

土木学会西部支部沖縄会

第 6 回 技術研究発表会

琉球大学 研究者交流会館・50 周年記念館

2017 年 1 月 17 日

発表プログラム・概要集



土木学会西部支部沖縄会

会場案内



琉球大学西原口を入り、構内の信号を左に曲がり、左手すぐ。

○ 土木学会継続教育（CPD）認定プログラム

発表プログラム

2017年1月17日

Time Table

Start	End	プログラム	
9 : 00	9 : 30	受 付・発表データインストール・CPD登録受付	
9 : 30	9 : 50	【 開会式 〈Room : A〉 】 開会の挨拶 : 宮城 理 (沖縄会会長・沖縄県土木建築部長) 実施要項の説明 : 津嘉山 司 (沖縄会幹事長・沖縄県技術・建設業課長)	
9 : 50	10 : 00	Break Time	
10 : 00	11 : 50	Session 1 〈Room : A〉 9編 (防災・環境関連) 座長 : 津嘉山 司 (沖縄県)	Session 2 〈Room : B〉 9編 (地盤・環境関連) 座長 : 富山 潤 (琉球大学)
12 : 00	13 : 00	Lunch Time	
13 : 00	14 : 50	Session 3 〈Room : A〉 8編 (振動・計測関連) 座長 : 田井 政行 (琉球大学)	Session 4 〈Room : B〉 9編 (腐食・維持管理関連) 座長 : 須田 裕哉 (琉球大学)
14 : 50	15 : 00	Break Time	
15 : 00	17 : 00	Session 5 〈Room : A〉 10編 (整備・交通関連) 座長:神田忠士(沖縄総合事務局)	Session 6 〈Room : B〉 10編 (防食・材料関連) 座長:玉城喜章(沖縄しまたて協会)
17 : 00	17 : 15	Break Time (優秀発表者賞 審査委員会)	
17 : 15	17 : 30	【 閉会式 〈Room : A〉 】 優秀発表者賞の表彰 : 神田 忠士 (沖縄総合事務局 企画調整官) 閉会の挨拶 : 矢吹 哲哉 (沖縄会副会長:琉球大学名誉教授)	

Presentation Schedule

Titles and Authors

○発表時間：9分、質疑応答：3分

○概要集：2頁～6頁（原則、偶数頁）

○注意事項

- ・発表者は、各発表セッション開始前に発表パワーポイントを会場パソコンにインストールし、動作状態を確認すること。
- ・発表者および聴講者は、土木学会西部支部沖縄会の会員登録をしてください。なお、土木学会正会員または学生は登録の必要はありません。

Time	Room A	
10:00 ┃ 11:50	Session1：防災・環境関連	座長：津嘉山 司（沖縄県）
	1. 防災情報源に着目した避難促進要因に関する考察 _____	10
	琉球大学大学院 三橋 洸道 琉球大学 神谷 大介，長崎大学 吉田 護，琉球大学大学院 峰 翔太，熊本大学 柿本 竜治，山口大学 赤松 良久	
	2. 地区毎に危険度評価を用いた相対的な災害応力に関する研究 _____	14
	琉球大学 金城 太一，神谷 大介	
	3. マルチエージェントを用いた津波避難シミュレーション分析 _____	20
	琉球大学 森 雅章，神谷 大介，松本 卓郎	
	4. 琉球諸島の地盤振動特性に関する研究 _____	26
	琉球大学 岩下 智，藍檀 オメル，富山 潤，須田 裕哉，地殻工学防災研究所 渡嘉敷 直彦	
	5. 長大斜面における落石シミュレーション及び法面対策手法について ～国道331号災害復旧工事（平成27年 災3号）～ _____	28
11:50	沖縄県北部土木事務所 玉盛 寛己，仲尾次 慶	
	6. 反応拡散系理論に基づいた3次元 Sinkhole 形成シミュレータの開発 _____	36
	琉球大学 川上 凌梧，松原 仁	
	7. 地下水流れを考慮した Sinkhole の形成シミュレーション _____	38
	琉球大学 天野 量稀，松原 仁	
	8. 再生水利用下水道事業に関する取組みについて _____	40
	沖縄県下水道管理事務所 金城 奈美	
	9. 太陽光発電設備の補償について _____	46
	沖縄総合事務局南部国道事務局 金城 康太	
	Room B	
11:50	Session2：地盤・環境関連	座長：富山 潤（琉球大学）
	1. 乾燥－湿潤繰り返し作用を受けるベントナイトと高炉スラグの亀裂パターンに関する研究 _____	52
	琉球大学 平山 雄一，琉球大学大学院 広瀬 孝三郎，琉球大学 松原 仁	
	2. 共役勾配法による地盤沈下シミュレータの高速化 _____	54
	琉球大学 大野 喬，松原 仁	
	3. 圧密時間が圧密特性値におよぼす影響に関する実験的研究 _____	56
	琉球大学大学院 山路 伸悟，琉球大学 羽間 翔一，原 久夫	
	4. 第四期琉球層群の不整合面における特徴的な浸食形態 _____	62
	琉球大学 崎山 浩考，琉球大学大学院 広瀬 孝三郎，琉球大学 松原 仁	
	5. 玄武岩質枕状溶岩に残された微細構造の数値モデリング _____	64
11:50	琉球大学 宮城 圭汰，松原 仁	
	6. 八重山層群に見られる剥離状風化と微生物活動の関連性 _____	66
	琉球大学大学院 岩崎 竜馬，琉球大学大学院 廣瀬 孝三郎，琉球大学 松原 仁	
	7. 石灰岩のマルチフィジックス生成作用に関する一考察 _____	68
	琉球大学 大城 勇人，琉球大学大学院 廣瀬 孝三郎，琉球大学 松原 仁	
11:50	8. 琉球石灰岩の化学的風化に伴う残柱強度に関する実験的研究 _____	70
	琉球大学 土肥 翔，琉球大学大学院 廣瀬 孝三郎，琉球大学 松原 仁	
11:50	9. 乾燥－湿潤繰り返しプロセスがMudcrackおよびMudblockに与える影響 _____	72
	琉球大学大学院 広瀬 孝三郎，琉球大学 松原 仁	

Time	Room A
13:00 └ 14:50	Session3：振動・計測関連 座長：田井 政行（琉球大学） 1. 岩盤不連続面及び施工ジョイントの動的せん断特性に関する実験的研究 _____ 78 琉球大学 安川 完祐, 藍檀 オメル, 富山 潤, 須田 裕哉 2. 地震断層のスティック・スリップ挙動に関する実験的研究 _____ 80 琉球大学 上之郷 唯奈, 藍檀 オメル, 富山 潤, 須田 裕哉, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷 直彦, 中電技術コンサルタント 岩田 直樹 3. 振動特性を利用した構造物の健全評価手法の構築 _____ 82 琉球大学 宮里 政國, 琉球大学大学院 吉次 優祐, 琉球大学 藍檀 オメル, 富山 潤, 須田 裕哉 4. 各種公共交通機関の振動特性に関する基礎研究 _____ 84 琉球大学 津田 浩希, 藍檀 オメル, 富山 潤, 須田 裕哉 5. 沖縄本島における石積文化財の保全に対する多重パラメータ動態観測システムの開発と適用 _____ 86 琉球大学 平良 ひかり, 藍檀 オメル, 富山 潤, 須田 裕哉, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷 直彦 6. 加速度応答を用いた変位応答モニタリングに関する検討 _____ 88 (株)ITES 梅川 雄太郎, 菅沼 久忠, 岐阜大学 木下 幸治, 小野 友暉 7. 道路橋照明柱の疲労特性に関する研究 _____ 90 琉球大学 浅田 智巳, 下里 哲弘, 田井 政行, 有住 康則 8. 具志川環状線の基礎工事近接地下墓に及ぼす影響に関する研究 _____ 92 琉球大学 田中 秀和, 藍檀 オメル, 富山 潤, 須田 裕哉, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷 直彦
	Room B
	Session4：腐食・維持管理関連 座長：須田 裕哉（琉球大学） 1. 道路ストック総点検からみた道路附属物の損傷状況について _____ 96 (一財)沖縄県建設技術センター 伊波 紀彦 2. 鋼桁端部を対象としたCold Spray工法の防食皮膜特性に関する検討 _____ 102 琉球大学 神山 哲史, 加藤 祐介, 田井 政行, 下里 哲弘, 有住 康則 3. 摩擦面にコールドスプレー工法を施した高力ボルト継手のすべり耐力特性 _____ 104 琉球大学 澤田 知幸, 下里 哲弘, 田井 政行, 加藤 祐介 4. 当て板ボルトと炭素繊維補修による腐食鋼I桁端部のせん断耐荷力特性 _____ 106 琉球大学 高橋 鴻, 有住 康則, 下里 哲弘, 田井 政行, (一社)沖縄しまて協会 玉城 喜章 5. 腐食鋼桁端部に対する当て板ボルト工法のFEM解析モデルの提案 _____ 108 琉球大学 厚地 大樹, 下里 哲弘, 田井 政行, 有住 康則 6. 高力ボルト摩擦接合継手の連結板の腐食減肉が接触圧に及ぼす影響 _____ 110 琉球大学 大城 泰樹, 下里 哲弘, 田井 政行, 山下 修平 7. 腐食凹凸面に対する当て板ボルト工法のすべり耐荷力特性に関する実験的研究 _____ 112 琉球大学 日高 拓朱, 下里 哲弘, 田井 政行, 長坂 康史, 有住 康則 8. モノレールの軌道精度確保について _____ 114 沖縄県都市モノレール建設事務所 島袋 祐一 9. 那覇空港滑走路増設事業における施工期間短縮への取り組みについて _____ 118 ～平成31年12月の工事完成を目指して～ 沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所 飯塚 幸司, 荒木 幸宏

Time	Room A	
15:00 └ 17:00	Session5：整備・交通関連 座長：神田 忠士（沖縄総合事務局）	
	1. 海洋博公園における設備整備事例とその効果 _____ 126 沖縄総合事務局国営沖縄記念公園事務所 石垣 太士，伊良部 哲	
	2. 沖縄県のMICE施設の現状と今後について 沖縄県文化観光スポーツ部 安座間 猛 _____ 130	
	3. 地方農村部での高齢ドライバーの交通行動に関する調査研究 _____ 138 北海学園大学 堂柿 栄輔，足利市 松山 将之，足利工業大学 藤島 博英，築瀬 範彦	
	4. 周遊観光行動の調査方法に関する基礎的考察 _____ 142 琉球大学 田中 謙大，神谷 大介，松本 拓郎，東京工業大学 福田 大輔，中西 航，小林 巴奈，都留 崇弘，地域未来研究所 菅 芳樹	
	5. 観光シーズンにおける交通集中の分散化に関する取り組みについて _____ 146 沖縄総合事務局北部国道事務所 濱川 昌丈，松川 剛	
	6. 那覇空港滑走路増設事業におけるサンゴの保全について _____ 152 沖縄総合事務局開発建設部 上地 杏奈	
	7. 海上保安庁係留栈橋の整備について 沖縄総合事務局石垣港湾事務所 瀬間 基広，大村 誠 — 156	
	8. 那覇空港滑走路増設における車載式レーザースキャナ測量を使用した埋立沈下管理手法について—160 沖縄総合事務局新滑走路整備推進室 田中 貴之，前里 尚	
	9. 小浜港航路における大型サンゴの人力作業による移設(竹富南航路関連事業) _____ 164 沖縄県八重山土木事務所 新城 博史	
	10. 各種金属中・鉄塔の非破壊健全性評価に関する基礎研究 _____ 172 琉球大学 盛田 樹里，藍檀 オメル，富山 潤，須田 裕哉	
	Room B	
	Session6：防食・材料関連 座長：玉城 喜章（沖縄しまたて協会）	
	1. 鋼材さび面に対するCold Spray工法の防食性能評価に関する電気化学的検討 _____ 176 琉球大学 島 孝仁，加藤 祐介，田井 政行，下里 哲弘，有住 康則	
	2. Cold Spray 工法における高力ボルト角部の皮膜特性に関する研究 _____ 178 琉球大学 吉代 大師，加藤 祐介，田井 政行，下里 哲弘，有住 康則	
	3. 濡れ-紫外線サイクル促進による鋼橋塗装の劣化特性に関する研究 _____ 180 琉球大学 池田 信人，加藤 祐介，田井 政行，下里 哲弘，有住 康則	
	4. 鋼とコンクリート境界部のマクロセル腐食に対するコンクリート中の塩分量の影響 _____ 182 琉球大学 賀数 淳人，加藤 祐介，田井 政行，下里 哲弘，有住 康則	
	5. 異なる暴露環境で8年経過した無塗装仕様耐候性鋼材の保護性さび評価 _____ 184 琉球大学 米丸 慎人，加藤 祐介，田井 政行，下里 哲弘，有住 康則	
	6. 薄板モルタルを用いたコンクリート橋梁の付着塩分に関する基礎研究 _____ 186 琉球大学大学院 吉次 優祐，琉球大学 松田 愛子，富山 潤，藍檀 オメル，須田 裕哉	
	7. モルタル材料に対するシラン系含浸材およびフライアッシュの水分移動抑制効果に関する基礎研究 琉球大学 荒崎 聡子，富山 潤，須田 裕哉，藍檀 オメル _____ 190	
	8. モルタルプレートを用いたマクロ・メゾ塩害環境定量評価に関する基礎研究 _____ 192 琉球大学 松田 愛子，琉球大学大学院 吉次 優祐，琉球大学 富山潤，須田 裕哉，藍檀オメル	
	9. 実構造物に使用したコンクリート配合に対するアルカリシリカ反応促進膨張試験 _____ 194 琉球大学 佐古 翔輝，富山 潤，須田 裕哉，藍檀 オメル，琉球セメント(株) 比屋根 方新，神谷 和志，上里 尚也	
	10. 池間大橋橋梁補修補強工事における状況報告 沖縄県宮古土木事務所 田中 文也 _____ 196	

発 表 概 要 集

Session 1 : 防災・環境関連

防災情報源に着目した避難促進要因に関する考察

○土木学会学生会員琉球大学大学院三橋洸道・正会員琉球大学神谷大介・正会員
長崎大学吉田護・学生会員琉球大学大学院峰翔太・正会員熊本大学柿本竜治・
正会員山口大学赤松良久

1. はじめに

2014年広島豪雨や2015年の関東・東北豪雨のような、近年人的被害を伴う甚大な水害が多発している。これらを引き起こす短時間豪雨や局地的豪雨は今後も増加することが示唆されており¹⁾、豪雨災害対策は我が国の喫緊の課題である。これに対し、国は『大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～答申』²⁾を出している。この答申では、市町村長による避難勧告等の適切な発令の促進、住民等の主体的な避難の促進等を掲げている。また、水防災意識社会再構築ビジョンでは、これまでのソフト対策を行政目線から、住民目線へと転換し、利用者のニーズを踏まえた実践的なソフト対策への転換を謳っている。つまり、住民は積極的に自らの命を守るための行動をとり、行政はそれを支援するために災害情報等を提供する必要があることが再提示されたということである。

災害の度に指摘される事項として、避難勧告発令の有無および避難率の問題がある。豪雨災害による人的被害軽減のために避難は有効な手段であり、それを促すものが避難勧告等の防災行政情報である。しかし、広域に発令される避難勧告に対し、避難率が低いことが災害の度に指摘されている。きめ細かな防災情報を期待する住民、豪雨の局地化に対し合併による基礎自治体の広域化、財政基盤強化のための職員減少によりきめ細かな防災行政対応が極めて困難な状況である。

このような、きめ細やかな防災行政対応が困難な現状で住民の自助・共助の重要性が高まっており、近所からの避難の呼びかけ等の情報伝達が有効であることが示されている⁴⁾。

以上のことより、本研究では、住民の避難行動意図形成に対し、多様な防災情報の効果を明らかにすることを目的とする。このため、太田川流域に位置する安芸太田町を対象とした質問紙調査を行い、特に避難勧告等の防災行政情報と近隣住民等の呼びかけ等に対する避難意思形成に関する分析を行う。

2. 行政情報の現状と情報源の多様化

近年の自然災害を受けて、政府は2014年11月に「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策推進に関する法律」を、2015年5月に水防法を改正した。これらは、災害の規模を想定最大まで拡大して情報を発表する内容である。このような法律の改正を受けて、内閣府は「避難勧告判断・伝達マニュアル作成ガイドライン」を2015年8月に改訂した。その中では、避難準備情報を十分活用すること、避難準備情報の発令段階から指定緊急避難所を開設すること、また災害種別の被害を考慮した発令単位・対象地域をあらかじめ検討することなどを推奨している。よって、市町村等の基礎自治体は、住民に対して災害の危険性が迫っていることを早い段階から、またより地区を絞って発令するように努めなければならない。

しかし、災害の危険性を知らせる行政情報にも課題が多くある。特に、近年問題視されていることが避難勧告発令の遅れである。2015年9月に発生した鬼怒川水害でも避難勧告の遅れが指摘されている⁵⁾。避難勧告等の行政情報の発令は、災害対策基本法 60 条により、各自治体の長に裁量がゆだねられている。しかし、避難勧告等の空振りによるオオカミ少年効果や空振りを恐れて対応が遅れてしまう。これにより、行政情報への空間

的・タイミング的な信頼が低下してしまう。しかし、住民は避難勧告の空振りより見逃しを問題視することが分かっている⁶⁾。一方で、過度な行政への依存が避難行動の遅れにつながるという事例も存在している⁷⁾。このような行政からの防災情報の限界を受けて、政府は「地域における防災教育の実践に関する手引き」のような防災教育や地域防災リーダーの育成、過去の災害からの教訓を掲載した冊子を作成するなど地域での自助・共助意識を高めるために普及・啓発活動を行っている。よって、住民も避難勧告等の行政から発令される情報だけでなく、災害の危険性を伝える多様な情報に対して感度を高める必要がある。

3. 情報種別の避難意図の促進要因

1) 調査地域の概要

安芸太田町は人口 7255 人、高齢化率が 45.3%の広島市の北部に位置する町で、町内を一級河川である太田川が横断している。安芸太田町の場所を図-1 に示す。その太田川流域では、2005 年の台風第 14 号に伴う水害によって床上浸水が 4 棟、床下浸水が 31 棟、道路被害が 45 箇所、河川被害が 46 箇所の被害が出た⁸⁾。また、避難勧告で避難した人が 86 世帯 96 人、自主避難をした人が 472 世帯 1001 人であった。1988 年の豪雨災害に伴い発生した土砂災害では死者が 14 名、全壊家屋が 38 棟、半壊家屋が 20 棟、床上浸水が 50 棟、床上



図-1 太田川本流図

浸水が 270 棟と甚大な被害が出た⁹⁾。このように、対象地域は災害の頻度が高い地域である。

2) 質問紙調査の概要

調査範囲は水害を対象とするため、太田川本流両岸500m圏内に居住する安芸太田町民とした。調査方法は、基本的に訪問配布、郵便回収で行った。質問紙を1205部配布して573枚回収し、回収率は約47.5%と比較的高い回収率であった。調査項目は、性別、年齢等の個人属性や被災経験、参加している地域活動、近隣住民との付き合い、災害に対する備えの実施状況、情報別の避難意図などである。質問紙調査の個人属性の概要を表-1に示す。

表-1 質問紙調査の個人属性(N=573)

個人属性	平均	標準偏差
年齢	68.4	13.1
居住年数	41.4	27.6
家族人数	2.5	1.5

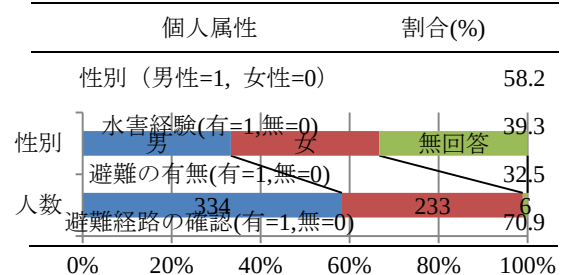


図-2 回答者の性別

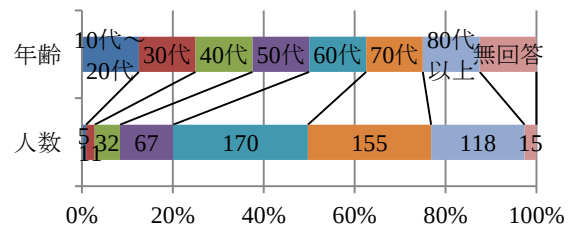


図-3 回答者の年齢

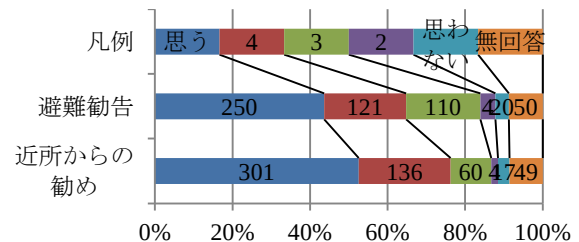


図-4 避難意思を決定する情報の単純集計

3) 基礎集計の結果と考察

回答者の性別と年齢をそれぞれ図-2, 3に示す。図-3より、回答者の半数以上が高齢者である。なお、2010年の国勢調査において町の高齢化率が45.3%であった。また、水害経験のある回答者が約40%、避難経験のある回答者が約32%、避難経路や避難所を日ごろから確認している回答者が約70%であった。次に、避難意思を決定する情報の単純集計を図-4に示す。これより「近所からの勧め」で回答者全体の約52.5%が避難意思を持つことが分かる。「避難勧告が発令された時」の場合は約43.6%であった。このように単一の情報で避難する回答者は多くないことが分かる。

4. 情報種別の避難意図の促進要因

次に「避難勧告」と「近所の勧め」でのクロス集計を行う。具体的には、「避難勧告と近所からの勧めのどちらでも避難する」、「避難勧告のみ避難する」、「近所からの勧めのみ避難する」、「どちらにも反応しない」の4つのタイプに分けた。この時、「思う」を選択した回答のみ避難するとした。これを表-2に示す。これより、避難勧告で避難しない回答者の269人のうち約39.4%に該当する106人が「近所からの勧め」ならば避難することが分かる。このように、避難勧告で避難しない人でも情報源の異なる避難情報ならば避難することが分かる。このうち、58人が「避難勧告」で106人が「近所からの勧め」で避難すると回答している。一方で、どちらの情報でも避難しない

表-2 避難勧告と近所からの勧めのクロス集計

		近所からの勧め	
		避難する	避難しない
避難勧告	避難する	186 (タイプ1)	58 (タイプ2)
	避難しない	106 (タイプ3)	163 (タイプ4)

人は全回答者の約28.4%に当たる163人であった。4つに分けたタイプと年齢とのクロス集計の結果を図-5に示す。これより、高齢者はタイプ1、2の割合が多く、40代以下にタイプ3の割合が多いことがわかる。また4つのタイプと「行政情報への信頼」及び「地域協力について」とのクロス集計を図-6, 7に示す。これらより、タイプ1の回答者は地域協力への意思が強く、行政の発する情報を信頼していることが分かる。一方で、タイプ3の回答者は比較的若い回答者が多く、タイプ1や2に比べて行政情報を信頼していないことが

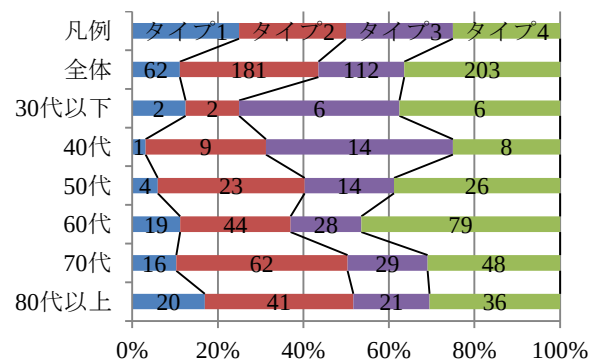


図-5 避難勧告と年齢のクロス集計

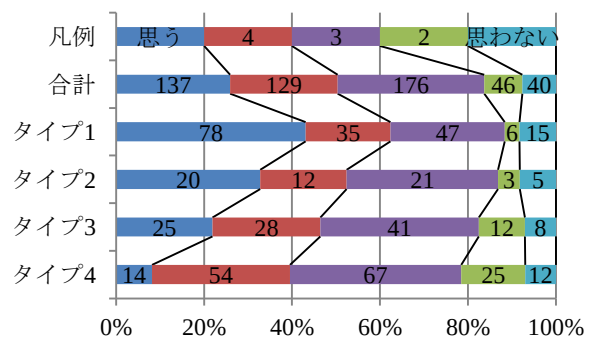


図-6 4つのタイプと行政情報への信頼のクロス集計

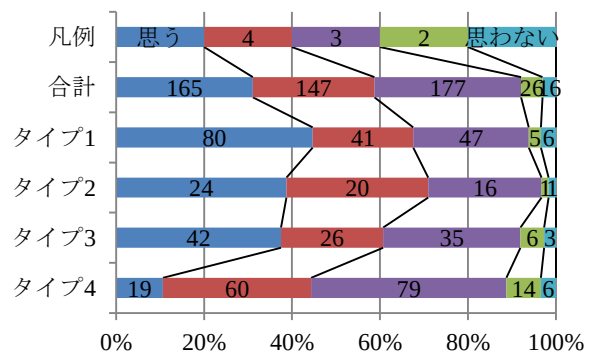


図-7 4つのタイプと地域協力意思のクロス集計

分かる。また、どちらの情報にも反応しない回答者は行政情報を信頼していなく、地域協力の意思も低いことが分かる。このように、避難意思を決定する情報の種類のよって認識構造に異なりがあると言える。

5. おわりに

本研究では安芸太田町を対象に単純集計とクロス集計を用いて、避難意思を決定させる情報によって避難意図を形成する要因が異なることを明らかにした。その結果、行政情報を避難意思決定の情報にする回答者は行政情報を信頼していることが分かった。また、地域協力の意思が高いと避難意思が促進されることが分かった。しかし、どちらにも反応しない回答者は行政への信頼や地域協力意思が低いことが分かる。よって、避難意思を促進するためにはきめ細やかな行政対応や地域全体での防災に対する意識の向上を促す社会的仕組みを整備する必要がある。

謝辞：本研究では国土交通省 河川砂防技術開発

(流域計画・流域管理課題分野「行政と住民間の連携を考慮した河川環境改善と水害リスク軽減に関する研究」代表：神谷大介)の補助を受けている。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁：気候変動レポート，2014.
- 2) 社会資本整備審議会：大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～，2015.
- 3) 神谷大介，當間優樹，赤松良久，富山潤：近地と遠地の津波警報発表時における住民の避難行動に関する分析，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.68，No.2，I_138-I_143，2012.
- 4) 記録的な豪雨，改修予定の堤防襲う 鬼怒川決壊.朝日新聞.2015-09-11.朝日新聞デジタル，<http://www.asahi.com/articles/ASH9B5JTLH9BUTIL034.html> (参照 2016-7-15)
- 5) 奥村誠，塚井誠人，下荒磯司：避難勧告の信頼度と避難行動，土木計画研究・論文集，Vol18 No.2，pp311-pp316，2001
- 6) 片田研究室(<http://dsel.ce.gunma-u.ac.jp/>)：平成16年7月新潟豪雨災害に関する実態調査報告書，2004年
- 7) 国土交通省 中国地方整備局 太田川河川事務所：平成17年度9月台風第14号出水資料，P.16
- 8) 広島県土木建築部：昭和63年7月20日～21日県北部豪雨災害(速報版)，P4，1988年

2. 対象地域における事前危険度評価

対象地域、安芸太田町において事前危険度評価を行う。ここでの事前危険度評価は対象地域において相対的に災害に対し危険な地区の抽出を目的とする。ここでの地区は、水害を考慮するため太田川から 500m 圏域内とする。

2.1 地区毎の危険度評価

避難行動は現在の地区内で終わることが望ましいとして、初めに地区毎の危険度評価を行う。評価の手順を以下に示す。

手順①：ハザード内の家屋の有無

家屋がハザード想定区域内に含まれていれば避難が必要であるという認識から、ハザード内の家屋数で危険度を示す。ここではハザード内の家屋数に字毎の平均世帯人員⁴⁾を掛けた避難想定人数を算出する。1 家屋に 1 世帯と仮定しているが集合住宅に関しては部屋数を考慮している。

手順②：安全な避難所の有無

手順①で危険と判断できる地区において行

う。避難所の危険度は建物属性と想定されるハザードを踏まえて評価を行う。安全な避難所とはハザード外に存在していることを指す、ハザード外に無ければ以下表-1 の 2 つの条件を満たしている避難所を比較的安全な避難所とする。

手順③：安全な避難が行なえるか

安全な避難所までの最短距離とそこから算出される避難時間を指標とする。

2.1.1 手順①を踏まえた危険度評価

対象地区内の住宅数と平均世帯人員、そこから導き出される想定避難人数を表-2 に示す。20 地区中 18 地区が災害時に避難を行う必要があることが分かる。

2.1.2 手順②を踏まえた危険度評価

地区ごとに評価を行い、避難所の安全性について表-3 に示す。18 地区中 8 地区がハザード想定区域内にしか避難所が無い、その内 6 地区においては安全に機能する避難所が無いことが分かる。

表-1 安全な避難所の定義

想定されるハザード	該当する避難所
浸水想定	想定される新推進と避難所の階数を考慮する
土砂警戒	RC2階建て以上

表-2 各地区の想定避難人数

		平均世帯人員	500m圏域内世帯数			想定避難人数			
			土砂＋浸水	土砂	浸水	土砂＋浸水	土砂	浸水	計
加計	右岸	2.29	25	167	41	57	382	94	534
	左岸	2.29	19	85	8	44	195	18	256
下殿河内		2.14	56	42	18	120	90	39	248
下筒賀	上流	2.16	35	24	12	76	52	26	153
	下流	2.16	8	21	1	17	45	2	65
穴	右岸	2.21	0	0	57	0	0	126	126
	左岸	2.21	0	0	35	0	0	77	77
津浪		2.45	0	0	26	0	0	64	64
坪野		2.14	0	0	65	0	0	139	139
中筒賀	上流	2.38	3	11	20	7	26	48	81
	下流	2.38	19	23	4	45	55	10	109
遊谷		2.1	16	33	6	34	69	13	116
吉和郷	右岸	1.93	0	23	0	0	44	0	44
	左岸	1.93	0	8	0	0	15	0	15
戸河内		2.46	8	11	54	20	27	133	180
土居		2.65	11	46	18	29	122	48	199
田吹		2.3	0	13	0	0	30	0	30
上殿		2.54	3	179	19	8	455	48	511
打梨		0	0	0	0	0	0	0	0
那須		1.46	0	0	0	0	0	0	0

表-3 各地区の避難所数

		避難所数	想定ハザード区域外避難所数	安全な避難所数
加計	右岸	16	6	4
	左岸	5	0	0
下殿河内		6	0	1
下筒賀	上流	5	0	0
	下流	2	0	0
穴	右岸	3	1	0
	左岸	1	0	0
津浪		7	7	0
坪野		5	1	0
中筒賀	上流	5	2	2
	下流	3	0	2
遊谷		1	1	0
吉和郷	右岸	1	1	0
	左岸	0	0	0
戸河内		11	5	0
土居		3	0	1
田吹		0	0	0
上殿		11	2	1

2.1.3 手順③を踏まえた危険度評価

最短経路問題から避難経路の策定及び避難時間の算出を行った。前述の安全な避難所を避難先とし避難経路を策定した。ノードを道路の結節点、家屋の入り口に発生させ、全家屋の避難経路を可能にした。算出方法はワーシャルフロイド法を用いている。アルゴリズムを以下に示す。なお、 L_{ij} はノードij間の距離、 n はノードの総数を表している。

- (1) $L_{ij}^{(0)} = L_{ij}, m = 1(i, j = 1, 2, \dots, n)$
- (2) $L_{ij}^{(m)} = \min(L_{ij}^{(m-1)}, L_{im}^{(m-1)} + L_{mj}^{(m-1)})$
- (3) $L_{ij}^{(m)} < 0$ のとき終了
- (4) $m = n$ ならば終了。 $m < n$ ならば (2) から $m=m+1$ として繰り返す

これらより算出した最短経路に、平均歩行速度 1.3 m/s を用いて、地区毎の避難時間を算出した。その中で最も長い時間を地区毎に求め、表-4 に示す。坪野地区が他地区と比べると突出して避難時間が長いことが分かる。また避難時間の分布を図-3 に示す。

表-4 各地区の避難時間

		最長避難距離 (m)	最遠避難時間(分)
加計	右岸	902	11.6
	左岸	2782	35.7
下殿河内	右岸	2685	34.4
	左岸	2413	30.9
津浪		6095	78.1
坪野	上流	1128	14.5
	下流	3078	39.5
遊谷		1069	13.7
吉和郷	右岸	2384	30.6
	左岸	934	12.0
戸河内		2036	26.1
土居		1675	21.5

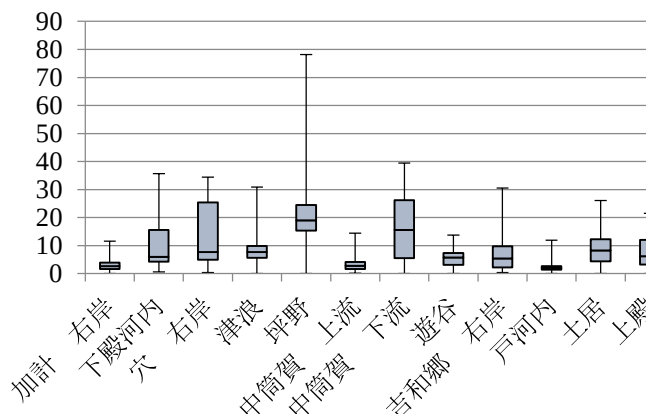


図-3 各地区の想定避難時間の分布

2.2 安芸太田町全体の危険度評価

次に地区間の避難を考慮するため、安芸太田町全体の危険度評価を行う。

現在、安芸太田町指定の避難所は、収容規模が大きい広域避難施設が 38 棟、集会所のような近隣の避難施設で、状況によって開設する地区避難施設が 108 棟、計 146 棟が指定されている。その内、対象地域に含められているのは 87 棟である。危険度評価の例、対象地域内の避難所と想定されるハザードとの組合せをそれぞれ図-3、図-4 に示す。

地区同士の位置関係と災害時の予想される状況を図-5 に示す。地区を繋ぐ線は道路を表しており、赤は土砂警戒区域、青は浸水想定区域に含まれていることを示す。災害時、各地区へ繋がる道路の多くが想定ハザードに含まれており、地区間の避難は困難であると予想できる。

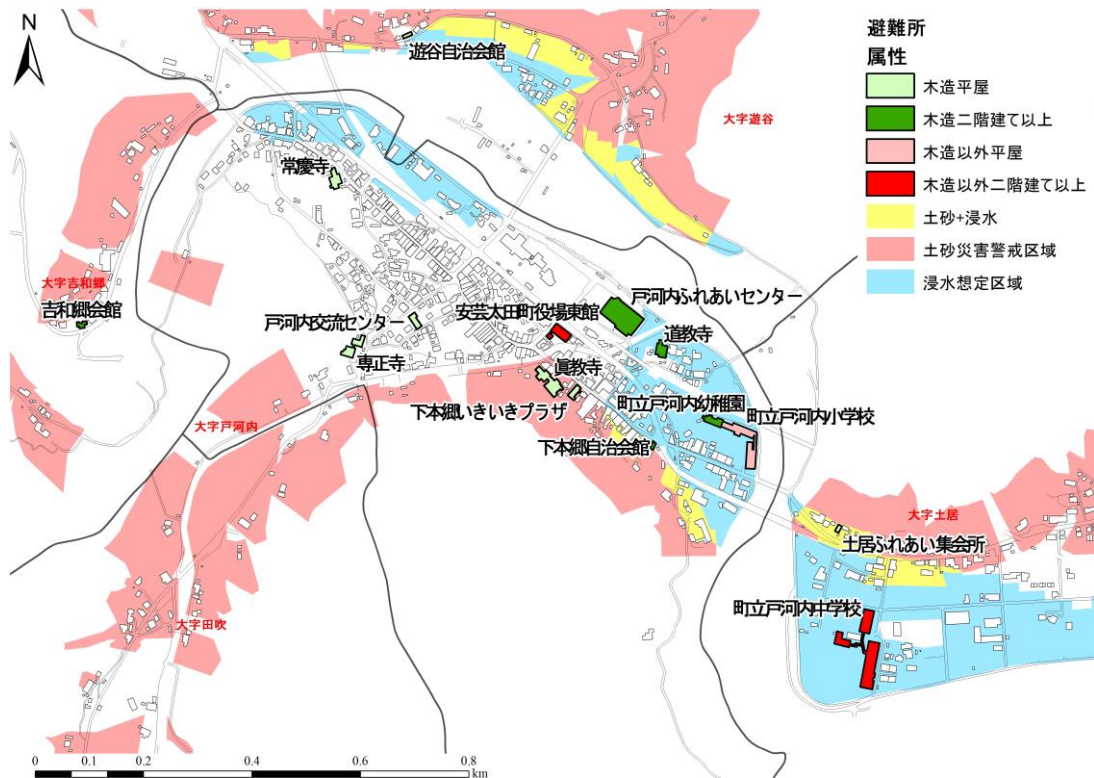


図-3 土砂・浸水被害想定（大字戸河内）

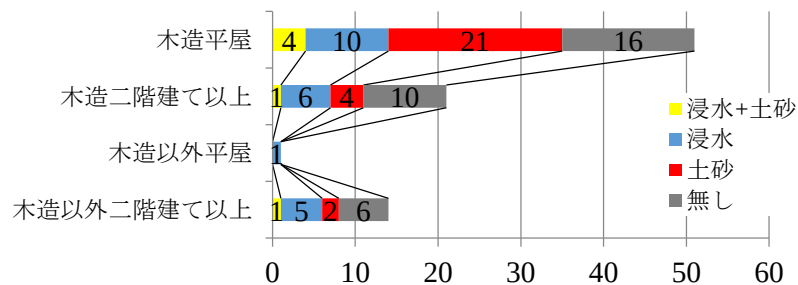
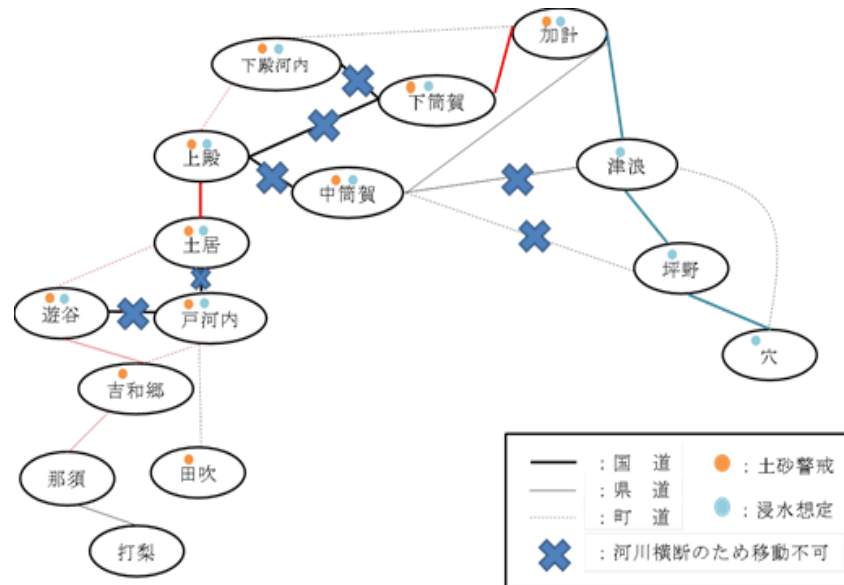


図-4 対象地域内避難所と想定ハザードの組合せ

図-5 災害時地区間位置関係



2. 3 人的要因による災害脆弱性評価について

前述のように、安芸太田町は高齢化の進んでいる地域である。加えて、安芸太田町の要介護・要支援認定者数は平成 25 年度末には 824 人高齢者数に対する比率は 25%となっている⁵⁾。各地区の避難想定人数中の高齢者数・要敬語者認定者数を表 - 5 にまとめる。ここでの高齢者は 65 歳以上とする。要介護者の支援に当たる事の出来る人数を表 - 6 にまとめる。表内の想定人口は 500m 圏域内のハザード内外、全ての家屋に平均世帯人員を掛けたものである。要介護者 1 人当たりの支援者数は想定人口中の生産人口と、避難想定人数中の要介護者認定者数を除いた結果である。下筒賀、田吹の両地区が他地区と比べ高齢者人口比が高いこと、要介護者 1 人当たりの支援者数が少ないことが分かる。このことより、上記 3 地区は

表-5 地区毎の高齢者・要介護認定者数まとめ

		高齢者人口 比(%)	避難想定人数 中の高齢者数	避難想定人数中の 要介護者認定者数
加計	右岸	42	224	56
	左岸		108	27
下殿河内		48	119	30
下筒賀	上流	63	97	24
	下流		41	10
穴	右岸	49	62	15
	左岸		38	9
津浪		42	27	7
坪野		48	67	17
中筒賀	上流	42	34	8
	下流		46	11
遊谷		48	55	14
吉和郷	右岸	41	18	5
	左岸		6	2
戸河内		40	72	18
土居		38	76	19
田吹		61	18	5
上殿		41	209	52

表-6 地区毎の生産人口・支援者数まとめ

		生産人口比 (%)	500m圏域 内想定人口	想定人口中の生産 人口数	要介護者1人当 たりの支援者数
加計	右岸	47	696	327	5.8
	左岸		270	127	4.7
下殿河内		43	261	112	3.8
下筒賀	上流	33	153	50	2.1
	下流		80	26	2.6
穴	右岸	48	181	87	5.6
	左岸		84	40	4.3
津浪		49	123	60	9.0
坪野		45	259	117	7.0
中筒賀	上流	48	95	46	5.4
	下流		109	52	4.6
遊谷		48	124	60	4.3
吉和郷	右岸	48	44	21	4.6
	左岸		15	7	4.5
戸河内		46	497	229	12.7
土居		48	244	117	6.2
田吹		34	30	10	2.2
上殿		52	556	289	5.5

2.3 評価結果を踏まえた対応策の検討

事前危険度評価のフローにを踏まえた結果、地区内の住民の避難が予想されるにも関わらず安全に機能する避難所が無い加計左岸側、下筒賀上流並びに下流側、穴左岸側、吉和郷左岸側、田吹地区は災害リスクが高いことが分かる。中でも要介護者等の要因を考慮した結果、下筒賀上・下流、田吹の3地区は他地区と比べ相対的に災害に対し脆弱な地区であると判断でき、住民の自助・共助の意識を高めるような対策が必要であると考えられる。

また安芸太田町全体として、避難所を指定する際、想定されるハザードを十分に考慮していないことが分かる。安全な避難所が無い地区では早めの避難により他地区への避難も視野に入れた検討が必要となることが明らかとなった。

3. おわりに

本稿では人的な災害対応力を考慮した総合的な災害対応力の評価を行うため、前段階として既往の物的対応力の評価を行った。そのような評価を行うことにより、災害に対し脆弱である地区を明らかにした。

今後は人的な災害対応力を踏まえた評価を行い、物的な災害対応力のみ評価した場合の結果との変化を評価する。

参考文献

- 1) 気象庁：気候変動レポート，2014
- 2) 社会資本整備審議会：大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～，2015
- 3) 総務省：過疎対策の現状と課題，2011
- 4) 総務省；平成22年国勢調査人口等基本集計，2010
- 5) 安芸太田町：第6期介護保険事業計画及び高齢者福祉計画，2015

謝辞：本研究では国土交通省 河川砂防技術開発（流域計画・流域管理課題分野「行政と住民間の連携を考慮した河川環境改善と水害リスク軽減に関する研究」代表：神谷大介）の補助を受けている。記して謝意を示す。

マルチエージェントを用いた津波避難シミュレーション分析

琉球大学 ○森雅章 神谷大介 松本卓郎

1. はじめに

2011 年の東日本大震災では、沿岸部に大規模な津波が押し寄せ、各地に甚大な被害をもたらした。この地震による死者・行方不明者は 1 万 9 千人を超え、津波による死者がその大半を占めているのが特徴である。

また、津波による人的被害の大きさが人々の避難行動によって大きく左右されることは繰り返し指摘¹⁾されており、今回の震災においても避難の遅れや不適切な避難行動によって犠牲になった人が多く、津波防災における防災意識の向上の重要性が浮き彫りとなっている。これらのことから、沿岸地域で津波避難対策の見直しが進められており、その一環として避難路や防災に対する関心が高まっている。

したがって、本研究で住民の意思決定や避難行動が津波避難成功率に与える影響についてシミュレーション分析を行う。なお、本研究の対象地域は沖縄県石垣市とする。



図 - 1 石垣市石垣港地域図

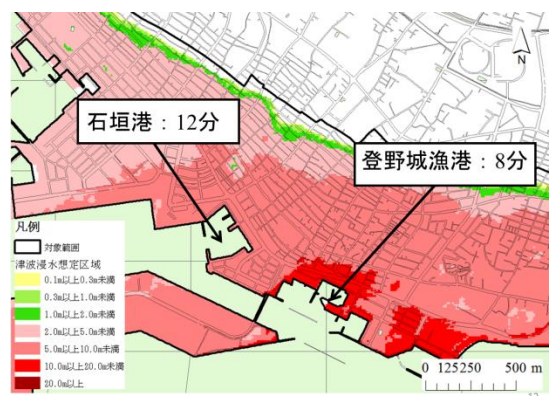


図 - 2 津波第一波到達時間

2. 研究対象地域概要

沖縄県の南西端にある石垣島は、総人口 49244 人（2016 年 11 月末現在）、世帯数 23573 戸である。今回の研究対象とした石垣市石垣港地域を図 - 1 の黒点線枠として示す。次に、研究対象地域における津波概要を表 - 1 に示す。対象地域の特徴として、図 - 2 および表 - 1 で示すように津波第一波到達時間が 10 分程度であることから、津波に対して危険な地域であると考えられる。

表 - 1 研究対象地域における津波概要

市町村名	1	2
	石垣港	登野城漁港
地点最大水位(m)	6.2	14.5
最大遡上高(m)	14.9	18
影響開始時間±20cm(分)	11	5
津波到達時間(分)	12	8
沿岸最大水位(m)	14.8	18.5

キーワード マルチエージェント シミュレーション 石垣市 津波避難

連絡先 〒 903-0123 西原町千原 1 番地 琉球大学理工学研究科
E-mail: e125316@eve.u-ryukyu.ac.jp

3. シミュレーションの概要

これまでのシミュレータ（swarm など）は、システムダイナミクスの手法を用いるのが主流であったが、本研究は研究手法として、マルチエージェントを使用する。マルチエージェントとは、複数のエージェント（人）から構成されるシステムであり、個々のエージェントの価値基準によって自分の行為を自由に選択できるような自立したエージェントが多数共存する環境をいう。

本研究では、地震発生時の避難行動において避難者をエージェントとして定義し、個人（性別、年齢）や家族などの属性に行動ルールをそれぞれ与えることで現実に近い避難行動を再現することとした。

1) エージェント数設定

対象地域の総人口をエージェント数とする。対象地域の総人口及び世帯数は 2010 年度の国勢調査²⁾より設定した。また、**地図**境界線で対象地域と対象地域外で区切られている字別対象区域内人口（字登野城、新栄町、字大川、字石垣、字新川）は区域内世帯数に対象字平均世帯人員を乗算することにより算出した。表 - 2 に字別対象区域内人口、世帯数、一世帯当り人員を示す。

表 - 2 字別対象区域内人口、世帯数

地区名	一般世帯数	各字人口	一世帯当り人員 (人/世帯)
浜崎町	451	944	2.093
美崎町	292	480	1.643
字登野城	796	1901	2.382
八島町	17	48	2.822
新栄町	168	413	2.456
字大川	583	1359	2.331
字石垣	498	1161	2.331
字新川	178	443	2.4881
総計	2983	6749	

2) エージェント初期配置設定

石垣地区の津波浸水範囲を 8 つに区分した字、総勢 6749 人、2983 世帯のエージェントを各字の境界点（ノード）に均等に配置する。

3) エージェントの行動設定

地域住民であるエージェントは避難場所を事前に正しく認知しているという条件下で、最短距離を移動する設定とした。また、最短距離のルート設定は 3 次元的な距離を算出しダイクストラ法による最短経路計算を行う。

4) 避難場所の設定

避難場所は石垣市が指定している避難場所³⁾および津波浸水範囲外を避難場所として設定する。津波浸水範囲外以外の避難場所の収容限界については、石垣市が発表している一時避難利用の収容人員数を用いる。避難場所の収容人数の容量を超えた場合にはエージェントは現在いる避難ビルから最も近い避難場所に移動を開始する。図 - 3 に避難場所位置、名称と収容人数を表 - 3 に示す。

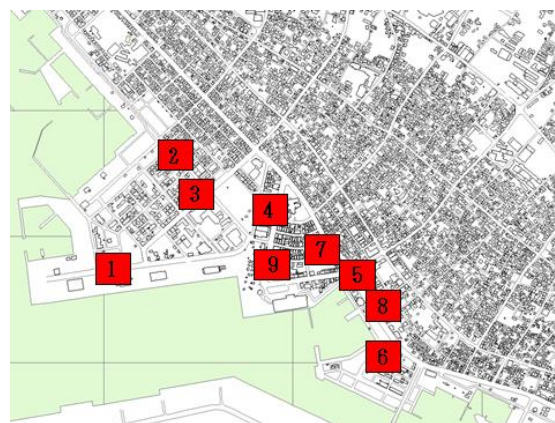


図 - 3 避難場所位置

表 - 3 避難場所一覧

番号	避難場所	収容人数
1	東横INN石垣島	270
2	ホテルルートイングランティア	850
3	蓬莱閣マンション	550
4	ホテルピースランド石垣島	500
5	ホテルハッピーホリデー石垣島	150
6	アパホテル石垣島	450
7	石垣島ホテルククル	250
8	ホテルグランビュー石垣	2200
9	南の美ら花ホテルミヤヒラ	2500

5) 避難開始時間の設定

エージェントの避難開始時間設定は、「津波避難ビル等に係るガイドライン、2005」⁴⁾より、地震発生2分後までに20%の地域住民が避難を開始し、津波警報が発令される3分後に50%、5分後に80%、シミュレーション終了時間である12分までに全てのエージェントが避難する設定とした。また、各字にすべて同じ配分で避難を開始する設定とした。また、夜間の場合には避難開始時間は昼間に比べてさらに時間がかかることも考慮する必要がある。

6) エージェントの歩行速度

エージェントの歩行速度は地域住民については年齢別で設定する。歩行速度については「津波避難対策推進マニュアル検討会報告書、2013」⁵⁾より昼間の歩行速度として、0-19歳を1.4m/s、20-64歳を1.4 m/s、65歳以上を1.1 m/sとする。また、家族などのグループの群衆歩行速度1.0 m/sとし、また、夜間においては歩行速度が80%程度に低下することから、同上の数字に0.8を乗算したものを夜間の歩行速度とする。今回においてはエージェントの混雑による速度低下は考慮していない。

7) シミュレーション終了時間設定

今回の研究に用いる津波想定時間は研究対象地域が石垣港付近を中心としているので、表-1の石垣港の数値を用いて、シミュレーションの終了時間を12分とする。なお、登野城漁

港については、津波到達時間が8分と非常に早く到達するため、今回の研究では用いないこととする。

4. 津波避難シミュレーション

1) ケース昼間の津波避難シミュレーション

3. シミュレーションの概要の条件の下、昼間の地震津波避難シミュレーションを行った。その結果を表-4と図-4に示す。また、ケース昼間のシミュレーション終了時の避難状況、シミュレーション上の点の説明を図-5、表-5に示す。

表 - 4 ケース昼間シミュレーション結果

番号	避難場所	収容人数
1	東横INN石垣島	270
2	ホテルルートイングランテ	554
3	蓬莱閣マンション	428
4	ホテルピースランド石垣島	326
5	ホテルハッピーホテル石垣	150
6	アパホテル石垣島	99
7	石垣島ホテルククル	250
8	ホテルグランビュー石垣	931
9	南の中ら花ホテルミヤヒラ	102
10	津波想定範囲外	2966
総計		6076

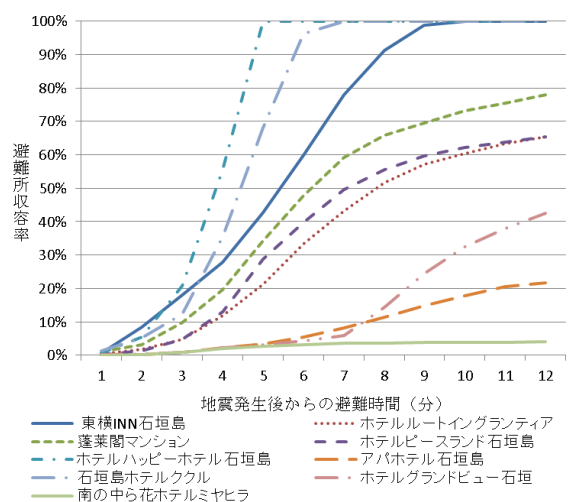


図 - 4 ケース昼間シミュレーション結果

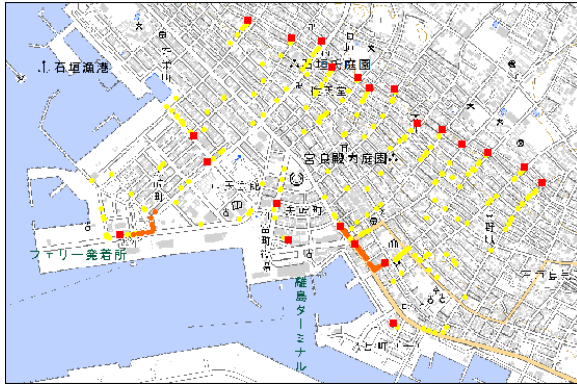


図 - 5 ケース昼間シミュレーション終了時

表 - 5 シミュレーション上の点の意味

色	点の意味
赤	避難場所
黄	避難者
オレンジ	再避難者(1回目の避難場所が満杯で避難完了できずに次に近い避難場所に避難している避難者)

2) ケース夜間の津波避難シミュレーション

夜間の場合には、歩行速度及び避難開始時間が遅れることを考慮してシミュレーションを行う。歩行速度は、昼間の歩行速度に 0.8 を乗算した数値を夜間時の歩行速度とする。避難開始時間については、「津波避難ビル等に係るガイドライン、2005」⁴⁾ より昼間には発災後 2～5 分後、深夜では 10 分後で避難開始するとして試算されているので、発生後 10 分に 80%、シミュレーション終了までに全エージェントが避難を開始する設定とした。その結果を表 - 5 及び図 - 5 に示す。また、ケース夜間のシミュレーション終了時の避難状況を図 - 7 に示す。シミュレーション上の点はケース昼間の表 - 5 と同様である。

表 - 6 ケース夜間シミュレーション結果

番号	避難場所	収容人数
1	東横INN石垣島	192
2	ホテルルートイングランテ	435
3	蓬莱閣マンション	306
4	ホテルピースランド石垣島	263
5	ホテルハッピーホテル石垣	150
6	アパホテル石垣島	63
7	石垣島ホテルクル	250
8	ホテルグランドビュー石垣	276
9	南の中ら花ホテルミヤヒラ	88
10	津波想定範囲外	2230
総計		4253

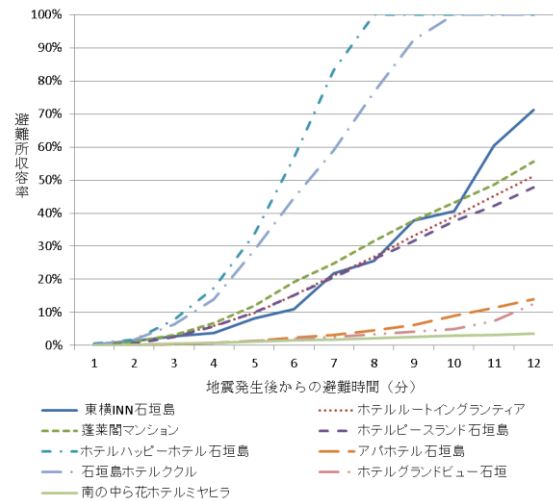


図 - 6 ケース夜間シミュレーション結果

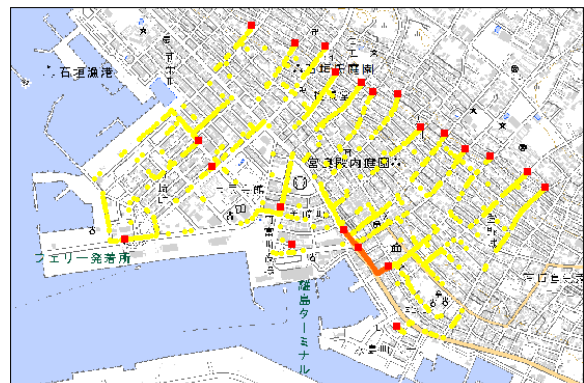


図 - 7 ケース夜間シミュレーション終了時

3) シミュレーションの結果考察

津波避難成功率の結果として、ケース昼間の津波避難成功率は 90.03%、ケース夜間の津波避難成功率が 63.02%であった。昼間及び夜間ともに 5. ホテルハッピー石垣島、7. 石垣島ホテルクルが昼間のケースだと図 - 4 から 5

分後と7分後に、夜間のケースの場合図-6から8分後と10分後に収容限界を迎えていることが分かる。収容限界を迎えている原因として収容人数が少ないことと、他の避難場所よりも内陸側に位置していることが考えられる。他にも、昼間のケースでは、5. ホテルハッピー石垣島、7. 石垣島ホテルククルが収容限界を迎えた2分後に、二つの避難ビルから最も近い避難ビルである8. ホテルグランドビュー石垣島の避難収容率が急増しているのが図-4から分かる。これは、5. ホテルハッピー石垣島、7. 石垣島ホテルククルに避難できなかった避難者が8. ホテルグランドビュー石垣島に殺到しているためだと考えられる。

また、5. ホテルハッピー石垣島、7. 石垣島ホテルククルのように収容限界を満たしている避難場所がある一方で、収容可能人数が多く、上記の二つの避難場所からも比較的近い、9. 南の美ら花ホテルミヤヒラには避難している人が少ないことが表-4から分かる。以上より、5. ホテルハッピー石垣島、7. 石垣島ホテルククルに避難している人を9. 南の美ら花ホテルミヤヒラに誘導する必要があると思われる。

最後に、昼間と夜間のケースの設定の違いは歩行速度及び避難開始時間の2点であるが、避難成功率に2割強の違いがある。これは、石垣市のように避難するための時間が12分と短い地域では、如何に早く避難を開始し避難場所に避難できるかが重要であるかが分かる。

5. まとめ

本研究では、石垣市石垣港地域を対象としてマルチエージェントを用いた津波避難シミュレーションを行い、ケースを昼間と夜間に区分し、歩行速度、避難開始時間の設定変更を行い、避難ビルの収容限界及び避難成功率の前後の変化を考察した。その結果得られた結論は以下の通りである。

1点目は、5. ホテルハッピー石垣島、7. 石垣島ホテルククルのように他の避難場所よりも内陸側に位置し、収容可能な人数が少ない避難場所は、すぐに満員になり避難できない人が多く発生することが分かった。また、その影響で避難場所に入れなかった人が次の避難場所に避難しようとして避難が間に合わないエージェント(図-5及び図-7のオレンジ色の点)が8. グランドニュー石垣付近では多くみられた。

2点目は、石垣市のように避難するための時間が短い地域ではケース夜間のように避難開始時間及び歩行速度が遅くなるようなケースでは避難成功率が著しく低下することが分かる。

1点目の問題の解決として、9. 南の美ら花ホテルミヤヒラに避難できる人はできる限り避難するように促すことで、避難できなかった人を減らすことができると考える。

また、今回の設定のように避難者が最も近い避難場所へ向かう設定では収容可能人数が少ない、5. ホテルハッピー石垣島、7. 石垣島ホテルククルであっても、多数の避難者が同じ避難場所へ向かうことになり、避難できないエージェントが発生する。他にも、起こりうる問題として、今回はシミュレーションに反映していない、混雑などによる渋滞および混乱などが発生することも考えられる。そのため、避難場所が3つ固まっておき渋滞や混乱が発生しやすいと思わる美崎町では、避難者が避難する避難場所やその際に向かうルートを分散することができれば、避難しきれなかった人の数を減少させることができると考える。それを実現させるためには、ワークショップや避難訓練を行い、避難者が避難場所や避難場所へ向かうルートを事前に決めておくことが重要になると考える。

今回は、地域住民のみを考慮したシミュレー

ションであったが、石垣市は観光地であるため、研究対象地域にあるユーグレナモールなどの観光地及び、離島への玄関口である離島桟橋には観光客が多く存在すると考えられる。そのため、実際に地震が発生した際には津波浸水範囲内にいる観光客はどこに避難すれば良いのかわからない人がほとんどであるので、地域住民が声を掛けて一緒に避難するなどの対策が必要である。

今後の課題として、地域住民だけでなく観光客を含めた津波避難シミュレーションを行い、地域住民及び観光客の避難行動が津波避難成功率にどのような影響を与えるかを考える必要がある。

参考文献

- 1) 広瀬弘忠：人はなぜ逃げ遅れるのか―災害の心理―、集英社、2004.
- 2) 平成 22 年度国勢調査石垣、総務省統計局、2010.
- 3) 石垣市避難所一覧、石垣市総務部防災危機管理室、2014.
- 4) 津波避難ビル等に係るガイドライン：内閣府政策統括官（防災担当）、2005.
- 5) 津波対策推進マニュアル検討委員会：津波対策マニュアル検討報告書、pp23 - 25、2013.
- 6) 沖縄県津波被害想定調査、沖縄県土木建築部海岸防災課、2014.

琉球諸島の地盤振動特性に関する研究

琉球大学 ○岩下智, 藍檀オメル, 富山潤, 須田裕哉, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷直彦

1. はじめに

沖縄県の地震の発生確率は、日本の他の県に比べると小さいと言われている。しかし、実際はそうではない。地震が少ないと言われているのは、他の県と比べて過去の地震の情報が大変限られているからである。琉球諸島において最も古い地震は 1667 年であり、その前の地震についての情報が存在していない。

琉球列島は、北西側に沖縄トラフ、南東側に琉球海溝が位置し、約 1100 km の広がりをもつ弧上列島である。さらに琉球諸島の南東側には、フィリピン海プレートの潜り込み口が存在し、一方大陸側には沖縄トラフと呼ばれる谷状の海底地形が存在しており、周辺で断層運動も確認されている。図 1 は琉球列島に沿って発生している地震の分布を示している。

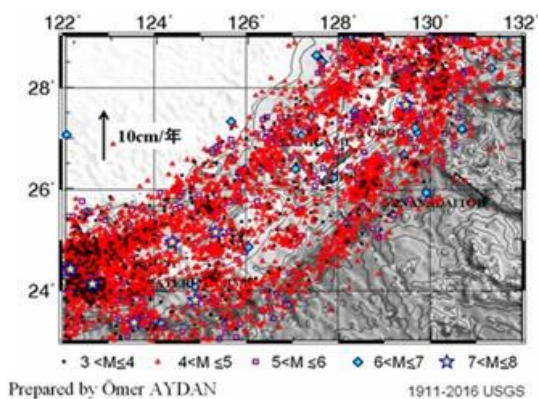


図 1 琉球列島における 100 年間の地震活動

この図からも分かるように、決して沖縄県の地震の発生確率は小さいとは言えない。近年では、地震の発生確率が小さいと言われていた地域でも阪神大震災（1995 年）や熊本地震（2016 年）のように大きな被害をもたらした。

したがって、大きな地震にも対応できるよう琉球諸島の地盤振動特性の把握が求められる。

2. 研究の目的

地震の被害は、地盤構造と振動特性に密接に関係していることが分かっている。振動特性を把握することは、地震に耐えられる建物や構造物の建設など、引き起こされる地震災害の予防を計画する際に重要である。そこで、本研究では沖縄本島の地盤振動特性を定量的に把握することを目的とする。

3. 計測概要

本研究では、防災科学研究所の観測点である名護・国頭・具志川・那覇・知念の計 5 か所で図 2 の SPC-51 を用いて常時微動や加速度の測定を行った。また、測定したデータと 5 か所の過去の大きい地震のデータと気象庁から頂いたデータの比較・分析を行い、振動特性を把握した。気象庁のデータは国頭村奥・名護市宮里・名護市豊原・読谷村座喜味・読谷村波平・那覇空港・那覇市樋川・南城市玉城宇玉城・南城市前川の計 9 か所である。解析方法としては、フーリエスペクトル、H/V スペクトル、伝達マトリックス法である。



図 2 SPC-51

4. 測定結果

今回は、結果を一例だけ示すことにする。図 4, 5 は、2010 年 2 月 27 日 5 時 31 分に沖縄本島近海で起きた M7.2, 最大震度 5 弱の地震に関して、それぞれ名護市港および名護市宮里で観測されたデータをフーリエスペクトルと H/V スペクトルに変換したものである。

キーワード：地震、振動特性、フーリエスペクトル、H/V スペクトル、伝達マトリックス法

連絡先：〒903-0213 西原町千原番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail : e135307@eve.u-ryukyu.ac.jp

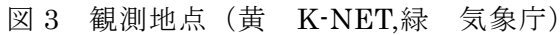
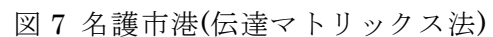
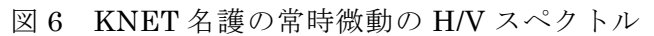
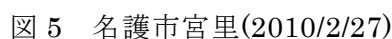


図 6 は名護 KNET 強震観測点における常時微動計測結果を示す. 4 つの記録の卓越周波数は 2.12 から 3.32Hz の間に変化していた.

図 4 名護市港(2010/2/27)



5. まとめ

謝辞：本研究を遂行する上で，沖縄気象台地震火山課より貴重なデータを提供頂いた．ここに記して感謝の意を表す．

1) 琉球諸島の巨大地震の可能性とその対策を考える <http://www.bosai.u-ryukyu.ac.jp/pg-topics/pdf>

長大斜面における落石シミュレーション及び法面对策手法について ～国道 331 号災害復旧工事（平成 27 年災 3 号）～

沖縄県北部土木事務所 道路整備班 主任技師 仲尾次 慶
○主任 玉盛 寛己

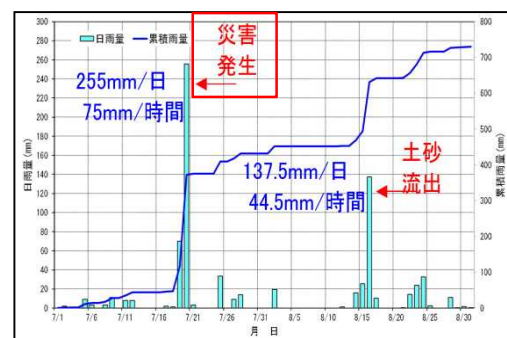
1 はじめに

平成 27 年 7 月の日当たり 255mm の豪雨により東村平良の国道 331 号沿いにおいて、高低差 100m を超える大規模な斜面崩壊が発生し、土砂が国道を越え海岸まで流出した。幸い死傷者は出なかったが、災害時避難や輸送ルートとして重要な国道 331 号を数ヶ月にわたり全面通行止めする事となり、利用者に多大な負担が生じた。

現在、応急復旧が完了し片側交互通行による交通解放を図っているものの、2m を超える転石（岩石群）が源頭部法面で確認され、落下した際に長大斜面直下にある国道に危険が生じる可能性が危惧された。その理由により、後述の対策工（落石防護柵）を実施し工事を進捗しているところであるが、本稿では本災害の事例を紹介しながら、長大斜面における落石シミュレーション及び法面对策工について報告する。



図－1 災害位置図



図－2 東村の日降雨量（沖縄気象台）



写真－1 全体写



写真－2 近景写

2 被災発生メカニズム

2.1 地理的特性

沖縄本島北部の東海岸域は、土壌が流れやすい・水が浸透しにくい等の特徴を有する国頭マージが広く分布しており、今回の被災箇所もその分布地域にあたる。

本災害は、表層土砂（国頭マージが主）が飽和状態になると共に斜面中腹沢部の洗掘

キーワード 法面对策、落石シミュレーション

連絡先 〒905-0015 名護市大南 1-13-11 北部合同庁舎 3 階 E-mail:tammorih@pref.okinawa.lg.jp

がきっかけとなり斜面全体のバランスが崩れ、大規模な崩壊が発生したと推定される。

2.2 被災地形特性

被災延長（滑り測線方向）140m 間に、3 箇所の変配の変化が見られる。それぞれ、源頭部（50m：最大傾斜角 45°）、流下部（60m：最大傾斜角 20°）、道路部（30m：最大傾斜角 55°）に区分し勾配に併せて対策を実施する。（図-4）

2.3 素因と誘因

素因：崩積土及び源頭部の強風化砂岩層の風化が著しく、土砂化が進行

：流下部下端がボトルネック形状となっているため、表面水・地下水の集中化

：本対策範囲外からの表面水の流入が多い

誘因：平成 27 年 7 月 20 日に生じた異常気象（255mm/日）（75mm/時間）

※平成 27 年 8 月 16 日の豪雨（137.5mm/日）により、国道に土砂災流出

3 対策工

対策工の検討にあたり、長大斜面の高低差や搬出土量（ $A=12,000 \text{ m}^3$ ）、地理的特性（下端直下に国道）を考慮し、施工中の土砂崩壊等の危険性が低くなる、逆巻き工法（図-5）で対策することとした。また、3 箇所の変配の変化に併せて、吹付法砕工や布製型枠工・鉄筋挿入工等で法面を復旧する工法とした。（図-4）

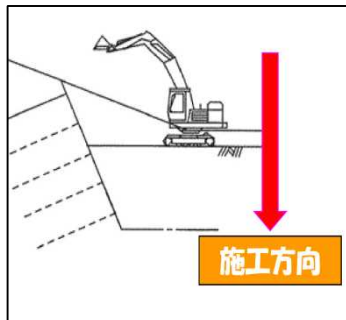


図-5 イメージ図

復旧の進捗状況		その他の動き
緊急対応	7月20日20時45分頃 ・土砂崩れにより通行止め ・崩壊土量 3,000 m ³ （うち、1,700 m ³ 程度が車道へ流出） ・迂回路は津波山雲道と慶佐次地区幹線農道使用（L=9km） ・NTT：沖電と現地点検を実施 ・全面通行止め区間を1kmに縮小 ・沖電により電線撤去作業開始 ・沖電作業終了後車道に流出した土砂撤去作業開始	災害発生 7月21日 停電世帯の解消 別ルートへの切替を21日に実施済み 電線の回復状況 北部土木事務所の土砂撤去作業完了後、仮柱に架線をを行う予定
	7月21日 11:00～	
	7月22日 6:00～	
	7月22日 9:00～	
	7月23日 9:00～	
応急復旧	7月25日～26日 台風接近の為、作業中断 土捨て場、重機等の再手配、準備が整い次第、撤去作業再開予定 午前より土砂撤去作業再開（31日完了予定） 土砂撤去完了 倒壊清障・路面清掃完了・応急対策工事契約 埋設物（国道事務所光ケーブル）調整 掘削機械搬入 鋼材搬入開始 大雨により土砂流出（少量） 土砂撤去完了。 台風15号来襲に伴う大雨により土砂流出（少量） 本格復旧 工事契約 測量業務・地質調査業務開始	8月3日 仮柱に架線作業継続中 8月5日 仮柱に架線作業完了
	7月27日	
	7月28日	
	8月1日	
	8月4日	
	8月7日	
	8月9日	
	8月11日	
	8月16日	
	8月20日	
本復旧	H28.3～	
	5月1日	

図-3 時系列状況

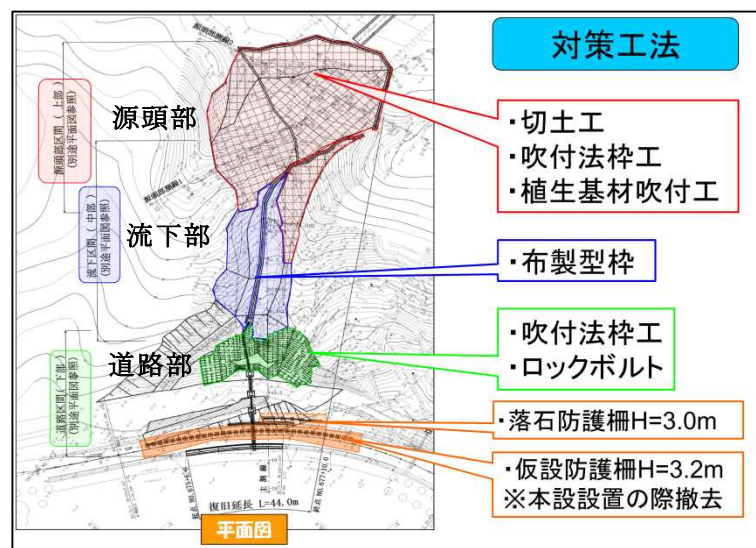


図-4 平面図及び対策工



写真-3 源頭部切土工・法砕工（平成 28 年 9 月時点）

4 長大法面における落石シミュレーション

4.1 現状及び素因

災害査定後の詳細な現地踏査及び降雨侵食に伴い、源頭部において複数のノジュール(固結した砂岩固:露頭岩)が数10箇所(図-6)確認された。また、露頭岩の中には3mを越える岩塊もあり、斜面より隆起、又は固定化・小崩落しているため、これらが自然落下した場合に法面直下にある国道へ到達する可能性が懸念され対策が急がれた。

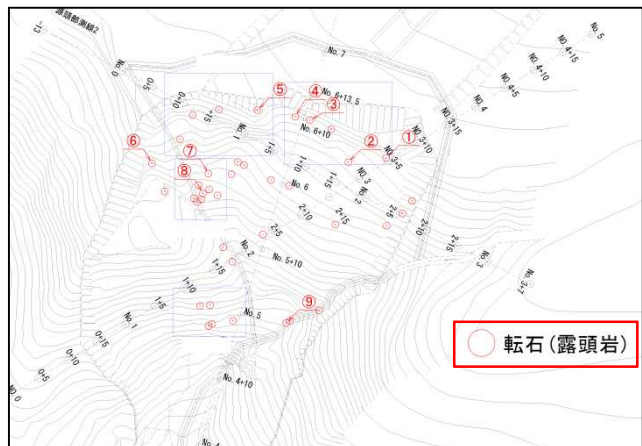


図-6 源頭部地内岩礫分布のプロット図



写真-4 落石抜粋①



写真-5 落石抜粋②



写真-6 落石抜粋③

4.2 落石シミュレーションの実施

落石対策便覧(※1)によれば、『落石』は様々な原因が考えられ、また、幾つかの原因が重なって生じることが多く、形態も落石が単独で生じる場合や土砂崩壊を伴う場合等複雑で、発生の位置・規模等も予測し難いのが現状である」と述べられている。本災害箇所の露頭岩に関する落石シミュレーションを行うにあたり、現地の状況に則して下記のとおり条件を設定した。

(1)シミュレーションの設定条件(図-8)

- ①試行条件：試行回数を50回/1箇所
- ②落石特性：現場の落石状況より推定・設定(原位置より自然落下)
- ③地盤特性：本災害と類似性が高い下呂実験「風化流紋岩」で設定(図-7)
- ④照査位置：施工性・経済性に留意し、既設落石防護柵等の対策工位置も含め設定
→【照査設定位置1：流下区間の下端付近(狭小区間で対策工が安易)】
→【照査設定位置2：国道上に現在設置している仮設防護柵地点(流下確認)】
- ⑤計算条件：落石径 $\phi 1\text{m}$ 及び $\phi 2\text{m}$ 、落石重量 $\gamma = 19\text{KN/m}^3$ 、等価摩擦係数 $\mu = 0.2$

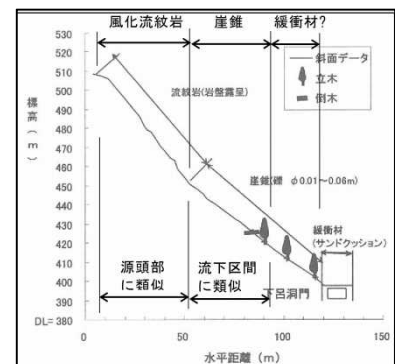


図-7 実験斜面の標準断面
【本災害類似モデル(下呂)】

注1. 高松実験(2種)、下呂実験(3種)の実験状況の異なる5つのタイプに対し再現性を有す組み合わせが示されている。今回、現地状況に近い下呂実験モデルを採用した。

注2. 下呂実験モデル【上方斜面で岩盤(流紋岩)が露頭、下部斜面で崖錐が分布しているモデル】

(2) 落石発生位置のパターン

落石発生位置のパターンは、施工中における発生位置の変化を再現するため『頭頂部より落石位置をそれぞれ 5m ピッチで下方へ移動』しながら、各落下発生位置でシミュレーションを実施する。

(3) その他

シミュレーションは任意の乱数を与え実施する。

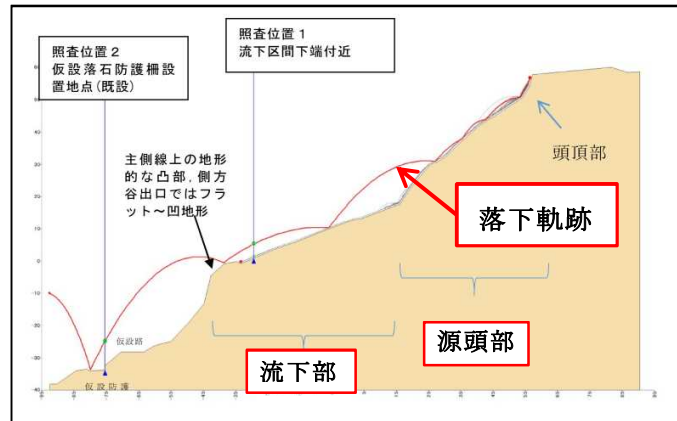


図-8 落石エネルギーと落石対策工種との適合

4.3 既存仮設防護柵（国道部）の効果検証

現在、国道部に仮設防護柵（H=3.2m）を設置している。シミュレーションでは、同位置で跳躍高 5m を超過する落石、最大エネルギー量 480kJ（簡易法では源頭部頂部からの落下：約 830kJ～道路脇崖頂部からの落下：320kJ）の落石が把握された。

既設仮設防護柵は斜面に残った崩積土の流出を防ぐことを目的としており、その防護可能エネルギーは 419kJ である。落石エネルギーがこれを超過するため、既設の仮設防護柵は落石に対して機能を果たさない。

4.4 対策箇所案

既存仮設防護柵（国道部）では新たに確認された落石に対する防護が十分得られないことから、逆巻き工法の施工性・安全性・施設対策・交通規制等の回避を考慮して、4.2(1)の照査設定位置 1 において対策案（新設する落石防護柵（高エネルギー吸収タイプ））を検討する。

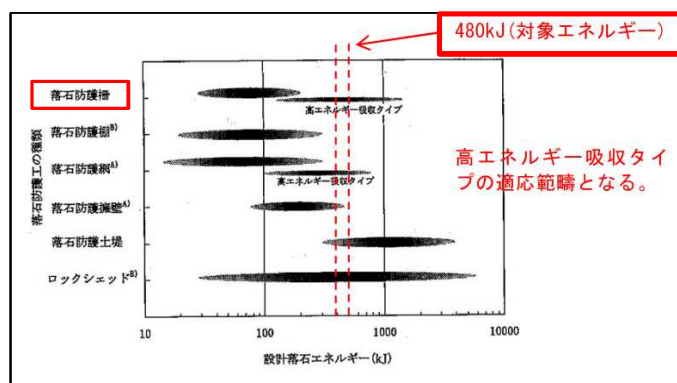


図-9 落石エネルギーと落石対策工種との適合図

また、落下した転石は勾配が緩やかな狭小部に集中することが予想されるため、機能が効果的に発現する照査設定位置 1 に設定した。

4.5 シミュレーション結果

下記に照査設定位置 1 及び 2 のシミュレーション結果を示す。

●照査設定位置 1（流下区間下端）について（図-8）

- ・飛び越えた落石は 1 回/50 回。最大値となる。
- ・その他は照査位置 1 まで到達、又は流下部の中腹部で停止した。

	跳躍高 H(m)	線測線 V(m/s)	線エネルギー E(kJ)	通過角度 ベータ(°)	水平方向 到達距離
最大値	4.498	22.290	471.986	26.979	149.023
平均値	0.55	1.80	3.28	20.95	89.67

図-10 照査位置 1 における資料

●照査設定位置 2（国道上仮設防護柵地点）について（図-8）

- ・到達した落石は 9 回/50 回。その中で防護柵を越え国道に至るものは 4 回/9 回
- ・跳躍高が 3.5m を越える落石の平均エネルギーは 204.6kJ である。

	跳躍高 H(m)	線測線 V(m/s)	線エネルギー E(kJ)	通過角度 ベータ(°)	水平方向 到達距離
最大値	8.976	25.910	637.764	60.956	149.023

図-11 照査位置 2 における資料

4.6 シミュレーション総括

4.2(2)より照査設定位置 1 及び 2 について、転石が落下・跳躍し国道まで達する可能性がシミュレーション結果により確認された。また、「源頭部～△E L 5m」範囲からの落石で、国道へ到達する可能性が高く、△E L 5m 以下についても、落石が照査設定位置 1 へ到達する可能性が高いため安全対策を実施する。

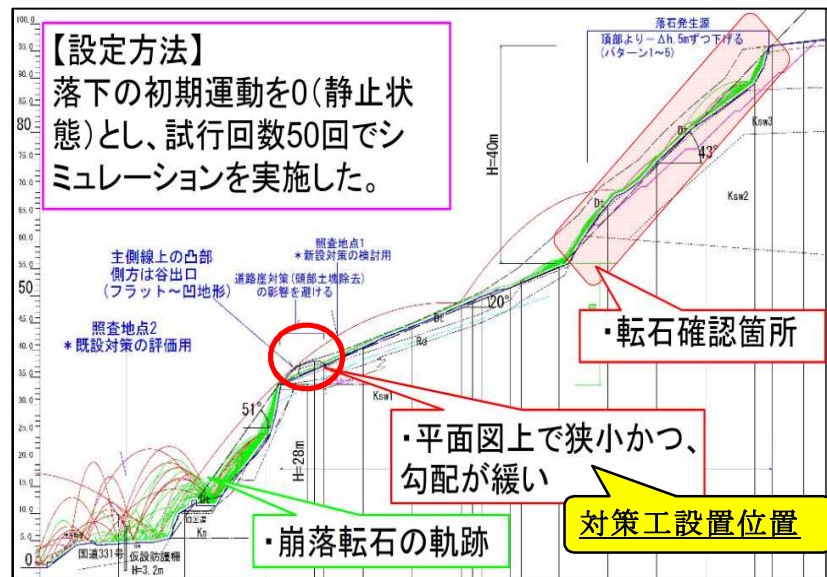


図-12 シミュレーション結果（崩落転石の軌跡）

加えて、落石の大きさが 2m を超える場合に国道部まで達する可能性がさらに高くなるため、それらが源頭部土工時に発見された際は、その他の仮設対策（ネット工、ワイヤーロープ掛工、静的破砕、小割作業）を検討・実施する必要がある。

5 対策工（落石防護柵）

前述の結果を反映し、落石防護柵（高エネルギー吸収タイプ）の 3 案で比較検討を実施し、『リングネット工法』を採用した。（図-13）

5.1 リングネット工法諸元

延長：最小範囲及び現地状況に則した延長・設置箇所とする。

【H:3.0m×W5.0m×3 箇所】

直工費：約 14,400 千円

工種：仮設足場工、アンカー工等

対象エネルギー：最大 750kJ

設置期間：源頭部切土工～流下部布製型枠工の施工期間存置

転用：可能（ただし落石エネルギーが 750kJ を越えない、柵高 3.0m を越えない等）

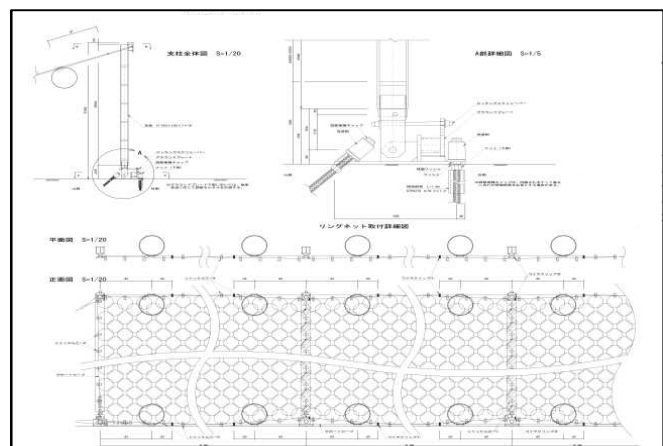


図-13 落石防護柵詳細

5.2 対策工 時点状況

平成 28 年 9 月現在、国道 331 号を片側交互通行しながら長大斜面源頭部の土工を施工中（切土工・法面工等）である。

写真-6 のとおり、斜面源頭部からの小崩落により 1 m 以下の落石が堆積している状況が確認されているものの、国道側への落石は確認されておらず、落石防護柵が転石の流下・跳躍に対して十分に機能していることが検証されているところである。



写真-7 落石堆積状況

また、源頭部で確認された 2m 以上の転石についても小割・運搬等を実施し落下の危険性を低減しながら工事を進捗している。

6 まとめ

現地において落石防護柵を設置したことで、道路利用者の安全が確保されている事が確認できた。（※2）今後も、下記のとおり留意しながら本事業及び他業務に反映する所存である。

6.1 今後の留意点 及び 類似事業への提言

- ① 複雑な自然現象であり、一様なもので無い落石や法面崩落現象について、発生 の位置・規模等も予測しがたいが、現場条件に則し出来るだけ定量的に判断できる材料を確保する。（適宜の安全確認等:シミュレーションの活用、安定計算の活用等）
- ② 適切な対応策の決定、経済的な工法・設置箇所の選定、定量的な想定エネルギーの算出及び決定、危険性の判断等に留意する。
- ③ 主要道等の被害想定については、市町村地域防災計画や緊急性・重要性和相まって、地元自治体や関連機関と綿密に調整していく必要があると考えられる。

7 追加提案

緊急時の対応（施工時）について

7.1 施工時の通行止めについて（大雨及び台風時等）

落石等の危険回避措置として落石防護柵を設置しているところであるが、厳しい地形で大規模掘削を行うことから、掘削土に対する危険回避措置についても検討を行った。源頭部において 1 万 m³を越える掘削土が発生するため、急な大雨や台風発生時には万全な対策を行う事が困難である。よって、全面通行止めも併せて検討する。また、今後の大雨等による 2 次災害を防ぐため通行止めの判断基準を定量的に設定し、実施方針を北部土木事務所内で規定した。

7.2 現状

本災害について、前述したとおり応急復旧工事により前年度（平成 26 年度）国道部に設置した既設の仮設防護柵は、落下の恐れがある土砂や転石の衝突荷重は考慮され

ておらず、大雨等により更なる斜面崩壊や、仮置している掘削土の流出が発生すると国道 331 号へ到達する危険性がある。

また、前年度の災害発生時・土砂流出時降雨量推移（図-14）によれば、80mm/24hを超えると危険性が高くなり前面通行止めの必要性が高いと判断される。

7.3 交通規制管理手法(案)について

本災害復旧工事において、定量的に土砂災害の予兆等を把握するため、当該地域における災害履歴を基準に交通規制管理手法（案）（図-15）及び連絡体制を確立した。

土砂災害警戒情報及び土砂災害警戒判定メッシュ情報等も参考にしながら、交通規制管理手法（案）のとおりに交通規制の実施を検討することとしており、2 次災害による人的被害を防ぐ目的で実施する事とする。なお、現地状況も確認しながら運用することし、変更や追加事項、現地条件変化に併せて臨機応変に対応する。

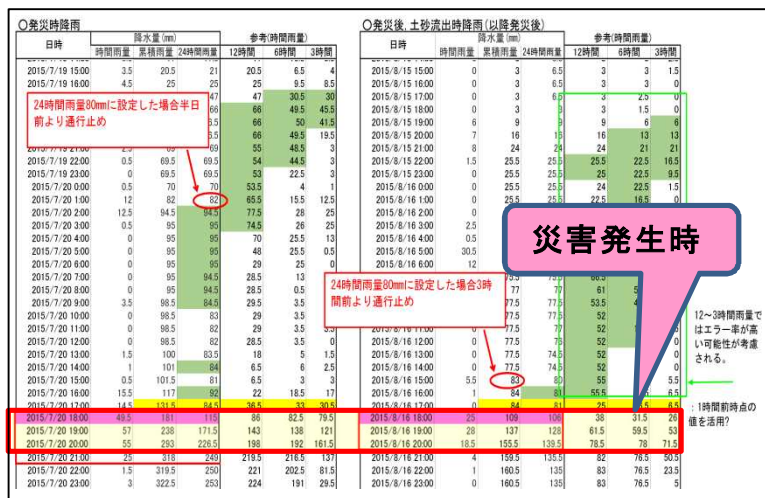


図-14 災害発生時・土砂流出時降雨量推移

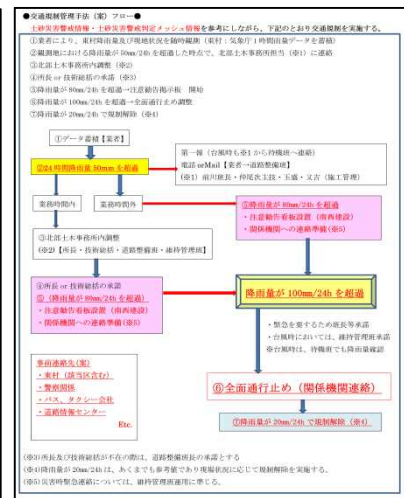


図-15 交通規制管理手法（案）

7.4.1 事例

平成 28 年 10 月 3 日の台風 18 号来襲の際に、源頭部切土の施工中であったためその際の検討資料を併せて報告する。前述した危険度評価の結果、及び、交通管理手法（案）（図-15）に加えて、暴風警報が発令されたため国道 331 号で全面通行止めを実施した。なお、源頭部法面施工中であり仮設盛土（ $\phi=30^\circ$ 、 $C=10\text{kN/m}^2$ ）の足場を設けながらの施行であったため、台風 18 号来襲前に出来る限りの対策を実施した時点での危険度評価を早急に実施することとした。

7.4.2 結果

盛土斜面安定計算（円弧すべり理論計算）によると、仮設盛土（ $\phi=30^\circ$ 、 $C=10\text{kN/m}^2$ ）に地下水位が形成した場合、安全率 $F_s < 1.0$ の想定円弧滑りが複数箇所検出され高い確率で仮設盛土部に崩れが生じると判断された。また、準備・対策期間の制約上、発生土内に排水経路の設置・応急対策工等は困難であったため、危険性を考慮し全面通行止めを実施することとした。

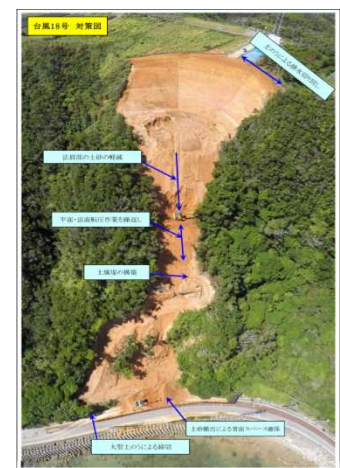


図-16 台風 18 号対策

8 おわりに

ここまで、国道 331 号における長大斜面落石シミュレーション及び法面対策手法について事例紹介を含めて述べてきたが、平成 28 年 10 月時点では源頭部を施工中であり、今後の現地状況の変化や 2 次災害によっては設計変更の可能性があることをご了承頂きたい。

おわりに、今後何時発生するか分からない災害、そして大規模な災害復旧等についても公共の福祉を最大限に増進（国民の利益）することを念頭に、行政（発注者）が主体となり、建設関連業者、建設業者ともに、それぞれの役割を果たすことにより進める必要があると考える。

9 参考文献 及び 参考資料

9.1 参考文献

- ※1)『災害手帳』平成 27 年、(社)全日本建設技術協会
- ※2)『落石対策便覧』平成 17 年 6 月、(社)日本道路協会
- ※3)『落石対策便覧に関する参考資料－落石シミュレーション手法の調査研究資料』平成 14 年、社団法人 日本道路協会
- ※4)『道路土工 切土工・斜面安定工指針』平成 21 年、(社)日本道路協会
- ※5)『沖縄県地域防災計画』平成 27 年 3 月修正、沖縄県防災会議

既往の実験結果によれば、図 1-13 に示すように回転エネルギー E_r は線速度エネルギー E_v の 40 % 程度まで達する場合もあるが、大半は回転エネルギー E_r は線速度エネルギー E_v の 10 % 程度であるとみることができる。

(1-3) 式を (1-4) 式に代入することによって、落石の全運動エネルギーは次式によって求めることができる。

$$E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) m \cdot g \cdot H \quad \dots\dots\dots (1-5)$$

ここに、

$$(1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) \leq 1.0$$

E ：落石の全運動エネルギー
 β ：回転エネルギー係数 (0.1 としてよい)
 μ ：等価摩擦係数 (表 1-3 による)
 θ ：斜面勾配
 m ：落石の質量
 g ：重力加速度
 H ：落石の落下高さ

参考－1 簡易式を用いた落石エネルギーの算定式

【落石設計重量】

落石単位体積重量 $\gamma_1 = 19.0 \text{ kN/m}^3$ 直径 = 2.0 m 円形、砂岩 (ノジュール)

$$m \cdot g = \left(\frac{4}{3} \right) \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \gamma_1$$

$$= \left(\frac{4}{3} \right) \times \pi \times 1^3 \times 19.0$$

$$= 79.59 \text{ kN}$$

0.4 m 立方体
 0.064 m³
 1.216 kN_γ 1.20

【簡易法の落石エネルギー】

高低差の最大の位置で下式で算出する。

$$E_1 = \gamma \cdot (1 + \beta) \cdot \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) \cdot m \cdot g \cdot H$$

E_1 ：落石の運動エネルギー (kN・m)
 β ：回転エネルギー係数 (0.1)
 μ ：等価摩擦係数 (0.20)
 θ ：斜面勾配 30
 W ：落石の重量 (79.59)
 H ：落石の落下高さ 60
 γ ：平場衝突による速度エネルギー 1 (1.00)
 落石運動エネルギー $E_1 = 3433.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (=kJ)

斜面の種類と等価摩擦係数 μ の値		
区分	落石および斜面の特性	設計に用いる μ
A	硬岩、丸状；凹凸小、立木なし	0.05
B	軟岩、角状～丸状；凹凸中～大、立木なし	0.15
C	土砂・堆すい、丸状～角；凹凸小～中、立木なし	0.25
D	堆すい～巨礫まじり堆すい、角状；凹凸大～中、立木なし～あり	0.35

参考－2 $\phi 2\text{m}$ 落石を想定した簡易算定式 (抜粋)

9.1 参考資料：【参考-2 について】

簡易式を用いた落石エネルギーの算定式を用いると $\phi 2\text{m}$ の落石で、落石エネルギー約 3,400kJ が得られるが、流下区間でのバウンドによる減衰を考慮していない式のため、特に $\phi 2\text{m}$ で高エネルギーが算定された。

なお、同エネルギーに対応できる仮設対策は、土堤となっている。

反応拡散系理論に基づいた 3 次元 Sinkhole 形成シミュレータの開発

琉球大学 学生会員 ○川上 凌梧

琉球大学 正会員 松原 仁

1. はじめに

Sinkhole は炭酸カルシウムを主成分とするカルスト台地のような地形において多発する地盤陥没現象であることが知られており、雨水や地下水などによって石灰岩の層が溶解することで発生すると考えられている。実際に、世界各国の都市部で多くの被害が確認できる。一例として、ネパールで実際に発生した Sinkhole を図-1 に示す。Sinkhole 問題における岩盤溶解等の基本的なメカニズムは解明されつつあるものの、その具体的な発生個所や岩盤の動態挙動を詳細かつ高精度に予測できる技術の提供には至っていない。

一方で、Sinkhole が引き起こす被害は物理的被害だけでなく人的な被害も招く恐れがある。したがって、Sinkhole の発生メカニズムを解明することは工学上極めて重要であり、人間生活に与える影響を評価することが必要となる。沖縄県においても例外でなく、地層の多くが第 4 期琉球石灰岩で形成されていることを考慮すると、本課題は沖縄でも重要な問題であると考えられる。

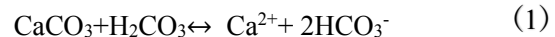
Sinkhole は岩盤内部の亀裂面が 3 次元的に形成され、進行していく現象であるが、亀裂面の形成や岩盤全体の巨視的な動態挙動については、対象とする現象が複雑かつ大規模なものであるため、これらを統合的な観点から予測することは困難な現状がある。また、Sinkhole に関する過程観察や再現実験を行うことは困難であり、災害後の調査などに頼らざるを得ない現状である。

そこで本研究では、岩盤内部で発達する Sinkhole の動態挙動を詳細かつ高精度に予測す

るため、反応拡散系理論を基盤とした 3 次元 Sinkhole 形成シミュレータを開発し解析を行った。

2. 数理モデル

石灰岩内部で起こっている溶解反応は次式にて表すことができる。



ゆえに、式 (1) に各物質の流入と拡散を考慮すると、以下に示す方程式を得ることができる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -k_1[A][B] + k_2[C][D]^2 + \alpha([A]_0 - [A]) \quad (2)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -k_1[A][B] + k_2[C][D]^2 + \beta([B]_0 - [B]) + D_1 \nabla^2 B \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_1[A][B] - k_2[C][D]^2 + \gamma([C]_0 - [C]) + D_2 \nabla^2 C \quad (4)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = k_1[A][B] - k_2[C][D]^2 + \delta([D]_0 - [D]) + D_3 \nabla^2 D \quad (5)$$

本研究では A:CaCO₃, B:H₂CO₃, C:Ca²⁺, D:HCO₃⁻, α:CaCO₃の反応速度定数, β:H₂CO₃の反応速度定数, γ:Ca²⁺の反応速度定数, δ:HCO₃⁻の反応速度定数, k₁k₂:反応速度定数, t:時間, D₁:H₂CO₃, D₂:Ca²⁺, D₃:HCO₃⁻, をそれぞれの物質の反応係数とし、石灰岩溶解の支配方程式とした。なお、CaCO₃は固体であるため拡散は考慮していない。

3. 数値解析例

本研究では、前章で提案した数理モデルを差



図-1 実際の sinkhole (Modified from Rama *et al.* 2015)⁽¹⁾

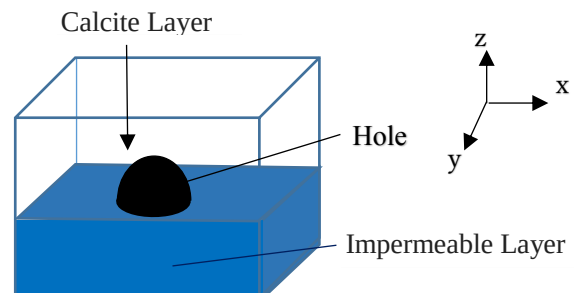
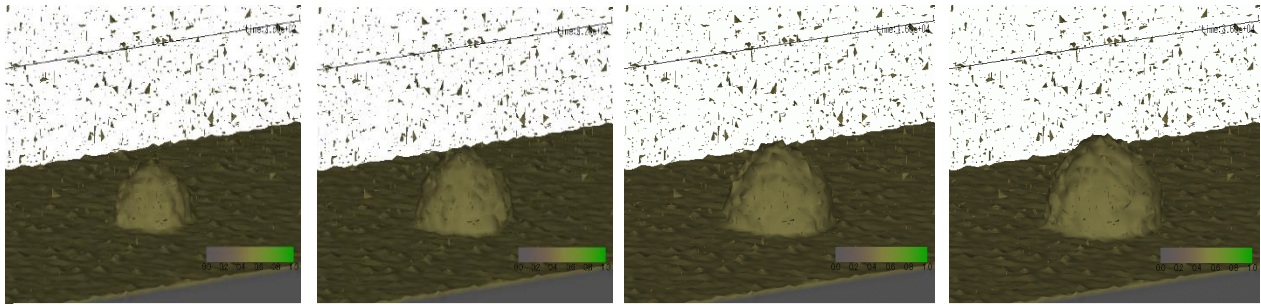


図-2 解析モデル

キーワード Sinkhole, 地盤陥没

連絡先 〒903-0123 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科

E-mail e125315@eve.u-ryukyu.ac.jp



(a) 3600 ステップ (b)79200 ステップ (c)162000 ステップ (d)360000 ステップ

図-3 石灰岩の時間ステップ別の溶解パターン

分法にて離散化した.数値解析例として図-2 に示すような解析モデルを設定した. 同図に示すように直方体領域を解析対象とし, モデルのサイズは $2 \times 1 \times 0.75$, 空洞内部には常に水が流入するように設定した. 本モデルの総格子点は 410865 であり, 境界には Neumann 条件を設定し, 岩盤内部による初期の各物質量はランダムになるように設定した.

図-3 に時間ごとの空洞の変化を示す.同図より, 空洞は時間が進むごとに大きくなっていることが確認できる.これは, 空洞内部に流入している H_2CO_3 が拡散し CaCO_3 が化学反応によって溶解したためであることが原因であると考えられた.

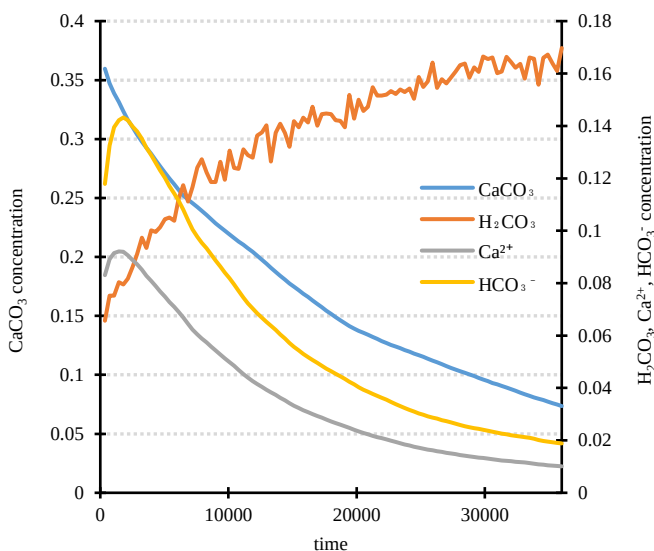


図-4 各物質の変化量

各物質の時間変化に伴う濃度を図-4 に示す. 同図より, H_2CO_3 が増加することによって CaCO_3 は減少していることが確認できる.このことは, CaCO_3 と H_2CO_3 が反応し Ca^{2+} と HCO_3^- を生成したことが原因であると考えられた.

また, 同図より Ca^{2+} と HCO_3^- は急激に増加し

時間が進むにつれて緩やかに減少していることが確認できる. このことは, 式 (1) において反応速度 $k_1 k_2$ の値に差があり, k_1 の値が大きいため CaCO_3 が初期段階で H_2CO_3 と反応し, Ca^{2+} と HCO_3^- が大量に生成され, 時間が進むにつれ反応速度 k_2 の影響により Ca^{2+} と HCO_3^- の量が減少したのが原因であると考えられた.

4. まとめ

本研究では, 反応拡散系理論を基盤とした 3 次元 Sinkhole 形成シミュレータを開発した.その結果, 時間ごとにおける石灰岩の溶解を確認することができた.しかしながら, 各物質における係数は想定される値を設定し, 空洞内部に常に水が流入されると設定したため実際の Sinkhole 現象とは異なる部分がある. 以上の解析結果より今後, 様々なパターンの解析モデルの解析を行い今回の解析データとの比較を行うとともに, 地下水流れを考慮した解析を行う必要がある.

また, 実際に石灰岩が溶解する実験を行い実験値の係数と比較を行いより実際の Sinkhole 現象に近い係数を設定し, より高性能な 3 次元 Sinkhole 形成シミュレータの開発を行う必要があると考えられる.

5. 参考文献

- ①R.M. Pokhrel et al., Preliminary Field Assessment of sinkhole Damage in, Pokhara, Nepal, Int. J. Geoenvironment Case Histories, Vol.3(2),p113-125.

地下水流れを考慮した Sinkhole の形成シミュレーション

琉球大学学部生 ○天野 量稀
琉球大学 松原 仁

1. はじめに

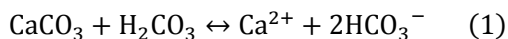
Sinkhole とは広く地盤陥没現象を意味している。地下空洞に上層の土粒子が流れ込み、地表が陥没する現象である。自然界においてはカルスト地形に多く見受けられ、可溶性岩盤が雨水等により溶解、空洞が形成されることにより陥没現象が発生する。空洞上層の土質により陥没過程が変化し、粘性土層と砂質土層が重なっている場合には、Cover-collapse sinkhole と呼ばれる突発的な陥没現象が発生する。

Sinkhole による被害は世界各地で報告されており、石灰岩が広く分布するフロリダ半島では人的被害も発生している。沖縄県においても石灰岩は広く分布していることから、Sinkhole の要因となる地下空洞の形成が懸念されている。

本研究は、石灰岩の溶解による空洞形成過程を移流反応拡散系でモデル化し、地下水流れの空洞形成への影響評価、Sinkhole の発生メカニズムの解析を試みた。

2. 数理モデル

岩盤内部では、化学反応による物質の生成および風化、地下水による移流、地中での拡散現象が考えられる。石灰岩の溶解は以下の化学反応式で表すことができる。



各物質について移流反応拡散方程式を仮定すると次式が得られる。

$$\frac{d[X]}{dt} = \mp k_1[A][B] \pm k_2[C][D]^2 - \nabla(v[X]) + \nabla(D_X \nabla[X]) \quad (2)$$

ここで、A: CaCO_3 , B: H_2CO_3 , C: Ca^{2+} , D: HCO_3^- , $k_1 \cdot k_2$: 反応速度係数, $[X]$: 物質 X の濃度, v : 地下水の流速, D_X : 物質 X の拡散係数である。こ

こで、地下水の流速は非圧縮流れの連続の式とダルシー則からポテンシャル分布を算出し決定した。今回は計算コスト削減の為にポテンシャル分布の更新を 100 回計算毎に行うとした。なお、 CaCO_3 は固体であるので、簡便の為に移流拡散による移動現象はないとした。

3. 数値解析モデル

数値解析モデルを図-1 に示す。解析領域は、 2×2 の二次元モデル、総格子点数 40401。ポテンシャルの境界条件は左右端が Dhirichlet 条件で、左端を 1、右端を 0、上下端を Neumann 条件とした。移流の境界は、計算安定化の為に、流入境界を Dhirichlet 条件、流出境界を Neumann 条件とした。拡散の境界は上下左右端に Neumann 条件を設定した。不透水層は透水係数、拡散係数、ポテンシャルを 0 とした。解析領域上部に CaCO_3 を濃度 0.9 ± 1 で設定した。本モデルでは、中央に半円形の穴があり、高濃度の H_2CO_3 が流入、不透水層との境界面からも微量の H_2CO_3 が流入していると仮定している。

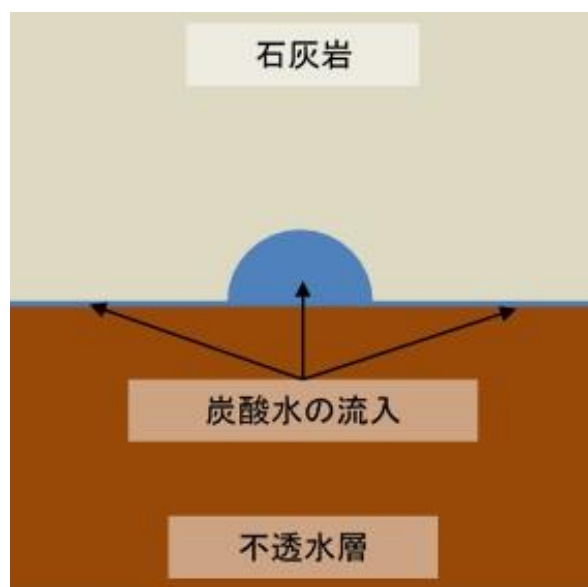


図-1 数値解析モデル

キーワード Sinkhole 石灰岩 解析モデル

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科

E-mail : e135345@eve.u-ryukyu.ac.jp

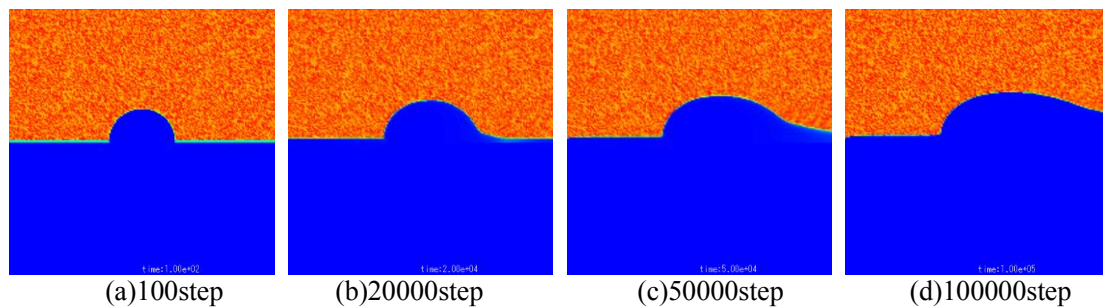


図-2 CaCO_3 の濃度変化

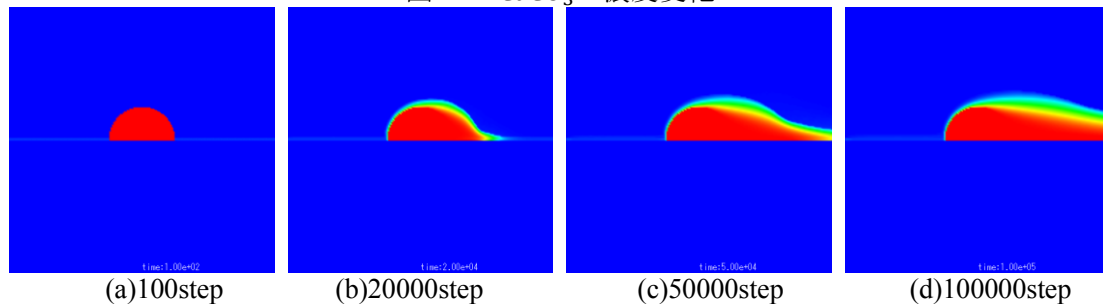


図-3 H_2CO_3 の濃度変化

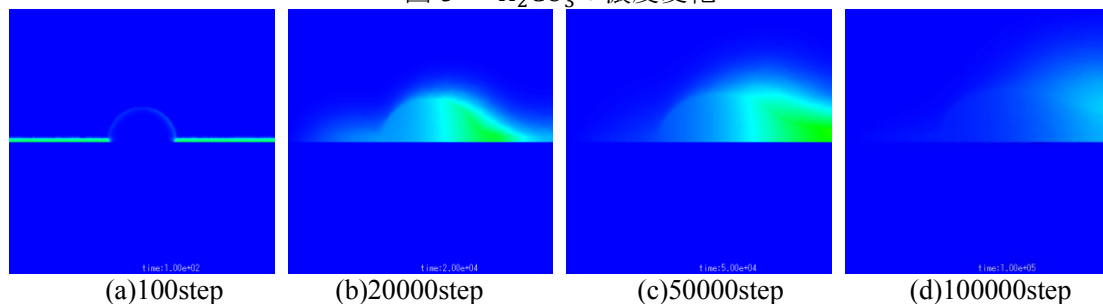


図-4 Ca^{2+} の濃度変化

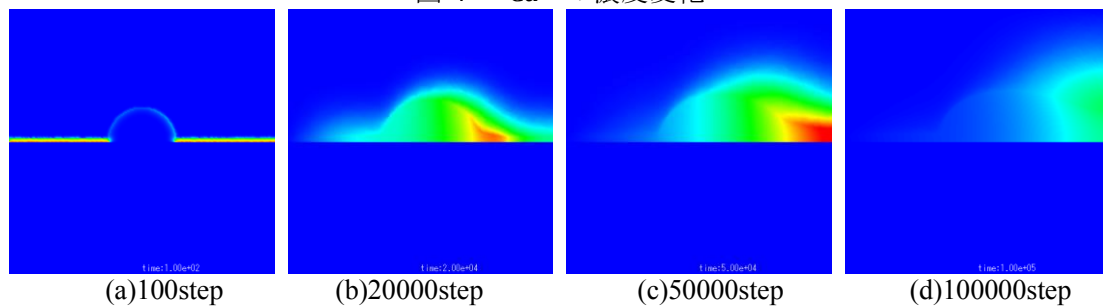


図-5 HCO_3^- の濃度変化

4. 解析結果と考察

各物質の濃度変化を図-2, 図-3, 図-4 および図-5 に示す. CaCO_3 が下流(画面右)側で不透水層との境界部に沿って溶解しているのがわかる. これは, CaCO_3 が溶解しポテンシャル分布が変化することで流れ方向が境界部に集中し, 溶解が加速度的に速められた為だと考えられる. また, Sinkhole の発生は空洞が上層に達することが要因だと考えられる. 今回の解析結果では上方向への流れが生まれているものの, CaCO_3 を溶解させる H_2CO_3 が上部に輸送される前に反応により減少する為, 空洞は下流側の

み広がったと考えられる.

5. おわりに

本研究では, 地下水流れが Sinkhole に及ぼす影響を示すには至らなかったが, 地下空洞の形成を促進させていることを示した. 今後はパラメータサーベイを行い, より実地盤に近いモデルの構築を行う必要がある.

参考文献

- 1) Xiaohu Tao, Experimental and Numerical Investigation of Sinkhole Development and Collapse in Central Florida pp. 1-3. 2015.

再生水利用下水道事業に関する取組みについて

沖縄県下水道管理事務所 金城奈美

1. はじめに

那覇浄化センターでは、渇水に強いまちづくりの一助を担うべく、「再生水利用下水道事業」を実施している。この事業は、下水処理水を高度処理した水（以後、再生水とする）を水洗トイレ用、樹木散水用に限定して商業施設等に有料提供するものである。

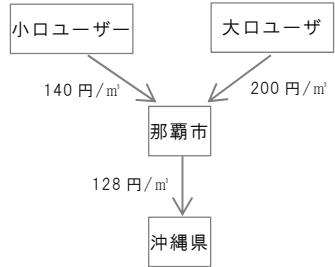
平成 14 年度の供用開始後、いろいろな課題が発生したが、本稿では、利用水量増加と再生水の残留塩素確保に対する取組みについて報告する。

2. 事業概要

沖縄本島では過去に断水があり、平成 4 年度に策定された「沖縄県水資源有効利用推進方針」において、下水処理水が新たな水資源として位置づけられた。その後、再生水に関する基本計画調査、沖縄開発庁との協議を経て建設省より事業採択を受け、平成 14 年度から那覇新都心地区で再生水の利用が始まっている。事業内容が再生水を製造して商業施設等で利用していただくサービス提供であるため、沖縄県と那覇市が共同で運営しており、県は再生水の製造及び市への提供、市はユーザーへの再生水供給等の対応という役割を担っている。

再生水は、下水処理水の高度処理によって水洗トイレ用等に使用できる水質になっている。したがって、再生水は下水処理水から製造された「生産物」と解釈され、下水を処理するために徴する下水道維持管理負担金とは別に、地方自治法第 237 条第 2 項に基づいて維持管理負担金を徴収している（表 1）。

表 1 再生水事業概要

事業主体	沖縄県、那覇市
供用区域	那覇新都心地区、送水管周辺地区 県庁周辺地区、那覇空港地区
計画水量	（日最大）2,130 m ³ /日
利用用途	トイレ洗浄用水、散水用水
再生水水質基準	pH 5.8～8.6 残留塩素（遊離）0.1mg/L 以上 残留塩素（結合）0.4mg/L 以上 大腸菌群数 検出されないこと 臭気、色度 不快でないこと
処理方式	生物膜ろ過 →オゾン処理 →次亜塩素酸
次亜塩素酸ポンプ	0.7～140mL/分×2 台
再生水料金（税抜）	

3. 利用水量増加への取組み

再生水利用下水道事業計画では再生水有収水量を 1,369 m³/日と設定しているが、利用水量は 500 m³/日程度で頭打ちとなった。

そこで、新都心地区での利用以外に新たな利用場所を模索することになった。旭橋地区の

キーワード 那覇浄化センター 再生水 残留塩素

連絡先 〒901-2221 宜野湾市伊佐3-12-1 沖縄県下水道管理事務所 E-mail : maekawan@pref.okinawa.lg.jp

再開発、那覇市役所の建替えに伴う再生水専用配管の設置やパレット久茂地内循環利用水の再生水への切替などのニーズを確認し、県庁周辺地区への送水を平成24年10月に開始した。しかし、それでも設定量に達することができなかった。

その後、さらなる新規開拓ということで目星がついたのが那覇空港だった。那覇空港へ送水する最短ルートはうみそらトンネル内を通すことであったため、沖縄総合事務局と調整を重ねた。当初は難航したが、有効利用の意義や空港側が供用を望んでいるということもあって最終的には了承いただき、平成28年3月に空港ルートも供用を迎えた（図1）。

そして、那覇空港地区の供用によって、再生水利用水量は設定量の9割に近づいている（図2）。今後利用が予定されている新那覇市民会館等が利用開始すれば再生水利用水量は設定量に到達すると思われる。

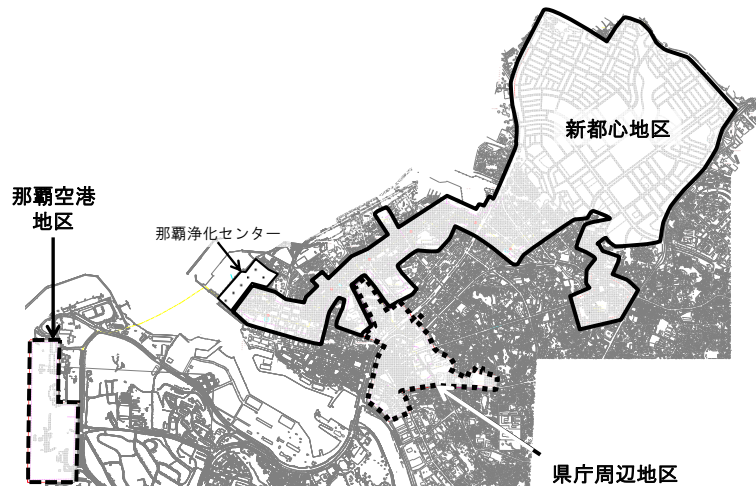


図1 再生水供用地区図

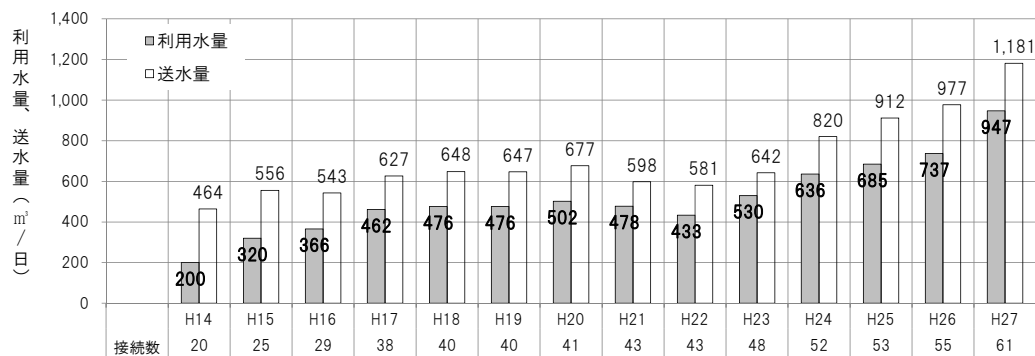


図2 再生水利用水量、送水量の経年推移

4. 残留塩素安定確保への取組み

4. 1 残塩確保に要する塩素注入率が高いことへの取組み

再生水は特定建築物でも利用されることから、遊離残留塩素 0.1 mg/L（または結合残留塩素 0.4mg/L）を確保できるよう次亜塩素酸ナトリウム溶液（以後、次亜塩とする）を注入している。所定の残留塩素（以後、残塩とする）を確保するための塩素注入率は設計上 3mg/L となっている。しかし、供用してみると、塩素注入率 8mg/L でも残塩確保が厳しかった。

4. 1. 1 調整排水の実施（平成14年度～）

そもそも、残塩消費は、水質に含まれる被酸化性物質による消費、滞留時間中の自己分解によって起こる。供用開始時の高い塩素注入率の原因は利用水量が少ないことによる残塩消費だと考えられた。そこで、当面は那覇新都心地区ループにある排泥弁を利用して常時排水して残塩を確保しつつ、排水用の調整排水弁及び水質監視盤（残塩などを連続測定）を整備

した（図3）。調整排水弁などの設置位置はループ内での送水方向が時計回りまたは反時計回りの末端になる2カ所を選定し、滞留時間を短くするために、利用者の多い方が末端にくるよう時計回りの送水を採用した。

4. 1. 2 送水中の劣化の確認（平成22年度）

供用開始後発生した残塩低下について、高度処理施設設計業者との協議やコンサルタントによる調査を実施するも、残塩確保への効果的な対応策は探せなかった。また、利用水量も徐々に増えたが調整排水量を減らしているのので、塩素注入率は相変わらず設計より高い状況だった。

そこで、根本的なことの確認として、再生水が那覇浄化センターから圧送されて那覇新都心地区で排水されるまでの残塩低下の状況を調査した。実際の送水で起きている消費（図4）は室内試験（図5）と同じような低下であったことから、残塩は時間、再生水の水質、残塩成分の自己分解など通常の原因によって消費されていると考えられた。

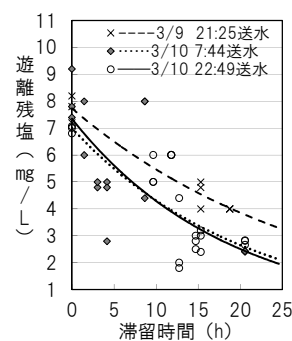


図4 遊離残塩劣化状況（那覇新都心地区内）



図3 調整排水弁と水質監視盤位置図（那覇新都心地区内）

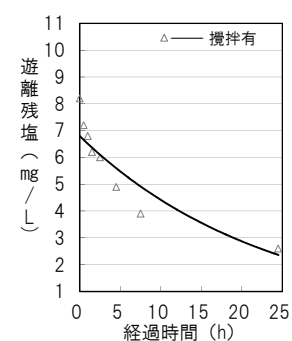


図5 遊離残塩劣化状況（室内試験）

4. 1. 3 再生水製造工程における水酸化ナトリウム溶液の注入（平成26年度～）

その後、利用水量は県庁周辺地区での供用で増加した。しかし、那覇新都心地区までの滞留時間の短縮にはならないため、残塩成分の自己分解を抑制することで残塩を維持する調査を行った。これは、アルカリ性では残塩成分の自己分解が抑制されるという性質に着目したもので、再生水製造工程で水酸化ナトリウム溶液（以後、苛性ソーダとする）を注入した。ただし、再生水 pH は 5.8～8.6 という規制があり、また、次亜塩自体もアルカリ性であるということで、苛性ソーダの注入量に限度があるなかで実施した。

結果は、効果面では苛性ソーダを注入することで残塩の低下が少し抑えられる（図6）、費用面では次亜塩注入量減少による金額抑制分よりも苛性ソーダ注入による金額増額分が大きいということになった

（表2）。費用はかかるが、送水開始時点の再生水の残塩を少し抑えることができるということを考慮して、調査以降は苛性ソーダ注入を実施している。

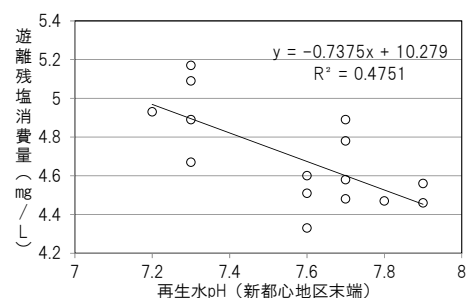


図6 pHと遊離残塩消費量

表2 遊離残塩消費量と薬品費用

注入率 (mg/L)	苛性ソーダ	次亜塩	遊離残塩消費量	薬品 (円/日)			送水開始時点の再生水遊離残塩
				苛性ソーダ	次亜塩	合計	
注入なし	11.88	4.95mg/L	4.95	3,466	3,466	6,932	6.01mg/L
10.1	11.51	4.58mg/L	4.58	1,861	3,358	5,219	5.64mg/L
13.3	11.48	4.55mg/L	4.55	2,453	3,349	5,802	5.61mg/L

4. 1. 4 那覇新都心ルート内の排水場所の変更調査（平成 26 年度）

最も遠い那覇新都心地区末端までの滞留時間を短縮することができれば塩素注入率を下げるができるため、那覇新都心地区を対象に、排水量は変えずに排水場所のみを変更する調査を実施した。

効果としては、那覇浄化センターから那覇新都心地区での排水までの時間が通常より 2 時間短縮された分、残塩の低下も平均で 1mg/L 以上抑制されたことが確認できた（図 7、図 8）。

しかし、当時、送水量が時間最大になると次亜塩ポンプ注入量の関係から塩素注入率は最大約 8mg/L という制約があったため、水質監視盤がない状態ではリスクがあるということで、運用へは適用されなかった。

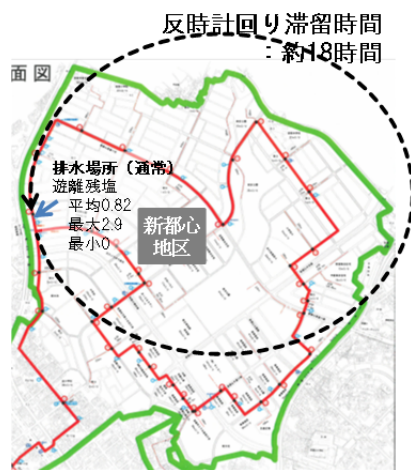


図 7 新都心地区内の排水場所と遊離残塩状況（通常）

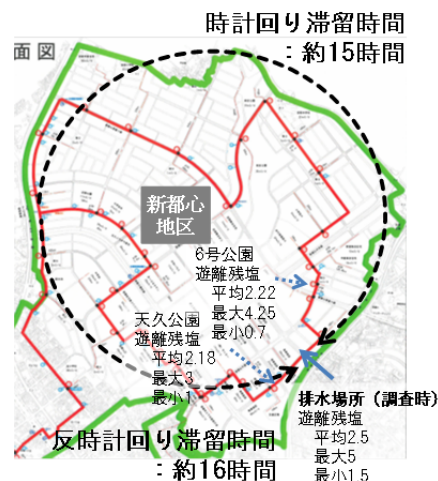


図 8 新都心地区内の排水場所と遊離残塩状況（調査時）

4. 2 送水量の一時的激増に伴う残塩低下への取組み

送水量が増えていくと、滞留時間が長いことによる残塩低下とは別の原因による残塩低下が発生するようになった。新たな原因というのは、送水量に比例して次亜塩が注入されるタイムラグ（図 9、図 10）と次亜塩注入量の頭打ちである。

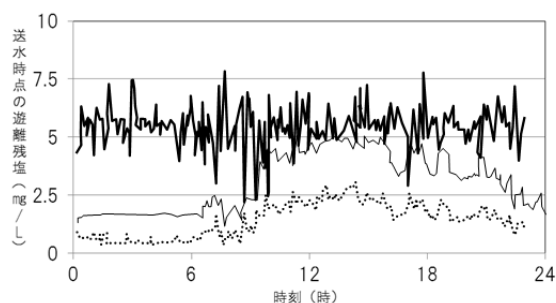


図 9 平成 19 年度の送水時点残塩（太線）、送水量（細線）、次亜塩注入量（点線）

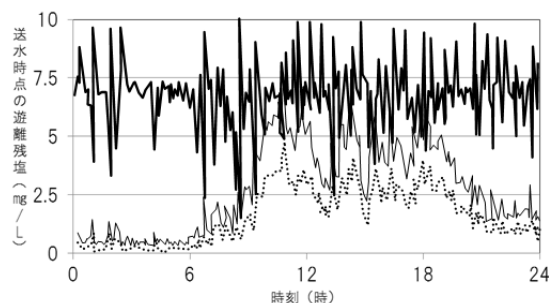


図 10 平成 25 年度の残塩（太線）、送水量（細線）、次亜塩注入量（点線）

4. 2. 1 貯水槽への次亜塩直接注入調査（平成 26 年度）

再生水の水質がよくなないと送水開始時点ですでに残塩低下してしまうため、塩素注入率を増やして対応するが、送水量が増えるにつれて次亜塩ポンプによる注入だけでは注入量が不足するという状況が発生するようになっていた。そのような場合、ポンプによる注入以外に緊急的に次亜塩を貯水槽へ直接注入するという対応をとっているが、その対応が一時的な送水量急増時の最低限度の残塩確保にも対応できるか調査した。

貯留槽への次亜塩直接注入によって残塩自体は確保しやすくなったが、貯水槽内での滞留

によって残塩が消費されているため、ポンプのみによる注入と比べるとかなり次亜塩を注入した（表

表 3 貯留槽へ次亜塩を注入したときの遊離残塩と塩素注入率

	遊離残塩 最低値		塩素添加率
	送水開始時点	新都心地区末端	
貯水槽へ次亜塩注入あり	2.5～3.9 mg/L	0.1～0.8 mg/L	(貯水槽) 7.1～9.4 mg/L (貯水槽+ポンプ) 14.5～17.3 mg/L
貯水槽へ次亜塩注入なし	0～0.45 mg/L	0 mg/L	(ポンプ) 12.42、12.43 mg/L

3)。また、貯水槽への次亜注入設備はなく、次亜塩注入をポリ容器のコックからの自然流下に任せる方式であったため、コックの開度や次亜塩の残量により流下量は変動し、貯水槽内の残塩は不均一、補充のための夜間作業が発生するという状況であった。そのため、効果は認めるも、運用へは適用できないということになった。

4. 2. 2 次亜塩注入ポンプ 2 台目追従運転対応への制御変更（平成 26 年度～）

次亜塩注入ポンプは 2 台あるが 1 台は予備機扱いであるため時間最大送水時の次亜注入率は 8mg/L までとなっていた。平成 26 年度発注の監視制御設備工事の更新対象に再生水の次亜塩注入制御があり、発注後の調整において 2 台目追従運転ができるように変更した。それにより、時間最大送水時の塩素注入率も 16mg/L まで可能となった。

4. 3 原水改善への取組み

原水として採用している下水処理水そのものの質を改善しようということで、下水処理（標準活性汚泥法）において送風量を増やすことによる硝化促進処理を試みた（平成 24 年度）。これは、残塩消費物質であるアンモニアなどの被酸化性窒素を亜硝酸性窒素や硝酸性窒素に酸化しようというものである（以後、硝化とする）。しかし、水質が安定せず下水処理の制御が難しかった。

4. 3. 1 再利用水水質調査（平成 25、26 年度）

そこで、原水を下水処理水から再利用水に変更できないかということで、再利用水に関する調査を実施した。なお、再利用水とは、下水処理水を場内で利用するために、砂ろ過設備で処理し細かな浮遊物を除去したものである（図 11）。

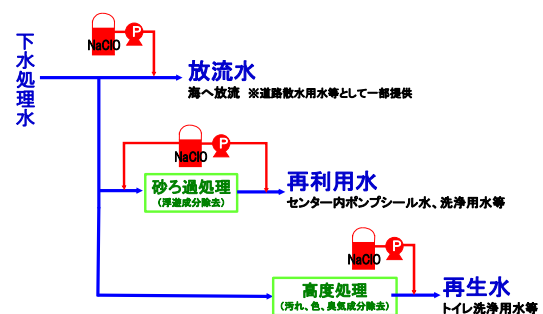


図 11 再利用水及び再生水の製造工程図

通常、砂ろ過設備の詰まり防止のために次亜塩を注入しているが、調査にあたって次亜塩を注入停止した。調査時の水質としては、再利用水は下水処理水と比べると若干硝化しており原水として利用可能だが、塩素注入率を大きく改善するほどのレベルではなかった（図 12）。また、2 ヶ月弱で再利用水製造に影響を与えるレベルに泥分が増えたため、調査を終了した。

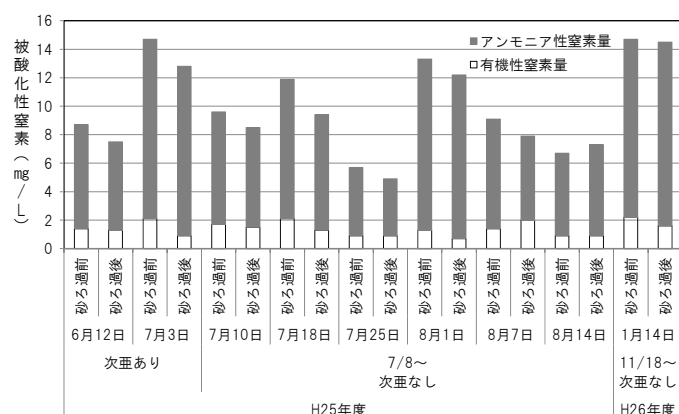


図 12 砂ろ過前後の被酸化性窒素状況

4. 3. 2 下水処理方法の変更（平成 27 年度～）

原水として利用している下水処理水をさらに水質改善するために、下水処理方法を、標準活性汚泥法による硝化促進処理から擬似嫌気好気法による硝化促進処理へ変更した。これによりさらに硝化を促進することができ、被酸化性窒素分が低減されて再生水の残塩低下が抑制されると想定した。実際、擬似嫌気好気法に変更してから、再生水の塩素注入率が下がる傾向になっている。

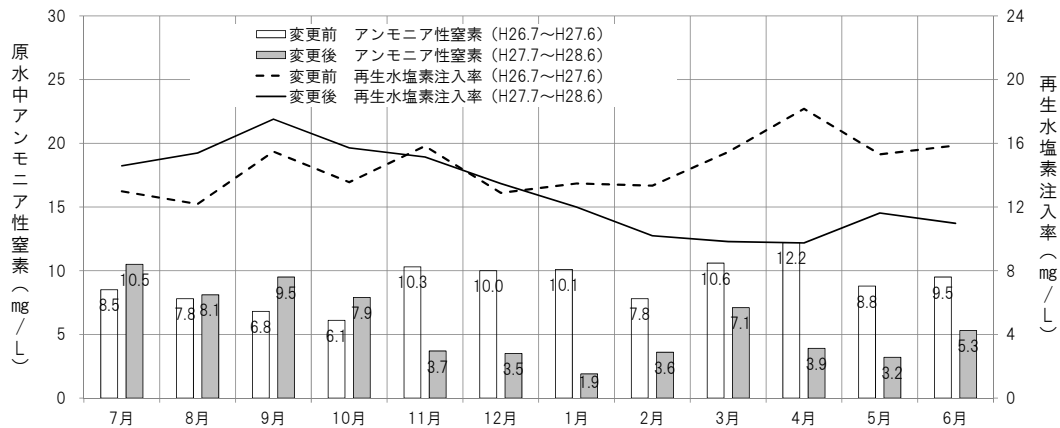


図 12 下水処理水のアンモニア性窒素と塩素注入率状況

4. 4 現在の取組み

送水量の一時的激増に伴う残塩低下への取組みとして、送水量制御に関する調整を検討している。最初は送水量増減に対する次亜塩注入量増減のタイムラグを抑えようと検討したが、送水ポンプにインバーター機能がなかった。そこで、維持管理者側で設定している推定外部調整項（水圧を微調整するための調整項）の値を変更する予定である。

5. おわりに

再生水事業は今年度で事業開始 15 年目を迎えることができた。維持管理は永続的に続く一方で関係者は入れ替わっていくという状況にあっても課題が少しずつ改善されているのは、関係者の努力によるものである。今後も残塩確保への取り組みは続くので、どこまで改善されるか期待していただきたい。

そして、都会のなかの小さな水源として、安全で安心な水を安定的に供給するために必要な取り組みを今後も実施していきたい。

太陽光発電設備の補償について

沖縄総合事務局 南部国道事務所 用地第一課 金城康太

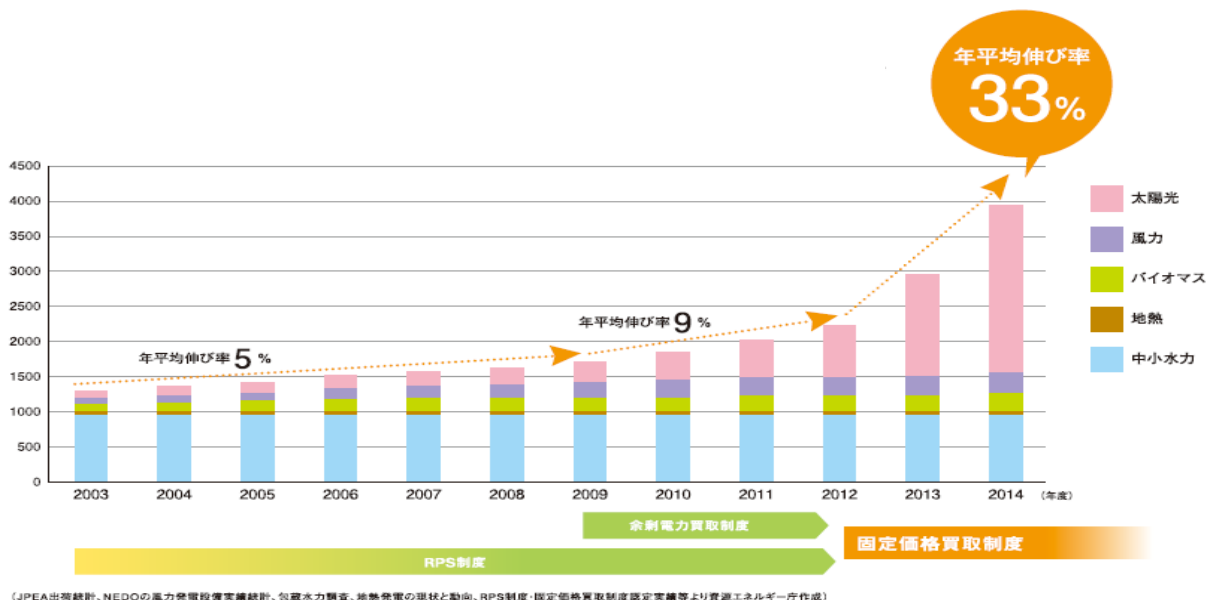
1 はじめに

近年、利用が促進されている再生可能エネルギー。その中でも特に注目されている太陽光発電のための設備の補償に係る問題を取り上げる。

2 太陽光発電の概要

(1) 太陽光発電の状況について

地球温暖化や東日本大震災の影響で再生可能エネルギーの利用が増え、太陽光発電設備を備えた一般住宅や施設が多くなってきた。特に、2012年7月から開始された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」以降、太陽光等の再生可能エネルギーによる設備導入は急速に増加している。



▲再生可能エネルギー等による設備導入量の推移

(2) 固定価格買取制度について

再生可能エネルギーの固定価格買取制度は、再生可能エネルギーで発電した電気を電力会社が一定期間、一定価格で買い取ることを国が約束した制度である。買取単価や買取期間は太陽光や風力といった各電源ごとに、事業が効率的に行われた場合、通常必要となるコストを基礎に適正な利潤などを勘案して定められる。具体的には、中立的な有識者会議である調達価格等算定委員会の意見を尊重し、経済産業大臣が決定している。

(3) 固定価格買取制度における太陽光発電設備の買取単価及び買取期間について

太陽光発電は発電設備の容量によって1kWh当たりの買取単価と、買取期間は異なる。また、買取単価は一度契約すると基本的に買取期間内は変動しないものの、新規契約時の買取

単価は毎年見直しが実施され、年々値下がりしている。これは、太陽光発電設備の設置費用の低下に加え、設備そのものの性能が向上し、発電量が増加していることなどが、買取単価下落の要因の一つとなっている。

	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
買取期間 20 年 事業用太陽光 (10kW 以上)	40 円	36 円	32 円	29 円 27 円※1	24 円
買取期間 10 年 住宅用太陽光 (10kW 未満)	42 円	38 円	37 円	33 円 35 円※2	31 円 33 円※2

※1 2015 年 7 月 1 日～（利潤配慮期間終了後）

※2 出力制御対応機器設置義務あり

▲買取単価の変動推移

3 太陽光発電設備の移転補償に伴う問題

(1) 分割移転に伴う買取単価差額について

一定規模を有する太陽光発電設備を備えた施設において、公共事業により施設の一部が支障となった場合、当該施設は全体又は施設の一部だけを分割して移転する必要が生じる。ここで、分割移転となった場合、残地（事業の支障となっていない土地）に残る施設の太陽光発電設備については、固定価格買取制度上、発電量の減少届等の手続きを行うだけで継続使用が可能となるものの、一方、分割移転する施設の太陽光発電設備については、移転先で新たに売電契約を締結しないと太陽光発電設備が使用できない。新規契約の場合は、固定価格買取制度上、契約時点での買取単価となる。先述のとおり、買取単価は年々値下がりしていることから従前の買取単価と新たな買取単価に差額が生じてしまい、太陽光発電事業者にとっては、当初見込みの利益が得られず不測の損失を与えることになってしまう。特に、売電を目的とし大規模で太陽光発電設備を設置している事業者については、投資と収益を考慮した長期的な計画に基づき、事業展開していることが多く、買取単価の変更がもたらす影響は少なくない。

4 太陽光発電設備の分割移転に伴う補償方法

(1) 買取単価の差額補償について

公共事業による移転によって、買取単価の差額が生じ、太陽光発電事業者に損失を与えた場合、その損失について補償する必要がある。

国道整備事業等の直轄事業の場合、国土交通省の公共用地の取得に伴う損失補償基準（以下、損失補償基準）に基づき、事業に伴う損失の補償を行う。しかし、損失補償基準では、事業用地の取得に伴う一般的に生ずる損失の補償について、それぞれ規定されているものの、今回のような買取単価の差額の損失等については、規定がない。そこで、損失補償基準では、第 65 条（その他通常生ずる損失の補償）において、一般的な損失の補償項目として典型的、

定型的に損失補償の規定が設けられていない損失について、それらが、社会通念上通常生ずる損失である場合は補償することができるとする規定を設けていることから、この条文を根拠に補償方法を検討する。

第65条（その他通常生ずる損失の補償）

第30条から前条までに規定するもののほか、土地等の取得又は土地等の使用によって土地等の権利者について通常生ずる損失は、これを補償するものとする。

▲国土交通省の公共用地の取得に伴う損失補償基準

（２）買取単価の差額補償方法について

公共事業による分割移転の影響で買取単価の差額（従前の買取単価に比べ新たな買取単価が安価）が生じると、太陽光発電事業者の売電による収益は、買取単価に買取期間と発電量を乗じたものとなるため、固定価格買取制度における従前の買取期間のうち、分割移転が無ければそのまま契約が継続できた期間（残期間）に渡って損失が発生する。なお、残期間における発電見込量は、営業補償の考え方を準用し、今回は直近の年間実績発電量とする。

また、太陽光発電設備のモジュール、その他関連設備は経年劣化による機器の老朽化によって発電効率が低下することが想定されるが、毎年発電電力量が低下すること（劣化率）について、出力低下がどの程度の水準であるかという点について、確立したデータが存在していないため、買取単価自体には劣化率は考慮されず算定されている。

しかしながら、適正な補償を行うためには、劣化率も考慮する必要があるため、今回は太陽光発電協会が2012年3月19日に開催された調達価格等算定委員会（第3回）に提出した資料に記載がある劣化率を用いることとした。

また、買取単価の差額を補償する場合、複数年の残期間全体に渡る差額分の補償を一括して行うため、将来に渡る運用益を差し引き、前価とする必要がある。

したがって、補償額は、買取単価の差額に残期間と直近の年間実績発電量及び劣化率を乗じ、前価率で割り戻した額となる。

５ おわりに

損失補償基等は常に日常と乖離がないよう改正されているが、まだまだ、追いつけていない現状がある。しかしながら、公共事業用地の取得は、一般国民の大事な財産の犠牲の上に成り立っていることから、正当な補償の確保は最も重要であり、慎重に行わなければならない。

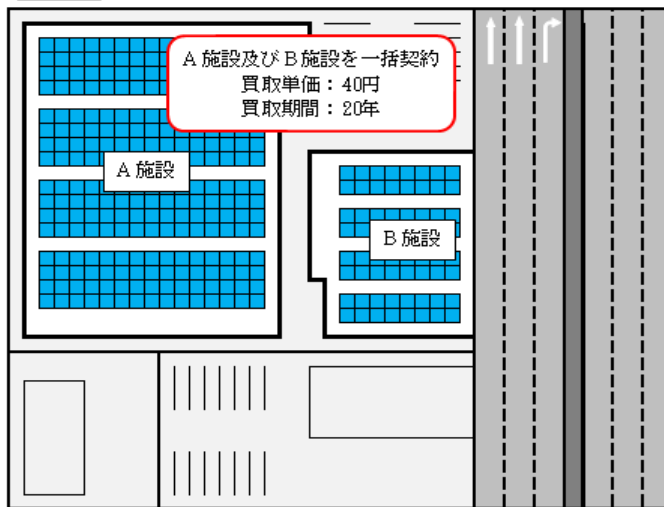
今回は、太陽光発電設備について、検討を行ったが、今後も従来では考えられなかった補償すべき案件も発生することが思慮される。常日頃から、問題意識を持ち、問題点を把握、分析し、今後の公共事業用地の取得が円滑に進むために努力して参りたい。

参考文献

「再生エネルギー固定価格買取制度ガイドブック（2016年度版）」

【分割移転の一例】

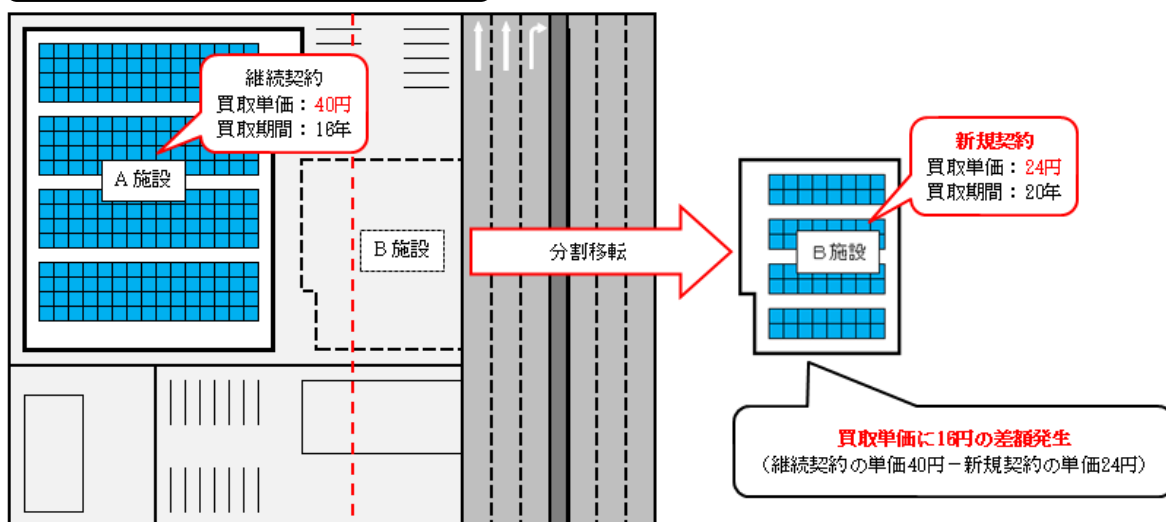
当初



- 買取期間 20 年、買取単価 40 円で
A・B 施設を一括して売電契約
- 5 年目に B 施設のみ分割移転
- B 施設は買取期間 20 年、買取単価
24 円で新規売電契約
- A 施設と B 施設の間で単価差額発生

※4 年目の年間実績発電量
B 施設 200,000kWh

5 年目に B 施設のみ分割移転



▲分割移転の概要図

$$\begin{aligned}
 \text{B 施設に係る補償額} &= \text{買取単価の差額} \times \text{残期間} \times \text{年間実績発電量} \times \text{劣化率} \div \text{前価率} \\
 &= 16 \text{ 円} \times 16 \text{ 年} \times 200,000\text{kWh} \times 0.957 \div 1.268 \\
 &\doteq 38,642,271 \text{ 円}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{劣化率} &= (1-a)^n \\
 &= (1-0.27\%)^{16} \\
 &\doteq 0.957
 \end{aligned}$$

a=劣化率、n=残期間

※劣化率は太陽光発電協会の資料による

$$\begin{aligned}
 \text{前価率} &= (1+r)^n \\
 &= (1+1.5\%)^{16} \\
 &\doteq 1.268
 \end{aligned}$$

r=年利率、n=残期間

※年利率は損失補償算定標準書による

Session 2 :地盤・環境関連

乾燥－湿潤繰り返し作用を受けるベントナイトと高炉スラグの亀裂パターンに関する研究

琉球大学

○平山 雄一

琉球大学大学院

広瀬 孝三郎

琉球大学

松原 仁

1. はじめに

Mudcrack と呼ばれる粘質土壌の乾燥過程で生じる亀裂は不可逆性の非線形現象のひとつとして知られている¹⁾²⁾。近年, Mudcrack の工学的な問題として, 一般的な廃棄物埋立処分の際に使用される土壌ライナーに Mudcrack が発生することが挙げられる。Mudcrack が発生することによって地下水や雨水等が土壌ライナーの内部に流入することで, 汚染物質の拡散が懸念されており, 人体への安全・安心の観点からしても重大な問題とされている。したがって, 乾燥－湿潤繰り返しに Mudcrack の亀裂パターンに与える影響の評価手法の構築や, Mudcrack の発生抑制手法を構築することは工学的にも重要な課題であると言える。しかしながら, 乾燥－湿潤繰り返しを考慮した Mudcrack の亀裂パターンの評価や Mudcrack の発生抑制に関する研究はほとんど見受けられない。そこで本研究では, ベントナイトおよび高炉スラグを用いて乾燥－湿潤繰り返し実験を実施し, 乾燥－湿潤繰り返しに Mudcrack に与える影響を評価した。さらに, 高炉スラグの亀裂発生抑制効果の検討を合わせて実施する。

2. 実験概要および条件

本実験では, ベントナイトと高炉スラグを実験材料に用いて, 乾燥－湿潤繰り返し実験を実施した。なお, 初期含水比に関しては, 水と試料の均質な混合を可能とする最小値: 60% (飽和度: 約 80%) に設定することで作成した。実験容器は, ペーストとの摩擦を考慮した低摩擦特性を示すフッ素樹脂にて加工されている円形の金属容器 (直径: 28cm, 厚さ: 5.3cm) を使用し, 容器表面にはグリスを塗布することで摩擦の影響をなくすことにした (実験開始時のペーストの層厚: 10mm)。本研究では, 実験環境の影響を取り除くために, 恒温器内部 (温度: 25℃, 湿度: 37℃)

での実験を実施した。図-1 に, 恒温器内部の模式図を示す。給水作業に関しては既存の Mudcrack および Mudblock に与える影響を最小限にするために, ピペットを用いて慎重に給水することとした (給水量はペースト作成時と同量とする)。本実験では, 給水回数を5回に設定し, 1回の乾燥時間は48時間とした。

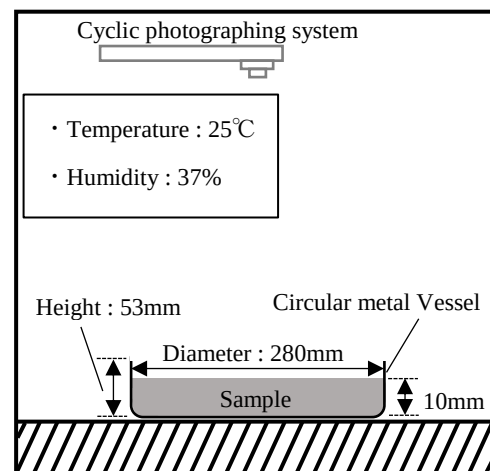


図-1 恒温器内の模式図

3. 実験結果と考察

図-2 および図-3 に, 乾燥－湿潤繰り返し実験から得られた各実験供試体の様子を示す。図-2 に示すように, ベントナイトペーストには主要な Mudcrack が複数発生しており, 乾燥－湿潤サイクルの増加に伴い, Mudcrack の幅が大きくなっていることがわかる。一方, 図-3 に示すように, 高炉スラグにおいては, 乾燥－湿潤繰り返しを重ねても, 主要な亀裂が発生していないことがわかる。ここで, 亀裂進展長さに着目した場合 (図-4 参照), ベントナイトペーストにおいては増加傾向にあることから, 亀裂進展が乾燥－湿潤繰り返しの増加に伴い増加していることがわかる。ここで言う亀裂進展長さとは, ペースト表面に発生した Mudcrack の長さを意味し, デジタル画像処理

キーワード Mudcrack, 高炉スラグ, 乾燥－湿潤繰り返し, 亀裂発生抑止

連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科

E-mail: e135306@eve.u-ryukyu.ac.jp

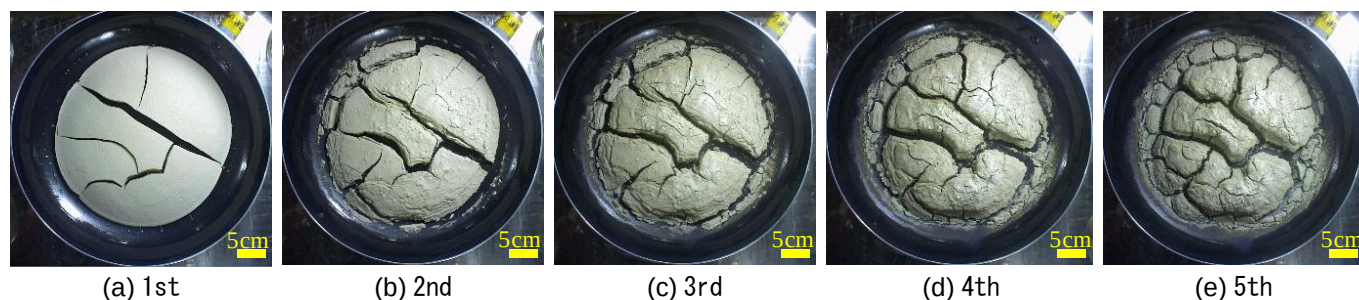


図-2 乾燥－湿潤繰り返し実験結果（ベントナイト）

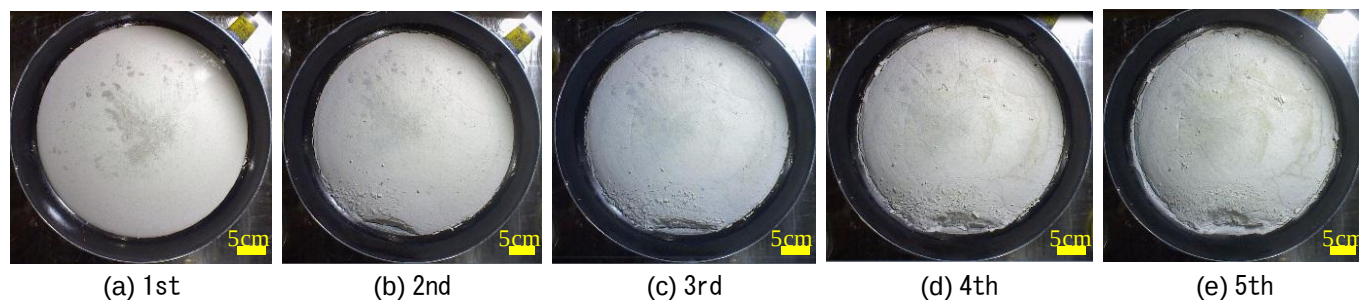


図-3 乾燥－湿潤繰り返し実験結果（高炉スラグ）

技術を用いて、撮影した亀裂をピクセル単位で読み込み、実際値に換算することで獲得した。このことから、ベントナイトペーストには亀裂発生抑制を見込めないことがわかる。一方、高炉スラグにおいては亀裂抑制効果がある可能性があることがわかった。次に、図-5 に各実験供試体における一面せん断試験の結果を示す。同図に示すように、高炉スラグはベントナイトと比較して、粘着力が大きいことがわかった。粒子間の連結がより一層、強固であることから、亀裂発生抑止の観点からして、十分な効果が考えられる。

4. まとめ

本研究では、乾燥－湿潤繰り返し実験を実施し、Mudcrack に与える影響および抑制効果を検討した。その結果、高炉スラグにおける土壌ライナーへの適用性が示唆された。しかしながら、ベントナイトペーストが有する膨潤性の効果を高炉スラグが有するか、また SEM 観察や X 線回折法等による分析を進める必要がある。これらについては、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Kindle, E. M.: Some factors affecting the development of mud cracks, *The Journal of Geology*, Vol.25, pp.135-144,1917.
- 2) 伊藤寛之，宮田雄一郎：マッドクラックのパターン形成実験，地質学雑誌，Vol.104，No.2，pp.90-98，1998.

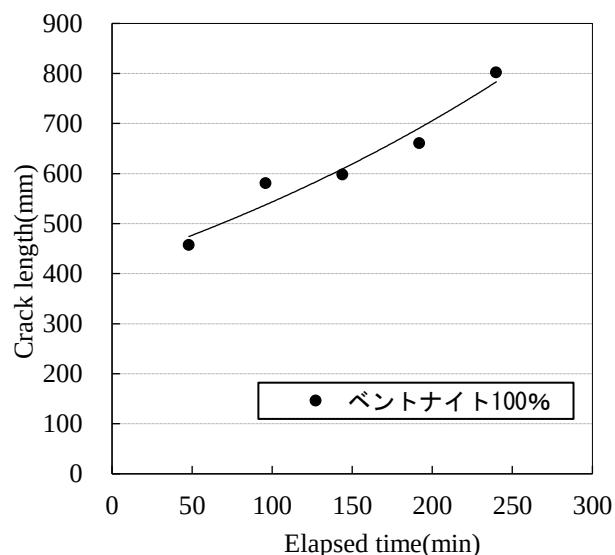


図-4 経過時間と亀裂進展長さの関係

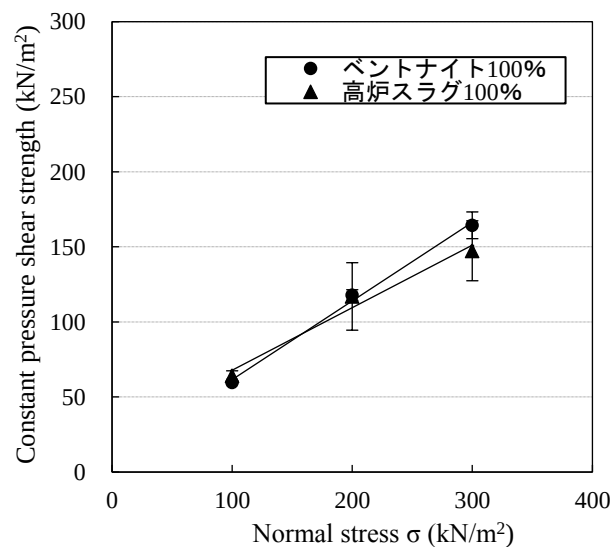


図-5 一面せん断試験結果

共役勾配法による地盤沈下シミュレータの高速化

琉球大学 ○大野 喬
松原 仁

1. はじめに

地盤の変形解析を行う際、広域な地盤の動態挙動を精度よく算出することが求められる。よって、大規模な計算が可能で、かつ高速な演算を可能とする地盤沈下解析プログラムを開発することが必要である。有限要素法で考えると、計算時間の最大のボトルネックは、連立一次方程式の解を導く部分であることはよく知られている。一般に、地盤の挙動を解析するためのコードでは、連立一次方程式の解法として三角分解法が用いられる。しかし、三角分解法では、膨大な計算時間がかかるうえに、多くのメモリを有する。そこで本研究では、地盤沈下プログラムの大規模化と高速化を指向し、連立一次方程式の求解法として、共役勾配法の適用を試みる。

2. 三角分解と共役勾配法

2.1 三角分解法

三角分解法について説明する。対象とするマトリクス A を、上三角マトリクス U と下三角マトリクス L に分解することを LU 分解という¹⁾。ここで、 $A = LU$ である。 LU 分解した行列で連立1次方程式を解くことを考える。 U は上三角行列であるので、後退代入していくことで解を求めることができる²⁾。

2.2 共役勾配法

連立一次方程式の求解法である共役勾配法について説明する。 $[A]\{x\} = \{b\}$ の係数行列 A が正値対称行列であるならば、その解 x を求めることは、以下の方程式の最小値探索と同等である。

$$f(x) = \frac{1}{2}(x \cdot Ax) - (b \cdot x) \quad (1)$$

ここで、記号($X \cdot Y$)はベクトルの内積を表す。 $[A]\{x\} = \{b\}$ を直接解く代わりに、任意の初期値ベ

クトル x_0 から出発し、方程式 $f(x)$ が減少するように逐次修正しながらベクトル $x_0, x_1, \dots$ を求め、求めた $f(x)$ を最小にする x を解とする方法を共役勾配法と呼ぶ³⁾。

2.3 三角分解法と共役勾配法の利点・欠点

直接法である三角分解は、あらゆる方程式に対して、原理的には厳密な解を求めることができる。しかし、式の変形により変数を消去していく方法であるため、マトリクスの非ゼロ要素に比べて、数倍の記憶容量が必要な場合があり、また、マトリクスの記憶量が大きくなるにつれて、演算量も大幅に増えてしまう。

一方、反復法である共役勾配法は、適当に選んだ初期値から計算を繰り返して反復的に近似解を求め、その解が十分に真の解に近づいたところで計算を打ち切って解とする方法である。したがって、演算量は直接解法と比較して少なくなる傾向にあり、さらに計算時間の短縮が期待できる。なお、本研究では、共役勾配法の前処理として対角スケーリング法を用いた。

3 数値解析例

図-1 に三角分解法と共役勾配法で解いた場合の地盤沈下量を示す。同図より、三角分解法で解いた場合と共役勾配法で解いた場合の沈下量はほぼ同じことがわかる。したがって、地盤の3次元弾塑性解析においても、三角分解法の代わりに、共役勾配法を用いることが可能であるといえる。図-2 に三角分解法と共役勾配法と前処理なしの共役勾配法のそれぞれの場合における計算時間と自由度の関係を示す。同図より、自由度が8000以下の場合には、三角分解法で解いた方が、共役勾配法で解くよりも速い。しかし、三角分解法で解

キーワード 共役勾配法, 三角分解法

連絡先 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字上原 207 番地 琉球大学工学部地盤工学研究室

E-mail e135310@eve.u-ryukyu.ac.jp

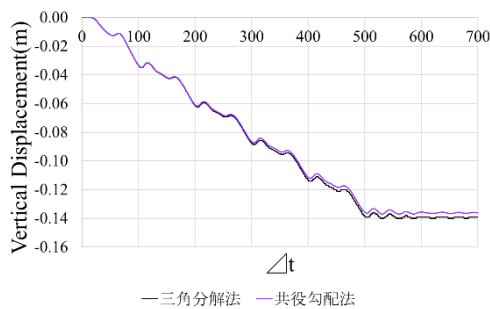


図-1 三角分解法・共役勾配法で解いた時の地盤沈下量

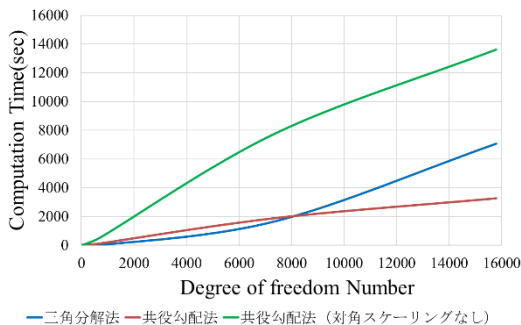


図-2 計算時間の比較

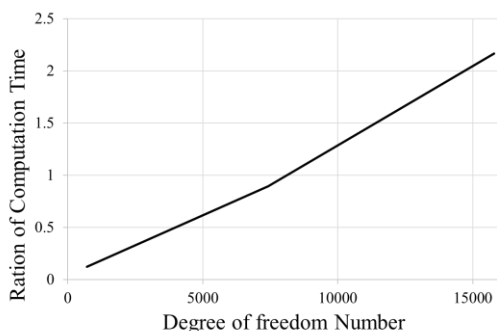


図-3 三角分解法の計算時間／共役勾配法の計算時間

いた場合の計算時間は、2 次関数的な挙動をしていることから、自由度が増えるに従って、計算時間の大幅な増加が懸念されている。

一方、共役勾配法で解いた場合の計算時間は、線形的な挙動を示すので、自由度が増えても、極端に計算時間が増えることはない。また、図-3 に三角分解法の計算時間を共役勾配法の計算時間で除した値の変化を示す。同図より、共役勾配法で解いた場合は、自由度が 15000 で 2 倍以上速く、自由度が増えるにつれて計算時間の差が拡大していることがわかる。また、対角スケーリングを前処理として行わない場合は、多くの計算時間を要しているものの、線形的な挙動を示しているの

で、自由度が増えた場合には、三角分解法で解くより計算は速くなると考えられる。

4 本研究のシミュレータの応用例

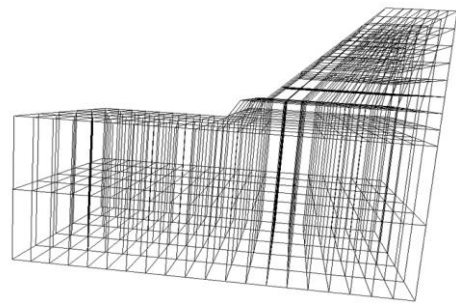


図-4 法面のモデル

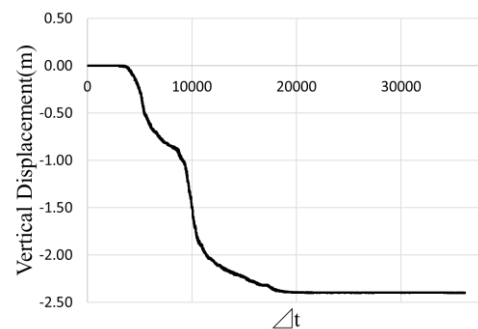


図-5 法肩の沈下量

ここでは、本研究で開発したコードの実問題への適用例を示す。図-4 と図-5 は、それぞれ法面の 3 次元メッシュモデルと、その法肩の沈下量を示している。法面は、広範囲な解析を必要とするために、自ずと大規模な計算になるが、本研究で開発したコードを利用することで計算時間が短くなり、比較的容易に変形解析を行うことが可能になった。

5 まとめ

本研究では、共役勾配法を用いることにより、地盤沈下プログラムを高速化することに成功した。高速化したことにより、大規模な解析の結果を、精度よく算出することができるようになった。

参考文献

- 1) 地盤工学会(2003)『弾塑性有限要素法がわかる』,p77-79.
- 2) 川上一郎(1989)『数値計算』,p.77-83,岩波書店.
- 3) 佐藤次郎,中村理一郎(2001)『よくわかる数値計算』,p72-73,日刊工業新聞社.

圧密時間が圧密特性値におよぼす影響に関する実験的研究

学生会員 琉球大学大学院 ○山路 伸悟

琉球大学 羽間 翔一

正会員

琉球大学 原 久夫

1 背景と目的

軟弱粘土地盤上に構造物を造る場合や、盛土をする場合には粘土地盤の沈下量や沈下の経過時間（圧密時間）を推定するために圧密試験が行われる。土の圧密試験方法としては、段階載荷による圧密試験方法 JIS A 1217（標準圧密試験）と、定ひずみ速度載荷による圧密試験方法 JIS A 1227（CSR 試験）が規定されている。CSR 試験では二次圧密の情報が得られない、ひずみ速度の違いによる時間効果を受ける、連続的な載荷と計測を高精度で実験できる試験装置が必要¹⁾だということもあり、一般的には標準圧密試験が行われることが多い。標準圧密試験は圧密圧力 p を 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280kpa の 8 段階で行う。1 段階で 24 時間圧密した後、次の段階に移るため、試験を終了するまでに 8 日間を要する。また、標準圧密試験から得られた圧密特性値を用いて圧密時間を推定するが、実地盤との差異がある²⁾。また Terzaghi の圧密理論では二次圧密沈下を説明できない。このような背景のもと、これまで圧密時間に関する研究として多くの成果が報告されている。

標準圧密試験より長期な圧密試験については、柴田は約 6 か月間の長期圧密試験を行っており、二次圧密量は時間の対数に比例して増加する³⁾と報告している。標準圧密試験より急速な実験については、酒井による実験があり、急速圧密試験結果に 5 要素一般化 Voigt

モデルを適用することにより、標準圧密試験と同等の沈下曲線を再現し、標準圧密試験と同程度の圧密特性値が得られる⁴⁾と報告している。一方原位置での圧密沈下では稲垣が 2011 年に神田試験盛土を事例とし、一旦収束に向かった沈下が速度を速める「沈下の加速化」や間隙水圧の上昇といった従来の圧密理論では説明のできない現象が観測されたこと⁵⁾を報告している。

著者らはこれまで試験時間の短縮を目的とし、1 段階での圧密時間(以下 T_s と記す)を短縮して実験をおこなってきた⁶⁾。また、 T_s を 8 日間と長くして実験を行った。この沈下曲線も一般化 Voigt モデルを用いることで再現することができた⁷⁾。本論文では T_s が 24 時間よりも短いものを急速圧密試験、長いものを長期圧密試験と記す。

本研究は、圧密沈下のメカニズムを解明することを目的にして、圧密時間が圧密特性値に与える影響を調べたものである。急速圧密試験、標準圧密試験、長期圧密試験の沈下曲線および圧密特性値の比較を行った。

2 実験方法

JIS A 1227 により標準圧密試験における一段階の圧密時間 T_s は 1440 分と定められている。本研究の目的は圧密時間が圧密特性値におよぼす影響を調べることにあるので実験では、 T_s を変更し圧密試験を行った。その際、

キーワード 島尻粘土, 圧密時間, 圧密特性値

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 E-mail : k148478@eve.u-ryukyu.ac.jp

温度と圧密特性値については、二次圧密時に温度を室温から高温にすると、圧密が促進され体積が収縮する⁷ということが報告されているので室温を20度に設定した。実験方法の概要を以下に示す。

2-1 再圧密島尻粘土

試料は沖縄本島中南部に広く分布する島尻層群泥岩を粉碎して用いた。供試体の差異を少なくするために、以下の手順で供試体を作成した。再圧密島尻粘土の物理特性を表1に示す。

1. 固結状態の島尻層群泥岩を木槌で打ち砕き、2000 μm ふるい通過分を水に浸す。
2. スラリー状の粘土を液性限界の2倍程度の含水比(105%)に調整して、攪拌機で十分に練り返す

3. 十分に練り返した試料を425 μm のふるいに通して、15cm径のモールドに静かに流し込み、圧密圧力50kPaで10日間、圧密する。
4. 圧密終了後のモールドからジャッキを用いて試料を取り出す。

表1 再圧密島尻粘土の物理特性

土粒子の密度(g/cm^3)	2.68
液性限界(%)	57.5
塑性限界(%)	20.8
塑性指数	36.7
砂礫分(%)	15.3
シルト分(%)	41.3
粘土分(%)	43.4
分類名	粘土(CH)

表2 実験条件・実験結果一覧表(室温20度)

No	実験名	一段階の圧密 時間 T_s (分)	初期間隙比 e_0	圧密試験終了後 の全ひずみ ε_f	圧縮指数 λ_e	圧密降伏 応力 p_y (kPa)
1	SH8m01	8	1.382	-0.3419	-0.0938	44.89
2	SH15m03	15	1.326	-0.3469	-0.1043	50.21
3	SH20m01	20	1.423	-0.3488	-0.0928	39.04
4	SH25m02	25	1.294	-0.3518	-0.1036	62.92
5	SH25m03	25	1.288	-0.3516	-0.1016	63.76
⑥	SH40m04	40	1.290	-0.3574	-0.1008	55.10
7	SH180m01	180	1.293	-0.3700	-0.1021	50.35
8	SH180m02	180	1.305	-0.3695	-0.998	45.09
9	SH360m01	360	1.257	-0.3673	-0.1013	47.74
10	SH360m02	360	1.255	-0.3546	-0.1002	54.06
⑪	SH720m02	720	1.310	-0.3672	-0.1034	53.89
⑫	1440m01	1440	1.423	-0.3977	-0.0995	36.68
13	LN8d01	11520	1.377	-0.3964	-0.1021	36.68
⑭	LN8d02	11520	1.391	-0.3994	-0.1027	33.96
⑮	LN28d01	40320	1.354	-0.4111	-0.1093	40.94

*○印については3-1に述べる。 λ_e については3-3に述べる。実験名のSHは一段階の圧密時間が1440分より短いことを表し、LNは1440分よりも長いことを表す。末尾の数字は実験小番号である。

2-2 T_s を変えた圧密試験

T_s を 8, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 180, 360, 720, 1440 分(標準圧密試験), 8, 28 日とした圧密試験とし 13 種類延べ 55 回の実験を行った。

3 結果と考察

以下に実験結果を示す。 T_s が圧密沈下量あるいは沈下速度におよぼす影響を中心に考察する。

3-1 実験結果一覧表：主系列の設定とデータの選択

実験データをまとめるにあたり、対数時間と間隙比の関係に注目し、55 回の実験データから $\lambda_e \sim e_0$ 関係図(λ_e は $e \sim \ln p$ 曲線の勾配)上ではばらつきの少ない 15 データを抽出した。さらに本文では図の繁雑さを避けるため、その中から 5 つの代表的なデータを用いて図表を作成している。15 データの実験条件・実験結果一覧表を表 2 に示す。○印の実験は、5 つの代表データである。

3-2 $e \sim \ln p$, $\varepsilon \sim \ln p$ におよぼす T_s の影響

初期(載荷前)の状態からの体積変化を累積ひずみ ε として次式(1)で示す。

$$\varepsilon = \ln \frac{1+e_i}{1+e_0} \cdots (1)$$

ここに、 e_i : 圧密 i 段階($i=1 \sim 8$)のひずみである。図 1 に T_s と $e \sim \ln p$ 曲線関係図、図 2 に T_s と $\varepsilon \sim \ln p$ 曲線関係図を示す。図 1 に示すように、 $e \sim \ln p$ 曲線におよぼす T_s の影響は、初期間隙比のばらつきが大きいため、確認できない。一方図 2 の $\varepsilon \sim \ln p$ 曲線では T_s が長いほど $|\varepsilon|$ が大きくなるという傾向を確認することができる。 ε は初期間隙比のばらつきの影響を受けないためである。したがって T_s の影響を考察するためには、 $\varepsilon \sim \ln p$ 曲線の方が適しているといえる。これは 3-7 でも述べるように二次圧密量の大小が関係しているためと考えられ

る。

3-3 $\varepsilon \sim \ln p$ 曲線から得られる圧縮指数 λ_e と T_s の関係

通常、圧縮指数 λ_e (以下 λ_e と記す)は $e \sim \ln p$ 曲線の勾配として求められる。ここでは、 $\varepsilon \sim \ln p$ 曲線を対象としているので、新たにこの $\varepsilon \sim \ln p$ 曲線勾配 λ_e を次式(2)で定義する。

$$\lambda_e = \frac{\ln \frac{1+e_{i+1}}{1+e_0} - \ln \frac{1+e_i}{1+e_0}}{\ln p_{i+1} - \ln p_i} \cdots (2)$$

圧縮指数 λ_e は T_s の影響を受け、 T_s が長くなれば λ_e の絶対値は(表 2 から)大きくなる。圧密荷重が大きいほど二次圧密による ε の値が大きくなっているために圧縮指数 λ_e の値が大きくなっているといえる。

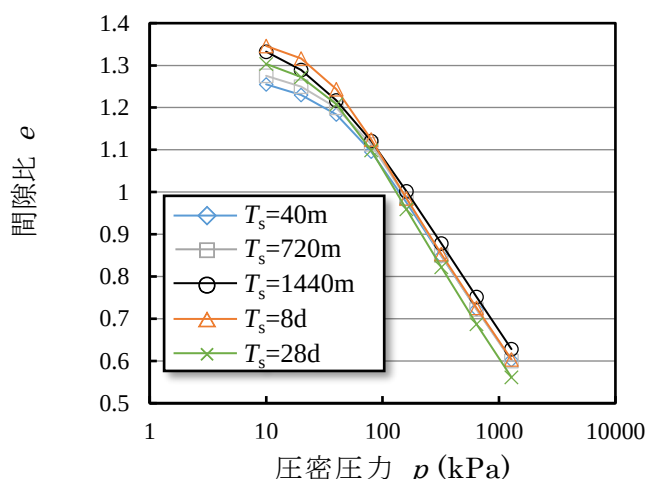


図 1 T_s と $e \sim \ln p$ 曲線関係図

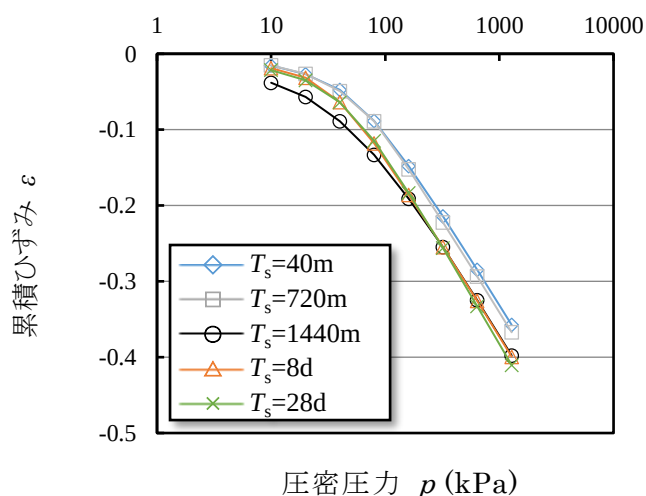


図 2 T_s と $\varepsilon \sim \ln p$ 曲線関係図

3-4 圧密沈下曲線におよぼす T_s の影響(正規圧密領域)

次に正規圧密領域における沈下曲線について考察する．図 3 に沈下曲線の一例として代表 5 データの第 7 段階目 ($p=640\text{kPa}$) の沈下曲線を示す．縦軸は沈下ひずみ(ε_i)で各段階において，生じた沈下ひずみである．図に示すように， ε_i は T_s の影響を受け，同時刻における沈下量は T_s が長いものほど小さくなる． T_s を長くした供試体は，3-7 で述べるように二次圧密ひずみが大きいため，間隙が密となり剛度が増加している．したがって次段階での载荷に対して，一次圧密ひずみは減少する．この影響は一次圧密が卓越する圧密初期に顕著となるので，結果として， T_s が長くなるほど沈下曲線は上にずれることになると考えられる．これは酒井⁴⁾と同じ結果を示している．

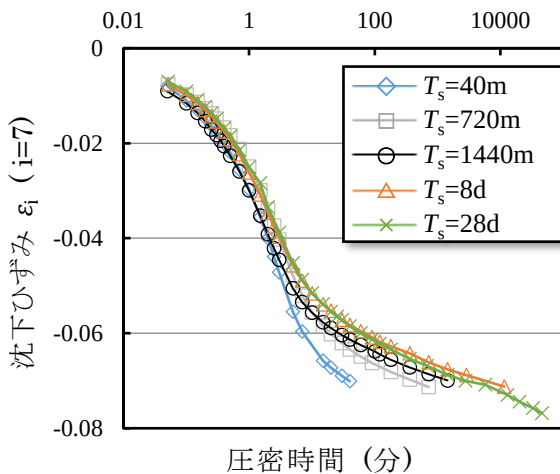


図 3 ひずみ沈下曲線 (7 段階目 [640kPa])

3-5 一次圧密比，体積圧縮係数，圧密係数と T_s の影響

図 4, 5, 6 にそれぞれ一次圧密比，体積圧縮係数，圧密係数と圧密圧力の関係を示す．図 4 から，正規圧密領域において， T_s が長くなると一次圧密比 r は小さくなることがわかる．これは， T_s が長くなると沈下変位量自体は大きくなっているにもかかわらず，一次圧密ひずみは小さく，二次圧密ひずみが大きくなっていることを表す．

体積圧縮係数は正規圧密領域では収束する傾向があることから，体積圧縮係数におよぼす载荷時間の影響は少ないものと考えられる．また，圧密係数は， T_s による明確な違いなどはみられなかった．

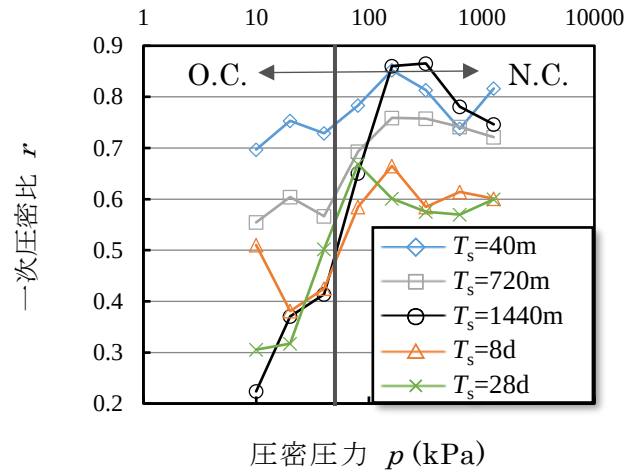


図 4 圧密圧力～一次圧密比関係図

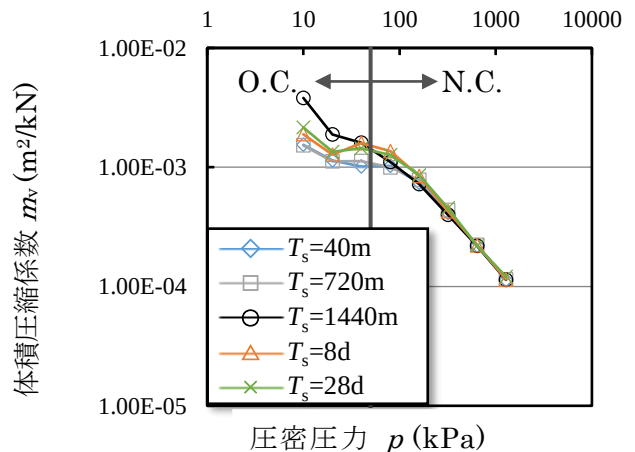


図 5 圧密圧力～体積圧縮係数関係図

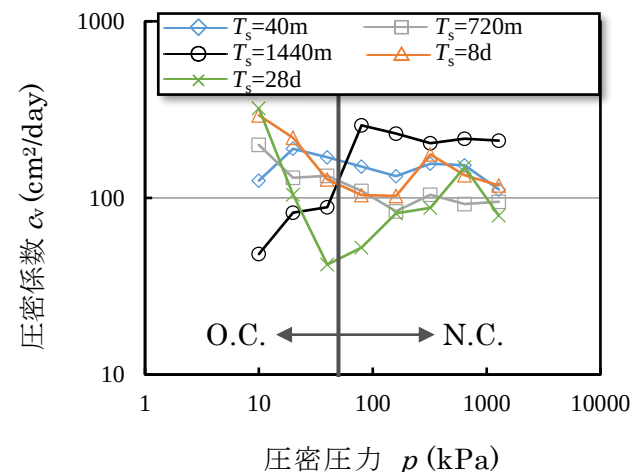


図 6 圧密圧力～圧密係数関係図

3-6 一次圧密沈下曲線におよぼす T_s の影響

T_s が変化すると ε_i も変化することは 3-4 に示した通りであるが, ε_i に占める一次圧密ひずみ ε_i^p と二次圧密ひずみ ε_i^s に区分してそれぞれの沈下特性を把握することが重要である。ここで各沈下量の関係は次式(3)に示すものである。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^p + \varepsilon_i^s \cdots (3)$$

次に ε_i^p による一次体積圧縮係数 m_v' を(4)式で定義する。

$$m_v' = \frac{\varepsilon_i^p(\text{最終})}{\Delta p_i} \cdots (4)$$

(4)式による m_v' と p の関係を代表 5 データについて図 7 に示すが, 図に示すように T_s が長くなると m_v' は小さくなることが分かった。

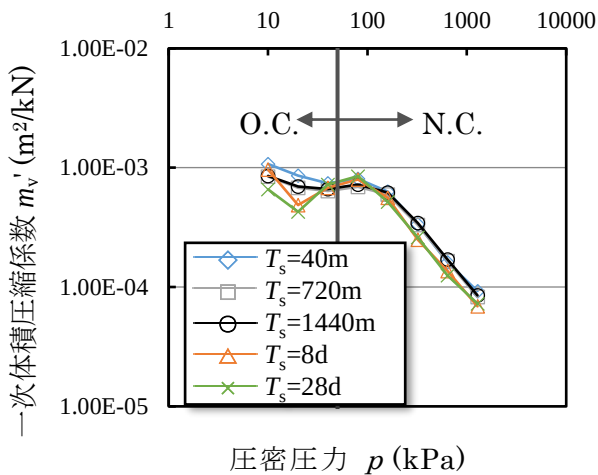


図 7 圧密圧力～一次体積圧縮係数関係図

m_v' および c_v から計算される一次圧密ひずみ ε_i^p 曲線を図 8 に示す。一次圧密ひずみは正規圧密領域において, T_s が長くなるほど小さくなる傾向がある。

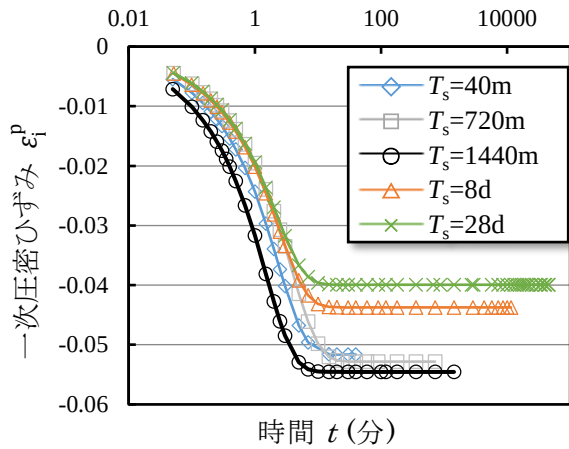


図 8 一次圧密ひずみ曲線(7 段階目 [640kPa])

3-7 二次圧密ひずみ曲線におよぼす T_s の影響

二次圧密ひずみ ε_i^s は次式(5)によって求められる。

$$\varepsilon_i^s = \varepsilon_i - \varepsilon_i^p \cdots (5)$$

ε_i^s の沈下曲線を図 9 に示す。 T_s が長くなると ε_i^s は大きくなる。

二次圧密ひずみ曲線の前半部分は直線で近似でき, この直線から逸脱する後半部分は二次曲線で近似できることがわかった。図 9 の関係式を求めたものを表 3 に示す。

表 3 二次圧密曲線の関係式

直線部分(前半)			二次曲線部分(後半)		
T_s (分)	切片 a_0	勾配 a_1	切片 a_0	一次係数 a_1	二次係数 a_2
40	-5.47E-03	-9.87E-04	1.21E-03	-6.61E-03	3.42E-04
720	-5.47E-03	-9.22E-04	5.68E-03	-5.29E-03	2.44E-04
1440	0.85E-03	11.3E-04	9.28E-03	-5.20E-3	2.50E-04
8d	-5.74E-03	-9.89E-04	1.89E-03	-5.18E-03	2.22E-04
28d	-5.52E-03	-10.7E-04	-3.21E-03	-4.47E-03	1.32E-04

※ $\varepsilon_i^s = a_0 + a_1 \log t$ (前半)

$\varepsilon_i^s = a_0 + a_1 \log t + a_2 (\log t)^2$ (後半)

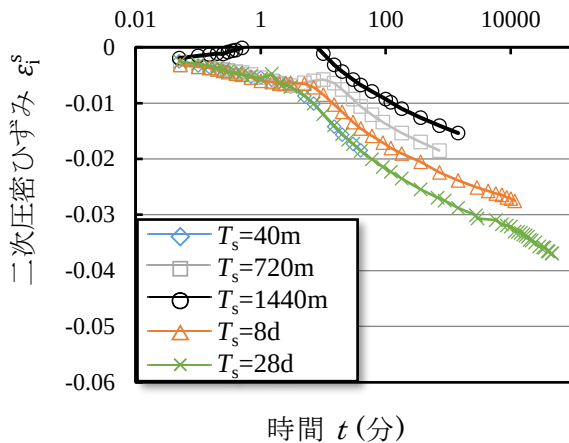


図9 二次圧密ひずみ曲線(7段階目[640kPa])

4 結論

本研究では、一段階の圧密時間 T_s を変更して実験を行ってきた。 T_s を変更させたことによって圧密特性値に与える影響についてまとめる。

T_s が圧密特性値におよぼす影響を考える際には $e \sim \ln p$ 曲線より $\varepsilon \sim \ln p$ 曲線の方が適している。

沈下量について

- λ_e は T_s が長くなるほど大きくなる。
- T_s が長くなると m_v' は小さくなる。
- T_s が長くなると ε_i は大きくなる。
- T_s が長くなると一次圧密比 r は小さくなる
- m_v は T_s に影響されず正規圧密領域において収束する。

二次圧密ひずみについて

- 正規圧密領域において T_s が長くなると ε_i^p は小さくなる。一方で ε_i^s は大きくなる。
- 二次圧密曲線の前半部分は直線で近似でき、この直線から逸脱する後半部分は二次曲線で近似できる。
- 実地盤では何十年という年月、圧密が行われるので、24時間の載荷時間では二次圧密ひずみ量を過小評価している。

今後の課題

- 標準圧密試験，急速圧密試験から長期圧

密試験の沈下値を予測することをこれからの目的とし実験を進めていく。二次圧密まで再現することが沈下量の予測結果向上につながる。

参考文献

- (1) 社団法人地盤工学会：土質試験基本と手引き第二回改訂版，pp.103-117，2010.
- (2) 今井五郎：実務における標準的な圧密試験その目的・役割と今後 Standard Consolidation Tests in Practice Their Purpose, Role, and Future 土と基礎 54(2), pp.18-21, 2006.
- (3) 柴田徹：粘土の圧密に関するレオロジー的考察，土木学会論文集 vol.1960(1960)No.69 pp.29-37, 1960.
- (4) 酒井康司：一次元圧密沈下解析に対する多要素 Voigt モデルの適用性に関する研究，琉球大学修士論文，2013.
- (5) 稲垣太浩：盛土載荷に伴う自然堆積粘土地盤の長期大沈下の簡易判定法の提案と予測・対策に関する研究，名古屋大学博士論文，2011.
- (6) 酒井康司，原久夫：圧密速度が圧密特性値に与える影響に関する実験的研究，土木学会西部支部研究発表会 /III-58，pp.463-464，2011.
- (7) 吉中淳，宮城弘季，原久夫：土の粘性を考慮した圧密沈下量に関する研究，第5回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会，pp.169-175，2016.
- (8) 上俊二，藤原東雄，勝村雅子：二次圧密時に温度効果を受けた粘土の圧密特性

第四期琉球層群の不整合面における特徴的な浸食形態

琉球大学学部 ○ 崎山 浩考
琉球大学大学院 広瀬 孝三郎
琉球大学 松原 仁

1. はじめに

堆積学における不整合面とは通常、地殻変動などにより侵食を受けた堆積岩の表面にさらに堆積物が沈殿することで生じる境界面を意味する。このような不整合面ではたびたび岩盤崩落や地すべり等が発生する。例えば、地中海西部で発生した海底地すべりは中新世末期の不整合の浸食面から生じたとされる¹⁾。このような不整合面では岩盤崩落が発生する危険性を孕んでおり、今後不整合面に関する評価手法の構築が必要不可欠であると考えられるが、未だ達成されていないのが現状である。

そこで本研究では、南西諸島に位置する西表島で発見された大浜層と名蔵層の間で発達している不整合面を対象とする。この不整合面では、図-1 に示すように、堆積岩の層離面に複数の柱状の岩石(以後、Column と呼ぶ) が形成されており、数十メートル離れた地点では、図-2 に示すように、Column のみが残されている状況が確認された(図-1 が見られる地点をエリア A、図-2 の地点をエリア B とする)。このような Column が不整合面に生じている事例は極めて珍しく、非常に興味深い。本研究の目的は、不整合面に現れた Column の形成メカニズムをフィールド調査、物性試験、SEM-EDS 分析及び X 線回折法から解明することである。

2. 調査及び分析方法

現地踏査から目視により周囲の地形状況と環境特性を把握し、撮影した写真から岩石の形状を画像解析により測定した。加えてシュミットハンマーを用いた反発度から岩盤表面の強度特性を判定した。また堆積岩の各層から採取した岩石から pH の測定、X 線回折装置による岩石を構成している鉱物の同定、



図-1 第四期琉球層群で見られる不整合 (エリア A)



図-2 図-1 の近くに存在する Column の集合 (エリア B)

SEM-EDS による岩石の構造・元素分析を行い、岩種を判定した。

3. 調査及び分析結果

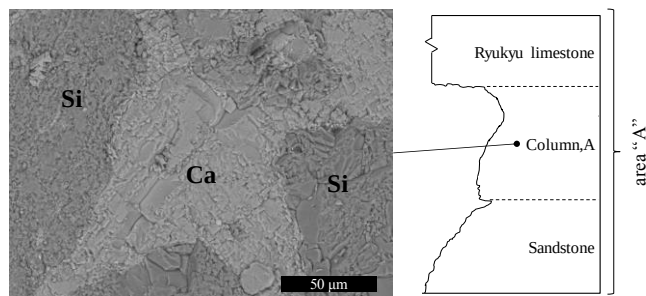
Column の形状は各エリアで多少異なり、エリア A では円錐台、エリア B では多角形の Column が形成されていたが、Column が等間隔に配置している点は共通していた。画像解析ソフトを用いてエリア B における各 Column 上面の角度を測定したところ、主に 90°付近に集中していることが分かった。また強度測定及び pH 測定からはエリア A とエリア B それぞれの Column において共に高い強度、pH を示した。加えて Column の強度はエリア A の琉球石灰岩の強度と類似していたが、Column 表面の粗さは下層に堆積する砂岩と非常に酷似している。

さらに各エリアの Column の鉱物組成を比較してみると、どちらも石英と方解石を主成分とする岩石であることが分かった。また SEM 画像分析によると、Column の間隙はカルシウムで構成された鉱物で

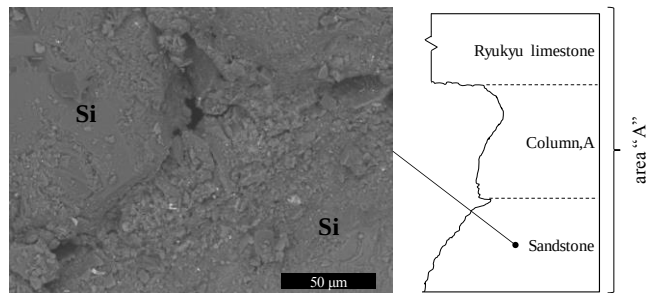
キーワード 不整合面, Column, Sandcrack

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科

E-mail : e135301@eve.u-ryukyu.ac.jp



(a) Column,A



(b) 砂岩(Sandstone)

図-3 エリア A の元素分析(Si:ケイ素 Ca:カルシウム)

満たされている一方、下層に堆積している砂岩の間隙にはそのような構造は見られなかった(図-3(a),(b))。したがって、この間隙を満たしている膠結物質は、Column の鉱物組成の結果より方解石であると考えられ、これが強度を高めていた原因と考えられた。

4. 考察

Column の起源について着目すると、方解石による膠結作用は二次的な作用であるため、初期は砂岩であったと推察した。図-2 に示すような複数の Column が等間隔に配置している形状は、膠結作用が影響する以前にもたらされた浸食作用によると考えられ、その地質学的事例として Sandcrack が挙げられる。

Sandcrack は砂地盤で生じる亀裂であり、波の影響を比較的受けない後浜で発生する。バハマのキャット島では Sandcrack によって最大 68 cm の直径を有する Column 状のブロックを生成しており、これは西表島で確認された Column と比較しても相違ない規模である²⁾。Sandcrack にみられる特徴として、亀裂同士が 90°及び 120°に交差することが挙げられる。前項に述べた分析結果から西表島においても同様の特徴を有していることが分かる。

したがって、本研究で発見された Column は



(a) 層厚 1 cm (b) 層厚 3 cm (c) 層厚 5 cm

図-4 各層厚における亀裂パターン(室温:21℃, 湿度:65%)

Sandcrack によって発生したと考えられ、現地の砂粒子によって亀裂が発生する様子を観察するために実験的検討を行った。層厚を 1 cm, 3 cm, 5 cm に分け、繰り返し乾燥-湿潤プロセスによる実験を行った結果、図-4 に示すような結果が得られた。層厚 1 cm 及び 3 cm からは目立った亀裂は確認できなかったが、5 cm の層厚からは複数の亀裂が発生し、Column 状のブロックも生成された。

5. おわりに

本研究では、第四期琉球層群の不整合で観察された Column を対象に調査及び分析を行い、Sandcrack による浸食作用が不整合面の一因であると推察した。今後は、発生メカニズムの更に明確化し、そして解析的手法を用いた不整合面から生じる岩盤崩落や地滑りといった自然災害の評価手法の構築を行う。

参考文献

- 1) Cristian Berndt et al.: Repeated slope failure linked to fluid migration: The Ana submarine landslide complex, Eivissa Channel, Western Mediterranean Sea, *Earth and planetary science letters*, vol.319-320, pp.65-74, 2012
- 2) Bosiljka Glumac et al.: Polygonal sandcracks: Unique sedimentary desiccation structures in Bahamian ooid grainstone, *Geology*, vol.39, pp.615-618, 2011

玄武岩質枕状溶岩に残された微細構造の数値モデリング

琉球大学学部生
琉球大学

○宮城 圭汰
松原 仁

1. はじめに

南アフリカのバーバトン緑色岩帯において、地質年齢35億年の枕状溶岩内部の火山ガラスから微生物活動の痕跡と思われる微細な管状構造が数多く発見されており、内部にチタン石が沈殿することにより長期間保存されてきた。また、管状構造の壁面から生命活動の痕跡である炭素同位体(δ^{13})の値も見つかり、微生物による管状構造の形成が有力とされている¹⁻²⁾。

しかしながら、微生物に起因する管状構造は糸状菌という単一生物によるもので、管状構造を形成する、明確な理由が明らかにされておらず、決定的な証拠とはなっていない。

そこで管状構造は微生物によるものではなく、熱変成作用の逆反応による化学反応によってチタン石が生成され、それが管状構造であるという可能性が指摘されている³⁻⁴⁾。また管状構造形成に約1000年の歳月を要することが予想され、実験室での再現が困難だとされており両者の論争が続いているのが現状である。

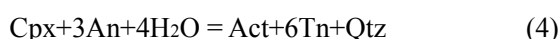
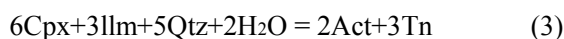
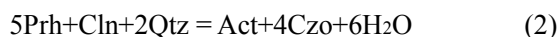
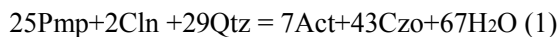
そこで本研究では、熱変成作用の逆反応による管状構造の発生現象を反応拡散方程式によって数値モデル化し、数値シミュレーションにて表現することにより、微細な管状構造の形態学的特徴を計算力学的な観点から見出し、その発生要因を明らかにすることを目的とする。

また地質年齢35億年の岩盤内部における微細な風化形態を解明することにより過去から現在までの風化形態の違いを見出し、未来における岩盤風化を予測することができるため、本研究は工学上極めて重要であることを明記しておく。

2. 化学反応による管状構造形成モデル

玄武岩質火山ガラスや無水鉱物は熱変成作用の逆反応によって不安定になり、緑泥石や石英、チタン石などの鉱物に変換される。チタン石はその仮定で反応拡散し、チタン鉄鉱が減少しながら生成することが分かっている。

チタン石が生成される式は、次式にて表すことができる³⁾。



ここで、Pmp:パンペリー石、Cln:クリノクロア Act:緑閃石、Ilm:チタン鉄鉱、Czo:緑簾石、Prh:ブドウ石、Cpx:単斜輝石 Qtz:石英、Tn:チタン石、An:灰長石とする。

本研究ではこれらの式を反応拡散系でモデル化を行ったが、実験による反応速度係数や拡散係数などを求める事が困難なため、それぞれ任意の値を用い、無次元量とした。

なお本研究ではチタン鉄鉱及びチタン石の反応に着目するため、チタン石生成が発生する式(3)のみを用いて計算を行った。

3. 化学反応による管状構造形成シミュレーション 3.1 数値解析モデル

本研究では、前章にて示した式を定式化し、数値モデルを差分法にて離散化した。解析領域は正方領域で 0.2×0.2 の二次元モデルを仮定した。このモデルの総格子点は10201、境界条件はモデルの上下左右にNeumann条件を設定した。

モデル領域内にチタン鉄鉱を濃度1.0、単斜輝石、石英、 H_2O の濃度はそれぞれ0.0~1.0の乱数で初期値を設定した。

式(3)を反応拡散方程式でモデル化した際に反応速度係数を k_1 , k_2 と定め $k_1=5.0$, $k_2=1.0 \times 10^{-8}$ とした。また H_2O 及び鉱物中の原子も拡散すると仮定して、 H_2O の拡散係数を $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ 、チタン鉄鉱及びチタン石を $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ 、単斜輝石及び石英を $1.0 \times 10^{-11} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ の乱数を用いて仮定した。また反応によって生成する、緑閃石、緑簾石、チタ

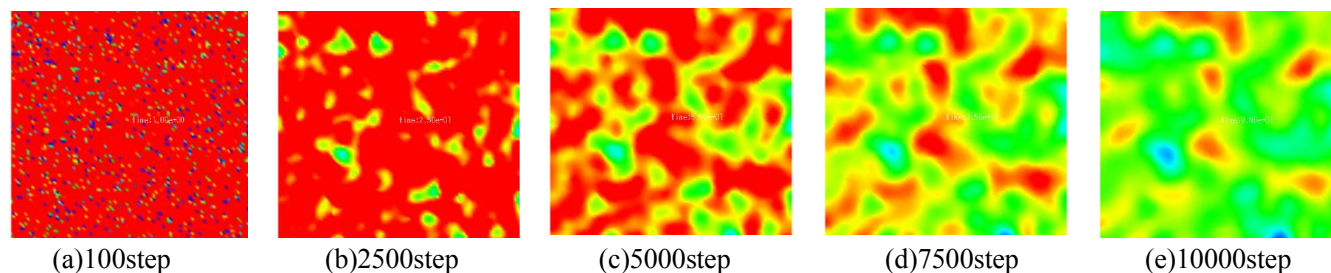


図 1 チタン鉄鉱の時間ステップ別濃度

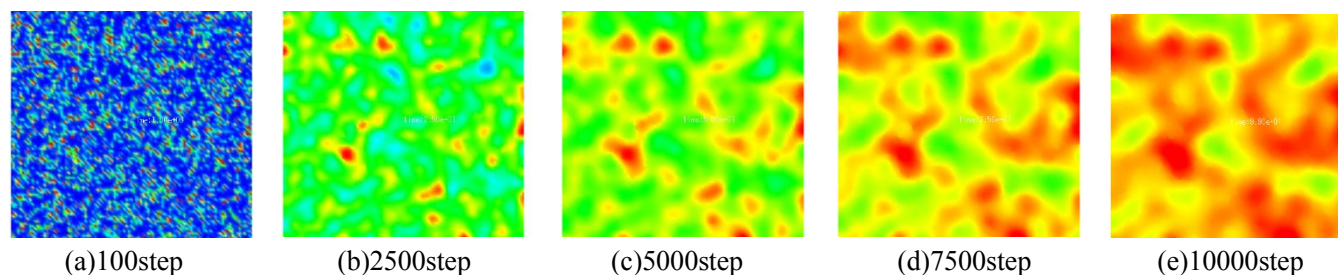


図 2 チタン石の時間ステップ別濃度

ン石については，初期濃度を 0 とし，鉱物同士の反応でのみ生成されるようにした。

3.2 解析モデルの結果と考察

チタン鉄鉱，チタン石の，石英の濃度変化をそれぞれ図 1，図 2，に示す．解析ステップの増加による図中のカラーグラデーションは濃度の大きさを示しており，青から赤に変わるにつれて低濃度から高濃度に変化したことを意味する．また解析ステップの図をそれぞれ 100，2500，5000，7500，10000step ごとに示す．

図 1 に示すようにチタン鉄鉱はステップごとに濃度が減少していく様子が確認できる．またチタン石は図 2 に示すようにステップごとに濃度が上昇しながら管状構造を形成している様子が確認できる．

これらのことから管状構造は化学反応によって，チタン鉄鉱が減少しながらチタン石が生成されることによって生み出される可能性が考えられる．

またチタン鉄鉱の反応による濃度減少，及びチタン石の生成による濃度上昇はどちらも最大で 0.1 しか変化しておらず，管状構造の形成には長い時間がかかることが予測される．

以上のことから，南アフリカのバーバトン緑色岩帯において発見された 35 億年前の微細な管状構造は岩石の熱変成作用によってもたらされたと考えられた。

4. おわりに

本研究において，2 章で示した化学反応による管状

構造形成モデルは多くのパラメータを含んでおり本計算例はその一例である．したがって今後の展開としてはパラメータサーベイを多く実施し，実際に起こっている現象を明らかにしなければならない．

また微生物による管状構造形成についても数値モデル化し数値シミュレーションを行い，それぞれの結果から比較解析によって発生要因の検討を行なわなければならない．

参考文献

- 1) Harald Furnes Neil R. Banerjee, Karlis Muehlenbachs, Hubert Staudigel, Maarten de Wit: Early Life Recorded in Archean Pillow Lavas, Vol.304, pp.578-581, 2014.
- 2) Hubert Staudigel, Harald Furnes, Nicola McLoughlin, Neil R. Banerjee, Laurie B. Connell, Alexis Templeton, :3.5 billion years of glass bioalteration, Volcanic rock as a basis for microbial life? Vol.89, pp.156-176, 2008.
- 3) Eugene G. Grosch and Nicola McLoughlin, : Reassessing the biogenicity of Earth's oldest trace fossil with implications for biosignatures in the search for early life, vol.111, pp.8380-8385, 2014.
- 4) Eugene G. Grosch, Manuel Munoz, Olivier Mathon, Nicola McLoughlin : Earliest microbial trace fossil in Archean pillow lavas under scrutiny: new micro-X-ray absorption near-edge spectroscopy, metamorphic and morphological constraints.

八重山層群に見られる剥離状風化と微生物活動の関連性

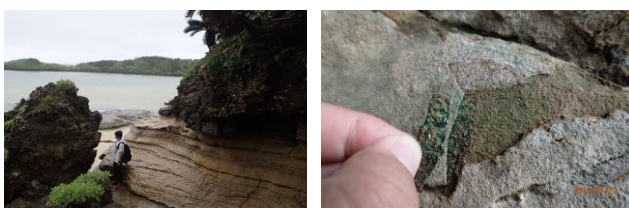
琉球大学大学院
琉球大学大学院
琉球大学

○岩崎 竜馬
広瀬 孝三郎
松原 仁

1. 背景と目的

沖縄県八重山諸島の沿岸部には観光地が点在しており、多くの人々が訪れる。しかし、沿岸部の岩盤路頭は激しく風化しているものも見られ、落石または岩盤の崩落している箇所も確認され（図-1(a)）、訪れた人々に被害が及ぶ可能性が懸念される。これらの現象はこれまで主に岩盤の力学的要因の風化作用が原因として研究・検討がなされてきた。しかしながら、西表島の沿岸部八重山層群岩盤表面では剥離状の風化が見られ、剥離した岩石の下にバイオマットの層が確認された（図-1(b)）。既存の研究により微生物が岩盤の風化に影響を与えることは明白となっているが 1) 2) 3)、八重山層群における微生物風化の影響は未だ検討されていない。

そこで本研究では、バイオマットによる剥離的な風化が確認された西表島白浜地区の岩盤を対象にサンプリングを行い、サンプル試料の X 線粉末回折解析および SEM 解析を用いて、八重山層群に微生物活動が及ぼす風化を検討・考察する。



(a) 崩落した岩盤

(b) 確認されたバイオマット層

2. サンプリング場所と解析方法

本研究では西表島北部の海岸線に沿うように立つ岸壁を対象にサンプリングを行った。岩盤表面の砂

岩層とその直下のバイオマット層が付着した状態の岩石サンプルを取得した。取得したサンプルは粉末状にし、X 線粉末回折解析を行い、岩石サンプルの鉱物組成を解析した。一方で砂岩層とバイオマット層の接触断面を SEM で観察し、元素マッピング解析を行った。

3. 解析結果と考察

X 線粉末回折解析の結果を図-2 に示す。鉱物のピークは石英(SiO_2)に集中しており、この岩石サンプルの主成分は石英(SiO_2)であることが分かる。石英を主成分とする砂岩は Budel らによりシアノバクテリアによる生物的風化が促進的に行われる鉱物とされ 1)、生物的な風化が起こりやすい試料ということが確認できる。SEM によって観察した断面及びその元素マップを図-3 に示す。図-3 の元素マップに着目すると石英(SiO_2)で構成される砂岩層と炭素 (C) が集中するバイオマット層に分かれていることが確認される。また、砂岩層とバイオマット層の境界部分に着目すると、砂岩層に向かってバイオマット層が穿孔的に侵入する箇所が見受けられた（図-4(a), (b)）。これは微生物が生命活動に必要な要素を求め、石英(SiO_2)に向かって選択的に穿孔していると考えられる。

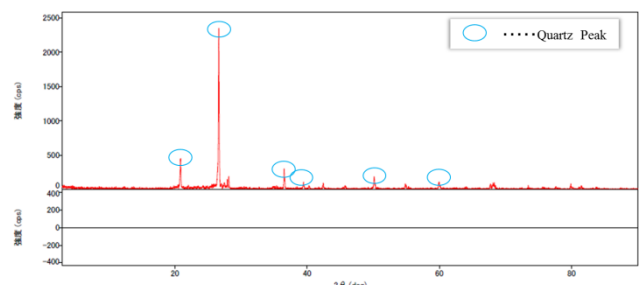


図-2 サンプルの X 線粉末回折解析

キーワード 微生物風化, 剥離風化, 八重山層群,
連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科
E-mail: k168483@eve.u-ryukyu, ac. jp

また、上島雅人氏らの研究によると植物やバクテリアの分泌するシュウ酸には Si を溶脱する効果があることが分かっている²⁾。以上のことから、本サイトで見られた剥離状の風化は、まず砂岩層に侵入した微生物(図-5(a))は石英(SiO_2)から生命活動に必要な要素(Si)を摂取しながらコロニーを拡大させていき(図-5(b)), 砂岩層直下にバイオマット層を形成する(図-5(c)). やがて、拡大したバイオマット層から Si を溶脱され軟弱化した砂岩層は自重を支えきれなくなり剥離状の風化を起こすと考察できる(図-5(d)).

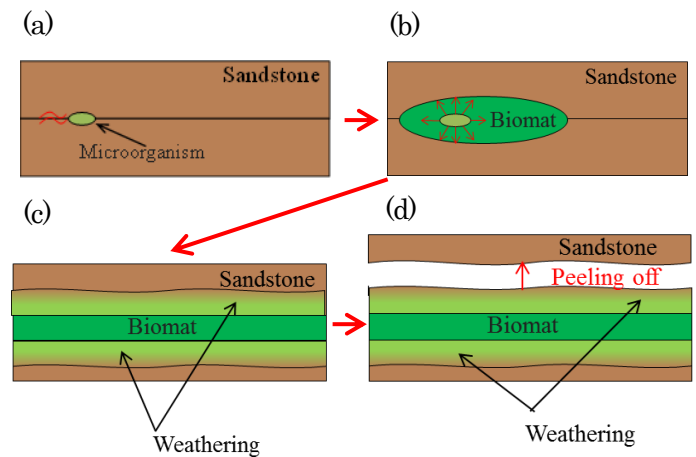


図-5 微生物による剥離風化メカニズム

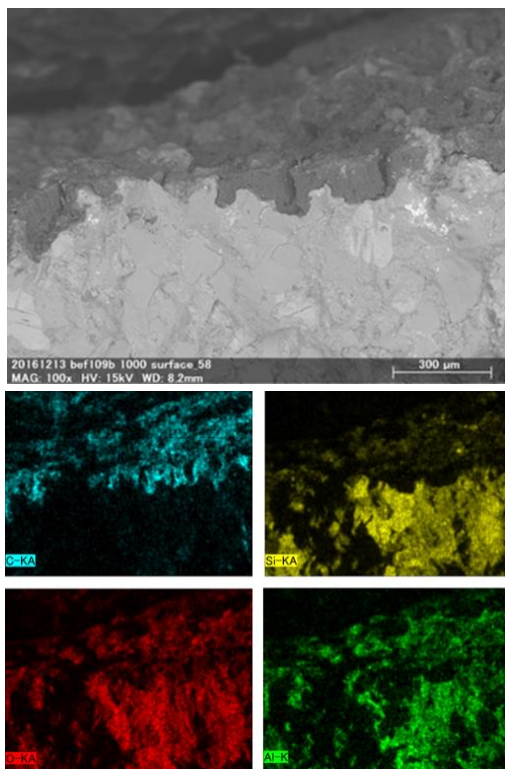


図-3 サンプル断面の SEM 画像 (×100)
および元素マップ画像

4. おわりに

本研究から、微生物は生命活動のため選択的に生命要素を求め、岩盤を浸食し風化をもたらしていることが考察された。短いスパンでみれば微生物による風化速度は微小であるが、微生物の生命起源は長く、現在の岩盤が微生物によってどれだけ風化されているのかは未知数である。そのため、微生物が岩盤に及ぼす風化作用を無視することはできないと考える。

本研究では、石英(SiO_2)に剥離状の風化形態を与える微生物の特定には至っておらず、また、剥離状風化に対する塩類風化および力学的風化の影響を考慮していない。

今後の課題として石英(SiO_2)に影響を及ぼす微生物の特定 (DNA 解析), 実験的観点から塩類風化や力学的風化の剥離状風化に対する関連性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Budel et al. , 2004 - Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria - bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes.
- 2) 上島雅人・田崎和江, - 花崗岩中のカリ長石および黒雲母の微生物風化, 粘土科学 第38巻 第2号 68-82(1998)
- 3) W. Song, N. Ogawa, C. T. Ogucti, T. Hatta, Y. Matsukura, - Effect of bacillus subtilis on granite weathering : A laboratory experiment (2007)

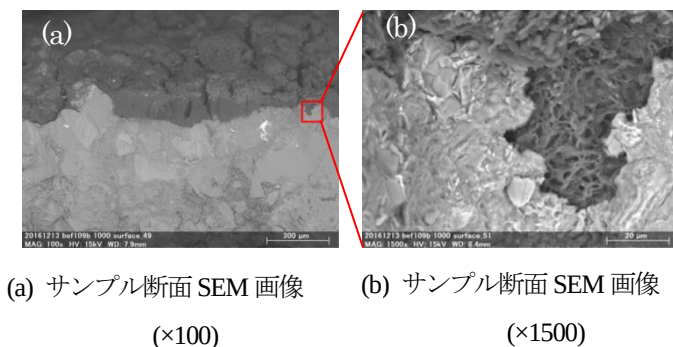


図-4 微生物の穿孔的浸食

石灰岩のマルチフィジックス生成作用に関する一考察

琉球大学
琉球大学
琉球大学

学生会員
学生会員
正会員

○大城 勇人
広瀬 孝三郎
松原 仁

1. はじめに

地盤工学の観点から、人間生活の安心・安全を脅かす事象として、落石、地盤陥没、地すべり等が挙げられる。これらの多くは地盤の風化と密接に関わっており、研究対象として扱われることが多く、多岐にわたるアプローチにて風化機構やその発生要因の研究がなされている。

しかし、地盤は一定のサイクルで破壊と再生、すなわち風化と生成を繰り返しながら絶えず変化する。例えば、石灰質地盤の場合、雨水による石灰岩の風化（溶解）作用で鍾乳洞のような地下空洞が発達する。一方で、石灰岩層を通過した地下水は、洞内または地表に湧出する際に、鍾乳石やトウファ（淡水成炭酸塩岩）を生成する。つまり、地盤の風化と生成は表裏一体の関係であり、風化作用のみならず、生成作用の機構と発生要因を含めて検討することは、深淵かつ体系的な地盤特性の評価に繋がるため地盤工学的にも極めて重要な事項である。

しかしながら、上記の機構で生成される石灰岩は、マルチフィジックスなプロセスが作用しているため、その要因に対する理解が十分であるとは言いがたい。特に、石灰岩の生成に関する生物的影響は、そのメカニズムが複雑であるがゆえに未だ手付かずの状態と言っても過言ではない。

そこで本研究では、地下ダムからの越流水が湧出する岩盤露頭にて、実際に石灰岩の生成が確認できたため、その石灰岩を対象として、水分分析、鉱物の組成分析及び構造分析等を実施し、石灰岩のマルチフィジックス生成作用に関して考察した。

2. 研究サイトと試料の試験方法

2.1 研究サイト

沖縄県八重瀬町慶座地区には農業用水の取水効率化を指向して建設された地下ダムの止水壁がある。その南側約 180 m の露頭岩盤からは、地下ダムの浸透水及び越流水が湧出しており（図-1）、現地では、石灰岩の生成が確認できる。地下ダムは、農業地帯の地下に建設されており、湧水は土壌由来の二酸化炭素やカリウム、窒素、硫黄を多く含んでいる。

2.2 試料のサンプリングと試験方法

本研究では、湧水点から直線距離約 5m の壁面に生成している岩石をサンプリングした（図-2）。同時



図-1 岩盤露頭の湧水点

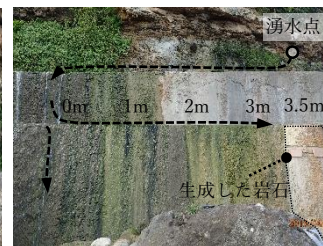


図-2 生成した岩石周辺の様子

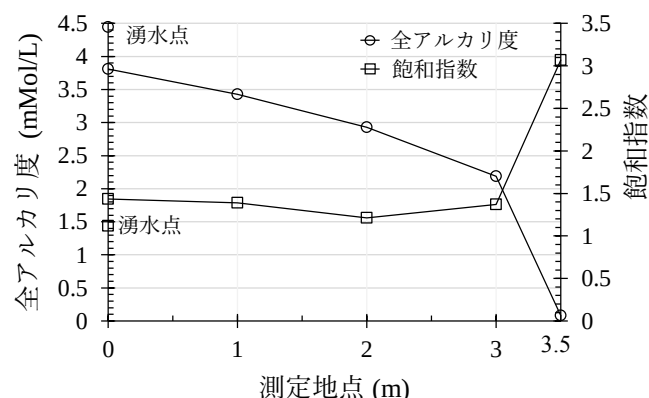


図-3 全アルカリ度及び飽和指数の変化

に水分分析用の水 100 ml も採取した。これらのサンプルを用い、以下に挙げる試験を実施した。

i) 湧水の水分分析：

本研究サイトの湧水は石灰岩層を通過してくるために、水分中に多くの炭酸カルシウムを含む。そこで、湧水が炭酸カルシウムの生成/溶解に及ぼす影響を定量的に判断する指標として、飽和指数を導入し、湧水点および岩石の生成場所周辺の飽和指数の変動を算出した¹²⁾。

ii) 岩石の SEM 画像解析：

走査型電子顕微鏡を使用し生成岩石の表面および内部の微細構造を観察した。

iii) 岩石の組成分析：

粉末 X 線回折装置を使用し、生成した岩石に含まれる鉱物の組成を測定した。

3. 結果及び考察

3.1 湧水の水分分析

図-3 に全アルカリ度及び飽和指数の変化を示す。飽和指数の値は、湧水時点で 1.13 であったが最終的に 3.16 まで増加し、岩石の生成場所が、生成作用に適している環境（理論値で、飽和状態の約 1445 倍過飽

キーワード 石灰岩、生成、岩内微生物、光合成活動、結晶成長

連絡先 〒903-0123 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail: e135326@eve.u-ryukyu.ac.jp

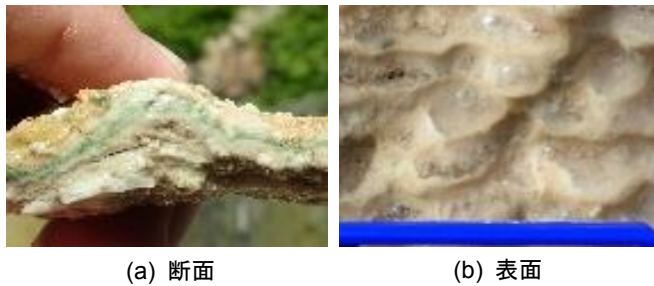


図-4 生成した岩石の様子

和に達している)であることが確認された。なお、値が正かつ大きいほど生成されやすい。

また湧水の pH は、湧水点から岩石の生成場所にかけて 7.71 から 11.45 に増加していた。これは、物理学的な脱ガスや生物学的な光合成等の影響によるものと考えられる。また、全アルカリ度が低下した理由は、pH と全アルカリ度の間に成立する電離平衡にあり、pH の増加と共に炭酸水素イオンが炭酸イオンに、解離したことが考えられる。

さらにサンプリングした岩石断面には、明暗のコントラストを繰り返す層位構造が形成されていた(図-4(a))。また、岩石の表面下 2-3mm の位置には緑色の層があり、緑藻またはシアノバクテリア層だと考えられる。この地点では、全アルカリ度の結果から水の pH に対する緩衝能力が低下しているため、微生物代謝によるアルカリ化の影響も石灰岩の生成作用の要因として、密接に関与していることが示唆された⁴⁾⁵⁾。

3.2 SEM 画像解析

図-5 には、サンプル断面(図-4(a))の表層と緑層に対して実施した SEM 画像解析の結果を示す。

岩石の表層では、藻類と思われるフィラメント状の有機物が鉱物粒子と絡み合うように、ネットワークを形成しているのを確認した(図-5(a))。この様子は、岩石内部の緑層でも同様に確認された。しかし緑層では他にも、鎖状に連なった微粒子が鉱物粒子を取り巻くようにネットワークを形成している様子も確認できた(図-5(b))。鉱物の組成解析の結果、いずれの鉱物も方解石であることが判明した。

これらの結果より、生成した石灰岩の表層及び緑層では微生物が形成した集合体(バイオマット)が発達していたことがわかった。さらに地球科学分野における近年の研究から、フィラメントの表面は、カルシウムイオン等と強く結合し、分解される際に炭酸カルシウムの微結晶を生成することが知られている⁹⁾。つまり、岩石の内部で確認された鎖状に連なった微粒子は、おそらくフィラメントが分解される際、その周囲を被覆するように炭酸カルシウムの微粒子が生成したものと考えられる。

一方、石灰岩表面の窪みに形成されていた水溜りには藻類マットで見られるような気泡を目視で確認

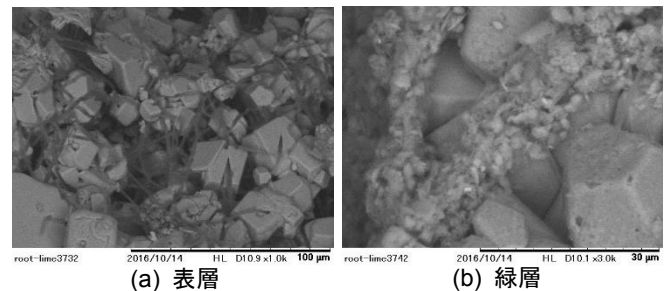
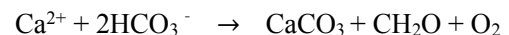


図-5 SEM 画像

することができた(図-4(b))。これは、岩石表面及び内部の独立栄養微生物が活発に光合成活動を行った結果、酸素が多量に発生し溶存できなくなった分が気泡となり現れていると考えられる。

4. まとめ

- (1) SEM 画像解析の結果から、フィラメント(藻類の細胞やその鞘)の存在が炭酸カルシウムの結晶成長の場になっていることが予想された。
- (2) 石灰岩表面の窪みに形成された水溜りには、酸素と思われる気泡が確認できたことから、石灰岩表面及び内部の微生物が活発に光合成活動していることが予想された。したがって、次に示す微生物の代謝反応式によって岩石内部の環境が局地的にアルカリ化し、石灰岩生成に適した環境を作り出していることが考えられる。



5. おわりに

本研究では、湧水が石灰岩のマルチフィジックス生成作用に及ぼす影響について考察し、石灰岩内部に形成された微生物マットが生成作用を促進している可能性を示した。本研究サイトのように、物理的及び流体力学的な脱ガスの影響が比較的小さい液膜流下の環境では一般的に、生物的影響の重要度が増すと考えられている。したがって、本研究のように、マルチフィジックスな影響要因を考慮していくことは、現場で発達する岩石の生成を正確にフィードバックするために重要な事項だと考える。

参考文献

- 1) Merrill *et al.* :Suggested methods for calculating and interpreting calcium carbonate saturation indexes, 1990
- 2) JIS K 0400-15-10:1998. :水質-アルカリ度の測定-
- 3) 狩野彰宏 :淡水成炭酸塩トッファの特徴と成因 :レビュー, Earth Science vol.51, 177-187, 1997
- 4) Christophe Dupraza *et al.* :Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats, 2009
- 5) E. Couradeau *et al.* :Cyanobacterial calcification in modern microbialites at the submicrometer scale, 2013

琉球石灰岩の化学的風化に伴う残柱強度に関する実験的研究

琉球大学学部生
琉球大学大学院
琉球大学

○土肥 翔
廣瀬 孝三郎
松原 仁

1. はじめに

琉球諸島には多孔質性の琉球石灰岩が広く分布しており、自然空洞や海食崖が海岸周辺や内陸部に多く存在する¹⁾。これらは岩盤崩壊という形で人間生活を脅かしている。岩盤崩壊に関わる現象に岩自体の風化が深く関わっていることは自明であり、現象そのものを理解することの重要性は一般的に知られているものの、その詳細は明らかになっていない。また、将来移転が予定されている米軍普天間基地の地盤内部には琉球石灰岩層が広がっており、再開発時における空洞の対策が重要な課題となる。

我が国における琉球石灰岩に関する研究は、海水への溶解特性に塩分濃度および炭酸ガスの影響に関する研究^{2),5),6)}や琉球石灰岩の空洞の工学的特性を検討した研究³⁾など数多く存在する。しかしながら、空洞の安定性を評価する上で重要なファクターとなる残柱強度の化学的風化に伴う力学的特性は未だ明らかになっていない。

そこで本研究では、琉球石灰岩の化学的風化に伴う残柱の一軸圧縮強度の変化特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

本実験では、サンゴ質石灰岩からなる琉球石灰岩の供試体を使用した。

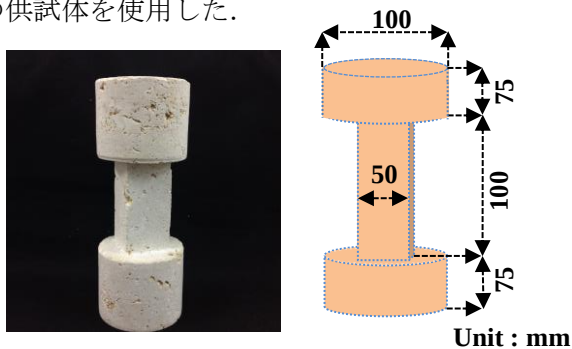
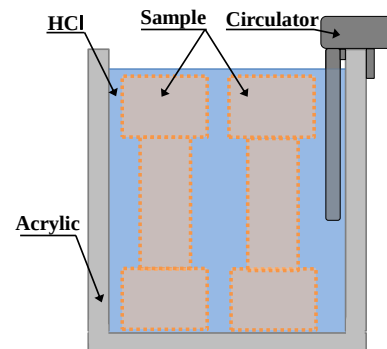


図-1 風化実験に使用した供試体

供試体は琉球石灰岩が地下水や雨水などによって溶解あるいは浸食され空洞が形成され残柱が残った場合を想定したものである(図-1)。一般的に琉球石灰岩は強度のばらつきが非常に大きいことが知られている⁴⁾ため同寸法の供試体を2つ用意

し実験を行った。図-1の供試体をアクリル容器に入れ風化促進溶液に浸した。また、琉球石灰岩を飽和状態にするため風化促進溶液に浸す際に真空デシケーターに20分程度置いた。さらに風化促進溶液として希釈した塩酸を使用することにし、図-2に示す様に浸漬中は溶液を循環装置で循環させながら実験を行い、24時間毎にすべての溶液を入



(b) 実験の様子
図-2 風化実験状況

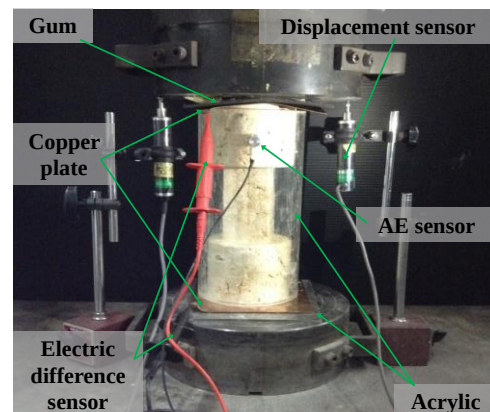


図-3 一軸圧縮試験状況

キーワード 琉球石灰岩, 残柱, 化学的風化作用, 一軸圧縮強度
連絡先 〒903-0123 西原町千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科
E-mail : e135324@eve.u-ryukyu.ac.jp

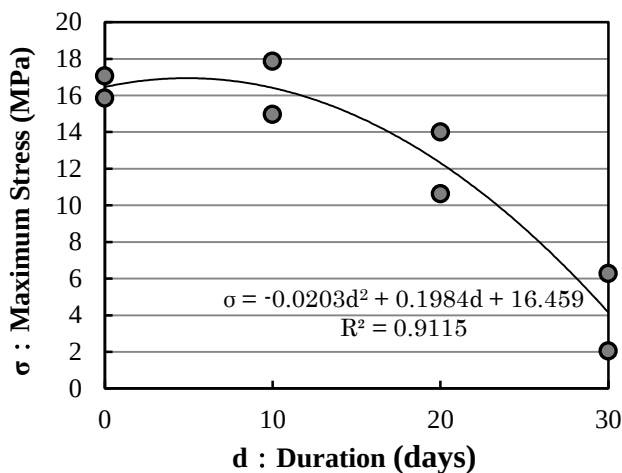


図-4 浸漬日数と一軸圧縮強度の関係

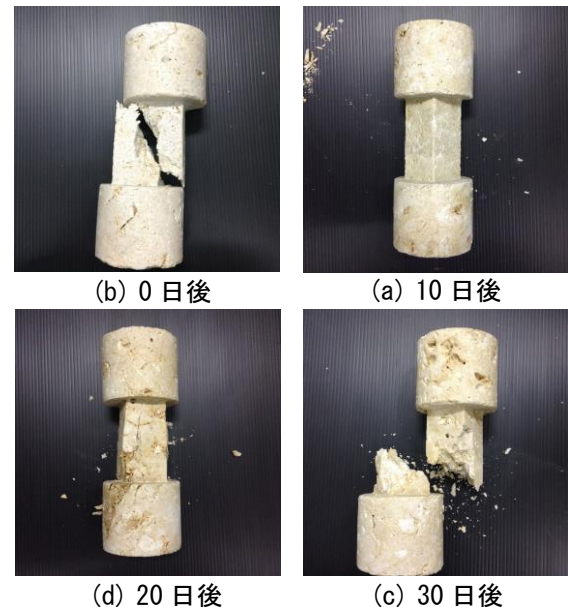


図-5 一軸圧縮試験後の供試体

れ替えた．一軸圧縮試験は風化実験開始日から 0 日目、10 日目、20 日目、30 日目にそれぞれ一軸圧縮試験を実施した．本研究では、岩盤中の側圧を考慮するために一軸圧縮試験の際に供試体を包んでいる円柱型のアクリル容器を用いることにした．一軸圧縮試験における供試体は 0 日目の供試体は水で飽和状態にし、10 日目、20 日目、30 日目の供試体は希塩酸の飽和状態で試験を行い、載荷速度は一定の条件(1 mm/min)で試験を行った．一軸圧縮試験状況を図-3 に示す．

3. 実験結果及び考察

図-4 は浸漬日数と一軸圧縮強度の関係を示したものである．図-4 より、琉球石灰岩の残柱強度は 2 次曲線的に低下することが確認された．また、一軸圧縮試験後の供試体の様子を図-5 に示す．

一般的に琉球石灰岩は強度のばらつきが非常に大きいことが知られている．10 日間風化させた供試体の 1 つの強度は風化実験を行っていない 0 日目の供試体の強度より大きくなった．これは元々この供試体の強度が非常に高かったからだと考えられる．しかし全体的に見ると、図-4 より明らかに風化による残柱の強度低下が確認された．よって琉球石灰岩の残柱強度に溶解という形で化学的風化作用が与える影響は大きいと考える．

5. おわりに

本研究では琉球石灰岩の残柱は化学的風化に伴う残柱の一軸圧縮強度の変化特性を検討するため簡易的に化学的に風化させ、一軸圧縮試験を行った．その結果、琉球石灰岩は化学的風化によって強度が低下することがわかり、岩盤の崩壊に力学的視点だけではなく化学的視点を加えることの重要性が示された．琉球諸島には琉球石灰岩層が広

く分布しており、大小の鍾乳洞や海食崖が多数確認されており、落石や岩盤の陥没、再開発時における岩盤の安定性の評価などが問題となっている．大切であることはその問題をどうやって解決するかであり、今回の研究はその問題解決の一研究に過ぎない．本実験では琉球石灰岩の化学的風化という形のみで実験を行った．しかし実環境では様々なことが複合している．したがって、今後は琉球石灰岩の風化を化学的風化に加え物理学的風化作用、生物学的風化作用などの観点からも捉えた学際的な研究が必要である．更に、実験での時間的や現象の複雑性を考えると数値モデルなどを用いた計算力学的な研究も必要となってくると考える．

参考文献

- 1) 松倉公憲：地形変化の科学，pp. 23-43，2008．
- 2) 橋本亜希子，小口千明，松倉公憲：高濃度の二酸化炭素環境下における石灰岩の溶解実験，筑波大学陸域環境センター報告，pp. 141-148，2003．
- 3) アイダンオメル，渡嘉敷直彦，田野久貴，湖城清，照屋優：空洞を有する琉球石灰岩層の空洞安定化対策前後における静的・動的安定性評価と施工管理モニタリングについて，沖縄地盤工学会講演論文集，pp. 11-16，2009．
- 4) 日本材料学会編：ロックメカニクス，pp. 51-122，2002．
- 5) 木村知子，松倉公憲：塩化ナトリウムによる塩類風化実験，筑波大学陸域環境センター報告 No.4，pp. 149-155，2003．
- 6) S. -F. POPa, R. -M. ION: Thermal analysis of the chemical weathering of chalk stone materials, Journal of the optoelectronics and advanced materials, Vol. 15, pp. 888-892, 2013

乾燥－湿潤繰り返しプロセスが Mudcrack および Mudblock に与える影響

琉球大学大学院
琉球大学

学生会員
正会員

○広瀬 孝三郎
松原 仁

1. はじめに

Mudcrack は、粘質土壌の乾燥過程で生じる乾燥収縮亀裂現象として知られており¹⁾³⁾、不可逆性の非線形現象のひとつである(図-1)。Mudcrackに関する工学的な問題としては、一般廃棄物や有害廃棄物等の最終処分場にて使用される土壌ライナーに Mudcrack が発生することにより雨水や地下水といった水が流入し、汚染物質が拡散することが挙げることができる⁴⁾⁵⁾。したがって、人間生活の安全・安心の観点からしても極めて重要な問題とされている。さらに、堆積岩における先在亀裂群の形成には、それが固化する前に発生した Mudcrack が直接的な原因となっており、土壌における Mudcrack 進展現象が現代の岩盤構造に大きな影響を及ぼすことが報告されている。したがって、Mudcrack 現象の評価手法を構築することは工学的にも重要な課題であるといえる。

Mudcrack は、マッドペースト(粉体と溶媒を均一に混ぜ合わせたもの)の種類や層厚、粒度、溶媒の種類等によって亀裂パターンが異なる¹⁾³⁾⁶⁾。さらに、マッドペーストは気温や湿度、地下水といった環境因子の影響も大きく受けており、それらによって亀裂パターンも変化することが知られている⁶⁾が、これらの環境因子を統合的に捉えた評価手法や Mudcrack 形成のメカニズムについての明確な説明は未だ達成されていない現状がある。

そこで本研究では、ベントナイトペーストを用いた乾燥－湿潤繰り返し実験を実施し、給水回数の増加に伴う Mudcrack および Mudblock に生じる形態変化の評価を試みた。Mudcrack に関しては、給水回数の増加に伴う亀裂交差角度の変化を明らかにする。一方、Mudblock に関しては、給水回数の増加に伴う面積変化、層厚変化および底面の形状変化を明らかにする。

2. 実験材料と実験概要

本実験では、粒度調整済のベントナイトと水を十分に混合することにより作成したベントナイトペースト(初期含水比 $w=60\%$)を実験材料に用い、乾燥－湿潤繰り返しが Mudcrack および Mudblock に与える影響に関して、1) 乾燥時間：24 時間に設定した乾燥－湿潤繰り返し実験、2) 乾燥時間：48 時間に設定した乾燥－湿潤繰り返し実験の計 2 種類の実験を実施した。表-1 に本実験で用いたベントナイトの物理的性質を示す。同



図-1 粘質土壌にみられる Mudcrack

表-1 ベントナイトの物理的性質

Experimental soil	Bentonite
Texture	CH
Liquid Limit (%)	61
Plastic Limit (%)	25
Plasticity Index (%)	35
Gravel (%)	1
Sand (%)	11
Silt (%)	52
Clay (%)	36
Void ratio	1.8
Saturation ratio (%)	87.5
Volmetric shrinkage (%)	26

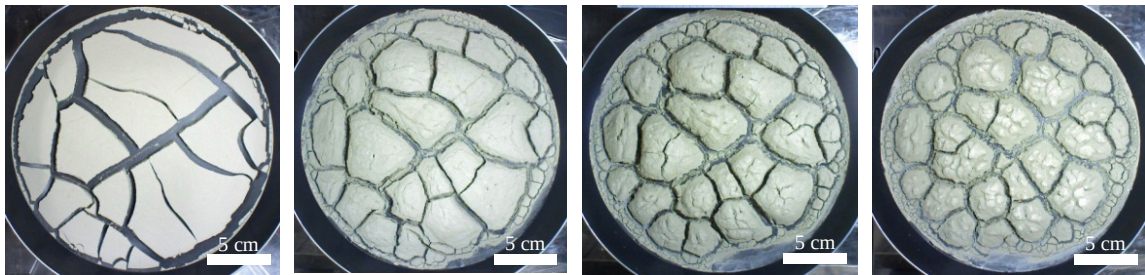
表より、本試料はシルト分が多く含まれる、工学的分類体系⁷⁾(JGS0051)の粘土(CH)に分類される粘土であることがわかる。

容器には、フッ素樹脂加工を施してある円形金属容器(直径:28cm, 厚さ:5.3cm)を使用し、実験開始時のベントナイトペーストの層厚は 10mm に設定した。なお、本実験では、外部環境の影響を取り除くために、温度：25℃、湿度：37%に設定した恒温器内部にて実験を実施した。給水作業に関しては、恒温器内で乾燥させたベントナイトペーストに発生した Mudcrack および Mudblock に対して与える影響を極力抑えるために、ピペットを用いて容器と試料の境界付近から慎重に実施した。ここで、給水作業は、給水回数：2 回と同じ箇所から給水作業を実施し、給水回数は 10 回とした。給水作業は、恒温器内部にて実施するものとし、恒温器内部での給水作業を終了してから各設定時間の乾燥を再度実施した。また、本実験では実験供試体上部に設



(a) 給水回数：1回 (b) 給水回数：3回 (c) 給水回数：6回 (d) 給水回数：10回

図-3 乾燥-湿潤繰り返し実験における乾燥後の実験供試体の様子（乾燥時間：24時間）



(a) 給水回数：1回 (b) 給水回数：3回 (c) 給水回数：6回 (d) 給水回数：10回

図-4 乾燥-湿潤繰り返し実験における乾燥後の実験供試体の様子（乾燥時間：48時間）

置した定点カメラにて撮影を継続的に行うことで亀裂進展の様子を観察した。

ここで、本実験にて設定した乾燥時間に関して記述する。乾燥時間：24時間に設定した場合、乾燥後の実験供試体表面には未乾燥箇所が若干観察されることから、「未乾燥状態」での乾燥-湿潤繰り返し実験と仮定した。これは、地下水や雨水の流入が多い環境下を想定した実験である。一方、乾燥時間：48時間に設定した場合、乾燥後の実験供試体表面には未乾燥部分は見受けられないことから、「完全乾燥状態」での乾燥-湿潤繰り返し実験と仮定した。これは、乾燥-湿潤繰り返し実験が比較的明確に発揮される箇所を想定したものである。つまり、スレーキング現象が発生しやすい環境下を模擬したものである。

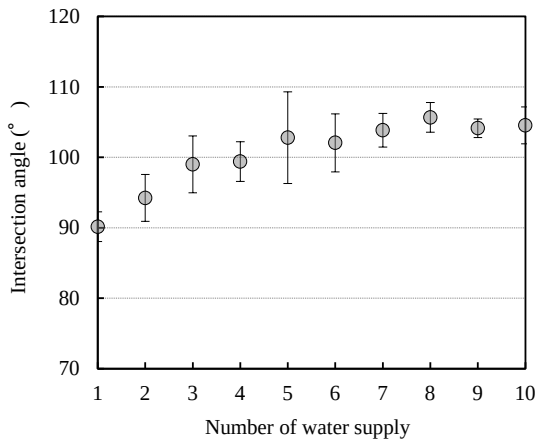
3. 乾燥-湿潤繰り返し実験の結果

3.1 乾燥-湿潤繰り返し実験が亀裂パターンに与える影響

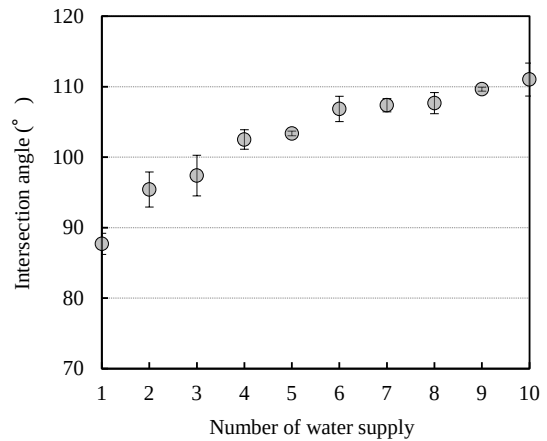
図-3に、温度25℃、乾燥時間：24時間に設定した、未乾燥状態の実験供試体における乾燥-湿潤繰り返し実験結果を示す。同図(a)および(b)に示すように、Mudblockの形状に関しては、給水回数が3回目までは四角形および五角形のものが多く観察された。また、Mudcrackの亀裂交差角度に着目した場合、およそ90°のものが多く観察された。一方、同図(c)および(d)に示すように、給水回数の増加に伴ってMudblockの細分化が顕著に進むことで、給水回数が少ないときと比較してMudblockの小片化が顕著に現れることがわかった。さらに、Mudcrackに関しては給水回数の増加に伴って直線形から不規則な形に変化することがわかる。また、

Mudcrackの亀裂交差角度に着目した場合、およそ90°以上の亀裂が多数みられるようになった(図-5(a)参照)。ここで、給水回数の増加に伴うMudblockの層厚変化に関しては、給水回数の増加に伴う変化はほとんどみられなかった。

一方、図-4に、温度25℃、乾燥時間：48時間に設定した、完全乾燥状態の実験供試体における乾燥-湿潤繰り返し実験の結果を示す。同図(a)および(b)に示すように、Mudblockの形状に関しては、給水回数：4回目までは四角形および五角形のものが多く観察された。また、Mudcrackの亀裂交差角度に着目した場合、およそ90°に交差している箇所が多く観察された。一方、同図(c)および(d)に示すように、給水回数の増加に伴ってMudblockの細分化および均質化が進み、乾燥時間：24時間の場合と比較して、若干大きなMudblockに均質化されていく傾向があることがわかった。また、Mudcrackの亀裂交差角度の変化に着目した場合、およそ120°に近い箇所が多く観察されるようになった(図-5(b)参照)。ここで、図-6に示すように、給水回数の増加に伴うMudblockの層厚に着目した場合、ベントナイトペースト作成時(給水回数：1回)の層厚よりもMudblockの層厚が厚くなる傾向があることがわかった。同図(a)に示すように、ベントナイトペーストの乾燥後のMudblockは比較的平らであったが(層厚：約10mm)、給水回数の増加とともにMudblockの中央付近が盛り上がったような形状(同図(b))に変化し層厚が厚くなることがわかった(層厚：約18mm)。そこで、給水してから乾燥後のMudblockの層厚変化を計測することにした。なお、計測方法に関しては、Mudblockを取り出し



(a) 乾燥時間：24 時間



(b) 乾燥時間：48 時間

図-5 給水回数の増加に伴う亀裂交差角度の変化



(a) 給水回数：1 回



(b) 水回数：10 回

図-6 乾燥後の Mudblock の断面の様子
(乾燥時間：48 時間)

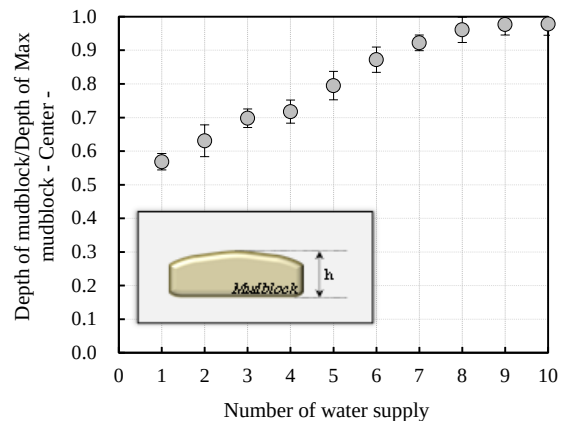


図-7 給水回数の増加に伴う Mudblock の層厚変化

て測定ができないため、ノギスを使用することにより Mudblock の層厚の計測を試みた。図-7 に、給水回数の増加に伴う Mudblock の層厚変化を示す(図-7 のエラーバーは 3 回の実験から得られた結果の標準偏差を表している)。同図に示すように、Mudblock の中央付近の層厚に関しては、給水回数：8 回までは線形的に増加し、最終的には収束傾向にあることがわかる。以上のことから、乾燥-湿潤繰り返し実験においては、実験供試体の乾燥度合いによって、Mudcrack の亀裂交差角度の増加傾向、Mudblock の層厚変化、均質化・細分化率に相違がみられることがわかった。

3.2 乾燥-湿潤繰り返し給水 Mudblock 底面に与える影響

本節では、乾燥-湿潤繰り返しプロセスが、Mudblock 底面に与える影響を評価することを目的とする。図-8 に示すように、乾燥時間：48 時間とした完全乾燥状態の実験供試体における乾燥-湿潤繰り返し実験では、給水回数の増加に伴い Mudblock の底面に穴状のもの(以後、くぼみと呼ぶ)が形成されることがわかった。図-8(a)に示すように、ベントナイトペーストを乾燥させた場合(給水回数：1 回)、試料全体が十分に均一なペースト状であるため、Mudblock の底面はほぼ平らな

形状をしている。同図(b)に示すように、細分化した複数の Mudblock のひとつに着目すると、Mudblock の容器底面にはベントナイトペーストの粉体が付着した箇所と付着していない箇所が観察された。また、同図(c)に示すように、Mudblock の断面を観察すると Mudblock の表面および底面に粗面は観察されなかった。

同図(d)~(f)に、給水回数：2 回および 3 回における Mudblock および容器底面の様子を示す。同図(d)および(e)に示すように、Mudblock 底面の中央付近には大きくくぼみが観察された。このくぼみの位置は、容器底面の粉体が付着していない箇所と一致していることがわかった。また、Mudblock 底面に形成されたくぼみに着目した場合、くぼみの上面は容器底面との摩擦の影響による粗面は観察されず平らな状態であった。このことから、Mudblock 底面に形成されたくぼみの上面は、給水回数：1 回のときに容器底面に位置していたものである可能性が示唆された。同図(f)に示すように、Mudblock の断面に着目すると、Mudblock 底面に凹凸が観察された。このことから、給水回数が増加すると Mudblock 底面には粗面が形成され始めることがわかった。その後、給水回数が増加すると、Mudblock 底面に形成されたくぼみは、給水回数：2 回および 3 回と比較

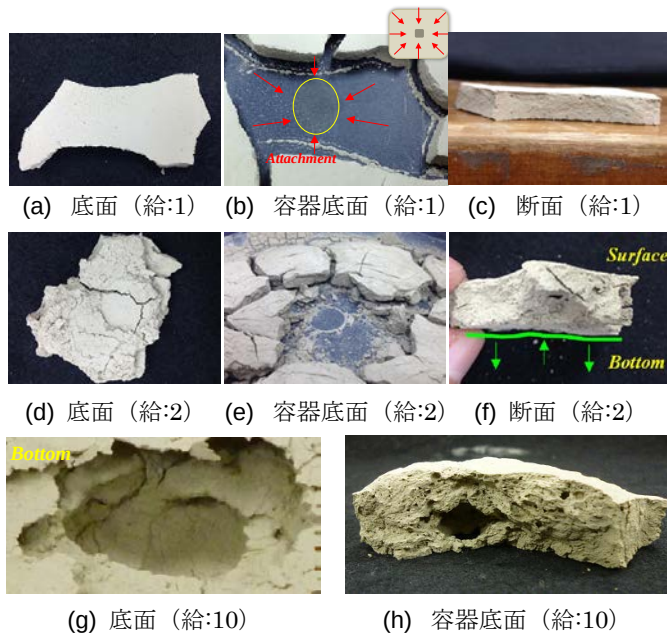


図-8 Mudblock 底面および容器底面の様子

すると、若干小さくなることが観察された。また、Mudblock 底面は平面に近い状態であった。

同図(g)および(h)に、給水回数：8 回以降の Mudblock 底面および Mudblock の断面に観察されたくぼみの様子を示す。同図(g)に示すように、Mudblock 底面に形成されたくぼみの形状が層状に変化することが観察された。さらに、同図(h)に示すように、Mudblock 底面に観察されたくぼみが Mudblock の底面から上側へと移動する箇所が観察された。なお、給水回数：4 回から 7 回の場合と同様に、Mudblock の底部に形成されたくぼみの上面は比較的なめらかな面が観察された。

以上のように、乾燥－湿潤繰り返し実験においては、実験供試体の乾燥度合いが異なることで Mudblock 底面においても影響を与えることがわかった。

4. おわりに

本研究では、乾燥－湿潤繰り返しおよび実験供試体の乾燥度合いが Mudcrack および Mudblock に与える影響に関する評価を試みた。以下に、本実験で仮定した実験環境下における知見を列挙する。

- (1) 本実験で設定した実験条件においては、乾燥時間：48 時間の完全乾燥状態よりも乾燥時間：24 時間の未乾燥状態の実験供試体のほうが Mudblock の細分化が顕著であった。
- (2) 本実験で設定した実験条件においては、乾燥時間：48 時間の完全乾燥状態よりも乾燥時間：24 時間の未乾燥状態の実験供試体のほうが亀裂交差角度の増加傾向が大きいことがわかった。

- (3) 給水回数の増加に伴い、乾燥時間：48 時間の完全乾燥状態の試料では Mudblock の層厚変化が顕著であった。

- (4) 給水回数の増加に伴い、乾燥時間：48 時間の完全乾燥状態の試料では Mudblock 底面にくぼみが形成されることがわかった。

本実験より乾燥－湿潤繰り返しおよび実験供試体の乾燥度合いといった環境因子を考慮することの重要性が示された。特に、実験供試体の乾燥度合いによって Mudcrack の亀裂交差角度、Mudblock の層厚変化だけでなく Mudblock 底面にも影響を与えることが明らかとなった。つまり、過去の岩盤形成過程においても、同様の現象が発生していることが考えられることから、今後、乾燥－湿潤繰り返しおよび実験供試体の乾燥度合いの違いによって発生し得る現象を考慮した実験的検討および評価手法の構築が必要不可欠である。しかしながら、本実験では、ベントナイトペーストを用いた乾燥－湿潤繰り返し実験のみを行っている。したがって、今後、実際に分布する粘質土壌において、本実験にて得られた知見が適用できるかを検討する必要がある。今後、本実験によって得られた知見を応用して、多くの飛翔や粘質土壌における Mudcrack の進展現象の極めて複雑かつ不確実な挙動および現象の解明が望まれる。

参考文献

- 1) 伊藤寛之，宮田雄一郎：マッドクラックのパターン形成実験，地質学雑誌 104 巻，pp.90-98，1998。
- 2) Funda, S. and Dilek, T.: Factors effecting mud crack formation in Ankara clay, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol.56, pp.166-167, 2011.
- 3) 広瀬孝三郎，松原仁，原久夫：マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.72, No.1, pp.27-37, 2016.
- 4) Philip, L. K., Shimell, H., Hewitt, P. J. and Ellard, H. T.: A field-based test cell examining clay desiccation in landfill liners, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol.35, pp.345-354, 2002.
- 5) Miller, C. J., Hong, M. and Yesiller, N.: Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners, Journal of the American Water Resources Association, Vol.34, pp.677- 686, 1998.
- 6) DeCarlo K. F. and Shokri N.: Effects of substrate on cracking patterns and dynamics in desiccating clay layers, Water Resources Research, Vol.50, No.4, pp.3039-3051, 2014.
- 7) 地盤工学編：土質試験の方法と解説（第一回訂正版），pp. 127-135，2000.
- 8) Mandelbrot, B. B.: The fractal geometry of nature, New York: W.H. Freeman Co., 1982.

Session 3 : 振動・計測関連

岩盤不連続面および施工ジョイントの動的せん断特性に関する実験的研究

琉球大学 ○安川完祐

琉球大学 藍檀オメル, 富山潤, 須田裕哉
返しせん断試験」「クリープせん断試験」「外部
電圧入力による動的せん断試験」を行うことが
できる. 各種の試験条件をタッチパネルで容易
に設定し, せん断試験を行うことができる.

1. はじめに

硬質の岩盤には岩盤不連続面が多数存在し, 岩盤の強度や変形性に大きな影響を与える. また, その岩盤の強度は不連続面や境界面に依存しており, 不連続面や境界面のせん断特性の把握は岩盤構造物の安定性の把握に必要不可欠である. それにも拘らず, 動的なせん断試験を行える試験機はほとんど存在しておらず, 海外及び国内においてもあまり研究が進んでいないという現状がある. 実際の地震動を再現した試験条件のものもあり見受けられない. 本研究により境界面, 不連続面の動的せん断特性を把握することにより「地震断層の挙動の把握」「重要構造物の地震時安定性の評価」「コンクリート施工ジョイントにおけるせん断特性の把握による, 各種岩盤構造物やコンクリート構造物の安定性の評価」につなぐことを考えている.

2. 動的せん断試験機

せん断試験においては, 図-1 に示すように片振りせん断試験と両振りせん断試験がある. 琉球大学には両方のせん断試験ができる装置が存在している (図-2, 図-3).

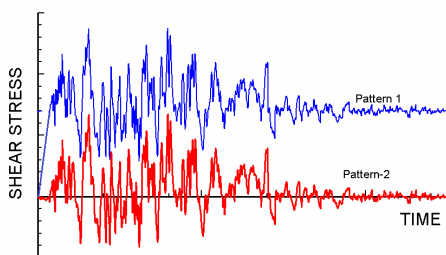


図-1 動的せん断試験の载荷パターン

図-2 は Aydan らが 2014 に開発した両振り小型動的せん断試験機を示す¹⁾. また, 図-3 は Aydan らが 1994 に開発し, 近年片振り動的せん断できるように改良した試験機である²⁾³⁾ (Aydan et al. 2016). この試験機では「単純せん断試験」「繰り

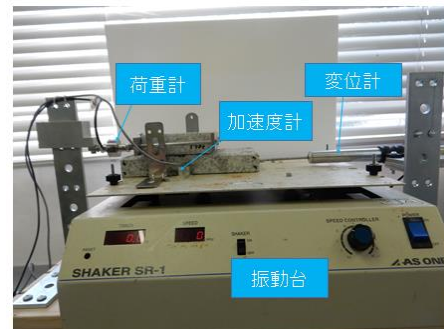


図-2 両振り小型動的せん断試験機



図-3 大型動的せん断試験機

3. 動的せん断試験

今回は両振りせん断試験機を使用することにし, 図-2 に示す試験機で両振り動的せん断試験を行った. 振動台に大小 2 つの石を載せ, 上部ブロックは水平方向を固定し, 下部ブロックは振動台に固定している. 上部ブロックに荷重計, 下部ブロックに変位計, 振動台に加速度計を設置した. 振動台を左右に振動させ速度, 垂直荷重を変えながらそれぞれの値を PC に記録していく. 本試験では稲田花崗岩・斑レイ岩・富士山安山岩・富士山玄武岩・琉球石灰岩の全 5 種の岩石においてそれぞれ自重のみ・1kg・2kg・3kg の 4 パターンの荷重条件で試験を行った.

キーワード: 岩盤不連続面, 動的せん断特性, 両振りせん断試験, 片振りせん断試験

連絡先: 〒903-0120 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL:098-895-8663

各試験前に、傾斜試験機を利用して静的および動的摩擦係数を求めた。また、動的せん断試験後にも摩擦係数を求めることにした。

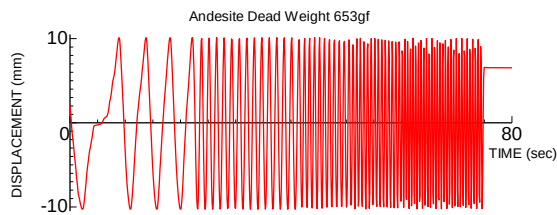


図-4 富士山安山岩 (変位)

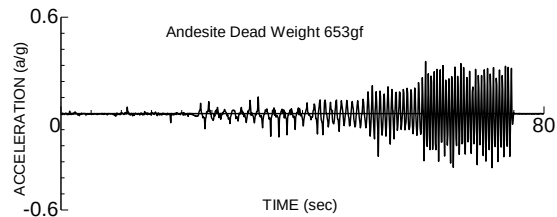


図-5 富士山安山岩 (加速度)

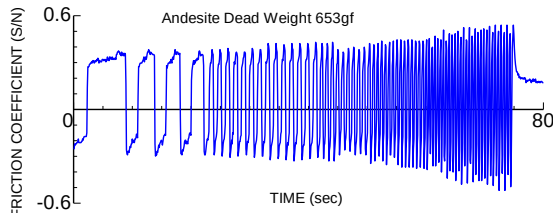


図-6 富士山安山岩 (動的摩擦係数)

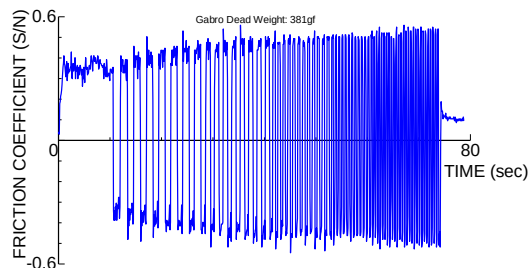


図-7 斑レイ岩

図-4～図-6 は富士山の安山岩の自重のみでの変位，加速度，動的摩擦係数について，図 7～図-10 は残りの 4 種の岩石についての自重のみでの動的摩擦係数について計測された応答を示す。それぞれを比較すると，富士山安山岩・斑レイ岩・稲田花崗岩・富士山玄武岩の 4 種は繰り返し周波数が大きくなると動的摩擦係数も大きくなっている。しかし，琉球石灰岩はほとんど変化が見られず，動的摩擦係数はほぼ一定である。また，変化が見られた 4 種の中でも稲田花崗岩は繰り返し周波数の増加に伴う動的摩擦係数の増加が少ないことが見受けられる。この結果が

不連続面のせん断強度の繰り返し周波数依存性があることを意味する。

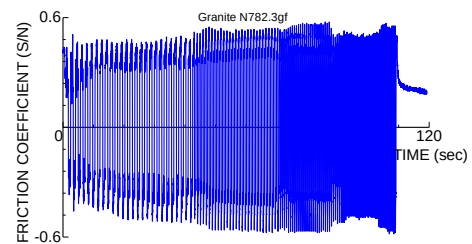


図-8 稲田花崗岩

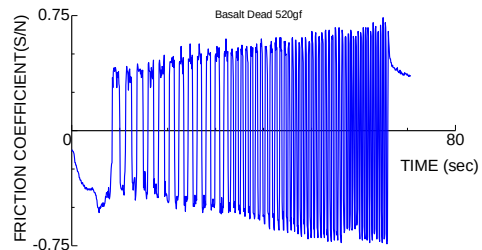


図-9 富士山玄武岩

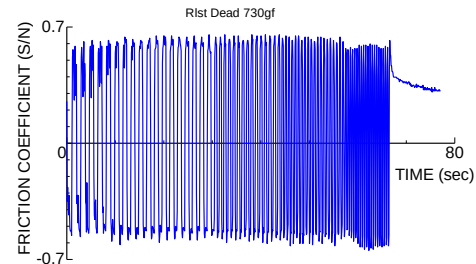


図-10 琉球石灰岩

4. まとめ

両振りせん断試験において種々の岩石についてのデータが得られ，せん断特性の把握をすることができた。今後大型動的せん断試験機についても試験を行い，それぞれ比較検討を行い，せん断特性の把握，動的せん断試験の試験方法の確立につなげていきたい。

参考文献

- 1) Aydan, Ö., Fuse, T. Ito, T. (2015): An experimental study on thermal response of rock discontinuities during cyclic shearing by Infrared (IR) thermography. Proc. 43rd Symposium on Rock Mechanics, JSCE, 123-128.
- 2) Aydan Ö., Akagi T., Okuda H. & Kawamoto T. 1994. The cyclic shear behaviour of interfaces of rock anchors and its effect on the long term behaviour of rock anchors. *Int. Symp. on New Developments in Rock Mechanics and Rock Engineering*, Shenyang, 15-22.
- 3) Aydan, Ö., N. Tokashiki, J. Tomiyama, N. Iwata, K. Adachi, Y. Takahashi (2016). The Development of A Servo-control Testing Machine for Dynamic Shear Testing of Rock Discontinuities and Soft Rocks, EUROCK2016, Ürgüp, 791-796.

地震断層のスティック・スリップ挙動に関する実験的研究

琉球大学 ○上之郷唯奈, 藍檀オメル, 富山潤, 須田裕哉
地殻工学防災研究所 渡嘉敷直彦, 中電技術コンサルタント 岩田直樹

1.はじめに

スティック・スリップは、接触する2面が固着と滑りを繰り返す現象であり、岩石のせん断挙動に共通して観察することができる。Brace and Byerlee¹⁾は、スティック・スリップ現象が地震の繰り返し発生のメカニズムであると考え、岩石を用いた室内試験を行い、スティック・スリップ現象が地震の繰り返し発生するメカニズムであることを提唱した。それ以降、プレート境界面での地震挙動を考える場合に類似点が多いため、岩石の摩擦現象を地震の発生機構と関連付けた検討がなされてきた。しかし、これまで摩擦側に基づく理論的な研究や静的な実験は盛んに行われてきたが、動的な実験は少ないため、本研究では図-1のような実験装置を用いて動的な実験を行い、岩盤のスティック・スリップ挙動を調べた。

2.実験装置及び実験概要

実験装置はゴム製のコンベアーベルトと固定フレームからなり、コンベアーベルトの移動速度は自由に変えることができる。供試体は岩盤ブロックの不連続面を模擬するため、上部ブロックと下部ブロックに分割し、上部ブロックはバネを通して固定フレームに、下部ブロックはコンベアーベルトに固定する。また、本研究では図-2に示す岩石を使用する。それぞれ、花崗岩(黄), 花崗岩(グレー), 熊本(珪岩), 熊本(安山岩), 富士山(安山岩), 富士山(玄武岩), バリ(安山岩), バリ(玄武岩)であり、使用する上部ブロックと下部ブロックの表面はソーカットによる粗い面である。用いるバネの種類はs14とs20であり、コンベアーベルトの速度は約0.7mm/s, 1.5mm/s, 1.9mm/sで行う。

コンベアーベルトを作動させると、初期は上部ブ

ロックと下部ブロックは共にバネが伸びる方向に移動するが、ある変位を超えると上部ブロックに接続されたバネの復元力により、滑りが生じる。これがスティック・スリップ現象である。

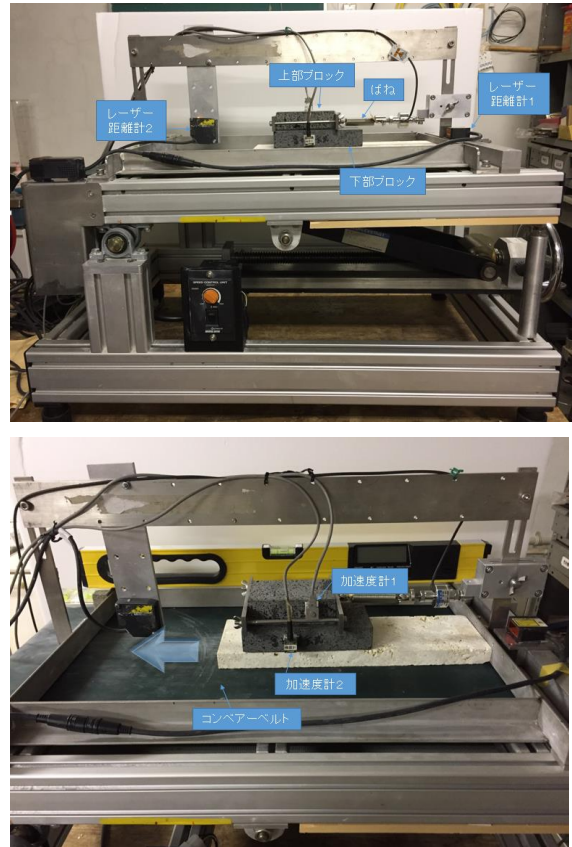


図-1 実験装置

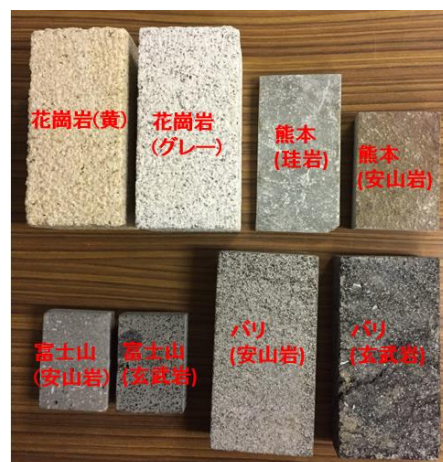


図-2 試料

キーワード：スティック・スリップ, 摩擦特性, 地震断層

連絡先：〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail : e135325@eve.u-ryukyu.ac.jp

3.実験結果と考察

現在、図-2 に示した供試体について実験を行っている。ここで富士山の玄武岩の供試体について行なったスティック・スリップ試験結果を紹介する。実験において、不連続面に作用する垂直荷重を変化させた。ベルトの速度は約 0.7mm/s である。また、実験前に傾斜実験を行い、その摩擦角は 22.0° と 23.0° の間に変化した。図-3、図-4 および図-5 は各垂直荷重下で得られた摩擦係数、上部ブロックおよび下部ブロックの加速度・変位応答を示す。垂直荷重がブロックの自重による場合は降伏がほぼ摩擦係数に近い値で発生し、ひずみ硬化に近い挙動が見受けられ、その後、従来のスティック・スリップ挙動が見られている。また、各スリップごとに上部および下部ブロックで加速度が発生している。この結果から、上部ブロックの加速度は下部ブロックの加速度に比べて、2 倍大きくなっていることがわかる。このことは地震断層の上盤と下盤で観測された地震動に大変類似しており、新しい知見である。

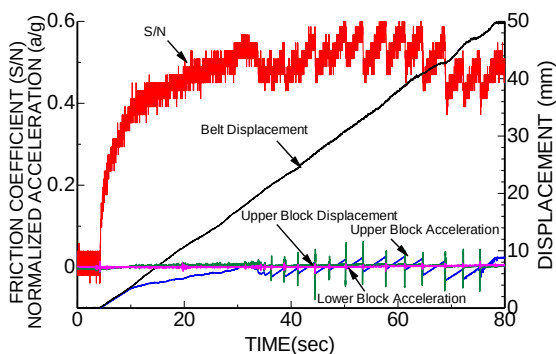


図-3：摩擦係数，ブロックの加速度・変位応答
($N=502\text{gf}$)

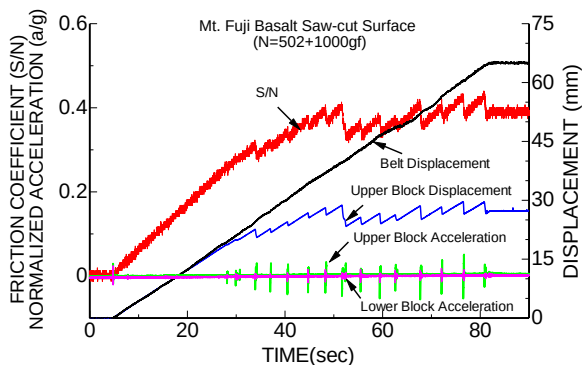


図-4：摩擦係数，ブロックの加速度・変位応答
($N=502+1000\text{gf}$)

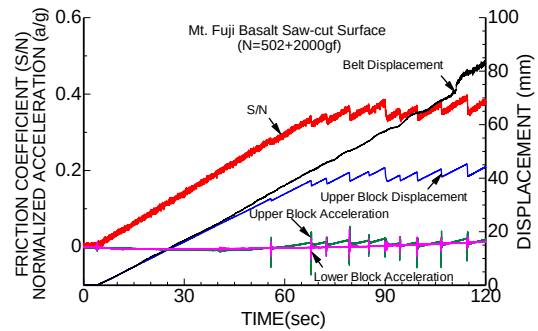


図-5：摩擦係数，ブロックの加速度・変位応答
($N=502+2000\text{gf}$)

図-4 および図-5 を図-3 と比較すると垂直荷重が増加することによって降伏荷重が若干低下している。しかし、スティック・スリップ挙動がもっと明確に現れている。図-6 は垂直荷重 ($502+1000\text{gf}$) 下でスティック・スリップ挙動が見られている部分を拡大したものである。荷重計の感度による若干ノイズ的な応答が見られているが、スリップの際に荷重・変位応答はほぼ線形的に減少し、スリップが停止時の摩擦角は約 22.8° である。この値は傾斜実験で求めた摩擦角の値にほぼ等しい。

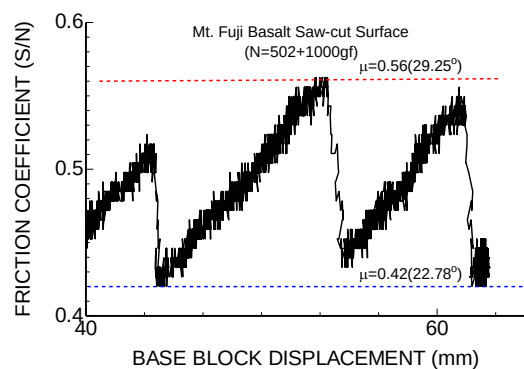


図-6：垂直荷重 $N=502+1000\text{gf}$ におけるスティック・スリップ挙動

4.結論

本研究で、地震断層の地震時の挙動を検証するため、室内試験を実施し、実地震断層のスリップ時の挙動に近い挙動を再現することができた。今後は、表面粗さ、剛性およびベルト速度を変化させて、更なる実験的な研究を継続する必要がある。

参考文献

- 1) Brace, W. F. and Byerlee, J. D., 1966, Stick-slip as a mechanism for earthquakes, Science, 153, 990-992.

振動特性を利用した構造物の健全性評価手法の構築

琉球大学 ○宮里政國，琉球大学大学院 吉次優祐
琉球大学 藍檀オメル，富山 潤，須田裕哉

1. はじめに

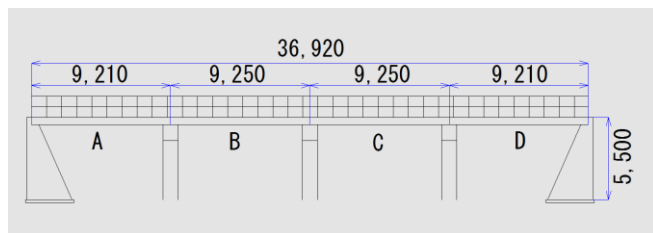
多くの道路構造物が維持管理されており，非破壊的な健全性評価手法の構築が望まれている。

構造物の健全性を評価する方法として，構造物の振動特性を利用する方法が検討されている。すべての構造物はそれぞれ固有の振動特性を有しており，固有振動数（ f ）や固有周期（ T ）が挙げられる。一般的に固有振動数が低下することは構造物の劣化などの変状を意味する。

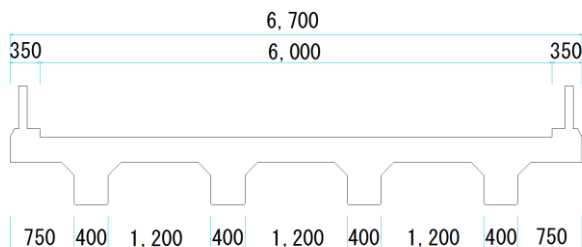
本研究では橋梁を対象とし，対象橋梁に振動を与え，固有振動数を把握し，健全性評価手法の構築を目的とする。

2. 対象橋梁概要

対象橋梁は沖縄県名護市に位置し，1962 年（昭和 37 年）竣工の 4 径間 RC 単純 T 桁橋である（図-1 参照）。竣工から 54 年経過しており全体的にコンクリートのひび割れ，剥離剥落，さらに露出した鉄筋は断面欠損している。損傷が激しいため現在は通行止めとなっている。



(a) 側面図



(b) 断面図

図 1 対象橋梁概略図

3. 実験概要

対象橋梁は 4 径間 RC 橋であり，それぞれの径間を ABCD とし，図-2 に示すように各径間ごとに衝撃荷重を与えた振動計測を行った。各径間の中心と両端に加速度計を設置し，中心に 30kg の砂袋を 70cm の高さから落下させた。これをそれぞれ 3 回程度繰り返した。なお，図中の青で示した矩形が加速度計，×が落下位置を示している。

計測結果に対して周波数解析を行い，固有振動数を求めた。また，対象橋梁の健全時の固有振動数がわからないため，midas Civil¹⁾ を用いて有限要素解析（FEM 解析）を行い，健全時の固有振動数を求め，計測結果との比較を行う。

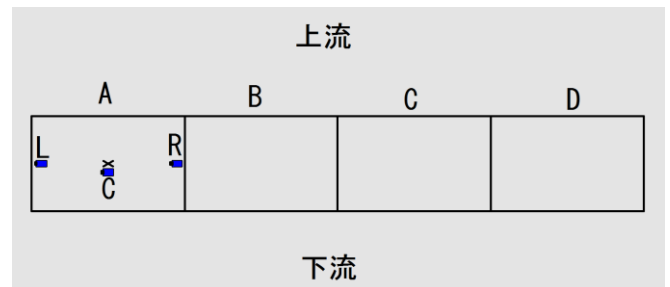


図 2 加速度計設置と衝撃荷重落下位置概要図



図 3 ポータブル小型加速度計



図 4 砂袋

キーワード：振動特性，固有振動数，有限要素解析，周波数解析

連絡先：〒903-0213 西原町千原番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail：e135305@eve.u-ryukyu.ac.jp

4. 計測結果

加速度計は川の上流に向かって s14 が左側，s03 が中央，s04 が右側で行った。

図 5 に径間 A の計測結果（2016 年 11 月）を示す。この結果より，固有周波数 33.3Hz が得られる。つぎに径間 A の中央の値を，これまで行ってきた結果と比較する。図 6 は昨年度の結果と比較したものである。昨年度の平均固有振動数が 34.05Hz であるのに対して，今年度の平均固有振動数が 33.1Hz と小さくなっていることがわかる。このことから昨年度よりも劣化が進行していることが示唆される。

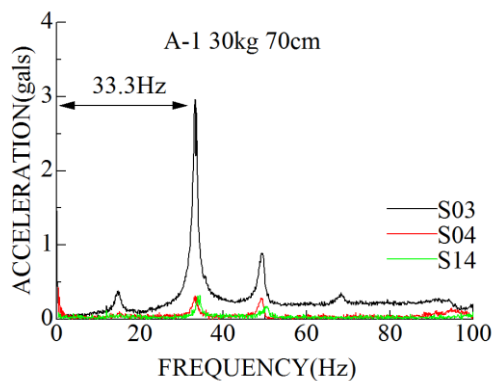


図 5 計測結果

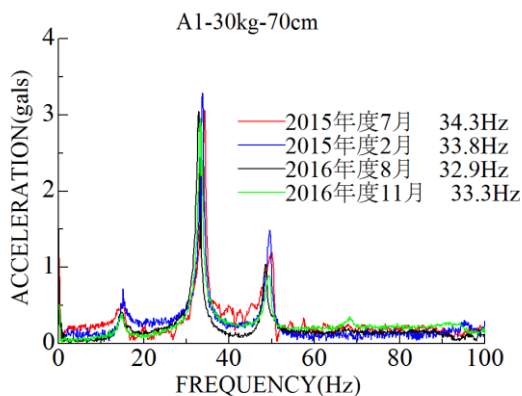


図 6 昨年度との比較

5. 健全時を予測するための有限要素解析

本研究の対象橋梁は竣工当時の固有振動数が測定されていないため，midasCivil¹⁾ を用いて有限要素解析を行った。解析に使用した材料特性は建設時の示方書を参考に定めた。境界条件は対象橋梁の形状から両端の面を拘束面とした。

図 7 に解析モデルと衝撃荷重載荷位置を示す。図の矢印の部分に載荷し，図 2 の加速度計の位置を参考に固有振動数を把握した。

解析結果から固有周期 $T=0.021$ (s) と固有振動数 $f=48.0\text{Hz}$ を得た。

図 8 に実測値と解析値の比較を示す。この図より，健全時を想定した解析結果に比較し，計測結果の固有振動数が低下していることがわかり，劣化が進行している可能性があることが示唆される。

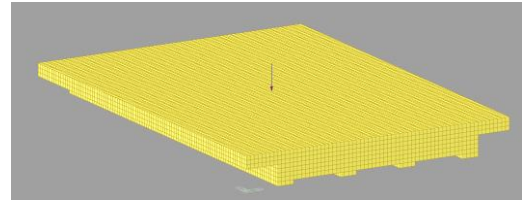


図 7 解析モデル 正面

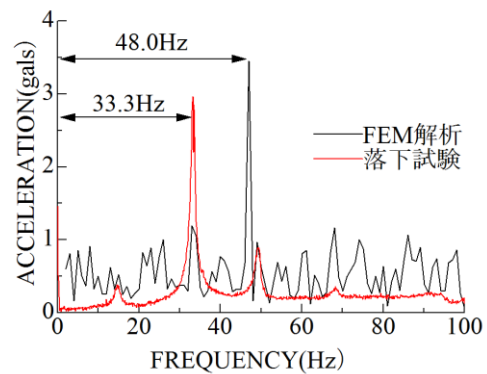


図 8 FEM 解析と落下試験結果の比較

6. まとめ

本研究は構造物の振動特性を利用し，非破壊的に対象橋梁の固有振動数を把握し健全性評価手法の構築を目的として行っている。解析結果と有限要素解析で得た健全時モデルから対象橋梁の劣化の進行が確認された。この 2 つの結果は振動特性を利用した健全性評価が可能であることを示している。今後は対象橋梁の固有振動数の把握に加え，どの程度表面のコンクリートが剥離しているのか，内部の鉄筋の腐食による影響なども解析によって正確に検討できるよう研究を進める予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり，沖縄県北部土木事務所の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

1) midas IT Japan:

<http://jp.midasit.com/midasit/>

各種公共交通機関の振動特性に関する基礎研究

琉球大学 ○津田浩希

琉球大学 藍壇オメル, 富山 潤, 須田裕哉

1. はじめに

飛行機や新幹線, モノレール, 在来線などは, 社会の生活基盤を支える重要な公共交通機関である. 公共交通機関, その下部構造物には, 繰り返し荷重が作用している. その荷重を考慮しながら, 維持管理および機能向上し供用していかなければならない. 維持管理には健全性評価が必要である. 近年, 構造物の健全性を構造物自身の振動特性から評価する方法の検討が行われている. 本研究は, 各種公共交通機関に加速度計を設置し, 測定・分析結果をもとに振動特性を求め, 健全性評価の可能性, 維持管理への適用性を検証する. 実際には, 飛行機, モノレール, 在来線を対象として測定, フーリエスペクトル解析を行っている. しかし, 概要では飛行機について書くものとする.

2. 研究目的

本研究の目的を以下に示す.

- (1) 各種公共交通機関に作用する動的な力の把握
- (2) 各種公共交通機関が下部構造物に与える動的な力の把握
- (3) 様々な状況下で各種公共交通機関の快適さ

以上3つを, 本研究の目的とする.

3. 研究概要

測定は, ポータブル加速度計を用いて行う. ポータブル加速度計は, 非常に小型であり, 設置が容易である. 交通機関のフレームなど安定した場所に両面テープや磁石を使い設置

することで容易に測定することができる. 今回の測定では, 進行方向 (x), 横方向 (y), 鉛直方向 (z) の3成分の加速度を250秒間測定した. それをフーリエスペクトル解析し, 周波数特性を求める. 測定した加速度記録より飛行機などの乗り物に作用する動的な力を求めることができる. 逆に乗り物による下部構造物に作用する動的な力を求めることができる.

4. 計測結果

実際には, 離陸時, 飛行時, 航空機別の測定データもあるが, 今回は飛行機の着陸時の計測結果を示す. 図1は加速度記録から求めたフーリエスペクトル, 図2は飛行機の着陸時の加速度記録を示す. 図1のフーリエスペクトル図から見てわかるように, 進行方向の固有振動数は50Hz, 鉛直方向の加速度の固有振動数はおよそ30Hz, 横方向の固有振動数はおよそ50Hzであることがわかる.

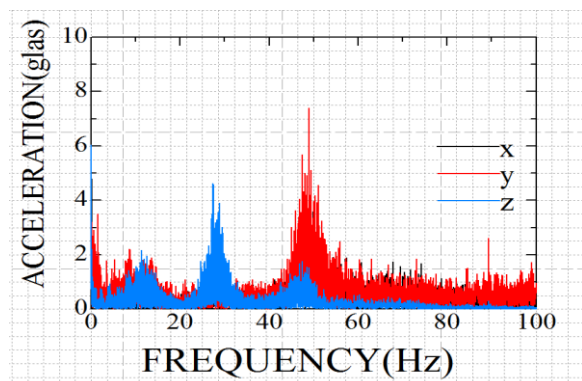


図1 フーリエスペクトル (x : 進行方向 ; y : 横方向 ; z : 鉛直方向)

キーワード : 振動特性, 公共交通機関, 乗り心地, 荷重, フーリエスペクトル

連絡先〒903-0123 西原町千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL098-895-8663

このことから、鉛直方向の加速度の周期が1番大きいことが分かる。人は短周期の方が揺れを強く感じると言われていることから、鉛直方向の揺れを大きく感じたことが分かる。また、加速度記録からわかるように最大の加速度がおおよそ2000galに達していることが分かる。この状況はパイロットの表現でハードランディングといわれている。Newtonの第2法則より荷重と加速度の間に次式が成り立つ。

$$F(t) = m \cdot a(t) \quad (1)$$

ここに $F(t)$ は外荷重、 m は航空機の質量； $a(t)$ は加速度である。式(1)より時局(t)において飛行機に作用する動的力を求めることが出来る。逆に、飛行機による下部構造物である滑走路に作用する動的な力をNewtonの作用反作用の法則より求めることができる。

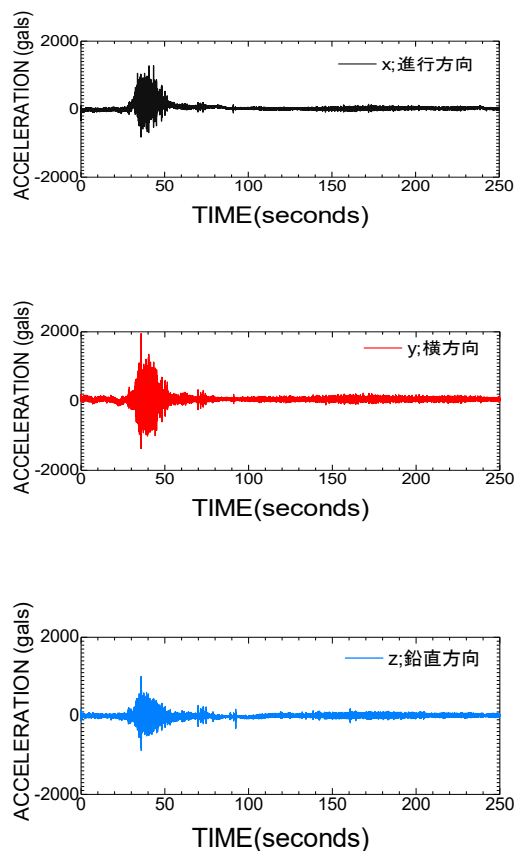


図2 加速度記録

5. 乗り心地

乗り心地を左右する要因にはいくつかのものがあげられるが、中でも振動が一番大きな要因となっている。乗り心地の評価には、等感覚曲線と乗り心地レベルが用いられている(図3)¹⁾。本研究では、周波数およびその振幅を把握することができている。解析はまだですが、今後、文献を参考にこれらのデータを用いて乗り心地を評価する解析を実施する予定である²⁾。

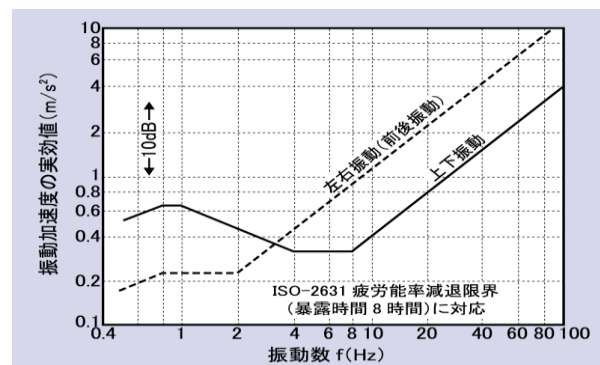


図3 等感覚曲線

6. おわりに

本研究のような研究例が少なく、今後同様な計測を行うことで再現性を確かめる必要があるが、現時点の計測データを基に、ポータブル加速度計を用いた振動特性の計測は荷重を把握することに関して良い結果が得られた。また、違う飛行機との比較や新幹線、在来線、モノレールにおいてカーブ時や他の車両とすれ違い時などの状況別ではどのような結果になるのか検証することが必要である。乗り心地の評価についても、検討を続ける予定である。

参考文献

- 1) 公共財団法人 輝堂総合技術研究所：鉄道車両の乗り心地測定および評価
- 2) 眞田 一志， 風戸 昭人：空気圧制御による鉄道車両の乗り心地向上

沖縄本島における石積文化財の保全に対する多重パラメータ動態観測システムの開発と適用

琉球大学 平良ひかり, 藍檀オメル, 富山潤, 須田裕哉, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷直彦

1. はじめに

琉球諸島には、城（グスク）や石橋、など沖縄独特な石積み構造物が文化財として多数あり、多くは琉球石灰岩上や屋外に存在。石積み構造物の力学的安定性は構造の複雑性・地盤の影響・地震や気象などの外的要因が大きく関わっており、建造されてから数百年の年月が経過しているため劣化・風化現象によって長期的な破壊が進行している。本研究では今後発生し得る被害に備えるため、勝連城址を対象に石積み文化財を長期的モニタリングし構造物の静的及び地震時の安定性を検討する。

2. 勝連城址概要

勝連城址は勝連半島南風原にあり 12～13 世紀に築城。標高 98m の琉球石灰岩丘陵上に築かれており、5 つの郭からなる。城址の地質は、基盤となる琉球石灰岩と、その下に知念砂層、島尻泥岩層が存在している。島尻泥岩は風化に対する抵抗力が弱く、軟質化、土壌化しやすい。

3. 多重パラメータ動態観測システム

勝連城址岩盤の長期的安定性動態を観測するため、多くの計測が可能な多重パラメータ（AE、変位、傾斜、温度、湿度、気圧、加速度、電位）動態観測システムを三の郭南側に設置した。また、変位計（5 台）と AE センサーを城壁に設置状況を図-1 に示す。



図-1 多重パラメータ動態観測システムの設置状況

4. 常時微動計測システム

常時微動測定は、微小な地盤振動を測定して地盤の振動特性の推定や地盤種別の判定などに利用するために行う。勝連城址では標高の違いによる振動特性を調査するため、一の郭、二の郭、四の郭での測定を行った（図-2）。



図-2 常時微動計測システム

5. 多重パラメータ動態観測システム計測結果

5.1 温度・湿度・気圧・降水量

勝連城址三の郭南側の城壁に 2016 年 2 月に設置した多重パラメータ動態観測システムによる 2016 年 5 月 2 日からの観測についてここで述べる（図-3）。

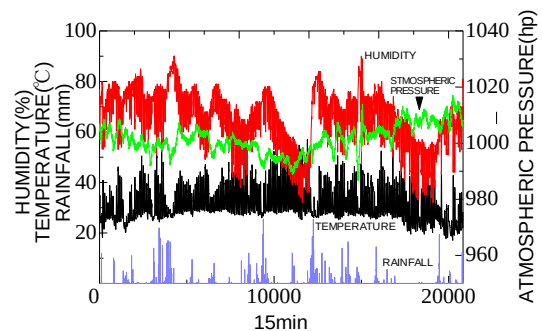


図-3 温度、湿度、気圧、降水量（5/2～12/5）

5.2 変位、AE 挙動

まず、変位、温度、湿度、降水量の結果を示す。図-4 からわかるように変位は全体的に少しずつ変化を示し、5 月 20 日 8 時 15 分に 1.363 mm、同日 8 時 30 分 1.324 mm、8 時 45 分 1.313 mm と 30 分で -0.039 mm の急な差が見られている。

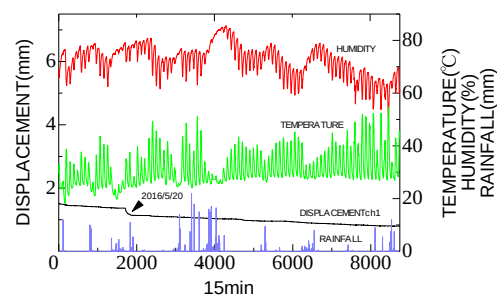


図-4 変位 ch1、温度、湿度、降水量（5/2～8/1）

次に、8 月 1 日～9 月 30 日までの 5 台の変位計の

キーワード：石積み文化財、多重パラメータ、常時微動、航空測量

連絡先：〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail: e105311@eve.u-ryukyu.ac.jp

結果と AE, 降水量を比較し図-5 に示す。

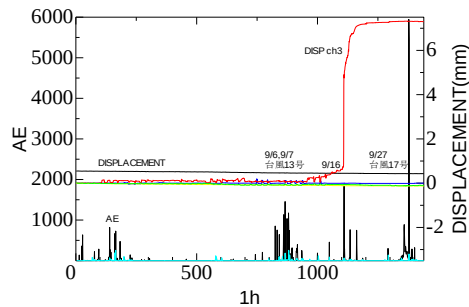


図-5 変位, AE, 降水量 (8/1~9/30)

9月7日に台風13号の影響で降水量が最大で25.5mmとなり,その影響でAEが頻繁に発生する。また,台風13号が去ったあと変位に変化があらわれはじめ,9月16日に大きく変形した。14時30分に1.539mm,15時00分に4.408mmと+2.869mmの大きな変化が表れ,そこから徐々に値は大きくなり9月27日14時30分に最大で7.319mmとなる。それと同じ日にAEも発生しており,9月16日のAE発生は城壁の変形の影響によるものと思われる。地震時のAE発生はそれほど大きくなく,風雨の影響によるAE発生が多い。

6. 常時微動計測システム計測結果

標高の違う3カ所で,それぞれ3回の測定を行い,解析結果を図-6にフーリエスペクトルで示す。城址上部の一の郭に関して,各成分のフーリエスペクトル値は10.74Hzに卓越している。また,中央部の三の郭と下部の四の郭に関しては各成分の値が10.83Hzと同様の値となっており3カ所に差はあまり見られない。

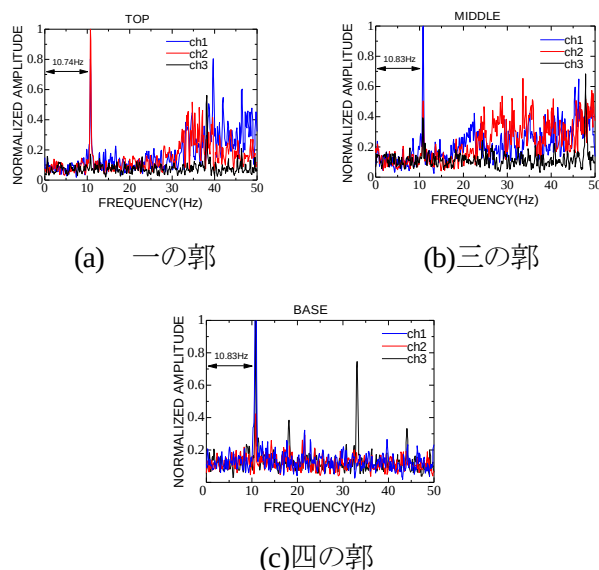


図-6 フーリエスペクトル

7. ドローンによる航空測量

従来の航空測量の技術を応用して,ドローンを用いて撮影した画像データから3Dモデル化する技術が近年の画像解析ソフト・ドローン撮影技術の向上により急速に普及している。震災時に土砂崩れや構造物の崩壊があった場合,震災前後の3D画像解析モデルを比較することによって崩壊面積,体積,斜面崩壊土砂量,厚さなどのデータを計算,解析して出すことができ,そこから崩壊の仕方を予測することもできる。勝連城址でもドローンによる航空測量を取り入れ,城址に変形があった場合または地震などの震災で崩壊した場合に3D画像解析モデルの比較をできる。

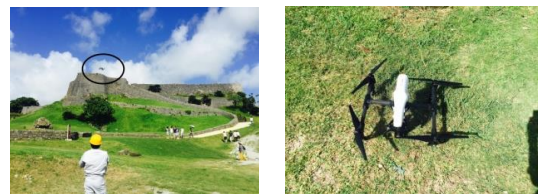


図-7 勝連城址ドローンによる測量

8. まとめ

本研究で得られた結論は下記の通りである：

- 1) 多重パラメータ動態観測システムによって石積構造物の長期的な挙動を動態観測が可能である。
- 2) 2016年5月20日に城壁に対して-0.039mmの鉛直方向の変位が観測された。
- 3) 2016年9月16日から27日にかけて+5.78mmの開口が見られ,台風13号による降水量の影響も考えられる。16日に開口の影響と思われるAEが発生した。
- 4) 常時におけるAE発生は風雨の影響を受けている。
- 5) 城址の標高差による振動特性の違いは小さい。
- 6) ドローンによる航空測量は今後も継続する。

参考文献

- 1) 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 渡久地真, 高良倉行:歴史的石積み構造物に対する多重パラメータ動態観測システムとその中城城址への適用。第43回岩盤力学シンポジウム, 土木学会, 146-151, 2015。
- 2) 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤: 沖縄本島における石積文化財の地震時の応答に関する計測システムの開発と応用。第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, 56-61, 2016。
- 3) 鈴木浩一:ドローンによる3次元の地形・構造物の計測と設計・防災等への活用, 島嶼防災研究センター, 発表会

加速度応答を用いた変位応答モニタリングに関する検討

株式会社 TTES
岐阜大学

正会員 ○梅川 雄太郎、菅沼 久忠
正会員 木下 幸治 学生会員 小野 友暉

1. はじめに

全国に約 70 万以上あるとされる橋梁の高齢化が進行しており、インフラ構造物維持管理の重要性が高まっている。そのような中、維持管理に関わる技術者の人材不足を補うべく、センサを用いた構造ヘルスマニタリングによる効率的な維持管理手法に関する研究・開発が試みられている。しかしながら、構造ヘルスマニタリングにより算出される指標の多くは、従来の基準類には定義されていない新しい概念であるため、維持管理に利用し、判断材料として使用することが難しい。また、効率的に維持管理すべき多くの中小橋梁を抱える地方自治体は財源不足であり、最小限の費用で可能な限り多くの橋梁を簡易に点検可能にする手段が望まれている。

本研究では、最小限の労力と費用で中小橋梁を効率的に維持管理する方法について検討することを目的とする。道路示方書で定義されている「たわみの許容値」に着目し、車輛通行荷重により発生するたわみ量、すなわち変位応答を監視するモニタリング方法を検討することとした。また、変位応答のモニタリング方法は、加速度応答の 2 階積分による算出を用いることとした。加速度計は、橋梁構造物の変位計測において必要な不動点を必要とせず、また、無線化可能であり、現場での高い作業性が期待できるためである。

本論では、試験車輛通行荷重による変位応答を、加速度応答より算出する方法について検討し、計測変位応答と算出変位応答を比較することで、算出方法の精度・誤差を評価する。また、試験車輛通行荷重に伴い発生する変位応答結果より、橋梁のたわみの許容値に関して、荷重に対する最大変

位応答の関係より使用限界について検討を行う。

2. 加速度応答を用いた変位応答の算出

加速度センサにより計測した応答を分析し、車輛通行時の橋梁の変位応答を算出する方法について示す。理論的に変位応答は加速度応答の 2 階積分により定義される。しかしながら、実際の積分過程では、加速度センサ自体が持つ自己ノイズの影響により、大きな積分誤差が生じるため、加速度センサの性能および積分処理の工夫が重要となる¹⁾。特に、車輛通行による変位応答は準静的な半波長応答であり、積分誤差と混在する変位応答を判別・処理することが難しい²⁾。

文献¹⁾では複数の加速度センサを利用し、車輛検知することで変位応答算出する方法も提案されているが、本検討の主旨として、最小限の計測機器での実現を目標とし、加速度センサは 1 個のみを使用して変位応答を算出することとした。本研究では、変位応答算出プログラムは事前に橋梁の情報(長さ等)を入力し、加速度応答から変位応答の変換はブラックボックス化して実施した。積分誤差の影響と変位応答を自動判別し、基線補正処理可能な手法を考案・適用することとした。

3. 対象橋梁および計測概要

対象橋梁および計測機器の設置位置を図 1 に示す。対象橋梁は、1 車線であり、支間長約 24[m]、全幅員 4.9[m]の鋼単純 H 桁橋である。加速度センサは支間中央から約 3[m]離れた主桁下フランジ上に設置した。また、同位置にロッドを地面まで伸ばし、その先端に接触式変位計を設置し、加速度応答からの変位応答への算出精度の確認用として利用した。加速度センサと変位計は同じデータロガーに接続し、時刻同期を行っている。なお、デ

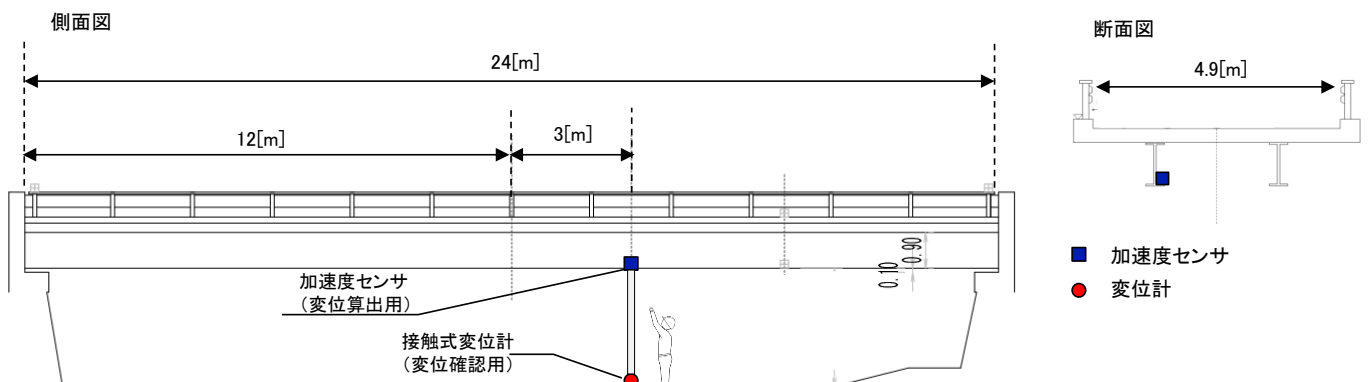


図 1 対象橋梁側面図、断面図および計測設置位置詳細

キーワード 構造ヘルスマニタリング、桁たわみ、使用限界、加速度応答、変位応答

連絡先 〒153-0051 東京都目黒区上目黒 3-30-8 (株)TTES TEL:03-5724-4011

ータのサンプリング周波数は、100[Hz]とした。

4. 走行試験概要

走行試験の様子を図2に示す。試験車両は2軸車で全重量は6[ton]であった。走行試験は左右両方向へ橋面上を走行した。通過速度は約20[km/h]で、ビデオの記録や計測した変位応答を確認すると約7秒経過している。すわなち、通過に伴い発生するたわみ成分は、積分誤差が卓越する1[Hz]以下周波数成分であると確認できる。

5. 算出変位応答の誤差・精度評価

走行試験において、試験車両通行に伴い発生する鉛直方向加速度応答と変位応答の計測結果の例を図3に示す。最大で約2[mm]の計測変位応答が確認できる。得られた鉛直方向加速度応答を独自手法により積分処理することにより、図4の結果が得られた。計測変位と算出変位で傾向が一致していることが確認できる。最大変位に着目すると、計測変位が1.84[mm]に対して、算出変位は2.08[mm]であり、約10[%]の相対誤差である。また、分析区間全体の計測変位と算出変位の誤差を評価すると、標準偏差の3倍（約99%確率領域）は0.16[mm]であり、加速度応答から算出した変位応答の算出精度は ± 0.16 [mm]と評価できる。走行試験毎の算出精度を評価し、表1にまとめた。各試験についても、算出精度が1[mm]以下であることが確認できた。

6. 変位応答に基づく使用限界評価に関する検討

道路橋示方書に定義されているたわみの許容値の算出式に従うと、今回の対象橋梁の場合、たわみ制限、すなわち使用限界は約29[mm]である。加速度応答からの変位応答への算出精度誤差は、それと比較して約1%以下であることから、車輛通行荷重に対するたわみ量を加速度応答より算出し、評価するには十分な精度であると考えられる。

最大たわみ量が荷重に対して線形の関係を仮定した場合、制限値である29[mm]に到達する荷重は約95[ton]と予想される。しかしながら、実際に



図2 走行試験の様子および試験車両

これほどの荷重は想定して設計されていない上に、非線形な挙動が突然発生することも考え得るため、変位応答のみによる使用限界の評価方法に関して、今後、更なる検討の余地がある。

7. まとめおよび今後の展望

橋梁の維持管理を最小限の費用で効率的に行う方法として、車輛通行荷重に対する加速度応答を用いた変位応答モニタリングに関する検討を行った。

1. 加速度応答よりブラックボックス化された積分処理によって、橋梁の使用限界判断に直接利用可能である変位応答を算出できた。
2. 加速度応答より算出した変位応答の精度は、たわみの許容値に着目した使用限界の判断を行う上では十分な精度であることが分かった。
3. 変位応答モニタリングによるたわみの許容値に着目した使用限界評価を行う方法に関して、更なる検討の余地があると考えられる。

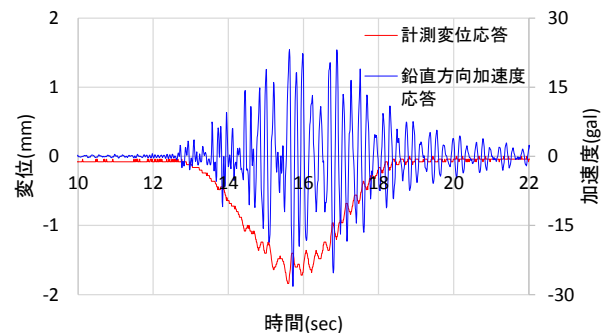


図3 車輛通行時の計測変位応答および鉛直加速度応答

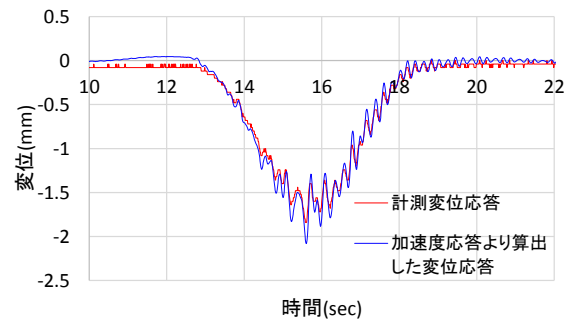


図4 鉛直加速度応答より算出した変位応答と計測変位応答の比較

表1 走行ケース毎の算出変位応答の精度・誤差評価結果

走行No.	走行方向	最大変位[mm]	算出最大変位[mm]	精度[mm]
1	右	1.60	1.62	± 0.25
2	左	1.68	1.92	± 0.17
3	右	1.68	2.08	± 0.21
4	左	1.84	2.08	± 0.16
5	右	1.56	1.77	± 0.13
6	左	1.76	2.08	± 0.18

参考文献

- 1) 関屋ら：“橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案”，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 72, No. 1, 61-74, 2016.
- 2) 梅川ら：“Evaluation of Vehicular Induced Displacement by Using Wavelet Transformation from Wireless Acceleration Measurement”，IABSE Symposium Report, IABSE Workshop Helsinki 2015: Safety, Robustness and Condition Assessment of Structures.

道路橋照明柱の疲労特性に関する研究

琉球大学 工学部環境建設工学科 ○浅田智巳, 下里 哲弘, 田井 政行, 有住 康則

1. 序論

平成23年に沖縄地方に襲来した台風9号(最大風速約50m/s)により、沖縄南部沿岸地域の高架橋上に設置された道路橋照明柱(以下照明柱)3基が倒壊し、複数の照明柱に亀裂が発見された。詳細な原因は現在調査中であるが、照明柱は1本のパイプで支持されており、渦励振が発生し易い構造といえ、これが図-1に示すような照明柱基部での疲労破壊を引き起こしたと推測される。近年の地球温暖化の影響により、超大型強力台風の襲来が予想される中、照明柱の疲労損傷はますます増加し、顕在化していくことが予測されるため、照明柱の倒壊を防ぐためにも、照明柱の疲労特性を明らかにすることが重要である。

そこで本研究では、沿岸部の道路橋に設置された2種類の照明柱において基部に生じるひずみのリアルタイムモニタリング計測を実施し、照明柱基部の疲労特性の分析を行った。なお、疲労特性の分析にはリアルタイムモニタリング結果から疲労損傷度の算出が可能な独自開発プログラムを用いた。

2. 疲労損傷度算出システム概要

照明柱基部の疲労特性を明らかにするために、リアルタイムモニタリング結果から疲労損傷度を算出可能な疲労損傷度算出システムの開発を行った。

(1) レインフロー法による応力範囲発生回数の計数

図-2(a)に示すモニタリングより得た波形から図-2(b)に示す極値のみを抽出した波形にレインフロー法を用い応力範囲の発生回数を計数する。なお、本疲労損傷度算出システムに用いたレインフロー法アルゴリズムは ASTM E1049 - 85(2011)¹⁾に準拠する。

(2) 疲労損傷度の解析

溶接継ぎ手の分類により決定される疲労設計曲線の等級とレインフロー法より計数した応力範囲と発生回数に累計疲労損傷則を用い疲労損傷度 D を算出する。この際、打ち切り限界以下の応力範囲を損傷に含めない手法がマイナー則、含める手法が修正マイナー則である。図-2(c)に示すよう応力範囲 σ_i の場合の破断までの繰返し回数を N_i 、解析により計数した応力範囲 σ_i の場合の繰返し回数を n_i としたときの疲労損傷度 D の算出式を下式に示す。

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

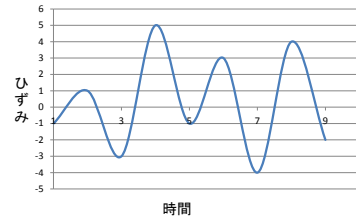
開発した疲労損傷度算出システムの動作例を図-2(d)に示す。

3. 台風時、強風時の照明柱基部の疲労特性

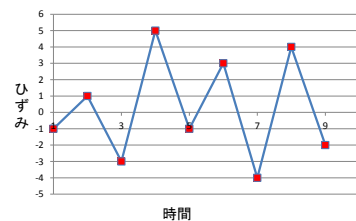
開発した疲労損傷度算出システムを用い、最大風速が大きく



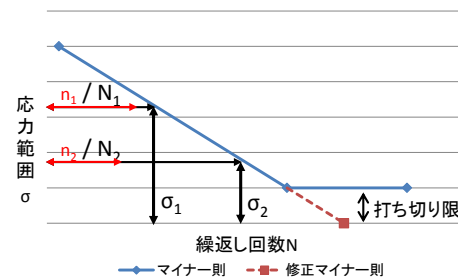
図-1 照明柱基部き裂



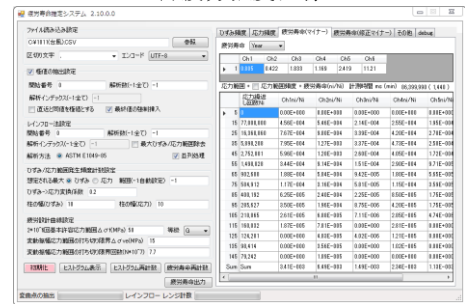
(a)モニタリング波形



(b)極値抽出波形



(c)疲労強度曲線



(d)疲労損傷度算出システム動作例

図-2 疲労損傷度算出システム



(a)モヤシ形 (b)直線形

図-3 照明柱上部構造

キーワード 実働疲労, 疲労, 損傷, レインフロー法, 照明柱
連絡先 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地
国立大学法人 琉球大学 工学部 環境建設工学科 TEL:098-895-8666 FAX:098-895-8677

異なる台風時、強風時の照明柱基部に発生する応力範囲、マイナー則による疲労損傷度の比較を行った。計測を行った照明柱上部構造は図-3(a)に示すモヤシ形で材質は鋼である。基部の溶接構造は面外ガセット継手に分類されるため疲労等級は G 等級²⁾である。なお、応力計測位置は図-4 に示すリブ上の溶接ビード止端から 10mm の位置である。

計測の解析結果を図-5 に示す。図-5(a)のひずみ波形を一見して分かる通り、台風時と強風時では応力の発生範囲が大きく異なる。台風時（最大瞬間風速 38.3m/s、平均風速 16m/s、1 回通過期間 3 日）の最大応力範囲は 150MPa であり、応力範囲の発生回数より疲労損傷度は 7.88×10^{-3} と非常に大きな損傷を蓄積、強風時（平均風速約 10m/s、3 日間）の最大応力範囲は 20MPa であり、応力範囲の発生回数より疲労損傷度は 1.93×10^{-5} であった。これより、台風時は強風時に比べ最大で約 7 倍の応力範囲が発生しており、約 400 倍の疲労損傷度を蓄積することが判明した。

4. 照明柱上部構造が照明柱基部の疲労特性に及ぼす影響

次に照明柱上部構造が図-3(a)に示すモヤシ形と図-3(b)に示す直線形と異なる場合の照明柱基部に発生する応力範囲の比較を行った。照明柱の材質はアルミニウムである。なお、応力計測位置は図-4 に示すリブ上の溶接ビード止端から 10mm の位置である。

計測の解析結果を図-6 に示す。モヤシ形（最大瞬間風速 7m/s、2 時間）の最大応力範囲 4MPa であった。直線形（最大瞬間風速 10m/s、2 時間）の最大応力範囲は 22MPa であった。直線形のみ風速 5~6m/s の風が連続する場合に大きく振動した。基部の溶接構造の疲労強度曲線は IIW の定義する FAT20³⁾であるため、マイナー則打ち切り限界は 9.49MPa かつ 20MPa 時の疲労限界は 2.0×10^6 回である。応力範囲の発生回数よりモヤシ形は最大応力範囲が打ち切り限界以下ため疲労損傷度は 0 である。また、直線形に 2 時間で生じた疲労損傷度は 3.36×10^{-3} である。これより、モヤシ形では常時には疲労損傷度を蓄積しないことや直線形では常時から大きな疲労損傷度を蓄積していることが判明した。ただし、計測精度を高めるためには長期間モニタリングを行う必要がある。

5. 結論

台風 1 回通過により強風時の約 400 倍の疲労損傷度を蓄積する。また直線形では強風時や常時から非常に大きな疲労損傷度を蓄積する。これより、風荷重による疲労特性の観点からは強風時や常時の風に対してはモヤシ形の照明柱が直線形より安全であるといえる。

参考文献

- 1)ASTM E1049-85(2011)e1
- 2)三木 千寿 (2000). 鋼構造 共立出版株式会社
- 3)A. Hobbacher (2007). IIW document XIII-2151-07 / XV-1254-0

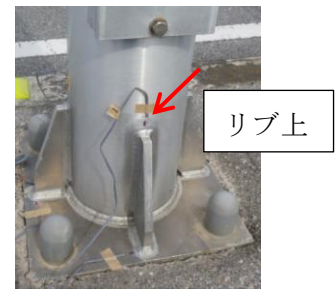
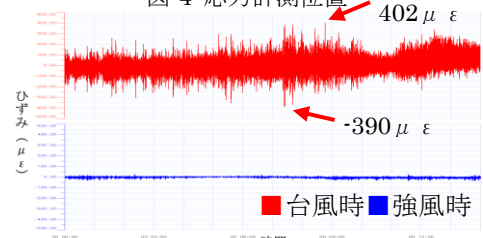
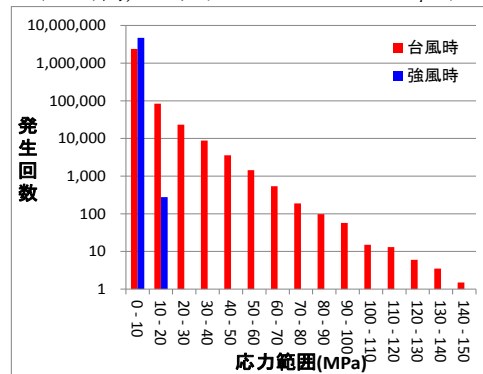


図-4 応力計測位置

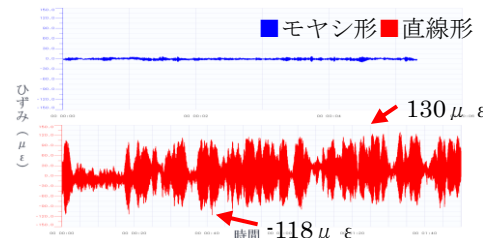


(a)ひずみ波形
(14 時間、ひずみレンジ 500 ~ -500 με)

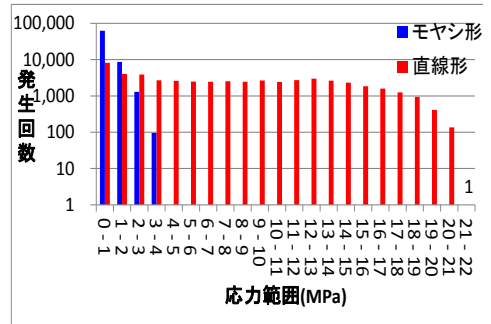


(b) 応力範囲発生回数

図-5 台風時、強風時疲労特性



(a) ひずみ波形 (モヤシ形 2 時間、直線形 2 時間、ひずみレンジ 150 ~ -150 με)



(b)応力範囲発生回数

図-6 モヤシ形、直線形疲労特性

具志川環状線の基礎工事近接地下墓に及ぼす影響に関する研究

琉球大学 田中秀和, 藍檀オメル, 富山潤, 須田裕哉, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷直彦

1 研究目的

具志川環状線 4 号橋の A2 橋台が琉球石灰岩層を掘り込んで造られた墓に近接しており, 施工を行う際, 振動等による墓への影響が懸念された. 本研究では, 墓の安全を目的として施工による影響を各種計測法により管理する¹⁾.

2 現場の地形

平成 19 年 5 月に沖縄県土木建築部中部土木事務所や株式会社芝岩エンジニアリングによって, 報告された報告書によると, A2 橋台部は琉球石灰岩がつくる孤立的な高まりがあり, その比高は河川付近を基準にすると 20m 程度に達する²⁾.

3 事前現場計測

事前現場計測は現場の地盤の伝達特性の評価を目的として行った. その計測は以下の通りである.

- 1) 弾性波速度伝達特性計測 (OAE-EX/W)
- 2) 振動振幅の減衰特性計測 (WE7000+加速度計)
- 3) AE 伝達特性の評価 (NE,OAM-AE,TANDD 計測システム)
- 4) 常時微動計測 (SPC51)

今回は AE 伝達特性の結果のみを掲載することとする. 計測方法は施工基面から, 高さ 20~30cm からバックホウを使用して衝撃を与えた. AE 計測器は 4 か所に設置し, 3 か所はボーリングした孔内先端まで鉄筋棒を挿入し, 衝撃を与えた際の孔先端で発生した AE

を設置した鉄筋棒を利用し, 鉄筋棒の上部に設置した AE センサーにより, AE を計測した. その結果を図-1 に示す. また, AE 発生回数を表-1 に示す.

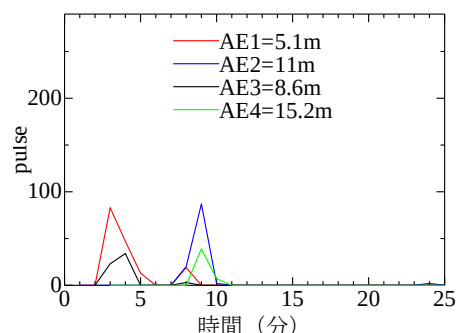


図-1 衝撃試験中の AE 発生数

表-1 バックホウの際の AE 発生回数

地点	AE発生回数(pulse)
AE-1	83
AE-2	87
AE-3	34
AE-4	39

4 室内計測

ボーリングにより, 採取したコアの物性値を把握するために圧縮試験や圧裂試験を行った. 今回は結果の一例を図-2 に示す.

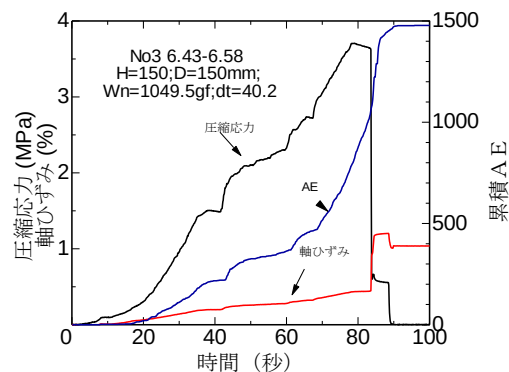


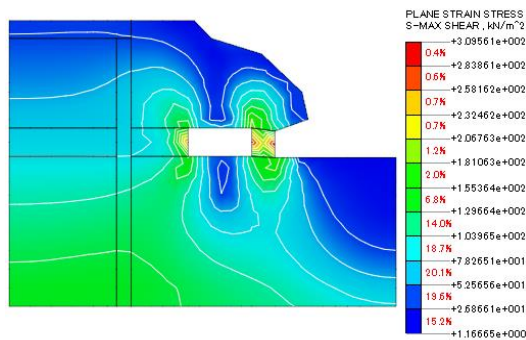
図-2 圧縮試験結果

キーワード : 事前現場計測, 室内計測, 有限要素解析, 現場計測, AE 発生数

連絡先 : 〒903-0213 西原町千原番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail : e135343@eve.u-ryukyu.ac.jp

5 有限要素法による解析

杭工事の与える影響を検証するため、有限要素法(GTS NX)の解析を行なった。数値解析は1)掘削前の状況について自重解析、2)掘削解析、3)杭施工後の荷重条件について3段階の解析を行なった。解析結果の一例として最大せん断応力分布を図-3に示す。



[DATA] CASE1, kussaku, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, m

図-3 掘削後の最大せん断応力分布

6 現場計測

今回、現場計測では下部工事に併せて次の計測を行い、地盤のモニタリングを行った。計測項目は以下の通りである。

- 1) AE 計測,
- 2) 加速度計測
- 3) 傾斜計測
- 4) 変位計測

図-4³⁾に今回は AE 計測結果の一部を紹介する。また、AE 計測結果は全体の総和のものとする。

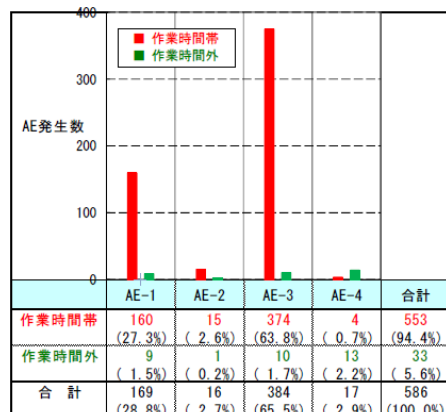


図-4 各地点 AE 発生数

7 考察

今回は AE の視点からのみ考察をすることとする。予備計測からは AE の発生回数はグラフからも分かる通り、振動源との距離と地盤の状況に関連している。振動源から最も近い地点の AE 発生数は 83 回であるのに対して、最も遠い地点の AE 発生数が 39 と減少している。これらの間の地点で AE 発生数は上下しているが、全体的にみると AE は減少している。室内実験と本計測から AE の観測地点 3 とその位置のコアの累計 AE を比較してみると下部工事を通して発生した AE の累計は 384 回であったのに対して、コアの破壊時での AE 発生数は約 1400 回であった。また、作業時間帯に発生した AE 発生回数がわずかであった。したがって、下部工事を行っても破壊レベルまでに達していない。

8 今後の課題

現段階で掘削後の数値解析が完成していないため、今後その数値解析も実施し、全体的な考察を行なう予定である。また、母岩の物性値をアイデンらによって提案された岩盤分類評価方法 RMQR を利用して、岩盤としての評価も行なう。

参考文献

- 1) 「具志川環状線橋梁設計業務委託 (H18-3・4 号橋) 土質調査報告書」(引用)
- 2) 「具志川環状線 4 号橋下部工施工振動計測管理業務, 計測概要所」
- 3) 「具志川環状線 4 号橋下部工施工振動計測管理業務, 計測概要所」(引用)

Session 4：腐食・維持管理関連

道路ストック総点検からみた道路附属物の損傷状況について

(一財) 沖縄県建設技術センター 伊波紀彦

1. はじめに

我が国の道路、橋梁、トンネルなどの社会インフラは 1960 年代の高度経済成長期に一斉に整備が進められ、近々建設後約 50 年を経過することから、全国的に施設の老朽化が懸念されているところである。平成 24 年 12 月、中央自動車道笹子トンネルの天井板が約 130m にわたって崩落し、車 3 台が巻き込まれ 9 人が死亡する事故が発生するなど、その懸念が現実のものとなっており、老朽化等により危険が生じている橋梁やトンネル等の道路構造物（道路ストック）の早急な点検調査・補修等の対策を講じる必要がでてきた。

2. 現状と課題

沖縄県においても、これまでの急速な社会基盤整備において、道路や橋梁、標識・照明等の附属施設など数多くの公共土木施設が建設されており、これらは県民生活において欠かすことのできない施設となっている。

これらの公共土木施設は、建設から長期の年数が経過しており、近年、主部材や附属部材の経年劣化（老朽化）により、耐久性・機能性の低下が懸念されている。

今後も既存施設を安心・安全に継続して供用していくためには健全度や損傷度を正確に把握することが非常に重要である。

現在、橋梁については、平成 22 年に策定した「沖縄県橋梁長寿命化修繕計画(案)」に基づき、定期的な点検、計画的な補修を行い、予防保全型維持管理に取り組んでおり、また、道路法面についても、道路防災総点検を毎年実施し定期的に点検を実施しているところである。

しかし、道路標識や道路照明等については、これまで詳細な点検を実施した経緯がなく、また、建設年次や補修履歴が不明となる施設があり、今後の効率的な維持管理を進めるうえでの課題となっていた。

本稿では、道路ストック総点検のうち、管理施設数が膨大な道路附属物について、点検結果および損傷状況について報告するとともに今後の維持管理の方向性について述べるものである。

3. 道路ストック総点検の概要

平成 25 年 2 月、国土交通省からの通達に基づき全国地方自治体においては、倒壊、落下による道路利用者及び第三者被害を防止する観点から、橋梁やトンネル及び附属

キーワード 点検 道路標識 道路照明 腐食

連絡先 〒901-2202 宜野湾市普天間 1-2-16 (一財)沖縄県建設技術センター

E-mail : Toshihiko_iha@okinawa-ctc.or.jp

施設等の損傷状態を把握し健全性、変状等の異常を把握するため、道路ストック総点検を実施したところである。道路ストック総点検は、本体部材及び附属施設の損傷状況を把握することを目的として、近接目視や打音検査、触診等を実施したものである。

対象施設、内容はそれぞれ以下のとおりである。

- ① 橋梁：第三者被害が予想される全部材・施設等を近接目視、打音、触診による点検。
- ② トンネル：覆工、坑門工、附属施設及びその取付け金具を近接目視、打音、触診による点検。
- ③ 舗装：路面変状（ひび割れ、わだち掘れ、縦断凹凸等）の点検。
- ④ 道路附属物：標識、照明等について、道路の頭上に設置されている規模が大きい施設または、第三者被害が大きくなるおそれが高い施設について点検。
- ⑤ 法面・土工構造物：第三者被害を防止する観点から、法面・土工構造物の変状等を把握するための点検。

また、第三者被害の可能性のある異常が確認された場合は、可能な限り以下の応急措置を行った。

- ① コンクリート部材のうきをたたき落とす。
- ② ナットのゆるみの再締め付け
- ③ 落下可能性のある部品等の撤去

ただし応急措置は、点検で携行できる点検ハンマ等の器具によって対応可能なものに限られており、孔食や亀裂等により、重大事故に繋がる損傷を発見した場合は各道路管理者によって、措置を行ったところである。

4. 道路附属物に関する総点検

4.1 総点検実施状況

道路ストック総点検においては、管理路線 148 路線について点検を実施し、これら路線へ設置された附属施設（標識・照明）の総数は表－1 のとおりである。

	道路標識	照明灯	道路情報板	計
北部	433	813	26	1,272
中部	708	2,552	15	3,275
南部	728	2,741	3	3,472
宮古	419	772	2	1,193
八重山	300	555	4	859
計	2,588	7,433	50	10,071

表－1 点検数量

4.2 点検方法の概要

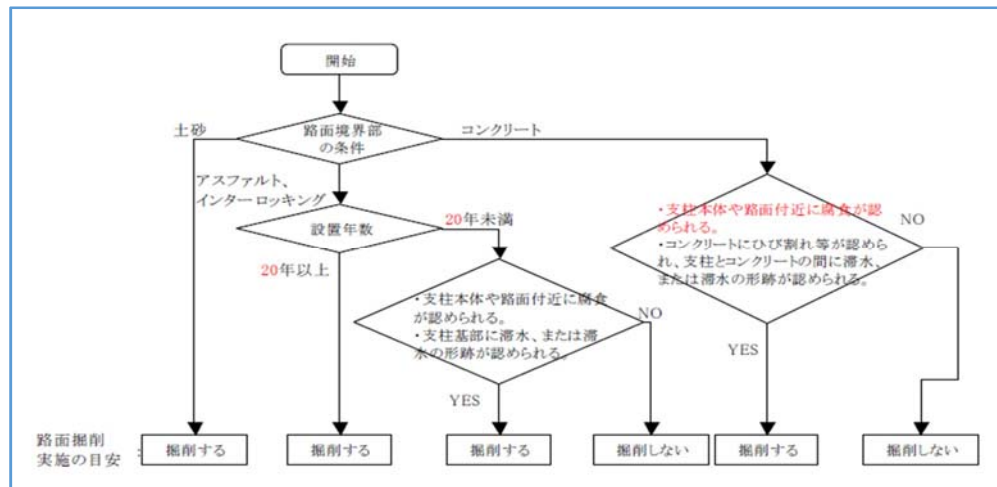
点検については、自治体版の「総点検実施要領（国土交通省 道路局）」に基づき、標識や照明等を構成する全ての部材において、高所作業車を用いて近接目視、打音点検等を実施し、目視によりボルト・ナットのゆるみを確認可能とするための合いマークを施した。

また、ベースプレートが土砂やアスファルトで覆われている箇所については、設置年数が 20 年未満についても、路面付近に腐食や滞水の形跡などが認められる場合などは、国土



写真－1 掘削点検の状況

交通省道路局国道・防災課発行の「附属物（標識、照明施設等）の点検要領（案）」の路面掘削実施の目安（下図－2）を参考に掘削点検を実施した。



図－2 路面掘削実施の目安

4.3 損傷度の判定結果について

4.3.1 損傷度の判定基準

「総点検実施要領（国土交通省 道路局）」では、発生した損傷の程度を判定するための損傷度判定基準が規定されている。

点検結果の判定区分		鋼部材における腐食の損傷内容
判定Ⅰ	異常なし	異常なし
判定Ⅱ	経過観察の必要あり	錆は表面的であり、著しい板厚の減少は視認できない。 孔食が生じているが貫通していない。
判定Ⅲ	施設の倒壊、落下等のおそれあり	表面に著しい膨張が生じているか又は明らかな板厚減少が視認できる。 貫通した孔食が生じている。

表－2 損傷度判定基準

4.3.2 損傷度の判定結果

点検の結果、附属物総数 10,071 基のうち 3,612 基(全体の約 36%)において判定Ⅲ（施設の倒壊、落下等のおそれがある）となる施設が確認された。また、大きな損傷ではないものの、経過観察が必要となる判定Ⅱの施設が 2,667 基(全体の約 26%)あり、実に 6,279 基(全体の約 62%)において、何等かの変状が確認された。

	施設計	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲの割合
北部	1,272	397	375	500	39.3%
中部	3,275	1,259	1,089	927	28.3%
南部	3,472	1,485	641	1,346	38.8%
宮古	1,193	395	269	529	44.3%
八重山	859	256	293	310	36.1%
計	10,071	3,792	2,667	3,612	35.9%

表－3 損傷度の判定結果

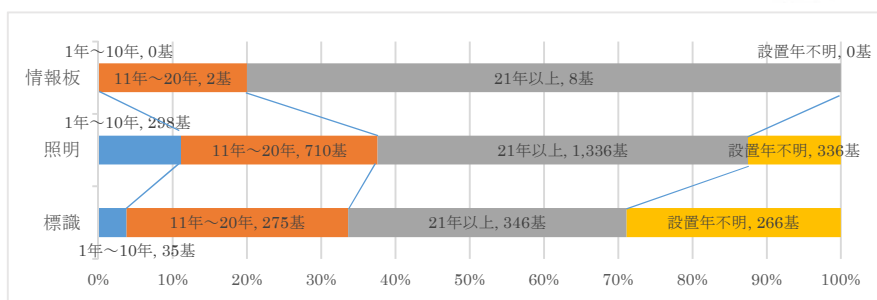
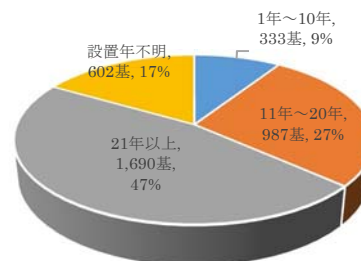
4.4 附属物の現状分析

判定結果Ⅲと判定された管理施設について、年代や損傷状況等の現状について整理し分析を行った。

4.4.1 設置年数による分類

対象施設について設置年数を10年刻みで集計したものである。これによれば、設置から21年以上経過した施設において、損傷が顕著に見られ全体の半数近くを占めていることが判明した。

設置年数	標識	照明	情報板	計
1年～10年	35	298	0	333
11年～20年	275	710	2	987
21年以上	346	1336	8	1690
設置年不明	266	336	0	602
計	922	2680	10	3612



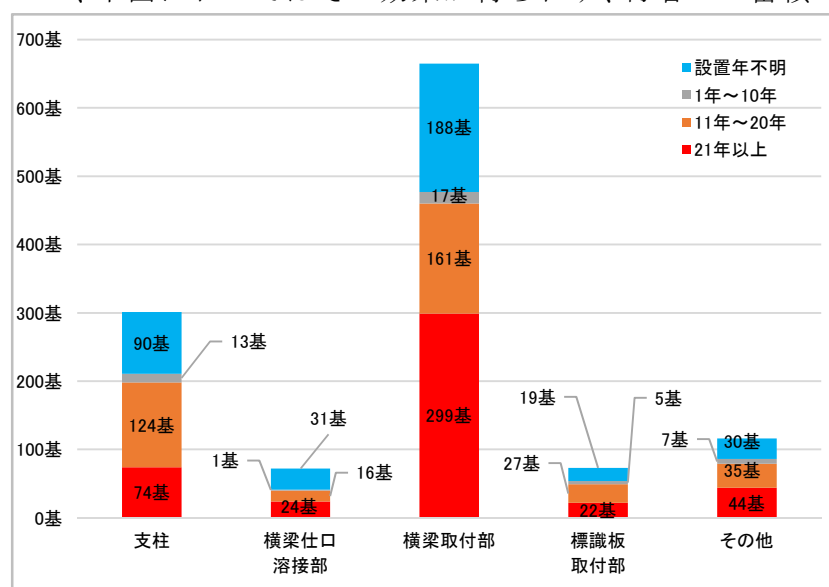
図－3 設置年数による分類

4.4.2 部位による損傷分類

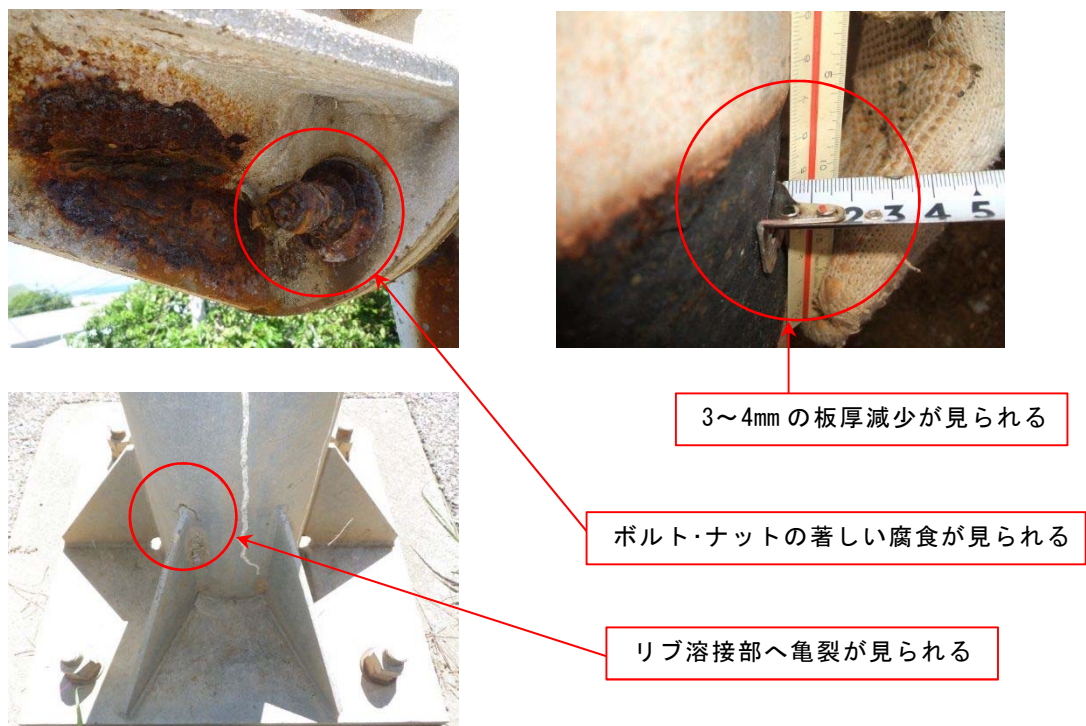
① 標識

標識における損傷は、横梁取付部と支柱への損傷が多く見られる。特に横梁取付部の損傷については、ボルト・ナットの著しい腐食や破断が確認されており、この部位においては、海風により塩化物が付着しやすい状況であり、横梁取付部の上面にあつては雨による水洗い（洗浄）効果で付着した塩分が洗い流されるものの、下面においてはその効果が得られず、付着 → 蓄積 → 腐食という状況から腐食が進行したものと考えられる。

また、支柱については主に傾きや腐食で、傾きが確認された箇所についてはナットの緩みも確認されている。



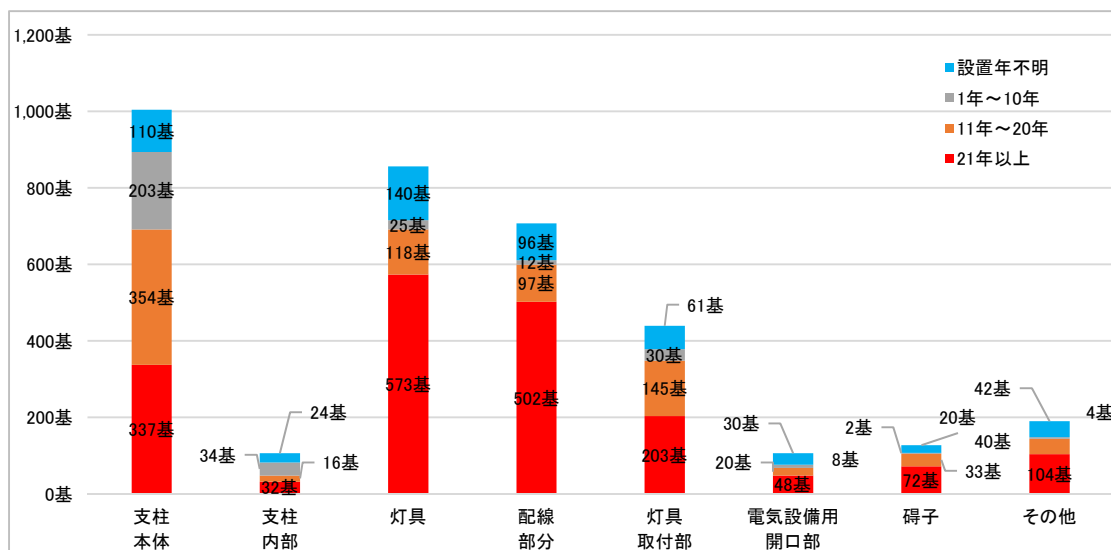
図－4 部位による損傷分類（標識）



写真－2 損傷状況 上段左：横梁取付部の腐食 上段右：支柱の腐食による減肉
下段左：リブ溶接部の亀裂

② 照明

照明における損傷は、支柱本体と灯具および配線部分への損傷が多く見られる。支柱の損傷については、亀裂や孔食、支柱本体の傾き（横断方向へ最大6cm）が確認されている。また、設置から21年以上経過した施設については、灯具や配線部分の損傷が顕著に表れていることが判明した。



図－5 部位による損傷分



写真-3 損傷状況 上段左：灯具蝶番部の腐食破断 上段右：灯具取付部の腐食
下段左：支柱の孔食 下段右：配線部分の腐食損傷

5. 今後の維持管理について

点検は第一に、管理する附属物の変状をできるだけ早期に発見することである。第二に、効率的な道路管理業務を実施するために必要な変状の程度の把握を行うことにある。

附属物については、突然の灯具落下や支柱の倒壊等の事故事例も報告されており、点検においては事故に関わる変状を早期にかつ確実に発見できることに注意を払う必要がある。

今回の点検結果から、年代が古いほど損傷し補修の必要性が高まる傾向にある。発見された変状の部位等については内容に応じた適切な措置を行うことによって事故を防止し、安全かつ円滑な交通を確保することができる。

また、蓄積された点検結果を分析することにより、道路管理面から見た附属物の設計・施工上の問題点や改善点が明らかになること、また、点検そのものの合理化に資することが期待される。このため、取得したデータは適切に保管、蓄積しておくことが重要となってくる。

今後は、安心安全な道路機能の保全のため、これら附属施設の効率的な維持管理が実施できるよう、メンテナンスサイクルで義務化された記録へ対応するため、情報の蓄積によりデータ分析や統計処理等が可能となる効率的な管理システムの構築を目指すものである。

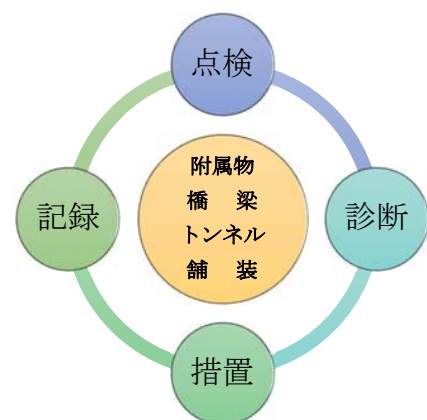


図-5 メンテナンスサイクル

鋼桁端部を対象とした Cold Spray 工法の防食皮膜特性に関する検討

琉球大学 神山哲史 加藤祐介 田井政行 下里哲弘 有住康則

1. 序論

鋼橋の防食上の弱点部の1つとして写真-1のような桁端部が挙げられる。現状の維持補修工法は、除錆を行ったうえで、再び塗装を施すといった2段階の工程であり、手間と費用を要する。さらに、桁端部は、完全に錆を除去することが困難であり、残留した錆が膨張し、塗膜の再劣化・母材の再腐食が早期に生じやすい。そのため、防食上、効果的かつ効率的な鋼桁端部の維持補修工法の開発が重要である。現在、腐食箇所に対し、錆の残留を許容しつつ素地調整と強靱な防食皮膜(亜鉛層)の形成を同時に行うことができる新たな維持補修工法である Cold Spray (以下、CS) 工法を開発中である。これまでの検討¹⁾²⁾により、腐食鋼板(平板状)に対し、完全除錆の素地調整を行わずに CS 施工を行うと、①多少の錆は残留しつつも緻密な防食皮膜が形成可能であること、②吹き付け角度は90°が最適であり、それよりも低くなると成膜性が低下するものの、吹き付け角度70°までは、有効な成膜が得られることが明らかとなった。そこで、本研究では複雑な構造空間を持った鋼桁端部を対象として CS 工法を適用し、その防食皮膜特性を明らかにすることを目的とした。

2. 試験方法

2.1 腐食鋼桁試験体における CS 施工試験

写真-2の腐食したI型桁試験体(以下、桁試験体)端部を対象にCS施工を行った。施工風景を写真-3、施工箇所を図-1に示す。初期錆状態が防食性に与える影響について検討するために、2つの領域に異なる素地調整方法で施工を行った。東側領域(初期平均錆厚244.08 μm)では、1種ケレンによって素地調整(錆の完全除去)を行ったうえで、CS施工を行った。西側領域(初期平均錆厚199.32 μm)では、ワイヤーブラシを用いた4種ケレンによって素地調整を行い平均錆厚100 μm に下げた上で、CS施工を行った。本施工では、写真-4の直線形ノズルを用いた。溶接部も面として捉え、面・溶接部ともに図-2のように蛇行したルートで施工を行った。また、ガンの大きさにより、吹き付け角度90°で施工可能な範囲と90°以下でのみ施工可能な範囲(施工面に対して垂直に溶接されている面から4cm以内)が存在した。そのような範囲においては吹き付け角度90°以下(最低吹き付け角度約75°(写真-5))で施工を行った。90°以下でのみ施工可能な範囲の一例を図-3に示す。防食性能を把握するために、CS施工した桁試験体は琉球大学構内にて大気暴露試験を実施した。琉球大学構内の腐食環境は、平均気温22.6℃、平均湿度74.1%、飛来塩分量0.253mddである。

2.2 評価・分析方法

(1) 外観調査

桁試験体におけるCS施工箇所の外観変化の追跡観察を週に1回行った。

(2) 膜厚変化計測

電磁膜厚計を用いて、桁試験体における施工箇所の膜厚変化計測を月に1回行った。

(3) 密着力試験

CS施工後2か月が経過した桁試験体の西側・東側の吹き付け角度90°以下で施工した箇所(下フランジ上面)を対象に10mmのドリルを用い、アドヒーショ



写真-1 腐食した鋼桁端部

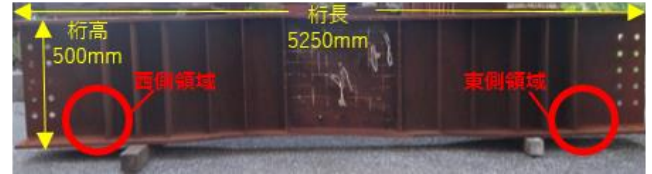


写真-2 腐食鋼桁試験体・施工領域

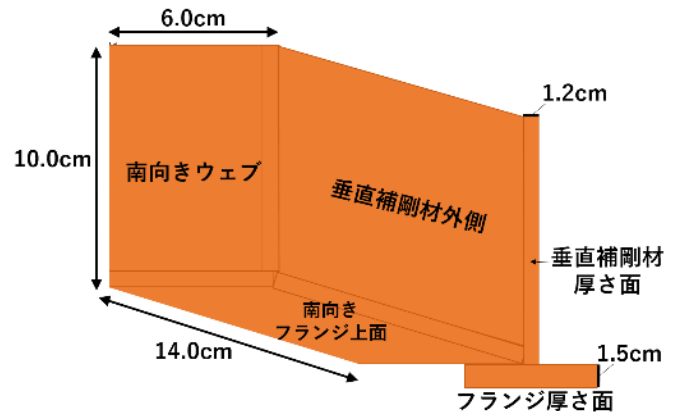


図-1 桁試験体 CS 施工箇所



写真-3 CS 施工風景



写真-4 使用ノズル
(直線形)

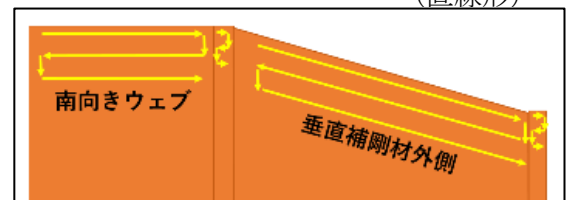


図-2 桁試験体 CS 施工ルート

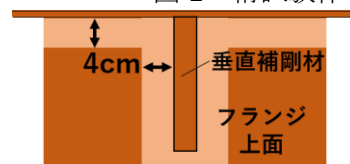


図-3 吹き付け角度
90度以下の施工箇所

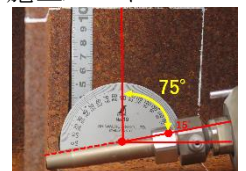


写真-5
最低吹き付け角度

キーワード: Cold Spray (CS) 鋼桁端部 構造空間

住所: 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学環境建設工学科 E-mail: e125342@eve.u-ryukyu.ac.jp

ンテスタによる密着力計測を行った。

3. 結果と考察

3.1 外観観察結果

外観観察結果の例（上段：西側領域のウェブ部，下段：東側領域のウェブ部）を写真-6に示す。CS施工後2ヵ月が経過した。全ての施工箇所において、赤錆の発生は確認されなかった。また、全ての施工箇所において、灰色への変色が見られたことから、亜鉛による腐食生成物の形成が示唆された。このことから、素地調整の違いやCSの吹き付け角度による耐食性には著しい差がないこと、桁端部へのCS工法に有用性があることが示唆された。

3.2 膜厚計測結果

各々の条件（東西領域の吹き付け角度90°で施工を行った箇所、東西領域の吹き付け角度90°以下で施工を行った箇所、全4条件）における初期膜厚と2ヵ月間の膜厚の推移を図-4に示す。初期平均膜厚は、大きい順に、西側領域の吹き付け角度90°で施工を行った箇所、西側領域の吹き付け角度90°以下で施工を行った箇所、東側領域の吹き付け角度90°で施工を行った箇所、東側領域の吹き付け角度90°以下で施工を行った箇所、であった。このことから、これまでの検討²⁾と同様、複雑な構造空間を持った鋼桁端部においても吹き付け角度が90°以下では成膜性が劣化することが確認でき、4種ケレンによって素地調整を行った箇所では、施工を行った防食皮膜の下に錆が残存していることが示唆された。目標初期膜厚を一般外面の塗装仕様の防食下地75μm以上の100μmに設定したが、平均140μm以上の初期膜厚が成膜できた。このことから、吹き付け角度90°以下では、成膜性は僅かに劣化するものの、複雑な構造空間を持った鋼桁端部においてもCS工法による成膜性能上の有用性が確認できた。また、曝露2ヵ月間で全ての条件において膜厚の増加が認められたが、これはCS皮膜の腐食生成物の形成によるものと推測される。

3.3 密着力試験結果

CS施工後2ヵ月が経過した桁試験体の西側・東側の吹き付け角度90°以下で施工した箇所における密着力測定試験の結果例を表-1、2に示す。西側の吹き付け角度90°以下で施工を行った箇所の密着力は平均8.2MPa程度であり、破壊箇所は残存していた錆中であつた。東側の吹き付け角度90°以下で施工を行った箇所の密着力は平均12.8MPa程度であり、破壊箇所は防食皮膜中であつた。西側のCS施工箇所では、吹き付け角度が90°以下であること・残存していた錆の影響により密着力が低下している可能性があるが、外観上では腐食劣化は認められないことから、このような施工条件においてもCS皮膜の防食性能としては十分発揮できているものと推測される。

4. まとめ

腐食桁試験体にてCS施工試験を行い、桁端部でのCS工法による防食皮膜特性の検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 外観観察より、全ての施工箇所において、赤錆の発生は確認されず、灰色への変色が見られた。

(2) 膜厚計測より、吹き付け角度90°以下では、成膜性は僅かに劣化するものの、構造上複雑な部位（桁端部を対象）にも十分に成膜が可能であることが示唆された。

(3) 吹き付け角度や残存錆の影響により、CS皮膜の密着力が低下する可能性もあるが、CS皮膜の防食性能としては十分発揮できるものと推測される。

これらのことから、腐食した鋼桁端部の補修工法としてCS施工の有用性が示唆された。

参考資料:1) 水流, 下里: 腐食面に対するSmartZIC工法の防食性に関する実験的研究, 2014, 2) 山城, 下里: Cold Spray工法を用いた鋼桁端部の腐食面に対する防食処理技術に関する研究, 2015



写真-6 外観観察結果

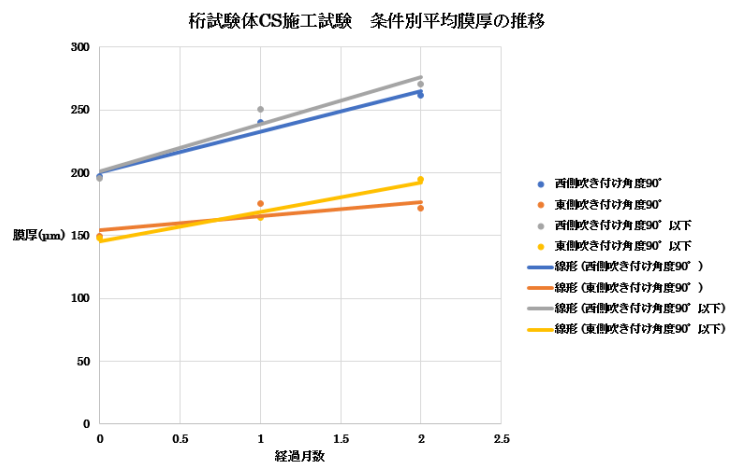


図-4 条件における初期膜と
2ヵ月間の推移

表-1 吹き付け角度90°以下で施工した
箇所における密着力測定試験の結果

対象箇所	密着力(MPa)			平均(Mpa)
	1カ所目	2カ所目	3カ所目	
西側吹き付け角度90°以下	7.99	8.63	8.11	8.24
東側吹き付け角度90°以下	14.28	11.63	12.54	12.82

表-2 密着力測定試験による破壊状況

試験箇所	ドリ側表面外観	母材側外観
西側(4種ケレン) 吹き付け角度 90度以下		
東側(1種ケレン) 吹き付け角度 90度以下		

摩擦面にコールドスプレー工法を施した高力ボルト継手のすべり耐力特性

琉球大学 ○澤田知幸 下里哲弘 田井政行 加藤祐介

1.はじめに

鋼桁橋では写真-1 のようにウェブやフランジの腐食減肉による耐力評価が課題となっている。現行の腐食損傷に対する補修法の一つに高力ボルトを使用した当て板工法写真-2 が用いられる。標準的な当て板工法では腐食鋼板面を素地調整後、無機系ジンク塗装を行うのが一般的である。しかし、実橋の腐食は完全に除錆するのは困難である。除錆できていない場合には錆が早期に再発するという課題があり、この課題を解決できる防食技術の確立が求められる。近年、音速噴射による衝突エネルギーである程度の残存錆面上に防食皮膜の形成が期待できる低温低圧型金属溶射工法¹⁾(コールドスプレー工法、以下、CS 工法)が注目されている。本研究ではこの CS 工法を腐食凹凸および残存錆面状態にある当て板高力ボルト継手の摩擦面に適用し、すべり耐力特性を明らかにすることを目的とする。

2.試験方法

2-1 すべり評価方法

すべり耐力は、式(1)に示すように高力ボルトの軸力とすべり係数を用いて評価することが出来る。一般的に、摩擦面に無機系ジンク塗装を施した場合、高力ボルト軸力はリラクセーションにより、導入軸力の低下する一方で、すべり係数が増加するといわれている。そこで CS 工法を摩擦面に適用した場合の高力ボルトの導入軸力変化をリラクセーション計測し、その特性を分析する。また、CS 面のすべり特性の検証を目的にすべり耐力試験を行う。

$$\mu = \frac{F}{m \cdot n \cdot N} \quad \text{式(1)}$$

μ : すべり係数
 F : すべり荷重
 m : 面数
 n : ボルト本数
 N : 試験時軸力

2-2 試験体パラメータ

図-1 に供試体を示す。すべり発生を容易に計測するために、ボルト 1 本側と 2 本側の配置とし、ボルト 1 本側のすべり荷重で評価を行う。表-1 に摩擦面の処理状況のパラメータを示す。パラメータは母材側に設定し、亜鉛(Zn)とアルミナ(Al_2O_3)の比率を 60:40 として施工した CS 工法型、CS 施工を膜厚 100 μm になるように調整した膜厚調整型、亜鉛比率を 100%とした Zn100%型を用意し、添接板側は 2 種ケレンを行った。なお、比較のため添接板側に無機ジンクを塗装し、母材に無機ジンクを施したケース、母材に無機ジンクを塗装したケースも併せて行った。膜厚計測には電磁膜厚計(測定精度は 50 μm 未満 $\pm 1 \mu m$ 、50 μm 以上 1000 μm 未満 $\pm 2\%$)で計測した。また、CS 工法を施した母材の表面形状は波型の形状をしており、無機ジンク塗装は平面形状をしている。(写真-4)

2-3 試験方法

(1) ボルト軸力のリラクセーション計測

写真-5 に示すボルト軸力のリラクセーション計測を行うために、写真-6 に示すボルト頭部にひずみゲージを貼り付け、軸力導入時と導入後のひずみの変化の計測を行った。なお、事前にボルト頭部のひずみゲージと高力ボルト軸力の関係の計測を行い、ボルト頭部のひずみゲージから算出した軸力値から式(2)を用いて高力ボルト軸力の残存率の評価を行った。



写真-1 腐食鋼桁橋

写真-2 当て板工法

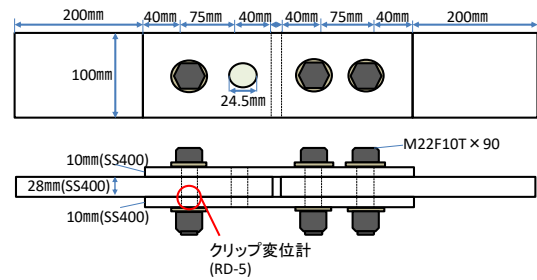


図-1 試験体寸法

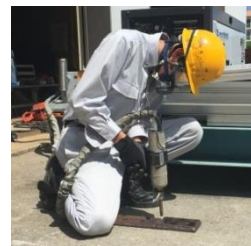


写真-3 CS 施工風景

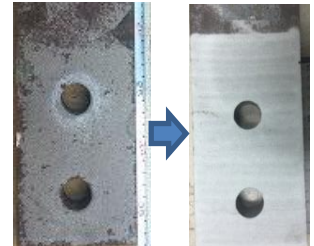
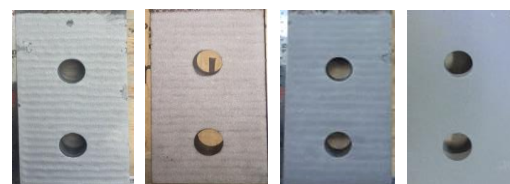


図-2 試験体施工前施工後

表-1 パラメータ一覧

	母材施工		添接板	膜厚(μm)
	CS(Zn)	CS(Al_2O_3)		
CS工法型	60%	40%	2種ケレン	161 μm
膜厚調整型	60%	40%	2種ケレン	98 μm
Zn100%型	100%	0%	2種ケレン	150 μm
母材CS添接板無機ジンク型	60%	40%	無機ジンク	145 μm
無機ジンク型	無機ジンク		2種ケレン	100 μm



(a)CS工法 (b)膜厚調整 (c)Zn100% (d)無機ジンク

写真-4 形状特性



写真-5 リラクセーション計測



写真-6 ボルト頭部ひずみゲージ

キーワード：コールドスプレー すべり耐力試験 リラクセーション すべり係数

連絡先：〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地 琉球大学 工学部 環境建設工学科

$$\text{残存率(\%)} = \frac{\text{試験時軸力(kN)}}{\text{導入軸力(kN)}} \times 100(\%) - \text{式(2)}$$

(2) すべり耐力試験方法

写真-7 に示す 2,000kN 万能試験機を用いてすべり耐力試験を行った。すべり判定には供試体の母材と添接板の相対変位をクリップ変位計(RA-5)で測定した。図-1 にクリップ変位計の取り付け位置を示す。

3.試験結果

(1) ボルト軸力のリラクセーション特性

図-3 にリラクセーション計測の結果を示す。ボルト軸力の残存率は CS 工法型では 86%、膜厚調整型は 89%、Zn100%型では 90%、母材 CS 無機ジンク型では 88%となった。また、無機ジンク型は 88%となった。CS 工法は現行基準である無機ジンクと概ね同程度のリラクセーション特性であることが確認できた。ここで、CS 工法と無機ジンク塗装では同じ亜鉛(Zn)が使用されており、亜鉛層のすべり特性に起因するものと推測される。しかし、CS 工法型では 2%程度リラクセーションによる軸力の抜けが確認された。これは CS 工法型が他のパラメータに比べて膜厚が厚く表面形状も波型であることからリラクセーションによる軸力の抜けが大きいと予測される。

(2) すべり耐力特性

図-4 にすべり耐力試験の結果を示す。すべり荷重の判定は鋼構造接合部設計指針¹⁾より、図-1 に示すクリップ変位計の相対変位 0.2 mm 以内の最大荷重もしくは相対変位 0.2 mm 時の荷重とし、評価式(式(1))を用いてすべり係数 μ を算出した。図-5 にすべり係数の結果を示す。図より、すべり係数は CS 工法型において 0.38、膜厚調整型は 0.33、Zn100%型は 0.31、母材 CS 添接板無機ジンク型は 0.38、無機ジンク型は 0.38 となった。これより、現行基準の無機ジンクと同等のすべり係数となったケースは CS 工法型、母材 CS 添接板無機ジンク型であった。一方、膜厚調整型と Zn100%型は無機ジンクのすべり係数と比べると低い値となった。これは膜厚調整型では膜厚が無機ジンク型と同程度であるが、他の CS 工法と比べ膜厚が薄いこと、波型の表面形状が影響していることが考えられる。また、Zn100%型は亜鉛の柔らかい性質がすべり係数を低くする原因と考えられる。写真-8 に設計軸力を導入後に展開した母材と添接板、すべり耐力試験を行った後に展開した母材と添接板の摩擦面の状況を示す。

4.まとめ

本実験で得られた CS 工法を摩擦面に適用した高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力特性を以下に示す。

(1) ボルト軸力のリラクセーション特性

CS 工法シリーズは現行基準の無機ジンク型と概ね同程度の特性を示し、母材の膜厚や表面形状による差も確認できた。

(2) すべり特性

摩擦面に CS 工法を適用した場合のすべり係数は摩擦面に無機ジンクを適用した場合と同程度である。しかし、CS 工法の膜厚が薄い場合や亜鉛のみを用いた場合、すべり係数が低下する傾向がある。

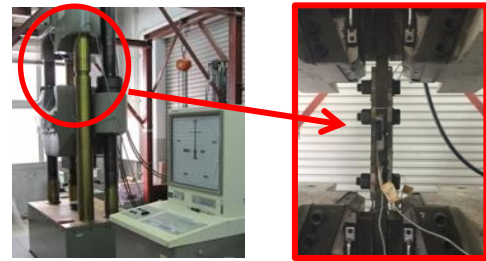


写真-7 すべり耐力試験

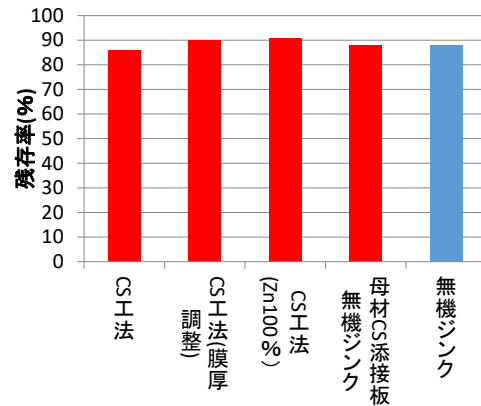


図-3 各パラメータにおけるボルト軸力の残存率

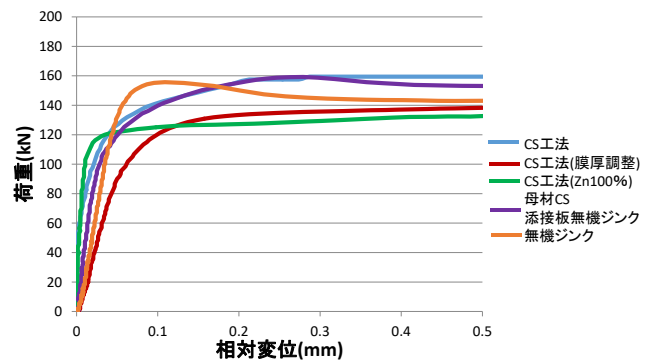


図-4 荷重と相対変位の関係

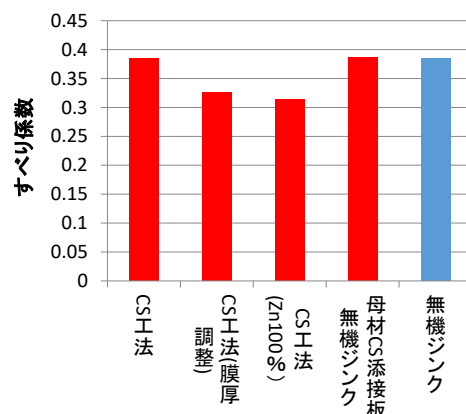
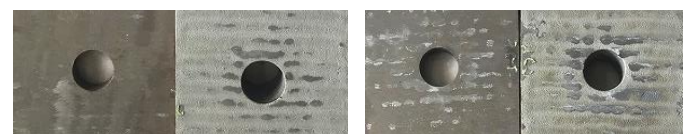


図-5 各パラメータにおけるすべり係数



(a)軸力導入のみ

(b)すべり耐力試験後

写真-8 すべり面の特性

参考文献：

- 1)山城、下里ほか：腐食面に対する SmartZIC 工法の適用性に関する研究，土木学会西部支部沖縄会第 5 回技術研究発表会，2016.3
- 2)日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，pp281-283，2006.3

当て板ボルトと炭素繊維補修による腐食鋼 I 桁端部のせん断耐荷力特性

琉球大学 学生会員○高橋 鴻 正会員 有住 康則 下里 哲弘 田井 政行
一般社団法人 沖縄しまたて協会 正会員 玉城 喜章

1.序論

我が国の鋼橋の多くは、架設から約 40 年経過しており、その経年の中で多い損傷の一つが腐食であり、特に写真 1 に示す桁端部の腐食事例が多く、この腐食損傷の進行により崩落¹⁾に至る恐れもあるため、効率的で効果的な補修法の確立が必要である。腐食した実橋での腐食分布はウェブの下部及び中央で腐食が進行する特性を有している¹⁾。特に下部腐食では溶接部の破断に至る恐れがある。現在、腐食した鋼橋の一般的な補修方法は当板ボルト補修であるが、腐食の著しい鋼桁端部においては、腐食による下フランジとウェブとの溶接近傍での破断とウェブの減肉が連成して生じることから、両方の損傷を回復する補修方法の確立が求められる。そこで本研究では、鋼 I 桁端部を対象に、ウェブ下部の破断の補修法に当板ボルト補修、ウェブ腐食減肉の補修に炭素繊維補修を適用し、その両方の補修法に対する桁端部のせん断耐荷力の回復効果、変形性能の保持効果に対する評価を目的として、せん断耐荷力実験を実施した。

2.載荷試験

(1)載荷試験方法

図 1 にせん断耐荷力試験の載荷条件を示す。図 1 のような載荷により、着目パネルにせん断力を卓越させて桁端部の断面力を再現した。表 1 に試験パラメータを示す。パラメータは実橋腐食分布を再現した下部腐食とウェブ腐食とし、下部腐食タイプは「ウェブと下フランジの境界部欠損」+「ウェブと補剛材境界部の切上（下部切上(DL)）」の最も過酷な腐食状態とした。また、ウェブには実橋から採取した腐食板をウェブに用いて、ウェブ腐食試験体(WC)を作成した。写真 2 に下部切上(DL)試験体を示し、写真 3 にウェブ腐食試験体、図 2 にレーザー計測で得られた腐食減肉の板厚コンターを示す。なお、せん断耐荷力に評価にはこのレーザー計測による腐食減肉量を用いた。

(2)補修材

補修に使用した当板鋼板は SS400 材を使用し、炭素繊維はヤング率 $2.45 \times 10^5 \text{MPa}$ 、繊維目付量 300g/m^2 、設計厚さ 0.167mm 、引張強度 3400MPa を使用した。また、炭素繊維の接着には、先行研究で急激な剥離防止に効果があるポリウレアパテを塗布後に炭素繊維をエポキシ樹脂で接着した。ここで、炭素繊維は片面総計 4 層設置し、その設置方向はせん断座屈時に生じる斜め張力場方向に対して、1 層目に引張方向、2 層目に圧縮方向に接着し、3・4 層目は交互に接着し行った。接着剤はヤング率が 1000MPa 以上、引張強度 45MPa のエポキシ系接着剤を使用した。

(3)補修モデル

まず、下部切上(DL)は当板ボルト補修を適用し、当て板接触面の処理として 2 種ケレン (RHB1) とコールドスプレー(以下 CS)処理試験体 (RHB2) とした。下部腐食とウェブ腐食(DLWC)は当板ボルト接触面の処理として 2 種ケレン試験体(RHB3)、CS 処理試験体(RHB4)と、当板と炭素繊維の両方を施した試験体(RHBCF)を作成した。

(4)評価方法

耐荷力及びダクタリティの評価は、せん断応力-鉛直変位関係を用いて評価する。ここで、せん断応力はウェブに生じたせん断力をウェブの高さと平均板厚で除した値である。



写真 1 鋼桁端部腐食事例

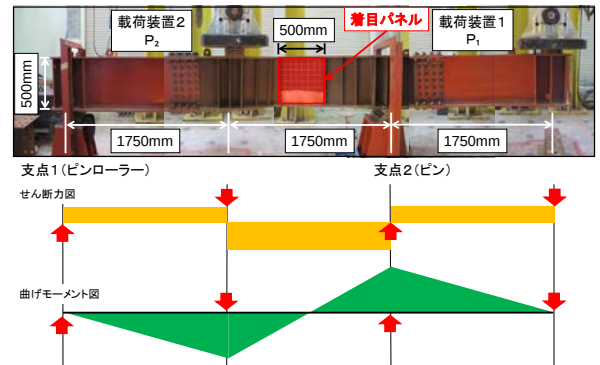


図 1 せん断耐荷力試験

腐食 形態	下部腐食		下部腐食,ウェブ腐食(DLWC)			
	下部切上 方法 (DL)	当板補修 (RHB1)	当板補修 (RHB2)	当板補修 (RHB3)	当板補修 (RHB4)	当板,炭素繊維補修 (RHBCF)
	下地 処理	2種ケレン	CS施工	2種ケレン	CS施工	CS施工

表 1 試験パラメータ



写真 2 下部切上試験体



写真 3 ウェブ腐食試験体

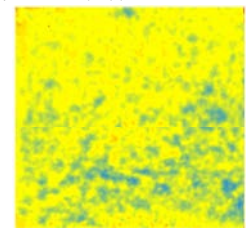
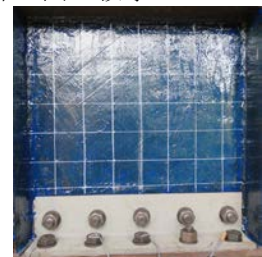


図 2 板厚コンター



(a)当板ボルト補修 (b)当板・炭素繊維補修
写真 4 補修を施した試験体

せん断応力の上昇が緩やかになった時を最大せん断耐荷力とし評価を行った。耐荷力回復の要求性能として、先行研究から、健全(N)のせん断応力である 150MPa 相当のせん断応力を得ることとした。また、最大せん断耐荷力到達後、急激にせん断応力が低下しないことを要求性能としてダクタリティの評価を行った。ここで、せん断座屈耐荷力の算定は、ウェブ表裏の最小主ひずみの分岐またはウェブの面外変位が発生のいずれかの小さい荷重をせん断座屈荷重とした。

3.実験結果

(1)破壊特性

図 3 に破壊形態の例として、健全(N)、下部切上(DL)、当板補修(RHB1)、および当板・炭素繊維補修(RHBCF)の試験後の破壊形態を示す。図中の赤線はウェブパネルを対角線上に結んだ線であり、青の点線は実験で得られた斜め張力場を表している。図より、健全(N)では対角線上に斜め張力場が形成されている。下部切上(DL)は切上の上部に斜め張力場が形成されており、当板補修(RHB)では当板の上部に斜め張力場が形成されている。また当板・炭素繊維補修(RHBCF)では、当板補修(RHB)と同様に斜め張力場が形成され、斜め張力場上部のアンカー部から剥離が確認された。

(2)耐荷力評価

図 4 に実験により得られたせん断応力-変位関係を示す。図より、下部切上(DL)では 80MPa にまで最大せん断応力が低下した。この損傷状態に対する補修により、いずれの補修ケースも健全(N)のせん断応力 150MPa 以上の結果となり、耐荷力の回復が得られた。

(3)ダクタリティ評価

腐食ウェブ試験体に対する当板補修では、腐食減肉の激しいウェブ部分で破断が生じ、急激な耐荷力の低下が見られた。また、炭素繊維補修の試験体では、炭素繊維に剥離が生じた後に耐荷力の低下する特徴が見られた。

(4)せん断座屈耐荷力評価

図5にせん断座屈耐荷力の算定に用いた一例を示す。このグラフでは急激に面外変形が生じている80kNをせん断座屈耐荷力とした。以上の方法によりせん断座屈強度を算定し、各実験のせん断耐荷力をプロットしたせん断耐荷力曲線を図6に示す。図の縦軸の τ_{cr}/τ_y は、各試験体のせん断座屈応力を降伏せん断応力で除し無次元化した値であり、横軸は各試験体の幅厚比パラメータである。図より、当板補修(RHB)ではせん断耐荷力曲線以上の結果が得られず回復が見られなかったが、当板・炭素繊維補修(RHBCF)ではせん断耐荷力曲線以上の結果が得られ、せん断耐荷力の回復が見られた。

4.結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1)斜め張力場の形成は、下部切上(DL)は切上の上部、当板補修(RHB)では当板上部に形成された。

(2)炭素繊維の剥離は斜め張力場上部アンカー部から生じる。

(3)下部切上(DL)の補修に対する当板補修(RHB)は、健全相当の耐荷力回復と十分なダクタリティが得られた。

(4)ウェブ腐食に対する炭素繊維補修は、健全相当の耐荷力が得られたが、その後の剥離により十分なダクタリティが得られなかった。

(5)当板補修(RHB)はせん断耐荷力の回復が見られなかったが、当板・炭素繊維補修(RHBCF)では回復が見られた。

[参考文献]

1) 下里哲弘, 村越潤, 玉城喜章, 高橋実: 腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程, 橋梁と基礎, Vol.43, pp.55-60, 2009.11.

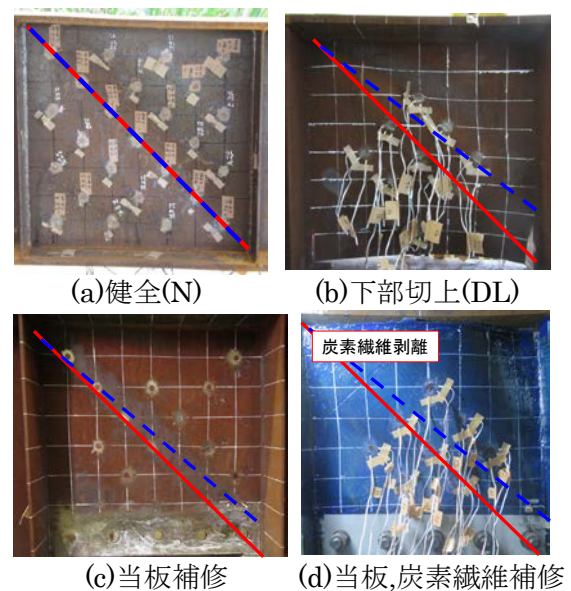


図 3 試験終了後のせん断座屈形態

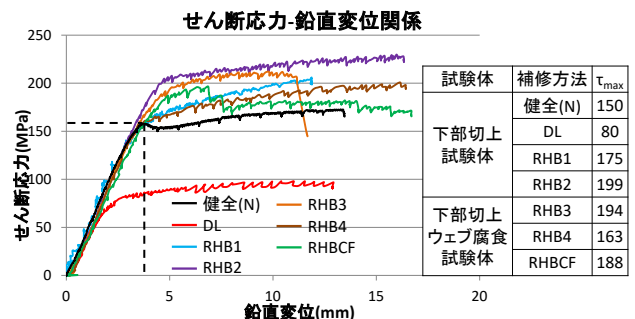


図 4 せん断応力-鉛直変位関係

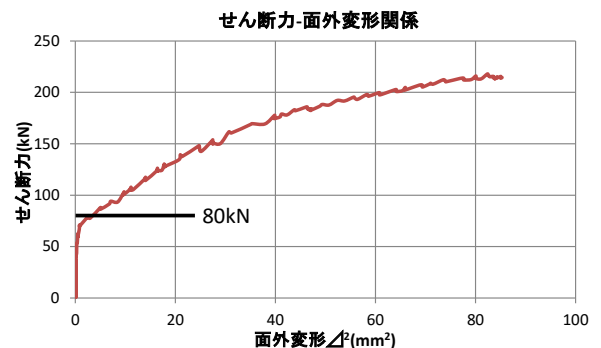


図 5 面外変形による座屈判定

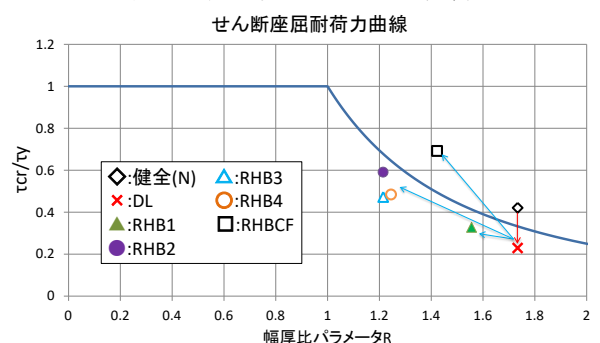


図 6 せん断耐荷力曲線

腐食鋼桁端部に対する当板ボルト工法の FEM 解析モデルの提案

琉球大学 ○厚地大樹 下里哲弘 田井政行 有住康則

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に架設された多数の鋼橋の腐食劣化が問題となっている。鋼橋の腐食劣化は桁端部近傍で生じることが多く、損傷が進んだ場合、写真 1 に示すように、ウェブ-下フランジ接合部で破断する場合がある。

一般的に、腐食損傷の補修には、鋼板をボルトにより添接する当板ボルト工法が用いられる場合が多い。既往研究において、ウェブ-下フランジ接合部の破断に対する当板ボルト工法の補修効果は実証されている²⁾が、当板の板厚、ボルトの本数、ボルト間隔などが補修効果に及ぼす影響は明らかになっていない。したがって、当板ボルト工法の合理的な補修設計法を確立するためにも、当板ボルト工法に関する FEM 解析モデルを構築し、当板の板厚等が補修効果に及ぼす影響を検討する必要がある。

そこで本研究では、ウェブ-下フランジ接合部の破断に対する当板ボルト工法を対象とした FEM 解析モデルを提案し、提案モデルの妥当性の検証を行った。

2. ばね要素を用いた当板補修のモデル化の提案

FEM 解析で当板を作成する場合、ばね要素を用いることが多い³⁾⁴⁾。Solid 要素を用いてモデル化した場合、Shell 要素と比べて節点数が多くなり、時間を要する為、効率的ではない。また、本研究では当板のすべり耐力について検討するため、初期剛性、すべり荷重、すべり後の支圧剛性のバイリニア型モデルで設定できる、ばね要素を用いたモデル化が適している。以上のことから、ばね要素を用いたモデル化を目指す。

2.1 解析モデル概要

ばね要素を用いた M22 のボルト 2 本の解析と、実際に行った実験とを比較検証し、当板のすべり挙動を再現することが可能か検討する。図 2.1 に引張試験の摩擦接合継手の解析モデルとばねの概略図を示す。ボルト 1 本の実験結果より、ボルト 1 本分のばね要素に設定するすべり荷重を 263kN、剛性を 2233kN/mm とした(図 2.2)。

2.2 ばね要素によるすべり挙動の再現性の検討

図 2.3 は、ボルト 2 本の実験と解析の荷重-開口変位グラフである。剛性に関しては、概ね一致する結果となった。荷重のピークは 30kN 程実験が強いが、摩擦係数に換算すると 0.03 の差であり、顕著ではない。以上のことから、ボルト 1 本のばねで、ボルト 2 本の当板のすべり挙動を概ね再現できた。このことから、複数のボルトを扱う当板ボルト工法に、ばね要素を用いることが可能であると考えられる。

3. 提案手法によるウェブフランジ破断部に対する当板補修の再現性の検証



写真 1 鋼桁の腐食事例

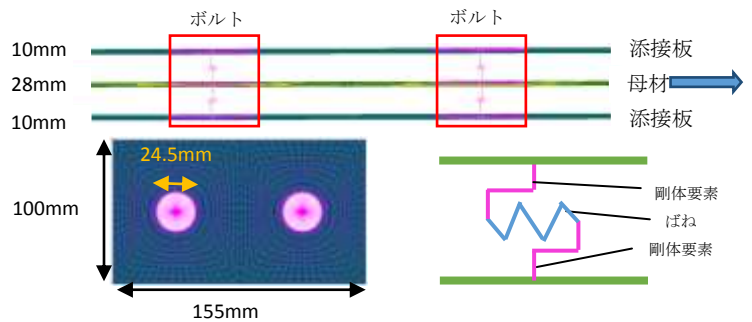


図 2.1 ばね要素を用いた引張試験体モデル

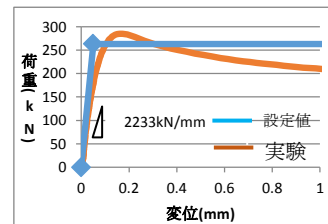


図 2.2 ばね要素の設定値

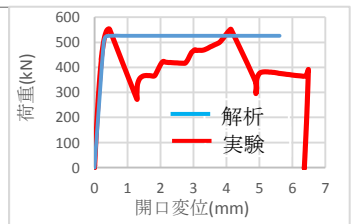


図 2.3 荷重-開口変位グラフ

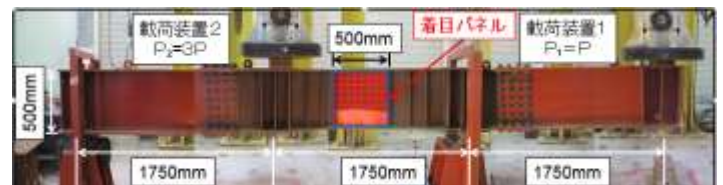


写真 2 セン断耐荷力試験体

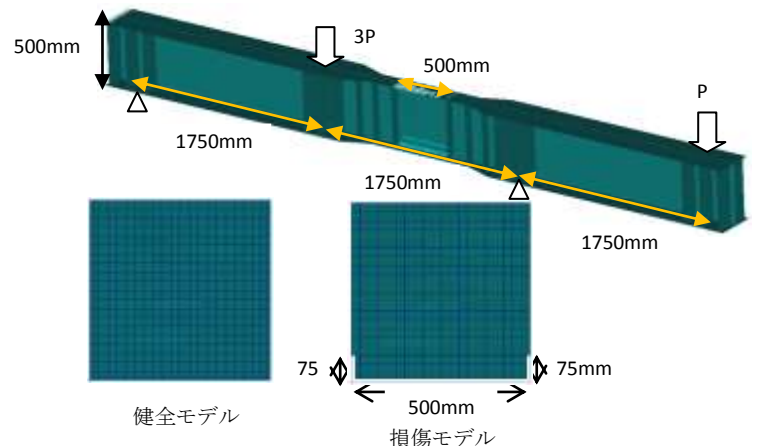


図 3.1 健全と損傷の解析モデル

キーワード: セン断耐荷力試験 当板ボルト工法 ばね要素

住所: 〒903-0213 沖縄県西原町千原 1 番地 琉球大学環境建設工学科 E-mail: e125312@eve.u-ryukyu.ac.jp

提案手法の妥当性を検証するために、写真2に示す腐食模擬試験体を用いたせん断耐荷力実験結果と解析結果について比較検証を行った。なお、当板ボルトモデルを導入前の健全モデルや損傷モデル(図 3.1)の妥当性については事前に解析をまわし、確認を行っている。

3.1 FEM 解析モデルの概要

本研究の当板ボルトモデルを図 3.2 に示す。すべり荷重は、道路橋示方書より、次式で求める。

μ : すべり係数 P_s : すべり荷重

$P_s = \mu \cdot m \cdot N_d \cdot n$ m : 接触面数 n : ボルト本数

N_d : 設計ボルト軸力

本研究モデルは、すべり係数:0.4、接触面数:2、ボルト本数:1、設計ボルト軸力:165kN として計算し、本研究モデルのすべり荷重を 132kN とした。

初期剛性は 2500kN/mm、支圧開始は、添接板と母材のずれが 2.5mm 生じたときと仮定した。ばね要素にこれらの条件を荷重一ずれの関係で設定した。ウェブの板厚は 3.2mm で、尚且つ、実測した初期たわみを 25mm ピッチで挿入した。当板とウェブ、当板と下フランジは、面方向にすべるようにばねを 2 方向に作成した(図 3.3)。面外変形の座屈を当板でおさえるために、面外変形方向に剛のばねを作成(図 3.4)した。フランジ:340MPa、ウェブ:330MPa、内側補剛材:276MPa、外側補剛材:292MPa と、部材ごとの降伏応力を挿入した。以上の条件を適用し、解析モデルの妥当性の検証を行った。

3.2 提案手法の妥当性

図 3.5 に当板ボルトモデルの実験と解析の荷重一変位グラフを示す。グラフより、剛性は概ね一致していると考えられる。荷重のピークに関しては、解析の方が約 10kN 強く出ているが、当板のすべり荷重を計算にて算出しているため、誤差は顕著でないと考えられる。また、面外方向の変形を実験と解析で比較すると(図 3.6)、当板の上でせん断座屈がおきており、概ね変形においても一致する。このことから、実験を解析で概ね再現することができたといえる。

4. まとめ

1) ばね要素を用いた当板ボルト工法の FEM 解析モデルを提案した。

2) 提案した解析モデルにより剛性や座屈形状、せん断耐荷力などを再現することが可能であり、ウェブのせん断耐荷力の補修効果について検討が可能であると考えられる。

今後は、本解析モデルを用いて当板の板厚やボルト本数、間隔等をパラメータとした解析を行い、当板ボルト工法の合理的な補修設計法の確立に向けた基礎的資料とする予定である。



解析モデル

実験モデル

図 3.2 解析と実験の当板ボルトモデル

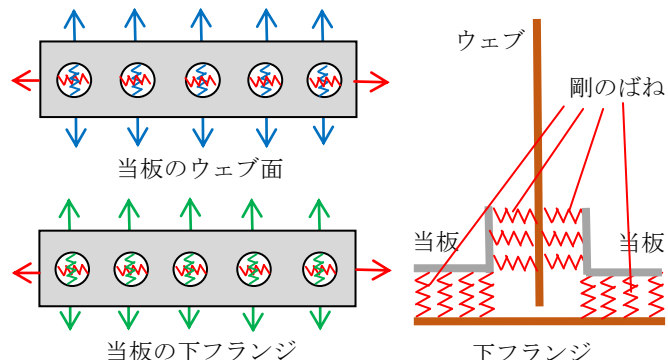


図 3.3 2方向のばねの概略図

図 3.4 剛のばねの概略図

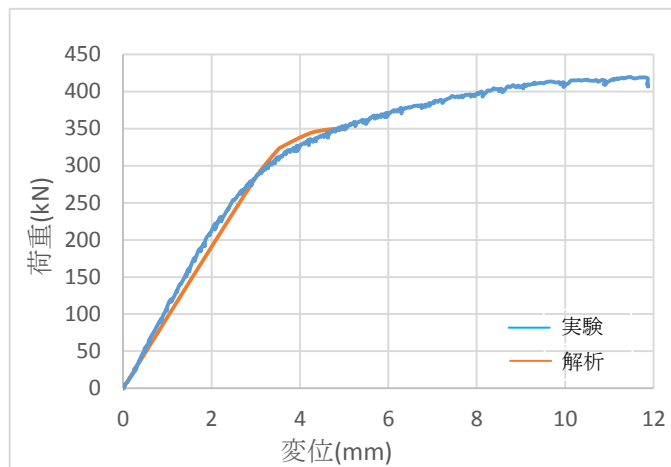
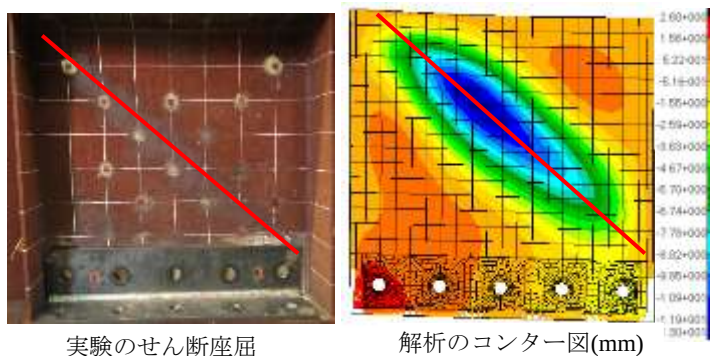


図 3.5 当板ボルトモデルの P-d グラフ



実験のせん断座屈

解析のコンター図(mm)

図 3.6 せん断座屈の形状

【参考文献】

- 1) 田井政行, 下里哲弘, 玉城善章, 有住康則, 矢吹哲哉: 腐食により崩落に至った鋼プレートガーダー橋の崩落メカニズムと桁端部の損傷回復評価に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 416-428, 2015. 3.
- 2) 利光崇明, 下里哲弘, 有住康則, 玉城善章, 島袋秀也, 長嶺由智: 損傷を受けた鋼 I 桁端部腹板の補修法に関する実験研究, 土木学会西部支部沖繩会, 第 3 回技術研究発表会, Session3, pp. 88-91, 2013.
- 3) 下里哲弘, 平林泰明, 平山繁幸, 佐々木力: 鋼製橋脚の耐荷性能に対する隅角部当板補強および溶接条件の影響, 構造工学論文集 A, Vol. 54A, pp. 512-521, 2008.
- 4) 下里哲弘, 木ノ本剛, 三木千壽: 打込式高力ボルト支圧接合継手の耐荷力性状と FEM 解析モデルの提案, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 167-178, 2008.

高力ボルト摩擦接合継手の連結板の腐食減肉が接触圧に及ぼす影響

琉球大学 ○大城泰樹・下里哲弘・田井政行・山下修平

1. はじめに

鋼橋における部材接合方に摩擦接合継手がある。この継ぎ手はボルト、座金、ナット、母板、連結板から成り凹凸部が多い。そのため水分や塩分などの腐食因子が滞留しやすく、さびやすい箇所となっている。実環境下における鋼橋の摩擦接合継手を観察したところ、連結板で写真 1-(a)、(b)のような座金周辺がドーナツ状に腐食減肉する特徴的な腐食が見られた。この腐食減肉が母板と連結板間の荷重伝達機構に影響を及ぼし、すべり耐力を低下させる可能性がある。

本研究では摩擦接合継手における荷重伝達機構について摩擦接合面の接触圧に着目し、連結板の腐食減肉が接触圧に及ぼす影響を実験及び解析的に検討した。さらにこの接触圧の変化が、ボルト軸力に及ぼす影響について FEM 解析により検討を行った。

2. 連結板の腐食減肉特性

連結板表面の腐食形状を把握するため、まず、腐食減肉のタイプを外観目視及び触診確認により、I～IVの4タイプに分類を行った。タイプIは指先でなぞった際に表面凹凸が確認できない状態、タイプIIは指先でなぞった際に局所的な凹みが確認できたもの、タイプIIIは座金と接触していた面周辺だけがドーナツ状に減肉していることが目視にて確認できるが、さらにその周辺は触診確認でも凹凸は確認できない状態である。タイプIVは座金と接触していた面周辺の減肉に加えて、連結板表面全体が凹凸を伴って減肉している状態である。

次に写真 2 に示すレーザー変位計を用いて、連結板の腐食減肉量の計測を行った。測定間隔は 2mm ピッチとした。図 1 に各タイプのコンター図の例を示す。連結板表面の腐食減肉分布評価パラメータは、ボルト孔周りの減肉に着目し、局所平均孔周辺減肉率で評価した。局所平均孔周辺減肉率とは最も減肉が激しい座金との接触面周辺の範囲を評価するパラメータとして、図 2 に示すようにボルト孔中心から 32mm(=座金半径 22mm+10mm)範囲における減肉量の平均値を設計時の板厚で除した値としている。なお、減肉量の平均値に関しては、図 3 に示すように、レーザーにより計測した値を平均化し、減肉分布評価パラメータの計測範囲の平均減肉量としている。

3. 連結板の腐食減肉が継手内の接触圧に及ぼす影響

(1) 試験方法

ドーナツ状の腐食減肉と継手内の接触圧の関係を検討するため、着目するボルト孔を1つ選定し図 4 のように連結板、座金、感圧紙を設置し圧縮試験を行った。

なお、載荷荷重は F10TM22 ボルトの設計軸力 205kN を 10% 割り増した 226kN とした。着目するボルト孔は腐食タイプ II～IV から各 5 体、タイプ I (新材) を 1 体選定した。感圧紙は超高压用と超低压用の 2 種類を用いた。超高压用はボルト孔周りの高接触圧領域を検証するために用い、超低压用は接触圧分布の広がりを検証することを目的に用いた。



写真 1-(a) 腐食した連結板



写真 1-(b) ドーナツ状減肉例

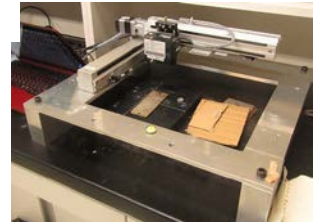


写真 2 レーザー変位計

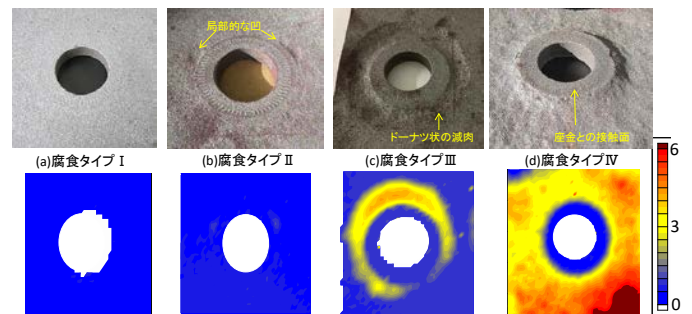


図 1. 減肉量のコンター図例

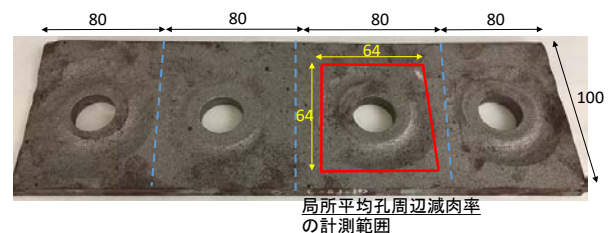


図 2 局所平均孔周辺減肉率の計測範囲

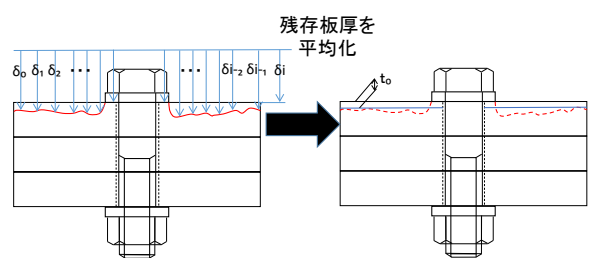


図 3. 減肉量の平均値の定義

(2) 試験結果

腐食連結板を用いた接触圧試験結果のコンター図の例を図 5 に示す。タイプ I (新材) とタイプ IV を見比べると接触圧の分布に変化が見られる。

腐食連結板を用いた接触圧試験結果を図 6、7 に示す。横軸は各ボルト孔周りの局所平均孔周辺減肉率とし、縦軸は加圧面積や接触圧について、腐食ボルト孔での結果を新材ボルト孔の試験結果で除した比率で表している。つまり、タイプ I (新材) の減肉率は 0%。加圧面積率、接触圧率は共に 100% とする。

キーワード：高力ボルト 腐食連結板 ドーナツ状減肉 接触圧 ボルト軸力

連絡先：〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科

加圧面積の変化を図 6 に示す。本図の加圧面積率は接触圧の有効面積を新材の有効面積で除した値である。局所平均孔周辺減肉率が 15%を超えると減肉に伴い線形的に加圧面積が低下しており、減肉率が 25%になると加圧面積率が 50%程度に減少した。

接触圧の変化を図 7 に示す。本図の接触圧率は感圧紙の解析ソフトにより求めた超高压用の結果より得られた孔近傍の平均接触圧値を新材の値で除した値である。平均接触圧との関係も同様に、減肉率が 15%を境に接触圧の急激な増加が見られ、局所平均孔周辺減肉率が 25%時には約 20%接触圧が増加した。

以上の結果より、腐食タイプ II では加圧面積や接触圧はそれほど変化せず、腐食タイプ III や IV では加圧面積は減少し、接触圧は増加する傾向が見られた。そして、局所平均孔周辺減肉率を用いることで、腐食タイプによらずに評価が可能であり、減肉率 25%を境に加圧面積は減少し、接触圧は増加する傾向を示すといえる。つまり、座金直下が残存している場合でも、座金と接触していた面周辺が減肉することで孔回りの接触圧が増加するといえる。

4. 連結板の腐食減肉が軸力に及ぼす影響の解析的検証

連結板の減肉に伴う接触圧の変化が高力ボルトの残存軸力に及ぼす影響を検証するために、FEM 解析を行った。以下に解析概要を示す。

(1)解析モデル

解析モデルを図 8 に示す。solid 要素を用いて継手のボルト 1 本を対象とし、連結板の新材とドーナツ状減肉のモデルを比べボルト軸力への影響を検証した。腐食モデルのドーナツ状減肉幅は 10mm、減肉深さは 5mm、9mm で検証した。母板と連結板、座金と連結板、座金とボルトには接触要素を摩擦係数 0.65 で設定し、接触を再現した。ボルト軸力は、新材モデルにおいて F10TM22 ボルトの設計軸力 205kN を 10%割り増した 226kN となるような強制変位をボルト軸部に与えた。また、降伏強度はボルト、座金を 900MPa、母板、連結板を 365MPa とした。なお、5mm 減肉モデルの局所平均孔周辺減肉率は約 23.5%、9mm 減肉モデルは約 42%である。

(2)解析結果

図 9 に解析結果より得られた母板部接触圧のコンター図を示す。新材モデルと腐食モデルを比較すると、減肉することで高接触圧領域が増え、孔縁からの分布範囲が約 4mm 減少し実験と同様の傾向が見られた。表 1 に各モデルの軸部への強制変位導入時のボルト残存軸力を示す。新材モデル、減肉量 5mm モデル、減肉量 9mm モデルと検証したが残存軸力は約 1%の低下しか見られず、減肉することで接触圧分布への影響は確認できたが軸力への影響はほとんど見られなかった。

以上より、連結板の腐食減肉が高力ボルトの残存軸力に及ぼす影響をは小さいと考えられる。

5.まとめ

本研究では、摩擦接合継手の連結板の腐食減肉が摩擦接合面の接触圧およびボルト残存軸力に及ぼす影響を検証した。得られた知見を以下に示す。

1)連結板の腐食減肉は座金と接触した面周辺に起こり

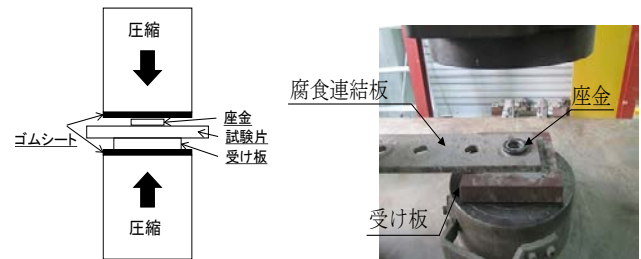


図 4. 圧縮試験方法

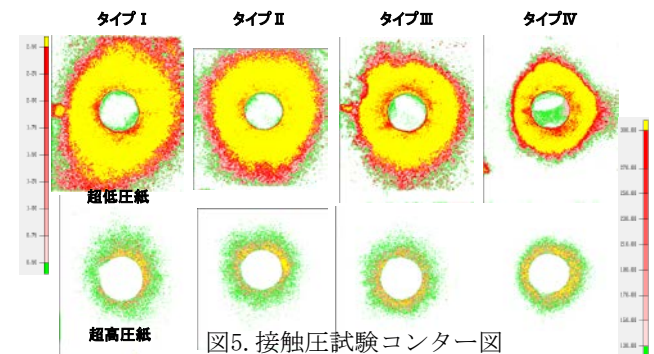


図 5. 接触圧試験コンター図

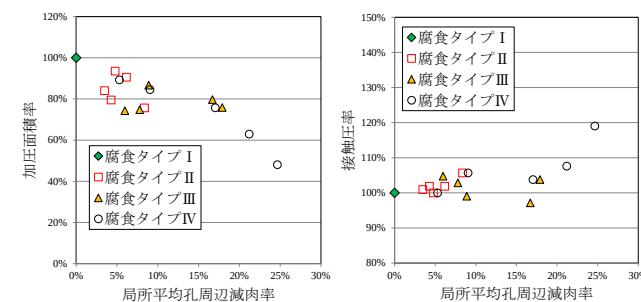


図 6 腐食減肉分布と加圧面積の関係

図 7. 腐食減肉分布の平均接触圧の関係

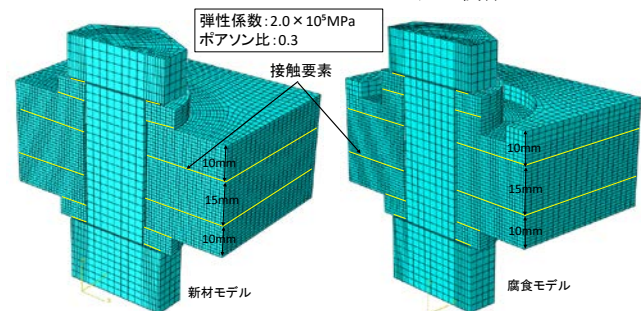


図 8. 解析モデル

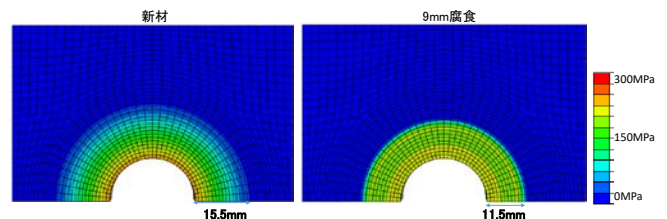


図 9. 接触圧解析結果・母材

表 1. 各モデルの軸力残存率

	軸力(kN)	%
新材	113.2	100.0
5mm腐食	112.7	99.6
9mm腐食	111.8	98.8

易く、座金直下部では腐食減肉し難い。

2)座金直下が残存している場合でも、連結板の腐食減肉に伴い接触圧面積が減少し孔周接触圧が増加する。

3)FEM 解析より、連結板の減肉がボルト軸力に及ぼす影響はほとんどなかった。

今後の課題として、引張荷重を与えると連結板の減肉がすべり耐力に及ぼす影響の検証をしていきたい。

腐食凹凸面に対する当て板ボルト工法のすべり耐荷力特性に関する実験的研究

琉球大学 ○日高拓朱 下里哲弘 田井政行 長坂康史 有住康則

1. はじめに

鋼橋の主な劣化要因の一つに腐食がある。腐食損傷が生じた橋梁部材では、板厚の減少や断面欠損、破断等を引き起こし、鋼橋の耐荷力を著しく低下させる場合があるため、損傷が著しい部材に対しては、一般的に当て板ボルト工法が適用される。腐食面に凹凸を有するため、当て板と腐食面での接触面積が十分に確保できないことが懸念されているが、摩擦面間に凹凸を有する場合の高力ボルト当て板工法のすべり耐荷力特性は十分に解明されていない。そこで本研究では、腐食による凹凸を有する場合の高力ボルト当て板工法のすべり耐荷力特性の解明を目的として、実腐食鋼板を用いた当て板継手のすべり耐力試験を行った。

2 腐食鋼板の腐食分類

試験体に用いた腐食鋼板は、自然暴露した実橋から採取した鋼材(SMA490、公称板厚9mm)である。写真1に腐食試験体の表面状況、図1に表面形状のコンタ図を示し、表1、2に試験に使用した腐食鋼板を示す。この表1、2の腐食材パラメータは、レーザー変位計を用いて腐食表面を2mm間隔で計測し、算出したものである。使用したレーザー変位計を写真2、性能を表3に示す。また表1、2の腐食材は、腐食深さの標準偏差の表裏平均したもので分類分けし、一様に腐食した鋼材①、一様に腐食し、局部腐食も見られる鋼材②として、分類分けした鋼材から、本試験で使用する腐食材を3体ずつ選定したものである。

3 摩擦面に凹凸を有する当て板継手のすべり耐荷力特性

3.1 試験方法と試験パラメータ

すべり試験体の形状寸法を図2に示す。すべり側をa側として、aのみボルトを締め付けたすべり側ボルト1列のケースとすべり側をa, b側として、a, bのボルトを締め付けたすべり側ボルト2列のケースの両面添接試験体を作製した。試験ケースを表4、5に示す。試験パラメータは、母材の表面状態の違い(新材、腐食材)、添接板の材質の違い(SS400, SM570 材)のケースを用いた。使用したボルトはM20、F10Tである。すべり側ボルト1列のaのボルトの締め付け軸力については、道路橋示方書・同解説で規定されているM20、F10Tの設計ボルト軸力182kNのケースと設計ボルト軸力の60%の109kNで締め付けたケースの2ケースを設定した。すべり側ボルト2列のa, bのボルトの締め付け軸力については、設計ボルト軸力の50%の91kNずつ軸力を導入した。表面処理については、ボルト1列での



写真1: 腐食材の表面形状(試験体番号3)

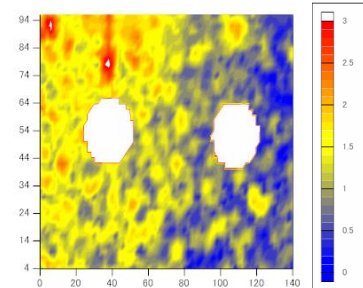


図1: 表面形状コンタ図(試験体番号3)

表1: ボルト1列すべり試験体での腐食材パラメータ

試験体番号	腐食深さ(mm)			腐食深さ標準偏差			板厚(mm)	
	表	裏	平均	表	裏	平均	平均	偏差
①-1	0.9	0.6	0.8	0.3	0.3	0.3	7.5	0.3
①-2	1.1	0.8	1	0.5	0.3	0.4	7.4	0.5
①-3	1.1	0.8	1	0.5	0.3	0.4	7.1	0.4
②-1	1.1	1	1.1	0.4	0.5	0.5	6.2	0.7
②-2	0.9	1.5	1.2	0.4	0.8	0.6	7.3	1
②-3	0.7	0.6	0.7	0.4	0.2	0.3	7.6	0.4

表2: ボルト2列すべり試験体での腐食材パラメータ

試験体番号	腐食深さ(mm)			腐食深さ標準偏差			板厚(mm)	
	表	裏	平均	表	裏	平均	平均	偏差
1	0.7	0.6	0.7	0.4	0.2	0.3	7.6	0.4
2	1.5	1.9	1.7	0.4	0.6	0.5	6.7	0.7
3	1.9	1.6	1.8	0.9	0.6	0.8	6.2	0.7



表3: レーザー変位計の特性

型式	LK-G80(KEYENCE)
使用光源	赤色半導体レーザー 波長655nm
測定精度	0.2μm
測定範囲	±15mm
最小表示単位	0.01μm

写真2: レーザー変位計

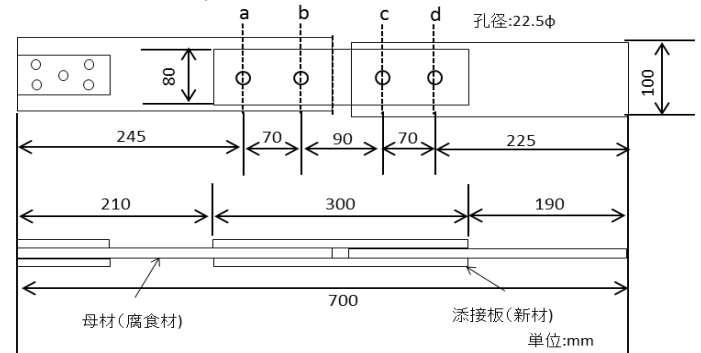


図2: すべり試験体の形状寸法

キーワード 腐食凹凸面すべり耐力, 摩擦接合継手

連絡先 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1 番地

国立大学法人 琉球大学 工学部 環境建設工学科 TEL: 098-895-8666, FAX: 098-895-8677

表 4：ボルト 1 列試験体でのすべり試験ケース

試験体名	母材	添接板	締付軸力(kN)	表面処理	試験体数
C-HTB100/SS400	SMA490	SS400	182	ブラスト	6
C-HTB100/SM570	SMA490	SM570	182	ブラスト	6
C-HTB60/SS400	SMA490	SS400	109	ブラスト	6
C-HTB60/SM570	SMA490	SM570	109	ブラスト	6
N-HTB100/SS400	SM490Y	SS400	182	ブラスト	3
N-HTB60/SS400	SM490Y	SS400	109	ブラスト	3
N-HTB100/SM570	SM490Y	SM570	182	ブラスト	3
N-HTB60/SM570	SM490Y	SM570	109	ブラスト	3

C-HTB100/SS400

添接板材質(SS400: SS400, SM570: SM570)
締付軸力(100: 100%182kN, 60: 60%109kN)
母材表面(C: 腐食材, N: 新材)

表 5：ボルト 2 列試験体でのすべり試験ケース

試験体名	母材	添接板	締付軸力(kN)	表面処理	試験体数
C-SS400	SMA490	SS400	91	2種ケレン	3
C-SM570	SMA490	SM570	91	2種ケレン	3
N-SS400	SM490Y	SS400	91	2種ケレン	3
N-SM570	SM490Y	SM570	91	2種ケレン	3

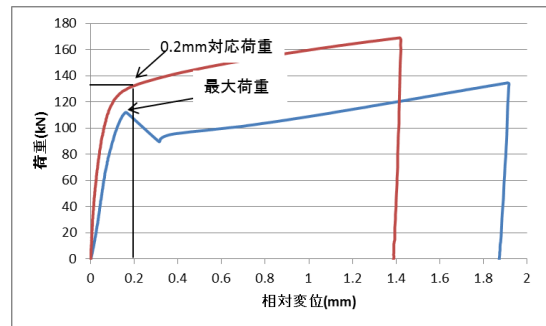


図 3：荷重-相対変位線図

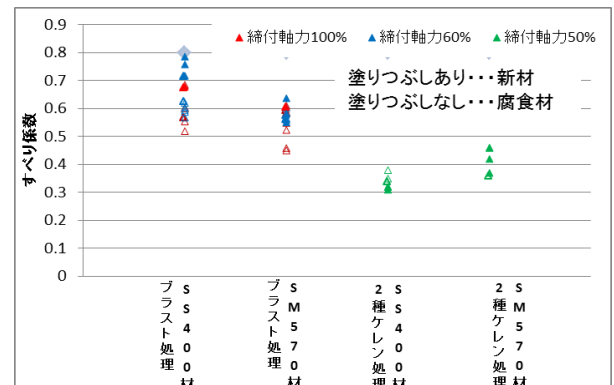


図 4：すべり係数グラフ

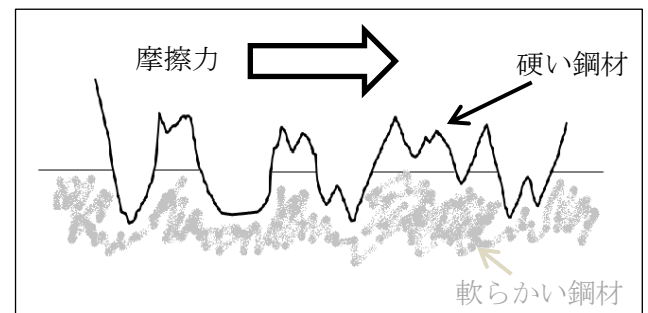


図 5：硬い鋼材による掘り起こしの状態

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造結合部設計指針、2006. 3
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、2002. 3

試験体はブラスト処理、ボルト2列での試験体は動力工具による2種ケレン処理を施し試験体の組立てた。本試験では、図2のボルト a 横位置での添接板と母材で相対変位を計測した。すべり荷重は、図3で示すように荷重-相対変位線図において、0.2mmまでに最大の荷重が生じた場合はその最大荷重、明瞭な主すべりが生じない場合は、鋼構造結合部設計指針¹⁾を参考に、母材と添接板の相対変位が0.2mmに達した時の荷重をすべり荷重と定義した。また、その時のすべり荷重を用いて、次式によってすべり係数を算出した。

$$\mu = \frac{P(\text{すべり荷重})}{N(\text{ボルト軸力}) \times n(\text{ボルト本数}) \times m(\text{摩擦面数})}$$

3.2 すべり試験結果

図4は、各試験ケースについて、すべり係数をグラフに整理したものである。

本試験では、異なる腐食度の鋼材を母材に用いてすべり耐力試験を行ったが、平均腐食深さ0.7mm～1.7mmの腐食材では、表面処理がブラスト処理、2種ケレン処理とどちらも腐食度とすべり耐力の関係性は低いと考えられる。

また添接板の強度によりすべり耐力の違いがみられブラスト処理では、低強度の添接板の方がすべり耐力が高く、2種ケレン処理では、高強度の添接板のほうがすべり耐力高い結果が示された。これは、図5で示すような、硬い金属が軟らかい金属に、押し込まれる状態が生じることで、掘り起こしの抵抗が生じすべり係数が高くなることが原因と思われる、ブラスト処理での試験体は低強度のSS400材の添接板のケースの方がすべり耐力が高いとの結果になったと考える。また、2種ケレンでは、表面粗さがブラスト処理より小さいことで掘り起こしでの抵抗も受けにくい状態となり低強度のSS400材の添接板のケースの方がすべり耐力が低い結果となったと考える。

5 まとめ

- (1) 平均腐食深さ0.7mm～1.7mmの腐食材を母材に用いたすべり耐力試験を行った結果、表面処理にかかわらず腐食度とすべり耐力の関係性は低いと思われる。
- (2) 表面処理が2種ケレン処理の場合、すべり係数が0.31～0.39と道路橋示方書・同解説²⁾での規定値0.4を満たしていない場合もあり、十分なすべり耐力を確保することが困難であることを確認した。
- (3) 母材と添接板とをブラスト処理した場合のすべり係数は、低材質の方が高い傾向にあり、母材と添接板とを2種ケレン処理した場合のすべり係数は、高材質の方が高い傾向にある。そのため、表面処理により、鋼材の材質とすべり耐力の関係性に影響があると思われる。

モノレールの軌道精度確保について

沖縄県都市モノレール建設事務所 建設2班 主任 島袋 祐一

1. はじめに

沖縄都市モノレールは、平成15年8月に那覇空港駅から首里駅に至る12.9kmの区間で開業した。平成28年8月には総乗客数が1億8千万人に到達、また、平成27年度の年間乗客数は1600万人を超え、一日当たりの平均乗客数も44,145人となり、ともに4年連続で過去最高を記録するなど、県民及び観光客の足として順調に定着している。

2. 延長整備事業について

現在の終点である首里駅から沖縄自動車道との結節点となるてだこ浦西駅まで整備するものである。平成23年度に軌道法に基づく特許取得及び都市計画決定を行い、詳細設計及び用地取得を経て、平成25年度より工事に着手しており、平成31年の開業を目指し、鋭意工事を行っている。

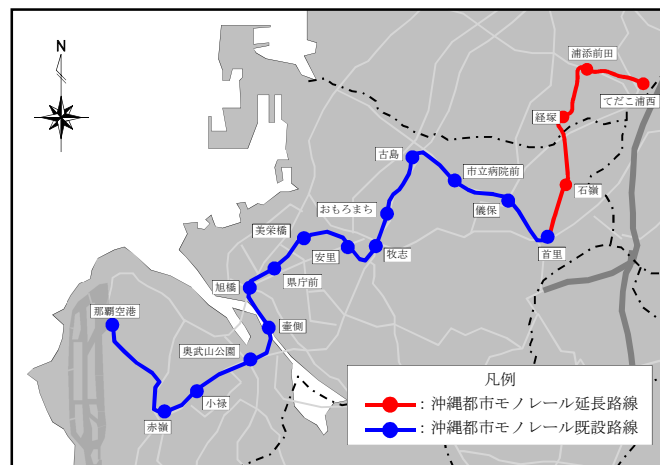


図-1

【延長整備の概要】

- 建設区間 首里駅～てだこ浦西駅 約4.1km
- 駅数 4駅（石嶺駅、経塚駅、浦添前田駅、てだこ浦西駅）
- 事業主体 インフラ部：沖縄県、那覇市、浦添市
インフラ外部：沖縄都市モノレール株式会社
- 事業期間 平成23～30年度
- 総事業費 インフラ部：約335億円
インフラ外部：約145億円

キーワード 精度管理、PC軌道桁、キャンバー、
連絡先 〒901-2102 浦添市前田141街区6（前田565-2）
沖縄県都市モノレール建設事務所 TEL 098-943-5520

3. モノレールの構造

モノレールは図-2 のように、土木構造物（軌道桁）の上面を直接走行面とし、案内輪、安定輪で挟みつけて軸の安定を確保している。このように軌道桁に直接荷重が載荷され、路面の連続した平坦性（走行面の仕上がり、伸縮装置の不陸、軌道桁のたわみと桁端のたわみ角）は運転速度への直接的な制限をもたらす。沖縄都市モノレールでは最高速度を65km/hとし、敷設道路空間から制限を受ける曲線区間では、乗り心地から定められる、遠心加速度の変化率0.03g/sec以下になるよう速度制限されることもある。

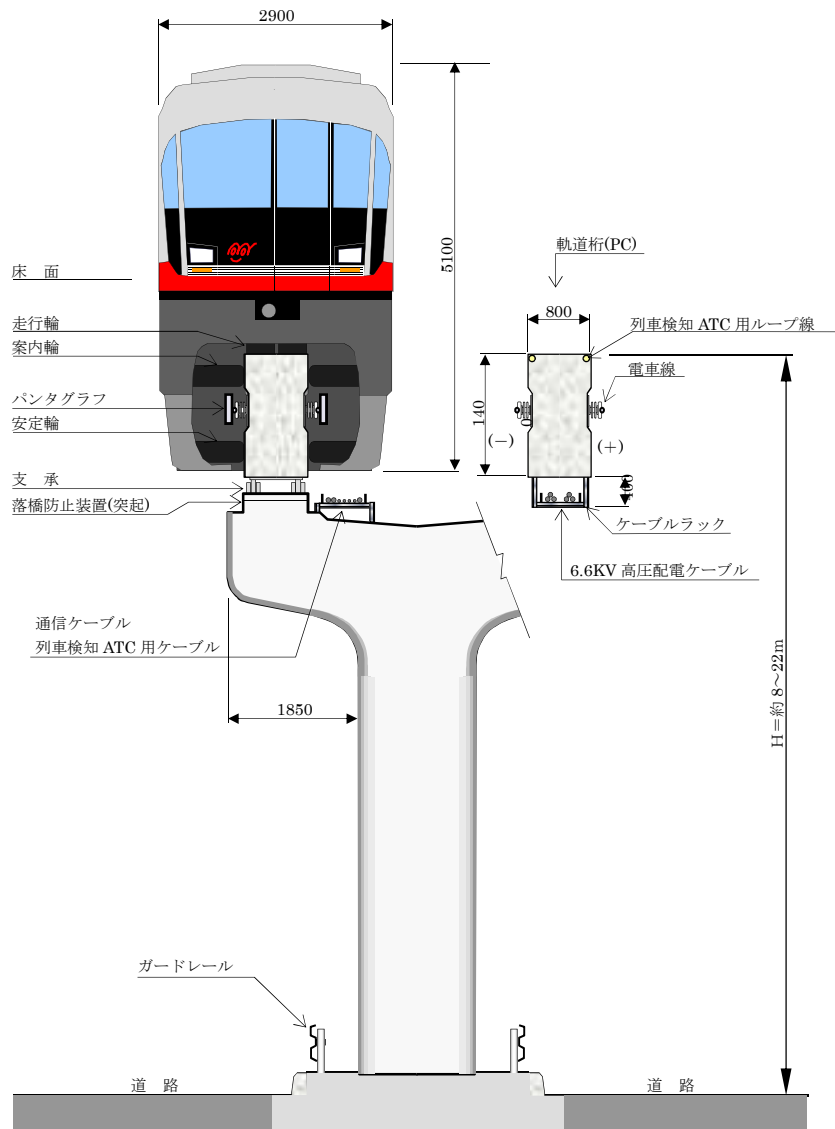


図-2

4. 軌道精度管理の必要性

前章でも述べたようにモノレールは、一般の道路橋と異なり、軌道と桁が一体化した構造であることから、軌道の精度は桁の製作及び架設精度に求められ、さらにそれを受ける下部工の沓座の仕上がり精度に求められる。このため、実施設計、下部工施工、上部工製作および架設の各段階において、極めて精度の高い施工管理を行う必要がある。

また、乗り心地（衝撃の大きさ）の観点から検証すると次のようになる。下部工の施工誤差2.0cmが生じ、20m スパンとした場合、桁の継ぎ目で折れ角が生じる。軌道の出来形管理値のうち、軌道の部分通りは5 mm/4 m (0.0025Rad) のため許容内となる。一方で構造物設計上許容される、車両通過時の振動などによる橋脚の水平変位は、軌道面で4/1000Rad (0.004Rad、乗り心地より規定) であり、当該箇所を車両が最高速度65km/h

で通過する際の衝撃の大きさは $0.004 \times 65 = 0.26$ (折れ角 $\times$ 速度 = 衝撃)。ここに前述の施工誤差 2.0cm が生じた場合、同じ衝撃の大きさで通過できる車両の速度は、 $V = 0.26 / (0.004 + 0.002) = 43.3 \text{ km/h}$ に低下せざるを得ないことになる。

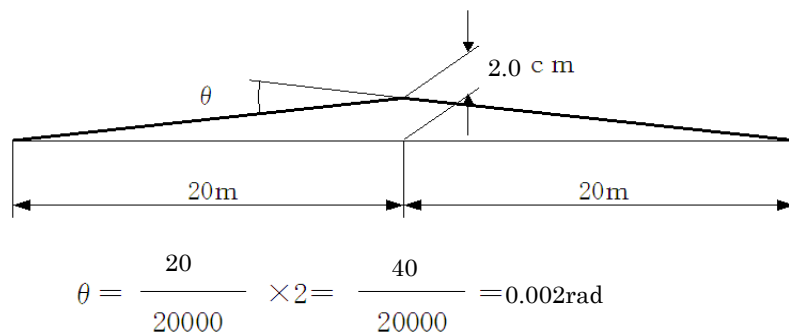


図-3

5. 軌道精度管理方法

5.1 精度管理方法の概要

モノレールの軌道精度管理に関する特徴としては、下部工施工の各段階で、支柱中心位置、沓座位置を施工業者とは別の測量コンサルタントによる照査測量を行うことによって、下部工の出来形を桁製作に反映している。また、桁製作時については、浦添市西洲に建設した特殊な型枠装置（モールド装置）を備えた桁製作場にて一貫した品質管理を行い、桁架設後についても鋼製支承の軌道調整機能を用いて第1次軌道調整、車両試走後の第2次軌道調整を実施する。



PC 軌道桁製作場(浦添西洲)



型枠装置(モールド装置)

次節では、桁製作時の軌道精度確保に係る一例について記述する。

5.2 コンクリート変形量

PC 軌道桁では、プレストレスに伴う弾性変形量及び持続荷重に伴うクリープ変形が桁製作精度に影響するため、実測データに基づきキャンバー量を設定する必要がある。

大阪や多摩など他地域のモノレールでは、季節変動に伴いコンクリートの変形量が変位した事例がある。ただし、沖縄都市モノレールの既存区間ではすでに、実績データを集計し、季節変動による大きい影響は見られないものとなっている。今回の延長事業にて製作

しているPC軌道桁はこの既存区間のデータをもとにキャンバー量を設定している。

ただし、今回は既存区間との違いとして、道路橋示方書の改訂に伴う鉄筋量の増加やフライアッシュを混和したコンクリートの使用等があり、それらがどの程度変形量に影響するか検証する必要もある。そのため、現在も実際に製作した桁を継続的に測定し、変形量の調査を実施中である。現時点での集計データと既存区間のデータを比較したグラフを図-4に示す。コンクリート打設後28日時点で既存区間のデータより6mm程度そり変形量が少ない傾向となっており、全体としても既存区間のデータの80%程度の変形量となっている。こ

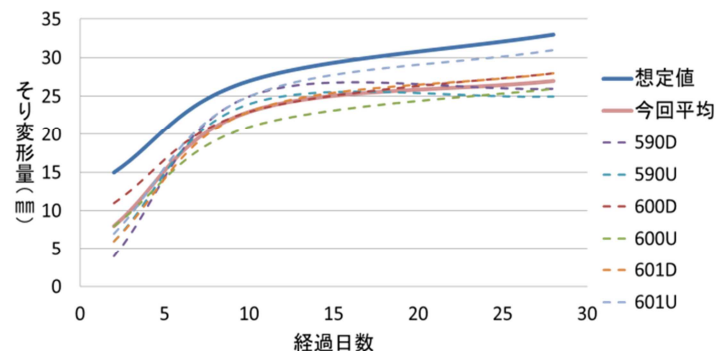


図-4 既存区間とのそり変位推移比較



PC軌道桁緊張状況

れは、鉄筋量の増加及び使用材料等の違いにより剛性が高まり、変形量が少なくなったと想定される。今後も継続的に測定を行い、キャンバー量の設定に反映させ更なる精度向上に努めたい。

5. 最後に

ここで記述することはできなかったが、駅舎ホームや鋼軌道桁部等では、支承構造の違いや駅舎ホーム高さ等により精度条件が厳しくなることもある。そのため、より一層の精度管理が求められるが、軌道精度の向上は、直接的に利用者の乗り心地向上及び安全安心な運行に繋がる。更に、モノレールの利用促進が図られ、那覇都市圏における慢性的な交通渋滞の緩和及び延長整備による駅周辺の新しい街作りに寄与することを期待する。

那覇空港滑走路増設事業における施工期間短縮への取り組みについて ～平成31年12月の工事完成を目指して～

○ 沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 第一工事課 係員 飯塚幸司
那覇港湾・空港整備事務所 第一工事課長 荒木幸宏

1. はじめに

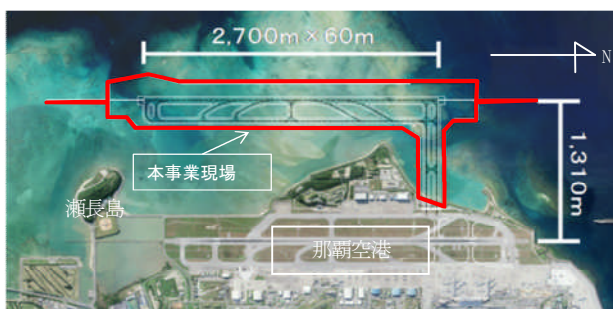
本事業は、当初、平成33年3月末の供用開始を目指した計画であったが、地元沖縄県からの早期供用という強い要望を受け、平成32年3月に供用開始する計画に見直しを行った。

当初計画も厳しい計画工程であり、課題は多くあった。以下の取組みを実施することで、沖縄県の要望する供用開始時期を実現することとした。

- ・土砂搬入能力が高い作業船の調達
(県外からの調達)
- ・護岸工事の並行作業及び一部前倒し
(実績の無い場所での施工)
- ・資材や人員の集中投入による全体工程の短縮
(適切な時期に必要な量の調達が可能に)
- ・沖縄県(埋立免許権者)の手続き等の協力
(審査期間の短縮)

また、供用開始が12ヶ月間早まったことにより工事の輻輳や増設工事関係者間での情報を適切に共有することが必要であることから、「工事情報共有システム」を構築した。

以下に、事業概要、工事実施における課題、工事実施における課題に対する対応、今後想定される課題と対応、本事業の進捗状況について報告する。



図一-1 本事業範囲位置図

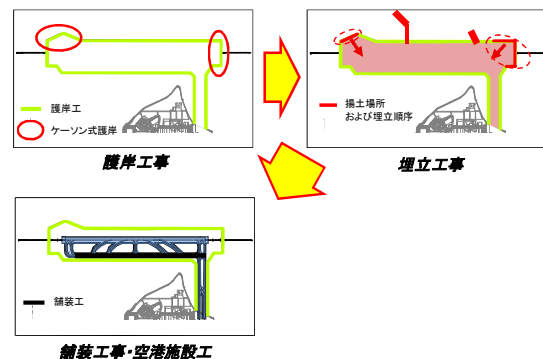
2. 事業概要

本事業は、那覇空港の現滑走路中心から西へ約1,310m離れた沖合海域に約160haを埋立し、長さ2,700m、幅60mの滑走路1本を増設する那覇空港の増設事業で

ある。

整備実施手順としては、まずは護岸工事により埋立護岸の形成を実施する。

次に護岸工事完了後、埋立工事(埋立土量：約990万m³ 埋立面積:160ha)並びに進路灯工事(南側：575m、北側：540m)を行い、埋立工事が完了次第に舗装工事及び空港施設工(無線施設・航空灯火)を行う。



図一-2 主な施工ステップ図

3. 工事実施における課題

(1) 厳しい現場条件

本現場は、今までに施工実績が無い外海での施工であり、高波浪の影響を受けやすい現場環境となっている。工事着手後も台風及び高波浪の影響により、度々作業の中止を余儀なくされている。

特に高波浪の影響を受けやすい北工区では頻繁に作業中止(平成26年11月～平成27年2月休止率 78.3%)となっており、実施工程の遅れが懸念されていることから、施工期間短縮の取組みが必要である。

キーワード 那覇空港 施工期間短縮 滑走路増設 護岸工事 埋立工事

〒901-0142 沖縄県那覇市鏡水 344 那覇空港新滑走路整備推進室 E-mail: iiduka710-kouji@ogb.cao.go.jp



図－3 傾斜堤護岸への高波浪の来襲

(2)護岸工事の材料不足

本現場は、遮蔽物が無く直接外海に面していることから、台風や冬季風浪の影響で安定的に連続した施工日を確保することが困難な状況となっている。

よって、施工可能な時期に集中して多くの資材を調達し、集中的に工事を実施せざるを得ない状況となった。



図－4 那覇空港増設事業近辺衛星写真

更に、護岸工事の主要資材は石材であるが、当初想定していた沖縄県内の石材供給能力に制約があり、増設工事が必要とする時期に必要な量の石材が確保できないことが判明した。

(3)工事の輻輳による情報共有

本事業は、全体工程が短縮されたことにより、海上工事と陸上工事といった様々な工事を同時期に並行して施工せざるを得ない状況(最大31件)となっている。

また、工事が集中したことにより広大な作業ヤードも必要となる。しかし、現場周辺でまとまった作業ヤードが確保できないことから、施工箇所も複数

(那覇空港、那覇市、浦添市、糸満市、沖縄市、うるま市)に分かれることになったため、以下に増設工事関係者間で関連する工事情報を共有するかが課題となった。



図－5 作業ヤード一覧

4. 工事実施における課題に対する対応

以上の工事実施に伴い発生した課題により、実施工程の遅れが懸念されることから、厳しい現場条件に対応した施工方法の工夫、材料不足への対応、について取り組んだ。

(1)厳しい現場条件に対応した施工方法の工夫

主な施工方法の工夫として、陸上施工によるケーソン製作、材料変更による護岸荒均し作業の省略化、ケーソン蓋コンクリートのプレキャスト化を実施しており以下に紹介する。

① 陸上施工によるケーソン製作

沖縄県では、陸上でのケーソン製作の実績は無く、フローティングドック船によるケーソン製作が一般的である。しかし、本事業では、短期間に60函ものケーソンを製作する必要があり、これに対応できるフローティングドック船を沖縄県内外から調達するのは困難であった。検討の結果、空港に隣接する那覇港においてケーソンを陸上製作が出来るヤードを確保するよう調整が出来たことから、フローティングドック船による製作から陸上製作に変更し同時並行で複数のケーソンを製作することが可能になり、施工期間短縮に繋がった。

但し、製作したケーソンを吊り下ろす大型起重機船は県内に無いことから、県外から調達することが生じた。



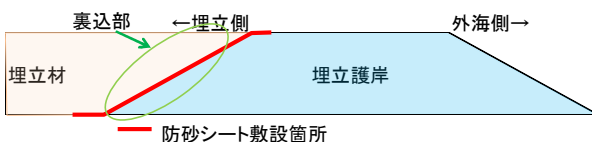
図－6 ケーソンの陸上製作

② 護岸荒均し作業の省略化（高伸度シートの採用）

護岸から埋立材の流出防止のために裏込部に敷設する防砂シートは、敷設する前にシートの破損を防ぐため護岸の荒均し作業が必要である。しかし、工程短縮の観点から検討した結果、防砂シートの規格を高伸度性（伸び率を60%以上から110%以上）に変更することで、防砂シート敷設前に行う護岸裏込部の荒均し作業を省略すること可能となり、約2ヶ月の施工期間短縮になった。



図－7 防砂シート敷設状況について



図－8 防砂シートイメージ図

③ ケーソン蓋コンクリートのプレキャスト化

ケーソン据付けの一連の作業は、艀装→浮上→曳航→据付→中詰砂投入・均し→蓋コンクリート打設→根固ブロック据付といった通常9日（稼働率含まず）の継続した施工日が必要となる。しかし、当該

海域は、台風や冬季風浪の影響で連続した施工日を確保することが出来ない場合もあることから、ケーソン据付後に実施するケーソン蓋コンクリートをプレキャストコンクリート版（PC版）に変更した。

PC版に変更したことにより、海上作業期間が短縮され、トータルで約2ヶ月の施工期間短縮に繋がった。また、海上作業の日数が減ることで、被災リスクの低減にも繋がった。



図－9 ケーソン蓋コンクリート設置状況

(2)材料不足への対応

当初の石材調達計画では、沖縄県北部にある本部地区鉦山のみを想定していたが、当時は9件もの護岸工事が同時期に実施される状況下で、台風の度重なる来襲により休止日が多発したことから、施工可能日に集中して石材を調達し施工する必要が生じた。しかし、本部鉦山だけの調達では積出能力に制約があり、増設事業全体で必要とする石材の確保が困難であるため、施工可能日に石材の必要量が確保できるよう調達計画の見直しを図った。

まずは、沖縄県内で追加調達可能な鉦山を調査した。調査の結果、国頭鉦山及び石垣鉦山からも調達可能であったが、必要量には不足していたことから、沖縄県外とはなるが運搬時間も踏まえ奄美大島鉦山からも石材調達を行うよう調達計画を見直した。

その結果、本部鉦山、国頭鉦山、石垣鉦山、奄美大島鉦山の4鉦山から石材を供給することで、安定的な調達が可能となり工程を約4ヶ月短縮することができた。

また、県外産の奄美大島鉦山から調達するにあたっては、沖縄県の『公有水面埋立事業における埋立用材に係る外来生物の侵入防止に関する条例』に基づき、沖縄県知事に搬入予定日の90日前までに必要な10項目（埋立用材の種類・用途・数量・採取場所、搬出経路・特定外来生物の付着又は混入の調査結果等）について届出を行った。

また、県外産の石材を海上投入する際には、投入前に石材に特定外来生物の付着・混入のないことを

確認してから投入を行っている。

現時点で使用した県外産石材には特定外来生物の
付着・混入は確認されていない。



図－１０ 各鉤山の位置図

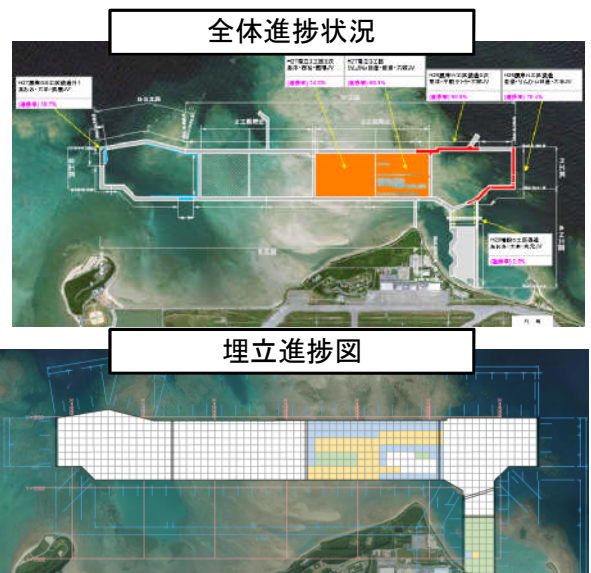


図－１１ 特定外来生物混入有無確認状況

(3) 情報共有の取り組み

施工期間が5年10カ月と厳しい工程で計画され、大規模工事から小規模工事、陸上工事や海上工事等と、多岐にわたる工事が同時期に実施される計画となっている。工事が円滑且つ安全に進めるためには如何に関係者間で情報共有が図れるかが重要であることから、工事情報化システムの構築を行った。

工事情報化システムは、日々の作業現場の確認や工程調整、進捗状況の確認、埋立情報、水質監視情報など、相互調整に必要な情報を効率的に把握が確認できるシステムとした。工事情報化システムが構築されたことで、関係者間での情報共有が図られ本事業の円滑化に繋がっている。

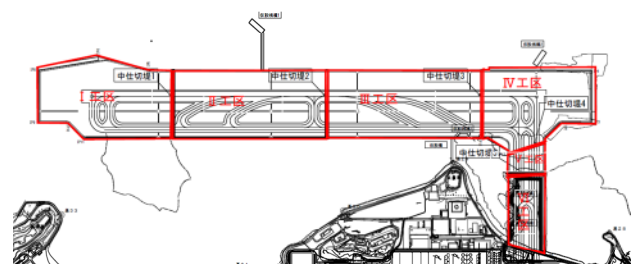


図－１２ 工事情報化システムの全体進捗図・埋立進捗図

5. 今後想定される課題と対応

本事業は現在、埋立護岸が約90%概成しており、2工区、3工区及び6工区(平成28年12月現在)が外海と締め切られた。平成27年9月より6工区から埋立工事が開始されている。現在は、6工区の水中部埋立が完了し、平成28年4月からは3工区の水中部埋立工事、平成28年10月から2工区の水中部埋立工事が鋭意施工中であり、今後は1工区及び4工区の埋立へ着手予定で、本事業の主要工事が護岸工事から埋立工事へと移行してきている。

本事業が今後も遅延無く完成させるためには埋立工事の課題についても十分な対応が必要である。



図－１３ 本事業の工区割り

(1) 埋立工事の課題・対応

埋立工事の課題は、下記のとおりである。

- ・埋立材投入に伴う濁り
- ・埋立材のゾーニングに伴う投入管理

a)埋立材投入に伴う濁りについて

埋立材を投入するに当たっては、埋立用地内から外海に濁水等が流出しない対策が必要である。濁水等の流出防止策として、護岸の裏込部に防砂シート

を敷設し、その後フィルターの役割を果たす海砂の層を形成することとしている。フィルター層を設けることで、濁水がフィルター層の中で濾過されることとなり、外海への濁り流出防止となる。

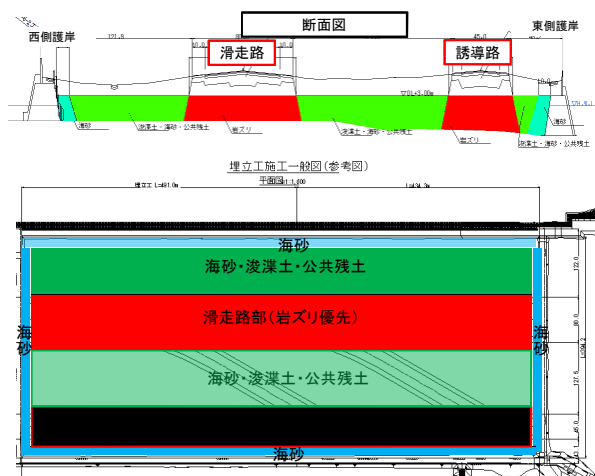
しかし、以上の対策の実施にあたっては、工程上フィルター層の施工を優先して実施する必要があり、材料となる砂を優先して調達するなど、適切かつ確実な埋立施工計画が必要である。

b) 埋立材のゾーニングに伴う投入管理について

埋立後は、滑走路及び誘導路の舗装工事となるが、良好な舗装を実施するためには滑走路・誘導路部の良質な路床を確保する必要があり、その管理のため埋立材のゾーニングを実施している。

滑走路及び誘導路の直下には、非液状化材である岩ズリ、その他の箇所については、海砂、浚渫土及び公共残土を投入するゾーニングを行っている。

また、設計で決定したゾーニングと実際の施工で投入した材料がどのようになっているのか管理する必要があり、埋立工事の投入管理が把握できる工事情報化システムを活用するなど、効率的な施工管理を行うこととしている。



図－1 4 埋立工事のゾーニング断面図・平面図

6. 進捗状況

平成26年1月の工事着手から平成28年9月までに2年9ヶ月を経過し、全体工程の折り返し地点となっているが、これまでに報告した課題への対応により着実に進捗してきている。以下に、進捗状況を報告する。

本事業は6工区（Ⅰ工区～Ⅵ工区）に分けて実施することとしているが、先行して浚渫工事や資機材運搬用の仮設栈橋工事を実施し護岸工事へ着手、各工区の護岸を締切次第埋立工事に着手してきており、

平成28年12月末現在で護岸工事が約94%、埋立工事が約14%完了している。

また、平成26年1月の工事着手から、平成28年12月末現在での約2年11ヶ月の短い期間に95件もの工事を契約し、83件の工事が完了している。

浚渫工事：浚渫土量 約26万m³

製作工事：ケーソン60函

各種ブロック約5万4千個

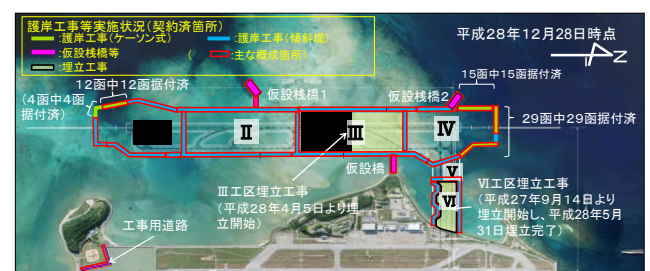
通水函6函

護岸工事：約8.0km護岸築造

傾斜堤護岸：捨石投入170万m³

ケーソン式護岸：全60函据付済

埋立工事：約140万m³埋立済



図－1 5 全体進捗状況（平成28年12月現在）

表－1 工種別工事契約件数

（平成28年12月末現在）

種別工事	契約済工事	完了工事	施工工事
浚渫工事	6	6	0
製作工事	52	52	0
仮設栈橋工事	3	3	0
護岸工事	17	14	3
埋立工事	7	1	6
進入灯工事	2	0	2
その他工事	8	7	1
合計	95	83	12



図－1 3 那覇空港進捗状況（平成28年11月現在）

7. まとめ

本事業着工後、想定以上に厳しい気象・海象条件

等の中で工事を実施せざるを得ず実施工程の遅延等も懸念されていたが、様々な取り組みにより全体工程に影響が無いように工事を進めている。

本事業の完成まで、残り2年11ヶ月となり、今後は護岸から、本格的な埋立工事、舗装工事へと工種が変わってくることから、新たな課題も出てくるかと思われる。今後も、その課題に対し臨機応変に対応し、平成31年12月には本事業を完成できるよう引き続き取り組んで行く。

Session 5 : 整備・交通関連

海洋博公園における設備整備事例とその効果

沖縄総合事務局 国営沖縄記念公園事務所 工務課
○石垣 太士
伊良部 哲

国営沖縄記念公園海洋博覧会地区（以下、海洋博公園という）の主たる設備である、空気調和設備の経年劣化に伴う更新にあたって、メンテナンス費や光熱費の高額化等、海洋博公園の維持管理上の課題を併せて解決するため、受変電設備や発電設備等を含む既存設備構成を一新する整備（以下、設備リニューアルという）を行った。

本論文ではその設備リニューアルの事例とそれによって得られた効果、および設備リニューアル後に生じた課題と対応状況について報告する。

1. はじめに

(1) 海洋博公園の概要

海洋博公園は、昭和50年度（1975年）に開催された沖縄国際海洋博覧会を記念して、昭和51年8月に博覧会跡地に設置された国営公園であり、年間400万人以上が訪れる沖縄県の観光振興の中核施設である。

海洋博公園の主要施設として、図-1に示す沖縄美ら海水族館、美ら海プラザ、海洋文化館、熱帯ドリームセンター等があり、それらの施設運営を円滑に行うためには、設備機能の維持が必要不可欠である。



図-1 海洋博公園主要施設

(2) 従前の状況と課題

海洋博公園の主たる設備のうち、空気調和設備については、設置後約20年経過しており、経年による機器等の劣化が進んでいる状況であった。空気調和設備の故障等が発生すると、施設利用者の快適性等、施設としてのサービス性能が著しく損なわれることから、早急に設備を更新する必要があった。

また一方で、以下に示す維持管理上の課題もあった。

a) 高稼働機器のメンテナンス費の高額化

常時稼働させていた常用発電機について、高稼働機器であることから、年1回の分解点検や部品交換・修繕等が必要となり、そのメンテナンス費が高額化していた。

b) 原油価格の高騰による光熱費の高額化

海洋博公園全体のエネルギー使用量のうち、約64%をA重油からまかなっていたため、原油価格の高騰により、光熱費が高額化していた。

(3) 課題解決のための対策

従前の課題に対して、既存同様の設備構成のまま空気調和設備の更新をするだけでは、前記(2) a), b) に示す課題の解決にはならないため、以下の対策を併せて実施することとした。

a) 常用発電機の非常用化

年1回の分解点検や部品交換・修繕等が必要なくなるよう、常時稼働させていた常用発電機を、停電時のみ稼働する非常用発電機に用途変更（以下、非常用化という）する。

b) 設備エネルギー源の転換

A重油をエネルギー源として稼働していた冷水プラントの空気調和設備の主要機器を、電気をエネルギー源とする機器に更新する。

また常用発電所の空気調和設備については、常用発電機からの排熱を利用するコージェネレーションシステムとしていたため、前記(3) a) の対策で発電機を常時稼働させないことになれば、エネルギー源の転換は必要不可欠となる。

c) 受電電圧の特別高圧化

前記(3) a), b) の対策を実施する場合、契約電力が2,000 kWを大幅に超えるため、電気事業者（以下、沖縄電力という）の供給約款上定められている、受電電圧を

キーワード 常用発電機の非常用化、設備エネルギー源の転換、受電電圧の特別高圧化

連絡先 〒905-0206 沖縄県国頭郡本部町字石川424番地 沖縄総合事務局 国営沖縄記念公園事務所 工務課

E-mail : ishigaki713-takashi@ogb.cao.go.jp

高圧から特別高圧に変更する（以下、特別高圧化という）ことが必要不可欠となる。

図-2に課題と対策の相関図を示す。

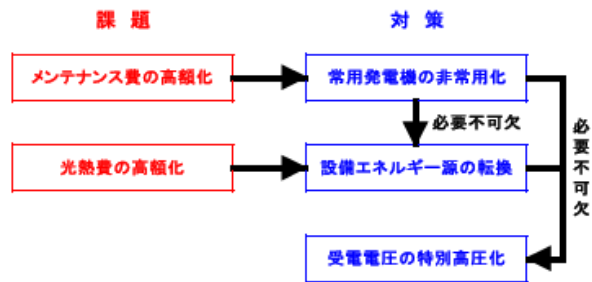


図-2 課題と対策相関図

2. 設備リニューアルの概要

(1) 空調調和設備の更新

設備エネルギー源の転換のため、冷水プラントの直だし吸収式冷凍機および常用発電所の吸収式冷凍機を、圧縮式冷凍機に更新する。

表-1に設備仕様比較表、図-3に整備状況写真を示す。

表-1 空調調和設備仕様比較表

施設名称	項目	リニューアル前	リニューアル後	備考
冷水プラント	主要機器	直だし吸収式冷凍機	圧縮式冷凍機	
	エネルギー源	A重油	電気	
	冷却方式	冷却塔	冷却塔	
	冷凍能力	3,516kW	2,814kW	
	電気出力	214kW	814kW	関連機器含む
常用発電所	主要機器	吸収式冷凍機	圧縮式冷凍機	
	エネルギー源	常用発電機排熱	電気	
	冷却方式	海水冷却	海水冷却	
	冷凍能力	738kW	1,406kW	
	蓄熱利用能力	417kW	417kW	水蓄熱
	電気出力	120kW	375kW	関連機器含む

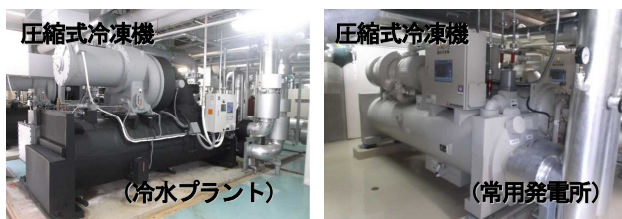


図-3 空調調和設備整備状況写真

(2) 発電設備の改修

常用発電機の非常用化のため、停電時の自動起動および復電時の自動停止等、非常用発電機として動作させるよう制御回路の改修を行う。また、今回更新する常用発電所の空調調和設備にて既存の海水冷却器を使用するため、発電機用の冷却塔を新設する。

表-2に設備仕様比較表、図-4に整備状況写真を示す。

表-2 発電設備仕様比較表

施設名称	項目	リニューアル前	リニューアル後	備考
常用発電所	形式	屋内オープン形		既存設備利用
	原動機	ディーゼル機関		
	エネルギー源	A重油		
	発電出力	1,960kW		制御回路改修
	用途	常用	非常用	
	冷却方式	海水冷却	冷却塔	



図-4 発電設備整備状況写真

(3) 特別高圧受変電設備の新設

受電電圧の特別高圧化のため、特高変電所を新築し、その建物内に特別高圧受変電設備を新設する。

表-3に設備仕様比較表、図-5に整備状況写真を示す。

表-3 高圧受電・特別高圧受変電設備仕様比較表

施設名称	項目	リニューアル前	リニューアル後	備考
中央開閉所	受電電圧	6,000V		
	契約電力	2,100kW		
特高変電所 (新築)	受電電圧		20,000V	
	変圧器容量		7,500kVA	
	契約電力		4,060kW	現在3,850kW



図-5 特別高圧受変電設備整備状況写真

(4) 受変電・動力設備の増設

前記(1)の空調調和設備の更新による電気出力の増加に伴い、電源送り等に必要な変圧器および制御盤の増設を行う。

表-4に設備仕様の比較表、図-6に整備状況写真を示す。

表-4 受変電・動力設備仕様比較表

施設名称	項目	リニューアル前	リニューアル後	備考
冷水プラント	受変電盤面数	10面	12面	
	変圧器容量	725kVA	1,225kVA	
	制御盤面数	2面	5面	
常用発電所	受変電盤面数	17面	18面	
	変圧器容量	350kVA	850kVA	
	制御盤面数	1面	4面	



図-6 受変電・動力設備整備状況写真

(5) 設備構成

前記(1), (2), (3), (4)に示す設備リニューアルの全体像把握のため、図-7、図-8にリニューアル前とリニューアル後の設備構成図を示す。

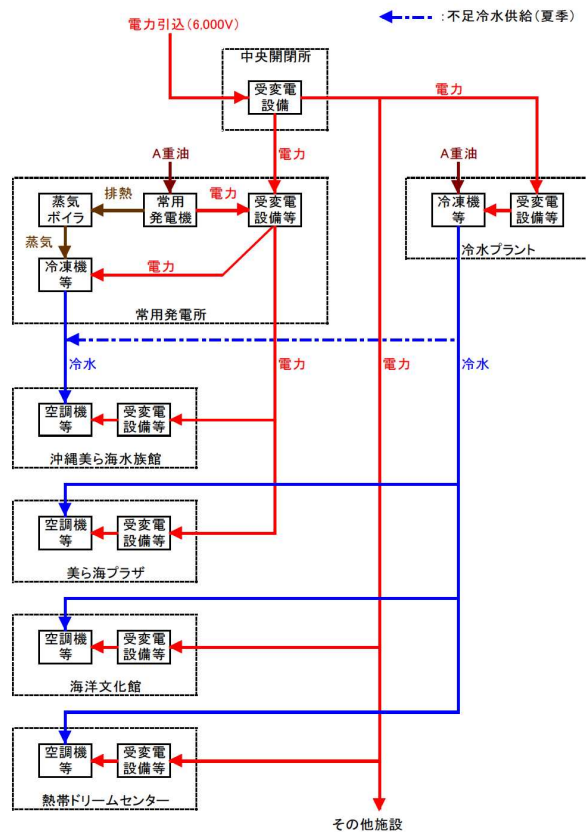


図-7 設備構成図（リニューアル前）

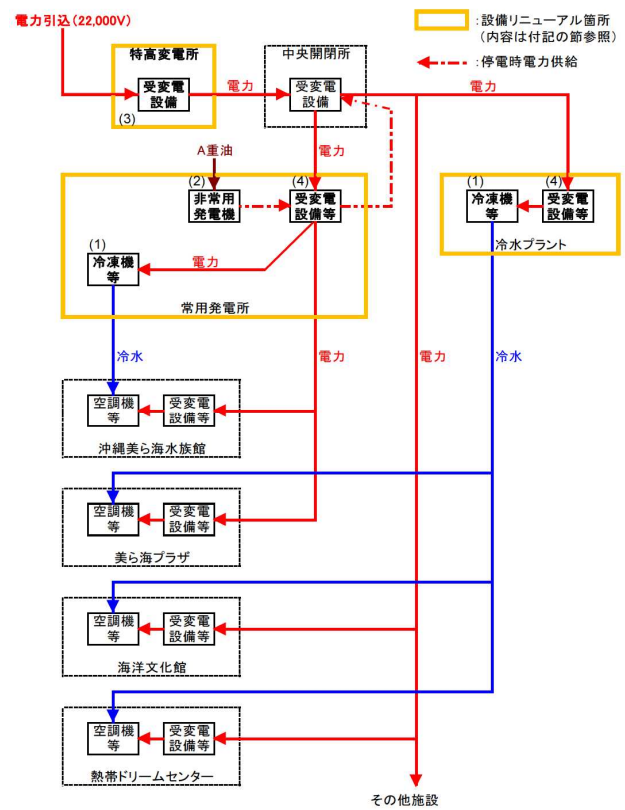


図-8 設備構成図（リニューアル後）

公園内の電力系統と冷水系統の変更内容を以下に示す。

a) 電力系統の変更

今回非常用化した発電機の発電電力を有効活用できるよう、常用発電所から中央開閉所までケーブルを新設し、停電時に、発電した電力を必要箇所へ供給できるようにした。

b) 冷水系統の変更

従前は常用発電所の冷凍機の冷凍能力が不足していたため、夏季には冷水プラントの空気調和設備で不足冷水を供給していたが、冷凍能力の見直しを行い、更新後は常用発電所の空気調和設備だけで美ら海水族館の冷水をまかなえるようにした。

3. 設備リニューアルの効果

(1) メンテナンス費・光熱費の削減

従前まで必要だった年1回の分解点検や部品交換・修繕等に加え、排気ガスのばい煙量等測定やボイラーの性能検査等の法定点検が必要なくなったため、日常の保守点検を除く発電機のメンテナンス費が年間約 4,500万円、率にして約 98%削減できた。

また、従前まで海洋博公園全体のエネルギー使用量の約 64%をまかなっていたA重油の使用比率が約 3%まで下がったことにより、光熱費が年間約 5,200万円、率にして約 12%削減できた。

なお、既存同様の設備構成のまま空調設備更新だけを行った場合と今回の設備リニューアルの整備費の差額は約4億5,000万円であるが、年間約9,700万円の維持管理費削減ができ、今後も同様の削減が見込まれるため、約4年7ヶ月で償却できる予定である。

図-9に年間費用の比較グラフ、図-10に経年費用の比較グラフを示す。

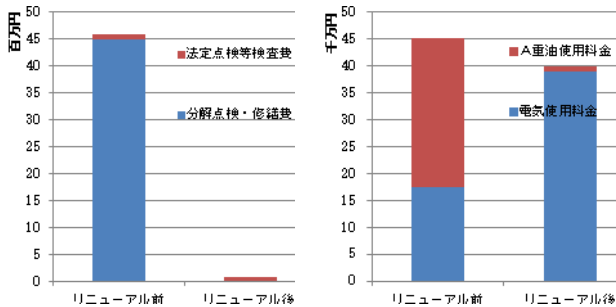


図-9 メンテナンス費・光熱費比較グラフ

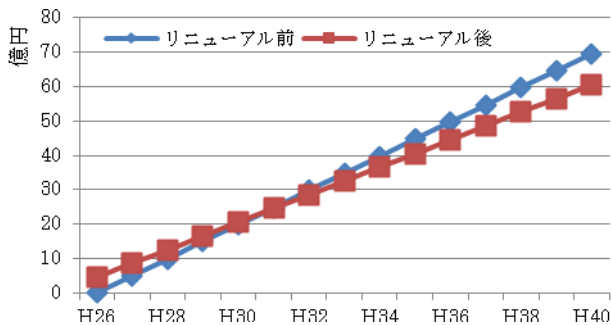


図-10 整備費・維持管理費経年比較グラフ

(2) 一次エネルギー・CO2排出量の削減

常用発電機を非常用化したことにより、夜間等電力需要が少ない時間帯の発電電力のロスが無くなったため、海洋博公園全体で消費する一次エネルギーは年間約16,000GJ、率にして約6.9%削減できた。また、CO2排出量は年間約178t-CO2、率にして約1.0%削減できた。

図-11に年間量の比較グラフを示す。

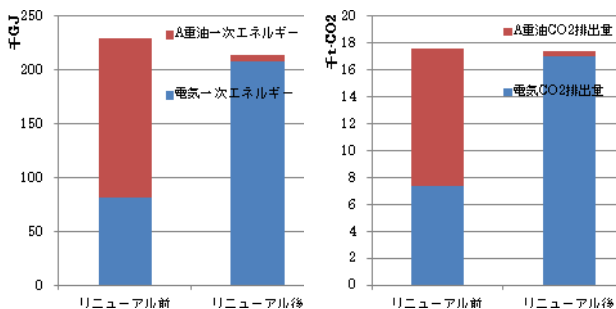


図-11 一次エネルギー・CO2排出量比較グラフ

4. 設備リニューアル後に生じた課題と対応状況

(1) 設備リニューアル後に生じた課題

従前は中央開閉所まで地中線で電力引込をしていたが、受電電圧の特別高圧化にあたって、沖縄電力から海洋博公園に専用で電力引込をするための特別高圧の地中線が無かったことから、電力引込の系統を伊江島に至る架空線の伊江線1号と共用することになった。

伊江線1号が停電した場合には、伊是名島に至る伊是名線1号に沖縄電力側で手動で切替えができるようになっていたが、両方とも長距離にわたる架空線であったため、台風等自然災害等の影響を受けやすい状況であった。

そういった状況の中、近年台風の影響で伊江線1号が停電し、屋外作業である伊是名線1号への切替作業が暴風のため遅れたことで、海洋博公園の全体停電が長期化したことがあったことから、早急に電力引込の信頼性を向上させる必要があった。

(2) 対応状況

前記(1)に示す課題の解決のため、沖縄電力と協議を重ねた結果、負担金工事として沖縄電力側で海洋博公園専用の地中線を新設することとした。これにより台風等自然災害等の影響を受けづらくなり、電力引込の信頼性が格段に向上すると考える。

図-12に電力引込の現状と将来像を示す。

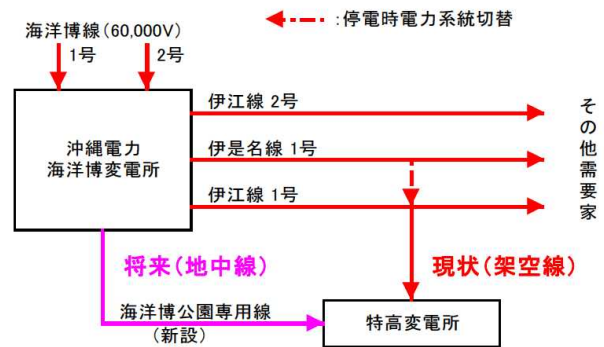


図-12 電力引込の現状と将来像

5. おわりに

今回の設備リニューアルにより、目的であった維持管理費削減のほか、海洋博公園の整備に係る重点項目である、「老朽化施設の更新による利用者の利便性・快適性の向上」や「省エネルギー化による環境保全性の向上」にも寄与できたと考える。今後も引き続き施設機能の維持・向上を図り、魅力ある公園づくりを進めていきたい。

沖縄県のMICE施設の現状と今後について

沖縄県文化観光スポーツ部観光整備課

主任技師 安座間猛

1 はじめに

沖縄県の観光は、今、好調に推移している。毎月発表される入域観光客数概況では、過去最高を更新といった文字がここ数年当たり前のように続いている。

平成27年度の入域観光客数は、過去最高の783.6万人と推計され、800万人も目前となっており、対前年度比で10.7%の増加である。県外客については、626.6万人で、対前年度比が1.3%、約8.2万人の増加。外国人客については、167.0万人で、対前年度比が69.4%、約68.4万人の増加と過去最高となっている。

観光客全体消費単価は、平成27年度は、75,881円となり、対前年度比1.9%の増加となっている。

観光収入は、6022.1億円となり対前年度比12.7%の増加となっている。一方、観光は、水物と言われ、米国同時多発テロや新型インフルエンザなどの直接的でない要因により、いきなり落ち込むこともある。

また、シーズンによって、変動があるため、観光事業者の安定経営と観光従事者の安定雇用環境確保が課題である。

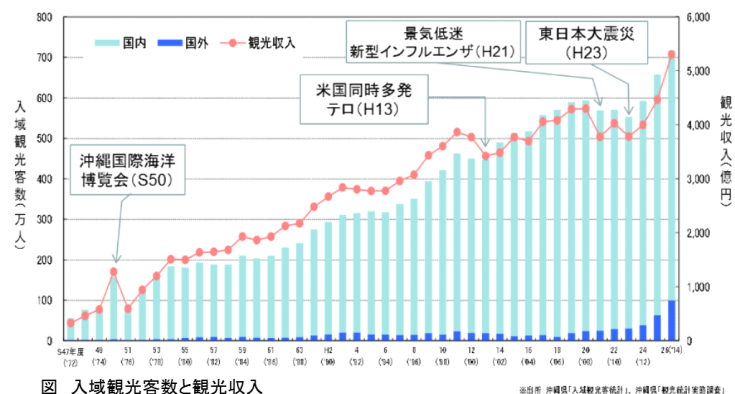
そこで、沖縄県は、本県のリーディング産業である観光を安定的に発展させるため、「沖縄21世紀ビジョン基本計画」の中で、施策展開である「国際的な沖縄観光ブランドの確立」に向けて、「MICEの推進」を位置づけている。

沖縄県では、これまでも沖縄コンベンションセンターや万国津梁館を整備し、MICE誘致に取り組んできたところであるが、世界的には、MICE施設規模は大型化し、機能も高度化している状況にある。現状では、規模拡大に対応できないことから、機会損失となり、域外流出の状況となってきている。

このような状況に対して、沖縄県は、平成25年度から有識者委員会を開催し、大型MICE施設整備についての基本方針等を基本構想としてとりまとめている。

そこで、沖縄県のMICE施設の現状と今後について紹介し、MICEとまちづくりについて考察を述べることとする。

※MICE（マイス）とは、Meeting（会議・研修・セミナー）、Incentive tour（報奨・招待旅行）、ConventionまたはConference（大会・学会・国際会議）、Exhibition（展示会）またEventの頭文字を合わせた造語で、ビジネスツーリズムの一形態をいう。



キーワード 観光, 大型 MICE, 沖縄コンベンションセンター, 万国津梁館, 大型 MICE 振興戦略
連絡先 〒 900-8570 那覇市泉崎 1-2-2 沖縄県(観光整備課) E-mail: aa081302@pref.okinawa.lg.jp

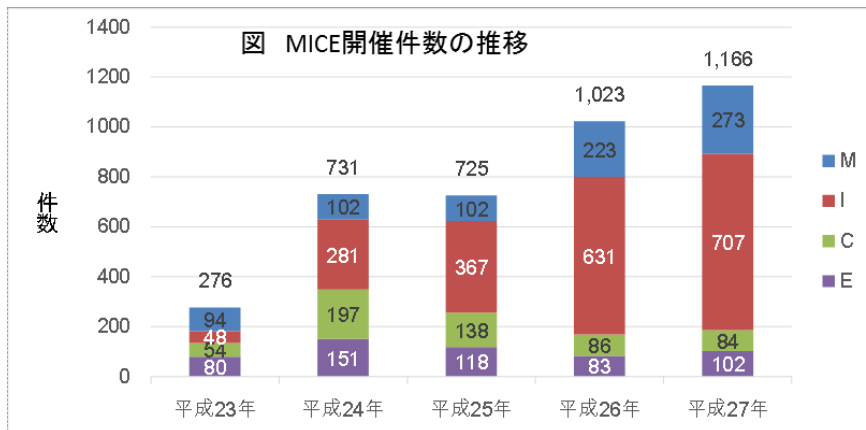
2 沖縄県のMICEの現状について

沖縄観光は好調であり、インバウンドによる押し上げ効果がかなり大きなウェートを示しており、全国的にもインバウンドの増加が、日本の観光全体を押し上げているのがあるが、観光が伸びているのは、日本や沖縄に限ったことではない。

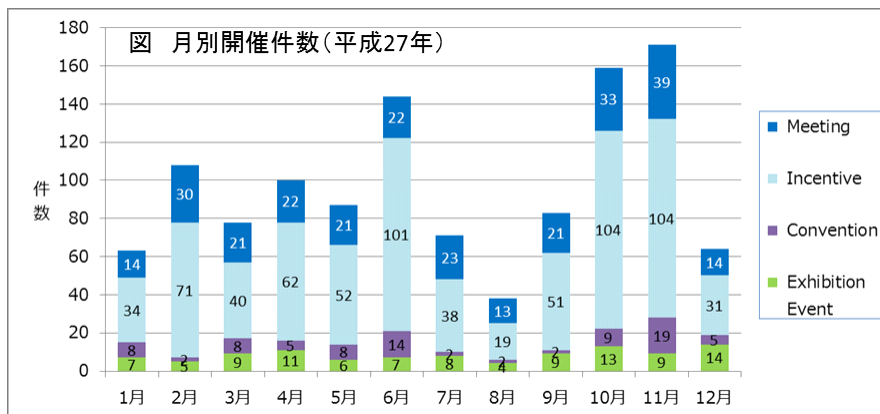
国連世界観光機関（UNWTO）が2016年1月に発表した「世界観光指標（World Tourism Barometer）」によれば、2015年の国際観光客到着数（1泊以上の訪問客）は世界全体で4.6%増加しており、アジアでは6%増で過去最高となっている。

少子高齢化で、国内旅行の需要の伸びは期待できない現状の中、成長著しいアジア地域におけるMICE開催ニーズは拡大を続けており、今後もその傾向は続くと考えられている。その一方で、アジア諸国や国内の諸都市間のMICE誘致競争は激化しており、MICE施設の大規模化と機能拡充が行われている。

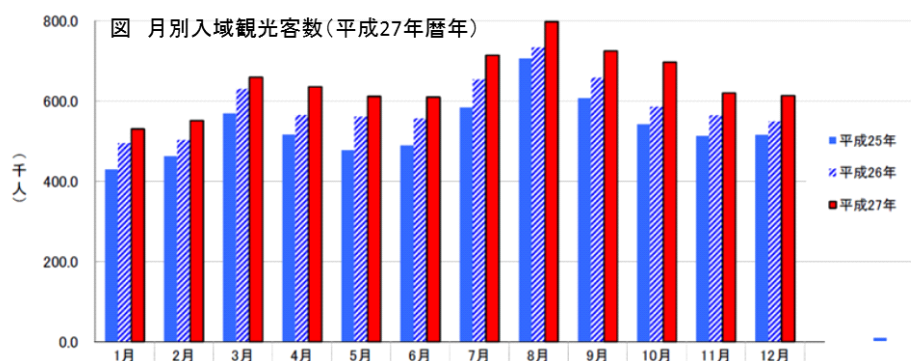
沖縄県におけるMICE催件数は、平成27年（暦年）で、1,166件となっており、M（Meeting）とI（Incentive）の件数割合が高く、中でもIが全体件数の6割程度を占めている。



ただし、参加者数は、イベントや展示会等で一度に多くの人を集客するEが、平成27年（暦年）では、68%と一番多い。次に、Mの14%で、続いてIの12%となっている。



沖縄で開催されるMICEの特徴として、月別の参加人数では、1月～3月にピークがあり、7～9月の一般観光の繁忙期は、逆に少なく、10月、11月に再びピークを迎える傾向にある。入域観光客数とは、対照的な傾向となっている。



このことから、MICE誘致は、入域観光客数の平準化に寄与していることがわかる。

3 沖縄県のMICE施設について

沖縄県のMICE施設としては、宜野湾市に立地する沖縄コンベンションセンターで学会や展示会が多数開催されているほか、名護市のリゾートエリアに立地する万国津梁館は、特徴的な外観や高品質な内装が高く評価されており、ミーティングやインセンティブトラベルで多く利用されている。

さらに、県内には、会議室やバンケットホールを備えたリゾートホテルが多数立地しており、会議や企業研修として利用されている。

また、那覇市の沖縄セルラースタジアムにおいては、大規模イベントが開催されている。

それでは実際に沖縄県が管理しているMICE施設の利用状況と管理コストについて確認し、既存MICE施設の現状を確認することとする。

3.1 沖縄コンベンションセンターについて

沖縄コンベンションセンターは、国際、国内コミュニケーションの場としてのコンベンションを誘致・推進し、本県の産業の振興及び文化の振興に寄与することを目的として、昭和62年に開館している。

設計は、京都国際会館を設計した建築家故大谷幸幸男先生（東京大学名誉教授）によるもので、当館は、晩年の作品となっている。

本施設は、東シナ海を眺め、周辺には海浜公園及び海水浴場（人工ビーチ）、総合運動公園、マリーナ、ホテル等が配置された総合的なコンベンションセンターを形成し、県民に広く利用されている。

3.1.1 施設概要

施設面積：55,553㎡

総事業費：108億円

延床面積：21,034㎡

(a) 展示棟 延床面積：7,464㎡（5,000人収容）

(b) 会議棟A 延床面積：2,366㎡（A1:500人、A2:105人、A3:30人）

(c) 会議棟B 延床面積：1,879㎡（B1:226人、B2:112人、B3-B7:49人/1室）

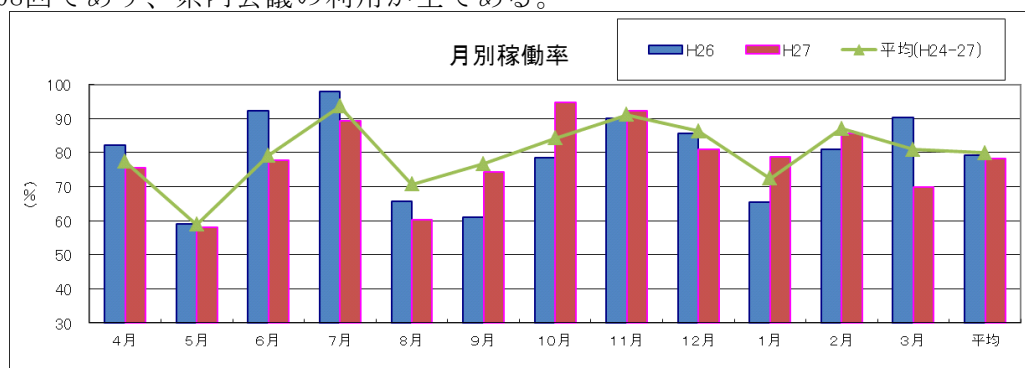
(d) 劇場棟 延床面積：9,244㎡（1,709人収容）

3.1.2 利用状況

平成27年度の利用者数は、約50.3万人で、海外参加者が0.5%、県外参加者が12%、県内参加者が87.5%と圧倒的に県内利用者が占めている。

また、平成27年度の施設の利用件数は、467回で、国際会議が18回、県外会議が41回、県内会議が408回であり、県内会議の利用が主である。

施設稼働率は、78.1%となっており、例年5月と8月が閑散期となっている。



平成26年度から立ち上げた「宜野湾市コンベンションエリア連絡会議」を通して、エリア周辺の主要施設（宜野湾マリーナ、宜野湾トロピカルビーチ、宜野湾海浜公園、各商業施設、宿泊施設等）、宜野湾市及び指定管理者が連携強化を図り、大型催事時に渋滞問題、駐車場問題への対策となる受入体制構築を図っている。

3.1.2 管理コスト

平成27年度の収入は、3億9千万円で、利用料金の収入が76.1%で、指定管理料が16.8%、自主事業収入が7.1%となっており、利用料金収入が収入の柱となっている。

一方平成27年度の支出は、3億8.2千万円で、施設の設備関係の管理委託費が48.5%となっており、設備管理に係る費用が大きいことがわかる。

また、当該施設は、開館から29年が建っていることから、老朽化が激しく、平成27年度から平成31年度まで集中的に大規模修繕事業を県費により実施しているところである。

大規模修繕工事は、騒音振動が発生する場合は、催事に影響があるため、作業ができず、工事業者にとっては、かなり作業効率が悪く、工期が長くなっており、作業によっては、連続して作業する工種があり、その場合は、長期間にわたり、予約を止めて工事を行うこととしている。その場合は、利用料金の収入が途絶えることとなるため、指定管理者にとっては厳しい運営状況となっている。

3.2 万国津梁館について

2000年九州・沖縄サミット開催に併せて建設された万国津梁館は、沖縄コンベンションセンターと同様に、国際、国内コミュニケーションの場としてのコンベンションを誘致・推進し、本県の産業の振興及び文化の振興に寄与することを目的として、平成12年に開館している。

3.2.1 施設概要

施設面積：26,621㎡

総事業費：約40億円

延床面積：4,900㎡

(a) サミットホール 延床面積：2,344㎡（500人）

(b) サンセットラウンジ 延床面積：523㎡

(c) カフェテラス 延床面積：462㎡

(d) オーシャンホール 延床面積：1,160㎡（340人）

(e) ビジネスルーム 延床面積：36㎡

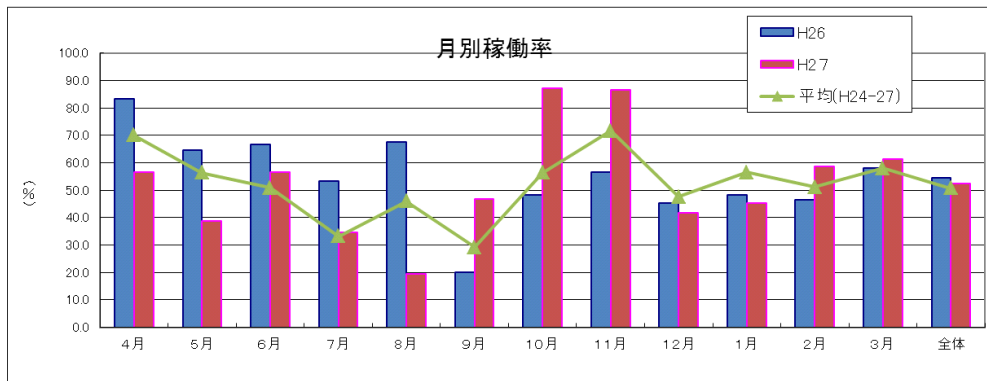
(f) 貴賓室 延床面積：40㎡

3.2.2 利用状況

平成27年度の利用者数は、約2.1万人で、海外参加者が14.1%、県外参加者が58%、県内参加者が27.9%と県外利用者が多く、沖縄コンベンションセンターとは利用者層が違っていることがわかる。

また、平成27年度の施設の利用件数は、247回で、国際会議が31回、県外会議が160回、県内会議が56回であり、県外会議の利用が主となっている。

施設稼働率は、52.5%となっており、例年一般旅行では夏場の繁忙期である8月が閑散期となっている。



3.2.3 管理コスト

平成27年度の収入は、3億2.5千万円で、利用料金の収入が20.2%で、指定管理料が20.1%、自主事業収入が59.7%となっており、自主事業の収入が柱となっている。

一方平成27年度の支出は、2億8.6千万円で、施設の設備関係の管理委託費が20.6%、仕入原価費が50.6%となっており、自主事業に係る費用が大きいことがわかる。

また、当該施設は、開館から16年が建っていることから、設備系の老朽化が進んでおり、平成27年度から平成31年度まで集中的に設備機器の更新を県費により実施しているところである。

3.3 大型MICE施設の整備について

沖縄県は、2000年の九州・沖縄サミットをきっかけとして全国に先駆けてMICE誘致に取り組んできた結果、国内におけるMICE開催地としては一定の知名度を有してはいるが、施設容量、ホテルの客室数の限界などにより、機会損失が発生している状況である。

そこで、沖縄県では、成長著しいアジア地域や国内のMICE需要を取り込み、沖縄観光の更なる飛躍を目指すとともに、県内経済の活性化や産業の振興を図るため、平成25年度から、大型MICE施設の整備を検討してきている。

平成25年度に策定した基本構想の中で、立地場所を特定しない前提で、下記の3つの施設概要としている。

- ①展示会、コンサート等の多様なイベントに対応できる1万㎡～2万㎡の大規模な展示場
- ②企業の報奨旅行で、4,000人規模の板再会に対応できる約7,500㎡の多目的ホール
- ③学会の分科会等に対応できる20室～30室の中小会議室

3.3.1 MICE施設整備の基本方針

基本構想では、新規のMICE施設整備において、基本方針を以下のとおりとしている。

- (1)アジア地域を中心に増加するMICE開催ニーズを早期に捉えるための整備
- (2)沖縄独自の魅力を有する大規模MICE施設の整備
- (3)長期の都市計画においてMICEエリア形成に適した立地
- (4)適切なエリアマネジメントによる地域が一体となった受入環境の実現
- (5)利用者満足を得られる施設水準の実現と整備費用最適化への配慮

3.3.2 大型MICE施設の建設地について

大型MICE施設の建設地の選定にあたっては、最終的に要請のあった5つの候補地（那覇市、宜野湾市、浦添市、豊見城市、与那原町・西原町）について、各市町村の都市計画、

空港等からのアクセスとなる道路整備の進捗、民間の進出可能性等を確認し、平成27年5月22日に、建設地を「中城湾港マリンタウン地区」とすることに決定している。

建設地決定の主な理由は下記のとおりである。

- (1) 2020年度（那覇空港第2滑走路供用開始）の供用開始が可能な地域であること
- (2) MICEエリアとしての成立可能性（周辺に商業施設等が立地可能なまちづくり）
- (3) 交通アクセスの向上（那覇空港から高規格道路の整備が進められている）
- (4) 東海岸地域の振興による県土の均衡ある発展

3.3.2 大型MICE施設の機能、規模について

大型MICE施設の機能、規模については、平成27年9月に県内外の有識者で構成する「沖縄県大型MICE施設整備推進委員会」を設置し、平成25年度に策定した基本構想（上記3.3表記の①～③）をベースに検討を行った。

委員会の中では、施設は多機能型のMICE施設とし、展示場を2万㎡で整備し、将来の拡張性を確保する点で意見が集約されたところである。

また、委員会開催と同時期に沖縄県アジア経済戦略構想では、「アジアをつなぐ国際競争力のある物流拠点の形成」に向けた施策の一つに、大きな経済効果が期待される見本市・展示会ビジネスの誘致促進が掲げられ、受け皿となる展示場規模は、「世界のスケール感に合致」する必要があるとの考えも示された。

さらに、同年10月には、沖縄経済同友会から期待が大きく、5万㎡以上の広さを有する世界標準の大規模展示会場をオリンピックが開催される2020年までに建設されることと提言があり、同年11月には、東海岸地域サンライズ推進協議会から沖縄県に対し、多機能型施設であることと将来需要動向に対応できる拡張性をもった施設配置とするよう要望が提出された。

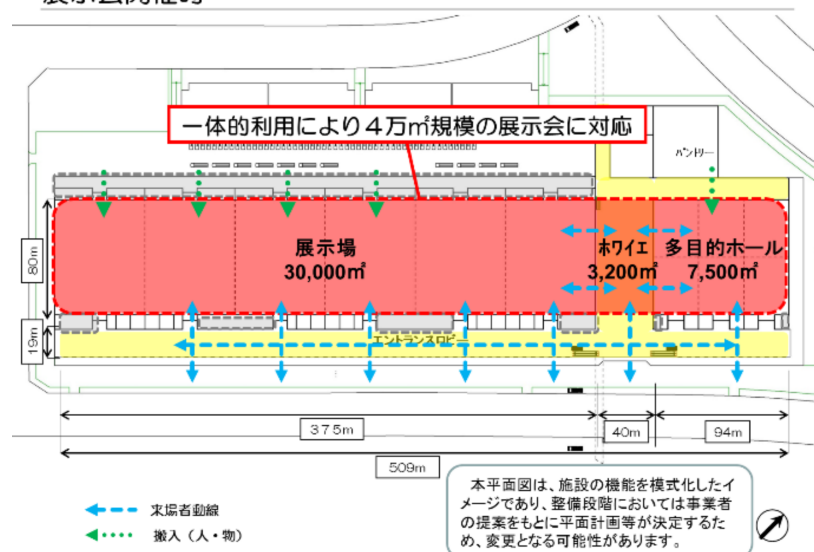
沖縄県では、大型MICE施設がアジアの旺盛な展示会ビジネスの取り組みにつながるという視点から、展示会やコンサート等のイベントの誘致可能性を改めて検討する事と市、県内外の需要調査を再度、実施した。

また、アジア地域の展示会主催者からは、沖縄のリゾートとしてのイメージを活かし、ヨットやダイビングなどのマリンレジャーをテーマとした展示会や富裕層向けのライフスタイルに関連した展示会の開催可能性が示された。

その他には、コンサートについて、これまで検討してきた5千人から2万人規模のコンサートだけではなく、2万人以上のコンサートの需要が一定程度あり、施設の集客や稼働率を高めることが確認できた。

従って、これまでの調査データに基づく検証、ヒアリング結果、有識者の意見、

展示会開催時



そして、大型MICE施設をアジアのダイナミズムに取り込み繋げる拠点として位置付けるという考え方などを総合的に検討した結果、沖縄県としては、展示場の規模を3万㎡とすることを決定した。

展示スペースとして、展示場3万㎡、多目的ホール約7,500㎡、ホワイエ等約2,500㎡を一体的に使用することで、実質4万㎡規模の展示会に対応できる施設となる。

3.3.3 大型MICE周辺におけるまちづくり

大型MICE施設は、西原町と与那原町にまたがる中城湾港マリンタウン地区内で整備されることから、両町のみならず本島中南部の東海岸における新たな都市機能として地域の活力向上に資することが期待されている。

また、大型MICE施設周辺には、宿泊施設や複合商業施設等を適切に配置し、MICE利用者の利便性を高めると共に、MICE開催時以外でも街の賑わいを創出する必要がある。

そこで、東海岸地域の発展を図るため、地域が一丸となり大型MICEの受入環境整備を進め、中城湾港マリンタウンエリア内のを対象として、今後の土地利用や都市構造等まちづくりの目指す方向性を統一し、MICEに必要な宿泊施設やMICE開催時以外でも賑わいを生む商業施設等の立地を促すことを目標として『マリンタウンMICEエリアまちづくりビジョン』を策定することとなった。

当該「まちづくりビジョン」は、適切なエリアマネジメントによって、地域が一体となった受入環境の実現を目指すためのまちづくり構想（考え方）であり、MICE誘致開催に伴う経済波及効果を十分に享受するためのホテルや商業施設等の立地を考慮したまちづくりを検討するものであり、今後、住民説明会を行い、住民のまちづくりに対する意識醸成を行っていくことが重要である。

大型MICE施設を核として、周辺環境と調和の取れた賑わいあるまちづくりのためには、県と周辺の関係市町村とが連携を密にし、体制づくりを整えながら取り組んでいくことが、成功の鍵となると考えている。

4 沖縄MICE振興戦略（仮称）について

沖縄県では、沖縄観光の更なる発展に繋げるという観点から、大型MICE施設、沖縄コンベンションセンター、万国津梁館、沖縄科学技術大学院大学及び民間ホテルの既存MICE施設が連携して、沖縄観光にビジネスリゾートという新機軸を打ち出すことを目指している。

このため、今年度は、今後の10年のMICE振興に向けた長期ビジョンとなる「沖縄MICE振興戦略（仮称）」の策定に取り組んでいる。

これは、大型MICE施設を核としてた、既存のMICE施設、民間施設等が一体となったMICEの誘致戦略や人材育成等、本県のMICE振興の指針となるビジョンとなる。



5 おわりに

沖縄コンベンションセンターのそれぞれの棟のコンセプトとデザインは、展示棟が「空」、会議棟は「海」、劇場棟は「ガマ」として、建築されている。

沖縄コンベンションセンター15周年記念誌から、そのコンセプトとデザインの意味について引用したい。(下記、参照)

「空」は、鳥や太陽であり、「海」はその中に棲む生物たちであり、「ガマ」は人々を意味しています。沖縄の強い陽射しを大鳥が羽を広げることにより、強い陽射しをさえぎり、その木陰に人々が集います。「海」「亀」に導かれ海底の世界へ。竜宮にも通じるような海底楽園へ思いをはせます。人々を包み込むシェルターとしての「ガマ」は、西(東シナ海)に沈む夕日を静かに受け入れます。

そこには、戦中に追いつめられた人々が鳥の翼(つばさ)に乗って空へ逃れ、亀やマンタの背に乗って海に逃れることができたという願いがこめられています。



会議やコンサート等でこの施設を利用される皆さんが、この施設に込められた大谷先生の思いを馳せながら、施設を利用していただけたら幸いである。

MICE施設の管理運営者は、様々な催事が滞りなく行われるよう施設の管理運営にあたり、時には利用者から、難しいサービスの提供を求められることもあれば、催事中に体調を悪くするお客様が出る場合もあり、高い緊張感で仕事にあたっている。

“うとういむち”の気持ちで、MICE施設の運営にあたるスタッフの仕事への姿勢を見ると、改めて、沖縄のMICE発展に期待が膨らんでくる。

本県的一大プロジェクトとなる大型MICE施設が、更なるMICE発展となるよう、皆さまのご支援とご理解及びご協力をお願いするところである。



<参考文献>

- ・「創立15周年記念誌沖縄コンベンションセンター 平成15年3月」 沖縄コンベンションセンター
- ・平成25年度沖縄MICE推進戦略検討・策定事業 報告書 平成26年3月」 沖縄県
- ・「沖縄県大型MICE施設民間活力導入可能性調査業務 報告書 27年12月」 沖縄県
- ・「平成27年度沖縄県MICE開催実態調査事業 報告書 平成28年3月」 沖縄県
- ・「平成27年度観光統計実態調査 平成28年3月」 沖縄県
- ・「平成27年度観光要覧 平成28年8月」 沖縄県

地方農村部での高齢ドライバーの交通行動に関する調査研究

北海学園大学 正会員 堂柿栄輔
足利市 正会員 松山将之
足利工業大学 正会員 藤島博英
足利工業大学 正会員 築瀬範彦

1. 研究の動機と目的

公共交通機関のサービス水準の低い地方農村部では、地方自治体が公共交通の利便性確保のため種々の施策を行っているが、一方では年齢に関わらず自動車が主要交通手段となっている。しかし自ら運転可能な年齢には限界があり、高齢者の運転者行動及び将来の運転可能年齢を知ることとは計画情報として有益であろう。

本研究は、上記の視点から地方農村部での高齢者の運転行動及び意識を意識調査から明らかにし、現在及び将来の高齢者交通の課題を示した。調査地域は栃木県茂木町であり、北関東の一般的な地方農村部である。

2. 研究の概要

図-1に研究の全体内容を示す。地域の高齢者の交通行動については多くの研究例があるが、ここでは自らがドライバーとなる交通を対象とした。意識調査の方法等については以降の説明となるが、日常の「2)運転行動」と「3)運転意識」が意識調査の主な内容である。

「2)運転行動」では b)トリップ長、c)交通目的、d)走行速度、e)外出頻度等から日常の客観的交通行動の把握を行った。また「3)運転意識」では、f)日常の運転意識、g)道路の危険箇所の評価等を得た。日常の運転意識では運転に対する積極性、消極性を質問している。また道路の危険箇所の評価では、道路事業及び交通管理に対する評価を得た。さらに代替交通手段の限られる地域交通での将来の運転行動について、h)運転可能年

齢、i)免許返納行動、j)相乗りの可能性についても調べた。

高齢者の運転による事故等は近年地方部、都市部を問わず報告されており、少数ではあるが道路法や道路交通法では対応の難しい社会問題となりつつある。代替交通手段が限られ、一方身体的能力の限界まで自ら交通手段を確保せざるを得ない高齢者の交通行動を把握することは、今後の地域交通を考える上において有益な計画情報であろう。

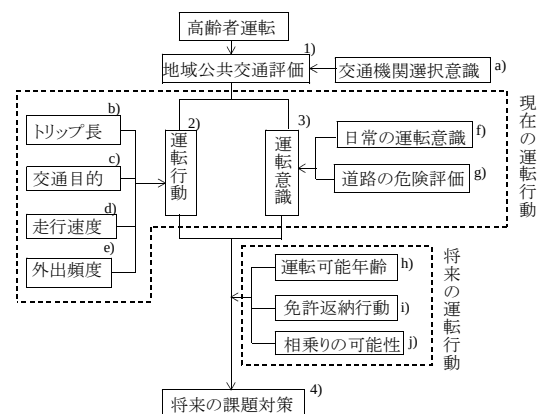


図-1 研究の内容

表-1 調査概要

項目	内容
調査方法	郵送法
調査日	2015年12月1日～14日
対象地域	栃木県茂木町
配布数	配布世帯数 497 世帯 1,998 人
回収数	300 人(回収率 15.0%)

キーワード 高齢者、ドライバー、地方農村部

連絡先 〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目 北海学園大学工学部

Tel 011-841-1161(内線 7733) E-mail dohgaki@cvt.hokkai-s-u.ac.jp

表－2 主な質問項目

項 目	内 容
個人属性	性別, 年齢, 免許の有無 保有自動車の種類
運転意識	日常の運転意識
所要時間	買い物通院等の時間距離
運転頻度	日・週単位の運転頻度
運転速度	通常の運転速度
運転継続理由	今後の運転継続の理由
運転継続年数	将来の運転継続年数
相乗行動	相乗りの対象者及び 相乗りしない理由
自動運転	自動運転達成可能年数

3. 意識調査の概要

3.1 調査の概要

調査概要を表－1に示す。調査は 2015 年 12 月に行った。497 世帯 1,998 人を対象に郵送配布し、300 人から結果を得た。世帯の 60 歳以上全員が対象者であり、回収率は 15.0%である。茂木町の 15 歳以上産業別就業人口は、一次産業 12.4%、二次産業 30.9%、三次産業 56.4%であり、就業者総数は 7,204 人、人口は 15,018 人である。また 65 歳以上の割合は 34.8%である。

3.2 意識調査の質問項目

意識調査の質問項目を表－2に示す。回答形式は、設問により多肢選択法及び複数選択法を用いた。また幾つかの項目には自由回答欄を設けた。

4. 分析

4.1 将来の運転可能年齢

(1) 運転終了年齢について

表－3に年齢階層別運転継続意志(年数)を示す。表中「年齢階層A」は回答者の年齢区分、「平均値B」は回答された運転継続年数の平均値、「 σ 」はその標準偏差、「運転終了年齢(A+B)」は回答者の現年齢に、回答された運転継続年数を加えたものである。年齢階層の 60 歳未満は 55 歳とした。ここで表中の「年齢階層A」と「平均値

(m)B」の関係を図－2に示す。横軸は「年齢階層」、縦軸は「運転終了年齢」である。これより、

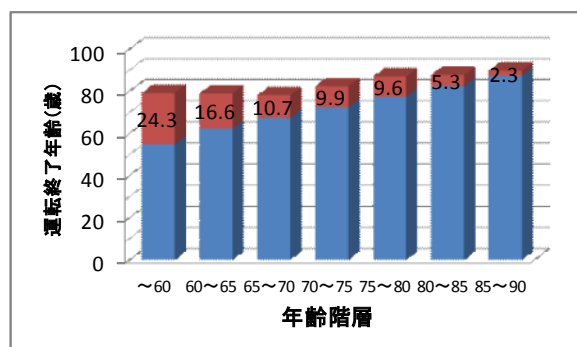
①運転終了年齢の平均値(m)は80.6歳、標準偏差は6.8(σ)であり、 $m \pm \sigma$ は73.8歳～87.4歳の範囲である。mの値は年齢の増加に従い単調減少するが、80歳前後では減少の値が小さい。若年層ではほぼ80歳程度を運転の限界と想定するが、80歳前後ではさらに継続年数が延長される傾向にある。

②76歳を超える年齢階層での運転終了年齢は 87 歳～ 90 歳であり、ほぼ 90 歳程度が上限である。

従って運転終了の想定年齢は、若年齢では 80 歳程度、それを超えると 90 歳程度となる。

表－3 年齢階層別運転継続意志(年数)

年齢階層	平均値(m)	σ	運転終了 年齢(A+B)
A	B		
60 歳未満	24.3 年	12.8	79.3
60 ～ 65 歳	16.6 年	5.1	79.1
66 ～ 70 歳	10.7 年	2.7	78.2
71 ～ 75 歳	9.9 年	2.8	82.4
76 ～ 80 歳	9.6 年	1.1	87.1
81 ～ 85 歳	5.3 年	2.9	87.8
86 ～ 90 歳	2.3 年	1.8	89.8



図－2 年齢階層別運転終了年齢

(2) 免許の返納行動について

免許の返納を行った 11 人について、返納年齢とその理由をまとめた。返納年齢の統計値を表－4に、その理由を表－5(複数回答)に示す。

表－4より免許返納の平均年齢(m)は 75.2 歳であった。また標準偏差(σ)=8.0 である。返納の年齢は 60 歳未満～ 80 歳超えと幅があり、個人差

も大きい。サンプル数が少なく統計的な考察は難しいが、返納は80歳を過ぎてからが多い。またその理由は、「D家族の送迎」が可能なことである。従って家族の送迎が難しい場合は運転の継続をせざるを得ない場合もあることが推測される。他の返納の理由では、家族友人のすすめ、身体的不自由、事故経験の順となった。意識調査での返納理由の選択項目は他に、「適性検査の結果」、「公共交通機関への利用転換」、「経済的理由（自動車の維持費用）」もあったが選択はされなかった。

さらに返納後の利用交通機関を表－6に示す。「家族による送迎」が8名(100%)、「デマンドタクシー」3名(37.5%)、「デイサービス」1名(12.5%)であり、免許返納後は家族による支援が前提であるが、

表－4 免許返納年齢

年齢区分	人数(人)	構成比 (%)
～60歳	1	9.1
61～70歳	3	27.3
71～80歳	3	27.3
80歳～	4	36.4
計	11	100.0

表－5 返納の理由(複数回答)

返納理由	回答数(人)/ 構成比(%)
A 家族友人のすすめ	4/36.4
B 目や耳が悪くなった	2/18.2
C 事故を起こした	1/9.1
D 家族が送迎してくれる	7/63.4
計 (人)	11 人

表－6 免許返納後の利用交通手段
(複数回答)全回答者 8 人

免許返納後の利用交通手段	人数(人)
家族の自家用車	8 人(100%)
デマンドタクシー	3 人(37.5%)
デイサービス	1 人(12.5%)

不便と言われるデマンドタクシーも利用されている。

4.2 道路の環境の改善希望

(1)道路の危険箇所の評価

表－7に意識調査で示した危険箇所 8 分類を示す。項目 A, B, C は主に道路事業に、D, E は交通管理に関する内容である。複数回答での評価の結果を性別に図－3に示す。縦軸は構成比(%), 横軸は危険箇所の分類である。サンプル数が小さく、項目毎の性別の有意差は確認できないが、これより

①「C狭い道」の評価が最も大きく男性30.1%, 女性32.2%, 男女平均では31.1%の評価である。交通量の少ない地方部での運転速度は都市部より速く、幅員の狭い道路での高速でのすれ違い等に対する危険意識は大きい。第二は「E信号の無い交差点」であり男女平均25.8%の評価であった。いわゆる出会い頭事故に対する危険意識である。一方、「D信号機のある交差点」の評価は最も低く、男女平均で3.2%である。項目DとEの評価数値の違いは統計的に有意であり、交差点での信号機の設置は危険意識の低下に大きく寄与していることがわかる。

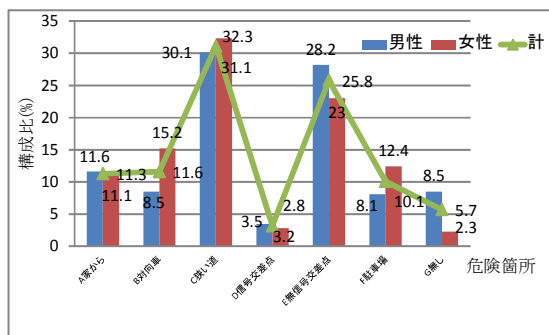
②「A家から道路に出るとき」及び「B対向車とのすれ違い」は男女平均で各々11.3%, 11.6%であった。前者

では男女差は小さいが、後者では男性8.5%, 女性15.2%と異なった数値となった。表－2に示す「運転速度」に関する質問項目では、平均速度は50kmを超えており、特に狭い道での高速でのすれ違いは女性には負担となっている可能性がある。一方項目A(表－3)は都市交通での一般的な危険要因では無いが、民地が広く交通量の少ない地方部特有の危険要因である。

②「F病院や店舗の駐車場」は男女平均で10.1%の評価があったが、女性により不安を与える要因である。しかし不安をあまり意識しない男性がより安全な駐車行動を行っているとは限らない。また「G無し」は男性が8.5%, 女性が2.3%である。これも「F」同様、より危険を意識する女性のほうが慎重な運転を行っているとも考えられる。

表－7 危険箇所の説明

項 目	内 容
A家から	家から道路に出るとき
B対向車	対向車とのすれ違い
C狭い道	道路幅員の狭い道路
D信号交差点	信号のある交差点
E無信号交差点	信号のない交差点
F駐車場	病院や店舗の駐車場
G無し	危険を感じていない
Fその他	自由回答



図－3 性別危険箇所の評価

表－8 運転中の危険箇所に関する自由回答

番号	内 容	対 策
1	山道・カーブ	道路の線形
2	急なカーブ	
3	雨の夜道	道路標示
4	雨が降っていて夜センターラインが見にくいとき	
5	信号ランプはもっと大きくならないか	交通管理 公安委員会
	信号ランプの大型化	

(2) 自由回答による危険箇所の評価

自由回答の結果を表－8に示す。表中「内容」は自由回答中のキーワードであり、5つの項目にまとめた。表中の「対策」は、これらの指摘の管理主体を想定した。「1山道・カーブ、2急なカーブ」は道路事業主に者の対策である。また「3雨の夜道」及び「4雨による道路標示

の識別の困難性」の指摘は交通管理者及び道路事業者双方に関わる問題であり、一般ドライバーにとっても共感を得る指摘であろう。さらに「5信号機」については交通管理者（公安委員会）の対応である。これは道路事業に比べ費用も少ない対策であろう。

4. まとめと課題

本研究では、地方農村部での高齢者の運転可能年齢の上限を示し、道路の危険箇所を高齢運転者の視点により評価した。

(1) ドライバーの運転可能年齢

高齢ドライバー自身の想定する運転可能年齢の上限は、70歳代までは80歳前後と考えるが、それを超えると90歳前後までと上限がさらに伸びる傾向がある。年齢の増加により運動能力や判断能力は徐々に衰えるが、80歳を境に急速に変化するわけではない。従って特に大きな大病をを煩う、または大きな事故を経験するようなきっかけがなければ日常生活の中で運転を継続することになる。

(2) 道路事業と交通管理の視点

・道路管理及び交通管理上の問題の指摘では、道路幅員と無信号交差点に対する危険意識が強かった。ここで幅員の改良では全線の広幅員化は現実的ではないが、特に視距の確保しにくい箇所での拡幅や路肩の樹木の伐採等による見通しの確保等は可能ではないか。また無信号交差点の改良では公安委員会での限られた予算制約が常にいわれるが、交通量の少ない地方部では道路事業によるラウンドアバウト等の交差点改良もありうるのではないか。現在の我が国の道路法令、道路交通法令は急速な自動車の増加時代を想定したものであり、ドライバーの高齢化に伴う道路事業と交通管理には新たな視点が必要であろう。

参考文献

1) 松山将之、築瀬範彦、藤島博英：過疎地域における高齢者の運転実態調査について、第52回土木学会関東支部研究発表会論文講演集CDROM、土木学会関東支部、平成28年3月

周遊観光行動の調査方法に関する基礎的考察

琉球大学 ○田中謙大 神谷大介 松本拓郎

東京工業大学 福田大輔 中西航 小林巴奈 都留崇弘

地域未来研究所 菅芳樹

1. はじめに

沖縄県は、那覇市におけるピーク時旅行速度が東京 23 区を下回るなど、中南部都市圏における渋滞が大きな社会問題となっている。人口増加社会であり、日本一の自家用車利用率である沖縄においては、この問題がさらに深刻化することが容易に想定できる。

また、沖縄県は観光産業を主要産業として位置づけ、観光客数 1 千万人を目標として各種施策を講じている。一方で、観光地周辺での渋滞・混雑、観光客の陸上交通に対する不満、外国人ドライバーによる事故の増加等、観光による負の影響および観光産業への負の影響が顕在化してきている。

これらに対して適切な施策を講ずるためには、観光客の心理・行動の把握が必要である。つまり、観光客は何の情報を基に、どのような判断の下で、観光地選択、経路選択、交通手段選択を行っているのかを理解した上で、適切な施策を講じる必要がある。しかしながら、現状においては RP データである観光行動の実態自体十分に把握できているとは言い難い。

以上の認識の下、本研究ではこれまで沖縄県内で実施されてきた観光行動に関する調査結果を纏めるとともに、そこから得られる情報とその限界について考察する。その上で、近年交通分野において利用されてきている携帯電話に関するビッグデータ、Wi-Fi を用いた調査、ETC2.0 データの利用可能性について検討する。

2. 既往の調査方法に関する考察

沖縄県では毎年観光統計実態調査を行っている。これまでに行われた調査としては、レンタカープローブ調査やドライブレコーダを用いた調査、著者らが行った那覇空港におけるアクティビティダイアリ調査がある。

2.1 観光統計実態調査

この調査の質問項目の内、観光行動に関する内容は、訪問地、交通手段、およびこれらに影響を及ぼす旅行回数、同行者、年齢等個人属性である。訪問地に関する調査結果を図-1 に示しておく。

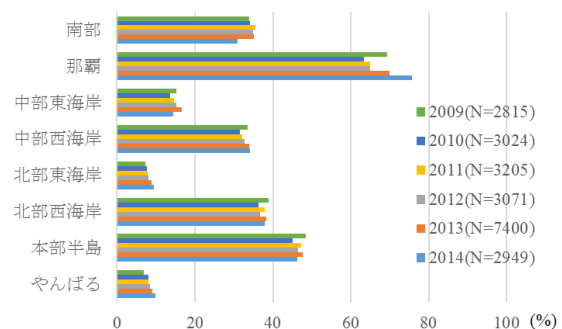


図-1 年度別における訪問地域選択確率の推移

2.2 レンタカープローブおよびドライブレコーダによる調査

この調査は GPS 機能を有した機器をレンタカーに設置し、その移動奇跡を記録するものである。結果の一例を図-2 に示す。

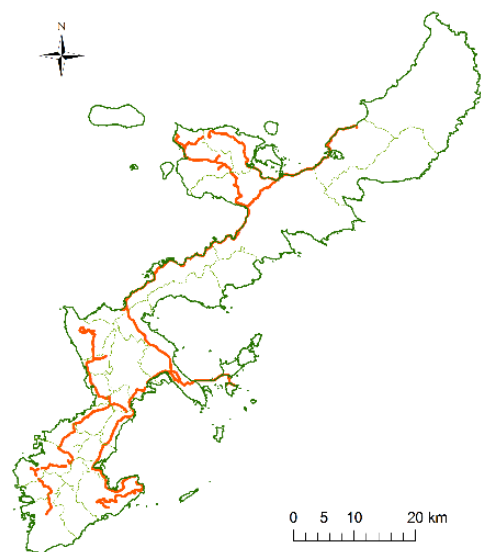


図-2 レンタカー移動奇跡の一例

この調査ではアンケートに比べて詳細な移動奇跡を得ることができるため、経路選択結果を把握することが可能となる。さらに、レンタカー受け渡し時に簡単なアンケートに協力してもらうことで、個人属性に関するデータを合わせて取得することができる。また、近年設置数が増加してきているドライブレコーダでは、CAN（Controller Area Network）データを合わせて取得することが可能となる。これにより、急加減速や急ハンドル等のヒヤリ・ハット情報の取得が可能となる。しかしながら、レンタカー受け渡し時間の増加、レンタカー事業者の協力等の課題があり、継続的な実施は困難である。また、レンタカーを停めて移動した場合の奇跡を把握することができない。

2.3 アクティビティダイアリ調査

旅行終了時に那覇空港で観光行動に関するアンケート調査を実施するものである。この調査では、OD、経路、手段、目的等、PT 調査と同程度の調査データを得ることができる。しかしながら、1 サンプルあたり 1 時間程度の調査時間を

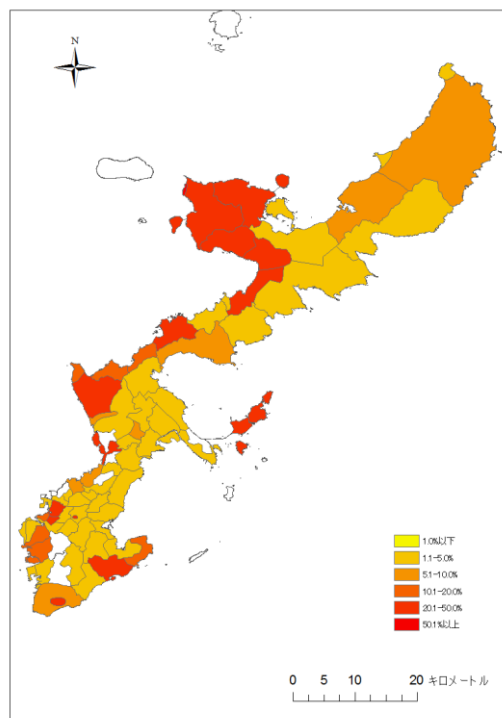


図-3 プローブとダイアリ調査による観光地選択確率

要すること、記憶の曖昧さ等の課題がある。

レンタカープローブとアクティビティダイアリデータを組み合わせることにより、図-3 のように図-1 よりも詳細な観光地選択確率を表現することが可能となる。さらに、沖縄滞在中の時間の使い方を把握することも可能となる。

3. 通信機器を用いた調査方法に関する考察

携帯電話等の通信機器の位置情報やそれが発信する Wi-Fi の信号を用いた調査が各地で行われるようになってきている。

3.1 滞留人口データ

これには Docomo 社の「モバイル空間統計」などがある。全滞留メッシュ人口の一例を図-4 に示す。メッシュ内滞留人口を把握できる一方、秘匿情報の関係より、沖縄では属性別集計などは表示されないことが多い。また、個人情報把握できないこと、トリップチェーンを把握することは出来ない。

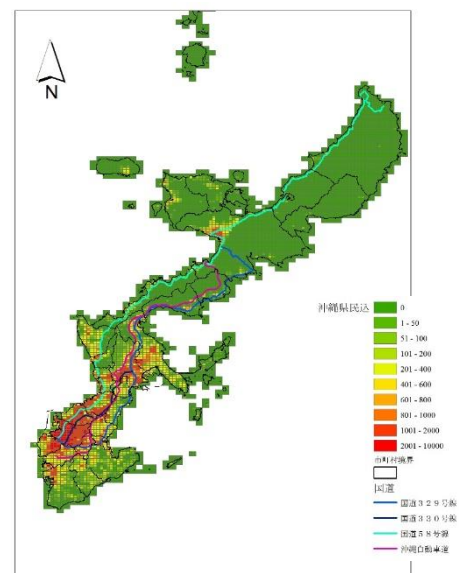


図-4 2016 年 8 月 19 日 14 時の滞留人口

3.2 Wi-Fi パケットセンサを用いた調査

この調査はスマートフォン等の端末が Wi-Fi を利用するため、アクセスポイントの情報を得るために行っている動的スキャンの情報を収集する調査方法である。本研究では図-5 に示す位置にお



図-5 調査地点

いて、2016年8月に調査を行った。ここでは特に、調査データの精度を検証するため、美ら海水族館入館者数との比較結果を図-6に示す。これより、ユニークIDを用いることにより、入館者数との関係は概ね一致している。また、ユニークIDを入館者数で除した値は平均1.33、分散0.10で比較的安定していた。これより、この調査で得られた結果は概ね拡大係数になりうるものと考えられる。

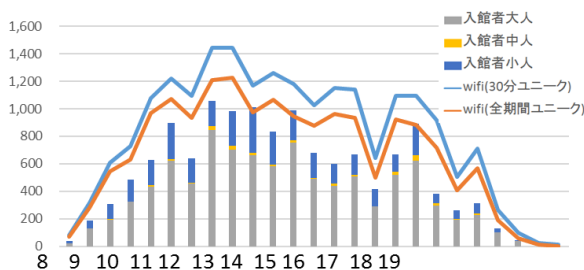


図-6 ユニークID数と入館者数の比較

4. 調査方法に関する考察

ドライブレコーダやプローブを用いた調査では、レンタカーの動きは詳細に把握できる一方、停車後の移動については把握が困難である。また、レンタカー事業者への負担、レンタカー引き渡し時間の増加という課題も残される。

Wi-Fiを用いた調査は多くのデータが入手可能であり、観光地での滞在時間を最も確実に把握できる一方、各調査地点に機器を設置する必要がある。また、観光施設間の移動手段については把握することは出来ない。

これら調査方法の特徴を図-7および表-1に示す。モバイル空間統計は、図-7をある時間断面で集計した結果となる。

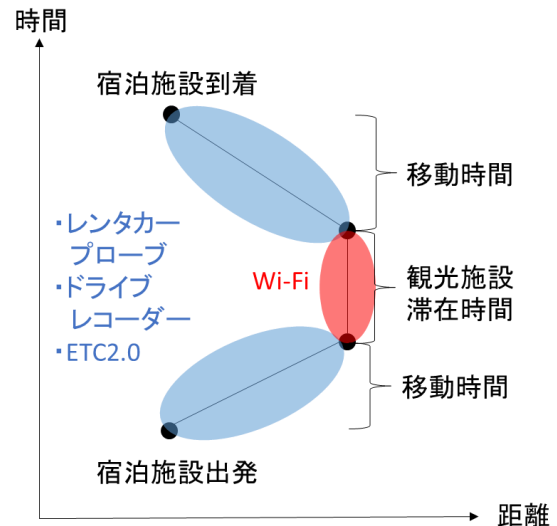


図-7 調査方法の時空間的特徴

表-1 調査方法の特徴

		属性	OD表	費用	人手	外国人	持続性	サンプル数
既存調査	観光統計	◎	×	×	○	×	◎	○
	レンタカープローブ	○	◎	×	◎	×	×	×
	アンケート	◎	○	×	×	×	×	×
新規調査	ETC2.0	○	◎	◎	◎	◎	◎	×
	ドライブレコーダー	○	◎	○	◎	○	×	×
	Wi-Fi	○	◎	○	◎	×	○	◎

また、アンケート調査では、多くの問いを聞くことができる一方、人手がかかるとともに、調査協力者への負担という課題が残される。また、周遊行動を把握するためにアクティビティダイアリを調査すると、記憶の曖昧さ、調査時間の長さが課題となる。このため、継続的なデータの取得は困難である。

なお, ETC2.0 データを用いた調査も行われてきているが, 沖縄ではセットアップ率が約 0.2% (2016 年 3 月) という状況である. レンタカーへの設置は著者らが 2016 年 12 月に設置したばかりであるため, これに関する考察は今後の課題とする.

5. おわりに

本研究では観光客の周遊行動を把握するための調査方法について, 既存手法や近年用いられている方法について整理した. 特に Wi-Fi を用いた調査においてはある程度の精度が確認できた. 今後はこれらの調査の組み合わせにより, 観光客の観光行動をトリップチェーンとして把握することの可能性について検討する. また, ETC2.0 についてもデータが得られ次第, 比較検討に加えることとする.

本研究は「ETC2.0 プローブ情報等を活用した”データ駆動型”交通需要・空間マネジメントに関する研究開発」(研究代表: 福田大輔, 道路政策の質の向上に資する技術研究開発) の一環として行ったものである.

観光シーズンにおける交通集中の 分散化に関する取り組みについて

松川 剛¹・濱川 昌丈²

¹沖縄総合事務局 北部国道事務所 調査課長（〒905-0019 沖縄県名護市大北4-28-34）

²沖縄総合事務局 北部国道事務所 調査課 調査係員（〒905-0019 沖縄県名護市大北4-28-34）

観光立県である沖縄県のなかでも、本島北部地域は、年間来館者数340万人を誇る「美ら海水族館」を擁する海洋博公園などの施設があり、多くの観光客が訪れる地域である。一方、沖縄本島において人口が集中し、那覇空港を有する南部地域と北部地域を結ぶ路線は沖縄自動車道、国道58号、国道329号の3路線であるが、世富慶～許田間においては、国道58号、国道329号の2路線のみとなり、約9割もの交通が国道58号（許田～世富慶）に集中する状況にある。そのため、観光シーズンには、交通渋滞が発生し北部地域全体の課題となっている。本研究は、観光シーズンの偏った渋滞に対し、北部地域へのアクセス道路全体を賢く活用し、アクセス経路の分散を図るなど交通環境の改善を図った取り組みを報告するものである。

キーワード 交通円滑化、経路分散、渋滞対策、SW（シルバーウィーク）

1. 背景と目的

(1) 背景

a) 観光ピーク時の交通状況

沖縄県北部地域では、春の大型連休（GW）や夏のビッグイベントである海洋博公園花火大会など、観光ピーク時には、図-1 に示すとおり、中南部からのアクセス経路である沖縄自動車道や国道58号に交通が集中し、例年数キロに渡る渋滞が発生し、来訪した観光客の移動のみならず、日常生活や業務交通の妨げになり、本島北部地域全体の課題となっている。



図-1 渋滞箇所位置図（左）と国道58号の混雑状況（右）

b) これまでの取り組み

観光ピーク時の交通集中の緩和に向け、北部国道事務所では、平成25年度より海洋博花火大会（例年7月に実施）を対象に、本島北部地域へのアクセス経路の分散化を図るための経路分散実証実験に取り組んできた。平成26年の海洋博花火大会では、花火大会会場へのアクセス時間の平準化が確認された。これは、花火大会の来場者

の約9割が県内客であり、表-1 に示す経路分散メニューの効果が比較的容易に周知できている結果と推察される。

表-1 これまでの取り組み内容

平成 25 年度	①ラジオによる事前周知 ③立て看板による経路案内	②沖縄自動車道本線での情報提供 ④広報誌(アシナビー)による情報提供
平成 26 年度	①ラジオによる事前周知 ③立て看板による経路案内 ⑤リアルタイム情報の提供	②沖縄自動車道本線での情報提供 ④広報誌(アシナビー)による情報提供

(2) 経路分散実証実験の目的

前述の背景を踏まえ、平成27年度の実証実験では本島北部地域で著しい混雑が発生する大型連休（シルバーウィーク、以下SW）を対象に実証実験を行い、大型連休中の交通円滑化を図ることを目的とした。なお、大型連休は花火大会等の特定イベントと異なり、観光客の目的地が分散するため、主な観光地として以下の3地点を事前に設定し、経路分散を行うこととした。

- ①海洋博記念公園（本部町）
- ②古宇利島（今帰仁村）
- ③道の駅ゆいゆい国頭（国頭村）

2. 経路分散実証実験の概要

(1) 実施概要

前述の目的を遂行するため、以下に示す内容で経路分散実証実験を実施した。

a) 実施期間

平成27年度は、秋に5連休の大型連休（SW）があり、このシーズンに交通混雑が想定されるため、SWを対象に経路分散実証実験を行った。

・平成27年9月19日（土）～9月23日（水）：5連休

b) 実施内容

表-2，図-2 に示す，経路分散メニューを準備し，来訪する観光客に対し交通情報の提供を行った。

特に，大型連休は県外客が増加することが想定されることから，これまでの経路分散の取り組み（ラジオ放送，横断幕，立て看板等）に加え，空港付近のレンタカー店舗にて北部地域に来訪する際の迂回情報を記載したチラシの配布を行った。

表-2 平成27年度経路分散メニュー

平成27年度	①ラジオによる事前周知	②沖縄自動車道本線での情報提供
	③立て看板による経路案内	④広報誌（アシナビー）による情報提供
	⑤リアルタイム情報の提供	⑥レンタカー店頭でのチラシ配布



図-2 実施内容と位置図



図-3 横断幕



図-4 立て看板



図-5 道路情報誌（アシナビー）



図-6 チラシ（左）と配布したレンタカー店舗（右）

(2) 効果計測

効果計測は，以下に示す3つの方法により実施した。

a) 交通実態調査

交通実態調査（交通量調査・渋滞長調査）については，本島北部地域にて渋滞が発生する箇所として図-7に示す4箇所にて，5連休の中日（9月21日(祝)）に実施した。



図-7 交通実態調査箇所位置図

b) プローブデータによる所要時間測定

指定した主な観光地（海洋博公園，古宇利島，道の駅 ゆいゆい国頭）への所要時間を，図-8に示す①通常ルート，②迂回路についてそれぞれ算出した。算出にあたっては，大型連休期間中の一般車プローブデータを活用した。

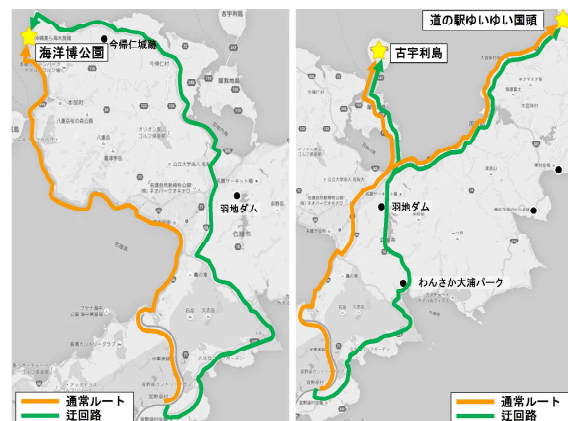


図-8 「①通常ルート」「②迂回路」の経路

c) 来場者インタビュー調査

表-3, 図-9で示すとおり, 来場者インタビューを実施した。なお, 今回の経路分散実証実験は, 横断幕や看板, 道路情報いずれも日本語のみの情報提供としたため, 本調査の対象については日本人のみとした。

表-3 来場者インタビュー調査概要

＜来場者インタビュー調査＞	
【手法】来場者へのインタビュー形式の聞き取り	
【日時】平成27年9月21日(祝) 10:00～17:00	
【場所】①海洋博公園 (203票回収)	
②古宇利島 (110票回収)	
③道の駅ゆいゆい国頭(102票回収)	



図-9 インタビュー調査風景

3. 効果計測結果

(1) 交通実態調査

交通実態調査を行った結果を以下に示す。

a) 流入経路の交通量バランス

本島北部地域への流入経路として, 国道58号と迂回路である国道329号の交通量バランスを時間帯別に確認した。流入経路が混雑していない朝の時間帯は国道58号の分担率が80%～90%と高いものの, 混雑が発生し始める9時頃から徐々に国道329号の分担率が上昇している。午後13時には, 国道329号の分担率が26%まで上がった。

これは, 事前に経路分散メニューを確認した人や, 当日, 沖縄自動車道の変換情報板やラジオ放送等により国道58号経由が混雑していることを認識した人などが, 国道329号へ経路変更を行った結果であると推察される。

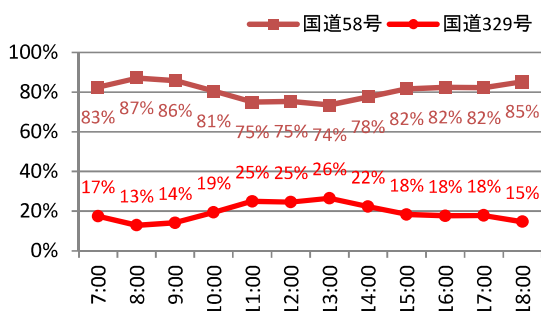


図-10 北部地域への経路分担率

b) 時間帯別渋滞状況

当日の道路混雑状況を図-11に示した。国道58号は9時から世富慶交差点を先頭に渋滞が発生し, 12時台には許田合流部を超えるまで渋滞が延伸(最大渋滞長7.6kmを観測)した。

また, 迂回路である国道329号松田北交差点では, 10時台までは渋滞が発生していなかったものの, 国道58号の渋滞がピークに近づく11時頃から渋滞が発生し始め, 12時には宜野座IC付近まで渋滞の延伸が確認された。(最大渋滞長4.5kmを観測)

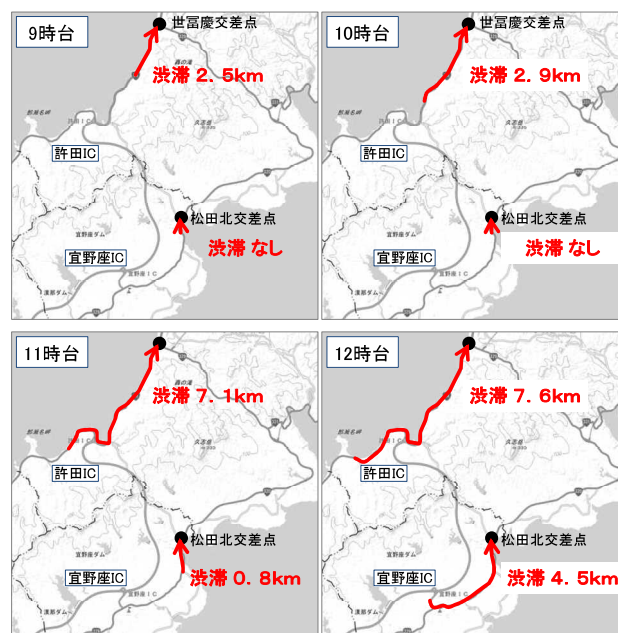


図-11 時間帯別渋滞状況

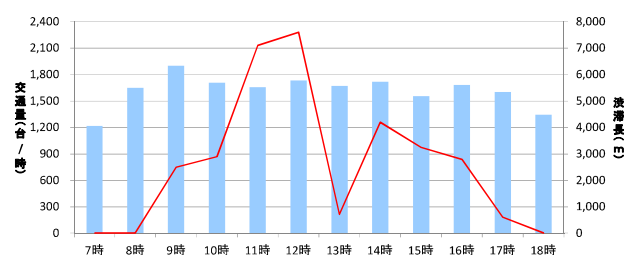


図-12 渋滞長調査結果(世富慶交差点: 許田側流入部)



図-13 左: 世富慶付近 右: 許田交差点の渋滞(喜瀬付近)

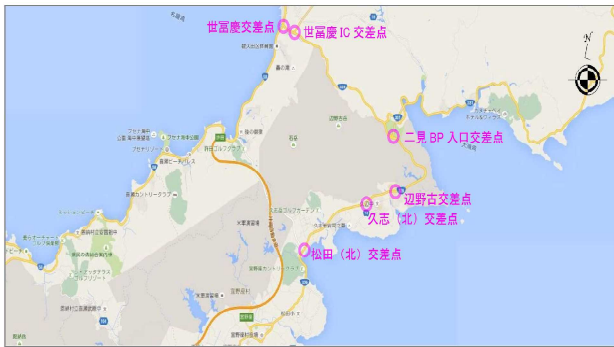


図-14 国道329号の信号交差点位置図



図-15 国道329号松田(北)交差点を先頭とした交通渋滞

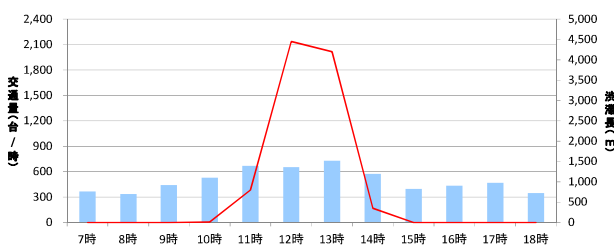


図-16 渋滞長調査結果(松田北交差点：金武町側流入部)

c) 沖縄自動車道

沖縄自動車道では、許田料金所を先頭に、9時台から14時台まで交通混雑が発生。料金所からのぼり方向（那覇向け）に、約1.2km程度の渋滞を確認した。

許田料金所の渋滞要因として、料金所の捌け交通量が小さいことが挙げられる。具体的には、ETC専用レーンが1レーン設けられているものの、ETC利用率が低い（アンケート調査結果で詳述）ことから、図-17 で示すとおり、ETC専用レーンがほとんど使われていない状況にあった。



図-17 ETCレーンの状況

d) レンタカー混入率

本島北部地域の主な流入経路である国道58号の交通量調査結果を元に、SWの時間帯別レンタカー混入率を確認した。その結果、交通量が増加し始める9時に32.1%と最も高く、その後12時台まで30%前後を推移し、13時以降徐々に混入率が低下し始めている。前述した特に渋滞が延伸している時間帯とレンタカー混入率が高い時間帯は概ね整合することがわかる。



図-18 流入交通量及びレンタカー混入率(世富慶交差点)

(2) プローブデータによる所要時間測定

次に、各地点で設定した各々のルートで所要時間の計測を行った。海洋博公園へのルート（宜野座IC⇒海洋博公園）では、混雑前の7時台では、通常ルートが迂回路に比べ約15分強早いのに対し、混雑する12時台では、通常ルートが最も遅く迂回路より約5分強長くなっている。

古宇利島、道の駅ゆいゆい国頭については、非混雑時は通常ルートが最短でそれぞれ33分、45分であるのに対し、混雑時は迂回路が最短となりそれぞれ52分、62分となっている。

今回設定した3地点のいずれのルートでも、混雑時の所要時間自体は通常ルートに比べて迂回路が短い結果となった。

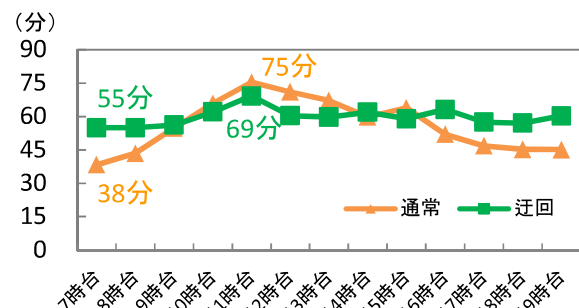


図-19 海洋博公園へのアクセス経路別所要時間

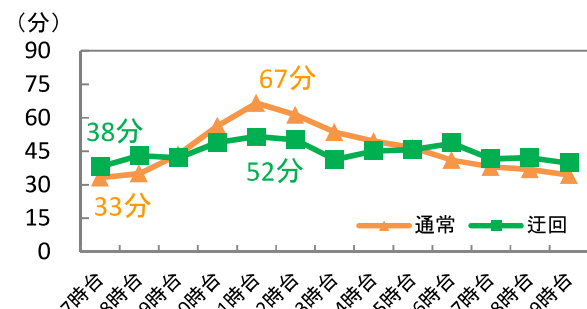


図-20 古宇利島へのアクセス経路別所要時間

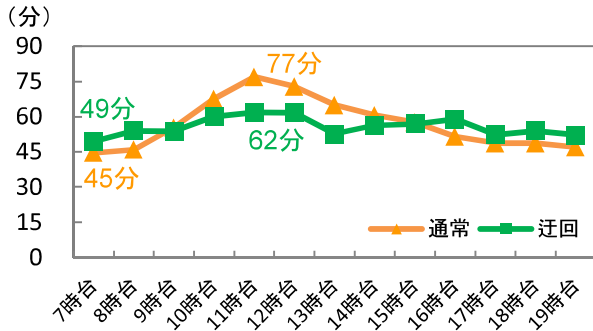


図-21 道の駅へのアクセス経路別所要時間

(3) 来場者アンケート

来場者アンケートは、3地点の合計として415サンプルの回答を得た（海洋博公園203票、古宇利島110票、道の駅ゆいゆい国頭102票）。

a) 回答者属性

性別、年齢ともに大きな偏りなくサンプルを収集した。また、県外客が4割強を占めており、これまで実施した海洋博花火大会における経路分散実証実験のターゲットが変わることを確認した。

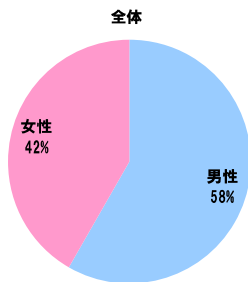


図-22 性別

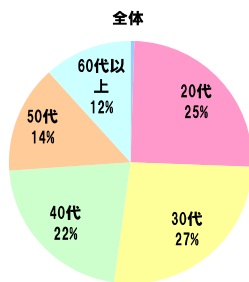


図-23 年齢

また、県内客の8割以上は中部以南から北部地域に訪している。

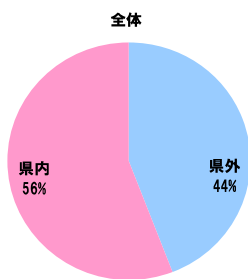


図-24 県内外の割合

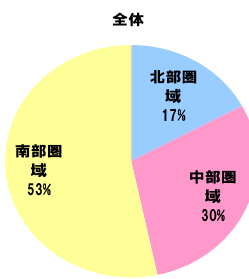


図-25 県内居住地

b) 認知した情報媒体

観光客が本島北部地域に訪れる際に認知した情報媒体を確認した結果を図-26に示す。来場客の約4分の3が情報媒体を認知（確認）しており、情報媒体を確認した人の約2割は本社会実験にて提供した情報媒体（以下、経路分散メニュー）を活用していることが確認すること

ができた。経路分散メニューの中でも、特に高速道路本線上に設置した横断幕や立て看板、ラジオ放送等の認知度が高かった。

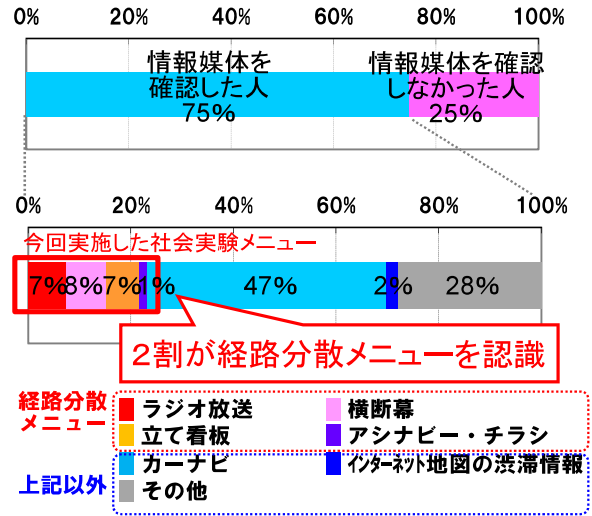


図-26 情報媒体の利用状況

c) 迂回経路の利用状況

迂回経路の利用状況について、経路分散メニューを認知したかどうかについてクロス集計を行い、その結果を図-27に示す。経路分散メニューを確認した人の約2割が国道329号の迂回路を利用している一方で、経路分散メニューを確認しなかった人は約1割の迂回路利用にとどまった。

これは、提供した経路分散メニューが迂回路への誘導に一定程度寄与したことを表すとともに、迂回路があることを認識しつつも、混雑しているルートを選択していることを示している。これらの理由として、迂回路を選択することによりどの程度のメリットがあるかわからない、といったことや、国道58号海沿いの景観や道の駅許田などを目的の一つとしていることが推察される。



図-27 迂回経路（R329）に転換した人の割合

d) ETC利用状況

最後に、前述した沖縄自動車道許田料金所を先頭とした渋滞が発生する理由を確認するため、ETC利用状況を集計した。その結果、図-28に示すとおり、県外客の約6割、県内客の約8割はETCを利用しておらず、利用しない理由として県外客の約4割が「ETCカードは持っているが今日は持ってきていない」と回答している。つまり、

自家用車にETCカードを差し込んだままになっており、観光地での必要性を認識していなかった等の理由により混雑に巻き込まれた可能性も想定される。

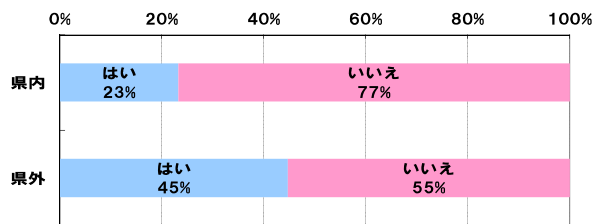


図-28 ETCの利用有無

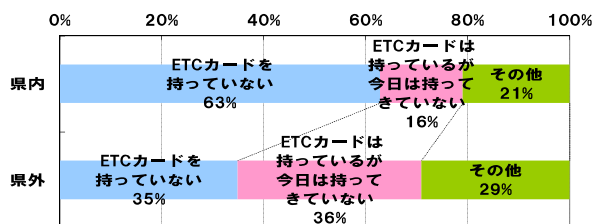


図-29 ETCを利用しない理由

そのため、特に混雑が集中する大型連休（GW等）は、空いている朝の早い時間に北部地域に到着するなど、時間の分散を図ることが必要となる。

d) 目的地の分散

知名度の高い美ら海水族館や古宇利島に観光客が集中するが、均衡ある観光活性化のため、積極的に東村等、北部東海岸の情報を提供していき、目的地の分散を図ることも必要。

e) 外国人への対応

台湾等のアジア圏を中心に増える外国人観光も、レンタカーで移動を行っている。彼らへの情報提供を見据え、今後は案内の多言語化も必要。

以上

4. まとめと今後の課題

今回の実証実験のまとめと今後の課題について以下に示す。

(1) まとめ

今回の実証実験においては、提供した横断幕や立て看板等の経路分散メニューは一定程度認知され、交通情報としての利活用が確認できた。また、通常のアクセス経路よりも案内した迂回路がピーク時には早く到着できることも確認できた。ただし、大型連休は交通需要が交通容量を超過しており、迂回路でも混雑が発生するなど、対応が必要な事項も明らかになった。

(2) 今後の課題

取り組み結果を受け、以下が今後の課題と考えられる。

a) 国道329号の交通容量の拡大（迂回路の交通円滑化）

迂回路では交通需要と信号現示のアンバランス（交通量が少ない従道路側に余分な青現示が設定）が想定される。そのため、大型連休時には迂回路となる国道329号の信号青時間を拡大し、より円滑に北部地域にアクセスできる道路環境を整えることが必要である。

b) ETC利用率の向上（許田料金所の混雑緩和施策）

県外客はETCカードを保有しているものの、観光に携帯していないためETC利用率が低く、その結果許田料金所の渋滞が発生している。旅行代理店や宿泊予約サイトなどを通じ、県外からの観光客にETCカードを携帯することを呼びかけることも必要である。

c) 時間の分散

大型連休においては、北部地域へのアクセスピーク時間帯（正午前後の時間帯）は迂回路も混雑が発生する。

那覇空港滑走路増設事業におけるサンゴの保全について

沖縄総合事務局開発建設部空港整備課 上地杏奈

1. はじめに

那覇空港滑走路増設事業（以降、本事業）は、平成26年2月25日に工事着手し、平成29年1月現在、護岸工事及び埋立工事を鋭意進めている。本事業は那覇空港の沖合に約160haの埋立地を造成し、既存の滑走路から1310m離して整備される。（図-1）

本事業により改変される海域には、保全しなければならない海域生物が多数あり、その中にはサンゴも含まれている。本事業を実施するにあたり、環境影響評価法に基づき実施した「那覇空港滑走路増設事業に係る環境影響評価書」の中で、サンゴ類は移植により保全を図ることと位置づけている。

サンゴ移植法には大きく分けて2種類の方法がある。天然海域からサンゴ群体や断片を利用する「無性生殖法」と、卵や幼生を利用する「有性生殖法」である。

本事業により消失するサンゴに関しては平成25、26年度に無性生殖法による移植・移築を行った。また補完的に有性生殖法により試験的にサンゴ幼生を着床させて育生し、実海域へ移植をする有性生殖移植も実施している。

本稿では、これまでの移植によるサンゴ保全の取り組みの結果と今後の課題について報告する。

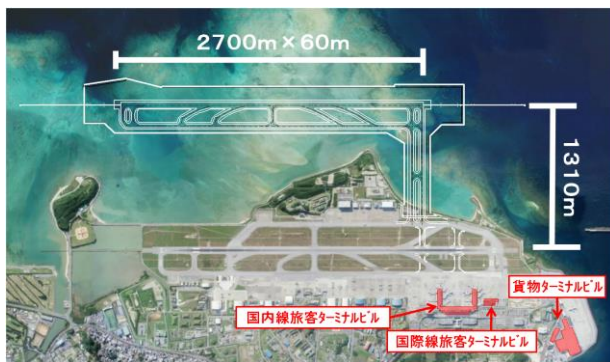


図-1 事業概要

2. 無性生殖法によるサンゴ移植

(1) 移植の実施

本事業により消失するサンゴ類を可能な限り改変区域外へ移植するという方針のもと、平成25、26年度に

表-1に示すように大規模な代替措置を講じた。

移植・移築するサンゴの選定基準は、原則的に被度10%以上のエリアに生息するサンゴ類を移植対象とし、成長に時間を要する直径1m以上の大型ハマサンゴ類を移築対象とした。

移植元と移植先の概略位置を図-2に示す。移植先については、サンゴ群集の分布特性やサンゴ類の詳細な生息状況及び食害生物、病気を把握した上で選定した。

表-1 無性生殖法による移植実績

種類	手法	対象	移植実績
小型サンゴ	小型サンゴ片の固定による移植	ミドリイシ属等	19,506群体
		アオサンゴ等	17,176群体
		ショウガサンゴ等	242群体
大型サンゴ	移築工事	大型塊状ハマサンゴ	37群体
枝状サンゴ群集	サンゴ群集移植法	ユビエタハマサンゴ等	1042.1㎡

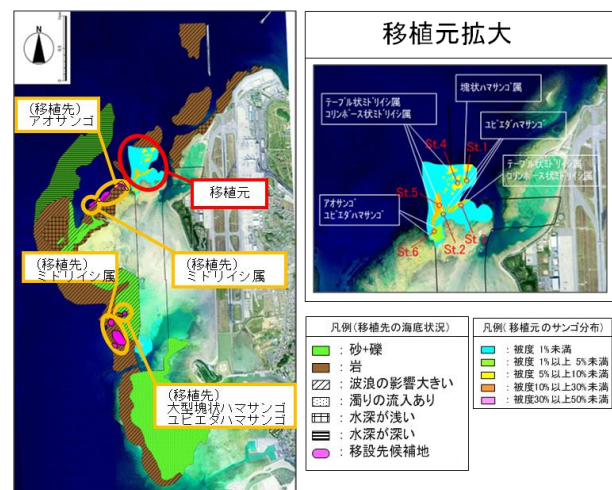


図-2 移植元と移植先の概略位置

(2) 移植サンゴ産卵確認調査

平成27年12月、沖縄科学技術大学院大学（OIST）マリンゲノミクスユニットの新里宙也研究員らにより、沖縄周辺海域では海流による幼生の供給はあまりみられないとする研究結果が発表された。琉球列島各地で採集したサンゴのゲノム（遺伝情報）を解読した結果、従来考えられていたよりもサンゴは広く分散しておらず、沖縄周辺では海域ごとのサンゴ保護が求められることが示唆された¹⁾。

この研究結果を受け、本事業により移植したサンゴ

キーワード サンゴ移植、有性生殖移植、移植サンゴの産卵

連絡先 〒900-0006 沖縄県那覇市おもろまち 2-1-1 沖縄総合事務局開発建設部空港整備課

E-mail : uechi712-anna@ogh.cao.jp

について産卵していることが確認できれば、移植事業が空港周辺海域におけるサンゴ群集の維持に寄与していることにつながり、このことについても確認する必要があると考えられた。そのため、平成28年度に移植サンゴの産卵確認調査を実施した。

調査対象は一斉産卵を行うミドリイシ属とし、図-3に示す2点5カ所に定点カメラを設置し、インターバル撮影（10分間隔）を行った。調査期間はミドリイシ属が産卵すると想定される5～6月の1ヶ月間とした。

調査の結果、5月28日と6月11日の深夜にミドリイシ属のサンゴの産卵を確認した。（図-4）

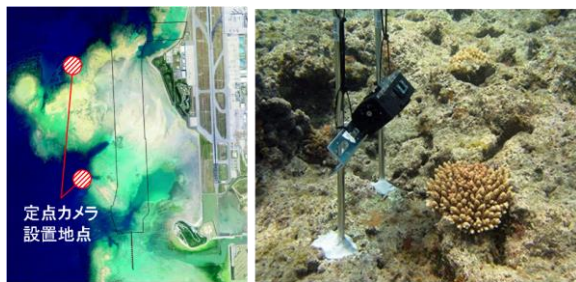


図-3 定点カメラの設置状況



図-4 移植サンゴの産卵状況（平成 28 年 6 月 11 日）

3. 有性生殖法に係る移植試験

有性生殖移植法とは、サンゴの産卵に合わせて海域に着床具を設置し、サンゴの卵を着床具に着床させた後、海域の中間育成場にて着床具のまま1～2年育成させて海底に移植する方法である。（図-5）

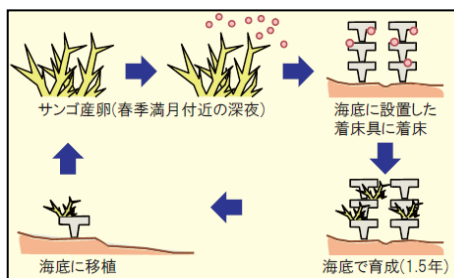


図-5 有性生殖法による移植の流れ

(1) 着床具の設置

有性生殖法では、着床具にサンゴの卵や幼生がまとまって着床することが重要である。サンゴの幼生が着床する可能性が高く、着床具の設置場所に適した地点を選定するため、平成26年度に稚サンゴの加入状況等を調査した。

調査地点を図-6に示す。空港周辺海域における比較的高被度のサンゴ群集は、潮通しがよく、波高が高い礁縁部に分布していたため、これらの条件にあてはまる St.1～St.8を調査地点として選定した。

調査結果を図-7に示す。8地点のうち、空港周辺海域の主な構成種であるミドリイシ属の稚サンゴが多く確認されたのは、St.2, 4, 5, 7の浅所と、St.1, 2, 7の深所であった。また、空港周辺海域で局所的に高被度群集を形成するアオサンゴ属の稚サンゴが多く確認されたのは St.4, 5の深所であった。

この結果をもとに、図-6の赤枠で示す5地点に平成26年度は6,480個、平成27年度は4,860個の着床具を設置した。（図-8、図-9）

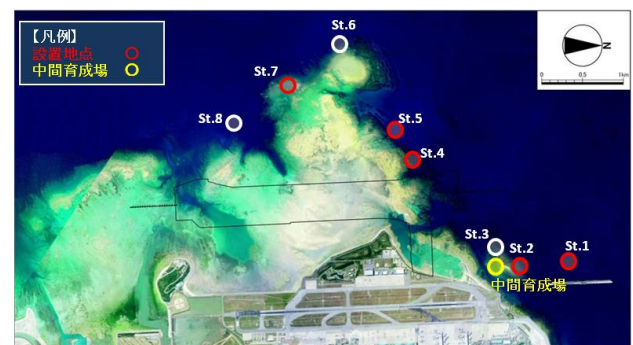


図-6 稚サンゴ加入状況調査地点

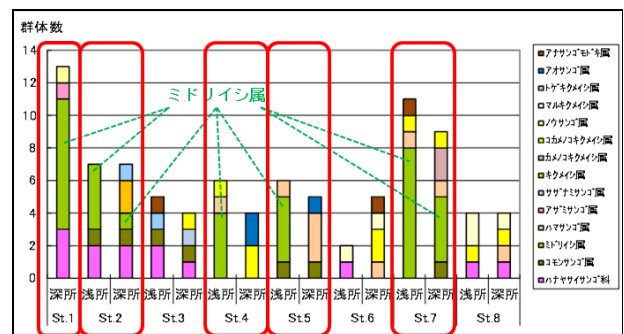


図-7 稚サンゴ加入状況調査の結果

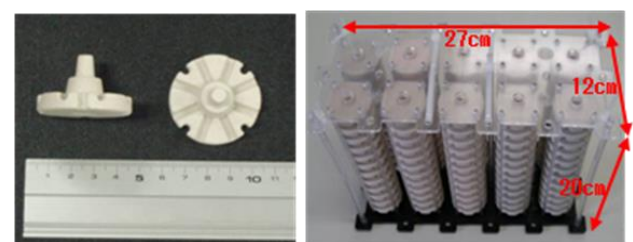


図-8 （左）：着床具（セラミック製），
（右）：着床ケース（1ケース 120個）

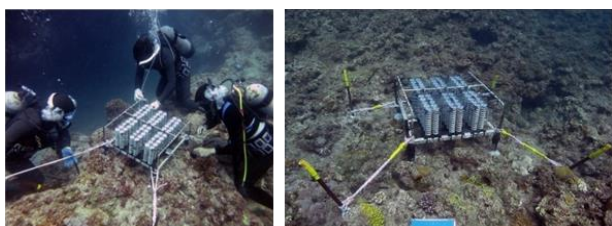


図9 着床具設置状況

(2) サンプルング調査

サンゴの産卵を確認後、サンゴ幼生の着床状況を把握するため、設置した着床具の一部を抽出し、着床したサンゴの種類や群体数等を確認するサンプルング調査を実施した。（図-10）

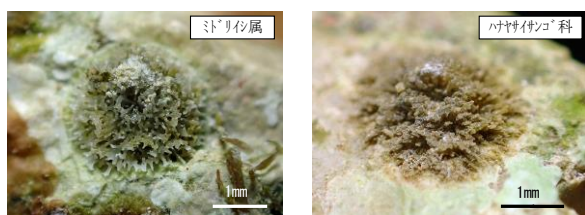


図-10 着床が確認されたサンゴ類の例

平成26年度と平成27年度に設置した着床具についてのサンプルング調査の結果を表-2に示す。

平成26年度に設置した6,480個のうち、各地点から合計1,620個の着床具を抽出し、サンプルング調査をした。サンゴの着床が確認された着床具は1,620個中169個で、合計191群体の着床が確認された。全体採苗率は10%であった。地点別にみると、最小採苗率はSt.1深所で3%、最大採苗率はSt.2浅所で20%であった。一方、平成27年度に設置した4,860個の着床具については、各地点から合計1,620個を抽出し、うち364個、合計483群体のサンゴの着床が確認された。全体採苗率は22%であった。地点別にみると、最小採苗率はSt.5浅所の11%、最大採苗率はSt.7浅所の41%であった。

サンプルング結果の比較より、平成27年度は全ての地点で着床群体数、採苗率ともに平成26年度を上回っていた。着床したサンゴの種類をみると、平成27年度のミドリイシ属の着床群体数が平成26年度に比べ増加していたが、その他の種類の着床群体数に大きな変化は見られなかった。したがって、平成27年度と平成26年度の着床状況の変化にはミドリイシ属の着床が関与しており、その結果が着床場所や着床群体数の変化につながったと考えられる。

ミドリイシ属の着床数の増加については、ミドリイシ属は一斉産卵する種類であり、産卵期の気象海象条件が着床状況に大きく影響していると考え、産卵期の

風向きを比較した。図-12に示すように、平成26年度の産卵期の風向きはばらつきがみられたのに対し、平成27年度の産卵期は南西寄りの風向きで安定していた。

この結果より、空港周辺海域においては、産卵期の風向きが安定すると、その年のサンゴの着床状況は良好になる可能性が示唆された。

表-2 サンプルング調査結果概要

地点		着床具数		着床群体数		採苗数		採苗率	
		H26	H27	H26	H27	H26	H27	H26	H27
St.1	深所	180	180	8	71	6	57	3	32
St.2	浅所	180	180	40	47	36	44	20	24
	深所	180	180	36	69	31	51	17	28
St.4	浅所	180	180	16	36	15	25	8	14
	深所	180	180	16	43	14	38	8	21
St.5	浅所	180	180	16	20	16	19	9	11
	深所	180	180	21	29	16	21	9	12
St.7	浅所	180	180	22	115	21	73	12	41
	深所	180	180	16	53	14	36	8	20
全体		1620	1620	191	483	169	364	10	22

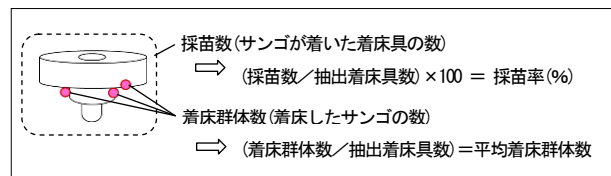


図-11 採苗数と着床群体数の考え方

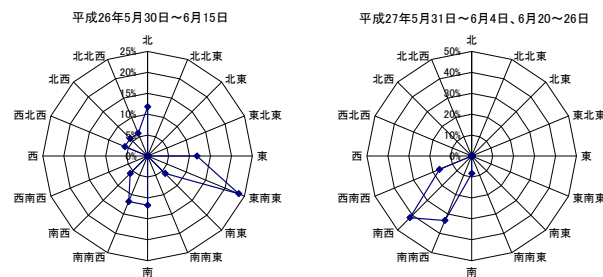


図-12 空港周辺海域のミドリイシ属の産卵期の風配図（左：平成26年度、右：平成27年度）

(3) サンゴの中間育成

サンプルング調査に用いた着床具以外については、図-6の黄色枠で示す中間育成場へ移設し、海底に移植可能となるまで育成する。移設した着床具は図-13に示すように、パイプを組み立てた育成枠に取り付け、育成状況を確認するために冬季と夏季にサンプルング調査を実施する。

中間育成場は地理的に波浪の影響を受けにくいと想定される場所を選定した。

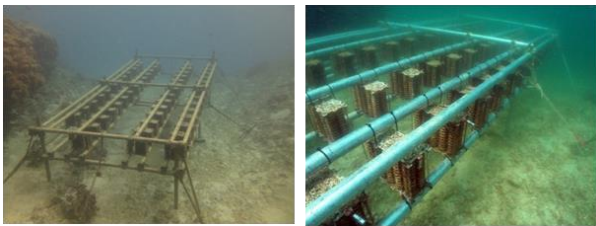


図-13 中間育成場状況

(4) 成育サンゴの移植計画

平成26年度に設置した着床具については、サンゴ幼生の着床から1年半以上が経過して成育が確認された149個を平成28年6月に海底に移植した。(図-14)

平成27年度以降に設置した着床具についても、現在中間育成場にて成育状況を調査しており、表-3に示すように随時移植を行う計画としている。



図-14 有性生殖法により海底に移植したサンゴ

表-3 有性生殖法の移植計画

項目	調査年次	H26			H27			H28			H29			H30			H31		
		春	夏	冬	春	夏	冬	春	夏	冬	春	夏	冬	春	夏	冬	春	夏	冬
平成26年度設置	着床具(着床具の設置)																		
	中間育成																		
	サンプリング																		
	有性生殖移植(実海域への移植)																		
平成27年度設置	着床具(着床具の設置)																		
	中間育成																		
	サンプリング																		
	有性生殖移植(実海域への移植)																		
平成28年度設置	着床具(着床具の設置)																		
	中間育成																		
	サンプリング																		
	有性生殖移植(実海域への移植)																		
平成29年度設置	着床具(着床具の設置)																		
	中間育成																		
	サンプリング																		
	有性生殖移植(実海域への移植)																		

(注) 青は調査完了を示す。

安定的にサンゴ幼生を採苗できるような着床具設置の検討等が必要である。また、平成28年度から有性生殖法によって成育したサンゴの海底移植を行っている。サンゴ保全へ向けて有性生殖移植が空港周辺海域においてどの程度寄与できるかについても調査、検討を進めていくこととする。

参考文献

- 1) Shinzato C, Mungpakdee S, Arakaki N, Satoh N. Genome-wide SNP analysis explains coral diversity and recovery in the Ryukyu Archipelago.(2015) Scientific Reports. 5:18211

4. まとめと今後の課題

無性生殖法により移植したサンゴについては、産卵が確認でき、空港周辺海域への幼生の供給とサンゴの再生産、サンゴ礁生態系の回復に寄与することが今後期待される。引き続き、モニタリング調査を行い、知見の集積に努めることとする。

有性生殖法については、当初那覇空港沖は効率的、安定的にサンゴ幼生を採苗することが難しい海域であると推察された。しかし、これまでの調査結果より、サンゴ幼生の加入状況については年変動が大きいことが明らかになったため、今後はこれを踏まえて効率的、

海上保安庁係留栈橋の整備について

内閣府 沖縄総合事務局 石垣港湾事務所 整備保全課
○瀬間 基広 大村 誠

石垣港が所在する石垣市の行政区には、尖閣諸島も含まれており、中国公船の領海侵犯が問題化している。そのため巡視船の増強により専従体制を図るとして、海上保安庁から沖縄総合事務局へ係留施設整備の依頼があった。

海上保安庁の巡視船専従体制の確立までに係留施設を整備する必要があり、タイトな工期、また、狭隘な水域、船舶が輻輳する厳しい現場条件下で施工を行った内容を報告する。

1. はじめに

石垣港は、日本最南端の重要港湾であり、本土から沖縄本島を経由し台湾まで繋がる定期航路や大型クルーズ船が多数入港する活気あふれる港である。また、周辺離島へ高速船が1日100便程度就航しており、地域住民の生活や経済活動に重要な役割を果たしている。

一方、尖閣を含む先島諸島における海上保安上の拠点としての重要性も高まっており、海上保安庁巡視船の増配備や、応援船の港湾利用が増加している。

本栈橋は、海上保安庁から委任を受け、巡視船専従体制の確立までに係留施設の整備を行ったものである。

2. 施設概要

施設は、石垣港（浜崎地区）に海上保安庁の巡視船（PL型：1,500GT）を係留する栈橋4バース（A～D）を、平成26年度から27年度までに整備するものである（図-1、図-2）。

施設配置詳細図を図-3に示す。なお、係留施設を構成する各施設は以下のとおりである。

①プラットフォーム（延長50m(25m×2)×幅15m、約80t/基）

船舶を接岸係留する機能および人の乗降、荷物の積降、車両の転回スペース等の機能を有する施設。

②係留ドルフィン（延長5m×幅10m、4基/バース）

船舶係留時の船首ならびに船尾の係留索を固定する機能を有する施設。



図-1 全体計画図

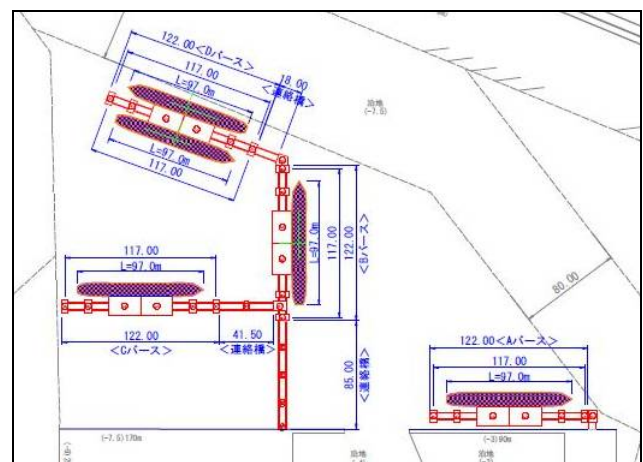


図-2 施設配置図

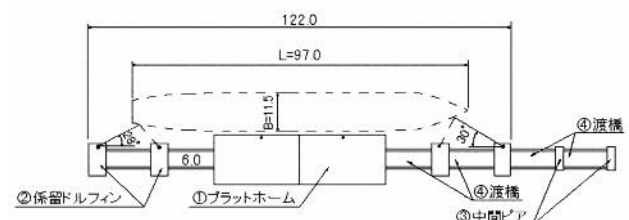


図-3 施設配置詳細図

キーワード 工期短縮、ジャケット、鋼管杭

連絡先 〒907-0012 沖縄県石垣市美崎町1-10 内閣府沖縄総合事務局石垣港湾事務所整備保全課

- ③中間ピア（延長2.5m×幅7m、異形部あり）
渡橋を支持する施設。施設延長に伴い適宜配置する。
- ④渡橋（延長5～13m×幅6m、PC歩廊桁）
人や車両の連絡通路としての機能を有する施設。

各バースに対して係留索の展張角度が30°程度の方向に展張可能となる位置に船首索用及び船尾索用の係留ドルフィンを設置し、プレストライン用の係留ドルフィンをプラットホームとの中間に配置する。スプリングラインは必要に応じてプラットホーム上の係船柱に係留するものとする。以上により、1バースに対して係留ドルフィンは船首側2施設、船尾側2施設の計4施設を配置するものとする。

プラットホーム部の構造形式については、海上保安庁が下記の3案について比較検討を行った。

①ドルフィン式

基礎は鋼管杭、上部工は鉄筋コンクリートの杭式横棧橋構造。基本的に作業は全て現地での作業となるため、短期間での施工には不向きとなる。

②ジャケット式

基礎鋼管杭と鋼管トラス鋼製上部工（ジャケット部）を一体化した構造。ジャケット部は工場製作。現地まで運搬し基礎鋼管杭に被せるように据付け、結合部にグラウト材を充填させ一体化させる。

③ポンツーン式

海水に接する外壁をプレストレスコンクリートとし、外壁を支える内部の骨組みを鋼部材とした複合

構造。ポンツーン部は工場製作。現地まで運搬して設置する。ローラーや可動橋等の可動部分については、上下動による繰り返し荷重が作用するため破損しやすく、定期的なメンテナンスおよび交換が必要となる。

比較検討の結果、プラットホーム部の構造形式はジャケット式を採用した。

ジャケット式構造の特徴として、現地海上作業と並行してジャケットを製作できること、現地作業が低減できることから工期短縮が図られる。一方で、あらかじめ打設された鋼管杭にはめ込む性質上厳しい精度管理が求められる。

3. 制約条件（施工上の課題）

(1) 工期

巡視船専従体制を確立するまでの約2年で整備する必要があったため前述のとおり、ジャケット式構造の採用により工期短縮を図った。

関係者と協議した上で各年度の工事発注区分を図-4のとおり設定した。平成26年度においては係留ドルフィン及び中間ピアの工事に並行してプラットホームのジャケット製作を行う。平成27年度においてはプラットホーム、渡橋、設備等の工事を行う。さらに狭隘な工事区域で、同時施工が可能な工区割として7件に分割して発注した。

実際の工事においては、後述する現場条件により

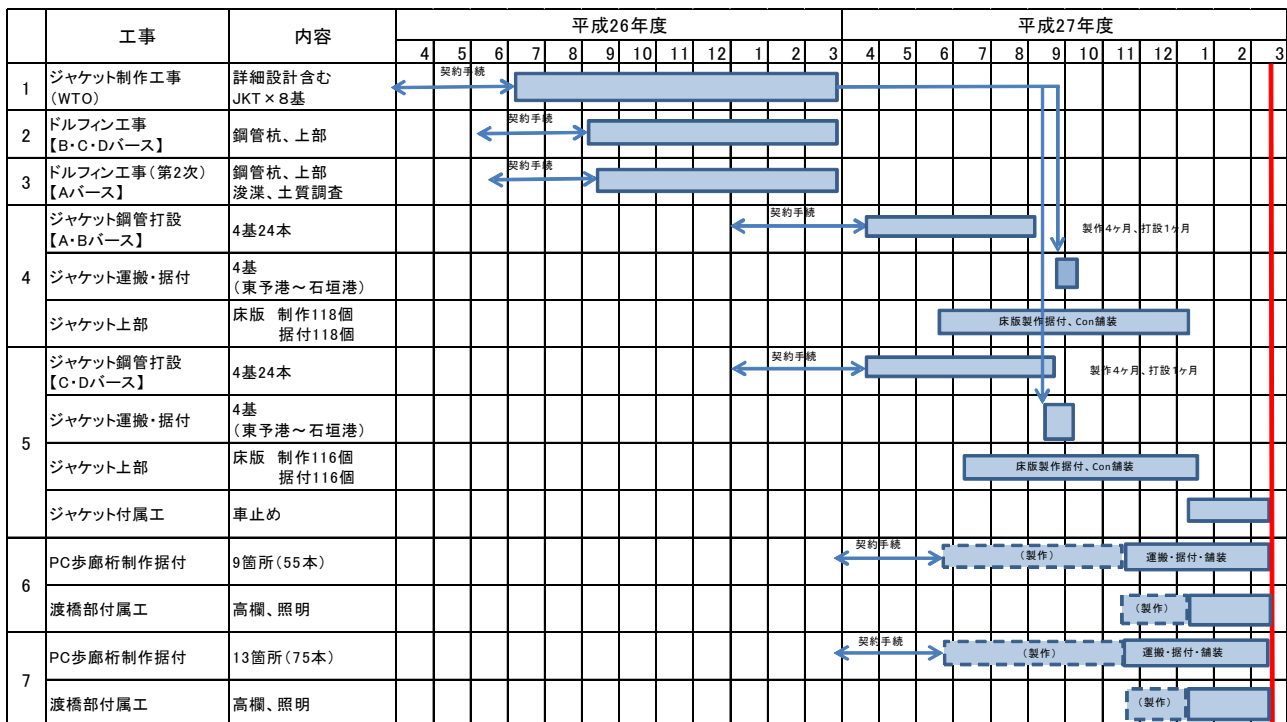


図4 工程計画

海上工事の時間帯が制約されたことから、さらにタイトな工期であった。

(2) 狭隘な水域、一般船舶への影響

工事区域は石垣漁港及び浜崎地区船だまりが近接していることから、漁船やプレジャーボートの航行に支障がないように狭隘な水域での施工が必要であった（図-5）。

さらに、工事区域は図-1のとおり、漁港、船だまりだけでなく国際物流ターミナルや離島ターミナルを利用する貨物船、クルーズ船、定期高速船等の一般船舶が航行する航路に隣接しており、安全管理に課題があった。

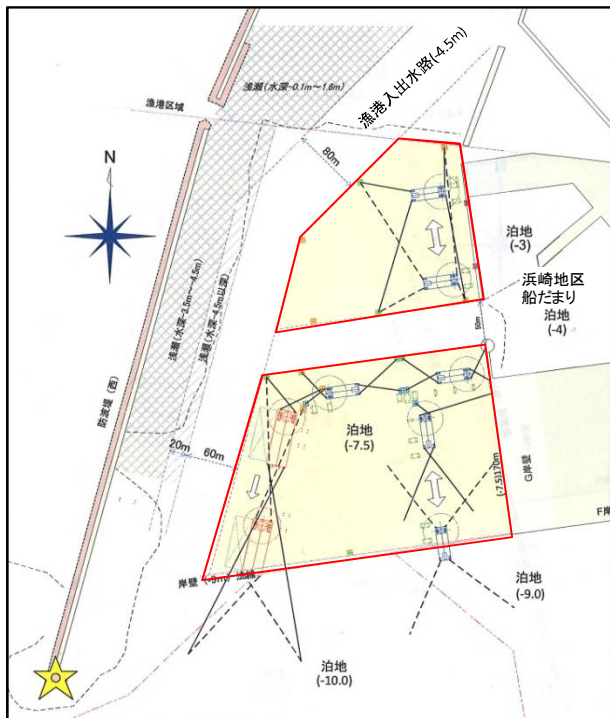


図-5 工事区域における作業船配置イメージ

向上した（図-8）。

ジャケット据付（120t）は、起重機船 500 t 吊で吊り上げ、打設済みの鋼管杭に、はめ込む作業であるが、GNSSを使用し据付位置の可視化を行ったことでスムーズな施工が可能となった（図-9）。



図-6 ジャケット製作



図-7 ジャケット運搬

4. 施工状況

(1) ジャケット製作・運搬

ジャケット製作は、沖縄県内に設備が無いことから四国（香川県）で工場製作（ジャケット L25m×W15m×H10m 8基（120t/基））した（図-6）。

ジャケットは愛媛県の東予港から積み出し石垣港まで6日をかけ1,400kmを回航した（図-7）。

(2) 鋼管杭打設・ジャケット据付

鋼管杭打設は起重機船 500 t 吊を使用し、打設精度を高めるため、導材を 2 重にする等の対策を行った結果、許容範囲の 50%以内を確保できた。それによりジャケット据付の施工性が上がり、工程や品質も



図-8 鋼管杭打設



図-9 ジャケット据付



図-10 床版据付



図-11 PC 歩廊桁工場製作

事から沖縄本島で工場製作し、船で石垣港まで運搬搬入した（図-11）。

PC 歩廊桁架設等の海上施工においては、狭隘な水域で工事が輻輳し、また一般船舶が航行する航路が隣接する厳しい施工条件下であったが、綿密な調整と一般船舶の輻輳する時間帯を避けることで工程管理、安全管理に影響なく施工することができた（図-12）。



図-12 PC 歩廊桁架設



図-13 係留施設完成状況

(3) 床版製作・据付

床版製作は、製作ヤードに均しコンクリートを打設し、個々の製作精度を向上させた。

床版据付は、緩衝・間隔保持材を使用することにより、作業効率を向上させた（図-10）。

(4) 渡橋工

PC 歩廊桁については、石垣島内に製作設備が無い

5. おわりに

早期供用が求められる中、ジャケット式構造の採用により約 2 年で 4 バースを完成させることができた（図-13）。

現地作業では、漁船やプレジャーボートの出入り口での作業であり、利用者との調整を密に行う必要があったが、事前説明や苦情への対応を真摯に行い、無事故、無災害で期間内に完成させることができた。

那覇空港滑走路増設における車載式レーザースキャナ測量を使用した埋立沈下管理手法について

前里 尚¹・田中 貴之¹⁺

¹那覇港湾・空港整備事務所 那覇空港新滑走路整備推進室 (〒901-0142 沖縄県那覇市鏡水344)

那覇空港増設滑走路は海上埋立空港であり、供用後に残留・不等沈下が予測される。従来の管理においては一般的な水準測量、沈下板計測および、巡回点検により実施されているが、供用中の空港は計測作業に時間的制約を受け、非効率ばかりか局所的な沈下等の発見が困難であるなど課題を抱えている。

そこで MMS (Mobile Mapping System; 車載式レーザースキャナ) を用いて広大な新滑走路用地の短時間・高精度の 3 次元情報取得を試み、空港沈下管理計測への適用性を検討した。

本論文では、MMS の精度検証ならびに MMS を検討する中で取得した計測データの特性を活かした**空港 MMS** の利活用事例を示す。

キーワード 那覇空港滑走路増設、埋立沈下管理、MMS、空港維持管理システム、空港空間3次元計測

1. 概要

那覇空港においては、将来の航空需要に適切に対応するとともに沖縄県の持続的振興発展に寄与するため、将来にわたり国内外航空ネットワークにおける拠点性が発揮できるよう現滑走路から1310m沖合に2本目の新滑走路(滑走路長2700m)の整備を行っている。

図-1 に位置図を示す。

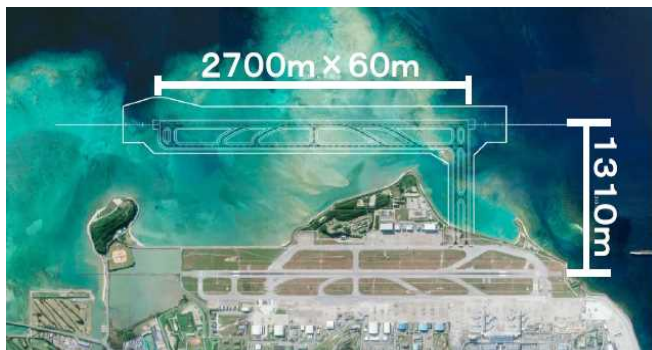


図-1 現滑走路と増設滑走路の位置図

那覇空港増設滑走路は海上埋立であり、供用後に残留・不等沈下が予測される。そのため沈下に起因する空港舗装(滑走路、誘導路、エプロン)空港用地、航空保安施設用地、付帯施設に対する要求性能への影響を適切に管理する必要がある。

新技術として MMS が開発されている。MMS とは、レーザースキャナ・GNSS/IMU(位置姿勢計測装置)・デジタルカメラを車両に搭載し、走行しながら周辺 3 次元情報(地形・地形形状・画像)を取得するシステムで、MMS を適用することで広大な新滑走路用地の 3 次元情報(XYZ)を短時間かつ広範囲に取得することが可能となる。本試みで

は、那覇空港増設滑走路における沈下管理計測を効率的かつ効果的に実施するための適用性について、既存滑走路等の MMS による計測試験を実施し、取得したレーザ点群データと既往の定期点検測量との誤差等について精度検証を実施した。また MMS 技術を検証する中で、取得した計測データの特性により、今後の空港の維持管理等に新たに適用可能と思われる**空港 MMS** の利活用事例案を示す。

2. MMS の概要

MMS(モビルマッピングシステム)とは、GPS(全球測位システム)により正確に自車両の位置を求めるとともに、IMU(慣性計測装置)を利用した姿勢計算と車両などに搭載したセンサーで計測したレーザデータ/カメラ画像から、車体の揺れや路面の傾斜に関わらず取得したレーザ点群データに高精度の 3 次元公共座標を与えるシステムである。そして 3 次元レーザ点群データと画像データの正確な融合を実現し、空港空間情報を的確に把握するものである(図-2、図-3)。



図-2 計測車両(三菱製 MMS-X500ZL)

3. 現状と課題

那覇空港増設滑走路の沈下検討の結果、埋立に伴う沈

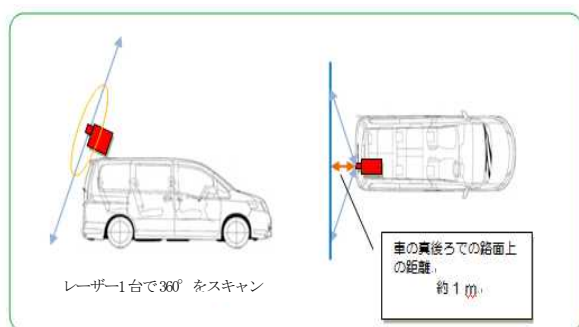


図-3 レーザー照射範囲

表-1 使用機材の諸元

名称	MMS-X500ZL
計測車両メーカー	三菱電機（株）
レーザー機種	Z+F 社 Profiler9012
レーザー台数	1 台
レーザー搭載方法	鉛直 60°
レーザースキャン頻度	200Hz
レーザー発射頻度	1,016KHz
レーザー測定精度	±2mm
点群密度	2000 点/m ²
計測距離	118m（実効）

下量は 70cm 程度であり、そのうち最大 30cm 程度は供用後の残留沈下として見込まれている。沈下に起因して起こる問題としては基本施設及び空港用地における縦横断勾配の変化、舗装のひび割れ、わだち掘れ等が挙げられる。その結果、規定勾配の逸脱が生じれば航空機の運用が不能となることから、定期的に管理する必要がある。従来これらの管理は一般的な水準測量による縦横断測量、沈下板による沈下計測と巡回点検からなる目視点検の組み合わせで実施されている。これまでの測量方法についての課題を以下に挙げる。

課題① 水準測量による管理では規定測線上の縦横断による 2 次元管理及び沈下板による点管理であり、観測地点外の局所的な沈下等が発生した場合に発見が遅くなる可能性がある。また目視点検では僅少な勾配変化など定量的な判断が難しい。

課題② 那覇空港増設滑走路用地は約 153ha と広大であり、制限が厳しい制限区域内において航空機の運用時間外で実施するため、従来の測量作業では多くの計測日数と労力を要する。

4. MMS による沈下管理検討

供用開始以降の沈下管理に関して、MMS の活用の有効性とその適用性について現滑走路を対象として検討を実施した。

(1) 那覇空港 MMS データの取得

MMS 計測にて取得する 3 次元データと既往の定期点検測量データの精度を比較するため、那覇空港において MMS データを取得した(図-4)。取得した点群データを図-5 に示す。

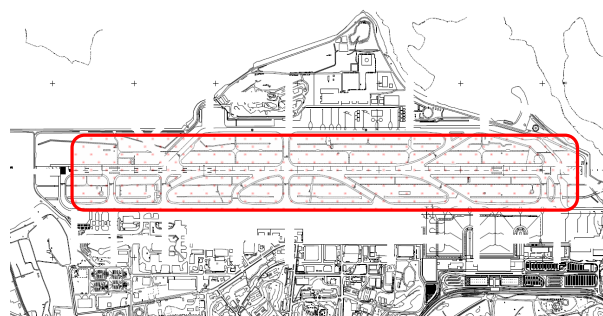


図-4 那覇空港 MMS データ取得範囲

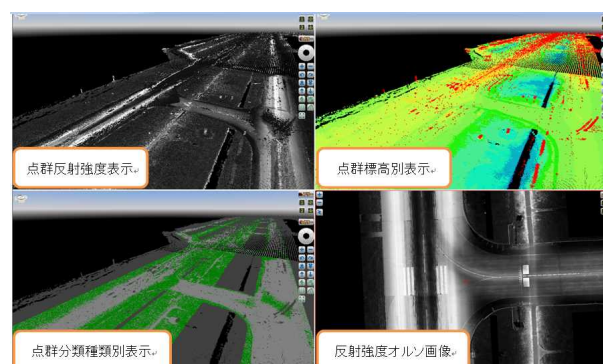


図-5 那覇空港 MMS 点群データ表示

(2) MMS による課題

那覇空港滑走路を対象に MMS 計測データと定期点検測量データを縦断図により比較した。その結果 MMS 単独による測量値が、一般的に高さ方向の誤差が 5cm 程度となった(図-6)。供用後の残留沈下量 30cm に対してその割合は大きく、3 級水準測量で設けた標定点を同時に計測・補正することで誤差消失を試みた。

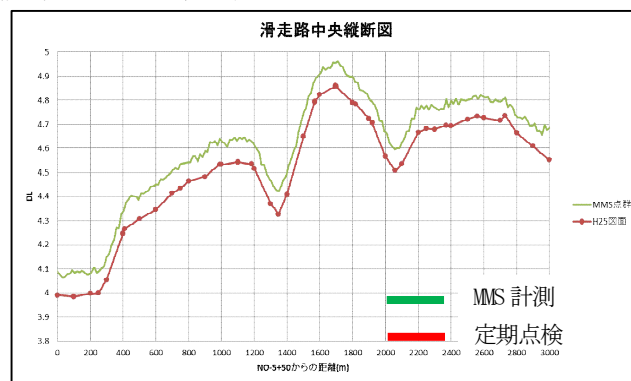


図-6 MMS 計測結果と定期点検測量の対比

(3) MMS の課題解決と精度確保の検討

MMS の精度を向上するための標定点の設置箇所数及び位置について検討した。

具体的検討内容は以下のとおりである。

① 標定点の数量による誤差の比較

標定点の使用点数による検証のため、滑走路を対象に

H25 年定期点検測量成果と MMS の差分及び RMS 誤差の比較を行った。使用した点数及び点番号は図-7 の通りである。なお最大差分は絶対値で算出した。

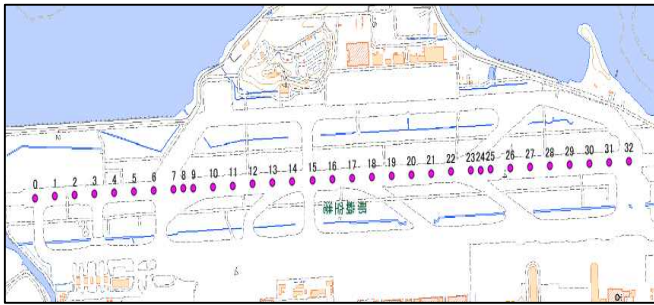


図-7 滑走路における標定点の位置

標定点数量検討の結果、図-8 に示すとおり 1 点使用することで RMS 誤差は大幅に小さくなるが、MMS と H25 年成果の差分の数値にばらつきがあるため、1 点のみの使用では誤差は押えられない。よって RMS 誤差が安定的に小さくなり、かつ可能な限り少ない点数という条件から、両端と中央の 3 点を使用すれば RMS 誤差を 1cm 程度に抑えることができると考える。

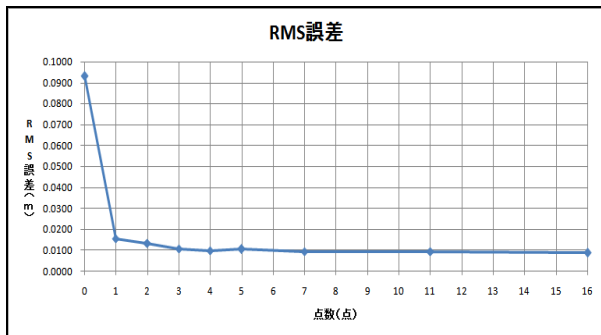


図-8 標定点数と RMS 誤差の関係

②滑走路縦断方向での MMS 補正

MMS データと定期点検測量を比較した結果、高さ方向の一定のズレが確認できたため、標定点の高さは同じと仮定して、MMS 計測データの補正を行った(図-9)。差分の最大値、最小値(ともに絶対値)及び、RMS 誤差は表-2 の通りとなった。RMS 誤差は H25 年成果を真値とする場合の誤差を示す。MMS-H25 年を δ 、比較箇所数を n とすると、RMS 誤差は以下の式となる。

$$\text{RMS 誤差} = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}}$$

表-2 滑走路縦断 調整前後の比較

	最大値 (m)	最小値 (m)	RMS 誤 差 (m)	高さ移動 量 (m)
調整前	0.093	0.066	0.093	-0.080
調整後	0.016	0.000	0.010	

③滑走路横断方向での MMS 補正

滑走路横断方向については、RWY36 から RWY18 に向かう方向で起点から 3 箇所を抽出し検証した。MMS データと定期点検測量を比較した結果、滑走路同様高さ方向への一定のズレ及び回転が確認されたため、中央の高さは同

じと仮定して、MMS データを高さ方向及び回転の調整を行った。それぞれの調整後の結果を表-3 に示す。

滑走路における横断図を補正した結果、1,500 m 地点の横断位置で最大 2.1cm の RMS 誤差が生じた結果となった(図-10)。

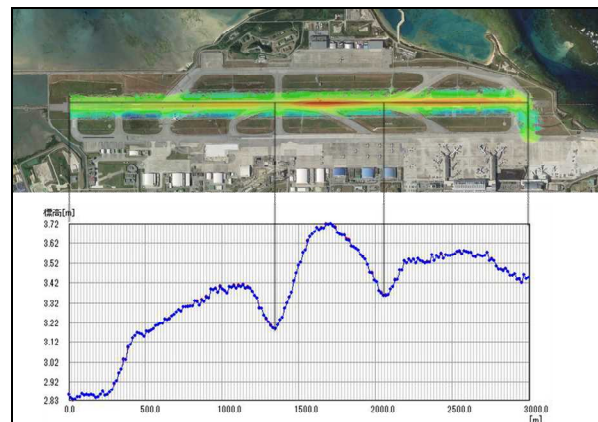


図-9 滑走路縦断補正後

表-3 滑走路横断 調整結果

箇所	調整前 RMS 誤差 (m)	調整後 RMS 誤差 (m)	高さ調 整量 (m)	回転調整量
0m 地点	0.063	0.011	-0.031	0.190° 反時計まわり
1,500m 地点	0.116	0.021	-0.085	0.150° 反時計まわり
3,000m 地点	0.095	0.014	-0.064	0.204° 反時計まわり

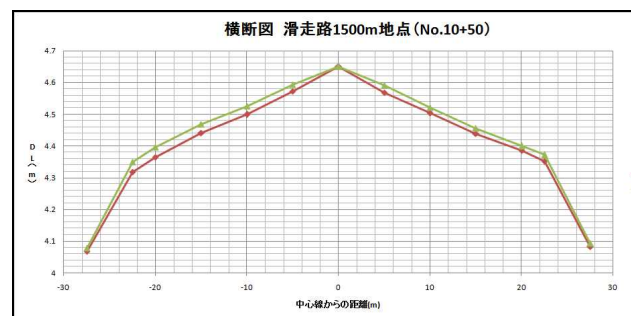


図-10 滑走路横断補正後

④MMS 精度検証結果

空港土木設計・測量・地質土質調査共通仕様書の「縦断測量の往復差及び閉合差」との比較を実施した。S を片道の観測距離(km)とすると、許容精度は以下の通りである(表-4)。

表-4 横断測量の精度

	精度	S=3km の場合の許 容精度 (cm)
3 級水準測量	10mm $\sqrt{S}$	1.73
4 級水準測量	20mm $\sqrt{S}$	3.46

滑走路長が 3km とすると、4 級水準測量の許容精度は 3.46cm となる。MMS 検証による定期点検測量結果との RMS 誤差が最大差分 2.3cm であり 4 級水準程度の精度が確保

できる結果となった。

(4) MMS の優位性について

MMS の検証結果により、MMS による有意性は以下のとおりである。

① 計測スピードの速さ

MMS は時速 40km で走行しながら半径約 150m の 3 次元計測が可能で、作業時間が限られる制限区域内で迅速かつ効率的に地形物の計測が可能である。

現空港での計測の実績より増設滑走路島全体 153ha の計測に要する時間は 2 時間程度である。

② 点群データの密度

MMS で計測した点群データは最大で 1m² 当り 2000 点の取得が可能で、その点群データには全て XYZ 値が与えられており、通常の水準測量で取得できる線的数据に比べてデータ量が膨大である。

③ 任意点の縦横断計測が可能

MMS 3 次元データにより、任意の点の縦横断計測及び面積、体積の算出が容易である。

④ 計測環境が容易

MMS は雨天以外、昼夜間での計測が可能である。

⑤ 計測データによる舗装状況の評価が可能

MMS は取得した 3 次元データより、わだち掘れ、平坦性を解析が可能である。

⑥ 地表状況が即時確認可能

MMS データにより、空港における任意の必要点を机上で計測することが可能となり現場作業が不要となる。

⑦ 計測データのアウトプット

MMS データを CAD データとしてアウトプットすることができ発注図等への提供が可能である。

(5) MMS による沈下管理への適用性について

MMS データと既往測量データによる精度検証の結果、ほぼ全体が 4 級水準測量を満たすに十分な精度を有することが証明された。一部では許容精度を超える結果となったが、その対策は今後の課題である、しかし MMS は 3 次元の膨大な点群データにより、従来の測量技術では不可能であった空港全体の 3 次元管理による空間把握を可能とする。MMS を主とし、従来の測量を従とした手法で空間形状の変化を高精度に計測することが可能となり、那覇空港増設滑走路における沈下計測の精度向上、及び『今後の効率的な維持管理に寄与できる』と考える。増設滑走路における計測結果イメージを図-11 に示す。

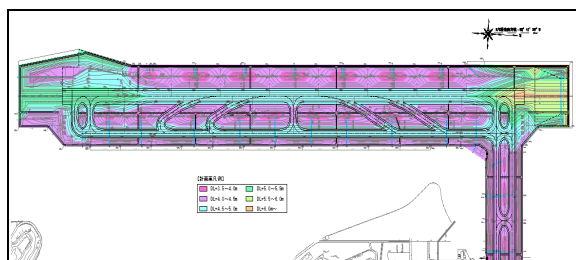


図-11 MMS 計測コンター図

5. MMS 計測結果の利活用について

空港 MMS の適用を検討する中で、得られた 3 次元データを SIM 環境に取り込むなどから、従来の測量結果との整合性を保つことが可能となり、MMS 計測データの長所を活かした多様な利活用への可能性が明らかになってきた。以下に MMS 計測データの利活用事例を示す。

① 空港 MMS を利用した空港安全管理

MMS の膨大な 3 次元データを SIM のデータベース化することで机上での任意の位置、任意の縦横断を計測することが可能になる。その結果空港制限区域内工事における工事車両等の制限表面への支障の有無、建築限界の支障の有無、見通し確認などが可能となり、航空機運航に関する安全性向上と省力化に期待できる。

② MMS データの災害時の活用について

大規模災害発生時には那覇空港は救急救命活動や緊急物資等輸送の拠点として役割を求められており、発生後は早期復旧のため空港機能を回復する必要がある。したがって、地震や津波の後に空港施設（滑走路等基本施設、着陸帯等空港用地、付帯施設等護岸）の性能を確認し、異常箇所を早期発見することが重要である。増設滑走路新設時の空港施設全体の初期値は定期 MMS で得た 3 次元データを用いる。災害時には被災後に得た航空レーザー測量結果と MMS 結果の融合による広域 3 次元データと MMS 初期値との比較の中で異常箇所を抽出し、早期復旧のツールとして期待できる。

③ 空港維持管理での活用

MMS 計測データの長所は空港維持管理において様々な利活用が可能と思われる、反射強度オルソ画像（図-12、13）による路面標識の劣化状況、滑走路におけるゴム付着範囲、点群データ解析によるわだち掘れや平坦性状況の把握、ダブルデッキ下面の点検などと巡回点検・PRI 調査・すべり摩擦抵抗調査と組み合わせることで効率的かつ効果的な点検に活用できると考える。

また、任意の点において縦横断計測や面積、体積の計測が容易であり、今まで事業毎に事業範囲のみ個別で発注していた計測作業など一元化ができ、省力化に期待できる。

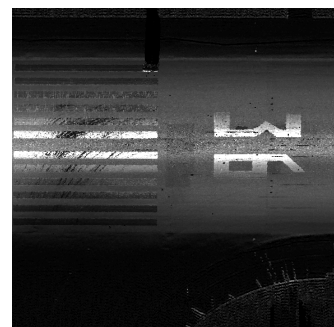


図-12 反射強度オルソ画像（滑走路）

小浜港航路における大型サンゴの人力作業による移設 (竹富南航路関連事業)

八重山土木事務所 河川都市港湾班

主 任 新城 博史

1 はじめに

八重山諸島の石垣島と西表島の上に広がる我が国最大のサンゴ礁の海域（東西約 20km、南北約 15km）は、石西礁湖（せきせいしやうこ）と呼ばれており、自然度の高い海域景観を有していることなどの特徴から国立公園に指定されている。このような亜熱帯域特有の豊かな自然や文化を有する八重山圏域は、新石垣空港の開港も相まって平成 23 年以降の入域観光客数が増加傾向にあり、海上交通を利用して竹富町の各島へ入域した観光客数は、年間 115 万人（平成 27 年）に達している。



図 1. 八重山諸島と石西礁湖

しかしながら、石西礁湖の海上航路は一部を除いて未整備の状況にあり、船舶はサンゴ礁海域特有の浅瀬や暗礁を避けながらの航行を余儀なくされている。

このため、国と県では、地域住民や来訪者が日常的に利用する船舶の安全・安心を確保するため、石西礁湖における航路整備を進めている。航路の整備に際しては、浚渫予定箇所および近郊に生息するサンゴを航路外へ移設することにより、サンゴの生息環境の保全を図っている。

本稿では、石西礁湖の周辺環境に配慮した大型サンゴの人力作業による移設について、報告する。

2 事業概要

2. 1 国における竹富南航路（開発保全航路）の整備について

竹富南航路は、竹富島の南東に位置する開発保全航路であり、沖縄本土復帰以降の年々大幅に増加する旅客及び貨物に対処するため、国において整備（昭和 56 年度供用開始）されたものである。当該航路の整備により、石垣島から各周辺離島への最短コースが確保され、大幅な時間短縮が可能となった。

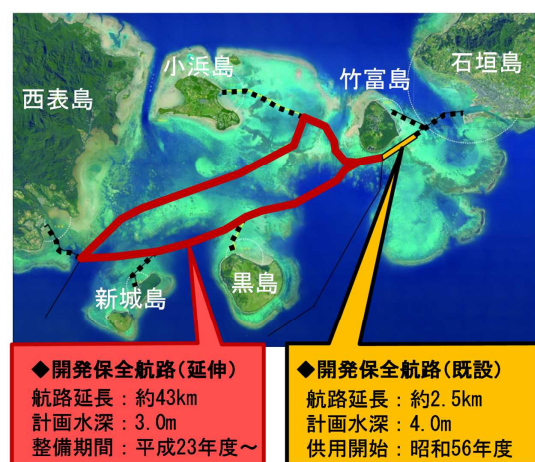


図 2. 竹富南航路の事業概要

しかしながら、既設の竹富南航路（約 2.5km）より先の石西礁湖内は依然としてサンゴ礁海域特有の浅瀬や暗礁が多く点在する複雑な海域となっており、安全な船舶航行が確保されていない状況にある。また、航行船舶数が年々増加している状況にあることから、国では開発保全航路の指定区域を拡大し、平成 23 年度から竹富南航路の延伸整備を実施しているところである。

2. 2 県における小浜港航路（港湾区域内航路）の整備について

小浜港は、県が管理する地方港湾であり、石垣島との間に定期高速船が多数運行しているほか、定期貨物船や地元の小型船が利用している。両港の沖合は、竹富南航路と同様に浅瀬や暗礁が多く点在する海域となっており、地域住民や来訪者の安心・安全を確保するため、かねてから航路の整備が要望されてきた。

当初は、この海域における航路整備についても国において実施する方向で検討されていたが、単独離島航路となる部分については、小浜港の港湾区域を竹富南航路へ向けて枝状に拡張し、国が整備する竹富南航路の関連事業として、県が平成 24 年度から接続航路の整備を実施している。

表 1. 小浜港航路の事業概要

航路名	延長	幅員	計画水深	浚渫面積	浚渫土量	事業費(予定)	事業期間(予定)	補助率
小浜港航路	約5.2km	55.0m	-3.0m	約39,500m ²	約42,400m ³	1,661百万円	H24～H29	9/10

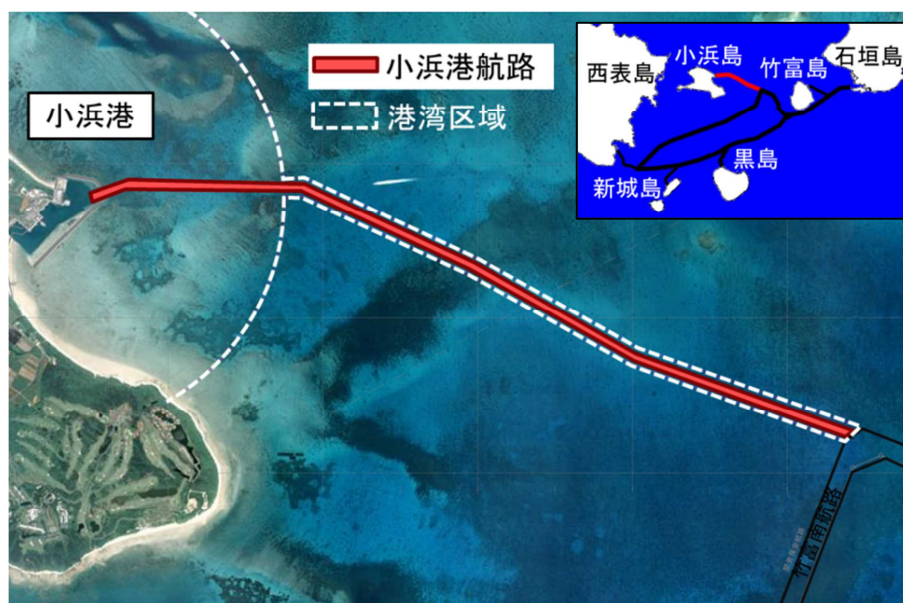


図 3. 小浜港航路全体図

3 求められる環境保全対策

3. 1 環境保全対策について

豊かな自然環境を有する石西礁湖における航路計画の策定及び航路整備技術の検討にあたり、国では「石西礁湖における航路計画検討委員会（平成 19 年度～平成 21 年度）」及び「石西礁湖における航路整備技術検討委員会（平成 22 年度～現在）」を設置し、海上交通の安全・安心を確保するために必要となる施設や、その整備に伴い影響を受ける自然環境に対する環境保全対策等について検討を行っている。

県の航路整備においてもこれらの委員会での検討結果を基に同等の環境保全対策を実施するものとしており、主な実施内容は、図 4 に示すとおりである。

移設対象のサンゴについては、航路浚渫などの工事が実施される前に移設を行い、移設後の定期的なモニタリングを実施することとしている。

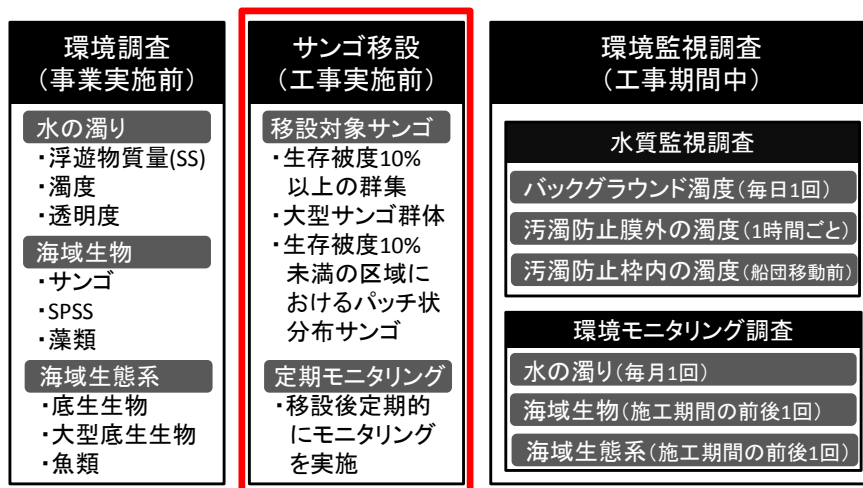


図 4. 石西礁湖における航路整備にあたっての主な環境保全対策

3. 2 大型サンゴの仕分けについて

3. 2. 1 移設工法による仕分けについて

まず大型サンゴの定義については、平成 25 年度の業務にて寸法規模が長径 1m 以上のものを大型サンゴとして取り扱うこととした。

その中でさらに規模による仕分けを行い、小規模（1m 以下）・中規模（1m～2m）・大規模（2m 以上）に区分した。

基本的には約 2m 以下の大型サンゴを人力移設の対象としており、2m 以上の大規模なサンゴについては、人力移設ではなく機械移設にて移設することとした。

3. 2. 2 人力移設と機械移設の違いについて

サンゴの移設作業は、基本的に採取・運搬・設置の 3 要素からなり、採取と運搬の方法が人力移設と機械移設で異なっている。人力移設が可能であると判断した大型サンゴについて、平成 26 年度に移設作業を実施した。

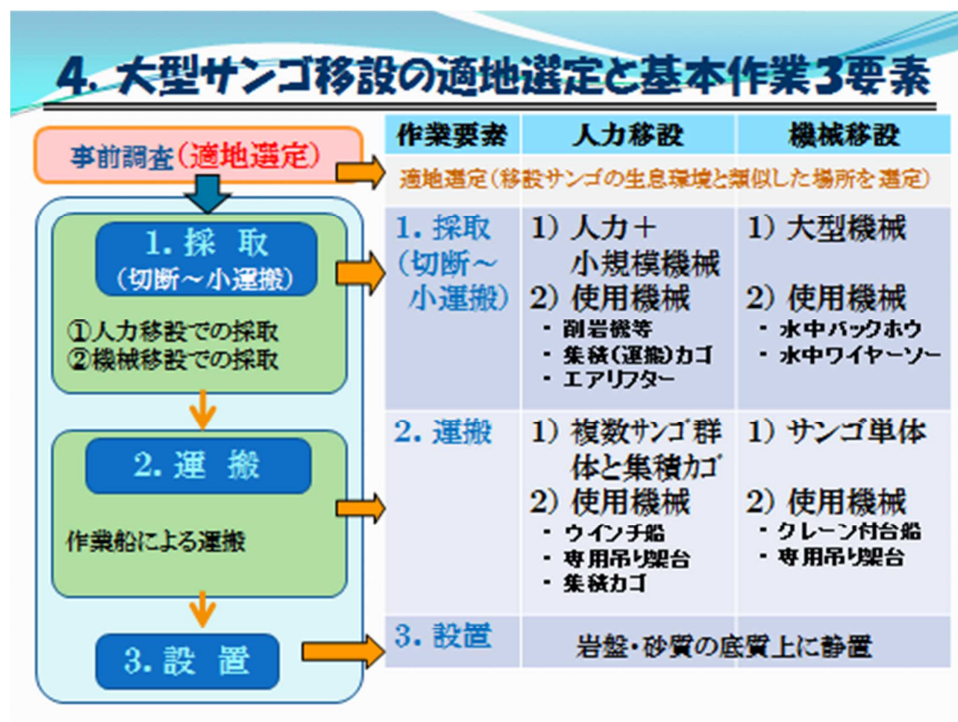


図5. 人力移設および機械工法の作業内容

4 大型サンゴの移設方法について

4. 1 移設元および移設先について

移設対象サンゴの適合条件を表2に示す。下表に該当する移設対象サンゴについて、航路外への移設を実施した。

表2. 移設対象条件（大型サンゴ）

対象サンゴ	移設適合条件
大型サンゴ	長径が約1.0m以上であること
	小浜港航路の航路内であること
	サンゴ群体の天端が浚渫にかかる水深（3.5m）以浅であること

4. 2 作業方法について

4. 2. 1 採取（切断・小運搬）

大型サンゴの採取に際しては、サンゴの健全さへの配慮に加えて、移設後のモニタリングも考慮して単群体での回収を優先しているが、形状や強度特性などから単群体採取が困難なサンゴに対しては、小割分割採取を行っている。本発表では、小割分割を行い、面積管理を実施した事例を紹介する。

人力の採取作業に使用した機材は、ハンマー、タガネ、バール等に加えて、エアリ

フターや削岩機（エアハンマー）であった。

小割分割による移設の場合は、小ぶりとなったサンゴは採取後に運搬カゴに集積して運搬するほうが効率的なため、潜水士が運搬カゴまで小運搬した。

4. 2. 2 運搬

小割分割により大型サンゴを集積した運搬カゴは、ユニック船にて運搬カゴを直接吊り上げて運搬した。

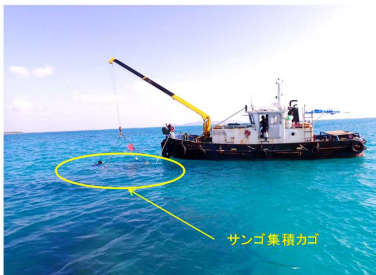
採取（切断・小運搬）	運搬
 パール等での小割分割採取	 運搬カゴとユニック船
 運搬カゴ内の小割サンゴ	 サンゴ集積カゴ 水中運搬

図6. 大型サンゴの採取・集積

4. 2. 3 設置

大型サンゴを設置する際は、事前調査にて選定した砂質海底の移設先にて静置することとした。同属のサンゴを集約するように配慮し、環境の変化や波浪等のイベントが発生することを想定して、サンゴ同士の距離を保たせて配置している。

小割分割にて移設したサンゴのうち、モニタリング調査にて面積管理を行うサンゴについては、移設後のサンゴの成長に伴う被度の増加を考慮して、図7のように千鳥格子状に設置した。

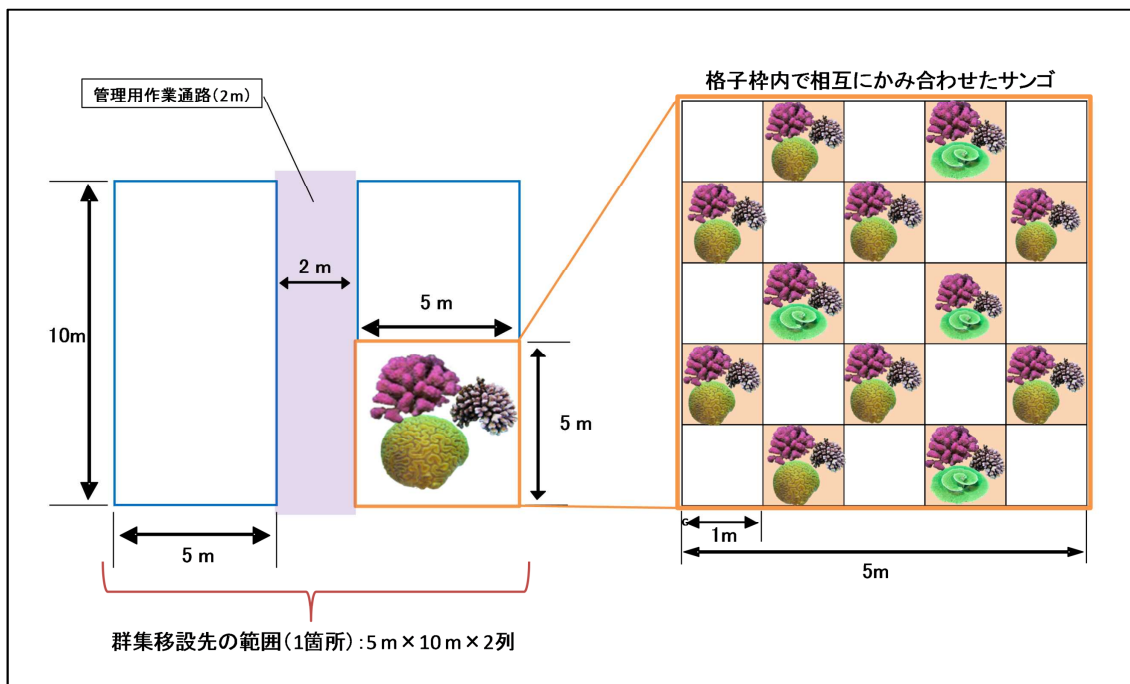


図7. 群集移設による大型サンゴの配置

5 モニタリング調査

5. 1 調査方法について

面積管理を行う大型サンゴのモニタリング調査のイメージ図を、図8に示す。調査時期については、移設前・移設直後・1ヶ月後・3ヶ月後・6ヶ月後・12ヶ月後の調査を行った。

5m×5mで設定された方形枠へ千鳥格子状に移設したサンゴについて、生存被度や魚類などのモニタリング調査を実施している。



図8. 群集移設を行った大型サンゴのモニタリング（イメージ）

5. 2 調査結果について

代表的な事例として、小浜港近傍の St. 2 と名付けた移設先へ移動した大型サンゴの調査結果を図 9 に示す。

移設後 6 ヶ月後までは生存被度に大きな変化は見られなかったが、12 ヶ月後のモニタリング調査で約 3% 減少が確認された。

魚類や底生生物については、移設前と比較して出現個体数および出現種類数が増加傾向にあることが確認された。

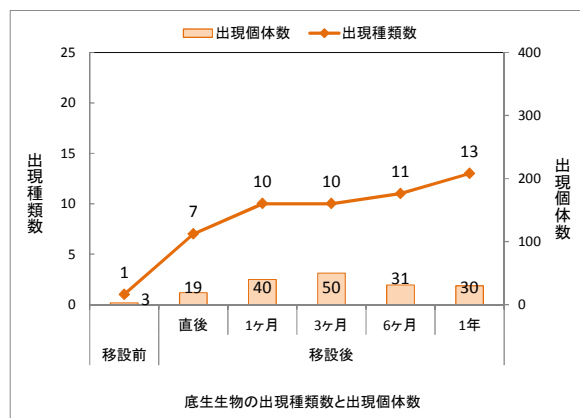
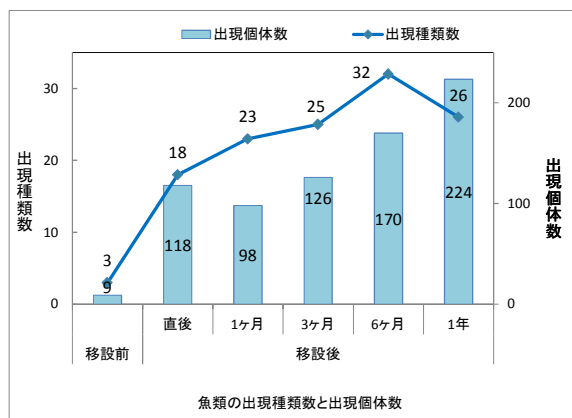
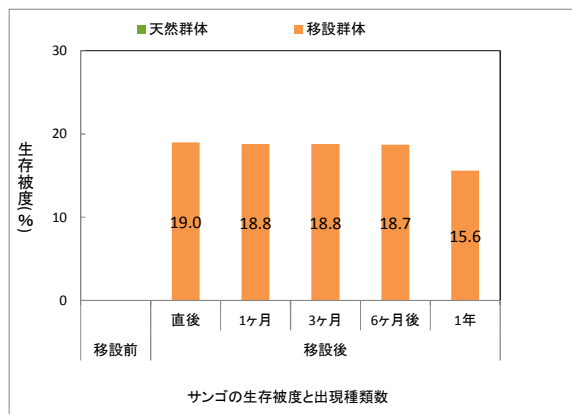
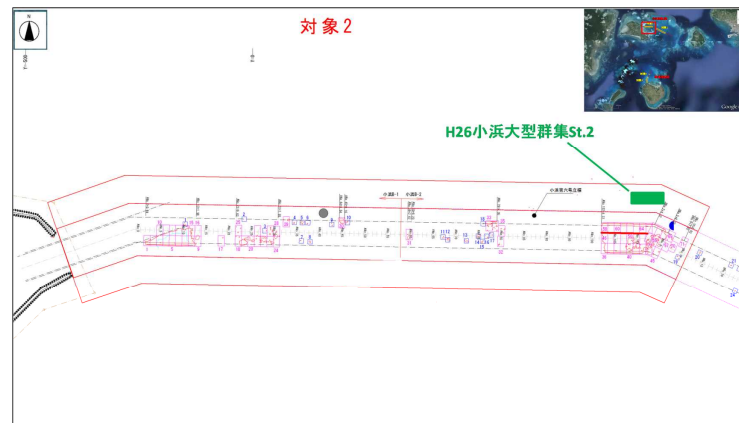


図 9. 群集移設における経時変化（サンゴ被度・魚類・大型底生生物）

6 まとめ

石西礁湖における航路浚渫工事に伴うサンゴの破損や死滅を最小限に抑えることにより、砂質に点在する生物の生息環境を保全することができた。

今回の大型サンゴの移設は、平成 25 年度に移設工法の検討を行ったうえで、平成 26 年度に移設作業を実施しており、現場で確認されたサンゴの生息状況を考慮することが重要であった。

今後の課題としては、本業務にて適用した移設工法が適正であったかどうかを評価するために、実績データを蓄積・整理していくことが必要である。特に、12 ヶ月後の調査結果で生存被度が低下していた要因として、台風や高波浪等による影響が考えられる。図 10 に示すとおり、コードラート内で部分的にサンゴが移動していることが確認されており、砂質に埋もれた部分が死滅した可能性などが考えられる。

また、本業務においては実施していないが、事前に専門家ヒアリングを実施することにより、移設先の選定や移設方法、モニタリング方法、移設後のモニタリング結果の評価等について助言を得ることが必要な場合もあると考えられる。

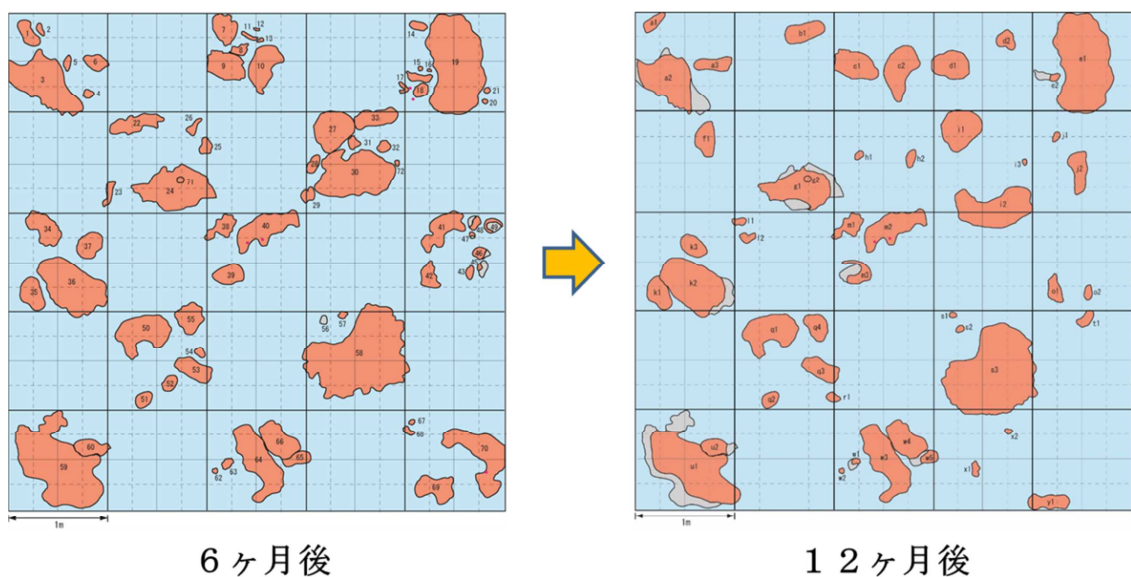


図 10. St. 2 におけるマッピング図（6 ヶ月後および 12 ヶ月後）

【参考文献】

- 1) 沖縄県八重山土木事務所：H25 小浜・黒島航路サンゴ移設業務委託（平成 26 年 3 月）
- 2) 沖縄県八重山土木事務所：H26 小浜・黒島航路サンゴ移設業務委託（平成 27 年 3 月）
- 3) 沖縄県八重山土木事務所：H27 小浜・黒島航路サンゴ移設業務委託（平成 28 年 3 月）
- 4) 沖縄県八重山事務所：平成 27 年八重山入域観光客数統計概況
- 5) 沖縄総合事務局石垣港湾事務所：石西礁湖における航路整備技術検討委員会資料（第 1 回～第 9 回）

各種金属柱・鉄塔の非破壊健全性評価に関する基礎研究

琉球大学 ○盛田樹里, 藍檀オメル, 富山潤, 須田裕哉

1. はじめに

社会基盤施設には, 様々な構造物が多く存在し, これらの構造物は台風や強風による繰り返しの風荷重や共振現象による疲労破壊が問題になっている. 本研究では, 昨年度¹⁾ から継続して, ユーティリティーポール(電信柱, 照明柱, 標識, 信号柱)を対象に, 常時微動計測, 風荷重を受けた際の加速度計測を行い, ユーティリティーポールの振動特性に関する基礎的な研究を行った.

2. 研究目的

近年ユーティリティーポールの転倒などの事項が増加している. 台風や強風などによる風荷重とは別に, 材料の劣化や疲労は転倒の主な要因となっている. したがって, 本研究では非破壊試験によって構造物の健全性の評価方法の構築を目的として研究を行った.

3. 計測概要

研究対象の照明柱は本部町A橋にある平成20年と平成26年竣工の照明柱とn-siteにおける損傷のある照明柱, y-siteにおける損傷のある照明柱と健全な照明柱を対象とし, 図1に示す測定器を用いて, 以下の振動計測を行った.

- (a) 加速度計を用いて人力による振動の計測(サンプリング間隔: 2ms)
- (b) 常時微動計測器(SPC51, PicRECORD)を用いて人力, 風による自由振動の計測(サンプリング間隔: 10ms)



図1 加速度計(左上),
常時微動計測(右上, 下)

4. 測定結果と考察

測定した加速度記録と常時微動計測による記録をもとにフーリエスペクトル変換を行い同様の結果が得られているかの検証を行った.

H20年の照明柱を例に示す. 図2はH20年の照明柱に対しての加速度記録によるフーリエスペクトル, 図3は常時微動計測記録によるフーリエスペクトルを示す. 結果は共に約10および20Hzで固有周波数の存在が見られる.

図4, 図5はy-siteにおける照明柱の常時微動計測によるフーリエスペクトルを示している. 図4の照明柱は損傷がない健全な柱, 図5は損傷のある柱となっている. また図6, 図7は加速度記録によるフーリエスペクトルを示している. 測定には機器を設置後に人力により振動を与えて計測を行った.

人工的な振動を与えたとき損傷なしの照明柱

キーワード: 固有周波数 フーリエスペクトル 健全性評価

連絡先: 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail: e135340@u-ryukyu.ac.jp

では常時微動計測器と加速度計共に 10Hz と 30Hz で特徴がみられる．また損傷ありの照明柱では共に 1Hz と 28Hz で特徴がみられているのが分かる．損傷ある照明柱に対して，全体的に固有の周波数が小さくなる傾向が見受けられる．フーリエスペクトルの振幅と周波数特性の違いより損傷の度合や位置など推定が可能である．

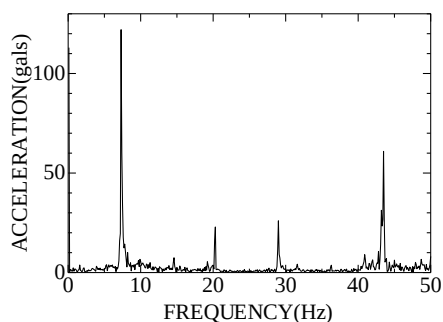


図 2 H20 年の照明柱のフーリエスペクトル

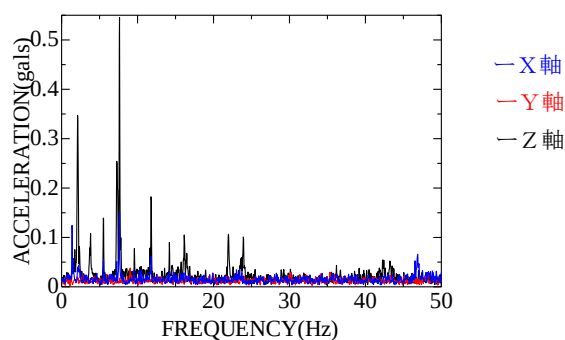


図 3 H20 年の照明柱のフーリエスペクトル

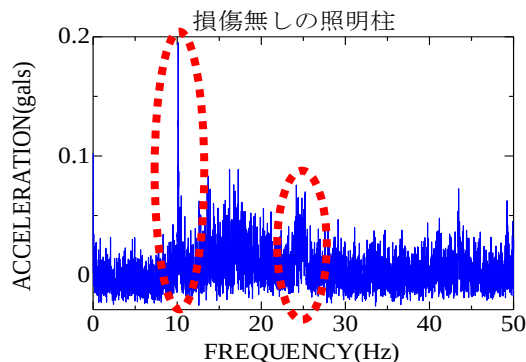


図 4 y-site 照明柱(損傷なし)

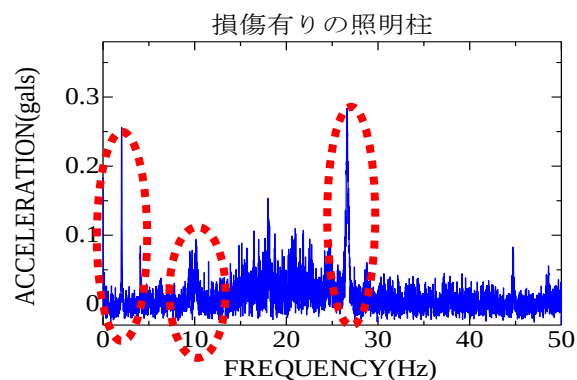


図 5 y-site 照明柱 (損傷あり)

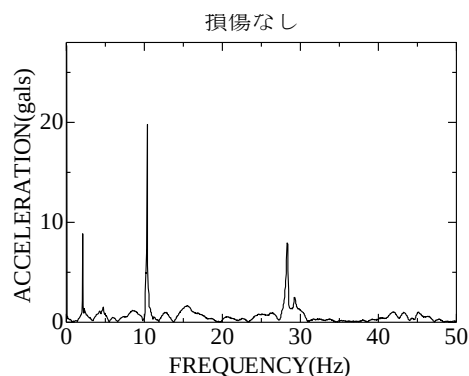


図 6 y-site 照明柱(損傷なし)

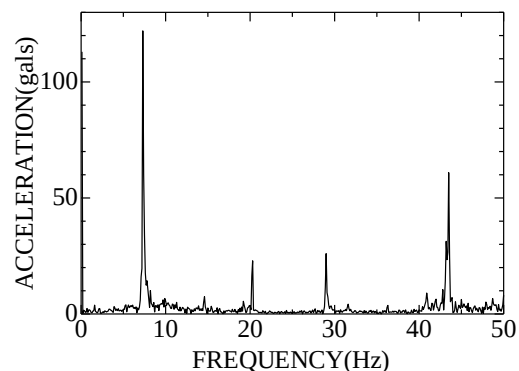


図 7 y-site 照明柱 (損傷あり)

5. まとめ

本研究により，常時微動計測器，加速度計のいずれの計測結果を利用した周波数解析より，柱の損傷が検出可能であることがわかった．今後は数値解析と合わせて定量的な評価を行う．
謝辞：本研究を遂行するにあたり，沖縄県北部土木事務所に協力を頂いた．ここに記して感謝の意を表す．

参考文献

- 1) 栗原郁弥：照明柱の健全度評価に関する非破壊法の基礎研究，土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会，P157,158，2016

Session 6 : 防食・材料関連

鋼材さび面に対する Cold Spray 工法の防食性能評価に関する電気化学的検討

琉球大学 ○島孝仁 加藤祐介 田井政行 下里哲弘 有住康則

1. 序論

鋼橋における一般的な防食法は塗装であるが、素地調整において錆を完全に除去する必要がある。しかし、鋼桁端部(写真-1)のような狭隘部では、十分なケレン作業は困難であり、少量の錆が残存してしまい塗装後の腐食の早期再発が問題となっている。本研究では、少量の錆を許容しつつ強靱な犠牲防食皮膜を形成することが可能である現在開発中の新しい防食工法のCold Spray(以下、CS)工法¹⁾について、鋼材さび面に対する防食性能を明らかにすることを目的とする。今回、CS処理した腐食鋼材の防食性能を電気化学的手法により検討した。



写真-1 桁端部が腐食した鋼橋

2. 試験方法

2.1 CS 処理した試験体作製

本試験では、無腐食鋼材(普通鋼ブラスト処理、寸法: 150×40mm)、実腐食鋼材(普通鋼、初期錆厚: 250 μ m、寸法: 150×40mm)を用いた。初期錆厚がCS工法の防食性に及ぼす影響について検討するために実腐食材に関しては、ケレン無(錆厚平均: 250 μ m)と3種ケレン(カップワイヤブラシ使用、錆厚平均: 100 μ m)の腐食材を用いた。これらの鋼材に対しCS施工を実施し、CS処理鋼材を作製した(写真-2)。本試験に使用したCS粉体は、亜鉛とアルミナの混合粉体(重量配合比6:4)を用いた。



写真-2 CS 施工風景

2.2 腐食促進試験

CS処理鋼材に対し、乾湿繰り返し複合サイクルによる腐食促進試験を実施した。複合サイクル条件は、5%濃度食塩水を塗布後、温度35℃・湿度90%の湿潤条件(2h)、温度40℃・湿度50%の乾燥条件(6h)を1サイクル(計8h)とし、3サイクル(計24h)毎に5%濃度食塩水を繰り返し塗布した。試験期間は0, 8, 28日とし、それぞれの期間で試験体を回収した。

2.3 評価・分析方法

(1) 腐食状況観察

CS処理鋼材の腐食状況を確認するために外観観察を実施した。CS処理鋼材の成膜状況と腐食状況の詳細を確認するためにSEM断面観察を実施した。

(2) 自然電位測定

CS処理鋼材の防食性能を把握するために、自然電位測定を実施した。回収した各試験体に対し、電位測定用試験片(写真-3)を作製し、3wt%NaCl溶液中(大気解放条件、室温平均20℃)にて約20min浸漬後の自然電位を測定した。なお、参照電極は銀塩化銀電極(SSE)を用いた。



写真-3 自然電位測定用試験片

3. 試験結果

3-1. 腐食状況

CS 処理鋼材の腐食外観を図 1 に示す。無腐食鋼材、実腐食材（ケレン有）では、28 日経過後においても、赤さび発生はなく外観良好であった。一方、実腐食材（ケレン無）では、28 日経過後に赤さび発生が認められた。

3-2. SEM 断面観察

SEM 断面観察結果を図 2 に示す。腐食試験前（0 日目）の無腐食鋼材と実腐食材（ケレン有）では、CS 皮膜の成膜性が良好であった。一方、腐食材（ケレン無）では、CS 皮膜の成膜性が著しく低下していた。従って、腐食材においても 3 種ケレン程度を行うことで成膜性が向上し、その結果、防食性能が向上したと推測される。

3-3. 自然電位測定

自然電位の測定結果を図 3 に示す。腐食試験前（0 日目）では、いずれの試験体においても自然電位が約 -1.0V vs. SSE であった。これは、亜鉛の自然電位と概ね一致していることから、試験初期では鋼材さび面においても CS 工法により亜鉛の犠牲防食皮膜が形成されているものと考えられる。実腐食材（ケレン無）では、試験期間の経過に伴い、自然電位が著しく貴化していた。一方、無腐食鋼材と実腐食材（ケレン有）では、腐食試験 28 日目においても、初期の自然電位を概ね維持していた。従って、初期錆厚が大きい場合でも 3 種ケレン程度を行うことで防食性能が向上し、長期において亜鉛の犠牲防食効果が維持できる可能性があることが示唆された。

4. 結論

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) ケレン無腐食材（初期さび厚平均 $250\mu\text{m}$ ）を用いた複合サイクル試験では赤さび発生等の腐食が確認できた
- (2) 初期さび厚が大きい場合でも 3 種ケレンを行うことで、防食性能が向上し、長期において亜鉛の犠牲防食効果が維持できる可能性があることが示唆された。

参考文献：1) 山城, 下里ほか：腐食面に対する SmartZIC 工法の適用性に関する研究, 土木学会西部支部沖縄会第 5 回技術研究発表会, 2016.3

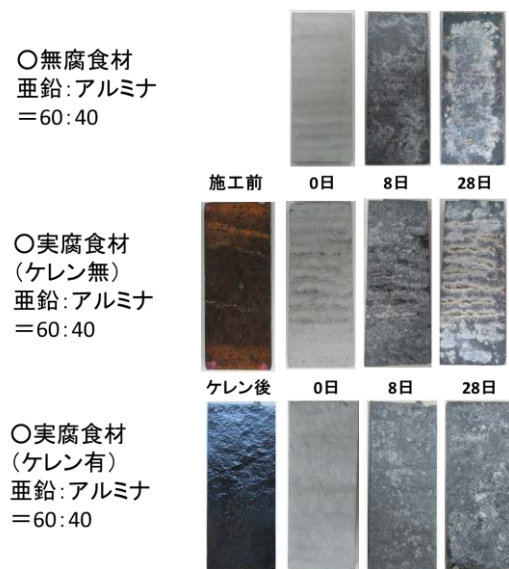


図-1 外観写真

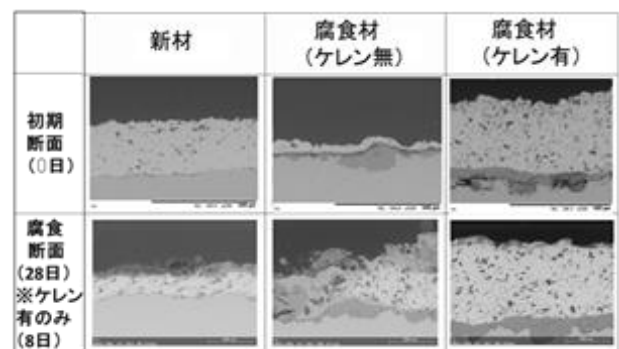


図-2 SEM 断面観察結果

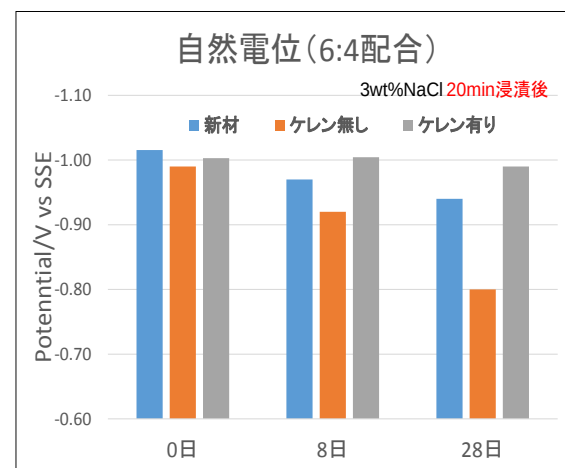


図-3 自然電位まとめ

Cold Spray 工法における高力ボルト角部の皮膜特性に関する研究

琉球大学 ○古代大師 加藤祐介 田井政行 下里哲弘 有住康則

1. 背景と目的

写真 - 1 に示すように海岸部の橋梁の高力ボルト継手は、塩害などにより腐食損傷が発生しやすく、劣化状況によっては橋の安全性が損なわれる危険がある。また、高力ボルトの角部は締付時の傷や、塗膜厚が確保されづらく塗膜厚が薄いことが腐食の原因の1つとなっている。本研究では、高力ボルト角部へのCold Spray (CS と示す) 工法による皮膜特性を成膜性と防食性の観点から検証する。

2. 試験方法

2.1 供試験体作成

図 - 1 に試験全体フローを示す。本研究では新材高力ボルトと腐食高力ボルトを用いた。新材と腐食高力ボルトに配合 (亜鉛 : アルミナ = 60 : 40)、施工角度 90 度で CS 施工を行った。成膜性に影響を及ぼすと考えられるパラメーターとして、①ノズル種類、②ノズルの移動経路、③重ね施工を選定した。

(1) ノズルの種類による成膜

ノズルを標準ノズル (内径 7 mm) 小径ノズル (内径 5 mm) (写真 - 2) で標準施工を行い角部の CS 成膜形状の違いを比較した。

(2) ノズルの移動経路による成膜

図 - 2 にノズルの移動経路を示すように、3 パターン (標準 : ボルトの各側面に上下蛇行状に施工 螺旋型 : ボルト全体に螺旋状に施工 両開き戸型 : ボルトの各側面に中心から角部に向け施工) に分け施工を行い、角部の CS 成膜形状の違いを観察した。

(3) 重ね施工による成膜

ノズルの移動速度を変え (5 mm/秒・7 mm/秒・10 mm/秒) 標準の施工を行い、後からボルト半分の角部だけ重ねて施工を行い (図 - 3) 角部の CS 成膜の膜厚を重ねなしと比較した。

2.2 高力ボルト角部への成膜状況観察 (デジタルマイクロスコープ)

CS 皮膜の膜厚、特性を観察するために、CS 施工したボルトを切断し断面をデジタルマイクロスコープにより観察した。

2.3 高力ボルト角部の防食性検討 (複合サイクル試験)



写真 1 腐食高力ボルト



図 - 1 試験全体フロー



写真 - 2 小径ノズル (左) 標準ノズル (右)

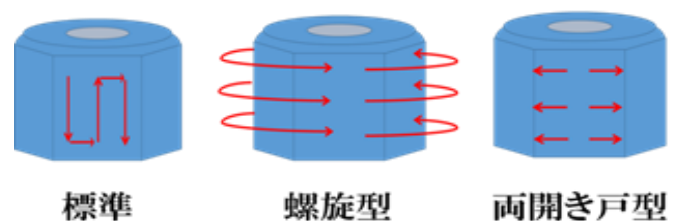


図 - 2 ノズルの移動経路

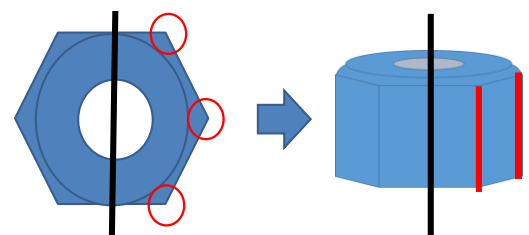


図 - 3 重ね施工

キーワード CS 成膜, ノズル種類, ノズル移動経路, 重ね施工

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学環境建設工学科

E-mail: e125301@eve.u-ryukyu.ac.jp

CS 成膜の状況が防食性に及ぼす影響を把握するために、重ねて施工を行った試験体 6 体（新材 3 体・腐食 3 体）で乾湿繰り返し複合サイクル試験を実施した。複合サイクル条件は、35℃・90%×2h（湿潤）40℃・50%×6h（乾燥）1 サイクル 8h で行い、3 サイクルに 1 度食塩水（5%）を塗布する

3 結果・考察

1) ノズルの種類の影響

図 - 4 に小径ノズル（内径 5 mm）で施工を行ったボルトの側面と角部の CS 膜厚を示す。図より角部の膜厚は側面に比べて薄く、標準のノズル（内径 7 mm）と同じ傾向がみられた。

2) ノズルの移動経路の影響

写真 - 3 にノズルの移動経路による角部断面図を示す。移動経路による CS 成膜形状の違いは見られず、それぞれの角部膜厚は側面に比べて薄くなっている。また、角部の膜厚は一般外面塗装仕様の 防食下地 75 μm 以上¹⁾ を満たしていない。

3) 重ね施工の影響

写真 - 4 に標準の重ね施工あり・なしの角部 CS 成膜断面図を示し、図 - 5 に新材と腐食材の角部膜厚と側面の平均膜厚を示す。写真と図より重ねて施工を行うことで、角部にも側面と同じかあるいはそれ以上の成膜形成が可能であることがわかる。また、新材と比べ腐食材の膜厚は全体的に少し薄くなっている傾向が認められた。これは、初期錆の影響によるものと推測される。

3. 2 複合サイクル試験結果

図 - 6 に複合サイクル試験のさび発生時間と膜厚の関係のグラフを示す。グラフより初期膜厚が増すにつれてさびの発生時間が遅くなる傾向が確認できた。

4 まとめ

CS 工法の高力ボルト角部への防食皮膜特性（成膜性、防食性）について検討した。本研究のまとめを以下に示す。

1) 重ねて施工を行うことにより、角部に側面部と同等以上の膜厚を形成可能であることを確認した。一方、移動経路・ノズルの種類に関しては、高力ボルト角部の成膜に及ぼす影響は認められなかった。

2) 複合サイクル試験により膜厚の増加とともにさびの発生時間は遅くなる傾向を確認した。従って、角部からさびが発生する原因も膜厚の薄さであることが確認できる。

3) 以上から、角部の防食性を向上するためには、重ね施工が重要であると考えられる。

小径ノズル角部膜厚

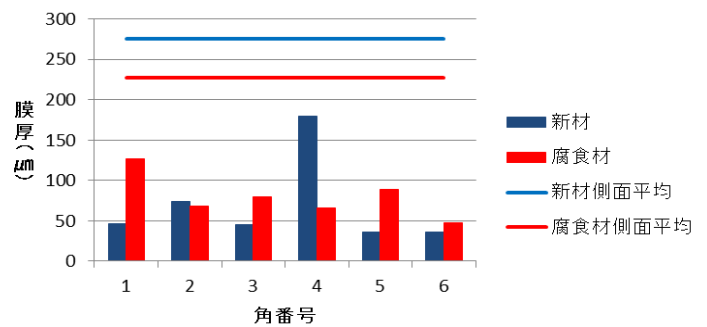


図 - 4 小径ノズル 角部膜厚

標準

螺旋型

両開き戸型

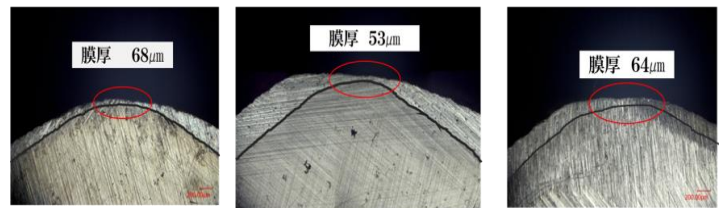


写真 - 3 ノズルの移動経路



写真 - 4 重ね施工あり（左）重ね施工なし（右）

新材角膜厚

腐食材角膜厚

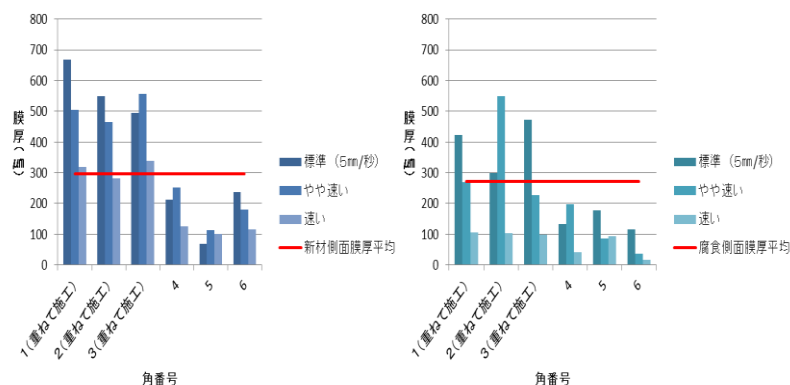


図 - 5 角部膜厚

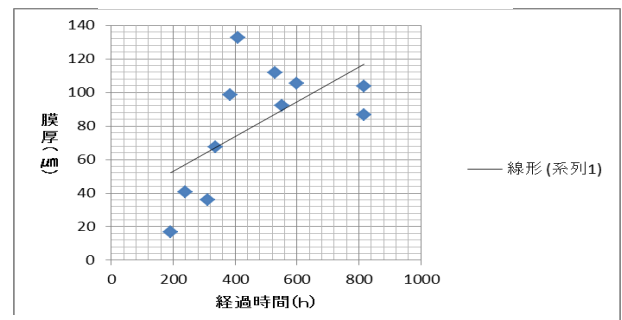


図 - 6 複合サイクルさび発生時間と膜厚

参考文献: 1) 日本道路協会:鋼道路橋防食便覧.2014.3

濡れ-紫外線サイクル促進による鋼橋塗装の劣化特性に関する研究

琉球大学 ○池田信人 加藤祐介 田井政行 下里哲弘 有住康則

1 章 はじめに

図 1 は、気象庁公開の過去 25 年の紫外線データを平均化したものである¹⁾。図 1 より沖縄地域は、日本の他地域と比べて強い紫外線環境下であり、特に白系塗料において早期に白亜化現象が発生し、下塗りが露出している現状がある²⁾。白亜化の原因は、紫外線による分解、水分による加水分解、顔料中の酸化チタンの光触媒反応³⁾によるとされている。本研究ではまず、実塗装鋼橋における白亜化の実態を調査する為に、遠方目視調査を行った。また、塗膜の劣化特性の検証を目的に、塗装鋼板試験体に紫外線照射および塩水塗付乾湿繰り返しサイクル試験を行った。

2 章 実塗装鋼橋における白亜化の実態調査

2-1 調査方法

モノレールの鋼軌道桁において、白亜化現象により下塗りが露出している箇所が存在する。その箇所の白亜化原因を究明する為に遠方目視調査を実施し、白亜化発生原因の分析を行った。

2-2 調査結果と考察

白亜化現象により下塗りの赤色が露出していたのは、ウェブ全面(写真 1)、横ウェブ下端(写真 2)、ウェブ下端(写真 3)、ガセットとウェブの接合部(写真 4)であった。各々は、塗装面が東西方向を向いている為、紫外線の影響を受けやすいと考えられる。また、フランジやガセット等の雨水が滞留しやすい(濡れ時間が長い)箇所においても白亜化が発生していた為、濡れによる影響も大きいと考えられる。

3 章 濡れ-紫外線サイクル促進試験

3-1 試験方法

図 2 は、本研究に使用する試験体である。鋼板に白色、青色、緑色のふっ素樹脂塗料を施している。ふっ素樹脂塗料は、現行の一般外面塗装仕様で用いられる。下塗りに、ジンクリッチペイントを施している。各々のマンセル値は、白色→N9、青色→5PB7/6、緑色→5GY8/2 である。

紫外線の照射では、写真 5 の紫外線照射機器(メタルハライドランプ)を用いた。図 3 は、琉大暴露場とメタルハライドランプの紫外線強度を表している。屋外の紫外線強度の最大値の約 20 倍の強度で照射を行う。促進試験を行う上で、次の 2 つを実施した。

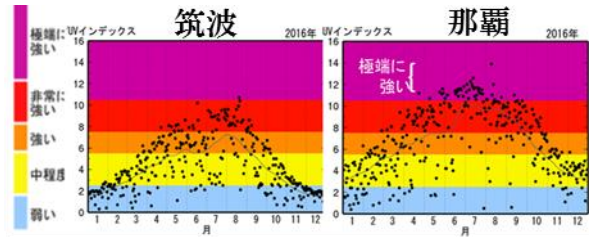


図 1 紫外線の比較¹⁾



写真 1 鋼軌道桁ウェブ



写真 2 横ウェブ下端



写真 3 ウェブ下端



写真 4 ガセットウェブ接合部

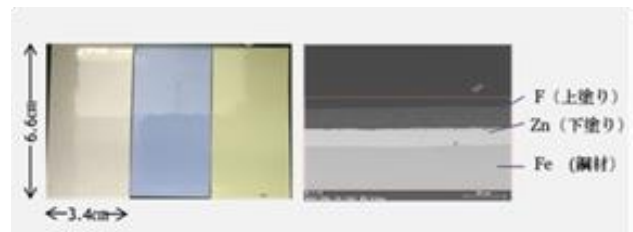


図 2 試験体と表面の様子

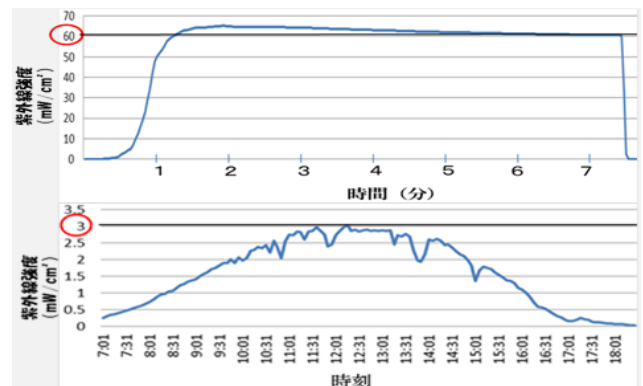


図 3 紫外線強度の比較



写真 5 メタルハライド



写真 6 恒温恒湿機

① 紫外線照射促進試験 (0h～300h)

→紫外線の照射のみで促進を行う。

→150h、300hで白亜化測定を実施。

② 紫外線照射および塩水塗付乾湿繰り返しサイクル試験 (300h～1000h)

→遠方目視調査の結果を踏まえ、実環境を再現するために、紫外線照射後に5%濃度食塩水を塗布し、恒温恒湿機(写真6)を用いて乾湿繰り返し複合サイクル試験を実施した。サイクルは図4に示す。

→500h、1000hで白亜化測定を実施。

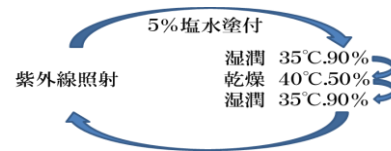


図4 濡れ-紫外線サイクル



写真7 光沢度計



写真8 白亜化測定用テープ

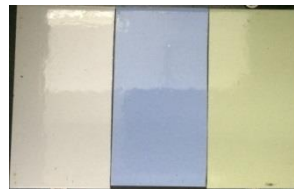


写真9 初期試験体

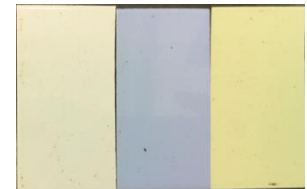


写真10 300h試験体

	W-1	B-1	G-1
150h			
300h			

図5 150h、300h 白亜化テープ試験

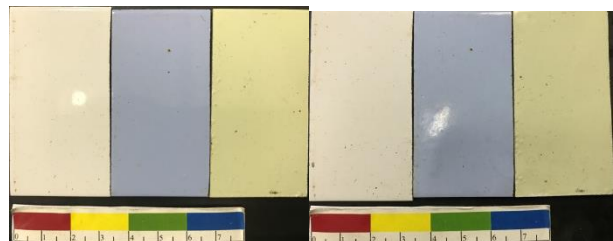


写真11 500h試験体

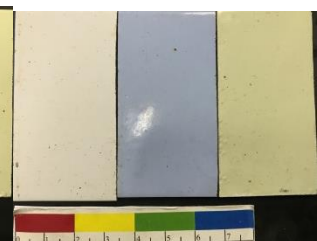


写真12 1000h試験体

	W-1	B-1	G-1
500h			
1000h			

図6 500h、1000h 白亜化テープ試験

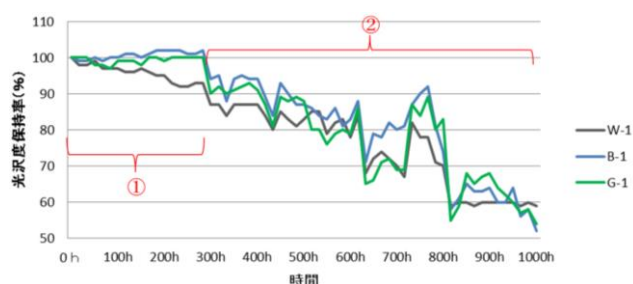


図7 光沢度保持率

いずれの試験でも紫外線照射後に、膜厚の測定、光沢度の測定を行った。

3-2 試験結果と考察

① 紫外線照射促進試験 (0h～300h)

写真9、10は外観の変化を示している。電磁膜厚計による膜厚の測定では変化は見られなかった。白亜化テープ試験でも白亜化は確認できなかった(図5)。図7より、白色の光沢度低下が著しいことが分かった。

② 外線照射および塩水塗付乾湿繰り返しサイクル試験 (300h～1000h)

写真11、12は外観の変化を示している。膜厚の変化はなく、白亜化テープ試験でも白亜化は確認されなかった(図6)。図7より、濡れが伴うと光沢度の低下が促進されることが分かった。

4章 まとめ

(1) 沖縄都市モノレール鋼軌道桁遠方目視調査を実施した結果、白亜化現象が発生する条件は、塗装面が紫外線と濡れの影響を受けやすい箇所であることが示唆された。

(2) 0h～300hの紫外線照射、300h～1000hの濡れ-紫外線サイクル促進において白亜化は確認できなかった。

(3) 白系塗料において白亜化が生じやすいとされているが本試験の範囲では、白色試験体において光沢度保持率の低下が顕著であることが確認できた。

参考文献

- 1) 気象庁 HP : 紫外線データ集,2016,12
- 2) 荒牧聡,藤本圭太郎,平原慎也,下里哲弘 : 鋼橋塗装の紫外線劣化特性と防食技術の研究,第24回鋼構造年次論文発表会,p1,2016,11
- 3) 日本鋼構造協会 : 重防食塗装,p40,2012.2

鋼とコンクリート境界部のマクロセル腐食に対するコンクリート中の塩分量の影響

琉球大学 ○賀数淳人, 加藤祐介, 田井政行, 下里哲弘, 有住康則,

1.はじめに

近年, 写真-1 に示すような下路トラス橋の斜材とコンクリート床板との境界部や鋼製橋脚基部のコンクリート境界部において, 著しい腐食損傷事例が数多く報告されており, 落橋や倒壊などの危険性が大きくなっている^{1) 2)}.

通常, コンクリートと接触する鋼材はコンクリートの強アルカリ性に接していることから不働態化しているため腐食速度が極めて遅くなる. しかしながら, コンクリート境界部では, 大気中からの塩分や炭酸ガスが侵入しやすいことが想定されるため, 不働態皮膜が破壊され腐食速度が大きくなると考えられる. そのため, 鋼/コンクリート境界部における腐食の特性とメカニズムの解明が重要である. 本研究では, 鋼/コンクリート境界部におけるマクロセル腐食に着目しコンクリート中の塩分量がマクロセル腐食に及ぼす影響を把握することを目的に, マクロセル腐食試験(鋼材埋設試験)を実施した.

2.試験方法

2.1 試験体 (マクロセル腐食電流測定用分割鋼材)

試験体概要を図-1 に示す. マクロセル腐食電流を測定するため, 10×40mm の分割試験片 15 個の 1 つ 1 つに導線を取り付けステンレス製の端子台に全分割試験片 (15 個) を接続し, 電気的には 1 本の鋼材とした. 各分割試験片同士の接触を防ぐため幅 3mm の塩ビの板を分割試験片の間に挟んだ. その後, 鋼材を表面のみの露出にするため側面と裏面をエポキシ樹脂で被覆した.

2.2 試験条件

コンクリート中の塩分量の影響について検討するために, 塩分量と塩分侵入範囲の異なるコンクリート埋設試験体を製作した. 表-1 に試験条件を示す.

2.3 腐食促進試験

試験体は恒温恒湿機に設置し, 温度・湿度一定 (温度 40℃・湿度 RH95%) での湿潤条件で 77 日間促進試験を行った.

2.4 マクロセル腐食電流の測定方法

腐食促進試験中におけるマクロセル腐食速度の経時変化とマクロセル腐食発生個所を把握するために, マクロセル腐食電流を測定した. 測定方法は測定対象の分割試験片 (1 個) のみ接続を切り離し, その他の分割試験片 (14 個) から流入・流出する電流を無抵抗電流計により測定した. 併せて, 開回路状態の自然電位の測定も実施した. なお, 測定時以外は全分割試験片を短絡した.

2.5 評価分析方法

試験体を解体し, 腐食状態の外観調査を行った.

3.試験結果と考察

3.1 腐食外観調査

回収後の各試験体の腐食外観を図-2,3 に示す. 塩分侵入の有無に関わらず全試験体において鋼/コンクリート境界部に腐食の発生が確認された. 特に塩分量 20kg/m³ では, 鋼/コンクリート境界部において著しい腐食が発生していた. また, 塩分侵入範囲を



写真-1 下路トラス橋損傷事例1)

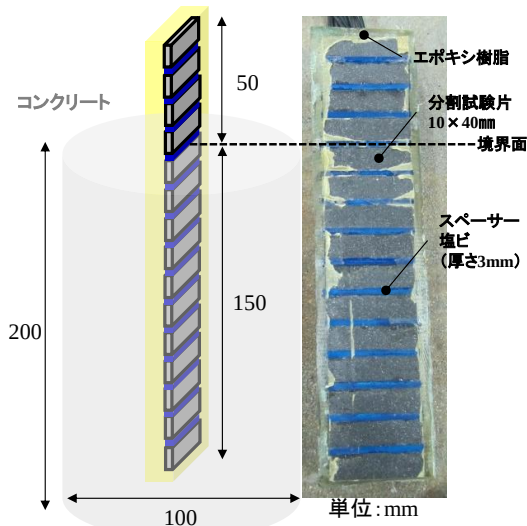


図-1 マクロセル腐食電流測定用分割鋼材

表-1 試験条件

No.	侵入範囲(mm)	塩分量(kg/m ³)
1	0	0.0
2	10	1.0
3	10	5.0
4	10	20.0
5	50	1.0
6	50	5.0
7	50	20.0

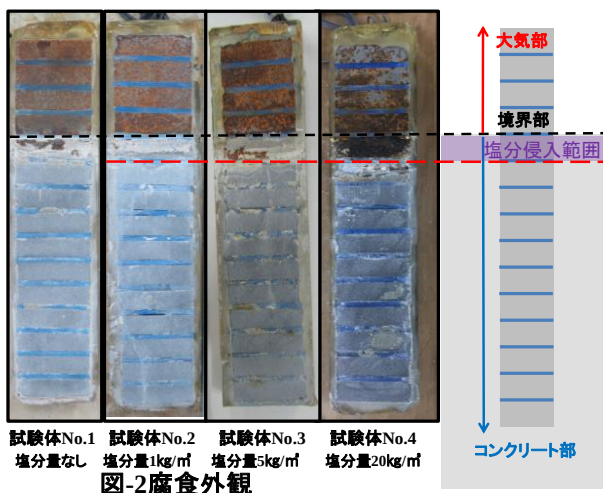
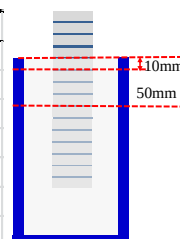


図-2 腐食外観

キーワード 鋼/コンクリート境界部, 塩分量, マクロセル腐食

連絡先 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地

国立大学法人 琉球大学 工学部 環境建設工学科 TEL:098-895-8666 FAX:098-895-8677

拡大した試験体 (No.5,6,7) に関しては塩分侵入範囲全体に腐食の発生がわずかに確認された。これは塩分の影響によって不動態皮膜が局所に破壊されたためであると考えられる。一方、塩分侵入範囲外に関しては腐食の発生はほぼ認められなかったことから、不動態皮膜が保持されたためであると考えられる。

3.2 マクロセル腐食速度/自然電位の経時変化

試験開始時 (0 日目) と試験終了時 (77 日目) の自然電位測定結果を図-4 に示す。コンクリート中の鋼材の自然電位は塩分量無し (No.1), 塩分量 1kg/m^3 侵入範囲 10mm (No.2) では、時間経過に伴い貴化していた。この測定結果と腐食外観調査結果から、境界部より下部の鋼材は不動態皮膜が保持され腐食の進展が抑制されたと考えられる。その他の試験体は、試験開始時と試験終了後では大きな電位の変化は認められなかった。

マクロセル腐食電流から換算したマクロセル腐食速度の結果を図-5 に示す。塩分侵入範囲(10,50mm)に関わらず、マクロセル腐食速度の分布状況は概ね一致し、一部の試験体においてコンクリート境界部にマクロセル腐食の形成が観察された。このことから、マクロセル腐食はコンクリート境界部において局所的に発生すると考えられる。この傾向は、腐食外観状態(図-2,3)とも一致した。塩分量無し(No.1)と塩分量 1kg/m^3 (No.2/No.5) では、試験期間中においてマクロセル腐食の形成は認められなかった。一方、塩分量 5kg/m^3 (No.3/No.6) では、試験開始時に約 0.04mm/y のマクロセル腐食速度が観察された。しかし、試験終了時にはマクロセル腐食の形成はほぼ認められなかった。これはセメントの塩分固定化³⁾により、腐食に関与する自由塩化物イオンが減少したためであると考えられる。その結果、試験期間の経過に伴い、マクロセル腐食速度が著しく減少したと考えられる。セメントの塩分固定化については別途検討を実施する。塩分量 20kg/m^3 (No.4/No.7) では、試験開始時に約 $0.1\sim 0.2\text{mm/y}$ の大きなマクロセル腐食速度が観測された。試験終了時においても、塩分侵入範囲 10mm では約 0.05mm/y 、侵入範囲 50mm では約 0.1mm/y のマクロセル腐食速度を維持していた。以上の結果から、コンクリート中の塩分量が増加するにつれ、マクロセル腐食速度は増大すると考えられるが、塩分量 5kg/m^3 迄の範囲では、長期的にはマクロセル腐食の影響は小さいと推測される。

従って、多量の塩分がコンクリート中に侵入しない限り、実環境ではコンクリート側の境界部におけるマクロセル腐食は問題とはならないと推察される。しかし、大気側の境界部におけるマクロセル腐食に関しては、別途検討が必要である。

4. まとめ

鋼/コンクリート境界部のコンクリート側のマクロセル腐食は塩分の侵入範囲に関わらず境界部に局所的に発生する。また、塩分量の増加によってマクロセル腐食速度は増大すると考えられるが、今回の試験条件の範囲 (塩分量: 5kg/m^3) では、長期的にみてマクロセル腐食の影響は小さいと推測される。

参考文献

- 1) 山田健太郎 『機関誌 Structure Painting』, 橋塗協, 2008, Vol.36 No.1 P2-3
- 2) 中島章典ほか 『鋼コンクリート接触面の腐食の発生・進展に関する実験的研究』, 構造工学論文集 A, 2012, Vol. 58A P 889-896
- 3) 武若耕司ほか 『コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数試験方法に関する規準化の現状と今後の動向』, コンクリート工学 2005, Vol. 43 No. 2 p. 19-26

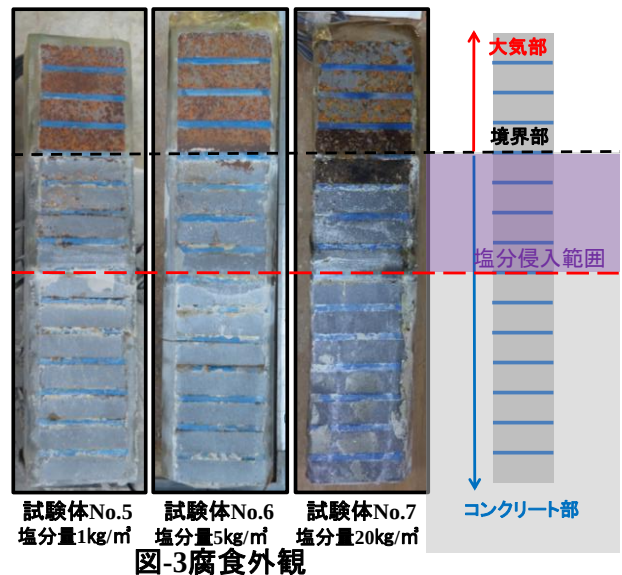


図-3 腐食外観

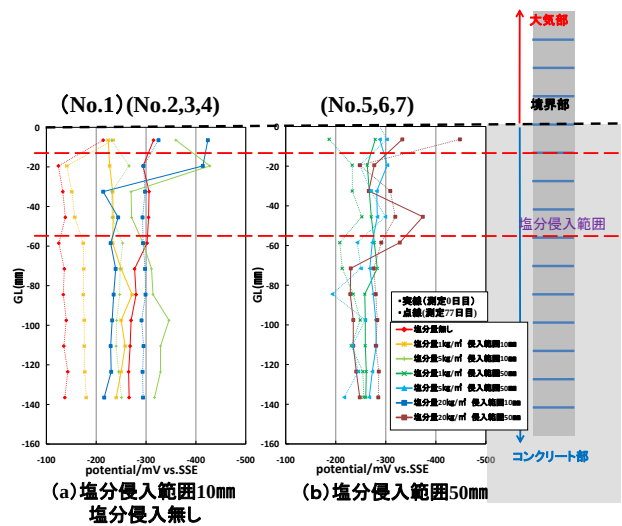


図-4 自然電位経時変化

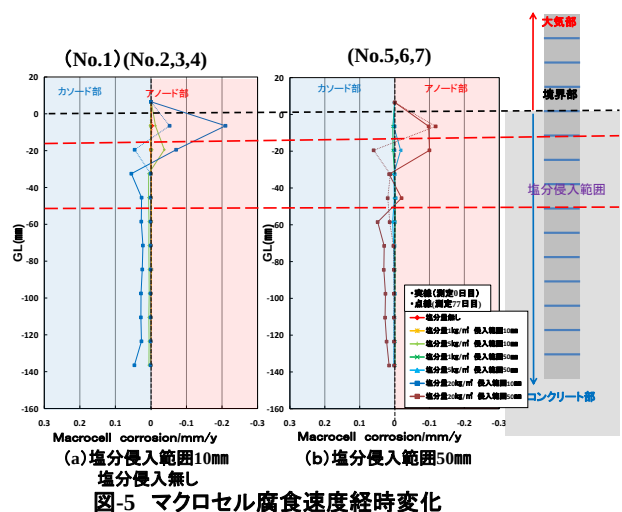


図-5 マクロセル腐食速度経時変化

異なる暴露環境で8年経過した無塗装仕様耐候性鋼材の保護性さび評価

琉球大学 ○米丸慎人 加藤祐介 田井政行 下里哲弘 有住康則

1. 序論

耐候性鋼材とは写真-1(右)のような緻密な保護性さびの形成により腐食を抑制する鋼材である。飛来塩分量が0.05mdd以下のマイルドな腐食環境であると保護性さびは形成されるが、沖縄のような過酷な腐食環境では保護性さびの形成は厳しいとされている¹⁾。しかし、実際に沖縄でも長期間供用された耐候性鋼橋が現存している。そこで本研究では、過酷な腐食環境である沖縄でも保護性さびが形成されるかを検証することを目的に、雨がかりありと雨がかりなしという異なる暴露環境で8年間暴露された耐候性鋼板のさびの評価をおこなう。

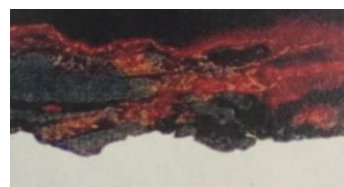


写真-1 偏光顕微鏡による耐候性鋼の観察 左)層状剥離さび 右)保護性さび



写真-2 琉大暴露試験状況 左)雨がかりあり 右)雨がかりなし

2. 保護性さび評価方法

写真-2及び写真-3に耐候性鋼板の暴露状況を示す。保護性さび評価は、耐候性鋼の表面を評価する。

2.1 試験体

琉大暴露場 JIS 規格耐候性鋼

雨がかりあり 75×150×6mm 水平置き

雨がかりなし 75×150×6mm 水平置き

那覇港暴露場 JIS 規格耐候性鋼

雨がかりあり 75×150×6mm 水平置き

雨がかりなし 75×150×6mm 水平置き



写真-3 那覇港暴露試験状況 左)雨がかりあり 右)雨がかりなし

2.2 大気暴露

琉大暴露場と那覇港暴露場の環境条件は、平均気温と平均湿度はほぼ同程度(23℃、48%)だが、図-1の平均飛来塩分量を見ても、那覇港暴露場0.3mdd、琉大暴露場が0.17mddと那覇港暴露場が琉大暴露場の約2倍の飛来塩分量となっている。

2.3 評価、分析方法

日本鋼構造協会・耐候性鋼橋梁部会の耐候性鋼材外観評価評点に基づき、さび厚と外観観察から評価した²⁾。また、回収した耐候性鋼を切断して偏光顕微鏡を用いてさび層断面を観察し、実際に保護性さびの生成状況を確認した。なお、さび層断面の偏光顕微鏡観察は、直交ニコル下で観察した。直交ニコルとは、光路に偏光子を加え、検光子を差し込んで観察する方法である。

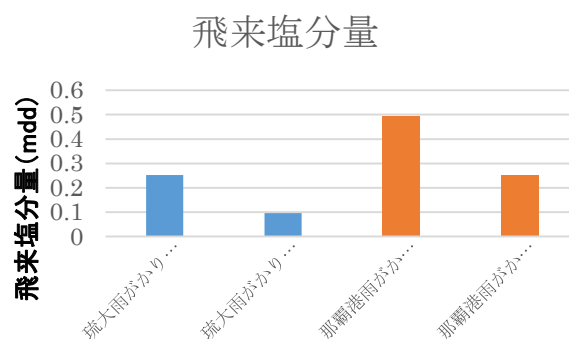


図-1 暴露場ごとの飛来塩分量

キーワード 耐候性鋼, 保護性さび, 偏光顕微鏡,

連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科 Email:e125327@eve.u-ryukyu.ac.jp

3. 試験結果、考察

3-1 外観評点結果

腐食外観状況を写真-4 及び写真-5 に示す。琉大暴露場及び那覇港暴露場の雨がかりありの耐候性鋼板は共にさび厚 $200\mu\text{m}$ 以下と良好で、色むらの無い均一なさびができていて外観も良好であった。現在保護性さびが形成されている、もしくは今後保護性錆が形成される可能性があると思われる、日本鋼構造協会・耐候性鋼橋梁部会の耐候性鋼材外観評価評点では、琉大暴露場の耐候性鋼は外観評点 4、那覇港暴露場の耐候性鋼は外観評点 3 である。

また、琉大暴露場及び那覇港暴露場の雨がかりなしの耐候性鋼板は、さび厚が $400\mu\text{m}$ を超えていて、うろこ状のさびを形成しており、現在も今後とも保護性さびが形成される可能性はないと思われる、琉大暴露場、那覇港暴露場共に外観評点 2 となる。

3-2 偏光顕微鏡による観察

写真-8 は 30 年間自然暴露され、実際に保護性さびを形成した耐候性鋼を偏光顕微鏡で観察したものである。保護性さびの比較のためにこれを用いた。写真-6(左)に琉大暴露場雨がかりありの耐候性鋼、写真-7(左)に那覇港暴露場雨がかりありの耐候性鋼を示す。琉大暴露場雨がかりありの耐候性鋼及び那覇港暴露場雨がかりありの耐候性鋼は写真-8 と同様に消光層と偏光層が 2 層に分かれており保護性さびを形成している可能性があるとして推測される。しかし、琉大暴露場雨がかりなしの耐候性鋼及び那覇港暴露場の雨がかりなしの耐候性鋼は、消光層と偏光層が 2 層に別れておらず、保護性さびを形成していないと考えられる。

4. まとめ

雨がかりあり、雨がかりなしという 2 つの異なる暴露環境では、雨がかりありの耐候性鋼板の方がさびが安定していた。偏光顕微鏡による観察では、実際に保護性さびを形成している耐候性鋼と同じような傾向のさびを観察することができた。従って、沖縄のような過酷な腐食環境でも環境条件によっては保護性さびが形成できる可能性があるとして推測される。



さび厚 $180.9\mu\text{m}$

さび厚 $585.8\mu\text{m}$

写真-4 琉大暴露場腐食外観状況 左)雨がかりあり 右)雨がかりなし



さび厚 $195.2\mu\text{m}$

さび厚 $689.9\mu\text{m}$

写真-5 那覇港暴露場腐食外観状況 左)雨がかりあり 右)雨がかりなし

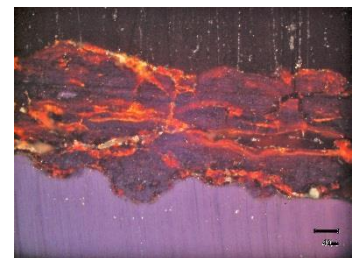
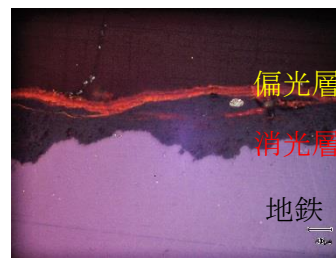


写真-6 琉大暴露場偏光顕微鏡観察 左)雨がかりあり 右)雨がかりなし

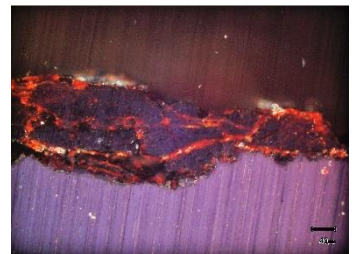
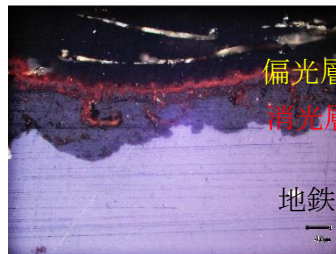


写真-7.1 那覇港暴露場偏光顕微鏡観察 左)雨がかりあり 右)雨がかりなし

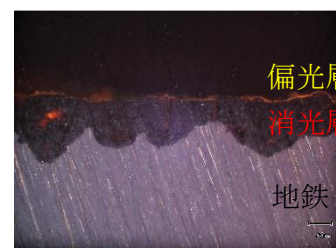


写真-8 30 年間暴露され実際に保護性錆を形成した耐候性鋼

参考文献

- (1) 日本道路協会：道路橋示方書，2002.3
- (2) 社団法人日本鋼構造協会：耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術，2006, No.73, pp187-188

薄板モルタルを用いたコンクリート橋梁の付着塩分に関する基礎研究

琉球大学大学院 ○吉次優祐

琉球大学 松田愛子, 富山潤, 藍檀オメル, 須田裕哉

1. はじめに

海から発生する飛来塩分により, コンクリート橋梁は塩害の被害を受ける. その飛来塩分は冬季風浪や台風によって海から内陸へ多く輸送される¹⁾. さらに沖縄県は高温多湿な亜熱帯環境である. この環境はコンクリート内部の鉄筋の腐食速度を早めるため, 他地域よりも塩害劣化が進行しやすい. 同一構造物においても気象条件, 周辺環境, さらに構造物の形状・寸法などにより, 部材, 部位ごとに劣化の程度が異なる²⁾.

本研究では, 新潟大学の佐伯らが提案する薄板モルタル³⁾を用いて, 一つの橋梁の各部位を対象に季節ごとに付着する塩分量の違いを調査し, メゾ塩害環境を評価した.



図1 位置図(Google Map より)



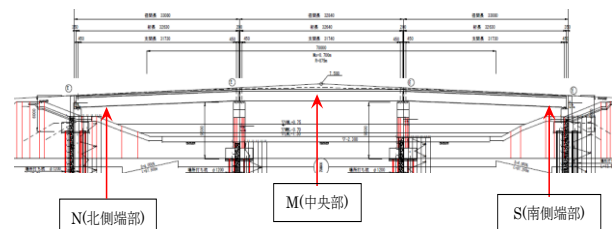
写真1 外来塩分による劣化

2. 対象橋梁

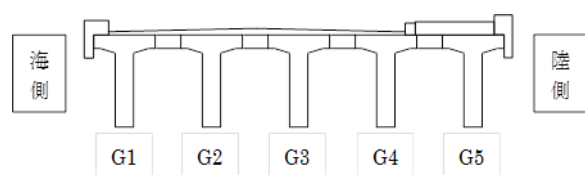
2.1 概要

対象橋梁は平成 23 年 3 月に供用開始された 3 径間ポストテンション PC 橋であり, 沖縄本島北部東シナ海側に位置する. 図 1 に位置図を示す. また, 図 2 に対象橋梁側面図及び断面図を示す.

調査は図 2 に示した N(北側端部), M(中央部), S(南側端部)の位置の 5 主桁すべてで行った. 本論文では, 強風と護岸の影響で直接波しぶきを受ける南側・北側端部と波しぶきの影響を受けない中央部の測定結果を報告する.



(a) 側面図



(b) 上部工標準断面図

図2 対象橋梁概略図

2.2 周囲の風況

対象橋梁の卓越風向の整理として, 伊是名気象観測所の観測データを集計した. 本論文では 2015 年 6 月 25 日～2015 年 8 月 26 日の 62 日間(以下, 期間 A), 2015 年 8 月 26 日～2015 年 11 月 27 日の 93 日間(以下, 期間 B), 2015 年 11 月 27 日～2016 年 2 月 26 日の 91 日間(以下, 期間 C)の結果

キーワード: 塩害, 薄板モルタル, 飛来塩分, 付着塩分量

連絡先 〒903-0123 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL:098-895-8663

を示す。図3に各期間の累積風向割合を示す。図3を見ると、夏季である期間Aでは南寄りの風が卓越していることがわかる。期間Aにおいては、いくつかの台風が接近、襲来した。冬季に向かう期間B、期間Cでは、季節風による北寄りの風が吹いていることがわかる。また、対象橋梁のある沖縄本島東海岸は冬季になると波の高さがおよそ2倍となる可能性がある⁴⁾。

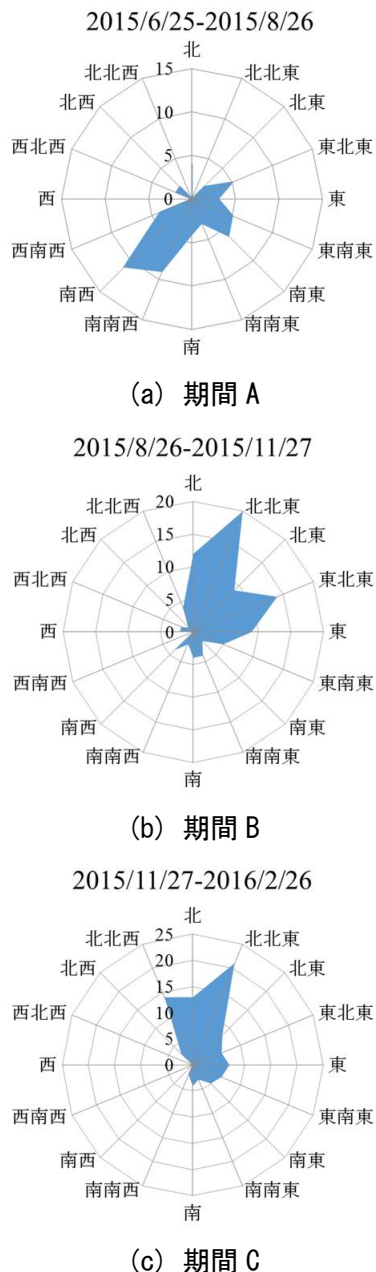


図3 各期間の累積風向割合

3. 薄板モルタル供試体

3.1 特徴

写真2に薄板モルタル供試体(4×4×1cm)を示す。薄板モルタルを用いた塩化物イオン量調査は、設置に特殊な機材や技術が必要なく容易に設置できる。以下に薄板モルタル供試体(W/C=50%)の主な特徴を示す。

- a) マクロ塩害環境の評価のために複数個所の飛来塩分の捕集・調査が容易
- b) 構造物のメゾ塩害環境の評価のための付着塩分量の捕集・調査が容易

以上のことから、薄板モルタルを用いた飛来塩分量および付着塩分量の調査は、構造物の点検優先度等への利用や、効率的な維持管理を行うために必要なデータを継続的に蓄積することが容易である。

塩分量分析は薄板モルタルを回収後、乾燥させて粉碎処理をして粉末試料とし、JCI-SC5に基づき電位差滴定法(自動滴定装置 GT-2001 型)によりモルタル中に含まれる塩化物イオン量を求める。

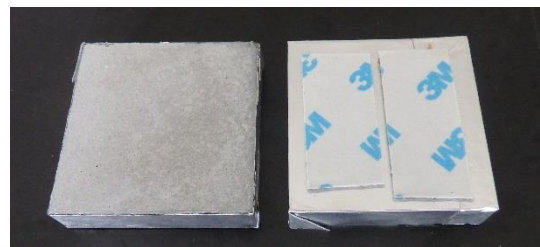


写真2 薄板モルタル

3.3 薄板モルタルの設置

薄板モルタルは北側・南側端部、中央部で図4のように設置した。期間A、期間Bでは北側・南側端部のみ、期間Cでは全ての位置に設置をした。中央部の設置には橋梁点検車を用いて設置回収を行った。写真3、写真4に薄板モルタルの設置、橋梁点検車の写真を示す。

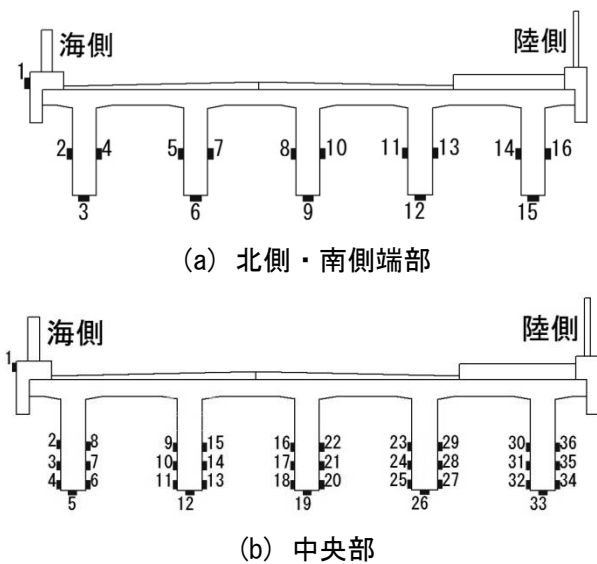


図4 薄板モルタル設置位置

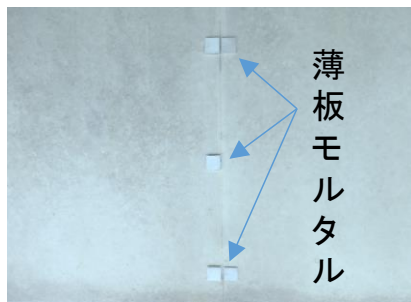


写真3 薄板モルタル設置



写真4 橋梁点検車

4. 計測結果

次に、各期間での計測結果を図4～図7に示す。一般的に主桁側面よりも主桁下面の方が付着塩分量は多くなると言われているが、期間Aと期間Bにおいては下面と側面には付着塩分量に大きな差がなかった。期間Cの中央部にも同じことが言える。期間Cでは主桁下面部の付着塩分量が多かった。これは、冬季風浪によって波しぶきが薄板モルタルにかかることが原因である。

次に、期間ごとの比較を図8、図9に示す。北側・南側の期間ごとを比較すると、全体的に期間Cの付着塩分量が最も多い結果となった。期間Bよりも設置期間が少ないにもかかわらず、期間Aの付着塩分量が2番目に多かった。これは、期間A設置時期に複数の台風が接近、襲来したことが原因ではないかと考えられる。

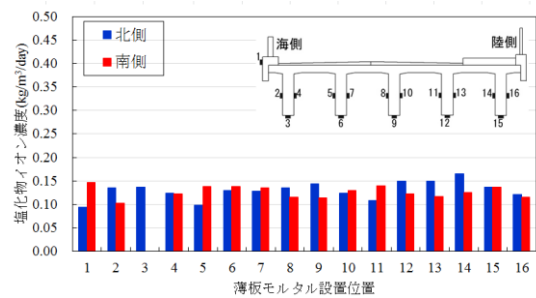


図4 期間A 端部での付着塩分量

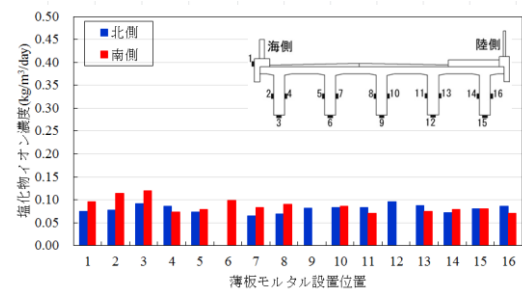


図5 期間B 端部での付着塩分量

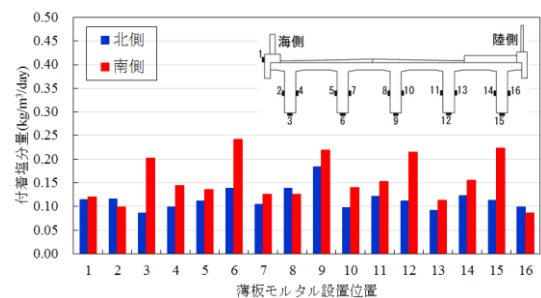


図6 期間C 端部での付着塩分量

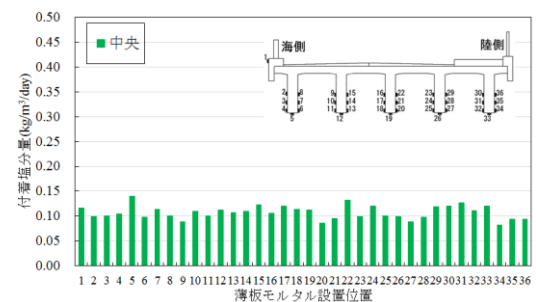


図7 期間C 中央部での付着塩分量

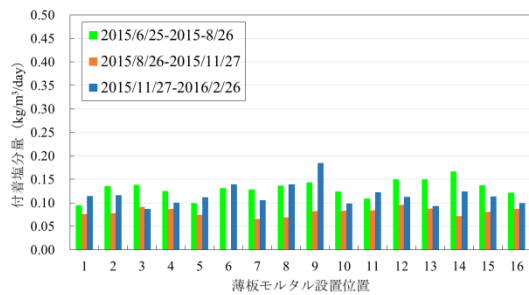


図8 期間ごとの比較（北側）

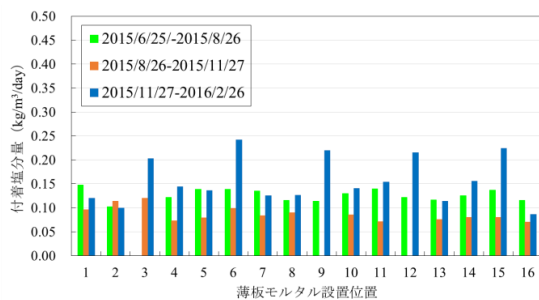


図9 期間ごとの比較（南側）

また、中央部は側面に3ヶ所ずつ設置をしている。同一面内における付着塩分量の違いを図10に示す。この結果を見ると、海側側面と陸側側面で付着塩分量が高さによって異なっている。海側側面は中(下から325mm)に設置したものが多く、陸側側面は上(下から750mm)に設置した薄板モルタルに飛来塩分が多く付着していた。このことから、側面部において、海側と陸側では卓越する風の流れに季節特有の傾向があるのではないかと考えられる。

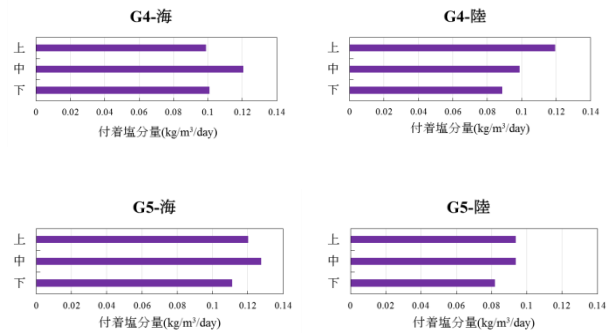
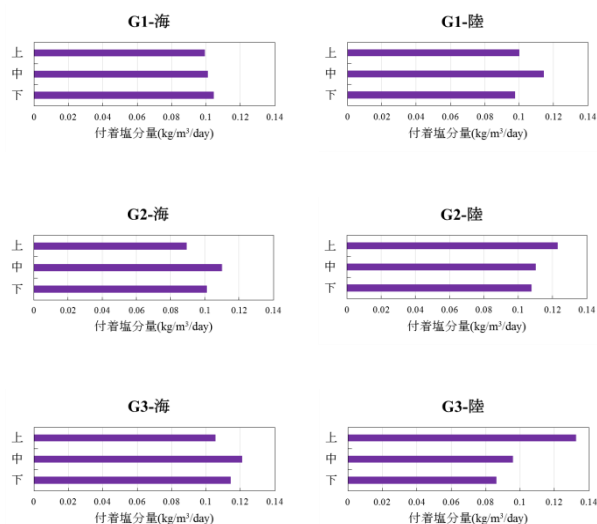


図10 側面の高さにおける付着塩分量

5. まとめ

今回の調査で得られた知見を以下にします。

- 1) 冬季においては中央部と端部では付着塩分量に差があった。これは冬季風浪が原因と考えられる。
- 2) 夏季は冬季に比較し、飛来塩分量は少ないが、台風が襲来接近することで多くの飛来塩分が供給される。
- 3) 側面部においては高さや海側・陸側側面によって付着塩分に傾向が見られた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、大宜見村役場に協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 真喜志ら：塩害環境下における飛来塩分量特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.28,No.1,2006
- 2) 材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会(342委員会)：委員会報告書およびシンポジウム講演概要集コンクリート技術シリーズ No.98, 土木学会, 2012.
- 3) 佐伯竜彦：薄板モルタル供試体を用いたミクロ塩害環境評価手法に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33,No.1,2011
- 4) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (波浪に関するデータより)

モルタル材料に対するシラン系含浸材およびフライアッシュの水分移動抑制効果に関する基礎研究

琉球大学 荒崎聡子, 富山 潤, 須田裕哉, 藍檀オメル

1. はじめに

コンクリート構造物の代表的な劣化現象に、塩害や ASR などがあり、それらはコンクリート内の水の存在や移動現象に大きく影響を与える。外部からの水の浸透を抑制する材料として、表面含浸材がある。含浸材の一種でシラン系含浸材（以下、含浸材）は、コンクリート表面に塗布することで吸水防止層を表層部に形成し、外部からの水や塩化物イオンの浸入を抑制する効果がある。そこで本研究では、モルタル材料を対象にシラン系含浸材（以下、含浸材と称す）の水分浸透抑制効果の確認を行う。また、フライアッシュセメントを用い、緻密化による水の浸透抑制効果に対する検討も行う。

2. 実験概要

モルタル材料に対する水分浸透抑制効果を評価するために、1) 含浸深さ試験、2) 一面水分浸透試験（重量測定、X 線 CT スキャナ撮影）を実施した。

2.1 モルタルの配合および使用材料

本研究では、普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 ）およびフライアッシュセメント（密度 2.98g/cm^3 ）を用いた水セメント比(W/C)を 35%, 50%, 60% の 3 水準のモルタルを用いた。細骨材には本部産石灰岩砕砂（密度 2.77g/cm^3 ）を用いた。含浸材には、2 種類の含浸材(#1, #2)を用いた。本報告では W/C=60% の結果を示す。なお、W/C=60% の配合は表-1 の通りである。

表-1 モルタル配合

配合水準	単位量(kg/m^3)			
	W/C	セメント	細骨材	水
NC※1	60	0.586	1.758	0.352
FC※2	60	0.586	1.758	0.352
※1：普通ポルトランドセメント（琉球セメント）				
※2：フライアッシュセメント B 種（琉球セメント）				

2.2 含浸深さ試験

ここで含浸深さとは、モルタル表面に塗布した含浸材がモルタル内部に浸透し、吸水防止層を形成する深さと定義する。ここでは、その含浸深さの確認を行うため、図-1 に示す角柱試験体($4 \times 4 \times 16\text{cm}$)を用いた。なお、養生は、水温 20°C で 7 日間水中養生し、その後 10 日 20°C の恒温で気中養生した。養生終了後、図-1 に示す供試体 1 面に含浸材(#1,#2)を標準量の 0.2kg/m^2 塗布した。所定の期間に 2cm ごとに割裂し、割裂した面に霧吹きで水を吹きかけ、含浸深さをノギスで測定した。

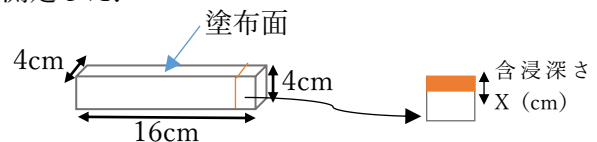


図-1 供試体イメージ図(X：含浸深さ)

2.3 一面水分浸透試験による水分浸透現象の確認

ここで使用する試験体は、 $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の円柱とし、使用材料は上記に示した通りである。養生については、上記に示した養生の後、 100°C の乾燥機を用いて乾燥状態を確認した後、試験を開始した。図-1 に一面水分浸透試験の模式図を示す。図-1 に示すように供試体の一面(底面 5mm 程度)を浸水させ、経過時間に応じた浸透現象の確認する。なお、実験は、普通ポルトランドセメント使用で、水に浸す底面を無処理(NC)、含浸材塗布(#1(NC#1),#2(NC#2))およびフライアッシュセメント使用で無処理(FC)の計 4 水準とした。

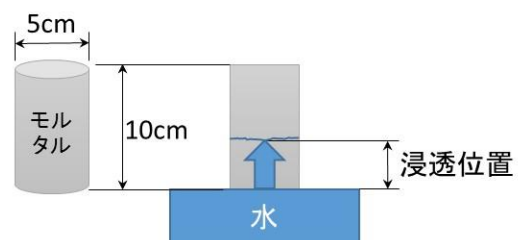


図-1 水分浸透試験の模式図

キーワード：水分移動, 塩分移動, シラン系含浸材, フライアッシュ, X 線 CT スキャナ

連絡先：〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail：e135322@eve.u-ryukyu.ac.jp

(1) 重量測定法

供試体一面(底面 5mm 程度)を浸水させ、経過時間に応じた浸透現象を 0.001g の精度の電子天秤で重量測定を行い、間接的に水分の浸透現象を把握する。図-2 に測定の様子を示す。



(a) 浸透試験



(b) 重量測定

図-2 一面水分浸透試験 (重量測定)

(2) X線 CT スキャナによる水分浸透現象の確認

2.3 で示した実験のうち、NC、NC#1、FC の 3 水準で、X 線 CT スキャナ (東芝製マイクロフォーカス X 線 CT スキャナ: 熊本大学)¹⁾ により、初期状態、試験開始 1 日、3 日、5 日の計 4 日のコンクリート内部の撮影を行い、CT 値²⁾ (CT の画像濃度値) 変化により水の浸透現象を確認する。

3. 実験結果・考察

3.1 含浸深さ試験

試験は各々 2 試験体で確認した。この図から割裂する場所によって含浸深さが変わることがわかるが、NC#2-2 を除いて、25 日目までに 3mm~6mm 程度含浸していることが確認できた。

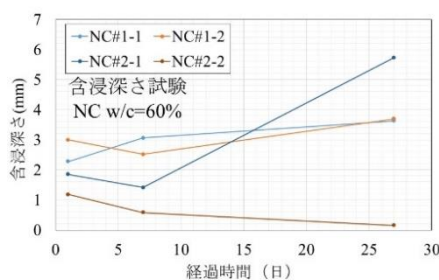


図-3 含浸深さ試験

3.2 一面水分浸透試験による水分浸透現象の確認

(1) 重量変化による浸透現象の確認

図-4 に経過時間に応じた重量変化を示す。この図から含浸材の水分浸透抑制効果がわずかではあるが確認できる。また、フライアッシュセメントを使用した FC が最も水分浸透を顕著に抑制しているのが確認できた。

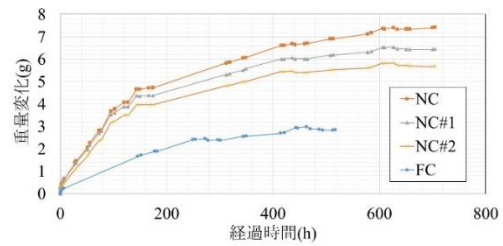


図-4 重量変化

(2) X線 CT スキャナによる浸透現象の確認

図-5 は、浸透面から約 6mm の断面の初期状態、浸透 1 日、5 日目の CT 値の比較を示す。この図から経過時間に応じて CT 値に変化が生じていることがわかる。この結果より、CT 値の値から水の浸透深さが確認できると考えられる。今後詳細な検討を行う予定である。

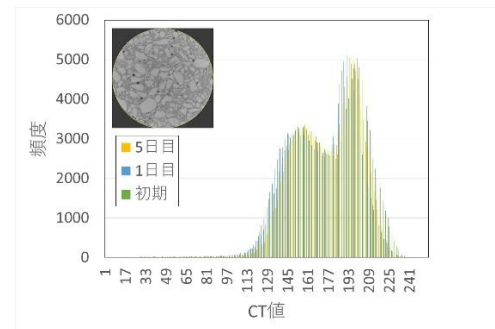


図-5 CT 値の比較

4. まとめ

以下に本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 両含浸材とも約 3mm の含浸深さを確認した。
- 2) 一面水分浸透試験の重量変化から、無処理に比較し、含浸材の水分浸透抑制効果はわずかであるが、フライアッシュの効果は顕著に表れた。また、X 線 CT スキャナを用いた検討では、CT 値を用いて水分の移動現象が把握できることを確認した。今後も継続して測定を行い、詳細な検討を行う。

謝辞：X 線 CT スキャナの撮影は、熊本大学尾原研究室に実施頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) <http://www.civil.kumamoto-u.ac.jp/x-earth/research/index.html>
- 2) 新谷 廉, 他 3 名: X 線 CT スキャナ法を用いたはつりによるコンクリートの損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2079-2084, 2016

モルタルプレートを用いたマクロ・メゾ塩害環境定量評価に関する基礎研究

琉球大学 松田愛子, 琉球大学大学院 吉次優祐,
琉球大学 富山潤, 須田裕哉, 藍壇オメル

1. はじめに

コンクリート構造物の効率的かつ効果的な維持管理を行うためには、構造物のおかれた環境作用を定量的に評価することが重要である。コンクリート構造物の劣化の一つに塩害があり、四方を海に囲まれた島嶼環境である沖縄県では、海から飛来する飛来塩分の供給が多いことや、高温多湿であることから鋼材の腐食速度が速いことが知られている。また、飛来塩分が主要因となるコンクリート構造物の塩害劣化は、同一構造物においても気象条件や海象条件、地形、さらに構造物の部材・部位ごとに劣化の程度が異なることが知られている。そこで本研究は、飛来塩分による塩害の定量評価を目的に、沖縄本島のコンクリート橋上部構造（主桁）を対象に、薄板モルタルを用いた塩害環境調査を行い、マクロ・メゾ塩害環境定量評価法の構築を目指す。

2. 調査方法

本調査では、新潟大学の佐伯ら¹⁾が提案している薄板モルタル供試体を参考にモルタルプレートを作製し、実構造物の測定箇所に設置する。

2.1 モルタルプレートの概要

モルタルプレート(W/C=50%)は写真-1 に示す寸法 $4 \times 4 \times 1$ cm の薄板状のモルタル供試体であり、普通ポルトランドセメント、水、標準砂を 2 : 1 : 6 で配合した。養生は、水中養生期間 28 日とする。

モルタルプレートは暴露面の 1 面(4×4 cm)以外はアルミテープで遮塩し、暴露面の裏面に両面テープを貼り付け、対象物の任意面に貼り付けることができる。モルタルプレートに浸透する塩分を測定することで、大域的な塩害環境や構造物の部材・部位ごとの塩害環境を評価することができる。

モルタルプレートの設置は容易でかつ省スペースで実施できることから、一度に多くの位置の調査が可能である。

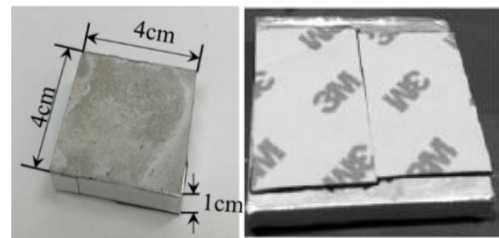


写真-1 モルタルプレート

2.2 塩分測定方法

一定期間設置したモルタルプレートを回収し粉碎後、JCI-SC5 に準じ電位差滴定法により塩化物イオン濃度を分析する。

3. 塩害環境調査

現在、沖縄県の複数の地域で大域的な塩害環境調査を行っており、本論文では西原町（東海岸側）、読谷村（西海岸側）での調査結果を示す。

3.1 対象地域

対象とした地域は、沖縄本島中・北部の西海岸側に位置する読谷村・恩納村の橋梁上部工と沖縄本島中部の東海岸側に位置する西原町の橋梁上部工である。図-1 に対象地域の位置図を示す。



図-1 対象地域位置図

キーワード：塩害環境, コンクリート構造物, モルタルプレート, 薄板モルタル供試体, ランダムウォーク法

連絡先：〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail : e135334@eve.u-ryukyu.ac.jp

3.2 調査結果

2016年9月23日から2016年10月28日までの35日間観測した結果(調査期間1)を図-2に示す。モルタルプレートは対象橋梁海側の両端部と中央に設置し、どちらも海岸から0mの地点に位置する。各地域での風向は、ともに東寄りの風が多かった。このことから、図-2を見てもわかるように全体的に西海岸側と比較し東海岸側の日平均浸透塩分量が多くなっている。

次に、2016年10月28日から11月24日までの27日間観測した結果(調査期間2)を図-3に示す。各地域での風向は、ともに北寄りの風が多かった。前回の結果と比較すると、西海岸側での浸透塩分量は東海岸側に比較し3箇所すべてが多くなっている。これより、モルタルプレートにより卓越風向の違いに影響を受ける飛来塩分量の評価が可能であることがわかる。

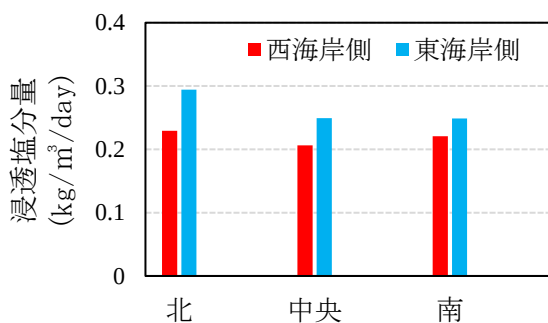


図-2 浸透塩分量測定結果 (調査期間1)

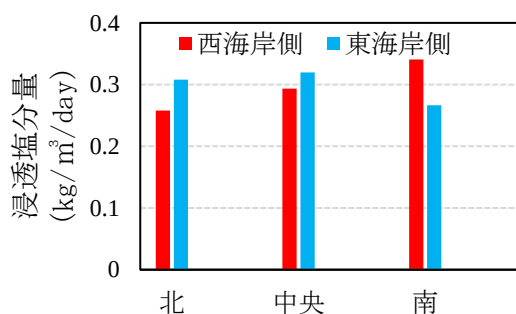
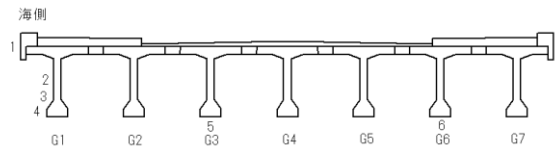


図-3 浸透塩分量測定結果 (調査期間2)

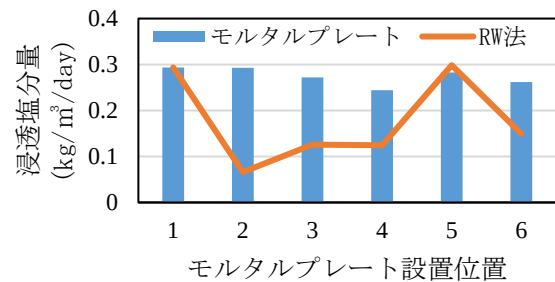
3.3 橋梁上部工の付着塩分量

ここでは読谷村に位置する対象橋梁中央部のモルタルプレートを用いた測定結果とランダムウォーク法(RW法)²⁾による付着塩分量予測を示し、比較した。図-4にモルタルプレートの設置位置と比較した結果を示す。この結果より、実測値と予測

結果には差が見られる個所もあることがわかる。しかし、同様な傾向にあることから予測結果の精度を高めることが可能であると考えられる。



(a)モルタルプレート設置位置



(b)予測結果と実測値との比較

図-4 設置位置と結果の比較

4. まとめ

本研究で得られた知見と今後の課題を示す。

- 1) モルタルプレートを用い、卓越風向の影響により異なる地域の飛来塩分量の測定が可能である。
- 2) 実測値とRW法による予測値には、差が見られる個所もあるが、付着量の傾向は類似していることから、解析で用いる風況や条件を変えることで予測精度を高めることが可能であり、今後の課題である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、沖縄総合事務局南部国道事務所、沖縄県中部土木事務所、読谷村、西原町に協力頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 佐伯竜彦, 能勢陽祐, 菊池道生: 薄板モルタルを用いたミクロ塩害環境評価手法に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.803-805, 2011
- 2) 富山 潤: コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.874-879, 2014

実構造物に使用したコンクリート配合に対するアルカリシリカ反応促進膨張試験

琉球大学 佐古翔輝, 富山潤, 須田裕哉, 藍檀オメル
琉球セメント (株) 比屋根方新, 神谷和志, 上里尚也

1. はじめに

近年、沖縄県のコンクリート用骨材として使用されている新川沖産海砂に微晶質石英や隠微晶質石英などの有害鉱物が含まれており、それらが遅延膨張性のアルカリシリカ反応 (ASR) を起こす可能性があることが明らかとなっている。国内における現行の試験方法である化学法およびモルタルバー法では、反応性の低い遅延膨張性骨材により生じる ASR の危険性を検出できない可能性があり、新しい試験法の検討が行われている¹⁾。文献 2) では、ASR の新しい促進膨張試験として、RILEM の AAR-4.1 「Detection of potential alkali-reactivity-60°C test method for aggregate combinations using concrete prisms」を参考にした検討が行われている。

このような背景の中、沖縄県では、ASR 抑制のために、フライアッシュコンクリートの利用が積極的に検討されている。本研究では、沖縄県でフライアッシュコンクリートを使用して実際に建設された 2 橋梁の下部工および上部工の配合を用い、フライアッシュの ASR 抑制効果を文献 2) で検討されている促進膨張試験により確認した。なお、海砂に起因した ASR の劣化状況の現状は、軽微でかつ限定的である。

2. 試験概要

(1) 使用材料および供試体

沖縄県内の細骨材に使用されている海砂は、図 1 から分かるように、遅延膨張性の ASR を生じる微晶質石英や隠微晶質石英を含む変成岩 (砂岩、頁岩、泥岩等) や堆積岩 (珪質粘板岩、珪岩、変成砂岩、粘板岩等) が 80% 以上を占めており、ASR の生じる可能性のある骨材である。本研究では、沖縄県のコンクリート用細

骨材として使用されている本部産石灰岩砕砂

(非反応性) と新川沖産海砂 (反応性) の混合砂 (F.M=2.8) を用い、供試体を作製した。供試体は、コンクリート中のアルカリ総量が 5.5kg/m^3 となるように特級試薬の NaOH 水溶液を、あらかじめ練り混ぜ水に添加して調整した。表 1 に配合を示す。供試体の寸法は、 $75\times 75\times 250\text{mm}$ (約 3.5kg) のコンクリートプリズム (CPT) である。また、それぞれの橋梁の下部工および上部工の配合に対して普通ポルトランドセメント使用 (NC) とフライアッシュセメント使用 (FC) の 2 水準とした。

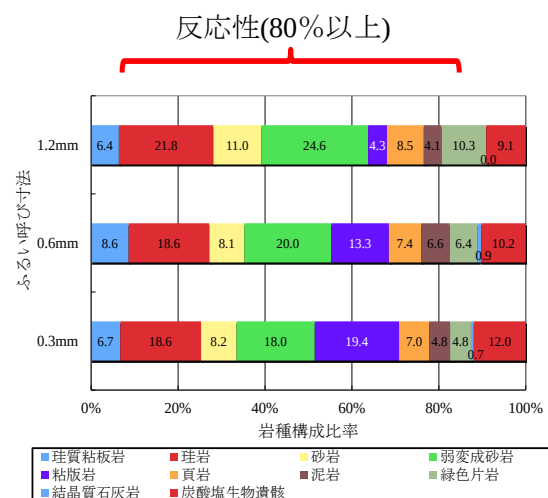


図 1 海砂の岩種構成比

(2) 試験方法

本研究では、RILEM AAR-4.1 を元にした方法で行った。供試体は、アルカリ溶脱と乾燥を防ぐために 1.33mol/l の NaOH 水溶液 50g を吸水させた不織布 1 枚で供試体を包み、その上からラップフィルムで密封する。供試体を格納した格納容器を養生槽へ静置し、温度 60°C 一定環境で養生を行う。

キーワード：遅延膨張性、アルカリシリカ反応、コンクリートプリズム、促進膨張試験、実配合

連絡先：〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 E-mail : e135339@eve.u-ryukyu.ac.jp

表 1 配合表

試験体名	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m³)					
			W	C	FB	S1	S2	G
						(砕砂)	(海砂)	
NC-1	48.5	47.9	156	322	—	310	562	980
FC-1		47.5		—	322	306	552	
NC-2	32	36.8	160	500	—	251	378	1129
FC-2		35.9		—	500	243	363	
W/C：水セメント比，s/a：細骨材率，W：水，C：普通ポルトランドセメント（琉球セメント産）， FB：フライアッシュセメント B 種(琉球セメント産)，S：細骨材，G：粗骨材								

(3)測定方法

長さ変化を計測する 24±2 時間前に、格納容器を養生槽から取り出し、測定室に静置する。

測定の際は、取り出した供試体の余分な水分を取り除き、供試体の質量を測定する。コンタクトゲージ法により測定を行う。測定の材令は、脱枠時、5,10,15,20, 26 週とする。写真 1～4 に測定方法、ラッピング、養生の様子などを示す。

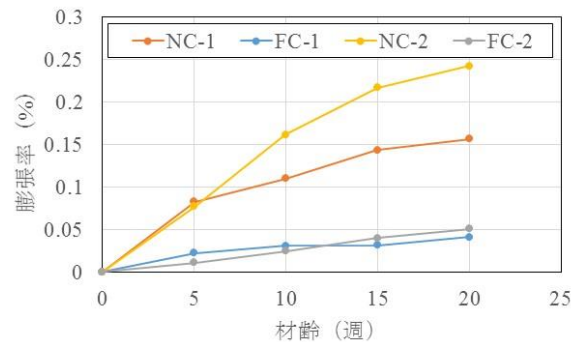


図 2 促進膨張試験の結果



4. まとめ

本研究では、沖縄県でフライアッシュコンクリートが利用され建設された 2 橋梁の下部工および上部工の配合に対し、RILEM AAR-4.1 をベースとした CPT 試験を実施し、フライアッシュの ASR 抑制効果の確認を行った。その結果、フライアッシュを用いない場合に、高アルカリ環境では、膨張挙動を示し、フライアッシュを用いた場合は、その膨張を抑制可能であることを確認した。

3. 試験結果および考察

試験は測定中であり、図 2 に材齢 20 週までの促進膨張試験の結果を示す。なお、図 2 は 3 試験体の平均値を示している。この図から、2 橋梁橋台の NC では膨張挙動が表れているのに対し、フライアッシュセメントを用いた場合は、膨張が抑制されているのがわかる。この結果より、フライアッシュの ASR 抑制効果が確認でき、沖縄県で実施したフライアッシュコンクリートの利用は妥当な判断であったといえる。

参考文献

- 1) 富山潤, 知念正昭, 大宜見圭太, 山田義智: 長期暴露したフライアッシュコンクリート試験体を用いた遅延膨張型アルカリ骨材反応に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp947-952, 2004
- 2) 日本コンクリート工学会: ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, 2014.7

池間大橋橋梁補修補強工事における状況報告

沖縄県 土木建築部 宮古土木事務所 道路整備班
○主任 田中文也

1. はじめに(緒言)

既設橋梁は、長年に渡る供用及び使用環境の悪化に伴い、橋梁自体の疲労、腐食等が進行し、損傷が発見されている。沖縄県の既設橋梁においても、塩害環境の厳しい中、劣化の進行や塩害損傷等の発生が問題となっており、それらの橋梁の機能を維持していくためには、架け替え工事、あるいは補修補強が必要とされている。

沖縄県が管理する道路橋は、平成23年現在で672橋あり、これらの橋梁の大半が老朽化していく中、維持管理コストの増大、架け替えなどの事業が集中し、維持修繕の実施が滞る可能性がある。安全で安心な県民生活の確保ため、本県においては、「沖縄県橋梁長寿命化修繕計画(案)」を策定し、限られた予算の中で効率的かつ効果的に橋梁の維持管理を行うことに留意しながら、橋梁補修補強工事等を進めているところである。

また、本県には、県管理の離島架橋が13橋あり、長大橋である離島架橋の適切な維持管理、補修工事を行うことは、離島の定住条件向上のためにも特に重要である。宮古管内には3つの離島架橋があり、そのうち1つである池間大橋においては、腐食環境下における経年変化に伴うひび割れ等の腐食対策として橋梁補修工事を実施している。また、平成24年の道路橋示方書の改訂に伴い、目標とする耐震性能や落橋防止システムの規定等に関する見直しを踏まえ、池間大橋においても耐震補強工事を合わせて実施することから、池間大橋における補修工事の状況と下部工等の補強工事に関する施工事例について報告する。

2. 池間大橋の概要

2.1 事業概要

池間大橋は平成4年に建設されたPC連続箱桁橋で橋長1,425mの長大な離島架橋である。池間大橋が位置する一般県道池間大浦線は、宮古島市平良池間を起点として宮古島市平良大浦を終点とする約11.8kmの道路であり、池間島と宮古島を結ぶ重要な幹線道路である。池間大橋の位置を図-1に示す。



図-1 池間大橋位置図

また、離島架橋ということで宮古島と池間島間を結ぶ重要度の高い橋となっており、沖縄県土木建築部道路管理課が策定した県管理橋梁の長寿命修繕計画においては、本橋梁は個別管理橋梁として指定されている。橋梁概要としては、以下のとおりである。

キーワード 池間大橋、橋梁補修、耐震補強

連絡先 〒906-0012 宮古島市平良字西里1125番地3F E-mail:tanakafu@pref.okinawa.lg.jp

橋梁概要

- ・ 竣工：平成 4 年 2 月
 - ・ 橋長：1,425m
 - ・ 橋格：二等橋（T-14）
 - ・ 橋種：プレストレストコンクリート道路橋
 - ・ 上部工形式：ポストテンション方式 PC4,5 径間連続箱桁橋（標準部）、ポストテンション方式 PC3 径間連続箱桁橋（航路部）
 - ・ 下部工形式：逆 T 式橋台（A1, A2）、柱式橋脚（P1～P24）
 - ・ 基礎形式：直接基礎（P3, P5）鋼管杭基礎（P3, P5 以外）
 - ・ 幅員構成：全幅員 W=8.75m、有効幅員 W=7.75m（車道 W=6.25m、歩道 W=1.5m）
 - ・ 道路規格：第 3 種第 4 級（V=50km/h）
- （写真-1、図-2 参照）



写真-1 池間大橋全景

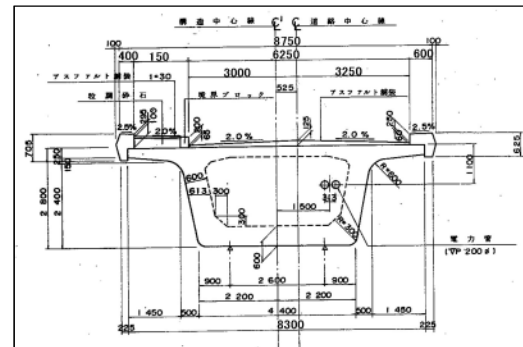


図-2 断面形状図

2. 2設計概要(補修補強)

平成 23 年度より補修設計を行っており、現地で詳細調査（外観調査、コンクリートコア採取、鉄筋腐食度調査）を行い、塩化物イオン試験や中性化試験等の室内試験の結果により、既設の橋梁の劣化度を評価した。劣化や損傷の種類により、補修工法を選定し、総合的な評価（耐久性、施工性、維持管理、経済性等）を行い、対策工法を決定した。ひび割れやうき・剥離に対しては、ひび割れ注入工法や断面修復工法を行うこととし、既設鉄筋に対しては、含有塩分の浸透による鉄筋の腐食が懸念されるため、表面保護工（含浸工法、シラン系）と電気防食を行うこととした。

耐震補強に関しては、旧基準であり、現行基準に要求された耐震性能を有していないため、平成 24 年度より現行の基準で要求されている耐震性能を満足するよう耐震補強設計を行うこととした。耐震性能の照査を行った結果、全ての支承及び橋脚において応力超過と判定された。支承部に関しては、支承補強コンクリートブロックを施工し橋軸直角方向の変位を制限することで補強を行うこととしている。橋脚の耐震補強としては、全ての橋脚に RC 巻き立て工法（STEP 工法）を行い、11 箇所には制震装置であるダンパーを設置することで耐震性能を確保している。

基礎の対策については、既設橋梁の耐震補強工法実例集（平成 17 年 4 月発行(財)海洋架橋・橋梁調査会）において、過去の地震の事例において、基礎の安定性に起因した被害が生じていないことから、橋脚補強・支承変更・落橋防止システムの設置などを優先とし、基礎の補強を不要あるいは最小限とすることが重要であると記述されている。しかし、平成 27 年 6 月 25 日既設道路橋の耐震性能照査及び耐震補強設計について、国土交通省道路局より関係者に対し、基礎の照査に関して事務連絡があったことから、

現在、基礎耐震補強の検討を行っているところである。

2. 3工事概要

上部工については、平成 24 年度より補修工事を実施し、全て完了している。下部工については、平成 26 年度より耐震補強工事に着手しており、下部工の補修工事及び耐震補強工事を同時に進めているところである。既設橋梁については、適切な補修計画や維持管理が必要とされていることから、現在実施している下部工の補修工事及び耐震補強工事について、次章により説明を行う。

3. 施工方法

3. 1補修工事

(1)ひび割れ補修工

コンクリートの耐久性及び防水性の向上を図ることを目的としている。準備工として、施工前に設計図書と現場を照合し、目視によりクラックに沿って、コンクリート面にマーキングを行う。次に下地処理工として、ワイヤーブラシやディスクサンダーなどを使用してひび割れ部の清掃を行う。注入器具の設置間隔決定後、注入器具台座を取り付け、ひび割れ幅に沿ってシール材を塗布し、注入器具も同時に取り付ける。シール材の硬化が確認された後、注入器具を用いて注入材を注入する。注入材の硬化後、シール材及び注入器具を撤去し、ディスクサンダーなどを使用して平滑な面に仕上げ、完了とする。(図-3 参照)

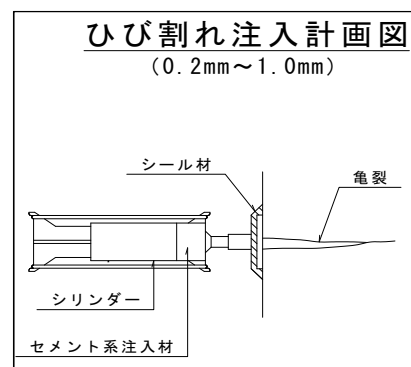


図-3 ひび割れ注入計画図

(2)断面修復工

コンクリートの劣化、鋼材の腐食等によって欠損したコンクリートについて、許容限度以上の劣化因子を含むコンクリートを除去し、当初の形状に修復する。準備工として、施工前に設計図書と現場を照合し、目視によりクラックに沿って、コンクリート面にマーキングを行う。次にははつり範囲に沿ってカッターにて切れ目を入れ、電動ピックなどを用いてコンクリート劣化部をはつり、ディスクサンダー等により鉄筋表面の錆を落とす。ケレンした鉄筋表面に鉄筋防錆材を塗布し、鉄筋防錆材乾燥後、はつり部分にプライマーを塗布し、ポリマーセメントモルタルにて断面修復する。コテを用いて表面を平滑に仕上げ完了とする。(図-4 参照)

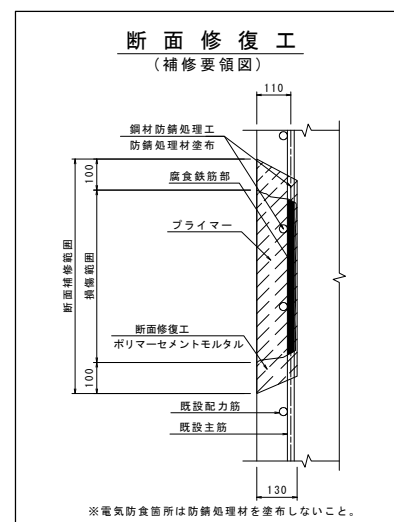


図-4 断面修復工(補修要領図)

(3)表面保護工

コンクリート表面に含浸材を塗布することによって、コンクリートの劣化や鋼材の腐食の原因

となる劣化因子(塩化物イオン、二酸化炭素、水分、酸素など)の進入を抑制する。準備工として、施工前に設計図書と現場を照合を行う。次に下地処理工として、ワイヤーブラシや研磨材等でコンクリート表面の汚れ、粉塵等の除去を行うが、必要以上にケレンしないよう留意する。また、不織布等により油脂、汚れ等の除去を行う。表面含浸率試験により含水率 8% 未満、飛来塩分試験により 50mg/m² 以下を確認し、刷毛・ローラー等を用いて所定量(標準使用量 0.2kg/m²)を塗布する。塗布後、施工面が乾くまでに雨等に濡れないように養生する。(図-5 参照)

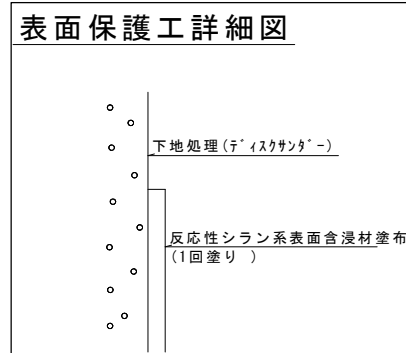


図-5 表面保護工詳細図

(4)電気防食工

電気防食工とは、コンクリート表面に設置した陽極材から、コンクリート中の鋼材に微弱電流(1~30mA/m²)を通電し、塩害による鋼材腐食を抑制することを目的とする。電気防食対象の鉄筋は、全て電氣的な導通が必要であるため、鉄筋間の導通確認として、直流電圧計により鉄筋及び排流端子設置位置の鉄筋との電位差を測定し、1mV 未満で安定した値であれば導通していると判断するが、導通が得られていない場合は、導通用の鉄筋を溶接し導通を得るものとする。

まず、墨出し・溝切削を行うため、陽極材等の設置位置にマーキングを行い、所定の位置にハンドカッター等を用いて溝を切削する。その後、溝内に陽極材の設置を行い、セメントモルタルが充填されるよう陽極材を固定する。また、陽極材の設置に合わせて、排流端子や照合電極等の取付箇所をはつり、取付を行う。排流端子とは、鉄筋と陽極とを直流電源装置を介して電気回路を構成するものであり、照合電極は、モニタリングのため鉄筋の電位を計測するものである。陽極材や排流端子等を取り付けた後、溝内やはつり部を復旧し完了とする。

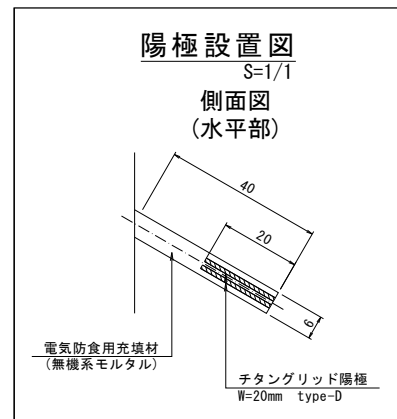


図-6 陽極設置図

なお、陽極材や排流端子等の各リード線はプルボックスまで配線、配管を行い、桁内に設置した直流電源装置(子機)まで配線する。配線後は、通電調整として、通電を行い通電後の電位がマイナス側に分極することを確認する。分極で電位変化量100mV 以上となるよう電位量の設定を行う。また、コンクリート中の鋼材が、適切に防食されているかを確認するために復極量試験を行い、鋼材電位と通電遮断 24 時間後の鋼材電位の差(復極量)が 100mV 以上あることを確認する。(図-6、写真-2 参照)



写真-2 陽極材設置状況

3. 2耐震補強工事

(1)鋼板仮締切工(STEP 工法)

既設橋脚を補強するにあたり、橋脚廻りを締め切る必要がある。締切工法について、比較検討を行った結果、鋼板で仮締切を行う STEP 工法に決定した。STEP 工法とは、対象構造物の周りに分割された締切鋼板(鋼板パネル)を組立て、海中のフーチング上面等に沈設し、圧入ジャッキにより必要な深度まで圧入を行う。圧入と併用して締切鋼板内の土砂を掘削し、止水処理・支保工を設置後、締切鋼板内を排水して、ドライな作業空間を確保する工法である。なお、締切鋼板の圧入反力は、既設構造物に反力ブラケットを設置し、反力とするのを標準としている。

STEP 工法の特徴としては、大規模な浚渫および処理が必要無く環境に優しい、分割して運搬・据付が可能のため梁下空間や作業機械等の制約条件が少ないなどがある。特に従来・類似工法に比べ、桁下空間が狭い場合や施工時の通水阻害や航路確保が懸念される場合等に有効とされており、本現場のような桁下空間が狭い現場条件に対して有効的だと考えられる。(写真-3 参照)



写真-3 鋼板仮締切完了後

(2)橋脚 RC 巻立工

既設コンクリートの周囲に鉄筋コンクリートを増打ちする工法であり、じん性や耐力の向上を図り、粘り強い構造とする工法である。橋脚の耐震性能を現行の基準に満足させるため、鉄筋コンクリートで橋脚の巻き立てを行う。

施工方法としては、鉄筋探査にて既設鉄筋の位置を確認後、アンカー削工位置をマーキングし削工を行う。はつりを行い旧コンクリート面に十分な粗度をつける。削孔内には、エポキシ樹脂系接着材を充填し、所定の定着長が確保できるようアンカー筋を挿入する。その後、鉄筋組立を行い、型枠組立完了後、コンクリートの打設を行う。所定の強度を確認した後、型枠を解体し完了となる。(写真-4、図-7 参照)



写真-4 RC 巻き立て完了後

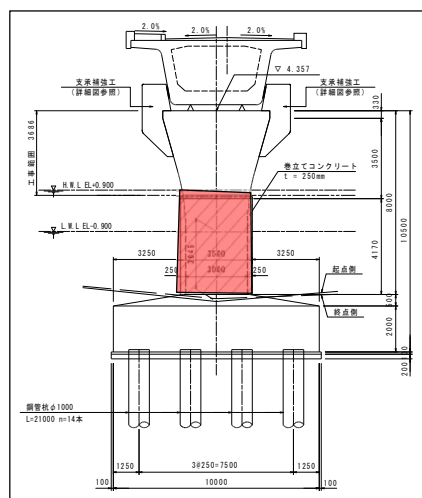


図-7 橋脚補強構造一般図

(3) 支承補強工(変位制限コンクリートブロック設置工)

支承部においては、タイプ A のゴム支承であるため、既設の支承部をそのまま使用する計画である。橋軸直角方向にはレベル 2 地震時に生じる慣性力を分担できる構造を追加することが必要であるため、支承補強工として、変位制限コンクリートブロックを施工する。

施工方法としては、既設鉄筋の位置を確認後、削孔位置をマーキングし、削孔機にて所定の深さ、径で削孔する。新旧コンクリート打ち継ぎ部をチップパー等を使用してチップング作業を行い、旧コンクリート面に十分な粗度をつける。削孔内には、エポキシ樹脂系接着材を充填し、所定の定着長が確保できるようアンカー筋を挿入する。アンカー定着の完了後、鉄筋の組立、支保・型枠の設置を行い、コンクリートを打設する。所定の強度を確認した後、型枠を解体し完了となる。(写真-5、図-8 参照)



写真-5 支承補強工完了後

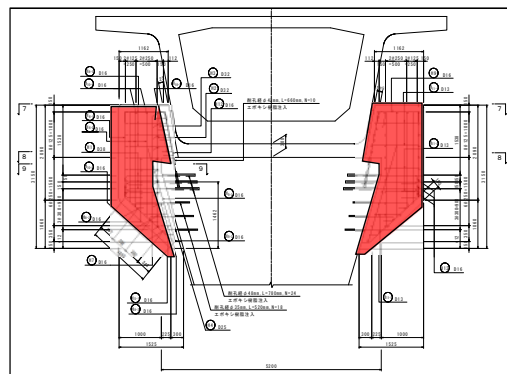


図-8 支承補強工配筋図

(4) ダンパー設置工

ダンパー設置工は、橋軸方向の地震時慣性力を他の橋脚・橋台に分散することを目的としている。本橋梁の既設支承は、水平力分散ゴム支承であるため、その分散効果を考慮し、橋脚における耐力向上の RC 巻き立てと合わせて、本橋梁における地震時の応答値(応力加速度や変位)低減を図っている。

施工方法としては、既設鉄筋の位置を確認後、削孔位置をマーキングし、削孔機にて所定の深さ、径で削孔する。削孔内には、エポキシ樹脂系接着材を充填し、所定の定着長が確保できるようアンカー筋を挿入する。アンカー定着の完了後、先に既設橋梁の上部工と下部工の両側にブラケットの取付を行い、ダンパーを取り付けて完了となる。(写真-6、図-9 参照)



写真-6 ダンパー設置完了後

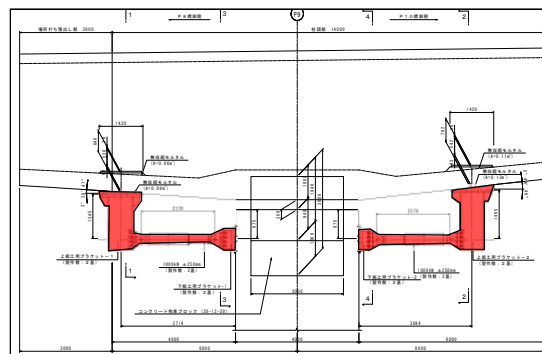


図-9 ダンパー取付図

4. 現場条件に合わせた設計変更や問題点への対応

(1) 支承補強コンクリートブロックにおける支保工ブラケットの転用可能な形状へ変更

支承補強コンクリートブロックを施工する際、鉄筋組立後、型枠組立を行うため、支保工ブラケットを取り付ける必要がある。支保工ブラケットについては、もともと転用する計画であったが、支保工ブラケットの形状については、転用が難しい形状であったため、転用可能な形状へ変更するよう検討を行った。(図-10 参照)

既設橋脚へ取り付けの際にアンカーボルトで固定を行うが、鉄筋探査を行い、既設鉄筋に支障のない箇所を確認したうえで取付を行う。当初の支保工ブラケットの形状では、初回取付時にアンカーボルトの固定位置を確認しているため問題ないが、次期工事へ流用した際にアンカーボルトの位置に変更が生じると容易にアンカーボルトの位置を変更することができない。そのため、支保工ブラケットの切断や加工手間が発生、もしくは転用不可となり新規で支保工ブラケットを製作する必要がある。そこで、アンカーボルトの位置を容易に変更できるようアンカーボルトを取り付ける縦材について、取り外し可能な形状にするため、溶接からボルト締めへ変更することで改善を図った。これによりアンカーボルトの位置に変更が生じ取り付けが難しい場合、アンカーボルトを取り付ける縦材のみ新規製作を行い交換することで転用可能な形状に変更することができた。(図-11、図-12 参照)

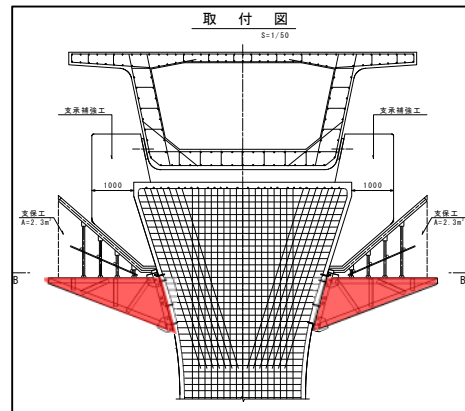


図-10 支承補強工支保工取付図

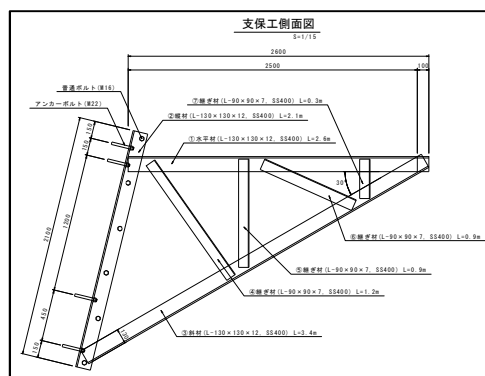


図-11 支保工ブラケット側面図(当初)

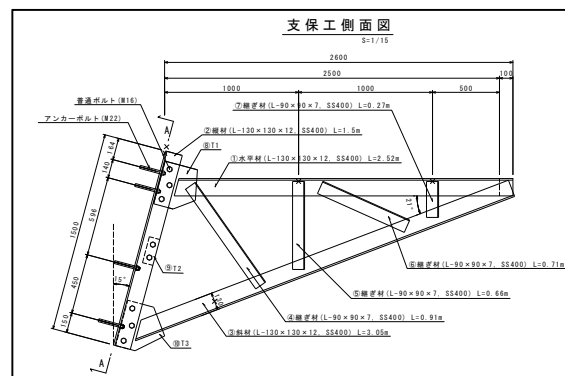


図-12 支保工ブラケット側面図(変更)

(2) 落橋防止装置の溶接不良問題への対応

落橋防止装置等の溶け込み溶接部において不良が確認されたことで、全国的に問題となっているところである。池間大橋耐震補強工事においても制震装置であるダンパーを取り付ける際のブラケットが多数溶接を行い製作される。このブラケットの溶接不良や不正を防止するため、溶接部において非破壊試験(超音波試験)により全数検査を行い、業者による品質管理の強化を図った。また、工場検査を行い、発注者による抜き打ち検査を行った。発注段階において、条件明示により溶接種別の明確化や全数検査の実施等の品質管理の強化を記載し、元請業者や製作会社に問題意識の共有化を図っていきたい。

5. 耐久性向上や下部工長寿命化の取り組み

(1) フライアッシュコンクリートの使用

平成 26 年 1 月 14 日付けで沖縄県土木建築部道路街路課長、道路管理課長より「フライアッシュコンクリートの利用促進について」事務連絡があり、重要構造物の建設にあたってはフライアッシュコンクリートの積極的な利用に取り組むよう検討することになっている。この事務連絡を受け、池間大橋の支承補強コンクリートブロックや RC 巻き立てコンクリートにおいて、フライアッシュコンクリートを使用し、耐久性向上を図っている。

(2) 下部工長寿命化による電気防食システムの導入

塩化物イオン含有量が鉄筋位置で高い橋脚においては、電気防食を行うこととしているが、橋長の長い離島架橋であるため、日常の維持管理が重要課題となっている。そのため、現地計測による維持管理と遠隔監視装置による維持管理について、維持管理方法の比較検討を行った。(図-13 参照)

比較検討の結果、今後 10 年間は、現地計測による維持管理が有利であるが、10 年以後については、遠隔監視システムの方がライフサイクルコストで有利となるため、遠隔監視システムを導入することとしている。遠隔監視システムを導入することで、橋長約 1.4km もありその中で点在する橋脚電気防食の維持管理を人力では無く、離れた場所で管理することが可能となる。

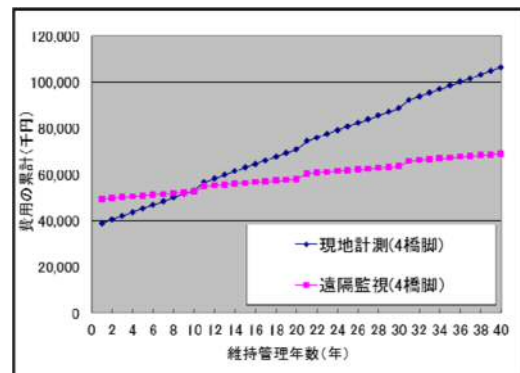


図-13 現地計測と遠隔監視装置の比較

6. おわりに(結言)

今回報告できなかったが、池間大橋については、耐震補強や耐久性検討のため、基礎の照査やダンパー及びブラケットの防食機能の検討を行っている。また、道路橋定期点検要領（平成 26 年 6 月 国土交通省 道路局）の改訂等に伴い、池間大橋における個別管理橋梁維持管理マニュアル(案)の改訂を進めているところである。今回は、池間大橋橋梁補修補強工事に関する施工事例の報告であったが、同様な橋梁補修や耐震補強において、本報告が参考になれば幸いである。

【参考文献】

- ・ 沖縄県 橋梁長寿命化修繕計画（案）（平成 23 年 3 月沖縄県土木建築部道路管理課）
- ・ 離島架橋下部工長寿命化のための電気防食システムの提案（(株) ホープ設計技術管理部、沖縄県土木建築部宮古土木事務所道路整備班）