2023 年度 土木学会西部支部沖縄会

第13回 技術研究発表会

琉球大学 研究者交流会館·50 周年記念会館 2024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),CPDS 認定プログラム

発表プログラム

2024年1月17日

Time Table

		Time table
Start	End	プログラム
9:00	9:30	受付・登録
9:30	9:45	開会式 開会の挨拶:前川 智宏(沖縄会会長) 実施要項の説明:田井 政行(沖縄会副幹事長)
9:45	10:00	Break
10:00	11:40	Session 1 10編 (人流・交通・防災) 座長:嶺井 直樹(沖縄県)
11:40	12:30	Lunch
12:30	14:10	Session 2 10編 (材料・防食) 座長:関 信郎(沖縄総合事務局)
14:10	14:20	Break
14:20	16:10	Session 3 8編 (耐久性・計測) 座長:須田 裕哉(琉球大学)
16:10	16:20	Break
16:20	17:20	特別企画 過酷な塩害環境下におけるステンス鋼を用いた高耐久性鋼橋の開発 ファシリテーター:琉球大学工学部附属地域創生研究センター 下里 哲弘 講演①:ステンレスハイブリッド鋼橋の開発研究(強度特性) 建設技術研究所 荒牧 聡 講演②:ステンレスクラッド鋼の耐食性と実装事例 JFEエンジニアリング 田中 裕明, 岩川 貴志
17:20	17:40	閉会式 優秀発表者賞の表彰:有住 康則(沖縄会副会長) 閉会の挨拶:河南 正幸(沖縄会副会長)

Presentation Schedule

Titles and Authors

○発表時間:7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、土木学会正規会員または学生は登録の必要はありません。

Time	Room A
	Session1:人流・交通・防災 座長:嶺井 直樹(沖縄県)
10:00 ∫ 11:40	

Time	Room A									
	S	Session2:材料、防食 座長:関信郎(沖縄総合事務局)								
	1	古宇利大橋コンクリート暴露20年の塩害耐久性評価 ———— 沖縄県建設技術センター 比嘉 正也	27							
	2	バガスボタニカルコンクリートの機械学習による曲げ強度推定 — 3 琉球大学 平城 有梨,富山 潤,石川 桜史 , Curelabo(株) 山本 直人, (株)バイオアパタト 中村 弘一,琉球ブリッジ(株) 谷中田 洋樹								
	3	機械学習による黒木リグニンを利用したボタニカルプレートの曲げ強度推定	39							
		琉球大学 西浦 梨華,富山 潤,須田 裕哉,平城 有梨, (株)バイオパタイト 中村 弘一,琉球ブリッジ(株) 谷中田 洋樹	39							
	4	4 遅延膨張性ASRにより劣化したコンクリート橋における亜硝酸リチウムの 補修効果検証 琉球大学 宮里 昂志,富山 潤,(株)沖縄建設技研 宮城 敏明, 極東興和(株) 森 裕介, MicroRange 知念 正昭								
12:30	5	塩害劣化予測に対する機械学習モデルの検証と特徴量の解釈 — 5 琉球大学 吉見 映輝, 富山 潤								
14.10	6	高欄コンクリート剥落防止を目的としたプレキャスト版の付着耐久性に関する 研究								
		琉球大学 城間 理央,下里 哲弘,瀧上工業(株) 上田 博士, 東海コンクリート(株) 伊藤 宏辰	57							
	7	電気化学を用いた炭素鋼-ステンレス鋼の異種金属接触腐食反応特性に関する 研究 ————————————————————————————————————	5 59							
		琉球大学 佐藤 志帆,下里 哲弘,建設技術研究所 荒牧 聡, 日鉄ステンレス株式会社 江目 文則	37							
	8	ステンレスクラッド鋼の腐食促進試験による耐食性の評価 ———— 琉球大学 与世田 兼人,下里 哲弘,JFEエンジニアリング株式会社 田中 裕明								
	9	亜鉛系防食技術に対する電気化学的評価 —	63							
	10	分光分析と元素分析によるさびの成分と磁性の特定 琉球大学 新坂 萌, 淵脇 秀晃, 下里 哲弘, 徴日本橋梁建設協会 阿部 浩志, 鈴木 克弥, 利光 崇明	65							

Time	Room A								
	,	Session3: 耐久性、計測 座長: 須田 裕哉(琉球大学)							
	1	炭素鋼-ステンレス鋼突合せ溶接継手の疲労強度特性 — 67 琉球大学 後藤 昌大,下里 哲弘,建設技術研究所 荒牧 聡							
	2	ステンレス鋼と炭素鋼を異材溶接接合した鋼桁の載荷実験 — 69 横河ブリッジホールディングス 加藤 健太郎, 結城 洋一, 石井 博典							
	3	限界状態診断に用いる腐食したボルト連結板の破断特性 — 71 琉球大学 吉野 修平,下里 哲弘, Yasin Mumtaz, 宮地エンジニアリング株式会社 山下 修平							
	4 赤嶺トンネル施工に伴うモノレール橋脚の沈下対策について ———— 沖縄総合事務局 下地 涼大, 城間 和樹								
	5 モノレール直下のトンネル施工における三次元数値解析の活用 —								
14:20	6 高力ボルト防錆用ボルトキャップ内部の腐食環境と防錆性能に関する研究								
16:10	琉球大学 矢ヶ部 菜月, 佐藤 志帆, 淵脇 秀晃, 下里 哲弘								
	7	デジタル撮影による点群データを用いた腐食鋼板の減肉量比較精度評価 — 85 琉球大学 照屋 博紀,下里 哲弘							
	8	台風下と強風下における橋梁周りの風圧特性に関する実測的研究 — 87 琉球大学 磯部 喬幸,下里 哲弘,宮地エンジニアリング 山下 修平, 浅野 文佳,日鉄エンジニアリング 田村 康行, 横河ブリッジホールディングス 加藤 健太郎							

Session 1 人流·交通·防災

交差点の通交方法に関する法規範と市民意識

正会員 北海学園大学 堂柿栄輔

1. 研究の動機と背景

交通整理の行われていない交差点での事故の過失割合は、当事者の常識と法規範が異なる事例の一つである。法学においては日本人の法意識と欧米のそれは異なることが知られており、諸説はあるがその理由も説明されている。事故時の民事裁判では、司法は法に基づき当事者の責任割合の算定を行うが、この時当事者は常識(行為規範)と法規範のずれを意識することになる。

本研究では、交差点の通交方法について、交差点 事故の過失割合の法根拠を示し、法で示される過失 割合についての意識調査から、法規範と意識のずれ を示した.

2. 過失割合の法規範

(1)交通事故の責任

交通事故では、刑事責任、民事責任及び行政処分の3つの責任が問われるが、過失割合は民事上の責任として数値化されている¹⁾. 社会の法秩序維持のための刑事責任や、道路交通の安全の確保を目的とし公安委員会が行う行政処分に対し、民事責任は損害賠償に関するものであり被害者の被った損害を填補し金銭により原状回復を図ることを目的とする. ここで事故は被害者にも過失がある場合が多く、諸要素を考慮して加害者、被害者双方の過失割合を判断することになる. この時、損害の公平な負担の観点から、被害者の被った損害額から被害者の過失の程度を減額する(過失相殺)することとなる. 過失割合は被害者、加害者双方の責任を法規範に基づき数値化したものであり、直感的に分かりやすく意識調査による法規範の評価もこれを用いた.

(2) 交通整理の行われていない交差点の通行方法

一方が優先道路である交通整理の行われていない交差点での、自動車と自動車の事故の過失割合を図-1に示す.過失割合は優先車Aが10、劣後車Bは90である.優先道路を通行するAが10の過失を要求される根拠は道路交通法(以下法)第三十六条四項及び法第四十二条一項にある.

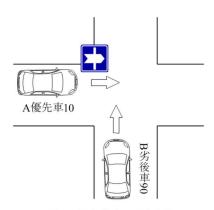


図-1 優先道路の過失割合

・法第三十六条四項:車両等は、交差点に入ろうとし、 及び交差点内を通行するときは、当該交差点の状況に 応じ、交差道路を通行する車両等、反対方向から進行 してきて右折する車両等及び当該交差点又はその直近 で道路を横断する歩行者に特に注意し、かつ、できる限り 安全な速度と方法で進行しなければならない

・法第四十二条一項:車両等は、道路標識等により徐行すべきことが指定されている道路の部分を通行する場合及び次に掲げるその他の場合においては、徐行しなければならない。

一 左右の見通しがきかない交差点に入ろうとし、又は 交差点内で左右の見通しがきかない部分を通行しようと するとき(当該交差点において交通整理が行われている 場合及び優先道路を通行している場合を除く)。

法第四十二条一項では徐行の義務はないとされるが過失は10であり上記二つの条文は相矛盾する.その理由は法第三十六条第四項が法第四十二条一項に優先すると考えれば理解できる.優先道路を通行する車両は、見通しのきかない交差点であっても徐行の必要はない(法第四十二条一号)が、一方交差道路を通行する車両等に注意し、できる限り安全な速度と方法で進行する義務(法第三十六条四項)を有する.これは他方の一時停止標識等の有無に関わらずである.「できる限り安全な速度と方法で進行する」が「徐行の必要はない」とは如何なる運転行為なのか.一般には理解が難しいが、「徐行の必要はない」ととは、徐行してはならないことではない.従って「できる

キーワード 交通事故,交差点,法規範

連絡先 〒001-0903 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目 北海学園大学工学部社会環境工学科

E-mail: dohgaki@cvl.hokkai-s-u.ac.jp

限り安全な速度と方法」で進行した結果、徐行となることがあってもよいことになる。これは法特有の表現で、言われてみれば反論の余地がない。これらのことから過失割合の設定は、優先する側の権利ではなく"優先させて頂く"側の義務の視点に立つと言える。過失割合は多くの判例の積み重ねであり市民常識の反映ではない。

3. 過失割合に対する意識

(1) 設問形式

一方に一時停止標識を有する図-2の交差点を設定し意識調査を行った.この交差点での事故時の過失割合は参考文献⁴⁾⁵⁾からA20, B80である. 調査は過失割合の評価として行った. 設問を以下に示す.

【設問1】Aの過失20、Bの過失80について

- ①まあまあ妥当
- ②「止まれ」側の過失100,もう一方0
- ③ 「止まれ | 側の過失60. もう一方40
- ④「止まれ」側の過失(),もう一方()

【設問2】回答の立場(視点)について

- ①Bの立場(運転者)
- ②Aの立場(運転者)
- ③両者の立場

【設問2】は【設問1】に続く設問である.【設問1】の回答の直後に,回答の立場①~③を選択してもらった. 設問形式は自由回答付き多肢選択法,回答は調査の趣旨が伝わるよう集合調査法で行った.回答者は185人,男子大学生(2年生~3年生)が90%である.

(2)分析結果

図-3 は回答の立場による過失割合の選択結果である. 横軸分類は劣後車の過失割合であり, 例えば「100 対 0」の 33.3%なる値は「A 優先側」の立場で回答した割合, 13.8%は「B 停止側」の立場での回答結果である.【設問 1】では, 回答者は A, B 何れかの立場で回答したと思われるが, 【設問 2】ではその立場を「A 優先側」, 「B 劣後側」または「両者」の何れかで選択してもらった.

① 標準値80対20の評価

回答の立場に関わらず、80対20の過失割合の指示が大きい.しかし「B停止側」の立場では62.1%であるのに対し、「A優先側」の立場では38.1%と小さい.つまり「A優先側」の立場では法規範に納得しない割合が多いことになる.「B停止側」に85以上の過失を求める割合は、「B停止側」の立場では27.6%、「A優先側」では55.5%となった.一般に社会規範に関する意識調査では自身の責任を小とする傾向があり、この数

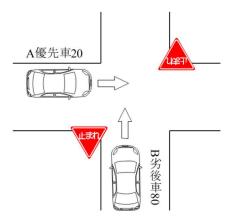


図-2 一時停止交差点の過失割合



値のずれは妥当であろう.

② 100対0について

この過失割合は、一時停止側に 100%の責任を問うものであり、法規範(第三十六条四項)と市民意識のずれが顕著な例である。一時停止標識の有無に関わらず両者に交差点通行の注意義務を促す法規範は優先側の立場の 33.3%の人にとって理解が難しいことになる。交差点の通行に関し我が国の法には優先権(権利)の意識が低く、安全の確保は"互いに注意する"ことを前提とする。一時停止の義務が他方の優先的な通行権を意味しないことは、一時停止後の事故の過失割合が 40 対 60 であることからも分かる。我が国では「Yield」や「GIVE WAY」の規制が可能か否か興味深い。

4. まとめ

ここでの意識調査の被験者は男子大学生であり属性が限られている。属性の異なる一般市民を対象とした調査結果がより説得力を有するが、一方限定された属性でも相当の意識差を知り得たことは一つの成果と考える。

【参考文献】

1) 倉田卓次, 宮原守男:交通事故損害賠償必携(資料編), 新日本法規出版(株), 平成30年11月.

国道329号金武インター交差点の渋滞対策について

伊良波 憲1・岡本 哲次2・山城 元3・村田 太紀4

- 1沖縄総合事務局 北部国道事務所 管理第二課長 (〒905-0019 名護市大北4丁目 28-34)
- 2沖縄総合事務局 北部国道事務所 道路保全官 (〒905-0019 名護市大北4丁目 28-34)
- 3沖縄総合事務局 北部国道事務所 管理第一課長 (〒905-0019 名護市大北4丁目28-34)
- ○4沖縄総合事務局 北部国道事務所 管理第一課 管理係長 (〒905-0019 名護市大北4丁目 28-34)

一般国道 329 号は、沖縄本島の東海岸を南北に走る主要幹線道路であり、金武町字金武〜同町字屋嘉の 2 車線区間は、沖縄自動車道の金武 IC、屋嘉 IC に接続しているため交通量が多く、朝夕のピーク時には渋滞 が発生し、右左折時の事故や追突事故等が発生している。

金武インター交差点では、沖縄自動車道の金武 IC に直結するキャンプ・ハンセン新ゲートの完成に伴い、 交通の流れが大きく変化することが予想されたため、渋滞及び事故対策として、付加車線の設置等、安全・ 安心な道路空間を確保する交差点改良を実施した。本稿は、上記の国道 329 号金武インター交差点の渋滞対 策・事故対策事業について、その経緯と整備内容の報告を行うものである。

キーワード 渋滞、交通転換、事故対策

1. はじめに

(1) 一般国道329号金武地区の交通状況

一般国道 329 号の金武町字金武~同町字屋嘉区間(延長約 11 km)は 2 車線区間となっており、沿道には住宅地や火力発電所、米軍基地キャンプ・ハンセン等の施設が位置している。

地域内の主要な道路網である国道 329 号の当該区間に おいては、朝は上り(北)方向、夕方は下り(南)方向 の慢性的な交通渋滞が発生し、特に朝の交通渋滞は、屋 嘉地区から金武地区へ向かう金武中学校生徒のバス通学 に影響を及ぼし、6 時台発のバスに乗車しても始業に間 に合わない生徒が多くいる状態であった。

また、バスに定時性がないことに起因する、父母によるマイカー送迎もさらに交通渋滞に拍車をかけ、加えて、 渋滞を避けたい車両による集落内道路の抜け道利用も集 落内に危険を及ぼしているという課題があった。



図-1 国道329号金武地区、屋嘉地区の交通状況

(2) 金武地区渋滞対策検討委員会の設置

金武町は、平成25年4月に公表された「沖縄における在日米軍施設・区域に関する統合計画」に対して、平成26年4月、本島中南部に位置する米軍基地施設の一部をキャンプ・ハンセンへ受け入れることを表明。これに伴う基地施設移設工事が、基地内で行われていた。

こうした状況もあり、基地施設移設工事完了後、キャンプ・ハンセンからの発生集中交通量が増加し、国道 329 号の交通渋滞が悪化することが懸念された。

防衛省沖縄防衛局では、渋滞対策の一環として、国道 329 号現道に位置しているキャンプ・ハンセンゲートを 移設、閉鎖し、新たなゲートを金武 IC ランプ部に直結 させるための道路整備を計画していた。

一方、北部国道事務所では、国道 329 号現道(金武町字金武中川~同町字金武浜田)の幹線機能低下を改善するため、国道 329 号金武バイパスを事業中であった。



図-2 金武インター交差点周辺の道路整備計画

連絡先 沖縄総合事務局北部国道事務所 管理第一課 管理係 E-mail:daiki.murata.t9f@ogb.cao.go.jp

以上のことから、国道 329 号(金武町字金武〜同町字 屋嘉間)の2車線区間の渋滞対策は、単に原因となる交 差点単独の改良検討だけではなく、周辺の道路改良事業 の状況を含めた、総合的な改善の検討を各関係機関の協 力のもとに進める必要があった。

そのため、北部国道事務所では、各関係機関と情報共 有及び必要な対策案を検討する場として、「金武地区渋 滞対策検討委員会」を平成31年3月に設置した。

当該委員会では、朝夕の交通渋滞の主な区間となっていた金武地区、屋嘉地区、それぞれについて対策案を検討しているが、本稿では、金武地区内にある金武インター交差点の渋滞対策について紹介する。

(金武地区渋滞対策検討委員会)

○沖縄総合事務局
・開発建設部 道路建設課長
道路管理課長
・北部国道事務所 (技)副所長(改築)
(技)副所長(管理)
○沖縄防衛局
・企画部 地方調整課 基地対策室長
・沖縄高速道路事務所 統括課長

図-3 金武地区渋滞対策検討委員会メンバー

2. 交通状況の整理

(1) 渋滯原因の調査

平成30年9月に実施した金武インター交差点(無信号交差点)の交通実態調査によると、交通混雑は朝7:20~8:00で発生、最大滞留長は910mであった。金武インター交差点を境にして、東側断面において交通量が増加しており、また、その交通量の割合は沖縄自動車道金武ICからの合流車両が約4割を占めていた。

同断面の車種別交通量を見ると 7:00~7:30 にかけて米軍関連車両 (Y ナンバー及び軍用車両) の割合が、約4割を占めていた。



図-4 金武インター交差点の渋滞状況

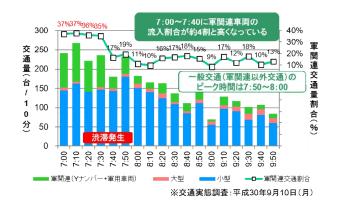


図-5 金武インター交差点東側断面の車種別交通量

加えて、金武インター交差点~金武(南)交差点にかけてカメラを設置し、交通状況を観察したところ、金武(南)交差点及び(仮称)ファミリーマート前交差点における信号や、コンビニ等の沿道施設への出入りによる速度低下が、金武インター交差点まで伝播していた。特に(仮称)ファミリーマート前交差点の信号は、歩行者横断用の押しボタン式信号であったが、車両の流れが途切れないために、住宅区画側の従道路から国道329号に流入できない車両運転手が、押しボタンを作動させる様子が確認された。





図-6 金武インター交差点付近の交通状況

(2) 金武インター交差点における渋滞発生メカニズム

本上記の交通実態調査から、金武インター交差点の渋滞発生メカニズムを分析すると、下記の通りであった。

- ①金武インター交差点~金武(南)交差点の単路部で 交通容量の約9割程度の交通量が流入。
- ②単路部での押しボタン式信号作動や沿道施設への出 入等により、交通容量が一時的に低下し、速度低下が発

生。金武インター交差点まで速度低下が伝播。

③沖縄自動車道金武ICから国道329号への合流部において、織り込み交通により、更なる速度低下が発生。後続車両に速度低下が伝播し、低速区間が延伸。

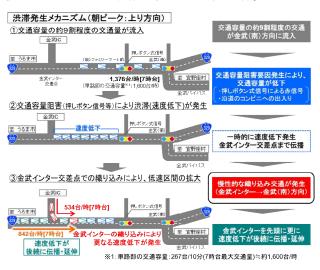


図-7 金武インター交差点の渋滞メカニズム

3. 対策の検討

(1) 短期対策の実施

北部国道事務所では、すぐに実施できる対応策として、 金武インター交差点の合流部における手前織り込みを防 ぎ、スムーズな合流を促すことを目的に、合流部にポス トコーンを設置した。(令和元年6月)

効果検証のため同年7月に実施した交通実態調査において、滞留長短縮、旅行速度向上、バス通学者の遅刻者なし等、一定の効果が見られた。

しかし、令和2年2月の交通実態調査において、金武インター交差点~金武(南)交差点区間の交通量が大幅に増加していることが確認され、短期対策実施前と同程度の交通渋滞も確認したため、短期対策の改善効果は一時的なものとなった。

そのため、北部国道事務所では追加の対策案を引き続き検討することとした。



図-8 短期対策:ポストコーンの設置状況(出典:Google Map)



図-9 交通実態調査状況 (H30~R4年度)

(2) 交通シミュレーションの実施

沖縄防衛局では、国道 329 号の渋滞緩和を目的としてキャンプ・ハンセン新ゲートを金武 IC に直結させる道路整備を進めていた。これにより国道 329 号現道に位置していたゲートが閉鎖され、米軍関連車両の交通の国道329 号への流入が減少するなど、金武地区の交通流が大きく変化することが予測された。

このため、北部国道事務所では、沖縄防衛局から基地施設移転後の推計交通量データの提供を受け、新ゲート直結道路完成後の交通流変化を加味した交通シミュレーションを実施し、キャンプ・ハンセン新ゲート完成時+基地機能移転後の交通流を再現することで、金武インター交差点における最も効果的な渋滞対策案を検討することとした。

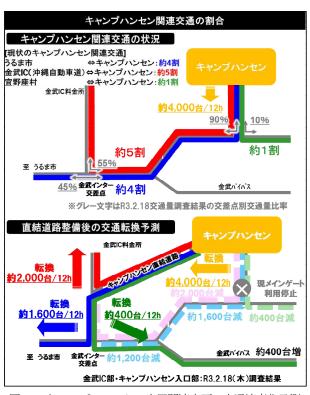


図-10 キャンプ・ハンセン米軍関連車両の交通流変化予測

a) 朝ピーク時の交通状況検証

新ゲート直結道路整備により、米軍関連車両の交通量が新ゲート直結道路へ転換することで、国道329号現道のキャンプ・ハンセン入口交差点〜金武インター交差点間の走行速度が向上するため、既存形状のままの金武インター交差点でも、滞留長が大幅に低減することが分かった。

①朝ビーク時の交通状況の検証



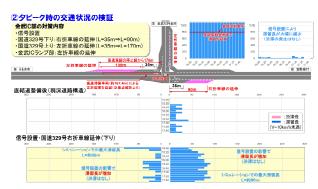
図-11 朝ピーク時の交通シミュレーション

b) タピーク時の交通状況検証

新ゲート直結道路整備により、夕方、金武 IC ランプ部〜国道 329 号うるま市方面への右折需要が増加し、金武インター交差点の金武 IC ランプ部側が混雑することが確認された。

対応策として、金武 IC ランプ部の左折車線延伸や、

うるま市方面への右折可能時間を作るため、金武インター交差点の信号交差点化を検討、シミュレーション結果として、金武 IC ランプ部の混雑が大幅に減少することが確認された。ただし、信号交差点化することで、同時に国道 329 号側に渋滞が発生することが確認されたため、この対応策として、国道 329 号の上り線側(北向け)の金武 IC ランプ部への左折車線を L=35m から L=170m に延伸、下り線側(南向け)の金武 IC ランプ部への右折車線を L=35mから L=90mに延伸することが交差点改良の素案として考えられた。



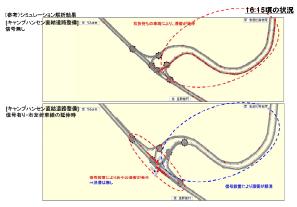


図-12 タピーク時の交通シミュレーション

4. 交差点改良の実施

(1) 改良案の追加

北部国道事務所では、3. (2) b)の交差点改良素案をもとに、金武インター交差点改良の詳細設計を進めた。 その結果、より効果的な渋滞対策として、金武ICランプ部の右折2車線化と受け側である国道329号下り線側(南向け)の一部2車線化の対策を追加した。

別添3



図-13 金武インター交差点改良案

(2) 交差点改良施工

上記改良案をもとに、令和3年1月から金武インター交 差点の改良工事を着工。

沖縄防衛局がR5年3月末に供用を目指して、整備を進めていた新ゲート直結道路に合わせる形で、同じくR5年3月末に金武インター交差点改良を供用した。



図-14 金武インター交差点改良前後①



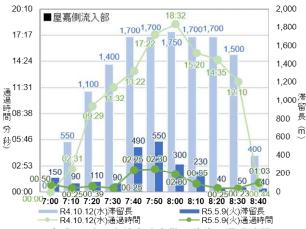
図-15 金武インター交差点改良前後②

5. 対策の効果

金武インター交差点改良及び新ゲート直結道路の供用 後の約1か月後(令和5年5月)の交通実態調査による と、供用前の令和4年10月の調査と比較して、金武イ ンター交差点東側断面において、断面交通量約23%の 減少を確認した。また、これにより、金武インター交差 点の上り線側(北向け)の通過時間短縮、及び、滞留長 の大幅な減少を確認した。



図-16 金武インター交差点供用後の断面交通量の変化



▲金武インター交差点改良供用前後の通過時間

図-17 金武インター交差点供用後の通過時間比較

また、供用後の約半年後(令和5年9月)にも交通実態調査を実施したところ、金武バイパス供用の効果と合わせてではあるが、生活道路(金武町道)の交通量が約4割減少していることが確認され、同町道を含めた周辺の生活道路の年あたりの事故件数が減少していることが確認された。ただし、事故件数はR2-3年のコロナ禍のイタルダデータの分析であり、コロナ禍明けのデータでも改めて比較、分析が必要と認識している。

別添3



図-18 国道 329 号周辺の事故発生個所

●生活道路における交通量と事故件数の変化

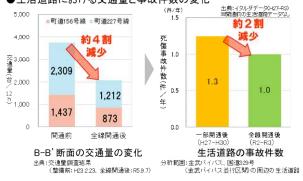


図-19 生活道路の交通量・事故件数

6. まとめ

金武インター交差点改良における一定の整備効果が確認されたが、R5 年度はコロナ禍からの回復期にあたり、今後沖縄県全体で国内旅行者やインバウンド等観光交通

も増加してくると考えている。そのため、引き続き当該 交差点の交通状況の確認を行っていく必要があると考え ている。

また、今回本稿では、金武インター交差点にフォーカスした渋滞対策検討について紹介したが、北部国道事務所では、屋嘉地区における渋滞対策や、今回の交通流変動を踏まえた金武地区〜屋嘉地区の区間における交差点集約や、信号機の廃止・効率化について「金武地区渋滞対策検討委員会」にて引き続き検討を行い、金武地区内のさらなる交通混雑の緩和について対応していくこととしている。

7. 謝辞

金武地区渋滞対策検討委員会や金武インター交差点改良を進めるにあたり、関係省庁や自治体、警察、西日本高速道路株式会社の皆様には、情報提供等、多大なご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

図 1~7 及び図 9~15:金武地区渋滞対策検討委員会資料

図 16~17:北部地域渋滞対策 WG 資料 図 18~19:金武地区渋滞対策検討委員会資料

メッシュ間 OD ペアでみた公共交通不便地域に関する基礎的分析 〜沖縄本島中南部都市圏を対象として〜

琉球大学大学院 上間大輔 琉球大学 神谷大介

1. はじめに

本研究の対象地域である沖縄本島中南部都市圏では、慢性的な渋滞問題の改善策等として、路線バスやモノレール等の公共交通利用の促進を挙げている。しかし、公共交通網のほとんどを担っている路線バスでは、図-1に示す運転手不足や高齢化、さらには利用者の減少により、路線の維持・確保が困難となっている。働き方改革関連法の適用による 2024 年問題を踏まえると、更なる供給能力の低下が危惧される。このため、より効率的な公共交通網の形成が必要である。

これまで、公共交通不便地域や空白地域は、バス停の有無やバス停までの距離等のみで議論され、人々の移動は考慮されていない.

以上の認識の下,本研究では,対象地域内住民による500mメッシュ間の移動実績データを用い, 顕在化された移動ニーズに現行の公共交通網が対応できている割合を評価することを目的とする.

2. 移動実績データ

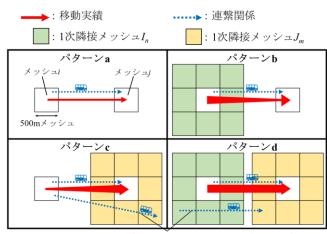
本研究では、町田らの研究¹⁾と同様、株式会社ブログウォッチャー提供のアプリケーションから取得される携帯電話 GPS データを、15 分以上滞在した 500m メッシュ間 OD(Origin-Destination)で集計された移動実績データ(単位:トリップ)を扱う.

対象期間は2021年10月1日から2022年10月31日の平日であり、公共交通の運行時間帯である6時台から23時台に発生する移動を対象とする.なお、対象者は対象地域内居住と推定される者である.

町田らりは通勤時間帯における住民の移動実績の発生量と、平成27年国勢調査における当地(500mメッシュ)に常住する15歳以上就業者・通学者総数で相関分析を行っている.その結果、相関係数が0.96であり、移動実績の拡大係数が30.0であることを明らかにしている.



図-1 大型二種免許保有者数及び路線バス輸送人員



メッシュi、j間以外に連繋関係があるメッシュ間は集計の対象外

図-2 各パターンにおける移動実績の集計処理

3. 公共交通連繋関係

公共交通におけるメッシュ間の繋がりを表す指標として、町田ら 1)の論文で定義されているメッシュ間バス路線連繋関係を算出する. なお、本研究では、町田ら 1)のバス運行データに沖縄都市モノレールの平日ダイヤを加えて算出し、メッシュ間公共交通連繋関係(以下、連繋関係)とする.

4. 公共交通不便地域間の移動実績

(1) 移動実績の集計処理

2.及び3.で示した移動実績と連繋関係を用いて, 連繋関係の有無別で移動実績を集計する.このと き,連繋関係があるメッシュi,jにおいて,1次隣

キーワード 公共交通不便地域,移動実績,効率的な公共交通網 連絡先 〒903-0213 西原町字千原 1 琉球大学大学院理工学研究科 E-mail: k238522@eve.u-ryukyu.ac.jp

接(500m)メッシュを含めた移動を考慮し、図-2及び下記に示すパターンaからdの4つの条件を設け、それぞれの集計処理を行った。

- a) メッシュ i からメッシュ j への移動実績を集計
- b) メッシュi及びメッシュiの1次隣接メッシュ I_n からメッシュjへの移動実績を集計 [n:1次隣接メッシュ番号(n=1,2,...,8)]
- c) メッシュiからメッシュj及びメッシュjの1次 隣接メッシュ J_m への移動実績を集計 [m:1次 隣接メッシュ番号(m=1,2,...,8)
- d) メッシュ i 及びメッシュ I_n からメッシュ j 及び メッシュ J_m への移動実績を集計

なお、パターン b、c、d の集計の際に、1 次隣接メッシュが関連するメッシュ間(メッシュ I_n , j 間、メッシュ i, J_m 間、メッシュ I_n , J_m 間)に連繋関係がある場合、図-2 に示す通り、そのメッシュ間は集計の対象外とする。したがって、1 次隣接メッシュが関連するメッシュ間のうち連繋関係が無いメッシュ k, l 間の移動実績を含めてメッシュ i, j 間の移動実績を集計する。

また、上記の集計の際、メッシュk及びlが複数メッシュの1次隣接メッシュであることで、メッシュk、l間の移動実績が複数のメッシュi、j間で重複して集計される。そのため、メッシュ間の移動実績を重複する数で除し、等分した移動実績をそれぞれのメッシュi、j間で集計する。

以上の条件の下,対象地域内の全 3,748,096 メッシュ間のうち,移動実績のある 537,474 メッシュ間 (1日1時間あたり 3,220 トリップ) において集計を行う.これにより,各パターンにおいて,総移動実績に対する連繋関係が無い公共交通不便地域間の移動実績の占める割合を明らかにする.

(2) 各パターンにおける集計結果

(1)の結果、各パターンで得られた連繋関係の有無別の移動実績を表-1 に示す. これより、パターン a では、公共交通不便地域間が全体の 8 割近くを占めており、パターン b, c では、どちらも 6 割近くを占めている. また、パターン d では 3 割近くの移動実績が公共交通不便地域間となっている.

また、パターンdにおいて、どのメッシュ間が公 共交通不便地域間となっているのかを明らかにす るため、移動実績上位 50 位の空間分布を図-3 に示

表-1 各パターンにおける連繋関係の有無別移動実績

パターン	連繋関係有り 移動実績	公共交通交通不便地域間 移動実績	公共交通不便地域間 移動実績の占める割合
a	719 (トリップ/日・時)	2,501 (トリップ/日・時)	77.7%
b	1,343 (トリップ/日・時)	1,877 (トリップ/日・時)	58.3%
c	1,337 (トリップ/日・時)	1,883 (トリップ/日・時)	58.5%
d	2,243 (トリップ/日・時)	977 (トリップ/日・時)	30.3%

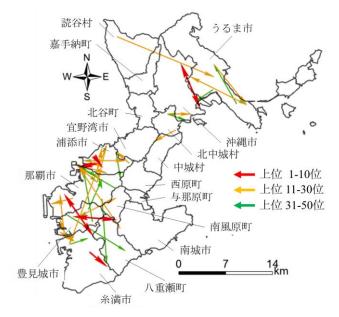


図-3 パターン d における公共交通不便地域間移動実績 上位 50 位の空間分布

す. これより, 宜野湾市及び中城村以北と以南の 2 地域に分かれて分布していることがわかる.

5. おわりに

本研究では、平日における沖縄本島中南部都市 圏住民の移動実績と公共交通の運行データを基に 算出したメッシュ間の連繋関係の有無から、公共 交通不便地域間の移動実績を明らかにした。その 結果、パターンdでも約3割の移動には対応できて いないことが明らかとなった。なお、ここでの結 果は1日1本でも運行されていた場合は連繋関係あ りと判断している。今後は運行本数を考慮すると ともに、観光客等の域外居住者の移動も含めた分 析を行うこととする。

謝辞:本研究は JSPS 科研費, JP21K12483, JP22H00222, JP23H00197 の助成を受けたものです. 参考文献

1) 町田宗瞭,神谷大介,眞栄里和希:携帯電話 GPS データを用いた人流に対するバス運行本数の評価,交通工学論文集,交通工学研究会, Vol.9, No.4, p.A_114-A_119, 2023.

道路利用からみたイリオモテヤマネコロードキルに関する基礎的考察

琉球大学 〇金城三華 神谷大介 国場有沙 琉球大学大学院 上地安諄 株式会社中央建設コンサルタント 仲村一起

1. はじめに

本研究の対象地域である西表島は,2021年に世界自然遺産に登録されたが,IUCN (国際自然保護連合)からは希少野生生物のロードキルなどの問題を指摘されており,西表島では個体数が100頭程度と推定されるイリオモテヤマネコのロードキルが脅威と位置づけられているり.これまで,西表島ではロードキルに対する様々な対策が講じられてきたが,図-1に示すようにじこロードキル件数は増加傾向にある.

先行研究^{2), 3)}ではロードキル発生に関係すると考えられる要因(以下,ロードキル発生要因)を整理し,ロードキルとの関係を分析した.しかし,ロードキルを明確に説明できる要因の特定には至っていない.このため,走行速度抑制がロードキル対策に重要な手段として考えられている.そこで本研究では,走行速度及びこれと関係する視距⁴⁾を発生要因の一つとして新たに設定し,ロードキルとの関係について考察する.

2. 車両旅行速度の調査概要及び分析方法

本研究では、図-2 に示す 15 地点に BT (以下、Bluetooth) スキャナを設置した. 本調査機器は、設置地点を通過した BT 機能搭載機器の通過時刻と 秘匿化処理を行った固有 ID を記録している. 車両 旅行速度分析では、2022 年 2 月 12 日~2023 年 10 月 6 日に実施された交通実態調査 5) で観測されたデータを用いて、車両旅行速度を走行方向別(上り:西表①向け、下り:南風見①向け)に算出する.

図-3 に 1km あたりの交通事故件数が多い西表② ~西表③上りの月別車両旅行速度の代表値の変化を示す. 有意水準 0.05 として, 2022 年と 2023 年の平均値の差の検定を行うと, 上りにおいて速度上昇は 5月, 低下は 7・9・10 月, 下りにおいて上昇は 3・5月, 低下は 7~10 月となった. これより,

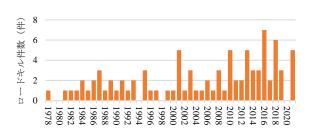


図-1 年別イリオモテヤマネコロードキル件数²⁾





図-3 西表②~西表③上りの月別車両旅行速度

2023 年夏季以降に実施した施策が有効に働いた可能性がある.この原因の特定については今後の課題とする.

3. 視距の調査概要及び分析方法

2023年5月10日に西表島県道215号線の始点から終点までを法定速度(集落外:40km/h,集落内:30km/h)で走行しながらGoProで道路状況を撮影した。車両目線の視距を測定し、車両旅行速

度の制動停止距離⁶が視距を上回っている安全停止 困難区間を推定する.

視距の分析では、GoProで道路状況を撮影した動画を「Telemetry Extract for GoPro」で読み込み、各時刻における緯度経度、日時と走行距離を表示させる。これより、撮影動画上の車両所在地点及びその地点における最長視認地点の時刻を確認し、両時刻の走行距離の差から視距を測定する。

すべり摩擦係数 ⁷⁾と制動停止距離の関係式 ⁴⁾より, 分析対象区間の法定速度 40km/h の制動停止距離は 路面乾燥時 37m である. また, 表-1 より, 平均旅 行速度と 85 パーセンタイル速度の制動停止距離は それぞれ 39m と 51m である. 図-4 より, 視距 40m 以下の区間が県道 215線を占める割合は上り下り両 方向において 9.0%であり, 視距 50m 以下は 15.9% である.

図-5 に、地点毎の方向別の最短視距を示す. 視距の値が最も短い地点を赤色、最も長い地点を青色とし、カラースケールで表している. 視距 40m未満を示す赤とオレンジには、法定速度で走行した場合の安全停止困難区間を含む.

4. おわりに

本研究では、車両旅行速度の算出と視距の測定を行うことで、安全停止困難区間を推定することができた。車両速度が速くなるほど制動停止距離が長くなり、安全停止困難区間が増加するため、走行速度抑制がロードキル対策に重要であることが再認識できる。

今後は、視距に加え、先行研究で扱われたロードキル発生要因も変数としてポアソン回帰分析を行い、ロードキル発生要因解明に努めていく.また、有意差が見られる月の車両旅行速度の分布を分析することで車両旅行速度とロードキルの関係性も明らかにする.

謝辞:現地での調査にあたり、協力していただいた株式会社日本インシークの平野順俊氏には多大なるご協力を頂戴した.ここに記して感謝の意を示したい.

参考文献

- 1) UNESCO: IUCN World Heritage Evaluations 2020 and 2021, https://whc.unesco.org/archive/2021whc21-44com-8Binf2-en.pdf, 2021. (2023年6月13日閲覧)
- 2) 池原隆之介:イリオモテヤマネコのロードキルにおけ

表-1 西表②~西表③上りの車両旅行速度と制動停止距離

車両旅行速度(km/h)	制動停止距離(m)	
最高速度	85.7	101
85 パーセンタイル速度	51.4	51
中央値	42.9	40
最低速度	18.1	14
平均値	42.1	39

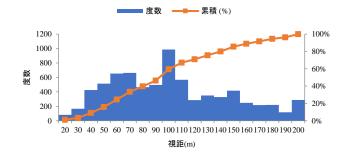


図-4 車両目線上りと下りの視距

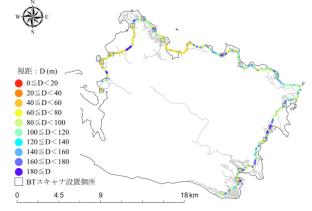


図-5 車両目線上りと下りの最短視距

- る課題と対策,令和4年度琉球大学,卒業論文,2023. 3) 池原隆之介,神谷大介,山中亮,菅芳樹:イリオモデヤマネコのロードキルと道路・交通環境の関係に関する一考察,第12回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会概要集,pp.25-26,2023.
- 4) 国土交通省:Ⅲ道路構造令の各規定の解説, https://www.mlit.go.jp/road/sign/pdf/kouzourei_3.pdf. (2023年6月13日閲覧)
- 5) 沖縄県:イリオモテヤマネコの交通事故防止を目的とした交通実態調査の実施について、https://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/shizen/sekaishizenisan/bluetooth.html, 2022. (2023年6月13日閲覧)
- 6) 内閣府:最高速度違反による交通事故対策検討会 第 3 回 議事録, https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/ma x-speed/k_3/pdf/s5.pdf, 2009. (2023 年 6 月 13 日閲覧)
- 7) 安藤和彦, 倉持智明:路面のすべり摩擦係数と路面管 理水準及びすべり事故, 土木技術資料, pp.56-59, 2010.

エコツアールートモニタリングへの LiDAR の適用可能性に関する一考察

琉球大学 ○国場有沙 神谷大介 株式会社日本インシーク 平野順俊 大月庄治 澤口 侑 法政大学大学院 山本 忍 小宮 涼 庄司康太 浅野達海 法政大学 今井龍一

1. はじめに

近年,世界的にオーバーツーリズムが課題として認識され,サステナブルツーリズムの取り組みが行われている。日本では地域資源を活用しながら補完し支え合う「地域循環共生圏リ」が提唱されている。持続可能な観光地マネジメントを行うためには、様々なモニタリングにより包括的に情報を取得した上で、資源の活用と保全のバランスを検討する必要がある。

本研究の対象地域である西表島は、2021 年 7 月に世界自然遺産に登録された 2). 今後、観光需要の増加に伴う負の影響が懸念され、適切なモニタリングを行う必要がある. 世界自然遺産地域では、表-1 に示すようなモニタリングが行われているが、例えば、作業量が膨大である、非定量的である、誤差が生じる、短期的な変化が見られない、天候による変化が大きい、樹冠による死角が生じる等の課題が考えられ、モニタリングの高度化及び効率化が求められている.

そこで本研究では、近年様々な場面 8)で活用される LiDAR(Light Detection And Ranging)を用いて西表島のエコツアールートにおける 3 次元点群データ (以下、点群)を取得した. 2 時期の点群の地面の差分算出及び可視化を行うことで、自然環境の変化を定量的に明らかにし、モニタリングへの適用可能性について検討することを目的とする.

2. 調査概要および処理手法

本調査は沖縄県八重山郡竹富町西表島中央部に位置する浦内川におけるエコツアールートを対象に、2022年9月20日~9月21日(以下,第1回)及び2023年5月8日~5月9日(以下,第2回)の2時期に3次元計測デバイスNavVis VLXで計測した点群を,3次元点群処理ソフトウェア

表-1 世界自然遺産における自然環境のモニタリング

世界自然遺産	モニタリング
奄美大島、徳之 島、沖縄島北部及 び西表島	エコツアー利用場所等における定点モニ タリング調査,衛星画像 ³⁾
知床	モニタリングサイト (植被率や出現種), 広域植生図作成, 植生調査, 定点写真 4)
白神山地	毎木調査, 倒木調査, 倒壊林冠発生木調査, 樹冠投影図, 植物相調査, 土壌侵食 状況調査, 定点写真, 航空写真, リター と種子供給量調査 ⁵⁾
小笠原諸島	全線・ポイント調査 (植生, 幅員・土 壌, 踏み分け道, 枯死木・倒木) ⁶⁾
屋久島	毎木調査, 樹形図, 巨樹・巨木現状把握 (目視), 植生調査 (ブラウン・ブラン ケ法), 空中写真, 登山道の写真撮影 ^り

CloudCompare を用いて処理する.

具体的には、各時期の点群において、「CSF Filter (Cloth Simulation Filter) (Scenes & Steep slope, Classification resolution $\stackrel{*}{\mathcal{E}}$ 0.1m, Classification threshold を 0.3m, その他をデフォルトと設定), 「Segment」によりエコツアールートの地面を抽出す る. 次に、2時期の点群において不動と考えられる 10 の基準箇所を設け、両端とその間に基準箇所を 持つように区間を設定する. 各区間で「Align(point pairs picking)」により、「RMS(Root Mean Square)」が 0.05m 未満となるよう, 基準箇所の対照点を選択し, 2 時期の点群を重畳する.「Compute 2.5D volume」 (Empty cells \dot{z} leave empty, Grid \mathcal{O} step \dot{z} 0.025m, projection dir & Z, cell height & minimum height, その他をデフォルトと設定)により、第1回を基準 とした,2時期の点群の高さ方向の差分を算出する. 今回は、調査時に撮影した画像を比較して変化

が見られた地点に対し,以上の処理を施す.

キーワード 3 次元点群データ, LiDAR, 差分, エコツアールート, モニタリング 連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科 E-mail: e205504@eve.u-ryukyu.ac.jp

3. 処理結果

重畳の際に歪みが生じたことにより、差分の誤差は RMS の 0.05m 程度あると考えられるため、差分が 0.05m 以上の地点 A, B を以下に示す.

地点 A において,第1回及び第2回の画像を図-1に,2.により得られた結果を図-2に示す(赤丸は同地点).差分は第1回と比較して第2回の点群の地面が高ければ暖色,低ければ寒色としカラースケールで表示している.図-1より,第2回の方が根が露出して見え,図-2からも-0.10m以下の差分が集中していることがわかる.このことから,エコツアー参加者の踏圧等の要因により,地面が低下した可能性が考えられる.

地点 B は、図-3 より石の配置が変化して見え、図-4 からは寒色と暖色それぞれの集合が見られる. これは雨等の自然外力やエコツアー参加者の通過等の外的要因により、石が移動したと考えられる.

以上の結果から、点群を用いた2時期の差分算出 及び可視化を行うことにより、自然環境(地面) の変化を定量的に示すことができたと考える.

4. おわりに

本研究では、LiDAR を用いて西表島浦内川のエコツアールートを計測し2時期の点群の地面の差分算出及び可視化を行った。結果として、点群により0.10m程度の地面の変化を表せ、本調査手法が自然環境のモニタリングへ適用可能と示唆された。

今後は、歪みの補正方法について検討するとともに、GNSSが測位可能な地域へ適用する。また、 実用に向けて、点群の差分から変化箇所を推定する方法、及び、対象とする変化による差分値の許容誤差や測定機器等を検討する。

参考文献

- 1) 環境省:環境省ローカル SDGs 地域循環共生圏, http://c hiikijunkan.env.go.jp/. (2023 年 12 月 12 日閲覧)
- 2) IUCN: IUCN World Heritage Evaluations 2020 and 2021, 2 021.
- 3) 環境省:モニタリング計画に基づく令和3 (2021) 年度モニタリングの評価結果一覧, https://kyushu.env.go.jp/okinawa/amami-okinawa/plans/monitoring/pdf/a-3-j.pdf. (2023 年 12 月 27 日閲覧)
- 4) 知床データセンター:知床世界自然遺産地域第2期長期モニタリング計画,2022.
- 5) 環境省:白神山地世界遺産地域モニタリング計画,202
- 6) 農林水産省:関東森林管理局保護林管理委員会小笠原 諸島森林生態系保護地域部会報告, https://www.rinya.ma



図-1 地点Aにおける画像(第1回:左,第2回:右)

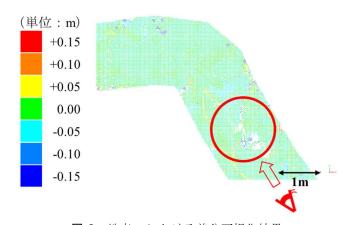


図-2 地点 A における差分可視化結果



図-3 地点Bにおける画像(第1回:左,第2回:右)

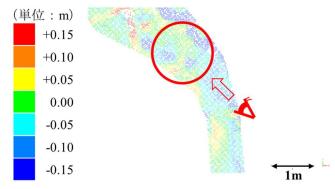


図-4 地点 B における差分可視化結果

ff.go.jp/kanto/keikaku/hogorin_kanriiinkai/attach/pdf/200305 -101.pdf. (2023 年 12 月 12 日閲覧)

- 7) 林野庁:屋久島世界自然遺産地域モニタリング計画,2 012.
- 8) 関和彦,岩佐宏一,窪田諭,塚田義典,安室喜弘,今 井龍一:小規模橋梁の安全確認のための効率的点検技 術の研究開発,土木学会論文集F3(土木情報学), Vol. 75, No.2, pp.II_8-II_16, 2019.

高齢社会における豪雨災害時の共助避難に関する分析

琉球大学 〇稗田椋介 神谷大介 山口大学 榊原弘之

1. はじめに

近年,人的被害を伴う集中豪雨による水害が頻発している。令和2年7月豪雨での全体の死者数のうち,約79%が高齢者であることから,高齢者への避難支援が課題であるとわかる。これらの解決のために個別避難計画の策定が努力義務化されているが,策定率が8.7%(151 団体/1,741 団体)と極めて低い状況である(2023年10月1日時点)¹⁾.また図-1から,避難行動要支援者(以下,要支援者)となりうる高齢者の増加に対し,避難行動支援者(以下,支援者)となる生産年齢人口が減少すると推計されている^{2),3)}.就業時間である昼に災害が発生した場合は,さらなる支援者数不足が懸念される.

そこで本研究では、個別避難計画の対象者となる在宅の要支援者数の推定方法を提示する.これを用いて具体的な超高齢地域に適用し、昼夜及び支援者の協力割合(支援率)を考慮した避難支援時間の変化を明らかにすることを目的とする.この結果は、超高齢社会に向けた水害リスクアセスメントとして位置づけることができる.

2. 要支援者と支援者の定義

国勢調査における「一般世帯」を対象に、浸水 想定区域及び土砂災害警戒区域 4) (以下,ハザード 区域)内に含まれる要介護 (要支援)認定者を本 研究では要支援者と定義する.要介護 (要支援) 認定者は、介護保険における第1号被保険者 (65歳 以上)と第2号被保険者 (40歳以上 65歳未満)で ある.

まず、一般世帯の年齢階級別人口は、一般世帯の人口に当該年齢階級の人口割合を掛けて算出する。一般世帯に居住する第1号被保険者は、高齢者を前期と後期に分け、それぞれの認定率を算出し、これらを一般世帯前期・後期高齢者数に掛けることにより算出する。これらに第2号被保険者を加え

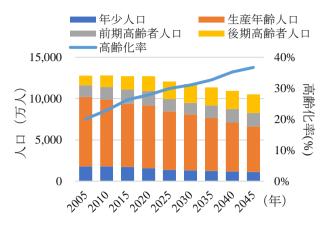


図-1 将来推計人口と高齢化率の推移 2), 3)

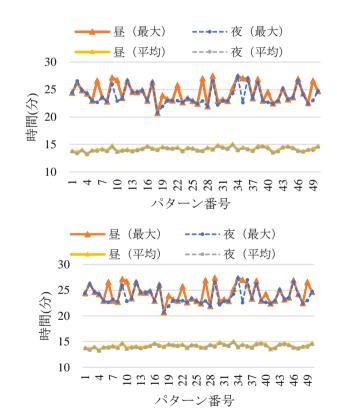


図-2 平均避難支援時間と最大避難支援時間 (上: MinSum,下: MinMax)

たものが個別避難計画の対象者となる.

支援者は生産年齢者とし、流出人口(当該市町村外通勤・通学者)を考慮して昼と夜の2つの時間帯を設定した。夜の支援者数は生産年齢人口から

キーワード 避難行動支援者,避難行動要支援者,MinSum,MinMax,避難支援時間 連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科 E-mail:e205547@eve.u-ryukyu.ac.jp 第2号被保険者数を除いたものとし、昼の支援者は 夜の支援者数から流出人口を除いたものとする⁵⁾.

3. 避難支援時間の考え方

本研究では豪雨災害時における要支援者支援を対象とするため、車での避難支援とする.支援者は自宅から要支援者宅へ行き、要支援者を同乗させた後に避難所へ移動する.要支援者乗車時間はデイサービス等ヒアリング結果より 10 分とする.また、車両旅行速度は豪雨による視界不良を想定し、30km/h と設定する.

支援者および要支援者の初期位置は、2.で設定した人数をランダムに住宅へ配置する。支援者と要支援者の組み合わせは、総移動時間最小化としての MinSum と、最大移動時間最小化としての MinMax により行う.

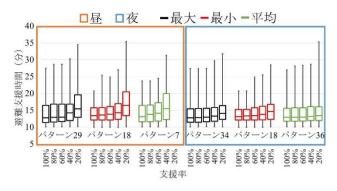
4. 実地域への適用

本研究では、山口県宇部市北部の中山間部に位置し、高齢化率 60%²⁾の二俣瀬地区と小野地区を対象とする。支援者と要支援者をランダムに 50 パターン住宅に配置し、MinSum と MinMax で組み合わせる。ここで 2.の定義に基づき、支援者が昼は 434人で夜は 746人、要支援者が平均 103 人である。

5. 避難支援時間の算出とその分析

支援を完了するまでの各パターンの平均と最大の避難支援時間を図-2 に示す. 平均避難支援時間は昼夜ともに 14 分前後であったが, 最大避難支援時間の差は昼夜で約5分もあるパターンが存在する. 次に, 在宅の支援者が支援にあたる割合(支援率)を変化させて分析を行う. なお, この分析は, MinSum と MinMax における最大支援時間が最大と

率)を変化させて分析を行う. なお, この分析は, MinSum と MinMax における最大支援時間が最大となるパターン 29 (昼) と 34 (夜), 最小となるパターン 18 (昼夜) 及び平均支援時間が全体の平均と同じになるパターン 7 (昼) と 36 (夜)を対象に実施する. この結果を図-3 に示す. 昼は流出人口がいることにより支援者数が少ないため, 避難支援時間が長いことがわかる. パターン7においては支援率が 20%の時, 1 対 1 対応ができない状態となっている. さらなる少子高齢化の進展は, 避難支援の増加を意味することが分かる. この対応のためには, 個別避難計画に加え, 立地適正化計画における居住誘導区域内への移転促進, 支援率の上昇, 自宅におけるリモートワークの促進などが考



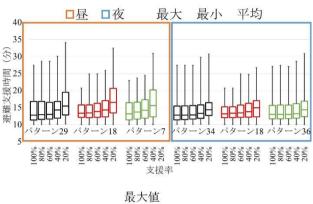




図-3 支援率を減少させた際の平均避難支援時間と最大 避難支援時間(上: MinSum,下: MinMax)

えられる.

6. おわりに

本研究では、豪雨災害時の昼夜における避難支援時間の変化を示した、避難支援時間は最大で 35 分であり、支援率が低くなると、1 対 1 対応すらできない状況も想定されることが示された.

今後は、将来推計人口を用いた分析を行うとと もに、当該地域で導入されているデマンド交通の 活用も検討する.

参考文献

- 1) 総務省消防庁: 令和 5 年度版消防白書, https://www.soumu.go.jp/main_content/000909956.pdf.(2023 年12月24日閲覧)
- 2) 国勢調査:都道府県・市区町村別統計表,2005-2020.
- 国立社会保障・人口問題研究所:日本の将来推計人口 (令和5年推計), https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/ zenkoku2023 /pp2023_gaiyou.pdf.(2023年5月6日閲覧)
- 4) 国土交通省国土数値情報ダウンロードサイト, https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/. (2023年9月6日閲覧)
- 5) 後藤昌大,神谷大介:少子高齢社会への推移が避難支援に与える影響に関する基礎的検討,第 11 回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会概要集,pp.93-94,2022.

5 車線の高規格道路における交通量調査システムの適用可能性の検証

法政大学大学院 学生会員 〇住吉 諒

法政大学 正 会 員 今井 龍一

関西大学 正会員 山本 雄平

 大阪電気通信大学
 正 会 員
 中原
 匡哉

 大阪産業大学
 正 会 員
 姜
 文渊

 琉球大学
 正 会 員
 神谷
 大介

1. はじめに

我が国では,交通量を把握して将来の交通需要を推 計するために自動車交通量調査が実施されている. こ の調査では、車両の形状やナンバープレートを目視で 確認することで、車種別の断面交通量を計数している. しかし, 少子高齢化に伴い調査員の確保が難しくなっ ているため、調査の効率化が求められている.こうした 背景から,動画像をAIにより解析する調査手法が注目 されている. そのため、著者ら1)は、深層学習の画像認 識手法を用いて,動画像から車種別の通過台数を計数 する交通量調査システムを開発してきた. 当該システ ムでは、2車線の道路において、小型車・大型車別の断 面交通量を高精度に計数できることが明らかになった. しかし、3車線以上の道路において、車種別の断面交通 量の計数精度は明らかになっていない、そこで、本研究 では、5 車線道路が含まれる沖縄県の旭橋駅周辺の交差 点で撮影した動画像に対して, 交通量調査システムを 適用することで、システムの適用可能性を検証する.

2. 交通量調査システムの概要

本研究で用いた交通量調査システムは、断面線設定処理、車両検出処理、部位識別処理、車種分類処理および計数処理によって構成される(図-1 参照). 断面線設定処理では、動画像上の対象とする道路に 2 本の断面線を設定することで、カメラ方向に向かってくる車両のみを継続して検出する(図-2 参照). 車両検出処理では、物体検出手法の YOLO v42 を用いて断面線を通過する車両を検出し、車両領域画像として抽出する. 部位識別処理では、画像領域分割手法の SegNet3 を用いて、車両領域画像から 9 種類の車両の部位(正面、背面、左側面、右側面、上面、前輪、後輪、フロントガラスおよびナンバープレート)と背景を識別する. 車種分類処理では、画像分類手法の VGG19 を用いて、車両領域画像を解析することで、小型車か大型車かを分類する. 計数処理では、1 台の車両から複数の車種の

分類結果が得られるため、多数決をとることで車種を 決定する. 各処理の詳細は、参考文献¹⁾を参照されたい.

3. 考案手法を用いた実証実験

(1) 実験概要

本実験では、図-3 に示す沖縄県の旭橋駅周辺の交差 点で15分間撮影した動画像に交通量調査システムを適 用し、有用性を検証する. カメラは、既存研究¹⁾と同様

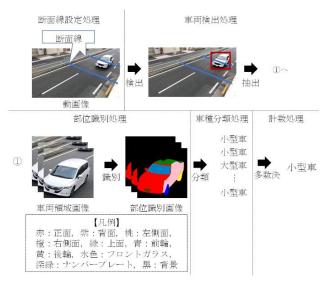


図-1 交通量調査システムの処理の流れ

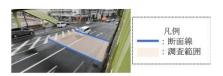


図-2 断面線の設定の例



図-3 撮影地点の周辺環境

キーワード:交通量調査,画像認識,深層学習,車種分類連絡生 〒162-0843 東京都新海区市公田町 2-33 法政士学

連絡先 〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33 法政大学 TEL: 03-5228-1347 E-mail: ryo.sumiyoshi.4t@stu.hosei.ac.jp

に地面からの高さ 4.0m, 垂直角度 20 度になるように設置する. 評価には, 適合率, 再現率とそれらの調和平均である F 値を用いる. 適合率, 再現率および F 値は, 1 に近いほど高精度である.

(2) 実験結果と考察

各地点における計数の結果を表-1 に示す.表-1 の合 計の行に着目すると、地点1と2、4では、F値が0.970 以上と非常に高いことがわかった. また, 地点3におい ても F値が 0.929 と高いことがわかった. これは, 各地 点で車両の検出漏れが少なかったためであると考えら れる. 次に, 小型車の行に着目すると, すべての地点で F値が 0.960 以上であることがわかった. これは、大型 車を小型車に誤分類することが少なく(図-4参照),小 型車の適合率が高くなったためであると考えられる. しかし、大型車の行に着目すると、小型車と比較して F 値が低く, 特に地点1と3では0.600未満であった. こ れは、図-5の左に示すように、車両が黒色の車両では、 部位の識別に失敗する傾向が確認できた. これは、グレ ースケール化により, 車両ごとの色の違いを低減でき るため、改善できる可能性がある.また、図-5の右に示 すように、カメラから遠い車線では車両同士の重なり により, 部位の識別に失敗していた. 現状のモデルでは, 2 車線の道路で撮影した動画像を教師データとして用 いているため、車両が重なった瞬間のデータが少ない. そのため、車両が重なった瞬間のデータを収集し、教師

データに追加することで、改善できる可能性がある.

4. おわりに

本研究では、沖縄県の旭橋駅周辺の交差点で撮影した動画像に交通量調査システムを適用することで、システムの有用性を検証した。検証の結果、5 車線の道路であっても高精度に通過台数を計数できることが明らかになった。今後は、部位識別モデルと車種分類モデルを近年公開された深層学習モデルに更新することで、大型車の分類精度の向上を図る。また、ナンバープレートの認識手法を適用することで、交差点における方向別交通量を計測できるかを検証する。

謝辞:本研究を遂行するにあたり,中央建設コンサルタント社,琉球大学神谷研究室の学生には多大なご協力を賜った.ここに記して感謝の意を表す.

参考文献

- 中畑光貴,今井龍一,神谷大介,山本雄平,田中成典,中原匡哉,姜文渊:車両部位を識別子とした交通量調査に関する研究,土木学会論文集F3(土木情報学),Vol.78,No.2,pp.1 158 168, 2022.
- Bochkovskiy, A., Wang, C. and Liao, H.: YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf, (accessed 2024.1.10).
- Badrinarayanan, V., Kendall, A. and Cipolla, R.: SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation, *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 39, No. 12, pp. 2481-2495, 2017.
- 4) Karen, S. and Andrew, Z.: Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition, International Conference on Learning Representations, 2 015.

	衣-1 谷地点にわける計数指来								
地点名	画角	車種	実台数 (台)	計数結果 (台)	計数成功 (台)	計数失敗 (台)	適合率	再現率	F値
		小型車	439	435	433	6	0.995	0.986	0.991
1		大型車	20	35	16	4	0.457	0.800	0.582
		合計	459	470	449	10	0.955	0.978	0.985
		小型車	103	100	100	3	1.000	0.971	0.985
2		大型車	4	7	4	0	0.571	1.000	0.727
		合計	107	107	104	3	0.972	0.972	0.972
	SIDNA CONTRACTOR	小型車	392	365	365	27	1.000	0.931	0.964
3		大型車	16	47	16	0	0.340	1.000	0.508
		合計	408	412	381	27	0.925	0.934	0.929
4	A STATE OF THE STA	小型車	156	153	153	3	1.000	0.981	0.990
		大型車	13	17	13	0	0.765	1.000	0.867
		合計	169	170	166	3	0.976	0.982	0.979

表-1 各地点における計数結果

















図-4 大型車と正しく判定できた画像の例

図-5 車種の分類に失敗した画像の例

首里城公園における BIM/CIM を活用したインフラ DX の推進 - 首里城デジタルツインの効果と課題 -

内閣府 沖縄総合事務局 国営沖縄記念公園事務所 〇勝美 直光・平塚 勇司株式会社パスコ インキュベーション推進室 岩瀬 嘉樹・田村 健・榊原 庸貴

1. はじめに

内閣府沖縄総合事務局国営沖縄記念公園事務所 (以下「公園事務所」という)では、令和元年10月 31日未明に発生した火災で焼失した首里城の復元 整備を推進している。公園事務所では、首里城復 元に向けた「三本柱」として、正殿を皮切りとし た「首里城復元」、復元の現場や過程を一般へ公 開・発信する「段階的公開」、それらの実施を通 した「地域振興・観光振興への貢献」を据え、令 和8年までの正殿復元を目指している。その一環 として、長い時間を要する正殿完成までの過程を、 その時々でしか見られない観光資源と捉え、来園 者に間近で見て楽しんでいただく「見せる復興」 に取り組んでいる。そのためには、円滑な工事の 進捗と来園者の安全な見学動線の確保、そして事 業への理解を促進する適時適切な情報発信という 複数の要素を加味しながら取組を進める必要があ った。そこで、復元中の正殿を雨風から保護する 「素屋根」、木材の保管や加工を行う「木材倉 庫・加工場」、実物大の図面を描く「原寸場」と いった工事建屋(図1)を、城郭に囲われた狭い 首里城内で建築しつつ、安全な見学動線を確保す るための見学デッキを建設することとした。しか し、未建設の「木材倉庫・加工場」等の来園者か らの見え方や景観上の配慮、効果的な見学動線を イメージすることは難しく、3D 動画等を作成し ながら検討を進めた。結果的に、この取組は、二 次元図面からだけではイメージしにくかった「木



図1 正殿周辺の工事建屋等

材倉庫・加工場」等の完成後の姿を、関係者全員が視覚的に理解しながら検討を進めることにつながり、非常に有益な経験となった。この経験を踏まえ、公園事務所では、本来建物の設計のために製作される BIM (Building Information Modelling) いに、工事関係者間が工事中・完成後の建物のイメージを共有するツール、来園者の事業への理解を促進する情報発信ツール等、多様な用途への活用可能性を感じ、BIM を軸にバーチャル空間で首里城を再現した「首里城デジタルツイン 2)」を作成して様々な活用を試みている。本稿では、これまでの公園事務所の取組を紹介するとともに、その効果や課題について報告する。

2. 既往事例

国土交通省では BIM/CIM 利活用促進のため BIM/CIM ポータルサイト 3)を公開し、BIM/CIM の活用事例を紹介している。その多くは橋梁や道路、河川における設計・施工・検査の事例であり、国営公園における BIM 活用の事例はない。また橋梁等の事例でも BIM データからデジタルツインを作成し、設計・施工以外の業務で活用する事例は見当たらない。

3. 首里城デジタルツインの作成及び活用

(1) 首里城デジタルツインの作成

国土交通省は、令和 5 年度までに小規模を除く全ての公共工事において BIM/CIM を原則適用することとしている。令和 2 年より実施された首里城正殿復元設計業務においても、設計図書は BIM モデル (以下、設計 BIM) で作成・納品され、本デジタルツインはその設計 BIMを軸に作成を進めた。さらに、公園事務所では、本デジタルツインを「見せる復興」に活用するため、設計 BIM に加え、異なる視点からの複数枚の写真を元に 3 次元形状を復元する SfM (Structure from Motion)手法で作成した世界遺産「首里城正殿基壇遺構」や周辺地形等の 3 次元データを、株式会社パスコが提供する「TerraExplorer Pro (日本語版)」等のソフト上で合成し、本デジタルツインを作成した。

キーワード BIM/CIM, 国営沖縄記念公園, 首里城, 見せる復興, デジタルツイン連絡先 〒905-0206 沖縄県国頭郡本部町字石川 424 番地

(2) 首里城デジタルツインの活用

① 復元までの首里城正殿の可視化

本デジタルツインは、正殿復元の前段階である 素屋根設置時の検討から活用した。素屋根は大規 模な建築物であり、周囲の景観に及ぼす影響を検 討する必要があった。特に首里城公園に近接する 県指定史跡「龍潭」等からの眺望景観への影響を 抑えるよう、外壁色の検討に本デジタルツインを 活用した。本デジタルツインには、周辺の地形情 報も盛り込んでいることから、実際に人が龍潭脇 に立つアングルからの素屋根の見え方等を確認し ながら検討した(図2)。通常であれば特定の画 角からのパース図を作成して検討するが、周辺地 形を含めて 3D モデル化した本デジタルツインで は自由に画角を調整しながら見え方の検証が可能 となった。また色の変更、日照状況の変化等によ る見え方の細かい条件変更も容易に画面を見なが ら行うことができたため、外壁色の検討を短時間 で行うことが可能となった(図3)。

次に、素屋根内に建設される正殿を本デジタルツインに反映した。他の民間や研究機関において、焼失前の正殿をメタバース等に構築した試みはあるが、本デジタルツインは平成復元後に得られた新たな知見等に基づく変更点を反映した「完成予想の正殿」である点で類例がない。具体的には、

「首里城復元に向けた技術検討委員会」等で委員 らより細部に至るまで学術的な検討を頂いた結果 として、向拝奥の彫刻物の文様を「1つの牡丹と 唐草」から「3つの牡丹と唐草、1対の獅子」に 変更、向拝奥の彫刻物に施されている獅子を約



図 2 素屋根外壁色検討時の景観検討 (左行:アイボリー、右行:ゴールド、1列目:見学デッキからの見え方、2列目:龍潭からの見え方、3列目:崎山公園からの見え方)





図3 素屋根外壁色検討時の景観検討(左:午前7時30分頃の見え方)右:午後1時頃の見え方)

1.3 倍大きくし、その顔の向きをやや上向きに変える等の変更を予定しており、それらの意匠の変更も反映している(図 4)。

また、今般の復元では、火災を二度と起こさないよう、様々な出火要因に対応した防火対策を講じることとしている。具体的には、焼失前の正殿には設置していなかったスプリンクラー等を設置することとしたが、可能な限り正殿の歴史的空間・景観を損なわないよう、本デジタルツインで防災・防火設備の見え方や設置箇所を確認することで、防災の専門家にも、歴史の専門家にも理解を頂きながら検討を進めることが可能となった(図 5)。

このように、詳細な意匠、防災・防火対策を反映した本デジタルツインは、どのような正殿ができあがるのか、関心を寄せる多くの人々の理解を促進するツールとしても活用した。具体的には、令和5年3月に開催した「首里城復元に向けた技術検討委員会第2回報告会」において、復元後の首里城正殿の姿を可視化した複数の3Dモデル映像と焼失前の正殿とを比較する資料を作成、配布した。報告会後に行ったアンケート結果では、9割以上の方が満足と回答し、「令和の防災対策と平成の復元との相違点、現在復元に向けた研究が進んでいることをよく理解できる良い報告会でした」等の意見も多数頂いた。



図4 変更箇所の可視化



図 5 防災設備設置箇所イメージ

② 消防訓練時のシミュレーションへの活用

公園事務所では、火災対策として、ハード面だけでなく、消防訓練等のソフト面の対策も強化しているが、その訓練にも本デジタルツインを活用した。具体的には、木材倉庫の初期消火訓練において、訓練を行った一部の参加者より、資機材搬入前の広大な空間が広がる倉庫内では火災の広がり方に対するイメージが持ちにくかった、との指摘を受けたことから、本デジタルツインを用いて木材搬入後の木材倉庫等での火災シミュレーション動画を作成(図 6)し、訓練に用いた。その結果、訓練参加者の火災に対するイメージが持ちやすくなり、この取組は、消火訓練に協力頂いた那覇市消防局からも評価する声をいただいた。

③ 園内展示コンテンツへの活用

本デジタルツインを、来園者向けの園内展示コンテンツとしても活用した。具体的には、本デジタルツインから画像や映像、3D コンテンツを出力し、以下の3つの活用を行った。

- 1) 公園内の休憩施設「世誇殿」に大型タッチパネルを設置。来園者が自由にタッチしながらデジタルコンテンツ映像等を閲覧。
- 2) 解説員が公園内を案内する「首里城 60 分 ぐるっとツアー」での活用。解説員がタブレット端末を用いながら、本デジタルツインで作成した首里城復元の工程等を映像で解説。
- 3) VR コンテンツでの活用。来園者の方々に体験していただく実証実験を令和5年3月10日~12日及び4月21日~23日にかけて実施。首里城の中庭に当たる御庭(ウナー)から完成後の首里城を見渡すことできるコンテンツや、世界遺産のため決して立ち入ることができない基壇遺構に降り立ったかのようなコンテンツ等を用意し、全編にわたり本デジタルツインを活用して没入感のあるVRコンテンツを作成(図7)。

実証実験では、海外の方を含め、日平均 150 名程の方が体験された。実証実験は無料で行ったが、参加者を対象に行ったアンケートでは 8 割以上の方が「有料でも体験したい」と回答しており、満足度が高かった。なお、一般的な VR 体験では、着口グル着用者のみが映像を見るケースが多く、着用者以外は退屈であること、着用者が見ているががいらず解説員による説明のタイミングが難しいこと、着用者自身も自分だけ反応するの事務所では、着用者が見ている映像を大型モニタが新れずかしいこと等の課題があった。そこで公園事務所では、着用者が見ている映像を大型モニタ族のグループも一体感を持って楽しめるように工夫のグループも一体感を持って楽しめるように工夫した点も高評価につながったと考える(写真 1)。

4. 設計 BIM を軸にデジタルツインを作成する際 の課題

上述のように、公園事務所では、設計BIMを軸に本デジタルツインを作成し、多様な用途に活用したが、その際に明らかになった課題として以下の2点が挙げられる。

まず、設計BIMはあくまで建物の設計・施工のために作成されたものであるため、映像制作ソフトウェアやゲームエンジンに取り込んでもそのまま展示用コンテンツ等として活用できない、という点が挙げられる。首里城の設計BIMでは彫刻物や瓦等の細部は反映されていないこと、25,000を超えるオブジェクトで構成されているためその一つの色味等の確認が必要であること等の限界があることから、正確かつリアルな首里城のイメージ作成のためには更に手間をかける必要があった。具体的には、複雑な形状の彫刻物等は別途モデルを作成し、それぞれのオブジェクトを実際に





図6 火災シミュレーション



図7 防災設備設置箇所イメージ (左上:操作方法のチュートリアル、右上:鳥瞰的に園内の構造を見渡す、 左下:素屋根内での復元工事の様子、右下:世界遺産の遺構内部に降りる)



写真 1 VR 実証実験を体験している来園者 (VR 体験者の様子をモニターに表示された画面と共に家族がスマホで撮影。 VR 体験者は足元に広がる遺構を覗き込むように下を向いている。)

手作業で確認しながら色味等がリアルなものとなるように検証を繰り返す等の対応を行い、来園者の方々が VR ゴーグルで見ても違和感を抱かない品質まで作り込んだ(図 8)。設計業務で作成された BIM/CIM データは、形状の正確性には疑義が無いため、デジタルツイン作成の大幅な時間短縮を可能とする点では有意義であることが確認できた一方、目的に応じて追加の加工作業等が必要となることが明らかになった。2点目に、BIM/CIM データを扱えるスペックの PC、人材を行政側で用意することが困難な点が挙げられる。これからの公共事業では、BIM/CIM での設計データ納品が一般的になってくるが、納品されたデータが一元化されていなければ、そのデータを十

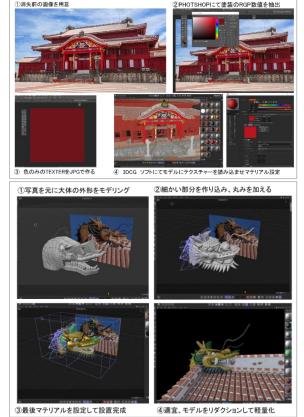


図8 デジタルツインの作り込み作業の一例 (上:色のみを設定すれば良い場合の手順、 下:別途モデルを作成し差し替える場合の手順)

分に活用することは出来ない。しかしながら、膨大なオブジェクトで構成される BIM/CIM データを的確に処理するためには相応のスペックを有する PC が必要となる。また、BIM/CIM の設計データに付与される属性情報等は設計者により異なることから、様々な業務での納品データを一元的に管理するためには、各業務の受託企業から納品されたデータの属性情報等を整理する必要がある。それらのデータを様々な検討に活用したり、内部構造の確認・分析等に活用したりするためには、一般的な技術職公務員のみでは対応が困難で、専門的な技能を有する者が行うことが必要となる。今後、BIM/CIM を十分に活用し、DX を推進するためには、所謂発注者支援業務のように、外部人材を活用することも検討が必要と考える。

5. おわりに

公園事務所では、本稿で紹介した事例を含め、本デジタルツイン作成に当たって得られた知見を「首里城公園 BIM/CIM 活用の手引き」として整理している。今後は、本デジタルツインを活用しながら、正殿完成後の北殿や南殿等の復元スケジュールの検討等に活用するとともに、施設の維持管理の効率化にも繋げていきたいと考えている。

参考文献及び補足

- 1)コンピュータ上に作成した主に3次元の形状情報に加え、室等の名称・面積、材料・ 部材の仕様・性能、仕上げ等、建築物の属性情報を併せ持つ建物情報モデルを構築するものをいう。(国土交通省「官庁営繕事業における BIM モデルの作成及び活用に関するガイドライン(令和4年改定)」,2018)
- 2)デジタルツインとは、現実空間の情報をサイバー空間内に再現することで、現実世界と対になる双子をデジタル空間上に構築し、モニタリングやシミュレーションを可能にする仕組みのことを指す。
- 3) http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/bimcimsummary.html(令和5年5月1日閲覧)

沖縄における建設副産物のリサイクルについて

○沖縄総合事務局 開発建設部 技術管理課 中山 弘

1. はじめに

「リサイクル」とは廃棄物等を原材料やエネルギー源として有効利用すること。日本におけるリサイクルの歴史は古く、平安時代から始まっていたとも言われている。

私たちが行っている公共事業(建設工事)においても廃棄物等は発生する。その廃棄物を建設副産物と位置づけ、国土交通省では、建設副産物の再資源化、他産業廃棄物を含む再生資材の建設資材としての活用といった、建設分野に係る省資源・資源循環の取り組みのことを「建設リサイクル」と定義づけしている。

沖縄県内でも社会資本整備に伴う建設工事は積極的に実施されている。今回は沖縄県内における 建設副産物のリサイクルの状況について報告する。

2. 建設副産物と建設リサイクル

「建設副産物」とは、建設工事に伴い副次的に得られたすべての物品であり、その種類としては、「工事現場外に搬出される建設発生土」、「コンクリート塊」、「アスファルト・コンクリート塊」、「建設発生木材」、「建設汚泥」、「紙くず」、「金属くず」、「ガラスくず・コンクリートくず(工作物の新築、改築又は除去に伴って生じたものを除く。)及び陶器くず」又はこれらのものが混合した「建設混合廃棄物」などがある。※1

また、「建設リサイクル」とは、建設副産物の再 資源化、他産業廃棄物を含む再生資材の建設資材 としての活用といった、建設分野に係る省資源・資 源循環の取り組みのことを指している。**2

3. 建設リサイクル推進計画2020

国土交通省は、これまで建設リサイクルや建設副産物の適正処理を推進するため、建設リサイクル推進計画を定期的に策定し、各種施策を展開してきた。

その結果、建設廃棄物のリサイクル率について、1990年代は約60%程度だったものが、2018年度は約97%となっており、1990年代から2000年代のリサイクル発展・成長期から、維持・安定期に入ってきたと考えられ、今後は、リサイクルの「質」の向上が重要な視点となると想定し*3、令和2年9月に「建設リサイクル推進計画2020~「質」を重視するリサイクルへ~」を策定している。

この計画では、2018年(平成30年)の実績を踏まえ2024年の達成基準を設定、達成基準を満足させるため、各地方において建設リサイクルの現状、建設リサイクルに関する個別課題、今後、実施すべき施策をとりまとめ公表している。

4. 沖縄地方の建設リサイクル推進計画

建設リサイクル推進計画2020における沖縄地方の建設リサイクル推進計画(以下、「推進計画」という。)で掲げた達成基準値を表-1に示す。

対象品目	アスファルト・ コンクリート境	コンクリート塊	建設発生木材	建設汚泥	建設混合廃棄物	建設廃棄物全体	建設発生土
	再資源化率	再資源化率	再資源化率·縮減率	再資源化率·縮減率	排出率	再資源化率·縮減率	有効利用率
全国 (2024目標)	99%以上	99%以上	97%以上	95%以上	3. 0%以下	98%以上	80%以上
沖縄 (2024目標)	99%以上	99%以上	95%以上	90%以上	3. 0%以下	96%以上	80%以上

表-1 沖縄地方の 2024 達差基準値

推進計画における達成基準値を満足させるため、 現状の課題と2024年に向けた対応方針を整理してい る。

5. 簡易型建設副產物実態調查

沖縄総合事務局開発建設部技術管理課では、建設 リサイクル推進計画2020で定めた対象品目の 2024年基準値の達成状況や急激な情勢の変化など、

キーワード:建設副産物、リサイクル、建設発生土

連絡先:900-0006 那覇市おもろまち2-1-1 E-mail hiroshi.nakayama.f8y@ogb.cao.go.jp

沖縄地方の建設副産物対策状況や現状把握、課題や問題点及び対策検討の基礎資料とするため、毎年簡易型建設副産物実態調査を実施している。

本調査は公共事業を実施している県内の国、県の機関で構成されている「沖縄地方建設副産物対策連絡協議会」の構成機関で実施した工事を対象に、工事受注者が工事完了時に「建設副産物情報交換システム」に登録したデータを抽出し集計する方法で実施した。

集計する建設副産物を、コンクリート、コンクリート及び鉄から成る建設資材、木材、アスファルト、土砂、砕石、塩化ビニール管・継手、石膏ボード、その他建設資材に区分けし、再生資材利用率、搬出先の種類、再資源化率を算出した。

令和4年度完了工事を対象に実施した令和5年の 簡易型建設副産物実態調査の結果は以下のとおり。

	対象品目		達成基準值(2024)		令和2年度	令和3年度	令和4年度	総老
			沖縄地方	全国	実績	実績	実績	(H30センサス)
	アスファルト・ コンクリート塊	再資源化率	99%以上	99%以上	99.4%	99.3%	99.6%	99.9%
	コンクリート塊	再資源化率	99%以上	99%以上	99.4%	99.8%	99.8%	99.9%
	建設発生木材	再資源化·縮減率	95%以上	97%以上	96.2%	95,3%	87.5%	89.3%
	建設汚泥	再資源化·縮減率	90%以上	95%以上	99.8%	100.0%	83.9%	99.5%
	建設混合廃棄物	排出率	3.5%以下	3.0%以下	0.1%	0.7%	1.6%	1.7%
æ	设廃棄物全体	再資源化・縮減率	96%以上	98%以上	98.6%	98.8%	94.1%	98.6%
建設発生土		有効利用率	80%以上	80%以上	87,6%	91.8%	87,4%	83.9%

表-2 令和4年度リサイクル率

5. リサイクル率低下の要因

沖縄地方における令和4年度の目標値の達成状況は、前述の表-2に示すとおり、建設発生木材と建設 汚泥以外の品目で達成していた。

令和4年度に目標値を達成できなかった「建設発生木材」「建設汚泥」について要因分析を行った。 建設発生木材については、与那国島、宮古島の事業において再生化施設が十分でなく廃棄処理されたことが要因と考えられる。再資源化するためには沖縄本島名への搬出が必要で輸送費が課題である。建設汚泥については、主に管路の敷設工事で発生したものであり、推進工法で発生する建設汚泥は薬剤や水分 の多い性状など土壌改良による有効利用が難しいこ とが推察される。

6. ゆいくる材

沖縄県は、県内で排出された廃棄物を原材料とした建設リサイクル資材の利用促進による循環型社会の構築の支援と、最終処分場の延命化を図ることを目的として、平成16年7月に「沖縄県リサイクル資材評価認定制度(ゆいくる)」を制定、建設資材として、品質・性能、環境に対する安全性等の評価基準に適合する資材を『ゆいくる材』として認定し、公共工事で積極的に使用している。沖縄総合事務局発注工事においても配慮事項としてゆいくる材の使用を推奨している。





ゆいくる材カタログ(沖縄県HPより)

7. まとめ

循環型社会形成に向けた法整備等が進められ、各 方面でもリサイクルの取組が行われている。特に沖 縄県は島嶼地域であることから県内で発生した廃棄 物等は一部の廃棄物を除けば県内で処理する必要が ある。今回建設工事において発生する建設副産物の リサイクルについてその状況を報告したが、課題も 残されていることから、その課題の解決に向けた取 組を進めていく必要がある。

※1国土交通省HPより

※2建設副産物リサイクル広報推進会議 HPより

※3建設リサイクル推進計画2020~「質」を重視するリサイクル へ 令和2年9月国土交通省

キーワード:建設副産物、リサイクル、建設発生土

連絡先:900-0006 那覇市おもろまち2-1-1 E-mail hiroshi.nakayama.f8y@ogb.cao.go.jp

改質バイオマ灰を用いたジオポリマーの実機ミキサでの練混ぜについて

西松建設㈱ ○原田 耕司 九州工業大学 合田 寛基 北九州市立大学 高巣 幸二

1. はじめに

地球温暖化対策として,フライアッシュを排出する石炭火力発電所が減る一方で,バイオマス発電所が増える傾向にある。バイオマス発電所から排出されるバイオマス灰を建設材料として使用するには,バイオマス灰に含まれる未燃炭素や重金属を除去して改質する必要がある。著者らはバイオマス灰の改質方法として浮遊選鉱法に注目して,室内試験およびテストプラントにより,バイオマス灰の改質技術を確立したり。

一方、改質されたバイオマス灰(以下、改質バイオマス灰と呼ぶ)の有効利用を図るため、セメントコンクリートに比べて CO_2 排出量が少ないジオポリマーに注目して、室内試験レベルで配合等の検討を

行ってきた。今後, 改質バイオマス灰を用いたジオポリマーの社会実装を進めるには, 実機ミキサを用いてジオポリマーを製造して検証する必要がある。

そこで本研究では、改質バイオマス灰を用いたジオポリマーを実機ミキサで製造して、そのフレッシュ性状および強度性状について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

使用材料は、表-1に示すようにアルカリ溶液は珪酸アルカリ溶液と水酸化ナトリウムを、活性フィラーは改質バイオマス灰および高炉スラグ微細粉末を使用した。また、容積調整材料として、石灰石微粉末を使用した。

分類	分類 材料		密度 (g/cm³)	備考
アルカリ溶液	珪酸アルカリ溶液	AS	1.40	市販品, GP-2
アルカリ俗似	水酸化ナトリウム	SH	2.13	粒状
水	水道水	W	1.00	_
活性フィラー	改質バイオマス灰	MCAS	2.26	混焼灰
荷性ノイノー	高炉スラグ微粉末	BFS	2.91	石こうなし
容積調整材	石灰石微粉末	LS	2.73	_
4-4-450,	細骨材	S	2.56	海砂
骨材	粗骨材	G	2.72	砂岩砕石

表-1 使用材料

表-2 配合

BFS/P	LS/P	単位量(kg/m³)							
(%)	(%)	AS	SH	W	MCAS	BFS	LS	S	G
18	12	150.6	20.4	86	257	66	44	709	917

キーワード:バイオマス灰,改質,ジオポリマー,実機ミキサ,

連絡先:〒105-0001 東京都虎ノ門 2-2-1 住友不動産虎ノ門タワー21階, E-mail:koji_harada@nishimatsu.co.jp

2.2 配合

配合は、スランプフロー 500 ± 100 mm、圧縮強度 $24N/mm^2$ の要求性能を満足する $\mathbf{表}$ -2 に示すものを使用した。

2. 3 練混ぜ方法および養生

練混ぜには,**写真-1**に示す特殊コンクリート製造用の100L強制二軸ミキサを使用した。

養生は、70℃12 時間の加温養生と室温養生の 2 種類とした。



写真-1 使用した実機ミキサの全景

2. 4 試験項目

フレッシュ性状は、JIS A 1150 に準じてスランプフローの経時変化を測定した。強度性状は材齢7日と28日で圧縮強度試験を実施した。なお、実際に境界ブロックの型枠にジオポリマーを打設して、施工性の確認も行った。

3. 実験結果

3. 1 スランプフロー試験の結果

スランプフローの経時変化は、室内試験では時間 の経過とともに小さくなる傾向を確認していたが、 実機ミキサでは図-1に示すように、60分までは時間の経過とともにスランプフローが大きくなる傾向

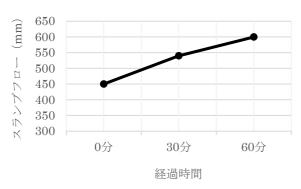


図-1 スランプフローの経時変化

となっている。これは、ジオポリマーの練上がり温 度が 13℃と低かったことが影響しているものと考 えらえる。

3.2 圧縮強度試験の結果

圧縮強度は表-1に示すように、加温養生は室内試験の値とほぼ同じであったが、室温養生の圧縮強度は室温が低かったため小さくなった。加温養生では室内試験と同等の圧縮強度が発現していることを考慮すると、室温養生でも養生温度が20℃であれば要求性能を満足していたものと考えられる。

表-3 圧縮強度試験の結果

種類	材齢				
性织	7 日	28 日			
加温養生	30.9N/mm ²	33.1N/mm ²			
室温養生	_	20.2N/mm ²			

3.3 施工性

改質バイオマス灰を用いたジオポリマーを**写真**-2 に示すように型枠へ打設して、セメントコンクリー トと同等の施工性であることを確認した。



写真-2 打設状況

4. まとめ

改質バイオマス灰を用いたジオポリマーの製造では、練上がり温度および養生温度に留意すれば、実用化できる可能性が高いことを確認できた。

謝辞: 本研究は,環境研究総合推進費(3G-2103)の助成を 受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

1) 山崎勇輔他, 浮遊選鉱法によるフライアッシュ中の未 燃炭素を除去する改質条件と混和材としての特性に 関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 87,798(巻, 号)、pp.667-679, 2022 年

Session 2 材料·防食

古宇利大橋コンクリート暴露 20 年の塩害耐久性評価

公益財団法人沖縄県建設技術センター 比嘉正也

1. はじめに

古宇利大橋は、平成 17 年 2 月に供用開始した屋我地島と古宇利島を繋ぐ橋長 1,960m の長大離島 架橋である。図-1 に側面図、写真-1 に全景を示す。橋種は、古宇利島側から PC8 径間連続箱桁 2 連+PC4 径間連続ラーメン箱桁橋+PC5 径間連続箱桁橋である。

ここで、沖縄県は亜熱帯海洋性気候に属し、海上からの塩分が内陸部まで飛来する過酷な塩害環境にある。このため、古宇利大橋では耐用年数 100 年を目標に建設当時可能な限りの耐久性向上対策を講じられている(表-1)。しかし、健全性を維持するためには、定期点検や調査において早期に変状の有無を把握することが最も重要となる。そこで、古宇利大橋では実橋に劣化損傷が発生する前に供試体レベルで変状等を確認することを目的に、実橋と同配合で作製した供試体を実橋と同環境に暴露し、継続調査を行っている。

本稿では、暴露 20 年目の追跡調査において、採取コアによる含有塩分量分析とコンクリート表面 塩分量分析を行い、得られた知見として、過酷な塩害環境にある古宇利大橋コンクリートの暴露 20 年の塩害耐久性評価について報告する.

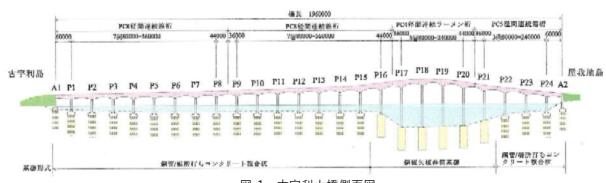


図-1 古宇利大橋側面図



写真-1 古宇利大橋全景

表-1 古宇利大橋の耐久性向上対策

- 箱桁橋の採用
- 鉄筋最小かぶり(上部工70mm、下部工90mm)
- 上・下部工にエポキシ樹脂塗装鉄筋の採用
- ポリエチレンシースの採用
- ポリエチレンシースカプラーの採用
- エポキシ樹脂塗装PC鋼材の採用
- 高耐久性コンクリートの採用(50N/mm²)
- 防錆処理(エポキシ樹脂塗装)定着具の採用

2. 供試体の設置位置と環境

供試体は、北東からの波風を強く受ける環境にある屋我地島北東部の階段式護岸上に設置している (図-2, 写真-2).

キーワード 暴露 20 年、表面塩分量、かぶり確保、塩害耐久性

連絡先 〒902-0064 那覇市寄宮 1-7-13 公益財団法人沖縄県建設技術センター試験研究部試験研究班



写真-2 暴露供試体設置状況

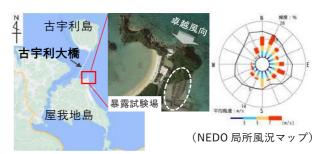


図-2 暴露供試体の設置位置と環境

3. 調査概要

3.1 供試体の概要

供試体は実橋と同配合の 27N/mm² (下部工柱部), 36N/mm² (下部工梁部), 50N/mm² (上部工) の 3 配合である. 供試体の配合を表-2, 使用材料を表-3, 供試体模式図を図-3 に示す. 供試体の形状は, 250×250×400mm の直方体で実橋と同じかぶり厚さに鉄筋が埋設されている(上部工 70mm, 下部工90mm). また, 暴露面は上下面とし, 側面は塩分が浸透しないよう塗装を施している.

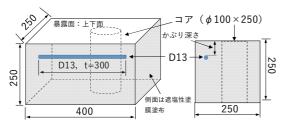


図-3 暴露供試体模式図

表-2 供試体の配合

/11 =-b	設計基	W/C	単位量(kg/m³)						
供試 体名	準強度	W/C	セメント	混和材	水	細帽	骨材	粗骨材	
PFYCI	(N/mm^2)	(%)	С	Р	W	S1	S2	G	
27PL	27	49.5	315	-	156	347	356	1173	
36PL	36	42.0	338	-	142	367	378	1149	
50PL	50	33.5	436	30	156	302	454	1004	

表-3 供試体の使用材料

材料		下部工	上部工	
		(柱部 27N/mm²、梁部 36N/mm²)	(主桁 50N/mm²)	
セメント	С	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	
混和材	Р	-	早強性膨張材(小野田 N-EX)	
水	W	上水道水	上水道水	
細骨材	S1	佐手沖産海砂	鹿児島県徳之島産陸砂	
和山門小约	S2	本部半島産石灰岩砕砂	本部半島産石灰岩砕砂	
粗骨材	G	本部半島産石灰岩砕石4005	本部半島産石灰岩砕石2005	

3.2 調査方法

(1) 含有塩分量分析方法(コアスライス法)

含有塩分量は、供試体から貫通コアを採取し、図-4 に示すように 10mm 間隔(中心部は 20mm)でスライスして、分布状況を確認した。塩分量分析は、JCI SC-5「硬化コンクリート中に含まれる塩分の簡易分析方法」により行った。

(2) 表面塩分量分析方法(表面研磨法)

前出コアスライス法は、10mm 間隔で分析するため、表面部の塩分量(C_0)が把握出来ない。このため、風間ら 11 の研究において有効性が確認されている表面研磨法により表面塩分量を測定した。表面研磨法とは、写真-3 に示すようにコンクリート表面部を集塵機能付きのディスクグラインダーで研磨し、採取したコンクリート粉を用いて表面部の塩分量測定を行う方法である。本調査では、暴露面(上下面)を 1.5mm の深さまで研磨して表面塩分量を測定した。

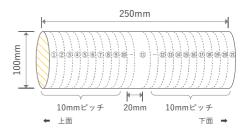


図-4 コアスライス法の模式図

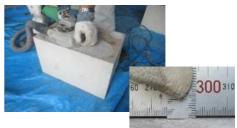


写真-3 表面研磨法

(3) 塩分拡散予測

コンクリート中の塩化物イオンの拡散予測は、コアスライス法および表面研磨法で得られた実測の塩分量分布、暴露年数から算定した塩化物イオンの見かけの拡散係数(D_{ap})と表面塩化物イオン濃度 (C_0)を式(1)の fick の拡散方程式に用いて算定した. $^{2)}$ また、設計条件から算定した C_0 および D_{ap} と 3 、実測で得られた C_0 および D_{ap} を用いて、塩分拡散状況の経年劣化予測の比較を行った.

$$C_{\langle x, t \rangle} = \gamma_{\text{cl}} \cdot \left[C_0 \left(1 - erf \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}} \cdot t} \right) \right] + C_i$$
 (1)

ここに、C(x,t):深さ(cm)、建設時からの時刻 t(年)における塩化物イオン濃度(kg/m^3)

C₀:表面における塩化物イオン濃度(kg/m³)

Dap: 塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/年)

Ci: 初期含有塩化物イオン濃度(kg/m³)

erf: 誤差関数

γcl: 予測の精度に関する安全係数(一般的に 1.0)

4. 調査結果と考察

4.1 コアスライス法による含有塩分量分析

今回の暴露 20 年目調査と暴露 11 年目調査(平成 25 年度)で得られた塩分量分布を合わせて図-5 に示す. なお, 暴露 11 年目調査はコアスライスピッチが 20mm であったため, 今回調査と図中のデータプロット間隔が異なっている. これらの分析結果を見ると, 供試体下面の塩分浸透量は暴露 11 年目から殆ど変わらなかったが, 上面は大幅な増加が確認できた. これは上面では直接波飛沫を受けるため, 上下面で塩分浸透量に違いが出たものと考えられる. 設計基準強度毎の浸透塩分量の経年変化を以下に示す.

◆ 27N/mm²供試体

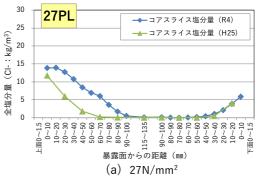
暴露 11 年目調査では、 $40\sim60$ mm の位置まで高濃度の塩分浸透(1.79kg/m³)が認められていたが、今回の調査では鉄筋かぶり位置の $80\sim90$ mm で 1.73kg/m³ となっており、顕著な塩分浸透量増加が確認された.

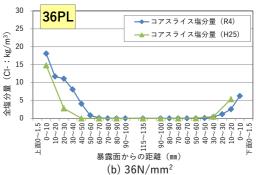
◆ 36N/mm²供試体

暴露 11 年目調査では、上面 $40\sim60$ mm で 0.67kg/m³ であったが、今回の調査では $40\sim50$ mm で 4.10kg/m³、 $50\sim60$ mm で 0.89kg/m³ となっており、27N/mm² 供試体上面と同様に塩分浸透量の大幅な増加が確認できた.

◆ 50N/mm²供試体

暴露 11 年目調査では、上面 $0\sim20$ mm で 10.95kg/m³、 $20\sim40$ mm で 0.34kg/m³ の塩分浸透が確認されたが、浸





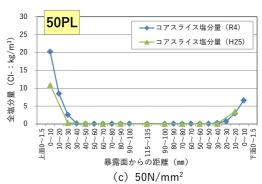


図-5 含有塩分量分布

透深さは表面から 20 mmまでに留まっていた. しかし、今回の調査では、上面の $0\sim10$ mm で 20.22kg/m³、 $10\sim20$ mm で 8.51kg/m³、 $20\sim30$ mm で 2.61kg/m³、 $30\sim40$ mm で 0.21kg/m³ の塩分量が認められ、表面から 30mm 付近までに 2kg/m³ を超える塩分浸透が確認された.

4.2 表面研磨法とコアスライス法の比較

図-6は、コアスライス法の塩分量分析結果に、表面研磨 法で得られた表層 1.5mm の塩分量分析結果を加えたもの である. 同図には、中性化深さ測定結果も合わせて示して いる. コアスライス法の 0~10mm と表層 1.5mm の塩分量 を比較すると、27N/mm² 供試体の上下面は同程度で、 36N/mm² 供試体の上面ではやや低い値であった。一方, 50N/mm²供試体の上下面, 36N/mm²供試体の下面では表層 1.5mm の塩分量が高い値であった. これらの結果につい て, 同図に示すように 50N/mm² 供試体の上下面, 36N/mm² 供試体の下面では中性化が認められなかったが、27N/mm² 供試体の上下面と 36N/mm² 供試体の上面では僅かに中性 化の進行が認められていたことから、27N/mm²供試体の上 下面と 36N/mm²供試体の上面は、中性化の進行により、表 層の塩分が内部へ移動したものと考えられる。また、表層 1.5mm の塩分量を暴露 11 年目と暴露 20 年目で比較すると 概ね同程度で変化が殆どないことから,表層塩分量は飽和 状態に達していると考えられる.

4.3 塩分拡散係数の算定

(1) 表面塩化物イオン濃度 C₀

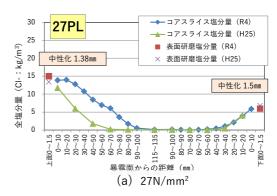
実測の塩分量試験結果から算出した表面塩化物イオン 濃度 C_0 を図-7 に示す. 設計条件から D_{ap} を算定する表面塩化物イオン濃度 C_0 は,コンクリート標準示方書に示される「飛沫帯: $13kg/m^3$ 」とした. 同図から, C_0 は下面に比べて上面が高く,さらに設計基準強度が高い(W/C が小さい)ほど C_0 が高いことがわかる.

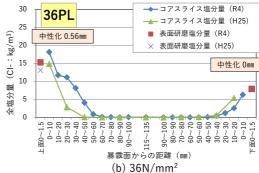
(2) 塩分拡散係数 Dao

実測の塩分量試験結果から算出した塩分拡散係数 D_{ap} を 図-8 に示す。暴露 11 年目の D_{ap} は、 $27N/mm^2$ 供試体の上面で設計条件から算定される普通ポルトランドセメントの D_{ap} を僅かに上回る値であり、 $27N/mm^2$ 供試体および $36N/mm^2$ 供試体の下面、 $50N/mm^2$ 供試体の上下面は設計条件より小さい値であった。これを暴露 20 年目で見ると、 $36N/mm^2$ 供試体の上面でも設計条件を上回る値となった。 $50N/mm^2$ 供試体については、暴露 11 年目より僅かに高くなっていたが、設計条件を大幅に下回る値であった。

4.4 腐食発生限界濃度 C_{lim}に達する将来予測

各配合の水セメント比(W/C)を用いて,鋼材位置にお





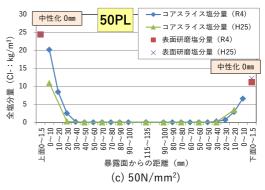


図-6 表面研磨法+含有塩分量分布



図-7 表面塩化物イオン濃度 C₀

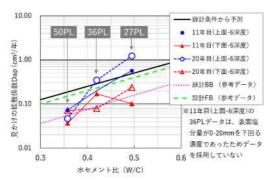


図-8 塩分拡散係数 Dao

ける腐食発生限界濃度 (Clim) 3)を算出した結果,以下のとおりとなった.

 \bullet 27N/mm²: 1.915kg/m³ (W/C=49.5%)

 \bullet 36N/mm²: 2.140kg/m³ (W/C=42.0%)

 \bullet 50N/mm²: 2.326kg/m³ (W/C=35.8%)

設計条件による C_0 , D_{ap} の算定結果および実測の塩分量分析結果から算出した C_0 , D_{ap} から予測した C_{lim} に達する年数および経年変化を表-4, 図-9 に示す。同図表に示すように、暴露 20 年目データで算定した結果、 $50N/mm^2$ 供試体の上下面、 $27N/mm^2$ 供試体および $36N/mm^2$ 供試体の下面では、100 年経過しても鉄筋位置の塩分量が腐食発生限界濃度を超えない予測となった。一方、 $27N/mm^2$

供試体上面は 13 年, 36N/mm² 供試体上面は 42 年で鉄筋 位置が腐食発生限界濃度に達する予測となり, 古宇利大橋 の目標耐用年数 100 年を大幅に下回った.

このことから、古宇利大橋暴露試験場のような環境では、一般的な下部エコンクリートに用いる 27N/mm² や 36N/mm² は、設計条件から算定される Dap は塩害耐久性の面で危険側の設計になることを留意する必要があると言える. なお、古宇利大橋ではエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いているため、現状鉄筋腐食を免れていると考えられる.

表-4 鉄筋位置の CI-濃度が腐食発生限界 濃度に達する年数

設計基準	腐食 発生			鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 腐食発生限界値に達する年数			
全年 強度 (N/mm²)	限界 濃度 (kg/m³)	深さ (mm)	位置	設計条件による算定	実測の分析終 暴露11年目 データで算定	ま果から算定 暴露20年目 データで算定	
27	1.915	90	上面	40	32	13	
21	1.515	30	下面	40	324	143	
36	2.140	90	上面	72	84	42	
30	2.140	30	下面	72	186	305	
50	2.326	70	上面	72	119	140	
50	2.320	70	下面	72	363	199	

36N/mm²上面は表層1.5mmの塩化量が0~20mmを下回るため、表面研磨塩分量を除いた5深度で算定

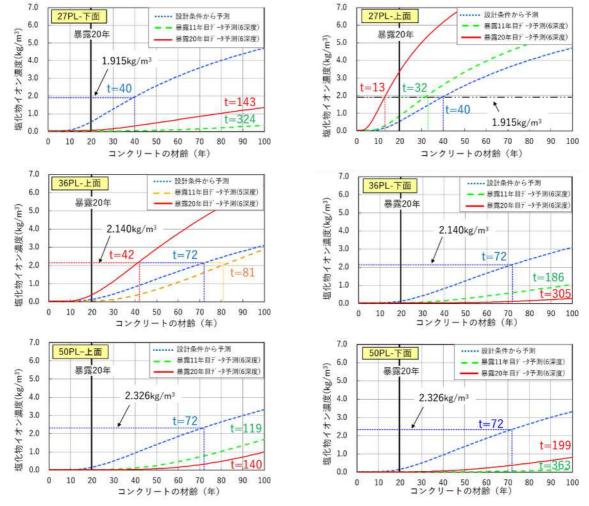


図-9 鉄筋位置の CI-濃度の経年変化予測

5. まとめ

- (1) 27N/mm²上面では、かぶり位置付近で腐食発生限界濃度 1.915kg/m³に迫る 1.73kg/m³の塩分浸透が確認できた。
- (2) 暴露 20 年目調査結果から塩分拡散係数 D_{ap} を算定した結果, 27N/mm²上面は 13 年, 36N/mm²上面は 42 年で鉄筋位置の塩分量が腐食発生限界濃度に達する予測となった.
- (3) 設計条件による塩分拡散予測では、上部工 $50N/mm^2$ では安全側の評価になるが、下部工 $27N/mm^2$ や $36N/mm^2$ コンクリートでは危険側の評価になった.
- (4) 古宇利大橋暴露試験場のような環境においては、かぶりの確保のみでは塩害 100 年耐久性確保 は不可能であると言える.
- (5) 現在、沖縄県では「フライアッシュコンクリートの配合及び施工指針」を策定し、フライアッシュコンクリートを用いて材料面から耐久性向上を図っている.
- (6) 予防保全の観点から、実橋の点検では塩害発生に十分注意して確認する必要がある.

謝辞

本調査では、アール・アンド・エー代表風間洋氏ならびに株式会社中研コンサルタント様に多大なるご協力を頂いた。また、沖縄県土木建築部土木整備統括監砂川勇二氏には本稿のとりまとめにご助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 風間洋,富山潤,下地建,小籏俊介:コンクリート表面の含有塩分量 C₀調査方法の提案,土木学会 全国大会 第70回年次学術講演会, V-070, 2015.9
- 2) 土木学会: 2018 年度制定コンクリート標準示方書,基準編,土木学会規準および関連規準,コンクリート中の全塩化物イオン濃度分布に基づいた見掛けの拡散係数の算出方法,pp.416-417, 2018
- 3) 土木学会: 2018 年度制定コンクリート標準示方書,維持管理編,pp.140-146, 2018

バガスボタニカルコンクリートの機械学習による曲げ強度推定

琉球大学 ○平城有梨,富山潤,石川桜史 Curelabo(株) 山本直人,(株)バイオアパタイト 中村弘一,琉球ブリッジ(株)谷中田洋樹

1. はじめに

沖縄県は、サトウキビ産業が盛んに行われている地域であるが、サトウキビから砂糖を精製する過程で生じるサトウキビの搾りかす(以下、バガスと称す)を年間約20万t排出しており、その利用方法として約9割が火力発電の燃料として利用されている1)。また、その火力発電の過程でバガス灰(バガスの焼却灰)も生じている。余ったバガス繊維・バガスアッシュは、紙やジーンズの糸など様々なことに利用されている2)、3)、4)、そして、リベイロら5)、大城らのはバガス、バガスアッシュを細骨材置換したバガスコンクリートの研究を行っているが、未だ限定的な利用に留まっており、バガス・バガスアッシュの処理が課題となっている。

一方で、脱炭素・資源循環型社会の実現に向けて、東京大学生産技術研究所の酒井雄也研究室では、廃木材とコンクリートがれきを利用した、ボタニカルコンクリートの研究が行われている⁷. 筆者らも古紙リグニンを利用したボタニカルコンクリート研究を行っている⁸. また、材料開発に機械学習を活用したマテリアルズ・インフォマティクス⁹が近年注目されている.

本研究では、沖縄県で処理が課題となっている製糖過程で生じるバガスのリグニンを利用したボタニカルプレート(バガス粉末のみ)、ボタニカルコンクリート(バガス粉末+廃コンクリート粉末)の力学的特性として曲げ強度および耐水性についての基礎的検討を行い、さらに、機械学習による曲げ強度推定の可能性を検討した.

2. 使用材料

2.1 バガス粉末 (サトウキビ)

本研究では、バガスをおよそ $100\mu m$ 以下の粉末状にしたものを使用した(写真-1). バガス粉末の粒度分布を図-1 に示す(レーザー回折式). また、図-2 にバガス粉末の SEM 画像(500 倍)を示す. これらよりバガスの粒径のほとんどが $100\mu m$ 以下になっており、多様な形

状を有することがわかる.

ボタニカルコンクリートはリグニン量の影響を受ける。リグニン量を定量的に求める方法として、藤井らは熱重量解析による迅速簡便なリグノセルロース分析法を提案している 10 . 本研究では藤井らの分析法を採用し、バガスのリグニン量を簡易的に推定した。分析では、空気雰囲気(気流 100 mL/min)で昇温速度 10 C/min の条件にて室温から 600 C まで昇温した。 図-3 にバガスの熱分解曲線を示す。藤井らは、450 C 時の分解残留率とリグニン含有量における検量線を求めている。図-3 のバガスの熱重量解析結果から温度 450 C の時の分解残留率が 0.075 と求めることができ、その値と藤井らの検量線からリグニン量は 12%程度と推定できる。



写真-1 バガス粉末

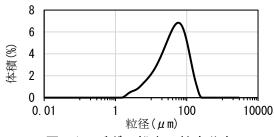


図-1 バガス粉末の粒度分布

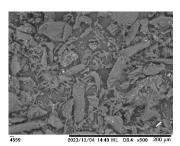


図-2 バガス粉末 SEM 画像(500 倍)

キーワード:バガス,曲げ強度,機械学習,強度推定,ボタニカルコンクリート

連絡先〒903-0123 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース 建設材料学研究室

e-mail: k228524@eve.u-ryukyu.ac.jp

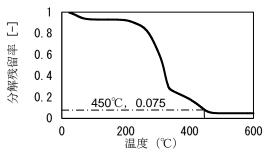


図-3 バガス粉末の熱分解曲線

2.2 廃コンクリート

本研究で使用した廃コンクリート粉末を写真-2 に示す。また,廃コンクリート粉末の粒度分布(レーザー回折式)を図-4 に,SEM 画像(500 倍)を図-5 に示す。また,主な化学組成を表-1 に示す。粒径はバガス粉末より大きく,また,沖縄の骨材は石灰岩砕石,砕砂が使用されているため,相対的に CaO が多いことがわかる。



写真-2 使用した廃コンクリートの粉末

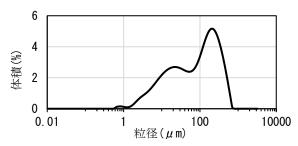


図-4 廃コンクリート粉末の粒度分布

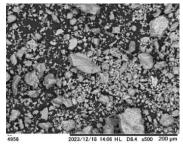


図-5 廃コン粉末 SEM 画像 (500 倍)

表-1 廃コンクリート粉末の主な化学組成

衣 「焼コンノケ」「粉木の土な七子恒成							
	Al ₂ O ₃			_			
15.3	2.63	5.03	74.6	0.566	15.3	0.142	0.55

3. 試験体作製方法

バガス粉末を金型に入れ、熱プレスすることで形成体(以下、試験体)を作製する. 使用した熱プレス機(AS ONE、H300-15、0~15t)を写真-3に示す. メス側(縦横 65mm×45mm)、オス側(縦横 64mm×44mm)の金型を使用し、写真-4に示す形状で厚さが約 3mm になるように約 8.5g の試料を金型に詰め作製した. 作製した試験体の厚さは圧締圧力の違いで最大3.78mm、最小2.37mmとなり、1.41mmの厚さの幅があった.



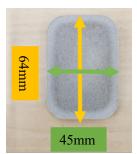


写真-3 熱プレス機

写真-4 作製試験体

4. 実験方法

バガス粉末と廃コンクリートを原料としたボタニカルコンクリートの強度特性の評価を行う前に,バガス粉末のみを原材料としたボタニカルプレートを用いた強度特性における検討を行った.その後,バガス粉末と廃コンクリート粉末を混合したボタニカルコンクリートにおいて同様な検討を行った.

4.1 ボタニカルプレートの強度特性評価 (曲 げ強度)

試験体を温度,圧力,時間のそれぞれをパラメータに作製し,図-6(a)に示す曲げ試験器(卓上型圧縮引張試験機:最大荷重500N)で曲げ強度試験を行った.図-6(b)に曲げ試験模式図を示す.試験体は1つの条件につき,3個作製した.また,載荷速度は10mm/minと設定した.試験体作製条件を以下に示す.

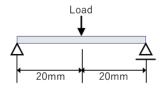
a) 温度をパラメータとした条件 (表-2) 熱プレス時の温度を 30℃,50℃,100℃, 160℃,200℃,220℃の 6 水準とし,圧力 35.1MPa,時間5分を固定とした.

b) 圧力をパラメータとした条件(表-3) 熱プレス時の圧力を 10.5MPa, 17.5MPa, 35.1MPaの3水準とし,温度160℃,時間5分を 固定とした.なお,圧力の管理は,荷重制御の ため3t,5t,10tで載荷した.

c) 時間をパラメータとした条件 ($\mathbf{表}-\mathbf{4}$)

熱プレス時の温度を 3 分, 5 分, 10 分の 3 水準とし、温度 160°C、圧力 35.1MPa を固定とした。同水準に対してそれぞれ 3 試験体作製し、曲げ強度に対する基礎的検討を行なった。





(a) 曲げ試験機 図 - 6

(b)曲げ試験模式図 曲げ試験の概要

表-2 作製条件(a)

温度 (℃)	圧力 (MPa)	時間 (分)
30		
50		
100	35.1 (10t)	5
160	33.1 (101)	3
200		
220		

表-3 作製条件(b)

温度 (℃)	圧力 (MPa)	時間 (分)
	10.5 (3t)	
200	17.5 (5t)	5
	35.1 (10t)	

表-4 作製条件(c)

温度 (℃)	圧力 (MPa)	時間 (分)
		3
200	17.5 (5t)	5
		10

4.2 ボタニカルコンクリートの強度特性評価 (曲げ強度)

4.1 で行った実験結果をもとに、粉末化したバガス粉末に廃コンクリート粉末を混合したボタニカルコンクリートの強度評価を行った.バガスと廃コンクリートの混合比率は、重量比10:0,7:3,5:5,3:7の4配合とした.試験体作製の温度、時間、圧力の条件は、4.1 の結果を参考に平均強度が最も高かった、温度200℃、圧力17.5MPa、時間5分とした.試験体作製時、バガス粉末と廃コンクリート粉末を十分にかき混ぜて混合した.比較に用いたバガスのみの10:0の配合の曲げ強度の結果は、4.1の試験で得た温度、圧力、時間が200℃、17.5MPa、5分の6つのデータを使用した.写真-5に作製

したバガスと廃コンクリート粉末を混合したボ タニカルコンクリート試験体を示す.



バガス:廃コン=5:5



バガス:廃コン=3:7 写真-5 ボタニカルコンクリート試験体

5. 結果および考察

5.1 ボタニカルプレートの強度特性評価 (曲げ 強度)

a) 温度をパラメータとした条件

曲げ強度試験結果を $\mathbf{20-7}$ に示す.この図より 160°C、180°C、200°C、220°Cの条件で製作した4つの試験ケースは、30°C、50°C、100°Cの3つの温度と比較して急激に高い曲げ強度となり、180°C以降曲げ強度がほぼ一定となった.これはリグニンの融点が約 180°Cであるため、バガスのリグニンが十分に溶けて硬化し、強度発現したと考えられる.試験ケースの曲げ強度にばらつきが見られる原因もリグニンの融解に関係していると考えられ、品質の観点から今後検討する必要がある.

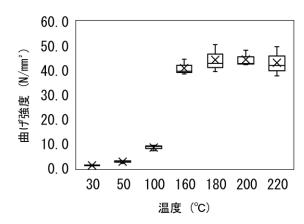


図-7 曲げ強度試験結果 (a)

b) 圧力をパラメータとした条件

曲げ強度試験結果を図-8に示す. 17.5MPaで作製した試験ケースの曲げ強度が最も高くなった. しかし, 3 ケースの曲げ強度の差は同程度である. 35.1Pa の条件で製作した試験ケースのばらつきがやや大きくなった. 今回の検討では,圧力が 10.5MPa 以上あれば十分な曲げ強度が得られる結果となった.

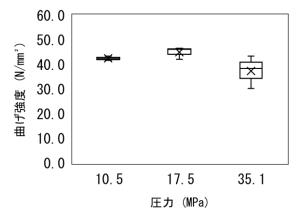


図-8 曲げ強度試験結果(b)

c) 時間をパラメータとした条件

曲げ強度試験結果を**図**-9 に示す. 熱プレス時間 3 分で作製した試験ケースの曲げ強度が最も高く,作製時間が長くなると曲げ強度はわずかに低下傾向にあることがわかる. また,作製時間 3 分の試験ケースは他のケースと比較し,ばらつきがやや大きくなった. この原因は試験体に若干の焦げが確認されたことから,リグニンの融解以外にセルロース等の熱変性等が関係していることが考えられる.

以上より,以降の検討では,曲げ強度が高く, ばらつきの小さい,温度 200℃,圧力 17.5MPa, 時間 5 分を試験体作製条件とした.

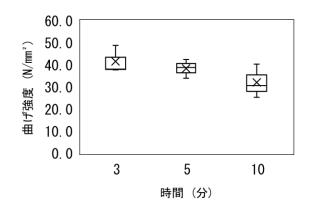


図-9 曲げ強度試験結果 (c)

5.2 ボタニカルコンクリートの強度特性評価 (曲げ強度)

バガス粉末と廃コンクリート粉末を混合したボタニカルコンクリートの曲げ強度試験結果を図-10 に示す.この結果より、廃コンクリート粉末の割合が高くなるにつれ、曲げ強度が低下していることが分かる.強度のばらつきについてはあまり見られない.図-11に試験体のSEM画像を示す.これらのSEM画像から、廃コンクリートの混合割合が高くなるにつれ、隙間が多く見られるため、リグニンの接着効果が十分に得られなかったことが強度低下に繋がったと考えられる.

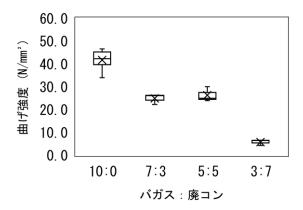
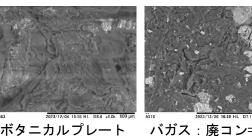
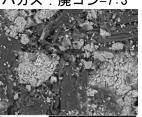


図-10 ボタニカルコンクリート 曲げ強度試験結果



ボタニカルプレート



バガス:廃コン=5:5 バガス:廃コン=3:7 図ー11 試験体 SEM 画像

6. 機械学習を用いた強度推定

ここでは、機械学習を用いてバガスリグンを 利用したボタニカルコンクリート(ボタニカル プレートも含む)の曲げ強度推定が可能か検討 した結果を示す.学習アルゴリズムとしてはア

ンサンブル学習のひとつである, ランダムフォレスト¹¹⁾を用いた. ランダムフォレストはデータの説明変数をランダムに選択し, 決定木を構築する処理を複数回繰り返し行い, 各決定木の推定結果の多数決や平均値により分類や回帰を行う方法である(図-12).

本研究では、プログラミング言語にPythonを用い、scikit-learn¹¹⁾によりランダムフォレストを実装した.表-5に示すように、5.を基にした、バガスボタニカルコンクリートの作製時に変動する条件を説明変数、曲げ強度を目的変数として、曲げ試験によって得られた全データ57個の中から45個(8割)を学習用データ、12個(2割)を評価用データとして使用した.

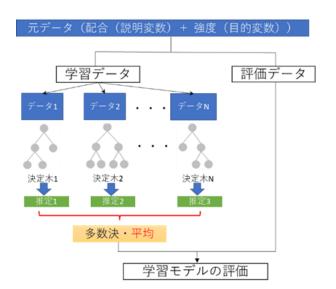


図-12 ランダムフォレストの概要

表 - 5	説明変数•	日的変数

種類	変数
	バガス粉末混合割合
	廃コン粉末混合割合
	プレス温度 (℃)
	プレス圧力 (MPa)
説明変数	プレス時間 (分)
	試験体質量 (g)
	試験体厚さ (mm)
	試験体体積 (mm³)
	試験体密度 (g/cm³)
目的変数	曲げ強度 (N/mm²)

推定結果を図-13に示す. 図より推定結果と 測定結果は良い相関を示していることがわかる. なお, 学習用データの学習モデルの決定係数は 0.974, 評価用データの決定係数は0.852となり, 予測精度は高い値を示した。また、特徴量として用いた説明変数の重要度を表-6に示す。この結果より、バガスボタニカルコンクリートの曲げ強度に最も影響を与えているのは質量であり、続いて厚さ、体積となった。熱プレス時の温度や圧力、時間について、重要度は高くない結果となった。

今回示した学習データの数は少ないため、精度や重要度の信頼性に課題が残る.今後は学習データを増やし、バガスボタニカルコンクリートの効率的な開発を目指す.

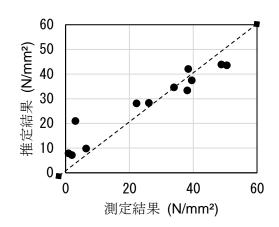


図-13 曲げ強度推定結果

表-6 特徴量の重要度

順位	特徴量	重要度
1	試験体質量 (g)	0.527
2	試験体厚さ (mm)	0.118
3	試験体体積 (mm³)	0.115
4	試験体密度 (g/cm³)	0.088
5	廃コン粉末混合割合	0.064
6	バガス粉末混合割合	0.042
7	プレス温度 (℃)	0.035
8	プレス時間 (分)	0.006
9	プレス圧力 (MPa)	0.003

7. まとめ

本研究では、バガス粉末を使用したボタニカルコンクリートの開発を目指し、その力学的特性に関する基礎的検討を行った。得られた知見と今後の課題を以下に示す。

- 温度 180℃, 圧力 10.5MPa, 時間 5 分以上の 条件で作製したボタニカルプレートの曲げ 強度はほぼ同じ値を示した.
- (2) ボタニカルコンクリートにおいて, 廃コン

- クリート粉末の割合が高くなるにつれ、曲げ強度が低下した. SEM 画像観察から、リグニンと廃コンクリート粉末の接着効果に問題があることが示唆された. ただし、混合割合 7:3, 5:5 は曲げ強度が 20N/mm²以上あり十分な強度を有している.
- (3) 本研究では、機械学習によりバガスボタニカルコンクリートの強度推定が可能であることを示すことができた。今後は、さらにデータ数を増やし、推定精度に関する検討を継続し、バガスボタニカルコンクリートの効率的な開発を目指す。

参考文献

- 1) 沖縄県 HP: さとうきびおよび甘しゃ糖生産 宝績・
 - https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/norin/togyo/kibi/mobile/documents/04_bagasu_keki.pdf, (2023 年 12 月 1 日閲覧)
- 2) SHIMA DENIM WORKS: https://shimadenim.com
- 3) (独)農畜産業振興機構:沖縄県におけるバガスの食品利用に向けた取り組み:https://www.alic.go.jp/joho-s/joho07_000983.html,(2023年12月1日閲覧)
- 4) 地球と未来の環境基金,バガス(非木材紙)普及: http://www.eco-future.net/project/bagas/list, (2023 年 12 月 1 日閲覧)
- 5) Bruno Ribeiro 他: An Environmental Assessment of Interlocking Concrete Blocks Mixed with Sugarcane Residues Produced in Okinawa, RESOURCES-BASEL (MDPI), Vol.9, Issue: 8, 2020.8

- 6) 大城藤乃,平城有梨,富山潤,須田裕哉: 機械学習を用いたバガス繊維モルタルの曲 げ強度推定に関する基礎的研究,第11回土 木学会西部支部沖縄会技術研究発表会, p.87-88,2021.1
- 7) 皆川佳惟, 酒井雄也, 勝木太: コンクリートがれきと木材を原料とする建設材料の開発, 生産研究, 研究速報, 72 巻, 2 号, p.213-217, 2020
- 8) 平城有梨,富山潤,谷中田洋樹,中村弘 ー:古紙リグニンを利用したボタニカルコ ンクリートに関する基礎研究,コンクリー ト工学年次論文集,45巻,1号,p1654-1659, 2023.
- 9) EAGLYS: マテリアルズ・インフォマティクス とは?注目される理由や取り組み事例も解説 https://www.eaglys.co.jp/news/column/materials informatics/: (2024年1月9日閲覧)
- 10) 藤井隆夫,望月和博,小林伸一,迫田章義:熱重量解析による迅速簡便なリグノセルロースの成分分析,廃棄物資源循環学会論文誌,Vol. 22, No. 5, p. 293-297, 2011
- 11) 須藤秋良: スッキリわかる Python による機械学習入門,株式会社インプレス,2020.10.

謝辞:本研究を遂行するにあたり,東京大学生産技術研究所の酒井雄也准教授にボタニカルコンクリートに関する知識や製作方法をご教授頂いた.また,琉球大学須田裕哉准教授にご助言頂いた.ここに記して感謝の意を表す.

機械学習による黒木リグニンを利用したボタニカルプレートの曲げ強度推定

琉球大学 ○西浦梨華, 富山潤, 平城有利, (株) バイオパタイト 中村弘一, 琉球ブリッジ(株) 谷中田洋樹

1. はじめに

現状,リサイクルされるコンクリートがれきの約9割が路盤材料として道路建設の際に舗装の下に埋められ,残り1割のコンクリートがれきは再生骨材としてコンクリートを製造するために利用されるため,新たにセメントを必要とする.セメントは製造時に多くの二酸化炭素を排出し,その量は全産業の約5%にまで達する1).

そこで我々はボタニカルコンクリート¹⁾として、産業廃棄物を新たなセメントを用いずに質を保ちつつ再生することで、低炭素社会・資源循環型社会への貢献を目指す。本研究では、黒木を用いたボタニカルコンクリートの開発を目的に、機械学習を用いた黒木のボタニカルプレート(コンクリート粉末を使用しないもの)の曲げ強度推定を行った。黒木は、沖縄文化を象徴する存在の一つとして知られる三線に用いられている。材質が重くて硬く、年月が経過しても反りや狂いが生じにくいことから²⁾、建設材料としても適応できると思われる。

2. ボタニカルコンクリートの原理

植物にはセルロース、ヘミセルロースに加え、リグニンという成分が含まれている。バイオマスのような高分子は温度を上げても液体にならず、250℃~300℃程度の温度で気化し始める。気化するより前の温度で加熱圧締することで、分子間の結びついている力が弱くなり、その状態のまま高密度化する。植物中のリグニンやヘミセルロースが溶け出し接着剤として作用し、物質を高密度のまま硬化させることができる3)。

3. 供試体の作製と曲げ強度の測定方法

含水率を測定した試料を約 10g 量りとる. 試料を指定の温度まで加熱しておいた金型(図-1)に平らに入れ上蓋をしたら、小型熱プレス機(写真-1)に設置して、加熱しつつ圧締する. 指定の時間が経過後、ゆっくりと除圧し、金型から供試体を取り出す. 作製した供試体は、重さと厚さ(h)を測り、曲げ試験機(写真-2)で荷重を載荷する. 記録された最大荷重から下式(1)において曲げ強度を算出する. 曲げ試験の図を図-2に示す. σ は曲げ強度(N/mm^2)、w は最大荷重(N)、l は試験台の幅(nm)、b は供試体の縦幅(nm)を表しており、本試験において b は 45mm、l は 40mm である.

$$\sigma = 3wl/2bh^2 \qquad \cdots (1)$$

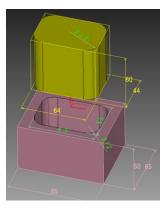


図-1 金型サイズ



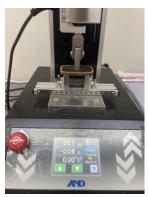
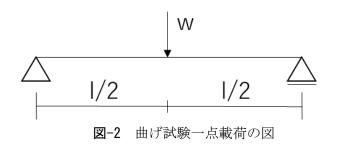


写真-1 小型熱プレス機 写真-2 曲げ試験機

キーワード:ボタニカルプレート、黒木、曲げ強度、機械学習

連絡先〒903-0123 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース 建設材料学研究室 e-mail: e205539@eve.u-ryukyu.ac.jp



4. 説明変数と目的変数の設定

試料には、三線製作時に生じる黒木の削り粕を微粉砕したものと、落ち葉を微粉砕したものを使用した。また、高温高圧の水蒸気で試料のヘミセルロースやリグニンを分解しか、供試体の強度や耐水性を向上することができるといわれる $^{5)6}$ オートクレーブ処理を施した試料でも試験を行った。また、同様に供試体の強度や耐水性を向上することができることから 7 、試料の一部をリグニン粉末で置換した試験も行った。以上より、試料、オートクレーブ、リグニン置換率(%)、含水率(%)、温度($^{\circ}$ C)、時間(min)、圧力(MPa)、質量(g)、厚さ(mm)、密度(g/cm $^{\circ}$)を説明変数とし、曲げ強度(N/mm $^{\circ}$)を目的変数とした。供試体は削り粕を1,落ち葉を2で表し、オートクレーブしたものは1、していないものは0と表した(表-1)。

5. データの整理と相関

プログラミング言語である Python を使用して、これまで作製した黒木のボタニカルプレートの曲げ 試験のデータをまとめた. 図-3 はヒストグラム、図-4 は目的変数と説明変数の相関、図-5 はヒートマップを示している. これらから、曲げ強度との間に、特に圧力と密度においてそれぞれ正の相関が見られ、曲げ試験結果に影響していることが分かる.また、厚さと曲げ強度には負の相関があり、厚さが大きいほど曲げ強度が低下している. これは、厚さが大きいほど密度が小さくなるため、密度とは逆の相関になったと考えられる.

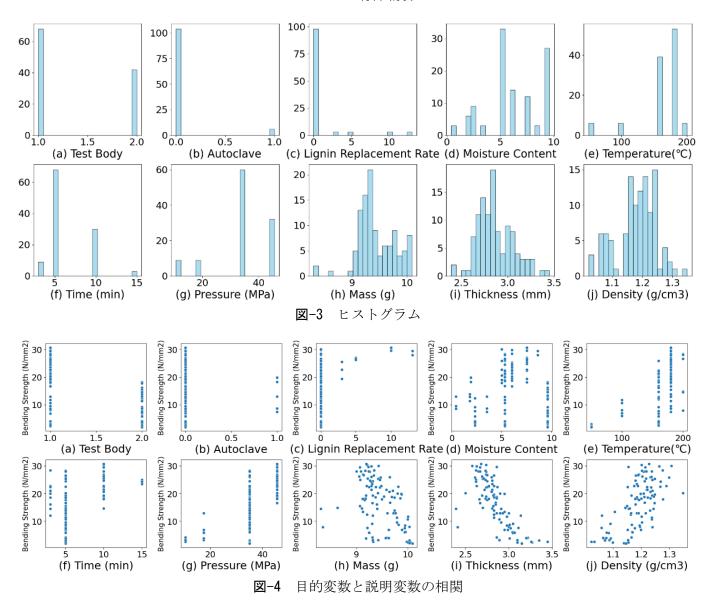
6. 機械学習を用いた強度推定

実験で得られた曲げ強度データ(全 110 件)の 8 割を学習用データ、2 割を評価用データとして使用し、重回帰分析 ⁷⁾・決定木 ⁸⁾・ランダムフォレスト ⁹⁾・深層学習ニューラルネットワーク ¹⁰⁾の 4 つの機械学習モデルを用いた曲げ強度推定を行った. それぞれ平均二乗誤差(MSE)と決定係数(R²)を算出、深層学習ニューラルネットワークでは平均絶対誤差(MAE)も算出した. 評価結果を図-6, ランダムフォレストにおける特徴量の重要度を表-2 に示す.

MSE, MAE は値が 0 に近いほど, R^2 は 1 に近いほど精度が良いことを示す.

変数名	標記	種類	備考
多 数石	徐 礼	俚积	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
試料	Test body		1(削り粕),2(落ち葉)
オートクレーブ	Autoclave		0(処理無し),1(処理有り)
リグニン置換率(%)	Lignin Replacement Rate (%)		0~13
含水率(%)	Moisture Content (%)		
温度(℃)	Temperature (°C)	説明変数	50~200
時間(min)	Time (min)	武明多数	3~15
压力(MPa)	Pressure (MPa)		10.5~45.6
質量(g)	Mass (g)		
厚さ(mm)	Thickness (mm)		
密度(g/cm³)	Density (g/cm³)		
曲げ強度(N/mm²)	Bending Strength (N/mm²)	目的変数	

表-1 説明変数と目的変数の設定



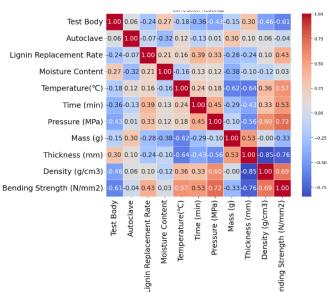


図-5 ヒートマップ

① 重回帰分析

重回帰分析は、目的変数と説明変数との関係を直線の式で表し、その関係を分析する方法で、多変量解析の中で最も一般的な分析手法である。p 個の変数がある場合、y を目的変数、x を説明変数、 b_n を定数項、 b_p を偏回帰係数として表すと、重回帰式は以下の(2)式で表される 7 . 結果は、MSE は 13.76、 R^2 は 0.8053 となった.

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + ... + b_p x_p$$
 ...(2)

② 決定木

決定木学習は、目的関数に関する知識を木構造によるルールの組み合わせで表現したものであり、生成された決定木はフローチャート的な木構造を成している.可読性が高いという特長を持つ⁸⁾. 分類のための分類モデルを作製する際は分類木、数値予

測などの回帰モデルを作成する際は回帰木をそれぞれ用いる. \mathbf{Z} -7 は今回の曲げ強度予測の回帰モデルとして作成された回帰木を示している. 結果は、MSE は 27.11、 \mathbf{R}^2 は 0.6162 となった.

③ ランダムフォレスト

ランダムフォレスト(図-8)は、アンサンブル学習の一種であり、複数の決定木を用いて森を構成して識別などを行うことで、より高い予測性能を有し過学習を抑えられる手法である。各決定木の学習に利用する学習データを選択する際に、重複を許してランダムに抽出し、分割関数を決定するパラメータもランダムに抽出する⁹. 結果は、MSE は 22.19、R²は 0.6858 となった。

④ 深層学習ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークは,生体の神経細胞を模 した人口ニューロンを基本構成要素として,生体の 神経回路網と同じように人口ニューロンがシナプスで結合したネットワーク構造を作る手法である 11 . また深層学習とは,多層の人口ニューラルネットワークを用いる機械学習の方法論を指す 12 . ニューラルネットワークには数多くの種類があるが,今回は多層パーセプロトン(図 $^{-9}$)を用いた.人口ニューロンは,入力数値 x_n にそれぞれ重み係数 w_n を掛け合わせて和を求め,バイアス b を加えた後,活性化関数に入力して出力 y を求める.結果は,MSE は8.626,MAE は 2.435, R^2 は 0.8779 となった.

4つの学習モデルのうち、MSEの値が最も小さく、R²の値が最も1に近いことから、深層学習ニューラルネットワークが最も精度の高い結果となったことが分かる。また評価結果の図は精度の高いものほどばらつきは小さくなっている。

ランダムフォレストにおける特徴量の重要度が最 も高かったのは厚さであった.これは厚さのデータ

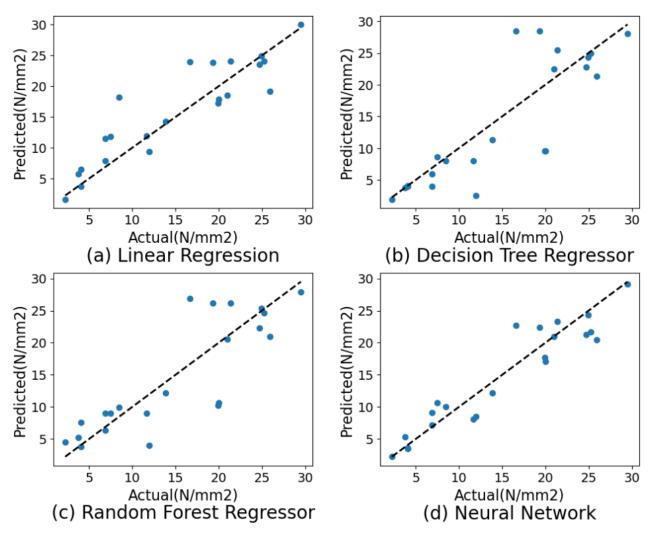


図-6 各機械学習モデルによる評価結果

が多く,曲げ強度にも相関的に影響を与えたため, 精度に与えた影響も大きかったのではないかと推測 する.

表-2 特徴量の重要度

順位	特徴量	重要度
1	厚さ(mm)	0.690
2	試料	0.134
3	質量(g)	0.054
4	密度(g/cm³)	0.050
5	圧力(MPa)	0.032
6	温度(℃)	0.015
7	リグニン置換率(%)	0.012
8	含水率(%)	0.007
9	時間(min)	0.006
10	オートクレーブ	0.000

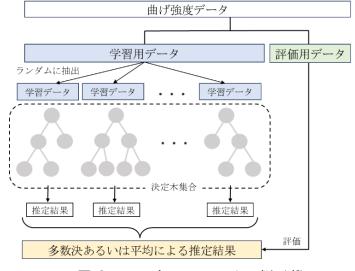


図-8 ランダムフォレストの概要 10)

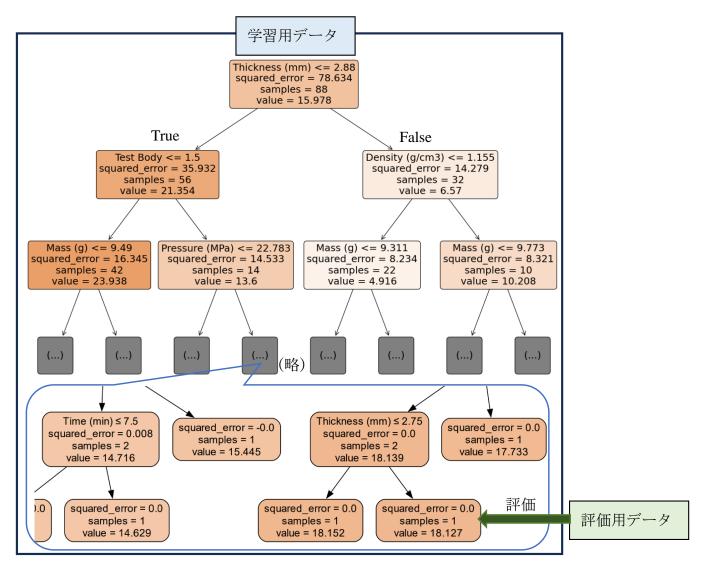


図-7 作成された回帰木

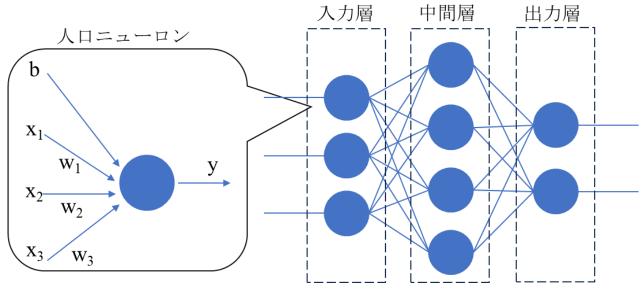


図-9 多層パーセプロトン 12)

7. まとめ

今回は、これまで行ってきた黒木のボタニカルプレートの曲げ強度データから、4つの機械学習モデルを用いて、曲げ強度推定を行った。4つの機械学習モデルのうち、深層学習ニューラルネットワークが最も精度の高い結果となった。課題としては、より精度の良い結果を得るために、さらにデータ数を増やす必要がある。

参考文献

- 1) 皆川佳唯ほか:コンクリートがれきと木材を原料 とする建設材料の開発,生産研究,研究速報,72巻 2号,p213-217,2020.
- 2) 三味線と三線の違いを勉強する前にまず三線を しろう!三線の各部の素材と名称編,三味線・二 胡音楽教室きずな(参照 2024 年 1 月 4 日) https://kizunamusicschool.com/blog/detail/2022092813 3058/
- 3) バイオコークスの研究と未来,その道の人に聞く,DOWA エコジャーナル(参照 2024/01/04): http://www.dowa-ecoj.jp/sonomichi/biocoke/02.html
- 4) 高橋勤子:木材の成分分析法と蒸気処理による 成分変化について,愛知県産業技術研究所,愛産 研ニュース11月号,p3,2008
- 5) 高橋勤子ほか: 木質系材料を用いた自己接着成 形体の製造, 愛知県産業技術研究所研究報告, 2004

- 6) 酒井雄也:植物性コンクリートの開発,一般財団法人 大成学術財団 2020 年度 助成研究梗概書
- 7) BellCurve: 統計用語集, BellCurve 統計 WEB, (参照 2024/01/04)

https://bellcurve.jp/statistics/glossary/initial/a/

- 8) 菅谷克行ほか:決定木を用いた情報検索能力の 分析,コンピュータ&エデュケーション,18巻, p145-151,2005
- 9) 波部斉: ランダムフォレストの基礎と最近の動 向,映像情報メディア学会誌,70巻5号,p788-791,2016
- 10) 清水寛太ほか: ランダムフォレストによる高流 動コンクリートのフレッシュ性状推定の試み, Cement Science and Concrete Technology, 74 巻, p265-272, 2021.
- 11) 岡谷貫之:技術解説 ディープラーニング,映像情報メディア学会誌,68巻6号,p466-471,2014
- 12) 神田寛行: Deep Learning (深層学習) の基礎知識と医療応用に向けた課題, 視覚の科学, 39巻3号, p75-79, 2018

謝辞:本研究で使用した黒木は、沖縄三線製作事業 協同組合より提供いただいた。また、本学工学部須 田裕哉准教授にご助言を頂いた。ここに感謝の意を 表す。

遅延膨張性 ASR により劣化したコンクリート橋における亜硝酸リチウムの補修効果検証

琉球大学 〇宮里昂志,富山潤(株)沖縄建設技研 宮城敏明,極東興和(株)森裕介,MicroRange 知念正昭

1. はじめに

沖縄県では、コンクリート用細骨材として使用されている海砂に、遅延膨張性のアルカリシリカ反応(以下、ASR と称す.)が生じる可能性が明らかとなっている ¹⁾が、これまでに報告された細骨材に起因する ASR による被害は限定的かつ軽微なものであった. しかし、2020 年に最大ひび割れ幅 2mm の比較的大きなひび割れが生じたコンクリート構造物が、海砂による遅延膨張性 ASR によるものと推定された. 本研究では、ASR 判定のための詳細調査および対策工法として、ASR に対して抑制効果が確認されている亜硝酸リチウム内部圧入工法 ²⁾を採用し、それが遅延膨張性 ASR に対して抑制可能か試験施工を行った. 本稿では、詳細調査の結果および亜硝酸リチウムの内部圧入工法の遅延膨張性 ASR に対する有効性を検討した.

2. 橋梁概要 · 調査項目

2.1 対象橋梁の概要

対象橋梁(以下, A橋と称す.) は沖縄県本島南部の海岸線から約5.1km 内陸部に位置し、竣工年1993年,全長63m,全幅5m,構造形式がポストテンション方式PC3径間連続中空床版橋の方杖ラーメン橋である. A橋は県道の上部に架設されており、地元住民の生活道路として利用されている. A橋の位置と外観を図-1に、A橋の側面図を図-2に示す. なお、亜硝酸リチウム内部圧入工法の試験施工は2021年に行われており、試験施工以外の範囲については2022年に内圧充填接合工法および表面保護工が施工されている.



図-1 A 橋の位置と外観

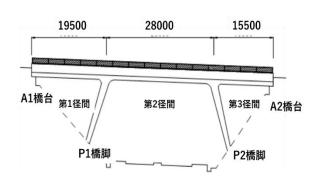


図-2 A 橋の側面図

2.2 点検・詳細調査方法

表-1 に、A 橋にて実施した調査項目と試験方法を示す.まず、No.1 の外観調査によりひび割れを確認し、次に No.2 から No.5 の詳細調査項目によって、A 橋のひび割れの原因を推定した.今回の試験で用いた P1 橋脚および P2 橋脚のコア採取位置をそれぞれ図-3、図-4 に示す.調査は 2020 年 10 月(竣工から 27 年後)に行った.

表-1 対象橋梁における調査項目と試験方法

No	調査項目	試験方法
1	外観調査	目視調査,打音調査
2	促進膨張試験	カナダ法
3	岩石学的試験	目視観察,実体顕微鏡観察 偏光顕微鏡観察,SEM-EDX 観察
4	中性化試験 塩分含有量試験	JIS A 1152 JIS A 1154
5	圧縮強度試験 静弾性係数試験	ЛЅ А 1108 ЛЅ А 1149

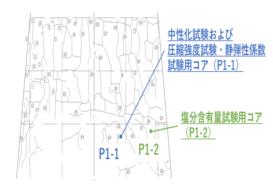


図-3 試験用コア採取位置(P1 橋脚・A1 側)

キーワード:遅延膨張性 ASR, 亜硝酸リチウム, 促進膨張試験, 岩石学的試験 連絡先 〒903-0123 西原町 1 番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース 建設材料研究室 E-mail: k228527@eve.u-ryukyu.ac.jp

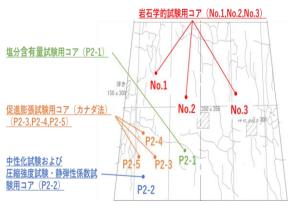


図-4 試験用コア採取位置 (P2 橋脚・A2 側)

(1) 外観調査

外観調査では、近接目視および打音調査を行い、 ひび割れの有無と幅および浮きを確認した. なお、 外観調査は2012年および2017年にも行われており、 損傷の進展程度についても確認した.

(2) 促進膨張試験

遅延膨張性 ASR¹⁾の可能性を考慮し、アルカリ溶液浸漬法 ³⁾ (通称:カナダ法) より膨張性を評価した. 試験に用いたコア試料は、P2 橋脚から直径約50mm,長さ約150mmを計3本(P2-3, P2-4, P2-5) 採取した. 表-2 に促進膨張試験の概要を後述するJCI-S-011 法と併せて示す.

表-2 促進膨張試験の試験方法および判定基準

試験名	試験方法	判定基準
アルカ リ溶液 浸漬ナ ダ法)	コンクリートコアを 80±2℃, 1N の NaOH 溶液に浸漬し,溶 減に浸剤と 張率の経時変化 を測定	試験開始後 21 日の膨張率で 0.1%以下:無害 0.1~0.2%:有害と無害な骨材 0.2%以上:潜在的に有害
JCI-S- 011 法	コンクリートコアを温度 90% 以上の環境で養生し経時変化を測定	

(3) 岩石学的試験

岩石学的試験は、RILEM AAR-64の手法に沿い目視観察、実体顕微鏡観察、偏光顕微鏡観察、SEM-EDX 観察を実施した. 試験に用いたコア試料採取位置を図-4に示す. コアは、P2 橋脚から採取した直径約50mm、長さ約150mmの3本(No.1~3)を用いた. 目視観察には拡大鏡を使用し、コンクリートコア外周に露出した骨材について、ASRの徴候の有無を観察した. また、画像解析ソフトを用いて、粗骨材の岩種構成率の算出も行った. その後、実体顕微鏡観察、偏光顕微鏡観察を行った. 細骨材の岩種構

成比は偏光顕微鏡にオートマチック・ポイントカウンターを取り付け、細骨材の粒子を岩種ごとにポイント集計し求めた. さらに SEM-EDX 観察により、偏光顕微鏡では検出が難しい微細なひび割れを観察した.

(4) 中性化試験および塩化物含有量試験

中性化試験には P1 橋脚と P2 橋脚から直径約75mm, 長さ約360mm のコアをそれぞれ 1 本ずつ (P1-1, P2-2) 採取し、JISA1152 に準拠して中性化深さを測定した. また,塩化物含有量試験には P1 橋脚と P2 橋脚から直径約75mm,長さ約360mmのコアをそれぞれ1本ずつ (P1-2, P2-1) 採取し、JISA1154に準拠し、コア中の全塩分量を測定した.採取したコアの測定間隔は20mmピッチとした.

(5) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

試験には P1 橋脚と P2 橋脚から直径約 70mm,長 き約 135mm のコアをそれぞれ 1 本ずつ (P1-1, P2-2)計2本採取した. 採取したコアは、JIS A 1108 および JIS A 1149 に準拠し、コンクリートの圧縮強度試験および静弾性係数試験を行った. 基準となる圧縮強度は、土木工事設計要領第 1 編共通編・河川編5より 40N/mm²と想定した.

3. 調査結果および考察

3.1 外観調査

図-5と図-6にP1橋脚とP2橋脚の損傷図を示す. 図中の赤線はひび割れ幅 0.2mm 以上のひび割れを示している. P1 および P2 橋脚ともに全体にわたって, ひび割れ幅が 0.2mm~2.0mm の ASR と思われる亀甲状のひび割れの発生が確認された. ひび割れは 2012 年および 2017 年の定期点検時より大きく進展し, 部分的に剥離剥落している箇所も確認された.

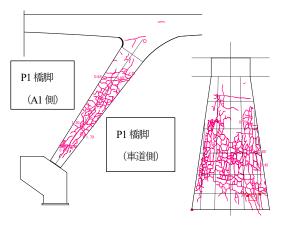


図-5 P1 橋脚の損傷図

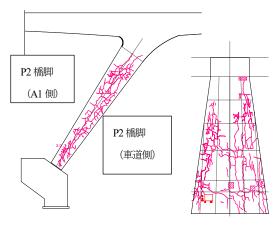


図-6 P2 橋脚の損傷図

3.2 促進膨張試験

図-7 にカナダ法による促進膨張試験結果を示す. P2-3 および P2-4 は、判定基準21 日において膨張率は 0.1%に達し、有害と判定される. 一方で P2-5 は、 0.09%と無害判定となるが、21 日から 28 日までの膨張率の伸び量は、他の 2 つのコア試料より大きく 28 日では、0.23%の膨張を示している. 以上の結果を総合的に考えると ASR 膨張は有害と考えられる.

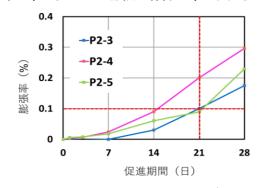
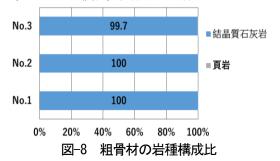


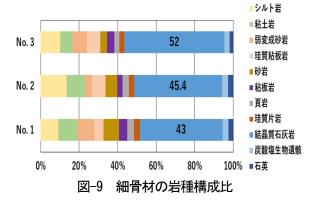
図-7 促進膨張試験結果(カナダ法)

3.3 岩石学的試験

(1) 岩種構成

図-8 に粗骨材, 図-9 に細骨材の岩種構成比を示す. 粗骨材はNo.1, No.2, No.3 いずれも結晶質石灰岩が大部分を占めていることが確認された. 一方で, 細骨材は, 粗骨材と同種の結晶質石灰岩が約半分を占め, 残りは堆積岩, 変成岩で構成されている.





(2) 岩種判定

粗骨材のほぼ全て、細骨材の半数近くを占める結晶質石灰岩は、大部分が方解石で構成され、ASRの 徴候は認められない.一方、その他の細骨材では、シルト岩、粘土岩などの反応性岩種において、反応 リムが見られることに加え、骨材からセメントペーストに至るひび割れが生じていることが確認できた. 図-10にASRの非反応性岩石である結晶質石灰岩と ASR の反応性岩石のシルト岩の偏光顕微鏡写真を示す.図-10(C)に示すように、反応性岩種には隠微晶質〜微晶質石英が含まれており、遅延膨張性 ASR のポテンシャルを持っているのと判断される.

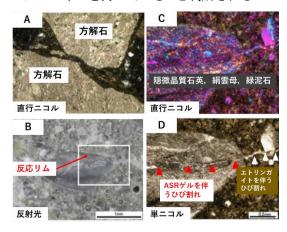


図-10 偏光顕微鏡写真 (A が結晶質石灰岩, B, C, D がシルト岩)

(3) SEM-EDX 観察

ASR の徴候が顕著な各粒子を対象に、反応生成物である ASR ゲルの存在を SEM-EDX 観察で確認した。No.1、No.2、No.3 いずれも、細骨材中の反応性岩種において図-11 に示すように ASR ゲルが確認された。これらの各反応性岩種では、骨材からセメントペーストに至るひび割れ内部において、ロゼット状からゲル状の生成物で充填されており、ゲルは典型的な ASR ゲルの成分である Si, Ca, Na, K で構

成されていることを確認した.

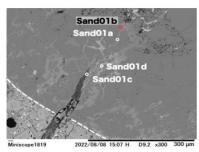


図-11 砂岩 (No. 1) のひび割れにおけるロゼット 状からゲル状の ASR ゲル (SEM-EDX 観察)

3.4 中性化試験・塩分含有量試験

P1-1, P2-2 とも中性化深さは 0mm である. したがって, P1 橋脚, P2 橋脚の表面のひび割れは, 中性化による鉄筋腐食に伴うものではないと判断される. また, コンクリートコアの深さごとの塩化物イオン濃度は, P1-2 および P2-1 のいずれのコア試料も鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m³以下であった. したがって, P1, P2 橋脚の表面ひび割れは塩害による鋼材腐食に伴うものではないと判断される.

3.5 圧縮強度試験・静弾性係数試験

表-3 に圧縮強度試験結果,図-12 に圧縮強度と静 弾性係数の関係を示す。図中には比較のために土木 学会コンクリート標準示方書に示された普通コンクリートの値も併せて示す。いずれの試験体もひび割れのない箇所から採取しているが、ASR 劣化した構造物の特徴として一般的に観察されるように圧縮強度に比較して静弾性係数はわずかに低下していることが分かる。このことからPI 橋脚とP2 橋脚において外観されたひび割れは、ASR である可能性が高いと考えられる⑦.

表-3 圧縮強度および静弾性係数

	試験体	圧縮強度 (N/mm²)	<mark>静弾性係数</mark> (N/mm²)
+呑PHI	P1-1	43.4	28100.0
橋脚	P2-2	45.7	26700.0

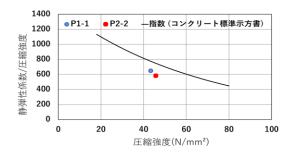


図-12 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.6 ひび割れの原因推定

中性化試験および塩分含有量試験結果より、A橋のひび割れは、中性化や塩害による鉄筋腐食に起因するものではないと判断された。また、促進膨張試験および圧縮強度と静弾性係数の関係より、A橋のひび割れはASRに起因するものであり、また岩石学的試験により、細骨材中の各岩種には遅延膨張性のポテンシャルを持つ隠微晶質~微晶質石英が多量に存在していることが判明したため、細骨材起因の遅延膨張性 ASR であると推定される。

4. 亜硝酸リチウムによる遅延膨張性 ASR 抑制効果

調査結果から A 橋の劣化機構は遅延膨張性 ASR によるものであることが明らかとなった。その抑制を目的として P2 橋脚に亜硝酸リチウム内部圧入工法を試験的に施工した。施工後に採取したコアを用いて促進膨張試験を行い,亜硝酸リチウム圧入前の試験結果と比較し,亜硝酸リチウムの効果検証を行った。また,亜硝酸リチウムの浸透状況と圧入量の妥当性を確認するために,呈色反応試験およびアルカリ含有量 (Na_2O_{co}) 試験を行った。

4.1 亜硝酸リチウム内部圧入工法概要 2)

亜硝酸リチウム内部圧入工法はコンクリートに直径 20mm の削孔を 750mm 間隔で行い、そこから亜硝酸リチウム水溶液に圧力をかけて注入する工法である. 図-13 に亜硝酸リチウム内部圧入工法施工状況を示す. 亜硝酸リチウム中のリチウムイオン(Li)が、ASR ゲルの Na イオンを置換し、非膨張化する.



図-13 A 橋における内部圧入工法施工状況

4.2 亜硝酸リチウムの浸透・圧入量確認

(1) 亜硝酸リチウムの浸透確認

A橋の圧縮強度の実測値は約45N/mm²と高く,高強度コンクリートにおける亜硝酸リチウムの浸透状況確認のため,圧入孔の近くからコア試料を採取し,TDI試薬を用いて呈色試験を行い亜硝酸リチウムの浸透状況を確認した。圧入済みP2橋脚における圧

入工①, ⑩, ⑫の3孔を選定しその孔から100,200, 300, 400mm 離れた位置からコアを採取し、(P2-①)、 P2-⑩, P2-⑫) 亜硝酸リチウムの呈色反応試験を実 施した. 採取したコアの直径はそれぞれ 30mm であ る. 図-14 に呈色反応試験と後述する圧入後の促進 膨張試験用のコア採取位置を示し、図-15 に呈色試 薬塗布後を示す. 圧入孔①および②においては、100 ~400mm のいずれのコア表面にて茶褐色の変色が 認められる. 一方, 圧入孔⑩を見ると 300, 400mm のコアには呈色が見られるものの、圧入孔に近い 200mm のコアには十分な呈色が認められない. 本工 法による亜硝酸リチウムの浸透は、コンクリート中 の微細ひび割れや密実度の違いなどに影響を受ける ことが確認されているため、この圧入孔⑩付近では その原因により均一な浸透が得られていない可能性 がある. 亜硝酸リチウムによる ASR 膨張抑制効果 は、リチウムイオンがアルカリシリカゲルに到達し てはじめて発揮されることを考えると、今回の対象 橋梁施工では局部的に ASR 膨張抑制効果が得られ ない範囲が生じると考えられる.

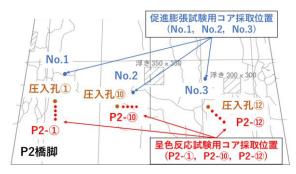


図-14 コア採取位置(呈色反応試験用と促進膨 張試験用)

	•		〜	13/									
圧入番号		P2	-①			P2	-10			P 2	-(12)		
圧入孔か らの距離 (mm)	100	200	300	400	100	200	300	400	100	200	300	400	
呈色状						1							表面
九 況	887												内部

図-15 呈色試験反応後の外観(亜硝酸リチウム が存在している箇所は茶褐色に変色する)

(2) 亜硝酸リチウムの圧入量確認

コンクリート中のアルカリシリカゲルの膨張を抑制するために必要なリチウムイオン量は,一般社団

法人コンクリートメンテナンス協会の設計・施工指 針 2)を参考に設定した、コンクリート中のアルカリ 含有量を標準的な 3kg/m³ とみなしてそれに応じて, [Li/Na]モル比が 0.8 となるように圧入量を算出して いる. 図-16 にアルカリ含有量と亜硝酸リチウムの 圧入量との関係を示す、対象橋梁のアルカリ含有量 が経験値よりも高い場合、亜硝酸リチウムの量も標 準より多く必要となる. そこでアルカリ含有量試験 を行い、対象橋梁のアルカリ総量を測定し、亜硝酸 リチウム必要量の再評価を行った. 試験方法は「コ ンクリートの耐久性向上技術の開発付属資料 3.3 コ ンクリートの水溶性アルカリ金属元素の分析方法 8)」 に準拠して行った. 試験に用いたコア試料は、P1 橋 脚とP2橋脚から3本(P1-7, P1-1, P2-1)を採取し た. コアの直径はそれぞれ 70mm である. 試験結果 を表-4に示す. 試験の結果、いずれの試験結果も標 準的なアルカリ含有量(Na₂O_{ea})の 3kg/m³ 大幅に下回 っており、通常の[Li/Na]モル比 0.8 にて圧入すると ころを、本橋では「Li/Na]モル比 2.7 に相当する大量 の亜硝酸リチウムを圧入したことになる. よって本 橋における亜硝酸リチウムの圧入量が不足していた 可能性は低いと判断できる.

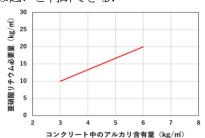


図-16 アルカリ含有量と亜硝酸リチウム圧入量 との関係

表-4 アルカリ含有量(Na₂O_{ea}) 試験結果

試料名	P2-1	P1-1	P1-7
試験結果(kg/m³)	0.85	1.7	1.8

4.3 亜硝酸リチウムによる膨張抑制効果

図-17 に P2 橋脚から採取した亜硝酸リチウム圧 入後の促進膨張試験結果を示す. コア No.1 および No.3 は無害判定 (No.1 で 0.069%, No.3 で 0.065%) となったものの, No.2 では有害判定 (No.2 で 0.162%) となった. 今回行った促進膨張試験については,圧 入前と同様にカナダ法によるものであるが,これは 亜硝酸リチウムの圧入前後の試験条件を揃えるため

である. ここで、カナダ法は採取したコア試料に強アルカリの NaOH 溶液を浸透させることで ASR 膨張を促進する試験方法であるが、これが亜硝酸リチウム圧入後のコア試料中のアルカリ含有量を増大させ、相対的に亜硝酸リチウムが不足する状態へと変化する可能性がある. そこで今回は追加試験として、表-2 に示した JCI-S-011 法による促進膨張試験も行った. コアは圧入前の P1 橋脚と圧入後の P2 橋脚から 2 本 (P1-7、P2-1) 採取した. 圧入前後の試験結果を図-18 に示す. JCI-S-011 法 9での促進膨張試験結果は圧入前と圧入後のいずれも膨張率は小さく、遅延膨張性 ASR の場合、JCI-S-011 法では、抑制効果を評価できない可能性が示された.

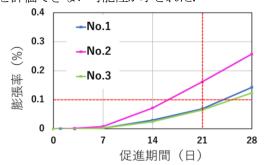


図-17 圧入後の促進膨張試験結果(カナダ法)

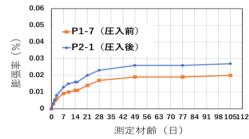


図-18 圧入前後促進膨張試験結果(JCI-S-011 法) 4.4 試験結果まとめ・考察

対象橋梁における膨張性の評価は、カナダ法により圧入前後の相対的な評価で可能であることが分かった。その一方、JCI-S-011 法による促進膨張試験では、本来有害であるはずの本橋の膨張性を過小評価してしまっており、補修効果の検証には適さない可能性が示唆された。カナダ法による圧入後の促進膨張試験結果においては、コア試料名 No.2 のみが有害判定となった。ここで、呈色反応試験結果との関係を整理すると、図-14 と図-15 に示すように亜硝酸リチウムの浸透が十分でない圧入孔⑩付近の No.2 では有害判定となり、亜硝酸リチウムが浸透している圧入孔⑪と⑫付近の No.1 と No.3 では無害判定と

なった.これより, 亜硝酸リチウムの未浸透範囲近傍の膨張は抑制できていない可能性が示唆された.

5. まとめ

各種試験により確認された対象橋梁の劣化機構である遅延膨張性 ASR にも亜硝酸リチウムによる膨張抑制効果は検証できた.アルカリ含有量試験の結果は極端に小さかったため、亜硝酸リチウムの必要量は十分に確保できていると考える.よって本橋における圧入後のカナダ法による促進膨張試験結果は、過大に評価されている可能性もあるが、今後の課題としてアルカリ含有量が極端に少ないにも関わらず、有害判定となった原因を調べる必要がある.また、より多くの遅延膨張性 ASR による劣化構造物に対して本手法を適用し、適用範囲や膨張抑制効果の評価方法の検討を行っていく必要がある.

謝辞:本研究を遂行するにあたり、現場を提供して頂いた八 重瀬町役場及び、有益な助言を頂いた須田裕哉琉球大学准教 授に、この場を借りて謝意を表す。

参考文献

- 1) 富山潤,大城武,金城和久,新城竜一:遅延膨張性を示す細骨材に起因したアルカリ骨材反応に関する基礎研究と抑制対策,コンクリート工学年次論文集,Vol.33,No.1,pp. 1049-1054,2011.
- 2) 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会:コンクリート構造物を対象とした亜硝酸リチウムによる補修の設計・施工指針(案)第2版
- 3) 鳥居和之,山田一夫,ほか:コンクリート診断-ASRの的 確な診断/抑制対策/岩石学的評価,森北出版,2017.4
- 4) Godart, B., de Rooij, M. and Wood J.G.M.: Guide to diagnosis and appraisal of AAR damage to concrete in structures. Part 1 diagnosis (AAR6.1). Springer, Berlin, p.89, 2013.
- 5) 土木工事設計要領第1編共通編・河川編, p44
- 6) 日本コンクリート工学協会編:作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, p. 37, 2008.
- 7) 日本コンクリート工学会偏: ASR の診断とあるべき姿研究委員会,pp. 106-107, 2014.
- 8) 土木研究センター付属資料 3.3:「コンクリートの耐久 性向上技術の開発」, pp. 159-160, 1989.5
- 9) 日本コンクリート工学会: JCI-S-011-2017 「コンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法」

塩害劣化予測に対する機械学習モデルの検証と特徴量の解釈

琉球大学 ○吉見映輝, 富山潤

1. はじめに

沖縄県は四方を海に囲まれた島嶼環境であり、海岸線の橋梁等の比較的規模の小さなものから離島架橋等の大規模のものまで多くの橋梁が建設されている。また、夏から秋にかけて襲来する台風や季節風による冬季の風浪の影響から多くの飛来塩分が供給ており、構造物の塩害が問題となっている。これらの事柄から、コンクリート構造物の点検手法と襲来する飛来塩分量の予測技術の高度化が望まれるところである¹⁾.

一方、近年、複雑な回帰問題や分類問題に対して、 機械学習など AI 技術の適用に関する研究が盛んに行 われ、土木工学の分野においても様々な用途で AI 技 術の利用が進んできている 2), 3). 筆者らの既往の研 究において、いくつかの地域の気象条件、飛来塩分、 付近の情報、コンクリート構造物の諸特性から、塩害 による劣化を予測可能なコンクリート構造物の長期性 能照査支援ソフトウェア(LECCA)4)を用いて腐食およ び腐食ひび割れの発生時期を計算し、この予測値と、 それらを算出するために必要な入力データを用いて機 械学習を行った結果、コンクリート構造物の腐食およ び腐食ひび割れ発生時期をある程度の精度で予測でき ることを示した5. その研究では入力データとしての 説明変数(以下、特徴量)の重要度について触れられ ているが、学習モデルおよび特徴量の解釈の仕方につ いてはさらに検討する必要があることを今後の課題と している.

そこで、本研究では、既往の研究 5) で実施した LECCA の入力データとそれに基づく計算結果である 腐食および腐食ひび割れ発生時期に対して、複数の学 習アルゴリズムを検討し、機械学習モデルの構築に加 え、そのモデルの特徴量の解釈について検討するため に、重要度に加え、SHAP(SHapley Additive exPlanations) 6) を取り入れた.

2. LECCA の概要および検討条件 (解析条件)

LECCA(Long time Evaluation Program for Concrete

Structures by Computational Analysis)は、日本コンクリート工学会「コンクリート構造物の長期性能シミュレーションソフト作成委員会」で開発されたコンクリート構造物の長期性能支援ソフトウエアであるも、LECCAでは、塩分浸透、鉄筋腐食、凍害、中性化などの劣化予測が可能である。本論文の塩害劣化予測計算に用いたLECCAは、文献5)で用いたものから「汀線からの距離」に応じた表面塩化物イオン濃度の算出方法に改善が行われ、計算値は文献5)とわずかに異なっているが、大きな違いはないことを確認した、LECCAの計算アルゴリズムなどの詳細については、文献4)などを参照されたい。

2.1 塩害劣化予測条件

LECCA による塩害劣化予測計算の条件は文献 5) と同条件とした. 以下にその概要を述べていくことと する.

(1) 諸条件の入力条件

LECCAでは、日本の154地点における過去の気象データ(風向・風速・気温・降水量など)が1991年から2000年までの10年間にわたってデータベース化されている。計算対象の地点を選択することにより、塩分浸透の計算に対して風向や風速を反映させることが可能である。関連して、塩分浸透の計算で必要となるセメントの種類、水セメント比、単位セメント量、ならびに単位水量を入力値としている。

本研究では、セメントに普通ポルトランドセメントを使用し、対象とした地域、コンクリート構造物の条件、陸上構造物としての諸条件をそれぞれ表一1、表一2、表一3に示す。なお、選定した地域は、塩害地域区分 A の沖縄県与那国、塩害地域区分 B の新潟県、塩害地域区分 C の山口県と設定し、全入力データは、目的変数が腐食発生時期で960個、腐食ひび割れ発生時期で713個となる。なお、このデータは全計算結果のうち、腐食および腐食ひび割れ発生時期が150年を超えるデータを除いた結果となっている。

キーワード:機械学習,飛来塩分,腐食発生時期,コンクリート構造物,塩害劣化予測

連絡先:〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース

E-mail: k228528@eve.u-ryukyu.ac.jp

2.2 解析条件

本研究では、道路示方書の塩害の影響度合いと環境区分により、異なる環境の3地点(新潟、山口、与那国)を選択した。また、コンクリート構造物の条件として、セメント種類は普通ポルトランドセメントとした。飛来塩分の発生・輸送モデルとしては宇多モデル3)を採用した。各種説明変数を表-2に示す。

表-1 対象とした地域

地域区分	気象デー	タの指定	気象データから算出した結果
地域区力	都市名	利用年	平均風速(m/s)
А	与那国	標準年	5.28
В	新潟	標準年	2.9
С	中口	標準年	1.39

表-2 コンクリート構造物の条件

水セメント比(%)	かぶり(mm)	ひび割れ深さ(mm)		
35	50	0	25	50
50	70	0	35	70

表-3 陸上構造物の諸条件

設定	波浪条件	のパラメータ	
汀線からの距離(m)	海面からの高さ(m)	波浪条件	海岸地形条件
1	2	日本海側	岩礁性
50	5	太平洋側	砂礫
100	10		
200			

3. 機械学習を用いた検討

本研究では機械学習の計算にプログラミング言語である Python⁷⁾ を用いてモデルを構築した. 開発環境には ANACONDA の JupyterNotebook⁸⁾を利用した. 使用したライブラリは scikit-learn⁹⁾, pandas¹⁰⁾ などである.

3.1 Pycaret について

本研究では、自動機械学習(Automated Machine Learning:AutoML)ライブラリの1つである Pycaret¹¹⁾を使用し、複数の学習モデルを検討した. Pycaret とは Python で実装されたオープンソースの機械学習ライブラリの一連の作業を少ないコーディングで実装できるため、計算処理の効率化や自動化を図ることができる. 今回実装した Pycaret では、20 種類以上ものアルゴリズムを比較検討することができるため、本研究で対象とした回帰問題に最適なアルゴリズ

ムを選定することに適している. なお, 本研究ではハイパーパラメータの調整は行っていない. **表-4**に今回検討したアルゴリズムの名称を示す. ここでは各アルゴリズムの簡単な説明をページ数の都合上,

CatBoost, Random Forest, Extra Trees, k 近傍法の 4 つ に絞って行う.

CatBoost¹²⁾ は、勾配ブースティングを用いたアルゴリズムで、カテゴリカル変数の扱い方が他に比べ優れていとされている。また、過学習を起こしづらくなるような工夫がされている。そして、多重共線性がある特徴量が複数ある場合に新たなカテゴリカル変数を作りその問題に対処している。

Random Forest¹³⁾ は、複数の木構造を構築し、それ らの並列的に用いて精度を高めていく、バギングによ り回帰を行うアルゴリズムである.

Extra Trees (Extremely randomized trees) ¹⁴⁾ は、Random Forest と似たバギング系のアルゴリズムであるが、特徴量を 2 分割して木構造を作成する際に持ちる指標であるジニ係数(またはエントロピー等)をランダムに選択する特徴がある。

k 近傍法(k-Nearest Neighbors)¹⁵⁾ は、考察の対象となる説明変数の近傍にある k 個のデータのうち、最もユークリッド距離が近いデータの目的変数を考察している入力の出力とするアルゴリズム。k の値によって精度が変化する(k が小さいとノイズに弱く、k が大きいと精度が低下する)。

表-4 検討したアルゴリズム

払 「	IXIII O IC / // - / / / C
Pycaret での略称	Sckit-learn での名称
ada	AdaBoost Regressor
br	Bayesian Ridge
catboost	CatBoost Regressor
dt	Decision Tree Regressor
dummy	Dummy Regressor
en	Elastic Net
et	Extra Trees Regressor
gbr	Gradient Boosting Regressor
huber	Huber Regressor
knn	K Neighbors Regressor
lar	Least Angle Regression
lasso	Lasso Regression
lightgbm	Light Gradient Boosting Machine
llar	Lasso Least Angle Regression
lr	Linear Regression
omp	Orthogonal Matching Pursuit
par	Passive Aggressive Regressor
rf	Random Forest Regressor
ridge	Ridge Regression
xgboost	Extreme Gradient Boosting

3.2 アンサンブル学習 16)について

機械学習におけるアンサンブル学習は複数の精度の低いモデル(弱学習器)を組み合わせて、1つの精度の高い学習モデルを生成する手法である。また、アンサンブル学習の中でも、弱学習器を並列的に学習していく手法がバギングであり、学習データを復元抽出することによってデータセットに多様性を持たせている。一方で、弱学習器を直列的に学習していく手法がブースティングである。まず、基本となるモデルを最初に訓練してベースラインを設けて誤差を求める。この誤差が減るよう重みを加味して次のモデルを改善する流れを繰り返し行い、まとめることで精度を上げていく手法である。

3.3 k 分割交差検証法 ¹⁷⁾について

本研究で用いた Pycaret では、構築したモデルの汎化性能を評価するとして、 k分割交差検証が採用されている。 k-fold 値は Pycaret のデフォルト値である 10 とした.

学習用データでの予測精度が高いのにも関わらず、評価用データでの精度が悪くなる過学習が起きてしまうことがある. k 分割交差検証では、データを k 個に分割し、そのうちの1つを評価用データ、k-1個を学習用データとして評価を行う. k 個のデータ全てが 1回ずつ評価用データとなるように k 回学習を行うことによって精度の平均をとることで過学習を防いでいる.

3.4 学習モデルの解釈性 16) について

近年、ニューラルネットワークや XGBoost などの高い推定精度の得られるさまざまなアルゴリズムが検討される一方で、そのモデルの解釈性は低いと言われている。実際にアルゴリズムを実装する際にはそのモデルがなぜ、その予測を行ったか、どのような特徴量が効いているのかを知ることは重要であり、機械学習も精度だけでなくモデルや特徴量に対する解釈性や説明性を求める見方が強くなっている。

4. 特徴量の重要度 ¹⁶⁾ および SHAP⁶⁾ について

4.1 特徴量の重要度について

重要度とはその特徴量の分割がターゲットの分類・回帰にどれくらい寄与しているか測る指標であり、ジニ不純度²¹⁾をもとに計算することができる.機械学習において決定木系のアルゴリズムを用いてモデルを構築した際に、各特徴量(説明変数)がどれくらい予測

に影響を与えているかを判断する目的で確認されることがしばしばある. ジニ不純度はノードごとにターゲットがどれくらい分類できていないかを測る指標である. あるノードにおけるジニ不純度は以下の式(1)で定義される.

$$G(k) = \sum_{i=1}^{n} p(i) \times (1 - p(i))$$
 (1)

ここで、G(k)はあるノード k における不純度、n は ターゲットラベルの数、p(i)はあるノード k におけるターゲットラベルいの頻度を示している。式(1)から、ノードにおいて完全にサンプルが分類されている場合、ジニ不純度は 0 になる。上述したジニ不純度をもとに重要度は以下の式(2)ように定義される。

$$\begin{split} I(j) &= \sum_{i=1}^{n \in F(j)} \left(N_{parent}(i) \times G_{parent}(i) \right) \\ &- \left(N_{left_child}(i) \times G_{left_child}(i) \right) \end{split}$$

$$+ N_{right_child}(i) \times G_{right_child}(i)$$
 (2)

ここで、I(j)はある特徴量jにおける重要度、F(j)はある特徴量jが分割対象となるノードの集合、 $N_{parent}(i)$ はあるノードiにおけるサンプル数、 $N_{lef_child}(i)$ はあるノードiの子ノードのうち左側のノードのサンプル数、 $N_{right_child}(i)$ はあるノードiの子ノードのうち右側のノードのサンプル数、 $G_{parent}(i)$ はあるノードiにおけるジニ不純度、 $G_{left_child}(i)$ あるノードiの子ノードのうち左側のノードのジニ不純度、 $G_{right_child}(i)$ あるノードiの子ノードのうち右側のノードのジニ不純度である。重要度はある特徴量で分割することでどれくらいジニ不純度が下げられるかを意味している。

4.2 SHAP⁶⁾ について

SHAP(Shapley Additive exPlanations)はモデルの予測結果に対する各説明変数(特徴量)の寄与度の把握や機械学習モデルの解釈をするための手法である.獲得利得を各プレイヤーに公平に分配する手法の協力ゲーム理論の Shapley 値を応用したものである.機械学習モデルの解釈には,協力ゲーム理論における各プレイヤーを機械学習モデルの各特徴量に置き換えて SHAPを計算する.ある特徴量i以外の全ての特徴量の組み合わせについて,予測モデルの出力 f_x が特徴量iを含むこ

とで生じる予測結果の差を評価する.

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|! (n - |S| - 1)!}{n!} (f_x(S \cup \{i\}) - f_x(S))$$
(3)

$$f_{x}(S) = E\{f(x)|x_{S}\}\tag{4}$$

ここで、 ϕ_i はShapley値、Sは特徴量iを除いた特徴量の部分集合であり、 $f_x(S)$ は特徴量の集合Sの元での予測結果の期待値である。

5. 結果および考察

5.1 高い推定精度を示したアルゴリズム

表-5 に予測精度の順位を示す. モデルの評価指標として決定係数R2とRMSEを用いた. 決定係数R2は式(5)で定義される. 回帰予測値の残差変動と目的変数値の変動の比を引いたものであり, 1.0に近いほど高い精度を示す.

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_{i} - \widehat{y}_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (y_{i} - \overline{y}_{i})^{2}}$$
 (5)

ここで、N はテストデータの数、 y_i は目的変数の実測値、 \hat{y}_i はモデルによる推定値、 \bar{y}_i は目的変数の平均値である。RMSE(Root Mean Squared Error)は平均的な予測誤差を表す指標で、式(6)で算出できる。各データに対して予測値と実測値の差の二乗値の総和をデータ数で割り、平方根をとった値である。0 に近いほど高い評価であることを示している。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2}$$
 (6)

TT (Training Time) はそのモデルの学習時間のことである.

ここでは予測精度の高い傾向の決定木系の CatBoost, Random Forest, Extra Trees に加え,決定木系以外の最も精度の良いアルゴリズムとして k 近傍法の合計 4 個について議論する.

図-1 は腐食発生時期,図-2 は腐食ひび割れ発生時期を目的変数とした,アルゴリズム別の計算値と推定値の関係の一例を示したものである.どのモデルの精度も決定係数 \mathbf{R}^2 が $\mathbf{0.9}$ 以上あり,精度が高いことがわかる.決定木系の推定精度が特に高く \mathbf{k} 近傍法と比較して若干ではあるが優れていることが分かる.

図-3 は、異なる 30 個のシードで学習した際の R^2 の最も高い値を示したアルゴリズムの回数の集計である。 Extra Trees,Catboost の回数が大きくなっている。k 近 傍法は1度も最も高い R²を算出しておらず,決定木系のアルゴリズムが上位を占めている. Catboost は機械学習のコンペティションでも活躍しているアルゴリズムであり,本モデルにおいても高い精度を示している. 図-3(a), (c)では Extra Trees, Random Forest が非常に良い結果を出しており,ブースティング系のみではなくバギング系のアルゴリズムでも高い精度を示すことが確認できた. 総じて,決定木系のアンサンブル学習であるアルゴリズムは k 近傍法等のそうではないアルゴリズムと比較して本研究で使用したデータとの相性がいいのが分かる.

表-5 腐食発生時期の予測精度の順位

Rank	Model	\mathbb{R}^2	RMSE	TT (Sec)
1	et	0.989	2.467	0.452
2	catboost	0.988	2.792	5.716
3	rf	0.987	3.001	0.644
4	lightgbm	0.985	3.858	5.86
5	xgboost	0.985	3.313	0.279
6	dt	0.984	2.896	0.133
7	gbr	0.984	4.174	0.23
8	knn	0.922	10.355	0.922
9	ada	0.903	11.892	0.333
10	huber	0.685	20.450	0.189
11	en	0.675	20.298	0.163
12	br	0.634	20.914	0.171
13	lasso	0.633	20.920	0.159
14	llar	0.633	20.921	0.139
15	ridge	0.629	21.005	0.177
16	lr	0.629	21.009	7.976
17	lar	0.629	21.018	0.153
18	par	0.415	29.097	0.143
19	omp	0.162	35.173	0.13
20	dummy	-0.013	38.725	0.272

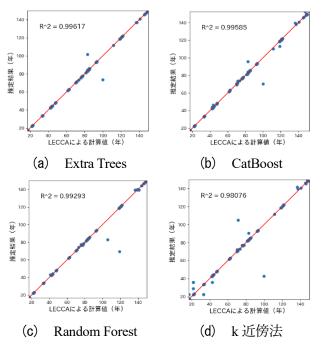


図-1 腐食発生時期の計算値と予測値の関係

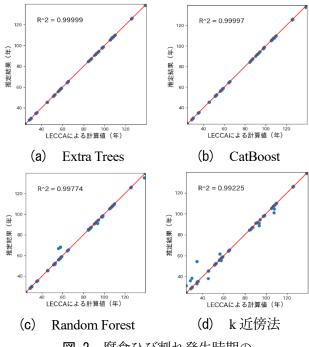
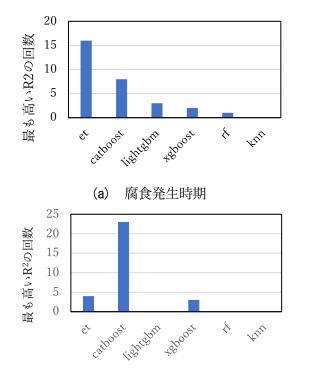


図-2 腐食ひび割れ発生時期の 計算値と予測値の関係



(b) 腐食ひび割れ発生時期

図-3 最も高い推定精度のアルゴリズムの集計

5.2 特徴量の重要度や寄与度

本研究で用いた 12 個の説明変数の特徴量を確認する. ここでのアルゴリズムは, 先ほどの比較において最も高い決定係数 \mathbf{R}^2 を示す回数が腐食発生時期, ひび割れ発生時期のどちらにおいても比較的大きかった $\mathbf{CatBoost}$ とする.

図-4 はアルゴリズムがモデルを構築する際に算出

された特徴量ごとの重要度を表している. 図-4の(a) と(b)に共通して言えるのは、表面濃度、かぶり、見かけの拡散係数、 W/C の 4 つは非常に大きく、汀線からの距離、平均風速、年間平均飛来塩分量の3つが中程度、ひび割れの有無、海岸地形条件、波浪条件、海面からの高さ、発錆塩化物イオン濃度の5つは非常に小さい重要度となっている。また、表面濃度と平均風速には相関関係があるが、互いの重要度は大きく離れているから、多重共線性の影響を受けている可能性がある。

図-5はインスタンスごとのSHAP値を示している. SHAP 値は各特徴量の寄与度を可視化したものであり、 上から重要度(SHAP 値の平均を取ることで算出でき る) の高い順に並んでいる. 図-5(a) において最も重 要度が高かったかぶりはその値が大きくなると腐食発 生時期に正に寄与する. 一方, 2 番目の表面濃度は値 が小さいほど正に寄与しており、コンクリート構造物 の表面塩分濃度が高いほど内部鉄筋の腐食の発生する 時期が早まることを表す、これらの正負の関係はこれ までの研究や知見から得られる内容と一致している. 表面濃度は高い時よりも低い時の方が目的変数への寄 与度が大きくなる傾向が見受けられることから、短期 間でコンクリート表面から内部に浸透していく塩化物 イオンには上限があり、表面濃度が大きくなれば大き くなるほどコンクリート内部に浸透する塩化物イオン の量が増加し続けるわけではないということが表れて いる可能性がある.

図-4 と図-5 を比較すると概ね傾向は一致しているが、図-4 の方が重要度の偏りが顕著に見受けられる. これらの妥当性の検証は、今後の課題である.

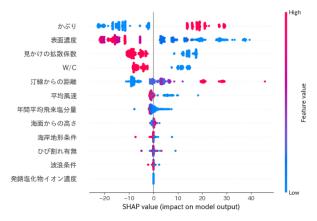
	features	importances
1	表面濃度	28.85
2	かぶり	28.77
3	見かけの拡散係数	21.95
4	W/C	14.34
5	汀線からの距離	4.10
6	平均風速	0.72
7	年間平均飛来塩分量	0.68
8	ひび割れ有無	0.23
9	海岸地形条件	0.22
10	波浪条件	0.09
11	海面からの高さ	0.05
12	発錆塩化物 イオン濃度	0

(a)	腐食発生時期	ļ

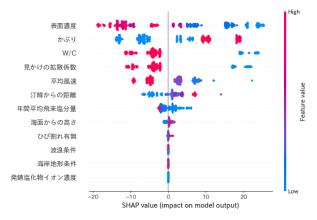
	features	importances	
1	表面濃度	26.667	
2	W/C	24.654	
3	見かけの拡散係数	24.149	
4	かぶり	18.010	
5	平均風速	3.154	
6	汀線からの距離	1.954	
7	年間平均飛来塩分量	1.227	
8	海面からの高さ	0.094	
9	ひび割れ有無	0.084	
10	波浪条件	0.005	
11	海岸地形条件	0.002	
12	発錆塩化物 イオン濃度	0	

(b) 腐食ひび割れ発生時期

図-4 特徴量の重要度



(a) 腐食発生時期



(b) 腐食ひび割れ発生時期

図-5 インスタンスごとの SHAP 値

6. まとめ

本研究では、LECAA の計算値を学習データとした機械学習モデルを構築し、塩害劣化予測を行った. 20 種類のアルゴリズムの中から精度よく推定するアルゴリズムの検討・構築し、特徴量の重要度や SHAP を用いてモデルの解釈を試みた. これらから得られた結果を以下に示す.

- (1) アルゴリズムごとの推定精度の比較の結果,決 定木系のアルゴリズムが優れているという結果 を得た.
- (2) 解釈の手法に SHAP を用いることで特徴量ごと の重要だけでなく、インスタンスごとと特徴や 傾向を示すことができた.
- (3) 今後の課題としては、さらに学習用データを増 やし、ニューラルネットワークなどの今回用い た Pycaret に含まれていないアルゴリズムの検討 も行うことがあげられる.

謝辞:本研究を遂行するに当たり,同研究室の須田 裕哉准教授,同大学建築学コースの崎原康平准教授に 多大なサポートを頂きました.ここに感謝の意を表し ます.

参考文献

- 1) 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」: SIP インフラ連携委員会報告 インフラ維持管理への AI 技術適用のための調査報告書,公益社団法人土木 学会, 2019.
- 2) 全邦釘:土木工学分野における人工知能技術活用の ために解決すべき課題と進めるべき研究開発, AI・ データサイエンス論文集 J1, Vol. 1, pp. 9-15, 2020
- 3) 崎原康平・中村文則・滝勇太:機械学習を用いた発生飛来塩分予測に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 599-604, 2019.
- 4) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の 長期性能シミュレーションプログラム LECCA2 理 論解説書, 2010.
- 5) 吉見映輝・富山潤・須田裕哉:機械学習によるコンクリート構造物の塩害劣化予測に関する研究, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol. 44, No. 1, pp. 478-483, 2022.
- Lundberg, S.M., and Lee, S.-I.: A unified approach to interpreting model predictions, Advances in Neural Information Processing Systems, 2017.
- 7) Welcome to Python.org:https://www.python.org/(閲覧日:2024年1月6日)
- 8) Project Jupyter | Home: https://jupyter.org(閲覧日: 2024 年 1 月 2 日)
- Pedregosa, F., Varroqueau, G., Gramfort, A., Michel, V., Weiss, R., Dubourg., V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., and Duchesnay, É.: Scikit-learn: Machine Learning in Python, Journal of machine learning research. Nal: JMLR, Vol. 12, pp. 2825-2830, 2011.
- 10) Pandas Python Data Analysis Library (pydata.org):https://pandas.pydata.org/(閲覧日:2024 年 1 月 2 日)
- 11) Ali, M.: PyCaret: An open source, low-code machine learning library in Python, https://pycaret.org/(閲覧日:2024 年 1 月 2 日)
- 12) Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, AV. and Gulin, A.: CatBoost: unbiased boosting with categorical features, Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems, pp.6639-6649, 2018.
- 13) Breiman, L.: Random forests, Machine Learning, Vol. 45, No. 1, pp. 5-32, 2001.
- 14) Geurts, P., Ernst, D. and Wehenkel, L.: Extremely randomized trees, Machine Learning, Vol. 63, pp. 3-42, 2006.
- 15) Bentley, J. L.: Multidimensional binary search trees used for associative searching, Communications of the ACM, Vol. 18, No. 9, pp. 509-517, 1975.
- 16) 森下光之助:機械学習を解釈する技術〜予測力と説明力を両立する実践テクニック,技術評論社, 2021.8
- 17) 須藤秋良: スッキリわかる Python による機械学習入門, 株式会社インプレス, 2020.10

高欄コンクリート剥落防止を目的としたプレキャスト版の付着耐久性に関する研究

○琉球大学 城間理央、下里哲弘

瀧上工業(株) 上田博士 東海コンクリート(株)伊藤宏辰

1. はじめに

壁高欄のコンクリート剥落防止で使用されている PCF版が設置された PCF 壁高欄の上に、遮音壁や落下 物防止柵が設置される場合は、風荷重などの外力によ り、付着性の低下が懸念される(図 1)。そこで本研究 の目的としては、PCF版の供試体を製作して静的載荷 試験を実施し、PCF版とコンクリートの付着力及び破 壊形態を評価する。

2. 試験方法

(1) PCF 版について

PCF版は、ビニロン繊維を混入した補強セメントを使用することで高いじん性を確保する特徴を有した型枠兼高欄コンクリート製品である。

(2) 載荷方法

PCF 版の壁高欄供試体を製作して静的載荷試験を行う。実構造物の断面で作製した 2 体の試験体を、鋼製治具に介して(写真 2)、曲げ試験機で載荷する。また、(写真 4)のように 2 点載荷で実験を実施した。

3. 実験結果

(1) 荷重-変位特性

本実験では、上面に PCF 版がある場合(以降実験 Aと示す)と下面に PCF 版がある場合(以降実験 Bと示す)の2回に分けて実施した。荷重と変位の結果を図2に示す。図2より、実験 Aの上面に PCF 版がある場合より、実験 Bの下面に PCF 版がある場合の方が大きな荷重を計測できた。また、どちらも荷重が最大に達し、下がり始めた位置でひび割れが観測された。

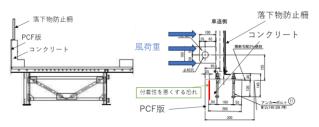


図1 実物試験橋の断面図



写真1 試験体と接続治具



写真2ひずみゲージ



写真3載荷方法



写真4 変位計





写真 5 上面に PCF 版がある場合 (左) 写真 6 下面に PCF 版がある場合 (右)

キーワード PCF 版、 壁高欄、 載荷試験、 付着力、 破壊 連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科 E-mail: e205513@u-ryukyu.ac.jp

(2)破壊形態

破壊した試験体を、実物試験橋の PCF 壁高欄に 置き換えて、それぞれの破壊形態を比較した図を 図 3 に示す。

- a) 実験 A の破壊形態 図 3(a)
- ①外側のアンカーボルト付近からひび割れ
- ②PCF 版にむけて断面ひび割れし、 その後は付着面に沿ってひび割れ
- ③内側アンカーボルトから側面に沿ってひび割 れ
- ④アンカーボルト付近から側面にひび割れ
- b) 実験Bの破壊形態 図3(b)
- ①コンクリート内側からのひび割れ
- ②アンカーボルト部の断面ひび割れ
- ③PCF 版付着面の剥離
- ④断面から内側にかけてのせん断ひび割れ

静的載荷試験荷重強度

実験結果より、実験 A の最大荷重が 92KN、実験 B の最大荷重が 125KN という結果が得られた。 この結果が安全であるかの照査を以下に示す。

◆橋梁部の支柱及び取付設計条件 支柱間隔:2.0m 支柱長:4.095m 風荷重:荷重強度 2.0kn/㎡

◆設計条件

2.0KN/m²×2m (支柱間隔) ×4.095m (高さ)

=16.4KN

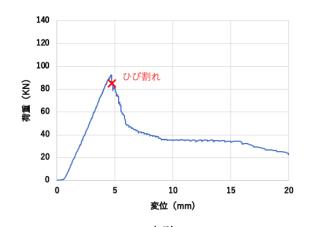
・上面に PCF 版 (実験 A) 安全率: 92KN/16.4KN=5.6 ・下面に PCF 版 (実験 B)

安全率: 125KN/16.4KN=7.6

4. まとめ

実験の破壊形態より、どちらの実験もコンク リートの破壊時に、PCF版は破壊することな く、完全に剥離することはなかった。よって PCF版は付着力が十分に保たれていることが分 かった。

今後は、PCF版とコンクリートの境界面にひずみゲージが埋め込まれた試験体の載荷試験を行い、ひび割れ発生による接着面に発生するせん断力について評価する。



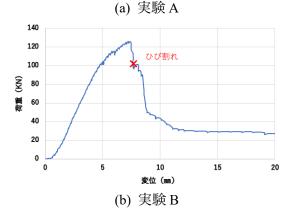
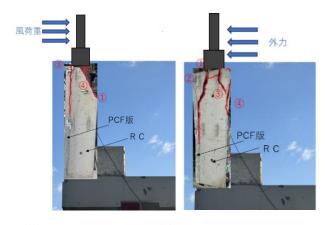
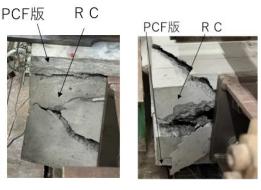


図2 荷重と変位の関係



(a) 上面に PCF 版図 3 破壊形態比較



(a) 上面に PCF 版(b) 下面に PCF 版図 4 壁高欄上面の破壊図

電気化学を用いた炭素鋼-ステンレス鋼の異種金属接触腐食反応特性に関する研究

琉球大学 〇佐藤志帆,下里哲弘

建設技術研究所 荒牧聡、日鉄ステンレス株式会社 江目文則

1. はじめに

炭素鋼橋梁の桁端部は腐食が激しいため,写真1に示すような耐久性に優れたステンレス鋼を適用し、炭素鋼とステンレス鋼を溶接して併用することが現在検討されている.しかし、ステンレス鋼と炭素鋼の突合せ溶接鋼材のような異なる材料間には、電位の差が生じるため異種金属接触腐食の発生が懸念されている.

既往研究より,異種金属が接触した場合,電位勾配は接触部近傍で最も大きい値を示すこと,接触部から離れるに連れてそれぞれの金属の自然電位に近い値を示す¹⁾²⁾³ことがわかっている.しかし,異種金属同士を溶接した際の電気化学的な関係や腐食進行度などの関係は明らかになっていない.

そこで本研究では、異種金属接触腐食反応特性 を電気化学的に証明し、腐食反応の反応速度や反 応範囲への影響等を解明することを目的とし基礎 的データの取得を行った.

2. 試験体概要と試験方法

本試験では SUS304-SM400 の材質を使用した. 試験体パラメータとしては, 異材同士 (SUS304-SM400) の組み合わせと同材同士 (SUS304-SUS304,SM400-SM400)の組み合わせの計3種類を行った. 試験体作成は, 既往研究に基づき, 鋼材と絶縁体を交互に介し, 試験面以外は樹脂で固め分割鋼材となるようにした. また, それぞれの鋼材に導線を繋げてあり,1カ所に集約し溶液を介して全体が繋がるようになっている. 加工後の試験体を写真2に示す.

試験方法は、自然電位測定法と電流密度測定法の2つを実施した.溶液は水道水(導電率:150µS/cm前後)を使用し、室温は約25℃、水温は約23℃の環境下で行った.図1に自然電位測定の簡易図と試験時の様子を、図2に電流密度測定の簡易図と試験時の様子を示す。自然電位の測定方法は、参照電極を測定したい電極の表面に近づけ、値が安定したらデータの回収を行った。参照電極には銀塩化銀電極(SSCE)を使用した.

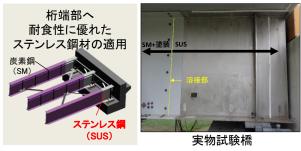


写真1 ステンレス鋼を適用した橋梁の桁端部

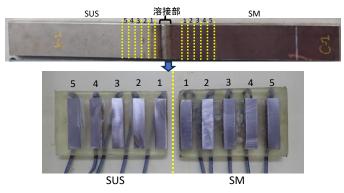


写真 2 加工後の試験体

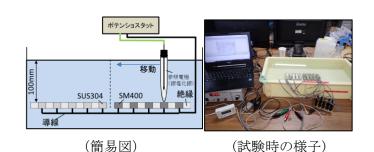


図1 自然電位測定法

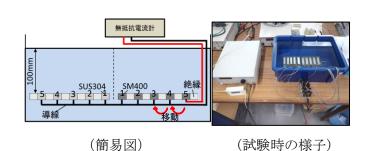


図 2 電流密度測定法

キーワード:ステンレス鋼,炭素鋼,異種金属接触腐食,自然電位,電流密度

連絡先:〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1 琉球大学大学院理工学研究科社会基盤プログラム

構造設計工学研究室 E-mail: k228534@u-ryukyu.ac.jp

また、電流密度の測定方法は、測定したい電極箇所 と全体の電流をそれぞれ無抵抗電流計のプラスマ イナスに繋げ、測定箇所の電極とその他の電極間 の電流値を計測している.これも同様に値が安定 したらデータの回収を行う.

3. 試験結果

初期状態では自然電位、電流密度の値が共に安 定しなかったため24h後の試験結果で評価を行う. 自然電位測定法の試験結果を図3に示す. SUS-SUS の自然電位は-0.008V, SM-SM の自然電位は-0.600V となった. しかし, SUS-SM の場合, SUS 側 の自然電位は-0.480Vとなり値が卑側に移動した. 一方, SM 側の自然電位は-0.600V と変化がなかっ た. 次に電流密度測定法の試験結果を図4に示す. SUS-SUS は概ね 0 の値を示し、SM-SM も微小な電 流値を示す結果となった.しかし、SUS-SMの場合 は、異材同士が接近している側の電流密度が高く なる結果が得られた. 同材同士と比べ異材同士の 電流密度が全体的に上がっているのは、SUS の自 然電位と SM の自然電位の電位差が大きいためだ と考えられる. また, 電極同士の距離が接近してい る程,溶液抵抗の影響を受けにくく,腐食電流が流 れやすくなるため、異材同士が接近している部分 は更に電流密度が上がると考えられる.

図4の電流密度をもとに個々の電極で計測され た電流値を腐食電流と仮定し腐食速度を算出し た.腐食速度の式は以下とする.

腐食速度
$$(mm/y)$$
= $\frac{$ 電流密度×1年の時間 (s) ×原子量 $}{ イオン価数×ファラデー定数×鉄の密度 $(g/cm^3)$$

図5の結果より、SUS-SUSの腐食速度は、0mm/y、SM-SMの腐食速度は0.020mm/y以下を示した. しかし、SUS-SMの腐食速度はSM-SMに比べSUS近傍で約10倍の値を示した. 表13の各環境の腐食速度より、琉大暴露場は0.026mm/y、辺野喜暴露場は0.563mm/y、港湾は0.100~0.300mm/yであるため、今回のSUS近傍のSMの腐食速度は港湾の干満部や海中部に該当する.

4. まとめと今後の展望

本試験で得られた知見を以下に示す.

- (1) 自然電位・電流密度の値は24h以降に安定する. SUS-SM の SUS 側の自然電位は卑側に移動した が, SM 側の自然電位は変化がなかった.
- (2) 電流密度は異材同士が近い SUS 近傍で高い.
- (3) SUS-SM の腐食速度は, SM-SM に比べ SUS 近傍が約 10 倍の値を示した.
- (4)今後の展望としては,実物試験橋を模擬し塗装防食した場合の自然電位・電流密度の動きを検証する.また,溶液の濃度を変化させたパラメータを増やし,

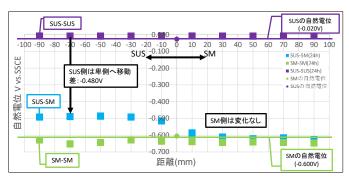


図3 自然電位測定結果

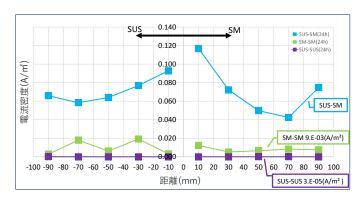


図 4 電流密度測定結果

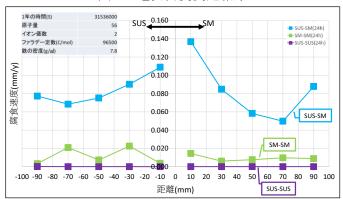


図 5 腐食速度算出結果

表1 各環境における腐食速度

琉大暴露場	辺野喜暴露場	港湾
0.026mm/y	0.563mm/y	飛沫部:0.300mm/y 干満部:0.100~0.300mm/y 海中部:0.100~0.200mm/y

大気環境との腐食反応速度を比較していく.

参考文献

- 青木ら:境界要素法による腐食・防食のシミュレーション, 1986
- 宮坂: 異種金属接触腐食の機構, 事例と対策技術, 2020
- 3) 釣:海中部・干満部及び飛沫部における鋼構造物 の防食技術, 2007

ステンレスクラッド鋼の腐食促進試験による耐食性の評価

琉球大学 ○与世田兼人,下里哲弘, JFEエンジニアリング株式会社 田中裕明

1. はじめに

海岸近傍, 海上などの厳しい環境下に架設さ れる橋梁に対して、耐食性が高いステンレス鋼を 用いることが理想的であるが、公共インフラの橋 梁の場合, 材料コストの観点から実現へのハード ルは高い. 一方で、クラッド鋼は炭素鋼と合わせ 材を製造時に一体化することで、ステンレス鋼を 被覆材のように用いることができ,ステンレス鋼 より安価な複合鋼板である. 写真1に示している のはSEM-EDXで観察したクラッド鋼の断面であ り, 上側がステンレス鋼 (JSL310Mo), 下側が 炭素鋼 (SM400) となっており、Cr (黄色) のマ ッピングの分布からもその境界面が分かる. クラ ッド鋼はその特性により、ステンレス鋼の持つ耐 食性能を発揮しつつ、クラッド鋼のコストに占め る合わせ材の材料コストの割合は限定的であり, トータルコストを抑えることができる. しかし, 橋梁構造物にクラッド鋼を適用した際に懸念され ていることは、溶接部の熱影響により、Cr炭化物 が析出, Crが欠乏状態(鋭敏化)となり耐食性が 低下する可能性である. また, 溶接ビード部にお いては、炭素鋼の溶け込みによる希釈によって耐 食性が低下する可能性がある. したがって, 本研 究ではステンレスクラッド鋼を腐食環境下の橋梁 へ適用した場合の耐食性を評価することを目的と している.

2. 試験方法

2.1 試験体

本研究では、表1に示すように4種類の合わせ材によって作成された各ステンレスクラッド鋼板を付け合わせ溶接した後、溶接部を含む合わせ材のみを切り取り、試験片とした.本試験における評価対象は、上面のみとし、炭素鋼接触面側の断面はブラッシャブルセラミックによりコーティングを施し、保護した.

2.2 塩化第二鉄試験

耐食性の試験は、塩化第二鉄試験(JIS G 0578)に基づき、塩化第二鉄溶液に6%塩化第二鉄溶液に24時間連続浸漬した. 試験器具は恒温水槽、セパラブルフラスコ、ガラスホルダを使用した. 試験温度は合わせ材の材質に応じ、表1に示す孔食発生臨界温度(CPT)とその前後±5℃刻みの温度で実施した. 本論文では溶接部を含む試験体表面の孔食発生の有無で評価を行う方針とした.

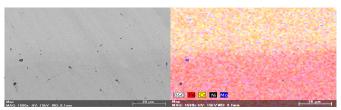
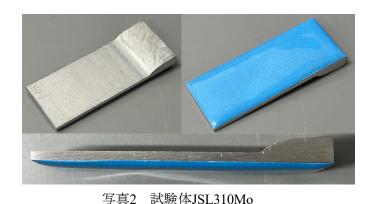


写真1 SEMによるクラッド鋼境界面観察と元素分析

表1 試験体パターン及び詳細

合わせ材	系	主成分	PI値	СРТ
SUS304	オーステナイト系	18Cr-8Ni	18.00	10°C
SUS316L	オーステナイト系	17Cr-12Ni-2.5Mo	25.25	15°C
SUS329J3L	二相系	22Cr-5Ni-3Mo-0.15N	34.30	50°C
JSL310Mo	オーステナイト系	25Cr-23Ni-4.5Mo-0.2N	43.05	70°C



(左上:表面,右上:裏面,下;側面)

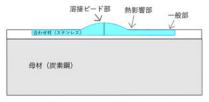


図1 試験体採取位置

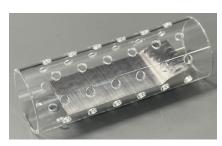


写真4 塩化第二鉄試験

写真3 試験体とガラスホルダ

キーワード ステンレス鋼, クラッド鋼, 孔食, 塩化第二鉄試験

連絡先 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

2.3 孔食深さ計測方法

孔食深さ計測については、試験体の表面に 発生した孔食と思われる箇所に、3Dレーザ 一顕微鏡VK-9710を用いて深さ計測を行った.

3. 試験結果

(1) JSL310Mo 試験温度60℃

試験片表面に孔状ではない,僅かな窪みを確認したため,該当箇所を3Dレーザー顕微鏡にて計測を行った結果,最大深さは41.9umだった.

(2) JSL310Mo 試験温度65°C

塩化第二鉄試験の前後で試験片表面の状態に変 化は確認されなかった.

(3) JSL310Mo 試験温度70℃

試験体表面に孔食のような現象を4箇所確認した. 最も進展していた孔食深さは234.1µmであった. 孔食が確認された箇所は全て一般部及び熱影響部であり, 溶接ビード部での孔食は確認されなかった.

(4) JSL310Mo 試験温度75℃

試験体表面に孔食のような箇所は15箇所程度確認できた. 最も進展していた孔食深さは476.0μmであった. 溶接ビード部での孔食は確認されなかったが, 浅い窪みが数十箇所確認された.

4. まとめ

- ① 炭素鋼の希釈により耐食性に大きく影響する と考えられる溶接ビード部では、僅かな窪み こそ確認されたが、孔食は確認されなかっ た.
- ② 試験結果より,溶接部を含むJSL310Moの孔 食発生臨界温度(CPT)は,70℃であった.

以上のことより、JSL310Moに関しては熱影響や炭素鋼の希釈による大幅な耐食性の低下はなかったと考えられる.

今後, SUS304, SUS316L, SUS329J3Lにおいても, 同様の塩化第二鉄試験により, 各合わせ材の熱影響部, 溶接ビード部を含む耐食性の評価, 整理を行い, 腐食環境下における経済的合理性に富むステンレスクラッド鋼橋を検討する.

参考文献

[1]日本鋼構造協会: ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針(案) JSSCテクニカルレポート No.108,(2015)

[2]西崎到,守屋進,佐々木巌:土木研究所資料 沖ノ鳥島における建設材料耐久性試験-第Ⅱ期メタル系材料の暴露19年の結果-(2012)



写真5 3Dレーザー顕微鏡 VK-9710



写真6 試験(1)の窪み (熱影響部側)

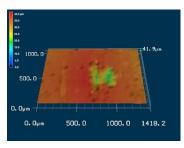


図2 試験(1)の計測結果

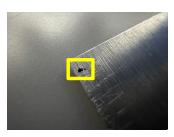


写真7 試験(3)の孔食 (一般部側)

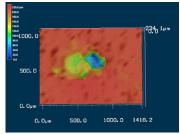


図3 試験(3)の計測結果



写真8 試験(4)終了後の試験体全体画像



写真9 試験(4)の孔食 (熱影響部側)

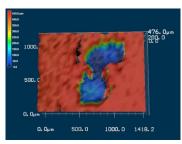


図4 試験(4)の計測結果

第13回 土木学会西部支部沖縄会 技術研究発表会 Session 2 材料·防食

亜鉛系防食技術に対する電気化学的評価

琉球大学 〇松下大悟,下里哲弘, 首都高技術 日和裕介, ㈱IHI インフラシステム 矢ヶ部菜月

1.研究背景・目的

鋼材には防錆のための措置が不可欠であり、防食を行う際に広く使われるのが亜鉛系を防食下地とする塗装である。また、腐食反応は電気化学的反応であることから、各防食皮膜に対する防食メカニズムとその効果の評価には、電気化学的に解明することが重要である。そこで、本研究では土木鋼構造物の防食皮膜へ活用されている亜鉛系の防食下地を対象として、複合サイクルによる腐食促進試験と自然電位及び分極曲線測定を行い、電気化学的に防食性能評価を行った。

2.試験方法

(1)試験体

本研究では表1及び図1に示すような無腐食の鋼材に対して亜鉛メッキと低温低圧型金属溶射技術である Cold Spray(以下,CS)施工を行った.溶融亜鉛メッキは,440~470°Cで溶かした亜鉛に鋼材を浸し,表面に亜鉛皮膜を形成する技術である.CS施工は亜鉛とアルミナ混合粉体を金属粒子の融点・軟化温度より低温のガスを専用ノズルで超音速に加速させ鋼材面に衝突させることで、固相のまま密着させる技術を用いて、防食皮膜を積層させている.

(2)自然電位および分極測定方法

各試験片は、図2に示す条件の乾湿繰返しサイクルによる複合腐食促進試験を実施し、図3に示す0,3,42,60cycleで試験片を適宜取り出して測定した.また写真1に示すように25mm×25mm範囲を露出面となるようにシーリング処理し、3mass%NaCl溶液中に約20分間浸漬し、参照電極として銀塩化銀電極を用い、自然電位測定を行った.分極測定は自然測定と同様の溶液条件、参照電極として銀塩化銀電極、補助電

表1試験ケースおよび条件

防食下地	寸法	膜厚	数量
CS皮膜(亜鉛アルミナ混合粉体)	100mm*80mm	約120um	5
溶融亜鉛メッキ	100mm*100mm	約75um	5





CS 施工

溶融亜鉛メッキ

図1使用試験体

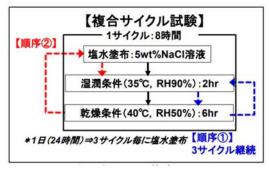


図2乾湿繰り返し複合サイクル

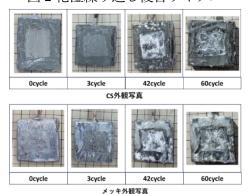


図3サイクルごとの亜鉛皮膜状況

キーワード 溶融亜鉛メッキ 低圧型金属溶射技術 防食 自然電位 分極曲線

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース E-mail: e205531@eve.u-ryukyu.ac.jp

第13回 土木学会西部支部沖縄会 技術研究発表会 Session 2 材料·防食

極として白金を用いた. ポテンショスタットを用いて 30 秒 ごとに電位を 0.01V ずつ掃引させ、電流計測機器を用いて電流値を計測した.

3.試験結果

(1)自然電位測定結果

各試験片の電気的特性を把握するために腐食促進試験 0,3,42,60cycle 経過時の自然電位測定した.測定結果を図 4 に示す.試験初期(0cycle)に溶融亜鉛メッキは 1.01Vvs.Ag/AgCl、CS は 1.03 V vs. Ag/AgCl となり、同条件の亜鉛の自然電位と同等の値を示した。2 つの試験体は ともに緩やかに貴化した。表面に亜鉛酸化被膜が発生したことが要因と考えられる.

(2)分極測定結果

最初の電位は cycle ごとに測定した自然電位に設定し、 $1.3\,V\sim -0.8V$ で 0.01V ずつ変化させた 0.3,42,60 cycle の分極測定結果を図 5 に示す.縦軸の電流密度は化学反応における電子のやり取りを表しており,横軸の電位によりアノード反応とカソード反応の判別を行う.自然電位より卑の範囲の曲線はカソード反応を表し、今回の実験条件の場合は $1/2O_2 + H_2O + 2e \rightarrow 2OH$ に関する反応の電流値である.自然電位より貴の範囲の曲線はアノード反応を表しており $Z_{n} \rightarrow Z_{n}^{2+} + 2e$ (亜鉛の酸化反応)に関する反応の電流値である. CS,溶融亜鉛メッキともに 3 cycle は特に変化がなかったが、42 cycle、60 cycle では亜鉛によるアノード反応の電流密度が低下していた.このことから測定範囲での亜鉛の酸化反応が少なくなっていることが分かる. これは亜鉛酸化物の被覆効果により亜鉛層の酸化反応が抑制されたためと考えられる.

(3)SEM-EDX を用いた断面観察結果

60cycle 経過時の断面観察と元素分析結果を図 6,図 7 に示す.2 つの試験体はともに Zn 層上部に O 層があることから酸化亜鉛が形成されていることが分かる,外観からも白錆(酸化亜鉛)が形成しているが赤錆は発生していない. 4.まとめ

- (1) 自然電位,及び分極測定の結果より,測定範囲での 亜鉛皮膜が十分に生成されていることから防食被 膜が機能していることが分かった.
- (2) SEM による断面観察では CS,溶融亜鉛メッキとも に酸化されていない亜鉛層が見られるため防食性 能が続いていることが分かった.



写真1 電気化学測定部位

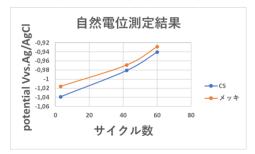


図4自然電位測定結果

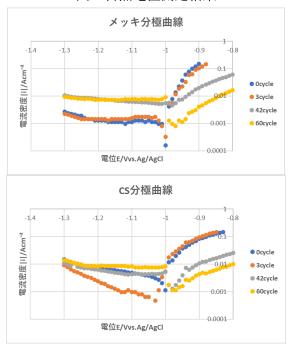


図5分極測定結果

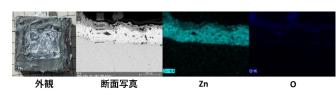


図 6 SEM-EDX 断面観察 (CS)

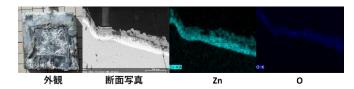


図 7 SEM-EDX 断面観察(メッキ)

分光分析と元素分析によるさびの成分と磁性の特定

琉球大学 〇新坂萌, 淵脇秀晃、下里哲弘 徴日本橋梁建設協会 阿部浩志、鈴木克弥、利光崇明

1. はじめに

大気腐食環境において生成した一般的な鋼材のさびの特性について,表1に示すように鉄酸化物とその特徴的性質として,さび種類,さび色,磁性などが系統的にまとめられている.本研究では,表1に示されている鋼材のさび特性に関する各種分析方法を用いた,活性や不活性さびの特定,防食性能評価への適用法の調査研究を目的とする.

2. 分析方法

本研究では,以下に示す分析方法を調査研究した.

2.1 SEM-EDS

この方法は,断面観察(倍率 10~10 万倍程度)により,さび,防食皮膜および鋼材の形態と,各元素マッピングにより,さび発生要因や防食皮膜の含有元素,各成分の分布形態を特定できる方法である.試験片の作成は型の大きさに合わせて試験体を切断,それを樹脂固めして断面観察ができるように切断,研磨を行う.今回は,計測点数 1 点,計測時間 1 時間程で行った.

2.2 ラマン分光分析法

断面に照射光を当て,励起して発生したラマン散乱 光を読み取ることでスペクトルを記録し,さびの組成 を特定できる.試験片の作成は SEM-EDS と同様であ る.今回は,計測点数1点,計測時間20時間程で行った.

2.3 メスバウア分析

ガンマ線を照射し、エネルギーレジンに共鳴吸収が起きているか起きていないかで判断し、さびの酸化状態によって内部磁場、異性体シフト等が異なるため、どのような磁性を持つか判別する方法. 試験片の作成はバルク状では共鳴吸収の観測ができないため、採取した試験体をすり潰し、パウダー状にする.

3. 分析法を用いた検証

2章で示した SEM-EDS による成分と元素分析およびラマン分光分析による鉄酸化物の特定により,沖縄地域の環境下における表面処理材下での保護性さ

	2	長2 鉄の	腐食生成物	(鉄酸化物)とその	性質		
鉄酸化物 (鉱物名)	Fe ³⁺ Fe ²⁺ +Fe ³⁺	@	結晶形	磁性(室温) (ネール点: K)	電気伝導	密度 g·cm ⁻³	加熱に伴う相変態
Fe (OH) ₂	0	Ĥ	Cdl ₂ 六方晶系	常磁性 (T _N =35)	絶縁体	3.40	約370KでFe ₃ O ₄ とH ₂ に分解 (Schikorr 反応)
FeO (wüstite) ウスタイト	0	黒	NaCl 立方晶系	常磁性 (T=250~211)	半導体	5.9~ 5.99	843K以上で存在
Fe ₃ O ₄ (magnetite) 磁鉄鉱 マグネタイト	0.67	無	逆スピネル 立方晶系	フェリ磁性 (T _N =850)	導体	4.87	
α-FeOOH (goethite) 針鉄鉱 ゲーサイト	1.0	黄	α-FeOOH 斜方晶系	反強磁性 (T _N =400)	絶縁体	4.26	約 470K で脱水して α-Fe ₂ O ₃
β-FeOOH (akaganeite) 赤金鉱、アカガネアイト[M.Nambu]	1.0	淡褐色 ~白	α-MnO ₂ 正方晶系	(反強磁性) (T _N =290)	絶縁体	3.56	約 570K で脱水して α -Fe ₂ O ₃ (または γ -Fe ₂ O ₃)
ァ-FeOOH (lepidocrocite) 鱗鉄鉱 レビドクロサイト	1.0	オレンジ	γ-FeOOH 斜方晶系	常避性 (T _N =77)	絶縁体	4.09	約 470K で脱水して ₇ -Fe ₂ O ₃
δ-FeOOH (Feroxyhyte)	1.0	褐色	乱れた Cdl _i 六方晶系	フェリ磁性 (T _N =450)		4.20	約 470K で α-FeOOH に要整 約 570K で脱水して α-Fe ₂ O ₃
α-Fe ₂ O ₃ (hematite) 赤鉄鉱 ヘマタイト	1.0	赤~黒	Al ₂ O ₃ 三方晶系	弱い強磁性 弱い反強磁性 (T _N =955)	絶縁体	5.26	
γ-Fe ₂ O ₃ (maghemite) 磁赤鉄鉱 マーゲマイト	1.0	褐色	スピネル 立方晶系	フェリ磁性 (T _N ≥850)	半導体~ 絶縁体	4.87	約 670K で α-Fe ₂ O ₃
緑さびⅠ 緑さびⅡ	(0.33)	緑緑	六方晶系 六方晶系		緑さびⅡ(green rus	t 1)の生成には Cl-共存が必要 t Ⅱ)の生成には SO ₄ 2共存が必要
X 線的非晶質さび物質 X-ray amorphous substance	(1.0)	(褐色)	X 線回折法	大気腐食さび層に含まれ、X 線的にブロードな回折図形を与える鉄酸化物。 X 線回折法では困難な約15mm以下の微細粒子径にはメスパウアー効果同定が有力で。 接高質オキン水酸化熱、超級部ゲーサイトであると権変される。			

表 1 鉄の腐食生成物 (鉄酸化物) とその性質 1)

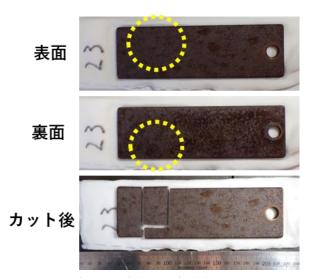


写真1 試験体の耐候性鋼片

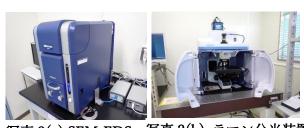


写真 2(a) SEM-EDS 写真 2(b) ラマン分光装置



SEM-EDS、ラマン分光分析の試験体 メスバウア分光分析の試験体 写真3 分析に使用する試験体の写真

び生成過程を考察する.

3.1 使用試験体

本研究では,沖縄県内で10年程度大気暴露された 表面処理材された耐候性鋼片(写真1を使用した.分析に先立ち,写真1(a)に黄色の点線で示すように腐 食している箇所で切断し,試験片を作成し,これらの 断面を分析する.

3.2 分析方法

表面処理材,さびおよび耐候性鋼材の断面分析と各層に含有する元素の特定には,写真 2(a)の SEM-EDSによる元素分析を使用した.また,さびの種類の特定には,写真 2(b)のラマン分光装置による分光分析を用いた.写真3のように SEM-EDS,ラマン分光分析は試験体を樹脂固めしたものを断面切断し,断面観察を分析する.細かい分析手順は表2に示す.

3.3 分析結果および考察

写真 3 に示す分析領域の電子顕微鏡像から断面画像より,耐候性鋼の表面に塗布されている表面処理剤の下にさびが生成していることが分かる.この箇所でラマン分光分析を行った結果,写真 4 に示すように,全体的に Fe3O4 と γ -FeOOH が確認され,さび内部の黒色の箇所に α -FeOOH と β -FeOOHが強く反応した.また,活性化さびである γ -FeOOH, Fe_3O_4 も多く点在し,安定している(不活性)の熟成さびである α -FeOOH は耐候性鋼表面やさび内部にある.また,エラーとして出た分布の箇所には他の成分が存在していると考えられる.

3.4 まとめ

1)全体的に活性化さびである γ -FeOOH と Fe₃O₄が多くみられた.また,耐候性鋼の表面とさび内部に塩分を要因とする β -FeOOH が存在していた.

2)耐候性鋼表面やさび内部の一部に保護性さびである α -FeOOH も存在.今後,活性化さびから不活性化さび(保護性さび)への変化を観察していく

4. あとがき

鋼材のさび特性の評価に用いる各種分析方法に関しての調査研究を実施し、耐候性鋼材のさびを特定できた.今後,メスバウア分光装置によるさび磁性の分析を行い,腐食した P C 鋼材の非破壊検査との連携研究を実施していく.

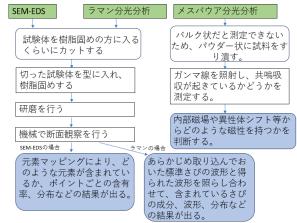


表 2 それぞれの分析方法フロー

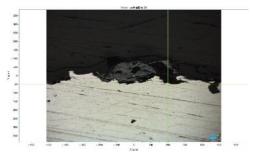


写真3 分析領域の電子顕微鏡像(x100)

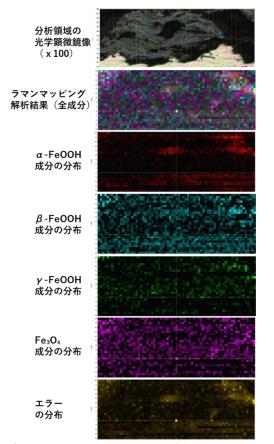


写真4 ラマンマッピング分析における成分分布

5. 参考文献

1) 三澤俊平:鉄鋼腐食科学の温故知新

Session 3 耐久性・計測

炭素鋼ーステンレス鋼突合せ溶接継手の疲労強度特性

琉球大学 〇後藤昌大 下里哲弘 建設技術研究所 荒牧聡

1. はじめに

近年,社会資本においては,ライフサイクルコスト縮減に対する要求が高まっている 1). **図-1** に示すように耐食性に優れているステンレス鋼を鋼橋桁端部のみに適用することでコストの増加を抑え,耐久性,耐食性に優れた鋼橋が実現できると考えられる. しかしながら,炭素鋼とステンレス鋼を溶接した場合の力学的特性は十分に明らかになっていない.

そこで本研究では、炭素鋼とステンレス鋼を突合 せ溶接した試験片を対象に、引張片振りの疲労試験 を実施し疲労強度特性の評価を行った.

2. 疲労試験片概要

図-2 に本研究で用いた突合せ溶接試験片の形状及び寸法を示し、表-1 に各鋼材の機械的特性を示す. 炭素鋼は鋼橋の主要部材として一般的に使用される SM400 と SM490 を用いた. ステンレス鋼は炭素鋼の機械的性質とのマッチングを考慮し、SM400 には SUS304、SM490 には SUS821L1 を接合し、溶接ワイヤは共に GFW309L を使用した. また、試験片ごとに溶接余盛非仕上げと余盛削除をしたものを用意し、計 4 つのパラメータで疲労試験を行った.

3. 疲労強度特性

3.1 疲労試験方法

疲労試験は、最大荷重 200kN の油圧式疲労試験機を用いて荷重制御で実施した。荷重波形は正弦波、荷重速度は応力範囲に応じて 5 から 10Hz とし、応力比 R=0 で試験を実施した。疲労試験は試験片が破断するか 1×10⁷ サイクルを超えるまで行い、1×10⁷ サイクル以降は破断しないとして載荷を停止した。

3.2 疲労試験結果

図-3 に試験片の破断例を示し、図-4 に応力範囲 Δ のと破断寿命 N の関係と JSSC の疲労設計曲線 2,3)との比較を示す。図中の矢印を付した試験結果は試験片の未破断を意味し、赤線は突合せ溶接の余盛有無による疲労等級を示す。余盛非仕上げでは多くの試験結果で JSSC に基づく D 等級を満たす結果となっ

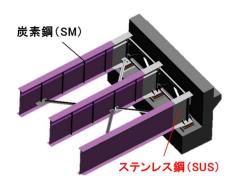


図-1 桁端部にステンレス鋼を適用したモデル

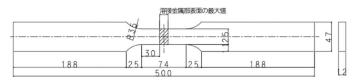


図-2 疲労試験片概要

表-1 鋼材の機械的特性

	引張強度 MPa	降伏応力 MPa
SM400	400~510	≧245
SM490	490~610	≧365
SUS304	≧520	≧205
SUS821L1	≧600	≧400
GFW309L	≧520	-



(i) 余盛非仕上げ



(ii) 余盛削除

図-3 試験片破壊例

たが、C等級を大きく超える結果は見られなかった. いずれの結果も止端より亀裂が生じた. 余盛削除も同様に多くの試験結果で JSSC に基づく B 等級を満たす結果となったが、A 等級を大きく超える結果は見られなかった. いずれの結果も溶接金属より亀裂が生じた. また、 1×10^7 サイクルを超えた全ての結果で疲労限界を大きく上回る結果がみられた.

キーワード ステンレス鋼,疲労強度特性,桁端部,異材溶接継手,突合せ溶接

第13回 土木学会西部支部沖縄会 技術研究発表会

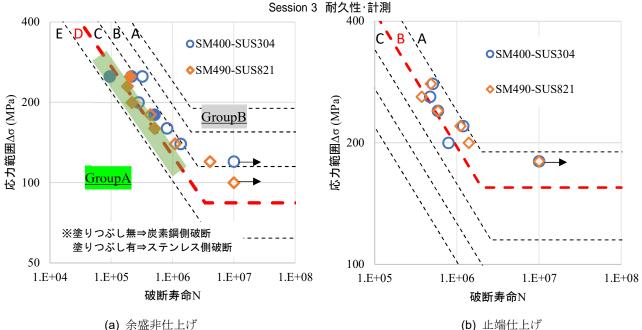


図-4 応力範囲 Δ σ と破断寿命 N の関係

3.3 溶接止端半径とフランク角の関係

本研究では全ての止端非仕上げ試験片の止端形状を計測した 4). 図-5 に止端形状の計測方法を示し、図-6 に亀裂発生箇所の止端半径とフランク角の関係を示す.ここで、炭素鋼とステンレス鋼それぞれの止端形状が疲労強度にもたらす影響を明らかにするため、図-3(a)のうち疲労設計線近傍の結果を Group A、その他の結果を Group B とした. Group Aの方がGroup B より応力集中の生じやすい傾向にある為、破断寿命が低下したと考えられる.また、材質ごとの止端形状に大きな差は生じなかった.

4. おわりに

本研究では、炭素鋼とステンレス鋼を用いた異材 突合せ溶接継手の高サイクル疲労試験および止端形 状の計測を実施した、余盛非仕上げ試験片では JSSC の D 等級を、余盛仕上げ試験片では B 等級を概ね満 足した. 疲労亀裂の発生箇所は, 余盛非仕上げ試験片 では全て溶接止端、余盛仕上げ試験片では溶接金属 であり、材質による破壊形状の変化は見られなかっ た. また, 炭素鋼-ステンレス鋼ともに止端形状が疲 労強度にもたらす影響は同等であるため, 異材溶接 継手に対しても炭素鋼同様に D 等級での評価が可能 であると考える. 本研究では炭素鋼とステンレス鋼 の異材溶接継手に対して, 低応力範囲で疲労試験を 実施した. 今後は高応力範囲での疲労試験を実施し, ステンレス鋼のラウンドハウス挙動が疲労強度にも たらす影響を明らかにし, 異材溶接継手の疲労強度 特性を評価する.

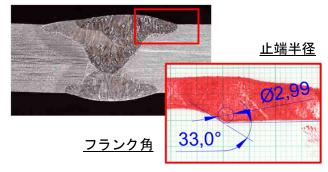


図-5 止端形状の計測方法

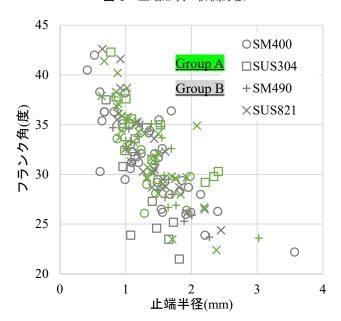


図-6 止端半径とフランク角の関係

参考文献

- 文部科学省:公共工事コスト縮減対策に関する新行動指針, https://www.mlit.go.jp/tec/cost/cost/pdf/sinkeikaku.pdf, (2023 年 12 月 10 日閲覧)
- 2) 日本鋼構造協会:ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針(案), JSSC テクニカルレポート, No.108,2015
- 3) 日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針・同解説ー付・設計例 ー,技報堂出版,2012.
- 4) 鋼橋技術研究会:鋼橋部材の溶接止端形状の実態調査,施工部会報告書,2009.

ステンレス鋼と炭素鋼を異材溶接接合した鋼桁の載荷実験

横河ブリッジホールディングス 正会員 ○加藤健太郎 結城洋一 石井博典

1. はじめに

ステンレス鋼は、従来の構造用鋼に比べて優れた耐食性を有するものの、材料価格が高いため、土木鋼構造物に活用する場合には腐食環境が厳しい部材またはその一部に部分的に使用することが経済的である。ステンレス鋼の部分的な適用に際しては、異材接合された鋼構造部材の耐荷性能をはじめとした諸特性を把握しておく必要がある。そこで本研究では、ステンレス鋼と炭素鋼の異材溶接板を用いて溶接組立した I 形断面桁供試体の載荷実験 1)を行い、せん断耐荷力を単一材料で構成される鋼桁および既往の耐荷力評価法と比較して調べた。

2. 実験方法

図1には、供試体に用いる鋼種について、引張試験により得られた板厚9mmのJIS1A号試験片の応力ひずみ関係および機械的性質を示す。ステンレス鋼にはリーン二相系のSUS821L1を、炭素鋼にはSUS821L1と降伏強度が同程度のSM490Yを選定した。図2には、対象とするI形断面桁供試体の形状を示す。供試体の形状は腹板パネルのせん断座屈が卓越するように決定し、その縦横比および板厚は式(1)に示す幅厚比パラメータR。を約2.0として算出した。

$$R_{s} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\tau_{y}}{E} \frac{12(1 - \nu^{2})}{\pi^{2} k_{s}}}$$
 (1)

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.0/\alpha^2 & (\alpha > 1) \\ 4.0 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha \le 1) \end{cases}$$
 (2)

ここで、b: 腹板幅、t: 腹板厚、 τ_y : 降伏せん断応力($=\sigma_y/\sqrt{3}$)、E: 弾性係数(=200GPa)、v: ポアソン比(=0.3)、 k_s : せん断座屈係数(式(2))、 α : 縦横比(=a/b)

ただし、ステンレス鋼の場合は σ_y を $\sigma_{0.2}$ に置き換え、異材溶接板の場合は降伏応力を各材料の平均値(= $(\sigma_y+\sigma_{0.2})/2$)とした.実験ケースは図3に示すように、Case1:桁端部にステンレス鋼を配置したケース、Case2:ステンレス鋼を桁下部に配置したケー

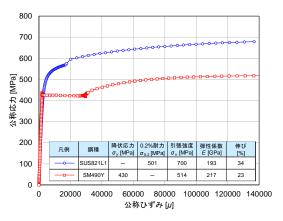


図1 応力ひずみ関係および機械的性質

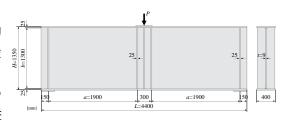
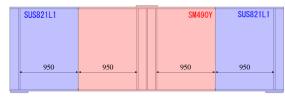


図2 I 形断面桁供試体の形状



(a) Case 1



(b) Case2

図3 異材溶接桁供試体の鋼材配置

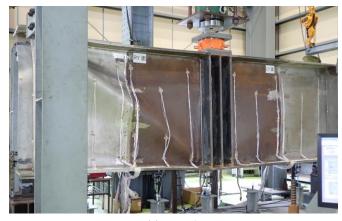
ス,比較として、Case3:ステンレス鋼または Case4:炭素鋼のみで構成されるケースの4ケースとした.載荷は耐荷重5,000kN の門型フレームを用いて、両端を可動支承で単純支持した供試体の支間中央にて5,000kN油圧ジャッキで加力する3点載荷とした.載荷実験では載荷荷重、変位、ひずみを各点で計測したが、ここでは主にせん断耐荷力に着目し、主ひずみなどの強度特性については文献1)を参照されたい.

3. 実験結果

写真1には、載荷後の供試体を示す。同写真に示すように、供試体腹板パネルの面外変形はすべてのケースで同様に、せん断変形が卓越し、斜張力場みられる変形モードを発現している。Casel および Case2 は、異材溶接線を有しているが、幅厚比パラメータが比較的大きいこともあり、斜張力場の波形に影響を与えていないことがわかる。

図4には、荷重とたわみの関係を示す。同図の縦軸は計測した荷重値を、横軸は支間中央と支点の鉛直変位 キーワード ステンレス鋼、SUS821L1、SM490Y、異材溶接桁、せん断耐荷力

連絡先 〒261-0002 千葉県千葉市美浜区新港88 (株)横河ブリッジホールディングス TEL043-247-8411





(a) Case1

写真1 載荷後の供試体

の差で表すたわみ値を示す. 同図より, 異材溶接桁の Case1 および Case2 の最大荷重は, 単一材料桁の Case3 および Case4 の中間に位置することがわかる. また, Case1 の座屈後の挙動は Case3 と同様であり, Case2 や Case4 と比べて, 最大荷重到達までにたわみが進行する非線形領域があり, それ以降の軟化領域で比較的ゆるやかに荷重低下している. これは, 腹板パネルのせん断変形が進行する領域において, ラウンドハウス型の応力ひずみ関係を示すステンレス鋼が塑性変形を促進させたと考えられる.

図5には、せん断耐荷力と既往の耐荷力曲線の比較を示す.同 図より、すべてのケースのせん断耐荷力は、宮嵜ら2)の提案した 耐荷力曲線で安全側に評価されることがわかる. なお, この耐荷 力曲線は,純せん断を受けるステンレス鋼周辺単純支持板に対し て, 初期たわみおよび残留応力の大きさを上限値相当で導入して いるため、下限値相当の耐荷力を与えるものとなる. 図6には、 終局せん断荷重(載荷実験による最大荷重)とバスラー式による 理論値との比較を示す. バスラー式は、炭素鋼 I 形断面桁の腹板 パネルの座屈後挙動を考慮した終局せん断荷重の理論式として 知られている. 同図より、Case1 および Case2 の終局せん断荷重 は、理論値に比べて約 10%および約 17%小さくなることがわか る. これは、初期不整を考慮していない理論値に対して、腹板パ ネルの異材溶接線近傍の引張残留応力が塑性変形を進行させる ことで終局せん断荷重を低下させるためである.特に Case2 は、 異材溶接線が高さ方向に配置されており,その引張残留応力の斜 張力場に与える影響が大きくなったと考えらえる.

4. おわりに

本研究では、ステンレス鋼と炭素鋼の異材溶接板を用いて溶接 組立した I 形断面桁供試体の載荷実験を行い、せん断耐荷力を評価した. 異材溶接桁のせん断耐荷力は、単一材料で構成される鋼桁の耐荷力曲線や理論値で評価できることがわかった.

参考文献 1)加藤健太郎,清川昇悟,西村公利:ステンレス鋼と炭素鋼を用いた異材溶接桁の載荷実験および異材溶接部の腐食促進試験,横河ブリッジホールディングスグループ技報,No.52,pp.44-55,2023.2)宮嵜靖大,奈良敬:ステンレス鋼板の面内純せん断強度特性



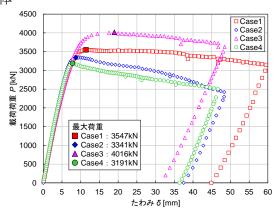


図4 荷重とたわみの関係

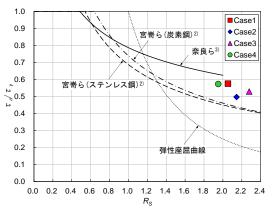


図5 せん断耐荷力と耐荷力曲線の比較

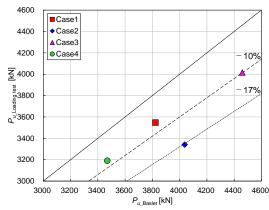


図6 理論値と比較した終局せん断荷重

および強度評価法,鋼構造年次論文報告集,第 22 巻, pp.72-78, 2014. 3)奈良敬,出口恭司,福本唀士:純せん断応力を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究,土木学会論文集,第 392 号/I-9, pp.265-271, 1988.

限界状態診断に用いる腐食したボルト連結板の破断特性

琉球大学 ○吉野 修平, 下里 哲弘, Yasin Mumtaz 宮地エンジニアリング株式会社 山下 修平

1.はじめに

鋼I桁下フランジの高力ボルト摩擦接合継手部において図1に示すような腐食損傷が見られ、連結板においても著しい腐食減肉が生じている。また、連結板の腐食減肉によってはすべり耐力が低下することが既往研究1)で明らかとなっているが、すべり後の余耐力についての研究は少ない。そこで本研究では、高力ボルト連結板の実腐食分布に基づき模擬した腐食連結板を用いて、引張破断試験を行った。

2.試験方法

2.1 試験体形状と種類

引張試験に用いた試験体は、図 2 に示した母材と、腐食減肉を模擬した Type0,2,3 を含む形状が異なる 4 種類の連結板を図 3 のように高力ボルトと組み合わせて構成している. 母材と連結板の形状および寸法は図 2 に示した. ミルシートによる材料定数を表 1 に記した. 今回は①のみ使用した. ボルトは M22 の六角型高力ボルト(F10T)を使用した. 引張試験は表 2 に示す 4 パターンを行った. 連結板は Type0,2,3 すべて減肉した箇所の板厚が 6 mmのものを使用し,上下連結板ともに腐食減肉を模擬した箇所が図 3 の赤い部分に相当するよう設置した. ボルトの締め付け軸力は、図 3 の右側 2 本を標準軸力の 226kN とし, 左側 2 本を 246kN 以上とし, 着目した領域(図 3 の赤い領域)のすべりが先に発生するよう設定した.

2.2 計測方法

着目した領域のボルトナット側連結板の上面と側面にひずみゲージを設置し、連結板のひずみを測定した。また、継手中央の母材開口部の開口変位とボルト位置の母材・連結板の相対変位を計測するためクリップゲージを設置した。試験状況を図4に示した。

3.試験結果

3.1 連結板の破断形態

連結板の破断形態の一覧を図5に示した. 両面健



図1 下フランジ腐食の様子

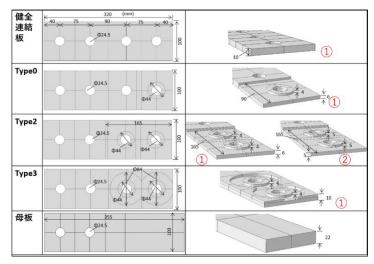


図2 試験体形状

表 1 材料定数

部材	板厚 (mm)	材質	降伏強度 (N/mm)	引張強度 (N/mm)	伸び (%)	ヤング率 (N/mm)	ポアソン比		
新材模擬腐食連結板①	10	SM490YA	426	529	25				
新材模擬腐食連結板②	10	SM490YA	408	530	23	2.0×10^{5}	0.3		
母材	22	SN490YB	441	550	31				

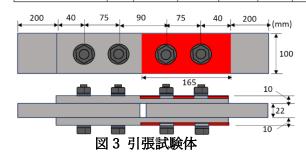


表2 試験ケース一覧

試験ケース(残存板厚)	パラメータ	導入軸力(kN)
両面健全(10mm+10mm)	健全+健全	226
0-1(6mm+6mm)	Type0+Type0	226
2-1(6mm+6mm)	Type2+Type2	226
3-1(6mm+6mm)	Type3+Type3	226

図 4 試験状況

連絡先 〒903-0129 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース Email: e205503@eve.u-ryukyu.ac.jp

キーワード 連結板 腐食損傷 引張破断特性

全, 2-1, 3-1 ではいずれも着目した領域の継手中心側の純断面で破断した. 一方, 0-1 では着目した領域の縁端部のボルト列の延長線上で破断した.

3.2 荷重-変位特性

荷重と開口変位の関係を図6に示す.これらの関係から、すべりにより荷重が低下した時の最大荷重をすべり荷重とした.図6より先攻すべり(◇で示した)と後攻すべり(▽で示した)が確認できる.両面健全では417kNで先攻すべりが発生し、435kNで後攻すべりが発生した.0-1では、359kNで先攻すべりが発生し、371kNで後攻すべりが発生した.2-1では、385kNで先攻すべりが発生した。3-1では、439kNで先攻すべりが発生した。3-1では、439kNで先攻すべりが発生した。最大荷重で破断が発生した.

3.3 連結板のひずみ

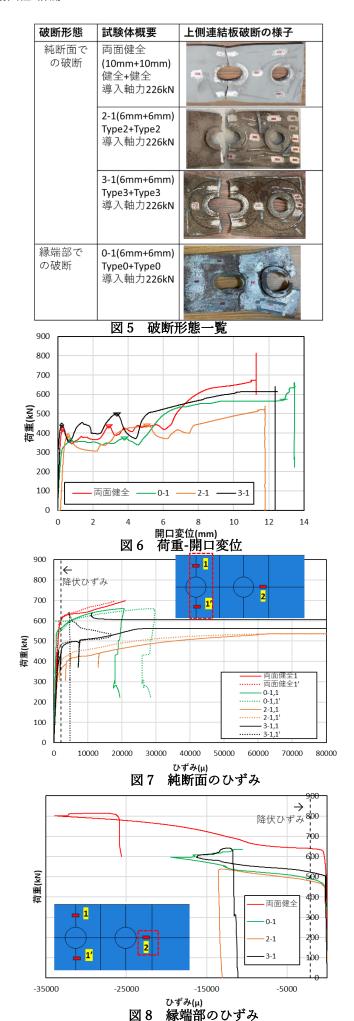
図 7 に両面健全、2-1、3-1 の破断位置である継手中心側純断面の荷重とひずみの関係を示す.また、図8 に 0-1 の破断位置である縁端部のひずみを示す.図7、8 には、表 1 で示した連結板の降伏強度を鋼材のヤング率で除して算出した降伏ひずみも破線で示している.純断面は、両面健全が600kN付近、0-1では550kN付近で降伏ひずみに達している.これらは後攻すべり後であるが、2-1は445kN付近、3-1は360kN付近と先攻すべり前に降伏した.縁端部では、後攻すべり後に負の挙動を示しひずみが増大しており、支圧の影響を受けたことが確認できる.純断面、縁端部いずれも降伏後ひずみが急増し破断した.

4.まとめ

- (1) 着目した領域の全ボルト孔周辺が減肉した連結 板は継手中心側純断面で破断し,外側ボルト孔周 辺のみ減肉した連結板は端抜け破断が発生した.
- (2) ボルト孔周辺が環状に減肉した場合は,座金直下を除く着目した領域全体が減肉した場合に比べ, すべり荷重と最大荷重が 1.1 倍ほど大きくなる.
- (3) 端抜け破断が発生する場合は、すべり荷重が低く、 純断面より縁端部が先に降伏する傾向がある.

参考文献

[1]下里哲弘,山下修平:両面腐食減肉を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力特性に関する実験的検証,構造工学論文集,2022 年 3 月, Vol. 68A



赤嶺トンネル施工に伴うモノレール橋脚の沈下対策について

南部国道事務所 那覇空港自動車道出張所長 城間 和樹 ○南部国道事務所 那覇空港自動車道出張所 下地 涼大

1. はじめに

小禄道路は那覇空港自動車道の一部区間であり、延長5.7kmの4車線自動車専用道路である(図-1). 那覇空港自動車道は、沖縄本島北部及び中南部から那覇空港間への定時性、高速性を確保するとともに、都市部の交通混雑の緩和を図ることを目的としている. 先行して那覇空港自動車道の南風原道路(L=5.1km)、豊見城東道路(L=6.2km)は供用を開始しており、現在全線開通を目指し事業を進めている.

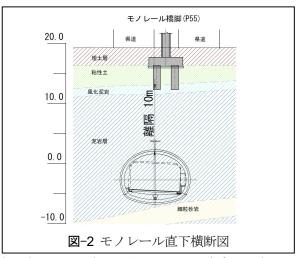
赤嶺トンネルは上下線2本(上り線L=1,026m,下り線L=907m)のトンネルで構成されており、小禄道路で唯一のトンネル区間である。当区間のルート上には自衛隊基地、沖縄都市モノレール(ゆいレー



ル)および県道那覇空港線が存在し、地上に道路を建設することが難しかったため、トンネル構造を採用することとなった。赤嶺トンネルの北側工区は、モノレール橋脚直下10mの位置を掘削することから(図-2)、運行中のモノレールに重大な影響が及ばないようにすることが求められた。本稿では、このような課題に対して実施した、モノレール橋脚の沈下対策について報告する。

2. 工事概要

赤嶺トンネルは、トンネルとモノレール橋脚下部との離隔を約10m確保するために、両坑口から下り勾配3%の縦断線形を採用しており、坑内にサグ



点を有するトンネルとなっている.赤嶺トンネルの 北側工区はモノレールと那覇空港線の直下を横断し (**写真-1**),モノレール橋脚への影響回避が課題 となる工事である.土被りはほぼ全線で2D以下 (D=12m)のため,DⅢパターンを採用している.

本トンネル周辺は東側(那覇市街地側)に標高 20~30m程度の起伏の緩やかな丘陵地が広がり,西側(那覇空港側)には標高0~数mの海岸低地が広がる.北側工区の坑口は丘陵地を侵食してできた標高10m程度の低地帯に位置し,直線状の低地帯に沿ってモノレールと県道那覇空港線が通っている.

このエリアの基盤岩は新第三紀の島尻層群であり、その上部に沖積層が堆積する.島尻層群は軟岩の泥岩層と砂岩層からなり、沖積層との境界部は1m程度の厚さで風化した泥岩が分布する.島尻層群の泥岩(島尻泥岩)は沖縄地方では「クチャ」と呼ばれ、スレーキングが発生しやすいことで知られている特徴的な岩石である.浸水崩壊度試験では30分程度で岩石試料全体が細粒化することが明らかとなっている。

キーワード:トンネル掘削,モノレール橋脚,沈下対策,計測管理 連絡先:ryouta.shimoji.s8u@ogb.cao.go.jp

3. モノレール橋脚の沈下計測



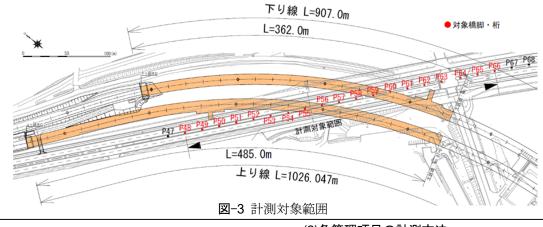
写真-1 モノレール直下横断図

表_1	平 /	1/-1	レ極脚。	・桁の管理は	ノベル
4V 1			r indival		/ · ·//

	計測項目			管理レベル		
			_	Ш	III	
	沈下	相対	(mm)	5	7	10
橋脚	<i>I</i> /L 1.	絶対	(mm)	8	11	16
	傾	頁斜(rad)		5/1,000	7/1,000	10/1,000
軌道桁	軌道桁 桁観察		(mm)	4	6	9
判(足11)	们」既无穷式	通り	(mm)	5	7	11

表-2 計測方法

	管理項目	計測方法	計測頻度	計測箇所数
	沈下	自動沈下計	24時間	38箇所
橋脚	(相対・絶対)	日劉儿「司	24時间	(2箇所/橋脚)
们可加州	傾斜	自動傾斜計	24時間	19箇所
	19月赤子	日動門外計司	24時间	(1箇所/橋脚)
#1,54	桁観察	トータルステーション	1回/日	38箇所
軌道桁	(高低・通り)	(手動)	1四/口	(2箇所/桁)



(1)モノレール橋脚の変位に対する管理値

トンネル掘削がモノレール構造物に影響を与えることが想定されていたことから、モノレール関係者(沖縄都市モノレール㈱、沖縄県土木建築部都市計画・モノレール課)と協議の上、モノレール橋脚と軌道桁の許容変位量および管理レベルを設定した(表-2). 橋脚の相対沈下(隣り合う橋脚との沈下量の差)と傾斜の許容変位量は、軌道桁における管理項目の「高低測定」と「通り測定」(軌道桁接続部4m区間における縦断方向・水平方向のシフト量)の基準値を超過させない条件で設定した. 橋脚の絶対沈下(各橋脚の沈下量)の許容変位量は、設計段階における数値解析の予測沈下量を基に設定した. 管理レベルの設定は、許容変位量を管理レベルIIIとし、管理レベルIII、I はそれぞれ許容変位量の70%、50%とした.

(2)各管理項目の計測方法

モノレール橋脚および軌道桁の変位は表-2に示 す方法で計測した. 計測対象範囲を図-3に示す. モノレール運行(10分間隔)の安全性を確保するた めには、変位をリアルタイムで把握する必要があっ たことから, 橋脚沈下および傾斜計測は自動計測を 採用した. 沈下計測では連通管式沈下計を採用し、 沈下計を各橋脚の両側に設置した(2台/橋脚). 連 通管式沈下計は基準装置(基準水槽)と沈下計を連 通管(水ホース)で連結し、基準装置と沈下計の水 位差を水圧として各沈下計のセンサーが検出する仕 組みとなっている.水を利用する計測方法のため, 計測値が水温変化の影響を受けてしまうことから, 適切な補正方法(温度補正式)を設定するために, トンネル掘削の半年前に沈下計を橋脚に設置して水 温変化と計測値のデータを採取した. その結果, 温 度補正をしても最大±6mm程度の変動が発生したこ

とから、モノレールの影響区間の掘削期間は、1~2回/日の頻度で手動沈下計測(レベル測量)を実施した.これにより、自動と手動の沈下計測を併用しながら、橋脚の変位を正確に把握することに努めた.

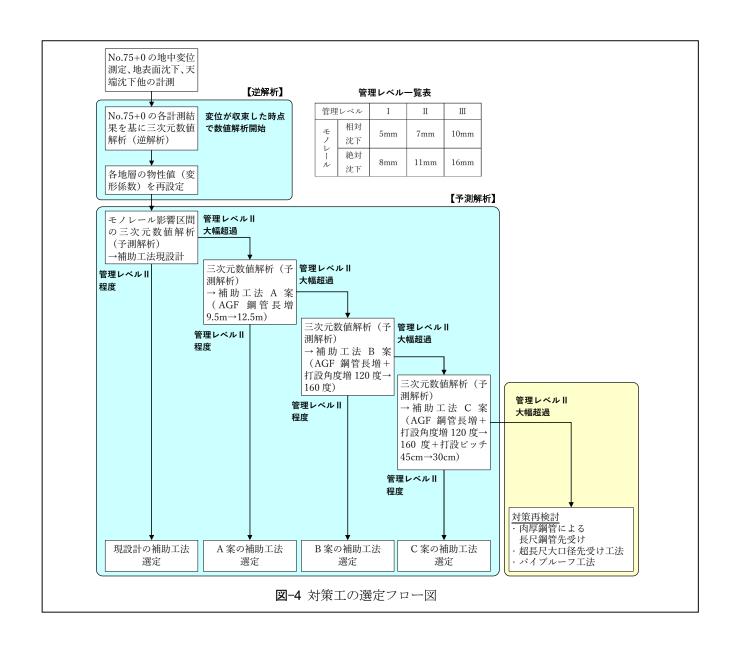
4. 沈下対策

モノレール橋脚の変位抑制対策の検討には、トンネル掘削の進捗に応じて橋脚の変位をシミュレーションできる三次元数値解析(FDM解析)を利用した。 事前調査の結果を基にした予測解析により設計段階で対策工を選定し、その結果を踏まえ、施工時に試験施工を行い、実際の地山挙動を反映した予測解析で対策工を最終決定した。

試験施工は設計段階で選定した対策工と地中変位

計測(地層境界位置の鉛直変位)を1箇所実施した. 試験施工で得られた地層毎の変位を基に,各地層の 地盤定数を逆解析により同定し,その数値を反映し た予測解析で対策工の最終判断を下した.

試験施工による対策工の選定フローを図-4に示す.対策工の選定基準は、絶対・相対沈下が管理レベルIIに収まることを条件とした.設計段階の対策工以外に、長尺鋼管先受け工の仕様をグレードアップした3案(A~C案 表-3)を用意し、数値解析により各対策工を採用した場合の変位を予測した。各ケースにおける、モノレール橋脚の絶対沈下・相対沈下の予測結果を表-4に示す.この予測結果を受けて、対策工の選定フローに基づき、モノレール影響区間の対策工を以下の通り選定した.



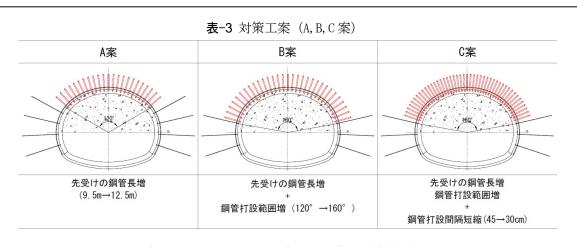
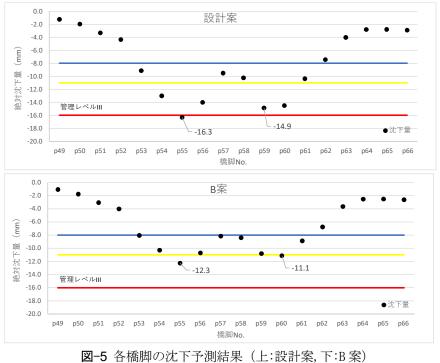


表-4 モノレール橋脚の沈下予測結果(最大値)

管理	管理項目 設計案		設計案 A案 B案		C案
	相対	4.6	4.8	4.0	3.4
沈下	יוחאי	Ⅰ未満:○	Ⅰ未満:○	Ⅰ未満:○	Ⅰ未満:○
(mm)	絶対	-16.3	-16.4	-12.3	-10.5
	かしくご	超過:× 超過:× - :〇		I~II:O	
判	定	×	×	0	0



- 当初設計案の沈下の予測結果(図-5)が管理レ ベルⅡを超過する橋脚(上り線P54~56,下り 線P59~60) の影響区間は、B案を採用する.
- 上記以外の区間は当初設計案を採用する.

また、管理レベルⅡ相当の絶対沈下が予測され たP54,55,56,58,59の直下区間にはインバートスト ラットを採用した. これにより, 橋脚や補助工法の

荷重を確実に一次インバートに伝達・早期閉合させ、 橋脚の沈下が予測以上の値にならないよう対策を講 じた.

5. 施工時の変位結果

(1)切羽の状態と坑内変位の傾向

2021年6月下旬から上り線のモノレール影響区間 の掘削を開始した. 掘削当初の切羽は泥岩が主体で, 細粒砂岩の薄層 (t=10cm以下) が2~3層挟在する地 質であった. 当初懸念していた湧水の滲みだしによ る切羽の不安定化は生じなかったが、橋脚P54の直 下手前から連続性の高い割れ目が複数現れ始め, P54通過後, 支保工建込み作業中に鏡面から岩塊 (約15m³) の抜け落ちが生じた(写真-2). 幸い作 業員にけがはなく、P54の沈下傾向にも変化はなか ったが、今後も同様の現象が発生することで、施工 の安全性や橋脚への影響に問題が生じることが懸念 されたことから、鏡面からの岩塊抜け落ち対策とし て長尺鏡ボルト (φ76.3mm, L=10.5m, N=6本, 6mシ フト)を追加した. これ以降も同様の割れ目が切羽 に存在し続けたが、前述の対策により岩塊の抜け落 ちを生じさせず切羽の安定を確保することができた. P56直下通過後は不連続面を境に層厚2.5m程度の細

粒砂岩層が現れ始めた(**写真-3**). 細粒砂岩は手で割れる程度の強度であるものの、補助工法の効果もあり、切羽は安定状態を維持できた. 上り線は9月初旬にモノレール影響区間の掘削を完了した. 下り線のモノレール影響区間は2022年1月中旬から掘削を開始し、2月末に掘削を完了した. 下り線の切羽は細粒砂岩が主体であったが、湧水の滲みだしはなく、切羽は安定状態を維持した.

上り線・下り線ともに坑内の変位は小さく、いずれも管理レベル I 未満であった。掘削中は坑内変位を常に把握するために自動計測を採用し、1回/3hrの頻度で計測を実施した。

(2)モノレール橋脚の変位結果

図-6にトンネル直上に位置する橋脚P55, P60の絶対沈下グラフを示す. いずれも管理レベル I 未満の沈下に収まった. 橋脚の相対沈下, 傾斜及び軌道桁の高低・通り測定(桁観察)も同じく管理レベル I 未満の変位に収まった. 沈下量が最も大きかった橋



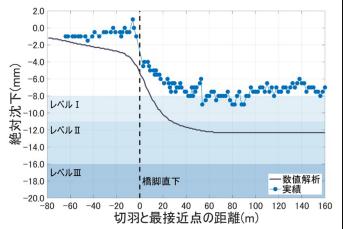




写真-3 切羽状況(不連続面と砂岩層)

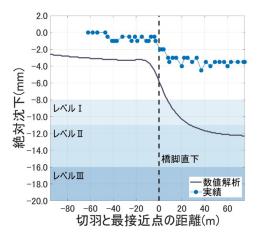


図-6 橋脚沈下グラフ (上:P55,下:P60)

脚P55における沈下の特徴は以下の通りである.

- ① 沈下は切羽が橋脚直下2m手前に到達した時点で始まった. 数値解析では先行変位が予測されていたが、そのような変位は生じなかった.
- ② トンネル掘削4m当りの最大沈下量(1.7mm)は, 予測値(1.6mm)とほぼ同じであった.
- ③ 沈下の収束は、切羽が橋脚直下の約25m前方まで進んだ時点で確認できた. 予測(60m前方)よりも半分以下の距離で沈下が収束した.
- ④ 最終沈下量 (7.5mm) は予測値 (12.3mm) の約 60%に収まった.

以上のように、数値解析の予測と比べて実際の 沈下は小さい結果となったが、5mm弱程度のわずか な差であった.よって、数値解析により対策工の効 果を適切に評価し、概ね実際の沈下を予測すること ができたと判断している.

5. おわり**に**

本トンネルは2022年3月に下り線、4月に上り線が 無事に貫通した. モノレール橋脚の変位計測は覆工 完了(2022年12月)まで継続し、長期的な沈下の有 無を検証した. その結果, 掘削中に沈下の収束を確 認して以降,変位は発生していないことが確認でき, 今後、トンネル工事が原因でモノレール橋脚に長期 的な沈下が生じる可能性は極めて低いと判断するこ とができた. モノレール橋脚は絶対沈下が最大で 7.5mm (P55), 相対沈下が4mm (P55-P56) の変位が 生じたが、モノレールの乗り心地(軌道の段差、線 形のズレ等による車両に生じる振動の評価)につい ては、工事着工前後で変化がほとんど生じていない との報告を受けている. これらの成果は、設計段階 から施工完了まで関係者が協力し合いながらモノレ ール構造物の変位抑制対策に取り組んだ結果である と考えている. 今回の取り組みが、同じような条件 下での工事の参考になれば幸いである.

最後に、本工事にあたりご指導、ご協力いただい た関係各位に対しまして、厚く感謝する次第である.

参考文献

1) 土木学会: トンネルライブラリー第25号 山岳トンネルのインバート, 2013.11.

モノレール直下のトンネル施工における三次元数値解析の活用

飛島建設(株) 兼松 亮

1. はじめに

山岳トンネル分野の設計においては、これまでの実績・経験に基づき支保構造や対策工を選定することが一般的であるが、土被りが少ない都市部や重要構造物と近接する工事では、支保や対策工の選定に数値解析を活用することが多い。その中でも、三次元数値解析は掘削過程を踏まえた支保や対策工の評価が可能となることから、特殊条件の山岳トンネルでは今後さらに適用事例が増えていくことが予想される。

山岳トンネルとして施工された赤嶺トンネル(北側)工事では、全線が小土被り(ID以下)でトンネル直上にモノレール橋脚や主要幹線道路が通る施工条件であったことから、類似条件の施工事例を参考にするとともに三次元数値解析を活用して設計が行われた。施工段階では、実際の地山変位や施工条件を反映した対策工の修正作業や、掘削の施工管理業務に対しても三次元数値解析を最大限活用した。その結果、トンネル掘削時におけるモノレール橋脚の変位を許容範囲に抑えて無事に工事を完了することが出来た。

本稿では、本工事において設計から施工にわた り三次元数値解析を活用した事例とその結果に ついて報告する.

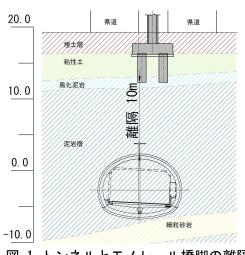


図-1 トンネルとモノレール橋脚の離隔

2. 工事の特徴

赤嶺トンネルは上下線2本(上り線L=1,026m,下り線L=907m)の道路トンネルで、本工事(平成30年度赤嶺トンネル(北側)工事)ではトンネルの北側(那覇空港側)半分を担当した。トンネルは沖縄都市モノレールおよび県道那覇空港線の直下を横断するルートとなっており、沖縄都市モノレールの橋脚直下10mを掘削(図-1)する計画であった。そのため、工事に伴うモノレール橋脚への影響を最小限に抑えることが本工事の最重要課題となり、この課題を解決する施工方法や対策工について検討が行われた。

3. 三次元数値解析の活用

3.1 設計段階における数値解析の活用

トンネル掘削に伴うモノレール橋脚への影響評価や対策工の選定及びその効果を把握するために、設計段階において三次元数値解析に基づく検討が行われた.数値解析には山岳トンネルで適用事例が多い解析ソフト FLAC3D (有限差分法)を使用した.3Dモデル(図-2)のサイズは、モノレール影響範囲全体を網羅できるように、横170m、縦350mとし、深さはトンネル下方から1D(≒12.5m)までとした.3Dモデルには上下線2本のトンネルとモノレール橋脚をモデル化している.地盤は6層(粘土層、風化泥岩、泥岩×2層、砂

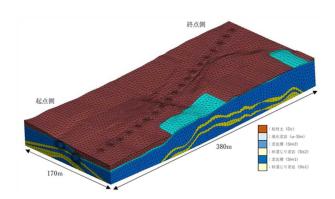


図-2 三次元数値解析の 3D モデル

キーワード トンネル,三次元数値解析,試験施工,沈下予測

連絡先 〒108-0075 東京都港区港南 1-8-15 W ビル 4F 飛島建設株式会社 土木本部

E-mail: kiyoshi_kanematsu@tobishima.co.jp

岩×2 層)で構成し、対象エリアのボーリング調 査結果を基にそれぞれの分布を設定した. 各層の 地盤定数 (表-1) は、ボーリング調査における原 位置試験や室内試験結果を基に決定した. トンネ ル支保,対策工(長尺鋼管先受け工)の物性値(表 -1) は山岳トンネル分野で一般的に用いられてい る数値を採用した. 解析ステップは, 上半, 下半, 一次インバートを 1m ずつ順次掘削する仕様とし た. 類似工事事例や予備解析の結果を踏まえて、 一次インバートの早期閉合距離(切羽と一次イン バートの離隔)は3mに設定した.

以上の条件を基に三次元数値解析を実施した ところ, モノレール橋脚の許容変位量(相対沈下: 10mm 以内, 絶対沈下 16mm 以内他) をクリアす る予測結果を得られたことから, 設計段階におけ る支保構造,対策工,施工方法を決定した.

3.2 試験施工による変位予測の精度向上

設計段階において三次元数値解析の変位シミ ュレーションにより対策工を選定したが, 予測変 位の信頼性は十分とは言い難いため、実際の地山 挙動を測定しその結果を反映した信頼性の高い 予測解析を行い、対策工の妥当性を確認する方針 とした. そこで、モノレール影響区間のトンネル 掘削開始位置の手前20m位置で対策工と地中変位 計測を行う試験施工(L=18m)を実施した. 試験 施工では長尺鋼管先受け工を3シフトと地中変位 計測(地層境界位置の鉛直変位)を1か所実施し

表-1 三次元数値解析で用いた物性値 地盤定数 (設計段階)

_	_								
地層名	単位体積重量 (kN/m²)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kN/m²)	変形係数 (kN/m²)	ポアソン比				
粘性土	20	0	37	1,600	0.42				
風化泥岩	20	0	37	3,500	0.42				
泥 岩 層	20	22	131	86,700	0.40				
砂岩層	20	49	82	66,800	0.42				

支保部材、モノレール基礎の物性値

部材名	単位体積重量 (kN/m²)	変形係数 (MN/m²)	ポアソン比	要素	備考
吹付けコンクリート	23.5	4,000	0.3	shell要素	
ロックボルト	78	200,000	0.3	beam要素	
鋼 製 支 保 工	78	200,000	0.2	beam要素	
長尺鋼管先受け工	_	2,700	0.3	solid要素	地山と鋼管 の等価剛性
モノレール基礎	24.5	23,00	0.2	solid要素	

超早期閉合(切羽と一次インバートの離隔4~6m)

①上半ベンチ3m, 一次インバート離隔4m

②上下半掘削·支保工:1m

③上下半掘削·支保工:1m ④一次インバート掘削・吹付け:2m

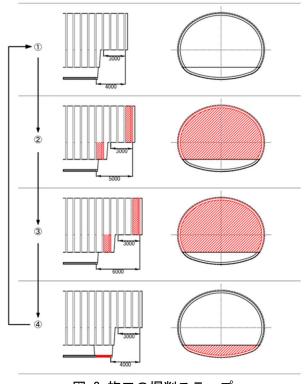


図-3 施工の掘削ステップ

た. 試験施工で得られた地層ごとの変位をもとに, 各地層の地盤定数を逆解析により同定し、その数 値を反映した予測解析で対策工の最終判断を下 すこととした. その際, さらに変位抑制効果の高 い対策工が必要となる事態に備え, 長尺鋼管先受 け工の仕様をグレードアップした対策工を検討 した. なお, 設計段階のインバート早期閉合3mの 仕様では, 支保設置時の安全性を確保することが 困難であったことから,安全作業が確保できる条 件(インバート閉合距離4~6m, 上半ベンチ長3 m, 図-3) に変更し, 数値解析に反映した.

試験施工区間における地中変位測定の結果を 図-4 に示す. 変位は切羽が20m 後方位置に達し た時点から発生し始め、粘性土以深では計測箇所 を通過するタイミングで変位速度が速くなる傾 向を示した. また, 掘削を一時中断した期間では, 変位速度が一時的に緩やかになる傾向を示した. 切羽が10m 前方位置に達した時点で, 泥岩層以深 が収束傾向を示したことから, この段階で各深度 の沈下量を決定し、三次元数値解析(逆解析)に よる地盤定数の同定作業を行った. まだ完全な収 東は示していない地点については、この時点の変位速度を参考に最終変位までの変位増加分を加算することとした. 逆解析では地山物性値として変形係数のパラメトリックスタディを実施し、そのほかの物性値(粘着力、内部摩擦角)は当初の値を変更しないものとした. 逆解析によって同定した物性値を表-2に示す. 風化泥岩については当初の値の5 倍と大きい数値を示したが、そのほかの変形係数は当初の値の0.8~1.0 倍に収まる結果となった.

逆解析で同定した物性値を利用して予測解析 を実施したところ、当初の対策工では絶対沈下の 許容変位量を満足できない予測結果となった.よ って、一部区間の対策工を修正(仕様増強)し、 モノレール影響区間を施工することとした.

地層名	【当初】 変形係数(kN/m²)	倍率	【再設定】 変形係数(kN/m²)
粘性土	1,600	×0.8	1,280
風化泥岩	3,500	×5.0	17,500
泥岩層	86,700	×0.9	78,030
砂岩層	66,800	×1.0	66,800

3.3 予測解析結果を反映した施工管理

モノレール橋脚の変位を許容変位量に抑えるため、掘削中における対策工の仕様増強や掘削中断などを判断する指標として、変位の管理レベルだけでなく、数値解析による変位の推移予測を活用する方針とした。三次元数値解析では、トンネル掘削1 m ごとのモノレール橋脚の予測変位を示すことができることから、掘削の進行(切羽の位置)ごとの予測変位と実際の変位を比較しながら施工を進める計画とした。とくに、対策工の仕様増強については、管理レベルの指標だけでは適切な変更時期を逸してしまう可能性があったことから、予測変位の指標も合わせて活用した。切羽が橋脚最接近位置に到達する前に、橋脚の変位が以下に示す指標に達した場合は、対策工の仕様を増強する方針とした(図-5)。

- ①4 m あたりの沈下量が最大予測沈下量の1.5倍以上になった場合(2 m ごとに判断). 予測沈下量が管理レベルII程度の橋脚に適用.
- ②実際の沈下が予測を上回り、その差が変位余裕量(最終予測沈下量と管理レベルIII:-16mmとの差)の80%以上になった場合.

掘削中は2回/日の頻度で各橋脚における実際

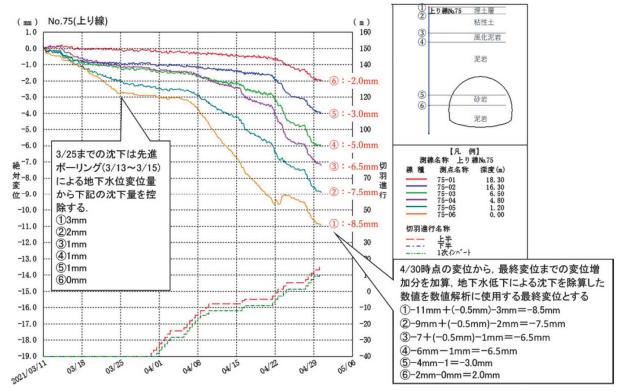
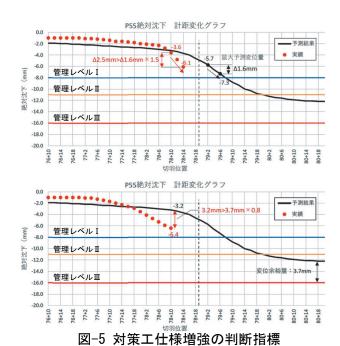


図-4 地中変位計測結果



と予測の沈下量を比較しながら対策工変更の要否判断を下す計画とした. なお,モノレール運行に支障をきたす事態を未然に防止するため,橋脚沈下の変位速度が5mm/h を超過した場合は掘削を一時中断し,掘削の継続可否や,対策工の抜本的な見直しについて関係者間で協議を行う方針とした. さらに,万が一,掘削中に坑内の異常(切羽崩落,支保変状)とともに橋脚の沈下が増大した場合は,施工者からモノレール管理者にモノレール運行の一時停止を要請する方針とした.

4. 予測解析と実際の沈下の比較

図-6にトンネル直上に位置する橋脚P55, P60の 絶対沈下グラフを示す. いずれも管理レベル I 未満の沈下に収まった. 橋脚の相対沈下も同じく管理レベル I 未満の変位に収まった. 沈下量がもっとも大きかった橋脚P55 における沈下の特徴や, 三次元数値解析との比較は以下のとおりである.

- ①沈下が始まったのは切羽が橋脚直下2 m 手前に到達した時点であった.数値解析では先行変位が予測されていたが、そのような変位は生じなかった.
- ②トンネル掘削4m あたりの最大沈下量(1.7mm) は、予測値(1.6mm)とほぼ同じであった.
- ③沈下の収束は、切羽が橋脚直下の約25m 前方 まで進んだ時点で確認できた. 予測 (60m 前 方)よりも半分以下の距離で沈下が収束した.

④最終沈下量 (7.5mm) は予測値 (12.3mm) の約 60%に収まった.

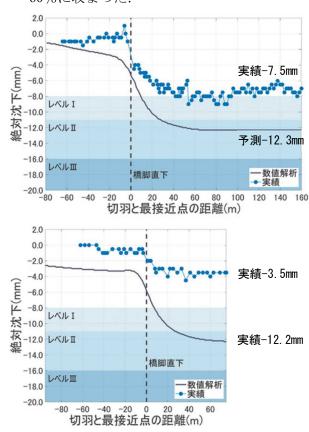


図-6 橋脚沈下グラフ (上:P55,下:P60)

5. おわりに

前述の通り、数値解析の予測と比べて実際の沈下は小さい結果となったが、5 mm 弱程度のわずかな差であった。よって、数値解析により対策工の効果を適切に評価し、おおむね実際の沈下を予測することができたと判断している。ただし、数値解析と実際の変位で差が生じていた先行変位についてはその要因を検証する必要があると考えている。数値解析の変位予測では、実際の沈下結果とは異なり、切羽が橋脚直下に到達する数十m も手前から橋脚の沈下が始まっていることから、数値解析の各種条件設定(例えば橋脚の荷重条件や橋脚直下の地盤定数)に検討の余地が残っていると考えている。

【参考文献】

1) 下地義光他3名:モノレール橋脚直下10mの 島尻泥岩内にトンネル施工,トンネルと地下, 2023年5月,pp.63-74

高力ボルト防錆用ボルトキャップ内部の腐食環境と防錆性能に関する研究

琉球大学 ○矢ケ部菜月 佐藤志帆, 淵脇秀晃, 下里哲弘

1. 目的

橋梁などの鋼構造物の添接部等にあるボルトは、 塗装による防錆処理を行った場合、他の構造部と 比較して角が多い形状のため塗膜厚が確保しにく く、他の部位と比較して発錆しやすい. 一般的な 対策として、ボルトキャップを設置する方法が広 く適用されており、大気遮断効果による、長期防 食性も実証試験にて確認されている 1). 定性的な 実証が行われている一方で、ボルトキャップ設置 による大気遮断効果に関する定量的な実証はこれ までに報告がなく、ボルトキャップの内部環境の 実態は不明慮である. そこで我々は、大気環境の 鋼材に設置したボルトキャップの内部に腐食セン サーを設置し、電気化学的に環境モニタリングす ることで、ボルトキャップの大気遮断効果の検証 を行った.

2. 試験方法

主桁部を模擬した試験体に, ACM

(Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサー (ACM センサー 図 1)を設置し、センサーを覆う形でボルトキャップを設置した(図 2).使用したボルトキャップは、軟質塩化ビニル製の、つば部に専用接着剤を塗布して設置するタイプで、ある.設置面の塗装仕様は鋼橋塗装便覧新設仕様の C-5 塗装系とした. ACM センサーを設置したボルトキャップ設置箇所について図 3 に示す.また、設置方法を図 4 に示す.作製した試験体は、琉球大学屋外暴露場にて 6 か月暴露試験を行い、試験中は ACM センサーの電流値をモニタリングした.また、同じ主桁部模擬体の添接部に設置されている塗装済高力ボルトの途膜に疵を入れて、

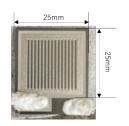


図 1. ACM センサ写真 (25mm×25mm)



図 2.ACM センサーを覆う形でボルトキャップを 設置する様子

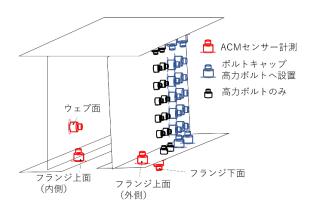


図 3. 各試験条件と鋼桁模擬体への設置場所

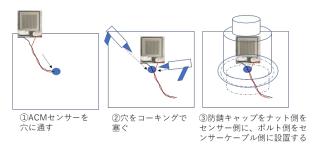


図 4. ACM センサー、ボルトキャップ設置手順

キーワード ボルトキャップ 高力ボルト 腐食 屋外暴露試験 ACM 型腐食センサー

連絡先: 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地

TEL 098-895-8666 E-mail: yakabe0251@ihi-g.com

一部のボルトにボルトキャップを設置し、ボルトキャップ設置有無での高力ボルトの防食性比較も行った.

3. 結果と考察

防錆キャップ内部の ACM センサーの電流値の 経時変化について、図5に示す、ACMセンサーの 電流値と腐食環境の関係性に関してはこれまでに 実証されており、 $0.01 \mu A$ 以下が「腐食進行がない 環境 |, 0.1 μ A 以上が「激しい腐食環境 | と定義さ れている²⁾. ボルトキャップがない場合の ACM セ ンサーの電流値は、 $0.1 \mu A$ 前後の値を示した. ボ ルトキャップをしている場合は一時的に 0.1 μ A 以上となる場合があるが、一度上昇した電流値が 低下し、 $0.01 \mu A$ 以下となった. ボルトキャップを 設置することにより大気遮断効果が認められること がこの結果から明らかである. また, 図6に, 同じ 鋼 I 桁試験体に設置した高力ボルトの暴露試験 3 年6カ月経過後の外観結果を示す. 写真左側の高 カボルトは、疵部から赤さびが発生しており、塗 装部の膨れ、剥がれ等も認められている一方で、 ボルトキャップを設置している高力ボルトからは, 赤さび等の発生が認められなかった. 今回の暴露 環境におけるボルトキャップの防食性が高いこと を示すことができた.これらの結果から、ボルト キャップの大気遮断効果が、ボルトキャップの防 食性に影響していることを示すことができた.

4. まとめ

大気環境の鋼材に設置したボルトキャップの内部に腐食センサーを設置し、腐食環境モニタリングすることで、ボルトキャップの大気遮断効果がボルトキャップの防食性に影響していることを示すことができた。

参考文献

- 1) 岩本達志, 今井学, 吉田利樹, 岩崎初美, 赤嶺健一:鋼構造物ボルト部の防錆対策, 土木学会第67回全国大会年次学術講演会講演概要集, pp.319-320(2019)
- 2) 竹淵敏郎,小野幸一郎,古土井健,佐々木一哉,千葉照男,三木千浩:腐食環境調査による東京港臨海大橋内面塗装仕様の検討,土木学会第61回年次学術講演概要集,pp.1293-1294(2006)



図 6 ボルトキャップ設置有無による高力ボルト 外観比較結果 (3 年半経過後)

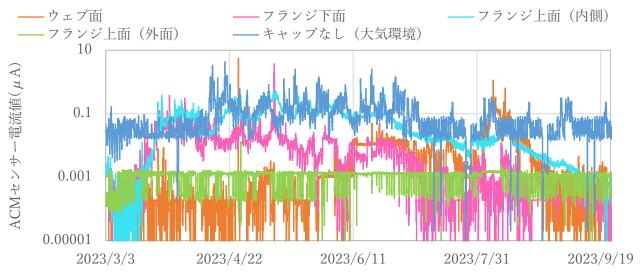


図 5. 防錆キャップ内部の ACM センサーの電流値の経時変化

デジタル撮影による点群データを用いた腐食鋼板の減肉量比較精度評価

琉球大学 〇照屋博紀, 下里哲弘

1. 研究背景・目的

社会基盤施設の一つである鋼橋では、今後老朽化が進行し、維持管理の費用・時間的コストは益々増加すると考えられる.橋梁表面の腐食度合いを確認する際に、レーザースキャンによって腐食部分の減肉量を算出するが、図1に示すような小規模面積の点群の取得であっても2mmピッチの計測で1時間強を要するのが現状である、この課題に対し、代替としてデジタル撮影技術を活用して腐食減耗量の測量が可能であれば、点検をより簡易的・迅速に行うことができると考える。本研究では、減肉量算出の精度をレーザーとデジタル撮影の両手法で比較し、既存技術に対する実用性を検証する.

2. 減肉量比較方法

(1)使用試験体

本研究では、写真1に示すようなブラスト加工されたボルト穴あき連結板を用いる。使用するのは、工場出荷時と差異がない平滑なモデル(以下フラットモデル)1つと腐食モデル6つである。

(2)点群取得方法

レーザースキャンについては、写真2に示すようなスタンドに磁石を用いて連結板を固定し、測定を行う. 点群は図2に示すようにxy座標について2mm間隔でz値を取得する. デジタル撮影においては、デジタルカメラ「Nikon COOLPIX B600」とPCソフト「Autodesk ReCap Photo」を利用して取得し、図3に示すような無作為に形状された点群データとなる.

(3)減肉量算出方法

点群データ取得時に3つの基準点を設置し、その3点から平面方程式を作成して基準面とする.表面形状のz値から基準面のz値を引いたデータを残存高さと定義すると、フラットモデルと腐食モデルの残存高さの差を使って各々の減肉量算出を行う.なお、レーザースキャンではL字金具、デジタル撮影ではナットを基準点として平面方程式を作成した.

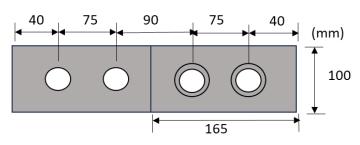


図1 試験体概要

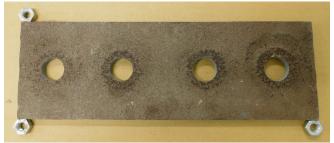


写真1 使用した連結板



写真2 レーザースキャン

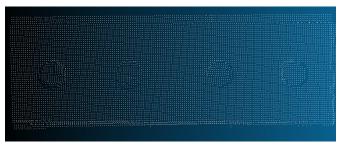


図2 レーザースキャンで取得された点群

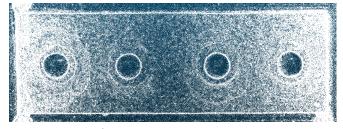


図3 デジタル撮影で取得された点群

キーワード 点検 点群 腐食 減肉量 デジタル撮影 連絡先 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース

(4)データ補正

図3で示したように、デジタル撮影で取得した点群 データは無作為に配列されているため、レーザース キャンのフォーマットに合わせることで比較可能とした. 試験体寸法をデジタル撮影で取得された x の 最大値で除して相似比とし、各点群に掛けた. また、図4に示すように2 mm間隔に再配列し、集約 された各点群の平均値を代表 z 値とした.

3. 比較結果・考察

レーザースキャンモデルとデジタル撮影モデルの腐食減肉量をプロットした各試験体の両対数散布図を次の図5に示す. 横軸をデジタル撮影,縦軸をレーザースキャンのデータとした. 散布図より,両データのオーダー1近辺ではばらつきが小さいが,片方が0.1以下の場合にオーダーが離れていることがわかる. よって,0.1mm以下のスケールでは誤差が大きくなっていることが得られた. しかし,デジタル撮影とレーザースキャンの残存高さを座標空間上で比較すると,目視上では曲面の一致が見られた. よって,現段階では比較するxy座標に多少のずれが生じて当結果が導出されている可能性がある. 原因としてフラットモデルおよび両モデルの座標不一致などが考えられ,比較方法の是正が必要であると考察する.

4. まとめと今後の展望

今回の実験結果より、デジタル撮影で得られた腐食高さは、レーザースキャンと正の相関を示したが、決定係数の値が小さく、誤差が大きいことがわ得られた. また、比較手法に未だ改善点が存在する結果となった. 今後の展望を以下に示す.

- 1. デジタル撮影で取得された点群のスケールおよび面角度などをさらに正確にレーザースキャンモデルと比較可能とする手法を詮索する.
- 2. レーザースキャンの測定ピッチを 2mm 未満に 設定し、腐食パラメータがさらに細分化された場合 を試行する.

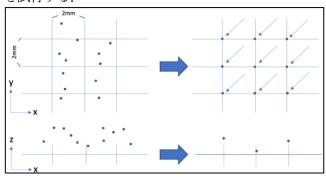
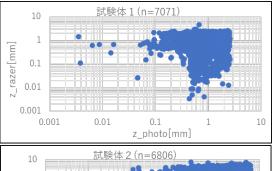
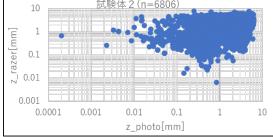
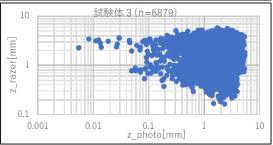
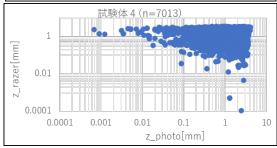


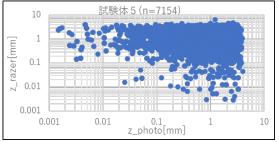
図4 再配列イメージ図











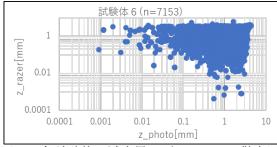


図5 各試験体の減肉量をプロットした散布図

台風下と強風下における橋梁周りの風圧特性に関する実測的研究

琉球大学 〇磯部喬幸,下里哲弘 宮地エンジニアリング 山下修平,浅野文佳 日鉄エンジニアリング 田村康行 横河ブリッジホールディングス 加藤健太郎

1. はじめに

近年, 飛来塩分の遮断や点検効率の向上, 景観性の向上といった多くのメリットを持つ, 図1に示す多機能防食デッキの設置が進められている.

一方,多機能防食デッキの風荷重については構造が 類似した建築物外装材のピーク外圧係数 ¹⁾が用いられ ているが,風洞実験や実橋計測などの検討例は少なく, 橋梁周りの風圧特性は不明な点も多い.

そこで本研究では、台風接近時の多機能防食デッキ に作用する風圧計測を行い、台風時の橋梁周りに作用 する風圧特性の検討を行った.

2. 計測環境・機器と計測方法

対象橋梁は図2に示す琉球大学暴露場に設置された 実物試験橋である. 橋長10,000mm, 主桁間隔3,000mm の単純非合成2主鈑桁橋であり,主桁間には図1に示 すアルミ製の多機能防食デッキ,G2側ウェブにはアル ミ製の側面パネルを設置している.

(1) 風圧計測システムの概要

主桁ウェブ面及び多機能防食デッキ下面風圧計測 孔に校正チューブを接続し、風圧センサニットを接続 した.計測孔は直径 15mm の孔とし、図 4 に示すように 支間中央部(以下、桁中央部)とデッキ妻部から 1,200mm の位置(以下、桁端部)に橋軸直角方向 100mm 間隔で設置した.ウェブ面については、桁中央部位置 に、計測孔を高さ方向 185mm 間隔で設置し、3 点で計 測を行った.計測方式は差圧法であり、サンプリング 周波数は 100Hz である.

(2) 風況環境システムの概要

風況環境については、実物試験橋のコンクリート地 覆天端に設置した図3に示す3次元超音波風向風速計 により計測を行った.3次元超音波風向風速計は各方 向の風速成分と大気圧・温湿度の変化を同時に計測が 可能である.サンプリング周波数は約40Hzとした.

3. 強風時と台風時の橋梁周りの風況特性

図 5 に本研究で計測した強風と台風例を示す. 2022 年強風は 2022 年 7 月に襲来した台風 4 号の計測結果 であるが, 気象庁発表の最大風速が台風の基準となる

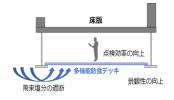




図1 多機能防食デッキの効果とデッキ下面計測孔





図2計測用実物試験橋

図3 超音波風向風速計

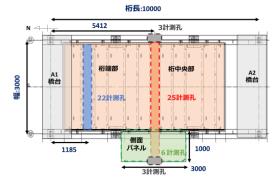
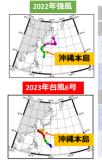


図4 実物試験橋の平面図



	2022年強風	2023年台風6号		
気象台(那覇)				
最大風速 (10分間平均)	13.8m/s	30.6m/s		
最大瞬間風速 (3秒間平均)	22.5m/s	52.5m/s		
琉球大学暴露場				
最大突風 (40Hz風速)	約18m/s	約124m/s		
最大瞬間風速 (3秒間平均)	約13m/s	約31m/s		
	(10分間平均) 最大瞬間風速 (3秒間平均) 最大突風 (40Hz風速) 最大瞬間風速	(10分間平均)		

図 5 計測した代表的な台風

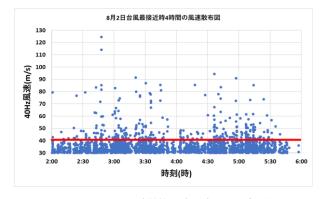
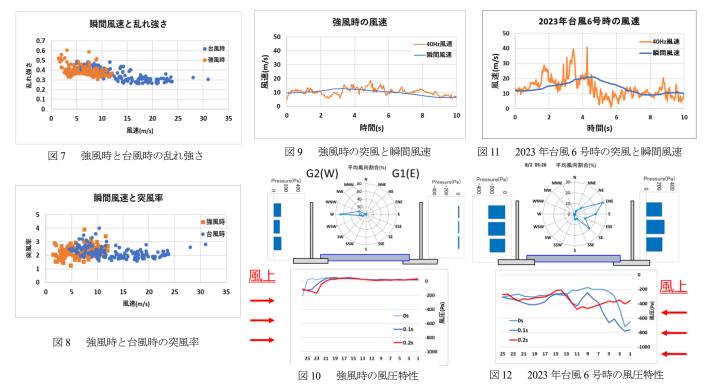


図 6 2023 年台風 6 号時最接近時 4 時間の風速分布

キーワード 多機能防食デッキ, 風圧計測, 実物試験橋, 台風

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 琉球大学大学院理工学研究科社会基盤デザインプログラム E-mail:k228522@eve.u-ryukyu.ac.jp



17m/s を下回ったことから今回の報告では強風と見なし、2022年台風6号との計測結果を比較し検討を行う.

図 6 に 2023 年台風 6 号最接近時 4 時間の 40Hz 風速 散布図を示す. 断続的に風速 40m/s 以上の強風を計測 しており, 非常に強い台風であったことが分かる.

図7に強風時と台風時の10分毎の乱れ強さ,図8に突風率(ガストファクター)を示す. 乱れ強さ,突風率は強風時,台風時で風速の大きさを除き目立った違いは見られなかった. しかし,乱れ強さは石崎がまとめた台風下での風況特性²⁾と同様に風速の上昇に伴い低下していく様子がみられた.

4. 強風時と台風時の橋梁周りの風圧特性

(1) 強風時の橋梁周りの風況風圧特性

図 9 に強風時の 10 秒間の風況状況を示す.最大突風は 18.39m/s で瞬間風速は約 13m/s であった.同瞬間の風向は図 10 に示す通り橋軸直角方向の風である西風が支配的であった.図 10 に同時間の風圧分布を示す.風上側ウェブ面では最大正圧 154Pa が発生し、デッキ下面エッジ部では最大負圧 200Pa であった.エッジ部で発生した負圧は時間の経過と共に減少しながら風下側へ流下していく様子がみられた.これは、風上側ウェブ面に作用した風がフランジで剥離し、デッキ下面に流れ込んだためと考えられる.

(2) 2023 年台風 6 号時の橋梁周りの風況風圧特性

図 11 に 2023 年台風 6 号時の 10 秒間の風況状況を示す. 最大突風は 41.04m/s で瞬間風速は約 21m/s であり, 風速が大きく変動している様子がみられた. 同瞬間の風向は図 12 に示す通り東北東の風が支配的であ

った.図12に同時間の風圧分布を示す.風上側ウェブ面では最大正圧278Paが発生し、デッキ下面エッジ部では最大負圧790Paであった.負圧の流下は強風時と同様に見られたが、風下側でも約200Pa程度の負圧が発生しており、風速の増加に伴い負圧範囲が拡大する傾向が見られた.さらに、風下側ウェブ面でも約250Pa程度の負圧が発生しており、剥離した風がデッキ下面を超えウェブ面まで影響したためと考えられる.

5. 結論

本研究では、橋梁周りの風圧特性について実物試験 橋を用いて風況風圧計測を行い以下の結果を得た.

- (1) 2023 年台風 6 号時には風速 40m/s 以上の風が断続的に発生し、非常に強い台風であった。台風時には風速が大きく増大するものの乱れ強さと突風率に大きな違いは見られなかった。しかし風速の上昇に伴い乱れ強さは低下した。
- (2) 強風時, 台風時に関わらず, 風上側ウェブにて正 圧が発生し, デッキ下面エッジ部で負圧が発生し 負圧は時間の経過と共に風下側へ流下していく.
- (3) 台風時には. デッキ下面風上側エッジ部周りだけでなく風下側デッキ下面及びウェブ面まで負圧が発生したことから, 風速の増大に伴い負圧の影響範囲が拡大する.

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説, 2015
- 石崎潑雄: 台風時の風の乱れの特質と平均風速, 京大防災研究所年報,第24号B-1,pp.1-6,1981.