

第 10 回 土木学会西部支部沖縄会

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

2021 年 1 月 13 日

発表プログラム



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。

発表プログラム

2021年1月13日

Timetable

Start	End	プログラム	
10:00	10:30	受 付・登 録	
10:30	10:40	Break	
10:40	11:50	Session 1 〈Room : A〉 6編 (建設材料) 座長：垣花寿 (川田建設)	Session 2 〈Room : B〉 5編 (振動・診断) 座長：玉城喜章 (沖縄しまたて協会)
11:50	12:50	Lunch	
12:50	14:00	Session 3 〈Room : A〉 6編 (建設・環境) 座長：赤沼隼一 (沖縄総合事務局)	Session 4 〈Room : B〉 6編 (点検・補修・補強) 座長：田井政行 (琉球大学)
14:00	14:15	Break	
14:15	15:25	Session 5 〈Room : A〉 6編 (整備・交通) 座長：島袋一英(沖縄県)	Session 6 〈Room : B〉 5編 (腐食・点検・計測) 座長：須田裕哉 (琉球大学)

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、土木学会正会員または学生は登録の必要はありません。

Time	Room A
10:40 ┃ 11:50	Session1：建設材料 座長：垣花寿（川田建設） 1. 湿度の違いによるセメントペースト中のC-S-Hと水酸化カルシウムの炭酸化進行に関する研究 ————— 2 琉球大学 福永 和摩, 須田 裕哉, 富山 潤 2. 遅延膨張性骨材を用いたモルタルのASR膨張と塩分浸透性に関する基礎的研究 ————— 4 琉球大学 小嶺 雅仁, 須田 裕哉, 富山 潤, (株)琉球セメント 比屋根 方新, 神谷 和志, 知名 ゆりか 3. 蛍光X線分析装置を用いたコンクリート表面の塩分浸透挙動に関する基礎研究 ————— 6 琉球大学 佐藤 由哉, 富山 潤, 須田 裕哉, (株)ティ・エス・プランニング 佐藤 智 オリエンタル白石(株) 渡瀬 博 4. 炭酸化したセメントペーストの気体の拡散性状と体積変化挙動の関係に関する研究 ————— 8 琉球大学 知花 開, 須田 裕哉, 富山 潤 5. 長期暴露後のモルタル供試体の物質移動性状の変化に関する研究 ————— 10 琉球大学 稲福 亮, 須田 裕哉, 富山 潤 6. 沖縄県の暑中期におけるコンクリート温度が及ぼす影響に関する実験 ————— 12 沖縄県生コンクリート工業組合 村田 旬, 琉球大学 富山 潤
	Room B Session2：振動・診断 座長：玉城喜章（沖縄しまたて協会） 1. 名護東道路数久田ICにおけるONランプ橋耐風試験設計について ————— 18 沖縄総合事務局 北部国道事務所 下地 涼大, 森山 正三 2. 強風環境下における多機能防食デッキの耐風安定性に関する研究 ————— 24 琉球大学 松井 尚輝, 下里 哲弘 田井 政行, Vincent Amores, 宮地エンジニアリング 山下 修平 横河ブリッジ 川東龍則, 日鉄エンジニアリング 藤川敬人 3. 沖縄県におけるフライアッシュを用いたコンクリートのポストテンションPC橋への 適用化に関する基礎的研究 ————— 26 PC建設業協会 柴田 和典, 妹川 寿秀, 赤嶺 文繁, 琉球大学 富山 潤, 須田 裕哉 琉球セメント(株) 比屋根 方新 4. ASR劣化したコンクリート構造物に対するX線回析法を使用した膨張力の評価法の基礎的検討 ——— 32 琉球大学 古田 泰祐, 富山 潤, 須田 裕哉, (株)沖縄建設技研 宮城 敏明, 泉水 雄太, 有澤 希, パルステック工業(株) 山口 真 5. 渦電流探傷試験による塗膜上からの疲労き裂検出技術に関する研究 ————— 38 琉球大学 鈴永 啓心, 下里 哲弘, 田井 政行, (株)IHI 大橋 タケル, 瀬戸口 雄介, 畠中 宏明

Time	Room A
12:50 J 14:00	Session3：建設・環境 座長：赤沼隼一 (沖縄総合事務局) 1. 県道20号線（泡瀬工区）橋梁整備事業におけるコンクリート構造物品質確保の取り組みについて(その2) _____ 42 沖縄県土木建築部中部土木事務所 恩河 大貴，小島 健太郎 2. 県道20 号線泡瀬連絡橋上部工外割りフライアッシュコンクリートの配合検討 _____ 50 沖縄県建設技術センター 比嘉 正也 3. サトウキビバガスコンクリートの開発 _____ 56 京都大学大学院 Ribeiro Bruno，山本 貴士，山敷 庸亮 4. バイオマス発電所から排出されるPKS燃焼灰を有効利用したコンクリート製品向け配合の基礎的検討 _____ 58 琉球大学 池田 季裕，富山 潤，須田 裕哉， (株)リュウクス 南出 拓人，上里 尚也，リュウコン(株) 仲宗根 晋也，新城 直樹 5. 竹富南航路整備事業における環境保全への取り組みについて _____ 60 沖縄総合事務局 石垣港湾事務所 大城 祥慎，前里 尚 6. 北部国道事務所の環境に配慮した道路事業の取り組みについて _____ 64 沖縄総合事務局 北部国道事務所 平敷 健太，高良 茂宏
	Room B Session4：点検・補修・補強 座長：田井政行(琉球大学) 1. 安波ダム減勢水槽における補修方法の検討について _____ 70 沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 福島 大五，三田美 修作 2. 腐食凹凸面に対する当て板ボルト補修のすべり耐力特性に関する実験的研究 _____ 74 琉球大学 上地 足登，田井 政行，下里 哲弘 3. ASR劣化したプレテンションPC桁の耐荷力評価に対するひび割れ画像解析を活用した 数値解析技術の検討 _____ 76 琉球大学 藤原 滉大，古田 泰祐，富山 潤，須田 裕哉 4. 腐食した鋼部材の防食補修技術に対する各種ケレン方法の錆除去能力 _____ 78 琉球大学 新田 健太，佐藤 志帆，下里 哲弘 5. 鋼製高力ボルト用の透明型防食キャップ素材の耐候性に関する分析 _____ 80 琉球大学 磯部 喬幸，蓮池 里菜，下里 哲弘，田井 政行， (株)IHI 矢ヶ部 菜月，IHIインフラ 石川 直 6. 沖縄自動車道における点検支援技術の取り組み状況について _____ 82 西日本高速道路総合サービス沖縄(株) 宮城 清秀

Time	Room A
14:15 ┃ 15:25	Session5：整備・交通 座長：島袋一英(沖縄県) - 訪日外国人レンタカーへのピンポイント事故対策効果について ————— 88 沖縄総合事務局開発建設部 仲村 一成，伊藝 誠一郎 - ビッグデータを用いたヒヤリハット分析について ————— 92 沖縄総合事務局南部国道事務所 原戸 鉄平 - 平良港国際クルーズ拠点整備事業の取組みについて ————— 98 沖縄総合事務局 平良港湾事務所 横山 美穂，金城 健吾 - 本部港（本部地区）国際クルーズ岸壁整備事業におけるジャケット工法の採用について ————— 102 沖縄県土木建築部北部土木事務所 平田 淳貴 - 小規模LNG海上輸送に関する検討 ————— 108 沖縄総合事務局港湾計画課 與古田 一樹，平良 宗孝 - 沖縄自動車道 幸喜橋の床版取替工事について ————— 112 西日本高速道路総合サービス沖縄㈱ 金城 樹，賀数 淳人，西日本高速道路㈱ 今村 光志， オリエンタル白石㈱ 牧野 翔平
	Room B Session6：腐食・点検・計測 座長：須田裕哉 (琉球大学) - 大気暴露環境下にある実物試験橋を用いた桁端部の腐食環境分析に関する一考察 ————— 116 琉球大学 望月 大地，蓮池 里菜，下里 哲弘，淵脇 秀晃 - 各種大気腐食センサを用いた腐食環境評価 ————— 118 琉球大学 児玉 晃太郎，押川 渡 - 突合せ溶接された炭素鋼材とステンレス鋼材の異種金属反応特性に関する基礎的研究 ————— 120 琉球大学 木下 実梨，蓮池 里菜，下里 哲弘 - Al-Mg合金溶射・塗装被膜の防食効果調査結果－模擬桁試験体の10年経過報告－ ————— 122 西日本プラント工業㈱ 山崎 正文，琉球大学 下里 哲弘，田井 政行 - 傾斜角変化に着目した変形形状計測の適用 ————— 128 ㈱TTES 梅川 雄太郎，菅沼 久忠，玉名市 建設部土木課 木下 義昭

Session 1 建設材料

湿度の違いによるセメントペースト中の C-S-H と水酸化カルシウムの炭酸化進行に関する研究

琉球大学 ○福永和摩, 須田裕哉, 富山潤

1. 背景および目的

近年, 環境負荷低減の観点から, コンクリート構造物に高炉スラグ微粉末 (BFS) やフライアッシュ (FA) などの混和材を置換したセメントの利用が進められている. これら混和材をコンクリートに置換することで塩分浸透抵抗性の向上, 長期強度が増進する. 一方で, 普通セメントに比べ混和材を利用すると中性化抵抗性が低下する. また, 相対湿度の違いによって炭酸化の進行速度が異なることが明らかになっているが, 混和材を用いた系の個々の水和物の炭酸化挙動は明確でなく, 湿度の違いによる炭酸化後の供試体の性質は明らかではない.

そこで本研究では, FA を使用したセメント硬化体内で生成した水和物の炭酸化挙動を明らかにすることを目的とし, 異なる湿度環境下での水酸化カルシウム (CH) と C-S-H の炭酸化挙動について検討を行った.

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料は普通ポルトランドセメント (以下, NC) および普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュに置換した試料 (以下, NF) とした. 供試体はセメントペーストとし, 水結合材比は 55%, フライアッシュの置換率を 30% とした. また, 初期養生として, 182 日間の 20°C 水中養生を行った.

2.2 試験体の乾燥, 炭酸化条件

任意の湿度で事前乾燥を行った後, 炭酸化を行った. 乾燥方法は調湿法とし, 飽和塩類を用いて調湿した 20°C 環境下のデシケーター内にて, 約 5 ヶ月間静置し乾燥させた. 調湿湿度は 43%, 56%, 66%, 85% とした.

試験体を乾燥させた後, 継続して飽和塩類を用いて 20°C 環境下で調湿したデシケーター内にて, 二酸化炭素濃度 3% の混合ガスを流量 100ml/sec で 4h/day

流通させ, 促進環境で炭酸化させた. 炭酸化日数 0, 14, 28, 63 日の供試体について各種測定を行った.

2.3 熱重量分析

所定期間, 炭酸化を行った供試体を 90 μ m 以下に粉砕し熱重量分析装置を用いて炭酸カルシウム (CaCO₃) 量を測定した. 昇温速度 10°C/min で試料を 1000°C まで強熱後, 400~550°C, 550~800°C 付近における重量減少量を CH, CaCO₃ の分解によるものと仮定し CH, CaCO₃ 量を定量した.

2.4 FT-IR 測定

非晶質の水和物である C-S-H の炭酸化を評価するため赤外線吸収スペクトル法を用いて分析を行った. 赤外線吸収スペクトル法にはフーリエ変換赤外分光光度計 (以下, FT-IR) を使用した. 本研究では, 全反射測定法 (Ge プリズムを使用) で分析を行った. 前処理として試料は 90 μ m 以下に粉砕し乾燥処理を行わず使用した.

3. 実験結果および考察

3.1 CaCO₃ 量の経時変化

図 1, 2 に NC, NF の炭酸化後の供試体における CaCO₃ 生成量の経時変化を示す. 図より, NC, NF とともに相対湿度 56%, 66% の供試体の CaCO₃ 量が他の湿度と比べてもっとも多い結果となった. 既往の研究より 50%~70% 程度の湿度で中性化がもっとも進

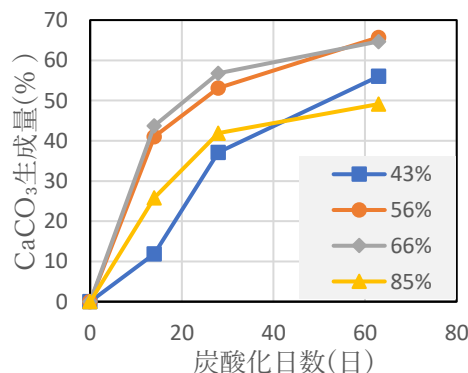


図 1 NC CaCO₃ 量の変化

キーワード: 炭酸化, C-S-H, 炭酸カルシウム, 水酸化カルシウム, 相対湿度

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部社会基盤デザインコース 建設材料学研究室

E-mail: e175301@eve.u-ryukyu.ac.jp

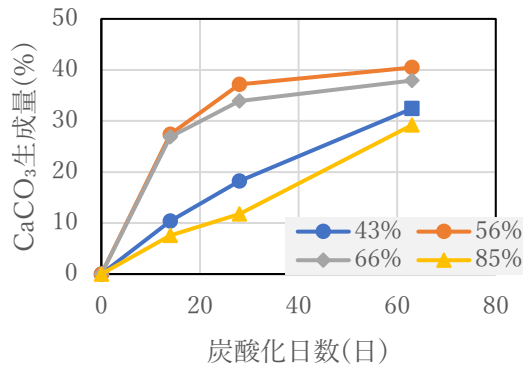


図2 NFのCaCO₃量の変化

行しやすいことが報告されており、本研究も一致する結果になった¹⁾。また、各湿度においてNFはNCに比べCaCO₃の生成量が少ない結果となった。

3.2 CH由来のCaCO₃生成量

炭酸化後のCHの減少量を炭酸化によって減少したものと仮定し、CH由来のCaCO₃量を求めた。図3に、NCのCH由来のCaCO₃生成量を示す。炭酸化63日のRH43%、85%の結果を比較すると、図1では、CaCO₃生成量が同程度であるにもかかわらず、図3では、RH43%に比べRH85%の方がCH由来のCaCO₃量が多くなった。これらは、RH85%の環境ではCH周りに水分が存在するため炭酸化が進行しやすく、RH43%では、周囲に水分が少なくCHの炭酸化進行が緩やかになったためと考えられる。

3.3 FT-IRによる波数の変化

既往の研究よりC-S-HのIRピークの波数と帰属は、それぞれ900~1100cm⁻¹、Si-O(C-S-H)伸縮である。また、C-S-Hが炭酸化しシリカゲルになると900~1100cm⁻¹域の間でピークの位置が高波数側へシフトする²⁾。そこで、本研究では、900~1100cm⁻¹域のピークの変化を評価した。図4にNC、NFの波数とCaCO₃量の関係を示す。図より、NCでは、CaCO₃の生成量の増加とともに970cm⁻¹の波数が1060cm⁻¹へシフトしていることが分かる。湿度の違いに着目すると、RH85%は、CaCO₃量が増加しているが波数に変化は見られなかった。RH43%、56%、66%ではCaCO₃量の増加とともに波数も増加している。このことから、RH85%よりも低い湿度ではC-S-Hの炭酸化が進行しやすいことが分かる。NFについてもRH43%、56%、66%でC-S-Hの炭酸化が進行しやす

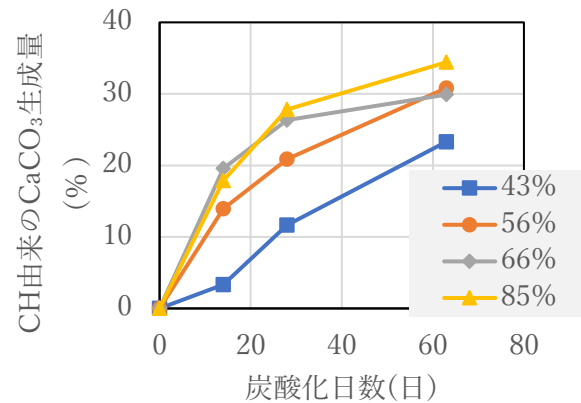


図3 NCのCH由来のCaCO₃量の変化

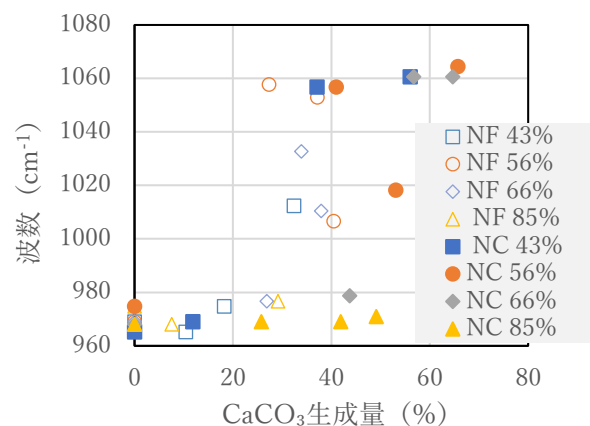


図4 C-S-Hの波数の変化とCaCO₃量の関係

いが、NCに比べCaCO₃生成量が少ない領域で高波数側へシフトしておりC-S-Hの分解が早期に生じていると考えられる。

4. まとめ

炭酸化時の相対湿度が低いとC-S-Hが炭酸化しやすく、相対湿度が高いとCHが炭酸化しやすいことがわかった。また、フライアッシュを置換した場合、CaCO₃の生成量は少ないがC-S-Hの炭酸化の影響が大きいことが示唆された。

参考文献

- 1) 小林一輔, 宇野祐一: コンクリートの炭酸化メカニズム, コンクリート工学論文集 Vol.1, No.1, pp37-49, 1990
- 2) コンクリート中のC-S-Hとは何か, 一般社団法人セメント協会, pp.324-339, 2018

遅延膨張性骨材を用いたモルタルの ASR 膨張と塩分浸透性に関する基礎的研究

琉球大学 ○小嶺雅仁 須田裕哉 富山潤, 琉球セメント (株) 比屋根方新 神谷和志 知名ゆりか

1. 背景および目的

島嶼環境にある沖縄県では、沿岸部のコンクリート構造物が厳しい塩害環境に曝されている。また、沖縄県で使用される海砂には、遅延膨張性のアルカリシリカ反応（以下、ASR）を引き起こす可能性が指摘されている。

既往の研究により、ASR による膨張ひび割れによって塩分浸透が促進されることが明らかとなっているが、そのような研究の多くは、比較的 ASR 反応性が高い急速膨張性の骨材を使用した事例である。沖縄県で使用される骨材は、遅延膨張性 ASR 発生の可能性があり、遅延膨張性骨材を用いたコンクリートの塩害との複合劣化環境下における事例は少ない。

本研究では、塩害と ASR の複合劣化環境における遅延膨張性骨材を用いたモルタルの劣化特性を評価するため、膨張量の違いから、ASR 発生が塩分浸透に与える影響について調査した。また、塩害と ASR の単独劣化に対して有効なフライアッシュ（以下、FA）を混和させ、FA による塩害と ASR の複合劣化に対する抑制効果を検証した。

2. 実験方法

2. 1 材料および配合

使用材料は、普通ポルトランドセメント、海砂（反応性骨材）、砕砂、FA（置換率：内割 18%）を使用した。NaOH を練混ぜ水に溶かして使用した。

本実験で用いた配合を表 1 に示す。FA 混和したものを NF、FA 無混和を NC と表記した。また、ASR を促進させるため、アルカリ総量を 10kg/m^3 、 15kg/m^3 となるよう NaOH を添加し、それぞれ NC-10、NC-15、NF-10、NF-15 とした。水セメント比は 0.5 とし、海砂：砕砂の比は 60:40 とした。

2. 2 膨張量試験

$4\times 4\times 16\text{cm}$ の角柱供試体を作製し、打設の翌日に脱型を行うとともに、コンタクトチップを 2 つ取り付け、初期値を測定した。供試体は NaOH 溶液で湿らせた（NaOH 無混和では水で湿らせた）不織布、ラップ、ジップロックで包み、 40°C および 60°C の恒温器で養生した。2 方向から測定を行い、それらの平均値を測定値とした。

表 1 供試体配合

配合名	単位量 (kg/m^3)					
	セメント	FA	水	海砂	砕砂	NaOH
NC-0	635	0	317	761	508	0
NC-10	635	0	317	761	508	9
NC-15	635	0	317	761	508	15
NF-0	515	113	314	753	502	0
NF-10	515	113	314	753	502	7
NF-15	515	113	314	753	502	13

2. 3 電気泳動試験

供試体は $\phi 10\times 12\text{cm}$ とし、膨張量試験と同じ環境下で養生した。養生 35 日後に供試体中央部からカットした厚さ 50mm の供試体に対し、真空吸水処理を行った。電気泳動試験は中村らの方法に基づき塩分浸透深さから塩化物イオン拡散係数を求めた²⁾。

2. 4 ゲルフルオレッセンス法

ゲルフルオレッセンス法を用いて ASR ゲルの発生状況を評価した³⁾。電気泳動試験後、塩化物イオン未浸透領域から供試体を採取し、溶液塗布および暗室での UV 照射を行った後、ASR ゲルの発光状況（ASR 部は緑色に発光）を確認した。

3. 実験結果および考察

3. 1 ASR 膨張量試験

図 1 に NC の ASR 膨張量試験の結果を示す。 40°C 養生を実線、 60°C 養生を点線で表記した。 60°C 養生では NC-10 が膨張量が最も大きくなり、NC-15 も膨張を示した。 40°C の供試体は現時点で大きな膨張を示さなかった。林らは高アルカリの ASR ゲルでは、ゲルが結晶化し、膨張性が変化することを報告している⁴⁾。NC-15 が NC-10 と比較して膨張量が小さくなったことは、NaOH の混和により、ASR ゲルの組成が変化し、膨張性の低いゲルが生成された可能性が考えられる。図 2 に NF の ASR 膨張量試験の結果を示す。FA 混和した供試体では 60°C で養生したものが最も高い膨張を示したが、全体として膨張率は低い傾向を示した。いずれの供試体においても膨張ひび割れは確認されなかった。

キーワード: アルカリシリカ反応, 遅延膨張性骨材, 塩害, フライアッシュ

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
建設材料学研究室 E-mail : e175547@eve.u-ryukyu.ac.jp

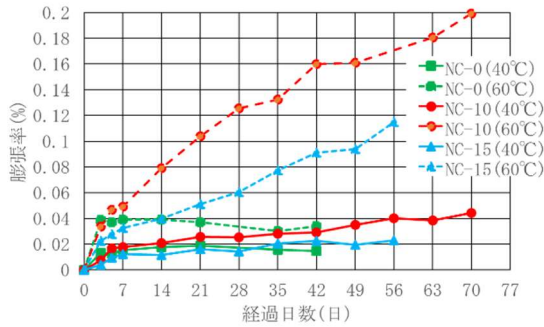


図1 膨張量試験結果

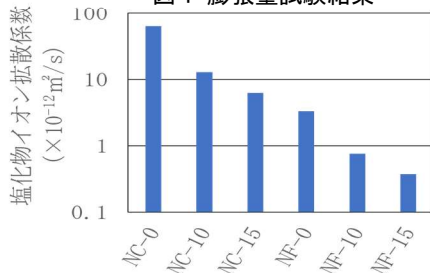


図3 塩化物イオン拡散係数 (60°C供試体)

3. 2 電気泳動試験

図3に60°C養生の各供試体の塩化物イオン拡散係数を示す。NCで比較すると、NC-0の拡散係数は、NC-10やNC-15より高い値を示した。また、FAを混和したものでは、NCと比較して拡散係数が低い値となった。FAでは、60°C養生でポズラン反応が進行したことで、組織が緻密になり塩化物イオンの浸透を抑制していると考えられる。NC-10、NC-15と比較して膨張量の低いNC-0が最も高い拡散係数を示したことから、ASR膨張を起こしたNC-10、NC-15内部のASRゲルが塩化物イオンの浸透に影響を及ぼしたと考えられる。

3. 3 ゲルフルオレッセンス法

NC-10およびNC-15の60°Cで養生した供試体に対してゲルフルオレッセンス法によるASRゲルの診断を行った。ただし、写真は視認しやすくするため明度等の調整を行った。写真1にASRゲルの発光状況を示す。NC-10ではNaOHを浸透させた表面部に緑色の発光が確認でき、ASRゲルが生じている。NC-15では割裂面全体に緑色の発光を示し、ゲルの発生が確認できた。ASR膨張の生じた供試体では、内部にASRゲルの発生が確認できたことから、ASRゲル発生により、組織が緻密化し、塩分の浸透を抑制したものと考えられる。

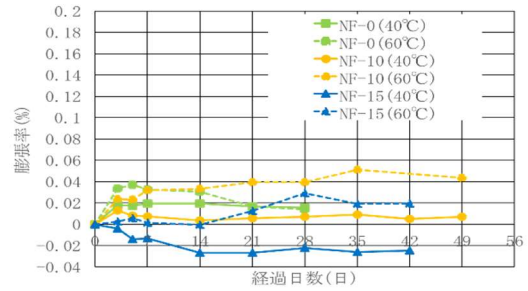


図2 膨張量試験結果(FA混和)



写真1 ASRゲルの発光状況(左:NC-10, 右:NC-15)

4. まとめ

遅延膨張性骨材を使用したモルタルで、ASR、塩分浸透ともにFAによる抑制効果を確認した。また、ASR膨張が発生した供試体において、ASRゲルにより塩化物イオンの浸透を抑制する可能性が示された。ただし、本試験は遅延膨張性骨材を使用しており、今後膨張ひび割れが発生し、塩化物イオン拡散係数の上昇も考えられるため、引き続き膨張量の継続的な測定を行う予定である。

参考文献

- 1) 熊谷善明, 大森伸尚, 奥田由法, 鳥居和之:凍結防止剤の影響を受けたASR損傷コンクリート橋脚の残留膨張性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.55-66, 2000
- 2) 中村英佑, 水戸健介, 古賀裕久:高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.219-224, 2018
- 3) 参納千夏男, 丸山達也, 山戸博晃, 鳥居和之:ゲルフルオレッセンス法によるASR簡易診断手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 4) 林建佑, 河野克也, 山田一夫, 原健悟:石灰岩碎石と海砂を使用したコンクリート構造物のアルカリ骨材反応による劣化診断, コンクリート工学年次論文集, Vol31, No.1, pp.124901254, 2009

蛍光 X 線分析装置を用いたコンクリート表面の塩分浸透挙動に関する基礎研究

琉球大学 ○佐藤由哉，富山潤，須田裕哉，(株) ティ・エス・プランニング 佐藤 智，
オリエンタル白石 (株) 渡瀬 博

1. 研究の背景および目的

沖縄県は，四方を海で囲まれた島嶼環境であり，高温多湿で大量の塩分が飛来している．コンクリート構造物に塩分が付着するとコンクリート内部に塩化物イオンが浸透しコンクリート構造物内部の鉄筋が腐食し塩害が生じる．また，塩害は飛来塩分，温湿度など環境作用の影響が大きい．従って環境作用を受けたコンクリートの応答としてコンクリート内部の鉄筋腐食時期を精度良く予測するためには，境界条件としての環境作用に加え，コンクリート表層の塩分浸透現象および内部の拡散現象を適切にモデル化する必要がある．そこで本研究では，コンクリート表面に付着した塩化物イオンがコンクリート内部へ浸透する現象として，表層の塩分濃度の経時変化を実験的に求め考察する．測定にはポータブル蛍光 X 線分析装置¹⁾を用いた．

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本試験では，100×100×400(mm)のコンクリート試験体を用いた．以下にコンクリート配合を示す．試験体は，28 日水中養生し，約 2 年間室内で乾燥させたものである．

表-1 コンクリート配合

配 合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	S1	S2	G	AE
NC	48.0	43.4	169	352	234	531	1031	3.344

W:水, C:セメント, S1:海砂, S2:砕砂, G:砕石, AE:混和剤

2.2 測定器（蛍光 X 線分析装置）概要

本研究では，コンクリート表面に付着した塩化物イオンの短期的な塩化物イオン濃度の経時変化に着目した．測定に用いた蛍光 X 線分析装置（測定原理：コンプトン散乱ノーマライゼーショ

ン法）を写真-1 に示す．

蛍光 X 線分析法は，分析対象試料に 1 次 X 線を照射して含有元素の原子の内殻電子を励起し，内殻上に空孔が生じた不安定な状態から安定状態に戻る時に発生するそれぞれの元素に固有の波長（エネルギー）を持った蛍光 X 線を観測することによって，分析対象試料の含有元素を定性又は定量分析する方法である（図-1 参照）²⁾．



写真-1 ポータブル蛍光 X 線分析計

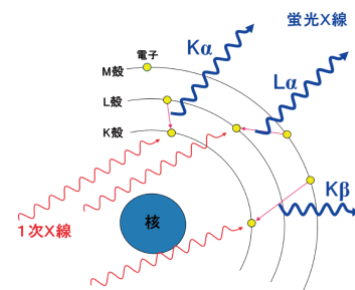


図-1 蛍光 X 線の発生機構²⁾

2.3 実験方法

実験は，乾燥させた試験体（乾燥試験体）を用いた場合（ケース 1）と，1 週間，水に浸漬させた試験体（飽和試験体）を用いた場合（ケース 2）の 2 ケースで行った．試験は，写真-2 に示すように測定位置を固定（黒い枠線内）した 4 箇所（向かって左から NC1, NC2, NC3, NC4）に，霧吹きを用いて濃度 10%の塩水を異なる初期濃度になるよう吹きかけ回数を変え，表層の塩素（Cl）を 3 分毎に測定した．測定状況を写真-3 に示す．

キーワード：塩害，表層塩分，浸透減少，ポータブル蛍光 X 線分析装置

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 : e175543@cs.u-ryukyu.ac.jp



写真-2 試験体の測定位置（枠線内）



写真-3 測定状況

(a) ケース 1

乾燥試験体の測定結果を図-2 に結果を示す。乾燥試験体では、異なる初期濃度のいずれの場合も急激に Cl 濃度が減少したが、5.9%~15.7%と初期濃度が高いため、0%には収束せず、初期濃度に応じた値に収束した。

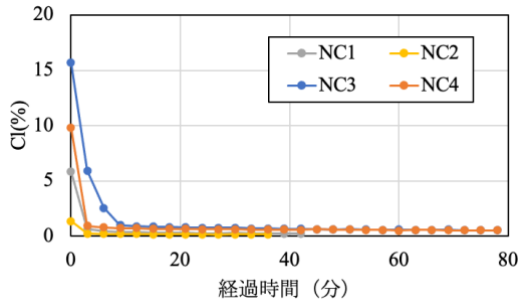


図-2 乾燥した供験体の表面塩分の経時変化

(b) ケース 2

飽和試験体(NC(2))の測定結果を図-3 に示す（2箇所）。飽和試験体では、乾燥試験体に比較し、表層の Cl 濃度は緩やかに減少しており、コンクリートの含水状態により塩分の浸透速度が大きく異なることが示唆された。

上記の実験は実環境に比較し、表面塩分濃度を高く設定したものである。次に塩害環境で考えられる初期濃度 0.23%(5.29kg/m³程度)を設定し、外来塩分が繰り返し作用する条件(3回)で表層の塩分濃度の経時変化を測定した。その結果を図-4 に

示す。図より塩水霧吹き前の表層に Cl が存在しない場合は、Cl 濃度が指数関数的に減少しほぼ 120ppm 以下とほぼ 0%に収束した。その後、2回目の塩水吹きかけ後の濃度は、1回目と異なり減少増加を繰り返しほぼ 0%に収束した。塩水吹きかけ3回目では、0%には収束せず、濃度が増減しながら増える傾向を示した。この結果は、コンクリート中の塩分の濃度拡散現象により、作用と浸透（拡散）のバランスに関係すると考えられる。

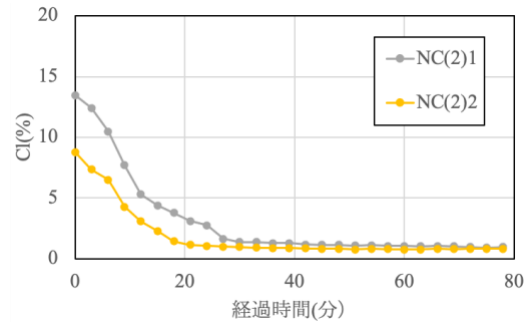


図-3 飽和した供験体の表面塩分の経時変化

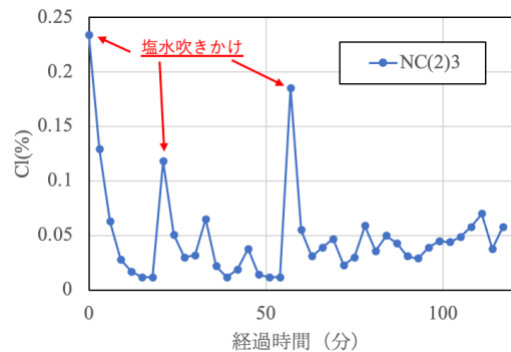


図-4 飽和した供験体の表面塩分の経時変化

5. まとめ

ポータブル蛍光 X 分析装置を用いてコンクリート表面の塩分(Cl)浸透現象について考察した。その結果、X 線分析装置を用いることで表層の塩分濃度の経時変化を測定できることが示された。今後は測定条件を増やし、表層の浸透現象を明らかにし、表層の浸透モデルを構築する。

参考文献

- 1) オリンパスホームページ： <https://www.olympus-ims.com/ja/vanta/>（閲覧日:2020年1月14日）
- 2) 一般社団法人 日本分析機器工業会ホームページ：X線分析法の基礎と応用， <https://www.jaima.or.jp/jp/analytical/basic/xray/foundation/>（閲覧日:2020年1月14日）

炭酸化したセメントペーストの気体の拡散性状と体積変化挙動の関係に関する研究

琉球大学 知花開 須田裕哉 富山潤

1. 背景および目的

コンクリート構造物は供用期間中に乾湿繰返し作用や大気中の二酸化炭素との反応で炭酸化が生じ、これらの影響によりコンクリートの強度や耐久性が長期的に変化する。したがって、乾燥や炭酸化がコンクリート構造物に及ぼす影響を評価することは重要である。

また、現在、循環型社会の実現の観点から、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュの有効利用が進められている。混和材を使用することで、遮塩性の向上などの優れた効果を与える一方で、中性化速度が大きくなることが知られている。さらに、水和物の炭酸化による緻密性の低下がその後の物質透過性を増加させることも報告されている¹⁾が、その主たる原因は明らかでない。

本研究では、混和材を使用したセメント硬化体の炭酸化による物質移動性状の変化を評価するため、固相の体積変化に着目し検討を行う。また、炭酸化時の湿度を変化させ、乾燥と炭酸化の影響を評価し、炭酸化による物質移動性状と体積変化の関係を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 材料・配合および乾燥・炭酸化条件

材料は普通ポルトランドセメント、混和材は高炉スラグ微粉末を50%(NB)、フライアッシュを30%(NF)置換した。無置換をNCとする。水結合材比は55%とし、セメントペーストとした。φ50×100の供試体は作製後、養生条件20℃で約2年間、飽和水酸化カルシウム溶液中で水中養生を行った。養生後、供試体を厚さ5mmにカットし、各供試体を飽和塩類による調湿法により43%、56%、67%、85%の相対湿度(RH)で100日間乾燥させた。炭酸化の影響を最小限にするために、デシケータ内には、水酸化ナトリウム水溶液を入れた。また、乾燥を行う供試体とは別に、同一配合の供試体を用いて、同一の湿度環境下のもとCO₂濃度3%のイ

ンキュベータ内で最大100日間炭酸化させた。

2.2 酸素拡散試験

気体の拡散試験装置により酸素の拡散係数を求めた。また、酸素拡散試験は乾燥・炭酸化開始後から、42, 70日に行った。型枠にはめた供試体に酸素ガスと窒素ガスを等圧等流量で流し、窒素ガス側の酸素濃度を測定し、窒素ガス側の酸素濃度が一定値に収束した時点の濃度より拡散係数を求めた。

2.3 長さ変化および質量変化の測定

炭酸化時および乾燥時の供試体の長さおよび質量変化を経時的に測定を行った。マイクロメーターより長さ変化を測定した。また、炭酸化収縮ひずみは、同一期間での炭酸化時のひずみから乾燥させた供試体のひずみを差し引くことで求めた。

3. 実験結果

3.1 酸素拡散係数

図1に、NC、NB、NFの拡散係数と湿度の関係を示す。凡例の数字は乾燥・炭酸化の日数を示す。NCでは、乾燥させた供試体の拡散係数よりも炭酸化させた供試体の拡散係数が低くなった。一方で、NBとNFでは、乾燥よりも炭酸化させた供試体の拡散係数が高くなった。特に、NFはその値の変化が大きく、RH56%において顕著な変化を示した。

3.2 長さ変化

図2に炭酸化による拡散係数の変化が顕著だったRH56%を対象に、RH56%のNC、NFの乾燥収縮ひずみ・炭酸化収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥収縮ひずみはNCの方が大きくなっているが、炭酸化時のひずみはNFの方が大きくなっている。

図3にNC、NB、NFの炭酸化収縮ひずみの経時変化を示す。NFでは、NC、NBに比べると炭酸化収縮ひずみの値が大きくなった。図1よりNFの酸素拡散係数はNC、NBに比べると値が大きく、これらは、炭酸化収縮により、NFの固相の体積変化が大きく、内部の空隙構造の粗大化、または微細なひび割れの発生

キーワード 炭酸化、炭酸化収縮ひずみ、酸素拡散係数、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ

〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地 琉球大学工学部 E-mail : e175517@eve.u-ryukyu.ac.jp

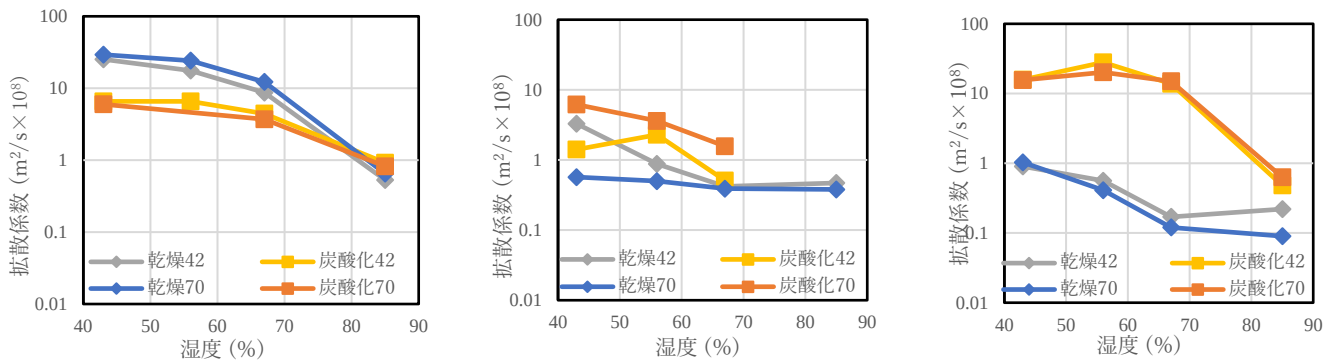


図1 湿度と拡散係数の関係 (左 NC 中央 NB 右 NF)

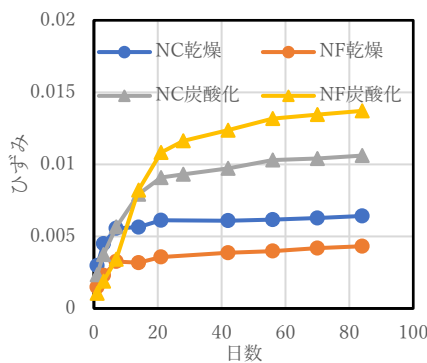


図2 乾燥・炭酸化ひずみ(RH56%)

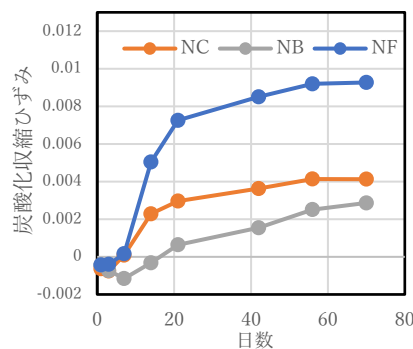


図3 炭酸化収縮ひずみ(RH56%)

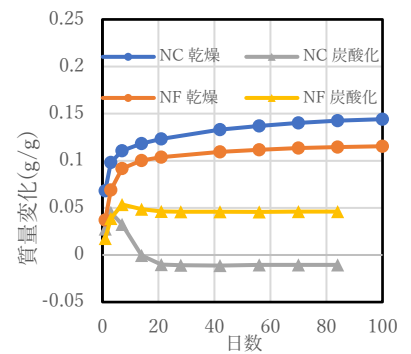


図4 乾燥・炭酸化時の質量変化(RH56%)

によるものと考えられる²⁾。

3.3 乾燥および炭酸化時の質量変化

図4に、RH56%で乾燥・炭酸化させたNC、NFの質量変化を示す。NCの乾燥供試体は、NFよりも質量変化が大きい。乾燥によって水分が逸散しており、逸散量の少ないNFは空隙量がNCよりも少ないものと考えられる。炭酸化供試体のNCは、初期の質量より増えている。一方でNFでは、NCに比べて質量増加はわずかであった。これら結果から、NCは炭酸化することにより、炭酸カルシウムの量が増えることで内部の空隙構造が緻密になっていると考えられ、その結果、酸素の拡散係数が炭酸化により低下したものと考えられる³⁾。

4. まとめ

本研究では、炭酸化による物質移動性状と体積変化の関係についての検討を行った。その結果、炭酸化により、NFは、酸素の拡散係数が最も大きな値を示し、炭酸化収縮ひずみでも最も大きい値を示した。また、NCは炭酸化により初期質量が増加した。炭酸カルシ

ウムの緻密化が酸素の拡散係数を低下させた原因と推察された。

参考文献

- 1) 白川敏夫 他：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの炭酸化と気体拡散性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，NO.1，pp.665-670，2019.7
- 2) 白川敏夫 他：モルタルコンクリートの気体有効拡散係数への炭酸化の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006
- 3) 須田裕哉 他：高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストの炭酸化による気体の拡散性状の変化と相組成および空隙構造との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.125-130，2020

長期暴露後のモルタル供試体の物質移動性状の変化に関する研究

琉球大学 ○稲福亮、須田裕哉、富山潤

1. 背景および目的

鉄筋コンクリート内部への酸素や塩化物イオン、水分などの移動は鉄筋腐食の要因となることから、これら物質の移動性状を適切に把握することは重要である。コンクリート構造物は長期的に供用される中で、乾湿繰返し作用や大気中の CO_2 との反応で炭酸化が生じる。また、乾湿繰返しや炭酸化で生じたコンクリート内部の水和物に変質が生じ、その微細な構造が変化することで空隙構造も変化する。1) しかし、長期暴露されたコンクリートのこれらの性状変化は明確ではない。

本研究では長期暴露したセメント硬化体の酸素と塩化物イオンの拡散実験および水分浸透実験を行い、水合物と空隙構造の観点から暴露によって変質の生じたモルタル供試体の物質移動性状の変化を調査することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 材料・配合および暴露条件

材料は普通ポルトランドセメント、混和材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュを使用し、水セメント比は 50%とした。高炉スラグ微粉末は普通ポルトランドセメントに 50%置換し、フライアッシュは 30%置換した。練混ぜ水にはイオン交換水を使用した。供試体は、セメントペーストとモルタルとし、モルタルの骨材容積比は 0.48 とした。3 分間の練混ぜ後、 $3 \times 4 \times 0.5$ cm のアクリル型枠へ打設した。供試体は材齢 1 日で脱型し、水和反応を十分進行させるため 40°C 、60 日間飽和水酸化カルシウム溶液中で水中養生を行った。モルタルは、酸素拡散試験、水分浸透実験、塩化物イオン拡散試験で使用し、ペーストは熱重量分析で使用した。沖縄県の雨掛かりのない環境で供試体を暴露しており、本研究では 6 ヶ月と 12 カ月の結果を使用する。

2.2 酸素拡散試験

24 時間 50°C で真空乾燥した供試体を挟んだ両側のセルに酸素ガスと窒素ガスを等圧等流量で流し、窒素ガス側セルの酸素濃度変化が一定値に収束した時点の濃度より、酸素の拡散係数を求めた。

2.3 水分浸透試験

供試体 1 面からの浸透とするため、酸素拡散試験後の供試体に、アルミテープで 5 面をシールした。シールした供試体をイオン交換水に最大 24 時間浸漬させ、経時的に質量変化を測定し、吸水係数を求めた。

2.4 塩分イオン拡散試験

供試体をイオン交換水に浸漬させ、3 時間真空飽和を行い、その後 24 時間大気圧に保持した。吸水後の供試体を拡散セルに設置した。セル容器内にはイオン交換水と NaCl 水溶液 (0.5mol/L) をそれぞれ 200ml ずつ満たした。経時的に供試体を通じたイオン交換水側の溶液を採取し、塩化物イオンの濃度勾配から拡散係数を求めた。

2.5 熱重量分析

熱重量分析によって炭酸カルシウム量を測定した。供試体を $90\mu\text{m}$ 以下に粉碎し、 110°C -3h 乾燥させ測定試料とした。試料は熱重量分析装置にて 1000°C まで強熱し、 $550 \sim 800^\circ\text{C}$ の減量値から炭酸カルシウムをそれぞれ測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 酸素拡散実験および水分浸透実験の結果

図 1 に普通ポルトランドセメント (NC)、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を置換した供試体 (NB)、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換した供試体 (NF) の暴露期間による酸素拡散係数の変化を示す。NC、NF は暴露期間が進行するほど酸素の拡散係数が増

キーワード 物質移動性状 炭酸化 長期暴露 空隙構造 酸素拡散試験

連絡先：〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部 E-mail: e175502@eve.u-ryukyu.ac.jp

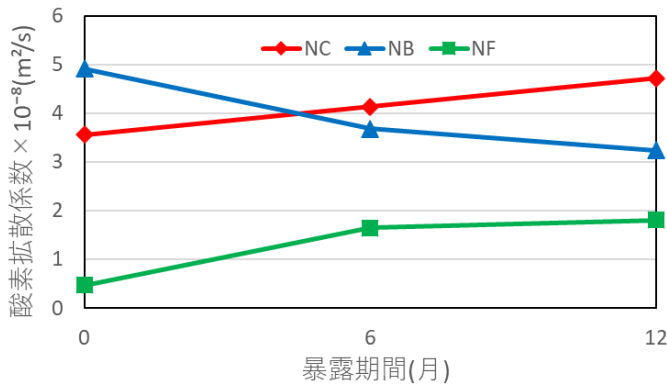


図 1. 暴露期間と酸素拡散係数

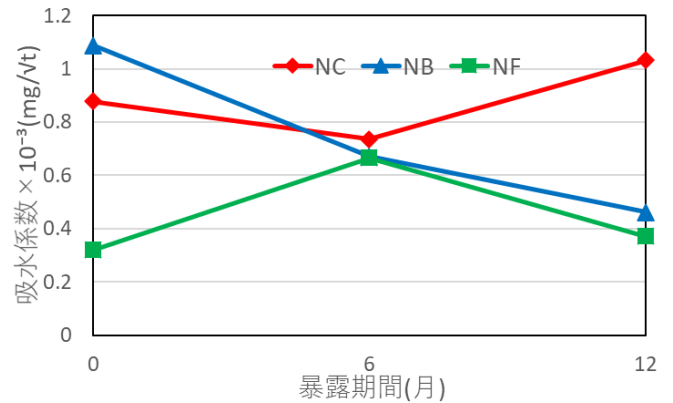


図 2. 暴露期間と吸水係数

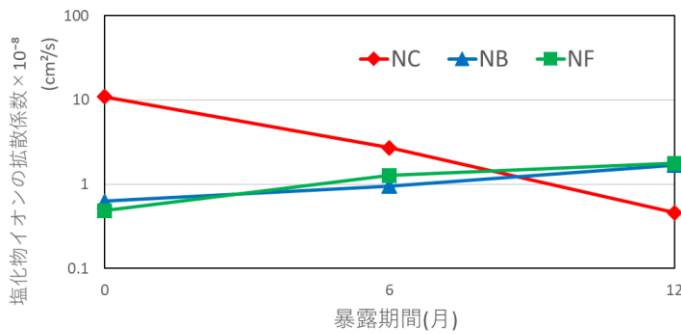


図 3. 暴露期間と塩化物イオンの拡散係数

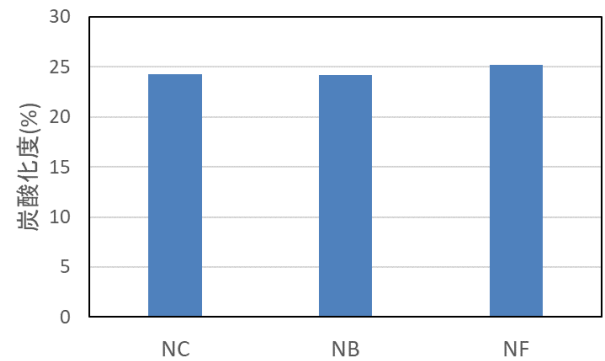


図 4. 1 年暴露したセメント供試体の炭酸化度

加する傾向を示した。一方で, NB は暴露期間の進行とともに酸素の拡散係数は低下した。

図 2 に暴露期間による吸水係数の変化を示す。NC では, 吸水係数が 6 ヶ月で低下し, 12 カ月で増加した。NB では, 吸水係数が 6 ヶ月, 12 カ月ともに減少する傾向を示した。NF では, 吸水係数が 6 ヶ月で増加し, 12 カ月で減少した。

3.2 塩化物イオンの拡散試験の結果

図 3 に, 暴露期間による塩化物イオン拡散試験の変化を示す。NC の塩化物イオンの拡散係数は暴露期間の進行とともに低下した。一方で, NB, NF の塩化物イオンの拡散係数は暴露期間の進行とともにわずかに増加する傾向を示した。

3.3 炭酸化度の評価の結果

図 4 に NC, NB, NF の炭酸化度を示す。炭酸化度は暴露供試体の全 CaO 量に対する CaCO₃中の CaO 量の値である。炭酸化度はいずれの供試体で 25%程度であった。暴露 1 年での物質移動性状の変化がわずかであり, これは, 本期間内で炭酸化が大きく進行していないことが考えられ, 長期的に炭酸化することで, 硬化体品質が変化

することも想定されるため引き続き検討を行う。

まとめ

本研究では, 長期暴露によるモルタル供試体の物質移動性状の変化について調査した。その結果長期暴露による炭酸化などの影響によって物質移動性状が変化し, その影響は材料により変化することが示唆された。

参考文献

- 1) 中村暢, 濱幸雄, 谷口円: 乾燥によるモルタル直径 40~2000nm の細孔量変化と温度時間席の関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.713, pp.981-989, 2015.6

沖縄県の暑中期におけるコンクリート温度が及ぼす影響に関する実験

沖縄県生コンクリート工業組合 ○村田 旬, 琉球大学 富山 潤

1. はじめに

昨今の地球温暖化による気候変動の影響を受けて気温の上昇が見られ、一部地域においては最高温度が40℃超を記録するなど、全国的に夏場のコンクリート温度対策は喫緊の課題となっている。

沖縄県内の生コン工場においては、他府県より1ヶ月ほど早めの5月から暑中コンとして、遅延形の混和剤に切り替えて、基本的な対策をとっている。それ以外に骨材貯蔵設備の上屋の設置、骨材への散水、練り混ぜ水の地下水槽への貯蔵、運搬車ドラムへの散水などの一般的な対策も講じている。しかし、真夏日の一定の時間帯においては、コンクリート温度35℃以下を満足することが難しい場合も想定される。

そこで、本実験では、暑中期においてコンクリート温度が35℃を超えた場合のフレッシュ性状および圧縮強度への影響を実機実験によって確認する。

2. 実施地区および時期の選定

実施地区として地域性を考慮し、本島中南部、本島北部、石垣、宮古の4地区を選定した。実施時期については、外気温が最も上がると想定される7月～8月とした。その詳細を表1に示す。なお、宮古地区においては実施直前にコロナウィルス感染拡大の影響により本年度の実験中止を余儀なくされた。

表1 実施地区および時期

地 区	実 施 日
中南部地区	令和2年7月3日、4日
北 部 地 区	令和2年7月8日、10日
石 垣 地 区	令和2年7月16日、8月20日
宮 古 地 区	コロナウィルスの影響により中止

3. 使用材料

本実験で使用する材料の品質特性を表2に示す。

表2 使用材料

材料名	記号	種類・産地	密 度	実積率
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	-
練り混ぜ水	W	工業用水・地下水・湖沼水	1.00	-
細骨材	海 砂	S ₁ 沖縄本島新川沖産	2.57～2.60	-
	砕 砂	S ₂ 沖縄本島本部半島産	2.65	-
	砕 砂	S ₃ 石垣島産	2.95	-
粗骨材（砕石2005）	G ₁	沖縄本島本部半島産	2.69～2.70	59.0～60.0
	G ₂	石垣島産	2.69	59.2
混和剤	AD ₁	AE源水剤（遅延形）	1.05～1.08	-
	AD ₂	高性能AE源水剤（遅延形）	1.08～1.09	-
フライアッシュ	FA	フライアッシュⅡ種	2.24～2.27	-

4. 配合選定

JIS 規格の中から出荷量の多い呼び強度 30、スランプについては、国土交通省直轄工事で標準とされる12cmとして実機実験を実施する生コン工場の配合を用いた。配合の詳細を表3に示す。

表3 配合

30-12-20N AE減水剤（遅延形）											
地 区	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)								
			W	C	FA	S ₁	S ₂	S ₃	G ₁	G ₂	AD ₁
中南部	46.0	45.6	171	372	-	400	400	-	977	-	3.31(0.90%)
北 部	47.5	45.8	168	354	-	278	533	-	988	-	2.66(0.75%)
石 垣	44.5	45.7	176	396	-	387	-	396	-	954	4.36(1.10%)
フライアッシュコンクリート 30-12-20N AE減水剤（遅延形）											
地 区	W/B (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)								
			W	C	FA	S ₁	S ₂	S ₃	G ₁	G ₂	AD ₁
中南部	46.0	46.9	171	298	74	421	421	-	977	-	3.31(0.90%)
北 部	47.5	47.0	168	284	70	293	559	-	988	-	2.66(0.75%)
石 垣	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5. 実験概要

表4に示す条件①、条件②、条件③のフレッシュ性状確認および条件④を含めた強度試験を実施する。経時変化試験は、アジテータ車にて行い、練り上がり直後、30分後、60分後、90分後とする。なお、アジテータ車での運搬を想定し、練り上がり30分後の目標値をスランプ12+2.5cm、空気量4.5+1.5%の範囲に設定する。ただし、フライアッシュコンクリートは空気量2.0%で設計されているため、目標値は設けない。試験体は、練り上がり30分後の採取とする。採取後から3日強度までは、20±3℃環境と20±10℃環境に分けて保管し、その後、全ての試験体を脱型する。脱型後から試験材齢まで20±3℃の水中養生とする。中南部地区においては模擬構造体を作製し(1m×1m×1m)試験材齢に合わせてコアを採取する(表4条件④)。

表4 実験概要

条件	配合	コンクリート温度	混和材	混和剤	スランプ・空気量・温度				試験体採取・材齢				
					0分	30分	60分	90分	3日	7日	28日	56日	91日
条件①	30-12-20N	35℃以下	-	AE減水剤（遅延形）	0	0	0	0	0	0	0	0	0
条件②			-	AE減水剤（遅延形）	0	0	0	0	0	0	0	0	0
条件③		35℃超え	フライアッシュ	AE減水剤（遅延形）	0	0	0	0	0	0	0	0	0
条件④				条件①～条件③の模擬構造体よりコア採取	-	-	-	-	-	-	-	-	-

キーワード 暑中コンクリート, コンクリート温度, フレッシュ性状, 圧縮強度
連絡先 〒900-0001 沖縄県那覇市港町2丁目14番1号

6. 実験結果

各地区における実験結果の詳細を表 5～表 7 に示す。

表 5 実験結果(中南部地区)

中南部地区	設 定	項 目	経過時間			
			0分後	30分後	60分後	90分後
30-12-20N AE減水剤 (遅延形)	35℃以下想定 (2020/7/3)	外気温 (°C)	29.0	31.2	30.2	30.6
		コンクリート温度 (°C)	33.0	33.6	33.8	34.4
		スランプ (cm)	14.0	13.0	10.5	7.5
	35℃超え想定 (2020/7/4)	外気温 (°C)	30.0	30.6	30.1	30.7
		コンクリート温度 (°C)	35.9	36.4	35.9	36.5
		スランプ (cm)	13.5	13.5	12.0	8.5
FAコン 30-12-20N AE減水剤 (遅延形)	35℃超え想定 (2020/7/4)	空気量 (%)	5.0	4.9	5.2	4.3
		外気温 (°C)	30.0	30.6	29.8	28.9
		コンクリート温度 (°C)	34.6	35.1	35.4	35.6
		スランプ (cm)	14.5	12.5	11.5	9.5
		空気量 (%)	2.1	2.4	2.5	2.4

表 6 実験結果(北部地区)

北部地区	設 定	項 目	経過時間			
			0分後	30分後	60分後	90分後
30-12-20N AE減水剤 (遅延形)	35℃以下想定 (2020/7/8)	外気温 (°C)	30.6	31.6	31.3	32.3
		コンクリート温度 (°C)	31.3	31.8	32.4	32.9
		スランプ (cm)	17.0	14.5	14.0	13.0
	35℃超え想定 (2020/7/8)	空気量 (%)	4.1	3.3	3.9	4.0
		外気温 (°C)	31.6	32.4	31.0	29.1
		コンクリート温度 (°C)	35.5	36.2	36.2	36.3
FAコン 30-12-20N AE減水剤 (遅延形)	35℃超え想定 (2020/7/10)	スランプ (cm)	14.0	14.5	13.5	12.5
		空気量 (%)	3.7	3.5	3.7	3.7
		外気温 (°C)	31.5	31.4	31.6	31.8
		コンクリート温度 (°C)	35.8	36.1	36.1	36.6
		スランプ (cm)	15.5	14.5	14.5	14.0
		空気量 (%)	2.0	1.8	1.6	1.7

表 7 実験結果(石垣地区)

石垣地区	設 定	項 目	経過時間			
			0分後	30分後	60分後	90分後
30-12-20N AE減水剤 (遅延形)	35℃以下想定 (2020/7/16)	外気温 (°C)	31.0	31.5	30.8	30.4
		コンクリート温度 (°C)	33.6	34.2	34.8	35.0
		スランプ (cm)	13.0	12.0	11.5	10.0
	35℃超え想定 (2020/8/20)	空気量 (%)	3.8	3.5	3.8	3.6
		外気温 (°C)	33.0	33.2	29.0	29.2
		コンクリート温度 (°C)	34.1	34.7	34.7	34.9
FAコン 30-12-20N AE減水剤 (遅延形)	35℃超え想定 (未実施)	スランプ (cm)	15.5	13.5	14.5	12.0
		空気量 (%)	3.6	3.4	3.3	3.3
		外気温 (°C)	-	-	-	-
		コンクリート温度 (°C)	-	-	-	-
		スランプ (cm)	-	-	-	-
		空気量 (%)	-	-	-	-

6.1 コンクリート温度

コンクリート温度測定結果を図-1に示す。中南部地区における最大値は条件①で34.4℃、条件②で36.5℃、条件③で35.6℃であった。北部地区における最大値は条件①で32.9℃、条件②で36.3℃、条件③で36.6℃であった。石垣地区における最大値は条件①で35.0℃、条件②で34.9℃、条件③は未実施であった。全地区において、90分後の測定値が最大となっており、荷卸し時間が長くなるほど、コンクリート温度が上昇する傾向にあるという結果になった。

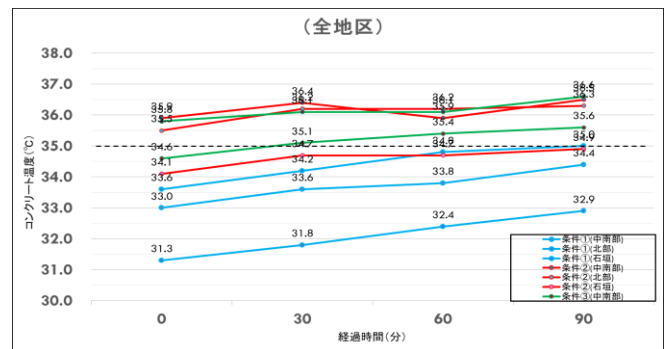
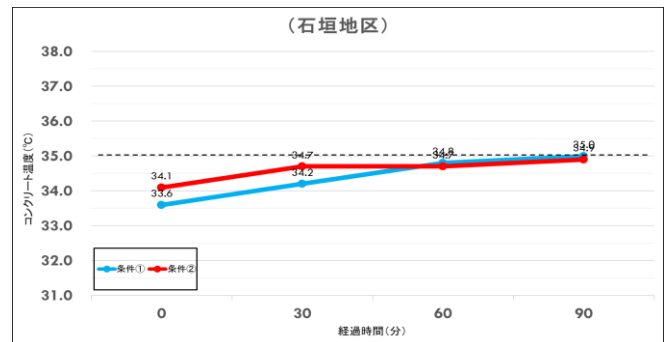
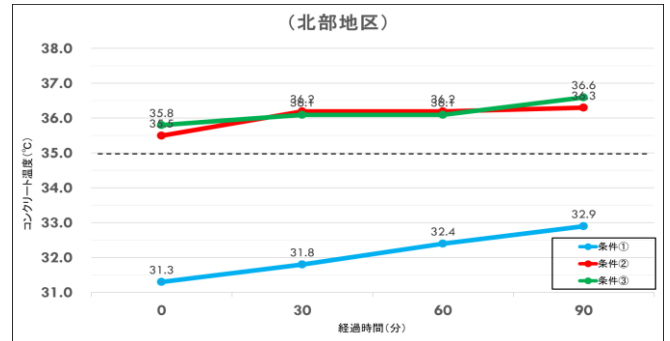
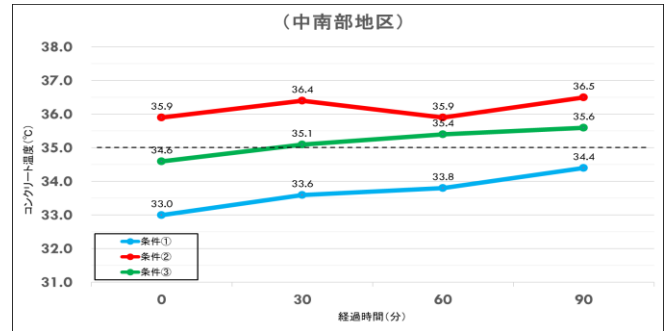


図-1 経時変化試験によるフレッシュ性状 (コンクリート温度)

6.2 スランプ

スランプ試験の結果を図-2に示す。中南部地区におけるスランプロスは、ほぼ同じ傾向であり、コンクリート温度による差はみられなかった。北部地区において、条件①は他の条件に比べコンクリート温度が約3℃低かったが、スランプロスは最も大きくなった。石垣地区において、条件②のコンクリート温度が35℃を超えず、結果として条件①、条件②ともに0分後から90分後までのスランプロスは同じ様な傾向を示した。全体としてスランプロスとコンクリート温度の相関はみられなかった。

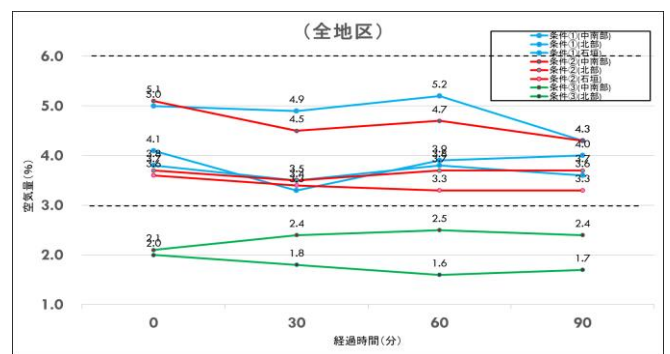
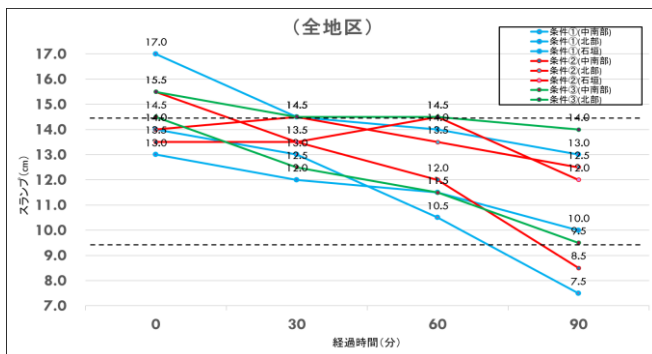
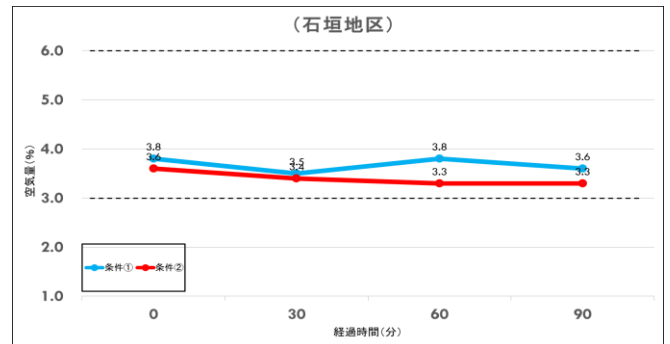
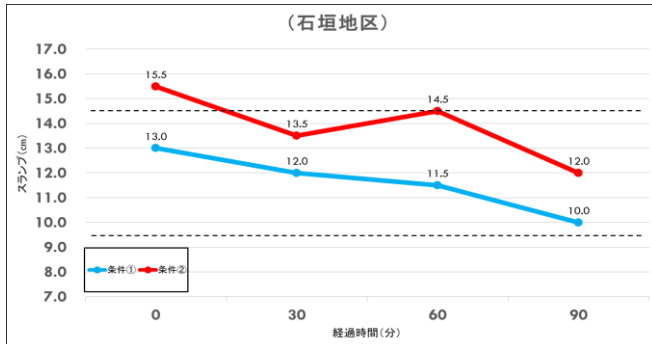
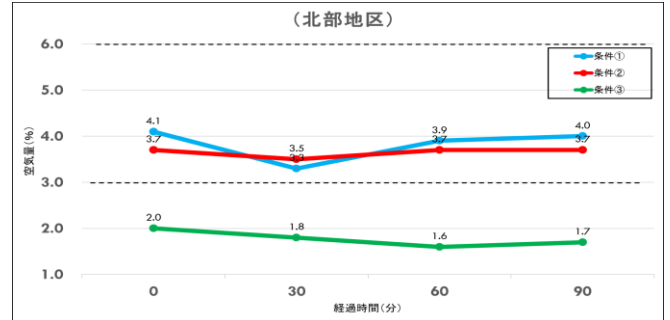
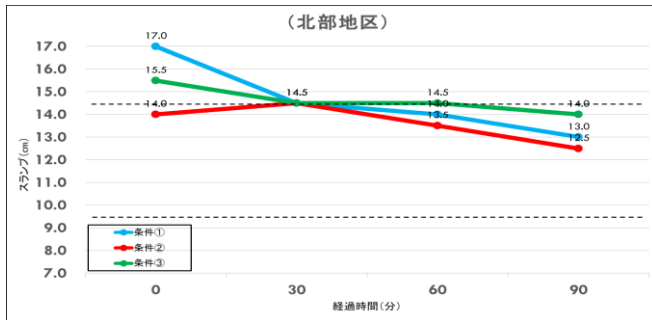
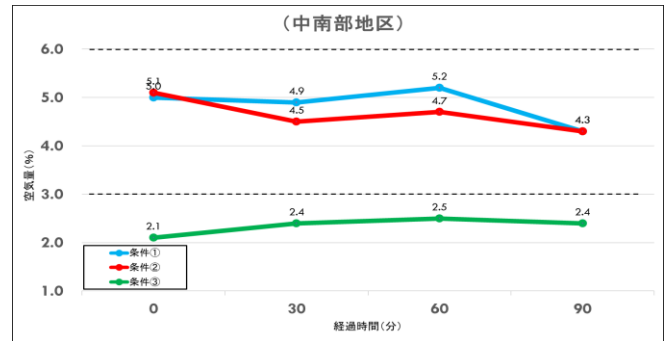
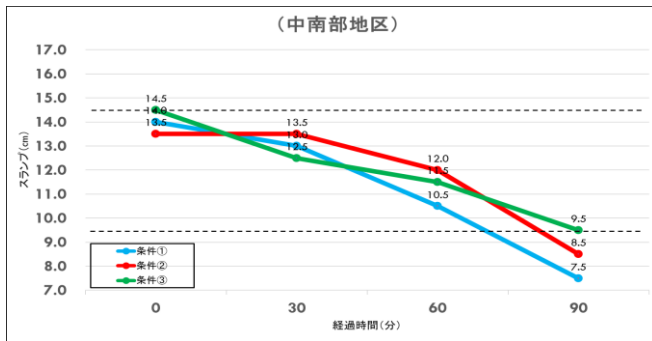


図-2 経時変化試験によるフレッシュ性状（スランプ）

図-3 経時変化試験によるフレッシュ性状（空気量）

6.3 空気量

空気量試験の結果を図-3に示す。中南部地区において、0分後から90分後までの減少量は条件①で0.7%、条件②で0.8%とほぼ同じであり、コンクリート温度による影響はなかった。北部地区において、条件①、条件②ともに0分後から90分後までの減少はなく、コンクリート温度差による影響はなかった。石垣地区において、コンクリート温度がほぼ同じ値であり、減少量も条件①0.2%、条件②0.3%と同じ傾向であった。フライアッシュコンクリートは空気量の設定が2.0%であるため、他の配合との比較は行わない。

6.4 圧縮強度

条件④のコア試験体は模擬構造体上面より採取した(図-4)。圧縮強度試験結果の一覧を表8～表11に示す。各々の試験値に大きな差はなく、全ての条件にて材齢28日で呼び強度を満足した(図-5)。また、採取後から3日強度まで $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 環境で保管した試験体は $20 \pm 10^\circ\text{C}$ 環境で保管した試験体と比較して、材齢3日までの強度の伸びは小さかったが、材齢7日以降で伸びが大きくなり、強度でも上回った。模擬構造体のコア試験体は採取箇所による強度差はなく、他の強度試験結果とも大きな差はみられなかった。

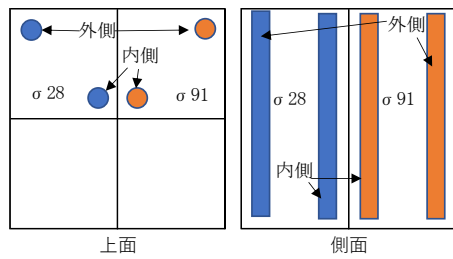


図-4 模擬構造物 (1m×1m×1m)

表 8 圧縮強度試験(中南部地区)

中南部地区	条 件	3日	7日	28日	56日	91日
35℃以下	初期20±10℃養生	27.5	30.8	37.2	40.0	41.2
	初期20±3℃養生	25.8	33.5	42.4	43.5	45.4
35℃超え	初期20±10℃養生	24.6	30.0	37.1	38.2	41.6
	初期20±3℃養生	21.7	30.8	39.4	40.7	45.9
35℃超え(フアイアッシュ)	初期20±10℃養生	19.7	25.0	33.9	40.9	46.3
	初期20±3℃養生	17.4	26.2	36.8	45.3	51.3

表 9 圧縮強度試験(北部地区)

北部地区	条 件	3日	7日	28日	56日	91日
35℃以下	初期20±10℃養生	25.8	29.8	37.1	40.6	44.5
	初期20±3℃養生	21.7	31.1	41.1	46.1	48.8
35℃超え	初期20±10℃養生	27.0	31.3	38.8	42.7	44.3
	初期20±3℃養生	21.7	31.9	41.5	46.1	48.9
35℃超え(フアイアッシュ)	初期20±10℃養生	20.0	24.7	33.8	39.8	46.3
	初期20±3℃養生	18.9	26.2	35.1	42.4	47.4

表 10 圧縮強度試験(石垣地区)

石垣地区	条 件	3日	7日	28日	56日	91日
35℃以下	初期20±10℃養生	26.7	32.8	39.7	43.8	45.6
	初期20±3℃養生	24.4	33.5	41.0	45.9	47.4
35℃超え	初期20±10℃養生	24.0	29.9	36.3	41.1	43.5
	初期20±3℃養生	23.3	32.4	42.0	44.8	49.0
35℃超え(フアイアッシュ)	初期20±10℃養生	-	-	-	-	-
	初期20±3℃養生	-	-	-	-	-

表 11 コア圧縮強度試験(中南部地区)

中南部地区	採取箇所	3日	7日	28日	56日	91日
35℃以下	内 側	-	-	40.0	-	43.1
	外 側	-	-	39.0	-	41.4
35℃超え	内 側	-	-	38.0	-	42.4
	外 側	-	-	37.8	-	39.4
35℃超え(フアイアッシュ)	内 側	-	-	40.3	-	44.3
	外 側	-	-	40.5	-	44.5

7. おわりに

全国各地では、様々な手法で暑中コンクリート温度対策実験が実施されており、実用化に向けた取り組みが行われている。沖縄県は日本の南方に位置する亜熱帯地域であり、他府県との気候が異なるため、独自の暑中コンクリート温度対策をとる必要があると考えられる。地球温暖化による気温の上昇は避けられない問題であり、暑中コンクリート温度対策は大きな課題である。

今後も他府県の事例を参考にしつつ、地域事情を鑑み、独自の暑中コンクリート温度対策実験を計画的に実施し、課題解決に向けて取り組む必要がある。

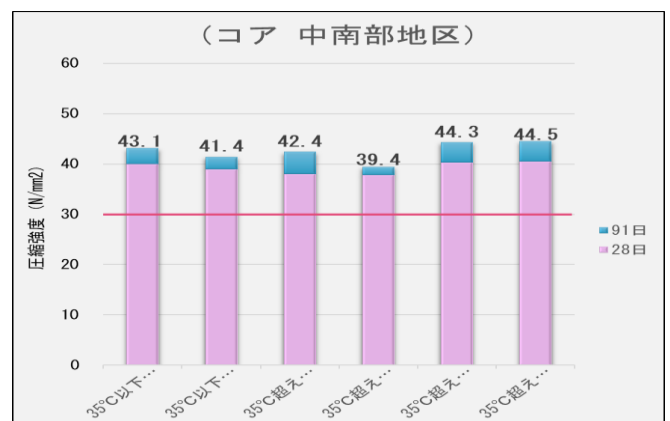
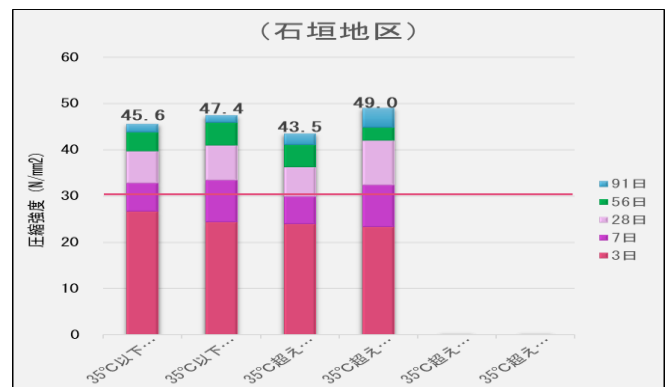
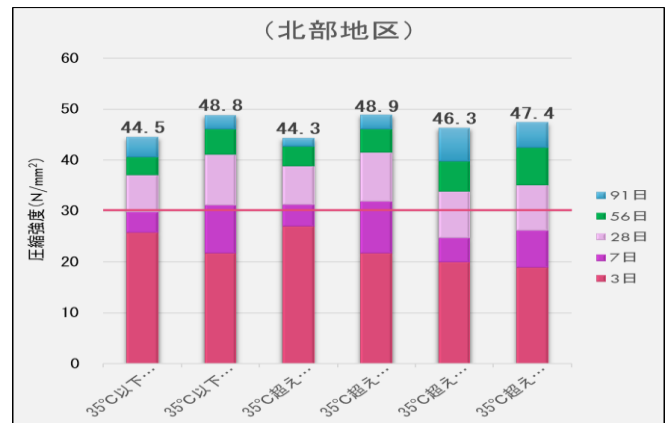
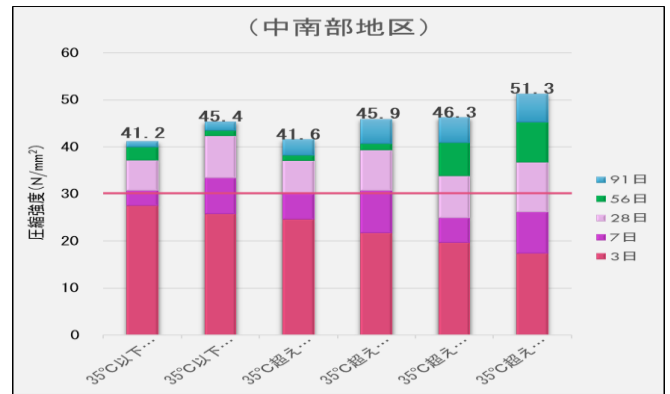


図-5 各地区の圧縮強度試験結果

Session 2 振動・診断

名護東道路数久田 ICにおけるONランプ橋耐風試験設計について

森山 正三¹・下地 涼大²

¹北部国道事務所 工務課 課長 (〒905-0019 沖縄県名護市大北4-28-34)

²北部国道事務所 工務課 係員 (〒905-0019 沖縄県名護市大北4-28-34)

本橋は、橋長 350m の鋼 4 径間連続鋼床版箱桁橋である (最大支間長=110m)。またランプ橋であることから幅員が狭く、供用中の風の作用により有害な振動現象の発生が懸念された。そこで本検討では、桁断面を逆台形の閉断面構造で計画した上で、道路橋耐風設計便覧に基づく動的耐風設計を実施し、本橋の耐風安定性が良好であることを見出した：すなわち、①照査風速以下でギャロッピング、渦励振とともに発生しない；②風速の上昇に伴って発生するガスト応答の最大振幅が有害な大きさではないことを風洞試験で明らかにした。よって本橋では、剥離干渉法による逆台形閉断面桁を採用することで、耐風安定性のみならず耐塩害性にも優れる橋梁を計画した。

キーワード 鋼床版箱桁橋、動的耐風設計、ギャロッピング、渦励振、剥離干渉法

1. 概要

本橋は、図-1 にそれぞれ示すように、橋長 350m の鋼 4 径間連続鋼床版箱桁橋であり、名護東道路の数久田 IC (仮称) に計画されている ON ランプ橋である。交差条件等のコントロールにより橋脚設置位置が限定されるため支間長が長く (最大支間長 $l_{max}=110m$)、ランプ橋であることから幅員が狭い (有効幅員 $B_e=6.75m$) 橋梁である。

本橋のように、断面辺長比 (桁幅 B /桁高 d) が小さい鋼箱桁を有する橋梁では、供用中の風の作用により有害な振動現象が発生する可能性がある。更に、図-2 に示すように、本橋の架橋地点が名護市南の海岸線であり、海側からの風が背後の地形の影響で大きな傾斜角の吹上げ風となり、本橋の耐風性に影響を及ぼすことが想定される。

そこで本検討では、道路橋耐風設計便覧¹⁾ (以下、便覧と称す) に基づく動的耐風設計を実施し、本橋の耐風安定

性について検証することを目的としている。特に本検証では、主として周辺地形の影響も考慮した全橋模型による風洞試験により、本橋の耐風安定性を詳細に調べた。

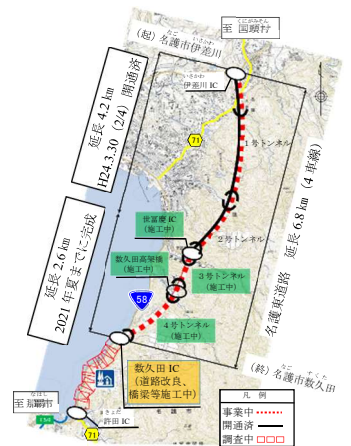


図-2 架橋地周辺の状況

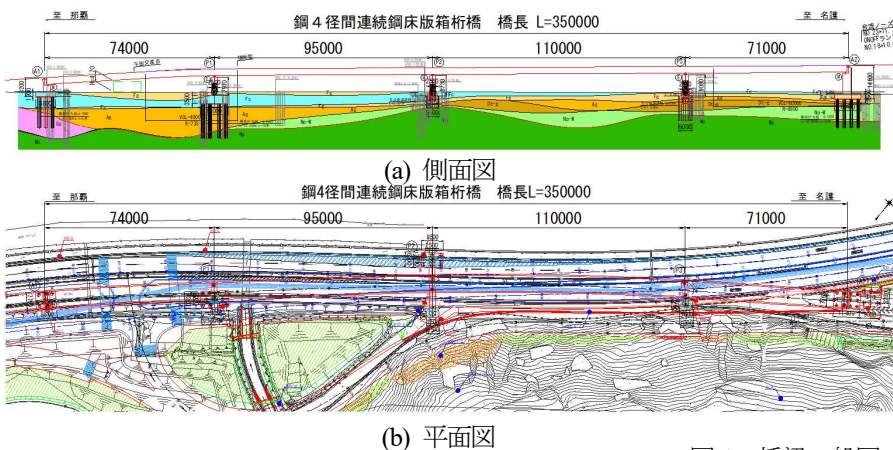
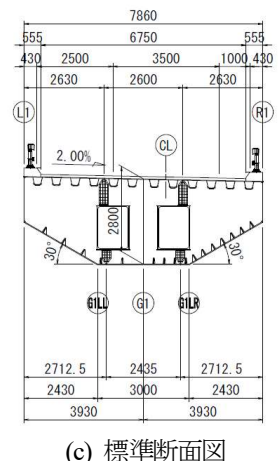


図-1 橋梁一般図



(c) 標準断面図

3. 便覧推定式による机上検討

(1) 照査対象とする振動現象

便覧では、振動発現風速の観点から、耐風性照査が必要と考えられる振動現象が橋種・構造形式ごとに示されており、本橋の場合、鉛直たわみ振動に対する発散振動および渦励振について検討が必要である。

(2) 桁の振動諸元

固有値解析の結果、本橋で対象となる鉛直たわみに対する低次モードは、図-3 に示す通りであり、最低次振動モードは鉛直たわみの逆対称モード（振動数 $f_h=0.72\text{Hz}$ ）である。

(3) 設計条件

本橋の耐風設計に関する設計条件をとりまとめて表-x に示す。設計基準風速 U_d は、本架橋地点の条件において 52.5m/s であり、ギャロッピング照査風速 U_{rg} および渦励振の照査風速 U_{rvh} は、それぞれ以下の通り算出される。

$$U_{rg} = 1.2U_d = 1.2 \times 52.5 = 63.0 \text{ m/s} \quad (1)$$

$$U_{rvh} = U_d = 52.5 \text{ m/s} \quad (2)$$

また渦励振の許容振幅 h_a は、次式により算出される。

$$h_a = 0.04/f_h = 0.04/0.72 = 0.056 \text{ m} \quad (3)$$

ここに、 f_h ：鉛直たわみ振動数 Hz

(4) 机上検討

a) ギャロッピングに対する照査

架橋地点の風の乱れ強さ $I_u < 0.15$ 、桁の断面辺長比 $B/d < 5$ （ここに、 B ：桁幅、 d ：有効高）の鋼箱桁を有する橋の場合には、ギャロッピングに対する耐風性の検討を行う必要がある。本橋の場合、 $I_u=0.14 < 0.15$ 、 $B/d=2.47 < 5$ であるため、ギャロッピングに対する耐風性の検討が必要である。鋼箱桁橋のギャロッピング発現風速 U_{cg} は、次式により表され、本橋の場合 $U_{cg} < U_{rg}$ のため風洞試験等による詳細検討が必要となる。

$$U_{cg} = 4f_h \cdot B = 4 \times 0.72 \times 7.86 = 22.7 \text{ m/s} \quad (4)$$

b) 渦励振に対する照査

渦励振に対しては、発現風速 $U_{cvh} > U_{rvh}$ あるいは発現振幅 $h_c < h_a$ となることを照査する。本橋の場合、以下に示す通り、 $U_{cvh} < U_{rvh}$ かつ $h_c < h_a$ のため、風洞試験による詳細検討が必要となる。

$$U_{cvh} = 2f_h \cdot B = 2 \times 0.72 \times 7.86 = 11.3 \text{ m/s} \quad (5)$$

鉛直たわみ 逆対称 1 次
 $f=0.72\text{Hz}$

(a) 鉛直たわみ 1 次モード

鉛直たわみ 対称 1 次
 $f=1.04\text{Hz}$

(b) 鉛直たわみ 2 次モード

鉛直たわみ 逆対称 2 次
 $f=0.51\text{Hz}$

(c) 鉛直たわみ 3 次モード

鉛直たわみ 対称 2 次
 $f=1.60\text{Hz}$

(d) 鉛直たわみ 4 次モード

図-3 桁の鉛直たわみに関する低次モード

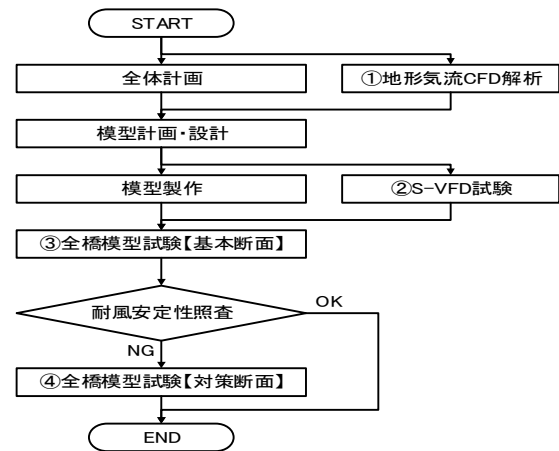


図-4 風洞試験実施フロー

$$h_c = 0.065(B/d)^{-1} \cdot \rho B^3 \cdot E_{th} / (m \delta_h) \\ = 0.065 \times 2.47^{-1} \times 1.23 \times 7.86^3 \\ \times 0.5 / (6710 \times 0.02) = 0.089 \text{ m} \quad (6)$$

ここに、 ρ ：空気密度 (1.23 kg/m^3)

E_{th} ：振動振幅の低減係数（本橋の場合、0.5）

m ：橋の単位長さあたり質量 kg/m

δ_h ：構造減衰 (0.02)

4. 風洞試験

(1) 実施方針

架橋地周辺の地形条件が極めて特殊であることから、周辺地形を模型で再現し、大型風洞設備を用いた全橋模型試験を実施した。また地形の再現範囲の妥当性確認のため、事前に数値シミュレーション（CFD 解析）を実施した。さらに、全橋模型を用いた大型風洞試験は多大な費用と時間を要するため、事前に小型風洞を用いた部分模型試験を実施し、検討ケースの削減を図った。風洞試験実施フローを図-4 に示す。

(2) 地形気流 CFD 解析

a) 検討方針

本試験は、架橋位置の周辺地形の影響を考慮するため、周辺地形を再現した地形模型の中に橋梁模型を設置し、現地の風環境を再現した中で橋梁の振動応答を確認する。したがって、架橋地の風況を風洞試験で精度良く再現することを目的として、事前に気流解析を実施し、地形模型の再現範囲・再現方法を決定した。

気流解析には、水域ネットワーク社の定常 3 次元気流解析ソフト MASCOT を使用し、地形データは国土地理院発行の数値地図 10m メッシュを使用した。なお本解析では、遠方の地形も含めた広域解析と模型再現範囲に絞った狭域解析の結果の対比から風洞試験時の地形模型再現範囲の妥当性を確認する。架橋位置周辺で、特徴的な地形は図-2 に示す、北東約 4.5km の位置にある名護岳（標高 345m）、南東約 3km の位置にある久志岳（標高 335m）である。そのため、広域解析の再現範囲はこれらの地形を含むように設定した。

b) 解析ケース

地形気流 CFD 解析では、周辺地形の影響により、架橋位置の風向と上流の風向が異なる可能性を考慮し、真北を $\theta=0^\circ$ として 22.5° ピッチで 16 方位の解析を実施した。解析結果より、風向の偏角を評価することで、架橋位置で海側風向、陸側風向となる上流の風向を調査した。

広域地形の解析範囲は、架橋位置を中心に風上側 7.2km、風下側 2.4km、左右 2.4km の範囲とした。また狭域解析は、風洞測定部の大きさ（幅 6.0m）と模型縮尺から、模型再現範囲となる架橋位置を中心に 480m 四方とした。

c) 解析結果①：試験対象風向の評価

橋梁位置で山風と海風の方角は、おおよそ $\theta=130^\circ$ および 310° である。図-5 は、広域解析における代表位置での風向 θ を縦軸にとり、解析で入力した流入風向 θ_0 との関係を表したものである。図中黒線で表す線は $\theta=\theta_0$ となる基準線を示すものであり、この線から外れている場合は、評価位置での風向が解析の流入風向から変化していることを示している。

海風（図中青枠）では、 θ と θ_0 に差異はなく、流入風向と橋梁位置で観測される風向がほぼ同じであることを示している。一方、山風（図中赤枠）は、風向変化が比較的大きいことがわかる。この要因としては、対象橋梁近傍の風上に標高変化が大きい地形が存在し、その剥離領域（逆流を伴う複雑流れ）が対象橋梁を巻き込む風下まで存在していることが考えられる。したがって対象橋梁の全区間（A1～A2）で橋軸直交風が作用する $\theta=112.5^\circ$ および 135° を山側風向として評価した。

以上より、対象橋梁位置にて橋軸直角風向に近い風向となる θ は、海風： $292.5, 315, 337.5^\circ$ および山風： $112.5, 135^\circ$ の 5 風向となる。

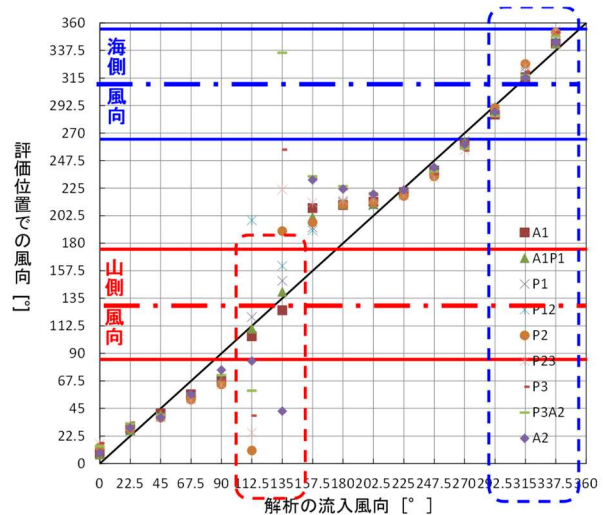
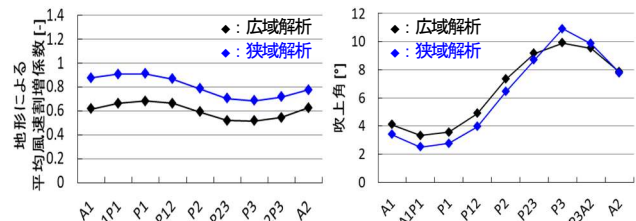
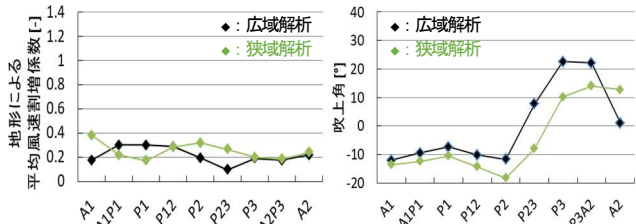


図-5 代表位置の風向 θ と入力風向 θ_0 の関係（広域解析）



(a) 海風： $\theta_0=315^\circ$



(b) 山風： $\theta_0=135^\circ$

図-6 広域・狭域解析における結果の対比

d) 解析結果②：実験での地形再現領域の妥当性評価

次に、ピックアップした 5 つの流入風向に対し広域解析と狭域解析の結果を比較し、下記項目について評価することで、風洞実験の模型再現範囲の妥当性および風洞試験の対象風向を評価した。すなわち、1 つ目は「平均風速割増係数」であり、平坦地形（地形がない状態）と比べた評価位置での風速の増速率である。2 つ目は「吹上角」であり、水平方向を 0° とし、橋梁に対して吹上となる角度を正とする角度である。代表として、 $\theta_0=315^\circ$ （海風）および 135° （山風）における広域解析と狭域解析の結果を対比したものを図-6 に示す。

海風では、平均風速割増係数に関して、狭域解析の値は広域解析より 1 割程度大きくなるものの耐風性の観点からは安全側の評価（模型試験では、実際の地形による風速減速の効果を小さく見積もること）となる。また、狭域解析の結果は、吹上角においては広域解析の結果とほぼ一致しており、架橋位置の吹上の影響を再現できている。

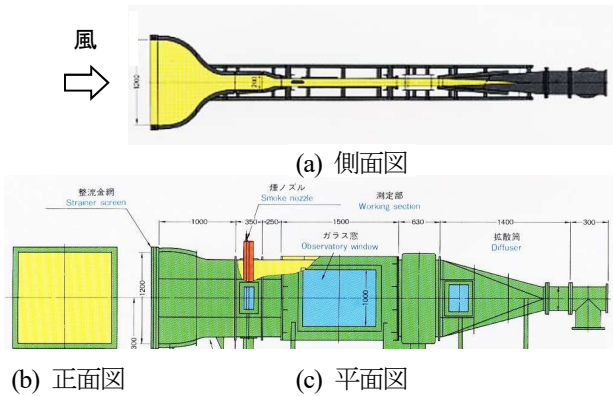


図-6 小型風洞試験に使用した S-VFD 装置

山風では、上流地形の剥離域に入り、地形による平均風速割増係数が小さく流入風速の4割以下になる可能性が示された。狭域解析と広域解析の結果は、上流地形の剥離域に入ると考えられる領域（吹上角が大きくなる領域）では異なる傾向にあるが、数値解析では詳細な評価は難しい。ただし、山陰に入り流速が大幅低減する特性や斜面を吹き降ろす気流に関する傾向は捉えることができています。

以上の結果から、耐風設計上問題となる可能性が高いのは海側風向であり、海側風向に関して広域解析の結果と比較すると、狭域解析の平均風速割増係数は安全側の評価、吹上角はほぼ同程度となるため、地形再現範囲に関しては妥当であると判断した。よって、本試験では、架橋位置を中心に480m四方の地形を再現することとする。

(3) 小型風洞 (S-VFD) 試験

a) 使用風洞

三菱重工業(株)所有の S-VFD (Super-Visualized Fluid Dynamics: 超小型風洞を用いた簡易風洞試験) 装置を使用し、気流は一樣流を用いたバネ支持試験を実施した。図-6に S-VFD 装置の概略図を示す。

b) 模型

模型縮尺は、模型と風路の相対寸法から定まる制約条件および試験装置による制約から 1/80 とした。模型は製作可能な範囲で、極力外形形状を相似させた (写真-1)。

c) 試験ケース

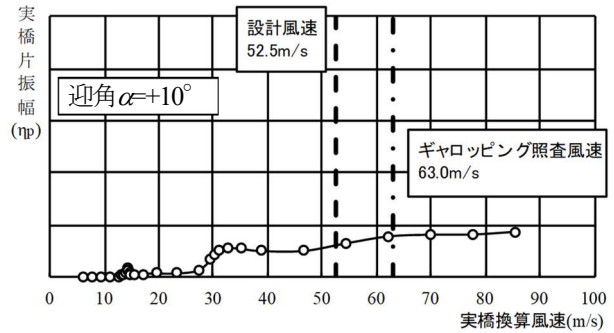
S-VFD 試験ケースは気流解析の結果から、吹上風が当たる海風とし、迎角 $\alpha=0, +3, +7, +10^\circ$ の4種とした。

d) 試験結果

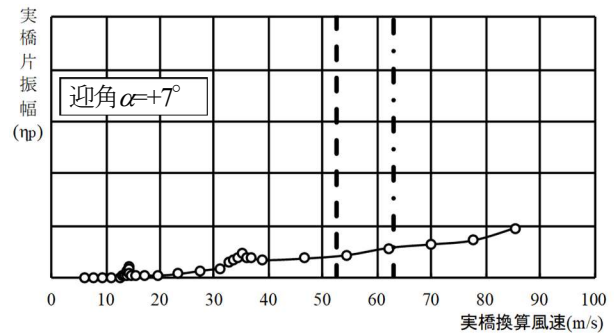
S-VFD の試験結果を図-7に示す。図中縦軸と横軸は、それぞれ実橋方振幅と実橋換算風速を表す。図より、ギャロッピング照査風速 U_{gs} 以下でギャロッピングは発生しないこと、ならびに風速 15m/s 程度で比較的振幅の小さい渦励振が発生するが、照査風速付近の振動振幅に比べて小さいことがわかる。本振動現象に対する安全性については、後述の全橋模型試験により詳細に検証する。



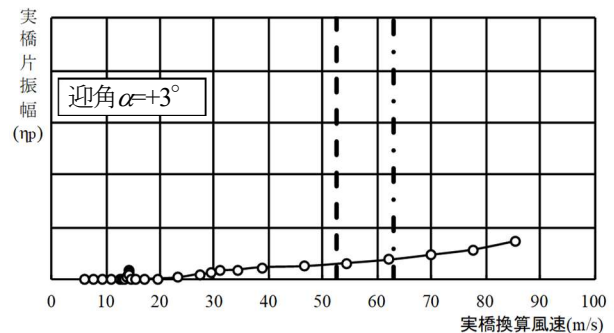
写真-1 小型風洞試験に使用した部分模型



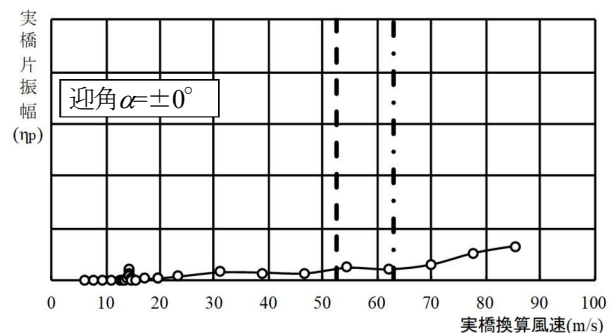
(a) 迎角 $\alpha=+10^\circ$ の結果



(b) 迎角 $\alpha=+7^\circ$ の結果



(c) 迎角 $\alpha=+3^\circ$ の結果



(d) 迎角 $\alpha=\pm 0^\circ$ の結果

図-7 S-VFD 試験結果 (風速-振幅関係)



写真-2 試験に使用した大型汎用風洞設備

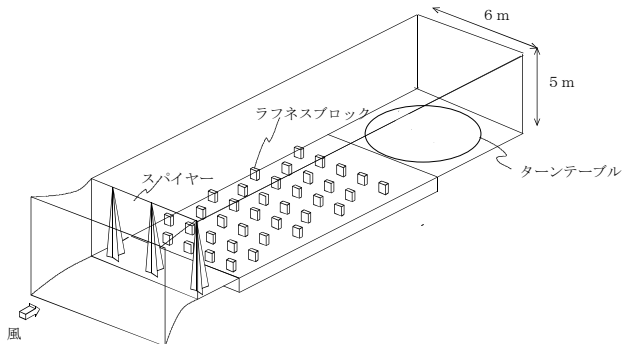


図-8 境界層風洞乱流発生装置

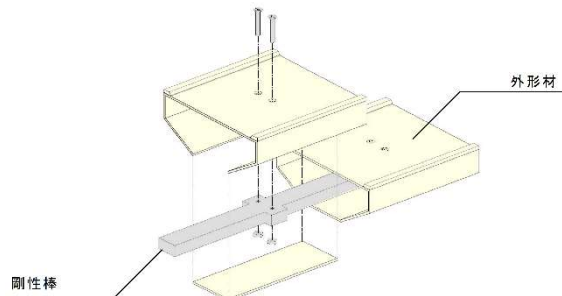


図-9 弾性模型の製作・取付

(4) 全橋模型試験

a) 使用風洞

三菱重工業株式会社所有の大型境界層風洞を用いた(写真-2)。本試験には幅6m×高さ5mの風路を使用し、気流は境界層乱流を用いた。また自然界の風環境を模擬するため、図-8に示すスパイヤーおよびラフネスブロックにより、気流条件(高さ方向の速度勾配および乱れ強さ)を再現した。

b) 模型

模型は、縮尺1/80の全橋模型と地形模型を新規に製作した。橋梁躯体の模型は、図-9に示すように実橋の剛性およびモード形状を再現するための「剛性棒」に、桁形状を再現するための「外形材」を取り付けて製作する方式とした。地形模型は、地形再現部およびその周辺の整形部を製作した。地形再現部は、架橋地点を中心に、国土地理院発行の1/25,000の地形図から製作した。なお、架橋地点周辺の地形造成は、設計図等を反映して製作した。

表-1に検討対象となる鉛直1次～4次モードについて、前述の固有値解析から算出された振動モードと、模型の振動モード(試験値)の一覧を示す。表に示すように、モ

表-1 固有値解析と全橋模型における固有振動モード

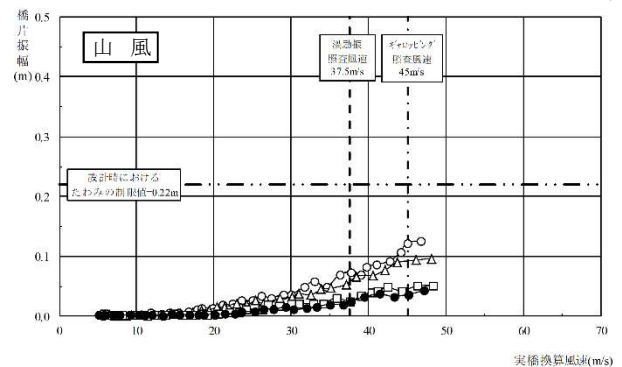
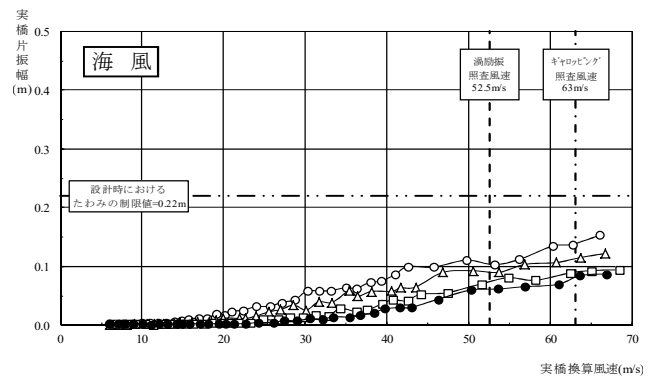
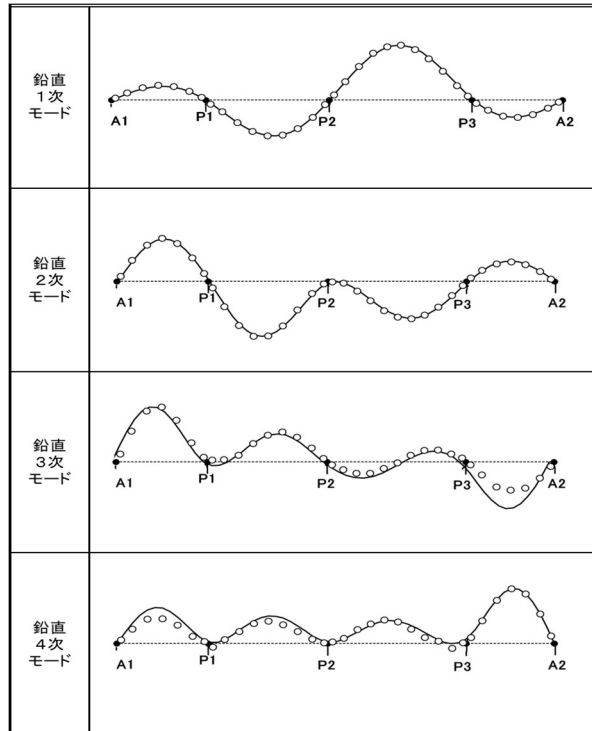


図-10 全橋模型試験結果(風速-振幅関係)

ード形状がよく再現できている。また、等価質量についても良好に再現した。なお、試験風向は前述の地形気流CFD解析結果より、海風、山風ともに橋軸直角風向とした。

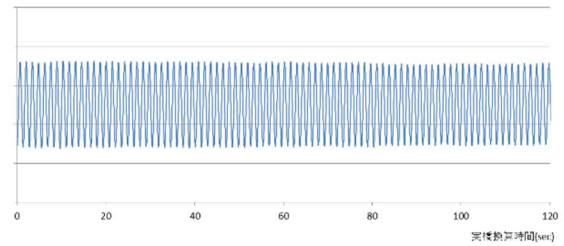
d) 全橋模型試験結果

図-10に試験結果を示す。図-7と同様に、図中縦軸と横軸は、それぞれ実橋換算方振幅ならびに実橋換算風速を

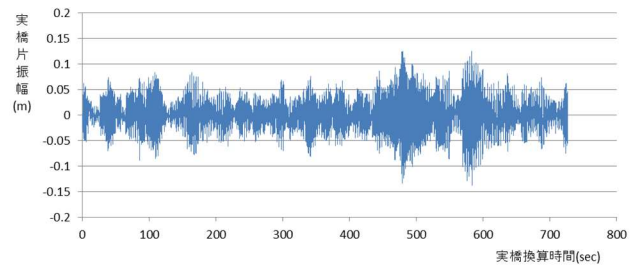
表す。海側風向および陸側風向の試験のいずれにおいても、鉛直1次～鉛直4次の渦励振およびギャロッピングは確認されなかった。S-VFD試験で発生した渦励振が全橋模型試験で発生していない要因としては、地形を考慮したことによる気流の乱れによるものと考えられる。

また、風速の上昇とともに振動振幅が大きくなる現象は、橋梁の空力的な振動ではなく、風の乱れによって強制的に揺さられるガスト応答と考えられる。

図-11にS-VFD試験時の渦励振の振動波形と全橋模型試験時のガスト応答と考えられる振動波形をそれぞれ示す。渦励振は断面周りに発生する渦の周期と構造物の固有周期があったときに発生する共振振動であり、振動波形は同図(a)に示す通り、規則的な波形となる。一方、全橋模型試験で発生している振動の波形は同図(b)に示す通り、不規則な非定常波形であることから、流入する風の乱れにより振動したガスト応答と考えられる。



(a) S-VFD試験における渦励振応答波形



(b) 全橋模型試験におけるガスト応答波形

図-11 S-VFD および全橋模型試験における振動波形

5. まとめおよび今後の課題

本検討では、架橋地特有の地形条件を考慮した大型風洞による全橋模型試験による動的耐風設計を実施した。検討を行うにあたっては、地形の再現範囲の妥当性確認のための地形気流CFD解析ならびに検討ケース削減のための小型風洞による事前の部分模型試験をそれぞれ実施した。本検討結果をとりまとめると、以下の通りである。

(1) 地形気流CFD解析

- ・気流傾斜角（吹上角）は、広域解析と狭域解析でよく整合した。
- ・平均風速割増係数は狭域解析の方が若干高くなる傾向にあったが、安全側の評価である。

(2) 小型風洞（S-VFD）試験

- ・ギャロッピング照査風速以下でギャロッピングは発生しなかった。
- ・風速15m/s程度で渦励振振動が発生するが、照査風速付近の振動振幅より小さかった。

(3) 全橋模型試験

- ・ギャロッピング照査風速以下でギャロッピング、渦励振ともに発生しなかった。
- ・風速の上昇とともに気流の乱れによって強制的に揺さられるガスト応答が発生した。
- ・ガスト応答の最大振幅は、海風の鉛直1次振動で、照査風速付近で約15cmであり、設計時における活荷重た

わみの制限値に比べて小さく、構造上問題とならない。

以上より、本橋の断面形状は剥離干渉法²⁾による逆台形閉断面構造を計画段階より採用したものであり、架橋地特有の地形条件下（海風の吹上げ等）においても風による有害な振動は発生しないことがわかった。

よって、本橋の主桁断面形状は良好な耐風安定性を示しており、耐風対策は不要であることを明らかにした。また、閉断面構造を採用したことで、厳しい塩害環境下において、耐塩害性の向上も図ることができた。

(3) 今後の課題と展望

本試験では、周辺地形の模型化の妥当性を気流解析により検討し、架橋位置の気流を考慮した試験を実施した。架橋位置の気流は、周辺の造成等の影響により変化することが考えられる。また、近年の気象状況から想定以上の風速の風が作用することも考えられることから、完成後の実橋の動態観測を実施することが望ましいと考える。

しかし、本桁断面構造が、塩害・風環境ともに厳しい沿岸部に架かる橋梁に対する一好事例となれば幸いである。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会, 道路橋耐風設計便覧, (平成19年改訂版), 平成19年12月。
- 2) 林田, 久保, 池田, 野田: 剥離干渉法による空力弾性振動制振メカニズムに関する研究, 第19回風工学シンポジウム論文集, 日本風工学会, 平成18年11月。

強風環境下における多機能防食デッキの耐風安定性に関する研究

琉球大学 ○松井尚輝 下里哲弘 田井政行 Vincent Amores

宮地エンジニアリング 山下修平 横河ブリッジ 川東龍則 日鉄エンジニアリング 藤川敬

1.はじめに

鋼橋の桁内部では、腐食因子である飛来塩分により腐食が堆積しやすいため激しい腐食進行が生じる場合が多い。それゆえ、桁間への飛来塩分の流入を遮断し腐食進行を抑制するために、桁間への多機能防食デッキが設置される場合がある。多機能防食デッキは点検時の恒久足場となるため、作業時の点検効率の向上に有効である。(図 1-1)

近年、巨大化する台風による構造物の被害が懸念されている。多機能防食デッキについても大型化した台風に対しての耐風安定性の確保が求められる。そこで本研究では、強風環境下での多機能防食デッキに作用する風圧性状及び挙動の確認を目的とする。

2.多機能防食デッキに作用する風圧特性

2.1 試験方法

琉球大学暴露場に設置された試験橋にアルミ製の多機能防食デッキを設置し、風圧計測を行った。多機能防食デッキ下面に風圧計測用の孔にチューブを接続し、(図 2-1,2-2)静圧と動圧の差から風圧を計測した。サンプリング周波数は 100Hz である。

2.2 計測結果

2020 年 9 月に沖縄に接近した台風 10 号通過時の風圧計測結果を図 2-3 に示す。計測当時の風速は最大 8.7m/s 程度の風況環境下であり、実物試験橋の多機能防食デッキ下面に作用していた風圧は、風上側で卓越した負圧が生じていたことがわかる。この負圧は時間の経過に伴い、風下側に移動する傾向を示し、約 0.3 秒後にはデッキ中央部でピークとなるような分布形状を示していることがわかる。つまり、強風環境下において多機能防食デッキに作用する風圧は、絶えず変動しているといえる。

3.FEM による多機能防食デッキの挙動特性の確認

3.1 FEM 解析概要

多機能防食デッキに作用する風圧分布は、絶えず

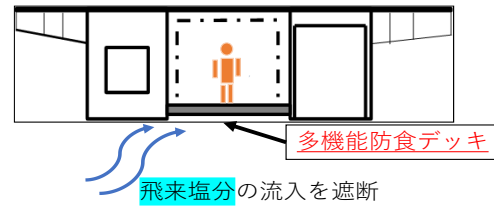


図 1-1 多機能防食デッキ設置



図 2-1 デッキ下面風圧計孔

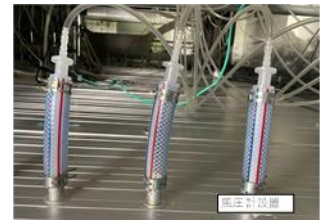


図 2-2 校正チューブ

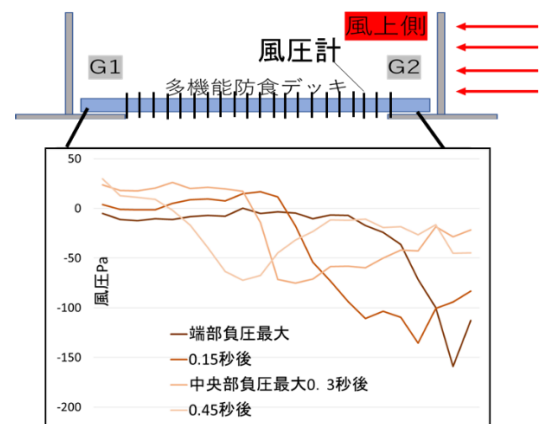


図 2-3 風圧データ

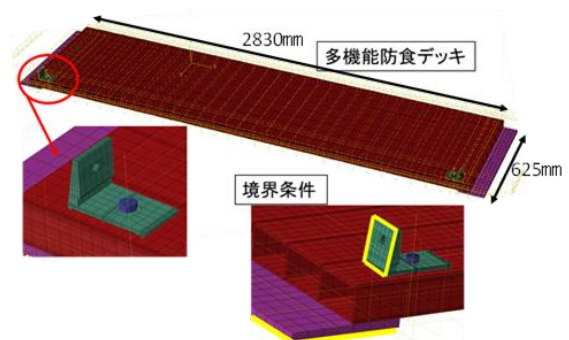


図 3-1 解析モデル

変動しているため、この風圧環境での多機能防食デッキの挙動特性を確認するために、有限要素解析を行った。解析モデルを図 3-1 に示す。解析対象は多機能防食デッキの 1 パネルとし、下フランジ下面及

キーワード: 多機能防食デッキ, 挙動特性, 風圧, FEM 解析

住所: 901-0213 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

び支持金具により支持された状態を境界条件とした。風圧には、図 2-3 に示す風上側のデッキ下面で最大の負圧が計測された圧力分布(端部負圧最大時)と端部負圧最大時から 0.3 秒後の圧力分布(中央部負圧最大時)をそれぞれ与え、多機能防食デッキの支持金具に生じるひずみについて比較を行った。

3.2 作用風圧におけるひずみの特性

図 3-2 に作用風圧における解析結果を示す。中央部負圧最大時には両端の支持金具が等しい値のひずみであった。端部負圧最大時には、風上側の連結材のひずみが風下側の支持金具より大きい結果となった。このことから、強風時の中央部負圧最大時の支持金具のひずみ及び、端部負圧最大時の風上側の支持金具のひずみに着目し、解析的検討を行った。

3.3 強風時の解析的検討

流体解析により、風速 50m/s(強風)時に多機能防食デッキに作用する風圧を算出した。流体解析モデルを図 3-3 に示す。流体解析モデルでは、風速 50m/s の風を流入側から作用させ、流出側である圧力 0 の 3 辺から風が出ていくようになっている。その際の多機能防食デッキに作用する風圧例を図 3-4 に示す。流体解析から得た端部負圧最大時と中央部負圧最大時の分布荷重を図 3-1 のモデルにそれぞれ与え、有限要素解析を行った。解析結果を図 3-5 に示す。中央部負圧最大時における最大ひずみは 1791μ であった。端部負圧最大時には、風上側の支持金具で最大ひずみ 700μ であった。

4. まとめ

- 1) 実物試験体の多機能防食デッキに作用する風圧計測を行った。最大 8.7m/s 程度の風況において下面に作用する負圧は風上側で卓越し、この負圧は時間の経過に伴い、風下側に移動する傾向であった。
- 2) 風圧計測による風圧分布を与えた解析では、中央部負圧最大時には、両側の支持金具のひずみは同程度の値であった。端部負圧最大時には、風上側の支持金具のひずみが大きくなる傾向を示した。
- 3) 風速 50m/s を想定した場合、支持金具の最大ひずみは、中央部負圧最大時で 1791μ 、端部負圧最大時には風上側において 700μ であった。

今後、台風時の風況および風圧データ等の蓄積を行い、耐風安定性の検討として、風荷重に関する設計条件等について研究していく。

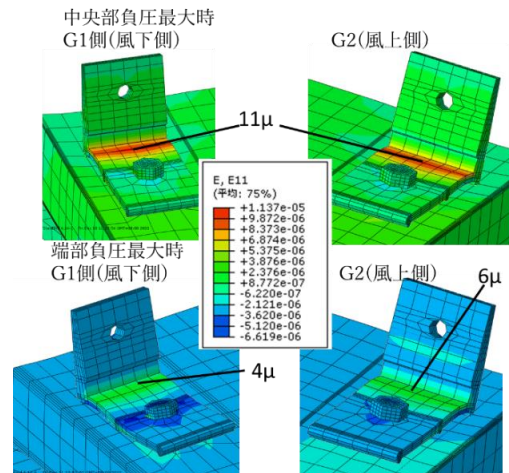


図 3-2 ひずみ解析結果

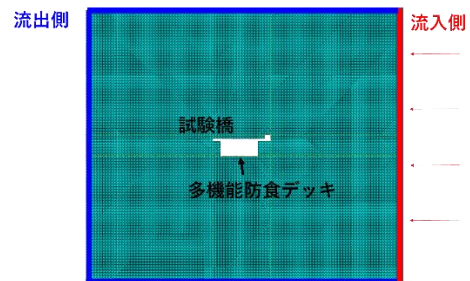


図 3-3 流体解析モデル

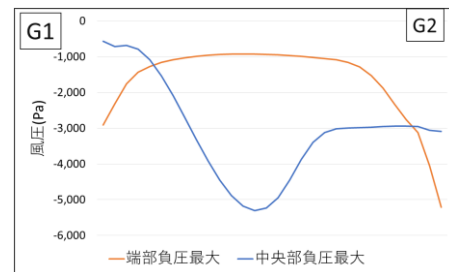


図 3-4 風圧データ

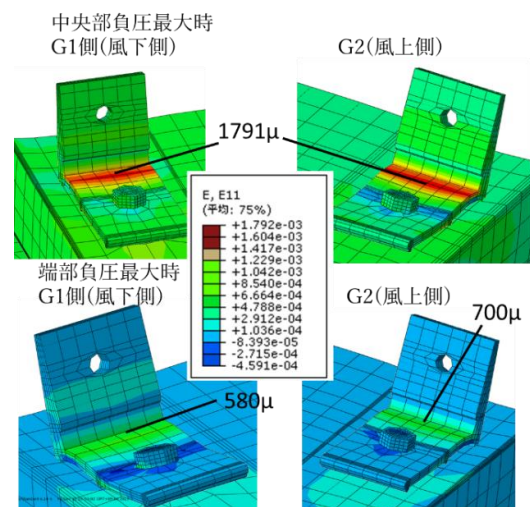


図 3-5 ひずみデータ

沖縄県におけるフライアッシュを用いたコンクリートのポストテンション PC 橋への適用化に関する基礎的研究

(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 ○柴田 和典, 妹川 寿秀, 赤嶺 文繁
琉球大学 富山 潤, 須田 裕也
琉球セメント(株) 比屋根 方新

1. はじめに

フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの副産物を混和材として活用することによって、コンクリートの耐久性向上と環境負荷低減を同時に実現できることが期待できる。沖縄県土木建築部では、「沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの配合及び施工指針」(以下、沖縄県 FA 指針)において、フライアッシュの混和材としての利用方法や施工に対する標準的な考え方を示しているが、ここではポストテンション PC 桁に対しては、ワーカビリティの改善を目的として、細骨材(砕砂)の 3~5mass%をフライアッシュで置換する外割り配合としており、塩化物イオン浸透抵抗性などの耐久性向上を主目的としていない。そこで、PC 橋の耐久性向上を目的に、普通ポルトランドセメントの質量の 15~20%をフライアッシュで置換したコンクリートのポストテンション PC 橋への実装化に向け、所定の圧縮強度を満足する配合の検討、圧縮強度発現および耐久性確保の観点からみた湿潤養生日数の検討、アルカリシリカ反応(以下、ASR)抵抗性について検討を行った。

2. 配合の検討

2.1 コンクリートの仕様および使用材料

本研究におけるコンクリートの仕様を表-1に、使用した材料を表-2に示す。コンクリートの設計基準強度はポストテンション T 桁に用いられる $\sigma_{28\text{day}}=40.0\text{N/mm}^2$ とし、一般的なコンクリートの場合と同様に材齢 3 日でプレストレス導入時に必要な強度 $\sigma_{3\text{day}}=34.0\text{N/mm}^2$ を封緘養生で目指す配合とした。本研究では結合材として品質が保証された市販のフライアッシュセメント B 種を採用した。なお、

フライアッシュを同程度の置換率とするポストミックスによる配合も想定する事から、以降はフライアッシュセメントを結合材として取り扱うこととする。沖縄県 FA 指針によれば、内割り配合タイプの空気量は耐凍害性を考慮する必要がないことから、空気量を規定しないことが述べられており、配合計算上 2.0%としていることを参考に、空気量は 2.0%とした。細骨材は沖縄県内で一般的に流通している「砕砂+

表-1 コンクリートの仕様

項目	規格値
設計基準強度	$\sigma_{28\text{day}}=40\text{N/mm}^2$
プレストレス導入時強度	$\sigma_{3\text{day}}=34\text{N/mm}^2$
単位水量の最大値	$W=175\text{kg/m}^3$
目標スランプ	$18\pm 2.5\text{cm}$
目標空気量	$\text{Air}=2.0\pm 1.0\%$ (注1)
塩化物含有量の最大値	300g/m^3
割増し係数から算出される配合強度	
設計基準強度の配合強度	$\sigma_{28\text{day}}=48\text{N/mm}^2$ (注2)
プレストレス導入強度の配合強度	$\sigma_{3\text{day}}=34\text{N/mm}^2$ (注3)

注1) 空気量の範囲は試験室試練り、かつ、圧縮強度の比較を実施するため ± 1.0 とした。

注2) 設計基準強度 $\times 1.2$

注3) プレストレス導入時強度 $\times 1.0$

表-2 コンクリートの使用材料

材 料	記号	仕 様
フライアッシュセメント	FA	フライアッシュの置換率： 15~20mass% 密度：2.98 g/cm ³ フライアッシュ： 電源開発石川発電所 分級 FA
水	W	上水道水
細骨材	S1	砕砂 密度：2.65 g/cm ³
	S2	海砂 密度：2.60g/cm ³
粗骨材	G	砕石 2005 密度：2.70g/cm ³
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系化合物

キーワード：フライアッシュ, PC 橋, 耐久性向上, 養生日数

連絡先：(PC 建協) 〒162-0821 東京都新宿区津久戸町 4 番 6 号 (第 3 都ビル)

(代表執筆者) 〒500-8703 岐阜市香蘭 1 丁目 1 番地 E-mail: shibatan@showa-con.co.jp

海砂」の混合砂とし、砕砂と海砂の比率は容積で1：1とした。

2.2 水結合材比の検討

フライアッシュを用いたコンクリートの配合（以下、FA 配合）の中心配合は、琉球セメント(株)の普通ポルトランドセメントの実績配合の水結合材比42%より5%小さくした水結合材比37%と仮定し、中心配合の水結合材比±5%とした結合材水比と圧縮強度の関係からプレストレス導入時強度と設計基準強度を満足する水結合材比を求めた。圧縮強度はJIS A 1108 に準拠して実施した。封緘養生した材齢3日の供試体と標準養生した材齢28日の供試体の結合材水比と圧縮強度の関係を図-1に示す。図中に近似式をあわせて示す。この近似式を用いて、所定の圧縮強度を満足する水結合材比は、プレストレス導入時強度で $W/B=39.4\%$ 、設計基準強度の配合強度で $W/B=47.2\%$ となり、プレストレス導入時強度で決定することとした。ここで、湿潤養生日数の検討と ASR 抵抗性を検討する配合を決定するにあ

たり、圧縮強度の5%を安全側にみることにし、本研究での水結合材比は38%に設定した。

3. 湿潤養生日数の検討

3.1 実験概要

湿潤養生日数が圧縮強度発現および耐久性に及ぼす影響を実験的に検討した。耐久性は塩化物イオン浸透抵抗性を把握することにより行った。

コンクリートの配合を表-3に示す。FA 配合の性能を評価するための比較配合は、一般的な普通ポルトランドセメントの実績配合（以下、N 配合）とし、空気量は4.5%、スランプは12cmとした。

養生方法を図-2に示す。脱枠は材齢1日とし、所定の材齢まで標準養生(20℃水中養生)を行い、その後、20℃室内で養生した。なお、以降では試験条件を明確にするため、湿潤養生日数を標準養生日数と記載する。コンクリート標準示方書では平均温度15℃以上では普通セメント+混和材の湿潤養生日数を7日としていることから、標準養生日数は7日ま

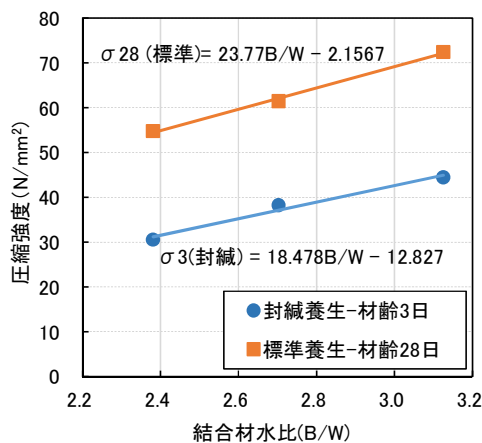
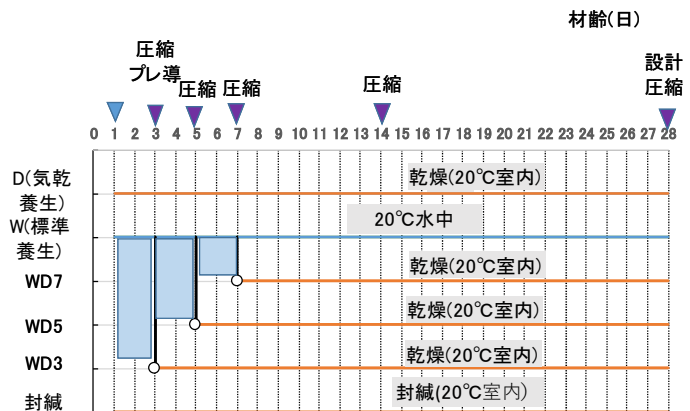


図-1 結合材水比と圧縮強度の関係



注) W は圧縮強度実施まで、非定常電気泳動試験開始材齢まで標準養生

図-2 養生方法

表-3 コンクリートの配合(湿潤養生日数の検討)

配合名	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)		単位量						混和剤 B×%	
					水	結合材(B)		細骨材		粗骨材	SP	AE
					W	FA	N	S1 (砕砂)	S2 (海砂)	G		
FA-38.0-2.0	2.0	38.0	45.7	kg	165	435	—	405	398	980	0.70	—
				リットル	165	146	—	153	153	363		
N-41.5-4.5	4.5	41.5	46.7	kg	160	—	386	333	490	969	0.40	0.0030
				リットル	160	—	122	125.6	188.4	359		

配合名は「結合材種別—W/B—空気量」で示す。AE 剤は原液

でとした。

塩化物イオン浸透抵抗性は、塩水による浸せき試験法や電気泳動法（定常法）では時間がかかり再水和により標準養生による影響が明らかにならない可能性があるため、本研究では電気泳動試験（非定常法）^{1),2)}を実施した。各養生条件で円柱供試体を各3本作製し、材齢4ヶ月で試験を行った。電気泳動試験（非定常法）により測定した塩化物イオン浸透深さから式（1）^{1),2)}を用いて塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を算出し、塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を比較することにより標準養生日数を検討した。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} K \quad \dots (1)$$

ここに、 D_{nssm} : 塩化物イオン拡散係数(m²/s), R : 気体定数(= 8.31 J/(K・mol)), T : 通電時の陽極側と陰極側の溶液温度の平均値(K), z : 塩化物イオンの電荷(= 1), F : ファラデー定数(= 9.65×10⁴ J/(V・mol)), E : 電位勾配(試験の開始時と終了時における両溶液

間の電圧の平均値を供試体厚さ(= 0.05 m)で除した値, V/m), K : 塩化物イオン浸透速度係数(m/s)である。塩化物イオン浸透速度(K)は通電時間と塩化物イオン浸透深さが比例関係にあると仮定して算出した。

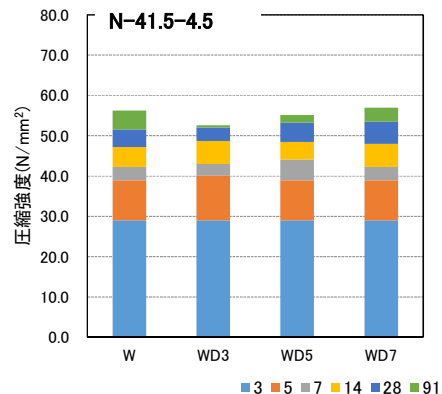
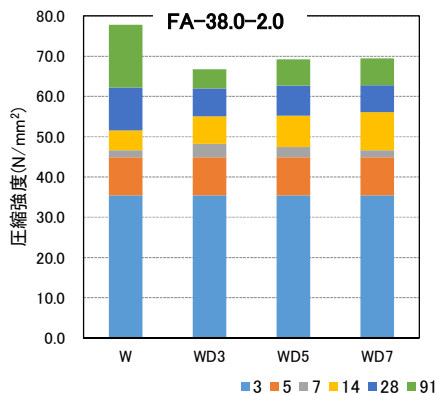
3.2 標準養生日数が圧縮強度に及ぼす影響

各材齢における圧縮強度の平均値を表 - 4 に、標準養生日数ごとの圧縮強度発現を図 - 3 にそれぞれ示す。配合「FA-38.0-2.0」はプレストレス導入時強度の配合強度(封緘養生材齢3日, 34N/mm²)と設計基準強度の配合強度(標準養生材齢28日, 48N/mm²)を満足し、本研究の配合を用いることで、普通ポルトランドセメントを用いた一般のコンクリートと同様の時期にプレストレスの導入が可能であることが確認できた。

養生条件の違いでは、材齢28日の圧縮強度においては、配合「FA-38.0-2.0」と「N-41.5-4.5」の両配合ともW, WD3, WD5, WD7で概ね同等であり、標準養生日数の違いによる差は認められなかった。

表 - 4 圧縮強度の平均値

配合名	養生方法	3日強度(N/mm ²)	5日強度(N/mm ²)	7日強度(N/mm ²)	14日強度(N/mm ²)	28日強度(N/mm ²)	91日強度(N/mm ²)
FA-38.0-2.0	W	35.4	44.9	46.7	51.6	62.2	77.8
	D	29.5	36.0	39.4	43.9	47.4	48.5
	WD3	—	44.9	48.2	55.1	61.9	66.7
	WD5	—	—	47.4	55.2	62.7	69.2
	WD7	—	—	—	56.1	62.8	69.5
	封緘	35.1	—	42.7	—	53.4	—
N-41.5-4.5	W	29.0	38.9	42.3	47.2	51.5	56.2
	D	27.0	31.5	34.8	37.5	41.0	41.9
	WD3	—	40.1	43.0	48.7	52.0	52.6
	WD5	—	—	44.1	48.4	53.2	55.1
	WD7	—	—	—	48.0	53.5	57.0
	封緘	32.5	—	40.3	—	48.0	—



注)WD3の圧縮強度は材齢3日までWと同じ、WD5の圧縮強度は材齢5日までWと同じ。
WD7の圧縮強度は材齢7日までWと同じとして示す

図 - 3 湿潤養生日数ごとの圧縮強度発現

しかし、材齢 91 日の圧縮強度においては、両配合とも WD3 から WD7 まで標準養生日数を長くするほど圧縮強度は増加するが、配合「N-41.5-4.5」では W と WD7 で概ね同等の値となっていることに対し、配合「FA-38.0-2.0」では、W は WD7 より大きな値となった。以上から、脱枠後の標準養生がコンクリートの圧縮強度発現性に影響し、特に FA 配合のコンクリートは脱枠後に適切な標準養生(湿潤養生)を実施することにより長期の圧縮強度の増加量を大きくすることが可能であることが認められた。

3.3 湿潤養生日数が塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす影響

各養生条件下で材齢 4 カ月の供試体の塩化物イオンの拡散係数を図 - 4 に示す。配合「FA-38.0-2.0」と「N-41.5-4.5」で比較すると、いずれの養生条件で配合「N-41.5-4.5」よりも配合「FA-38.0-2.0」の拡散係数は低下した。このことから、フライアッシュを使用することで塩化物イオン浸透抵抗性を向上させることが認められた。養生条件の違いでは、両配合ともに D (気乾養生) の供試体の拡散係数は他の養生条件の供試体よりも大きい値を示した。特に、配合「FA-38.0-2.0」では、D の拡散係数は W よりも 3.3 倍程度となり、乾燥の影響により十分なポゾラン反応が得られなかったものと考えられる。一方で、標準養生日数を長くすることで、両配合ともに拡散係数の低下が見られ、配合「N-41.5-4.5」では WD5 や WD7 の拡散係数が W とほぼ同程度の値を示し、配合「FA-38.0-2.0」では WD7 の拡散係数が W と同程度の値を示した。

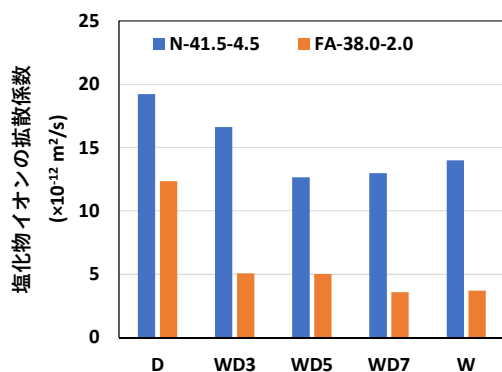
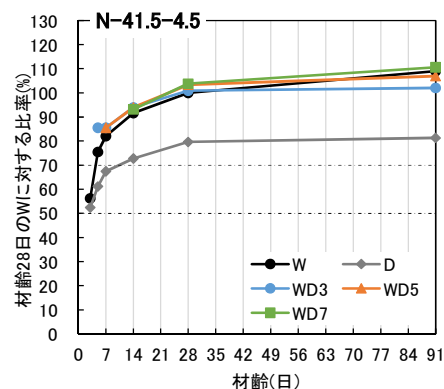
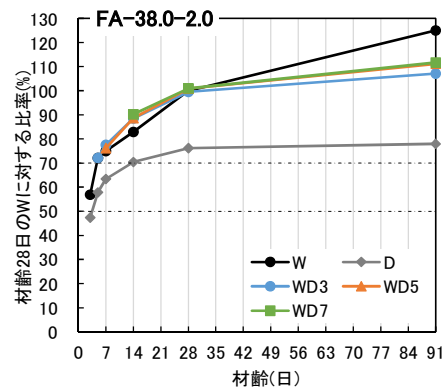


図 - 4 各養生条件における材齢 4 カ月の塩化物イオンの拡散係数

3.4 湿潤養生日数の検討

配合「FA-38.0-2.0」と「N-41.5-4.5」の材齢 28 日の標準養生した供試体の圧縮強度に対する比率を図 - 5 に示す。2012 年制定コンクリート標準示方書[施工編]の「湿潤養生日数」に示されている湿潤養生日数と 1986 年制定コンクリート標準示方書[施工編]の「マスコンクリート」の圧縮強度の算定式から湿潤養生日数の目安を材齢 28 日の標準養生した供試体の圧縮強度の 50%以上と推察している³⁾。本研究の試験では、両配合とも材齢 28 日および材齢 91 日において、WD3 の比率は WD5 および WD7 より若干小さくなる傾向があるものの、脱枠後材齢 3 日まで標準養生した供試体の圧縮強度は材齢 28 日の圧縮強度に対して 50%以上となった。このことから、本研究の範囲では、湿潤養生の目安を材齢 28 日の標準養生した供試体の圧縮強度の 50%と以上とした場合、脱枠後材齢 3 日以上標準養生(湿潤養生)とすることがよいと考えられる。



注)WD3 の圧縮強度は材齢 3 日まで W と同じ、WD5 の圧縮強度は材齢 5 日まで W と同じ。

WD7 の圧縮強度は材齢 7 日まで W と同じとして示す

図 - 5 材齢 28 日の標準養生した供試体の圧縮強度に対する比率

塩化物イオン浸透抵抗性の観点からは、材齢 4 カ月の塩化物イオンの拡散係数の結果から、N 配合では材齢 5 日まで標準養生（湿潤養生）を実施し、FA 配合では材齢 7 日まで標準養生（湿潤養生）を実施することで、4 カ月間の水中養生を行った供試体とほぼ同程度の塩化物イオンの拡散係数を示すことが認められた。

PC 橋において、ポストテンション T 桁橋や張出架設工法の箱桁橋などはサイクル施工が多く、湿潤養生日数が生産性に大きな影響を及ぼす場合がある。本研究の結果に施工工程などの生産性の観点を加えて、湿潤養生日数を以下のように提案する。

「湿潤養生日数は、圧縮強度発現性の観点から材齢 3 日以上実施することを標準とする。しかし、養生日数が施工の効率化や経済性に悪影響を及ぼさない場合は、長期的な強度増進と塩化物イオン浸透抵抗性の観点から安全側になるように配慮し湿潤養生日数は材齢 7 日以上が望ましい。」

4. フライアッシュによる ASR 抵抗性の検討

本研究では FA 配合の空気量を 2.0%，NA 配合の空気量を 4.5%としているが、ASR 抵抗性の検討においては、比較配合として FA 配合で空気量 4.5%（配合名「FA-38.0-4.5」）、N 配合で空気量 2.0%（配合名「N-41.5-2.0」）とした配合に対しても試験を行った。

本研究での促進膨張試験の試験方法および判定基準を表 - 5 に示す。既往の研究⁴⁾において、海砂を使用したコンクリートは、遅延膨張性の ASR を生じる可能性があることが指摘されている。この研究では、遅延膨張性の ASR は、現行の JIS では検出

が難しいが、カナダ法では検出することができることが示されている。本試験のコンクリートの細骨材は海砂と砕砂であることから、ここではカナダ法（1mol/L-NaOH 浸漬法）を用いて検討することとした。判定はカナダ法（1mol/L-NaOH 浸漬法）の試験開始後 14 日の基準と文献⁵⁾に記載がある試験開始材齢 21 日の基準により行った。

供試体は、φ100×200mm の円柱供試体から φ50×200mm のコアを採取することで製作し、供試体数は各配合 2 体とした。試験開始材齢は 31 日とした。

促進膨張試験 35 日までの結果（21 日判定）を図 - 6 に示す。いずれのシリーズも 14 日判定では無害と判断されるが、N シリーズに関しては、膨張傾向を示し、21 日目では、判定基準 0.1%を超える供試体（N-41.5-2.0-2）が確認された。N-41.5-4.5-1 については、21 日目に膨張率が低下しているが、これは、供試体を動かす際に、ゲージプラグを固定しているステンレスバンドに何かしらの衝撃が加わった可能性がある。浸漬期間をさらに 35 日まで延長した結果、不具合の生じた N-41.5-4.5-1 以外、0.1%の膨張率を示し、さらに膨張傾向を示している。FA シリーズは N シリーズに比べ 35 日時点においても膨張を抑制していることがわかる。しかし、わずかに膨張傾向を示している供試体（FA-38.0-2.0-2）も確認されるが、35 日時点で膨張率 0.057%と低いため、実環境においては抑制できるレベルであると考ええる。フライアッシュによる ASR 抵抗性の検討結果から、遅延膨張性を示す海砂に対して、フライアッシュセメントを使用することで ASR 抵抗性の向上効果が認められた。

表 - 5 ASR 抵抗性試験（促進膨張試験）の判定基準

試験項目	試験方法	判定基準
カナダ法	コンクリートコアを 80±2℃、1N の NaOH 溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定する。 (ASTM C 1260 と同様の条件)	試験開始後 14 日の膨張率で、 0.1%以下：「無害」 0.1～0.2%：「有害と無害な骨材が含まれる」 0.2%以上：「潜在的に有害」
カナダ法 1mol/L-NaOH 浸漬法 ⁵⁾	コンクリートコアを 80±2℃、1N の NaOH 溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定する。 (ASTM C 1260 と同様の条件)	試験開始後 21 日の膨張率で、 0.1%以下：「無害」 0.1%～ ：「有害」

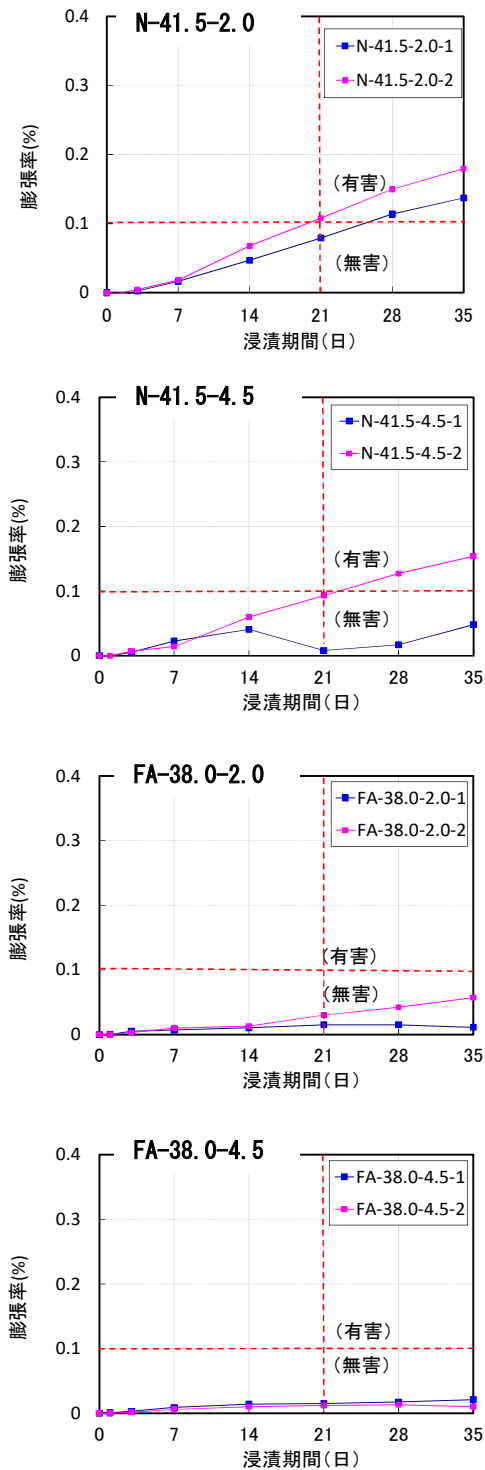


図 - 6 促進膨張試験結果 (21 日判定)

5. まとめ

湿潤養生日数の検討とフライアッシュによる ASR 抵抗性の向上効果の検討を実施した結果, 以下のことが明らかになった。

(1)脱枠後の湿潤養生がコンクリートの品質に影響し, FA 配合と N 配合のコンクリートは脱枠後に適切な標準養生(湿潤養生)を実施することにより圧縮強度の発現の増加量を大きくすることができ, 特

に FA 配合はその影響が大きい。

(2)FA 配合は N 配合より塩化物イオン拡散係数が大幅に小さくなることから, フライアッシュセメントを使用することで塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果が認められた。

(3)圧縮強度発現性の観点, 塩化物イオン浸透抵抗性の観点から, FA 配合の湿潤養生期間を「湿潤養生日数は, 圧縮強度発現性の観点から材齢 3 日以上実施することを標準とする。しかし, 養生日数が施工の効率化や経済性に悪影響を及ぼさない場合は, 長期的な強度増進と塩化物イオン浸透抵抗性の観点から安全側になるように配慮し湿潤養生日数は材齢 7 日以上が望ましい。」と提案する。

(4)遅延膨張性を示す海砂に対して, フライアッシュセメントを使用することで ASR 抵抗性の向上効果が認められた。

参考文献

- 1) 中村英佑, 水戸健介, 古賀裕久: 高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.219-224, 2018
- 2) 中村英佑, 皆川浩, 宮本慎太郎, 久田真, 古賀裕久, 渡辺博志: 通電後の塩化物イオン浸透深さをを用いたコンクリートの遮塩性能の評価, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.3, pp.304-322, 2016
- 3) (国研)土木研究所, (一社)PC 建協: 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(II), pp.141-151, 2016 年 2 月
- 4) 富山潤, 大城武, 新城竜一, 金城和久: 遅延膨張性を示す細骨材に起因したアルカリ骨材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
- 5) Tetsuya Katayama, Masahiko Tagami, Yoshinori Sarai, Satoshi Izumi, Toshikatsu Hira: Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol. 53, pp. 105-122 (2004)

ASR 劣化したコンクリート構造物に対する X 線回折法を使用した 膨張力の評価法の基礎検討

琉球大学 ○古田 泰祐, 富山 潤, 須田 裕哉
(株) 沖縄建設技研 宮城 敏明, 泉水 雄太, 有澤 希
パルステック工業 (株) 山口 真

1 はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) により劣化した構造物の補修・補強を施す際に最も重要なことは ASR の膨張に対する現状確認と将来予測である。それらを評価する方法として岩石学的試験¹⁾があるが、多くの経験と高い技術力を必要とする。また、膨張力がどの程度構造物に作用しているか評価できないという課題がある。一方で、金属などの結晶格子をもつ材料の残留応力の測定が可能な X 線回折法^{2,3)}がある。本研究では、この手法に着目し、ASR に起因したコンクリート構造物の劣化に対して、鉄筋の残留応力を測定することで、ASR に起因した膨張力を評価可能かどうか基礎的な検討を行った。今回の検証では、亀甲状のひび割れが生じたコンクリート橋台の詳細調査結果、ASR と判断された構造物に対して、X 線回折法による内部鉄筋の残留応力結果を用いた。また、ひび割れ幅および長さを含めた分布を定量的に評価することも重要するため、本研究では、ひび割れ画像解析技術⁴⁾を利用して橋台縦壁表面に生じた大量のひび割れを定量的に評価した。

2 調査概要および結果

本研究では、壁一面に亀甲状のひび割れが生じた橋台を対象とした。調査の第 1 段階として、亀甲状のひび割れが ASR に起因するものなのかを調査した。その結果、ひび割れは ASR によるものと判断し、X 線回折法を用いたコンクリート内部の鉄筋に対する残留応力を測定し、膨張力の評価の可能性を検証した。以下に、調査概要を示す。

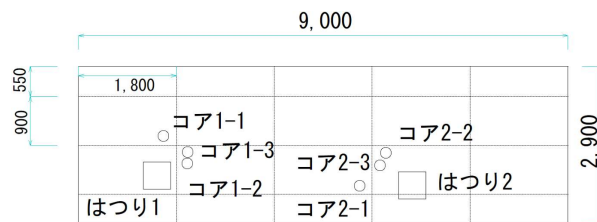
2.1 調査箇所

対象橋梁は、沖縄県本島中部の内陸に位置し、沖縄自動車道を跨ぐ 1986 年供用の跨道橋であり、アルカリ総量規制前に建設されている。また、内陸に位置することから飛来塩分の影響は小さい地域である。図-1(a)に調査対象の橋台の外観、図-1(b)に各試験に使用したコアの採取場所と鉄筋の応力測定のためのはつり箇所 (2 箇所: 60cm×60cm) を示す。図-1(b)の点線部分は型枠跡を示し、○印がコアを抜

いた箇所を示している。図-1(a)に示した橋台表面には亀甲状のひび割れが全面的に生じている。文献 5) によると建設当時、その周辺のコンクリート構造物は、塩害対策として細骨材に海砂を使用せず、輸入骨材 (台湾花蓮産) が使用されており、それが遅延膨張性を示すことが明らかとなっている。対象橋梁についても遅延膨張性の輸入骨材が使用された可能性が高い。



(a) 橋台外観 (合成画像)



(b) コア抜き箇所とはつり箇所

図-1 対象橋台

2.2 調査項目

今回行った調査では、橋台に発生したひび割れの原因を判定するために外観調査、デジタル画像解析、促進膨張試験、圧縮強度試験、静弾性係数試験、中性化試験、塩分含有量試験、鉄筋の腐食状況の確認、ASR ゲルの確認試験を行った。これらの結果を 3 章に示す。

4 章では、X 線回折法を用い、コンクリート内部の鉄筋の残留応力を測定し、ASR に起因した膨張力により鉄筋にどの程度応力が作用しているか調査した。また、その結果からコンクリートに作用した応力を換算し、コンクリートのひび割れ発生を考察した。

キーワード 維持管理, アルカリシリカ反応 (ASR), X 線回折法, 残留応力, 膨張評価

連絡先: 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 建設材料学研究室

E-mail: k198477@eve.u-ryukyu.ac.jp

3 調査結果

3.1 外観調査

外観調査では、橋台堅壁表面に接近し目視で損傷の位置や規模、構造物の変形状況を計測し、表-2の区分から損傷度を判定した⁶⁾。外観調査の結果、ひび割れから鋼材腐食による錆汁等が確認されなかったことから外観上の評価はグレードⅡであると考えられる。

3.2 ひび割れのデジタル画像解析

本研究で用いたひび割れ画像解析技術は、デジタル画像データにガボールフィルタに基づいたウェーブレット変換を適用し、画像データの濃淡情報に関するウェーブレット係数を求めてひび割れ判定を行い、ひび割れを検出し、ひび割れ長さ、幅や分布などを定量的に取得することができる⁴⁾。また、空間分解能の1/4以上のひび割れ（例えば、空間分解能0.8mm/pixelの画像の場合は幅0.2mm以上のひび割れ）を検出できる特徴を持つ。

今回の調査では、図-2の破線部分を12領域に分け、解析を行った。解析に用いた空間分解能は、すべての領域で0.8mm/pixel程度になるよう撮影条件を設定した。

図-3にひび割れ幅を色ごとに分別した結果と図-4(a)にひび割れ幅の割合、図-4(b)にひび割れ幅ごとの総ひび割れ長さを示す。図-3からひび割れの分布からASR劣化の特徴である亀甲状のひび割れが確認することができる。また、ひび割れは、雨掛かり

の影響がある橋台側面付近に密集していることがわかる。図-4(a)よりひび割れの半数を0.2mm以下のひび割れが占めていることが定量的に示されている。しかし、0.3mm以上のひびわれも存在し、また、総延長としては2m以下（図-4(b)）であるが、0.9mm程度のひび割れも確認できる。条件によっては今後もひび割れは広がる可能性があると考ええる。

表-2 損傷度の区分

損傷状況	損傷度
鋼材の露出や破断、またはコンクリートの断面欠損が認められる場合	Ⅳ
ひび割れ、錆汁、剥離、あるいは剥落が連続的に認められる場合	Ⅲ
ひび割れ、錆汁、あるいは剥離が部分的に認められる場合	Ⅱ
ごく軽微なひび割れや、錆汁が認められる場合	Ⅰ
損傷が認められない場合	無

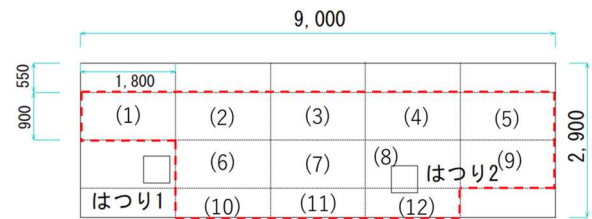


図-2 ひび割れ画像解析した箇所

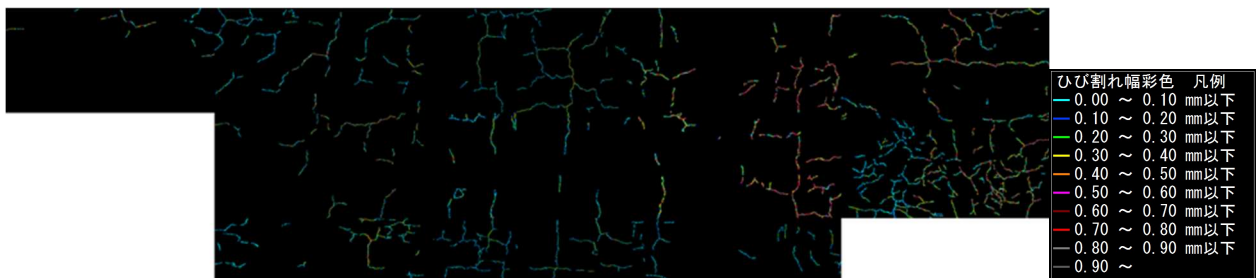
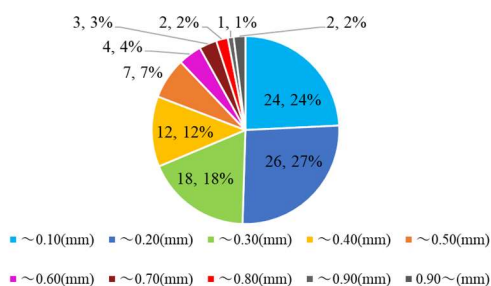
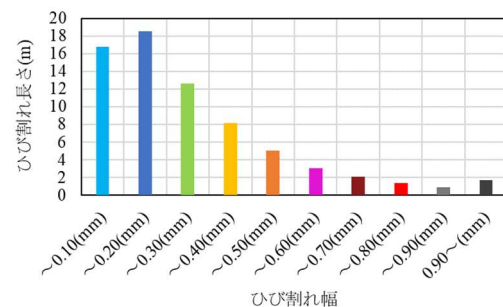


図-3 ひび割れ幅ごとの分布



(a) ひび割れ幅の全体に占める割合



(b) ひび割れ幅ごとの総ひび割れ長さ

図-4 ひび割れ画像解析結果

3.3 促進膨張試験

促進膨張試験は、表-3 に示す 1mol/L-NaOH 浸漬法^{1),7)}により行った。測定はコンタクトゲージを用い、基準長は 100mm である。2 カ所のはつり面近くから内径 60mm のコアビットを用いてそれぞれ 1 体ずつ採取したコンクリートコア（直径約 58mm、長さはコア 1-1：145.6mm、コア 2-1：143.6mm）を 80 ± 2℃、1N の NaOH 溶液に浸漬し膨張率の経時変化を測定した。判定基準は katayama ら^{1),7)}が示した浸漬後 3 週間（21 日）で 0.1% 以上を有害とする基準を採用した。促進膨張試験の結果を図-5 に示す。この結果より、コア 2-3 で、21 日で有害と判断される膨張率 0.1% を超えた 0.145% の膨張率が確認された。また、コア 1-3 においても、0.1% に近い 0.086% の膨張率が確認され、さらに膨張傾向を示している。橋台堅壁表面は、有害な骨材が含まれていることにより ASR が生じたと考えられる。

表-3 促進膨張試験判定基準^{1),7)}

1mol/L-NaOH 浸漬法	試験開始後 3 週間（21 日）の 膨張率で判定 0.1% 以下：無害 0.1% ～：有害
--------------------	--

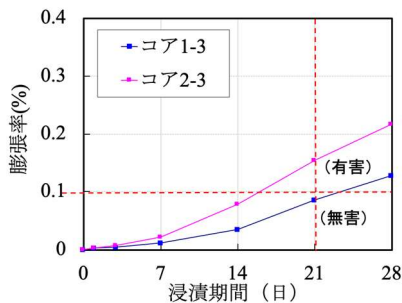


図-5 促進膨張試験結果

3.4 圧縮強度試験、静弾性係数試験

図-1 (b) に示した位置より採取したコンクリートコア（約φ70cm×145cm）、コア 1-1 およびコア 1-2 にひずみゲージを貼り、JIS に準じ、圧縮強度（JIS A 1107, 1108）および静弾性係数（JIS A 1149）を求めた。図-6 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。比較のため、土木学会コンクリート標準示方書（設計編）⁸⁾に示された普通コンクリートの値も同時に示す。ASR 劣化したコンクリート構造物から採取したコンクリートコアの静弾性係数は、ASR の膨張力から解放されるため、採取前の値とは異なる可能性があるが、コア 2-1 の圧縮強度と静弾性係数の関係は、ASR 劣化した構造物の特徴として広く観察されるように圧縮強度に比較し、静弾性係数が低下して

いることがわかる¹⁾。このことから観察された外観上のひび割れは ASR の可能性が高い。

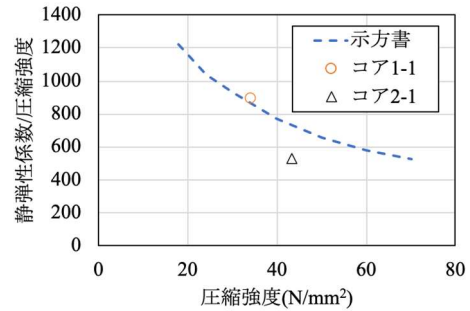


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.5 中性化試験

中性化試験（JIS A 1152）は、採取したコアの割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、着色の有無で中性化しているかどうか判断する。コンクリート表面から着色した部分までの距離を中性化深さとする。試験結果を表-4 に示す。その結果、コア 1-2、コア 2-2 共に中性化深さはかぶり深さに比べて小さい。このため、橋台堅壁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。

表-4 中性化試験結果

	中性化深さ(mm)	かぶり深さ(mm)
1-2	6.5	90
2-2	10.3	120

3.6 塩分含有量試験

塩分含有量試験（JIS A 1154）は、コア 1-2 およびコア 2-2 を 20mm 間隔にスライスした試料を分析した。鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度は参考文献⁸⁾から 1.2kg/m³ とした。図-7 にコンクリートコアの深さごとの塩化物イオン濃度を示す。鉄筋位置での塩化物イオン濃度は、発錆限界と比較して低いことから、橋台堅壁表面のひび割れは、塩害による鋼材腐食に伴うものではないと判断される。

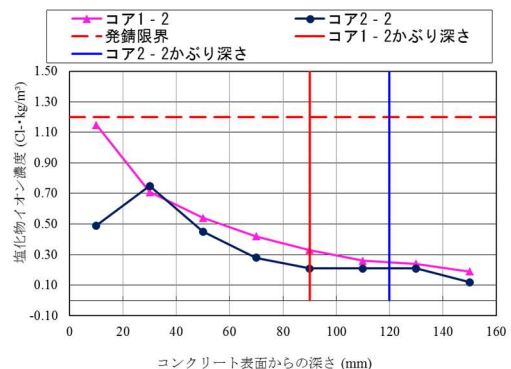


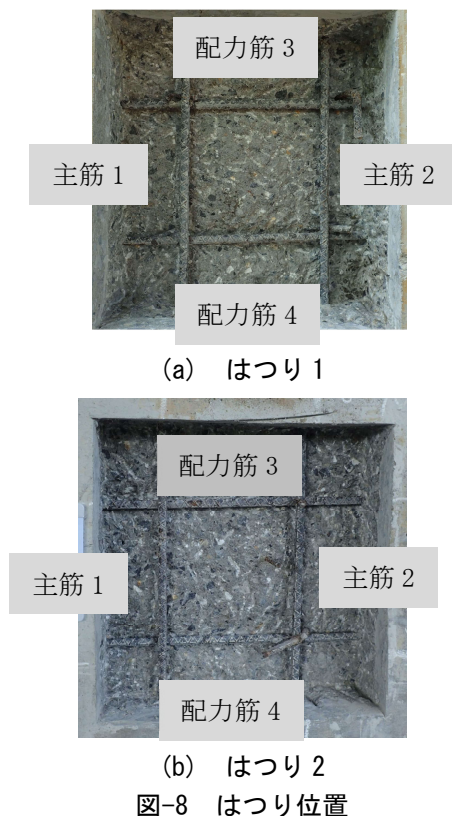
図-7 塩分含有量試験結果

3.7 鉄筋腐食状況調査

図-8 にはつり 1, 2 の写真と表-5 に鉄筋腐食状況の調査結果を示す。鉄筋は異形鉄筋 (D16) が使用されていることが確認された。鉄筋腐食グレードについては、『コンクリートのひび割れ調査, 補修, 補強指針 - 2013 - 』より評価した。ひび割れは鉄筋位置に達しておらず, グレード I は「部分的に腐食が認められる。軽微な腐食」である。これの結果からも橋台堅壁表面のひび割れは, 鋼材腐食に伴うものではないと判断される。

表-5 鉄筋腐食状況調査結果

	調査結果			備考
	鉄筋腐食グレード	鉄筋間隔 (mm)	鉄筋かぶり (mm)	
はつり 1	I	255	120	主筋 1
	I	250	140	配力筋 4
はつり 2	I	250	90	主筋 1
	I	260	105	配力筋 3



3.8 ゲルフルオレッセンス法による ASR ゲルの検出

3.8.1 測定理論

簡易的な ASR 診断法として紫外線によって発光するウラニルイオンを ASR ゲル中の陽イオンと置換することで ASR ゲルを可視化できる酢酸ウラニ

ル蛍光法という手法がある。しかし, 酢酸ウラニル蛍光法は, 高濃度のウラニル溶液を使用するため, 放射性溶液として取り扱う必要がある。その課題を解決し汎用的に取り扱えるように調合した試薬を使用した ASR ゲル判別方法がゲルフルオレッセンス法である⁹⁾。

3.8.2 測定手順

試薬をコンクリートの表面に薄く膜が張る程度に塗布し, 5 分間反応させる。その後, 暗室下で UV ランプを照射し ASR ゲルの発光を確認する。測定に使用する試薬は文献 9) より, 硝酸ウラニン標準液 (2% HNO₃ 溶液, 29 元素含有, 0.0017% のウラニルを含む) を NaOH による中和後, 酢酸を少量加え, 低濃度の酢酸とウラニルを含むウラン濃度 0.00058% の希釈酢酸ウラニル溶液を使用した。

3.8.3 測定結果

橋台のコンクリートの一部を対象に ASR ゲルの検出した確認した結果を図-9 に示す。赤枠で示した黄色に発光している箇所に ASR ゲルを確認することができる。

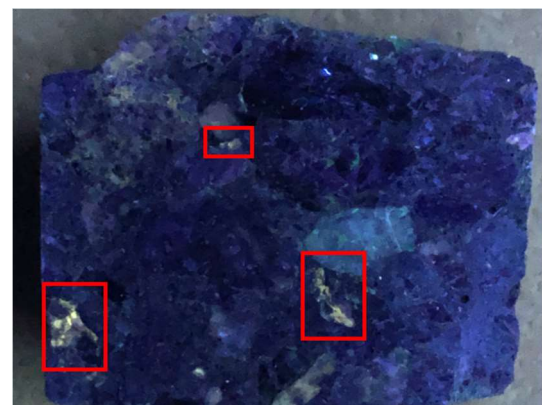


図-9 ASR ゲルの検出結果

3.9 ひび割れの原因判定

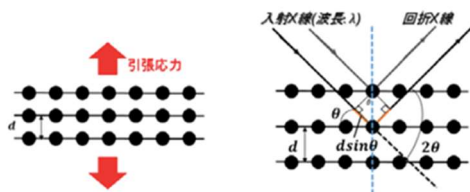
以上の調査結果から, 橋台堅壁表面のひび割れは, 中性化や塩害に起因した鋼材腐食によるものではないと判断され, また, 静弾性係数と圧縮強度の関係, ゲルフルオレッセンス法による ASR ゲルの検出, 促進膨張試験の結果および遅延膨張性を示す骨材使用の可能性から ASR に起因したものと判断できる。

4 X線回折法による鉄筋の応力測定

4.1 X線回折法による応力測定原理

一般に, 金属材料は無数の結晶粒の集合体であり, 格子面間隔は金属原子固有のものである。そこに応力が加われば, 図-10 に示すように, 応力に応じて

格子面間隔が変化する．X線を入射させると，散乱する際に，Braggの法則を満たすようにX線がリング状に回折してくる．この回折像をデバイリングと言い，無応力試料におけるデバイリングを基準とし，測定試料のデバイリングとの差を求めることで格子面間隔の変化を測定し，発生している応力を推定する方法がX線回折法による応力測定法である^{2),3)}．この原理をコンクリート分野へ適用性した基礎的な検討事例も報告され，その有効性が示されている¹⁰⁾．



出典：コンクリート工学年次論文集，Vol39，No.1，2017

図-10 X線回折法の原理

4.2 測定機器

使用した測定器を図-11に示す．この測定器は，X線を用いた応力推定手法の一つである $\cos \alpha$ 法を採用した装置¹¹⁾で，応力の算出には，フェイライトのヤング係数 $E(224\text{GPa})$ ，ポアソン比 $\nu(0.28)$ を用いて文献¹¹⁾の推奨値である応力定数 $(E/(1-\nu)=175\text{GPa})$ を採用している．この方法の特徴は，X線の単一入射のみで応力を測定でき，従来の測定器に比べ小型化，測定時間の短縮化できるという点である．このことから，現場での計測が可能となった．



図-11 ポータブル型X線残留応力測定装置

4.3 測定方法

本測定法は，文献¹⁰⁾に示された方法に準じて行った．はじめにコンクリート内部の鉄筋をはつり出し，鉄筋表面の平面処理および酸化被膜を除去することを目的にディスクグラインダーなどで物理的に研磨したのち，さらに電解研磨を行う．図-12に研磨した測定箇所を示す．研磨した箇所に測定装置をかざし，応力を測定する．測定箇所は図-8の箇所

ある．測定ははつり箇所ごとに主筋2本，配力筋2本とし，1か所につき3回ずつ測定した．なお，現場での測定方法については今後も検討を行う予定である．



図-12 電解研磨後の鉄筋

4.4 精度確認

図-13のように鉄筋(D19)の引張試験を行い，ひずみゲージにより鉄筋のひずみを計測し，ロードセルの値から算出された応力レベル0, 25, 50, 100, 150, 200MPa時に試験機を停止し，X線回折法により応力を測定した．その結果を図-14に示す．なお，X線回折法の応力は停止時のひずみゲージから算出されるひずみに関連づけて図示している．また，ロードセル算出値が原点をわずかに通らないのは測定誤差である．この結果から，今回の精度確認試験においては，既往の研究¹⁰⁾に示された $\pm 30\text{MPa}$ 精度より高精度となっていることがわかる．



図-13 精度確認実験（引張試験）

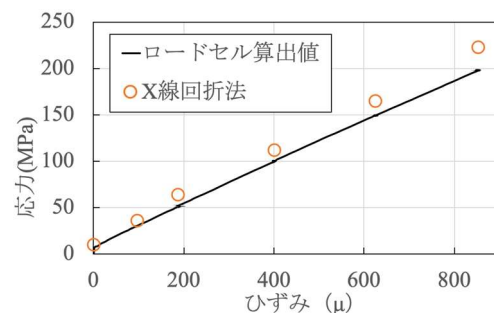


図-14 精度確認試験結果

4.5 応力測定結果

表-6に応力測定結果を示す．換算応力とは，ヤング係数比を $n=E_s/E_c=6.56$ として，鉄筋の測定応力を n で除すことで算出したコンクリートの推定応力である．なお，鉄筋のヤング係数は $E_s=200\text{kN/mm}^2$ ，コ

ンクリートのヤング係数は調査結果の大きい方の値を用い $E_c=30.5\text{kN/mm}^2$ とした. 表-6 からはつり 1, はつり 2 の主筋では 37~103 MPa と大きな引張応力が生じているのに対し, 配力筋の応力は-18~7 MPa と主筋に比べ応力が小さい結果であった. 供用中の橋台には, 上部工の死荷重及び背後からの土圧が作用しているものの, 橋台前面側の主筋に引張応力が生じるとは考えにくい. このことから, ASR の膨張作用などにより主筋に引張応力が生じているものと考えられる. なお, 配力筋に生じた応力が主筋の応力に比べ小さくなった理由は不明ため, 今後, 膨張力を考慮した有限要素解析を実施し, 数値解析的な検討を行い, この現象を明らかにする予定である.

次に, ひび割れ発生について, 実際のコンクリート構造物では, 設計基準強度を下回らないように配合強度を設定し, 建設されるが, ここでは安全側の考察を行うために設計基準強度からコンクリートの引張強度を推定し考察する. 建設年を考慮しコンクリートの設計基準強度 f'_{ck} を 30MPa と仮定するとコンクリートの引張強度 $f_t=0.23f'^{2/3}_{ck}=2.2\text{MPa}$ と推定される. その結果, 主筋の測定応力から推定した換算応力は, コンクリートの引張強度をはるかに超え, ひび割れが生じる応力レベルであることが確認できる. このように X 線回折法による鉄筋の応力測定は, ASR 劣化したコンクリート構造物の膨張力レベルを定量的に評価可能であり, ASR 劣化した構造物の調査に対し, 有力な測定技術となりえると考ええる.

表-6 測定結果 (正: 引張, 負: 圧縮)

	箇所	測定値(MPa) 鉄筋	換算応力(MPa) コンクリート
はつり 1	主筋 1	58.0	8.84
	主筋 2	102.6	15.64
	配力 3	0.3	0.04
	配力 4	-18.0	-2.74
はつり 2	主筋 1	37.3	5.69
	主筋 2	50.0	7.62
	配力 3	7.0	1.07
	配力 4	5.0	0.80

5 まとめ

本研究で得られた知見と今後の予定を以下に示す.

- (1) 各種試験の結果から, 橋台表面に生じたひび割れは ASR に起因するものと判断された.
- (2) X 線回折法を用いた鉄筋の応力測定法を使用す

ることで, コンクリートに生じている応力を推定することができ, ASR 劣化構造物の調査に対して有力である可能性を示すことができた.

- (3) 今後は, より多くの劣化構造物に対して本手法を適用し, 適用範囲, 精度検証および評価方法の検討を行っていく予定である.

謝辞

本研究の一部は, 公益社団法人日本コンクリート工学会 2020 年度研究助成金の支援を受けた. また, 本研究を遂行するにあたり, 現場を提供して頂いた管理者, ひび割れ画像解析技術を提供して頂いた大成建設株式会社関係各位に感謝の意を表す.

参考文献

- 1) 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
- 2) 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明: 残留応力の X 線評価, 養賢堂, 2006
- 3) 郡重美, 高久泰弘, 鈴木健次, 中代雅士: $\cos \alpha$ 法を用いた残留応力測定の有効性の確認, IIC REVIEW, No.53, pp.48-53, 2015
- 4) 小山哲, 丸屋剛, 堀口賢一, 澤健男: ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発, 土木学会論文集 E2(材料, コンクリート構造), Vol.68, No.3. 178 - 194, 2012.
- 5) Katayama, T., et al: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan. Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008
- 6) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術 '07 [基礎編], p89, 2007.
- 7) Katayama, T., et al.: Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol. 53, pp. 105-122, 2004.
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書-維持管理編 (2018 年制定) -, p.115, 2018.
- 9) 参納千夏男, 丸山達也, 丸山達也, 山戸博晃, 鳥居和之, “「ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発」,” コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 10) 小田切勝也, 田中樹由, 野末秀和, 岩波光保: X 線回折法による鉄筋の残留応力推定手法の開発, コンクリート工学年次論文集 Vol.39, No.1, pp.1867-1872, 2017.
- 11) パルステック工業 HP (2020 年 4 月 22 日閲覧): <https://www.pulstec.co.jp/>
- 12) (社)日本材料学会 X 線材料強度部門委員会: X 線応力測定法標準(2002 年版) = 鉄鋼編 =, (社)日本材料学会, p.18, 2002.

渦電流探傷試験による塗膜上からの疲労き裂検出技術に関する研究

琉球大学 ○鈴木啓心 下里哲弘 田井政行
(株)IHI 大橋タケル 瀬戸口雄介 畠中宏明

1. はじめに

鋼橋の溶接継手部では、溶接止端部で疲労き裂が発生する場合がある。一般的に、疲労き裂の探傷には、図 1-1 に示すように塗膜割れが発生した個所について塗膜を除去し、磁粉探傷試験が行われる。しかしながら、塗膜割れが生じていたとしても、き裂が生じていない場合も多く、き裂検出効率の低下の要因となっている。それゆえ、塗膜割れ発生個所について、塗膜を除去することなくき裂を探傷できる技術が求められている。

そこで本研究では、溶接止端部の疲労き裂探傷として渦電流探傷¹⁾に着目し、塗膜割れ下のき裂の有無の検出性能について検討を行った。

2. 疲労試験及び渦電流探傷試験について

本研究では、図 2-1 に示す塗装された面外ガセット溶接接手を対象に溶接止端部のき裂探傷試験を行った。また、渦電流探傷試験には図 2-2 に示す機器を用いた。試験体パラメータは表 1 より、Case1 は塗膜割れありーき裂なし、Case2 は塗膜割れありーき裂あり、Case3 は塗膜割れなしーき裂ありとなっている。

2.1. 渦電流探傷試験の概要

渦電流探傷試験は、交流電流を流したコイルを用いて導体に時間的に変化する磁界を与え、電磁誘導作用によって渦電流が導体に発生する。図 2-3 のように、生じた渦電流が割れ等不連続部によって変化することを利用してき裂の検出を行う非破壊試験方法である。

キャリブレーションにおいて、き裂が無い場合は波形が動かず、表面長さ 5 mm、深さ 1.2 mm のスリットでは波形が垂直に動いた。その上で溶接止端部では、塗装無し試験体を対象に事前に予備試験を行い、渦電流探傷試験で検出される疲労き裂の応答としては、き裂が無い場合は波形が斜めに動き、き裂がある場合には波形が垂直に動くとして判定を行った。

2.2. 疲労試験及び渦電流探傷試験概要

疲労試験は、応力範囲を 125MPa、载荷周波数を 18Hz とし、10 万回ごとに渦電流探傷試験及び塗膜割れの有無の確認を行った。探傷手順は、図 2-4 のように溶接止端部に 3 つ計測点を取り 1 つにつきプローブを 10 往復させて計測を行った。なお、破面にピーチマークを残すために、渦電流探傷試験後に応力範囲を半減させ载荷を行った。

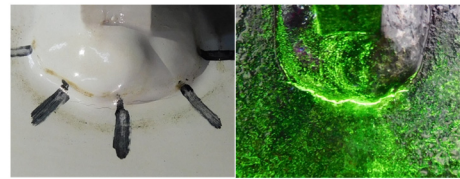


図 1-1 溶接継手部の疲労き裂

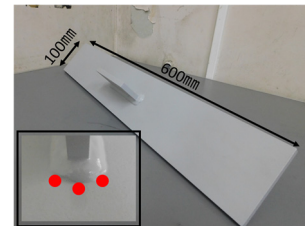


図 2-1 面外ガセット溶接継手



図 2-2 渦電流探傷器具

Case	塗膜割れ	き裂
1	あり	なし
2	あり	あり
3	なし	あり

表 1 試験体パラメータ

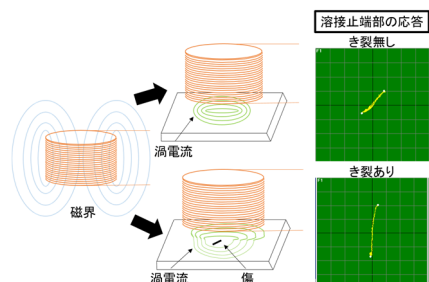


図 2-3 渦電流の原理

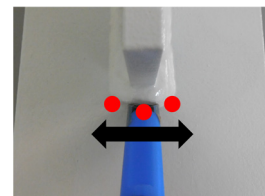


図 2-4 プローブの動かし方

キーワード：渦電流探傷試験，渦電流，疲労試験，疲労き裂

住所：〒901-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース

3. 渦電流探傷試験結果

3.1. 塗膜割れありーき裂なしの場合

塗膜割れが疲労き裂の検出に及ぼす影響を検討するために、塗膜割れを模擬した試験体を対象に渦電流探傷試験を行った。疲労き裂及び塗膜割れの無い面外ガセット溶接接手を対象とし、溶接部に 3 mm, 5 mm, 10 mm と段階的にカッターで切り込みを入れていき、塗膜割れを再現した。図 3-1 のように、どの段階でもき裂の反応を示す垂直の応答波形は見られず、塗膜割れは渦電流探傷試験に影響を及ぼさないと考えられる。

3.2. 塗膜割れありーき裂ありの場合

疲労試験中に得られた応答波形を図 3-2 に示す。ここでは、疲労試験前、40 万回、50 万回、80 万回载荷後の結果を示す。なお、塗膜割れは 80 万回载荷後に確認されている。図 3-2 より、塗膜割れが発生した 80 万回での応答波形は、垂直方向に大きな応答を示しており、き裂が発生していると考えられる。この溶接止端部について、破面観察を行った結果を図 3-3 に示す。図より図 3-2, 80 万回時点では表面き裂長さ 16 mm, 深さ 3.7 mm のき裂が生じており、塗膜割れ下のき裂の検出が可能であると考えられる。

3.3. 塗膜割れなしーき裂ありの場合

塗膜割れ以前の応答については、50 万回での応答はき裂があると考えられる垂直方向の応答を示しており、塗膜割れ以前においてもき裂の検出を行える可能性がある。

4. まとめ、今後の展望

本研究では、溶接止端部の疲労き裂検出において、渦電流探傷試験を用いて検証を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・塗膜割れありーき裂なしの場合、探傷においてき裂の応答がなかったため、塗膜下にき裂が無ければ塗膜割れは渦電流探傷試験に影響を及ぼさないと考えられる。
- ・塗膜割れありーき裂ありの場合、塗膜割れの上からき裂の応答が得られたため、塗膜割れでのき裂の探傷が可能であると考えられる。
- ・塗膜割れが出ていない場所、今回の試験体では表面き裂長さ 8 mm 程度、深さ 2 mm 程度のき裂であれば、塗膜下のき裂を探傷できる可能性がある。

今後は塗膜下疲労き裂幅の探傷性能評価、塗装無し試験体でのき裂のサイズ及び探傷性能評価を行う予定である。

参考文献：

- 1) 大橋ら：鋼橋における塗膜下のき裂を対象とした多チャンネル渦電流探傷システムの開発，第 75 回土木学会年次学術講演会，I-428，2020。

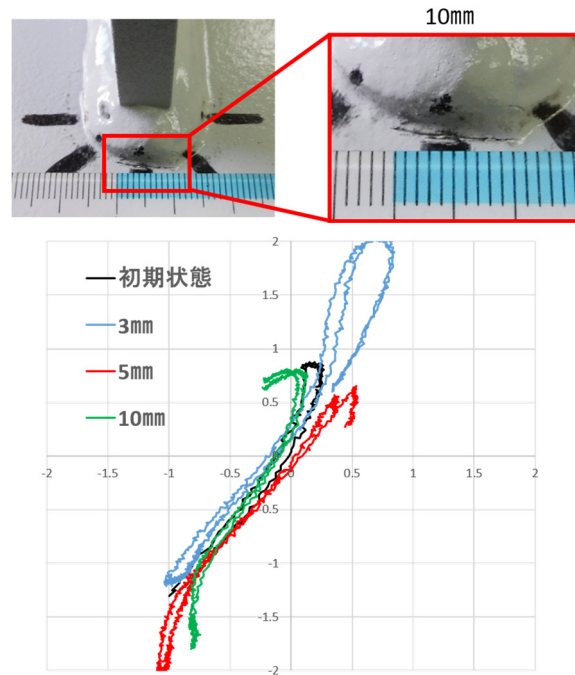


図 3-1 塗膜割れを模擬した応答値

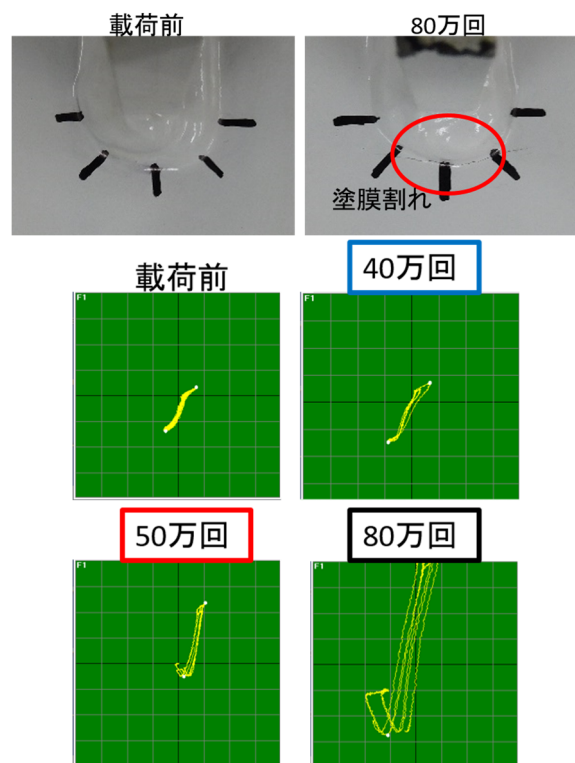


図 3-2 塗膜上からの応答値

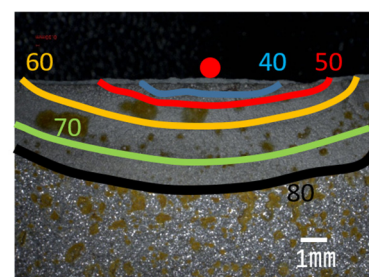


図 3-3 試験体断面図

Session 3 建設・環境

県道 20 号線（泡瀬工区）橋梁整備事業における コンクリート構造物品質確保の取り組みについて(その 2)

中部土木事務所 中城湾港建設現場事務所 主任技師 小島 健太郎
○主 任 恩河 大貴

1. はじめに

県道 20 号線（泡瀬工区）橋梁整備事業(以下「泡瀬架橋」)は、沖縄本島中部東海岸に位置する沖縄市泡瀬から泡瀬地区人工島へのアクセス道路として延長 810m 片側 2 車線の海上架橋を新設する工事である。

泡瀬架橋では、これまでの離島架橋での厳しい塩害環境下での耐久性確保のための対策と同様に塗装鉄筋、ポリエチレンシースやフライアッシュコンクリート(以下「FAC」)など高耐久の材料を使用している。

前回の報告では、海上架橋における 100 年耐久の確保のため、高耐久の材料の使用と併せて施工品質の向上を目的としたコンクリート施工の取り組みについて報告したところである。

泡瀬架橋の下部工は P1～P6 が壁式橋脚、P7～P17 が 2 柱式橋脚となっている。

今回は、これまで 10 基の下部工での取り組みから確認された施工時のコンクリートの不具合と改善への取り組み、泡瀬架橋におけるコンクリート品質向上のための具体的な方法の提案について述べる。



図 1 位置図

道路規格	第 4 種第 1 級
設計速度	60 km/h
設計荷重	B 活荷重
橋長	L=810.0m (142.750m+667.250m)
有効幅員	歩道3.500m+車道7.250m+歩道3.500m
塩害対策区分	A地域-S区分
上部工形式	ポストテンション方式PC連結中空床板桁 (A1～P6) PC12径間連続箱桁 (P6～A2)
下部工形式	逆 T 式橋台(A1,A2) 壁式橋脚(P1～P6), 二柱式橋脚(P7～P17)
基礎工形式	鋼管杭φ1100(P1～P9,P14～P17), φ1000(A1) 直接基礎(P10～P13)

図 2 橋梁諸元

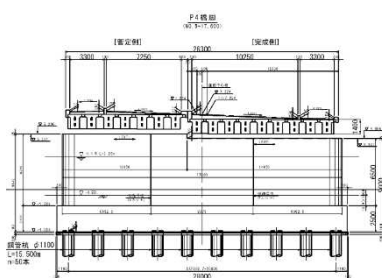


図 3 壁式橋脚(P4 下部工)

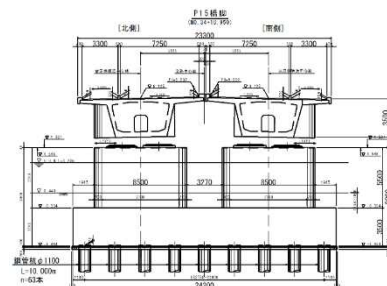


図 4 二柱式橋脚(P15 下部工)

キーワード 協働 施工品質 締固め

連絡先 〒904-2162 沖縄市海邦町 3-45 中部土木事務所 中城湾港建設現場事務所

E-mail : ongataik@pref.okinawa.lg.jp

2. コンクリート品質向上のための試行

泡瀬架橋では、平成 30 年度の下部工工事からコンクリート表層品質向上の取り組みを行っている。

2. 1 周知会

周知会は、過去の施工から良い事例を抽出し、打設前に周知会を開くことで、標準的な施工計画ではなく、泡瀬架橋に特化したものになるよう受発注者協働により行った。



写真1 周知会の状況

2. 2 施工状況把握チェックシート及び表層目視シート

「施工状況把握チェックシート」は、施工におけるコンクリート標準示方書の基本事項の実施状況を確認するためのものである。

「表層目視シート」は、表層の品質をできるだけ多くの施工関係者に目視評価するものである。

この2つを照らし合わせて施工状況と表層品質の関係を確認し、共有することで品質確保のための施工の工夫や改善を促すものである。

また、泡瀬架橋オリジナルの「養生状況確認シート」も活用した。これは、H30年度施工において脱型時期および養生を重視してなかった、もしくは、脱型後の養生が遅れた等の理由から温度応力ひび割れが発生したためである。

重要なことは、できるだけ多くの施工者と意見交換及び情報を共有し、発注者も積極的に関わり、協働していくことである。

図5 施工状況把握チェックシート

図6 目視評価シート

2. 3 品質確保システム

品質確保システムは、前述した3つのツールを活用し、施工品質の改善サイクル構築を図るものである。泡瀬架橋では、これらを受発注者協働で行うことにより施工のPDCAサイクルを徹底した取り組みを行っている。

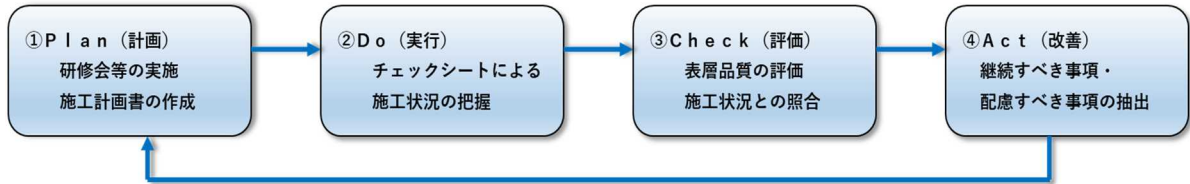


図7 品質確保システムフロー

3. 表層品質における不具合と改善

泡瀬架橋では、それぞれ施工者の異なる10基の下部工において、2. で述べた試行によるコンクリート品質の確保の取り組みを行ってきた。今回の試行で確認できた不具合とその要因、不具合に対する品質向上のための工夫や改善の取り組みについて述べる。

3. 1 沈みひび割れ

沈みひび割れ対策として、打設途中で沈下休みを行った。

沈みひび割れは、ブリーディング水の上昇によりコンクリートが沈下し、この沈下がセパレータコーンや鉄筋等で拘束されるために生じる。当初は粘性が高く、ブリーディング水の少ないFACを使用するため、沈みひび割れは発生しないものと考えていた。

断面の比較的小さい2柱式橋脚の柱部において、打上がり速度が速くなることから沈みひび割れが確認された。これは打上がり速度が早くなることから、打設ロットの途中で15分程度のコンクリートが自沈する時間を確保する沈下休みを行うことで、ひび割れが無くなった。

また、沈みひび割れは、2柱式橋脚の柱部に発生したがフーチングでは発生しなかった。これはフーチングのような打設範囲の広い構造物の場合、1層あたりの打設時間が比較的長くなり打ち重ね時間を要するため、沈下休みと同様な状況になったものと考えられる。

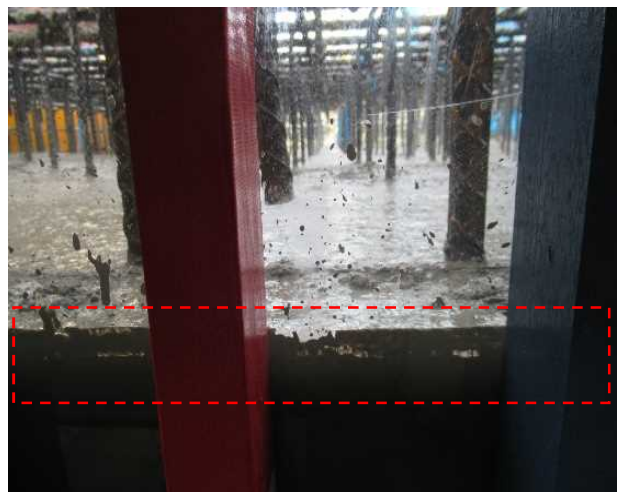


写真2 コンクリートの自沈

3. 2 表面気泡

表面気泡は、打込み時に巻き込んだ空気あるいはエントラップトエアがなくならずに残って、型枠に接するコンクリート表面に露出し、硬化したものである。

泡瀬架橋は、全体的な表面気泡の発生は非常に少なく良好であったが、打設ロットの仕上げ層になると局所的に比較的気泡の多い箇所が確認できた。これは、打ち重ね厚が変わることで、バイブレーターの挿入が深くなり、上層部分が締固めされなかったためである。仕上げ層を打ち込んだ後、左官仕上げが入る前に十分に締固めることや仕上げ層の打ち重ね高さを考慮したバイブレーターの挿入深さにした。また、かぶり部分にバイブレーターを挿入して丁寧に締固めることが気泡の抑制に非常に有効であることがわかった。バイブレーターの振動部の長さを勘案して、打ち込み高さは 30 cm とすることや作業員の疲れによる締固め不足を避けるための写真－4 のような足場の工夫なども有効である。



写真3 かぶり部の締固め状況



写真4 2段式足場による締固め

3. 3 打ち重ね線

打ち重ね線は、締固め不良や打ち重ね時間間隔が長くなることにより、不連続面が発生するものであり、コンクリートが硬化して打ち重ねた場合は、コールドジョイントとなる。打ち重ねの不良は、不連続性による構造上の欠陥だけでなく、劣化因子の侵入による内部鋼材の腐食となる。

打ち重ね線は、バイブレーターによる締め固め時間が短いことや、下層に挿入できてない場合に発生する。泡瀬架橋下部工では、打ち重ね不良は確認され

 A photograph of a construction site showing a green board with a table of data for managing the timing of concrete pouring and vibration. The table lists 10 rows of data, including start and end times, target times, and vibration depths.

LAP	開始 時間	完了 時間	目標 時間	打 込 深 さ
1	8:00 10:15	8:20 10:50	25分 40分	25cm
2	8:25 10:40	9:10 11:30	50分 40分	50cm
3	9:15 11:35	10:00 12:00	65分 38分	50cm
4	10:20 12:25	11:05 13:08	50分 40分	50cm
5	11:10 13:40	11:55	50分	50cm
6	12:00	12:45	50分	50cm
7	13:05	13:50	65分	50cm
8	13:55	14:40	50分	50cm
9	14:45	15:30	50分	40cm
10	15:35	16:05	30分	10cm

写真5 打ち込みの時間管理

なかったがバイブレーターの挿入時間の違いにより、細粒分が表面付近に集まってできる模様が発生した。

締固めによる表層品質の違いは、バイブレーターの挿入時間や深さの違いによるものと考えられた。この要因の1つとして、打設面が水平でないとバイブレーターの挿入深さや締固めの範囲が一定でなくなることが確認された。



写真6 かぶりバイブレーターによる締固



写真7 打設高さ確認

3. 4 ノロ漏れ

ノロ漏れは、型枠同士の継目や既設コンクリートと型枠の継目の隙間からセメントペースが漏れることをいう。ノロ漏れした部分は、豆板が発生することから塩害などの劣化因子の侵入による耐久性の低下が生じる。

型枠継目からのノロ漏れを防ぐためには、隙間を無くせばいいことから、ノロ漏れ防止テープを貼ることや、モルタルで目止めをすることで十分効果が出た。また、外部振動機により型枠の継目に長時間挿入するとノロ漏れが発生しやすくなることから、木槌によるたたきが良いことがわかった。外部振動機も内部振動機と同様に短いピッチで締固めることが重要である。

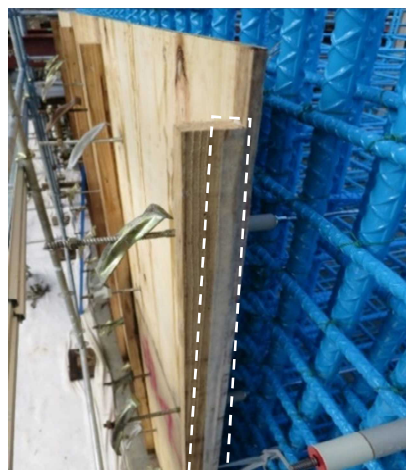


写真8 ノロ漏れテープ施工状況



写真9 境界のモルタルによる目止め

3. 5 砂すじ

砂すじは、水セメント比の大きいコンクリートや単位水量が多いコンクリート等で発生しやすく、特にブリーディング水を丁寧に除去しない場合に発生する。FACは比

較的ブリーディング水が少ないことから、砂すじの発生はほとんど見られなかった。

しかしながら、フーチング部は打設面が広いことから、打ち重ね時間が長くなることで自沈しブリーディング水がでることや降雨が型枠面に溜まることがあったがこまめに除去することで砂すじの発生はあまり見られなかった。また、締固めの時にバイブレーターの引上げ速度が速い場合にも発生することから、ゆっくり引き上げることが重要である。



写真10 ブリーディング水の除去

3. 6 温度ひび割れ

マスコンクリートとなるフーチングにおいて、締切矢板内の切梁や火打下はバイブレーターの挿入が困難であることから締固め不足による温度ひび割れの発生が見られた。また、養生が品質にどういふ影響がでるか検証した結果、型枠存置期間を長くすること。また、脱型後速やかに養生することやビニールシート等による保温、風対策を行うことでひび割れは軽減されることがわかった。

県道20号線(池田工区)橋脚整備工事 コンクリート表層品質確保
橋脚品質確保(表層)における養生方法

Ver2.0(191108)

工事名: 県道20号線(池田工区)橋脚整備工事(P8下路工)

1. コンクリート打設および養生日		打設日	打設時 気象・気温	養生日	養生時 気象・気温	養生日数
① フーチング	令和 2 年 12 月 28 日	晴	20℃	令和 2 年 1 月 26 日	晴	29日間
(二柱式橋脚柱)						
② 11.0t	暫定側	令和 2 年 2 月 4 日	晴 23℃	令和 2 年 2 月 12 日	晴 20℃	8日間
② 11.0t	完成側	令和 2 年 1 月 24 日	晴 25℃	令和 2 年 2 月 7 日	晴 19℃	14日間
③ 11.0t	暫定側	令和 年 月 日		令和 年 月 日		
③ 11.0t	完成側	令和 年 月 日		令和 年 月 日		
(壁式橋脚)						
② 11.0t		令和 年 月 日		令和 年 月 日		
③ 11.0t		令和 年 月 日		令和 年 月 日		

※入上り可能な範囲で養生する。

3. 養生方法(養生期)

① フーチング

打設後: 打設後含浸養生期数布、養生マット・型枠による防水
養生: 物になし
その他: 天端両側面をブルーシートで囲い

(二柱式橋脚柱)

打設後: 打設後含浸養生期数布、養生マット・型枠による防水
養生: ブルーシートで囲い
その他: 物になし

② 11.0t

打設後: 打設後含浸養生期数布、養生マット・型枠による防水
養生: ブルーシートで囲い
その他: 物になし

図8 養生状況確認シート

ただし、断面が狭く、幅の広い壁式橋脚では、養生のみの対策では補修不要な温度ひび割れの発生を避けることが課題である。

3-7. その他

打設時に型枠に付着したモルタル分は、打ち上がる前に硬化して型枠についた異物となり、そのまま打設すると脱型時に砂すじ状の模様(写真11)ができることがあるため、付着したモルタル分はスポンジなどで拭き取る事が有効である。

ただし、強く拭き取り過ぎると、剥離剤も拭き取ってしまう可能性があり、剥離剤が除去された型枠部分は気泡が残りやすくなるので注意が必要である。



写真11 砂すじの模様

4. 打設計画における品質確保

泡瀬架橋の下部工は、仮締切内での施工となり、切梁や火打ち梁が打設の支障となる。特に最大約1,600m³のコンクリート打設となるフーチングは横移動をさけるため、筒先の移動を多くする必要があるが、火打ち梁があることで下部への筒先挿入が困難となり、型枠から離れた箇所からの打込みや締固め間隔が確保できないことによる温度ひび割れや打ち重ね線状の模様が発生した。このことから打設前には十分な施工計画を立て、火打ち梁や切り梁下の打設方法を検討するとともに、設計段階から仮設材の配置等の配慮が重要であるとわかった。また、フーチング打設によく見られたが、ブリーディング水が型枠面へ流れ込み、かぶり部分の水量が多くなることから、耐久性の低い構造物となることがある。このことから型枠側を先に打設してブリーディング水を中央部で処理することによりかぶり部分の耐久性を確保できるのではないかと考える。



写真12 モルタルの拭き取り状況



写真13 火打ち直下での施工(遠景)



写真14 火打ち直下での施工(近景)

5. 泡瀬架橋で推奨する表層品質確保のための施工方法

これまでのコンクリート表層品質確保のための取り組みから泡瀬架橋の現場条件で推奨する施工方法を検討した。

- ①断面が小さく打ち上がり高さが高い場合は、沈下休みをとる。
- ②かぶり部分へのバイブレーター挿入。ただし、70mmなどの場合はバイブレーター径に配慮すること。
- ③ノロ漏れ防止テープを型枠接合面の両側に貼る。
- ④フーチングのような広い面積での施工の場合は、各層の打ち上がりをほぼ水平にするための標示等による打ち重ね厚の管理。
- ⑤型枠をブルーシート等で覆うなどの保温対策と脱型後の長期養生の確保。
- ⑥締固め方法としてかぶり仕上げ層の締固め方法が重要なことから、打ち上がり高さを30cmとすること。

例えば、1層が50cmの場合、図9のように2回に分けて締固めをすると時間がかかるが、1層が30cmだと、打ち込みと打ち重ね時間に余裕がもてるため短いピッチで締固めができることや、急変な天候やトラブルが発生した場合でも対応が可能になる。

全工程において、コンクリート標準示方書の基本事項で丁寧に作業を行うことが最も重要で、打設に関わる全員がこの基本事項を遵守することができれば、特別な工法をせずに高耐久性の品質が得られると考える。

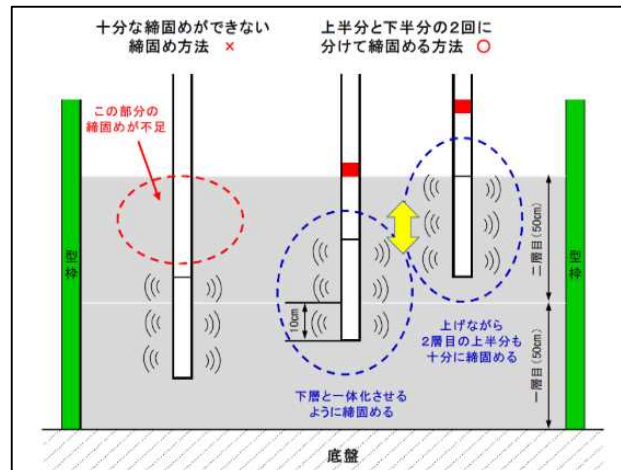


図9 締固め方法

6. 今後の課題

今回の試行では、泡瀬架橋に関わったコンクリート工場から施工の下請けまでの工事関係者に品質確保のための協働ができてきた。

今後は、今回の取り組みに関わった全員が泡瀬架橋以外の現場で同様な品質確保を広めていくことが期待できる。

また、下部工では、施工期間の制限から冬季打設のみであったが、上部工は通年の打設が想定される。上部工で50N/mm²の高強度FACを使用することから、暑中コンクリート対策が特に重要と考える。

7. おわりに

これまでに実施した10基の取り組みにおいて、多種多様な施工事例を確認できたことは、今後の施工品質に繋がる良い機会となった。

泡瀬架橋での100年供用のための1日の丁寧な打設をしたことで、施工者が他の構造物においても同様の取り組みをすることや、発注者にも共有していくことで、コンクリート構造物における施工品質の向上が強化されることを期待する。



写真15 施工状況写真(令和2年8月)

県道 20 号線泡瀬連絡橋上部工外割りフライアッシュコンクリートの配合検討

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

県道 20 号線（泡瀬工区）橋梁（以下、「泡瀬連絡橋」）は、沖縄県土木建築部中部土木事務所中城湾港建設現場事務所が整備が泡瀬地区開発事業で整備する人工島と沖縄本島東海岸を結ぶ橋長 810m の海上橋梁である。図-1 に泡瀬連絡橋の位置図、表-1 に橋梁諸元を示す。

ここで、沖縄県は道路橋示方書で定める塩害の影響地域区分において、日本で唯一県内全域が地域区分「A」と定められ、海上橋は影響が激しい対策区分「S」とされている。このため、泡瀬連絡橋では、塩害対策としてエポキシ樹脂塗装鉄筋・エポキシ樹脂 PC 鋼材などの高耐久材料に加えて、フライアッシュコンクリート（以下、「FAC」）を「沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの配合及び施工指針（第 1 回改訂）」（令和元年 5 月、沖縄県土木建築部）¹⁾（以下、「FAC 指針」）に則り、上・下部工に採用している。表-2 は、泡瀬連絡橋の部材別の FAC 配合タイプと耐久性劣化対策である。

同表から、下部工は、海上橋である事、アルカリシリカ反応（以下、「ASR」）発生の可能性がある沖縄県新川沖産海砂（以下、「海砂」）を用いる事およびマスコンクリートである事から、塩害・ASR・温度応力の抑制を目的に「内割り＋外割り配合タイプ」を採用している。

上部工は、ASR 対策として細骨材に海砂を用いず、本部産石灰岩砕砂（以下、「砕砂」）100%としている。しかし、砕砂は形状が歪なため、流動性の低下が懸念されることから、ワーカビリティを確保するため砕砂の一部をフライアッシュ（以下、「FA」）と置き換える「外割り配合タイプ」（以下、「外割り FAC」）としている。

本稿では、令和 2 年度から製作開始を予定している上部工に用いる 50N/mm² 外割り FAC の配合検討内容について報告する。



図-1 泡瀬連絡橋位置図

表-1 橋梁諸元

路線名	一般県道20号線
橋 長	810m
幅 員	23.300m～24.461m（4車線）
道路規格	第4種第1級（V＝60km）
下部工形式	逆T式橋台（A1、A2） 壁式橋脚（P1～P6） 二柱式橋脚（P7～P17）
上部工形式	（北側）ボーステンション方式PC6径間 連結中空床版桁橋 ＋PC12径間連続箱桁橋 （南側）ボーステンション方式PC4径間 連結中空床版桁橋 ＋ボーステンション方式PC単純 中空床版橋（2連） ＋PC12径間連続箱桁橋

表-2 部材別の FAC 配合タイプ

部材	設計基準強度	FAC指針で示される FACの配合タイプ	耐久性劣化対策
下部工	30 N/mm ²	内割り＋外割り配合タイプ <FA置換量> ・内割り：セメント置換20% ・外割り：細骨材一部置換 ※FA総量は100kg/m ³ 以内	塩害 ASR 温度応力抑制 ※細骨材は（海砂＋砕砂）
上部工	50 N/mm ²	外割り配合タイプ <FA置換量> ・細骨材の3～5%置換	ワーカビリティの確保 ※細骨材は砕砂100%

2. 外割り FAC

外割り FAC は、プレキャスト PC 桁や PC セグメント桁など高強度かつ脱型・吊り上げ移動などの早期強度が必要な構造物を対象とした配合である。

キーワード フライアッシュコンクリート、外割り配合、FA の置換率

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

FAC 指針では、砕砂に対する FA の置換率は生コンクリート製造工場（以下、「生コン工場」）で使用している砕砂の粗粒率（FM）や粒度分布を考慮して配合試験を行い、3～5%から最適置換率を決定することとしている。

3. 配合試験の概要

図-2 に配合試験から最適配合提案までの流れを示す。配合試験は、室内配合試験による基本配合（以下、「NC」）選定および外割り FAC の FA 置換率決定後、得られた配合を用いて実際の生コン工場やアジテータ車を用いた実機試験において性状を確認するとともに、実際に打設を行って施工性を確認し、最適配合を提案するものである。

4. 配合試験結果

4. 1 室内配合試験

(1) 基本配合の設定

泡瀬連絡橋上部工の設計基準強度は 50N/mm^2 である。表-3 に工程上の要求強度を示す。

ここで、泡瀬連絡橋上部工では 8 社の生コン工場から出荷が予定されていたが、これらの工場には設計基準強度 50N/mm^2 の JIS 普通コンクリート標準配合で、表-3 に示す若材齢の強度が得られる配合がなかった。このため、基本配合条件の設定とそれを満足する NC を決定する必要がある。

NC の検討にあたり、出荷予定の生コン工場において使用している砕砂の粗粒率（FM）を確認した（表-4）。また、同表には泡瀬連絡橋の使用材料選定の参考とした沖縄都市モノレールコンクリート軌道桁（以下、「モノレール軌道桁」）に出荷した 3 工場の粗粒率も併せて示している。モノレール軌道桁では、I 工場（FM=2.90）の外割り FAC を用いて製作した桁は表層品質が良好であったのに対し、J 工場（FM=3.21）の外割り FAC ではハンチ部分に多くのあばたが生じ、K 工場（FM=3.11）の外割り FAC でも多少のあばたが発生した。この結果から、泡瀬連絡橋では表層品質の出来映えを考慮して FM=3.10 以下（A～D 工場）の砕砂を用いることとし、その中で最も粗粒率が高い D 工場（FM=3.09）の砕砂を選定した。



図-2 配合試験の流れ

表-3 工程上の要求強度

材齢	要求強度 (N/mm^2)	要求項目
17.5 時間	14	脱型強度
39 時間	35	横締め緊張強度
7 日	—	28日強度の参考値
28 日	50	設計基準強度
91 日	—	ボゾラン反応による強度増進の確認

表-4 出荷予定工場およびモノレール軌道桁の
砕砂の粗粒率（FM）

構造物	生コン工場	粗粒率(FM)	表層品質 (出来映え)
泡 瀬 連絡橋	A	2.98	
	B	2.98	
	C	3.06	
	D	3.09	
	E	3.12	
	F	3.16	
	G	3.34	
	H	3.35	
モノレール 軌道桁	I	2.90	良好
	J	3.21	多数あばた発生
	K	3.11	あばた発生

基本配合条件は、表-5 の考え方により、表-6 の NC 配合を決定した。なお、本配合試験は基本配合から検討する非 JIS コンクリートであるため、泡瀬連絡橋地区では凍害対策で規定されている空気量の規定値は不要と考え、規定なしとした。

(2) 外割り FAC 配合

外割り FAC 配合は、前出表-6 に示すとおり NC 配合の砕砂の 2～5%を FA に置換し、スランプおよび

空気量、強度等を比較した。結果を以下に示す。

1) スランプの経時変化

目標スランプ値は、 18 ± 2.5 cmであり、本配合試験では打設予定時間帯を 15～45 分と想定し、30 分後に目標を満足するように配合した。図-3 にスランプの経時変化を示し、各配合の特徴を以下に示す。

- ◆ NC : FA を配合していないため流動性が悪く、練直0分が21 cmでも、30分後には16 cm、60分後には10 cmとスランプロスが大きかった。
- ◆ 外割り FAC (2%) : NC とほぼ同じ経時を示し、想定される打設予定時間帯には目標スランプの範囲を外れていた。
- ◆ 外割り FAC (3%) : 練直0分の22 cmから、30分後は20 cm、60分後は15.5 cmとスランプロスが少なく、打設終わり時間まで目標スランプの範囲内にあった。
- ◆ 外割り FAC (4%) : 練直0分が21.5 cm、30分後には18.5 cmであったが、60分後には12.5 cmとなり、外割り3%と比べ若干スランプロスが大きかったが打設予定時間帯では概ね良好な性状であると判断できた。
- ◆ 外割り FAC (5%) : 2%と同様のスランプ経時変化を示し、打設予定時間帯には目標範囲を外れていた。また、本配合は粉体量が多いため、最も粘性が高かった。

2) 空気量の経時変化

本配合試験は、基本配合から独自で検討しているため、非 JIS コンクリートである。また、沖縄県は凍害対策の必要がないため、空気量は規定せず、AE 助剤も添加しないこととした。しかし、容積計算上は一定の空気量が必要となるため、AE 助剤を添加しなくても得られる空気量として、 $2.0 \pm 1.5\%$ を規定値と設定した。図-4 に室内配合試験における空気量の経時変化を示す。同図から各配合の空気量は全て規定値内にあり、経時変化もほぼ一定であることがわかった。

表-5 基本配合決定の流れと考え方

配合条件の 設定項目と流れ	配合決定の考え方	決定値
① 水セメント比(W/C)	同じ離島架橋である伊良部大橋上部工桁と同じ $50\text{N}/\text{mm}^2$ で、PCセグメント桁であることから伊良部大橋上部工のW/Cを参考とする	35 %
② スランプ (SL)	施工を考慮して決定する	18 cm
③ 単位水量 (W)	スランプ値およびモノレール軌道桁の施工例から勘案する	165 kg/m ³
④ 単位セメント量(C)	単位水量とW/Cから決定する	493 kg/m ³
⑤ 単位粗骨材量 (G)	生コンの嵩容積から勘案する	900 kg/m ³
⑥ 単位細骨材量 (S)	Gの値をベースに施工性を勘案して細骨材率 (S/a) を決め、Sを決定する	843 kg/m ³
⑦ 混和剤料 (AD)	①～⑥の単位量を用いて配合試験し、SLの経時変化等最適な施工性が得られる添加率を探る	$C \times 0.6 \%$

表-6 室内配合試験の配合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	水 W kg/m ³	セメ ント C kg/m ³	外割り FA kg/m ³	砕砂 S kg/m ³	砕石 G kg/m ³	高性能 AE 減水剤 (C×%)
NC					0	843		0.600
外FAC (2%)					17	824		0.700
外FAC (3%)					25	816		0.750
外FAC (4%)					34	806		0.725
外FAC (5%)					42	795		0.800

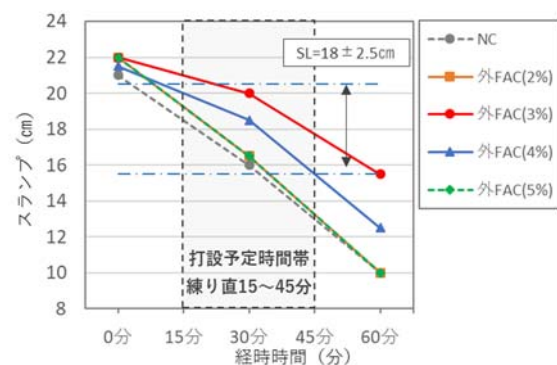


図-3 スランプの経時変化

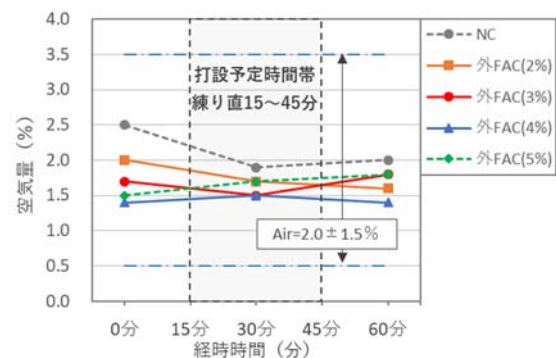


図-4 空気量の経時変化

3) 強度発現状況

圧縮強度試験に用いる供試体は、実施工における現場到着から受け入れ試験等を想定して、練り混ぜ後 30 分で供試体を採取した。図-5 に室内配合試験における圧縮強度試験結果を示す。

ここで、前出表-3 では、脱型強度を 17.5 時間で 14N/mm^2 としているが、同図では 14 時間の試験結果がある。これは、検討当初は設計で 14 時間とされていたためである。しかし、試験直後に脱型時間が 17.5 時間に変更となったため、NC と外割り FAC (3%) の予備供試体を用いて 17.5 時間強度試験を実施し、脱型強度を満足することを確認した。また、39 時間の横締め緊張強度および設計基準強度も全て満足することも確認した。

材齢 28 日の圧縮強度試験時には静弾性係数も測定した。図-6 に圧縮強度と静弾性係数の関係図を示す。同図には土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕(2017 年度制定) 2) に示される標準的なコンクリートにおける両者の関係(土木学会式)も折れ線グラフで示している。同図から室内配合試験を行った全ての配合で土木学会式を十分満足していることが確認できた。

4) 室内配合試験における最適配合の選定

室内配合試験の結果を以下のとおりまとめる。

- スランプの経時変化では、外割り FAC (3%) が最も良く、次いで外割り FAC (4%) であった。外割り FAC (2%) と外割り FAC (5%) はスランプロスが大きかった。
- 空気量の経時変化は、各配合ともロスはいくらか同様の傾向であった。
- 強度発現では、各配合とも工程上要求される強度を満足していた。

これらの結果から、室内配合試験では外割り FAC (3%) と外割り FAC (4%) の 2 配合を最適配合とし、これに NC を加えた 3 配合で実機配合試験を行うこととした。

4. 2 実機配合試験

実機配合試験は、使用材料を選定した D 工場において、室内配合試験で決定した外割り FAC (3%) と外割り FAC (4%) の 2 配合に NC を加えた 3 配合を

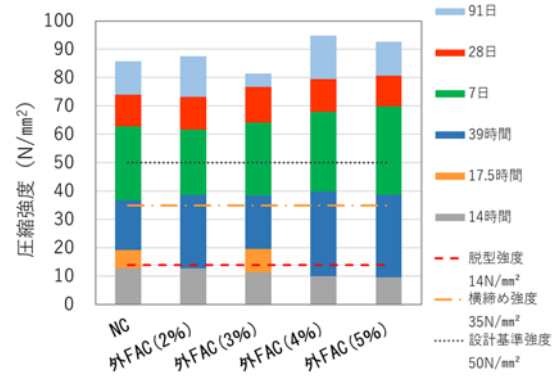


図-5 圧縮強度試験結果

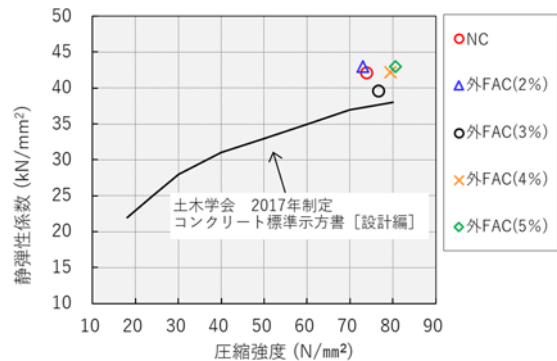


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係 (σ28)

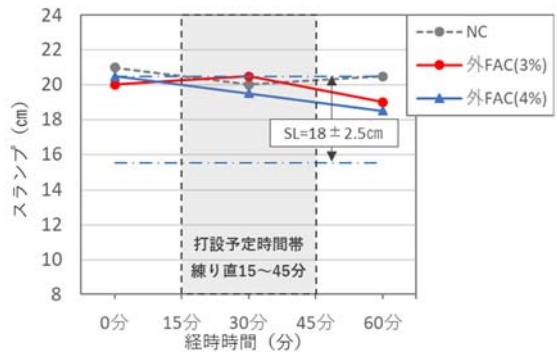


図-7 スランプの経時変化

用いて行った。試験は、室内配合試験と同様に練直 0 分、30 分、60 分のスランプおよび空気量の経時変化や性状確認、工程上で要求される強度発現状況等の確認を行った。実機配合試験結果を以下に示す。

(1) スランプの経時変化

図-7 に実機配合試験におけるスランプの経時変化を示す。同図から NC、外割り FAC (3%)、外割り FAC (4%) とともに打設予定時間帯の 15~45 分に規定値範囲 ($18 \pm 2.5\text{ cm}$) にあり、スランプロスが殆どないことを確認した。なお、スランプが上限値に近い値となったのは、実機配合試験時の外気温が室内配合試験の室温と同等で、多量に練る実機のほうが

スランプは大きく出たためである。また、夏季の高気温時にはスランプが低下しやすいことから、高性能 AE 減水剤を標準型から遅延型に変更するため、このスランプ経時を確認しておくことで、夏季の打設についても十分対応可能と考えられる。

(2) 空気量の経時変化

空気量は、室内配合試験で容積計算上 2.0% としていたが、D 工場から実機練りでは空気の巻き込み増加を考慮し、3.0% が提案されたため、規定値を $3.0 \pm 1.5\%$ として試験を行った。図-8 に空気量の経時変化を示す。同図から打設予定時間帯の 15～45 分の経時変化は殆ど無く、規定値範囲内にあることを確認した。

(3) 強度発現状況

実機配合試験においても現場到着から受け入れ試験を想定して、練り混ぜ後 30 分に供試体を採取した。図-9 に圧縮強度試験結果を示す。この結果から、全ての配合において所定の要求強度を満足することが確認された。

また、室内配合試験と同様に材齢 28 日の圧縮強度試験時に静弾性係数も測定した。結果を図-10 に示す。実機配合試験においても、両者の関係は土木学会式を十分満足していることが確認できた。

4. 3 打設試験

打設試験は、実施工を想定し、実構造物と同サイズの上部工セグメント打設試験体を用いて行った。写真-1 は打設試験体と打設状況である。打設試験では、外割り FAC (3%) と外割り FAC (4%) の 2 配合を D 工場から交互に出荷し、図-11 に示すように断面の左右半分ずつに打設し、鉄筋間への入り具合、締固めやすさ、仕上げやすさなど施工性の確認を行った。また、脱型後にコンクリート表層品質の確認も行った。打設試験で確認できた内容を以下に示す。

(1) スランプの確認

表-7 に現場受け入れ時のスランプ試験結果を示す。

外割り FAC (3%) の現場着のスランプは、20.0～20.5 cm と安定していた。また、2 台目の運搬車では、現場到着から 30 分経過後にもスランプの確認を行ったところ、20.0 cm とスランプロスは少なかった。

一方、外割り FAC (4%) は、現場着が 19.0～20.5

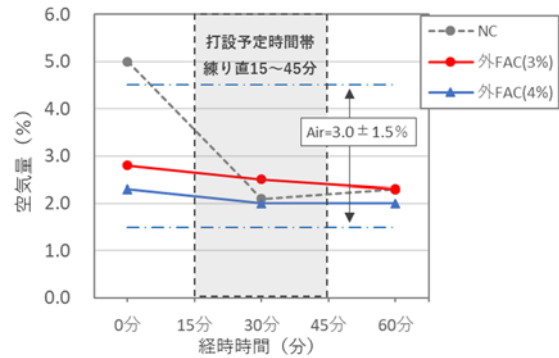


図-8 空気量の経時変化

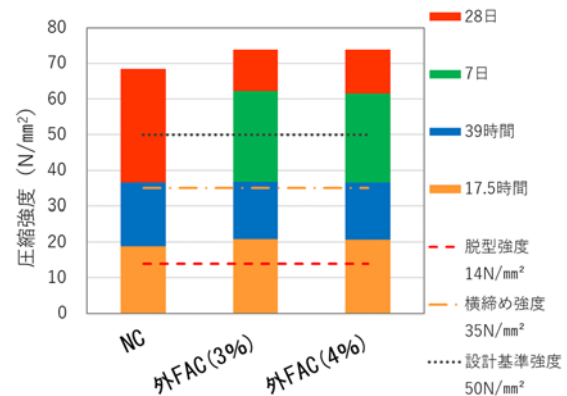


図-9 圧縮強度試験結果

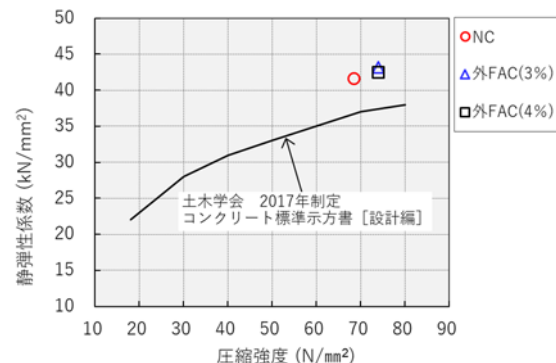


図-10 強度圧縮強度と静弾性係数の関係 (σ28)



写真-1 打設試験体および打設状況

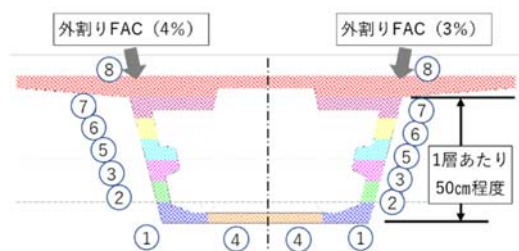


図-11 打設方法

cmと外割り FAC(3%)と比べるとやや変動していた。
2 台目の 30 分経過後のスランブも 18.0 cm となり、外
割り FAC (3%) に比べるとスランブロスしていた。

(2) 施工性の確認

FAC は、普通コンクリートと比べて粉体量が多くなるため、やや粘性が高いという FAC の特徴的な性状がある。これを踏まえて確認できた施工性および作業員らのヒアリング結果を以下に示す。

- ◆ 外割り FAC (3%) は、やや粘性が高いと感じられたが、良好なワーカビリティが得られ、特に問題なく打設できていた。仕上げについては、表面仕上補助剤を用いたため、FAC の材料特性などは感じられなかった。
- ◆ 外割り FAC (4%) では、打設当初は打設しやすいと感じられたが、2 台目以降は外割り FAC (3%) より粘性が高く、ワーカビリティがやや劣っていると感じられた。仕上げについては、外割り FAC (3%) と同様に表面仕上補助剤を使用したので問題なかった。

(3) コンクリート表層品質状況の確認

脱型後のコンクリート表層品質は、外割り FAC (3%) および外割り FAC (4%) とともに充填不足は認められず、表層状況は概ね良好であった。

この他、バイブレータによる締固め不足と考えられる沈下ひび割れが数カ所確認され、設計上気泡が抜けにくい箇所での表面気泡も確認されたが、これらは実施工においてバイブレータの挿入深さや時間など打設方法を工夫することで改善もしくは軽減できるものと考えられた。

(4) 実機試験における最適配合の選定

実機試験を行った 2 配合の打設性状や仕上げ性状、強度発現に加え、打設後の表層品質状況を総合的に鑑みると、外割り FAC (3%) が最適配合であると考えられた。

5. まとめ

本報告では、泡瀬連絡橋上部工桁 50N/mm² の外割り FAC の最適配合の検討を行った。以下に本報告の結果をまとめる。

- 1) 室内配合試験は、泡瀬連絡橋で出荷が予定されている D 工場の材料を用いて、砕砂 100%

表-7 打設試験におけるスランブ測定結果

配合	スランブ (cm)				
	1台目	2台目		3台目	4台目
	0分	0分	30分	0分	0分
外FAC(3%)	20.0	20.5	20.0	20.0	20.0
外FAC(4%)	20.5	20.0	18.0	19.0	20.0

の新たな基本配合 NC を検討した。

- 2) 室内配合試験において、砕砂の一部を FA と置換した配合で、スランブ、空気量、施工性などの経時変化を確認した結果、外割り FAC (3%) が最も良く、次いで外割り FAC (4%) が良いことが確認できた。
- 3) 室内配合試験で確認した 2 配合を用いて、実機配合試験を行った結果、外割り FAC (3%) と外割り FAC (4%) のスランブおよび空気量の経時変化、強度発現に差は無く、両者とも良好であった。
- 4) 実機配合試験で確認した 2 配合を用いて、打設試験を行った結果、脱型後の表層品質状況は同程度であったが、外割り FAC (3%) の方がスランブの安定性、施工性ともに外割り FAC (4%) より良いことが確認された。
- 5) 以上の結果から、泡瀬連絡橋上部工桁における最適配合は「外割り FAC (3%)」であると考え、本配合を提案した。

謝辞

本配合検討では、沖縄県土木建築部中部土木事務所中城湾港建設現場事務所の皆様にご協力を頂いた。各種試験では、沖縄県生コンクリート工業組合中南部試験所、(株)山城生コンクリート工業中部工場およびコーアツ工業(株)・沖縄ピーシー(株)特定建設工事共同企業体の皆様にご協力を頂いた。また、本配合検討ならびに本論文作成執筆には、アール・アンド・エー代表風間洋氏にご指導を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 沖縄県土木建築部：沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの配合及び施工指針，2019.5
- 2) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，p43，2018.3

サトウキビバガスコンクリートの開発

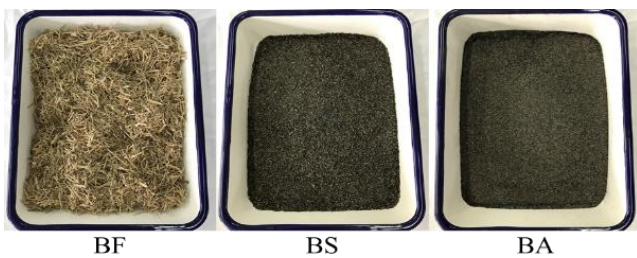
○京都大学大学院 Ribeiro Bruno、京都大学大学院 山本貴士、京都大学大学院 山敷庸亮

1. 初めに

製糖工程では残留物であるサトウキビバガスとバガス灰が発生する。後者はシリカが豊富で、ポゾラン反応性の可能性があり、コンクリートやモルタルへの混和材となる可能性がある。本研究は、サトウキビ残留物を分類後に混和材として使用しコンクリートの力学特性を検討した。

2. 実験概要

本実験で使用したサトウキビ残留物は沖縄県の製糖工場から入手したものである。バガスを、30℃の水に30分間浸した後に自然乾燥させた。バガスをふるいにかけ、5mmのふるいを通過し、2.5mmのふるいに残ったものをバガス繊維（BF、密度：0.71 g/cm³）とした。その後、含まれる糖分をできるだけ除去するため、BFを5%Ca(OH)₂の溶液に24時間浸漬し、アルカリ処理を行った。バガス灰は、2.5mmのふるいを通過し0.15mmのふるい



図ー1 分類後のサトウキビ残留物

残ったものをバガス砂（BS、密度：1.29 g/cm³）、0.15 mmのふるいを通過したものをバガスアッシュ（BA、密度：2.10 g/cm³）とした^{1,2)}。本研究で使用したBF、BSとBAを図ー1に示す。

コンクリートの配合を表ー1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³）を、細骨材には川砂（密度：2.57 g/cm³）、粗骨材には碎石（密度：2.57 g/cm³、Gmax：15 mm）を用いた。C配合は、水結合材比（W/B）45%の標準配合とした。BF2配合では、体積比2.0%のバガス繊維を使用し、細骨材代替とした。BS5配合では、細骨材の体積比として5.0%のバガス砂を使用し、細骨材代替とした。また、BA5+BF2とFA5+BF2配合供試体も作製した。これらでは、バガスアッシュとフライアッシュをそれぞれ細骨材の体積比として5.0%を代替した。バガス繊維は、BF2と同量の繊維を用いた。BA5+BF2とFA5+BF2のW/Bはそれぞれ43%、41%である。なお、WRAおよびAEAはそれぞれAE減水剤とAE助剤を示す。各配合に対して、圧縮強度試験（JIS A 1108）用のΦ100×200 mmの円柱供試体を、曲げ強度試験（JIS A 1106）用の100×100×400 mmの供試体を3体ずつ作製した。脱型後、水中養生を行い、材齢28日で試験を実施した。

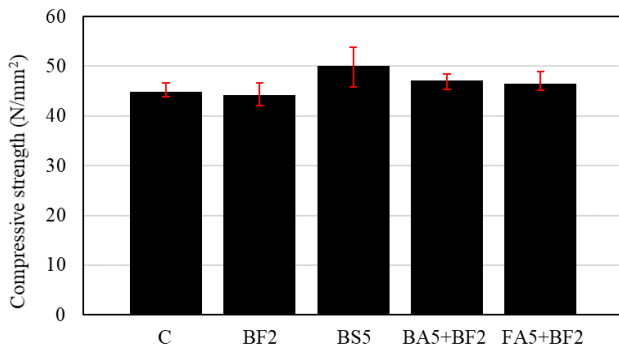
表ー1 コンクリート配合

Composites	Fiber (Vol. %)	W/B (%)	Unit (kg/m ³)								
			C	W	S	G	BF	BS	BA	FA	WRA
C	—	45	389	175	876	950	—	—	—	—	1.17
BF2	2				824		14	—	—	—	
BS5	—				832		—	22	—	—	
BA5+BF2	2	43			780		14	—	35	—	
FA5+BF2	2	41						—	—	39	

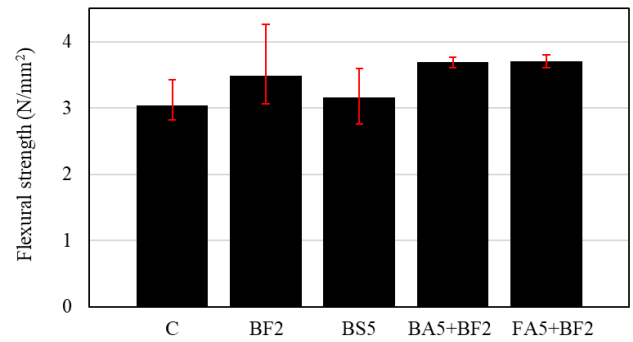
キーワード： サトウキビバガスコンクリート、バガス繊維、バガス砂、バガスアッシュ、力学特性

連絡先： 〒606-8306 京都市左京区吉田中阿達町1 京都大学大学院 総合生存学館

E-mail： ribeiro.bruno.57z@st.kyoto-u.ac.jp



図ー2 材令 28 日の圧縮強度



図ー3 材令 28 日の曲げ強度

3. 実験結果および考察

圧縮強度を図ー2 に示す。2%のバガス繊維を添加すると圧縮強度がやや低下した。コンクリート練混ぜ時に微細な気泡を同時に巻き込むことやバガス繊維に残留する糖分によってコンクリート硬化が遅れたことが原因と考えられる²⁾。一方、図ー2より、バガス砂、バガスアッシュやフライアッシュを添加した場合は圧縮強度が増加した。BS5 はバガス繊維を添加しておらず、バガスアッシュのポゾラン反応により圧縮強度が増加しつつある。BA5 とFA5 の圧縮強度の増加は BS5 より小さい。バガス繊維混入の影響を受けていると考えられる。なお、採取時期、製糖工場のボイラー種類や燃焼温度の違いによってバガス砂の品質のばらつきがあることを注意が必要である。

曲げ強度を図ー3 に示す。バガス繊維を添加している BF2、BA5+BF2 および FA5+BF2 の曲げ強度が、C および BS5 より大きい。バガス繊維を添加することによる架橋効果が、ひび割れ面の応力伝達を可能にし、応力を他断面へ再分配していると考えられる。また、図ー3 に示すように、BA5+BF2 および FA5+BF2 の曲げ強度は、BF2 より大きい。バガス繊維の効果に加え、ポゾラン反応により、C-S-H ゲルが形成され、繊維とセメントペーストの界面の空隙が埋められた可能性がある。それによって、繊維/セメントペースト界面の接触面が増加し、応力をより効果的に他断面へ再分配することができたと考えられる。

4. まとめ

一部の細骨材をサトウキビの残留物で代替することで、圧縮強度を保ちながら曲げ強度を増加させることのできる、環境に優しいコンクリートを開発することができた。本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

1. バガス繊維を添加したコンクリートの圧縮強度はやや低下した。しかし、バガスアッシュやフライアッシュのようなポゾラン反応物質を含む混和材を添加することで、圧縮強度は増加し、標準配合より大きくなった。
2. バガス繊維を添加したコンクリートの曲げ強度は、繊維なしの標準配合やバガス砂のみの配合よりも大きくなった。

5. 謝辞

サトウキビ残留物の取得に協力して下さった JA 沖縄とゆがふ製糖株式会社に感謝申し上げます。

6. 参考文献

1. Ribeiro, B.; Yamashiki, Y.; Yamamoto, T. A study on mechanical properties of mortar with sugarcane bagasse fiber and bagasse ash. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 22, 1844-1851 (2020).
2. Ribeiro, B.; Yamamoto, T.; Yamashiki, Y. A study on the reduction in hydration heat and thermal strain of concrete with addition of sugarcane bagasse fiber. *Materials* 13, 3005 (2020).

バイオマス発電所から排出される PKS 燃焼灰を有効利用したコンクリート製品向け配合の基礎的検討

琉球大学 ○池田季裕, 富山潤, 須田裕哉, (株) リュウクス 南出拓人, 上里尚也,
リウコン (株) 仲宗根晋也, 新城直樹

1. 研究の背景および目的

再生可能エネルギーとして、積極的活用が期待されている木質系バイオマス発電技術がある¹⁾。しかし、発電に伴い大量に発生する燃焼灰の処理に対する課題がある。現在その活用方法について研究が行われている²⁾が、限定的であり、多くは産業廃棄物として処理されるのが現状である。さらに、燃料である木質ペレットの原料種類や製造過程、または発電設備性能によって、排出される燃焼灰に高濃度な有害化学物質が含まれることも懸念されている。沖縄県うるま市内に2021年7月に運用開始が計画されている沖縄県内最大の木質系バイオマス発電施設(中城バイオマス発電所)が建設されている。この発電所は、パーム椰子柄(PKS)を主燃料とし定格出力約50MWを予定しており、年間5,000tのPKS燃焼灰(ボイラー型式「循環流動層」)が副産物として排出されることが試算されており、PKS燃焼灰の有効利用に対する検討が必要である。そこで本研究では、PKS燃焼灰(イーレックス(株)社より提供頂いた)を用いたコンクリート二次製品の実用化を目指した配合に対して強度発現特性、塩害抵抗性、安全性の確認について基礎的検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 PKS 燃焼灰

PKS燃焼灰は、PKSを燃料としたバイオマス発電所の発電過程で生じる燃焼灰である。表-1に本研究で使用したPKS燃焼灰の化学組成を示す。比較のために、一般的な石炭由来の石炭灰(以下、FAと称す)の値も示している。比較より Al_2O_3 およびCaOで大きくことなることから、反応性の検討が今後の課題の一つである。次に、写真-1に電子顕微鏡観察から得られたPKS燃焼灰の形状を示す。

写真-1 から PKS 燃焼灰は FA に比較し、形状が

FA のような球形ではないためボールベアリング効果はあまり期待できないと予想される。

表-1 PKS 燃焼灰の化学組成

使用材料	強熱減量	化学組成(mass%) (2018/3/19)								密度 cm ² /g	比表 面積 cm ² /g	フロー 値比 %
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl			
PKS	4.6	53.4	2.54	1.32	25.5	2.29	0.24	4.15	0.8	2.59	3360	93
FA	2.11	55.4	26.9	3.7	4.1	0.4	-	-	-	2.29	4300	108

PKS:PKS 燃焼灰, FA:石炭由来のフライアッシュ。FA の値は JIS II 種灰の一般的な値

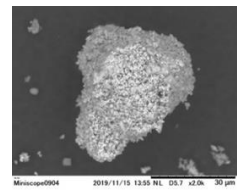
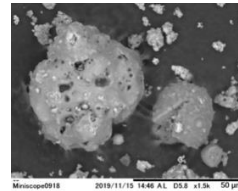


写真-1 PKS 燃焼灰 (電子顕微鏡写真)

2.2 コンクリート配合

本研究では、PKS燃焼灰を用いた環境負荷低減型コンクリート2次製品向け配合を検討しているため、細骨材の5%、10%をPKS燃焼灰で置換した外割配合とセメントの5%をPKS燃焼灰で置換した内割配合の3水準に対し強度発現特性(1日、7日、14日、28日、91日)を普通コンクリートと比較した。配合を表-1に示す。なお、工場製品のため空気量は規定せず、管理値として2%で配合計算している。スランブは12cmとした。また、各試験材齢まで水中養生を行なった。

表-2 コンクリート配合

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	内割 PKS	外割 PKS	S	G	AE
NC	36.0	43.0	160	445	-	-	774	1049	2.314
P1	36.0	43.0	160	445	-	38	735	1049	2.314
P2	36.0	43.0	160	445	-	76	696	1049	2.314
P3	36.0	43.0	160	423	22	-	774	1049	2.314

P1:PKS 外割 5%, P2:PKS 外割 10%, P3:内割 5%, W:水, C:セメント,
S:砕砂, G:砕石, AE:混和剤

2.3 試験概要

2.3.1 圧縮強度試験および静弾性係数試験

JISA 1108 および JISA 1149 に準じ、1 日、7 日、14 日、28 日、91 日材齢で圧縮強度試験および静弾性係数試験を行なった。

2.3.2 電気泳動試験による塩害抵抗性評価

塩害抵抗性として、電気泳動試験（非定常法）³⁾を用い、塩化物イオンの浸透深さを求め塩化物イオンの拡散係数を求めた。電気泳動試験（非定常法）の概要を図-1 に示す。試験は水中養生 28 日および 91 日まで実施した試験体について行なった。本報告では 28 日養生の結果を示す。

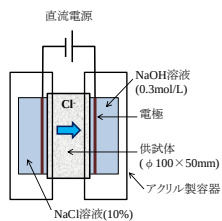


図-1 電気泳動試験概要（非定常法）

2.3.3 重金属類の溶出試験・含有試験

安全性の確認として、表-2 に示した配合に類似したモルタル試験を作製し、溶出しやすい六価クロム、セレン、鉛の溶出試験(環境省告示第 18 号)および含有試験(環境省告示第 19 号)を行なった。分析中のため、結果は発表時に行う予定である。

3. 結果および考察

3.1 圧縮試験および静弾性係数試験

図-2 および図-3 に圧縮強度試験、静弾性係数試験の結果をそれぞれ示す。これらの図から本検討ケースは、早期材齢に対し N と同等である。また、長期強度については、外割置換において N 以上の強度を示した。

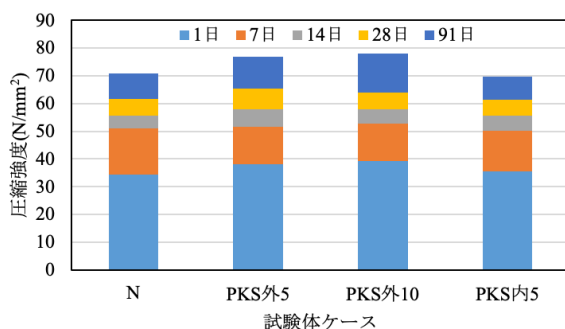


図-2 圧縮強度試験

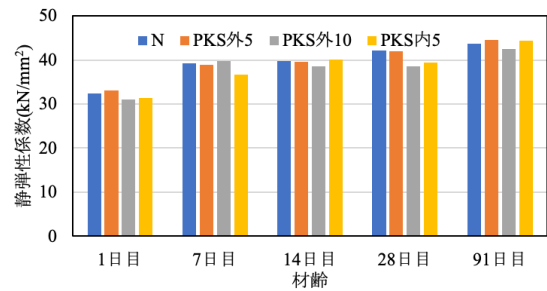


図-3 静弾性係数試験

3.2 電気泳動試験による塩害抵抗性評価

水中養生 28 日実施した試験体に対し、電気泳動試験を行なった結果を図-4 に示す。外割配合は、N に比較し、拡散係数が小さくなった。逆に内割配合は N に比較し、拡散係数が大きくなったが、これはポズラン反応が十分に進んでいないのが原因と考える。91 日水中養生で再検討する。

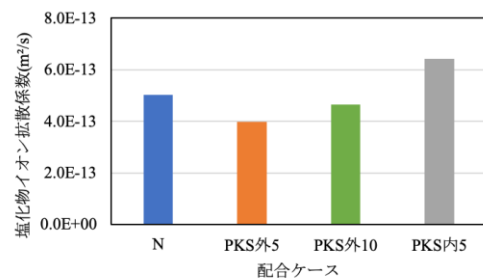


図-4 電気泳動試験（28 日水中養生）

5. まとめ

本研究で検討した PKS 燃焼灰を混和したコンクリート配合は、強度発現特性からコンクリート 2 次製品に使用可能であることが明らかとなった。今後も施工性、安全性、耐久性など検討を続ける。
謝辞：本研究を進めるにあたり、鹿児島大学山口明伸教授に貴重な資料をご提供頂いた。また、実験を遂行するにあたり本学技術部（環境建設班）に多大なご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本木質バイオマスエネルギー協会：<https://www.jwba.or.jp>
- 2) 高橋徹，他：木質系バイオマス燃焼灰の安全性評価および有効利用，
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jswmepac/19/0/19_0_208/_pdf
- 3) 中村英佑，水戸健介，古賀裕久：高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの塩性能の迅速評価手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.219-224，2018

竹富南航路整備事業における環境保全への取り組みについて

内閣府沖縄総合事務局 石垣港湾事務所 整備保全課 大城祥慎〇、前里尚

竹富南航路は沖縄県最南端の八重山諸島南西に位置する石西礁湖（サンゴ礁海域）の狭水路であり、従来は満潮時のみ利用可能な利便性の悪い航路であったが戦後復帰後の旅客・貨物需要増加や民生安定に資する定期船運行に必要な定時制と安全航行を確保する事を目的に開発保全航路として整備がされてきた。

同航路は世界有数のサンゴ礁海域の中で浚渫を行い整備されるため、その施工にあたっては周辺環境への配慮が求められており、本論では浚渫施工時の汚濁防止対策や環境監視について報告を行う。

1. はじめに

竹富南航路は従来から西表～石垣島とその間に位置する離島を結ぶ最短の航路として利用されてきた歴史があるが、従来の航路は水深や幅による影響で満潮時のみ利用可能な利便性の悪い水路であった。本土復帰以降の民生生活の向上や近年の観光需要の増加に備え、定期船や貨物の運行に際し、必要な水深や幅を確保するために整備が進められ、近年ではさらに利便性を高めるために事業化を行い、整備を進めている開発保全航路である。

竹富南航路の位置する石西礁湖は世界でも有数のサンゴ礁海域でもあり、それを背景とした漁業や観光等で利用される貴重な天然資源としての側面も持ち合わせており、石西礁湖内での施工は環境面に関して非常に厳しい制約を受けつつの施工となる。

本論ではそのような厳しい制約を受ける事業の中でどのような環境保全の取り組みを行ってきたかを紹介する。

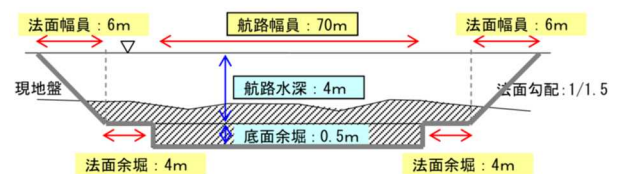


図 1.1 航路断面模式図（竹富島南部分）

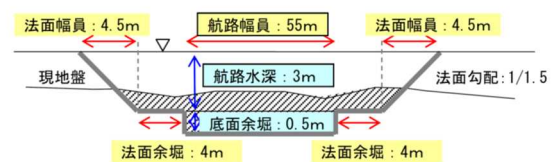


図 1 竹富南航路 断面図

2. 環境保全について

竹富南航路はサンゴ礁海域の中を浚渫し求められる航路幅と水深を確保する事を目的に施工を進めるが、その航路の位置設定に当たってはサンゴの個体数が少ない場所（サンゴ礁の切れ間等）を考慮して、施工にあたりサンゴ移設を極力行わなくても良いルートを検討し、周辺海域を利用する事業者や一般市民からの意見を取り入れた上で事業化を行った。

キーワード 開発保全航路、環境対策、サンゴ移設、モニタリング

〒907-0012 沖縄県石垣市美崎町 1-10 Tel.0980-82-4741

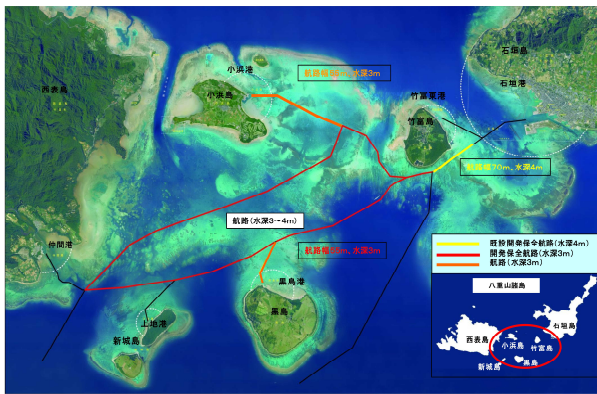


図1 竹富南航路ルート

施工にあたり移設が必要なサンゴについて、元の生息状況に近い海域を選定し移設作業を行い、その後のモニタリング調査を合わせて実施している。

また、浚渫工事にあたっては海底の底質状況にもよるが浚渫施工時に土砂に含まれる微細粒子が巻き上がり海中の濁度が悪化する事が多い。このような粒子は沈降するまで時間がかかり周囲の海域へ流出すると海底に生息するサンゴに降り積もりサンゴの生育に悪影響を与える懸念があるため、施工時に発生する濁度をどう低減するか、施工時の周辺海域への影響をどのように管理するかが問題となる。

3. サンゴ移設について

ルート設定時に行ったサンゴ調査によりサンゴの生息状況や生息箇所を把握し、航路上に生息し施工時に影響の出るサンゴについてサンゴ移設を行った。サンゴ移設の検討に当たってはサンゴの生息していた水深や生息箇所を参考に移設前の環境に極力近い条件の箇所を周辺海域から選定しサンゴ移設を実施した。

サンゴはデリケートな生物なため移設前と異なる環境に移設を行った場合、移設当初は良好であっても長く生育できる事は少なく、移設箇所の検討はサンゴ移設の中で非常に重要な作業の一つでもある。

また、サンゴ移設作業の際にもサンゴに損傷を

与えるような移設を行うと移設後の生育に支障が出るため丁寧な作業が求められる。

サンゴの種類により適切な移設方法も異なり基盤に固着する固着性サンゴであれば生育している基盤毎撤去を行い、移設先の基盤に水中ボンドを用いて固定を行い、基盤に固着しない枝状サンゴであれば移設先で枝状サンゴ同士を密接して移設し群集として波浪等の影響に耐えられるように移設を行うなど、サンゴ毎に異なる特性に対し移設後の生育や安定化に悪影響を及ぼさないように検討して実施を行っている。



サング移設概念図

4. 浚渫時の濁り対策について

浚渫に当たり発生する水質汚濁への対策として浚渫施工箇所の周囲に汚濁防止柵を二重に展開し周辺海域への濁度流出を防止する対策を講じている。



(写真 汚濁防止枠 展張状況)

基本的には上記の手法により水質汚濁の原因となる微細粒子は汚濁防止枠内に残留する事となるが、粒形が細かいため自然に沈降するまでにはかなりの時間を要し長時間航路に作業船舶が滞在する事になる事、沈降し海底に堆積した微細粒子が海流により巻き上げられ拡散する事で施工後に改めて水質汚濁を引き起こす可能性等が考慮されたため、施工後に水質汚濁が発生しない対策も含めて検討を行った。

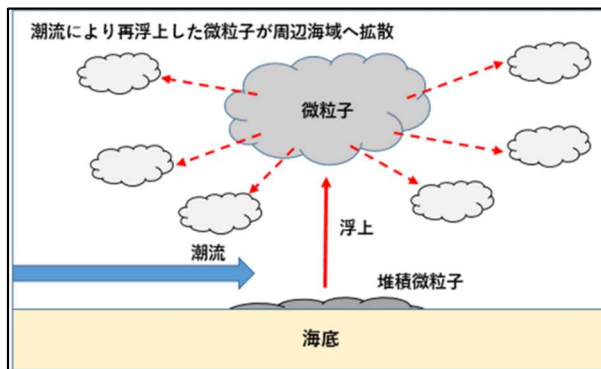


図 水質汚濁発生メカニズム (再浮上)

浚渫により発生する微細粒子への対策として台船上に鋼製の大型水槽を設置して汚濁防止枠内の微細粒子を含んだ海水をポンプで吸い上げ、吸い上げる過程で凝集剤を添加し水槽内で幾重にも循環を行い、微細粒子を取り除いた上澄みの海水のみを汚濁防止枠内に戻し、汚濁防止枠内の濁度が規定値以下になるまで継続して濁度低減に対応する。

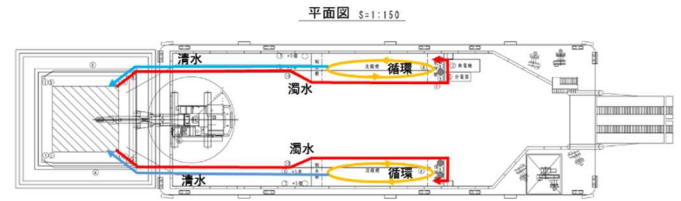
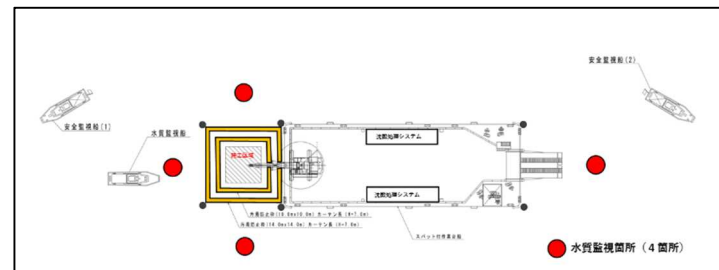


図. 沈殿処理システム概念図

また、汚濁防止枠の外では水質監視を行い周辺海域の濁度や水質に変化が無いかを施工中に確認を行い、変化がある場合は施工を一時中断し汚濁防止枠の外側からダイバーによる目視確認を行い汚濁防止膜の破損(岩礁等により破損していないか)や海底との接地面からの流出が無いを確認し、問題がある場合は補修を行い濁度対策を講じたうえで施工を再開する事としている。



施工状況 概念図

5. 移設後のモニタリング調査結果について

施工前に行った移設サンゴについて、最新のモニタリング調査の結果をご紹介します。

石西礁湖の移設サンゴについて平成28年以前までは移設サンゴの調査結果としては移設後の成長により概ね増加する傾向がみられてきており移設後の生育状況は良好だと判断されてきたが平成28年に発生した高水温により石西礁湖に生息していた天然サンゴ、移設サンゴで大規模な白化現象が確認され、その後はサンゴ被度が低下するなど白化現象の後も影響が継続して

見られてきた。

最新のサンゴ調査として令和元年度に行った調査では枝状サンゴではアナサンゴモドキ類が立体的に成長、固着サンゴではハナヤサイサンゴ等が成長しており被度は未だ低いが白化後に生残していた個体が成長している傾向が確認された。

また、サンゴを利用する生物についても調査を行っており、白化後の確認では生息種の大きな変化等は見られなかったものの生息数について減少する傾向がみられてきたが、上記のサンゴ調査に合わせた確認では回復傾向にある種とそうではない種が確認されている。

6. まとめ

竹富南航路整備事業にて施工時に浚渫により発生する濁度を軽減するために汚濁防止枠や濁水処理システム等の対策を講じて周辺環境に及ぼす影響を極力低減できるように対策を行った上で事業の実施を図っている。

また、施工時の水質監視や移設サンゴのモニタリング調査等を通じて周囲のサンゴ礁への影響も継続して調査を行い、環境負荷を極力低減した施工が出来ていると考える。

北部国道事務所の環境に配慮した 道路事業の取り組みについて

平敷 健太¹・高良 茂宏²

¹内閣府 沖縄総合事務局 北部国道事務所 調査課（〒905-0019 名護市大北4丁目28-34）

²内閣府 沖縄総合事務局 北部国道事務所 調査課（〒905-0019 名護市大北4丁目28-34）

沖縄県北部地域に位置している「やんばる」は、ヤンバルクイナなどの固有種を含む多様な小動物や植物が生息しており、今後、世界自然遺産への登録も目指している自然豊かな地域となっている。

北部国道事務所管内の国道58号は、海岸線に位置しており、オカガニなどの海岸部と内陸部を行き来する小動物が生息しており、道路横断中に車にひかれてしまう事故（ロードキル）が度々発生している。

これまで北部国道事務所では、貴重な小動物を保全する為のロードキル対策として、クイナトンネル、クイナフェンス、カニさんトンネルなどを実施している。

今回、北部国道事務所が実施している環境に配慮した道路事業の取り組みについて紹介する。

キーワード 小動物保全対策、ロードキル、道路事業

1. はじめに

沖縄県本島北部地域に位置している「やんばる」には、ヤンバルクイナやイボイモリ、リュウキュウヤマガメなどの固有種を含む多様な小動物や植物が生息しており、今後、世界自然遺産への登録も目指している自然豊かな地域となっている。

北部国道事務所管内は「やんばる」を含む、読谷村、うるま市の一部以北の8市町村（国頭村、大宜味村、名護市、宜野座村、恩納村、金武町、読谷村、うるま市）で構成されており、森林面積は管内全域で約59%、恩納村・金武町～国頭村に絞ると約70%を占めている。

北部国道事務所管内ではヤンバルクイナや、海岸部と内陸部を行き来するオカガニなどが道路横断中に車にひかれてしまう事故（ロードキル）が度々発生しており、小動物保全上の課題となっている。（写真-1）（写真-2）（写真-3）

ヤンバルクイナのロードキル件数は、平成26年の47件をピークに減少傾向にあるものの、依然として多く発生している状況にある。（表-1）

これらを背景とし北部国道事務所では、環境に配慮した道路事業を実施しており、本稿ではその取り組みの一部を紹介する。



写真-1 道路を横断するヤンバルクイナ



写真-2 ヤンバルクイナのロードキル状況

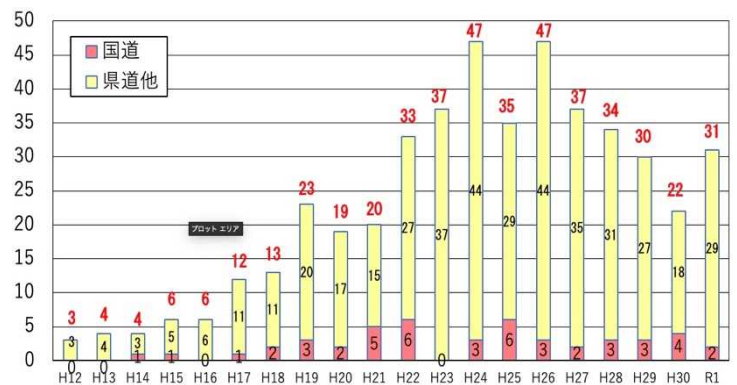


表-1 北部地区のヤンバルクイナのロードキル発生件数

2. 環境に配慮した道路事業の実施

北部国道事務所では、「小動物保全対策の手引き（案）」（平成20年2月）を策定している。

本手引きは、道路事業における環境配慮の考え方や、小動物の行動特性から、小動物保全対策技術を検討、整理した手引き（案）となっており、北部国道事務所では本手引を道路事業の立ち上げ時、工事着手前に活用し、自然環境に配慮した道路事業を実施している。

3. 小動物のロードキル対策

3-1. ヤンバルクイナのロードキル対策

北部国道事務所では、ヤンバルクイナのロードキルを未然に防ぐため、以下の対策を実施している。

(1) クイナフェンスの設置

ヤンバルクイナの道路進入防止対策としてクイナフェンスを設置した。クイナフェンスは高さ約1mで、緑色のプラスチック製角目ネットを使用しており、国道58号国頭村奥～辺戸間の6区間に延べ約3200m設置している。

クイナフェンスには、道路上に進入した個体が道路外へ退避できるように、開口部（ワンウェイゲート）を設けている。（図-2）（写真-3）（写真-4）

平成19年から令和元年までのヤンバルクイナの区間ごとの出現状況を図-3、図-4に示す。（図-3）（図-4）

クイナフェンス設置区間は、未設置区間やクイナフェンス設置後と比較し国道への進入や横断などが少ない状態で推移していることが確認できるため、クイナフェンスがヤンバルクイナの道路への進入防止効果が確認できる。



図-2 クイナフェンス設置位置図

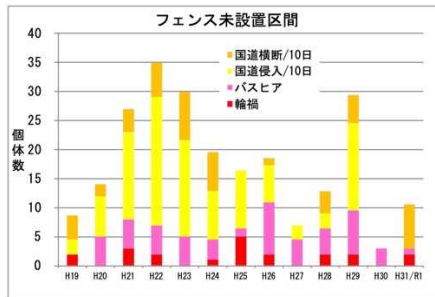


図-3 ヤンバルクイナの出現状況（フェンス未設置）

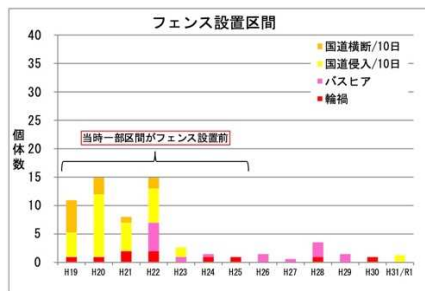


図-4 ヤンバルクイナの出現状況（フェンス設置）



写真-3 クイナフェンス設置状況



写真-4 ワンウェイゲート設置及びクイナの利用状況

(2) クイナトンネルの設置

クイナフェンスは、ヤンバルクイナの道路進入対策として一定の効果が期待できる一方で、自由な行動を阻害する可能性がある。そのため、ヤンバルクイナの移動分断対策として、道路下を横断する函渠（クイナトンネル）を国道58号3.8Kp付近に設置した。（写真-5）

平成29年の調査ではクイナトンネル周辺で751個体が確認され、うち、358個体（約48%）のクイナトンネルの利用が確認された。



写真-5 クイナトンネル設置及びクイナの利用状況

(3) その他の対策（クイナ標識、小動物保護型側溝）

その他の対策として、道路側溝にヤンバルクイナの雛やその他小動物が落下した場合に、側溝から脱出できるようにスロープのついた小動物保護型側溝の設置や、ドライバーの注意喚起としてクイナ標識も設置している。

（写真-6）



写真-6 小動物保護型側溝(左)のクイナ標識(右)設置状況



写真-8 カニ渡りネットの設置状況

3-2. オカガニ等のロードキル対策

オカガニ類やオカヤドカリ類（以下、オカガニ等）は、海岸部と内陸部を行き来しており、海岸沿いに位置し護岸がある国道により、移動を阻害する可能性や、国道を横断する際に事故に遭遇する可能性がある。そのため、オカガニ等の移動阻害及びロードキル対策として、以下を実施している。

（1）カニさんトンネルの設置

国頭村座津式地区、宇嘉地区および大宜味村謝名城地区の3箇所にオカガニ等の道路横断を可能とするため道路下を横断する函渠を設置した。（カニさんトンネル）（写真-7）（図-5）

カニさんトンネルは、陸生甲殻類の生態を考慮した、誘導壁を設置しており、カニ・オカヤドカリ類等の利用を促した構造としている。（写真-7）

平成28年7月～9月のカニさんトンネルの利用状況調査で、ビデオ観測578個体、目視観測で208個体、合わせて786個体の利用が確認された。



写真-7 カニさんトンネルの設置状況

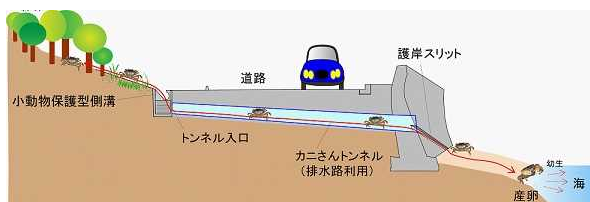


図-5 カニさんトンネルの横断イメージ図

（2）その他の対策

オカガニ等の海岸部と内陸部の移動阻害対策として、カニが護岸を登れるようにするカニ渡りネットや、カニさんトンネルへの誘導機能も持つ護岸スリットを設置した。（写真-8）（写真-9）



写真-9 護岸スリットの設置状況

3-3. ウミガメのロードキル対策

平成27年8月、大宜味村喜如嘉の海岸に産卵のため上陸したウミガメが国道58号に進入し車にひかれて死亡するロードキルが発生した。

このロードキルをうけ、ウミガメの産卵実績がある大宜味村及び国頭村の国道へ進入する可能性がある海岸へ、ウミガメの道路進入防止対策を実施した。（図-6）



図-6 ウミガメの道路進入防止対策箇所

道路進入防止対策として海岸開口部で砂浜と道路が連続している箇所には、ソフトポールを設置した。また、護岸が砂に埋もれ、砂浜と道路が連続している箇所には、ネットフェンス及び植栽を設置した。（写真-10）（写真-11）



写真-10 ソフトポールの設置状況



写真-11 ネットフェンス及び植栽

また、ウミガメが産卵する砂浜に道路照明の灯りが照射された場合は、親カメの繁殖活動や、子カメの降海時に悪影響を及ぼす恐れがある。そのため、ウミガメの産卵実績がある国頭村辺土名、大宜味村津波、根路銘、喜如嘉で、道路照明の照度を低減させる、カットルーバーなどの対策を行っている。（図-6）

4.工事区域における施工前の事前環境調査

北部国道事務所では、「小動物保全対策の手引き（案）」（平成20年2月）に基づき、工事予定地における貴重動植物の保全を目的として工事施工前に事前環境調査を実施している。

ここでは、令和元年度に実施した、恩納村喜瀬式原地区の事前環境調査を紹介する。（以下、本調査箇所）

本調査箇所は、恩納バイパス事業の土捨て場として整備を予定している箇所で、現地調査の結果、表-2及び表-3に示す貴重動植物が確認された。（表-2）（表-3）

確認された貴重動植物は、移動元の環境と同程度と判断される隣接地の工事影響範囲外へ移植や移動を行い、貴重動植物の保全に努めている。

No.	和名	沖縄県 RDB	環境省 RL	確認状況
1	オオイシカグマ	—	絶滅危惧 II 類	3 個体
2	ツルラン	絶滅危惧 II 類	絶滅危惧 II 類	4 個体
計	2 種	1 種	2 種	7 個体

表-1 恩納村喜瀬式原地区で確認された貴重植物



写真-12 工事前調査（貴重植物調査：移植作業）実施状況

No.	和名	天然記念物	種の保存法	沖縄県RDB	環境省RL	水産庁DB	個体数
1	オキナワキノボリトカゲ	—	—	絶滅危惧 II 類	絶滅危惧 II 類	—	3 個体
2	イボイモリ	県指定	国内希少	絶滅危惧 II 類	絶滅危惧 II 類	希少種	62 個体
3	シリケンイモリ	—	—	準絶滅危惧	準絶滅危惧	—	16 個体
4	フタゴモオカタニシ	—	—	準絶滅危惧	準絶滅危惧	—	120 個体
5	オキノエラガヤマトガイ	—	—	絶滅危惧 II 類	絶滅危惧 II 類	—	67 個体
6	アオミオカタニシ	—	—	準絶滅危惧	準絶滅危惧	—	29 個体
7	カニダミゴマゴイ	—	—	準絶滅危惧	絶滅危惧 II 類	—	138 個体
8	ナガケンガイ	—	—	—	準絶滅危惧	—	103 個体
9	オオカサマイマイ	—	—	—	準絶滅危惧	—	1 個体
10	ヤンバルヤマカサマイマイ	—	—	絶滅危惧 II 類	絶滅危惧 II 類	—	3 個体
11	キムラダモ類	ヤンバルキムラダモ	—	絶滅危惧 II 類	—	—	7 個体
		オキナワキムラダモ	—	絶滅危惧 II 類	絶滅危惧 II 類	—	—
計	11 種	1 種	1 種	8 種※	11 種	1 種	549 個体

表-2 恩納村喜瀬式原地区で確認された貴重動物



写真-13 工事前調査で確認された貴重動物（イボイモリ：沖縄県指定天然記念物）

5.今後の展望

本稿で述べたとおり、これまで北部国道事務所では、自然環境に配慮し道路事業を進めてきているが、小動物のロードキルなどの問題は依然として発生している。

これまで、ヤンバルクイナのロードキル対策は、クイナフェンスとクイナトンネルを中心に実施してきたが、対策未実施区間でのロードキルを回避できるように、通行車両の速度低減や注意喚起を促す対策も重要と考えており、今後検討を予定している。

引き続き、北部国道事務所では、自然環境との共存を目指し、自然環境に配慮した道路事業を行っていききたい。

参考文献

- 1) 北部国道事務所：小動物保全対策の手引き（案）（平成20年2月27日版）
- 2) やんばる野生生物保護センター：2019年のやんばる地域における野生生物の交通事故確認状況
- 3) 北部国道事務所：平成24年度北部国道管内小動物保全対策調査業務報告書
- 4) 北部国道事務所：平成27～31年度北部国道管内環境調査業務報告書

Session 4 点検・補修・補強

安波ダム減勢水槽における 補修方法の検討について

三田美 修作¹・福島 大五²

¹沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 管理課 課長 (〒905-0019 沖縄県名護市大北3-19-8)

²沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 管理課 管理係員 (〒905-0019 沖縄県名護市大北3-19-8)

沖縄本島に位置する福地ダム、新川ダム、安波ダム、普久川ダム、辺野喜ダムの5ダムは導水トンネルで連結されており、これらを統合的に運用することにより効率的な水運用を行っている。その中の安波ダム減勢水槽は、安波ダムから福地ダムへの送水を行う際のダムからの放流水を減勢させる管理上重要な施設である。当施設は施工後37年が経過し、減勢水槽内部壁面のコンクリートが溶食を受け、劣化が進んでいる状況となっている。本検討ではコンクリート溶食のメカニズムと、今後の補修方法について検討を行った。

キーワード コンクリート劣化、補修

1. はじめに

沖縄本島に位置する福地ダム、新川ダム、安波ダム、普久川ダム、辺野喜ダム（以下、北部5ダム）は北部ダム群調整水路で連結され、統合的な運用を図ることで効率的な水運用を行っている。特に福地ダム・安波ダム間の調整水路は両貯留ダムを結ぶ区間となっており、呑口部にあたる安波ダム減勢水槽は安波ダムから福地ダムへの送水を行う際、放流水を減勢させる管理上重要な施設である。安波ダムは施工後37年が経過し、老朽化が進んでおり、本検討では過年度に行われている調査結果を踏まえ、補修方法について検討を行った。

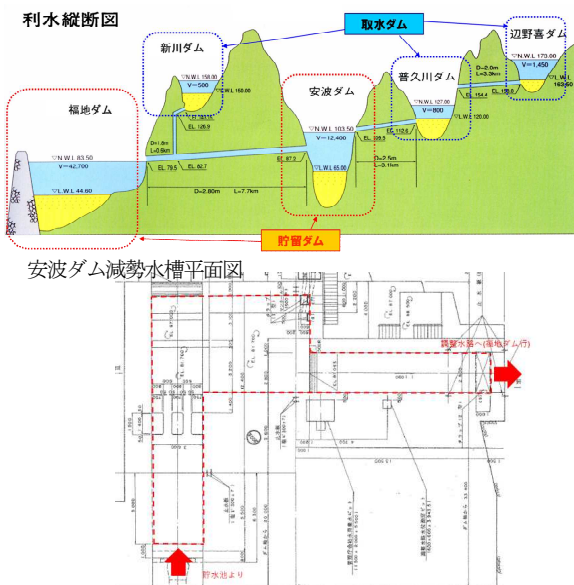


図-1 概要図

2. 安波ダム減勢水槽のコンクリート劣化の状況

(1) 総合点検における指摘事項

安波ダムでは平成26年度に総合点検を実施しており、点検時に減勢水槽の劣化具合について専門家より指摘を受けている。減勢水槽の劣化具合としては側壁の水位以下部分で全体的にあらたな侵食が進み、覆工コンクリートが土質化している部分などが確認された。（図-2）



図-2 劣化状況写真

内部壁面コンクリートの劣化状況調査として、圧縮強度試験及び中性化深さ試験を実施した。試料は減勢水槽内部壁面の上部（水面より上）、中部（水面より下）、下部（水面より下）の3箇所とした。

圧縮強度試験についてはいずれの箇所も設計基準強度を満たしており、上部、中部、下部ともに強度に大きな違いはなかった。

中性化深さ試験による侵食量調査については、1cm弱の中性化が認められ、床面0.3mの位置で壁面後退1cm、凹状侵食3cmであることから鉄筋かぶり10cmの半分程度まで薄くなっていると考えられる。

(2) 維持管理方針の設定

上記の調査を踏まえ、今後の維持管理方針として以下の検討を設定している。

- ① 今回の侵食量測定箇所以外でも侵食深さを測定し、現状の安全度評価を行う。
- ② 各構造物の補修の優先度を定め、緊急を要するものから対策を実施していく。

3. 維持管理調査業務による詳細調査

総合点検の結果及び維持管理方針より、減勢水槽内部の詳細調査が必要であり各種調査を行った。

(1) 3Dレーザスキャナによる調査

構造物安定性評価の基礎資料作成のため、3Dレーザースキャナによる侵食量調査を実施した。観測は放流設備減勢池、接続部、調整水路呑口の範囲とし、仮想面は、水の接触しない箇所を施工当初の仕上げ面と設定することで仮想面からの侵食量を可視化した。結果は、水の接触しない上部では、侵食はほとんど確認されず、中部～底部での侵食が顕著であり、5cm～10cm程度の侵食が確認された。鉄筋かぶりは10cmであることからかぶりの大部分が侵食を受けていることが確認された。(図-3)

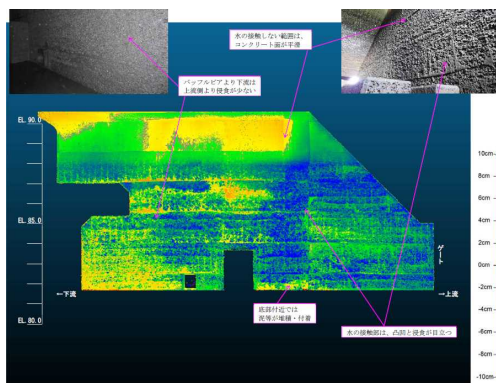


図-3 3Dレーザスキャナー

(2) 各種追加調査の実施

減勢水槽内部の劣化具合の調査として、詳細調査を実施した。調査箇所は表-1及び図4となっている。

表-1 調査箇所及び調査内容

調査箇所	床面からの高さ	現地作業		室内試験	
		現地試験	コア採取	EPMA	EPMA以外
調査箇所①	1.0m	○	○	—	○
調査箇所②	1.0m	○	○	○	○
調査箇所③	1.0m	○	○	○	○
調査箇所④	1.5m	○	○	○	○
調査箇所⑤	1.6m	—	○	—	○
調査箇所⑥	1.8m	○	○	○	○
調査箇所⑦	2.0m	—	○	○	○

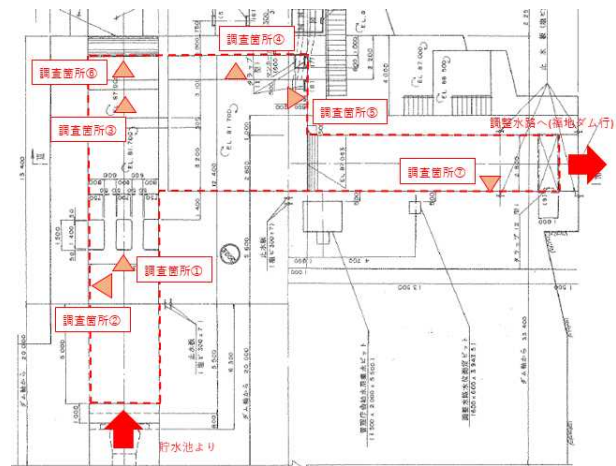


図-4 調査位置

(a) ハツリ調査他 (現地試験)

減勢水槽内部の壁面にハツリ調査を行った。結果はハツリ深さ2cm程度であった。ハツリを行った後の面にシュミットハンマーによる圧縮強度を実施し、調査箇所の1箇所では14N/mm²と低い値を示したものの、その他の箇所では、概ね24N/mm²前後であった。同箇所による中性化試験(ドリル法)による中性化は0mmであった。

(b) 鉄筋調査 (現地試験)

鉄筋のかぶり厚さは約10cmで、目視及び自然電位法による探查の結果、鉄筋に腐食は確認できず、鉄筋はコンクリートと密着していた。(図-5)



図-5 鉄筋調査写真

(c) 中性化深さ試験 (室内試験)

調査箇所①④⑤の中性化深さは何れも平均値で、18～21mmの範囲であり、EL.88.5mより上部の調査箇所⑥⑦は、中性化深さは平均2～3mmだった。

(d) 超音波伝播速度試験 (室内試験)

全体的に伝播速度は大きく、コンクリートの圧縮強度は設計基準強度である24N/mm²を十分上回ると考えられる。

(e) EPMA試験 (室内試験)

コンクリート壁面の表面から2～3mmの範囲は、CaOの濃度低下が大きくカルシウムが溶脱している。また、表面から2cm程度は炭酸化が生じており、劣化が生じている可能性があることが確認された。

(f) 螢光樹脂含浸試驗 (室內試驗)

コンクリート壁面の表面から1~2cmの範囲には空隙があるが、大きなクラックは認められなかった。

(3) 安定解析の実施

安定解析にあたって、3Dレーザースキャナ測量の結果、各種調査結果や、工事誌、設計図書等から減勢水槽内部の構造と状態を把握し、安定解析に必要な外力、構造物の物性値等の条件をを整理した。加重条件は常時において自重及び水槽内の静水圧、地震時では自重に係る地震力と静水圧及び動水圧としている。これらの諸条件のもと安定解析を実施し、安全率を満足していることを確認した。

4. コンクリート劣化のメカニズム

(1) 北部5ダムにおけるコンクリート劣化

安波ダム減勢水槽の劣化状況については総合点検時に指摘を受け各種調査を実施しているが、普久川ダムにおいても平成30年度に3Dレーザー測量を行った結果、壁面の侵食が確認された。また、各ダムを繋ぐ調整水路でも平成28年度の調査で床面及び側面に侵食が認められており、いずれも粗骨材の溶食といった共通の劣化が確認されている。

(2) 調整水路内での水質調査

安波ダム減勢水槽内部壁面のコンクリート劣化要因としてランゲリア指数(以下、LI)と遊離炭酸に着目し検討した。LIは水の実際のpH値と、「溶解も析出もしない平衡状態にあるときのpH値(pHs)」との差で定義され、負の値で絶対値が大きくなるほど腐食性が高い傾向となる。遊離炭酸は水中に溶解している二酸化炭素(CO₂)のことで、腐食の直接的な原因となる。遊離炭酸濃度が高いと炭酸カルシウムの溶解性が大きくなり、LIが下がる。

調整水路トンネル内部では水質調査を行っており、LI及び遊離炭酸の関係を図-6に示す。LIに関しては導水で、-3程度と腐食性が高くなり、遊離炭酸に関しては湧水で70mg/Lと中程度の侵食性の水という結果となった。

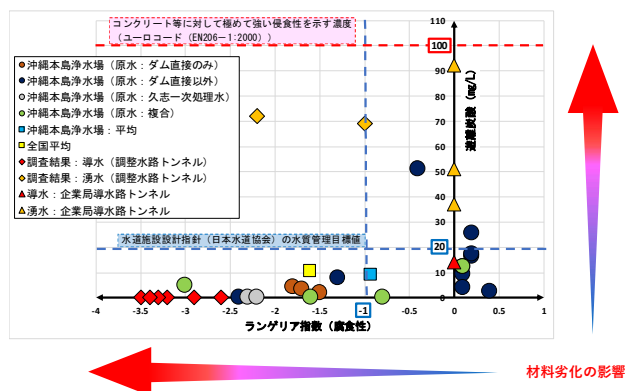


図-6 水質調査結果

(3) コンクリート劣化のメカニズム推定

前述したとおり壁面コンクリート劣化の直接原因は「接触する流水による骨材（石灰岩）の溶解である」ことが推定され、以下の特徴が見られる。

- I 流水との接触頻度が多い箇所ほど侵食が著しい。
- II 侵食深さは、その箇所の水流とも関係が大きい。
- III 劣化侵食部の詳細観測では、粗骨材が大きく溶食しており、細骨材の流失が顕著に見られる。

これらの特徴より、減勢水槽内部で生じているコンクリート劣化のメカニズムが以下の様なフローで推定される。

- ① 骨材の石灰岩が、接触する流水によって溶解する。
- ② 石灰石の碎石の表面が溶解して削られたように侵食される。
- ③ モルタル中の碎石や砂ならびに炭酸カルシウムが、コンクリートのクラック、「セメントペーストと碎石や砂との間隙」などからの浸透水に溶解して、多くの間隙ができる。
- ④ これらの反応が進んで空隙が多くなる。
- ⑤ モルタル中のイオン透過性が大きくなる。モルタルの炭酸化が進み、劣化が進行する。
- ⑥ モルタル中のセメント水和物が劣化して分解し、 Ca^{+2} や SO_4^{2-} などがモルタル中に溶出する。
- ⑦ Ca^{+2} や SO_4^{2-} などにより、部分的にエトリンガイト(3CaO 、 Al_2O_3 、 3CaSO_4 、 $32\text{H}_2\text{O}$)などが再生成し、局所的な成長によりコンクリートが著しく劣化する
- ⑧ 骨材の溶脱やモルタルの劣化により、壁面が著しく侵食される。

6. 補修方法の検討

補修の目的として、減勢水槽内のコンクリート表面の劣化を抑え、今後、劣化のさらなる進行が生じないようにする。また、対策範囲は、劣化が既に進行しており、今後も流水との接触が想定される範囲を対象とし、EL88.5m以下の壁面と底面とする。

(1) 補修工法に求められる条件

減勢水槽内を補修するにあたり、補修工法に下記の条件が必要となる。

- ①耐久性 今後、既設コンクリートの骨材（石灰岩）の溶解の進行を防止する必要がある。
- ②耐摩耗性 減勢水槽内は高速流が流下するとともに水衝部となるため、これに対する耐摩耗性を有する必要がある。
- ③既設コンクリートとの一体化 補修工法は既設コンクリートとの一体化が図れる構造とする必要がある。
- ④現地施工条件 クレーンの配置が限定されるとともに、減勢水槽内への入口が狭いため、資材搬入可能な部材寸

法に留意する必要がある。

- ⑤工期 工事期間中は、通水停止を行う必要があるため、できる限り工期の短い工法を採用する。
⑥メンテナンスフリーとなる構造物が望ましい。

(3) 補修工法の立案

安定解析の結果より、減勢水槽内部の壁面コンクリートの劣化による鉄筋への応力は数%程度となっており、また、内部鉄筋についても劣化が認められなかったため、壁面を施工時の状態にすることで強度は十分に確保できると考えられる。補修方法は、劣化が進行している壁面表面部分をハツリ取って除去し、セメント系材料で補修復旧するものとする。工法については表面を被覆する工法として確実な施行が可能となる以下の3つの補修工法を検討した。

① ポリマーセメントモルタル工法

表面のハツリを行った上で、ポリマーセメントモルタル吹付により表面を被覆する工法。他案に比較しても最も簡易な工法であるが、高速流に対する耐摩耗性は低く、骨材が石灰岩となるため、同様の劣化が生じる可能性がある。工期及び経済性に優れている。(図-7)

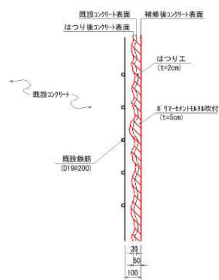


図-7 ポリマーセメントモルタル工法

② コンクリート打設工法

表面のハツリを行った上で、高強度コンクリートを打設することにより表面を被覆する工法。コンクリート表面を確実に締め固めるため、打設幅として10cm以上確保する必要がある。高速流及び耐摩耗性は①案に比べ高い。骨材が石灰岩となるため、同様の劣化が生じる可能性がある。経済性及び工期は他案と比較して劣っている。(図-8)

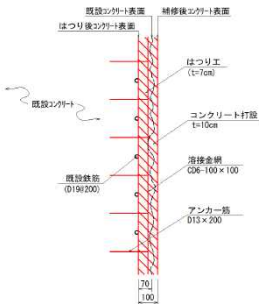


図-8 コンクリート打設工法

③ 鋼板ライニング工法

表面のハツリを行った上で、ステンレス鋼板により表面を被覆し、ステンレス鋼板の背面には高流動モルタルによる充填を行う工法。高速流及び耐久性が他案と比較して高い。(図-9)

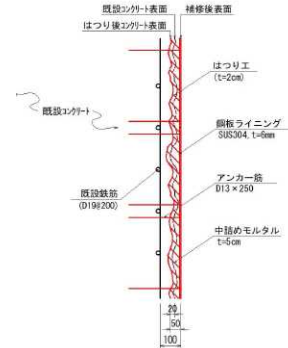


図-9 鋼板ライニング工法

(3) 補修工法の選定

補修工法の3案について、それぞれの利点と欠点を比較し、総合的な評価をした。(表-2)

表-2 補修工法の比較

	①ポリマーセメントモルタル工法	②コンクリート打設工法	③鋼板ライニング工法
メリット	工期や経済性に優れている	耐摩耗性では①案より優位となる	耐摩耗性、耐久性ともに他案より優れており、対策後の定期的なメンテナンスは不要である。
デメリット	耐摩耗性、耐久性に劣っており、対策後も30年程度に1度の定期的なメンテナンスが必要	耐久性は③案より劣っており、対策後30年程度に1度の定期的なメンテナンスが必要	工期や経済性は他案よりも劣る
評価	×	△	○

減勢水槽コンクリート壁面の補修方法として、減勢水槽の施設の特長性およびコンクリートの溶食劣化のメカニズムを考慮し、表-2より耐摩耗性、耐久性に優れており定期的なメンテナンスが不要となることから、③鋼板ライニング工法を選定した。

7. まとめ

今回、安波ダム減勢水槽の劣化について、減勢水槽内の詳細調査結果より、コンクリート劣化メカニズムを推定し、補修工法として鋼板ライニング工法を選定した。鋼板ライニング工法は耐摩耗性や耐久性に優れているといった利点がある一方で、他案と比較した場合、工期が長くなることが考えられる。今後、補修を実施するにあたり、導水を止める期間の考慮や機材搬入方法などより詳細な補修計画を決める必要がある。

腐食凹凸面に対する当て板ボルト補修のすべり耐力特性に関する実験的研究

琉球大学 ○上地 足登 田井 政行 下里 哲弘

1.はじめに

鋼橋の腐食減肉部の補修方法として、当て板ボルト補修が挙げられる。一般的にこの補修法は、当て板との接触面を平滑化することが必要とされるが、より効率的に補修を行うために腐食凹凸面に当て板補修を行うことが検討されている¹⁾。先行研究では、腐食凹凸度を定義し、腐食凹凸度が大きいほど、すべり係数が低下することを実験的に示したが、腐食凹凸度によるすべり耐力への影響を明らかにするためにはさらなるデータの蓄積が必要である。

本研究では、腐食凹凸度とすべり耐力特性を明らかにすることを目的とする。また、各種防食皮膜の皮膜厚さとすべり耐力特性についても併せて検討を行った。

2.試験概要

2-1. 試験体概要

試験に使用する腐食鋼材は実橋梁から採取した鋼材（SMA490Y 公称板厚 9mm）である。試験体モデルを図1に示す。使用した高力ボルトはF10TM20であり、軸力導入の際にはボルト軸部に貼り付けた2枚のひずみゲージを用いて軸力を管理して導入を行った。

試験体の表面塗装のパラメーターを表1に示す。本研究では、試験体毎の粗さを統一するため、無機ジンクペイントを用いて表面塗装を行っている。なお、現場施工性を考慮して、有機ジンクを適用した試験体についても検証した。

腐食凹凸度の定義としては、レーザー変位計を用いて2mm間隔で腐食深さを計測し、その標準偏差を腐食凹凸度として定義している。腐食凹凸度が大きい腐食材と小さい腐食材の実際の写真と計測結果を図2に示す。

2-2 すべり試験概要とすべり係数

すべり試験時の様子を図3に示す。载荷中の腐食材と当て板の相対変位を計測するために、クリップゲージを当て板の両側に設置した。計測された結果例を図4に示す。本研究では、载荷荷重-相対変位の関係において、最大荷重計測点をすべり荷重と定義している。得られた荷重を使用し、式1からすべり係数を算出する。

$$\mu = \frac{P}{Nnm} \quad (\text{式1})$$

μ =すべり係数 N =ボルト軸力 P =滑り荷重
 n =ボルト本数 m =接触面数

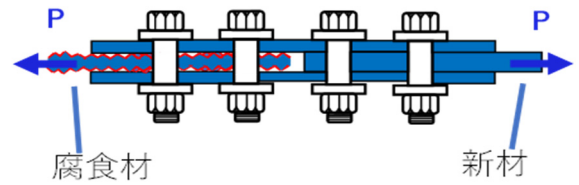


図1 試験体モデル

腐食大(腐食凹凸度0.94) 腐食小(腐食凹凸度0.26)

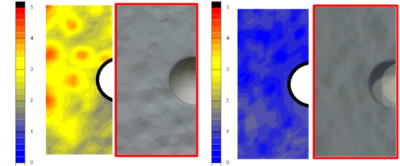


図2 腐食材の状況と減肉量のコンター図

表1 表面塗装のパラメーター

試験体名	母材	当て板
無機300無機300	無機ジンク300 μ m	無機ジンク300 μ m
無機100無機100	無機ジンク100 μ m	無機ジンク100 μ m
無機100無機300	無機ジンク100 μ m	無機ジンク300 μ m
有機100無機100	有機ジンク100 μ m	無機ジンク100 μ m

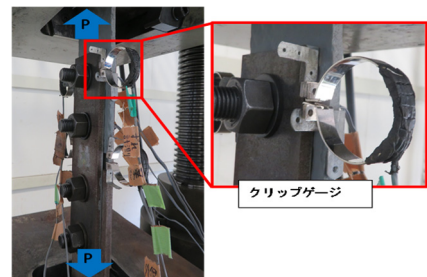


図3 試験の様子と変位計の位置

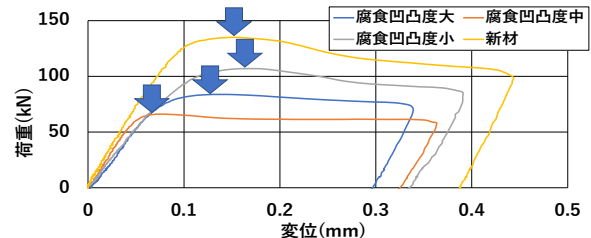


図4 荷重と変位

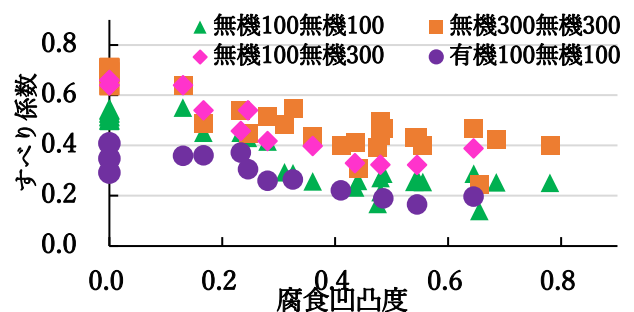


図5 すべり係数と腐食凹凸度

キーワード： すべり耐力 当て板ボルト補修 腐食凹凸 ジンクリッチペイント

連絡先： 連絡先 〒903-0213 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

3, すべり試験結果

3-1 腐食凹凸度とすべり係数の関係（無機ジンク）

図 5 にすべり試験により得られた、すべり係数と腐食凹凸度の関係を示す。また、パラメーター無機 100 無機 100 の無次元化したすべり係数と腐食凹凸度の関係を図 6 に示す。なお、図中には先行研究で得られた試験結果も併せて示す。無機 100 無機 100 の場合、腐食凹凸度が 0.3 程度より大きい領域では、腐食凹凸度の増加に伴いすべり係数が低下する傾向があり、新材に対して 50%程度のすべり係数を確保できないデータもある事が得られた。また腐食凹凸度が 0.3 程度以下の場合、新材に対して 80%程度のすべり係数を確保出来ることが確認出来た。

図 6 に加えて、図 7 に全パラメーターを追加したグラフを示す。0.3 程度以下の領域では、有機 100 無機 100 のみが無機 100 無機 100 と同じ傾向がみられたため、膜厚が $100\mu\text{m}$ であれば、0.3 程度以下ですべり係数が 80%程度確保出来ることが考えられる。無機 300 無機 300 と無機 100 無機 300 については、0.2 程度以下であれば新材に対して 70%程度のすべり係数を確保出来る結果が得られた。しかし、これらのすべり係数は、新材に対して 80%程度のすべり係数を確保出来た無機 100 無機 100 の腐食凹凸度 0.3 以下の領域よりもすべり係数が大きい傾向がある事が図 5 より確認できている。

3-2 防食塗装の皮膜厚とすべり係数の関係

被膜厚について、図 5 より無機 100 無機 100 と無機 300 無機 300 と無機 100 無機 300 を比較した際に、被膜厚が大きければ大きい程、すべり係数を確保できる傾向を示した。この理由としては、すべり試験後の写真である図 8 の皮膜厚 $100\mu\text{m}$ とは異なり、 $300\mu\text{m}$ の場合は防食皮膜が破壊していることから、すべり時に皮膜を巻き込みながら破壊するメカニズムになっている事が原因だと考えられる。

3-3 有機ジンクリッチペイントを適用した場合

図 5 より腐食材の塗装として有機ジンクを用いた場合、無機ジンクと比較して、すべり係数が低下する傾向を示した。すべり試験前に表面粗さの計測を行ったところ、表面粗さ Ra が無機ジンクの $15\mu\text{m}$ 程度に比べて有機ジンクは $5\mu\text{m}$ 程度であり、有機ジンクの方が低くなる傾向を示した。既往研究において、粗さが大きいほどすべり係数は高くなる傾向を示すこと²⁾から、腐食材についても同様に、粗さが低い有機ジンクですべり係数の方がすべり係数が低くなったものと考えられる。

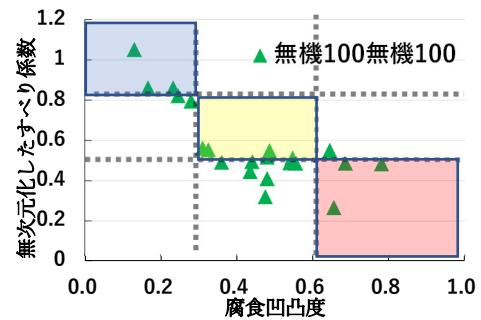


図 6 食凹凸度と無次元処理したすべり係数

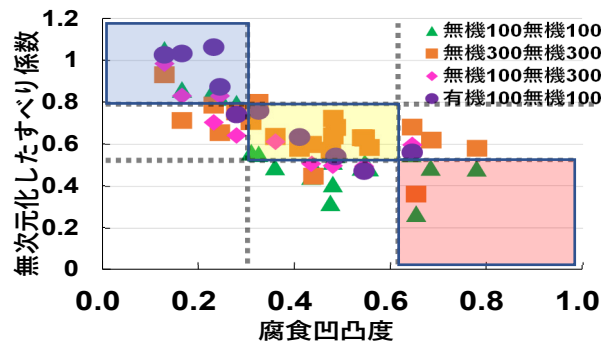


図 7 食凹凸度と無次元処理したすべり係数

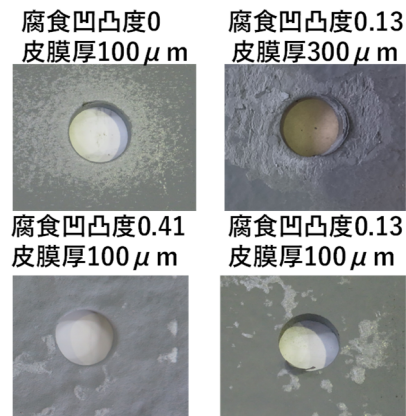


図 8 異なる膜厚や腐食凹凸度をもつ腐食材の接触面状況

4, まとめ

- ・腐食凹凸度が大きいほど、すべり係数が低下する傾向がある。また、腐食凹凸度が 0.3 程度以下であれば新材のすべり係数と同程度のすべり係数を確保出来る。
- ・腐食材に有機ジンクを用いた場合、無機ジンクと比べてすべり係数が低下する傾向がある。
- ・防食皮膜厚が大きいほど、すべり係数が確保できる傾向がある。

参考文献

- 1) 坂本ら：腐食凹凸面に対する防食皮膜厚とすべり耐力に関する研究，第 9 回土木学会西部支部沖繩会技術研究発表会，pp.24-25，2020。
- 2) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)，2007。

ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷力評価に対するひび割れ画像解析 を活用した数値解析技術の検討

琉球大学 ○藤原滉大, 古田泰祐, 富山潤, 須田裕哉

1. 研究の背景および目的

コンクリート構造物の劣化原因のひとつにアルカリシリカ反応(以下, ASR)がある. ASR が生じたコンクリート構造物は劣化の進行とともに剛性が低下する.

ASR 劣化したコンクリート構造物の耐荷力を数値解析的に評価するためには, 劣化したコンクリートの剛性を正しく評価する必要がある. そこで本研究では, ASR 劣化したプレテンション PC 桁を対象に表面ひび割れのデジタル画像から弾性係数を推定する方法を提案¹⁾し, 耐荷力評価の数値解析的な基礎的検討を行なった.

2. 解析対象構造物(部材)概要

解析対象部材は, 図-1 に示す断面を有するプレテンション PC 桁 (スパン 26m) で, 軸方向に卓越したひび割れが桁全体に生じている.

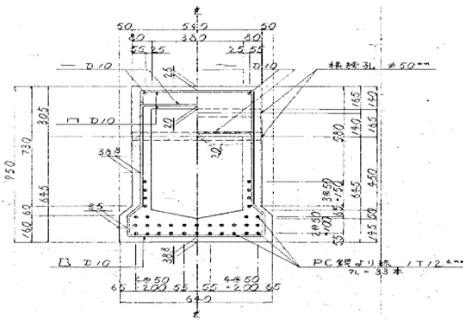


図-1 対象部材の断面図

3. 解析的検討

本研究では, ASR 劣化部材の弾性係数を, 文献 2) に示す弾性係数の低減率をひび割れ密度から求め推定する方法 (ケース 1) と, 表面ひび割れのデジタル画像を入力とした均質化法から弾性係数を推定する方法 (ケース 2) により推定し, 得られた弾性係数を用い, 曲げ破壊試験を数値解析的に行なった.

3.1 デジタルひび割れ画像解析

本研究ではデジタルひび割れ画像解析は, 大成建設が開発した技術を採用した³⁾.

3.2 ひび割れ密度を用いた弾性係数推定法

ASR 劣化した構造物の弾性係数の推定法としてひび割れ密度を用い, 図-3 に示す弾性係数の低減率を健全な構造物の弾性係数に乗じる方法がある²⁾. 本研究ではその方法をケース 1 とした.

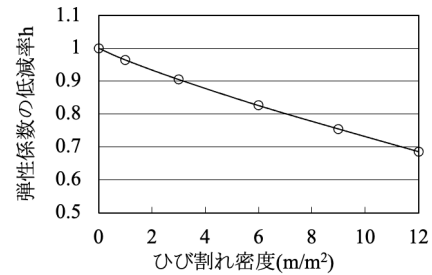


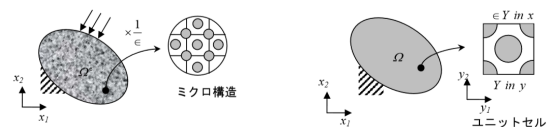
図-3 ひび割れ低減率²⁾

3.3 均質化法を用いた弾性係数推定法

均質化法は図-4 に示すような周期性を持った非均質なマイクロ構造からなる構造物を, それと等価な均質な構造物として数学的に置き換えることで, ミクロ構造を考慮した均質化弾性係数を求めることが可能である. (均質化) 弾性係数 D^H を式(1)のように求めることができる.

$$D^H = \langle D(I - BX) \rangle \quad (1)$$

ここで, D は, 材料ごとの弾性行列, I は単位行列, BX は, 特性変位 X から求まるマクロひずみである. ユニットセルとして, コンクリート表面のデジタルひび割れ画像解析結果を用いることで, ひび割れを考慮した弾性係数を推定できる. 本研究では本方法をケース 2 とした.



(a) 周期的なマイクロ構造 (b) 均質化されたマクロ構造

図-4 均質化法の概要¹⁾

3.4 数値解析手法 (曲げ破壊試験の再現)

解析手法としては, 非線形有限要素法を用いた. 構成則は文献 2) と同じモデルを採用した. 表-1 に健全な桁の機械的性質を示す. また, 図-5 に解析に用いたモデル図を示す. 解析では, 図-6 に示す

曲げ破壊解析を想定し、上述した2ケースの弾性係数推定値を用い、曲げ耐力について考察した。

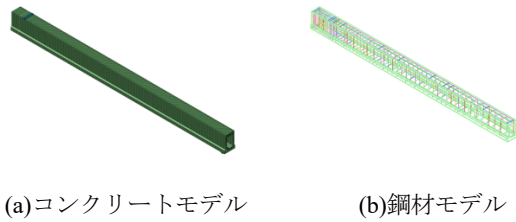


図-5 領域モデル図 (1/2 モデル)

表-1 健全桁の機械的性質

	$E_c(N/mm^2)$	$F_c(N/mm^2)$	$F_t(N/mm^2)$	ν
コンクリート (健全)	39,200	49.2	3.09	0.2
	$E_c(N/mm^2)$	$F_c(N/mm^2)$	$F_y(N/mm^2)$	ν
PC 鋼線	195,000	-	-	0
鉄筋(D10)	200,000	-	295	0.3
Ec:弾性係数, Fc:圧縮強度, Ft:引張強度, Fy:降伏強度, ν :ポアソン比				

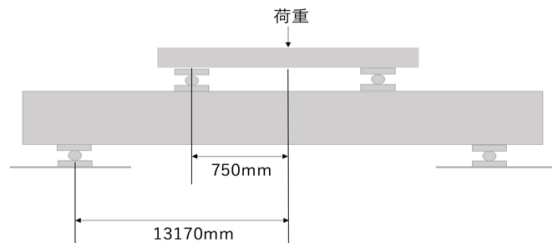


図-6 曲げ破壊試験の概要図

4. 結果および考察

4.1 弾性係数推定値 (ケース 1)

図-7 にひび割れ密度を求めた画像、ひび割れ密度および図-3 より推定した弾性係数を示す。写真のサイズは 160mm×160mm を用いた。

ひび割れ密度 8.66 (m/m ²)	ひび割れ密度 4.91 (m/m ²)	ひび割れ密度 11.97 (m/m ²)
推定弾性係数 30534.7(N/mm ²)	推定弾性係数 34248.3(N/mm ²)	推定弾性係数 28079.4(N/mm ²)
#1	#2	#3

図-7 ひび割れ密度からの推定弾性係数

4.2 弾性係数推定値 (ケース 2)

図-8 に図-7 のひび割れに対しデジタルひび割れ解析を行い、均質化弾性係数を推定した結果を示す。なお、健全な領域の弾性係数は表-1 の値を

用いひび割れ領域の弾性係数はゼロとした。

推定弾性係数 36541.4(N/mm ²)	推定弾性係数 38207.3(N/mm ²)	推定弾性係数 35931.5(N/mm ²)
#4	#5	#6

図-8 均質化法を用いた推定弾性係数

4.3 曲げ破壊試験の解析結果

上記で推定した弾性係数を用いた曲げ破壊試験の解析結果 (荷重—たわみ曲線) を図-9 に示す。図より、既往の研究²⁾と同様に健全桁に対して、ASR 劣化を考慮したすべてのケースで曲げ剛性が低下し、異なる耐荷力が評価可能であることがわかる。今後はケース 1 とケース 2 の整合性を検討し、本手法の精度向上を目指す。

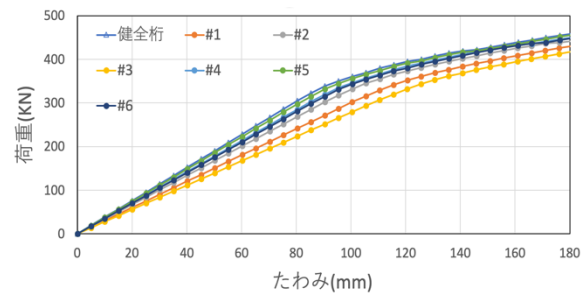


図-9 曲げ破壊試験の解析結果

5. まとめ

本研究では、プレテンション PC 桁を対象に ASR 劣化に起因した表面ひび割れから弾性係数を推定し、有限要素法を用いた耐荷力評価の方法を検討した。今後は本手法の妥当性を既往の実験などと比較し検討する予定である。

謝辞：ひび割れ解析には大成建設 (株) が開発した t.WAVE を用いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 富山潤, 古田泰祐, 須田裕哉, 堀口賢一: ひび割れ画像と均質化法を用いた ASR に起因した材料劣化推定に関する基礎的研究: コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1429-1434, 2019
- 2) 金城和久, 富山潤, 金田一男, 車谷麻緒: ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.970-974, 2012
- 3) 小山哲, 丸屋剛, 堀口賢一, 澤健男: ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.3, pp.178-194, 2012

腐食した鋼部材の防食補修技術に対する各種ケレン方法の錆除去能力

琉球大学 ○新田健太, 佐藤志帆, 下里哲弘

1. はじめに

鋼橋の防食弱点部の1つとして、写真1.1に示すようなボルト添接部や桁部材の角部などがあげられる。現状の補修工法は、錆除去を行ったうえで、再塗装を行う方法が一般的となっている。しかし、ボルト添接部や桁部材の角部はケレンによる錆除去が困難である。その結果、残存した錆を起点として、塗膜の早期再劣化と母材の腐食減肉が生じやすい。そこで本研究では、鋼橋のボルト添接部と部材角部を主な対象として、現行の錆除去基準の1種ケレンと2種ケレン、それと筆者らの既往研究¹⁾で錆面上の防食性能として期待されているアルミナCS施工の3種類を用いて、ケレンによる残存錆がどの部分に発生するのかを明らかにすることを目的とした。

2. 適用したケレンの種類

ケレンには塗膜劣化の程度と発生錆や腐食有無により、1種ケレンから4種ケレン方法の4種類に分類されている。本研究では1種ケレンには写真2.1に示すブラスト処理工法を用いる。本ケレンは設備の整った工場での作業が主流であり、効率的で適用範囲も広く、除錆度、表面粗さなど任意な表面状態にすることができる¹⁾。現場で行う際にはブラスト研削材の飛散防止対策と研削材を回収するバキューム器具などの大掛かりな設備が必要となる。2種ケレンには写真2.2に示す動力工具処理工法を用いる。この動力工具による素地調整は、電動機または圧縮空気によって駆動する工具を用いて、鋼材面の錆や塗膜などを除去する方法であり、工具には除錆、塗膜の目粗し、狭隘部の処理など目的によって様々な種類がある。²⁾表1に1種ケレンと2種ケレンに分類されている処理工法と特徴と共に、本試験で使用した器具を表1に示す。

また今回、現場で簡易な機器でブラスト同等のケレン施工のできるアルミナ100%を用いたコールドスプレー工法(以後、CS工法)も適用し、そのケレン性を評価する。なお、CS工法はアルミナと亜鉛を融点より低温低圧で臨界速度で鋼材に吹き付け、アルミナのブラスト効果と亜鉛の犠牲防食効果を用いた残存錆を許容することが出来る金属溶射技術である。¹⁾本研究で



写真 1.1 腐食した鋼桁の例 (桁下から視点)



写真 2.1 ブラスト処理



写真 2.2 2種ケレン工具



写真 2.3 アルミナ CS 施工



写真 3.1 L 型試験体

表 1 ケレンの状態

処理工法	工具	特徴
エアブラスト工法	CS施工用具	作業効率が良いが粉塵の飛散や騒音の対策が必要である
	エアブラスト装置	
動力処理工法	ディスクサンダー	素地調整の目的によって様々な工具で対応できる。広範囲には向かない。
	カップワイヤー	
	棒グラインダー	

キーワード 腐食した鋼部材, 防食補修技術, 各種ケレン方法, 錆除去能力

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)

は、ケレン性能のみを確認するためアルミナ粉体を100%でCS 施工を行った。

3. 実験方法

3.1 試験体パラメータ

試験体は、ボルト添接部を含む主桁のウェブと下フランジを模擬した写真 3.1 に示す L 型試験体を用いた。なお、この L 型試験体は、琉球大学暴露場の腐食環境下で 15 年間暴露されていたものであり、ボルト周りや添接板とウェブ面に塗装劣化と激しい腐食箇所が見受けられる。使用した試験体は 2 体であり、片面ごとにケレン種類を変えて施工し、評価を行う。

3.2 ケレン方法と評価方法

使用道具は、1 種ケレンは工場でのスチールグリッドを用いたブラスト法、2 種ケレンは平面部にディスクサンダー、角部にカップワイヤーと棒グラインダーを用いた。アルミナ CS 法は、2 種ケレン後に CS を用いたアルミナ粉体 100% の CS 法を用いた。評価方法としては、各ケレン後に試験体を分解し、残存錆の残っている箇所を外観目視観察で特定した。

4. 実験結果

写真 4.1、写真 4.2 および写真 4.3 にブラスト処理後の残存錆の状況を矢視で示す。残存錆の箇所はノズルが入らなかった角部のナット側面、添接板周辺、座金側面であった。また、ナット部にはウェブ面の影響で施工中に目視しづらい面に塗装が残った。

写真 4.4 に CS を用いたアルミナ粉体 100% のブラスト処理の結果を示す。結果より、CS のノズルが角部の影響で、塗膜が残る結果となった。このことから、ノズル形状の見直しが考えられる。

2 種ケレンは、平面部はディスクサンダーを用いることで錆を全て除去することができ、更に、施工効率も良い。L 型の下フランジとウェブの L 型部、ボルト部周辺および添接板の角部やその周辺にはディスクサンダーは物理的に使用できないため、カップワイヤーと棒グラインダーを用いた。しかし、添接板側面や座金側面の錆や塗膜を除去することはできなかった。これは写真 4.5 に示すように下フランジのウェブ面側は棒グラインダーなどで時間をかけて施工することで除錆出来たが、施工効率が悪い結果であった。

5. まとめと今後の課題

本実験結果から、どのケレン方法も L 型試験体の角部の除錆ができなかった。原因としては、写真 4.6 のようにウェブ面の影響による目視が難しい面にケレ



写真 4.1 ナット

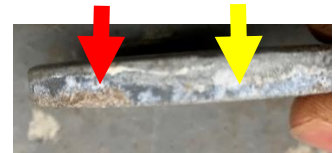


写真 4.2 座金側面



写真 4.3 下フランジ当て板側面部

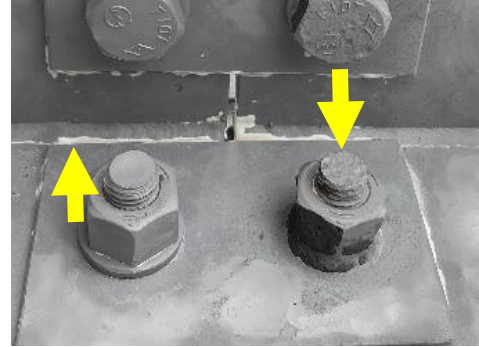


写真 4.4 アルミナ CS 施工後の角部

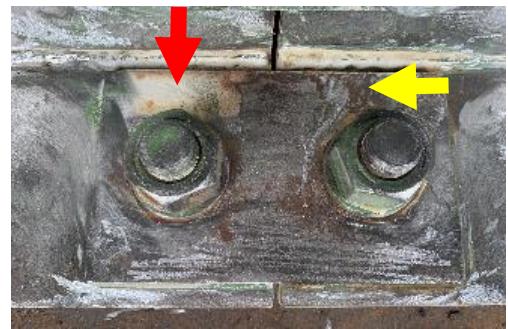


写真 4.5 2 種ケレン後の角部



写真 4.6 ディスクサンダーの角部ケレンの様子

ン工具が届いてない。今後は、この角部の残存錆を許容しながら、無機相当の亜鉛皮膜の形成による犠牲防食効果の高い CS 施工を適用し、残存錆面上の防食性能を評価する。

参考文献：1) 加藤祐介，下里哲弘，田井政行，押川渡，日和裕介：亜鉛アルミナ混合粉体を用いた Cold Spray 工法で成膜されたさび鋼板面上の防食皮膜の電気化学特性，鋼構造論 文集，Vol.26，No.102，pp.33-42，2019。

2) 社団法人，日本鋼構造協会編，「重防食塗装」，96p，105p

鋼製高力ボルト用の透明型防錆キャップ素材の耐候性に関する分析

○琉球大学 磯部喬幸、蓮池里菜、下里哲弘、田井政行 株式会社 IHI 矢ヶ部 菜月、IHI インフラ 石川 直

1. はじめに

鋼構造物の摩擦接合継手部に使用される高力ボルトは、他の部位に比べ発錆しやすい(写真 1)。それゆえ防錆キャップの開発が進められ、近年では維持管理の観点から内部を確認しやすい透明型防錆キャップが開発されている。しかし、この透明型防錆キャップの素材となっている塩化ビニルは紫外線により劣化する可能性があり、実用化に向けて塩化ビニルの耐候性を分析する必要がある。

そこで本研究では、透明型防錆キャップ素材の耐候性を評価することを目的とし、透明型防錆キャップの防食性能、視認性および透過性について検証した。

2. 観測環境及び透明ボルトキャップ施工箇所

写真 2 に透明型防錆キャップを施工した桁試験体を示す。桁試験体は琉球大学暴露場に設置されており、本暴露場の紫外線月間平均データを表 1 に示す。施工箇所は、図 2 に示すウェブ内部、外部、上フランジおよび下フランジの上面、下面の計五か所とし、本研究では黄色で示す三か所を観測対象とした。なお、透明型防錆キャップはつば部に接着剤を塗布することで施工している(図 2)。

3. ボルトの防食性

(1) 試験方法および初期状態

透明型防錆キャップの防食性調査のため、塗装済みのボルト、および塗装後に初期欠陥としてカッターナイフを用いて切れ込みを入れたボルトに対し、透明型防錆キャップの施工有無をパラメータとし検証した(写真 3)。暴露期間は 2019 年 6 月から 2020 年 11 月の 17 か月間である。

(2) 調査結果

写真 4 に下フランジ上面の 2020 年 11 月時点の外観を示す。透明型防錆キャップを施工していないボルトで切れ込み部よりボルトの腐食が見られた。一方で透明型防錆キャップを施工したボルトでは、腐食は発生していなかった。

写真 5 にウェブ内部の 2020 年 11 月時点の外観を示す。透明型防錆キャップを施工していないボルトで、



写真 1 ボルト部の腐食



写真 2 桁試験体

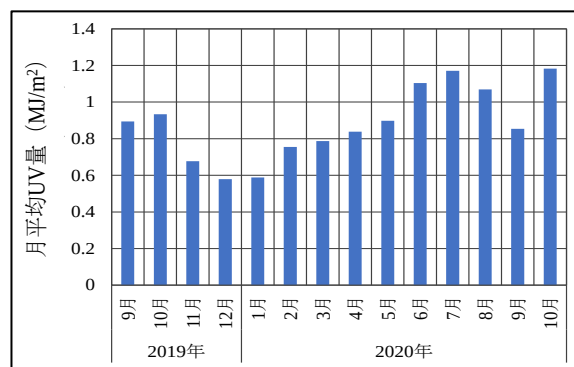


表 1 紫外線月間平均データ

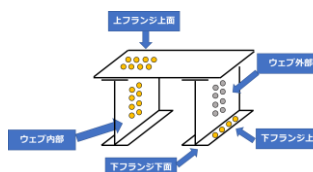


図 1 施工および観測箇所

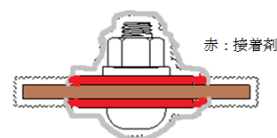


図 2 接着剤塗布範囲



写真 3 透明型防錆キャップ施工時(2019年6月)



写真 4 下フランジ上面(2020年11月)

キーワード ボルトキャップ、防食、耐候性、大気暴露、視認性

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: e185549@eve.u-ryukyu.ac.jp

切れ込み部よりわずかな腐食の発生が見られた。一方で透明型防錆キャップを施工したボルトにおいては、下フランジ上面同様に腐食は発生していなかった。

a) 上フランジ上面

写真6に上フランジ上面の2020年11月時点の外観を示す。透明型防錆キャップを施工していないボルトで、ナット角部より腐食が発生していた。一方で、透明型防錆キャップを施工したボルトにおいては、腐食は発生していなかった。

4. 透明型防錆キャップの透過率測定試験

(1) 試験方法

透明型防錆キャップと同じ塩化ビニル製のシートを写真2の桁試験体へ磁石にて貼り付け、暴露試験を実施した。透過性評価として、目視による背景文字の視認と、分光光度計(写真7)を用いた透過率計測を行った。分光光度計とは波長ごとに分けた光を試料に透過させ、透過率を測定する装置である²⁾。本試験では人間にとって一番見やすい波長の550nm³⁾を基準とした。本試験では、シート自身の透過率を測定するため、雨水等による汚れを除去した上で、測定を実施した。

(2) 結果

表2に目視観察結果を示す。2020年11月時点において、上フランジ上面で2019年6月と比較し僅かに背景文字の視認が難しくなっているものの、十分に視認可能な程度であった。ウェブ外部、内部については、視認性に変化はなかった。

図3に2020年11月時点のシートに対し、分光光度計を用いて計測した透過率を示す。暴露前の初期値で89%、ウェブ内部で86%、ウェブ外部で85%、上フランジ上面で80%を示し、最も低下したのものでも9%の低下に留まった。これらの結果はいずれも目視観察結果の関係と同様の結果となった。

5. 結論

- 1) 透明型防錆キャップを施工しているボルトでは全箇所腐食は発生しておらず、透明型防錆キャップの防食性能は維持されていると考える。
- 2) 透過率を測定した結果、17か月間の暴露により、上フランジ上面において初期値と比較し9%の低下が確認された。ただし、ウェブ内外面、上フランジ上面すべてにおいて透過率80%以上を維持し、視認性への大きな影響は無かった。よって、透明型防錆キャップの耐候性は低下していないと考えられる。

今後、暴露試験を継続すると共に、透明型防錆キャ

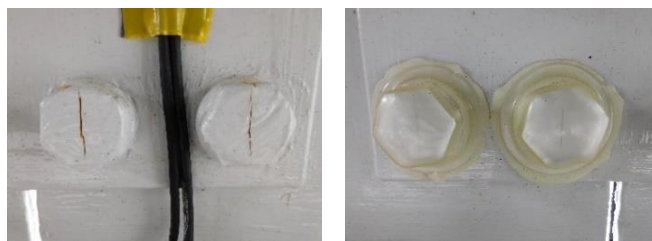


写真5 ウェブ内部 (2020年11月)



写真6 上フランジ上面 (2020年11月)

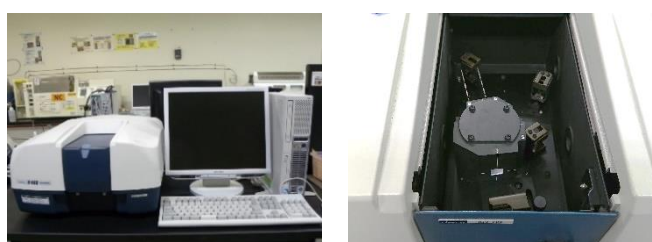


写真7 分光光度計

箇所	ウェブ外部	ウェブ内部	上フランジ上面
観察時期			
2019年6月			
2020年11月			

表2 目視観察結果

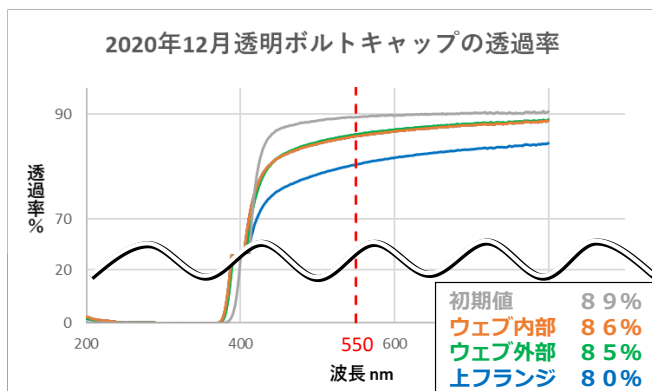


図3 透過率測定結果

ップ施工時に使用する接着剤の耐候性も検討していく。
＜参考文献＞ 1) 井上佳紀、田井政行、下里哲弘、淵脇秀晃、岩本達志：高力ボルトの透明型防錆キャップの耐候性に関する研究、第9回土木学会西部支部沖縄会 技術研究発表会、2019. 2) 一般社団法人日本分析機器工業会：分析の原理 10 紫外可視分光光度計の原理と応用、2011. 3) 武内徹二：照明学会誌第81巻第6号 明るさの知覚、1997

沖縄自動車道における点検支援技術の導入状況について

西日本高速道路総合サービス沖縄（株）宮城 清秀

平成 26 年の道路法施行規則の一部改正に伴い、膨大な数の橋梁やトンネル等の定期点検が 5 年/1 回の頻度で義務付けられ、多くの人手と予算を要する近接目視を主体とした点検が行われてきた。また、対象となる構造物の劣化が深刻化しており、これまで以上に社会資本管理の高度化・効率化が求められている。このような状況のなか、NEXCO 西日本グループでは、高速道路構造物点検における技術力向上を図るとともに、点検支援技術の活用による点検精度の向上及び点検技術者の安全性向上に向けた取組みを進めている。

本稿は、弊社における点検支援技術の取組み、現状の課題、今後の展開について報告するものである。

1.はじめに

沖縄自動車道では、構造物の健全性の把握及び第三者被害を未然に防止するため、表 1 に示す構造物の点検を実施している。

表 1 詳細点検対象数量

橋梁		のり面	
スパン数	橋数	切土	盛土
579 スパン	82 橋	77 箇所	94 箇所

カルバート BOX		標識	
道路 BOX	水路 BOX	区域内	区域外
86 基	29 基	123 基	115 基

トンネル	落下物防止柵	跨道橋
2 チューブ	6403m	13 橋

令和 2 年度においては、橋梁区間で表 2 に示す点検支援技術を活用した詳細点検を実施している。

表 2 点検支援技術

対象技術	目的・効果
Auto CIMA (高解像度カメラ)	【目的】近接目視の支援 【効果】点検精度・安全性向上 (外観変状)
J-システム (赤外線カメラ)	【目的】打音範囲の抽出 【効果】点検精度・安全性向上 (内部変状)
点検タブレット	【目的】外業・内業の効率化 ・省力化 【効果】点検精度向上

本稿では、各技術の概要・実施状況・今後検討を要する事項・点検支援技術運用状況の総括・今後の展開について報告を行う。

2.Auto CIMA(高解像度カメラ)

(1) 概要

Auto CIMA とは、高解像度カメラを用いて

構造物表面を撮影し、その画像を専用ソフトで解析することにより、ひび割れ等の外観変状を検出する技術である。図 1 に示す電動雲台付きの高解像度カメラを PC で自動操作することによりコンクリート面の撮影を行う。撮影時間は、85 m² (12.7 m×6.7m) のコンクリート床版下面で 20～30 分程度。(撮影枚数：144 枚) 撮影された画像をシステムで貼り合わせることで、1 枚の超高精細画像とし、その画像をもとにひび割れの自動検出を実施する。(図 2) ひび割れ幅については、0.2 mm 幅以上を自動で検出することが可能である。



図 1 撮影機材



図 2 貼り合せ画像

また、ひび割れの抽出は AI 技術を活用し、型枠跡・汚れ等を排除しひび割れの描写が可能である。



図 3 ひび割れ自動抽出

(2) 実施状況

令和2年度においては、5橋・29スパンにてAuto CIMAを用いた詳細点検を実施した。そのうち、西原町に位置する池田高架橋での実施状況を報告する。

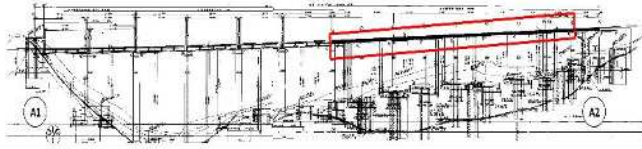


図4 池田高架橋側面図

当該橋梁は供用開始から33年が経過したPC連続合成桁5スパン、RC中空床版9スパンである。このうち県道交差箇所を除くRC中空床版8スパン（上下線）において、Auto CIMAによる撮影を実施し、表3に示す結果が得られた。

表3 Auto CIMA 撮影結果

撮影日数	2日 ※上下線各1日
橋梁点検車を使用した点検	2日 ※上下線各1日 (当初は4日間予定)
点検精度	桁下高15m~18mで幅0.1mm程度のひび割れが確認され、近接目視と遜色ない結果が得られた
安全性	・点検車による点検日数が短縮され、高所作業の削減が図れたことにより、作業員の安全性が向上した ・本線規制の日数が短縮されたことにより、お客様の安全性が向上した

(3) 今後検討を要する事項

①撮影困難箇所

撮影面に対して撮影角度45°以内にカメラを設置する必要があるため、用地境界の関係上、壁高欄や桁側面の撮影が困難な場合がある。ポールカメラやガイドカメラの技術を活用して撮影できないか検討を行う。

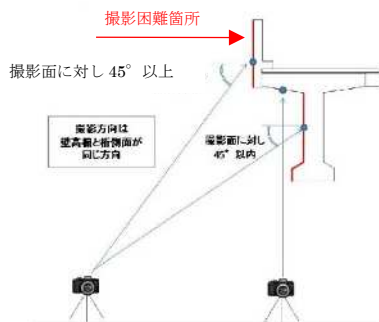


図5 撮影角度の例

②軽量化

撮影機材一式(図1)が約20kgあることから、移動時の負担が大きい。

3.J-システム(赤外線カメラ) ※R2年度 試行運用

(1) 概要

J-システムとは、高性能赤外線カメラによる撮影と、赤外線画像解析技術により、遠望非接触にて高精度かつ定量的に浮き・剥離を検出することが可能である。調査手順を①~③に示す。

① 調査前に対象橋梁に試験体を設置し、人工的に空洞部を作ることによって健全部と変状部の温度変化を把握し、調査可能な時間帯を判別する。

「EM(S)装置」(図6)

② 調査現場でリアルタイムに損傷レベル(3段階)を地上から確認しながら調査を行う。「Jモニター」(図7)

③ 赤外線画像から自動で解析し、変状レベルを3段階に分けて表示することで客観的な解析が可能。「Jソフト」(図8)

8)

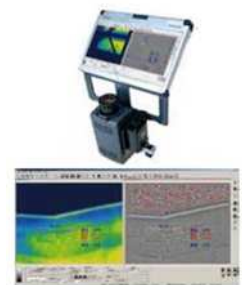


図6 EM(S)装置

図7 Jモニター

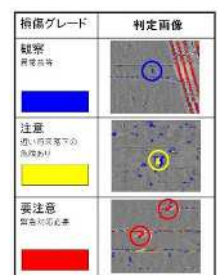
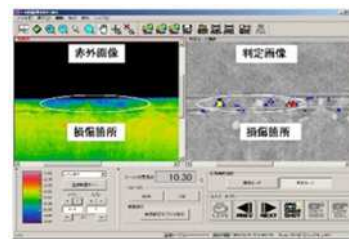


図8 Jソフトによる解析

(2) 実施状況

令和2年度においては、3橋・6スパン(914.5㎡)にてJ-システムを用いた詳細点検を試行的に実施した。そのうち、北中城村に位置する普天間川橋での状況を報告する。

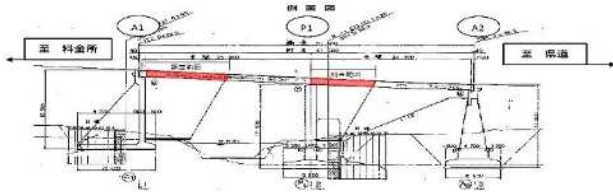


図9 普天間川橋側面図

当該橋梁は、供用開始から33年が経過した2径間連続PC中空床版橋である。このうち、農道交差箇所（第三者被害想定箇所）の4スパン・472.5㎡においてJシステムによる撮影を実施し、表4に示す結果が得られた。

表4 Jシステム撮影結果

撮影日数		1日
橋梁点検車を使用した点検		1日 (当初は2日間予定)
点検精度	検出率 ※1	100% 過年度に発見された変状に対して、赤外線カメラで全ての変状が検出できた
安全性		・点検車による点検日数が短縮され、高所作業の削減が図れたことにより、作業員の安全性が向上した ・本線規制の日数が短縮されたことにより、お客様の安全性が向上した

※1 検出率（打音点検で把握された変状のうち、Jシステムで検出できた変状数）／（打音点検で把握された変状数）

(3) 今後検討を要する事項

①調査時期

今年度は日中の気温が高くなる7月に調査を実施したが、日の入りが19時台と遅く試験体の温度差確認に時間を要し、調査が明け方近くまで及んだ。今後は日中の気温が比較的高く、日の入り時刻が17時台となる10月等に調査を実施できないか検討を行う。

②調査ロス

調査当日の夜間に現地に設置した試験体の熱環境を確認し調査の可否を判断するため、状況によっては遠方に行っても条件が適合せず調査が実施できない場合がある。現地調査前に遠隔で試験体の状況が確認出来るよう改良を検討する。

4. 点検タブレット ※R元年度～試行運用

(1) 概要

点検タブレットとは、従来の紙ベース型の現場野帳の代替として、対象橋梁の過年度点検情報（点検基図・変状情報等）をインストールした点検タブレット（図10）を現場で活用するものである。これにより、現場にて変状箇所の登録、点検結果の入力が可能となり、点検作業、報告書作成業務の効率化を図るものである。



図10 点検タブレット

(2) 実施状況

昨年度から点検タブレットを用いた橋梁点検を試行的に実施している状況である。従来型の紙ベースとの比較及びタブレット活用によるメリットを表5に示す。

表5 従来方法と点検タブレットとの比較表

工程	従来型	点検タブレット	タブレット活用によるメリット
点検準備	展開図と過年度変状データの紙媒体への印刷 【H30年度 約255枚×2部】	タブレットへ過去の点検記録データを保存 【一括登録】	・紙媒体のコスト削減 ・現場への資料持込み削減
現地点検	野帳へ新規・履歴変状概要・位置・写真番号を記載 【H30年度 956損傷】	タブレットへ新規・履歴変状概要や位置情報・写真情報を電子記録	・過去変状の見落とし減少
内業	CAD 変状概要等を記載した野帳を基にCADで整理し図面を作成	外業でタブレットにて作成済みのため、CAD作成不要	・内業時間の短縮 ・転記ミスの減少
	システム システムへ新規変状や履歴変状・写真・図面等を登録 【1変状単位】	タブレットで自動作成された点検記録データを一括登録	・内業時間の短縮 ・入力ミスの減少

(3) 今後検討を要する事項

①タブレットシステムの改良

昨年度からの試行運用ということもあり、操作

に不慣れ等の理由で外業に要する所要時間はグループ全体で約1割増となった。外業入力ソフトの簡素化や、スマートフォン並みの操作性にすることにより外業で使い易いシステムへの改良を検討する。

5. 点検支援技術運用状況の総括

前章で紹介した点検支援技術の導入効果を表6に示す。主たる導入目的である「点検精度の向上」、「点検作業の安全性向上」においては、従来手法と比較して効果が得られた。また、付帯的な効果として得られる効率性については、一定の効果は得られたものの、「現地環境の整備」、「気象条件による調査ロス」、「システム・運用の改良」等の課題も明らかとなった。これらの課題を改善すべく、NEXCO グループでは「点検支援技術の利用促進検討WG」を立上げ、各グループ会社との意見交換や新技術の講習会等を実施している。

6. 今後の展開

前章で紹介した点検支援技術の改良を重ね、点検結果の信頼性向上や各技術の高度化を進める。これにより、異常箇所を絞った点検が可能となり、高所作業の削減による点検技術者の安全性が向上するばかりでなく、客観的で品質の高い点検手法の確立が期待される。(図11)

また、UAV等の技術を活用し現在の点検支援技術では死角となるような高橋脚や支承周辺の点検(図12)を実施することで、より効率的・経済的な点検手法が確立できると考えている。

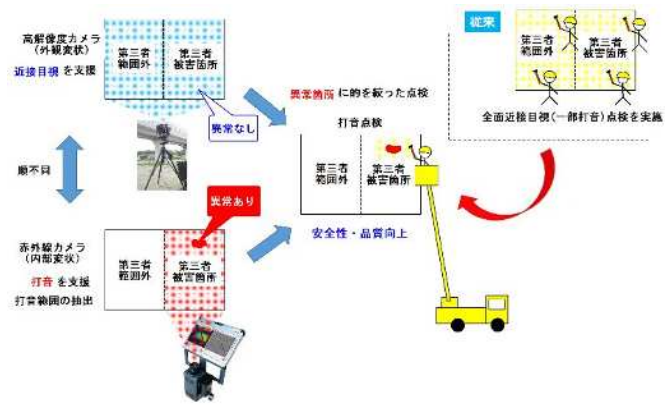


図11 近接目視範囲の削減イメージ

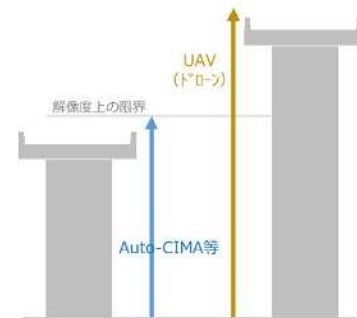


図12 UAVを活用した点検イメージ

7. まとめ

本稿においては、橋梁点検の精度向上及び安全性の向上を目指した点検支援技術を紹介した。今後は、高速道路構造物の経年劣化や潜在的なリスクを確実に把握すべく、のり面やカルバートBOX等の土工構造物全般への展開が期待される。

参考文献

- 1) 西日本高速道路（株）：保全点検要領 構造物編
- 2) （社）赤外線画像診断研究協会：高性能赤外線カメラによる剥落調査マニュアル

表6 点検支援技術導入効果の比較

対象技術	Auto CIMA	J-システム	点検タブレット
安全性	・高所作業が削減され、作業員の安全性が向上 ・本線規制が削減され、本線通行車両の安全性が向上	・高所作業が削減され、作業員の安全性が向上 ・本線規制が削減され、本線通行車両の安全性が向上	◎
点検精度	・事前にスクリーニングが可能となり、変状箇所の事前把握が可能 ・ひび割れの補足率は約100% (0.1mm程度のひび割れ検出) ・外観変状の見落とし防止が可能	・検出率が約100%かつソフトによる解析のため、バラツキや見落とし防止が可能	◎
効率性	・事前にスクリーニングを実施したことで、点検日数が削減 ・撮影箇所によっては、伐採等の事前準備が必要	・赤外線調査の可否が熱的環境によるため、天候に左右される(調査ロス) ・調査時間帯が原則夜間となる	○

従来手法と比較して

◎：著しく向上 ○：向上 △：同等

Session 5 整備・交通

訪日外国人レンタカーへの ピンポイント事故対策効果について

伊藝 誠一郎¹ ・ 仲村 一成²

¹沖縄総合事務局 開発建設部 道路建設課 課長補佐（〒900-0006 沖縄県那覇市おもろまち2-1-1）

²沖縄総合事務局 開発建設部 道路建設課 事業評価係（〒900-0006 沖縄県那覇市おもろまち2-1-1）。

沖縄県は、観光客1,200万人誘致(外国人400万人)を目標に掲げ、観光客数は年々増加し、外国人観光客数も増加傾向にある一方で、外国人観光客が運転するレンタカーの交通事故の増加など、受け入れの課題も顕在化してきている。

沖縄総合事務局ではこれまでに、ETC2.0プローブデータを用いて外国人特有と想定される事故危険箇所を特定し、対象交差点に注意喚起看板の設置等のピンポイント事故対策(仮対策)を実施した結果、外国人レンタカーの交差点進入速度の減少等の一定の効果が確認された。

本稿は、過年度の仮対策の効果検証の結果や、外国人ドライバーへ行ったアンケート等を踏まえて実施した恒久的な対策の実施内容とその効果、および今後の取り組み内容を報告するものである。

キーワード 地域道路経済戦略研究会（沖縄地方研究会）、ETC2.0、ピンポイント事故対策

1. はじめに

(1) 背景と目的

沖縄県において、入域観光客数数は年々増加傾向であり、平成30年度では1000.4万人となった[図1]。また、平成29年3月に沖縄県は第5次沖縄県観光振興計画改訂版の中で、令和3年度までに入域観光客を1,200万人(うち外国人400万人)の誘致の目標を掲げた。

また、国土交通省道路局は、情報通信技術や多様なビッグデータを最大限に利活用し、道路を賢く使い、道路空間の有効活用による地域経済活性化戦略と、これを実現するための社会実験、実装について研究を行うことを目的に、有識者からなる「地域道路経済戦略研究会」を設立した。その中で、沖縄県では「観光」をテーマに観光客の渋滞回避について、地域の道路を活かした政策や、道路空間の有効活用による地域経済活性化戦略と、これを実現するための社会実験・実装についての研究(施策)を行うことを目的に「地域道路経済戦略研究会(沖縄地方研究会)」(以下、沖縄地方研究会)を設立した。

(2) 沖縄観光(本島)が抱える課題

沖縄地方研究会では、「観光」をテーマに各関係者へヒアリング調査を実施し、観光資源が豊富で観光客も多い沖縄本島において「安全」・「快適」・「円滑」の観点から、解決すべき様々な課題を抱えていることを明らかにした。

a) 安全

入域観光客の増加に伴い、外国人観光客も増え、日本

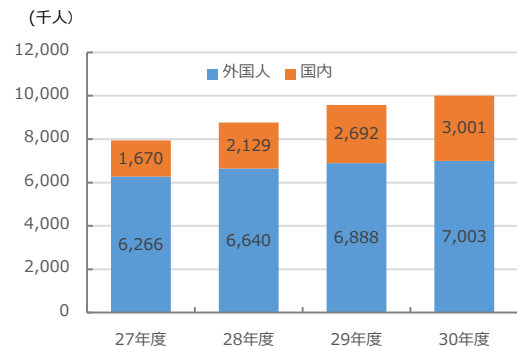


図-1 沖縄県入域観光客数の推移

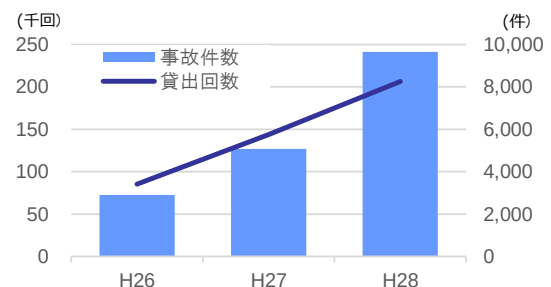


図-2 外国人レンタカー利用者と事故件数

の交通ルールに不慣れな外国人のレンタカー利用による事故件数も急増している[図-2]。一方で、安全対策が必要とされる危険箇所や要因については、定量的に把握出来ていないのが現状である。

b) 快適(満足)

沖縄本島には、海洋博公園(沖縄美ら海水族館)や、世

界遺産、海浜リゾートなど、著名で魅力的な観光資源が多数存在するが、特定の観光地に観光交通が集中し渋滞が発生している。

c) 円滑

都市内の慢性的な渋滞に加え、観光シーズンには観光交通が集中し地方部でも交通混雑・渋滞が発生している。

沖縄地方研究会では、様々な課題を抱えている沖縄本島を対象に、更なる観光振興や満足度向上に伴う地域経済活性化を目的として、本島内の観光行動(周遊パターン)を把握するため、持続的に交通ビッグデータ(ETC2.0プローブデータ)の収集・分析を行い、活用方策について検討・提言を行った。

本稿は、「安全」に係る外国人レンタカーの安全性の向上に着目し、過年度の外国人特有と想定される事故危険箇所へのピンポイント安全対策(仮対策)の結果を踏まえ、恒久的な対策を検討・実施するとともに、その効果と今後の取組み内容について報告するものである。

2. これまでの取組み

(1)外国人特有の事故危険箇所の特定

ETC2.0プローブデータを用い危険挙動(急減速)が多発している箇所を事故危険箇所として抽出した。そして、外国人レンタカーと沖縄県民の走行台数あたりの急挙動発生件数(急挙動発生割合(件/千台))を比較することで、表-1のように外国人特有と想定される事故危険箇所を特定した。なお、外国人レンタカーの具体的な事故発生箇所や状況に関するデータは県警等より入手できなかった。

(2)ピンポイント事故対策(仮対策)の実施

前項で示した外国人特有の事故危険箇所のうち、急減速の発生割合が最も高い古宇利島付近の交差点(以下、地点1交差点)にて、ピンポイント事故対策を実施した。

当該交差点は無信号の丁字交差点であり、発生している急減速の約7割が従道路である古宇利島方面からの進入車両によるものであった。そのため、当該方向に対し、交差点手前での速度低下と一時停止を促す英語表記の注意看板を設置した。なお、急減速車両の約9割が右側通行の台湾・韓国からの観光客であり、自国と異なる左側の一時停止(止まれ)標識を見落とす恐れがあったため、注意看板の設置位置は道路右側とした[図-3]。

(3)仮対策の効果検証

ETC2.0プローブデータにより急減速発生状況を対策前後で比較したところ、外国人レンタカーの急減速発生割合の変化は確認できなかった。

しかしながら、ビデオ観測により交差点への進入速度を計測した結果、日本人よりも高かった外国人レンタカーの進入速度が、仮対策後には日本人(沖縄県民、レンタカー)と同程度まで低下した[図-4]。また、外国人レン

表-1 急挙動の発生状況

交差点名称	外国人観光客レンタカー (ETC2.0特定プローブ:H29.05~12)			沖縄県民 (ETC2.0プローブ:H29.04~10)		
	急減速 件数	走行 台数	急減速 発生割合 (件/千台)	急減速 件数	走行 台数	急減速 発生割合 (件/千台)
地点1	30	215	139.5	17	411	41.4
具志堅西	23	180	127.8	6	297	20.2
地点2	17	202	84.2	1	311	3.2
大浜	26	381	68.2	19	874	21.7
地点3	8	118	67.8	24	1,357	17.7
地点4	11	163	67.5	8	407	19.7
...	...	...	...	...	...	...



図-3 地点1交差点のピンポイント対策(看板設置箇所)

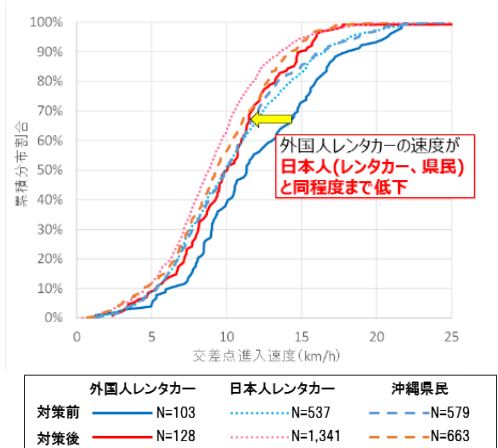


図-4 交差点進入速度(停止線から横断歩道端)

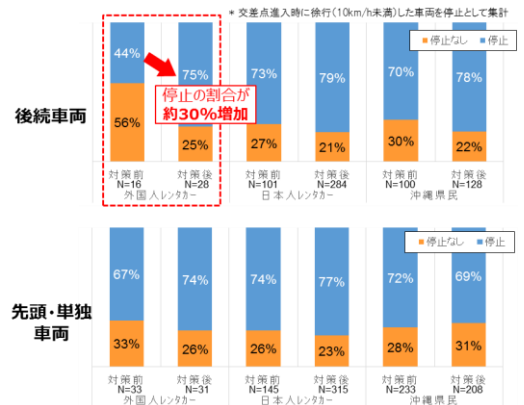


図-5 右折車両の交差点手前での停止状況

タカーが右折する際の一時停止割合が向上し、特に後続車両においてその傾向が顕著であった(3割程度)[図-5]。

このように外国人ドライバーに対し、一時停止の注意喚起を行うことで、安全性が向上することが確認された。

3. 恒久的な安全対策の実施

(1) 対策内容の改善案の検討

地点1交差点を通過した外国人レンタカードライバー(50人)に、ピンポイント事故対策(仮対策)に対する聞き取り形式のアンケートを実施し、注意看板の認知度や恒久的な対策に向けた対策内容の有効性について調査した。

その結果、50%(25/50人)のドライバーが注意看板に気づき[表-2]、そのうち88%(22/25人)が一時停止を認識したことが確認された。一方で、50%のドライバーは注意看板に気づいておらず、恒久的な対策では認知度の向上のための改善が必要であることが明らかとなった。

また、対策内容の改善の方向性としては、標識や路面標示の英語表記や、カラー舗装が有効との回答が多かった[図-6]。これより外国人ドライバー向けの注意喚起方法として、国籍に左右されないよう、路面標示/カラー舗装などにより直感的(視覚的)に注意を引く対策[認知]と、英語表記のように注意すべき内容を周知する対策[理解]とを組み合わせることが有効であることが確認された。

(2) 恒久的な安全対策の実施内容

(1)の検討結果をふまえ、地点1交差点への恒久的な安全対策として、一時停止(止まれ)標識・路面標示への「STOP(英語表記)」の追加と、交差点手前区間へのカラー舗装を実施した。実施状況を図-7に示す。

4. 恒久的な安全対策の効果検証

(1) 効果検証方法

仮対策時と同様に、ETC2.0プローブデータおよびビデオ観測により恒久的な対策の効果を検証した。

a) ETC2.0プローブデータによる急挙動発生状況の検証

外国人レンタカーのETC2.0プローブデータ(挙動履歴情報)により、急挙動の発生状況の変化を確認した。検証期間は、対策前：2017年5月～2018年6月15日(295台)、仮対策後：2018年6月13日～2019年11月27日(207台)、恒久対策後：2019年11月28日～2020年1月31日(41台)である。

b) ビデオ観測調査による交差点進入状況の検証

ETC2.0プローブデータは取得間隔が200mであり、交差点への進入速度のようなミクロな走行状況の分析には不向きである。そのため、ビデオ観測により検証した。

■調査日時

《対策前》H30.6.6(水) 12:00～18:00

《仮対策後》H30.8.8(水) 12:00～18:00

《恒久対策後》R2.1.28(火) 11:00～17:00

■調査項目

・車両情報：レンタカー(外国人/日本人)*1/一般車(県民)

*1 レンタカーのステッカーにて判断

・走行状況：単独・先頭/後続車

・進行方向：左折/右折

・断面通過時刻：停止線位置～横断歩道端の間

・一時停止(2断面間の速度が10km/h未満)の有無

表-2 国籍別の安全対策(看板)の認知状況

国籍	回答者数	通過者数	認知者数 (気づいた)
台湾	77人	39人	25人
韓国	33人	7人	0人
香港	5人	1人	0人
米国	3人	0人	0人
その他	14人	3人	0人
合計	125人	50人	25人

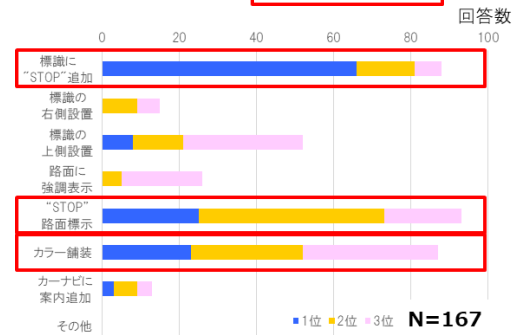


図-6 対策内容の改善方向性に関する調査結果



図-7 地点1交差点への恒久的な安全対策

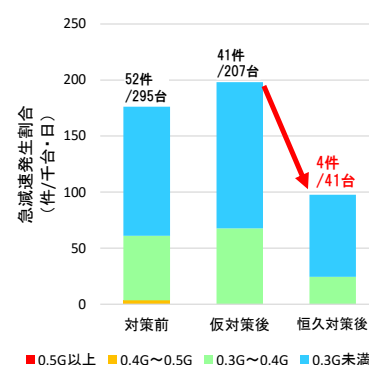


図-8 対策前後の急減速発生状況の比較(外国人レンタカー)

(2) 効果検証結果

a) 急挙動発生状況の比較

対策前後の外国人レンタカーの急減速発生割合を図-8に示す。仮対策後は対策前と比べ急減速発生割合の減少が見られなかったものの、恒久対策後には大幅な減少が確認された。但し、恒久対策後のサンプル数は40台程度であり、サンプル数を増やし再度検証する必要がある。

b) ビデオ観測調査による走行状況の比較

対策前後の外国人レンタカーの交差点進入速度の累積分布を図-9に示す。10km/h未満の割合に着目すると、対策前：39%に対し、仮対策後：50%、恒久対策後：62%と、対策により低い速度で進入する車両の割合が増加したことがわかる。また、図-10より各対策時点の国籍別交差点進入速度を比較すると、対策前には沖縄県民よりも高かった外国人レンタカーの進入速度が、恒久対策後には沖縄県民よりも低くなったことが確認できる。

次に、対策前後の交差点での一時停止状況を図-12に示す。仮対策により停止割合が向上した右折車は、恒久対策後も同様の状況で推移している。左折車は仮対策時には効果がみられなかったが、恒久対策により停止割合が大幅に向上し日本人と同程度になったことがわかる。

5. まとめ

本稿では、外国人特有の事故危険箇所(地点1交差点)に対し、ピンポイント事故対策(仮対策)を実施後、外国人ドライバーへのアンケート結果を踏まえ、標識・路面標示への英語表記(STOP)の追加やカラー舗装といった恒久的な対策を実施した。その結果、仮対策時には見られなかった急減速発生割合の減少のほか、交差点への進入速度の低下、一時停止割合の増加といった効果が見られ、対策による安全性の向上が確認された。今後、当該交差点と道路構造や交通状況等が類似する箇所については、県警等と協議・調整を行い対策の導入を検討していく。

このほか、ETC2.0プローブデータを活用し、地点1交差点以外の危険挙動の多発箇所を抽出し分析を実施した。その結果、以下に示す特性の交差点で急減速が多い傾向が確認された。今後は、これら箇所においても地点1交差点同様に急減速の発生要因を調査・分析し、対策を検討・実施していくことで、外国人レンタカー交通の安全性確保に向けた取組みを進めていく予定である。

- 無信号交差点(優先/非優先のルールが分かりづらい)
- 急勾配の下り坂、信号間隔の長い区間等の速度超過が発生しやすい交差点
- カーブ区間の先など見通しが悪い信号交差点

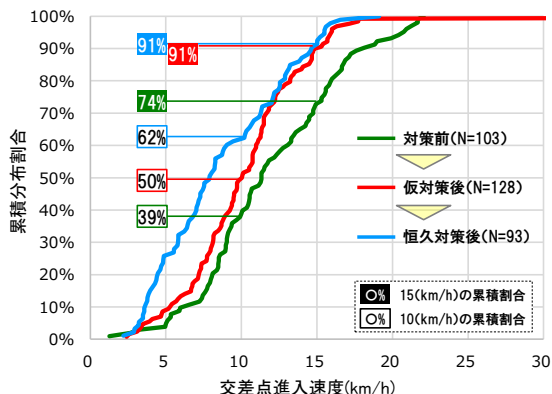


図-9 対策前後の交差点進入速度の比較(外国人レンタカー)

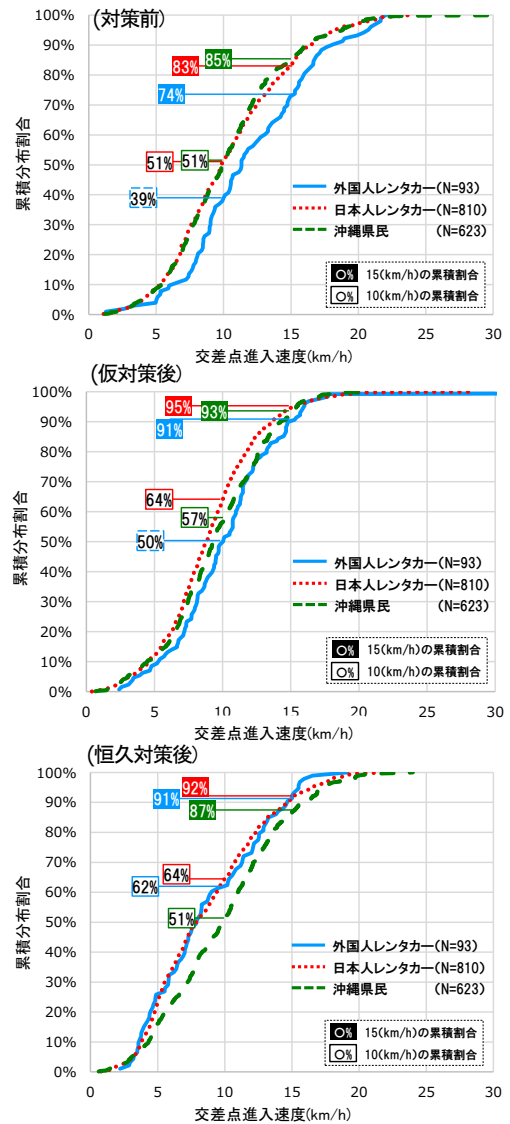


図-10 対策前後の国籍別交差点進入速度の比較

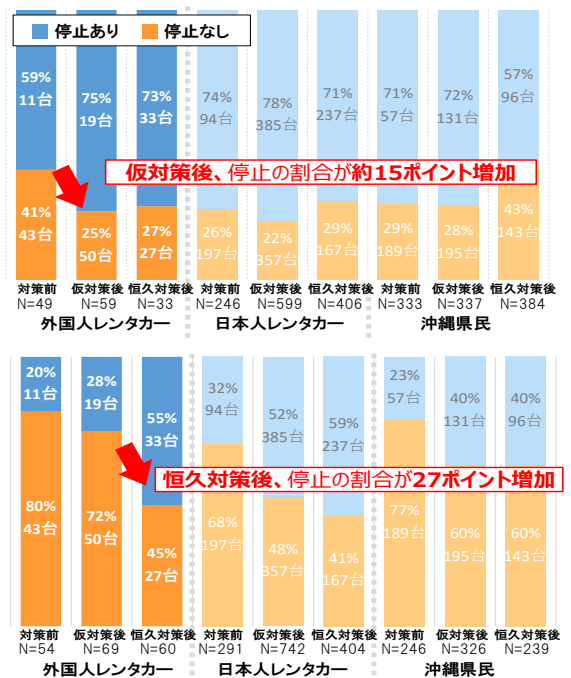


図-11 交差点の一時停止状況(上段:右折折車, 下段:左折)

ビッグデータを用いたヒヤリハット分析について

原戸 鉄平¹

¹南部国道事務所 交通対策課 (〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-8-14)

沖縄県内の直轄国道を対象として、事故件数としてはまだ顕在化していないが、急ブレーキが多く、将来的に事故危険性の高い箇所（ヒヤリハット箇所）の抽出、分析、対策立案を実施した。急ブレーキデータとしては、プローブデータを用い、ヒヤリハット箇所の抽出手法や詳細な分析手法、現地踏査を踏まえた原因の特定と対策立案までの流れについて紹介する。

キーワード ETC2.0

1. はじめに

(1) これまでの交通事故対策の進め方と本検討の着眼点

これまでの交通事故対策は、人身事故が発生した箇所を対象として、その原因を取り除き、同様の事故を減少させることを目的としており、『事故が発生するまで対策を実施しない』状態であった。

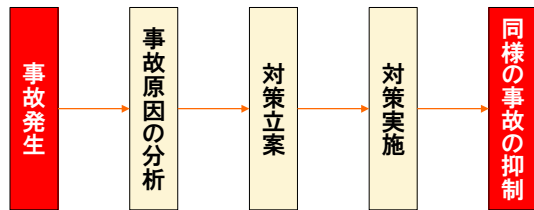


図-1 これまでの事故対策の流れ

本検討では、事故件数としてはまだ顕在化していないが、急ブレーキが多く、将来的に事故危険性の高い箇所（潜在的危険箇所）に対して、『事故を未然に防ぐ（予防保全）』ための対策を実施したものである。

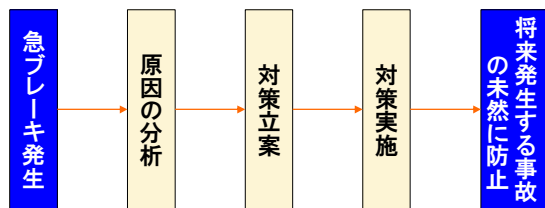


図-2 予防保全による事故対策の流れ

2. 潜在的危険箇所の抽出

(1) 潜在的危険箇所の抽出手法

任意の区間にて、事故データ及び急ブレーキデータを集計し、各発生確率を比較することにより、事故発生確率が低く、急ブレーキ発生確率の高い箇所を抽出することとした。

具体的なフローを図-3に示す。

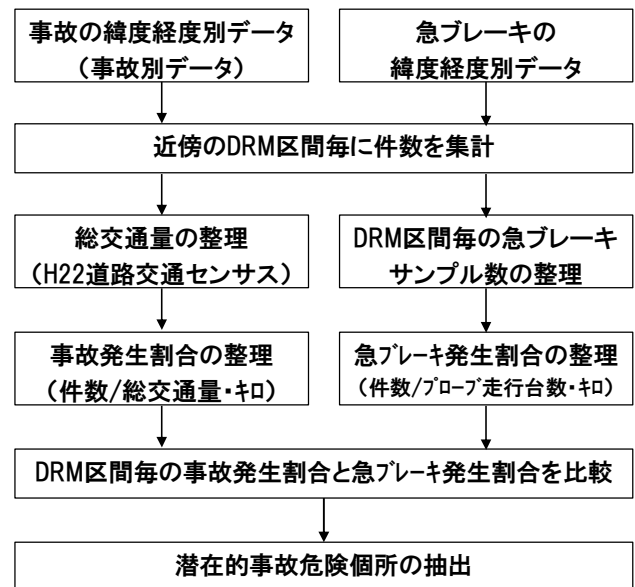


図-3 潜在的危険箇所の抽出フロー

(2) 使用データ

任意の区間としては、カーナビやプローブデータ集計等に広く使用されているDRM（Digital Road Map）区間を用いることとし、その他各データについては表-1に示すデータを用いて抽出を行った。

表-1 使用データ一覧

	データ名称
事故データ	ITARDA事故統合データ事故別(H23-H26)
急ブレーキデータ	民間プローブ急減速データ(H27.9-H28.3)
総交通量	H22道路交通センサス
プローブ走行台数	民間プローブDRMリンク集計値(H27.9-H28.3)
区間延長	DRM区間長(ver.2603)

(3) DRM区間別発生確率の算出

下記計算式より、DRM区間それぞれの事故発生確率、

急ブレーキ発生確率を算出した。

事故発生確率

= 事故件数 ÷ 道路交通の1日交通量 ÷ DRMリンク長

急ブレーキ発生確率

= 急ブレーキ件数 ÷ プローブ走行台数 ÷ DRMリンク長

以下に沖縄県内の集計結果を図化したものを示す。

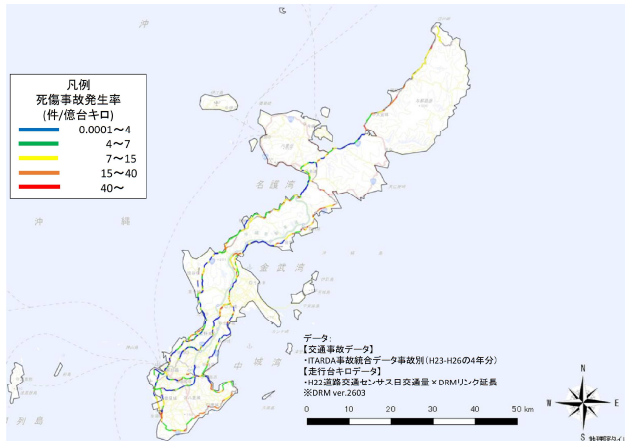


図4 事故発生確率反映図

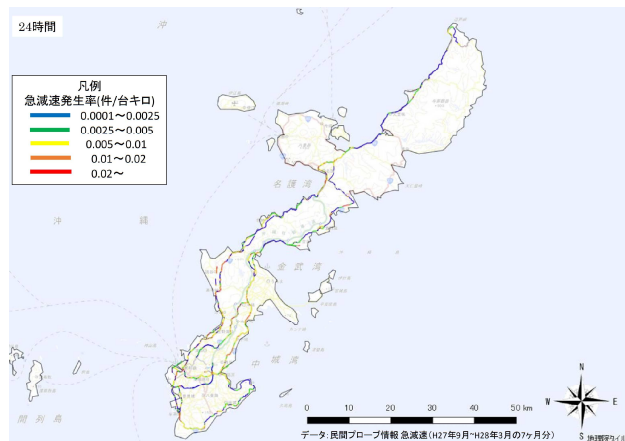


図5 急ブレーキ発生確率反映図

(4) 潜在的危険箇所の抽出

DRM区間別の事故発生確率と急ブレーキ発生確率を整理し、下記基準のもと潜在的危険箇所の抽出を行った。

潜在的危険箇所抽出の閾値

事故発生確率：100[件/億台キロ]以下（全国平均相当）
かつ、急ブレーキ発生確率上位10位程度

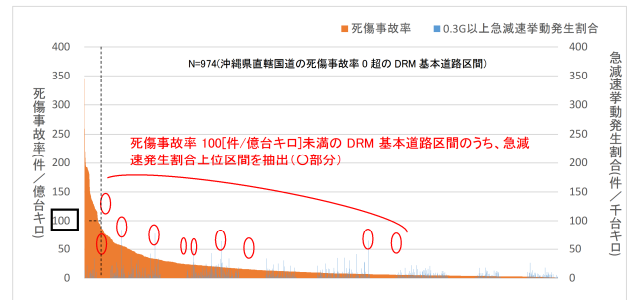


図6 DRM区間別死傷事故率曲線図、危険箇所抽出

抽出の結果選定された上位11か所のうち、すでに対策検討が予定されている箇所（事故ゼロプラン選定箇所等）を除いた4箇所について、詳細な分析、現地確認、対策立案を実施した。

表-2 抽出結果及び検討箇所選定結果表

No	交差点名	死傷事故率 (件/億台キロ)	0.3G以上 急減速発生割合 (件/千台キロ)	事故ゼロプランでの 選定箇所との重複 対策状況
①	伊良皆(北)	85.5	56.0	
②	比屋根	76.9	129.9	重複
③	嘉手納町ローリープラザ前	56.6	84.1	要望有、対策実施
④	城一丁目	33.3	77.7	
⑤	国道道路入口	24.6	49.9	
⑥	太平	24.5	53.8	重複
⑦	浦添バイパス西原IC前	23.1	47.6	重複
⑧	浦添バイパス西原IC前	19.0	64.2	重複
⑨	牧港	15.5	50.4	重複
⑩	太平	6.9	64.9	重複
⑪	名嘉地	5.8	52.6	

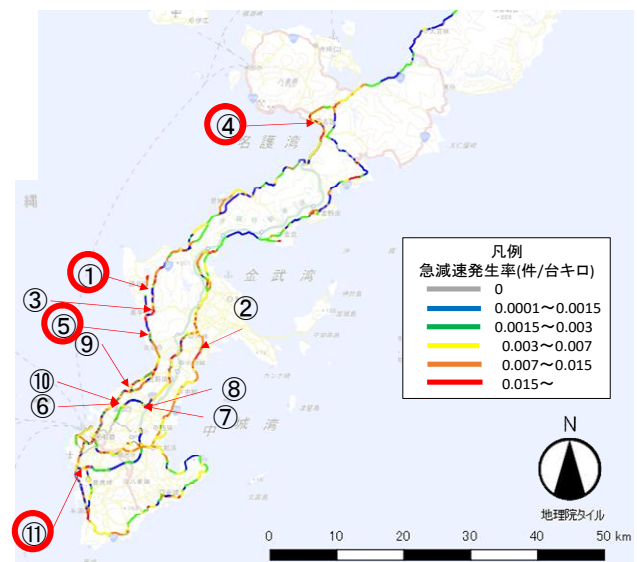


図7 潜在的危険箇所の抽出箇所位置図

本論文では、そのうち『国道道路入口交差点』について記載する。

3. 潜在的危険個所の詳細分析

民間プローブデータを用いて、潜在的危険個所の詳細分析を行った。分析項目としては、急ブレーキ発生位置分析（10mピッチでの集計分析）、発生時間帯分析（ピーク時、昼夜の割合分析）を行っている。

(1) 急ブレーキ発生位置分析

箇所抽出の際に、分析を行ったDRM区間毎の急ブレーキ発生割合、事故発生割合は図-8のようになっており、区間全体としての傾向を把握することは可能であるが、対策を実施すべき箇所の特定を行うためにはより詳細な位置の把握が求められる。



図-8 DRM区間別の分析結果

本検討では、道路延長線上で10m毎に区間を分割し、急ブレーキの数を集計することで、急ブレーキが集中している箇所の特定を行うこととした。分析結果を図-9に示す。

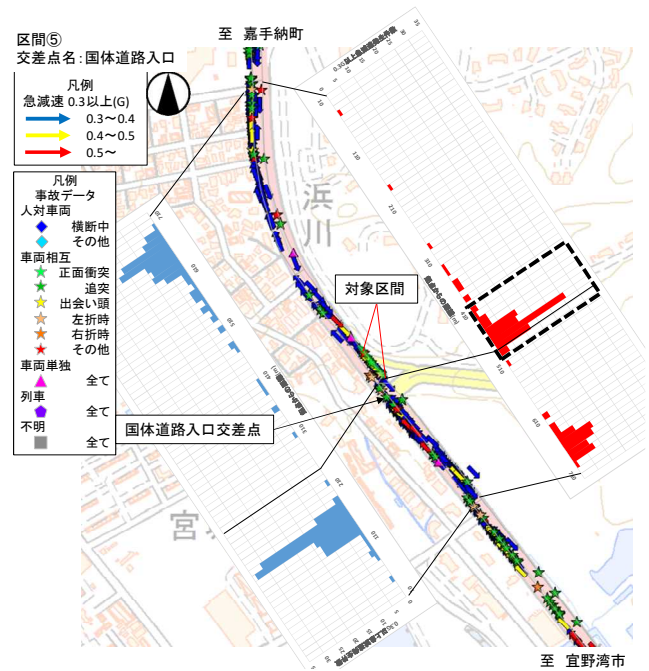


図-9 10mピッチでの分析結果

国道道路入口交差点では、下り線停止線直近に急ブレーキが集中している状態であることが確認できた。

(2) 発生時間帯分析

急ブレーキが集中している時間帯等、時間軸での特徴を把握するために、発生時間帯毎の割合を算出し、沖縄県全域平均値と比較を行った。

分析対象時間としては、ピーク時分析（朝、夕、OFF）、昼夜分析を行っている。詳細な時間帯については下記に示す。

【ピーク時分析】

朝ピーク時：7～9時 、 夕ピーク時：17～19時
OFFピーク時：0時～7時、9時～17時、19時～24時

【昼夜分析】

昼：7～19時 、 夜：0～7時、19時～24時

分析結果を図-10、図-11に示す。

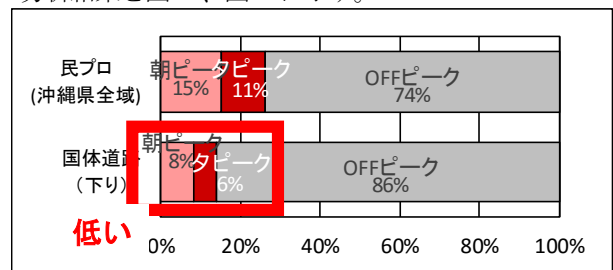


図-10 ピーク時分析結果

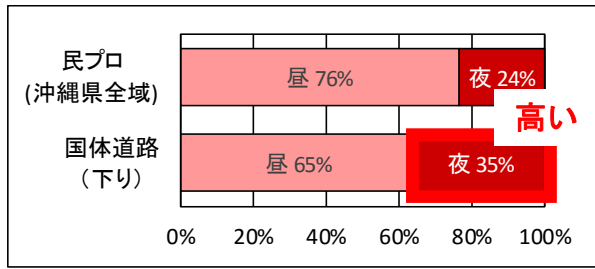


図-11 昼夜分析結果

国体道路入口交差点では、各ピーク時の割合が低く、夜の割合が高いことから、ピーク時に急ブレーキを観測しない速度(30km/h以下)となっている可能性が考えられ、原因としてピーク時の渋滞影響が考えられるため、整備効果分析時に留意が必要である。

4. 現地確認による原因分析

詳細分析の結果を踏まえ、下り線停止線直近の区間に着目し、現地確認を実施した。

現地確認の結果、交通量が多く、信号による滞留は長い傾向(図-13、14)や、1kmほど続く下り勾配となっており、速度が出やすい環境(図-15)が見られた。



図-12 写真位置図



図-13 長い滞留写真



図-14 長い滞留写真

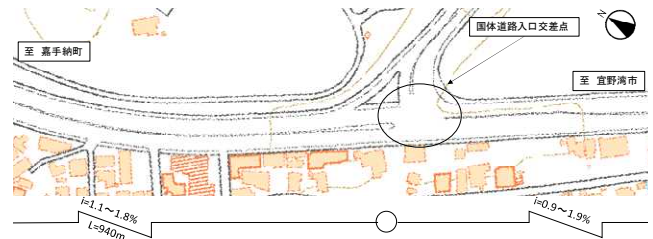


図-15 下り勾配状況

現地確認の結果を踏まえ、急ブレーキが多い原因としては、『長い下り勾配が原因』及び『信号の変わり目における無理な交差点進入・停止の判断の差』が原因であると考えられる。

5. 対策立案

現地踏査にて把握した原因を解消する対策について、検討を実施した。

『速度超過』『無理な交差点進入』に対する対策となることから、【速度抑制対策】及び【無理な交差点進入の抑止対策】が対策方針となる。

具体的には、減速路面表示(ドットライン)及び注意喚起路面表示(追突注意)、停止線のワイド化、交差点のコンパクト化(実施済み)を対策案として立案した。

対策図について図-16に示す。

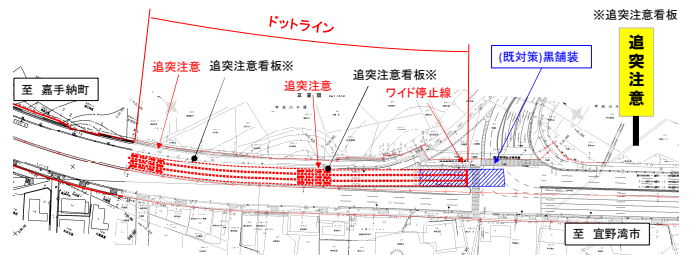


図-16 国体道路入口交差点の対策図

6.整備効果

対策実施箇所における整備効果を、対策前後の急減速の変化により把握した。また、分析については長い滞留による影響を受けにくいETC2.0データにて分析を実施した。

整備備考効果の把握については、急ブレーキの発生回数では、サンプル数の差が影響し、比較が困難であることから、発生確率（急ブレーキ発生回数÷サンプル数）にて評価を行った。

整備前後の比較の結果、対策後急ブレーキ発生確率が13%減少した。

対策内容が減速路面表示（ドットライン）及び注意喚起路面表示等であり、交差点直近での早めのブレーキ行動等による急ブレーキが減少したと考えられる。

急ブレーキの発生位置図（事前、事後）を図-17、18に急ブレーキの発生回数の月別推移を図-19に対象期間における発生回数の変化を図-20に整備前後の写真を図-21に示す。

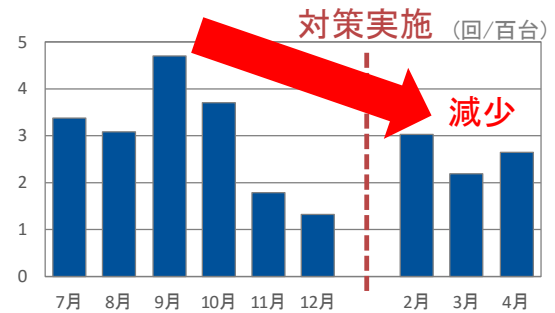


図-19 対策前後の急減速発生回数（月別）

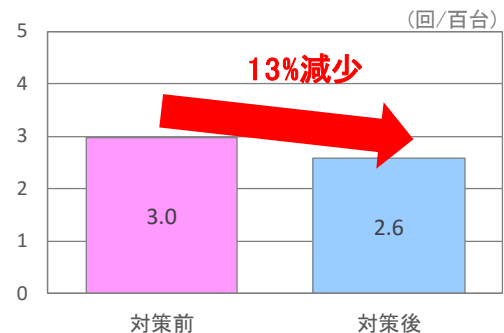


図-20 対策前後の急減速発生回数

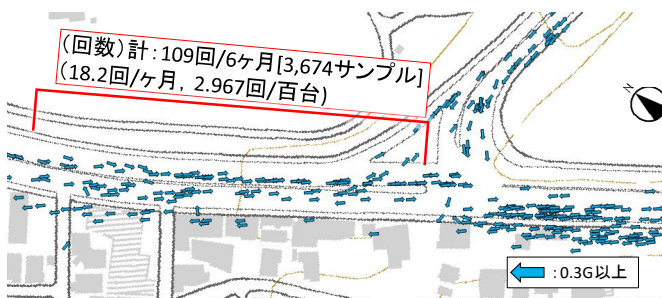


図-17 対策前急ブレーキ発生位置図
(2017年7月～2017年12月（6ヶ月））

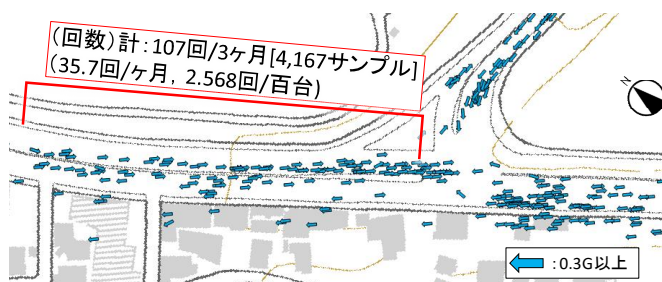


図-18 対策後急ブレーキ発生位置図
(2018年2月～2018年4月（3ヶ月））



図-21 事前事後の現地写真

7. 終わりに

(1) プローブデータを用いた潜在的危険個所の抽出の可能性

今回、プローブデータを用いた潜在的危険個所の抽出を実施し、地元要望がすでに上がっている箇所や、現地確認の結果危険性の高い箇所が抽出されており、抽出の妥当性の高さが確認できた。

今までの交通事故対策は、事故データに依存していたため、事故が発生してから対策しか行えず、どうしても後手に回っていたが、新たにプローブデータの活用の可能性が見えてきた。

今後の交通事故削減に向けた取り組みとして、事故が発生する前に先行して対策を実施する予防保全対策を推進することで、発生する事故を未然に防ぎ、事故件数の削減を図ることが期待できる。

(2) 対策実施個所の整備効果把握

プローブデータの強みの一つとして、データ取得の迅速さがあげられ、早期に整備効果の把握が可能である。

H29.2に対策実施を行ったことから、今後定量的なデータ取得を行い、急ブレーキの発生件数の減少などから、整備効果把握を実施する必要がある。

なお、先行して、周辺商業施設へヒアリングを実施し、以下のような回答を得ている。

- ・安全になったと感じている。
- ・観光客も多いので、路面標示のような注意喚起は実施した方がよい。
- ・路面標示も追突注意看板も両方対策したほうがよい。

別紙2 (論文)

平良港国際クルーズ拠点整備事業の 取組みについて

○沖縄総合事務局 平良港湾事務所 横山 美穂・金城 健吾

近年、沖縄県への国際クルーズ船の寄港回数は年々増加しており、2019年は平良港においても過去最多で全国6位となる147回の寄港があった。しかし、平良港ではクルーズ船専用岸壁がなく、安全面や環境面等で課題も多かった。そうした課題に対応するため2017年度から「平良港国際クルーズ拠点整備事業」が開始され、並行して港湾管理者や民間業者等と協力したクルーズ船の受け入れ体制の強化を図ってきている。本論文では「平良港国際クルーズ拠点整備事業」の実施を通して、平良港におけるハード・ソフト面のクルーズ船受入体制強化の取組みと今後の展望について報告するものである。

1. 平良港国際クルーズ拠点整備事業について

(1) 平良港のクルーズ船受入状況

宮古島は沖縄本島から南西に約300km、東京から約1800kmに位置し、豊かな自然環境や歴史的・文化的特性を有する魅力的な観光リゾート地である。2015年の伊良部大橋の開通や、平良港へのクルーズ船の定期就航等により宮古島の知名度が上がり、空路・海路共に入域観光客数が年々増加している。

平良港は古くから島民の生活物資の受け入れや周辺離島である多良間島への貨物の積み替え拠点としての役割を果たしてきたが、クルーズ船の定期就航により、現在では海路の観光客受け入れの玄関口ともなっている。平成26年まで那覇港や石垣港に比べクルーズ船の寄港回数は低調に推移していたが、2015年にクルーズ船が定期就航するようになってからは寄港回数が大幅に増加し、2019年には全国6位となる147回の実績を記録している。

しかし、平良港ではクルーズ船専用の岸壁がないため、5万トン級以下のクルーズ船は市街地から約3km離れた貨物用岸壁の下崎埠頭で受け入れており、5万トン級を超えるクルーズ船は沖に停泊しテンダーボートに乗り換えて上陸を行っている。また、出入国手続きのためのCIQ設備を備えた旅客施設が無いため、毎回受入導線等の準備が必要となっている。更に、クルーズ船の寄港が急激に増加したことにより、二次交通や対応する人材の不足等周辺環境の課題も多く抱えている。

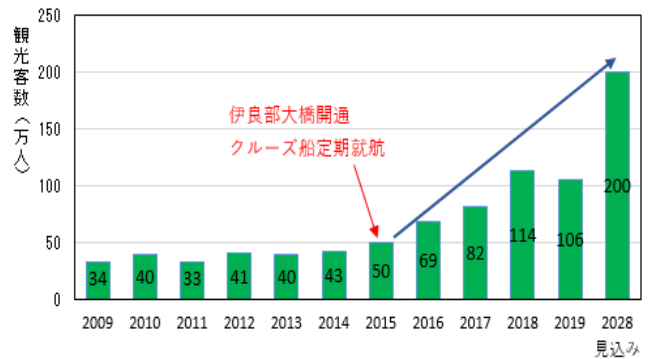


図-1 宮古島市入域観光客数の推移

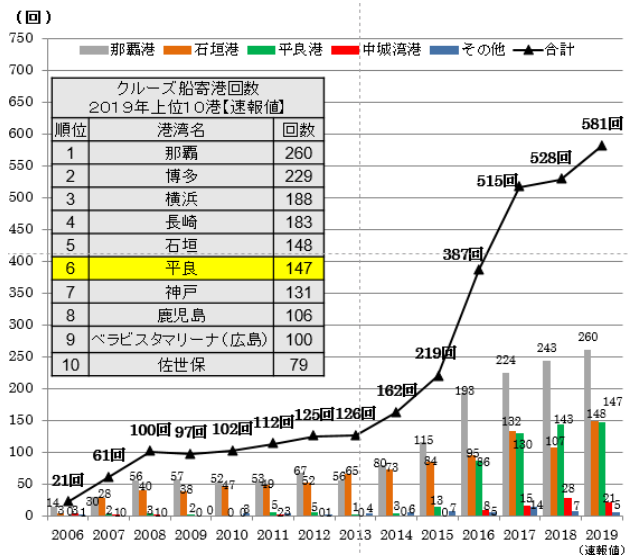


図-2 沖縄へのクルーズ船の寄港回数の推移

キーワード 国際クルーズ船、クルーズ振興

連絡先 沖縄総合事務局 平良港湾事務所 (〒906-0012 沖縄県宮古島市平良字西里 7-21)

E-mail:yokoyama710-miho.b9f@ogb.cao.go.jp

(2) 平良港国際クルーズ拠点整備事業

平良港湾事務所では、これらの課題に対応するため、ターミナル機能の強化や周辺環境の整備等を港湾管理者の宮古島市と共に行っており、その一つが2017年から進めている「平良港国際クルーズ拠点整備事業」である。この事業は、2020年春までに14万トン級クルーズ船対応の岸壁及び受入施設を整備し、引き続き2022年春には22万トン級に対応可能な岸壁に拡張することとなっている。事業完了後は2026年に現在の倍以上となる年間310回のクルーズ船寄港を目標にしており、寄港回数の増加やクルーズ船の大型化による経済効果が期待されている。

また、平良港を海路の玄関口として周辺市街地に商業施設エリアや賑わい空間を整備する「みなとまち宮古再生プロジェクト」が計画されており、クルーズ客の快適性の向上だけでなく、市街地全体の活性化が期待されている。

2. 事業におけるハード整備について

(1) 施設配置計画及び岸壁の構造検討について

平良港の既設岸壁では大型クルーズ船の接岸が出来ないため、急増するクルーズ船の寄港に対応するために新たな岸壁の整備が必要となった。新たな岸壁は、寄港が見込まれる大型クルーズ船に対応できる岸壁及び回頭水域を確保できる場所を検討した結果、漲水地区の防波堤北外側に岸壁を整備し、その前面は必要な水深を確保する為、航路・泊地の浚渫を行うこととした。また、その背後に岸壁から陸上の一般道路へアクセスする臨港道路を計画した。

また、施設の構造検討にあたっては、急増するクルーズ船に早急に対応するため、施工期間を極力短くすることも条件に検討した。



図-3 平良港国際クルーズ拠点整備事業概要図

岸壁の構造は、本岸壁に適用性の高い構造形式である「ケーソン式」、「控え矢板式」、「栈橋式」を構造形式として抽出し、一次比較を行った結果、最も経済性に優れ、施工期間の短い「栈橋式」を採用した。また、栈橋式の構造形式として、「RC栈橋式」、「PC栈橋式」、「ジャケット式」を抽出し、比較検討を行った結果、最も経済性に優れ、施工期間の短い「ジャケット式」を採用する事とした。また、臨港道路の構造についても比較検討を行った結果、埋立部は経済性に優れ、施工期間の短い「コンクリートブロック式+裏込石」を採用し、橋梁部は経済性、施工性、維持管理性等から「7径間連続プレテンスラブ橋ラーメン構造」を採用した。

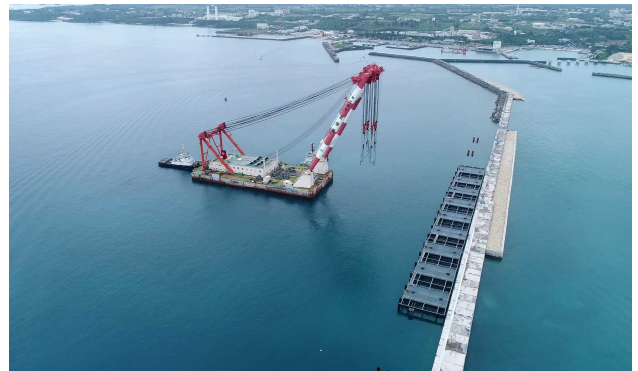


図-4 ジャケット据付工事の様子

(2) 施設整備の概要

主な施設としては、「岸壁・係留部」、「臨港道路埋立部・陸上部」、「臨港道路橋梁部」があり、それぞれの工事概要を以下に示す。

① 岸壁・係留部

まず、整備箇所にある既設防波堤の消波ブロックを撤去し、水深確保のため浚渫工事を行った。岸壁部は、ジャケットを載せるための基礎となる鋼管杭を打設し、県外で製作したジャケットをえい航運搬し、大型起重機船によりジャケットの据付けを行った。その後、防波版の取付けを行い、ジャケット海中部の基礎捨石及び被覆石の均しを行った。ジャケット上部については、製作した床版を設置し、その上にインターロッキング舗装や付属物（車止め・防護柵等）を設置し完成した。また、係留部（ドルフィン）については、鋼管杭打設後に係船柱の取付けや上部コンクリート打設を行い、係留ロープを取るために人が渡る連絡橋を設置し完成した。

② 臨港道路埋立部・陸上部

臨港道路護岸の基礎として防波堤内側に基礎捨石を投入・均しを行い、その上に陸上にて製作した本体ブロックを据付けし、上部コンクリートの打設を行った。その後、防波堤と本体ブロック・上部コンクリートの間に裏込石を投入し、シート敷設、路盤工を行い、アスファルト舗装を行い、最後に防護柵、ガードレールを設置した。

③ 臨港道路橋梁部

橋梁部は、臨港道路埋立部と陸上部の海上132m区間に連絡橋を架ける工事である。陸上部では場所打杭・橋台の施工を行い、海上部では橋脚杭を打設し、その上に橋脚コンクリートを製作し橋脚を設置した。その後、工場で製作したPC桁を架設し、地覆コンクリートを打設し、渡版を設置し、アスファルト舗装を行った。



図-5 完成した施設全景

(3) 景観検討

クルーズ船乗客がまず降り立つ玄関口として『これからの楽しい時間を期待させる宮古島らしい「はじまりの場所」』を実現させるために、以下の方針を基に景観検討を行った。

- ・岸壁の機能や利用形態に対して、必然性や整合性と経済性の調和のとれたデザインとする。
- ・厳しい塩害環境に対し、整備当初の景観形成の意図を将来にわたり維持しやすくすることを念頭に置くとともに、一定の劣化補修や設備交換等の維持管理の合理性等を考慮したデザインとする。
- ・宮古島に最初に降り立つ場として期待感が感じられ、かつ島内で楽しい時間を過ごす中で、まちと岸壁がつながるような（宮古島の良さが再発見できるような）デザインとする。

検討の結果、宮古らしさを演出するデザインとして、織物の宮古上布をモチーフにする案を採用し、さらに、宮古上布のデザイン・配色案を検討し、以下のデザインを取りまとめた。

- ・航路から岸壁を見ると、接岸して岸壁を俯瞰する際に、宮古島に初めて降り立つ場として期待感を演出することが大事であり、全体の岸壁ベース色をサンゴ礁でできた白い砂浜をイメージした乳白色に設定。
- ・岸壁の模様は宮古上布をイメージさせる柄（七宝紋）を採用し、地域性を表現した。模様色は沖縄らしい華やかさ、高揚感を演出するベンガラ色を採用することで、周りの海の青色にも映える配色とした。

その他に、防波版・防舷材・係船柱等付帯施設も岸壁のイメージに合わせた配色となる様検討を行った。

A-1案：麻の葉×藍色		A-2案：麻の葉×ベンガラ色	
模様と色彩の華やかさがやや欠ける。	△	模様の華やかさがやや欠ける。	△
B-1案：七宝紋×藍色		B-2案：七宝紋×ベンガラ色	
色彩の面で華やかさにやや欠ける。（落ち着いた印象となる）	○	模様と色彩が華やかで期待感を演出している。	◎

図-6 岸壁デザインの比較



図-7 完成した岸壁

3. ソフト環境の整備について

(1) クルーズ船の定期寄港開始に向けた取り組み

ハード面の平良港国際クルーズ拠点整備事業の工事で並行して、ソフト面の受け入れ環境についても官民が協力して取り組みを進めてきた。2008年に設立された「宮古島クルーズ客船誘致連絡協議会」では、市・県・国及び宮古島商工会議所、宮古島観光協会、陸上交通関連等の民間事業者が一体となり、東アジアを中心とした好調なクルーズ需要を取り込むために勉強会や幹事会を開催し、平良港の課題の抽出・対応策について議論を行ってきた。

協議会の様々な取り組みにより、2015年には平良港において10年ぶりとなる定期寄港が始まったが、定期寄港開始当初は受け入れ環境の整備がまだ進んでおらず、通訳等の多言語対応、CIQ、Wi-Fi環境、両替、クレジット等への対応、二次交通の不足等課題が続出した。また、クルーズ船が寄港する度にスーパーが混雑し、タクシーが不足する状態に市民からの不満も多く、クルーズ船の寄港はあまり歓迎される状態ではなかった。

(2) 官民が連携した受け入れに対する取り組み

上述した様々な課題に対する環境整備に力を入れて取り組むために、2016年に協議会を「宮古島クルーズ客船誘致・受入環境整備連絡協議会」に改編した。これまでの連絡協議会、幹事会の下に作業部会を設置し、二次交通対策は陸上交通部会、入管・税関・植物防疫対策はCIQ等部会等、各部会毎に受け入れ環境の整備を進めた。

その他の課題に対しても、即応性・実効性のある改善を行うために幹事会メンバーによるランチミーティングを毎週開催し対応策の検討を行った。ランチミーティングでは、オブザーバーとして船舶代理店や旅行代理店が参加しており、クルーズ船社や各事業者からの要望・意見等を直接もらい情報を共有することで、課題に対し迅速な対応が可能となった。現在もクルーズミーティングとして毎月開催しており、クルーズ船の2隻同時寄港時の対応について事前の検討等も行っており、スムーズなクルーズ船の受け入れ準備に大きな役割を果たしている。



図-8 クルーズミーティングの様子

(3) 「みなとまち宮古再生プロジェクト検討委員会」

宮古島ではクルーズ船の寄港だけでなく、伊良部大橋の開通や下地島空港の開業等により海路・空路の入域観光客が急増しており、将来的に観光客 200 万人時代が来ると予想されている。そのため、平良港を中心とした背後市街地全体のまちづくりを進めるため、2018年に

「宮古島クルーズ客船誘致・受入環境整備連絡協議会」を発展的に解消し「みなとまち宮古再生プロジェクト検討委員会」を設立した。委員会には引き続き陸上交通作業部会・CIQ作業部会等を設置し、具体的な対応策や施策を検討している。2020年完成のクルーズ岸壁・CIQ施設についても、作業部会で旅客の移動導線や二次交通のタクシーやツアーバスの配置について協議を行い、各事業者の要望も反映させた整備を進めている。

また、まちづくりの中核となる拠点を、平良港国際クルーズ拠点整備事業の実施地区（拠点Ⅰ）、リゾート計画のあるトゥリバー地区（拠点Ⅱ）、市役所周辺の中心市街地（拠点Ⅲ）の3つにゾーニングし、それぞれの作業部会に参加している民間業者等からの意見や提案を取

り入れながら、官民一体で施策を検討してきた。今後も2023年にトゥリバー地区に開業が予定されている Hilton Hotel や下地島空港の国際線の就航によるフライ&クルーズ、CIQ施設の敷地に整備される商業施設を中心とした平良港の賑わい空間の創設等、宮古島市街地全体の活性化に向けて取り組みむこととしている。

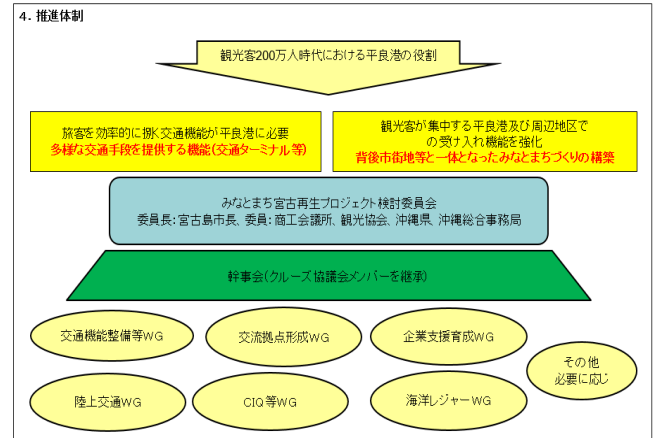


図-9 みなとまち宮古再生プロジェクト体制図

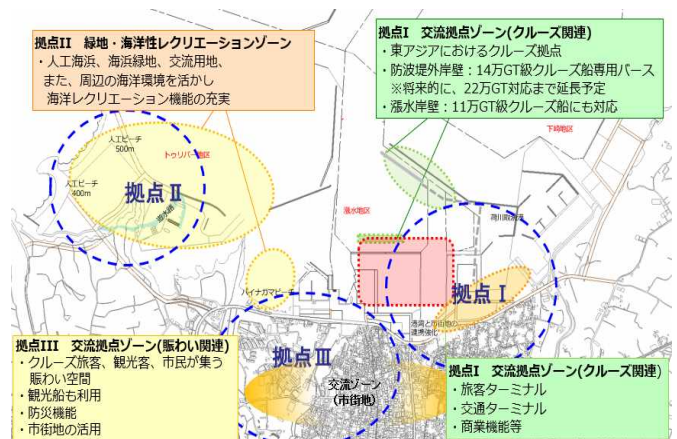


図-10 みなとまちづくりゾーニング

4. 今後の取組み

平良港国際クルーズ拠点整備事業により、14万トン級クルーズ船対応の岸壁整備は完成したが、クルーズ船の更なる大型化が進んでいるため、平良港においては引き続き22万トン級クルーズ船対応の岸壁整備を進めていくこととしている。現在、世界的な新型コロナウイルスの影響によりクルーズ船の運航が休止しているが、沖縄は国内・国外共にリゾート地としての人気が高くなり、「観光予報プラットフォーム」では宮古島への観光客の戻りは他の国内観光地と比較しても早いことが予想されており、アフターコロナの宮古島の経済・観光のV字回復の起爆剤として、平良港国際クルーズ拠点整備事業を中心とした官民が連携した宮古島市街地の周辺環境の整備は非常に大きな役割を果たすことが期待されている。

本部港（本部地区）国際クルーズ岸壁整備事業におけるジャケット工法の採用について

○沖縄県 北部土木事務所 都市港湾班 主任 平田 淳貴

1 はじめに

沖縄県北部土木事務所では、重要港湾2港、地方港湾10港の合計12港の港湾が配置されており、4つの有人離島と沖縄本島間の人的・物的輸送の円滑化に資するとともに、国際交流や物流機能の再構築に必要な拠点港湾の整備を行っている。

その中でも、本部港（本部地区）においては、平成29年1月に国土交通省より「官民連携による国際クルーズ拠点形成する港湾」に選定されたことを受け、20万トン級の大型クルーズ船の寄港が可能となる岸壁の整備に取り組んでいる。

本稿では、本部港における国際クルーズ岸壁整備事業の概要と県事業としては初採用となるジャケット式栈橋工法について報告する。



図1 位置図

2 本部港概況、整備内容

2.1 本部港（本部地区）の概況

本部港（本部地区）は、瀬底島の対岸となる本部町崎本部に位置し、地方港湾及び産業拠点港として位置付けられている。本港からは、那覇～本部～鹿児島間、本部～伊江村への定期フ

ェリーが毎日就航していることに加え、外国からの石炭船や国内の貨物船が利用しており、多くの住民や観光客、生活物資、農産物、石炭等の資材等の人的・物的移動に利用され、北部地域の拠点港として機能している。また、近隣には県内有数のダイビングスポットがあることから、日頃から多くの利用者で賑わいをみせており、活気のある港湾となっている。

2.2 国際クルーズ整備事業について

本港は、平成29年1月に国土交通省より「官民連携による国際クルーズ拠点形成する港湾」に選定され、同年7月、「国際旅客船拠点形成港湾」に指定された。国際クルーズ拠点を形成することにより、北部地域の豊かな自然環境を活用したエコツーリズムや海洋レジャーの促進、新たな観光ルートの形成など、北部地域のさらなる振興に資する観光拠点となることを目指す。「官民連携」とあるように、沖縄県と民間船社が連携し、県がクルーズ船寄港に対応できる岸壁整備等を行い、民間船社が旅客ターミナルビルを整備する。整備後、民間船社は数年間、クルーズ対応岸壁の優先的な使用が可能となっている。

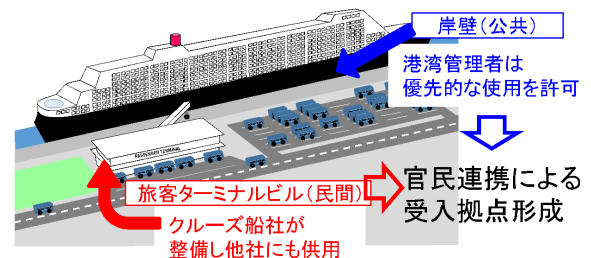


図2 官民連携による拠点形成イメージ図
(国土交通省公表資料より)

キーワード 本部港, 国際クルーズ岸壁, ジャケット式栈橋

連絡先 〒905-0015 名護市大南1丁目13番11号3階 北部土木事務所都市港湾班 0980-53-2983

2. 3 整備内容

本港は、以前より耐震岸壁（-9.0m）や那覇～本部～鹿児島間の定期航路等が接岸する岸壁（-7.5m）などが整備されている。

本事業の対象船舶はクルーズ船の世界最大クラスである 20 万トン級であり、喫水や回頭半径、防舷材や係船柱等の条件から、現状施設では接岸することができない。

そのため、対象船舶の大型化に対応するため、以下の整備を行うこととした。

整備項目	整備内容
泊地浚渫 V=50,000m ²	・ 回頭範囲（φ723.8m） -10.5m 水深まで浚渫
既設岸壁改良部 L=220m	・ 耐震岸壁（-9.0m）を（-10.5m）に増深改良 ・ 防舷材や係船柱を 20 万トン級対応に規格変更
岸壁新設部 （栈橋部） L=100m	・ ジャケット式栈橋（50m×20m）2 基 ・ 杭打設 20 本×2 基（先行杭 8 本・後打杭 12 本 / 基） ・ 床版、防波版製作設置
岸壁新設部 （ドルフィン部） L=100m	・ 杭打設 12 本×3 基 ・ 上部工、係船柱 ・ 連絡橋 3 基
その他	・ SOLAS 施設

表 1 整備内容

整備に当たって、早期の国際クルーズ拠点港形成を目指すことから、新設栈橋部（100m）にはジャケット式栈橋形式が採用された。この構造形式は、埋立てが伴う重力式の岸壁と比較し、工期の短縮が図れることに加え、周辺の海洋環境への負荷が軽減されるものとなっており、県主体の事業としては初の採用となる。次節では、そのジャケット式栈橋の概要について述べることとする。

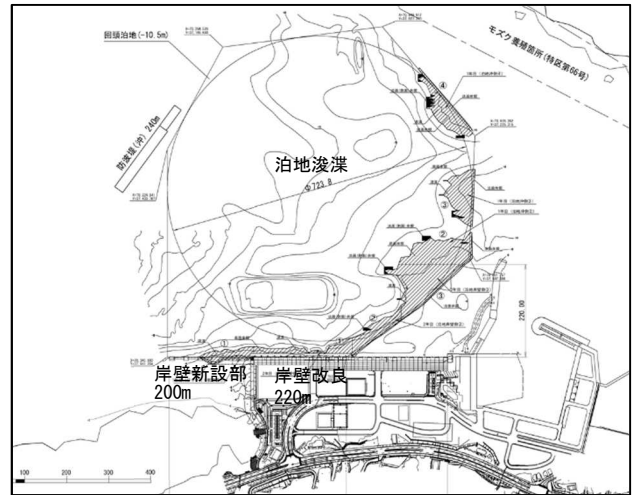


図 3 計画平面図

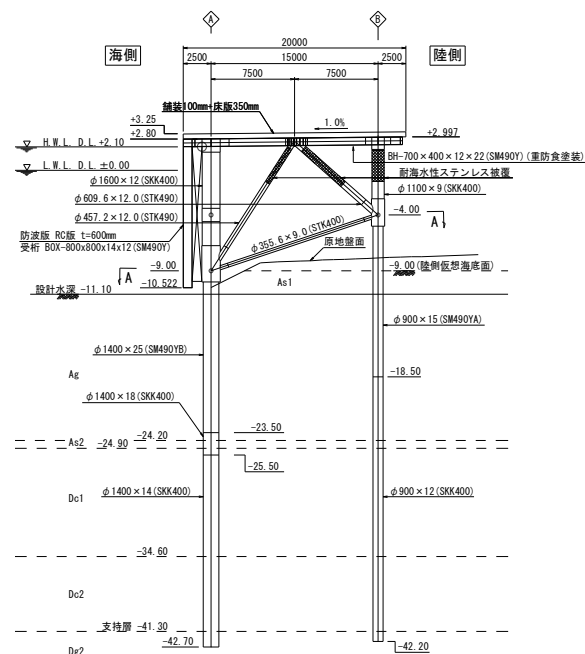


図 4 ジャケット式栈橋断面図



図 5 本部港計画イメージ図

3 ジャケット式栈橋整備

3. 1 ジャケットの概要

ジャケット構造とは、鋼管で組み立てた立体トラス構造物の脚（レグ）と海底地盤に固定した杭を溶接やセメントグラウトにより一体化させて外力に抵抗する構造体である。

本事業においてはジャケット2基（1基あたり高さ12.8m、延長50m、幅20m、重量約500～600t）を県外工場で製作し、海上を回航した後、先行打設した鋼管杭に被せるように据え付ける。その後、残りの鋼管杭を打設し、溶接やグラウト充填を行って一体化させる。そして、床版や波力に対応するための防波版の設置、舗装などの上部工を施工し完成となる。

なお、ジャケットの海上運搬や据付にあたっては国内最大級の台船や起重機船を使用するなど、使用するなど、防波堤（沖）のケーソン工事と比較しても規模の大きな施工となった。

【ジャケット式栈橋全体施工フロー】

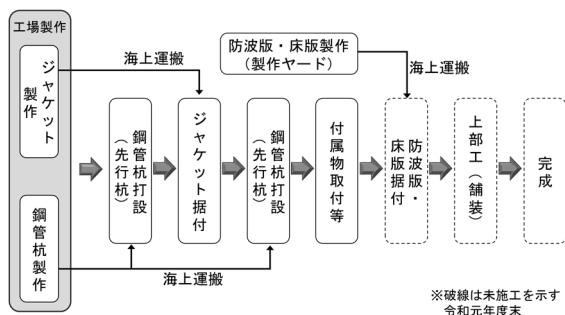


図6 ジャケット式栈橋全体施工フロー

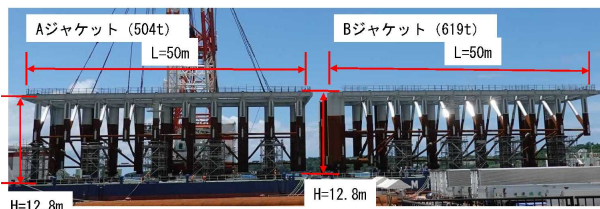


写真1 台船積載時のジャケット

【ジャケット据付使用船舶】



図7 ジャケット据付使用船舶

3. 2 設計上の配慮事項

本工法を採用するに当たって、様々な課題があったが、その中でも発注者が特に検討に時間を要した点について述べる。

3. 2. 1 本部港の波浪条件への対応

対象地の波浪条件は非常に厳しく、通常の栈橋方式では床版に揚圧力が作用し、杭の引き抜き等でジャケット構造が成立しない。

そのため、栈橋前面に防波版を設置することで波力を水平方向から受ける構造とし、揚圧力が支配的でない構造とした。

また、直杭式栈橋の通常の設計では終局限界状態（荒天時等の強い波力）の照査にて構造が決定することが多いが、本ジャケットにおいては疲労限界状態（波浪の繰り返し荷重）により決定する部材があるなど、厳しい波浪条件に対する構造検討に時間を要した。

3. 2. 2 杭打設の検討

ジャケット構造およびドルフィンの基礎となる鋼管杭打設については、杭打船の最小寄港回数とする工程検討や、土質条件・台船運搬・杭打船規格等を考慮した鋼管杭規格や継杭位置の検討、レグと杭を一体化するためのシアキーの設置方法など、設計時に配慮する事項は多岐に

渡るものであった。また工事に入ってから先行杭が高止まりし、追加ボーリング調査の実施による杭規格の再検討等を行いながら工事を進める必要があったため、対応に苦慮した。

3. 3 ジャケット据付工程の課題と対応

3. 3. 1 据付工程での課題

本節では、令和元年度に実施したジャケット据付に関して、特に配慮を要した次の2点の課題に対する対応を述べる。

- 1) 定期航路などの他船舶の運行を妨げることのない据付施工計画の検討
- 2) 据付時の精度確保の課題

3. 3. 2 各課題に対する対応

まず、1) 他船舶の運行を妨げることのない据付施工計画の検討にあたっては、設計時点から施工スケジュールおよび各ステップ毎の船舶配置図を作成し、据付作業の約1年前から定期フェリー船社及び海上保安庁等と適宜調整を行い、時点修正を行いながらより安全に運行が可能な施工計画を立案することに取り組んだ。特に、台船・起重機船のアンカーの位置関係（隔離）や定期フェリー入出港時の安全確保方法等については、フェリー運航に最も影響を及ぼすことから、受注者等と複数回に渡る協議を重ね、綿密な施工計画を提示することで、港湾利用者から理解を得ることができた。

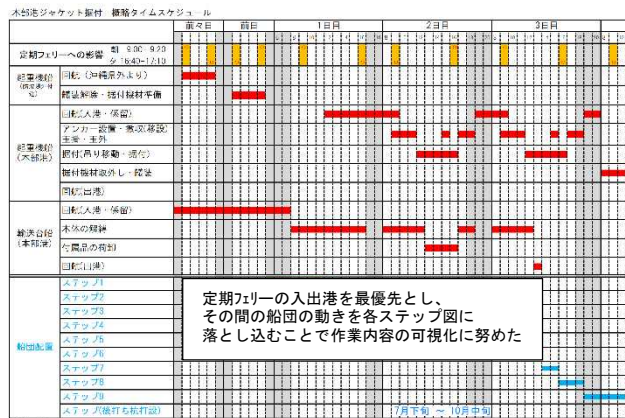


図 8 詳細施工タイムスケジュール

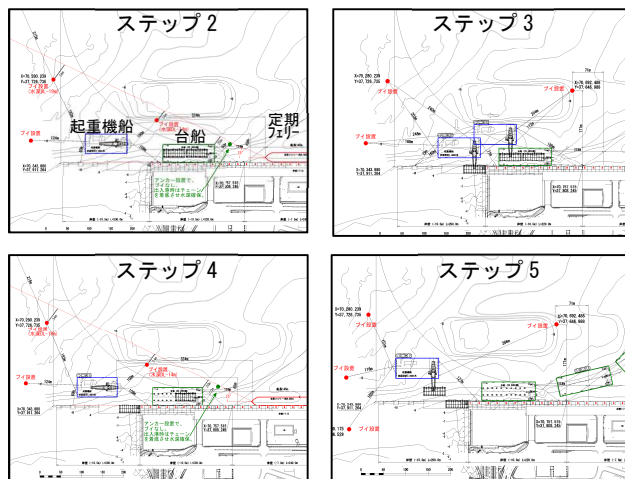


図 9 各施工ステップ図の検討

2) 据付時の精度確保の課題に対しては、1 基約 600t もあるジャケットを揺動する起重機船で正確な位置に設置を行わなければならないため、その施工方法については高度な技術が要求された。その課題に対し受注者は技術提案において、自動追尾式トータルテーションでジャケットに設置したターゲットを捕捉し 3 次元方向でのリアルタイム管理を行うことや、浮力等の影響を加味したフック方法の検討、間隔保持ガイドの設置などの対策を行うことで、所定の据付精度を確保した。

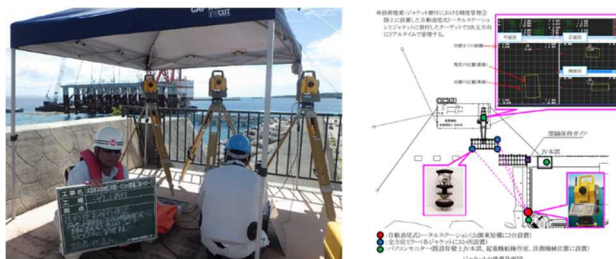


写真2 自動追尾式トータルステーションによる3次元管理 (NETIS KKK120001-A)



写真3 間隔保持ガイド設置

3. 4 据付施工

前述の諸課題に適切に対応し、令和元年8月26日、27日にジャケット据付を行い、据付精度も所定の出来形を満足させることができた。

ジャケット据付後は、早期に後打杭を打設し、グラウト充填による杭とジャケットの一体化を図った。

本ジャケット式栈橋は、今後、防波版や床版設置、上部工の施工を行い完成となる。早期の完成に向けて本年度も鋭意整備を進めているところである。

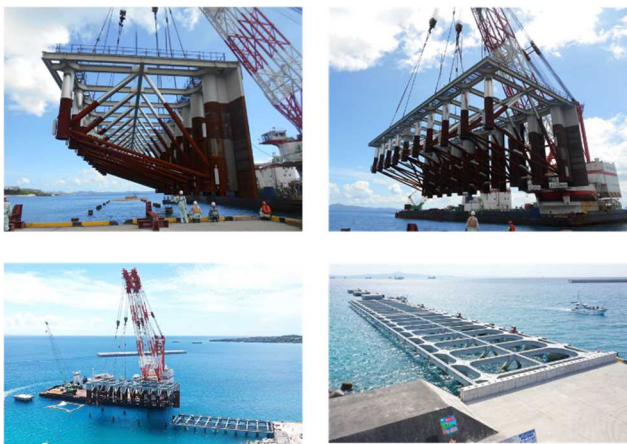


写真4 ジャケット据付状況

4 ジャケット以外の施工概要

本事業ではジャケット式栈橋の整備のほか、浚渫やドルフィン整備、既設岸壁整備等を行うこととしており、ここでは令和元年度まで実施した施工を紹介する。

4. 1 泊地浚渫

泊地浚渫は、約50,000m³の浚渫を行うこととし、昨年度までに約半分に当たる約25,000m³の浚渫を完了した。なお、施工にあたっては定期フェリー等の運航に支障とならないよう、夜間施工を行っている。今年度も引き続き施工を行うこととしている。



写真5 夜間浚渫状況

4. 2 ドルフィン区間 (3基)

新設岸壁部200mのうち、100mは係船するためのドルフィン3基で構成する。ドルフィンの施工としては鋼管杭φ1200を12本打設し、上部工(RC)をコンクリートミキサー船から打設するものである。杭打設にあたっては導杭を現場対応で設置し施工精度確保を行ったことや、適切な打ち止め管理を行うとともに騒音・振動の各基準も満足するよう配慮しながら施工し、R2.3月をもって3基完成させた。



写真6 ドルフィン施工状況

4. 3 床版・防波版製作

ジャケット式栈橋の床版や防波版については、別途製作ヤードにて製作を行っている。防波版はジャケット一体型として工場製作する場合もあるが、海上運搬の安定性や施工工程等から別途製作とした。床版・防波版ともに配筋ピッチが細かいことや(10cmピッチ)、床版のループ筋施工のための型枠や固縛工夫など、難易度の高い施工が要求された。また海上からの据付を予定しているため、ジャケット上のスタッドや

防波版受口部に干渉しないよう高い精度で製作を行う必要があり、精度管理に労力を要した。

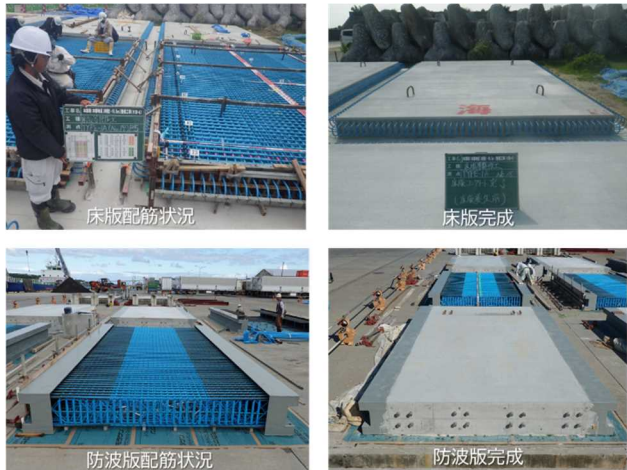


写真7 床版・防波版製作状況

監視調査、騒音対策等を実施しているところである。

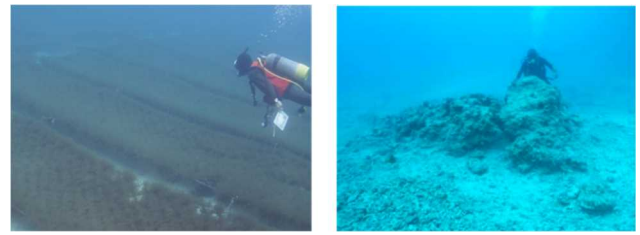


写真8 モズク生育調査・サンゴ調査



写真9 環境監視委員会の開催

5 その他配慮事項等について

5.1 環境への配慮について

本事業の実施に伴い、事業地周辺の環境が変化する可能性がある。本港は一部を除いて共同漁業権区域内にあることから、周辺にはモズク養殖特区や定置網特区、海ぶどう養殖の海水取水口があることに加え、近隣には県内有数のダイビングスポットもあることから、工事による環境変化を可能な限り発生させない必要があった。

そのため、工事による環境影響を把握するため、水質、底質、潮流、モズク生育調査等の環境調査を実施している。また、事業と並行して琉球大学の教授等や本部町で構成する「本部港（本部地区）環境監視委員会」を設立。当委員会において、環境調査方法の検討や調査結果の確認を行うとともに、施工中に異常な事態の発生が予想される場合もしくは発生した際には、その原因の究明や、必要な措置・対策について検討を行うなど、事業実施者に対する指導・助言を頂きながら事業に取り組んでいる。

具体的な環境保全対策として、モズク漁時期における浚渫工事の自粛、汚濁防止膜の2重展開による濁水流出防止、施工前・中・後の環境

6 さいごに

本港が平成29年に官民連携による国際クルーズ拠点港湾に選定されてから今日まで、早期竣工を目標として鋭意整備を進めてきた。昨年度には本事業の主工種である”ジャケット据付”を無事施工することができた。

ここまで辿り着けたのは、事業に携わってきた設計・調査コンサルタントや施工業者、環境監視委員、関係機関、港湾課そして北部土木事務所の歴代担当者の皆様において限られた時間の中で多くの課題に直面しながらも、事業進捗を図るために懸命に取り組んできた結果であり、この場を借りて敬意を表したい。

本事業はまだ既設岸壁改良や浚渫、連絡橋等の整備が残っており、今後も早期の完成を目指し施工を鋭意進めていく。

本稿が今後、少しでも他事業の参考となれば幸いである。

小規模LNG海上輸送に関する検討

沖縄総合事務局 港湾計画課 ○與古田一樹 平良宗孝

1. LNGの概要

(1) LNGとは

LNG（液化天然ガス）は、気体である天然ガスをマイナス162℃まで冷却することにより液体化したものである。気体の状態と比べて体積が600分の1に減少するため、大量輸送に適している。天然ガスは、メタン（CH₄）を主成分とする可燃性ガスのことで、動物や植物の死骸が長い年月をかけて分解されたことにより生成された化石燃料の一種である。酸性雨や大気汚染の原因となる硫黄酸化物（SO_x）が発生せず、石油や石炭と比べて窒素酸化物（NO_x）の発生量が少ないことから、環境負荷の少ない燃料として注目されている。

(2) LNGの需要と貿易

資源エネルギー庁の報告¹⁾によると、LNGの需要は世界的にも増加しており、今後も増加する見込みである。

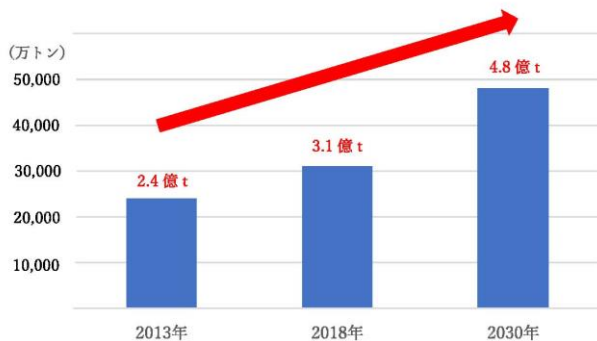


図-1 LNG需要の今後の伸び

（出典：令和元年度エネルギーに関する年次報告）

2018年の天然ガス生産量は約3.9兆m³であった。2008年から2018年までの間で、天然ガスの生産量の年平均伸び率は2.5%を記録している。

地域別にみると、2018年時点では欧州・ロシア及び旧ソ連邦諸国が世界の生産量の約29%、北米が26%を占めている。一方、原油の生産量が中東を中心としたOPEC（石油輸出機構）産油国が40%を占めることから、原油と比べて地域偏差は少ないと言われている。

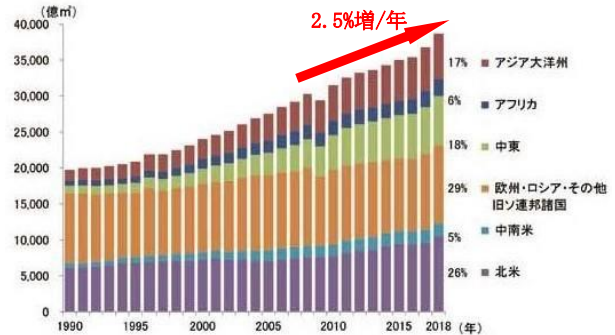


図-2 地域別天然ガス生産量の推移

（出典：令和元年度エネルギーに関する年次報告）

天然ガス貿易の動向について、2018年の世界全体の天然ガス生産量の32.0%が生産国では消費されずに、他国へ輸出されている。2018年に取引された天然ガス貿易量1兆2,364m³のうち、パイプラインにより取引された量は8,054億m³（貿易量全体65%）、LNGによる取引は4,310億m³（同35%）であった。

LNG貿易はアジア向け輸出を中心とし、2018年のLNG貿易量の26%を我が国が輸入している。

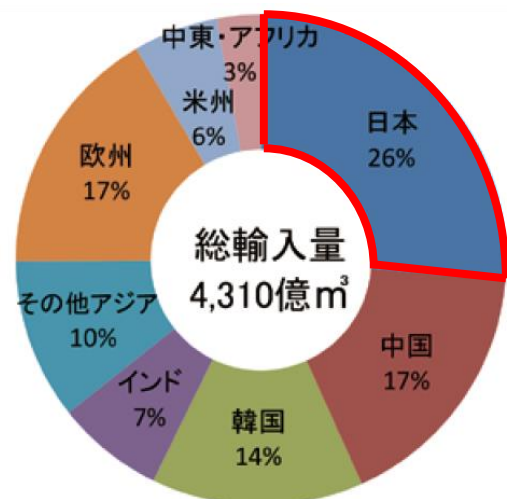


図-3 世界のLNG輸入（2018年）

（出典：令和元年度エネルギーに関する年次報告）

キーワード LNG, タンクコンテナ, 高圧ガス保安法, 港則法

連絡先 〒900-0006 那覇市おもろまち2丁目1番1号 那覇第2地方合同庁舎2号館
沖縄総合事務局 港湾計画課 Email:yokoda710-kazuki.c4i@ogb.cao.go.jp(與古田)

我が国の2018年度における天然ガスの輸入割合は、97.6%と石油と同様にきわめて高く、その全量がLNGとして輸入している。我が国に対するLNGの輸入先は、豪州が36.6%、マレーシアが12.4%、ロシアが7.9%とアジア太平洋地域とロシア等中東以外の地域が78.8%を占めており、原油と比べて中東依存度が低く、地政学的リスクが相対的に低いといわれている。

(3) わが国及び沖縄県のLNG利用状況

わが国において、2018年度に天然ガスのうち約60%は電力として使用されている。発電量に占める割合は、35%と石炭の31%を上回り、わが国の発電の主力となっている。沖縄県においては、沖縄電力の2019年度実績によると、石炭火力発電が67%を占めている。LNG火力発電は21%となっており²⁾、大部分を、2012年に沖縄県内初のLNG発電所として稼働した吉の浦火力発電所（中城村）で対応している。

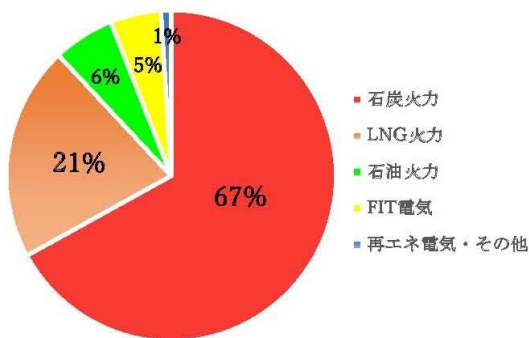


図-4 沖縄電力電源構成
(2019年度実績値)

(出典：沖縄電力ホームページを基に作成)



図-5 吉の浦火力発電所

(出典：沖縄電力株式会社)

県内離島の電力設備は、2019年3月末時点でそのほとんどが重油火力発電である。こうした状況から、沖縄電力は発電施設の更新・増設を進める中でより環境負荷の少ないLNG

への切り替えに取り組んでいる。具体的には、2021年より宮古島においてLNGと重油両方に対応できる二元燃料発電機の稼働を計画している。

2. コンテナ等によるスモールスケールLNG海上輸送に関する検討会の開催

(1) 検討会の目的

通常、LNGを海上輸送する場合はLNGタンカーが用いられるが、需要量が限定されている小規模離島へのタンカー輸送は採算面の課題が大きい。そのため経済性に配慮した小ロットでの輸送方法の確立が不可欠となっている。そこで、沖縄総合事務局（以下「当局」という。）において、本島から宮古島へのLNG海上輸送をモデルケースとして、タンクコンテナにより沖縄管内の離島に小規模でLNGを海上輸送するにあたり、規制上の課題を議論するための検討会を開催した。検討会は、当局開発建設部、第十一管区海上保安本部、経済産業省那覇産業保安監督事務所、沖縄県土木建設部港湾課、沖縄県商工労働部産業政策課、那覇港管理組合、宮古島市、沖縄電力株式会社、日本郵船株式会社の各担当により構成されている。第1回は2020年1月20日、第2回は同年2月17日に実施しており、規制上の課題を抽出・整理した³⁾。第3回を3月24日に実施し、最終的な取りまとめを行う予定であったが、新型コロナウイルス感染拡大防止のため中止となり、当局より取りまとめ案を各構成員に説明し、承諾を得ることで検討会に代えることとした。取りまとめた内容については、令和2年9月にプレスリリースし、現在、ホームページ上で公開している（表1）。



図-6 LNGタンカー

(出典：日本郵船株式会社)

＜ISOタンクコンテナによる輸送スキーム＞



図-7 タンクコンテナを用いた離島へのLNG輸送スキーム（想定案）

（出典：沖縄電力 検討会資料）

表-1 コンテナ等によるスモールスケールLNG海上輸送に関する課題と対応策（とりまとめ）

コンテナ等によるスモールスケールLNG海上輸送に関する課題と対応策

沖縄総合事務局
内閣府

○ LNG海上輸送には高圧ガス保安法、港則法、各港湾管理者が規定する条例への対応が特に課題になるとの指摘があり、必要な対応について以下の通り整理。																	
○ 沖縄本島から宮古島等への輸送をモデルケースに検討した結果、1回当たりの輸送量が約500t（年間約2.5万t）以下であればタンクコンテナ、約500tより多くなればタンカーによる輸送が経済的に優位となった※。																	
※沖縄本島陸上輸送費+海上輸送費+離島陸上輸送費+離島貯蔵設備費について、タンクコンテナと小型タンカー輸送を週1回15年間継続したケースで比較したもの																	
LNG輸送量（t/回）				100			400		500								
経済的に優れた輸送手段 （タンクコンテナ/小型タンカー）				タンクコンテナを用いたコンテナ船等による輸送							小型タンカー による輸送						
高圧ガス保安法※1				港湾の貨物ヤードでタンクコンテナを2時間以上蔵置		○ LNGを2時間以上、蔵置する場合は貯蔵所の設置が必要【法第16条】					○（輸送量が少量であるため）港湾の貨物ヤードでの蔵置時間が2時間未満となる荷役計画により対応可能なため貯蔵所の設置は不要。 ※ただし、少量であっても2時間を超える場合は貯蔵所の設置が必要		○蔵置時間が2時間以上となる場合には以下を備えた貯蔵所の設置が必要 （1）車両区画線 （2）警戒標（ロードコーン等） （3）消火器		—		
				国際規格タンクコンテナの利用		○ 国際規格コンテナの国内利用が制限されている【法第48条】											
						○特別充填許可の取得により、国際規格タンクコンテナの国内利用が可能 ※アセチレン容器以外の容器にあっては、容器に表示された最高充填圧力又は耐圧試験圧力の5分の3（安全弁の付いていない容器にあっては、耐圧試験圧力の2分の1）のうち、いずれか低い圧力を最高充填圧力とする									—		
港則法※2				岸壁区分（荷役許可容量）		引火性高圧ガス		A（1t/回）		B（20t/回）		C1（100t/回）		C2（400t/回）		D（港長が適当と認める数量）	
特定港（那覇港、金武中城港）※4				標準		・特定港で危険物の荷役をするには港長の許可を受けなければならない【法第23条】 ・原則、各区分の荷役許可容量内で許可する。 ※一般岸壁については港湾管理者等との調整により、港長が標準を参考として、パース単位にA、B、C1又はC2に区分又は区分の変更をする。危険物専用岸壁については事業者等からの申請を受けて安全性を検討の上、港長がD区分として認める。		○旅客船を係留するパース及びその付近のパース ○観光客の雑踏するパース ○船舶が極めて輻輳している場所の付近のパース ○市街地に極めて近接しているパース（距離の標準としては100m程度以下）		○A、C1、C2、D区分以外の岸壁（市街地からの距離の標準としては300m程度）		○港湾法上の保安港域に指定されたパース ○市街地から相当距離にあり開港場内にあるパース（距離の標準としては500m程度以上）		○コンテナ専用岸壁 ・岸壁区分のC1に該当し、さらに、関係者以外立ち入り禁止されている区域内にあるパースであること。 ・コンテナ化された危険物を専用の荷役設備によってコンテナ専用船に荷役するパースであること。 ・必要な消防設備、用具を備えていること。 ・必要な消防対策を行っていること。		○港長が適当と認める専用岸壁 ・危険物を取り扱う事業者等の構内にあるなど必要な立地条件を満たしていること。 ・適切な電気、照明設備、消防・防災設備等を備えていること。	
条例例3				危険物荷役の禁止						（沖縄県内各港には岸壁区分C1は設定されていない。）		（沖縄県内各港には岸壁区分C2の要件を満たすコンテナ専用岸壁がない。）※5		（沖縄県内各港にはLNGを充填したタンクコンテナを相当量取り扱う危険物専用岸壁が整備されていない。）			
																・各港湾管理条例に基づき、港湾管理者（那覇港：那覇港管理組合、中城湾港：沖縄県、平良港：宮古島市）の許可を取得	

※1 高圧ガス保安法についての詳細は事前に所管する産業保安監督事務所、地方自治体に確認すること。
※2 港則例についての詳細は事前に所管する海上保安本部に確認すること。
※3 条例についての詳細は事前に所管する港湾管理者に確認すること。
※4 金武中城港：港海上の金武中城港、中城湾港
※5 沖縄本島～離島間に就航しているコンテナ専用船も存在しない。

（出典：沖縄総合事務局ホームページ（<http://www.ogb.go.jp/kaiken/minato/R021007>））

(2) 高圧ガス保安法による規制

高圧ガス保安法（昭和26年法律第204号）は、高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、移動その他の取扱及び消費並びに容器の製造及び取扱を規制するものである。LNGについても同法第2条第3項の「引火性高圧ガス」に該当し、規制の対象となる。ここではLNGをタンクコンテナで輸送するにあた

って、該当する規制について記述する。

第1に、高圧ガス保安法第16条より、容量300m³以上の高圧ガスを2時間以上蔵置する場合は、都道府県知事の許可を受けて設置する貯蔵所の設置が必要となる⁴⁾。

第2に、高圧ガス保安法第41条、第44条及び第48条の規定により、国際規格（ISO）コンテナを国内で利用するためには、同法第48条第5項及

び容器保安規則第23条の規定により、特別の充填許可を得る必要がある。これは国内法で所定の検査を受けていない外国製容器や、高圧ガスを輸出するために輸出先の規格で製作された容器などに充填するための規定である。

(3) 港則法による規制

港則法（昭和23年法律第174号）では、政令で定める特定港で危険物の荷役をするには港長の許可を受けなければならないとされており、港長は岸壁区分に応じた荷役許容量の範囲内で許可することとなっている。岸壁区分ごとの標準（各港の現在の利用状況や周辺の立地条件等によって想定される標準的な岸壁利用状況）と1回あたりの荷役許容量は表1のとおりである。

(4) 港湾管理者の条例による規制

港湾管理条例において、港湾管理者の許可がある場合を除いて、危険物の荷役は禁止されている。

(5) 経済性について

検討会と並行して、沖縄電力において、タンクコンテナと小型タンカー輸送の経済性の比較検討を行った。週1回15年間継続した場合を想定して、必要な費用（沖縄本島陸上輸送費、海上輸送費、離島陸上輸送費、離島貯蔵設備費）を比較したところ、1回あたりの輸送量が約500t（年間2.5万t）以下であればタンクコンテナによる輸送が、約500tを超えるとタンカーによる輸送が経済的に優位となることがわかった。

3. 課題への対応

検討会により、沖縄管内の離島に小規模でLNG海上輸送を行うにあたって、課題の抽出・整理を行った。結果、課題への対応として、以下のような案が想定される。

- 1 高圧ガス保安法により、港湾の貨物ヤードでタンクコンテナを2時間以上蔵置するには、貯蔵所を備える必要がある。あるいは、2時間以内に荷役を完了させられる量、ルート等荷役計画を立てる必要がある。
- 2 港則法により、岸壁区分により1回の輸送量に制限が課せられていることから、必要量を運ぶための区分の格上げ等の検討が必要である。
- 3 各港湾管理条例に基づき、港湾管理者の

許可を得る必要がある。

これらの課題が解決されることで、県内外の離島港湾への円滑なLNGの海上輸送が可能となり、離島におけるLNGの活用が促進されることが期待出来る。そのためには、輸送先の需要量に応じた輸送計画を検討し、場合によっては貯蔵所の整備、使用する岸壁区分の見直し等が必要となる。とりわけ港湾法上の重要港湾以上の場合は、それらを港湾計画に位置付けていく必要がある。したがって、当局として今後も検討会で関わった関係機関や港湾管理者、船社等関係企業と調整を図りながら、具体的な輸送計画の立案に向けて検討を進めて参りたい。



図-8 検討会のようす

参考文献

- 1) 令和元年度 エネルギーに関する年次資料（経済産業省 資源エネルギー庁）
- 2) 沖縄電力ホームページ（最終閲覧日：令和2年7月27日）（<https://www.okiden.co.jp/company/guide/demand/>）
- 3) コンテナ等によるスモールスケールLNG輸送に関する検討会 配布資料（第1回 第2回）
- 4) 高圧ガスハンドブック 第3次改訂版（一般社団法人 日本産業・医療ガス協会）

沖縄自動車道 幸喜橋の床版取替工事について

西日本高速道路総合サービス沖縄株式会社 技術事務所 保全技術課
○金城 樹
賀数 淳人
西日本高速道路株式会社 九州支社 沖縄高速道路事務所 改築課
今村 光志
オリエンタル白石株式会社 福岡支店 工務部
牧野 翔平

1.はじめに

本工事は、沖縄自動車道北部区間に位置する幸喜橋の床版取替工事である。本橋は、許田 IC 内の国道 58 号線を跨ぐランプ橋で、沖縄本島西海岸の海岸線近くに位置し、飛来塩分の多い厳しい腐食環境にて供用されている。また、建設時に十分に除塩処理がされていない海砂をコンクリート材料として使用したため、塩害による著しい劣化が生じている(図-1)。このことから、本橋鋼桁部の床版取替及び RC 床版橋部の上部工更新工事を行うことになった。また、取替後の橋梁型式は、中央径間が非合成鈹桁、側径間は起・終点側共にプレテンション方式 PC4 径間連結中空床版橋である。また、コスト低減及び工期短縮の観点から SCBR 工法が採用された。本稿では、幸喜橋の施工について報告する。



図-1 幸喜橋(中央径間：非合成鈹桁部)

2.工事概要

工事名：沖縄自動車道（特定更新等）
億首川橋他 1 橋床版取替工事
工事場所：自）沖縄県国頭郡金武町字平川原
至）沖縄県名護市字許田手水原
工事期間：令和 2 年 3 月 18 日～
令和 4 年 3 月 7 日
橋梁型式：単純非剛性鈹桁+
4 径間連続 RC 中空床版×2
工事概要：工事延長 L=162.0m
PC 床版 20 枚

床版撤去工 1,042m²
床版防水工 1,451m²
支承取替工 6 基
伸縮装置、高力ボルト取替工、
塗替塗装工

3.施工計画

本工事は施工中の工事であり、図-2 の黄色着色部までの作業が終了している状況である。(令和 2 年 12 月現在)

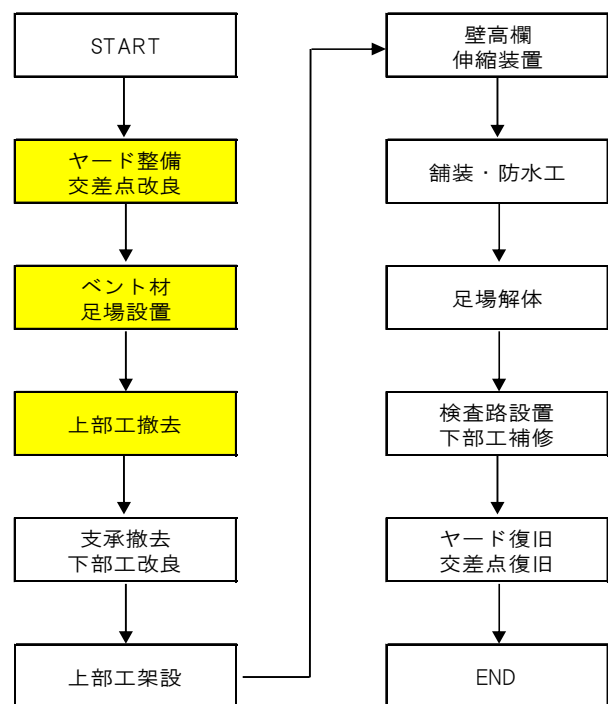


図-2 幸喜橋施工フロー

(1)交差点改良(迂回路の確保)

本工事では、幸喜橋が全面通行止めとなることで、許田方面 ON ランプ入口部交差点の恩納村側で、最大 130m 程度の車両滞留が予想された。その車両滞留に起因する渋滞緩和対策として、同交差点に右折車線を追加設置する案にて、その効果を検証した結果、滞留長が 14m まで緩和されるという予測が得られたため、それを採用案とした。交差点改良後の状況を図-3 に示す。

キーワード：床版撤去、中空床版、鋼橋、一般道、交差点改良

連絡先〒901-2101 浦添市西原 4-41-1 沖縄高速道路事務所 E-mail : t.kinjo.sa@w-nexco.co.jp



図-3 許田方面 ON ランプ入口部交差点改良後

(2) ベント材・足場設置

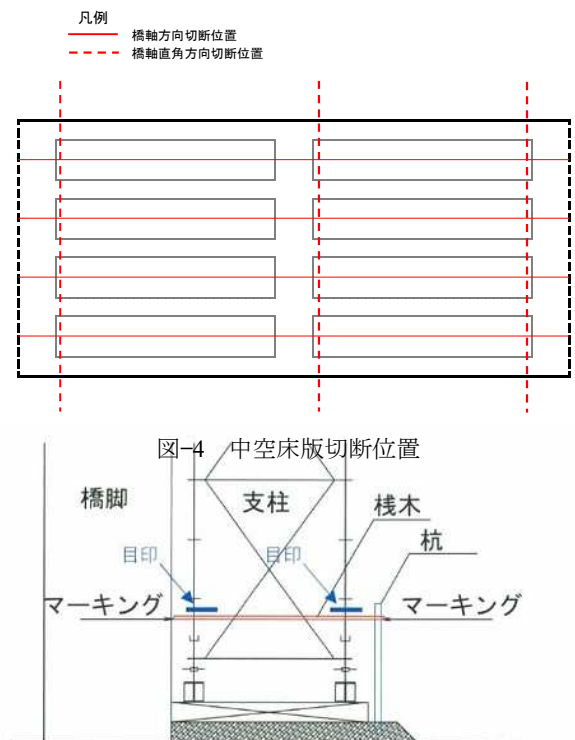
国道 58 号線を跨ぐ P4～P5 径間は、3 主桁桁であり、塩害により劣化した床版の取替えおよび塗替え塗装を行うため、桁下下面に吊り足場を設置した。吊り足場設置は、国道 58 号を片側交互通行規制し、高所作業車を用いて実施した。その際には、監視員を配置して高所作業車のバケットと一般車両との十分な離隔確保や吊り足場からの落下物等が無いように等、安全管理の徹底を行った。また、国道や歩道部に施工時の濁水の流出やコンクリート片の落下等を防止するため、吊り足場床面全体にシート養生を行った。

既設の中空床版撤去に先立ち、切断後の既設主桁の支持材としてベント支保工の組立てを行った。ベント支保工の基礎形式は直接基礎とし、設置個所に基礎碎石を敷設し、締固めを行う。その後、簡易支持力測定器にて地盤支持力の測定を行い、設計荷重以上の支持力があることを確認した後、ベント支保工の組み立てを行った。

(3) 上部工撤去

既設中空床版の撤去は、橋面上の舗装及び防水層を切削機で撤去した後、壁高欄および張出し床版部、主桁部の順で撤去した。壁高欄および張出し床版は、搬出車両の積載重量、施工性を考慮し、幅 1.5m、長さ 8.0m、重量 10t 未満の寸法で撤去した。撤去手順は、玉掛けおよびワイヤーソー用の孔を削岩機とコアドリルにて削孔した。削孔完了後、クレーンで吊り支持しつつ張出し床版部をコンクリートカッターで切断し壁高欄および張出し床版を撤去した。主桁部の撤去は、ワイヤーソーとコンクリートカッターを併用し主桁を切断する。主桁を切断する場合、橋軸方向の切断位置は、中空床版のボイド管の 12 時と 6 時方向を切断し、作業効率を向上させた(図-4)。上部工切断時、ベント支柱に仮設材変状の有無(座屈や不等沈下等)が無いかを常に確認しながら作業した。沈下量の確認方法は、支柱と杭にマーキングを行い、水平基準高さと

して、支柱の沈下量を目視にて確認した(図-5)。鋼桁部床版部の撤去は、中空床版と同様に、舗装、防水工、壁高欄を撤去後、コンクリートカッターを使用して橋軸直角方向を切断し、クレーンにて撤去を行った。床版を切断する場合は、コンクリートカッターを使用して橋軸直角方向を切断し、クレーンにて撤去した。床版の切断間隔は、搬出車両の積載重量、施工性を考慮し、2m 程度とし、重量 10t 未満の寸法とした。また、床版撤去時、国道 58 号上空をクレーンが旋回する際は、一時的に国道の通行止めを行い作業する(1 回 3 分間程度)。



管理基準
沈下量 全体30mm
不等沈下量 20mm
支柱傾き 高さ5mで30mm・・・0.6%相当
図-5 ベント材沈下量確認基準

4. まとめ

本工事は主要幹線道路(国道 58 号)を跨ぐランプ橋の施工であることに加え、複数の構造形式を有する等、複雑な施工条件となっている。今後、実施を予定している「上部工架設時の大型クレーン転倒」や「足場解体時の作業員の墜落」等、事故リスクの高い作業が続くが、お客様に安全安心な走行環境を提供するため、受発注者一体となって第三者被害の防止と労働災害の防止を徹底し、無事故無災害での完工を目指します。

Session 6 腐食・点検・計測

大気暴露環境下にある実物試験橋を用いた 桁端部の腐食環境分析に関する一考察

○琉球大学工学部 望月大地, 琉球大学 蓮池里菜, 下里哲弘, 淵脇秀晃

1.はじめに

鋼 I 桁橋の腐食事例として、外面より内面、一般部より桁端部の方が腐食の進行が速いことが報告されている¹⁾。これらの要因として、各部位が曝されている環境の違いが挙げられるが、複数の要因が複雑に作用することから未だ解明には至っていない。腐食の進行には、鋼材表面への水分と酸素の供給が必要不可欠である。さらに、海塩である NaCl の付着は、NaCl の吸湿効果により水膜を形成し、その水膜中に Cl イオンが溶け込むことで電気伝導度が向上することで、腐食促進要因となる。

そこで本研究では、桁端部の腐食環境分析にあたり、学内に建設した実物試験橋の桁端部において特に鋼材表面の濡れ状態と塩分量に着目し、温湿度、飛来塩分、風向風速を計測した。さらに、県内の実橋梁にて観測しているデータと比較検討も実施した。

2. 実物試験橋を用いた腐食環境調査

2.1 調査対象

桁端部の腐食環境特性を調査するため、琉球大学暴露場に建設した実物試験橋（写真 1）と、県内北部に位置する FN 橋（写真 2）を対象とした。実物試験橋は、単純非合成 2 主桁桁橋であり、離岸距離 2.5 km の琉球大学構内暴露場に位置し、2020 年 9 月 9 日から 2020 年 11 月 18 日まで環境調査を実施し、現在も継続している。実橋梁 FN 橋は、鋼単純合成桁橋であり、離岸距離 3.5 km の沖縄県国頭村に位置し、2014 年 12 月 11 日から 2015 年 12 月 12 日の期間で環境調査を実施した²⁾。

2.2 調査内容

本研究では腐食環境調査として、温湿度、濡れ時間割合、飛来塩分量および風向風速を計測した。

図 1 に実物試験橋の側面図と各計測位置を示す。実物試験橋の北側は、コンクリート壁により桁端部が再現されているが、南側は解放された環境となっている。なお、暴露場では周囲に遮蔽物のない地点で温湿度、濡れ時間割合、ならびに飛来塩分量を計測しており（図 2）、周辺環境の基準として比較対象としている。図 3 に FN 橋の側面図と各計測位置を示す。FN 橋では、桁下に飛来塩分捕集用のガーゼを設置した。

3. 腐食環境調査結果

3.1 温湿度変化および濡れ時間計測結果

各橋梁において環境調査期間が異なることから、本研究では 24 時間の温湿度を比較するため、平均温湿度および最高気温の値に近い一日を選出し、温湿度、



写真 1 実物試験橋



写真 2 FN 橋

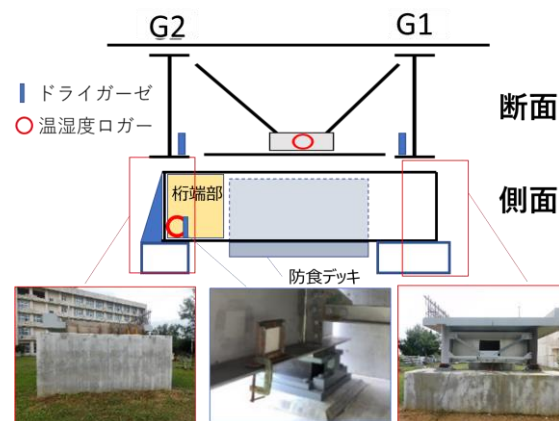


図 1 実物試験橋での計測位置



(a) 温湿度ロガー

(b) ドライガーゼ

図 2 琉球大学暴露場

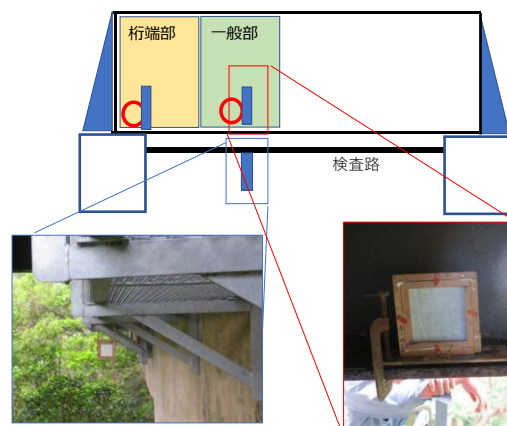


図 3 FN 橋での計測位置

キーワード 鋼桁端部 塩害 実物試験橋 腐食環境再現性 飛来塩分

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:e175522@eve.u-ryukyu.ac.jp

濡れ時間割合を分析した。図4及び図5に実物試験橋とFN橋の24時間の温湿度の計測結果を示す。なお、実物試験橋では桁端部と暴露場、FN橋では桁端部と一般部の結果を示している。図4、図5より、実物試験橋、FN橋双方において、桁端部の気温は外部や一般部と比べて温度の上昇は少ないことがわかる。一方、湿度は、実物試験橋では桁端部は外部と比較し高止まりになっているのに対し、FN橋では桁端部は一般部と比較し湿度は上昇しやすく、下降しやすい傾向であった。なお、前後1日ずつも確認したところ、同様の傾向が確認された。

次に、濡れ時間割合について検討した。本研究では、ISO9223に則り、気温0℃以上、湿度80%以上を濡れ状態とし、一日を占めるこの時間の割合を濡れ時間割合として算出している。図4、図5より、選出した日は気温が常に0℃以上であったため、湿度80%以上を「濡れている」、未満を「濡れていない」とし集計している。表1に実物試験橋、FN橋の対象日と前後2日間における濡れ時間割合の算出結果を示す。表1より、実物試験橋とFN橋の桁端部の濡れ時間割合は、桁端部はその他と比較し長時間濡れ環境下に曝されることが分かった。

3.2 飛来塩分量と風向風速の関係

図6、図7に実物試験橋とFN橋の飛来塩分量(mdd: mg/dm²/day)の測定結果を示す。実物試験橋は2020年10月7日から10月9日の二日間(台風14号襲来時)、FN橋は2014年12月11日から12月12日の1年間、琉球大学暴露場は2020年9月14日から10月15日の1か月間に計測された結果を示す。

実物試験橋、FN橋の桁端部で計測された飛来塩分の流入割合は、琉球大学暴露場の34%、FN橋桁下の42%であった。これは、既往研究と同様の結果であり³⁾、今後、実物試験橋においても付着塩分量を測定することで、塩分の堆積特性についての検討を実施する。

4. 結論

1. 実物試験橋の桁端部は、桁外と比較し、温度上昇は少なく、湿度は高止まりになっている。よって、濡れ時間割合が大きくなっており、腐食促進環境になっている。
2. 桁端部における飛来塩分の流入割合は、実物試験橋は外気の約3割、FN橋では桁下の約4割であった。

今後、付着塩分量の計測も実施し、腐食環境分析を進めていく。

参考文献

- [1] 下里哲弘, 村越潤, 玉城喜章, 高橋実: 腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程, 橋梁と基礎, Vol.43, pp.55-60, 2009.
- [2] 長坂康史, 下里哲弘, 竹渕敏郎, 既設耐候性鋼橋梁における濡れ時間割合が腐食減耗量に及ぼす影響, 土木学会

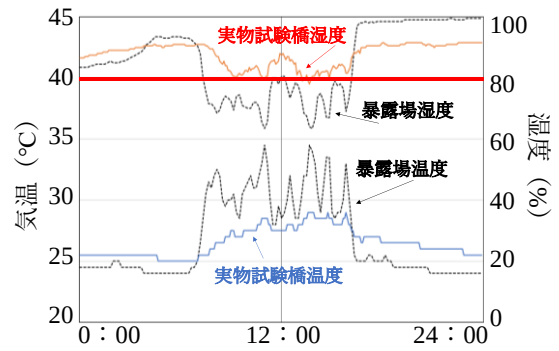


図4 実物試験橋 24時間の温湿度データ

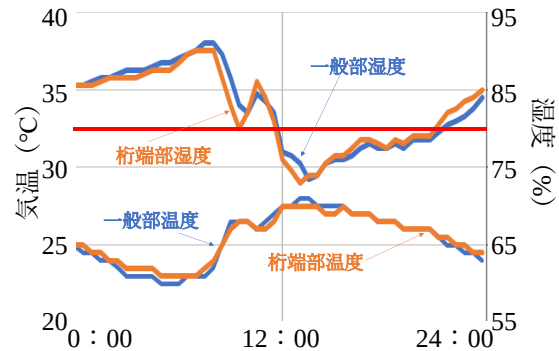


図5 FN橋 24時間の温湿度データ

表1 濡れ時間割合の結果

	前日	対象日	翌日
実物試験橋	61.3%	97.9%	86.4%
琉球大学暴露試験場	54.5%	66.4%	79%
FN橋桁端部	61.7%	63.8%	51.1%
FN橋一般部	61.7%	61.7%	48.9%

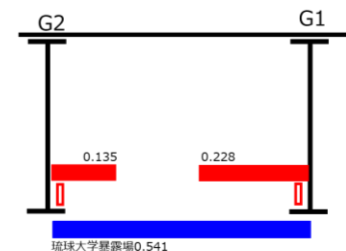


図6 実物試験橋飛来塩分量

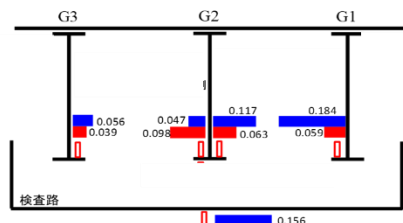


図7 FN橋 飛来塩分量

第70回年次学術講演会論文集 Vol.70, 2015

[3] 下里哲弘, 玉城喜章, 有住康則, 矢吹哲哉, 小野秀一, 三木千壽, 海浜大気環境下において長期暴露された耐候性鋼桁橋の腐食厚特性, 構造工学論文集 Vol. 62A, p785-795, 2016.3.

各種大気腐食センサを用いた腐食環境評

琉球大学大学院 理工学研究科 児玉晃太郎○
琉球大学 工学部 押川 渡

1. はじめに

金属の腐食に対する評価として大気暴露試験があり、室内で行われる腐食促進試験と比べ、実環境で行われるため腐食の進行を観察することができる。その腐食環境をモニタリングするものとして、ACM 型腐食センサがある(以下、ACM センサ)。一般的に ACM センサとして使用されるものは Fe-Ag 型(以下 Fe センサ)が多い。しかし、Fe センサは設置環境や部位によって早期に破損することがあり、長期的に大気環境をモニタリングするには不向きである。また、破損する前に交換することで長期的なモニタリングをできるが、その際人手や手間のコスト問題が発生する。そこで長期的にモニタリングするために Zn-Ag 型の ACM センサ(以下 Zn センサ)を用い、この問題を解消できないか検討する。Zn センサは Fe センサより実環境でのサンプルデータが少ないため様々な環境に設置し、そこで得られたデータから解析を行う。ACM センサの他に、腐食環境をモニタリングする装置として電気抵抗値から腐食速度を測定する Aircorr 腐食モニタリングシステム(以下 Aircorr)がある¹⁾。鉄板による大気暴露試験では最終的な腐食量を知り得るが、途中経過をモニタリングすることができない。Aircorr では経時的にデータを計測するため、どの時期に腐食が厳しいなど比較することができる。Aircorr の外観を図 1 に示す。また、大気環境での腐食速度を正確に得るために炭素鋼(鉄板)を暴露し、重量減から腐食速度を求め比較、検討する。

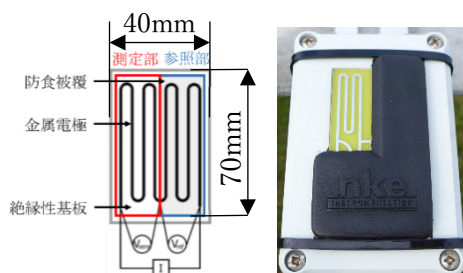


図 1 Aircorr の外観

2. 試験期間とセンサ

ACM センサ、Aircorr、鉄板を沖縄(琉球大学)、兵庫(明石)、茨城(つくば)、福岡(九州大学)にそれぞれ設置した。設置したセンサと期間は表 1 に示す。Fe センサは毎月交換し、Zn センサは交換することなく長期の連続測定を行う。

キーワード：ACM センサ、Aircorr、大気暴露連絡先

琉球大学工学部工学科エネルギー環境コース
(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地)

表 1 設置期間とセンサ

場所	期間	設置センサ
沖縄	2019年4月～ 2020年3月	Fe-Ag(毎月交換) 炭素鋼 Zn-Ag(1年設置) Aircorr
明石	2019年7月～ 2020年12月	Fe-Ag(毎月交換) 炭素鋼 Zn-Ag(1年設置) Aircorr
つくば	2019年12月～ 2020年9月	Zn-Ag(1年設置) Aircorr 炭素鋼
福岡	2019年7月～ 2020年7月	Zn-Ag(1年設置) Aircorr 炭素鋼

3. 試験結果

3.1 Fe センサと Zn センサの比較

図 2 に沖縄での 7 月の Fe センサと Zn センサの出力と雨量の比較を示す。どちらのセンサも降雨時に出力が上昇していることが見てとれる。降雨が観測されていない期間でも出力は得られているが電流値の出力から最大 0.1~1 μ A の範囲に収まっていることからこれは夜間の結露による出力とみられる。10~15 日はその傾向が特に顕著である。Zn センサでは Fe センサと比べて出力の振れ幅が大きい。これはイオン化傾向の反応の起こりやすさから Zn のほうが反応しやすいためと考えられる。明石でも Fe センサと Zn センサの比較を行ったが、沖縄と同様に Zn センサの振れ幅が大きい結果となった。

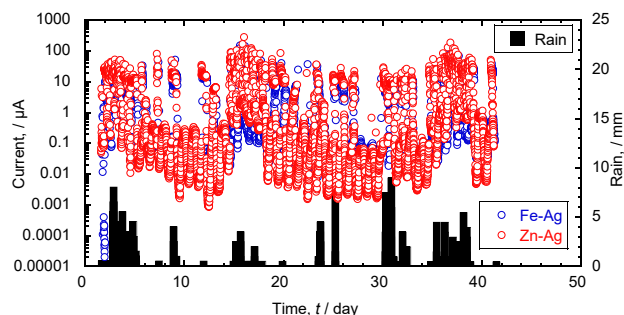


図 2 沖縄での 7 月の Fe, Zn センサと雨量比較

また、図 3 に沖縄と明石の ACM センサの月別電気量を示す。沖縄の Zn センサは設置初期出力で Fe センサより大きい値を計測していたが、10 月以降のセンサ出力は小さく、表面の錆や季節が冬の影響であると思われる。一方、Fe センサは年間を通して月の電気量は 8~10(C)と安定して出力を得られている。また、電気量が多い 9 月は台風の影響、最も小さい 1 月は冬の期間で乾燥しており、降雨も 1 か月間で 24mm しか観測されなかったためであるといえる。しかし、累積では 1 年間の出力でも Fe センサでは 109(C)、Zn センサ 133(C)と、Zn センサが出

力の振れ幅が大きかったため差が現れる結果となった。電気量から既報の式を用い腐食速度に換算した場合、Fe 0.44mm/y, Zn 0.45mm/y とほぼ変わらない値を示した²⁾。同様に明石でもほぼ変わらない結果となった。このことより Zn センサは 1 ヶ月毎の Fe センサと比べても長期的に腐食環境を評価できると思われる。しかし、後述するが鉄板の重量減から求めた腐食速度とは高い腐食速度を示した。

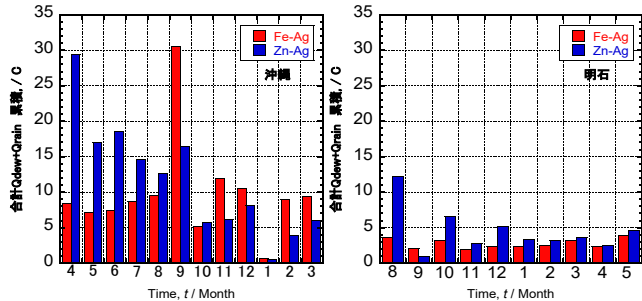


図 3 沖縄と明石の各センサ比較

3.2 Aircorr と ACM センサの比較

図 4 に各設置場所での Aircorr のデータと鉄板の腐食量を示す。開始時期は異なるがほぼ 1 年間で測定した。つくばが最も腐食量が小さく、ついで明石、福岡で 40 μ m 以下で沖縄では 63 μ m と高い値であった。さらに高い腐食量を示している沖縄の軒下は直接降雨が当たらない環境である。したがって雨でセンサ表面の塩分が洗い流されないため、119 μ m と非常に大きい。鉄板の重量減から求めた重量減をプロットするように Aircorr から求めた腐食量と一致している。腐食速度(mm/y)に換算しても、暴露場の Aircorr からは 0.05mm/y, 鉄板からは 0.05mm/y と同じ腐食速度となり、明石も同様に近い結果となった。また、図 5 に Aircorr の腐食曲線から求めた月ごとの腐食量を示す。8~10 月の腐食量が大きく、12~3 月の期間は腐食量が緩やかになっている。腐食速度でも沖縄では夏の期間は 0.06~0.1mm/y であり、冬の期間は 0.02~0.05mm/y である。他の設置場所でも明石の夏は 0.02~0.04mm/y, 冬は 0.003~0.01mm/y と夏に腐食が多く進行している。つくばと福岡も同様であった。

図 6 に沖縄での Aircorr のデータを再掲する。180 日前後で腐食速度が増大しているが、この腐食速度増大の原因を検討するため ACM センサの電気量との比較を行った。降雨時の電気量は非降雨時の電気量より大きくなることが知られているが降雨時の補正係数を用いることなく計算した。180 日前後では台風 17 号が接近しており、それが原因の一因である可能性があるが、ACM センサの出力からは大きな変化は見られなかった。これは長期暴露による腐食生成物の影響ではないかと考えられる。ACM センサとの関係性は今後さらに検討する必要がある。

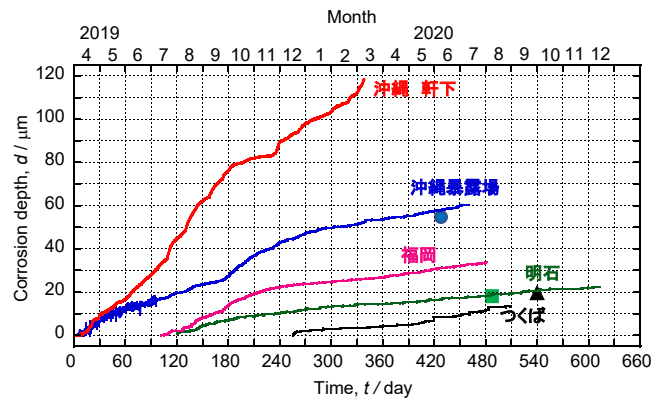


図 4 各設置場所での Aircorr と鉄板の腐食量

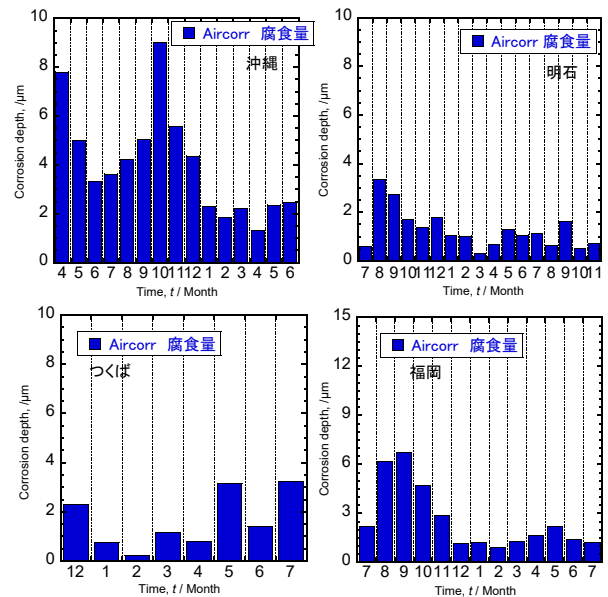


図 5 各設置場所での各月腐食量

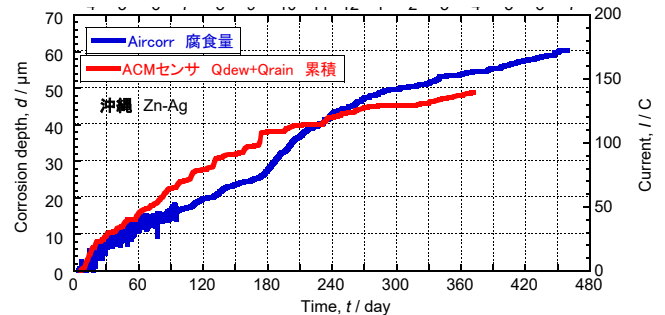


図 6 沖縄での Aircorr と ACM センサ比較

4. 結論

- 1) Fe-Ag のセンサと Zn-Ag センサはほとんど変わらないデータが得られ、長期でモニタリングをする際に Zn-Ag センサを使用することできる。
- 2) Aircorr の腐食量は鉄板の腐食量と一致した。さらに腐食の途中経過をモニタリングするには有効である。

参考文献

- 1) 面田真孝, 材料と環境, 65, pp.274-279 (2016).
- 2) 押川 渡, 材料と環境, 51, pp.398-403 (2002).

突合せ溶接された炭素鋼材とステンレス鋼材の 異種金属反応特性に関する基礎的研究

○琉球大学工学部 木下実梨, 琉球大学 蓮池里菜, 下里哲弘

1. 背景

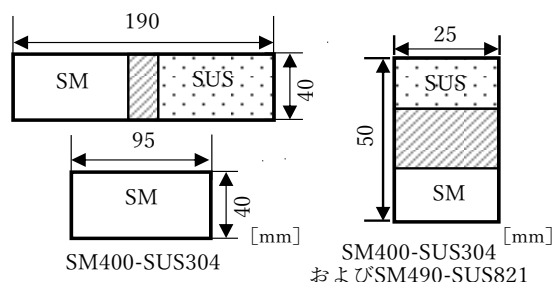
鋼橋桁端部では、塩害環境下などで腐食が発生しやすい。一般部などは炭素鋼材（SM 材）でもほとんど腐食が進行しない一方、高湿度かつ飛来塩分が蓄積しやすい桁端部では激しく腐食劣化した事例が報告されている¹⁾。これに対し、耐食性に優れたステンレス鋼材（SUS 材）の使用が考えられるが、材料費が SM 材と比較し高価であることから、腐食の進行が激しい桁端部のみへ適用し、SM 材と併用することが合理的である。一方、SUS 材と SM 材では標準電極電位が異なるため、双方を架橋するように水膜が形成されると電子のやり取りが行われ、異種金属接触腐食の発生²⁾が懸念されている。

そこで本研究では、突合せ溶接された SM 材と SUS 材に対し、溶接部近傍に着目し、異種金属接触腐食発生箇所の特定と要因の検証を行った。

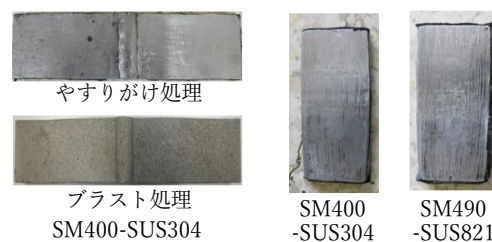
2. 腐食促進試験

本研究では、溶接余盛有無による異種金属接触腐食特性と腐食進行程度の違い、SUS 材を溶接した SM 材と SM 材単体の場合の腐食進行程度の違い、ならびに材質による異種金属接触腐食特性の違いについて検証すべく、腐食促進試験を実施した。溶接金属は、すべて SUS 材の GFW309L を使用している。

試験体は溶接余盛に着目すると、以下の4種類に分類できる。(A) SM400-SUS304 の突合せ溶接試験体（余盛あり）、N=2。(B) SM400-SUS304 の突合せ溶接試験体（余盛なし）、N=3。(C) SM490-SUS821 の突合せ溶接試験体（余盛なし）、N=2。(D) SM400 単体、N=2。なお、(A)、(B)の2体、(D)は表面処理について、やすりがけとブラスト処理の2パターンを検討した試験を実施している。(B)の1体、(C)の2体は特に材質の違いに着目するため、余盛を除去した上で別途試験を実施している。図1に試験体寸法および試験開始時の外観を示す。腐食促進試験は恒温恒湿器を用いて、乾湿繰り返し通常サイクル（図2①）、および SM-SUS 上に水膜を形成しやすいように、湿潤の時間を長くしたサイクル（図2②）の二つのサイクルで行った。各々3サイクルごとにスプレーで水溶水を吹付した。表1に各試験体に対する条件の組み合わせを示す。



(a) 試験体寸法



(b) 試験開始時の外観

図1 試験体寸法および試験開始時の外観

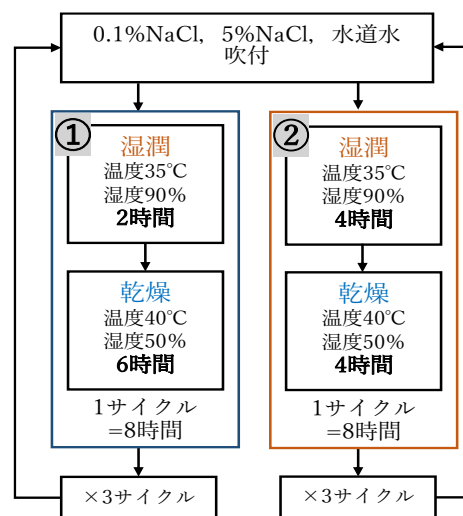


図2 促進試験サイクル条件

表1 材質および吹付水溶水

	材質	余盛	処理	吹付	サイクル
(A)	SM400-SUS304	○	やすりがけ	5%NaCl	①
		○	ブラスト	水道水	②
(B)	SM400-SUS304	×	やすりがけ	5%NaCl	①
		×	やすりがけ	0.1%NaCl	②
		×	ブラスト	水道水	②
(C)	SM490-SUS821	×	やすりがけ	0.1%NaCl	②
		×	やすりがけ	水道水	②
(D)	SM400 単体		やすりがけ	5%NaCl	①
			ブラスト	水道水	②

キーワード：異種金属接触腐食，ステンレス，炭素鋼，桁端部，防食

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: e175518@eve.u-ryukyu.ac.jp

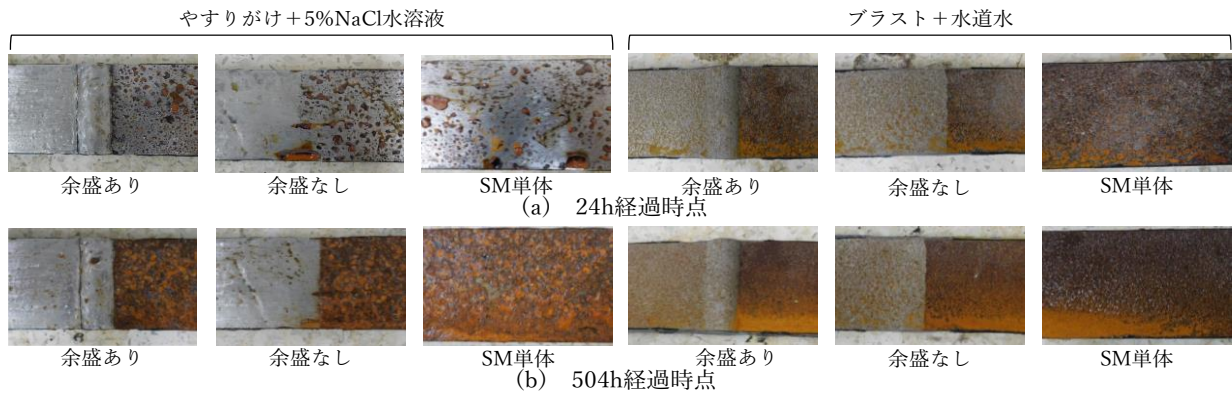


図3 24h および 504h 経過時点の SM400-SUS304 の外観

3. 試験結果

3.1 溶接余盛有無による検討

図3に(A), (B), (D)試験体の24hおよび504h経過時点の外観を示す。24h経過時点のやすりがけ処理+5%NaCl水溶液条件下では、余盛あり試験体で溶接止端部に沿った腐食がわずかに見られた。504h経過時点では、やすりがけ処理+5%NaCl水溶液、ブラスト処理+水道水条件のどちらも、SM材で全面に腐食が進行し、余盛の有無、SUS材と溶接したSM材とSM材単体での差は見られなかった。図4に錆厚測定箇所と測定結果を示す。錆厚は電磁膜厚計を用い、図中の網掛範囲を20回計測しその平均値とした。5%NaCl水溶液、水道水ともに、溶接接合試験体では溶接部に最も近い①の範囲で、その他範囲より僅かに大きい傾向にあったものの、SM材において著しく腐食が進行することはなかった。

以上より、本促進条件下では、異種金属接触腐食は溶接余盛の有無に関わらず発生しなかった。

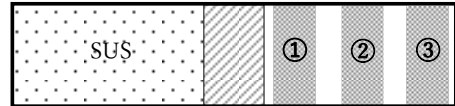
3.2 材質の違いによる検討

図5に(B), (C)試験体の48hおよび504h経過時点の外観を示す。48h経過時点のSM490-SUS821の0.1%NaCl水溶液条件下で、SM材溶接止端部において腐食進行を確認した。504h経過後には、この腐食は凸形状の局部腐食と思われるさびに進行していた。また、504h経過時点のSM490-SUS821の水道水条件下において、溶接止端部でも腐食が発生した。同条件のSM400-SUS304試験体では、504h経過時点であっても腐食は確認されなかった。

以上より、本促進条件下では、異種金属接触腐食の反応特性は、SM材の材質によって異なると考えられた。

4. 結論

- (1) 余盛の有無に関して、余盛ありでは腐食初期において溶接止端部で腐食進行が確認されたものの、504時間経過では余盛の有無にかかわらず全面的に腐食が進行しており、異種金属接触腐食の影響はないと考えられる。
- (2) SUS材と溶接した場合でも、SM材の腐食進行程度に影響はなかった。



	5%NaCl水溶液			水道水		
	余盛あり	余盛なし	SM単体	余盛あり	余盛なし	SM単体
①	302	303	273	21	15	19
②	277	278	273	16	17	19
③	281	258	291	16	19	15

図4 錆厚測定箇所と測定結果

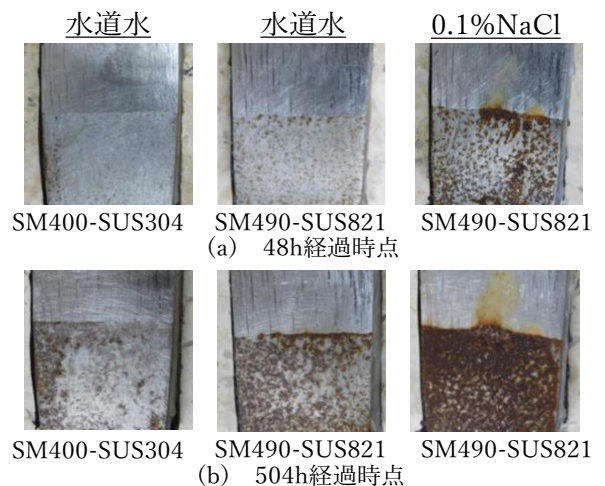


図5 48h および 504h 経過時点の SM400-SUS304, SM490-SUS821 の外観

- (3) SM490の試験体では、水道水および0.1%濃度NaCl水溶液の吹付により、溶接接合部近傍で異種金属接触腐食とみられる腐食進行を確認した。一方、SM400ではこのような腐食は確認されなかった。よって、異種金属接触腐食の反応特性は、SM材の材質によって異なると考えられる。

参考文献

- [1] 田井政行, 下里哲弘, 玉城善章, 有住康則, 矢吹哲哉: 腐食により崩落に至った鋼プレートガーダー橋の崩落メカニズムと桁端部の損傷回復評価に関する解析的検討, pp.416-418, 2015.
- [2] 山手利博, 吉田達也, 都竹克二, 金子智: 建築設備配管系でのガルバニック腐食とその防止に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.487, Vol.9, pp.51-60, 1996.

Al-Mg 合金溶射・塗装皮膜の防食効果調査結果 —模擬桁試験体の 10 年経過報告—

西日本プラント工業(株)プラズマイヤー工部部 ○山崎正文
琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース 下里哲弘 田井政行

1. はじめに

近年、鋼橋梁や鋼製栈橋等の鋼構造物の長寿命化が求められており、鋼構造物の多くは塗装によって防食されているが、熔融させた金属を鋼材へ吹き付け金属皮膜を形成する溶射法は、その皮膜の上に多様な塗装を施すことによって、耐久性を向上させ長期間の防食を可能としている。

これらの防食皮膜の耐食性は塩水噴霧や複合サイクル試験などで評価されているが、長期間の屋外での耐久性について評価された例は少ない。そこで、平成 20 年 8 月の「沖縄地区鋼橋塗装マニュアル」改訂を機に設置された塗装仕様比較暴露試験体（以下、模擬桁）を用いてアルミニウムマグネシウム（以下、Al-5%Mg）合金溶射皮膜の経年観察を開始した。今回は、10 年経過後の調査結果を報告する。

表 1 調査周期 (●：実施済 ○：計画 ★：今回)

H22.6	H22.8	H23.2	H23.10	H25.6	H27.8	H29.8	R2.10
設置	初回	0.5 年	1 年	3 年	5 年	7 年	10 年
●	●	●	●	●	●	●	★

2. 試験の概要

1) 試験体

国道 58 号新牧港橋高架下に設置してある、模擬桁（桁高 850mm、桁幅 2,490mm、桁長 3,150mm）の二つの桁を用いて行った。なお、試験面は図 1 に示す横桁の外面となる。

2) 試験体製作方法

試験面は、非金属系研削材（褐色熔融アルミナ #24）を用いてブラスト処理を行い、除錆度 ISO 8501-1 Sa3.0 相当、表面粗さ Ra 8.0μm 以上、Rz 50.0μm 以上になるように素地調整をした。金属溶射として、Al-5%Mg を溶射材料（線材）としたプラズマ溶射を行い、溶射膜厚 150μm 以上とした。その後、図 1 の A 面には有機系ポリウレタン塗装、B 面には有機系フッ素塗装、C 面には無機系の 3 種類（MG セラ、パーミット+MG セラ、パーミット）を塗装し、更には D 面に溶射の無封孔を採用した。

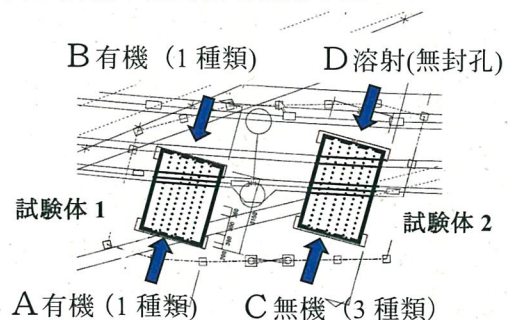
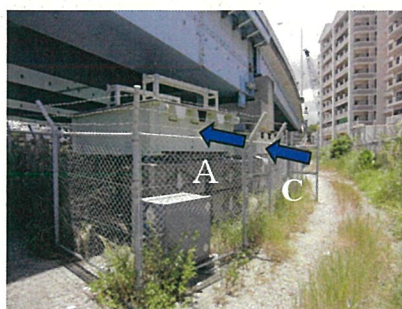


図 1 試験体測定箇所

キーワード：金属溶射、大気暴露

連絡先 〒810-0011 福岡市中央区高砂 1 丁目 7 番 11 号 NPC 別館 1F E-mail:ta-abe@npc21.jp

3. 調査方法

1) 目視調査

景観性、防食性について、目視により観察する。

2) 膜厚測定

2点調整型電磁膜厚計を用い、評価面につき定点（各測定点3回の測定値の平均値）を測定し、測定点は各仕様につき36点とした。

3) フォーティンテスト（密着力試験）

評価面につき1箇所の皮膜にドリルを取付け、24時間保持した後、ドリル接着部周辺の皮膜を除去し、リフターにて引抜き、密着力を測定する。

準拠規格：溶射皮膜の引張密着強さ試験方法¹⁾

4) 色差

評価面につき1箇所を、色差計（コニカミノルタ製 CR-400）にて色差（色の3属性を指標化した L^* 、 a^* 、 b^* を測定し、初期値との差の2乗和の平方根）の変化を評価する。

準拠規格：色差と人の感覚的な捉え方²⁾

5) 白亜化

評価面につき1箇所を、白亜化測定用テープで粉状となって離脱した皮膜を付着させ、その付着させた皮膜及び塗膜の評価を行い、10段階の等級を付ける。

準拠規格：皮膜の評価基準³⁾

4. 結果と考察

1) 目視調査

2-D（無封孔）については白錆が見られた。

2) 膜厚測定

施工時の膜厚との差を比較した結果を図2～7に表した。塗装を施した1-A,2-C-2-IIには、膜厚のバラツキが見られるものの、経時的な変化は今回も確認できなかった。

また、1-B,2-C-III,2-Dの仕様では、膜厚のバラツキが大きく見られるが、腐食による経時的な膜厚の減少や膨れなどによる膜厚の増加は確認できなかった。

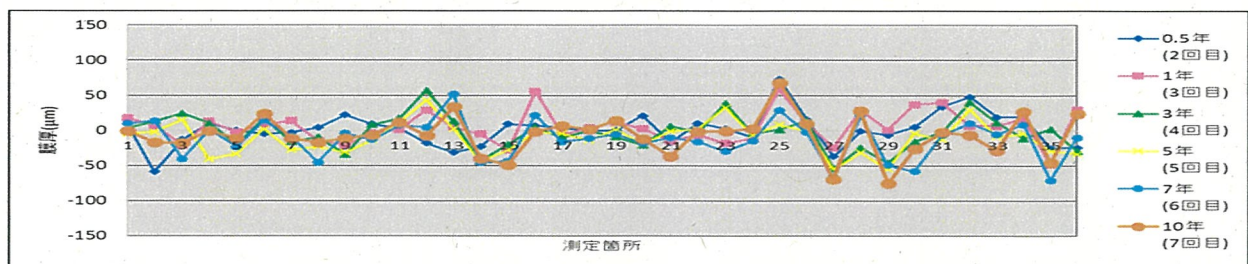


図2 膜厚測定結果（1-A：標準仕様）

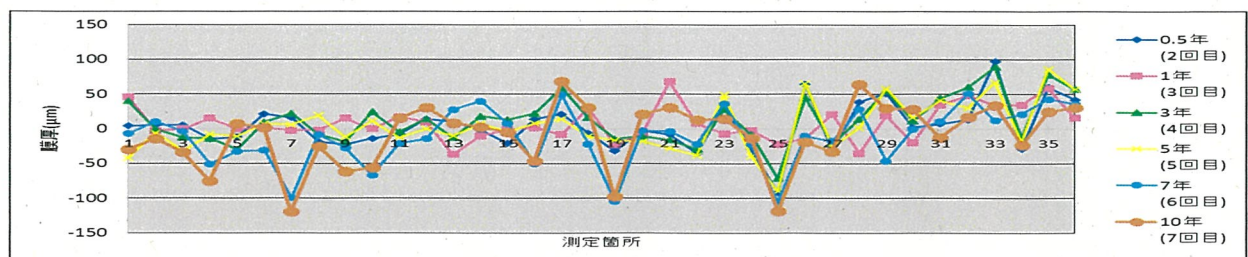


図3 膜厚測定結果（1-B：フッ素仕様）

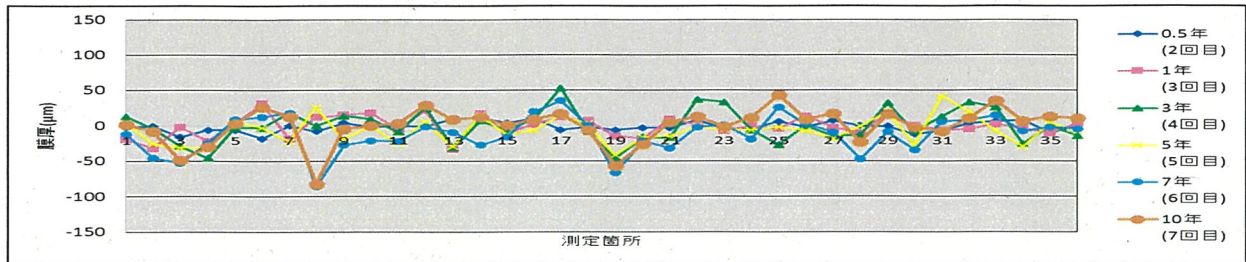


図4 膜厚測定結果 (2-C-I: 無機質無溶剤 MG セトン仕様)

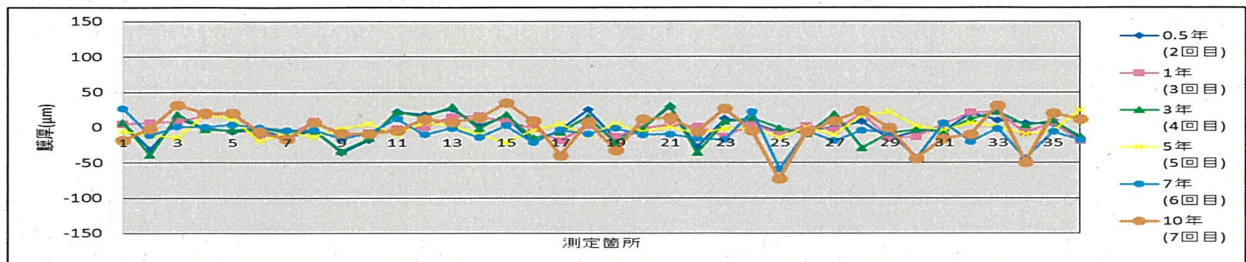


図5 膜厚測定結果 (2-C-II: 無機質無溶剤H°-ミイト+MG セトン仕様)

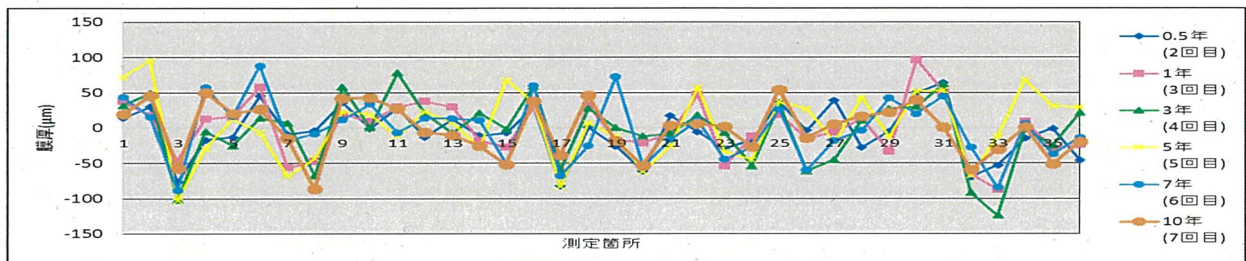


図6 膜厚測定結果 (2-C-III: 無機質無溶剤H°-ミイト仕様)

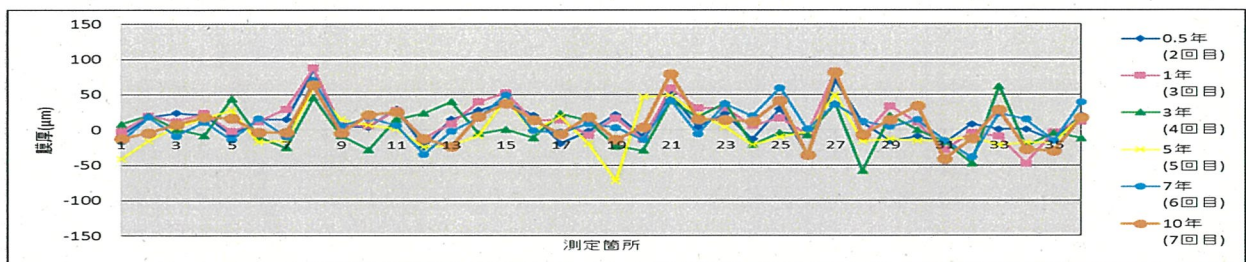


図7 膜厚測定結果 (2-D: 無封孔仕様)

3) アドヒージョンテスト (密着力試験)

アドヒージョンテストの結果及び推移を図 8, 9 に示す. すべての試験面において, 密着力は 4.5MPa 以上保たれている.

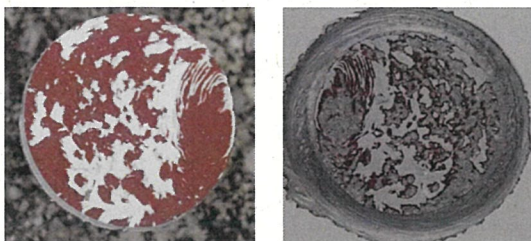


図8 アドヒージョンテスト結果
(左: ドーリー、右: 試験面)

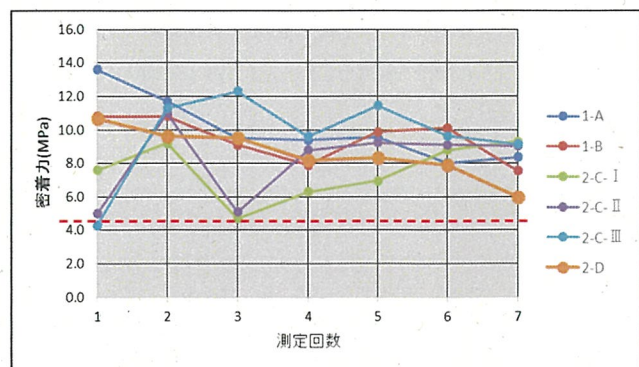


図9 アドヒージョンテスト推移

4) 色差

色差の結果を表2に示す。

色差(ΔE)の算出方法は次式によって求める。 $\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$

なお、 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* は初回測定値との差である。

		初回	0.5年(2回目)	1年(3回目)	3年(4回目)	5年(5回目)	7年(6回目)	10年(7回目)	評価(10年)
1-A	L*	80.1	79.4	79.6	80.1	77.0	80.7	82.2	3級以上
	a*	-7.9	-5.5	-6.6	-6.8	-4.8	-5.1	-5.4	
	b*	16.1	14.5	13.2	15.0	12.0	9.8	7.8	
	色差(ΔE)	0	3.0	3.2	1.5	6.0	6.9	8.9	
1-B	L*	80.5	79.4	79.7	80.2	76.3	79.6	80.7	2級
	a*	-7.8	-5.0	-6.1	-6.8	-5.4	-5.8	-7.0	
	b*	16.6	15.2	15.4	17.2	15.2	17.6	18.2	
	色差(ΔE)	0	3.3	2.2	1.2	5.0	2.4	1.8	
2-C-I	L*	96.7	96.8	96.6	95.8	94.3	96.1	96.4	1級
	a*	-1.1	-2.6	-2.3	-0.3	1.6	0.2	-0.9	
	b*	0.6	2.8	-0.4	1.4	2.3	1.9	2.0	
	色差(ΔE)	0	2.7	1.6	1.5	4.0	1.9	1.4	
2-C-II	L*	97.2	93.2	96.7	96.5	94.3	96.3	96.5	2級
	a*	-1.1	0.2	-2.3	-0.4	1.6	0.1	-0.9	
	b*	0.6	5.6	-0.4	1.5	2.7	2.2	2.3	
	色差(ΔE)	0	6.5	1.6	1.3	4.5	2.2	1.8	
2-C-III	L*	96.3	94.6	95.9	96.0	93.3	74.8	96.2	2級
	a*	-1.0	-8.2	-2.2	-0.3	1.7	0.2	-0.8	
	b*	1.9	15.8	0.5	2.5	3.5	3.6	3.6	
	色差(ΔE)	0	15.7	1.9	1.0	4.3	21.6	1.8	
2-D	L*	78.1	72.0	73.5	72.5	70.0	70.4	67.6	3級以上
	a*	-0.2	-1.7	1.3	-0.3	1.2	0.3	0.0	
	b*	2.9	1.6	1.0	3.0	4.4	4.4	5.6	
	色差(ΔE)	0	6.4	5.2	5.6	8.4	7.8	10.8	

結果として、塗装を施した5つの仕様の内1-Aが、『塗料では色違いといわれる領域』の3級以上の評価となり、色差の進行が見られた。ほかは、2級（実用色差）1級（許容色差）となっており、色差の進行はほとんど見られない。

5) 白亜化

白亜化の結果を表3に、最も進行した例を図10に示す。

表3 白亜化結果（等級）

初回	1年目	3年目	5年目	7年目	10年目
1-A	0.5	1.5	1.5	2.5	2.5
1-B	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2-C-I	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2-C-II	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2-C-III	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2-D	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0

今回も、1-B、2-C-I、2-C-II、2-C-IIIにおいて、ほぼ白亜化は見られなかった。

1-Aは2.5等級で前回から白亜化が進行していない、上塗で使用したポリウレタン樹脂系の耐候性が、他の4つの仕様より劣っていると考えられる。



図10 白亜化結果（1-A）

5. まとめ

Al-5%Mg合金溶射に塗装を施し、10年間大気暴露された模擬桁の膜厚測定、アドヒージョンテスト、色差、白亜化について評価を行い、以下のことが確認できた。

1) 目視調査

2-D（無封孔）については白錆が確認された。ほかの塗装を施した試験体面は、変化は見られない。

2) 膜厚測定

塗装を施した1-A、2-C-I、2-C-IIには若干の膜厚のバラツキが見られるものの、経時的な変化は確認できなかった。また、1-B、2-C-III、2-Dの仕様では膜厚のバラツキが大きく見られるものの、経時的な膜厚の減少や膨れなどによる膜厚の増加は確認されなかった。

3) アドヒージョンテスト（密着力試験）

すべての試験体において、密着力は4.5MPa以上保たれており、密着力には問題はない。

4) 色差

塗装を施した5つの仕様の内1-Aと2-Dでは『塗料では色違いといわれる領域』の3級以上の評価となり、色差の進行が見られた。

5) 白亜化

1-Aは2.5等級から白亜化が進行していない、また他の塗装を施した4つの仕様より耐候性が劣っている。

以上の結果から、模擬桁暴露 10 年経過後の Al-5%Mg 合金溶射皮膜に劣化は確認されなかった。但し、紫外線の影響と思われる、A 面のリウタン樹脂上塗部の白亜化進行や C 面の無機系塗料上塗部の色差進行など、景観上の違いは顕在化しつつあると思われる。

今回の 10 年目の調査において、Al-5%Mg 合金溶射皮膜の耐久性が優れていることを確認することが出来た。

参考文献

- 1) 日本工業規格：溶射皮膜の引張密着強さ試験方法 JIS H 8300:2011
- 2) アルミニウム表面技術便覧
- 3) 日本塗料検査協会：塗膜の評価基準

傾斜角変化に着目した変形状計測の適用

株式会社 TTES 正会員 ○梅川 雄太郎, 菅沼 久忠
玉名市 建設部土木課 正会員 木下 義昭

1. はじめに

性状評価が主である橋梁近接目視点検が 2 巡目を迎える。今後の技術者不足を見据えて、耐荷力などの橋梁性能を定量評価できる技術が必要とされている。橋梁の耐荷力調査において、たわみは重要な指標の 1 つである。

筆者らは従来、加速度の 2 階積分によるたわみ計測に手法を開発してきた。本手法は動的活荷重たわみに限定され、静的なプルーフ・ローディング試験等への適用には向かなかった。そこで傾斜角に着目することで、静的な荷重に対応した画期的なたわみ計測手法を新たに開発した。

本稿では、PC 3 径間連続有ヒンジラーメン箱桁橋を対象に静的な載荷試験を行い、傾斜角に着目した変形状計測手法の適用性について試行した。また、中央ヒンジ支承の状態に着目して、計測結果より現時点での橋梁の変形性能の把握を試みた。

2. 対象橋梁概要および計測・載荷試験概要

対象橋梁の概要および計測機器設置位置を図 1 に示す。A1-P1 間、P2-A2 間は支間長 75.6m、P1-P2 間は 115[m]の橋長 266m である。支間中央は中央ヒンジ支承になっている。

地覆上に加速度センサを橋軸方向に 18ヶ所設置し、200[Hz]で時刻同期しながら計測した。作業は橋面上で完結している。

載荷試験では、総重量 20[tf]の 3 軸ダンプ 2 台を試験車両として指定位置に配置し、その際の重力加速度を計測した。同時にレベルおよびトラン

シットによりたわみを計測している。対象橋梁全景および静的載荷試験時の様子を図 2 に示す。

なお計測後は、設置治具を残置し将来的な比較計測に備え、センサ自身は撤去している。

3. 複数加速度計を用いたたわみ計測

本計測で用いた手法を示す。重力加速度の変化から傾斜角を算出して用いる点に特徴がある。橋梁のたわみは図 3 に示すように、時刻 t における橋軸方向 x のたわみ関数 $\delta(x)$ は橋軸方向の傾斜角関数 $\varphi(x)$ の関係で定義され、桁全体の傾斜角を多項式関数として近似することができる。

$$\varphi_x = f(x) = a_1 x^n + \dots + a_{n+1}$$

上式を用いて、たわみ関数を下式で求める。

$$\delta(x) = \int f(x) dx = \frac{a_1}{n+1} x^{n+1} + \dots + a_{n+1} x + a_{n+2}$$

a_n は n 次項の係数である。

時刻 t において、計測位置 x_i における計測データの傾斜角 φ_i に対して最小二乗法を用いて、各次数の係数を求め、各時刻 t におけるたわみ $\delta(t)$ を算出する¹⁾。本計測では、A1-中央ヒンジ間と中央ヒンジ-A2 間に分割して分析処理を実施した。

4. 載荷試験結果

本手法を用いて静的載荷時のたわみ計測を実施した。静的載荷試験時の橋軸方向の載荷位置およびたわみ形状を図 4 に示す。本手法では特定のセンサ位置のたわみではなく、構造物全体の変形状がわかる点に特徴がある。

静的載荷 Case1 では、P1-P2 間に試験車両を 2 台

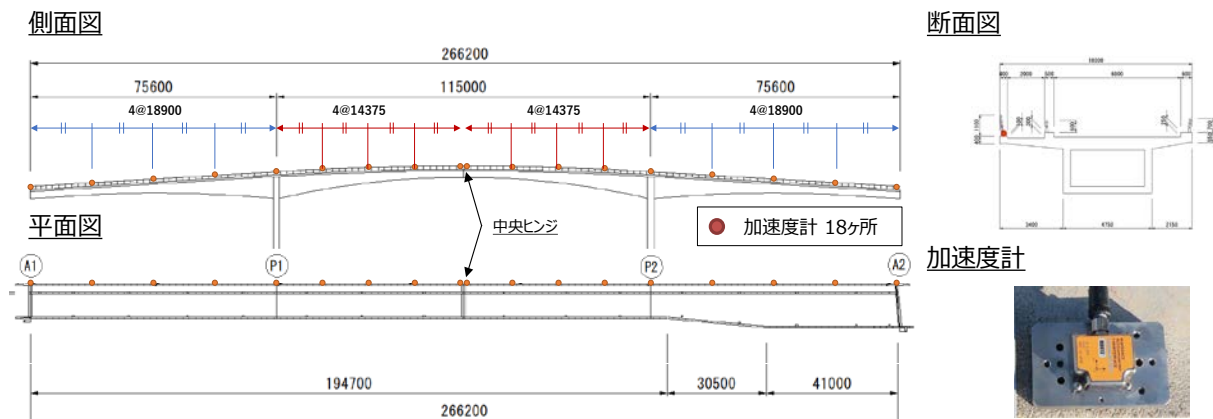


図 1 対象橋梁および計測機器設置位置

キーワード 変形状, たわみ計測, 加速度計, 傾斜角, PC 有ヒンジ橋

連絡先 〒153-0051 東京都目黒区上目黒 3-30-8 S2 (株)TTES TEL:03-5724-4011

縦列載荷した場合である。P1-P2 間載荷直下では、最大 14.5mm のたわみであり、P1 から中央ヒンジ支承にかけて片持ち梁のように倒れ込む形状になっていた。レベルおよびトランシット計測でも、支間中央部のたわみは 14~15mm であり、本手法の精度は従来技術と同等であることを確認した。

P2 から中央ヒンジ支承にかけても、P1 側と同形状であった。たわみ形状から判断すると、中央ヒンジ支承はピン結合として稼働していると考えられる。また、A1-P1 間および P2-A2 間は負曲げの影響で鉛直上向きに持ち上がる挙動を確認した。

静的載荷 Case2 では、A1-P1 間の支間中央付近に試験車両を 2 台並列載荷した。P2-A2 間載荷直下で鉛直下向きにたわむ挙動が確認でき、最大 2.6mm のたわみであった。A1-P1 間に載荷した場合でも、隣接する P1-P2 間は負曲げで鉛直上向きに持ち上がり、P2-A2 間では鉛直下向きの変形挙動が確認できた。

5. まとめおよび今後の展望

本稿では、直接変位計や画像処理手法などではたわみ計測が困難な大型橋梁に対して、橋面上からのアプローチによる傾斜角を用いたたわみ計測を実施した。従来手法と比較し、より短時間に同程度精度の計測と、対象物全体の変形という多くの情報を提供できることを確認した。また、計測結果のたわみ形状より、中央ヒンジ支承の稼働を確認し、健全性を判断す

る評価指標としての可能性も示すことができた。

たわみの初期値(現状)を取得したことは、今後なんらかの変状が生じた際に、定量的な判断を下す上で有効だと考えられる。災害後の道路早期復旧の判断にも利活用が期待される。

今後は、設計計算・有限要素法解析などからたわみの閾値の設定や、長期死荷重変形の把握に応用する検討を進めていきたい。



図2 対象橋梁全景および載荷試験

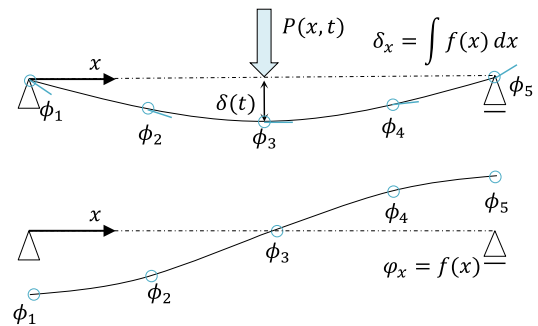


図3 橋梁のたわみと傾斜角関数の概念図

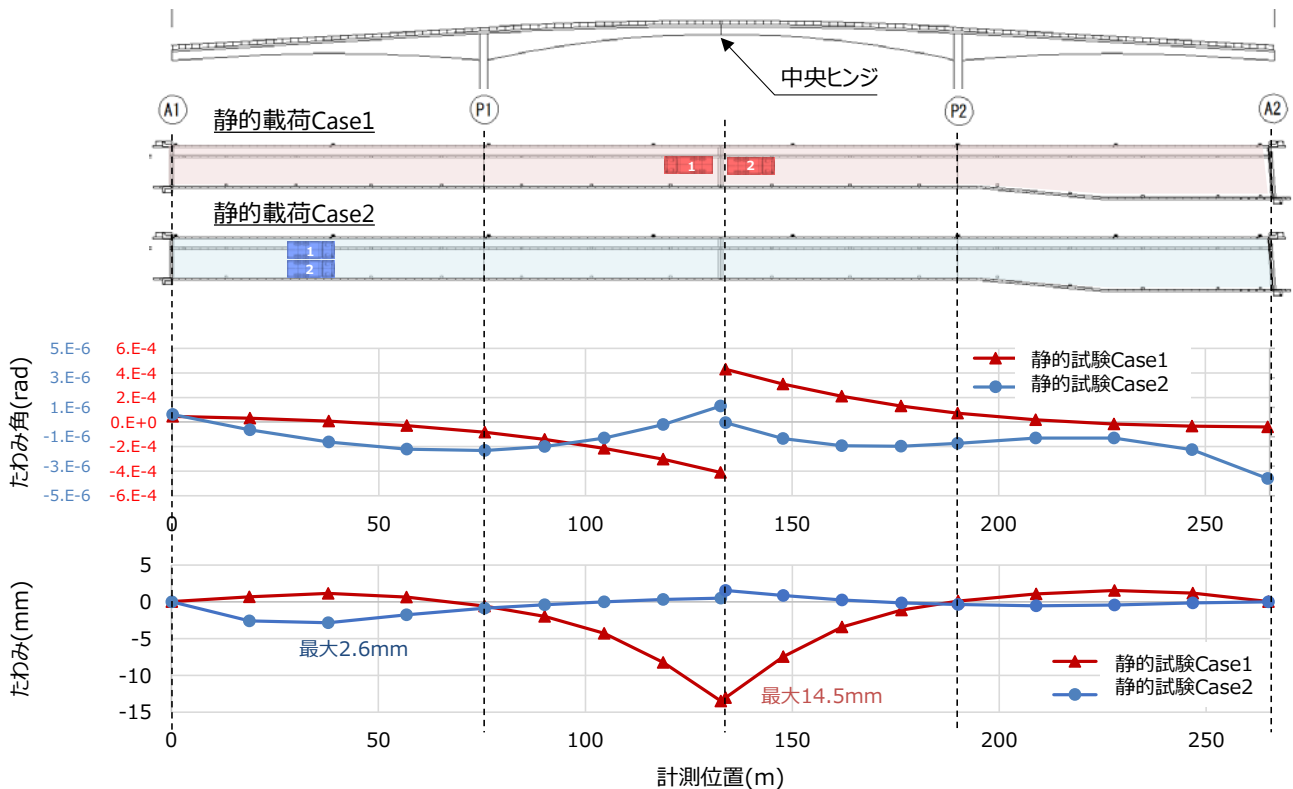


図4 載荷試験結果

参考文献

- 1) 梅川ら: "複数加速度センサを用いた橋梁のたわみ算出方法の適用性および精度向上に関する検討", 第73回土木学会年次学術講演会