

2024 年度 土木学会西部支部沖縄会 第 14 回 技術研究発表会

琉球大学 研究者交流会館・50 周年記念会館

2025 年 1 月 15 日

概要集

(2025. 1. 12版)



土木学会西部支部沖縄会

会場案内



琉球大学西原口を入り、構内の信号を左に曲がり、左手すぐ。

○ 土木学会継続教育（CPD），CPDS 認定プログラム

発表プログラム

2025年1月15日

Time Table

Start	End	プログラム
9:00	9:30	受付・登録
9:30	9:45	開会式 開会の挨拶：有住 康則（沖縄会会長） 実施要項の説明：下里 哲弘（沖縄会幹事長）
9:45	10:00	Break
10:00	11:10	Session 1 7編 （建設材料・防災） 座長：垣花 寿（川田建設）
11:10	11:20	Break
11:20	12:20	Session 2 6編 （腐食・防食） 座長：安里 嗣也（沖縄県）
12:20	13:30	Lunch
13:30	14:50	Session 3 8編 （環境保全・情報技術） 座長：淵脇 秀晃（琉球大学）
14:50	15:00	Break
15:00	16:10	Session 4 7編 （新材料・新工法） 座長：関 信郎（沖縄総合事務局）
16:10	16:30	Break
16:30	17:00	閉会式 優秀発表者賞の表彰：山田 哲也（沖縄会副会長） 閉会の挨拶：前川 智宏（沖縄会副会長）代理 砂川 勇二

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	
10:00 J 11:10	Session1 :建設材料・防災	座長：垣花 寿(川田建設)
	1 炭素骨材を混和したカーボンネガティブジオポリマーの耐酸性に関する研究	1
	西松建設(株) 原田 耕司, 九州工業大学 合田 寛基, 伊東 奈月, 日比野 誠, 北九州市立大学 高巢 幸二	
	2 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(その3)	3
	沖縄県生コンクリート工業組合 蒲牟田 孝二, 琉球大学 富山 潤, 山田 義智, 九州大学 小山 智幸	
	3 力学的な砕波の発生条件に基づく砕波指標の研究	7
	琉球大学大学院 荒瀬 悠人, 琉球大学 入部 綱清	
	4 モバイル端末のLiDAR による荒崎海岸に位置する琉球石灰岩塊の計測	11
	琉球大学 島袋 誉, 入部 綱清, 琉球大学大学院 橋口 優芽香, 琉球大学 藍檀 オメル, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷 直彦	
	5 ノッチを有する海食崖に対する津波の作用	13
	琉球大学大学院 橋口 優芽香, 琉球大学 入部 綱清, 藍檀 オメル, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷 直彦	
	6 国道506号小禄道路事業における多軸台車を活用した上部工一括撤去事例	15
	沖縄総合事務局 南部国道事務所, 伊佐 奨真	
	7 送電鉄塔の腐食した部材に対するCFRP補修検討および実鉄塔での施工事例	19
	日鉄ケミカル&マテリアル(株) 秀熊 佑哉, 東京電力パワーグリッド 山崎 智之, 佐野 和伸	

Time	Room A
11:20 ┃ 12:20	Session2 : 腐食・防食 座長：安里 嗣也(沖縄県)
	1. 電気化学実験を用いて減肉させた高力ボルトの軸力低下特性に関する研究 _____ 25 琉球大学 浦崎 真吾, 下里 哲弘, 淵脇 秀晃, 沖縄しまたて協会 玉城 喜章
	2. 改良型ノズルホルダーを用いたCS工法の成膜性評価 _____ 27 琉球大学 真田 大輝, 下里 哲弘, 淵脇 秀晃
	3. SEMとラマン分光法を用いた表面処理剤を施した耐候性鋼材のさび分析 _____ 29 琉球大学 安里 拓馬, 下里 哲弘, 淵脇 秀晃
	4. 改良型CFRPガセットを用いた端対傾構の地震時破壊特性 _____ 31 琉球大学 宮里 啓太郎, 下里 哲弘, 日鉄ケミカル&マテリアル 秀熊 佑哉, フクビ化学工業 成沢 良輔
	5. ボルトキャップにおける接着剤の耐久性の検討 _____ 33 株式会社IHI 矢ヶ部 菜月, 琉球大学 淵脇 秀晃, 下里 哲弘
	6. 高力ボルト継手近傍母材部の局部腐食形状と継手耐力特性 _____ 35 琉球大学 小田 脩斗, 下里 哲弘, ムムタズ ヤシン, JFEエンジニアリング(株) 田中 裕明

Time	Room A
	Session3 : 環境保全・情報技術 座長：淵脇 秀晃(琉球大学)
	1. 福地ダム上流洪水吐法面における災害復旧の対応 _____ 37 沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 砂川 尚也, 我喜屋 靖
	2. 国道331、332号ウェルカムロードにおける特定外来生物ハヤトゲフシアリに対する防除について _____ 43 沖縄総合事務局 南部国道事務所 大石 ゆり, 豊見山 直樹
	3. 沖縄管内のブルーカーボン形成及び活用方策の検討 _____ 49 沖縄総合事務局 開発建設部 小野木 佑徳, 國場 幸恒
	4. 軽石の再生路盤材利用検討について _____ 55 沖縄県建設技術センター 田仲 康将, 比嘉 正也
	5. 琉球大学千原キャンパスの点群化とその応用 _____ 61 琉球大学 梶原 稜佑, 入部 綱清, 琉球大学大学院 橋口 優芽香, (有)南部測量機 渡口 弘志, (同)Nシステム 仲間 聡久
13:30 J	6. 3D-CADデータと点群データの連携とその応用 _____ 63 琉球大学 宇地原 友彩, 入部 綱清
14:50	7. 激しく塩害劣化したPCプレテン桁の振動特性に関する基礎的実験 _____ 65 琉球大学 宮崎 ひな, 下里 哲弘, 川田建設 垣花 寿
	8. 無線型加速度計を用いた海上橋における高欄トップレールの渦励振と振動抑制対策効果 _____ 67 琉球大学 大山 詩織, 下里 哲弘, Yasin Malikzai

Time	Room A
15:00 ┃ 16:10	Session4：新材料・新工法 座長：関 信郎(沖縄総合事務局)
	1. ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの開発 (その1：高力ボルトの基本性能) ————— 69 (株)横河ブリッジ 奥村 優介，中村 智昭，東洋アルミニウム(株) 今村 隆大， 玉寄長治，神鋼ボルト(株) 山本 光春，琉球大学 下里 哲弘
	2. ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの開発（その2：防食性能）—— 71 東洋アルミニウム(株) 今村 隆大，玉寄 長治，(株)横河ブリッジ 奥村 優介， 中村 智昭，神鋼ボルト(株) 山本 光春，琉球大学 下里 哲弘
	3. ステンレスクラッド鋼の腐食促進試験による耐食性の評価Ⅱ ————— 73 JFEエンジニアリング(株) 田中 裕明，JFEスチール(株) 栗原 康行， 琉球大学 下里 哲弘
	4. ステンレス鋼と炭素鋼を異材溶接接合した十字断面長柱の圧縮載荷実験 ————— 75 (株)横河ブリッジホールディングス 加藤 健太郎，山田 悠作，結城 洋一，石井 博典
	5. 大気暴露したステンレス鋼桁端構造の外観評価 ————— 77 (株)建設技術研究所 案浦 宏太，荒牧 聡，羽根 航，琉球大学 下里 哲弘，城間 大
	6. 電気化学的手法を用いた炭素鋼とステンレス鋼間で発生する異種金属接触反応 の抑制技術の研究 ————— 79 琉球大学 城間 大，下里 哲弘，建設技術研究所 案浦 宏太，荒牧 聡
	7. 炭素鋼-ステンレス鋼横突合せ溶接継手の疲労強度特性 ————— 81 (株)建設技術研究所 荒牧 聡，羽根 航，案浦 宏太，琉球大学 下里 哲弘，川東 優香

Session 1 建設材料・防災

炭素骨材を混和したカーボンネガティブジオポリマーの耐酸性に関する研究

西松建設（株） ○原田 耕司

九州工業大学 合田 寛基, 伊東 奈月, 日比野 誠

北九州市立大学 高巢 幸二

1. はじめに

ジオポリマーはセメントを全く使用しないため、セメントコンクリートに比べCO₂を削減できる環境に優しい建設材料である。しかし、ジオポリマーの材料であるアルカリ溶液等はセメントに比べ少ないがその製造時にCO₂が発生するため、ジオポリマーをカーボンネガティブ（以下、CNと呼ぶ）にするのは困難であった。

一方、バイオマスを燃焼しない水準で管理された酸素濃度の下で、350℃以上の温度で加熱して作られるバイオ炭は、J-クレジット制度¹⁾では農地転用が承認されており、また国内外でセメントコンクリート用材料としてバイオ炭を用いた研究が報告されている。

このような背景から、バイオ炭をジオポリマーの材料として使用出来れば、炭素を固定化したCNジオポリマーを製造できる可能性がある。著者らは基礎的な検討として、バイオ炭を用いたモルタル試験を実施して、その強度特性からバイオ炭はジオポリマーに使用できる可能性があることを確認している^{例えば2)}。

本研究では、ジオポリマーの特長の一つである耐酸性能に着眼して、バイオ炭を混和したCNジオポリマーの耐酸性能について検討を行った。なお、本研究ではバイオ炭を骨材に置換して使用しているため、以降ではバイオ炭を炭素骨材と呼ぶ。

2. 実験概要

2. 1 炭素骨材について

本研究では、竹を材料とした炭素骨材を細骨材に置換して用いた。使用した炭素骨材は、表-1に

示すように炭素濃度 93%以上、粒径 1mm 程度、MB 吸着量 0.13mg/g のものを用いた。炭素骨材の外観は写真-1 に示すように色は黒いが細骨材に近い形状をしている。理論上は炭素骨材を 1kg 混和すると、約 3.7kg の CO₂ の削減効果が期待できる³⁾。

表-1 炭素骨材の仕様

炭素濃度	粒径	MB 吸着量
93%以上	1mm 程度	0.13mg/g

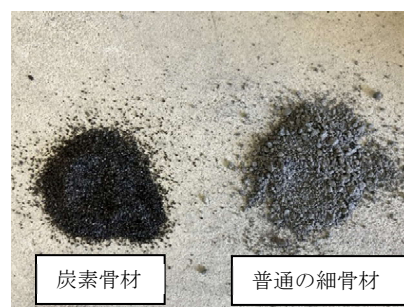


写真-1 炭素骨材と普通の細骨材

2. 2 使用材料

本研究では、表-2 に示すようにアルカリ溶液として密度 1.37g/cm³、アルカリ水比 (A/W) 0.11 の市販品を使用した。活性フィラーとしては、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用した。なお、炭素骨材の密度は 1.63g/cm³ であり、実験では絶乾状態で使用した。

表-2 使用材料

種類	記号	密度 (g/cm ³)	備考
アルカリ溶液	AS	1.37	A/W=0.11
フライアッシュ	FA	2.26	II 種品
高炉スラグ微粉末	BFS	2.91	石こうなし
細骨材	S	2.56	海砂
炭素骨材	T	1.63	絶乾状態

キーワード バイオ炭、炭素骨材、カーボンネガティブ、ジオポリマー、耐酸性

連絡先 〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-2-1 西松建設（株）技術研究所 E-mail:koji_harada@nishimatsu.co.jp

2. 3 配合

配合は、表-3 に示すように比較用の炭素骨材を混和しないもの、炭素骨材を 6%混和した CN のものとした。また、CN の配合に関しては、高炉スラグ微粉末の置換率を 20%と 30%の 2 種類について検討を行った。

表-3 配合表

No.	T 混和率 (%)	BFS/P (%)	質量 (g/リットル)				
			AS	FA	BFS	S	T
1	0	30	356	396	170	1245	0
2	6	30	356	396	170	1170	75
3	6	20	356	450	113	1163	75

* P = FA + BFS

2. 4 練混ぜ方法および養生

練混ぜはモルタルミキサを用いて、図-1 に示す手順で行った。養生は、封緘状態で 70℃、12 時間の加温養生を行った。

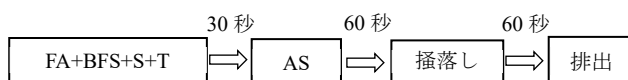


図-1 練混ぜ手順

2. 5 試験項目

圧縮強度試験は、材齢 28 日で実施した。耐酸試験は、濃度 5%の硫酸に供試体を浸漬して、1 週毎に外観観察および質量の測定を行った。

3. 実験結果

3. 1 圧縮強度試験結果

炭素骨材を混和した CN ジオポリマー(配合 No.2)は無混和 (配合 No.1) に比べ、表-4 に示すように約 14%強度が低下している。

表-4 圧縮強度試験の結果

配合 No.1	配合 No.2	配合 No.3
62.1N/mm ²	53.5N/mm ²	37.9N/mm ²

3. 2 耐酸試験結果

写真-2 に 4 週間浸漬後の外観写真を示す。外観写真を見る限り、炭素骨材無混和の配合と炭素骨材を混和した CN の配合に差は見られない。また、

図-2 に示す質量比率の経時変化も、炭素骨材混和の有無による差はない。

以上より、炭素骨材を 6%混和した CN ジオポリマーの耐酸性能は、無混和と同等であることが分かった。



(a)No.1 (b)No.2 (c)No.3

写真-2 浸漬 4 週後の外観

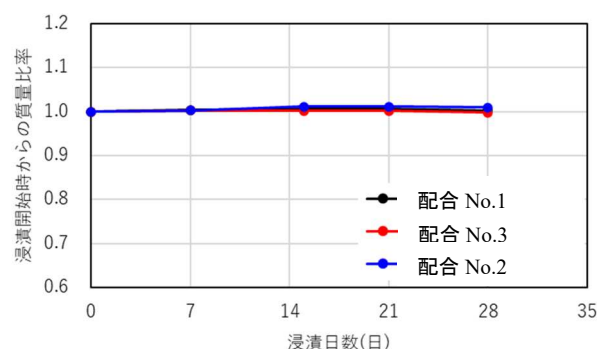


図-2 質量比率の経時変化

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) CN ジオポリマーは、炭素骨材無混和のジオポリマーに比べ圧縮強度が低下する傾向がある。
- (2) CN ジオポリマーの耐酸性能は、炭素骨材無混和のジオポリマーと同等であることが分かった。

今後は、炭素骨材を混和した CN ジオポリマーの耐酸性能以外の耐久性について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) J-クレジット制度 HP, “方法論”, <https://japancredit.go.jp/about/methodology/>, (参照 2023-1-5)
- 2) 原田耕司他, 炭素骨材を用いたカーボンネガティブジオポリマーの一研究, 電力土木, No.434, pp.17-19, 2024.11
- 3) 農林水産省環境政策室, バイオ炭の農地施用を対象とした方法論について, J-クレジット制度におけるバイオ炭の農地施用にかかる方法論に関する説明会資料, 2020 年

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(その3)

沖縄県生コンクリート工業組合 ○蒲牟田孝二
琉球大学 富山潤, 琉球大学 山田義智, 九州大学 小山智幸

1. はじめに

本実験は令和4年度の報告に引き続くものである。近年、地球温暖化に伴う気候変動の影響を受けて気温の上昇が見られ、全国的に暑中期におけるコンクリートの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、5月から10月までを暑中期と捉え、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。また、その他の対策として骨材貯蔵設備の上屋の設置、練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を講じている。しかし、暑中期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、暑中期における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した。

2. 実施地区および時期の選定

地域性による変動を考慮し、本島中南部、本島北部、宮古の3地区に分けて計画をした。実施時期は、外気温が最も上がると想定される7月～8月およびこれと比較するため、ほぼ確実に35℃下回る10月から11月とした。その詳細を表1に示す。

表1 実施地区および時期

地 区	実 施 日
中南部	A工場：令和6年8月9日，11月15日
	B工場：令和6年8月6日，11月28日
北 部	令和6年8月7日，10月29日
宮 古	令和6年7月20日 (35℃超えのみ)

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。いずれも各地区において一般的に使用されているものを用いた。なお、AE減水剤は、通常工場で使用されてい

るAE減水剤ではなく、コンクリート標準示方書の35℃を超える暑中コンクリートに定められた混和剤の基準を満足するAE減水剤を用いた。

表2 使用材料

材料名	記号	種類・産地	密度(g/cm ³)	実積率(%)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	-
練混ぜ水	W	工業用水・地下水・上澄水	1.00	-
細骨材	S ₁	海砂(沖縄本島産)	2.58~2.61	-
	S ₂	砕砂(沖縄本島産)	2.64~2.66	-
粗骨材	G ₁	砕石2005(沖縄本島産)	2.70	59.0~60.0
混和剤	A D ₁	AE減水剤(遅延形)	1.03~1.15	-

4. 配合選定

実験を実施する工場のJIS配合から、呼び強度30とし、スランブを12cmおよび18cmで実施した。配合を表3に示す。

表3 配合

普通30-12-20N AE減水剤(遅延形)									
地 区	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					A D ₁	
			W	C	S ₁	S ₂	G ₁		
中南部A	47.5	47.8	170	358	167	678	948	2.327(8月) 2.148(11月)	
中南部B	48.5	46.3	169	349	247	577	981	2.094(8月) 1.920(11月)	
北 部	47.5	49.3	168	354	350	525	923	3.54(8月) 3.19(10月)	
宮 古	47.5	46.6	170	358	494	329	969	2.971(7月)	
普通30-18-20N AE減水剤(遅延形)									
地 区	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					A D ₁	
			W	C	S ₁	S ₂	G ₁		
中南部A	47.5	48.1	180	379	164	666	918	2.464(8月) 2.274(11月)	
中南部B	48.5	48.2	180	372	251	584	918	2.232(8月) 2.046(11月)	
北 部	47.5	50.5	180	379	348	522	875	3.79(8月) 3.41(10月)	
宮 古	47.5	47.6	180	379	493	328	926	3.790(7月)	

※混和剤は、各工場で契約しているメーカーを使用

5. 実験概要

実験概要を表4に示す。全地区において表中の条件①から条件④のフレッシュ性状の確認および凝結試験、強度試験を実施した。経時変化試験は、アジテータ車にて行い、練上がり直後、30分後、60分後、90分後とした。なお、経時30分を荷卸し時と想定し、その際の目標値をスランブは12±2.5cmおよび18±2.5cmの範囲に設定した。また、空気量は全配合4.5±1.5%の範囲に設定した。凝結試験、強度試験の試験体は練上がり30

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 那覇市港町二丁目14番1号 沖縄県生コンクリート工業組合

分に採取した。強度試験用の試験体は、採取日から材齢3日までを環境温度 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ および $20\pm 10^{\circ}\text{C}$ (約 30°C) に分別して保管した。その後、全ての試験体を脱型し、脱型後は試験材齢まで $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の水中養生で保管した。

表4 実験概要

条件	配合	コンクリート 温度	温度・スランプ・空気量				凝結 試験	圧縮強度				
			0分	30分	60分	90分		3日	7日	28日	56日	91日
①	普通30-12-20N	35℃ 以下	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
②		35℃ 超え	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
③	普通30-18-20N	35℃ 以下	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
④		35℃ 超え	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

6. 実験結果

各地区における条件①から条件④の経時変化によるフレッシュ性状の実験結果を表5から表8に示す。

表5 実験結果 (中南部地区A)

条件	項 目	経過時間			
		0分	30分	60分	90分
①	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	29.3	29.4	29.3	30.1
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	34.3	34.6	34.6	34.8
	スランプ (cm)	13.5	13.0	12.5	12.5
	空気量 (%)	5.0	5.0	5.0	5.0
②	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	33.8	34.0	33.6	35.5
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	37.0	38.1	38.9	39.8
	スランプ (cm)	13.0	12.5	11.5	11.5
	空気量 (%)	4.5	5.0	4.9	5.0
③	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	26.3	27.3	30.2	30.0
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	33.2	33.4	32.8	33.6
	スランプ (cm)	20.0	19.5	19.0	18.0
	空気量 (%)	5.3	5.2	5.5	5.1
④	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	33.5	33.3	34.9	34.8
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	36.1	37.0	37.2	38.0
	スランプ (cm)	20.0	18.5	18.5	18.5
	空気量 (%)	4.7	5.1	5.1	5.0

表6 実験結果 (中南部地区B)

条件	項 目	経過時間			
		0分	30分	60分	90分
①	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	20.6	20.6	20.3	21.0
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	24.6	25.0	25.4	25.1
	スランプ (cm)	14.0	14.0	13.0	11.5
	空気量 (%)	4.3	4.9	4.7	4.8
②	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	33.3	33.6	32.7	33.5
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	35.1	36.0	36.5	37.1
	スランプ (cm)	12.5	11.5	11.0	10.0
	空気量 (%)	4.7	4.9	4.8	4.4
③	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	19.8	23.2	20.4	20.9
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	24.0	24.3	24.8	24.8
	スランプ (cm)	19.5	18.5	18.5	17.5
	空気量 (%)	3.9	4.8	4.7	4.7
④	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	30.7	31.6	31.2	32.5
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	34.5	35.1	35.4	35.8
	スランプ (cm)	19.0	20.0	18.5	17.0
	空気量 (%)	4.1	4.6	4.9	4.9

表7 実験結果 (北部地区)

条件	項 目	経過時間			
		0分	30分	60分	90分
①	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	25.7	25.8	25.4	25.2
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	30.0	30.1	29.8	29.8
	スランプ (cm)	14.5	14.5	14.5	14.5
	空気量 (%)	4.9	4.7	5.1	4.8
②	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	33.8	33.1	34.5	33.6
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	34.8	35.1	36.1	37.0
	スランプ (cm)	14.0	14.5	12.5	12.5
	空気量 (%)	5.0	5.0	4.8	5.2
③	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	25.9	25.9	26.0	26.0
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	30.1	30.4	30.3	30.4
	スランプ (cm)	20.0	18.5	19.0	17.5
	空気量 (%)	5.9	5.2	4.9	5.3
④	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	31.0	31.3	31.8	30.9
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	34.0	34.3	34.9	35.0
	スランプ (cm)	20.0	19.5	18.0	19.0
	空気量 (%)	5.3	5.1	5.0	4.8

表8 実験結果 (宮古地区)

条件	項 目	経過時間			
		0分	30分	60分	90分
②	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	36.5	35.0	35.0	33.5
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	35.7	36.4	36.8	37.1
	スランプ (cm)	14.5	14.5	14.0	13.5
	空気量 (%)	5.3	5.0	4.3	4.4
④	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	34.0	35.5	36.0	36.0
	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	35.3	35.8	36.5	37.0
	スランプ (cm)	20.5	20.5	20.5	20.5
	空気量 (%)	5.3	4.7	4.2	4.2

6.1 コンクリート温度の経時変化

各地区におけるコンクリート温度の経時変化を図1から図4に示す。 35°C 超えを目標とした実験においては、北部地区、中南部地区B条件④を除いて、経時30分の温度が目標値を満足した。いずれの工場においても、今回の実験目的を満たすため、通常行っている温度上昇抑制対策を講じなかったことによるが、とくに中南部地区A条件②においては経時30分で 38.1°C 達しており、経時90分では、 39.8°C まで上昇している。一方、 35°C 以下を目標とした実験においては、いずれの地区、工場において目標値を満足したが、実施日の外気温の変動が大きく、各地区で温度差が大きくなった。

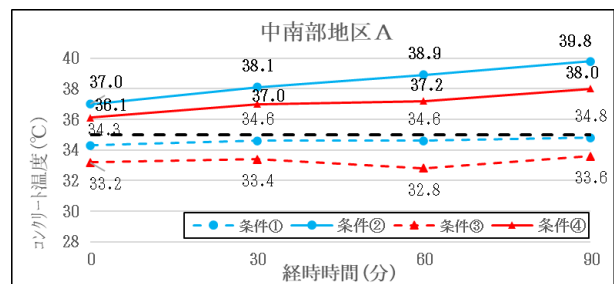


図1 経時変化試験によるコンクリート温度 (中南部地区A)

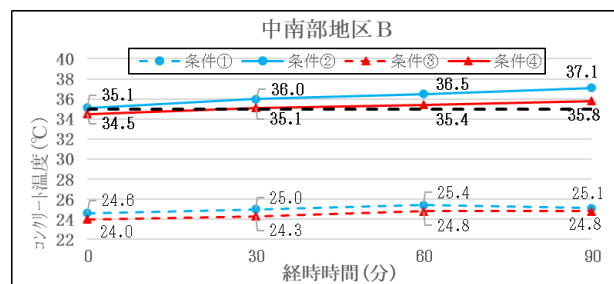


図2 経時変化試験によるコンクリート温度 (中南部地区B)

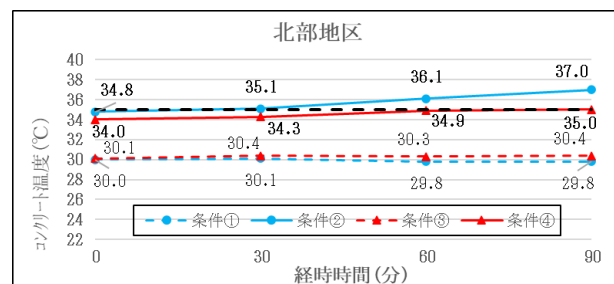


図3 経時変化試験によるコンクリート温度 (北部地区)

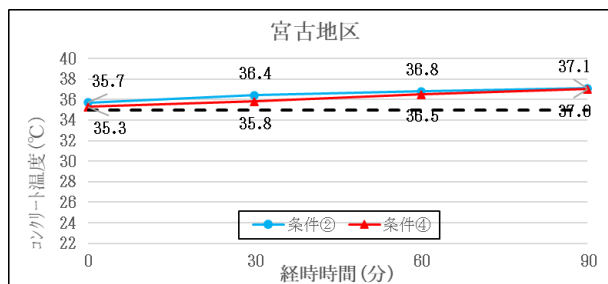


図4 経時変化試験によるコンクリート温度 (宮古地区)

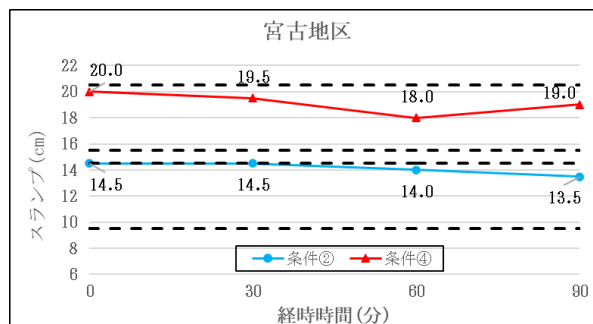


図8 経時変化試験によるスランプ (宮古地区)

6.2 スランプの経時変化

各地区におけるスランプの経時変化を図5から図8に示す。全地区の全ての条件で経時90分まで許容範囲内となった。令和4年度の報告⁷⁾では、一部で経時90分の間に許容範囲を超える結果となっていた。流動性保持に優れたAE減水剤を使用することで全ての条件で経時90分までは許容範囲となることが確認された。

6.3 空気量の経時変化

各地区における空気量の経時変化については、前述の6.の表5から表8に示す通りである。全地区の全ての条件で練り直から経時90分まで許容範囲内となった。

6.4 凝結試験

各地区、工場における凝結試験の結果を表9から表12に示す。北部地区の条件③を除いたすべての条件で貫入抵抗値が0.1N/mm²に達する時間が3.5時間以上となった。凝結遅延に優れた混和剤を使用する事により、荷卸し時のコンクリート温度が38℃に達する場合でも、十分な打ち重ね時間が確保できることが確認できた。また、コンクリート温度が25℃と低い条件でも異常な凝結遅延は起こらず、AE減水剤の添加量を調整することでコンクリート温度が35℃以下でも使用できることが確認された。

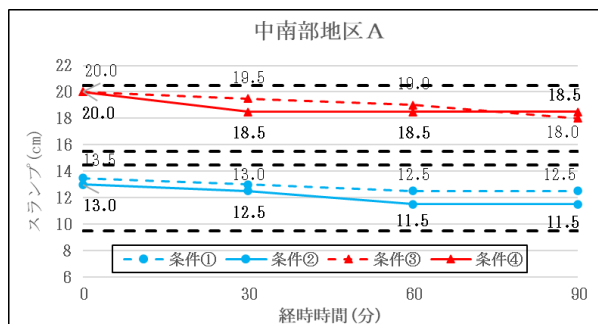


図5 経時変化試験によるスランプ (中南部地区A)

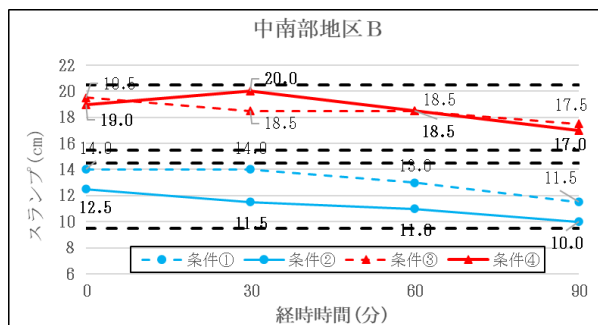


図6 経時変化試験によるスランプ (中南部地区B)

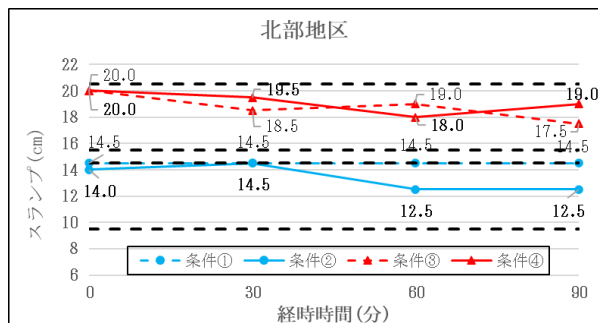


図7 経時変化試験によるスランプ (北部地区)

表9 凝結試験結果 (中南部地区A)

条件	凝結試験結果 (時 : 分)			
	0.1N/mm ²	0.5N/mm ²	始発	終結
①	3:35	4:15	5:15	6:35
②	4:05	4:50	5:50	6:50
③	4:15	4:55	5:55	7:15
④	4:55	5:45	6:40	7:45

表10 凝結試験結果 (中南部地区B)

条件	凝結試験結果 (時 : 分)			
	0.1N/mm ²	0.5N/mm ²	始発	終結
①	4:10	5:10	6:30	8:30
②	3:50	4:25	5:10	6:25
③	4:20	5:15	6:35	8:30
④	4:10	4:40	5:30	6:30

表11 凝結試験結果 (北部地区)

条件	凝結試験結果 (時 : 分)			
	0.1N/mm ²	0.5N/mm ²	始発	終結
①	4:10	5:05	6:00	7:30
②	4:05	4:35	5:30	6:35
③	3:15	3:50	4:40	5:55
④	4:05	4:50	5:30	6:30

表12 凝結試験結果（宮古地区）

条件	凝結試験結果（時：分）			
	0.1N/mm ²	0.5N/mm ²	始発	終結
②	3:40	4:15	5:00	6:05
④	7:00	7:35	8:30	9:30

6.5 圧縮強度

圧縮強度試験に関しては、投稿時点で結果が出揃っている35℃超えの結果のみを報告する。各地区の圧縮強度結果の詳細を表13から表16に示す。また、強度の推移を図9から図12に示す。初期20±10℃(約30℃)養生の場合、初期20±3℃(約20℃)養生の場合と比較して強度増進が鈍化するとが確認された。この傾向は、令和4年度の報告¹⁾と同様に全地区、全ての環境条件で示されている。なお、全地区の全ての環境条件において、材齢28日で呼び強度を満足した。

表13 圧縮強度結果（中南部地区A） 単位：N/mm²

条件	環境（材齢3日まで）	3日	7日	28日	56日	91日
②-1	初期20±10℃養生	28.1	30.5	34.7	38.0	40.8
②-2	初期20±3℃養生	25.6	32.7	37.8	40.2	43.8
④-1	初期20±10℃養生	27.6	29.4	34.5	37.9	40.8
④-2	初期20±3℃養生	26.2	32.8	38.9	41.2	44.0

表14 圧縮強度結果（中南部地区B） 単位：N/mm²

条件	環境（材齢3日まで）	3日	7日	28日	56日	91日
②-1	初期20±10℃養生	28.6	30.9	35.9	39.6	42.4
②-2	初期20±3℃養生	26.7	33.8	40.6	43.6	46.1
④-1	初期20±10℃養生	27.5	30.6	36.0	38.0	41.3
④-2	初期20±3℃養生	26.5	33.7	38.4	42.3	45.8

表15 圧縮強度結果（北部地区） 単位：N/mm²

条件	環境（材齢3日まで）	3日	7日	28日	56日	91日
②-1	初期20±10℃養生	32.2	34.9	39.8	41.3	41.9
②-2	初期20±3℃養生	27.2	35.7	42.8	43.9	44.5
④-1	初期20±10℃養生	29.9	32.9	37.3	39.0	39.1
④-2	初期20±3℃養生	25.3	34.3	40.3	42.1	42.6

表16 圧縮強度結果（宮古地区） 単位：N/mm²

条件	環境（材齢3日まで）	3日	7日	28日	56日	91日
②-1	初期20±10℃養生	25.3	29.1	34.9	37.7	38.7
②-2	初期20±3℃養生	23.0	30.8	36.7	40.6	41.6
④-1	初期20±10℃養生	23.9	27.4	33.1	35.1	35.8
④-2	初期20±3℃養生	20.9	29.2	35.3	38.8	40.9

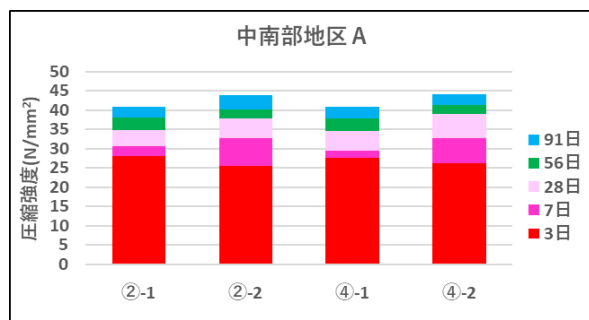


図9 圧縮強度（中南部地区A）

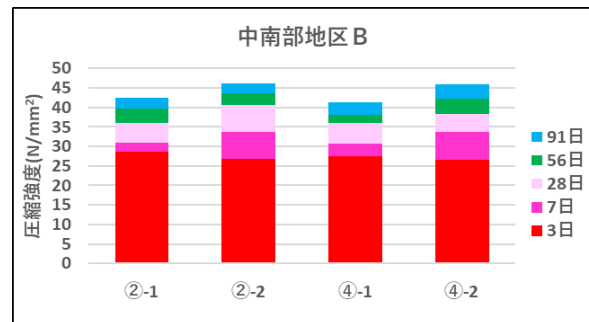


図10 圧縮強度（中南部地区B）

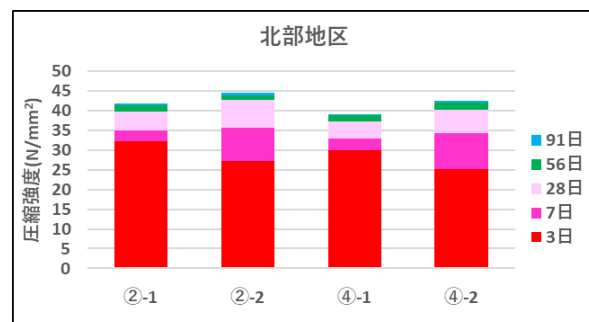


図11 圧縮強度（北部地区）

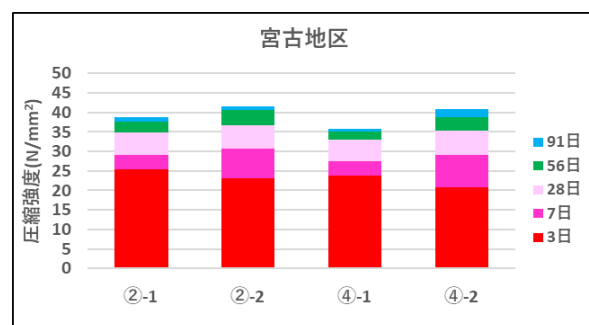


図12 圧縮強度（宮古地区）

7. まとめ

本実験により得られた知見を以下に示す。

- 1)流動性保持に優れた混和剤の使用により、90分間フレッシュ性状が維持され、荷卸し時のコンクリート温度が38℃以下の条件でスランプ、空気量および圧縮強度の各規格値を満足することが確認された。
- 2)凝結遅延に優れた混和剤の使用により、荷卸し時のコンクリート温度が38℃以下の条件で貫入抵抗値が0.1N/mm²に達する時間が3.5時間以上となることが確認された。

参考文献

- 1)比嘉圭二郎，富山潤：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(その2)，第12回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会，pp. 37-40，2023. 1

謝 辞

本実験に携わった生コン工場をはじめとする関係各位に多大なるご協力を頂いた。末尾ながら感謝の意を表す。

力学的な碎波の発生条件に基づく碎波指標の研究

琉球大学大学院 荒瀬悠人
琉球大学 入部綱清

1. はじめに

既往の碎波の理論的な研究において主に用いられている碎波の発生条件は、波峰の水粒子の水平速度が波速と等しいか、またはそれより大きくなるという運動学的な条件であり、これは、Rankine¹⁾によって定義された碎波の発生条件である。その後、Stokes²⁾は Rankine の運動学的な条件を前提に碎波の直前（以降、碎波限界）の波峰の頂角は 120°になるという結果を示している。

多くの研究者が Rankine の条件と Stokes の結果の両方を研究に取り入れている。一方、近年、新たな碎波の発生条件として、波峰の水粒子における遠心力と重力の釣り合いから得られる力学的な条件に基づく碎波の発生条件が示された³⁾。この力学的な条件は、波形勾配が増大し碎波限界に近づいていく波において、運動学的条件より早く満たされることが示され、さらに、碎波の普遍的な定数が力学的な条件に基づく碎波の発生条件から導き出された。また、深海波から極浅海波および極浅海波の碎波指標がこの力学的条件より示された。しかし、一様勾配斜面上の碎波指標までは示すことができず、実際の海岸の碎波の判断には適用できない問題が残った。

一様勾配斜面の碎波指標については Goda⁴⁾によって示されている。他者が行った多くの実験結果を基に統計的に得た碎波指標である。しかし、係数の決定については物理的根拠に乏しいため、採用した実験結果によって左右されるという問題がある。

そこで本研究は、前述の碎波の発生として力学的な条件を採用し、一様勾配斜面を考慮するためにストークス波の数値解析を行い、Goda 型の一様勾配斜面上の碎波指標を導くことを目的とする。さらに、碎波の発生として力学的な条件を採用した一定水深下での既往の碎波指標および Miche の碎波指標との比較を行う。

2. 碎波指標に関する既往の研究

深海波の碎波指標は 1893 年に Michell⁵⁾によって初めて示された。Michell は Stokes が示した結果を導入し、式(1)のように波形勾配 H/L を碎波指標として、その値が 0.142 になることを示した。

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.142 = \text{Constant} \quad (1)$$

ここで、 H は波高、 L は波長、下付き添え字の b は碎波限界での値を表す。

1944 年には Miche⁶⁾により、深海波から極浅海波まで

の任意水深を扱える碎波指標として次式が示された。

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.140 \tanh\left(\frac{2\pi}{L_b} h_b\right) \quad (2)$$

ここで、 h は水深である。Miche の式は水深波長比 h/L が 0.5 以上で $\tanh$ の値が 1 に収束することから、深海波では Michell の結果と同等であり、極浅海波の碎波指標である波高水深比 H_b/h_b については 0.88 となる。

1974 年に Goda はスロープ上の碎波の実験結果をまとめた自身の研究から統計的な判断で次式を碎波指標としてまとめ、その後、係数を修正し以下のような式を示した。

$$H_b = 0.17L_0 \times \left\{ 1 - \exp\left[-1.5 \frac{\pi h_b}{L_0} \left(1 + 11 \tan^3 \theta\right)\right] \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\tan(\theta)$ は海底勾配、下付き添え字 0 は沖側で観測される値を表す。Goda の式は Miche の式の $\tanh(x)$ を $\{1 - \exp[-1.5x]\}$ に置き換え、形式的には Miche の式と同じであるが、Miche との大きな違いは L_b を使わず、 L_0 を使ったことである。Goda はこのことについて、 L_b を観測することや正確に計算することが難しいためとしている。しかし、Goda が示した式(3)の係数は、採用する実験結果によって修正が必要ある。

このように、Miche の以前は深海波から極浅海波までの範囲において理論展開から得られた碎波指標が示され、その後は、沖側での波長を取り入れた Goda の碎波指標のような実験結果との対応を重視した碎波指標が示されている。

3. 力学的な条件に基づく碎波の発生条件

力学的条件に基づく新たな碎波の発生条件は、水粒子の水平速度に起因する鉛直方向に働く遠心力と、水粒子に作用する重力との釣り合いによるものである。この条件は Rankine によって定義された条件とは異なるものである。

図-1 に波峰の水粒子に作用する力を示す。実線は水粒子の軌道、破線は水表面である。波峰の水粒子には鉛直方向下向きに重力として f_g が作用している。また、水平方向の速度は v 、鉛直方向の速度は 0 である。ここで、水粒子の軌道の中心から波峰の水粒子までの距離を r とすると、重力と逆方向に遠心力として f_c が作用する。碎波の発生はこの遠心力と重力のバランスにより決まると

定義する。遠心力が重力より小さい場合、波は安定する。一方、遠心力が重力と等しい場合が砕波限界であり、遠心力が重力より大きいと波は砕波する。

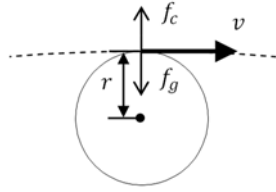


図-1 波峰の水粒子に作用する力

波峰の水粒子の遠心力が重力と同じかそれより大きい場合の関係式は次式で表される。

$$\frac{mv^2}{r} \geq mg \quad (4)$$

ここで m は水の質量、 g は重力加速度である。式(4)を力学的エネルギーの形（水頭）で整理すると次式が得られる。

$$\frac{v^2}{2g} \geq \frac{1}{2}r \quad (5)$$

4. 力学的な条件に基づく深海波の砕波指標

Stokes 波の 2 次近似解の波形 η は式(6)、波長 L は式(7)、水粒子の水平方向速度 v は式(8)で表される。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{\pi H^2}{8L} \times \frac{\{2 + \cosh(2kh)\} \cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} \cos\{2(kx - \sigma t)\} \quad (6)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (7)$$

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L}\right)^2 \frac{L}{T} \frac{\cosh\{2k(h+z)\}}{\sinh^4(kh)} \cos\{2(kx - \sigma t)\} \quad (8)$$

ここで T は周期、 k は波数、 σ は角周波数、 x は原点を 0 とする水平方向の位置、 z は静水面を基準とする鉛直方向の位置、 t は時刻である。

(1) 既往研究による深海波の砕波指標

式(8)の x および t を 0 とし、かつ深海波の場合($kh \rightarrow \infty$)、式(6)、式(7)、式(8)はそれぞれ式(9)、式(10)、式(11)となる。

$$\eta = \frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{4L} \quad (9)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (10)$$

$$v = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \quad (11)$$

式(9)は静水面から波峰までの距離 r と同じであるので、式(5)に式(9)と式(11)を代入すると次式が得られる。

$$\frac{\left(\frac{\pi H}{T} e^{kz}\right)^2}{2g} = \frac{1}{2} \left(\frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{4L} \right) \quad (12)$$

z は r と同じであるため、式(10)を使って、式(12)を整理すると次式が得られる。

$$\frac{H}{L} = \frac{2}{\pi \left(2e^{\{2\pi(H/L) + \pi^2(H/L)^2\}} - 1 \right)} \quad (13)$$

式(13)を逐次近似計算で解くと次の関係式が得られる。

$$\frac{H}{L} = 0.1364609 \dots \approx 0.1365 \quad (14)$$

式(14)は力学的な条件に基づく深海波の砕波指標であるが、これが有効であるかは力学的な砕波条件が Rankine の運動学的な砕波条件より早く成立するということを確かめなければならない。そこで、波速 C と波峰の水粒子の水平方向の速度 v の関係式を示す。

深海波($kh \rightarrow \infty$)の波速 C は式(7)を用いて次式で表される。

$$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \quad (15)$$

波速に対する波峰の水粒子の水平方向の速度 v の比を $\alpha(>0)$ とすると、式(15)を用いて波峰の水粒子の水平方向の速度 v は次式で表される。

$$v = \alpha C = \alpha \frac{gT}{2\pi} \quad (16)$$

式(5)に式(9)と式(16)代入し、式(10)を用いて整理すると次式となる。

$$\alpha^2 = \frac{\pi}{1} \left(\frac{H}{L} \right) + \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \quad (17)$$

式(17)を用いると、砕波限界の波形勾配から波速に対する波峰の水粒子の水平方向の速度 v の比 α を求めることができる。式(17)に式(14)を代入すると、 α として 0.72 が得られる。この結果は、力学的な砕波条件が Rankine の運動学的な砕波条件より早く成立するということを示している。よって、力学的な条件に基づく深海波の砕波指標として次式が得られる。

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.1365 \quad (18)$$

$$\frac{H}{L} = \frac{\varphi}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) \quad (25)$$

(2) 提案手法による深海波の碎波指標

式(5)の左辺に式(8)を、右辺の r に式(19)と式(20)に示すストークスドリフトを考慮した水粒子の軌道から計算した曲率半径を用いて力学的条件を判定する。

$$\begin{aligned} \xi = & \frac{H \cosh k(d+z)}{2 \sinh kd} \sigma \cos(kx - \sigma t) - \frac{\pi H^2}{8L \sinh^2(kd)} \\ & \times \left\{ 1 - \frac{3 \cosh 2k(d+z)}{2 \sinh^2(kd)} \right\} 2\sigma \cos 2(kx - \sigma t) \\ & + \frac{\pi H^2 \cosh 2k(d+z)}{4L \sinh^2(kd)} \sigma \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \frac{H \sinh k(d+z)}{2 \sinh kd} \sigma \sin(kx - \sigma t) \\ & + \frac{3\pi H^2 \sinh 2k(d+z)}{16L \sinh^4(kd)} 2\sigma \sin 2(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (20)$$

ξ は x 軸の座標値、 ε は y 軸の座標値である。力学的条件を判定を数値解析で行った結果、深海波の碎波指標として、次式を得た。

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.1813 \quad (21)$$

5. 力学的条件に基づく碎波の発生条件と碎波の普遍定数の関係

力学的条件に基づいて求められた碎波の発生条件を示す式(5)の右辺を波高 H と変数 β の積で、水粒子の水平方向速度を式(16)で置き換えると次式が得られる。

$$\frac{\alpha^2 C^2}{2g} = \frac{1}{2} (\beta H) \quad (22)$$

式(22)に $\alpha^2/\beta = \varphi$ を導入して整理すると次式が得られる。

$$\frac{gH}{C^2} = \frac{\alpha^2}{\beta} = \varphi \quad (23)$$

6. 力学的な条件に基づく任意水深の碎波指標

式(23)に基づいて Miche 形式の碎波指標の導出を試みる。微小振幅波の波速は次式で表される。

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right)} \quad (24)$$

式(24)を式(23)に代入して整理すると次式が得られる。

(1) 既往研究による任意水深と極浅海波の碎波指標

式(25)において、深海波の場合($kh \rightarrow \infty$)、 $\tanh$ は1となるため式(25)は式(14)と同じ意味となるため次式となる。

$$\frac{H}{L} = \frac{\varphi}{2\pi} = 0.1365 \quad (26)$$

$$\varphi = 0.8572 \quad (27)$$

式(27)を式(25)に代入すると次式が得られる。

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.1356 \tanh\left(\frac{2\pi}{L_b} h_b\right) \quad (28)$$

式(28)は任意水深での碎波指標である。式(28)において、極浅海波の場合($kh \rightarrow 0$)、 $\tanh$ は h_b/L_b となるため式(28)は次式となる。

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.8572 \quad (29)$$

式(29)は極浅海波の碎波指標である。

(2) 提案手法による任意水深と極浅海波の碎波指標

式(25)において、Goda と同様、 $\tanh(x)$ を $\{1 - \exp[-1.5x]\}$ に置き換えると次式が得られる。

$$\frac{H}{L} = \frac{\varphi}{2\pi} \left\{ 1 - \exp\left[-1.5 \frac{\pi h_b}{L_b}\right] \right\} \quad (30)$$

深海波の場合($kh \rightarrow \infty$)、 $\{1 - \exp[-1.5x]\}$ は1となるため、式(30)は式(21)と同じ意味となるため、次式となる。

$$\frac{H}{L} = \frac{\varphi}{2\pi} = 0.1813 \quad (31)$$

$$\varphi = 1.1385 \quad (32)$$

式(32)を式(30)に代入すると次式が得られる。

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.1813 \left\{ 1 - \exp\left[-1.5 \frac{\pi h_b}{L_b}\right] \right\} \quad (33)$$

式(33)は提案手法による任意水深での碎波指標である。極浅海の場合($kh \rightarrow 0$)、式(33)は次式を満たす。

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.8345 \quad (34)$$

式(34)は極浅海波の碎波指標である。さらに、式(34)に Goda と同様一様勾配斜面の効果を加えると次式が

得られる。

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.1813 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h_b}{L_b} \left(1 + 11 \tan^3 \theta \right) \right] \right\} \quad (35)$$

式(35)は提案手法による Goda 型の一様勾配斜面上の碎波指標である。

7. 碎波指標の比較

(1) 一定水深下における碎波指標の比較

図-2 に Miche の碎波指標 (式(2)) と Iribre の碎波指標 (式(28)) と提案する碎波指標 (式(33)) の比較を示す。それぞれの碎波指標は、深海波の場合 ($kh \rightarrow \infty$), $\tanh$ は 1 となるため H/L は収束する値となっている。Miche の式(2)と Iribre の式(28)は、係数がそれぞれ 0.140 と 0.1356 であるためほとんど同じ曲線を描いているが、提案手法は、 h/L の値が 0.25 辺りで両手法の H/L の値を上回っている。

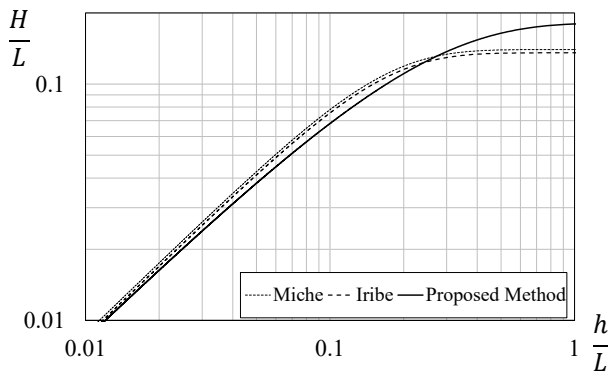


図-2 一定水深下の碎波指標の比較

(2) Goda の碎波指標と提案手法の碎波指標の比較

図-3 に水底勾配が 1/10, 1/20, 1/30 の時の他者が行った実験結果、Goda の碎波指標式(3)と提案手法による碎波指標式(35)の比較を示す。水底勾配 1/10 の時は曲線が実験結果の中心を通っているが、水底勾配 1/20, 1/30 の時は実験結果の中心より上部分を通っている。しかし、実験データのばらつきの中を通っているため Goda の碎波指標とほとんど変わらないことが確認できる。

8. まとめ

Goda によって示された一様勾配斜面の碎波指標は、他者が行った多くの実験結果を基に統計的に得た碎波指標で、係数の決定については物理的根拠に乏しいため、採用した実験結果によって左右されるという問題があった。しかし、本研究で力学的な条件の基、Goda の碎波指標に含まれる 0.17 を 0.183 に置き換えることができた。しかし、Goda が一様勾配斜面の効果として導入している $(1 + 11 \tan^3 \theta)$ については、導出するに至らなかった。

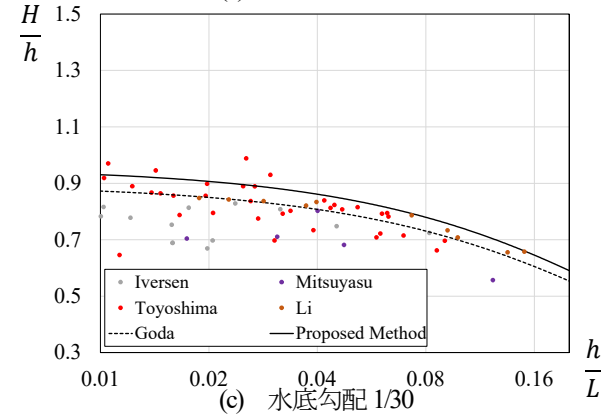
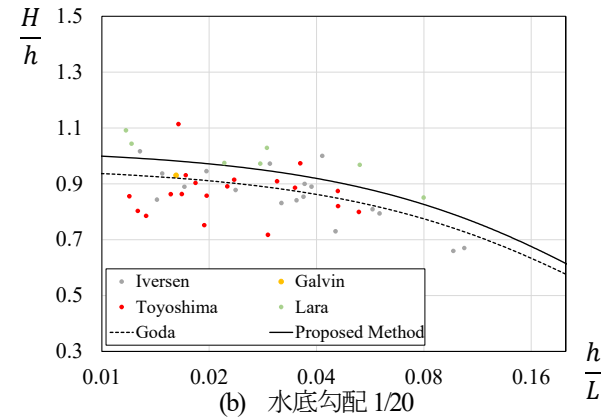
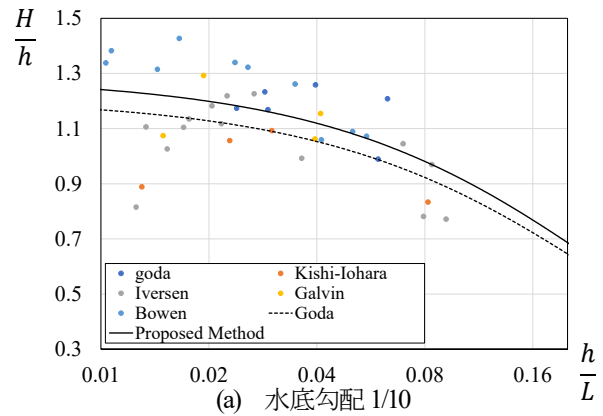


図-3 Goda と提案手法による碎波指標の比較

参考文献

- Rankine, W. M.: Summary of the properties of certain stream-lines, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 28 (189), pp. 282-288, 1864.
- Stokes, G. G.: *Mathematical and Physical Papers*, Cambridge University, 1880.
- Tsunakiyo, I.: Definition of the Breaker Indices and Universal Constant for a Breaking Wave Based on a New Occurrence Condition for Breaking Waves, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 12(1), 22-00363, 2024.
- Goda, Y.: New wave pressure formulae for composite breakwaters, *Coastal Engineering Proceedings*, ASCE, No. 14, pp. 1702-1720, 1974.
- Michell, J. H.: The highest waves in water, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 36 (222), pp. 430-437, 1893.
- Miche, M.: Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante, *Annales des Ponts et Chaussées*, pp. 369-406, 1944 (in French).

モバイル端末の LiDAR による荒崎海岸に位置する琉球石灰岩塊の計測

琉球大学 島袋 誉, 琉球大学 入部 綱清, 琉球大学大学院 橋口 優芽香
琉球大学 藍檀 オメル, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷 直彦

1. 緒言

沖縄には台風の高波や津波によって打ち上げられた岩塊が多く存在する。これらは、波の浸食作用により形成された海食崖が崩壊し、その一部が陸側に運ばれたものであると言われている。

沖縄本島南部の荒崎海岸には、カサカンジャーと呼ばれる 1832 年の台風による高波で打ち上げられた琉球石灰岩塊が存在する。カサカンジャーについても、その起源は海食崖のノッチ部の崩壊とされているが、カサカンジャーのノッチとしての形状や寸法については十分に明らかにされていない。

本研究では、LiDAR (Light Detection And Ranging) による測量を行い、その測量結果からカサカンジャーのノッチとしての形状や寸法について検討する。



写真-1 西側から撮ったカサカンジャーの写真



図-1 西側から見たカサカンジャーの点群データ

2. モバイル端末の LiDAR による点群化と可視化

LiDAR 測量とは、レーザーより照射した光の反射を利用し、物体や地形などの距離を読み取る技術である。LiDAR はミリ波レーダーより短い波長のレーザー光を利用しているため、高精度な 3 次元点群データの計測ができることが特徴である。本研究では、LiDAR 測量機としてモバイル端末を用いた。その理由として、カサカンジャーの周辺は、一般的な測量機を持って歩き回ることが難しいからである。

可視化は CloudCompare を使って行う。CloudCompare はフリーの点群処理ソフトウェアで、点群データをはじめとする 3D オブジェクトの処理を行うことができる。本研究では点群の可視化、距離の測定、メッシュの作成、体積の計算に使用する。

写真-1 に西側から撮ったカサカンジャーの写真、図-1 に西側から見たカサカンジャーの点群データを示す。点群の総数は約 57 万、データ量は約 15MB であった。



写真-2 荒崎海岸の海食崖の様子(手前)

3. ノッチとしての形状や寸法に対する考察

カサカンジャーから喜屋武岬方面の方向を撮った写真として手前を写真-2 に、奥を写真-3 に示す。荒崎海岸では広範囲にわたり海食崖としてノッチが形成されている。その特徴として、鉛直断面内でノッチ上部の上面は先端付近で丸みを帯びており、下面は一樣勾配となっている。また、水平断面内ではノッチの先端が丸みを帯びているのが確認できる。カサカンジャーがこの海食崖が崩壊した一部と仮定すると、測量した点群データにもこれらの特徴と似た個所が確認できると考えられる。



写真-3 荒崎海岸の海食崖の様子(奥)

キーワード：カサカンジャー, LiDAR 測量, 海食崖, ノッチ

連絡先：琉球大学工学部

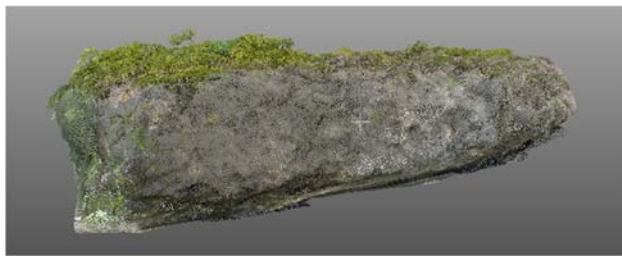


図-2 角度を調整し西側から見た
カサカンジャーの点群データ

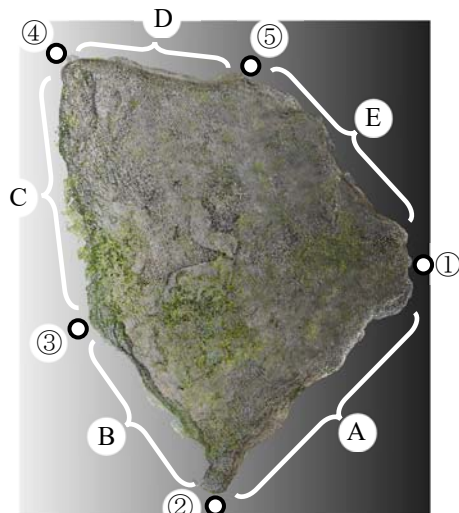


図-3 上面から見たカサカンジャーの点群データ

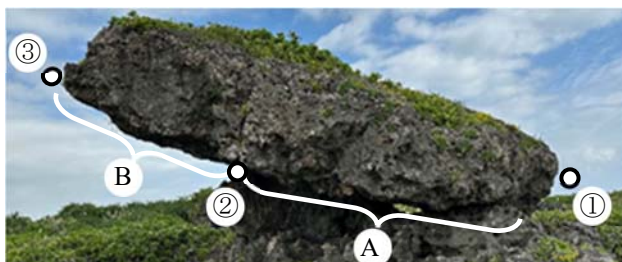


図-4 西側から見たカサカンジャーの側面



図-5 北側から見たカサカンジャーの側面



図-6 東側から見たカサカンジャーの側面

図-2 に角度を調整し西側から見たカサカンジャーの点群データを示す。点群データにおいても鉛直断面内で、ノッチ上部の上面は先端付近で丸みを帯びており、下面は一樣勾配となっていることが確認できる。

図-3 に図-2 の上面図を示す。水平断面内での目視で確認できる尖った位置に数字を割り当て、その間の辺にアルファベットを割り当てた。点群データにおいても水平断面内の線②-①-⑤は丸みを帯びていた。

図-4 に西側、図-5 に北側、図-6 に東側から見たカサカンジャーの側面を示す。A と E の鉛直断面内では、先端に向かって丸みを帯びている。一方、B, C, D の側面は直角に破壊した跡や、層状の様相が確認できた。これらのことから、側面 A, E はノッチ先端、側面 B, C, D は陸側にくっついていた可能性がある。また、ノッチの深さについてはおよそ①から③の方向であると考えることができる。

これらの仮定を踏まえ、点群データを利用してカサカンジャーのノッチとしての寸法を測定した。ノッチの先端と仮定した A と E の厚みはそれぞれ 1.07m, 0.77m であり、陸側にくっついていた可能性のある B, C, D の厚みは海食崖の崖高として、それぞれ 1.40m, 1.35m, 1.35m となっていた。また、ノッチの深さと仮定した①から③の方向で 6.5m であった。さらに、点群データからメッシュを作成して体積を計測したところ、体積は 58.59m³、琉球石灰岩の密度が 2.265kg/m³ とすると、重量は 131,370kg(131.37t)となる。カサカンジャーの寸法については、多くの研究者によって示されているが、海食崖の崩壊に関連性の高いノッチとしての深さについては示されていなかった。しかし、崩壊の原因となる自重や波を外力¹⁾²⁾として考えて崩壊を見積もる際、ノッチの深さは非常に重要な要素となる。そのため、本研究で示したノッチの深さは今後の研究に有用である。

4. 結言

本研究では、LiDAR (Light Detection And Ranging)による測量を行い、カサカンジャーのノッチとしての形状や寸法について検討した。測量結果を検討し、ノッチの深さは約 6.5m であることを示した。

参考文献

- 1) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: The stability assessment of overhanging Ryukyu Limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of rock mass, *JSCE*, Vol.66, No.2, pp.397-406, 2010.
- 2) Tetsuya Kogure, and Yukinori Matsukura.: Threshold height of coastal cliffs for collapse due to tsunami: Theoretical analysis of the coral limestone cliffs of the Ryukyu Islands, Japan, *Marine Geology*, 323-325, pp.14-23, 2012.

ノッチ有する海食崖に対する津波の作用

琉球大学大学院 橋口優芽香, 琉球大学 入部綱清
琉球大学 藍檀オメル, 地殻工学防災研究所 渡嘉敷直彦

1. はじめに

沖縄本島南部には琉球石灰岩からなる海食崖が発達しており海食崖の基部にはノッチが形成されている。海食崖はノッチの深さ方向への成長とともに、ノッチ上の海食崖の自重によって不安定になるため、崩落が起こることが知られている。

自重を外力とする海食崖の崩壊に関する既往の研究として、Tokashiki and Aydan¹⁾は海岸崖の崩壊事例と崩壊していない事例を調査し、崖の高さと浸食深さの関係について、岩盤強度の観点から安定性能の評価を行った。一方、津波を外力とした海食崖の崩壊の研究には、Kogure and Matsukura²⁾によって津波で破壊し得る海食崖の崖高の推定が行われている。しかし、津波が作用することによるノッチ深部の引張応力の計算に用いる波圧に関しては、屋内実験の結果から示された防波堤に水平に作用する波圧式を採用しているため、ノッチ内部の上向き方向に作用する波力を考慮できていない。

そこで本研究では、MPS(Moving Particle semi-implicit)法³⁾を用いて、ノッチを有する海食崖への津波の作用を計算する。計算には津波の波高、ノッチの深さを考慮し、琉球石灰岩からなる海食崖のノッチの崩壊について、琉球石灰岩の引張強度と津波に起因する曲げ応力を比較し検討する。

2. ノッチ有する海食崖の安定性評価

(1) MPS 法による数値計算

海食崖は海に面した陸地が波により浸食され切り立つ崖である。そのノッチ部分にかかる波の作用を計算するため、海食崖の基部のノッチ部分を長方形として片持ち梁としてモデル化し、ノッチ部分に作用する津波の波力を MPS 法によって計算する。数値計算に用いる片持ち梁モデルの寸法を図-1 に示す。

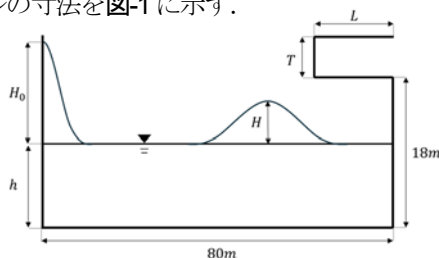


図-1 海食崖モデル

L はノッチの深さ、 T は海食崖の高さである。また、ノッチ部分は剛体として、計算ではノッチの深さと津波の波高を変化させる。ノッチにかかる波力を計算するための津波はモデルの左端から孤立波を発生させる。こ

で孤立波の波形は以下の式で与えられる。

$$\eta = H_0 \sinh^2 \left(\sqrt{\frac{3H_0}{4h^3}} r \right) \quad (1)$$

η は孤立波の波形、 H_0 は孤立波の初期波高、 h は水深、 r は波高最大位置からの水平距離である。それぞれの計算ケースを表-1 に表す。

表-1 計算ケース

ノッチの深さ $L(m)$	4	6	8
初期波高 $H_0(m)$	16~30	16~30	16~30
入射波高 $H(m)$	8~15	8~15	8~15
水深 $h(m)$	10		
時間刻み幅 (s)	0.005		
粒子間距離 (m)	0.2		

すべてのケースで水深 10m とし、初期波高は 16m から 30m まで 2m ずつ変化させ 8 ケースで計算する。孤立波はモデル左端に半分だけ発生させるため、入射波高は初期波高に対して半分の波の高さである。粒子間距離については 0.2m、初期時間刻み幅は 0.005s に設定しクーラン条件に応じて自動調節を行う。

既往の研究によると、空隙を考慮した琉球石灰岩海食崖の引張応力は、0.24~0.35MPa の範囲で崩壊した可能性が高いと推定されることから、海食崖の崩壊については、津波に起因するノッチ基底部にかかる曲げ応力を片持ち梁に生じるモーメントを用いて算定し、海食崖が崩壊する引張応力と比較し検討を行う。長方形断面にかかる曲げ応力は以下の式で算定する。

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (2)$$

M はモーメント、 Z は断面係数である。ここで Z の断面係数は次式で表される。

$$Z = \frac{bT^2}{6} \quad (3)$$

b, T はそれぞれ長方形断面の横の長さと高さを表す。

(2) 数値計算結果の評価

図-2 にノッチ深さ 6m、入射波高が 10m の計算結果の様子を示す。入射した波がノッチ底部に衝突し波の進行方向に前傾し波が砕波したことが確認できる。

図-3~5 に海食崖の高さを 6m としたときの、ノッチの深さが 4m、6m、8m の計算結果をそれぞれ示す。破線は海食崖が崩壊する可能性のある 0.24~0.35MPa の範囲である。図-3~5 よりノッチの深さが同じとき入射波高

が高いほど、波がノッチ底部に衝突する時間が早くなることを確認できた。また、入射波高が大きいと曲げ応力の最大値が増加する傾向が確認できたが、ノッチ底部に作用する波の衝突具合は必ずしも一定ではないことから、入射波高が増加しても曲げ応力の最大値が必ず増加するわけではないことがわかった。さらに、海食崖のノッチの崩壊については、岩盤の岩盤強度を曲げ応力が上回る必要があるが、概して、ノッチの浸食深さが深くなるほど曲げ応力の最大値が大きくなり、崩壊の可能性が高くなることを確認できた。

図-3 からノッチ深さが4mの時、入射波高が11mから15mでノッチが崩壊する可能性があり、図-4、5 からノッチ深さが6m、8mの時は今回行った計算のすべての入射波高で崩壊する可能性があることが分かった。

(3) 計算結果による海食崖の安定性評価

数値計算結果を用いて琉球石灰岩からなるノッチ有する海食崖の崩壊の限界条件を検討する。図-6 はノッチの深さが4m、6m、8mの時、ノッチが崩壊する海食崖の高さを計算に用いたそれぞれの入射波高ごとに示した。横軸がノッチ深さ、縦軸が海食崖の高さを示し、ノッチが崩壊に至る引張応力を0.35MPaとして算出した。図-6 から入射波高が8m、ノッチ深さが4m、6m、8mの場合、崖の高さがそれぞれ4.0m、5.7m、7.2m以下で崩壊する。このように、ノッチの崩壊条件として海食崖の高さが高いほど、ノッチの深さが深くなければならないことが示された。また、ノッチ深さが6mで、入射波高が8m、9m、10m、11m、12m、13m、14m、15mとした場合、崖の高さがそれぞれ5.7m、6.7m、6.8m、7.0m、7.2m、7.1m、7.3m、7.5m以下で崩壊する。このように、海食崖の高さが高いほど、高い入射波高に耐えうる傾向が示された。

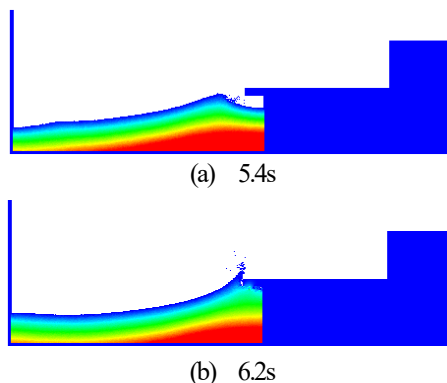


図-2 津波がノッチに衝突する様子（計算結果）

3. おわりに

本研究では、ノッチを有する海食崖に対する津波の作用の計算をし、琉球石灰岩からなるノッチの崩壊の考察を行った。また、津波の入射波高に対してノッチが崩壊する際の、ノッチの深さおよび海食崖の高さの関係を示した。

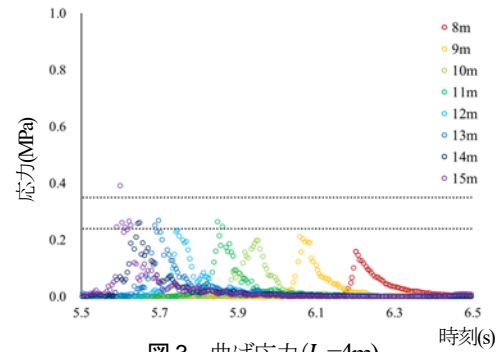


図-3 曲げ応力 (L=4m)

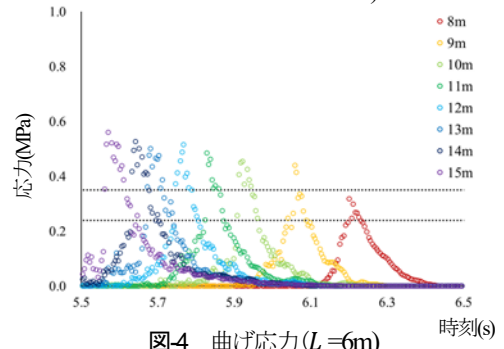


図-4 曲げ応力 (L=6m)

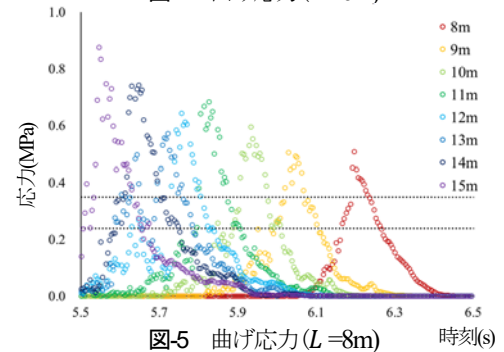


図-5 曲げ応力 (L=8m)

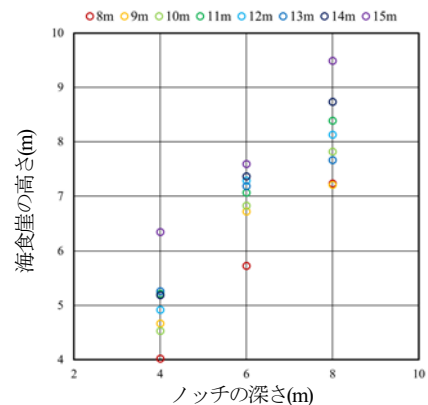


図-6 ノッチ有する海食崖の崩壊の限界条件

参考文献

- 1) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: The stability assessment of overhanging Ryukyu Limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of rock mass, *JSCE*, Vol.66, No.2, pp.397-406, 2010.
- 2) Tetsuya, K. and Yukinori, M.: Threshold height of coastal cliffs for collapse due to tsunami: Theoretical analysis of the coral limestone cliffs of the Ryukyu Islands, Japan, *Marine Geology*, pp.14-23, 2012.
- 3) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nucl. Sci. Eng.*, Vol.123, pp.421-434, 1996.

国道５０６号小祿道路事業における多軸台車を 活用した上部工一括撤去事例

内閣府沖縄総合事務局 南部国道事務所 工務課 伊佐 奨真

交通混雑緩和を目的として国道506号小緑道路を整備するにあたり、暫定ランプ橋（鋼5径間連続非合成少数1桁）が支障となるため撤去する必要があった。本ランプ橋は商業施設が隣接する地区内に位置し、終点側2径間は国道331号（現道）の上空に架設されている。施工に際して現道の昼間4車線の交通確保が必須であり、通常のベント&クレーンによる撤去では昼間に交通開放できず、現道に干渉しない門型ベントでは周辺民間施設の借地や地下埋設物への影響が懸念された。検討の結果、夜間通行止めの中、多軸台車を活用した一括撤去を採用し、交通ならびに周辺への影響を最小限として上部工の撤去を完了した事例を紹介するものである。

キーワード 多軸台車, 一括撤去, 門型ベント, 交通確保

1. はじめに

小緑道路は那覇空港自動車道の一部を構成する道路であり、延長5.7kmの4車線自動車専用道路である。那覇空港自動車道は、沖縄自動車道、南風原道路、豊見城東道路と一体となって本島北部及び中南部から那覇空港間の定時性、高速性を確保するとともに都市部の交通混雑の緩和を図ることを目的としている（図-1参照）。

小祿道路を整備するにあたり、豊見城・名嘉地IC空港側出入口にある暫定ランプ橋が支障となるため撤去することとなった。施工に際して現道の昼間4車線の交通確保が必須であり、限られた期間内での撤去完了が求められた。本稿では、これらの課題に対して実施した多軸台車を活用した上部工一括撤去の事例について報告する。

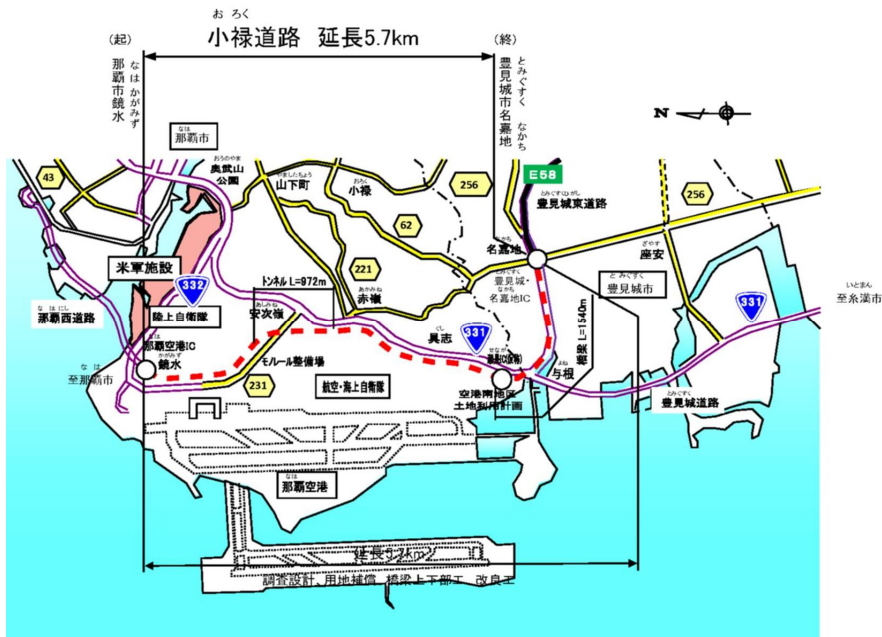


図-1 小禄道路路線図

撤去対象である暫定ランプ橋は、施工当時には那覇空港までの整備計画が確定しておらず、名嘉地交差点の渋滞緩和を図るための暫定計画としてH23年度に供用された。H27交通量センサスでは上下線の合計で日あたり約3万台と観光目的だけでなく日常的に利用される区間となっている。概要(図-2、図-3参照)を以下に示す。

【暫定ランプ橋諸元】

橋 長：L=224.600m

支間割：43.500m+2@50.000m+43.700m+35.800m

上部工：鋼5径間連続非合成少数桁

下部工：逆T式橋台1基、張出式橋脚4基

2. 撤去工法検討時の課題

撤去工事に伴う交通規制の概要は、豊見城・名嘉地IC空港側出入口が通行できなくなるとともに、現道の一部区間において一時的な車線数減少が発生する(図-4参照)。工事規制時の課題としては、まず現道の昼間の4車線交通の確保が絶対条件であり、この条件を満たす施工方法の課題が以下の通りである。

(1) 昼間の4車線交通の確保

当該箇所は市街地に位置し、高速道路 IC から空港へ向かう路線上にあり交通量が非常に多い状況である。そのため、昼間に4車線交通を確保し、車両並びに歩行者の沿道施設への乗り入れも確保することに加え、極力短い期間で撤去できる工法を選定する必要がある。上

記を踏まえ、現道に干渉しない門型ベントによる撤去と夜間規制による多軸台車一括撤去を検討した。

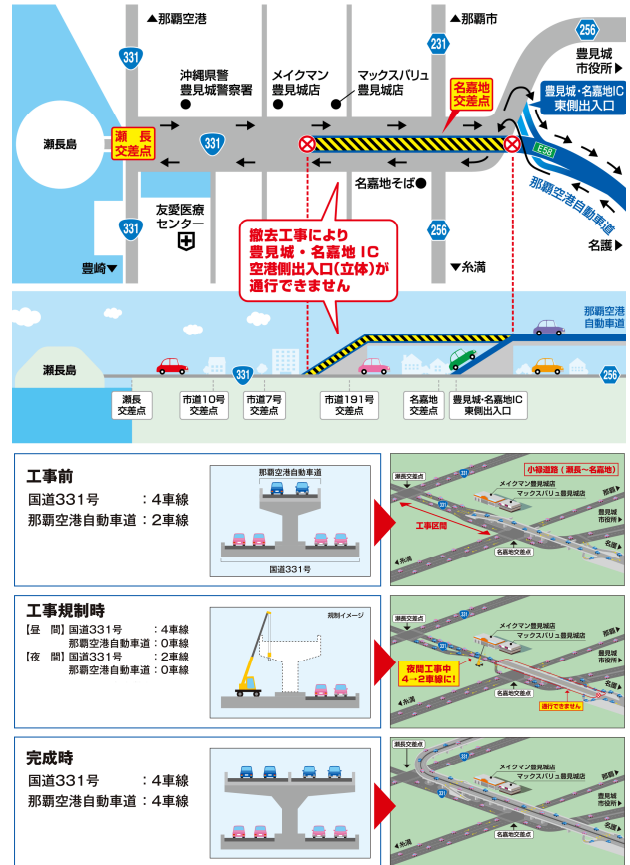


図-4 撤去工事パンフレット

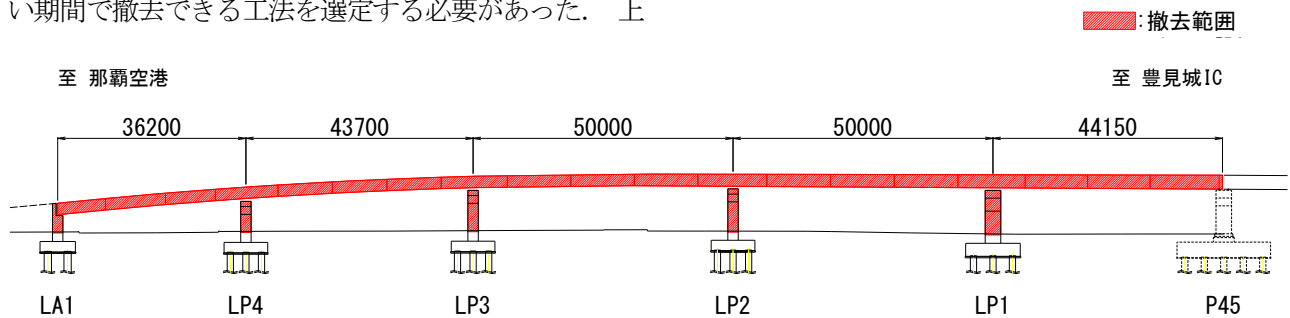


図-2 側面図

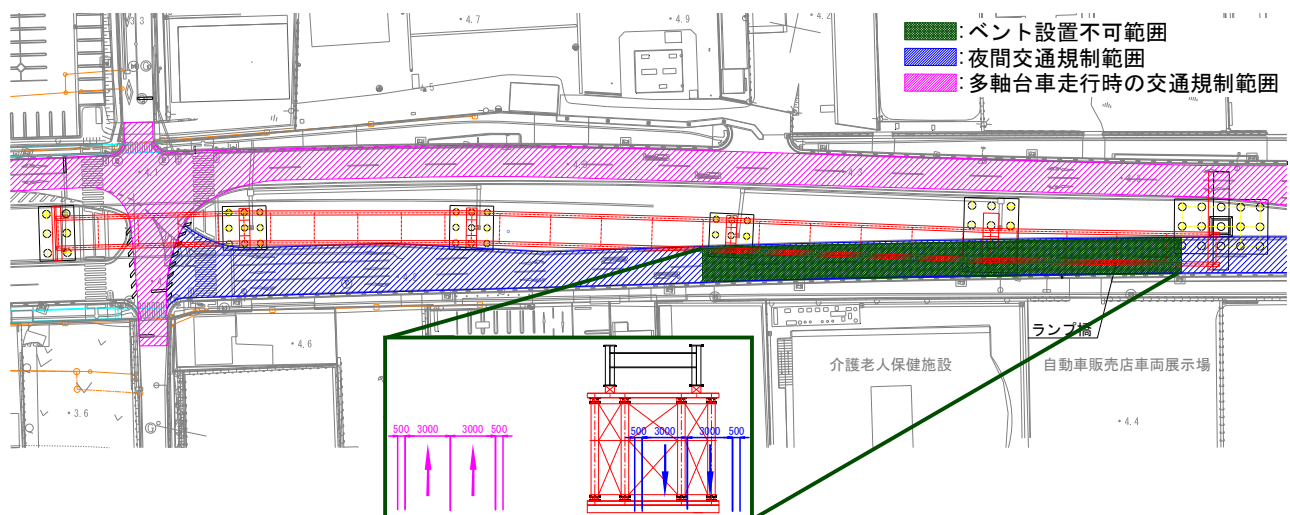


図-3 平面図

(2) 門型ベント設置時の周辺施設への配慮

図-3 に示す通り、暫定ランプ橋が現道の上空に来る区間があり、この箇所については図-5 に示す現道を跨ぐ門型ベント案を検討した。しかし、ベント基礎幅が歩道幅員（3.0m）以上必要であること、歩道下に既設排水路や雨水管などが埋設されていることが判明したため、ベント基礎は歩道部以外への設置を検討した。

しかし、既設構造物への影響を回避するためには、図-6に示すように歩道脇の民間施設敷地を借地する必要がある。門型ベント受梁が長くなるため地組みが必要となる。さらに、借地する場合は、地下埋設物の確認や地耐力調査・検討に不測の日数を要することが想定された。また、限られた空間で門型ベントの架設方法も非常に難易度の高い作業が求められた。

(3) 多軸台車使用時の留意事項

a) 運搬時の安全性

多軸台車で桁を運搬する際は、荷重軽減を図り1主桁ずつの撤去も検討したが、桁の横倒れが懸念されたため、横桁を残したままの2主桁一括撤去とすることで構造安全性を確保する必要があった。また、多軸台車で運搬距離を極力短くするために、図-7に示す橋台背面を桁細断ヤードとするL型擁壁の先行撤去などの運搬後の作業を踏まえた施工手順を検討した。

b) 走行時の支障物件

上部工を載せた多軸台車の高さは9.0m程度となるため、桁細断地点までに標識看板と信号機の干渉を回避する必要があった。標識看板については、F型標識柱であったため、横梁部分のボルトを外しての撤去と、信号機は設置されている向きを90度回転させる作業が求められた。

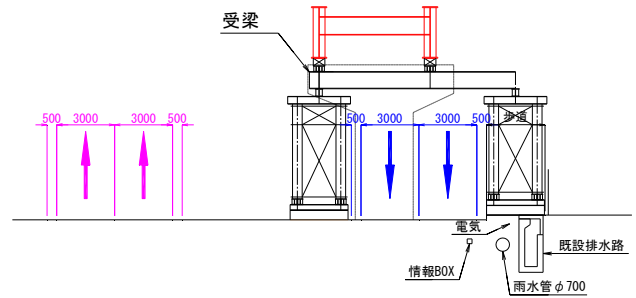


図-5 門型ベント設置断面図

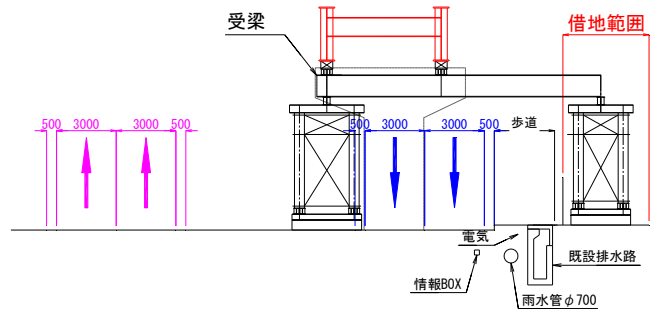


図-6 既設排水路を避けたベント位置断面図

3. 多軸台車による上部工一括撤去の概要

前述の門型ベントと多軸台車一括撤去の比較検討の結果、安全性に優れ2夜間で上部工の撤去を完了できる多軸台車一括撤去を採用した。

今回、CIMによる工事着手から完成までの施工順序をアニメーション化し、視覚的に重機・資材配置などを確認することで、施工確実性と安全性を検証した。図-7に撤去計画の平面・側面・断面図・動画キャプチャを示す。1夜間で1径間の撤去であり、桁細断・運搬を行い、桁細断地点を開けて2回目の撤去を行った。

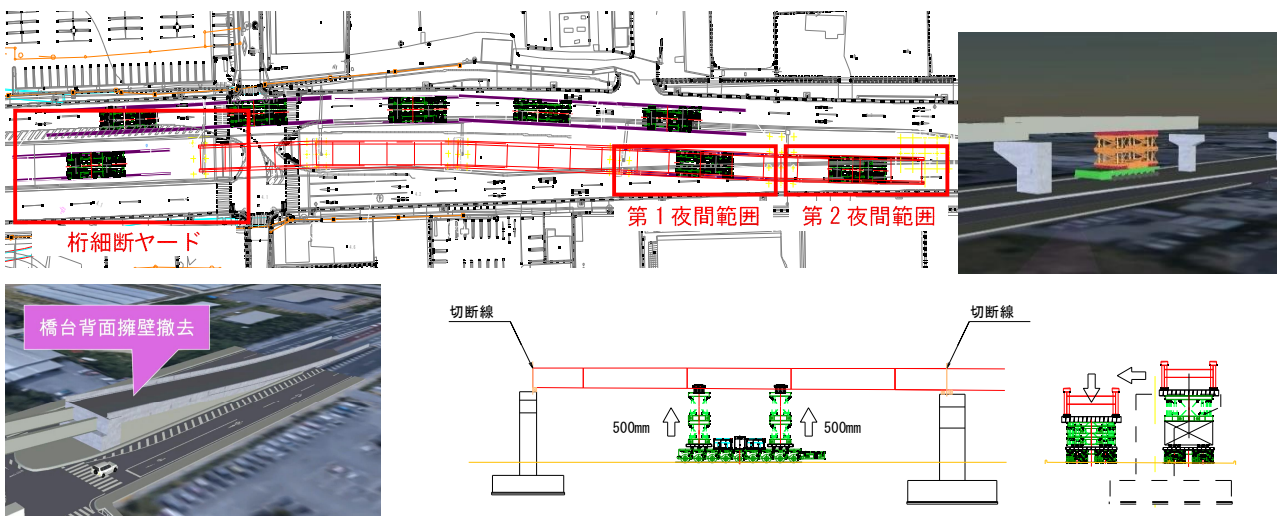


図-7 多軸台車による撤去計画

4. 撤去工事実施状況

本工事は、2024年2月13日（火）と17日（土）の2日間
で実施した（表-1参照）。まずは交通規制を完了させた
後、多軸台車の走行に支障となる標識看板と信号機の一時
撤去を開始した（写真-1参照）。その後、上部工2主
桁を多軸台車でリフトアップし、桁細断ヤードまで運搬
し（写真-2、写真-3参照）、クレーン2台の相吊りによ
って多軸台車から主桁を降ろした（写真-4参照）。最後
に信号機を復旧し交通規制を解除した。

5. おわりに

今回の工事は、交通量が多く、様々な施設が隣接し
ている地区内での撤去作業であった。狭小な施工ヤード
で交通規制は夜間のみに限られるなど厳しい制約条件の
中で、多軸台車の使用により、主桁を安全かつ迅速に撤
去することができた。

表-1 撤去スケジュール

2024年2月13日（火）		2024年2月17日（土）	
実施時間	内容	実施時間	内容
1:00	車線規制開始	1:00	車線規制開始
1:30	規制完了、標識看板・信号機の一部撤去	1:30	規制完了、信号機の一部撤去
2:00	多軸台車による移動開始	2:00	多軸台車による移動開始
2:30	桁細断ヤード到着、桁荷卸し開始	2:30	桁細断ヤード到着、桁荷卸し開始
4:00	信号機復旧、規制解除開始	3:30	標識看板・信号機復旧、規制解除開始
4:30	規制解除完了	4:00	規制解除完了

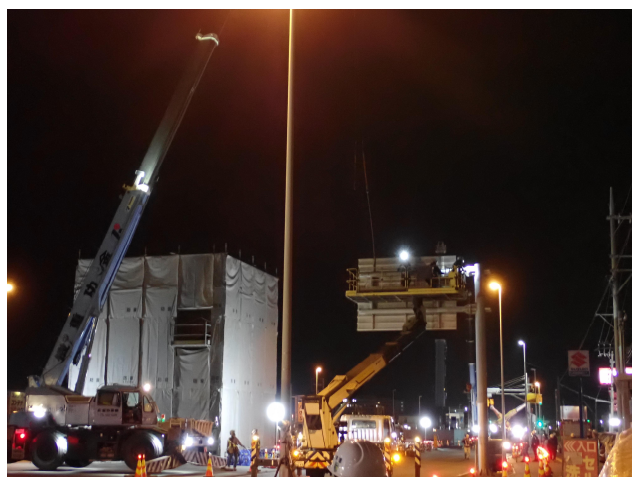


写真-1 標識看板の一部撤去状況



写真-2 多軸台車で桁のリフトアップ状況



写真-3 多軸台車走行状況



写真-4 多軸台車からの桁の荷卸し状況

送電用鉄塔の腐食した部材に対する CFRP 補修検討および実鉄塔での施工事例

日鉄ケミカル&マテリアル 正会員 ○秀熊佑哉
東京電力パワーグリッド 正会員 山崎智之、佐野和伸

1. はじめに

送電用鉄塔は防錆として定期的に塗装を行い、メンテナンスを行っているが、沿岸部など腐食環境の激しい場所に立地している場合、腐食による減厚が生じることがある。そのような場合、一般的に強度不足となるような腐食が発生することは限定的であるが、腐食した部材の補修として、鋼板を添接する当て板工法や部材を交換する部材交換工法などが用いられている。これらの工法は、大掛かりな架設機材や施工に特殊技能が必要となる。そのため、送電用鉄塔の高所で腐食が生じた場合、鋼板を容易に引き上げることができないので高所での作業が困難であること、対策範囲が小規模の場合には効率的な対策が困難であることなど問題点がある。そのため、送電用鉄塔の補修・補強として、大掛かりな架設機材や施工に特殊技能が必要とせず、高所でも容易に作業ができることができる工法の検討を進めてきた。

そこで、鋼橋の補修・補強で用いられている軽量かつ高強度、高弾性、高耐久性といった特徴を有する炭素繊維シートを用いた炭素繊維シート接着工法¹⁾²⁾に着目する。これまでに腐食劣化した鋼管に対して、VaRTM 法を用いた CFRP 補修についてその性能回復効果と適用範囲について検討してきた³⁾。

本研究では、これまで送電用鉄塔構成部材である等辺山形鋼に腐食減肉を模した円孔を設け、炭素繊維シートを剥離防止効果が確認されているポリウレアパテを介して接着し、補修効果を確認する引張試験および、圧縮試験⁴⁾を実施してきた。また、促進暴露試験による長期耐久性評価と、実際の送電用鉄塔を用いた試験施工による施工性評価を実施した。本報告では、鉄塔部材の設計上の決定応力が圧縮側であることから、力学的評価としては、文献⁴⁾にさらなる考察を加えた圧縮試験結果を報告する。また、促進暴露試験、実鉄塔での試験施工結果と合わせて報告する。

2. 圧縮試験

2.1. 試験概要

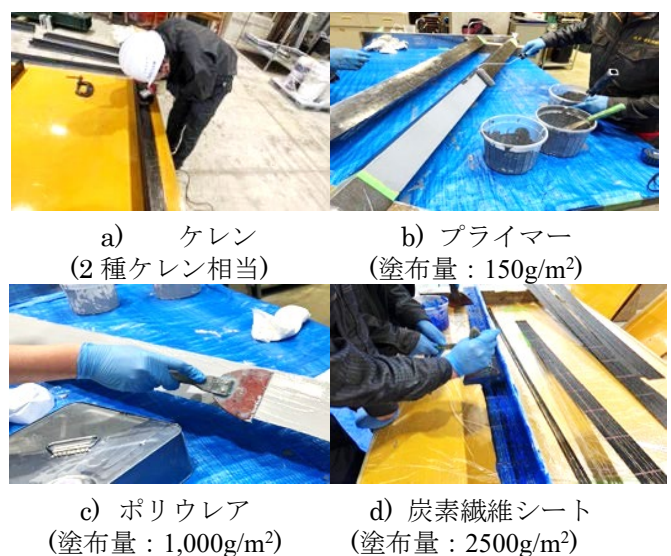
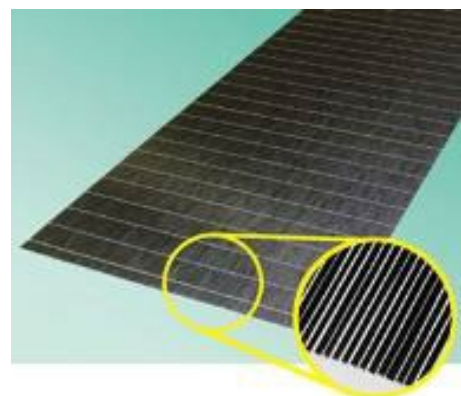
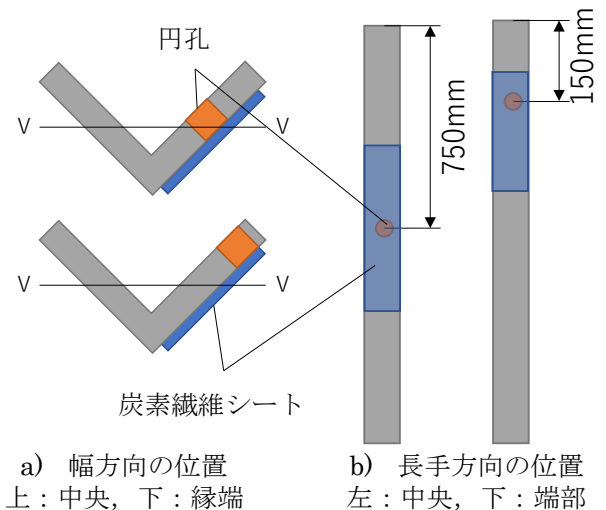


表-1 供試体一覧と実験結果

供試体条件				断面性能			実験結果			設計値との比較		
試料No.	部材 サイズ	降伏応力 N/mm ²	欠損 パターン	CFRP 層数	断面積 cm ²	細長比 λ	最大荷重 平均	降伏補正 P_{cr} kN	最大荷重 健全との比	許容座屈荷重 P_{ka} kN	許容座屈荷重 $P_{ka1.5}$ kN	実験値との比較 $P_{cr}/P_{ka1.5}$
L45-0	L45×4	296	—		3.49	85.3	66.5	66.5	1.00	37.7	56.5	1.18
L45D1	L45×4	321	中央17.5		2.79	77.6	66.1	71.6	1.08	32.3	48.5	1.36
L45D2	L45×4	345	縁端17.5		2.79	85.4	56.2	65.5	0.98	30.1	45.1	1.24
L45D3		345	縁端22		2.61	82.7	45.2	52.6	0.79	28.9	43.4	1.04
L45D4		345	端部縁端17.5		2.79	85.4	54.3	63.3	0.95	30.1	45.1	1.20
L45D1R	L45×4	321	中央17.5	2層	3.60	80.2	82.1	89.1	1.34	40.8	61.2	1.34
L45D2R		321	縁端17.5	2層	3.60	86.8	75.5	81.8	1.23	38.3	57.5	1.31
L45D3R		321	縁端22	3層	3.83	85.3	69.9	75.8	1.14	41.3	62.0	1.13
L45D4R	L45×4	321	端部縁端17.5	2層	3.60	86.8	60.8	65.9	0.99	38.3	57.5	1.06

本研究で用いた山形鋼は、鋼種 SS400、断面寸法 L-45×45×4 mm とし、部材長は 1,500 mm とした。供試体一覧を表-1 に示す通り、腐食を模した円孔の大きさ、位置、炭素繊維シート (CFRP) による補修の有無をパラメータとした。供試体の概略図は図-1 に示す。

円孔の大きさは、直径 17.5 mm と 22.0 mm の 2 種類、円孔の幅方向の位置は、山形鋼の中心と、円孔縁端と山形鋼の縁端距離が 2mm となる位置とした。また、円孔の長手方向の位置は中央 (端から 750 mm) および、端部付近 (端から 150 mm) とした。これは、一般的に炭素繊維シート接着補修では、欠損部から荷重伝達に必要な定着長を確保することが重要であるが、送電用鉄塔の腐食は定着が確保できない接合部付近で起こることも想定されるためである。

補修は図-2 に示す炭素繊維が一方向に配列したストランド型炭素繊維シート (繊維目付 : 900 g/m², 弾性係数 : 640 kN/mm², 引張強度 : 1900 N/mm², 設計厚 : 0.429 mm) を用い、図-3 に示すような施工手順にて、山形鋼の外面に貼り付けることで補修を行った。図-3 には各工程の塗布量も記載している。炭素繊維シートの塗布量は、炭素繊維シートを接着するエポキシ樹脂のシート 1 層当たりの塗布量である。炭素繊維シートの積層数は、円孔部の断面積を回復させるよう、文献 1) を参照に式(1)を用い、積層数に応じた応力低減係数を考慮し、炭素繊維シートの積層数を剛性換算にて決定した。応力低減係数とは、接着長と応力伝達長を考慮し、合成断面との乖離を補正するための係数である。

$$A_{sl} \leq c_n \times \frac{E_{cf}}{E_s} \times t_{cf} \times B_{cf} \times n \quad (1)$$

ここで、

A_{sl} : 鋼部材の補修・補強必要断面積

c_n : 応力低減係数

(積層数 n に応じた 0.93~0.74 の値)

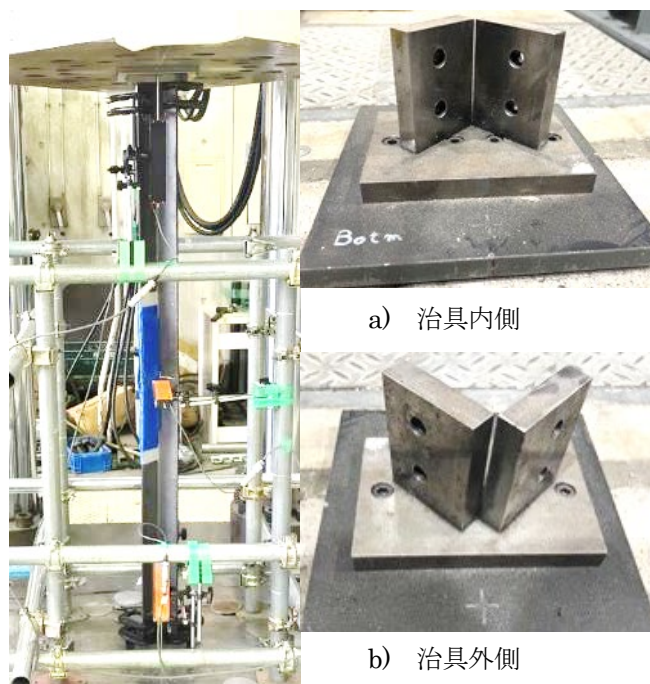


図-4 圧縮試験治具と設置状況

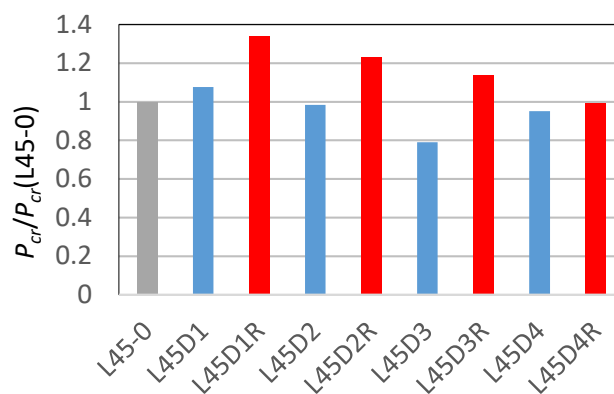


図-5 健全との最大荷重の比較

E_s : 鋼材の弾性係数(kN/mm²)

E_{cf} : 炭素繊維シートの弾性係数(kN/mm²)

B_{cf} : 炭素繊維シートの幅(mm)

t_{cf} : 炭素繊維シート 1 枚あたりの厚さ(mm)

n : 炭素繊維シートの積層数(枚)



図-6 補修前（L45D2：上）補修後（L45D2R：下）の破壊形態

また、炭素繊維シートの貼付け長さは、文献 1)を参考に定着長(腐食端から最外層シート端部までの距離)を 250mm, 各層の端部ずらし長を 75mm とした。

圧縮試験は、図-4 に示すように両端固定の境界条件で載荷できるように、試験体の両端に載荷治具を取り付けて、一軸圧縮載荷を行っている。計測項目は、鉛直荷重と鉛直変位とした。

2.2. 実験結果と考察

結果一覧を表-1 に示す。表中の断面性能は円孔や炭素繊維シートを考慮した値であり、細長比 λ は、両端の支持条件、有効座屈長も考慮して算出した。ここで、最大荷重の実験値は、各ケースの降伏応力が異なるため、健全供試体(L45-0)の降伏応力を基準に補正した。補正後の最大荷重を用いて健全と各ケースを比較した結果を図-5 に示す。

同図より、円孔が幅方向の中央の場合(L45D1)では、健全と最大荷重が同程度であり、中立軸近くの欠損は座屈耐力に大きな影響を与えないことがわかる。一方で、円孔が縁端付近にある場合(L45D2, L45D4)は、最大荷重が若干低下している。さらに円孔径が大きくなると(L45D3)、さらに最大荷重が低下することがわかる。それぞれの補修あり供試体に着目すると、補修したすべてのケースで最大荷重が大きくなっており、その値は健全以上であることがわかる。炭素繊維シートにより円孔断面分の剛性を健全相当に確保することによって、座屈耐力が回復することがわかった。

また、L45D2 供試体の補修前後の試験後の破壊形態の比較を図-6 に示す。補修前(L45D2)は円孔付近で局所的に座屈しており、くの字型に座屈していることがわかる。一方、補修後(L45D2R)では、座屈形状がくの字型ではなく、全体的に弓なりに座屈しており、

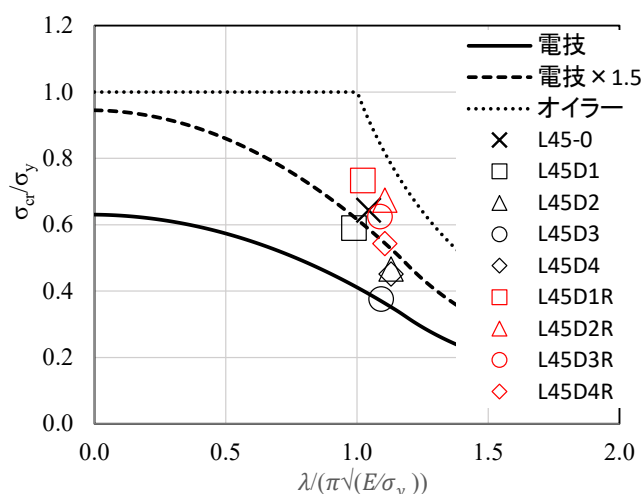


図-7 耐力力曲線

終局後には円孔まわりに炭素繊維シートの局所的な割れが確認できた。炭素繊維シート補修により、円孔付近の局所的な座屈が全体的な座屈形状に改善されたことにより、最大荷重すなわち座屈耐力が健全相当まで回復したと考えられる。この傾向は他の供試体でも同様であった。

さらに、電気設備に関する技術基準を定める省令⁵⁾に準拠し、単一山形鋼支柱材その他の偏心の比較的小さいものとして算出した許容座屈荷重の設計値(長期と短期、短期は長期に安全率 1.5 を掛けた値)と実験から得られて座屈耐力の比較を表-1 に示す。同表よりすべてのケースにおいて、設計上安全側となっているが、これは設計値が設計降伏応力である 245 N/mm²で計算された値であるため、実降伏応力との差で実験値がすべてのケースで設計値より大きくなっている。そこで、各ケースを相対的に比較するために、実験から得られた座屈耐力を断面積で除した座屈応力をそれぞれの降伏応力で無次元化した耐力力曲線を図-7 に示す。同図において、健全は(L45-0)、は短期の設

計値をほぼ一致しており、欠損有り無補修 (L45D1～4) は短期設計値より低く、補修後 (L45D1～3R) では短期設計値を超えて耐荷力が健全相当まで回復していることがわかる。円孔が長手方向の端部付近の場合 (L45D4R) は、短期設計値相当まで回復しているが、他のケースよりも耐荷力は低くなった。これは、文献1) において、通常 250mm 必要とされている欠損端からの定着長が、L45D4R のみ 50mm しか確保できていないためであると考える。

3. 促進暴露試験

補修後の部材が沿岸部などの腐食環境においても所定の性能を発揮できることを確認するために、複合サイクル試験による促進暴露試験を実施した。試験方法は、JASO M 609-91 に準拠し、図-8 に示すサイクルを 360 サイクル実施した後に、目視による外観評価および打音検査による剥離の有無の確認を実施した。

供試体は山形鋼で、実鉄塔から撤去してきた腐食部材に 2 種ケレンした後に、圧縮試験と同様の手順にて炭素繊維シートを施工したものを用いた。炭素繊維シートへの上塗り塗装の影響を検証するために、上塗り有り無し両方を評価した。

促進暴露試験後の供試体の写真を図-9 に示す。同図より、上塗り塗装の有無にかかわらず、炭素繊維シートの施工面および施工箇所境界付近に、目視での発錆は確認されず、補修層は高い防錆効果を有することが確認された。また、打音検査においても炭素繊維シートの剥離は確認されなかった。これは、炭素繊維シートの接着に用いるエポキシ樹脂だけでなく、剥離防止層をして用いているポリウレアパテ (施工厚 0.8mm 程度) の遮蔽性の影響が大きいと考えられる。今回の促進暴露試験において塗装無しでも問題なことが確認されたが、実際は紫外線によるエポキシ樹脂の劣化も考えられるため、恒久補修として本工法を用いる場合には塗装をすることが望ましいと考える。

4. 実鉄塔での試験施工

本工法の実際送電用鉄塔の塔上での作業性を確認するために、建替予定の実鉄塔を用いた試験施工を実施した。試験施工に用いた鉄塔は、2026 年度に建替により撤去予定であり、一部の部材に局所的な腐食が生じている。送電電圧 66kV、鉄塔高 27.0m の山形鋼鉄塔とした。本鉄塔は、沿岸部の山頂付近に位置しており、潮風による塩害を受けやすい環境にある。また立地上、

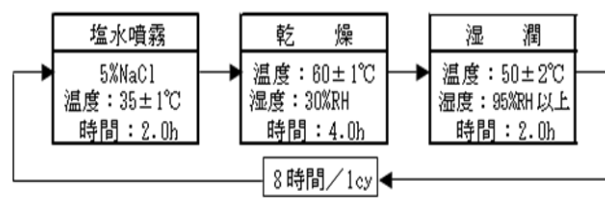


図-8 複合サイクル試験条件



a) 塗装有り



b) 塗装無し

図-9 促進暴露試験後の供試体

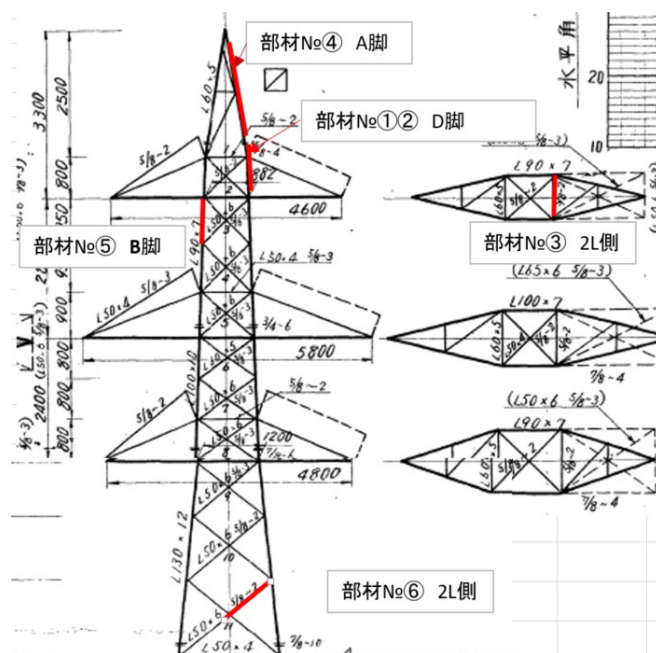


図-10 試験施工の適用部位 (赤線箇所)

重量物の搬入が困難な場所に位置しているため、本工法の試験施工対象として選定した。

本鉄塔における本工法の適用部位は図-10 に示す計 6 箇所とし、部位一覧を表-2 にまとめる。また、代表部位の腐食状況を図-11 に示す。腐食による減肉量は 0.6~2.9mm 程度であり、各部材の最大腐食位置の断面に合わせて炭素繊維シート必要補修量を決定した。積層数の計算は圧縮試験と同様に、腐食断面を健全相当まで回復させるよう、文献 1) に従いポリウレアパテによる応力低減係数を考慮し、剛性換算にて決定している。今回は圧縮試験と同様に、ストランド型炭素繊維シート（繊維目付：900 g/m²、弾性係数：640 kN/mm²、引張強度：1900 N/mm²、設計厚：0.429 mm）を用い、最大で 1 面当たり 3 層積層であった。

施工手順も圧縮試験と同様に図-3 に示す手順とし、下地処理は 2 種ケレンとし、ディスクサンダーを用いて孔食部以外は鋼板素地面を露出させるケレンを実施した。その後の作業に関しては、塔上での作業性を考慮して樹脂の配合（計量・攪拌）は地上での作業とし、地上で配合した樹脂をロープにより塔上の作業員に渡すことにより施工を行った。樹脂の可使用時間は 40 分程度のため、地上から送る樹脂の量は塔上で使い切れる量とすることに留意が必要であった。地上での樹脂の配合状況、塔上での作業状況を図-12 に示す。また、部材 No④の施工後の状況を図-13 に示す。屋外での施工の場合は通常上塗り塗装を行うが、今回は施工後数年後に撤去予定であること、施工後の変状を観察しやすくするために未塗装とした。部材 No④の試験施工後 2 年経過の写真を図-14 に示す。未塗装であるため、紫外線による表層の樹脂の変色が確認できるが、目視や打音検査による浮き、剥がれなどの異常は確認されなかった。

また、部材 No④ではステップボルトが取りついており、炭素繊維シートの連続性が失われる箇所がある。このような箇所は鉄塔には多数ありその対策が必要である。本試験施工では、干渉部のシートを切り欠き、隣接部に短冊状の増し貼りをし、切り欠き箇所も設計値同等のシート剛性を確保できるようにした。

本試験施工において、全 6 か所の作業に要した日数は 2 日で、人工は 10 人日であった。塔上での作業性に問題はなく、塔上においても簡易に施工可能であり、特に部材取替が困難である主柱材や腕金材においては本工法が有用であることが示された。

5. まとめ

表-2 試験施工の適用部位詳細

部材No	部位	アングルサイズ	減肉量(mm)
①	主柱材D脚	L90×7	1.9
②	主柱材D脚	L90×7	1.2
③	S材C1	L60×5	1.8
④	主柱材A脚	L60×5	2.9
⑤	主柱材B脚	L90×7	0.6
⑥	腹材11P	L50×6	1.0



a) 部位 No①

b) 部位 No④



c) 部位 No③

図-11 腐食状況

等辺山形鋼に腐食減肉を模した円孔を設け、炭素繊維シートで補修した供試体を圧縮試験し、得られた結果を以下に示す。また、促進暴露試験、実際の送電用鉄塔を用いた試験施工の結果も合わせて以下にまとめる。

- 炭素繊維シートにより円孔断面分の剛性換算分を補修することによって、座屈耐力が回復することがわかった。
- 円孔からの定着長が十分に確保できている場合



a) 地上での樹脂配合



b) 塔上での施工状況

図-12 施工状況写真



図-13 部材 No④の施工前後写真

は、耐荷力が短期の設計値レベルまで回復し、既往の座屈式で設計可能であることが示された。

- 3) 複合サイクル試験機による促進暴露試験試験を



図-14 部材 No④の2年経過後の様子

行った結果、塗装の有無にかかわらず発生は確認されず、補修層には高い防錆効果が確認できた。ただし、実施工においてはエポキシ樹脂の紫外線劣化も考えられるため、塗装することが望ましい。

- 4) 実鉄塔を用いた試験施工を行った結果、塔上での作業性に問題はなく、塔上においても簡易に施工可能であり、特に部材取替が困難である支柱材や腕金材においては本工法が有用であることが示された。

謝辞

本検討の圧縮試験の実施は、ものづくり大学の大垣教授、長野工業高等専門学校の上野准教授の支援による。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 株式会社高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法 設計・施工マニュアル，2013.10.
- 2) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ 09，2018.7.
- 3) 松井，大園，山崎，高野，松本：腐食劣化した送電鉄塔鋼管に対する VaRTM 工法を用いた CFRP 補修技術の検討，日本建築学会，構造工学論文集，Vol.67B，pp.471-482，2021.3.
- 4) 秀熊，山崎，村上，山戸，石川：圧縮軸力を受ける断面欠損した等辺山形鋼の炭素繊維シートによる補修に関する実験的研究，2022 年度日本建築学会学術講演会，pp.1251-1252，2022.9.
- 5) 経済産業省：電気設備に関する技術基準を定める省令，2023.3.

Session 2 腐食・防食

電気化学実験を用いて減肉させた高力ボルトの軸力低下特性に関する研究

琉球大学 ○浦崎真吾、下里哲弘、淵脇秀晃
沖縄しまて協会 玉城喜章

1. はじめに

鋼I桁橋において、腐食が顕著となるボルト添接部では、ナットやボルト頭部の減肉により軸力低下が懸念されている。図1に示すように、人工的にナットやボルト頭部を単体で減肉した場合、締付軸力の変化量が異なることが示唆されている^[1]。実橋梁では、ナットとボルト頭部が同時に減肉する場合がほとんどであり、その時の軸力への影響が明確になっていない。本研究では、電気化学的腐食促進と同時に軸力計測を行い、ナット及びボルト頭部の減肉と軸力の関係を検討する。

2. 試験方法と試験体概要

試験体は、写真1に示すように、2本の高力ボルト（F10TM22）のボルト頭部（1箇所）と軸部（2箇所）にそれぞれひずみゲージを貼り、道路橋示方書^[2]に準じて設計ボルト軸力の1割増しで軸力を導入したものある。その後48時間程度のリラクセーションのひずみ計測を行った。次に写真2に示すように試験体のボルト頭部のみ、もしくはナット部のみを3%NaCl水溶液に浸漬して電気化学的腐食促進により減肉させる。また、ボルト頭部およびナット部の減肉量は、図2に示すように座金より4mm高さごとにマイクロメーターを用いて所定の促進時間ごとに計測し、各高さの計測値の平均を計算して、平均減肉量とした。また、減肉中の軸力はボルト頭部と軸部のひずみを計測し、軸力の推定を行った。軸力の推定は軸力計を用いて軸力とひずみの関係をあらかじめ計測し、計測した近似曲線を用いた。^[1]

表1 実験パラメータ

試験体名	工程1	工程2
ナット減肉	ナット側の平均減肉量が8mm以上になるまで減肉	—
ボルト頭部減肉	ボルト頭部側の平均減肉量が8mm以上になるまで減肉	—
両方減肉①	ナット側の平均減肉量が4mmまで減肉	ボルト頭部側の平均減肉量が8mm以上になるまで減肉
両方減肉②	ナット側の平均減肉量が8mmまで減肉	ボルト頭部側の平均減肉量が8mm以上になるまで減肉
両方減肉③	ボルト頭部側の平均減肉量が4mmまで減肉	ナット側の平均減肉量が8mm以上になるまで減肉
両方減肉④	ボルト頭部側の平均減肉量が8mmまで減肉	ナット側の平均減肉量が8mm以上になるまで減肉

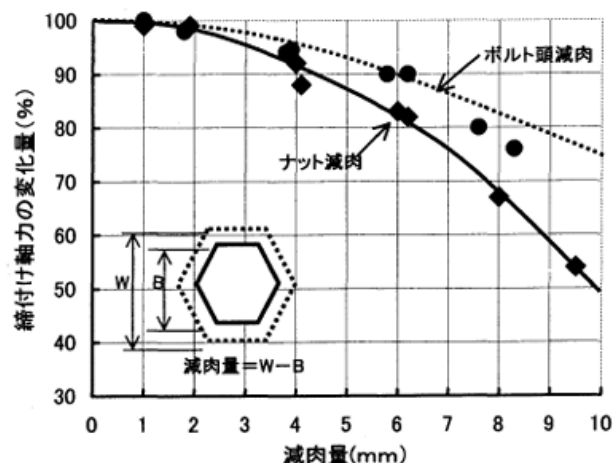


図1 高力ボルトの減厚に伴う締付軸力の変化^[1]



写真1 実験する試験体

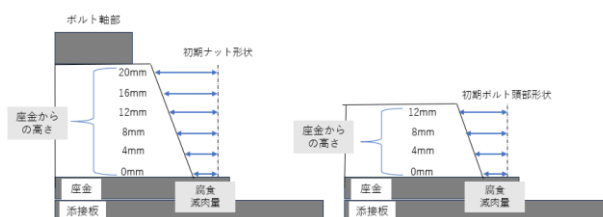


図2 ナット、ボルト頭部減肉量計測箇所



写真2 電気化学的腐食促進試験

キーワード 電気化学実験、減肉量、軸力低下特性、高力ボルト、
連絡先 〒903-0213 西原町千原1 E-mail: e215511@eve.u-ryukyu.ac.jp

表1に実験パラメータを示す。パラメータは、減肉させるボルト頭部およびナット部の減肉量と減肉順の組合せとした。

3. 実験結果

図3にナットやボルト頭部が単体で減肉した場合の平均減肉量と残存軸力の関係を示した。図3よりボルト頭部減肉に比べてナット減肉のほうが、減肉量に対して大きく軸力低下する。また既往の研究である図1と比較すると、減肉量が8mm地点での残存軸力割合が、ナット部では既往の研究のほうが10%ほど大きく軸力低下していたが、ボルト頭部ではほとんど差がない。図4に両方減肉①と②、図5に両方減肉③と④の平均減肉量と残存軸力割合の関係を示し、両方減肉の工程1と2で凡例を分けている。また図中には図3での近似曲線を示した。この図4と5よりナットとボルト頭部を両方減肉させた場合のほうが、ナットやボルト頭部を単体で減肉させるよりも減肉量に対して軸力低下が少ない。これは軸力の低下がナットとボルト頭部それぞれの減肉量に依存しているからと考えられる。

4. まとめ

(1) ナット減肉とボルト頭部減肉による平均減肉量と残存軸力の関係より、ボルト頭部減肉に比べてナット減肉のほうが減肉量に対して、わずかに大きく軸力が低下する。

(2) ナットとボルト頭部が両方減肉した場合、ナットやボルト頭部を単体で減肉させた場合よりも減肉量に対して軸力低下が小さい。

今後、多くの試験体からデータを取り、信憑性のあるデータを作成する。

参考文献

- [1] 名取 暢, 西川 和廣, 村越 潤, 大野 崇; 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, Vol.668, 2001.
- [2] 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編(平成8年12月), (社)日本道路協会, pp423-432. 1996,12

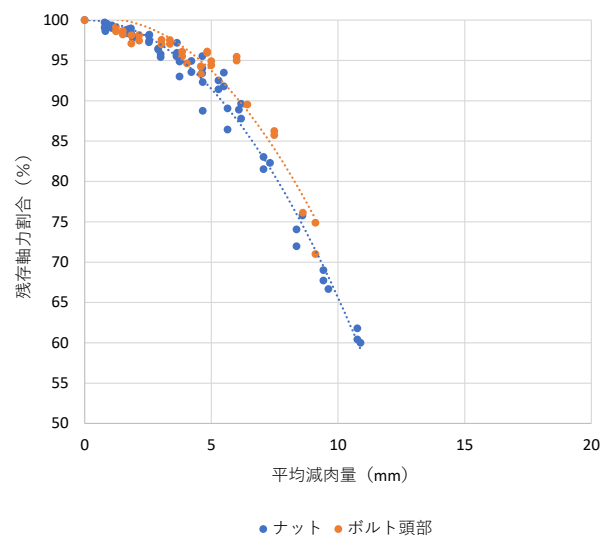


図3 ナット減肉とボルト頭部減肉の比較

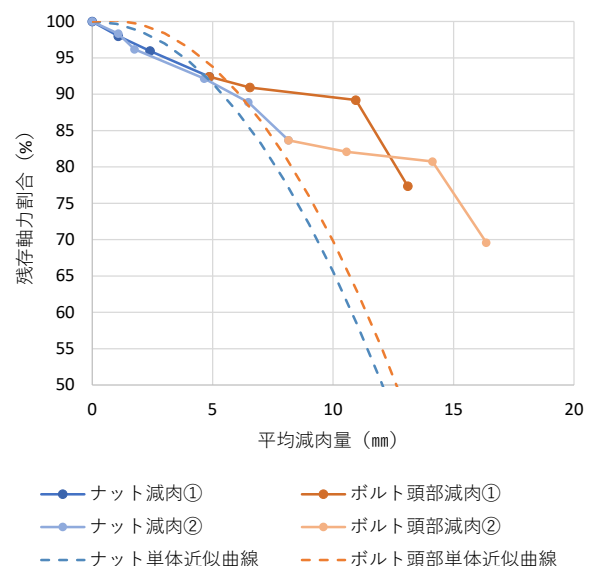


図4 図3と両方減肉①及び②の比較

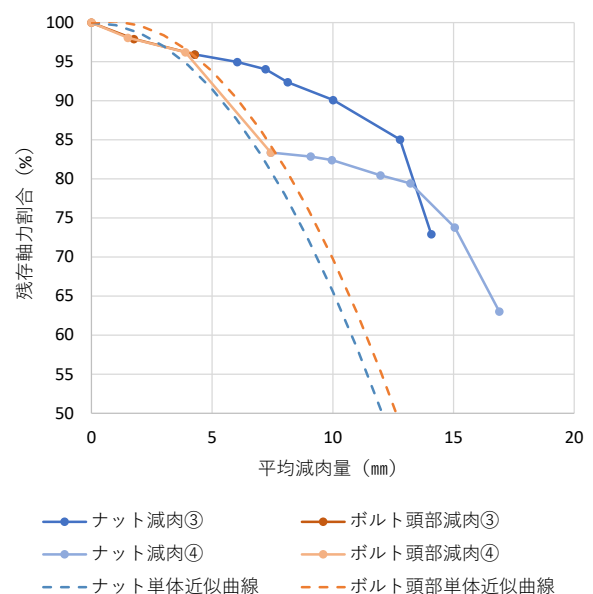


図5 図3と両方減肉③及び④との比較

改良型ノズルホルダーを用いた CS 工法の成膜性評価

琉球大学 ○真田大輝, 下里哲弘, 淵脇秀晃

1. はじめに

鋼橋の腐食部位の中で写真 1-1 に示すような連結部, ボルト部は, 他の構造部位と比べて早期に腐食損傷が生じている. この早期腐食に対し, 防食技術の開発を目的として, 低温低圧型金属溶射である Cold Spray (以下, CS) 技術の開発が行われている.¹⁾

従来型 CS よりさらに防食性能を上げることや施工効率化を目標として, ガンノズル部分を改良した新型の CS が開発された.

本研究では, 改良型 CS の施工効率化における防食性能の評価を行う.

2. 試験方法

(1) 施工効率化について

本研究の目標で掲げている施工効率化とは, 二つある.

一つ目は, スプレーガンノズル部分の改良(写真 2-1)による施工効率への貢献である. 具体的には, ノズル部分の供給口を二カ所から粉体を投入する仕組みに改良したことで, 平滑な皮膜形成が可能になる. また, 粉体供給の接続部品を金属製にすることで従来のチューブ折れ曲がりによる粉体詰まりの軽減をする. これら施工の安定に着目した改良と, ノズルホルダー内部の構造にガイド部品等を追加することで, ノズル先端部分の摩耗を防ぐといった品質の安定に着目した改良により, 施工連続性が向上する. その結果, 施工効率化につながると考える.

二つ目は, 物理的な方法で施工効率を高める. 具体的には, スプレーガン移動速度を通常の 5mm/sec から 15mm/sec にあげる. その結果, CS の成膜可能面積が従来の 3 倍の効率化につながられる.

(2) CS 施工条件

本研究では, 新材鋼板と鍍鋼板に対して CS 施工を行った. また, 施工速度について, 標準の速度 (5mm/sec) と高速な速度 (15mm/sec) の二条件で施工を行った(表 2-1).

(2) 表面膜厚

写真 2-2 で示した電磁膜厚計を用いて, CS 皮膜厚



写真 1-1 鋼橋の腐食損傷の例



写真 2-1 改良された CS のノズル部分

試験体種類	施工速度
鍍鋼板	5mm/sec
新材鋼板	15mm/sec

表 2-1 施工パラメータ



写真 2-2 電磁膜厚計



写真 2-3 卓上走査顕微鏡

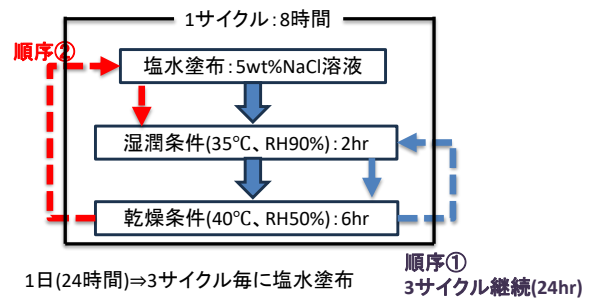


表 2-2 複合サイクル試験

を特定する。

(3) 断面観察

写真 2-3 で示した卓上走査顕微鏡を用いて, 断面の膜厚・鍍厚・鋼材の形状と元素の特定を行う。

(4) 密着力試験

アドヒージョンテストを用いたプルオフ試験から CS 皮膜の密着力を求める。

(5) 複合サイクル試験

表 2-2 に示した条件で乾湿繰り返し複合サイクルによる腐食促進試験を行った。

キーワード 残存鍍, 改良型 Cold Spray, 施工効率化, 成膜性, 密着力

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)

3. 試験結果

(1) CS 成膜結果

(a) 試験体表面状態

写真 3-1 に示すように、写真観察から表面には錆の残存が確認されなかった。表面膜厚測定の結果は、グラフ 3-1 で示すように、標準の施工速度 (5mm/sec) では、残存錆上でも CS 皮膜が十分形成していることが分かった。また、施工速度を上げた場合 (15mm/sec)、表面膜厚が標準の施工速度 (5mm/sec) と比べ、大幅に低下していることが分かった。これは、スプレーガンの移動速度を上げることで断面に対する停滞時間が短くなり、単位面積当たりの粉体供給量が低下するためであると考えられる。²⁾

(b) 試験体断面状態

写真 3-2 に示すように、新材鋼板上と錆鋼板上には CS 皮膜が形成されていた。また、元素マッピングを行った結果、亜鉛であることが特定されたため、亜鉛皮膜が十分形成していることが分かった。

(2) 密着力試験結果

グラフ 3-2 の結果から、施工速度を上げた場合 (15mm/sec)、密着力の低下は標準の施工速度 (5mm/sec) と比べてあまり見られないことが分かった。また、残存錆上で CS 施工を行った場合の残存錆と CS 皮膜との界面でも高い密着力を有する。

(3) 複合サイクル試験結果

写真 3-3 は、複合サイクル試験の 240 時間経過後の試験体の様子を示している。この結果から錆の発生は見られていないことが分かった。引き続き促進試験の継続、経過観察を行っていく。

4. まとめ

本研究では、施工効率化を目標としてノズル部分の構造改良された CS 機器の防食性能評価を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) 標準の速度 (5mm/sec) で施工を行った場合、残存錆上でも十分な成膜性と密着力を有している。
- 2) 施工速度を上げた場合 (15mm/sec)、表面に成膜する亜鉛の皮膜厚が低下する。
- 3) CS 防食指標である密着力は、施工速度の違いによる変化は見られず、既存 CS 工法と同等の 10Mpa を満足した。

今後は、改良型 CS 機器で施工速度を変えた場合に形成される亜鉛皮膜の耐久性能について、電気化学的に評価を行う。

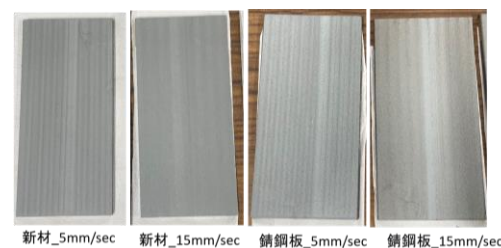


写真 3-1 施工後の試験体観察



グラフ 3-1 表面膜厚結果

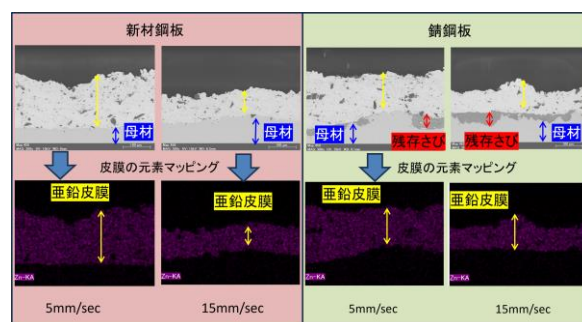


写真 3-2 試験体断面観察



グラフ 3-2 密着力試験結果

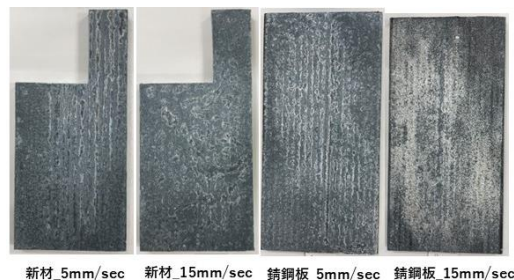


写真 3-3 複合サイクル試験 240 時間経過

謝辞： 本研究を遂行するにあたり、タツタ電線株式会社の平野正樹氏には、コールドスプレーについてご教授頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 清川昇悟, 井口進, 木村雅昭, 下里哲弘: コールドスプレー技術で生成する金属皮膜を適用した高力ボルトの防食性能と機械的性質, 日本鋼構造協会, 鋼構造論文集, 第 24 巻 (第 93 号), pp.65-72, 2017.3.
- 2) 日和裕介: 低温低圧型金属溶射を応用した鋼橋腐食部の防食性能回復法に関する研究, pp.48-54, 2024.9

SEM とラマン分光法を用いた表面処理剤を施した耐候性鋼材のさび分析

琉球大学 ○安里拓馬 下里哲弘 淵脇秀晃

1.はじめに

一般的に耐候性鋼材は無塗装でも塗装同様な防食性能を発揮するために、大気環境下で表面に保護性さびが構築されて長期耐久性を保持することが期待できる。しかしながら、保護性さびが形成されるまでに一定の期間を要するため、それまでにさび汁の流れが環境上の問題となる。したがって、耐候性鋼用の表面処理剤を建設当初に施し、その処理剤の下で保護性さびを形成することを要求性能としているが、その処理剤下の保護性さびの形成を実証した研究はない。そこで本研究では、表面処理剤下で発生するさびを SEM-EDX とラマン分光法によって分析し評価することを目的とする。研究では、現在実橋で適用されている各種表面処理剤を施した耐候性鋼材を用い、琉球大大気暴露場で発生するさびを分析しさびの特徴、発生メカニズムを明らかにする。

2. 試験体概要と分析方法

2.1 試験体

本研究では、琉球大学 10 年程大学で暴露し、写真 1 および表 1 に示すように 5 種の耐候性鋼用表面処理剤を施した試験体を分析する。

2.2 SEM-EDX

写真 2(a)に示した SEM-EDX により、試験体の断面観察を行い、防食皮膜および鋼材さびの形態の観察や、観察領域の元素マッピングにより、さび層およびさび瘤内の蓄積物や皮膜の含有元素などの、各元素成分の分布形態を把握することで、腐食状況の把握を行う。

2.3 ラマン分光法

写真 2(b)のラマン分光装置にて、断面に照射光を当て、励起して物質ごとに波長の異なる

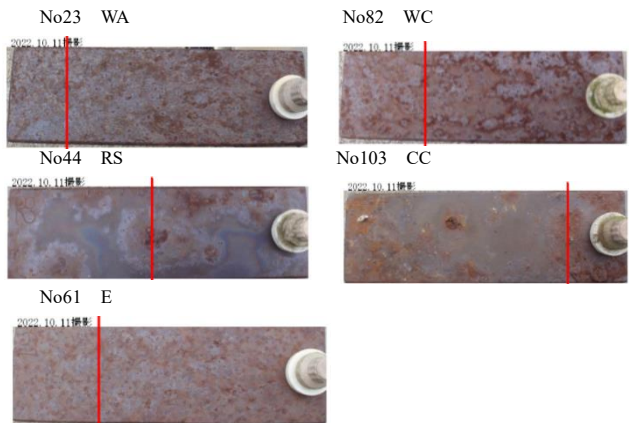


写真 1 暴露された耐候性鋼材

表一 耐候性鋼用表面処理剤の成分と機能

	WA	RS	E	WC	CC
標準厚	1層目20μm+2層目10μm=30μm	15μm×2層目=30μm	下塗15μm+上塗20μm=35μm	化成処理+2層目15μm+3層目25μm=40μm	45μm×1層=45μm
基本成分	ブチラール樹脂	ブチラール樹脂/クリル樹脂複層型	ブチラール樹脂	ブチラール樹脂/クリル樹脂複層型	エポキシ樹脂単層型
添加成分	硫酸クロム	多価陽イオン	保護性さびの核	クロム・リン酸樹脂	特殊添加成分
P機能	硫酸クロムを添加しクロム置換α-FeOOHの生成促進	多価陽イオンによりFeイオンを捕捉し安定化を促進	下塗に保護性さびの核となる成分を含有し微細なα-FeOOH生成促進	リン酸系火災処理皮膜により非晶質さび生成を補助	
T機能			上塗で速度なO ₂ 、H ₂ Oの透過(ブチラール樹脂)Cl-をモリブデン酸により阻止	アクリル樹脂によるCl-の透過を抑制	アニオン膜によるCl-など腐食要因の阻止 多孔質皮膜による速度なO ₂ 、H ₂ O透過
タイプ	促進	熟成	促進	熟成	促進
適用可能域	飛来塩分量0.4mddで使用可能	コントローラの選択で可能域拡大	裸使用同等(0.05mdd)	裸使用同等(0.05mdd)	裸使用同等(0.05mdd)



写真 2(a)SEM-EDX

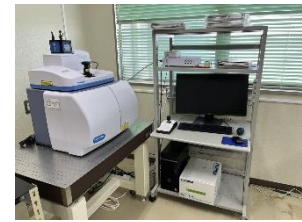


写真 2(b)ラマン分光装置

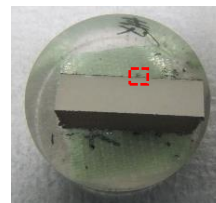


写真 3 試験体写真

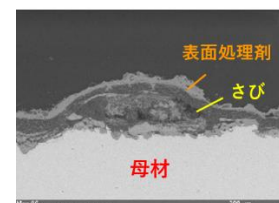


図 1 SEM 断面

キーワード 耐候性鋼材 耐候性鋼用表面処理剤 保護性さび 不活性さび ラマン分光法

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:e215509@eve.u-ryukyu.ac.jp

るラマン散乱光を読み取ることで得られるラマンスペクトルを分析し、さびの組成を特定できる。断面位置ごとに記録したスペクトルを分析することで、さび成分をマッピングし、さび成分の分布から腐食状態の把握を行う。マッピングにおける主な測定条件は、照射光波長が 532nm、グレーティングが 600nm、照射時間が 15sec、照射回数は、2 回とした。さび成分の特定は、市販の各種高純度さびから得られたラマンスペクトルを用いて最小二乗法により行った。なお、対象としたさび成分は、 α -FeOOH、 β -FeOOH、 γ -FeOOH、Fe₃O₄、 α -Fe₂O₃ とし、文献(1)および表 2)を参考にさび成分の性質から腐食状況の把握を行った。

3. 分析結果および考察

写真3および図1に示す分析領域のSEMによる断面画像より、耐候性鋼材の表面に表面処理剤が塗布されている事がわかる。この箇所にラマン分光分析を行った結果、試験体 No23 は、図 2-1 および表 3 に示すように全体的に安定している(不活性)の熟成さびである α -FeOOH が確認でき、母材付近に存在している。その上部に保護性さびとして機能している Fe₃O₄ がしている。図 2-2 に示す試験体 No44 は、母材付近に保護性さびの機能をはたす Fe₃O₄ が存在、安定している(不活性)の熟成さびである α -FeOOH、その上部に腐食原因ある α -Fe₂O₃(赤錆)が存在している。図 2-3 に示す試験体 No61 は、母材付近から保護性さびの機能を果たす Fe₃O₄ が存在し、その内部に安定しているさびである α -FeOOH が点在。その上部には α -Fe₂O₃(赤錆)が存在している。図 2-4、2-5 に示す試験体 No82 および No103 は、全体的に α -FeOOH が存在し、その内部に α -Fe₂O₃ が層状に存在している。

4. まとめ

- 1)No23, No44, No61 の試験体では各種表面処理剤の機能が確認でき、安定している(不活性)さびの α -FeOOH、保護性さびの機能をはたす Fe₃O₄(黒錆)が見られた。
- 2)No82, No103 の試験体では、安定しているさびの α -FeOOH が確認できたが、その内部に腐食要因である α -Fe₂O₄(赤錆)が確認できた。

表 2 鉄の腐食生成物(鉄酸化物)とその性質²⁾

鉄酸化物 (鉱物名)	Fe ²⁺ Fe ³⁺ +Fe ²⁺	色	結晶形	磁性(室温) (R-ループ: H)	電気伝導 率: cm ⁻¹	加熱に伴う相変態
Fe(OH) ₂	0	白	Cd ₁₀ 立方晶系	常磁性 (T _C <35)	熱絶体	約 370K で Fe ₂ O ₃ と H ₂ に分解 (Schikorr 反応)
FeO (wustite) ウスタイト	0	黒	NaCl 立方晶系	常磁性 (T _C >250~211)	半導体	5.9~ 5.99 843K 以上で存在
Fe ₃ O ₄ (magnetite) 磁鉄鉱、マグネタイト	0.67	黒	逆スピネル 立方晶系	フェリ磁性 (T _C <400)	絶縁体	4.26
α -FeOOH (goethite) 針鉄鉱、ゲーサイト	1.0	黄	α -FeOOH 斜方晶系	反強磁性 (T _C <400)	絶縁体	4.26
β -FeOOH (akaganeite) 赤鉄鉱、アカガネイト(M.Nambu)	1.0	黄褐色 ～白	α -MnO ₂ 正方晶系	(反強磁性) (T _C <250)	絶縁体	3.56
γ -FeOOH (lepidocrocite) 緑鉄鉱、レピドロクロサイト	1.0	オレンジ	γ -FeOOH 斜方晶系	常磁性 (T _C <77)	絶縁体	4.09
δ -FeOOH (ferroxylite) α -Fe ₂ O ₃ (hematite) 赤鉄鉱、ヘマタイト	1.0	褐色 赤～黒	変化した Cd ₁₀ 立方晶系 Al ₂ O ₃ 三方晶系	フェリ磁性 (T _C <450) 強い強磁性 弱い反強磁性 (T _C <850)	絶縁体	4.20 5.26
γ -Fe ₂ O ₃ (maghemite) 磁赤鉄鉱、マージマイト	1.0	褐色	スピネル 立方晶系	フェリ磁性 (T _C <850)	半導体～ 絶縁体	4.87
緑さび I 緑さび II	(0.33) (0.5)	緑 緑	六方晶系 六方晶系			
X 線回折法で確認された物質 X-ray amorphous substance	(1.0)	(褐色)	大気腐食さび層に含まれ、X 線的にブロードな回折図形を与える鉄酸化物。 X 線回折法では検出限界約 15nm 以下の微細粒子にはメスbauer 効果測定が有力で、 非晶質オキシ水酸化鉄、超微細ゲーサイトであると推定される。			

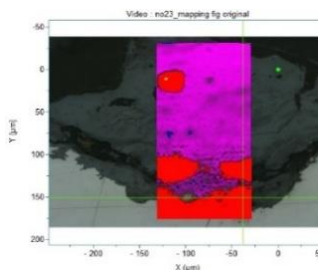


図 2-1 No23

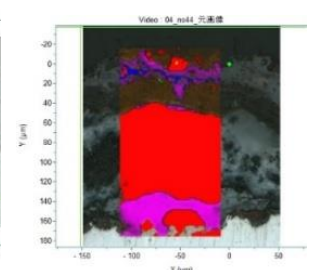


図 2-2 No44

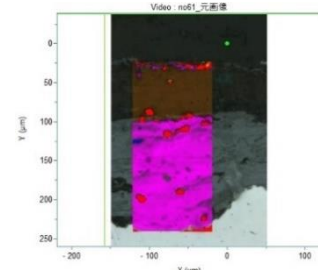


図 2-3 No61

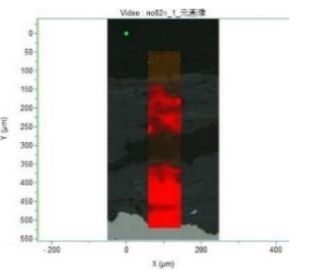


図 2-4 No82

表 3 凡例 マッピング配色

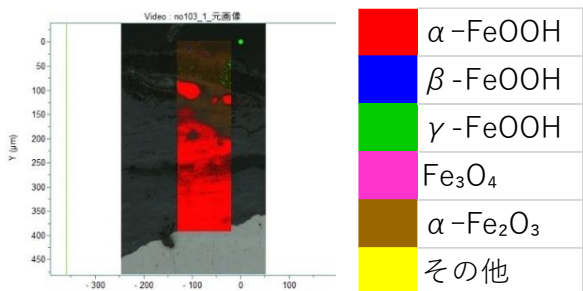


図 2-5 No103

図 2 ラマン分光法によるマッピング

謝辞

本研究のラマン分析にあたり、 β -FeOOH のサンプルは、日本製鉄の加藤様よりご提供いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 三木千尋・市原篤史：現代の橋梁工学 2004.12.
- 2) 三沢俊平：鉄鋼腐食科学の温故知新 2001

改良型 CFRP ガセツを用いた端対傾構の地震時破壊特性

琉球大学 ○宮里啓太郎 下里哲弘
日鉄ケミカル&マテリアル 秀熊 佑哉
フクビ化学工業 成沢 良輔

1. 研究背景・目的

鋼橋の桁端部は湿度が高く、伸縮装置からの漏水により、腐食損傷の激しい部位である。そのため、端対傾構には錆にくい又は錆びない高防食性材料の適用が検討されている。さらに、端対傾構の剛性が高いことから、主桁が先に破壊されることが確認されている。本研究では、既設橋では腐食損傷した部材を高耐食性部材に取り換え、新設橋では高耐食性部材の適用を目的としており、その対傾構に高耐食性部材を用いた際の耐荷力性能を評価する。さらに、補修のしやすいガセツから破壊されるようなパラメーターを研究している。本研究では、端対傾構の地震時における破壊特性を解明するために正負交番試験を行った。

2. 正負交番試験方法

2-1 試験方法および試験体パラメーター

正負交番試験は 2000kN の万能試験機を用いて変位制御で破壊するまで試験を行った。地震を模擬した実験である。その為、試験体に対して引張と圧縮を交互にかけ徐々に荷重を大きくしていった。圧縮で試験体を一部破壊した後、引張域で破壊した。試験体パラメーターを表-1 に示す。本研究では高耐久性材として FRP を用いた。実験では上ガセツを鋼材、アングル材及び下ガセツに FRP を使用した。下ガセツの中央幅及び厚さをパラメーターとして実験を行った。

2-2 試験体

各試験体のガセツ断面を図 2-1(a)、ボルト連結後の試験体を図 2-1(b) に示す。FG18t は 9mm のガセツを二枚重ねた。図 2-2 (a) は試験体の変位計の位置、図 2-2 (b) は試験体のゲージ位置を表す。試験体は 100×100×13mm の L 字のアングル材にガセツプレートを連結させた。接合部は摩擦接合を使用し、軸力が 20% 低下することを想定して、205kN×120% の軸力を導入した。軸力導入後はボルトリラクゼーション計測を行った。引張試験体のゲージ、変位計の位置については、先行研究のデータを参考にした。

3. 正負交番試験結果

3.1 荷重—変位曲線と破壊特性

(1) FG14t-100

図 3.1(1) に示す荷重—変位曲線のように、圧縮 -145kN において一部破壊され、その後、引張 201kN で破壊した。FG14t-100t では大地震に相当する L2 (186kN) を超えた。また、破壊形態は図 3-2 (1) に示す。



図 1 地震時の主桁の損傷・補修

表-1 試験体パラメーター

試験体	FRPガセツプレート
FG14t-100	板厚14mm
FG14t-150	板厚14mm
FG14t-200	板厚14mm
FG18t-100	板厚18mm

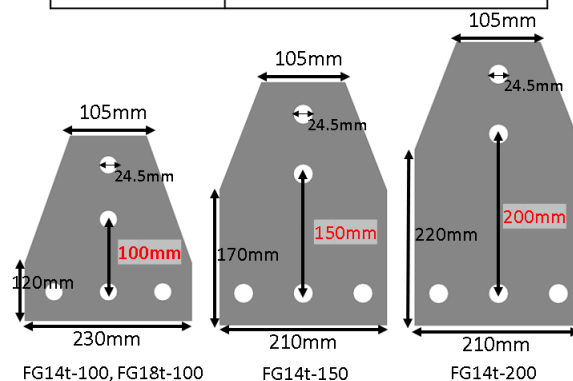


図 2-1 (a) ガセツ断面

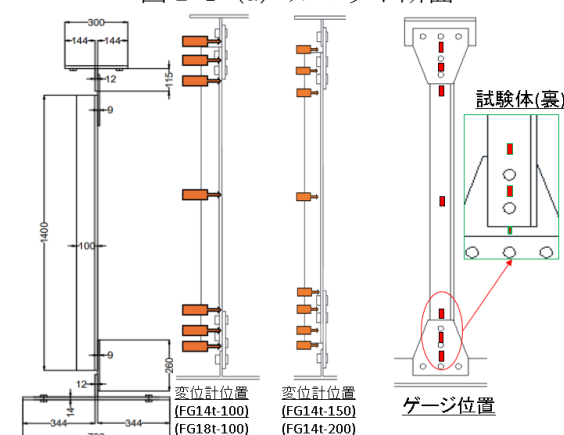


図 2-1 (b) 図 2-2 (a) 図 2-2 (b)
試験体

(2) FG14t-150

圧縮 -140kN において一部破壊され、その後、引張 171kN で破壊した。FG14t-150t で L2 (186kN) を越えなかった。また、破壊形態は図 3-2 (2) に示す

(3) FG14t-200

図 3.1(2)に示す荷重－変位曲線のように、圧縮 -143kN において一部破壊され、その後、引張 171kN で破壊した。三つの試験体中で最も引張耐荷力が低い。FG14t-200 では L2(186kN) を越えなかった。また、破壊形態は図 3-2(3)に示す。また、破壊形態は図 3-2(4)に示す。ガセット中央の面積を大きくするほど引張最大荷重が落ちることが確認できた。一方、圧縮耐力に目立った違いは見られない。FG14t-150 と FG14t-200 では破壊される荷重変位はほぼ同じだが FG14t-200t のほうが荷重に対して粘る。

(4) FG18t-100

圧縮 -174kN において一部破壊され、その後、引張 181kN で破壊した。FG14t-200 では L2(186kN) を越えなかったが、四つの試験体の中で最も大きな圧縮耐力を確認できた。

3.2 面内変位

FG14t-100, FG14t-150, FG14t-200, FG18t-100 の各荷重における面内変位を図 3.3 に示す。FG14t-100t は横方向に 19mm をとり、FG14t-150 は 10mm, FG14t-200 は 16mm, FG18t-100 は 23mm の横方向変位をとった。4つの試験体は全てアングル材下部で破壊されており、面内変位も試験体の下部で大きくなる傾向が見える。

ガセットの中央幅を広げることが、試験体の面内変位にどのように関係するのかは未だに不明である。

4. まとめ

- 1) ガセット中央の面積を大きくするほど引張最大荷重が落ちることが確認できた。一方、圧縮耐力に目立った違いは見られない。
- 2) 4つの試験体はアングル材下部で破壊されており、面内変位も試験体の下部で大きくなる傾向が見える。

・ガセットで破壊できれば補修が容易だが、ガセットプレートから破壊される実験パラメーターは見つかっていない。

・ガセットをパラメーターとして実験を行っているが、同じパラメーターで実験を行っても同じ結果が得られるかわからない。まだまだ、実験を重ねる必要がある。

・今後、FRP 試験体の圧縮試験による耐荷力の解明を行い、FEM 解析によるモデル化を行う。

<参考文献>

- 1) 正負交番繰り返し載荷実験による地震動における FRP 端対傾構の耐荷力特性に関する研究。

濱崎匠音 2024.

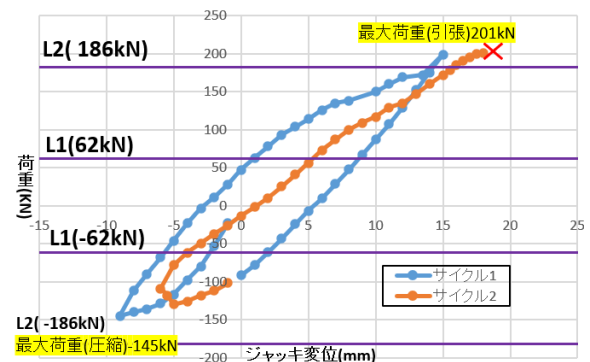


図 3-1(1) 荷重変位関係

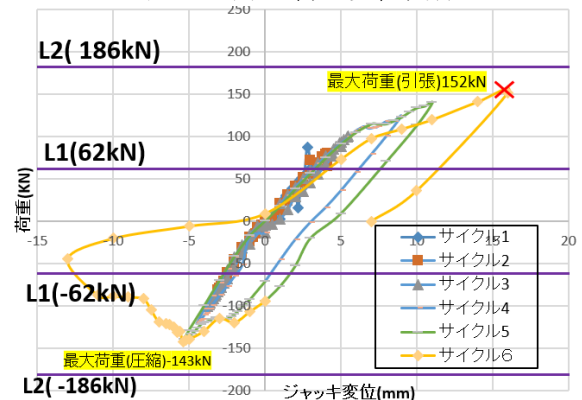


図 3-1(2) 荷重変位関係



図 3-2 (1)



図 3-2 (2)



図 3-2 (3)



図 3-2 (4)

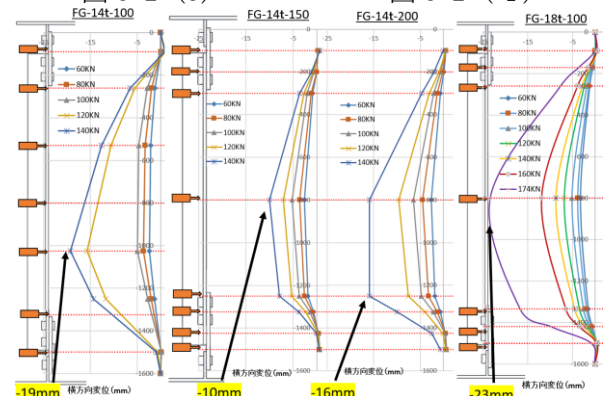


図 3.3 面内変位

ボルトキャップにおける接着剤の耐久性の検討

(株) IHI 矢ヶ部 菜月
琉球大学 淵脇 秀晃
琉球大学 下里 哲弘

1. 目的

鋼橋では、腐食による耐力低下は恒久的な問題となっており、特に角部が多いボルト・ナット部は角部の塗膜が薄くなりやすく、他の部位と比較して腐食劣化速度が速い傾向がある。一般的な対策として、ボルトキャップを設置することで大気・水分・塩分等の遮断を行い防食している事例が多い。ボルトキャップを設置後 23 年間経過した事例¹⁾では、高力ボルトの防食性を維持し、有色型のキャップ素材や使用している接着材の高耐久性も維持している状態を確認している。最近では、施工後のボルト部の目視確認ができるように、透明型のボルトキャップが開発されている²⁾。透明型ボルトキャップは実橋梁にて 5 年間防食機能が維持される³⁾ことが検証されている。一方で、ボルトキャップは、図 1 の断面図に示す「つば」に接着剤を付ける方法で鋼材部に設置される。つば部のみ接着させる手法の場合、つば部の接着剤の付着性がボルトキャップの各遮断効果を維持させるための重要な箇所となる。接着剤の付着性の低下は様々な原因が考えられる。例えば、日光が当たっている箇所において鋼材の輻射熱により接着剤の分解反応が促進される、紫外線による接着剤の分解反応が促進される、また、外気温の変化に対して鋼材および接着剤が膨張収縮することにより応力負荷が発生する、ボルトキャップ部に連続的に力学的な負荷がかかることにより付着性が低下する等が考えられる。そこで本研究は、外気温変化による付着性の低下に着目し、ボルト部にボルトキャップを設置した試験体について冷熱サイクル試験を実施し、ボルトキャップの剥離の有無を検証することで、ボルトキャップの付着耐久性を検証することを目的とする。

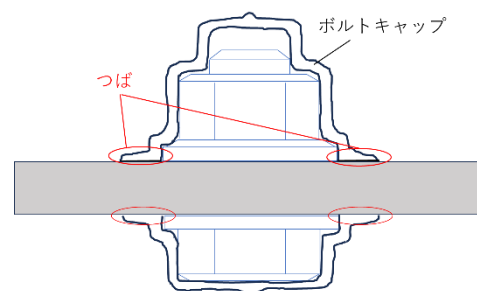


図 1. ボルトキャップ設置時のボルト・ナット部の断面図



図 2. 恒温恒湿槽に投入している試験体の写真

2. 試験方法

炭素鋼に M20 の六角ボルト・ナットを取り付け、フッ素樹脂塗料が上塗りとなる C-5 塗装系を両面に塗布した。ボルト・ナット部に、軟質塩化ビ

表 1. 試験体 No. とボルトキャップ-接着剤の組み合わせ

No.	ボルトキャップ種類	接着剤種類
1	透明	1 液型変成シリコンエポキシ
2	透明	1 液型変成シリコン
3	有色	1 液型変成シリコンエポキシ
4	有色	1 液型変成シリコン

表 2. 冷熱サイクル試験のサイクル条件

No.	温度 [°C]	相対湿度 [%RH]	時間 [Hr]
1	40	95	15
2	-20	制御無し	2
3	70	50	4
4	40	95	2

ニル製の M20 に合致する有色型および透明型ボルトキャップを、1 液型変成シリコンエポキシ樹脂系接着

キーワード ボルト, 防食, ボルトキャップ, 冷熱サイクル試験

連絡先 〒235-8510 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1 丁目

(株) IHI 技術開発本部 技術基盤センター 先進生産プロセス技術部 TEL045-759-2199

剤および1液型変成シリコーン系接着剤にて、ボルト部に設置した。試験体 No.とボルトキャップ、接着剤の種類の組み合わせは表1に示す。図2に示すように、各試験体はナット部分が上面となるように恒温恒湿槽に設置し、表2に示すサイクル条件（JIS K 6877を参照）にて冷熱サイクル試験を実施した。試験時の評価項目としては、ボルトキャップおよび接着剤の外観上の変化、指触によるボルトキャップ・接着剤の硬さの変化、ボルトキャップの塗装面からの剥離の有無の確認とした。

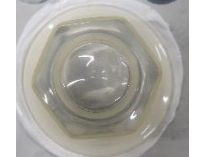
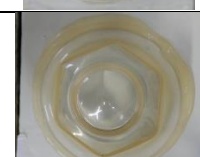
3. 結果

試験開始初期および、6, 12, 36 サイクル経過後の外観写真を表に示す。6 サイクル経過時にはいずれの評価項目に関しても変化は認められなかった。12 サイクル経過時には、透明型ボルトキャップおよび1液型変成シリコーン接着剤が黄変していることが確認できた。また、1液型変成シリコーンエポキシ樹脂系接着剤が初期と比較して硬化していることが確認できた。透明型ボルトキャップおよび1液型変成シリコーン接着剤が黄変した原因として、熱による添加物の劣化反応が起きている可能性があると考えられる。1液型変成シリコーンエポキシ樹脂系接着剤の硬化の要因は、エポキシ樹脂系の硬化反応が、高湿度下の高温環境に晒されたことにより、加速した可能性があると考えられる。36 サイクル経過後は、更なる黄変は認められた一方で、いずれの条件においてもボルトキャップの塗装面からの剥離が認められなかった。この結果から、温湿度が激しく変化する環境において接着剤の外観上の変化は認められるが、ボルトキャップに使用される接着剤の接着機能は維持されることを示した。

4. まとめ

ボルトキャップの接着剤について、外気温変化による材料の膨張収縮を再現するために冷熱サイクル試験を実施した結果、36 サイクル経過後においてボルトキャップの塗装面からの剥離はなく、健全な状態を維持していた。この結果から、温湿度が激しく変化する環境においてもボルトキャップに使用される接着剤の接着機能が維持される可能性を示すことができた。今後は本試験を継続実施すると同時に、紫外線等、接着剤の付着力低下につながる要因についてそれぞれ検討を進めていき、ボルトキャップ接着部の耐久性を検証していく。

表 3. 冷熱サイクル試験 サイクル数と各試験体の外観観察結果

サイクル数	No.			
	1	2	3	4
0				
6				
12				
36				

参考文献

- 1) 岩本達志, 今井学, 吉田利樹, 岩崎初美, 赤嶺健一: 鋼構造物ボルト部の防錆対策, 土木学会第 67 回学術講演会, I-160 pp319-320, 2012.
- 2) 岩本達志, 下里哲弘, 田井政行, 淵脇秀晃, 与那原飛侑, 清水隆: 透明型キャップ・つばのみ充填法による鋼製高力ボルトの防錆性能, 土木学会第 68 回年次学術講演会, I-390 pp779-780, 2013.
- 3) 日本鋼構造協会 鋼橋の腐食・耐久性研究部会: 鋼橋の頑強な防食技術および合理的な腐食診断と補修技術, 日本鋼構造協会テクニカルレポート, No.132, 2023.

高力ボルト継手近傍母材部の局部腐食形状と継手耐力特性

琉球大学 ○小田脩斗, 下里哲弘, ムムタズヤシン

JFE エンジニアリング株式会社 田中裕明

1. 研究の背景・目的

鋼橋の劣化現象の一つは腐食であり、腐食により耐荷力の低下が懸念される。特に、高力ボルト継手近傍の母材局部腐食は継手耐力の低下に対して注意を要する。この腐食現象は、ボルト連結板周辺の母材部に、腐食生成物の付着塩分及び降雨などによる濡れが他の部位より長くなる特徴により、局部的な腐食が発生する。本研究では、連結板周辺の母材の局部腐食形状をレーザー計測で分析し、その分析結果に基づき、局部減肉を模擬した試験体を用いた引張実験結果から局部減肉した母材の耐力特性を検証した。

2. レーザー計測

(1) 使用試験体

本研究では、腐食した実橋から採取した 29 体の試験片の腐食形状をレーザー計測した。計測前にワイヤブラシと紙やすりで浮きさびを除去した。

(2) レーザー計測方法

計測にはレーザースキャン計測器¹⁾を取り付けた XY 移動装置を使用した。計測範囲は X 軸 80mm, Y 軸 100mm とし、計測ピッチは X 軸 1mm, Y 軸 5mm とした。

(2) 計測結果

レーザースキャンの計測結果を図 1 に示す。図より、3 つの減肉タイプに分類した。タイプ A は腐食なし、タイプ B は長手方向に短い幅の局部減肉、タイプ C は長手方向に広く減肉しており、腐食幅が 20mm 以上で分類した。

3 引張試験

(1) 腐食模擬使用試験体

前述のレーザー計測の結果を基に、タイプ A（腐食なし）、タイプ B（局部減肉）、タイプ C（全体的減肉）の 3 種類の腐食模擬試験体を製作した。図 2 に試験体を示し、表 1 に試験パラメーターを示す。

(2) 実験方法

実験では、ひずみゲージによるひずみ計測と試験体の評点間距離 200mm の伸びを計測した。試験は 2000kN 万能試験機を用いて実施した。

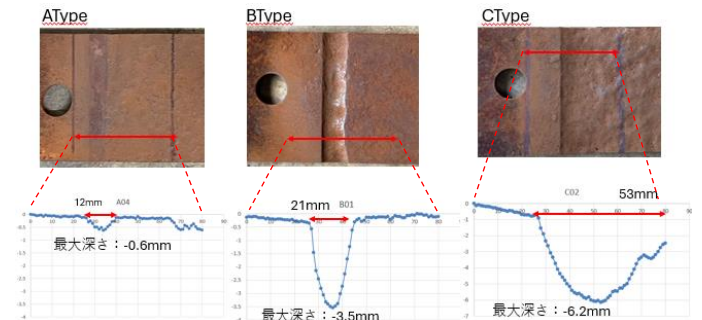


図 1. レーザー計測結果

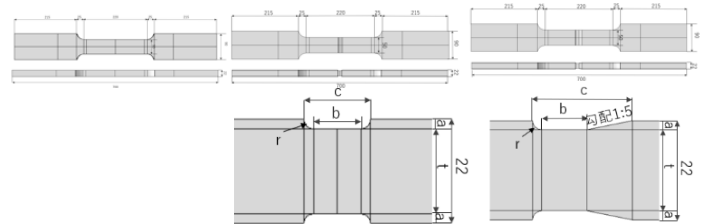


図 2. 引張試験モデル

表 1. 試験体パラメーター

	母材厚 (mm)	溝形状						母材厚 (mm)	溝形状				
		深さ a(mm)	底辺幅 b(mm)	全幅 c(mm)	R加工半径 r(mm)	溝部板厚 t(mm)			深さ a(mm)	底辺幅 b(mm)	全幅 c(mm)	R加工半径 r(mm)	溝部板厚 t(mm)
TypeA	22	0	0	0	0	0	TypeC-r2a2-10	22	2	10	22	2	18
TypeB-r2-0	22	2	0	4	2	18	TypeC-r2a2-20	22	2	20	32	2	18
TypeB-r2-10	22	2	10	14	2	18	TypeC-r2a2-50	22	2	50	62	2	18
TypeB-r2-20	22	2	20	24	2	18	TypeC-r4a4-10	22	4	10	34	4	14
TypeB-r2-50	22	2	50	54	2	18	TypeC-r4a4-20	22	4	20	44	4	14
TypeB-r4-0	22	4	0	8	4	14	TypeC-r4a4-50	22	4	50	74	4	14
TypeB-r4-10	22	4	10	18	4	14	TypeC-r6a6-10	22	6	10	46	6	10
TypeB-r4-20	22	4	20	28	4	14	TypeC-r6a6-20	22	6	20	56	6	10
TypeB-r4-50	22	4	50	58	4	14	TypeC-r6a6-50	22	6	50	86	6	10
TypeB-r6-0	22	6	0	12	6	10							
TypeB-r6-10	22	6	10	22	6	10							
TypeB-r6-20	22	6	20	32	6	10							
TypeB-r6-50	22	6	50	62	6	10							

キーワード 高力ボルト, 形状特性, 継手耐力, レーザー計測, 引張試験

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 E-mail: e215544@eve.u-ryukyu.ac.jp

(3) 実験結果

図3に荷重-変位と応力-ひずみの関係を示す。腐食減肉を模擬したタイプBとCでは、腐食なしのタイプAより減肉深さが大きくなるにつれて最大荷重低下した。最大変位は微小の減肉でも半分以上低下した。降伏応力は溝の深さが大きいほど上昇する結果となり、これは切欠き強化現象による影響と考えられる。

写真1に試験体破断状況を示す。減肉部を有するタイプBとC、減肉のないタイプAを比較すると、タイプBとCはタイプAより伸び性能が低く減肉部で破断していることがわかる。

減肉量による伸びと絞りの関係について、減肉の溝の深さ(a)、幅(b)、断面積($a \times b$)に着目して整理した結果を図4に示す。この図より、溝の深さが小さいほど伸びと絞りが大きくなり、溝の底辺幅が大きくなるほど伸びが大きくなるが、絞りはタイプBとCで異なる傾向を示した。また、溝の断面積($a \times b$)が大きくなると伸びは大きくなり、絞りは小さくなった。

また、図3に示すとおり、同じ溝深さの場合、局部的に腐食減肉したタイプBより全体的に腐食減肉したタイプCのほうが変位が大きい傾向となった。この結果より局部減肉から全体的減肉にすることで、伸び性能を上げることができ、一時的に継手耐力も上げることができると考えられる。

4. まとめと今後の課題

以下に本実験で得られた知見を示す。

- 1) レーザー計測によって局部的な減肉と全体的な減肉がある試験体の腐食形状を確認できた。
- 2) レーザー計測結果をもとに作成した試験体で引張試験を行った結果、母材の腐食減肉形状によっては、最大荷重と最大変位が低下する一方、降伏応力が上昇する傾向を示すことが分かった。
- 3) 減肉タイプBとCでは減肉による伸びと絞りの関係を定性的に評価できた。
- 4) タイプB（局部減肉）よりもタイプC（全体的減肉）のほうが最大変位が大きくなる傾向を示した。

今後、本研究で用いた模擬試験体の耐力力をFEM解析で検証するとともに、ボルト継手を有する試験体でも同様な実験を行い、継手耐力を検証する予定である。

参考文献

- 1) 照屋博紀：デジタル撮影による点群データを用いた腐食鋼板の減肉量比較精度評価，第13回 土木学会西部支部沖縄会 技術研究発表会，pp86-87, 2024。

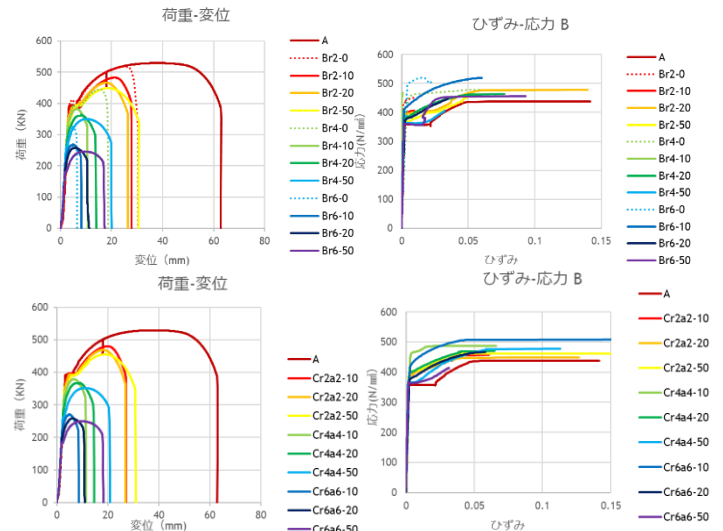


図3.引張試験結果



写真1.試験体破断状況

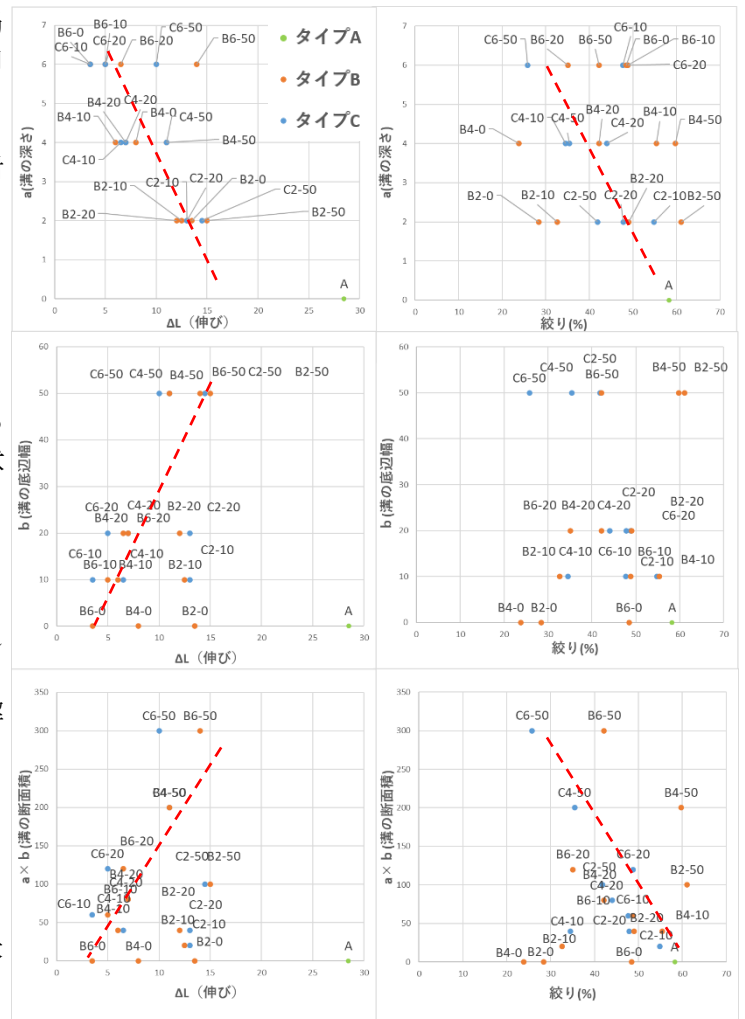


図4. 減肉量による伸びと絞りのグラフ

Session 3 環境保全・情報技術

福地ダム上流洪水吐法面における 災害復旧の対応

我喜屋 靖¹・砂川 尚也¹

¹内閣府沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 流域治水課 (〒905-0011 沖縄県名護市大北3-19-8)

2023年8月、台風6号の断続的な降雨の影響により、福地ダム上流洪水吐において法面崩壊が発生した。洪水吐流路内には崩壊土砂が堆積したため洪水調節機能の低下が懸念されたとともに、崩壊頭部が県道と近接している状況もあり、迅速な応急復旧が求められた。また、洪水調節機能の早期回復（流路内の崩壊土砂撤去）や、災害復旧に必要な予算（災害復旧事業費）の確保及び工事の発注手続きに関しては、被災から約3.5ヶ月で行った。

本稿では法面崩壊から災害復旧に至るこれまでの対応を紹介する。併せて、現在施工中の災害復旧工事における新技術の導入やDXの取組についても紹介する。

キーワード 災害対応，法面崩壊，応急復旧，コスト削減

1. はじめに

(1) 2023年台風第6号の特徴

7月28日にフィリピンの東で発生した台風第6号は、大型で非常に強い勢力に発達し、8月2日朝に沖縄本島に最接近した。沖縄近海で西北西に進路をとっていた台風第6号だったが、3日には一変して進路を東寄りに変えたことで、約7日間にわたって沖縄本島付近に留まり続けた。

県内各地では暴風雨による冠水や土砂崩れ、停電等の被害が頻発し、8月6日には本島北部に線状降水帯が発生した。国管理ダムである福地ダムの流域では、1日の降り始めから7日までの累加雨量が695mmを記録した。
(図-1)

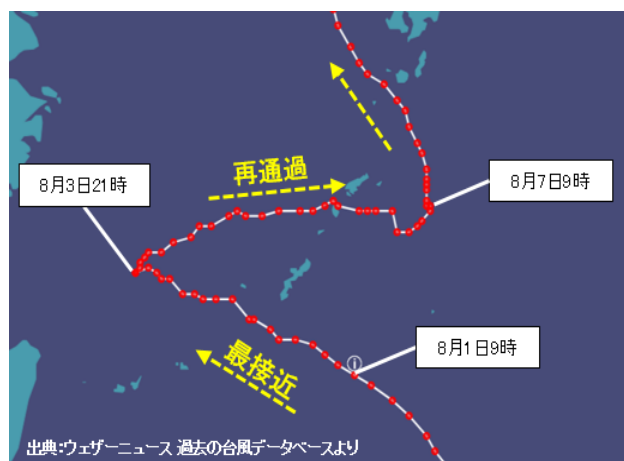


図-1 台風第6号経路図（沖縄近海を抜粋）

(2) 発災：福地ダム上流洪水吐右岸の法面崩壊

風雨が弱まりつつあった8月6日16時頃、巡視にあたっていた支援技術員が上流洪水吐右岸の法面崩壊を確認した。右岸法面が管理用道路3本と付属施設を巻き込んで崩壊しており、延長77m、幅62mの範囲にわたっていた。

洪水吐流路内には流れ込んできた土砂が大量に堆積し、ダムの洪水調節機能の低下が懸念された。また、路面排水の流末が欠損した影響で、排水が直接崩壊箇所に流れ込んでいる状況であった。そのため、関係機関との連携や堆積土撤去の応急復旧などに、迅速な対応が求められた。
(図-2a、図-2b)



図-2a 上流洪水吐右岸の法面崩壊箇所

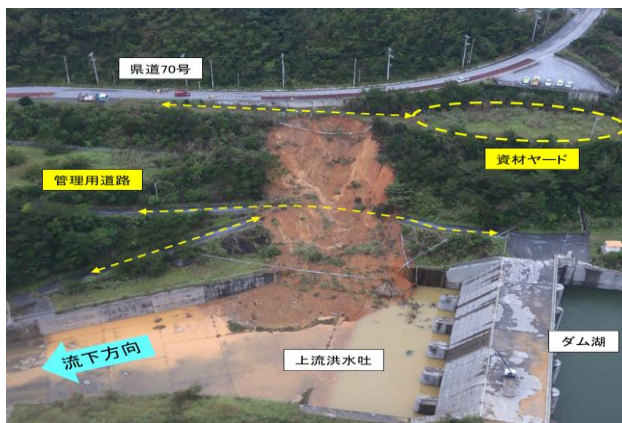


図-2b 法面崩壊の状況

(3) 崩壊要因の推察

福地ダム上流洪水吐は、米軍から工事を引き継いだ1972年当時、日本の基準に適合した設計洪水流量を流すために、新たな洪水吐としてダム上流端に設置された。その工事にあわせて県道の付替工事が行われた際に、一部の沢地形を盛土して工事用道路も造成しており、今回の崩壊箇所がそれにあたる。

過去の施工状況を踏まえた結果、台風の長雨によって元々集水地形であった当該箇所では、沢からの浸透水が集中しやすい状況であったとともに、県道からの路面排水が流れ込み、地下水位が上昇して盛土内の間隙水圧が大きくなったことで、沢と盛土との境界層付近から崩壊に至ったものと推察される。(図-3)



図-3 上流洪水吐設置時（1972年）の崩壊箇所の状況

2. 初動対応

(1) 関係機関との連絡調整

直ちに本局へ災害報告（第1報）を行うとともに、道路管理者の県北部土木事務所や、地元自治体である東村とのホットラインを確立をした。また、県道70号線の通行規制にあたっては、これまでの台風対応で土木事務所

の資機材が不足していたこともあり、当事務所から備品を貸出で、連携しながら規制対応にあたった。(図-4)

被災の翌日には関係機関との合同現地確認を実施し、県道の路面や擁壁に変異が見られなかったこと、監視体制を確保したことなどから、片側通行規制に切り替えた。また、当局の防災ヘリに自治体職員を同乗させ、上空からも被災状況を確認するとともに、当該箇所周辺を撮影した映像データを提供した。



図-4 県道70号線の規制状況

(2) 関連基礎資料の収集

今後の対応を進めるうえで必要となる基礎資料として、局関係課の協力のもと、国土地理院から崩壊前の現地盤がわかる航空レーザ測量データを提供していただいた。県北部土木事務所からは、県道70号線の工事図面や直近の地質データ等の関連資料を提供していただいた。

(3) 現場対応・監視計測体制

崩壊部への雨水流入を抑制するため、シートによる養生や土嚢を用いた路面排水の流入抑制対応を行った。

監視体制としては、崩壊部に変状が発生した際に迅速に対応できるよう、被災から数日は24時間体制で目視監視を行い、徐々にネットワークカメラや自動観測型地盤伸縮計等による遠隔監視に移行して、職員の負担軽減を図った。また、当該箇所では電柱も被災し商用電源が消失したため、自家発電機やソーラー発電機を設置して対応した。さらに現場作業員の安全面も考慮して、地盤伸縮計の計測値が閾値を超えた際には、パトランプとサイレンが連動し、携帯メールにも通知が届くよう整備した。

法面挙動の観測では、県道の擁壁や崩壊箇所の頭部で光波測量や鉅間計測、地下水位・歪観測を実施し、挙動解析用のデータを積み上げていった。また、計測用のチェックリストを作成し、現場担当者以外の者でも対応ができるよう、更なる職員の負担軽減を図った。(図-5)

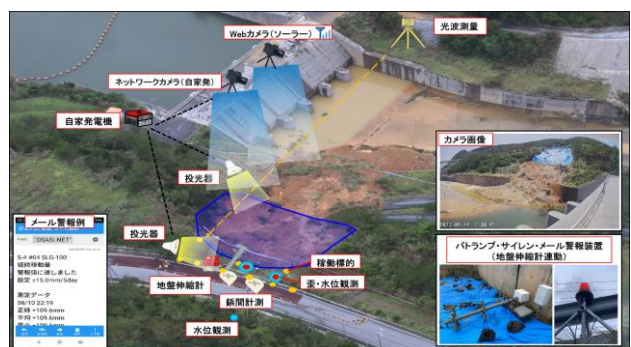


図-5 監視・計測体制

(4) 関係者間の進捗管理

当事務所では下記の2つの資料を用いて災害対応の作業状況を管理した。

a) 災害対応ミーティング様式 (図-6左)

初動対応～応急復旧の完了まで、毎日1回～2回実施していたミーティングで使用した。局・事務所の関係者全員で昨日までの実施状況を書き込み、当日と明日の具体的な作業内容を共有する。各項目の暫定方針も併せて記入しているため、実際の対応に沿って修正するだけで現時点の履行状況や変更内容についての把握が容易になる。

b) 進捗管理様式 (図-6右)

初動対応・応急復旧・災害申請・恒久復旧工事等における必要な項目を抽出分類して、各項目に対応する関係課・受注業者・概算金額・目標期日・対応状況等を一覧で整理した。目標期日を入力するとスケジュール表が自動着色されるように設定したことで、各担当項目の目処や関係する作業の進捗状況が一目でわかるようになった。また、項目ごとに各保存先フォルダをリンクさせることで、データの検索が容易となり、保存忘れも防止できた。

このような取組で、災害対応が初めての職員でも他部署の進捗状況や作業目処の把握がスムーズに行えていたと感じた。



図-6 左：災害対応ミーティング様式 右：進捗管理表

3. 応急復旧対応

流路内に崩壊土砂が大量に堆積し、洪水調節機能の低下が懸念されたとともに、崩壊頭部が県道と近接していた状況から迅速な応急復旧が求められたため、契約中の維持補修工事に対応した。前段のように必要な作業項目の抽出と進捗状況を共有していたことで、初動対応から崩壊土の撤去、2次崩壊土対策の完了まで約1.5ヶ月で実施できた。土砂撤去作業の流れを下記に示す。(図-7)

(1) 崩壊土砂撤去仮設計画

① 初動対応

シート被膜による法面保護対策と法面挙動の監視体制強化

② 赤土砂等流出防止対策

スイッチバック道路を整備し、減勢池を活用した沈砂池を設置（滞留水をポンプで汲みあげて仮設足場から貯水池へ排水）、流路の崩壊土周りに土嚢堤を設置

③ 土捨て場整備

伐採、除草、整地（雨水は貯水池へ誘導）

(2) 崩壊土砂撤去計画

④ 工事用道路整備

擁壁平面を敷鉄板養生、重機用斜路整備、支障物撤去

⑤ 流路内土砂撤去

擁壁の高さが約8mあるため、ロングアームのBHを擁壁上に設置して、小型BH数台を流路内に下ろし、リレー方式によって崩壊土砂を撤去

⑥ 2次崩壊土砂対策

崩壊法面底部のダム湖側に大型土嚢を4～5段設置し、流路内への更なる崩壊土砂の流出を防止

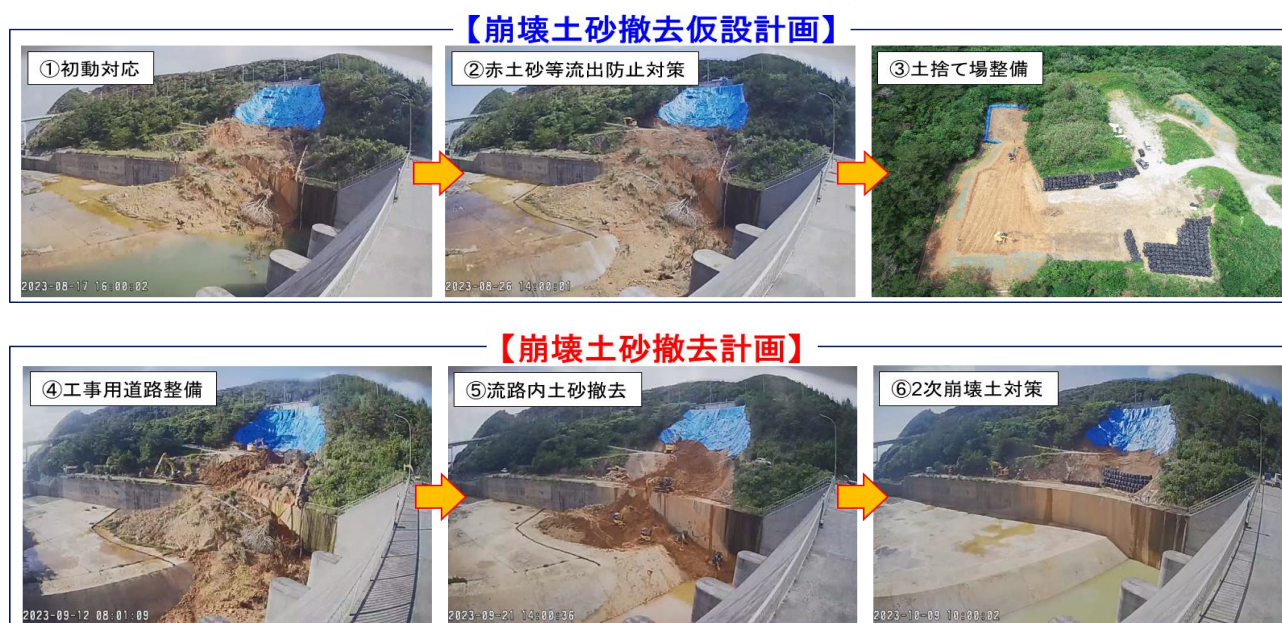


図-7 各応急復旧対応の現場状況

4. 災害申請

災害申請は恒久復旧工事に向けた予算確保のため、応急復旧と同時に進めた。（事務所では26年ぶりの申請）

恒久対策案の検討のため、発災後直ちに測量と設計を指示して概算額の算出を行った。本局河川課とも密に調整を進め、9月19日に本省に災害申請書を提出（発災から約1.5ヶ月）11月1日に配分額通知と予算示達を受けることができた。（発災から約3ヶ月）

こちらも各作業項目の進捗を共有しながら進められたことがスムーズな手続きに繋がったと感じる。（表-1）

表-1 災害申請の各手続きと実施日

各手続き状況	災害発生 第1報 8月6日	最終報告提出 8月10日	現地調査 (書面確認) 本省確認 8月28日	災害申請書 提出 9月19日	採択箇所 事業費決定 10月13日	配分額決定 (案)提出 10月16日	配分額通知 11月1日	実施計画書 提出 11月1日	実施計画 承認・予算示達 11月1日
手続段階	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
組織名	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
財務本省									
国土交通本省									
各地方整備局 北海道開発局									
各地方整備局 事務所 北海道開発局 開発建設部									
該当様式 添付資料	様式-1 申請書 等	様式-1 申請書 等	様式-1 申請書 等	様式-5 申請書 等	様式-5 申請書 等	様式-5 申請書 等	様式-5 申請書 等	様式-5 申請書 等	様式-5 申請書 等

5. 恒久対策の比較検討

(1) 設定条件

恒久対策の条件として、下記3点を設定した

- ◆災害復旧の原則に従い、原形復旧とする
- ◆復旧対象は、機能・利用形態・重要性等を勘案し、管理用道路3本とする
- ◆崩壊土砂は水分を含むと急激に軟化することから、盛土材は良質な現場発生土や購入土等を利用する

(2) 恒久対策案の比較

上記の検討条件をもとに、3つの比較案から選定した

- A) 「補強盛土案」 崩壊法面全体を補強盛土で覆い、被災前の法面形状に復元する
- B) 「補強盛土+補強土壁案」 復旧対象区間だけ補強盛土と補強土壁を設置し、その他の法面区間は崩壊土砂及び不陸土塊を除去し、表面保護対策を行う
- C) 「通常盛土案」 法面区間が県道と流路に挟まれており、勾配を寝かせることができず、復旧対象である上段の管理用道路が設置できないため、対象外。

以上からA案とB案を比較し、経済性・施工性・景観性の観点からA案の全面補強盛土案を選定した。（表-2）

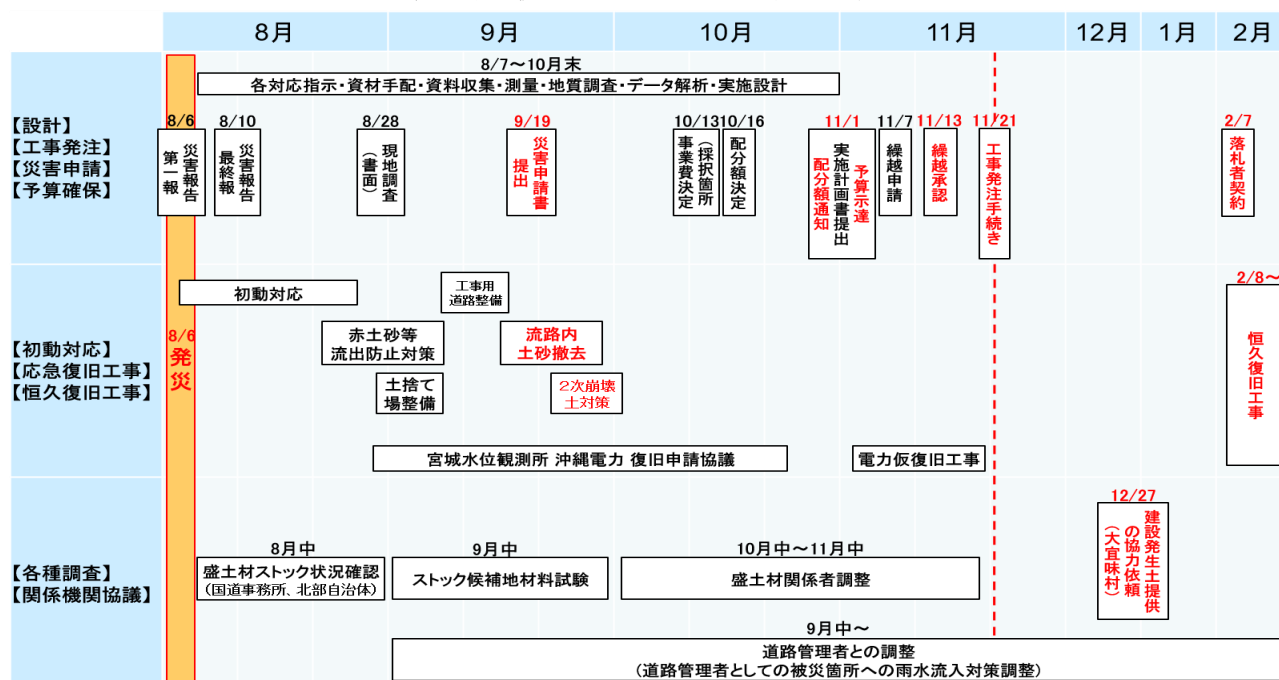
表-2 恒久対策案（原形復旧）の比較

等断面、幅30mを想定	
断面図	等断面、幅30mを想定
主要工種	主要工種
管理用道路① : 補強盛土工 中間法面 : 補強盛土工 管理用道路②③ : 補強盛土工 仮設工 : 施工時モルタル吹付+ロックボルト	管理用道路① : 補強土壁工 中間法面 : 植生マット工+法面保護工(左右法面) 管理用道路②③ : 補強盛土工 仮設工 : 仮設杭工
特徴	特徴
被災前の盛土形状に原形復旧する案 ①崩壊土除去、②地下排水、③補強盛土、④表面排水等を行い、原形に復旧する。 法面全体に適切に補強盛土を配置することで、幅の広い盛土材料に対応できる。 ・原形復旧なので、第2案に比較して景観性が良い。 ・経済性・施工性に優れている。 ・最下段法面より法面上方に連続して施工できるため施工性が良い。	一部を除き崩壊後の法面形状で復旧する案 ①崩壊土除去、②地下排水、③補強盛土、④補強土壁設置、⑤表面排水、⑥中間法面の風化防止 ※県道部の仮設時補強等を行う。 ・左右法面への張り付け部の法面保護も新規に行う必要がある。 ・盛土上段の施工後、施工位置を最下段法面からの施工となるため、少し施工性が劣る。
概算工事費	概算工事費
主項目 : 土工、補強盛土、植生マット工、地下水排除工 残土は全処分(搬出)としている。 直接工事費 : 109,226,307円 総工事費 : 192,016,000円	主項目 : 土工、補強盛土工、補強土壁工、植生マット工、地下水排除工、法面保護工 残土は全処分(搬出)としている。 直接工事費 : 170,955,136円 総工事費 : 298,034,000円
評価	評価
○ 経済性施工性に優れている	×

6. 発災から恒久復旧工事までの時系列

発災から現場対応、災害申請、関係機関協議など恒久復旧工事に至るまでの状況を時系列にまとめた。(表-3)

表-3 恒久復旧工事に至るまでの各対応の時系列



7. 恒久復旧工事における特徴的な取組

現在、恒久復旧工事では補強盛土工等を行っていて、年度内の完成を目指している。本工事の中でも特徴的な取組を以下に示す。

(1) コスト縮減

詳細設計を進めた結果、最上段の弱部の補強として行う仮設法面対策工は、概略設計時の工法から変更が必要となり、想定より工事費が増大することがわかった。そのため、様々なコスト縮減の可能性を探った結果、補強盛土で使用される「ジオグリッド」を活用する、新技術の「フィット筋工法」がコスト縮減やその他の事項に関しても適していると判断した。(表-4)

表-4 仮設法面対策工の比較

工法	当初案 吹付法枠工+鉄筋挿入工	変更 フィット筋工法
施工写真		
コスト	2,200万円	550万円
安定性	盛土との一体性が低下する懸念あり	一体性に問題はない
地下水の排水性能	普通	良い
全面盛土との施工性	悪い	良い

(2) DX : BIM/CIMを活用した施工手順の見える化

本工事は複雑な掘削形状だが、被災箇所の頭部が県道と近接し、さらに崩壊法面上での作業となるため、施工にあたっては慎重な対応が求められた。そのため、本工事においてはDXの取組として3次元BIM/CIMモデルを活用した作業手順の確認や仮設計画、安全対策等の検討を行った。

また、施工完了後には3次元データに属性情報を付与することで、今後の維持管理においても効率的な点検が可能である。(図-8)



図-8 3次元BIM/CIMモデル（詳細度:300）

8. 災害対応を経験して

(1) まとめ

大規模な法面崩壊は、再開発時に沢地形を盛土した箇所が、長雨の影響で盛土内の地下水位が上昇したことによって、地山との境界層付近から崩壊に至ったものと推察される。

また、当事務所では大規模な災害対応は初めてのケースであったが、事務所全体で取り組み、発災から工事発注手続きまで約3.5ヶ月で実施できた。

恒久対策は比較検討の結果から補強盛土案とし、コスト縮減として新技術の「フィット筋工法」の採用や、BIM/CIMを活用した施工手順の確認を行い、工夫しながら復旧工事を進めているところである。

(2) 今後に向けて

当事務所ではダム管理がメインで大きな土木工事も少ない。特に若手職員は今回の一連の対応を踏まえ、現場で復旧していく状況を把握しながら現場監理の一部を経験することで、スキルの向上に繋がられる。そのため、この機会を若手の現場経験のフィールドとしても活用していきたい。また、進捗状況を広報誌やSNS等で発信することで、広報業務の経験も積めると考えている。

さらに、災害発生から恒久復旧工事までを職員同士で振り返り、好事例や課題について意見交換を行うことで、今後に類似事例が発生しても迅速に対応ができるよう、ノウハウの技術継承を行っていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 治水課：直轄河川災害復旧事業の手引き，2023.
- 2) フィット筋工法技術研究会 HP <https://www.fitkin-k.com/>

国道331、332号ウェルカムロードにおける 特定外来生物ハヤトゲフシアリに対する防除について

沖縄総合事務局 南部国道事務所 管理第二課
○大石 ゆり，豊見山 直樹

2020年2月，国道331，332号の海側の歩道でハヤトゲフシアリの定着を確認した．本種は増殖率が著しく高いことに加え，在来のアリ類及び節足動物を積極的に捕食することから，在来の生態系を脅かす可能性が高いと判断され，同年11月，環境省は本種を特定外来生物に指定した．わずかな刺激で巣を簡単に移動させる性質や市販の毒餌を大して摂食しない観察結果を踏まえ，外来のアリ類に対して従来実施していた方法とは異なる方法で防除を実施した．本件は産官学が協力し，2024年5月に本種の抑え込みが成功するに至るまでの取組について報告する．

1. はじめに

生物多様性の保全は人々の暮らす環境の保持や生物資源を享受し続けることに不可欠であり，持続可能な社会を築くうえで欠かせない要素である．外来種の侵入による被害の例として固有種の駆逐や雑種の誕生，人身や家畜への咬傷被害等が挙げられ，それらは社会問題となっている．沖縄県は希少な固有種が多く，世界自然遺産に登録されている地域として生物多様性を守る不断努力が必要である．

一方，人や物資の移動，園芸，漁業などの人間の活動に伴い外来種は国内へ侵入また拡散しているのが現状である．この外来種問題について，国道管理者として適切な侵入対策，拡散対策をとり，国民に対し普及啓発を行い理解を得たい．

本件は，国道331，332号に侵入した外来種に対し，国道管理者として取り組んだ事項及び産官学で連携し抑え込みが成功するに至るまでの各関係機関の取組について報告する．

(1) 国道331，332号ウェルカムロードについて

国道331，332号は那覇空港を起点として市街地に接続することから，来訪者が空港から出て最初に見る道路景観であり，沖縄のウェルカムロードとして重要な路線である．以前は雑草等の繁茂により煩雑な印象が強く，健全性の低下した街路樹の発生や強風等での倒伏による道路安全性の低下が問題であった（図-1）．そこで2018年度から，道路交通の安全性

と快適性を高めるとともに，沿道と一体となった「沖縄への期待が高まる緑」として，道路景観の再生と更新を現在も推進中である（図-2）．

(2) ハヤトゲフシアリの侵入

ハヤトゲフシアリ（*Lepisiota frauenfeldi*）（以下，「本種」という．）は南ヨーロッパ原産であるが，人為



図-1 整備前のウェルカムロード



図-2 ウェルカムロードの整備イメージ

キーワード 道路，維持管理，防除，特定外来生物，生物多様性

連絡先 〒900-0001 沖縄県那覇市港町 2-8-14 E-mail : yuri.ooishi.f2p@ogb.cao.go.jp

的要因により分布を拡大し、地中海沿岸から中近東、マダガスカル、インド、オーストラリア、台湾などで生息が確認されている¹⁾。国内では2017年に愛知県及び東京都、2018年に大阪府と福岡県及び鹿児島県、2019年に兵庫県及び神奈川県、2020年に静岡県で侵入・定着が確認されている²⁾。

沖縄県では、2020年2月、環境省が実施した外来生物の定点モニタリング調査において、国道331、332号の海側の歩道約2kmにわたって本種の定着が初めて確認された。同年7月、環境省が実施した那覇新港でのヒアリ侵入モニタリング調査でも本種の定着が確認された⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

(3) 本種の生態

本種は体長2.5 - 4 mmほどの小型のアリで（図-3）、触角や脚が長く、日本産の種では見られない速度で行列を組んで活動する¹⁾。ヒアリ（*Solenopsis invicta*）のような人への直接的な被害はないが、アルゼンチンアリ（*Linepithema humile*）同様に多女王制でスーパーコロニーを形成し、増殖率が著しく高い¹⁾。分布を拡大させた場合、アルゼンチンアリのような強力な生態系攪乱者となる可能性がある¹⁾。本種と生態的に類似のアルゼンチンアリは、競争力・攻撃性が非常に高く、在来のアリの種数を著しく減少させることが知られ⁷⁾、また同じく本種も攻撃性が高く、在来のアリ類のみならず昆虫類、クモやヤスデなどの節足動物も積極的に餌にする点で在来の動物相への影響が懸念される¹⁾²⁾。一方でアブラムシやカイガラムシを強く保護し、そのために増殖したアブラムシ等により農作物や園芸植物、さらに自然植生にも影響があると考えられている¹⁾。

(4) 本種の評価

上田らの調査では、2018年に大阪府に定着した本種は2019年には複数の繁殖虫を生産するステージま



図-3 ハヤトゲフシアリ

写真提供：沖縄科学技術大学院大学（OIST）
OKEON美ら森プロジェクト

で個体数を増加させ、その他昆虫類の捕食や、アブラムシを保護する様子が観察されており、早期の防除の実施が望ましいことを言及している⁸⁾。

2020年11月、環境省は、本種が生態系に多大な影響を及ぼすおそれがあることから特定外来生物に指定し、飼育、移動、放出等を原則禁止とした⁹⁾。

(5) 外来のアリ類に対する従来の防除方法

本種の侵入以前から環境省らはヒアリ及びアルゼンチンアリに対して継続的に防除を実施している。先に特定外来生物に指定された2種の防除方法を参考として記載する。

a) ヒアリの防除方法

ヒアリは攻撃性が非常に高い上に重篤なアレルギー症状を引き起こす毒を持ち、人への直接的な被害があることから殺虫剤は即効性と遅効性を使い分ける。

アリを10個体以下発見した場合また侵入しているコンテナを特定できた場合などは、即効性のエアゾール式殺虫剤や燻蒸剤での殺虫を真っ先に行う。その後、遅効性設置型殺虫剤の設置と同時に誘引剤や粘着トラップでの採取、目視でモニタリング調査を実施し、生きたアリが残っていないか継続的に確認する¹⁰⁾。

b) アルゼンチンアリの防除方法

アルゼンチンアリは多女王制をとることから巣ごと殺虫するための方法をとる。

まず効果的かつ効率的に防除を進められるよう、巣の位置と行動圏を把握し、根絶処理前から定量的なモニタリングを実施する。

根絶処理はアリのライフサイクルに合わせて使い分け、採餌活動が活発な時期は毒餌（粒剤、液体剤、ペースト型、ジェル型）を利用した殺虫方法を用い、採餌活動が緩慢な時期は遅効性の液体型殺虫剤を巣口に流し込んだり、巣またはアリの通り道に浸透させるように散布する方法、エアゾール式殺虫剤で殺虫する方法を用いる。

また、営巣に向いている土嚢、木材、ブロックなどを取り除き、クラックや構造物の隙間はシーリング材などで隙間を埋めて、営巣できなくさせるのもひとつの手である。アルゼンチンアリは糖分に誘引されやすく、アブラムシやカイガラムシの甘露を餌資源として利用するため、その供給を断つために除草することも有効だ。アブラムシ等からの供給が減少することで毒餌への反応が良くなり、根絶処理をより効果的に出来るとされる⁷⁾。

(6) 本種を防除するうえでの課題

a) 国道331、332号の整備に関して生じた課題

本種を防除するうえでの課題として、植栽整備や

路面清掃等で外部へ持ち出した植栽や土、資材に女王アリが紛れ込んでいた場合、本種の分布を拡大させるおそれがあった。よって、分布拡大を防ぐために国道331、332号の植栽整備事業の計画を見直した。また、歩道のクラックや構造物の隙間をシーリング材など埋めるのは整備時期との兼ね合いのため難しく、巣に向いている場所の除去は出来なかった。さらに除草については利点よりも欠点が目立った。除草によりアブラムシ等を減少させるよりも、草木の持ち出しにより分布を広げる危険性の方が大きく、草木の処理については工夫する必要があった。

b) 従来の防除方法では対応しきれない本種の性質

本種の場合、前述した外来のアリ類2種と同じ防除方法は実施できない、もしくは困難であると判断し実施に至らなかった方法が多かった。

まずヒアリの防除方法である即効性殺虫剤による殺虫は、侵入前防除において簡易かつ安全性の高い方法として有効である。しかし、すでに本種は定着済みかつ地上に出ている本種の働きアリに対して使用しても、複数の女王アリを含むコロニー全体への殺虫は出来ないため効果は薄い。また、わずかな刺激で簡単に巣を移動させる性質を持つので、殺虫剤の使用がかえって分布を拡大させるおそれがあった。

次に、アルゼンチンアリの防除方法についても本種には当てはめられない部分があった。本種は市販の毒餌、特に乾燥した餌に対して反応が薄く、飽きやすい性質を持っていた。設置した当日は毒餌を採餌しても、翌日には採餌しないこともあった。ならびに液体型殺虫剤を巣や通り道に流し込む方法だが、本種は排水管やマンホール内部、歩道のクラックから地下深くに巣を広げていると推測され、巣全体に殺虫剤を散布することは困難に思われ、効率性に欠けていた。加えてその刺激に触発されて巣を移動させられるおそれがあった。

2. 産官学それぞれの取組

(1) 環境省沖縄奄美自然環境事務所の取組

2020年2月の本種の沖縄県内初確認直後から、県内ヒアリ監視体制の構築経験を活かした情報共有体制のもと、南部国道事務所、沖縄科学技術大学院大学（以下、「OIST」という。）、琉球大学、住化エンバイロメンタルサイエンス株式会社（以下、「SES」という。）、那覇市、沖縄県、在沖米陸軍らからなる役割分担に基づいた協働体制を整備し、根絶を目指す方針を共有した⁴⁾。また、防除にあたって各関係機関との調整を行った。

(2) 南部国道事務所の取組

2020年6月以降、OISTからの助言を受けて除草頻度の調整と除草後の草木の処理について変更した。除草は通常年3回（5月、9月、11月）だが、それを半年間隔の年2回に抑えた。加えて、根絶処理・モニタリング調査と除草作業を円滑に進めるため、それぞれの時期は重複しないようにOISTと調整した。また、除草後の草木の処理は、本種の拡散を防ぐためにその場に存置するか、ビニール袋に密封して焼却処分、もしくは殺虫剤を付近に漏らさないように閉じつつ袋全体に行き渡らせて噴霧するようにと助言を受けたため、袋の中で殺虫剤を噴きかけたうえで焼却処分を行った（図4、5）。草木をその場に存置した場合、水路に詰まり水はけを阻害するおそれがあり、また景観上好ましくないため不適とし実施しなかった。殺虫剤は人と家畜への毒性が比較的弱く、環境への残留性も少ないピレスロイド系殺虫剤を用い、OISTが作成した注意喚起のチラシを植栽維持業者に共有した。なお、当該チラシは環境省、自衛隊、米軍にも配布された。

2020年9月、国道331、332号の植栽整備事業の計画を環境省とOISTの3者で調整した。海側の整備を先んじて行う計画であったが、本種の分布していない中



図4 袋内の草木に殺虫剤を噴きかける様子



図5 殺虫済みの草木を焼却処分

中央分離帯及び山側の整備を進めるよう変更を行った（図-6,7）。

2022年1月、本種の侵入区域約2kmにわたって10枚の注意喚起看板を設置し、県民に対して注意喚起を行った（図-8,9）。看板は環境省と相談し作成したものであり、抑え込みが成功した現在は撤去されている。

(3) OISTの取組

2020年5月には根絶処理前の事前調査として、生態調査、分布調査（県内の広がりの確認）を行い防除計画を策定した。

2020年8月から毎月2回行われた根絶処理は、琉球

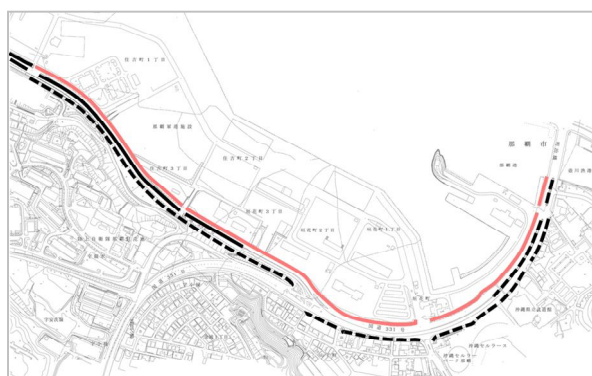


図-6 黒線：2020年までの整備範囲
赤線：2021～2023年の想定の整備範囲
点線：2024年までの想定の未整備範囲



図-8 注意喚起看板の設置箇所



図-10 画像左側：糖質毒餌
画像右側：タンパク質毒餌

大学及びSESと共同で開発した方法を実施する役割を担った。琉球大学とともに踏査し本種の巣口を確認後、糖質と昆虫成長阻害剤（以下、「IGR」という。）を含ませた脱脂綿と、ミールワームにIGRを注入して切り刻んだ餌をその巣口付近に2日間併設した（図-10）。

根絶処理後のモニタリング調査は那覇市と合同で実施した。餌への嗜好性が安定しない本種に対しては、ヒアリで一般に利用される誘引剤を用いた効果測定が有効ではない¹¹⁾。これに対しては、単位時間採取法を応用し、50m単位の一定区間を10分間吸虫管で採取する方法（見つけ採り）で調査を行った（図-11）。国道331、332号における全36区画のうち

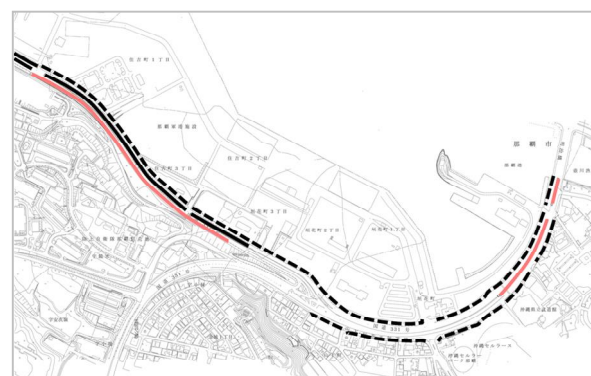


図-7 黒線：2020年までの整備範囲
赤線：2021～2023年の実際の整備範囲
点線：2024年までの実際の未整備範囲



図-9 注意喚起看板

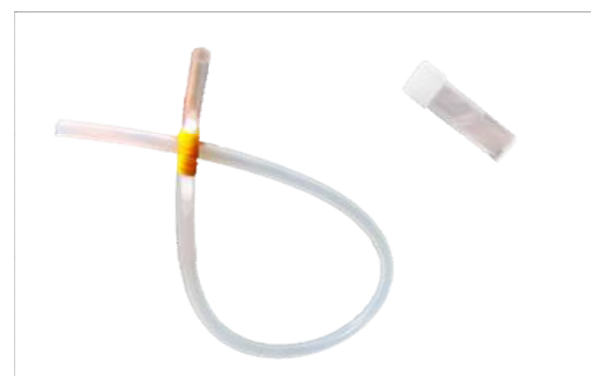


図-11 吸虫管

本種の高密度区域であった20区画は毎月調査し、全36区画は毎年7月に調査を行った。

(4) 琉球大学の取組

琉球大学昆虫学研究室はOIST及びSESと共同で本種に与える毒餌についての研究を主導した。当時研究中だった新技術を応用して、高い抑制効果が認められたIGRを添加した糖質毒餌及びタンパク質毒餌をそれぞれ作成し、2種類の毒餌を併設すると採餌効率が長く続くという結果を残した方法を採用して根絶処理を開始した¹¹⁾。

根絶処理を行うなか、この新技術とは反対に、本種の巣口付近に糖質とタンパク質を混合した固形の毒餌を1種類のみ設置したところ、設置当日は採餌しても翌日からは採餌しないことがしばしばあった。

この結果より、嗜好の変化が激しい本種に対応するためには、糖質毒餌とタンパク質毒餌の2種類を作成する必要があった。

(5) SESの取組

SESはOISTとの共同研究契約のもと、IGR（ピリプロキシフェン）を無償で提供し、餌に含むIGRの濃度やIGRを溶かす溶媒などの共同研究を行った。本種が採餌し、なおかつ根絶処理として十分なIGRの濃度として作成された毒餌の内容は以下のとおりである。これ以上の濃度の場合、採餌しないことがあった。

a) 糖質毒餌

糖質50%，IGR0.025%

b) タンパク質毒餌

ミールワームの重量に対しIGR0.1%

(6) 那覇市の取組

2020年8月から那覇市はOISTと合同で、毎月1回市販の粘着トラップによるモニタリング調査を実施した（図-12）。粘着トラップを本種の通りかかりそうな場所に両面テープで接着させ、3日間設置しアリ類を採取した。

加えて水道管工事の試掘において、OISTからの助



図-12 粘着トラップ

言を受け、除草後とコンクリート掘削後の殺虫処理を実施した。

(7) 沖縄県の取組

県内の未確認地域での早期発見のため、2020年から継続して誘引法及び吸引法、単位時間採取法により県内の主要港湾や空港周辺、港湾緑地でモニタリング調査を実施している。また沖縄県においても下水道管工事の試掘に際し、OISTからの助言を受け、除草後とコンクリート掘削後の殺虫処理を実施した。

2022年には県重点対策種に指定し、沖縄県として防除に向けた取り組みを推進するほか、本種を侵略性が懸念されるものの防除が成功する可能性がある種として県民に示した¹²⁾。

(8) 在沖米陸軍の取組

国道に隣接しているとして環境省からの情報提供を受け、2022年6月から軍港内のモニタリング調査を実施した。2022年8月からは那覇軍港内防除事業として同じく2種類の毒餌による防除を開始した。モニタリング調査は本種の高密度区域では毎月実施し、低密度区域含めた全区域では半年に一度実施した。

3. 結果

本種の分布について、防除開始前の2020年7月の時点では、国道331、332号における全36区画中26区画で本種が採取されていたが、同年8月より毒餌の設置を開始すると、2か月ほどで大幅な生息エリア縮小に成功した⁴⁾。翌年の2021年7月には全36区画中6区画のみの採取となり、2022年7月にはどの区画からも採取されず、現在もその状態が続いている¹³⁾。

本種の出現頻度については、根絶処理2か月後から急激に減少した。2021年の春から夏にかけて気温上昇に伴い一時的に出現頻度が増加したが、ピーク後は再び減少し、国道331、332号では2022年1月を最後に採取されていない（図-13）⁴⁾。本種以外のアリ類についてはアワテコヌカアリ（*Tapinoma*

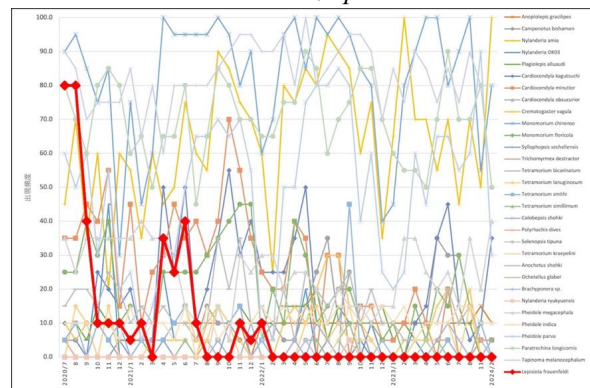


図-13 国道 331、332 号の各種アリ類の出現頻度
赤線：ハヤトゲフシアリの出現頻度

melanocephalum) とヒゲナガアメイロアリ (*Paratrechina longicornis*) に若干の影響が見られたが、本種以外で顕著に個体数を減少させた種は見られなかった。本種の巣口付近に毒餌を設置することで本種はほかのアリを排除し毒餌を独占する行動をとるため、他種のアリ類への影響を最小限に抑えることが出来た¹¹⁾。

国道331、332号以外の防除について、那覇新港では2022年11月から環境省の事業としてOISTが根絶処理とモニタリング調査を実施した結果、2021年8月以降本種は確認されていない¹³⁾。

在沖米陸軍管轄の那覇軍港でも、本種の検出数を順調に減少させており、検出なしを継続して記録するまでに低密度化している。2023年11月を最後に本種は検出されていない⁴⁾。

環境省は本種の防除において、最終発見から2年経過した段階で根絶とみなすとしている¹³⁾。県内では、国道331、332号と那覇新港、コンテナヤード含む港湾及び空港周辺地域など、ほとんどの地域で最終発見から2年継続して検出なしを記録しているため、本種の抑え込みに成功したと言える。

4. まとめ

2024年5月、産官学の連携した防除により本種の抑え込みに成功した。全国でも珍しい事例として環境省らと連名で2024年5月17日に抑え込み成功の旨の記者発表を行い、また同月23日には国道331、332号に新聞社とテレビ局を招き、各関係機関の取組を紹介することで、県民にこの事例を周知した。

記者発表後、南部国道事務所としては国道331、332号の海側の整備に着手し、除草頻度と草木の処理を通常に戻し実施するが、再びハヤトゲフシアリもしくは新たな外来種の侵入があった場合は環境省らと連携し対応していく所存である。

参考文献

- 1) 寺山守：ハヤトゲフシアリ (Browsing ant)：侵略的外来アリの侵入，埼玉動物通信，89：33-40，2017。
- 2) 寺山守：ハヤトゲフシ：新たな侵略的外来アリ，昆虫と自然，53(9)：4-7，2018。
- 3) 寺山守：緊迫する侵略的外来アリの侵入，ペストコントロール，196：11-16，2021。
- 4) 南部国道事務所：那覇市定着の特定外来生物ハヤトゲフシアリ防除についてー産官連携の取組により、抑え込みに成功ー，2024-05-17，<https://www.dc.ogb.go.jp/Nankoku/topix/r6kisyu/240517hayatoge/pdf/siryou.pdf>，(参照 2024-5-17)。
- 5) 環境省沖縄奄美自然環境事務所：(お知らせ) 沖縄県那覇市におけるハヤトゲフシアリの確認について，2020-07-20，https://kyushu.env.go.jp/okinawa/pre_2020/post_125.html，(参照 2024-6-14)。
- 6) 琉球新報：外来「ハヤトゲフシアリ」那覇で県内初確認 刺さないが高い侵略性，2020-07-21，<https://ryukyushimpo.jp/news/entry-1159727.html?fbclid=IwAR0TfZCcddm1lpAm0I-2eKb7Q>，(参照 2024 年 6 月 14 日)。
- 7) 環境省：アルゼンチンアリ防除の手引き，2009-03 (2013-07 改訂)。
- 8) 上田・村上：大阪府における侵略的外来種ハヤトゲフシアリ (ハチ目アリ科) の記録，昆虫 (ニューシリーズ)，25(1)，33-36，2022。
- 9) 環境省：外来生物法に基づき特定外来生物に指定されるハヤトゲフシ等 14 種類に係る同法施行規則の一部改正について，2020-10-30，<https://www.env.go.jp/press/108590.html>，(参照 2024-6-14)。
- 10) 沖縄県：沖縄県ヒアリ対策総合マニュアル (Ver.1.0)，2020-02。
- 11) 琉球大学：環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 4-1904 外来アリ類をモデルとした侵略的外来生物管理体系の構築，2022-05。
- 12) 沖縄県：沖縄県外来種対策行動計画に基づく ハヤトゲフシアリ 防除計画，2022-03。
- 13) 沖縄奄美自然環境事務所：令和 4 年度沖縄島におけるハヤトゲフシアリ初期防除業務 報告書，2023-05。

沖縄管内のブルーカーボン形成及び活用方策の検討

内閣府 沖縄総合事務局 開発建設部 港湾計画課 國場 幸恒
○ 小野木 佑徳

1. はじめに

2020年、我が国は「2050年カーボンニュートラル（CN）」を宣言し、2021年には、「2030年度に、温室効果ガスを2013年度から46パーセント削減することを目指す」ことを表明した。カーボンニュートラルとは、社会全体として温室効果ガス排出量と吸収量の差し引きがゼロである状態をいう。温室効果ガス削減のため、主要エネルギーを化石燃料から水素・アンモニアや太陽光等の脱炭素エネルギーに転換するなど、技術開発が進められている。しかし、排出量を完全にゼロにすることは困難であることから、解決の一端を担う吸収源として、2009年の国連環境計画（UNEP）中で、海洋生態系に取り込まれ、土壌等に蓄積される炭素がブルーカーボン（以下、BC）と命名され、注目されている。国土交通省は2022年、「命を育むみなとのブルーインフラ拡大プロジェクト」を発表し、藻場・干潟及び生物共生型機能を携えた港湾構造物をブルーインフラと位置付け、海洋生態系の保全・再生・創出の拡大に向けた環境整備等の取組の検討を進めており、沖縄においても藻場・干潟周辺の海岸保全施設などのハード整備と一体とした取組が求められている。

沖縄は、サンゴ礁域内側の浅海域に、大型藻類や海草が濃密で広大な群落を形成している藻場が多く見られる。一方、日本本土と異なる亜熱帯気候であり、生態系の構成種や特性も異なることから、現地調査による知見収集が重要視されるものの、詳細な現地調査が実施されている事例は少ない。特に、BC形成に資する海岸保全施設整備の方向性を示すう

で、海岸保全施設とBC生態系の生育状況との関係性を明らかにする必要がある。

以上から、BC形成を推進するための有用な知見を得ることを目的に、BC高ポテンシャル区域と選定した金武湾港における藻場生育状況調査を実施した。本論では、その調査成果と併せ、今後の海岸保全施設におけるBC形成に向けた方策をとりまとめた。

2. BC生態系について

BC生態系は、海草、海藻、干潟、マングローブの計4つが認識されている。各特性は以下のとおりである。

(1) 海草

海中で根をはり、地下茎による栄養繁殖及び花を咲かせ、種子によって繁殖する種子植物であり、内海・内湾の砂泥域の浅い所に生息する。（代表例：リュウキュウスガモ、アマモ）

(2) 海藻

孢子によって繁殖する藻類であり、主に岩礁域に生息する。根を有しておらず、土壌中に炭素を固定化することは難しいが、炭素を吸収した流れ藻が深海に堆積していくことで、大気と海の循環から外れ、炭素が貯留される。（代表例：ガラモ、コンブ、ワカメ）

(3) 干潟

干潮時に現れる砂や泥が堆積した勾配が緩やかな潮間帯の地形をいう。砂泥底の表面に着床する珪藻類である底生藻類が、光合成により炭素を土壌中へ貯留する。

(4) マングローブ

亜熱帯林の一種であり、熱帯、亜熱帯の潮汐干潟に生育する。国内では、鹿児島以南に分布する。

3. BC生態系の現地調査方法の検討

(1) 調査区域の検討

調査区域の検討にあたり考慮した、海岸沿岸域での選定条件及び整理方法を表-1に示す。各港湾区域における水深、底質、海岸保全施設からの藻場分布状況、近接する海岸保全施設の構造から点数別に精



図-1 BC生態系によるCO₂吸収の仕組み¹⁾

キーワード ブルーカーボン生態系、脱炭素化、藻場造成

連絡先 〒900-0006 沖縄県那覇市おもろまち 2-1-1

内閣府 沖縄総合事務局 開発建設部 港湾計画課 Email : yuutoku.onogi.v2u@ogb.cao.go.jp

表-1 藻場の高ポテンシャル区域選定条件

区分	整理項目・方法	海草の選定条件	海藻の選定条件
水深	日本海洋データセンターの500mメッシュ水深データから抽出	1～5 m：2点 6～10m：1点	1～5 m：2点 6～10m：1点
底質	平良港：「気候変動適応計画推進のための浅海域生態系現況把握調査業務」（環境省，2019年）から抜粋 上記以外の港湾：既往データが存在しないため，国土地理院の航空写真から判別	砂：1点	岩：1点
海岸保全施設からの距離別の分布状況	「藻場調査（2018～2020年度）」（環境省，2021年）と「琉球諸島沿岸海岸保全基本計画」（沖縄県，2003年）及び「海岸保全施設整備基本計画図」（沖縄県，2003年）の重ね合わせ	100m：5点 500m：2点 1km：1点	100m：5点 500m：2点 1km：1点
構造	「琉球諸島沿岸海岸保全基本計画」（沖縄県，2003年）及び「海岸保全施設整備基本計画図」（沖縄県，2003年）から抽出	養浜または人工リーフ：1点	自然石護岸，緩傾斜護岸，階段護岸，消波ブロック：1点

表-2 藻場の高ポテンシャル区域推定結果

区分	海草	海藻
	高ポテンシャル区域数	
那覇港	0	0
運天港	5	2
平良港	2	0
石垣港	1	0
選定 金武湾港	27	10
中城湾港	9	11

表-3 藻場現地調査方法の一覧

	選定			
	ドローン調査	シュノーケリングによるスポット調査	潜水士によるスポット調査	船上目視観察及びマンタ法
調査範囲（目安）	○ (50ha/日)	△ (6地点/日)	△ (3地点/日)	○ (20～40ha/日)
調査の精度	△	○ (潜水調査より劣る)	○	○ (潜水調査より劣る)
藻場の被度	×	○	○	○
出現種	×	○ (潜水調査より精度が劣る)	○	×
水深	浅い場所のみ	浅い場所のみ	～30m水深	浅い場所のみ
価格	○	○	△	△
その他	安価で広域を調査可能だが，データ整理・解析に時間を要する（AIの発達により短縮可能）	浅場での詳細調査としては取り入れ易い	精度が最も優れているが，高価かつ潜水事故の可能性がある	

査し，藻場の生育ポテンシャル，または，海岸保全施設との関係性が大きいと推定される5点以上の区域数を集計した結果を表-2に示す．結果から，金武湾港及び中城湾港が高ポテンシャル区域であることが分かる．本調査では，海草・海藻藻場の双方が豊富と推定される金武湾港に着目し，特に高ポテンシャル区域が密集する屋嘉地区～伊芸地区周辺の海域において，海岸から50m程度の範囲で調査区域を選定した．

(2) 調査方法の検討

藻場の一般的な現地調査方法を表-3に示す．既往の調査では，船舶を用いた調査や潜水調査などが実施されており，精度が高い一方，準備費用が高額となる．金武湾港選定区域は，沖縄の特徴である浅場かつ透明度が高い海を有していることから，カメラによる目視調査も有効であると判断し，船舶よりも安価でかつ広域を容易に把握可能であるドローン調査を先行的に実施した．ドローン調査により，沿岸浅海域での藻場生育地点を優先的に把握した後，海岸保全施設の関係性が高いと推測される地点や生育が著しい地点に限定したシュノーケリングによるスポット調査を実施し，海草・海藻の出現種と被度，付着基盤や詳細な生育状況などを補完することで，効率的な調査とすることを試みた．

4. 現地調査の成果

(1) ドローン調査

3. (1)で述べた調査選定区域（図-2）において，ドローン（Phantom 4 Pro）による航空写真撮影を実施した．海底が映るよう，潮位が低い時間帯に調査し，



写真-1 ドローン調査による海草と海藻藻場の航空写真

撮影した写真を基に，オルソ化（写真の合成処理等）を行い，藻場分布状況写真を作成した．写真-1が示すように，海草藻場は周辺より緑色がかった濃い色，海藻藻場は周辺より褐色～赤褐色がかった濃い色として判別され，海草や海藻藻場の分布範囲を確認することが目的であれば，ドローン調査のみだとしても概略的に把握することが可能であると分かる．しかしながら，詳細な生育状況を把握するために必要な藻場の被度や出現種を確認することは困難であり，やはりドローン調査で選定した地点でのシュノーケリング等のスポット調査を組み合わせることが有効な手段であるといえる．

(2) シュノーケリング調査（スポット調査）

ドローン調査結果を基に，海岸保全施設周辺において海草・海藻の生育環境が向上していると推測される場所，藻場生育状況を代表すると推定される場

所に着目し、計18地点でのシュノーケリングによるスポット調査を実施した。また、ドローン調査により藻場と推定されたが、確度が低い地点でのスポット調査も実施した。調査時は、1m×1mのコドラートを設置し、出現種、種別被度、底質、藻体の大きさや各地点における海岸保全施設との関連性を確認した。

調査結果を図-2、3に示す。海草藻場は8地点で確認され、被度は5%未満～45%で、平均すると24%であった。海草藻場構成種については、8地点中6地点でリュウキュウアマモやベニアマモ等の中型海草と呼ばれる種が優占した。2地点（St.16、17）では小型海草と呼ばれるマツバウミジグサやウミジグサが優占した。海草藻場の底質は、8地点中7地点で砂又は砂礫であり、海草の地下茎・根が生長しやすい環境であると分かった。

海藻藻場は9地点で確認され、被度は25～90%で、平均すると67%であった。海藻藻場構成種については、9地点中8地点で、キシウモクやヒイラギモクが優占しており、潮下帯を中心に見られた。9地点中1地点では、ヒメハモクが優占しており、こちらも同様に潮上帯で見られた。これらはホンダワラ類に分類され、ホンダワラ類で構成された海藻藻場は「ガラモ場」と呼ばれており、沖縄における海藻藻場は全てガラモ場であることが特徴である。ホンダワラ類は、天然の転石や礫の他、突堤や離岸堤などの人

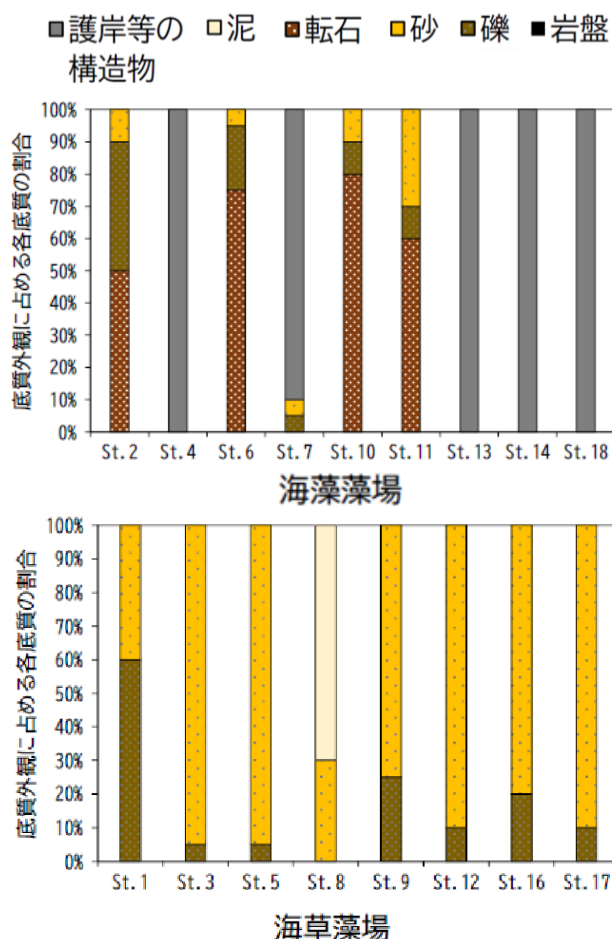


図-3 現地調査範囲における底質分布

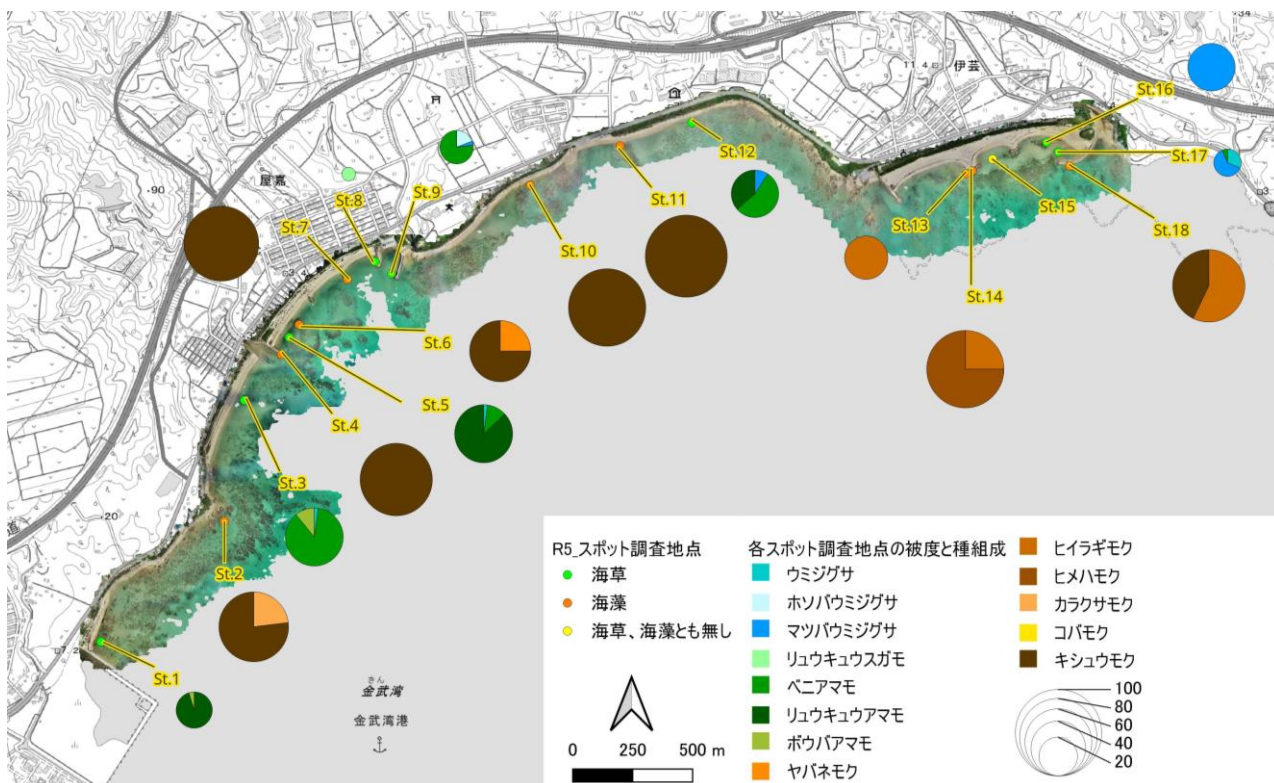


図-2 現地調査範囲と海草・海藻藻場の被度と種組成分布

工構造物にも生育していた。藻体の大きさは、平均するとヤバネモクで34.2cm, ヒイラギモクで43.8cm, ヒメハモクで27.1cm, カラクサモクで27.2cm, キシウモクで51.8cmであり、金武湾港の屋嘉地区から伊芸地区にかけては、被度の高い藻場が形成されていることが分かった。

(3) 海岸保全施設と藻場形成の関係について

a) 海岸保全施設と海草藻場の関係性

海草藻場の現地調査では、地下茎の露出や海底面のえぐれがしばしば観察された。これらは海草藻場が波浪による洗掘で流出した痕跡と推測され、沖縄の海草藻場ではよく見られる事象である。

海岸保全施設と海草藻場との関係に着目すると、写真-2で示す養浜を目的として整備された突堤の背後で海草藻場が確認され、このような場所では、藻場が洗掘され流出した痕跡が見られなかった。このことから、波浪が著しい環境下において、海岸保全施設等による波浪低減整備には、海草藻場の生育条件向上に効果があるといえる。

b) 海岸保全施設と海藻藻場の関係性

海岸保全施設と海藻藻場との関係に着目すると、養浜を目的として整備された突堤及び離岸堤と、漁港の防波堤にホンダワラ類が生育しており、海藻藻場が形成されていた。当該区域の藻場の種組成は周辺の藻場と同様であり、特定の種が護岸に着生し易いという状況は確認されなかった。写真-3で示すように、突堤や離岸堤の沖側では海藻が見られたが、岸側や河口部付近では海藻が見られなかった。これは、淡水の影響によるものといえる。写真-4で示すように、護岸の素材においては、自然石護岸、凹凸のあるコンクリート護岸、消波ブロックの順に着床している海藻の被度が高かった。ここで示したいいずれの護岸にもキシウモクやヒイラギモクといったホンダワラ類がみられた。自然石護岸ではこれら2種に加え、浅い場所（潮間帯）にヒメハモクが生育しており、被度が高かった。上記に示したいいずれの条件下においても潮間帯下部～潮下帯が主な生育水深であったことから、海藻藻場造成には潮間帯下部～潮下帯の水深帯が適するといえる。ゆえに、海藻藻場を造成するための好条件区域は、①淡水影響が小さく、沖側に面した波が当たる場所、②自然石護岸もしくは凹凸のあるコンクリート護岸、③潮間帯下部～潮下帯の水深帯であるといえる。

(4) 現地調査結果を活用したCO₂吸収量の算出結果

現地調査結果を基に、金武湾港全体の藻場におけるCO₂吸収量を算出した結果を表-4に示す。BC生態系による吸収量は、J ブルークレジットの手引き²⁾より、吸収量（トンCO₂/年）＝藻場面積（ha）×吸収係数（トンCO₂/ha/年）の数式によって算出した。また、吸収係数は、海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイ

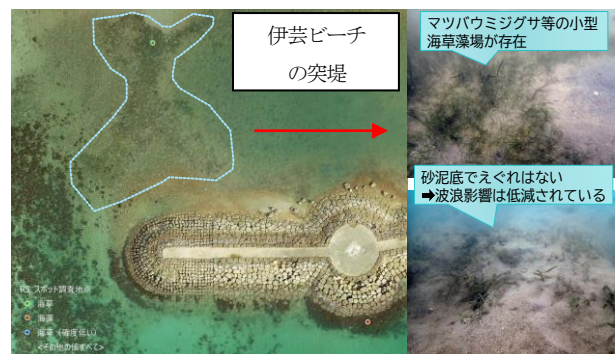


写真-2 伊芸ビーチ突堤背後における海草藻場



写真-3 屋嘉ビーチ突堤近傍における海藻生育量の違い



写真-4 護岸の素材・形状による海藻生育量の違い

表-4 金武湾港全体のBC吸収量算出結果

BC生態系の種類	吸収係数の区分	吸収係数 (トンCO ₂ /ha/年)	対象生態系の面積(ha)	吸収量 (トンCO ₂ /年)
海草藻場	亜熱帯中型	3.06	928.0	2839.8
海藻藻場	亜熱帯性ホンダワラ	0.42	57.2	24.0
合計	-	-	985.2	2863.8

ドブック³⁾の値を採用した。海草藻場は「亜熱帯中型海草」に該当する海草が、海藻藻場は「亜熱帯性ホンダワラ」に該当する海藻が多く確認されたため、上記にあたる吸収係数を適用した。金武湾港全体における藻場の分布面積については、環境省の「藻場調査2018～2020 年度」⁴⁾の結果のうち、港湾区域内を対象として面積を算出した。

CNP 形成に際して記載できる CO₂ 吸収量は人為的なBC生態系形成によって増加した CO₂ 吸収量であり、天然の海草や海藻藻場は対象外である。このため、参考値としての比較となるが、金武湾港内の天然の海草及び海藻藻場で吸収される CO₂は金武湾港における CO₂排出量 9,286 トン CO₂/年⁵⁾ (2022 年度における火力発電および船舶の排出量を除いた CO₂ 排出

量)の30%に匹敵し、金武湾港のBC形成におけるポテンシャルの高さが分かる.

5. BCの形成・活用に向けた具体的な方策の検討

港湾管理者等において、BC形成に向けた共通認識を深めることを目的に、海岸保全施設における具体的なBC形成及び活用方策を検討した。そのフローを図-4に示す。以下、方策の内容について述べる。

(1) BC形成に向けた契機

今後の大規模なBC形成に向けて、海岸保全施設などのハード整備と絡めた取組が必要といえる。しかしながら、BC形成のみを目的とした改修整備は費用対効果の面で現実的ではない。そこで、海岸保全施設の老朽化や高潮対策にかかる見直しに合わせた更新整備時に、BC形成のための工夫を施すことが望ましい。

(2) BC形成のための海岸保全施設における工夫

4. 現地調査の結果から、海藻藻場の形成には、既存防波堤や離岸堤の内側に海草を植付することが有効であり、海藻藻場の形成には、護岸の素材に自然石や凹凸のあるコンクリートブロックを採用することが有効であると分かった。上記に示すような費用的、技術的に取り組み易い好事例を海岸保全施設の改修時に採用することで、BC形成の促進が期待される。このため、今後も継続的に、BC形成区域における現地調査結果を収集しつつ、好事例をまとめた一覧表を作成する必要があるといえる。

(3) BC形成における波及効果の周知

BC形成後の維持管理には、食害や風水害などのBC生態系の減少リスクが伴い、形成から維持管理まで全て港湾管理者で実施すると、その負担の大きさから事業の継続性に懸念が生じる。そこで、港湾協力団体などの外部関係組織に対し、BC形成によるインセンティブとして、脱炭素化以外の様々な波及効果を示すことで、事業への参画を促す必要がある。以下、脱炭素化を除いた波及効果を示す。

a) Jブルークレジット制度による収益化

Jブルークレジットとは、BC生態系を活用した吸収源の拡大を図るため、藻場の保全活動等の実施者により創出されたCO₂吸収量を定量化し、認証するクレジットでJBE（ジャパンエコノミー技術研究組合）が主体となり運営している。（図-5）JBEにJブルークレジットとして認証されたクレジット創出者は、CO₂削減を図りたい企業・団体等とクレジット取引を行うことができ、例えばある企業で、企業努力だけでは減少し難いCO₂がある場合に、クレジット創出者からクレジット（BC生態系）を購入し、相殺するという仕組みである。購入企業は企業イメージの向上が見込め、創出側は活動資金の確保により、保全・創出



図-4 海岸保全施設におけるBC形成促進に向けた方策案

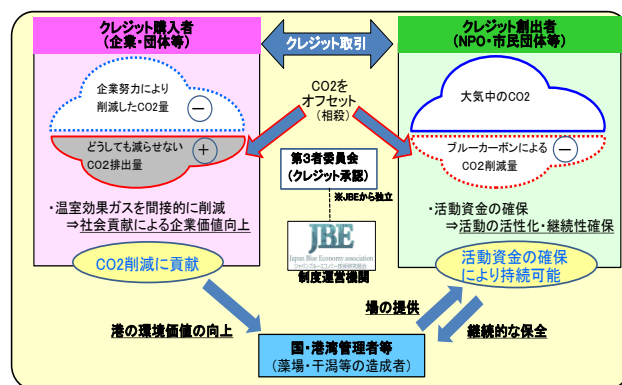


図-5 J ブルークレジットの仕組み

活動が持続可能なものとなる.

b) 環境學習效果

BC生態系は、沿岸部に形成されるものが多く、身近な自然として環境学習に活用できる。環境学習により、居住地域の自然への関心が高まることで、地域の自然環境を良い状態に保つことができ、地域の生活環境や魅力の向上に繋がると期待される。

沖縄県環境教育等推進行動計画⁹⁾において、環境分野別の学習内容が定められており、その内、BCは「自然・生命」及び「エネルギー・地球温暖化」に該当するため、BCと関連する環境教育活動を推進することは、沖縄県の教育計画にも沿っており、BCは適切な題材といえる。

c) 漁場再生効果

海草、海藻藻場及びマングローブ林には漁獲対象種も生息するため、こうしたBC生態系の創出は漁場再生の取組としても有効である。例えば、海藻藻場は沖縄の水産業において重要な養殖モズクの採苗場所や天然モズクの生育場として重要である。このため、BC生態系の創出は漁業者にとってもメリットがあり、日本国内他地域においても、Jブルークレジットの申請を活用し、漁業協同組合が参画している取

組が多い。また、BCの創出を行う沿岸域の大部分は、漁業権が指定されていることから、漁業者の協力は必須であるともいえ、漁場再生効果は広く周知する必要がある。

また、漁場再生効果があることで、水産業振興としての経済価値も生まれるため、水産関係予算の利用や、民間企業からの支援も期待できる。

d) 観光資源としての活用

BC生態系は沿岸域に形成されるため、観光客が目にすることも多い。沖縄における海草、海藻藻場、マングローブ林はいずれも日本国内では沖縄に特有のものであり、観光資源としての価値が高いといえる。漫湖公園のように観光客もアクセスし易いマングローブ林を整備することなど、観光資源として活用することにより、地域経済の活性化が期待される。

e) ネイチャーポジティブ等への寄与

2022年に生物多様性条約COP15において、昆明・モントリオール生物多様性枠組が採択された。この枠組において、2030年までに「自然を回復軌道に乗せるために生物多様性の損失を止め反転させるための緊急の行動をとる」ことが示されている。これを受けて、わが国でも生物多様性国家戦略が2023年に採択され、2030年までにネイチャーポジティブを実現させることが目標として示された。各地方公共団体においても、生物多様性地域戦略の策定が進められている中で、BC生態系においては、高い生物多様性と多くの生態系サービスがあることから、ネイチャーポジティブ、生物多様性地域戦略の実現に寄与できるといえる。BC形成の取組をこうした地域戦略とも連携させることにより、港湾管理者以外の行政機関も巻き込んだBC形成の取組を推進できる可能性がある。

6. まとめ

本調査では、BC形成における高ポテンシャル区域と位置付けた金武湾港において、ドローンとシュノーケリングによるスポット調査を実施することで、良質な藻場が形成されている地点とその周辺の海岸保全施設との関係性を明らかにし、今後の藻場造成に資する知見を収集することができた。今回の調査方法により藻場の生育状況を十分に確認可能であることから、船舶を用いた既往の調査方法よりも安価な調査方法の有用性を示した1例といえる。

また、本論で整理したBC形成に向けた具体的な方策及び波及効果を幅広く啓蒙することで、BC形成に参画する関係者を増やし、更なる事業促進が期待される。

沖縄においては、日本国内他地域には生育していない生態系が多く、国内の好事例を適用できない可能性がある。ゆえに本調査で実施した低コストで効率的な現地調査手法を用い、沖縄特有条件下での好事例の収集を進めていくことで、沖縄での脱炭素化社会の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) ジャパンブルーエコノミー技術研究組作成資料
- 2) ジャパンブルーエコノミー技術研究組合：Jブルーレジット®認証申請の手引きVer.2.4, 2023.
- 3) 国立研究開発法人水産研究・教育機構：海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイドブック, 2023.
- 4) 環境省：藻場調査2018～2020年度, 2021.
- 5) 沖縄県：令和5年度第2回 金武湾港・中城湾港脱炭素化推進協議会資料, 2024.
- 6) 沖縄県：沖縄県環境教育等推進行動計画, 2023.

軽石の再生路盤材利用検討について

(公財) 沖縄県建設技術センター 試験研究部 試験研究班 ○技師 田仲康将
試験研究部 試験研究班 主任技師 比嘉正也

1. はじめに

令和3年8月に小笠原諸島付近の海底火山「福德岡ノ場」が噴火し、大量の軽石が発生した。これらの軽石は軽石筏となり、沖縄県内の港湾施設や海浜を埋め尽くし、漁業や観光業、物流などに多大な影響を及ぼした。漂着した軽石は、回収後に多方面で利活用の検討がなされた。しかし、軽石は塩分を多量に含んでいることに加え、多孔質な性質上脆く砕けやすいため、強度や耐久性が求められる土木用資材等では具体的な使用方法が見出せず、殆どが採掘鉱山に埋め土処分となった。

ここで、今回の福德岡ノ場由来の軽石は、今回が初めてではなく1986年にも漂着した事例が報告されている¹⁾。また、気象庁の記録では、1924年に噴火した西表島北北東海底火山によって発生した軽石が沖縄本島へ到達したという記録もある。そこで、公益財団法人沖縄県建設技術センターでは、今後も海底火山の噴火によって発生する可能性がある軽石を土木用資材として利活用できないか改めて検討を行うこととした。しかし、軽石は単体での利用は難しいため、今回の検討ではコンクリート構造物を破砕・分級した再生路盤材（上層路盤 RM-40）に10～30%の割合で軽石を混合した「軽石混合再生路盤材」を作製し、再生路盤材としての規格値を満足できるか検討を行った。

本稿では、軽石の土木用資材としての利活用を目的に検討を行った「軽石混合再生路盤材」の各種試験結果について報告する。

2. 検討概要

2. 1 検討内容

沖縄県土木建築部発注工事で使用する路盤材は、沖縄県リサイクル資材評価認定制度（以下、ゆいくる制度）における「リサイクル資材評価基準」²⁾（以下、評価基準）を満足した再生路盤材を原則使用することとなっている。評価基準で定める再生路盤材料の品質・性能審査表を表-1に示す。同表から、粒度、修正 CBR、塑性指数、すりへり減量の4つの試験項目を満足する必要がある。このため、本検討では、コンクリート塊を再生資源とし、ゆいくる制度で認定された再生路盤材 RM-40 に、軽石を体積比で10%、20%、30%の割合で混合した「軽石混合再生路盤材」を作製し、表-1に示す路盤材料試験を行った。その試験結果を以下に述べる。

表-1 品質・性能審査表

試験項目	試験方法
粒度	JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」
修正 CBR	JIS A 1211「CBR試験方法」 舗装調査・試験法便覧 第Ⅲ章 5-1 E001「修正CBR試験方法」
塑性指数	舗装調査・試験法便覧 第Ⅲ章 6-1 F005「液性限界・塑性限界試験方法」
すりへり減量	JIS A 1121「ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験方法」

キーワード 軽石，再生路盤材，実積率，修正 CBR

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

2. 2 使用材料

(1) 軽石

今回の検討に使用した軽石は、沖縄本島の北部に位置する国頭村奥港に漂着し、港内に仮積みされた軽石を用いた。図-1 に奥港の位置図、写真-1 に軽石採取状況を示す。

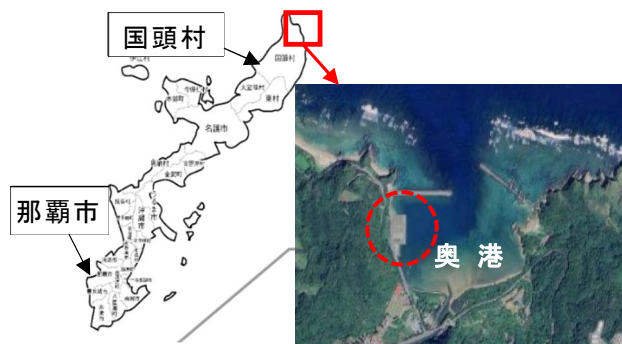


図-1 国頭村奥港



写真-1 軽石採取状況

(2) 再生路盤材 (RM-40)

前述のとおり、沖縄県土木建築部では、ゆいくる制度で認定された再生路盤材を原則使用することが義務付けられていることから、本検討では、ゆいくる制度で認定を受けた再生路盤材 RM-40 を用いて検討を行った。表-2 に本検討に使用した再生路盤材 RM-40 の物性値を示す。

表-2 本検討に供した RM-40 の物性値

試験項目	規格値	試験結果
粒度	図-2 粒度試験結果に示す	
修正CBR	80以上	84.8
塑性指数	4以下	NP
すりへり減量	50%以下	37.7

※NP : Non Plastic (粘土分を含まない)

2. 3 軽石混合方法

軽石混合再生路盤材を実際に混合製造するには、ホイールローダーなど重機車両を用いた作業工程を想定し、体積比による混合とした。また、回収した軽石は直径 10 cm 以上のものもあったが、今回の検討では、粒度調整は行わず網ふるいを用いて最大粒径を 19 mm とした (写真-2)。軽石の混合割合は、表-3 に示す 3 つの混合割合 (10%、20%、30%) とした。また、軽石混合再生路盤材と比較できるように軽石を混合しない RM-40 を含めた 4 試料とした。



写真-2 最大粒径の調整状況 (19 mm 以下)

表-3 軽石の混合割合

試料名	体積比による 混合割合 (%)	
	軽石	RM-40
RM-40	0	100
軽石 10%	10	90
軽石 20%	20	80
軽石 30%	30	70

3. 試験項目

3. 1 粒度

粒度は、JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」³⁾に基づき試験を行った。ふるい分け試験方法は、JIS に規定された 53 mm から 75 μ m の金網ふるいを用いてふるい分けを行い、各網ふるいを通しての質量百分率を算出し粒度を確認した。

3. 2 修正 CBR

修正 CBR は、JIS A 1211「CBR 試験方法」⁴⁾を参考に、舗装調査・試験法便覧 第Ⅲ章 5-1 E001「修正 CBR 試験方法」⁵⁾に基づき試験を行った。評価基準では、舗装再生便覧に定める 80% 以上を判定値としている。また、CBR 試験値を求めるために必要となる最適含水比および最大乾燥密度は、JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験方法」⁶⁾によって求めた。

3. 3 塑性指数

塑性指数は、舗装調査・試験法便覧 第Ⅲ章 6-1 F005「液性・塑性限界試験方法」⁷⁾に準じて求めた。試験は、試料を粉砕し、425 μ m 網ふるいを通して微粉砕試料を用いて行った。舗装再生便覧で定める RM-40 の塑性指数 (PI) は、4 以下である。

3. 4 すりへり減量

すりへり減量は、JIS A 1121「ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験方法」⁸⁾に基づき試験を行った。舗装再生便覧では、再生路盤材を素材として用いるセメントコンクリート再生骨材のすりへり減量を 50% 以下としている。

4. 試験結果

4. 1 粒度

図-2 に、粒度試験で得られた粒径加積曲線を示す。同図から、RM-40 に軽石を 10～30% の割合で混合しても粒度は大きく変化しないことが確認できた。しかし、軽石は空隙が多く、脆く砕けやすい性質をしていることから、転圧や繰り返しの輪荷重により碎石間で破砕することが考えられる。このため、突固め後の試料でも粒度試験を行い、粒度の変化を確認した。

図-3 および図-4 に、突固め後の粒度試験結果を示す。同図を見ると、20% と 30% とともに上限値側に偏っていることが確認できる。この結果から、突固められたことで軽石が破砕され、細粒分が増加し、ふるいの網目を通過する質量通過率が高くなったと分かる。しかし、突固め後の粒度分布を見ても、20% と 30% とともに規格値内に収まっており、突固めによる破砕後も RM-40 の規格を満足する結果であった。

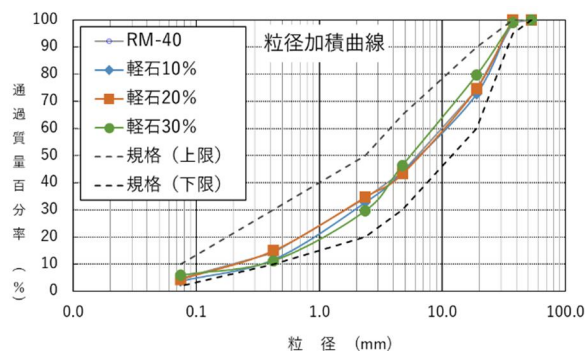


図-2 粒度試験結果

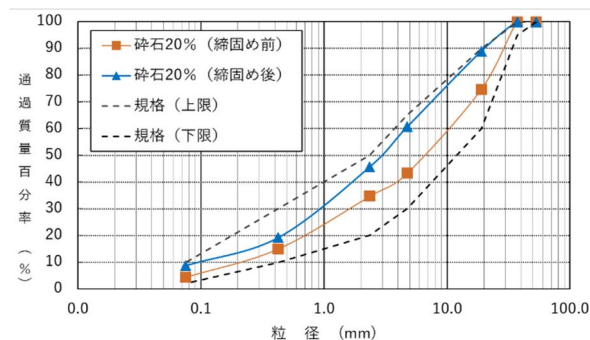


図-3 突固め試験前後の粒度試験結果
(軽石 20%)

4. 2 修正 CBR

表-4 は、突固めによる土の締固め試験で得られた最適含水比および最大乾燥密度である。突固め層数は3層、1層あたりの突固め回数は92回で行った。同表に示すように、軽石の混合率が多くなるほど、最適含水比は大きく、最大乾燥密度は小さくなった。

また、図-5 には、修正 CBR 試験結果を示す。RM-40 の修正 CBR 値は 84.5% で舗装再生便覧の定める 80% を満足する結果であった。これに対し、軽石 10% は 110.6%、軽石 20% は 94.4%、軽石 30% は 113.9% と全て RM-40 を上回る値であった。この結果について、突固め後の粒度試験で確認できたように、軽石は突固めによって破碎され、細粒化することから、細粒化した軽石が碎石間を充填したことで RM-40 単体より修正 CBR 値が高くなったものと考えられる。

そこで、突固め試験後のデータから実績率を求めてみたところ、突固め回数 17 回では RM-40 の実績率が最も高かったが、突固め回数 92 回では軽石 30% の実績率が最も高いことが分かった（図-6）。この結果から、軽石混合再生路盤材を用いた場合、施工後にたわみや陥没が生じるのではないかと考えていたが、締固め時点で軽石は破碎され、碎石間を充填すると思われる。

4. 3 塑性指数

本検討で使用する RM-40 は、前出表-2 に示すように、ゆいくる認定資材であるため、塑性指数の規格を満足している資材である。このため、塑性指数を求める液性・塑性限界試験では、軽石混合再生路盤材を用いず、軽石のみでの試験を行った。塑性限界試験は、425 μ m に微粉碎した試料に蒸留水を加えて団子状にし、これを転がして写真-5 に示す直径 3 mm の丸棒と同じ太さのひも状になった状態の含水比から塑性限界を算出するものである。試験を行った結果は、軽石では直径 3 mm のひも状に成型できなかった。よって、塑性限界は粘土分を含まない「NP」と判定した。なお、塑性限界は「NP」となった場合、液性限界も判定できないことから、塑性指数も「NP」と判定した。

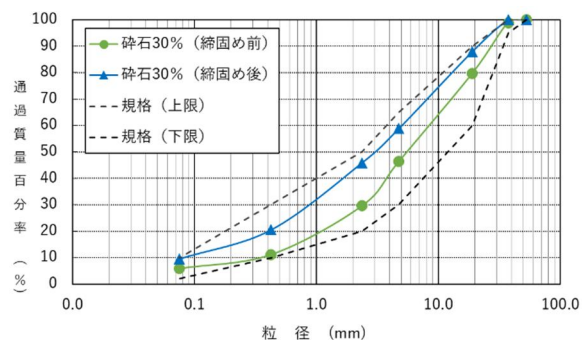


図-4 突固め試験前後の粒度試験結果
(軽石 30%)

表-4 最適含水比・最大乾燥密度

試料名	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (Mg/m ³)
RM-40	10.6	1.845
軽石 10%	12.3	1.779
軽石 20%	13.5	1.652
軽石 30%	13.3	1.582

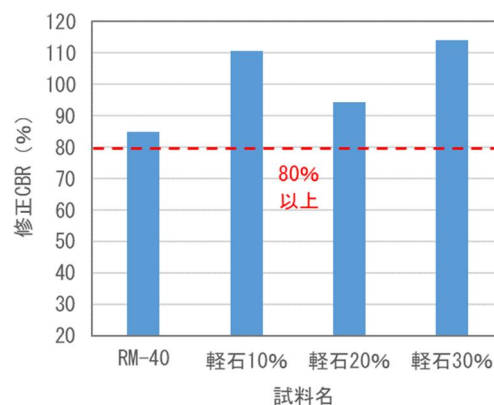


図-5 修正 CBR 試験結果

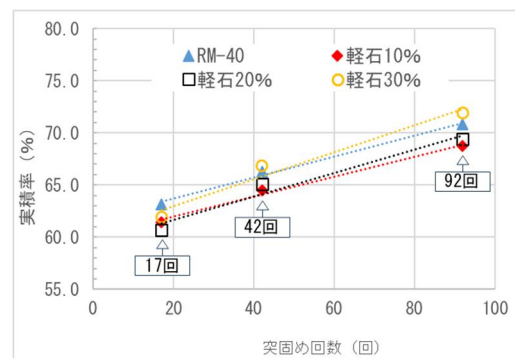


図-6 突固めによる実績率

4. 4 すりへり減量

図-7 にすりへり試験結果を示す。RM-40 のすりへり減量が 37.7%に対し、軽石混合 10%が 37.8%、軽石混合 20%が 39.8%、軽石混合 30%が 41.7%と軽石の混合率が多くなるほどすりへり減量が多くなった。しかし、舗装再生便覧では、再生路盤材の素材として用いる場合のセメントコンクリート再生骨材のすりへり減量を 50%以下としていることから、軽石を 30%まで混合しても再生路盤材の素材としての規格値の 50%以下を満足することが確認できた。



写真-5 塑性限界試験状況

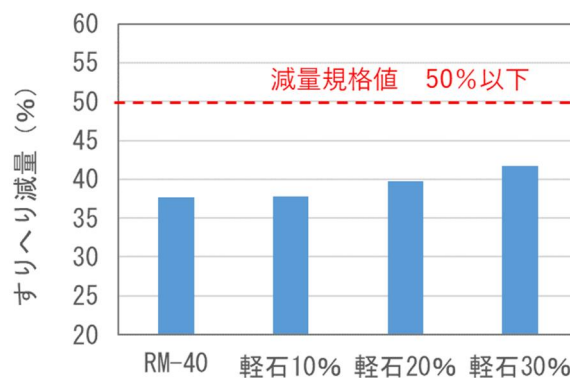


図-7 すりへり試験結果

5. まとめ

今回の検討は、再生路盤材（RM-40）に軽石を 10～30%の割合で混合し、「軽石混合再生路盤材」として検討を行った。以下に各種試験結果をまとめる。

- 1) 粒度試験の結果、軽石を体積比で 10～30%混合しても粒度が大きく変わらないことが確認できた。また、突固め後の粒度試験では、破碎による細粒化で質量通過率が高くなったが、粒度規格値内には収まっており、破碎後も RM-40 の規格を満足することが確認できた。
- 2) 突固め試験の結果から、軽石の混合率が多くなるほど、最適含水比は大きく、最大乾燥密度は小さくなった。
- 3) 修正 CBR 試験結果から、全試料で舗装再生便覧の基準値 80%以上を満足することが確認できた。また、軽石を 10～30%混合した 3 試料全てで RM-40 を上回る結果であった。
- 4) 突固め試験後のデータから実積率を求めたところ、軽石混合率が高いほど実積率が増加することが確認できた。この結果から、当初は軽石を路盤材に用いた場合、繰り返しの輪荷重により、たわみや陥没が生じるものと考えていたが、締固め時点で軽石が破壊し、細粒化されて碎石間を充填することで十分に締固められると考えられる。
- 5) 液性・塑性限界試験結果では、結果は全ての試料で NP (Non-Plastic)判定になり、軽石は粘土分を含んでいないことが確認できた。
- 6) RM-40 のすりへり減量試験結果から、軽石を 30%混合しても舗装再生便覧で示す再生路盤材の素材としての規格値 50%以下を満足することが確認できた。

参考文献

- 1) 加藤祐三：福德岡の場から琉球列島に漂着した灰色軽石，特定非営利活動法人日本火山学会，火山，第2集，第33巻，pp.21－30，1988
- 2) 沖縄県土木建築部：沖縄県リサイクル資材評価認定制度，リサイクル資材評価基準，2022.1
- 3) 日本規格協会：JIS A 1102 骨材のふるい分け試験方法，2014
- 4) 日本規格協会：JIS A 1121 CBR 試験方法，2020
- 5) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧 第Ⅲ章 5-1 E001 修正 CBR 試験方法，2019
- 6) 日本規格協会：JIS A 1210 突固めによる土の締固め試験方法，2020
- 7) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧 第Ⅲ章 6-1 F005 液性・塑性限界試験方法，2019
- 8) 日本規格協会：JIS A 1121 ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験方法，2022

琉球大学千原キャンパスの点群化とその応用

琉球大学 梶原稜佑, 琉球大学 入部綱清

琉球大学大学院 橋口優芽香

(有)南部測量機 渡口弘志, (同)N システム 仲間聡久

1. 緒言

インフラの老朽化により維持管理の担い手の不足が懸念される中、その解決策として、建設プロセス全体を高度な情報技術によってアップデートすることで生産性の向上が試みられている。特に測量分野においてはLiDAR(Light Detection And Ranging)技術や、LiDAR技術とフォトグラメトリ技術を併用して取得した点群データを利用することで工数の削減に大きな成果を上げている。

点群データを利用した先端的な取り組みとしては、静岡県による VIRTUAL SHIZUOKA¹⁾が挙げられる。静岡県全域を点群データ化し、公開することでインフラの維持管理、防災対策、文化財保存、観光、エンタメなど幅広い分野で活用されている。しかし、これらの点群に付加価値を与えるようなデータを公共施設や一般道などから取得することは制限を受けることがあると考えられる。

一方、琉球大学構内は一般公道等と比べ、教育活動や研究活動のフィールドとして比較的自由に計測機が設置できること、データが取得できること、社会実装ができることなど、点群の利活用について自由度が高い。そこで本研究では、琉球大学構内を点群データ化を行い、高度に情報化された新しい土木技術の基礎を開発することを目的とする。さらに、点群データの活用例として、ゲームエンジンの機能を利用した点群データの表示を示す。

2. 点群化の方法と手順

図-1 に示すように大学構内の点群化は、構内を 18 の領域に分割して行う。分割した領域には 4 から 5 つの測量点を設置し、この測量点と LiDARSLAM(Light Detection And Ranging Simultaneous Localization and Mapping)技術を用いた測量機器を使って建物と地形を点群化する。さらに、文字の輪郭を明瞭にデータ化したいモニュメントなどについては、LiDAR技術とフォトグラメトリ技術を併用した測量機器によって点群化する。

(1) 測量点の設置

大学構内への測量点の設置は、ネットワーク型 RTK-GNSS(Real Time Kinematic - Global Navigation Satellite System)測量機器を使って行う。ネットワーク型 RTK-GNSSは、衛星からの電波を移動局が受信できる環境であれば、電子基準点を用いた仮想基準点と衛星を利用して、高精度な位置情報を取得することができる。測量点は、ループ道とループ道内側に設置し、ループ道内側の測量点については、隣接する領域と共有できるように設置する。

(2) 建物と地形の点群化

大学構内の建物と地形を点群化は、LiDARSLAM 技術を用いた測量機器(X120GO)を使って行う。LiDARSLAM 技術は、自己位置推定(SLAM)と同時にレーザーを使って対象物をスキャンし点群化(LiDAR)する技術であり、事前に設置した測量点を参照することで、レーザーでスキャンしたすべての点に測量点と同様な座標を与えることができる。レーザーの計測距離は最長 120m、計測速度は 32 万点/秒であるため、短時間で非常に多くの点を取得することができる一方で、長時間計測するとデータ量が大きくなり、ファイルの取り扱いが難しくなる。そのため、1つの領域は徒歩で 30 分以内の広さに設定した。

(3) モニュメントの点群化

大学構内のモニュメントの点群化は、LiDAR 技術とフォトグラメトリ技術を併用した測量機器(XVS)を使って行う。フォトグラメトリ技術とは、被写体をさまざまな位置や角度から撮影した連続写真から、3D モデルを作成する技術である。モニュメントの対象は、大学本部入口にある石碑とし、図-2 のような測量結果となった。

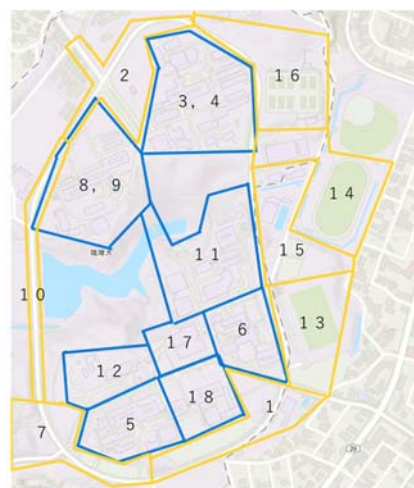


図-1 大学構内の領域分割



図-2 大学本部入口にある石碑の点群化

キーワード：LiDARSLAM, フォトグラメトリ, 点群データ, ゲームエンジン 連絡先：琉球大学工学部

3. 点群データの諸元と表示

表-1 に点群データの諸元を示す。総点群数は約 20 億、ファイルの総データ量は約 64GB であった。

図-3 に琉球大学千原キャンパスのすべてのエリアの点群を示す。測量を歩行で行っているため、森については歩道からレーザーが届く範囲、また、森および屋上などの上空からしか見えない範囲は測量できていない。しかし、レーザーが届く範囲においては、建物や外構などが鮮明に可視化できる精度で測量できている。

4. ゲームエンジンによる点群の利用

ゲームエンジンとはゲーム制作に必要な機能が備わっている開発環境である。本研究ではゲームエンジンの一種である Unreal Engine を用いて、点群の利用例を示す。

図-4(a) に工学部 1 号館駐車場から 2 号館を撮った写真、(b) にその場所にキャラクターに歩行させている様子、(c) にその場所に車を走行させている様子を示す。キャラクターと点群の移動は、点群とキャラクターや車との間で衝突計算を行うことで可能となっている。また、

キャラクターや車の数を増やすことや、それぞれを人間や AI で操作することができること、さらにオンラインゲームのように世界のどこからでも複数人で参加できるような機能を加えることができるため、土木工学とゲームエンジンを融合は、次世代のデジタルツイン技術の基盤となる可能性を有している。

5. 結言

本研究では、琉球大学千原キャンパスの点群化を行い、その応用としてゲームエンジンによる点群の利用例を示した。土木工学とゲームエンジンを融合させることで、高度に情報化された新しい土木技術を開発できる可能性を示唆した。

参考文献

- 1) VIRTUAL SHIZUOKA : <https://www.pref.shizuoka.jp/machizukuri/1049255/index.html>

表-1 点群データ諸元

番号	エリア名	点の数	データ量(GB)
1	琉大東口	109,309,412	3.46
2	琉大北口	115,358,903	3.65
3	工学部 1	125,944,995	3.98
4	工学部 2	142,906,484	4.52
5	教育学部	138,797,257	4.39
6	共通教育	114,607,602	3.62
7	琉大南口	95,158,608	3.01
8	農学部 1	127,132,506	4.02
9	農学部 2	141,786,504	4.48
10	南側ループ道	102,787,842	3.25
11	理学部	167,725,728	5.31
12	琉大本部	68,936,455	2.18
13	サッカー場	64,826,398	2.05
14	体育館 1	79,250,932	2.5
15	体育館 2	93,098,938	2.94
16	テニスコート	109,305,886	3.46
17	図書館	103,843,235	3.28
18	人文社会学等	116,419,934	3.68
	合計	2,017,197,619	63.78



(a) 1 号館と 2 号館の間の写真



(b) キャラクターの歩行



(c) 車の走行

図-4 点群の利用例

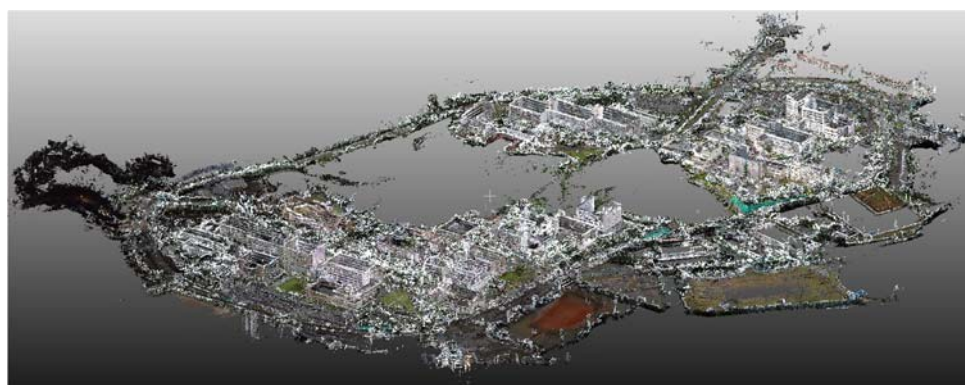


図-3 琉球大学千原キャンパスの点群

3D-CAD データと点群データの連携とその応用

琉球大学 宇地原友彩, 琉球大学 入部綱清

1. 緒言

建設分野では人手不足の解決策の一つとして、i-Construction¹⁾と呼ばれる従来の土木技術に最先端の情報技術を取り入れる取り組みが行われ、特に測量分野において、飛躍的な労働力の削減に成功している。また、デジタルツインと呼ばれる現実空間の情報を使って作られた建物や街などの仮想空間（デジタル空間）で試行実験を行い、試行実験の分析結果を現実空間へフィードバックを行うことで、業務の効率化を図る試みる取り組みも行われている。

デジタルツインの具体的な取り組みとして、国土交通省が公開している 3D 都市モデルの PLATEAU²⁾が挙げられる。様々な主要都市の建物が CAD でモデル化され、風況の数値計算や、都市計画などに利用されている。しかし、建物の内部をモデル化した LOD4 レベルの建物については、対応している建物が少ないためまだ十分に利用されていない。

本研究では、琉球大学キャンパスのデジタルツイン化を目的とし、その基礎的な取り組みとして、建物の 3D-CAD データと建物と外構の点群データを数値計算を通して連携させることを目的とする。数値計算に使用する建物の 3D-CAD データについては LOD1 レベルとし、琉球大学工学部 2 号館を平面図と立面図から作成する。また、建物と外構の点群化は LiDAR(Light Detection And Ranging)測量を用いて行う。さらに応用例として示す、点群データと建物のゲームエンジンでの連携には、LOD4 レベルの 3D-CAD データを使う。

2. 工学部 2 号館周りの流体計算

風況の数値計算として工学部 2 号館周りの流体計算を FreeCAD を用いて行う。FreeCAD は 3D モデルが作成でき、メッシュや流体の数値計算(CfdOF)機能を有している。

(1) CAD とメッシュによる計算モデル作成

工学部 2 号館は、平面図と立面図より 3D データ化を行う。計算領域を 200m×100m×50m とし、メッシュのサイズは 1m とした。図-1 に計算モデルの表面パッチを示す。計算に使う六面体要素数は約 76 万である。

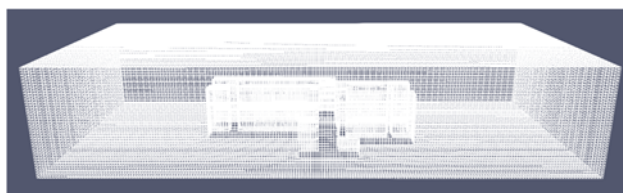


図-1 計算モデルの表面パッチ

(2) CfdOFによる計算条件設定

図-2 に計算領域の境界条件を示す。建物の東側に流入口(Inlet)として初期風速 20m/s を与え、西側を開放(Open)する。また、北側、南側、上空を slip 条件とし、地面と建物は Non-Slip 条件とした。計算領域内の初期風速は Inlet と同じ 20m/s、初期圧力は $1.0 \times 10^2 \text{ kPa}$ とし、空気の物性として密度は 1.2 kg/m^3 、動粘性係数は $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ とした。

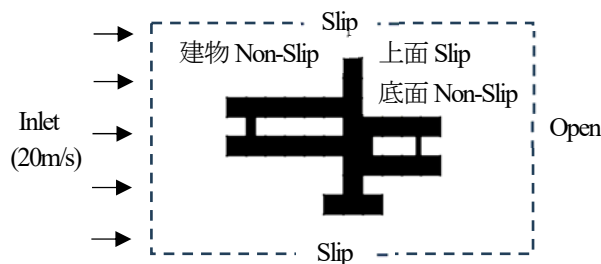


図-2 計算領域の境界条件（上図）

(3) Cloud Compereによる計算結果の可視化

図-3 に計算結果を示す。緑色の立体が工学部 2 号館、その周りに風の流れの流線を示す。また、流線の色は風の速さの絶対値である。建物に衝突した風が建物の後ろに回り込む様子や、建物の後ろで渦を巻いている様子が確認できる。データ形式については建物が stl 形式、流線が ply 形式である。

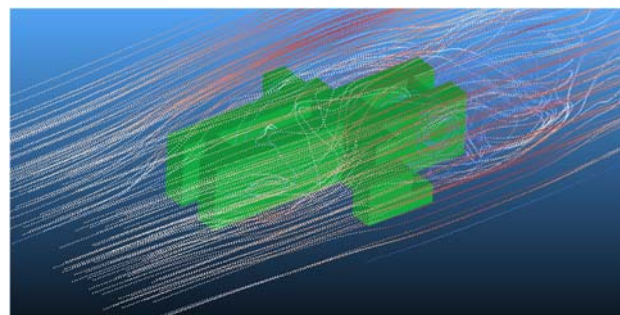


図-3 数値計算結果

(4) 工学部 2 号館の点群化

工学部 2 号館の点群化は、LiDARSLAM を用いた測量機器(X120GO)を使って行う。LiDARSLAM は、初期位置から現在の位置を計算（自己位置推定）しながら、それと同時に、レーザーを使って照射対象をスキャンして点群化する技術である。測量によって得た既知点を初期位置とすると、スキャンしたすべての点に座標を与えることができるが、今回はそれを行わず、任意座標とした。

キーワード：デジタルツイン, 3D-CAD データ, 点群データ, 数値計算

連絡先：琉球大学工学部



(a) 東側



(b) 南側



(c) 西側



(d) 北側

図-4 工学部2号館の点群化

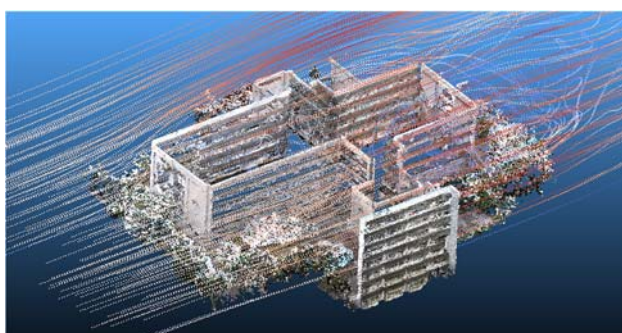


図-5 点群による数値計算結果の可視化

図4に点群化の結果を示す。点群の総数は約8500万であり、データ容量は約2.8GBであった。また、データ形式についてはlas形式である。

図-5に点群による数値計算結果の可視化結果を示す。図-3と比較すると建物の外観の情報と併せて流線を確認するができ、建物の階層と流れの強さの関連性などの

情報を得ることができるため、数値計算結果の有用性を高めることができる。また、CADデータ、数値計算結果、点群データを併せてデータベース化することで、施設の維持管理などに役立てることができる。

3. ゲームエンジンによるCADと点群の連携

ゲームエンジンではキャラクターを歩行させたり、車を走行させたりできることから、BIMへの応用が可能である。しかし、点群データを用いてキャラクターを歩行させる場合は、点群間でメッシュを作成する必要がある、その作成に膨大な計算時間とメモリーが必要となる。そこで、平面図と立面図から作成したCADデータのメッシュを使って、キャラクターを歩行させる。

図-6に工学部2号館ロビーをキャラクターが歩行している様子を示す。CADデータを利用するとメッシュを作成する時間が無くなり、使用するメモリーの増加もほとんどない。



図-6 工学部2号館ロビーを
キャラクターが歩行する様子

5. 結言

本研究では3D-CADデータと点群データの連携を数値計算を通して行った。建物の外観の情報と併せて流線を確認するができ、建物の階層と流れの強さの関連性などの情報を得ることができるため、数値計算結果の有用性を高めることができた。さらに、その応用として3D-CADデータと点群データをゲームエンジンで連携させ、BIMへの応用を示唆した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、工学部2号館の点群化するにあたり、LiDARSRAM測量とそのデータ解析について、(有)南部測量機の渡口弘志氏と、(同)Nシステムの仲間聡久氏にはご協力とご助言を頂いた。心より感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 国土交通省：<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/>
- 2) 国土交通省：<https://www.mlit.go.jp/plateau/>

激しく塩害劣化した PC プレテン桁の振動特性に関する基礎的実験

琉球大学 ○宮崎ひな、下里哲弘、川田建設 垣花 寿

1、研究背景と目的

沖縄は周囲を海に囲まれているという地理的条件のため橋梁における塩害劣化が深刻な問題となっている。PC 橋梁は、主要構造材の PC 鋼線がコンクリートで覆われているため、内部で発生・進展する腐食状態を外観から直接目視で確認することが非常に困難であるため、PC 鋼材の劣化状態を正確かつ効率的に評価できる非破壊技術の開発が求められている。本研究では、PC 鋼材の破断を検知する 3 軸磁気センサを用いた漏洩磁束法¹⁾によって検出された PC 鋼線破断を有する PC 桁に対し、加速度および変位応答による橋梁の振動特性から損傷度を推測する。

2、実験方法

本実験で使用する試験体は、図 1 に示す塩害劣化した実橋から撤去した全長 10m の PC 桁 5 本 (G5～G9 : 図 2)を用いる。実験では図 3 のように加速度計を桁上面、変位計を桁下面に設置し、PC 桁の支間中央位置におもり(砂袋:13 kg)を自由落下させ、桁の変位と加速度を各桁 3 回計測した。計測結果のうち最大応答を示したものを評価の対象とした。損傷度の推測は、①鉛直方向加速度応答特性、②加速度応答とフーリエ解析で求める PC 桁の固有振動数、③変位応答の 3 つの構造特性から桁の損傷度を推察する。なお、損傷度は先行研究²⁾にて非破壊計測技術の漏洩磁束法により推定されており、その一部はかぶりコンクリートを研って PC 鋼線の破断を確認している。

3、実験結果と考察

1) 鉛直方向の加速度応答

図 4 に G5～G9 の鉛直方向加速度を示す。図より、G9 の加速度応答は一波の減衰形状であるが、G5,G7 および G8 は減衰過程で再膨張が 1 回みられ、G6 は再膨張が 2 回みられた。よって、この減衰特徴から G9 は損傷が少なく、G5,7,8 は中程度の損傷、G6 は損傷が大きいと推測される。

2) 固有振動特性

一般に PC 鋼線が破断するとコンクリートに与える圧縮応力が低下する。それにより桁の剛性が低下し、固有振動数も低下すると考えられる。よって、図 4 の固有振動数より、振動数が 70 Hz 程度 G6,G8, G9 は損傷が少なく、振動数が小さい G5 (67 Hz) と G7 (64 Hz) の損傷が大きいと推測される。

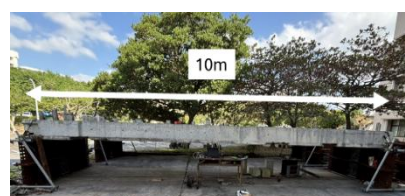


図 1 塩害劣化した PC

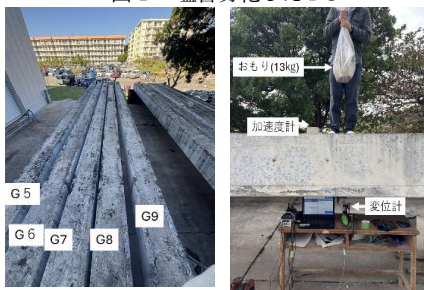


図 2 PC 桁試験

図 3 载荷と計測機器

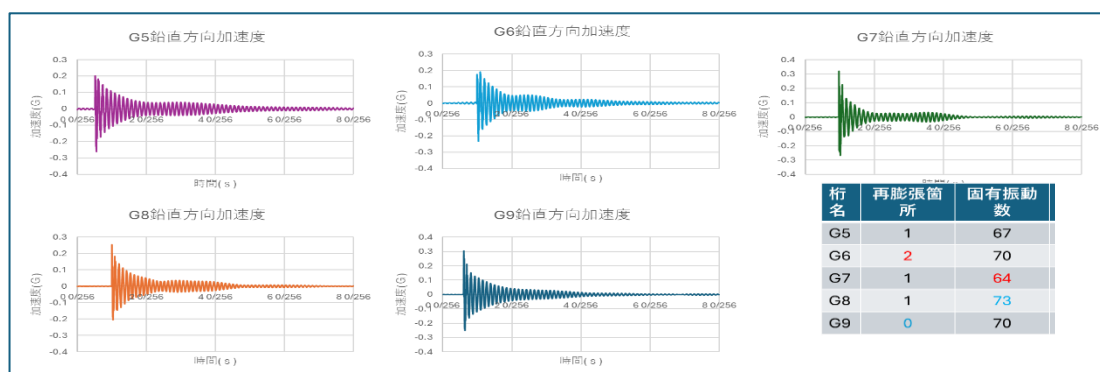


図 4 加速度応答

キーワード PC 桁 振動特性 劣化状態

連絡先 〒903-0213 西原町千原 1 番地 琉球大学工学部工学科 E-mail e225518@cs.u-ryukyu.ac.jp

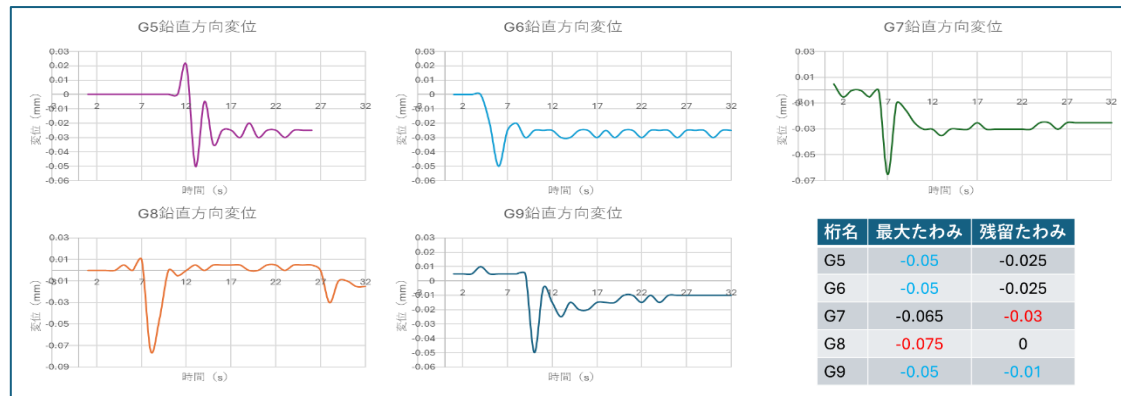


図 5 変位応答

3) たわみ応答特性

図 5 に変位応答を示す。図の最大たわみより、G5、G6、G9 のたわみは小さく、G7 と G8 のたわみが大きい。また、図 5 中の残留たわみ（おもり荷重による静止した状態）より、G9 の残留たわみは 0.01 mm と小さく、G5、G6、G7 は 3 倍の 0.03 程度である。これらより、G7 は損傷ありと推測される。

4) 損傷度の推測

表 1 に示す 4 つの項目で、損傷小を青色、損傷中を黒色、損傷大を赤色でまとめ、損傷度合いを点数化（損傷大 5 点→損傷小 1 点）し、平均点が高い順に損傷が激しいと推測した。（たわみは最高点を 4 点）。推測の結果、G7>G8>G5=G6>G9 の順に損傷していると推測される。

表 1 損傷度の推測

桁名	再膨張箇所	固有振動数	最大たわみ	たわみ	合計	平均	損傷順位（予想）
G5	1(4)	67(4)	-0.05(1)	-0.025(3)	(12)	(3)	3
G6	2(5)	70(3)	-0.05(1)	-0.025(3)	(12)	(3)	3
G7	1(4)	64(5)	-0.065(4)	-0.03(4)	(17)	(4.25)	5
G8	1(4)	73(1)	-0.075(5)	—	(10)	(3.3)	4
G9	0(1)	70(3)	-0.05(1)	-0.01(1)	(6)	(1.5)	1

5) 損傷度の推測と破断本数の比較

表 2 に漏洩磁束法により検出された PC 鋼線破断結果より得られた破断本数（写真 1）と推測された損傷度を示す。ここで推測と漏洩磁束法での損傷順位（損傷程度）が一致した場合を赤色で示す。表より、振動特性による推測と漏洩磁束法での損傷は概ね一致していた。

4、まとめ

本試験で漏洩磁束法により検出された PC 鋼線破断に対し、加速度および変位応答による橋梁の振動特性から損傷度を推測した結果、損傷度合いはある程度推測することは可能である。

今後、載荷荷重や衝撃方法等を検討し、各応答値の機械学習および構造解析を行い、精度向上を図る。

【参考文献】

- 1) 田邊優子ら：漏洩磁束法による PC 鋼材の破断検知に関する実験的研究，第 11 回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会
- 2) 玉城美七海ら：漏洩磁束法によるスターラップ近傍の破断特性及び破断検知精度向上に関する実験的研究，第 12 回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会，p117-118。



写真 1 PC 鋼線の破断状況例

表 2 損傷度の推測と破断本数

桁名	PC鋼線破断本数	損傷順位	損傷順位(予想)
G5	5	3	3
G6	3	2	3
G7	8	5	5
G8	6	4	4
G9	0	1	1

無線型加速度計を用いた海上橋における高欄トップレールの渦励振と振動抑制対策効果

琉球大学 ○大山詩織、下里哲弘、Yasin Malikzai

1. 研究の背景と目的

海上橋の高欄トップレール(以下、高欄)では、高欄レール同士の接合部のき裂が報告されている。このき裂が進展すると高欄が破断し利用者に被害をもたらす可能性がある。よって、高欄の損傷原因を明らかにするとともに、き裂発生防止策を検討する必要がある。

本研究では、風に伴うカルマン渦による振動に焦点を置き、振動の抑制手法として高欄にロープを巻き付けた場合の抑制効果を明らかにするとともに、より効果的なロープの巻き方の検討を目的とする。



図-1 高欄トップレール

2. 研究方法

(1) 対象高欄の特性及び計測環境

計測を行った高欄の計測環境を図-1に示す。この高欄は支柱間隔(L)1907 mm、断面積 5.32 cm²(h:50 mm, d:80 mm)の半楕円形、板厚 2.5 mmのアルミニウム合金製(A6063S-T5)である。

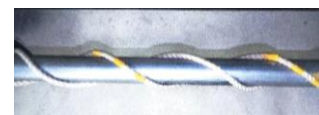


図-2 ロープ巻き方、ピッチ

(2) 計測方法

高欄の端から L/2 の位置(高欄支間中央)に無線加速度センサを設置し、高欄の橋軸直角方向について加速度を 30 秒間計測した。計測時の風速は 9~13m/s であった。

ロープの巻き方による振動の抑制効果の違いを調べるため、ロープなし(現状構造)、ロープあり(ピッチ 200 mm)、ロープあり(ピッチ 300 mm)、ロープあり(ピッチ 400 mm)の 4 パターンについて計測を行った。ここで、ピッチとは図-2に示すように、ロープを巻き付ける間隔としている。



3. 結果と考察

現状構造の加速度応答を図-3に示す。図より、渦励振による応答加速度は 1.5G 程度であった。また、図-7のヒストグラムより、応答加速度が 1.0G 以上のデータは 1182 個、1.5G 以上のデータは 528 個であった。

ピッチ 200 mmで高欄にロープを巻き付けた場合の加速度応答を図-4に示す。図より、現状構造より若干応答加速度が低下する傾向が伺える。図-7のヒストグラムより、その応答加速度が 1.0G 以上のデータは 550 個で現状構造の約 50%、1.5G 以上のデータは 163 個で現状構造の約 30%となり、振動抑制を確認できる。

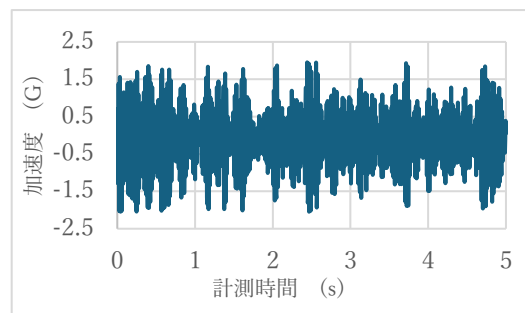


図-3 現状構造 加速度応答

キーワード 振動 カルマン渦 ピッチ

連絡先 〒903-0213 西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科

E-mail : e225528@u-ryukyu.ac.jp

ピッチ 300 mmで高欄にロープを巻き付けた場合の加速度応答を図-5 に示す。図より、図-4 のピッチ 200 mmで巻いた場合と似たような応答加速度を示したことから、ピッチ 300 mmで巻いた場合とでは効果に差はないと考えられる。また、図-7 のヒストグラムより、加速度が 1.0G 以上のデータは 769 個、1.5G 以上のデータは 286 個であった。現状構造と比較すると振動を抑制していることが確認できる。

ピッチ 400 mmで高欄にロープを巻き付けた場合の加速度応答を図-6 に示す。図-3,4,5 と比較すると加速度が大幅に減少していることから、高欄の振動を抑制するにはピッチ 400 mmでのロープの巻き付けがより効果的であると考えられる。また、図-7 のヒストグラムより、加速度が 1.0G 以上のデータは 195 個と現状構造の約 16%、1.5G 以上のデータは 60 個と現状構造の約 11%であった。

4. まとめ

本研究では、橋梁の高欄を対象に、風に伴うカルマン渦による振動の抑制手法として高欄にロープを巻き付けた場合の抑制効果を明らかにするとともに、より効果的なロープの巻き方を検証した。以下に本研究のまとめを示す。

- 1) 高欄にロープを巻き付けできる高欄表面の凹凸により、風の持つエネルギーを分散させることで、振動の原因となるカルマン渦を抑制することができる。
- 2) ロープを 400 mmピッチで巻き付ける場合に最も振動の抑制効果を発揮した。

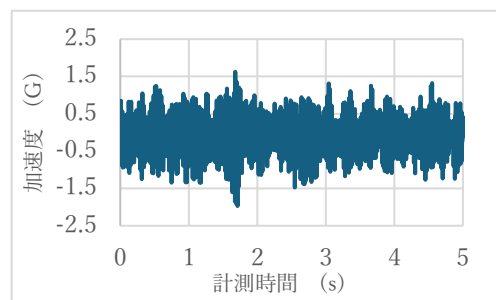


図-4 ロープ有り(ピッチ 200 mm)

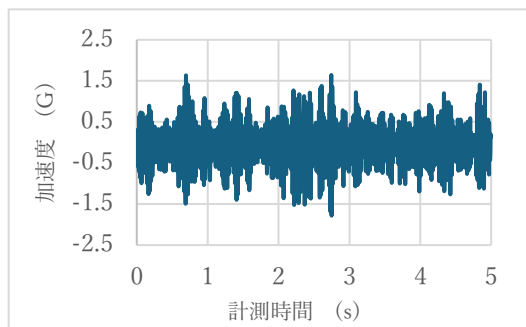


図-5 ロープ有り(ピッチ 300 mm)

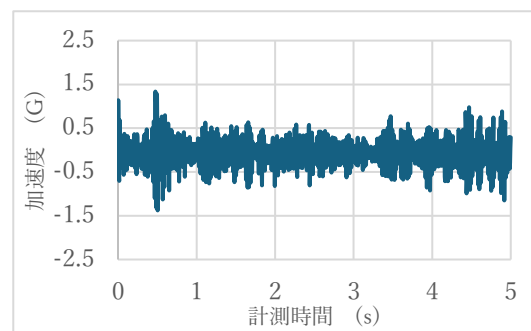
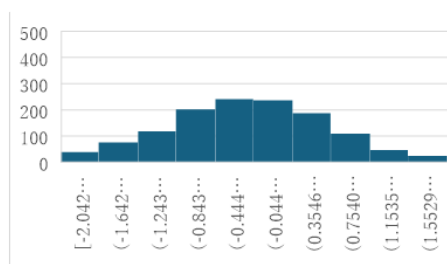
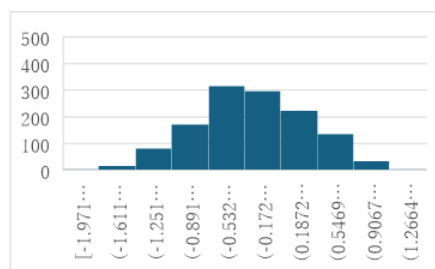


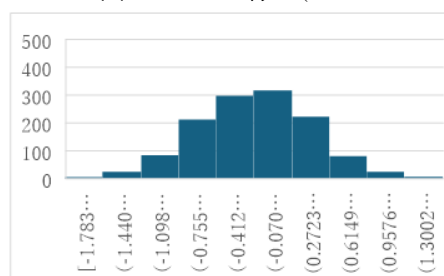
図-6 ロープ有り(ピッチ 400 mm)



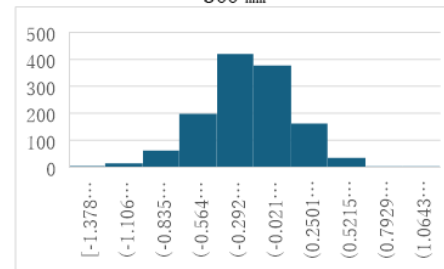
現状構造



200 mm



300 mm



400 mm

図-7 各データの度数分布

Session 4 新材料・新工法

ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの開発（その1：高力ボルトの基本性能）

横河ブリッジ 正会員 ○奥村優介 中村智昭 東洋アルミニウム 正会員 今村隆大 玉寄長治
神鋼ボルト 山本光春 琉球大学 正会員 下里哲弘

1. はじめに

沿岸部に位置する腐食環境の厳しい鋼橋においては、重防食塗装で防食しても、塗膜の早期劣化により著しい腐食が発生することがある。特に、鋼板のコバ部や高力ボルトのナット角部では、塗装が付着しにくく膜厚の確保が難しいため、それらの箇所を起点とした著しい腐食が進行し、高力ボルト継手の強度を低下させる可能性がある。このような理由から、沖縄県では一般的な重防食塗装系の下塗りを厚くした塗装系が規定されている¹⁾。しかし、このような塗装仕様であっても、高力ボルト継手部では、ボルトの締付け時に締結機と接触したナット角部にきずが発生し、そこが架設中の塗装までの期間に発錆することで、塗装仕様によらず塗装後も腐食の起点となり、著しく耐食性を低下させる。

本研究では、沿岸部などの腐食環境が厳しい鋼橋の高力ボルト継手部の長期耐食性を確保するため、ステンレスフレーク含有塗料を塗装した高力ボルトを開発した。本稿では、ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの特徴を述べ、高力ボルト（トルシア形）としての基本性能である軸力および軸力変化率を確認した。なお、文献 2),3)でもすでにステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの開発に着手し、締付け性能および耐食性を確認していたが、本稿ではより高力ボルトに適した塗料を使用することで本ボルトの性能を発揮できるように開発した仕様となっている。

2. ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの特徴

図1には、ステンレスフレーク含有塗料⁴⁾の概要を示す。本塗料は、塗膜樹脂中に鱗片状のステンレスフレーク顔料を積層させることで外部からの腐食因子を遮断し、鋼材の長期防食性を確保することが可能な塗料である。本塗料を用いた高力ボルト（トルシア形、写真1）は、特殊下地処理（犠牲防食）+ステンレスフレーク含有塗料の塗装仕様とした高い防食性能を有し、つぎの特徴を有する高力ボルトとして開発した。

①ステンレスフレーク含有塗料が締付け時の衝撃の犠牲となり、犠牲防食層を保持することで締付け後もナット角部の防食性を維持、②2層の防食層により、熔融亜鉛めっきボルト以上の防食性能を発揮（別途実施の腐食促進試験⁵⁾で防食性能を確認）、③塗装工程の熱影響による強度低下がなく、摩擦接合用高力ボルトの性能を維持（S10T相当）、④重防食塗装（F-11）などの塗装の塗り重ねが可能、⑤従来の高力ボルトと同様の締付け管理による施工が可能（ピンテール部および損傷部タッチアップ用の常乾補修塗料あり）

3. 締付け軸力

高力ボルトの締付け軸力はボルト、ナット、座金の表面の潤滑状態によって所定の値が得られる。開発したステンレスフレーク含有塗装高力ボルト（トルシア形、形状 M22、等級 S10T）においても日本道路協会規格⁶⁾の範囲内の締付け軸力を有することを確認した。ここでは、首下長さ 55mm、80mm、110mm のトルシア形高力ボルトを対象に、温度 0℃、20℃、60℃の状態での締付けを行った。締付け温度は、温度設定した恒温槽の中にセットした高力ボルトを入れて管理した。締付け軸力を確認したボルト本数は各首下長さ、各締付け温度で 30 本の計 90 本とした。これらは高力ボルトへのステンレスフレーク含有塗装の成膜安定性を確認するために 300 本塗装した中から無作為に抜き取り選定した。同様に試験を実施した防錆処理高力ボルト（首下長さ 80mm のみ、各締付け温度）との比較も合わせて実施した。

高力ボルトの締付け軸力の計測は、神鋼ボルト（株）所有の締付け専用試験機を用いて、一次締め、マーキング、本締めの順で行った。図2には、首下長さ 80mm の締付け軸力の計測結果を示す。同図より、ステンレスフ

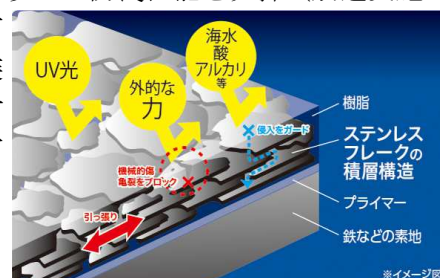


図1 ステンレスフレーク含有塗料の概要⁴⁾



写真1 ステンレスフレーク含有塗装高力ボルト（トルシア形）

キーワード ステンレスフレーク含有塗料、塗装高力ボルト、トルシア形、締付け軸力、軸力変化率

連絡先 〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町2-3 (株)横河ブリッジ TEL 072-241-1142

レーク含有塗装高力ボルトの締付け軸力の平均値は、一般的な無塗装のトルシア形高力ボルトの規格値⁶⁾(20℃の場合 212~249kN, 0℃または 60℃の場合 207~261kN)の範囲内となり、規格を満たすことが確認できた。締付け温度の違いについても、高温になるほど軸力が大きくなり、一般的な温度依存性と同様の傾向を示した。なお、割愛する首下長さ 55mm および 110mm も 80mm と同様の結果であった。

4. 軸力変化率（リラクセーション特性）

ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの締付け後の軸力変化率を調べるため、リラクセーション試験を行った。図 3 にはリラクセーション試験体の概要を示す。対象とするステンレスフレーク含有塗装高力ボルト（トルシア形）は、形状 M22, 等級 S10T, 首下長さ 55mm である。試験体は板厚 6mm の鋼板 2 枚をボルト 3 本で締付ける 1 面摩擦とし、鋼板の表面処理を無機ジंकリッチペイント（目標膜厚 75 μ m）とした。比較として、防錆処理高力ボルトも対象に試験を実施した。

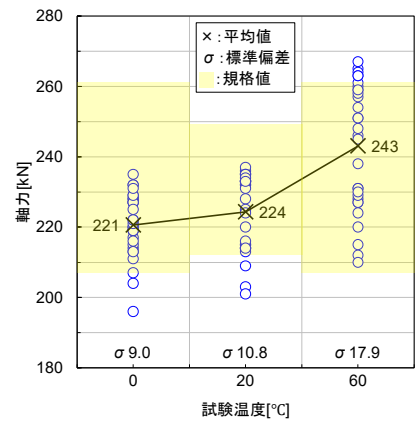
軸力の計測は、ボルト軸に埋め込んだひずみゲージで計測したひずみを軸力に換算することで行った。ボルトの締付けは、電動レンチで行い、一次締め後、トルク法によりピンテールの破断により軸力を管理した。ボルトの軸力変化率は文献 2) と同様に、締付けから 60 秒後のひずみを初期値として 90 日間計測し、締付けをしないダミーボルトを用いて温度変化によるひずみの補正を行った。

図 4 には、リラクセーション試験により計測した軸力変化率を示す。縦軸の軸力変化率は、試験体 3 本の軸力の平均値を初期値で除した値とした。同図には比較として、文献 2) のステンレスフレーク含有塗装高力ボルト（トルシア形）および無塗装の高力ボルト（六角, トルシア形）の結果も示す。なお、試験体 3 本の軸力変化率のばらつきは、文献 2) のケースも含めて、2%程度である。同図より、ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの軸力変化率は、90 日後に 87%程度となり、防錆処理高力ボルトまたは無塗装の高力ボルトに比べてわずかに小さいものの、概ね同程度といえる。一般に、添接板の表面処理が無機ジंकリッチペイントの場合はボルトの軸力低下が 10%程度⁷⁾であることや、締付け直後に連続的に変化する軸力の瞬時値を使用したデータロガーの計測間隔で計測することが困難であり、初期値の誤差を含むことを考慮すれば、本試験結果はばらつきの範囲内と考えられる。

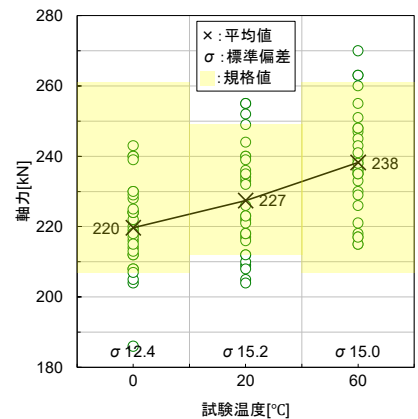
5. おわりに

本研究では、ボルト締結時にきずが発生しやすいナット角部の防食性を維持できる可能性がある高力ボルトとしてステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの特徴を整理し、締付け性能を確認した。本稿で対象としたステンレスフレーク含有塗装高力ボルトは、締付け軸力および軸力変化率が従来の高力ボルトと同様であり、沿岸部など腐食環境の厳しい鋼橋の高力ボルトに本ボルトを使用することでボルト継手部の長期耐食性が期待される。

参考文献 1) 沖縄総合事務局開発建設部・沖縄県土木建築部：沖縄地区鋼橋防食マニュアル, 平成 31 年。2) 加藤健太郎, 青山大悟, 望月大地, 下里哲弘, 山本光春, 玉寄長治：ステンレスフレーク含有塗料を用いた高力ボルトの締付け試験およびリラクセーション試験, 2022 年度土木学会西部支部沖縄会第 12 回技術研究発表会概要集, pp.85-86, 2023。3) 青山大悟, 望月大地, 下里哲弘, 加藤健太郎, 山本光春, 玉寄長治：ステンレスフレーク含有塗料を用いた高力ボルトの耐腐食性の検証, 2022 年度土木学会西部支部沖縄会第 12 回技術研究発表会概要集, pp.15-16, 2023。4) 東洋アルミニウム(株)：ステンシル® (SUS フレーク含有塗料), <https://www.toyal.co.jp/products/feature/sabikonazu.html>, 2024 年 12 月閲覧。5) 今村隆大, 玉寄長治, 奥村優介, 中村智昭, 山本光春, 下里哲弘：ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの開発 (その 2：防食性能), 2024 年度土木学会西部支部沖縄会第 14 回技術研究発表会概要集, 2024 (投稿中)。6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 平成 29 年。7) 南邦明：厚膜型無機ジंकリッチペイントを施した摩擦面で 15%増し締めした高力ボルト継手試験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.1, pp.32-39, 2017。



(a) ステンレスフレーク含有塗装高力ボルト



(b) 防錆処理高力ボルト

図 2 締付け軸力の計測結果（首下長さ 80mm）

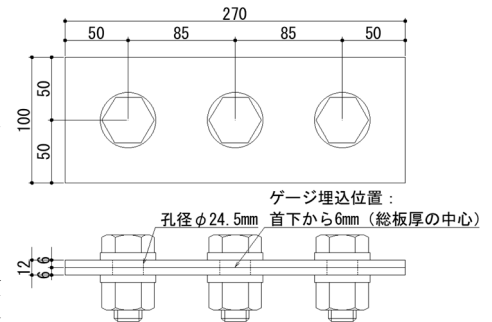


図 3 リラクセーション試験体の概要

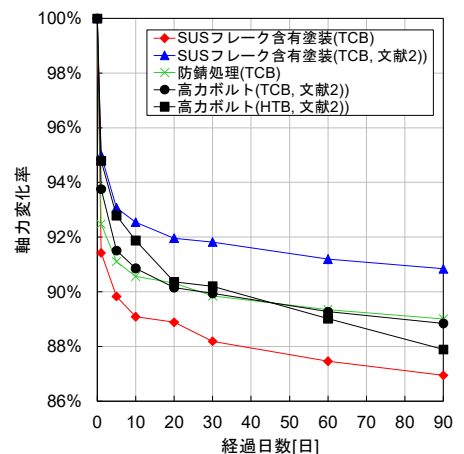


図 4 軸力変化率

ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの開発（その2：防食性能）

東洋アルミニウム 正会員 ○今村隆大 玉寄長治
神鋼ボルト 山本光春

横河ブリッジ 正会員 奥村優介 中村智昭
琉球大学 正会員 下里哲弘

1. はじめに

鋼橋の高力ボルト継手部では、ボルト締付け時にナット角部にきずがつきやすく、重防食塗装後もそこが起点となって著しい腐食が発生することがある。このように高力ボルトの著しい腐食の起点となる締付け時のきずが発生しても防食性を維持できる高力ボルトとして、筆者らはステンレスフレーク含有塗装高力ボルトを開発した¹⁾³⁾。ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトは、一般的な高力ボルトに特殊下地処理（犠牲防食）＋ステンレスフレーク含有塗料で構成する塗装を施工した塗装高力ボルトであり、溶融亜鉛めっき高力ボルト以上の防食性能を発揮することを期待している。その他のステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの特徴については、文献3)を参照されたい。

本研究では、ステンレスフレーク含有塗装高力ボルト（トルシア形）の防食性能に着目し、通常の高力ボルトセットおよび鋼板に締付けた後の高力ボルトを対象に腐食促進試験を実施し、従来の防食性能を有するボルトと比較してその性能を確認した。なお、文献3)でも本ボルトの防食性能を確認しているが、本稿ではより高力ボルトに適した塗料を使用することで本ボルトの性能を発揮できるように開発した仕様となっている。

2. 高力ボルトセットの防食性能

ここでは塗料自体の耐食性に着目し、高力ボルトにステンレスフレーク含有塗装を施工した締付け前のボルトセットを対象に腐食促進試験を行った。対象とするボルトは、ステンレスフレーク含有塗装高力ボルト、防錆処理高力ボルト、溶融亜鉛めっき高力ボルトのボルト、ナット、座金のボルトセットである。腐食促進試験は複合サイクル試験および塩水噴霧試験とし、対象としたボルトセットにて、ボルトねじ部を除き、締付けた後に外面に露出する箇所での赤錆が発生するまでの試験期間を耐食性がある期間と判断した。複合サイクル試験は、JIS K 5600-7-9 に従い、図1に示す試験条件とし、30 サイクル毎に各部品の発錆状況を目視観察した。塩水噴霧試験は、JIS Z 2371 に従い、試験温度 $35 \pm 2^\circ\text{C}$ 、NaCl 濃度 5% とし、250 時間経過毎に各部品の発錆状況を目視観察した。

写真1には、複合サイクル試験および塩水噴霧試験結果を示す。これより、ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトは、複合サイクル試験が 120 サイクル、塩水噴霧試験が 1000 時間程度でボルト締付け時に外面に露出する箇所（両試験とも座金表面）から赤錆

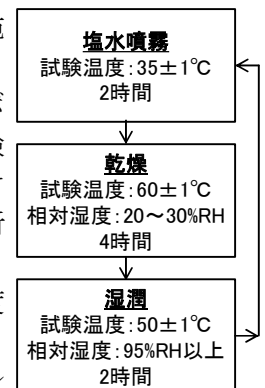


図1 複合サイクル試験条件

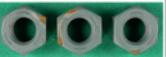
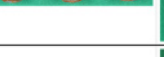
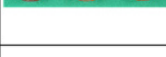
ボルトの種類	試験開始前 (複合サイクル試験体)		複合サイクル試験 (CCT)		サイクル数	塩水噴霧試験 (SST)		経過時間
			発錆時			発錆時		
ステンレスフレーク 含有塗装高力ボルト					120			1000
防錆処理高力ボルト					30			250
溶融亜鉛めっき 高力ボルト					30			250

写真1 高力ボルトセットの腐食促進試験結果

キーワード ステンレスフレーク含有塗料、塗装高力ボルト、複合サイクル試験、塩水噴霧試験、防食性能
連絡先 〒639-2277 奈良県御所市室410 東洋アルミニウム（株） TEL 0745-62-5151

が確認され、防錆処理高力ボルトおよび溶融亜鉛めっき高力ボルトに比べて 4 倍程度の防食性を有することがわかる。これは、評価対象部とした部品表面ではステンレスフレーク含有塗装の付着が良好であり、塗装仕様の高い防食性が発揮されたためである。

3. 鋼板に締付けた後の高力ボルトの防食性能

ここでは鋼板に締付けた後に生じるナット角部の防食性に着目し、鋼板に締付けた後の高力ボルトを対象に複合サイクル試験を行った。対象とする高力ボルトはステンレスフレーク含有塗装高力ボルト（トルシア形）、防錆処理高力ボルト（トルシア形）、溶融亜鉛めっき高力ボルトとし、電動レンチを用いたトルク法またはナット回転角法により、板厚 6mm の鋼板 2 枚をボルト 2 本で締付ける 1 面摩擦とした。ボルトの挿入方向は、ナット側と頭側の発錆状況を比較するため、互い違いとした。試験体の鋼板の表面処理は、無機ジンクリッチペイント（目標膜厚 75 μ m）である。なお、トルシア形高力ボルトのピンテール破断面は、専用塗料にて補修塗装して試験を行った。複合サイクル試験は 2 章と同様の方法で行い、鋼板を除くボルトセットに赤錆が発生するまでの試験期間を評価した。

写真 2 には、締付け試験体の複合サイクル試験結果を示す。これより、ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトは 120 サイクルで締付け時にきずついたナット角部から赤錆が発生し、30 サイクルでナット角部やボルトねじ部に赤錆が発生した防錆処理高力ボルト、赤錆が点状に発錆した溶融亜鉛めっき高力ボルトに比べて 4 倍程度の防食性を有することがわかる。この理由として、ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトは締付け時にナット角部がきずついたり、塗装が付着しにくいねじ部でも犠牲防食層が防食性を維持するためである。

4. おわりに

本研究では、ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの防食性能をボルトセットおよび鋼板に締付けた後のボルトを用いて、従来の防食性能を有するボルトと比較して評価した。本稿で対象としたステンレスフレーク含有塗装高力ボルトは、本研究の腐食促進試験にて、塗装仕様自体および鋼板に締付けた後の塗装高力ボルトとして防錆処理高力ボルトおよび溶融亜鉛めっき高力ボルトの 4 倍程度の防食性能が期待できる。ただし、実橋において、ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトはその上に F-11 などの重防食塗装を施工して長期耐食性を期待するボルトであり、防錆処理高力ボルトは架設中の一時的な防錆を期待するボルト、溶融亜鉛めっき高力ボルトは供用期間中に無塗装で使用するボルトであることを注記する。

参考文献 1)加藤健太郎, 青山大悟, 望月大地, 下里哲弘, 山本光春, 玉寄長治: ステンレスフレーク含有塗料を用いた高力ボルトの締付け試験およびリラクセーション試験, 2022 年度土木学会西部支部沖縄会第 12 回技術研究発表会概要集, pp.85-86, 2023. 2)青山大悟, 望月大地, 下里哲弘, 加藤健太郎, 山本光春, 玉寄長治: ステンレスフレーク含有塗料を用いた高力ボルトの耐腐食性の検証, 2022 年度土木学会西部支部沖縄会第 12 回技術研究発表会概要集, pp.15-16, 2023. 3)奥村優介, 中村智昭, 今村隆大, 玉寄長治, 山本光春, 下里哲弘: ステンレスフレーク含有塗装高力ボルトの開発 (その 1: 高力ボルトの基本性能), 2024 年度土木学会西部支部沖縄会第 14 回技術研究発表会概要集, 2024 (投稿中)。

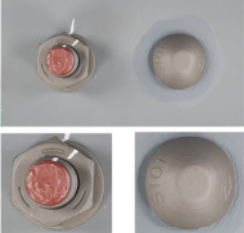
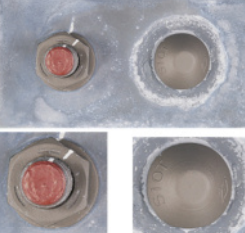
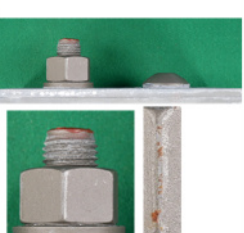
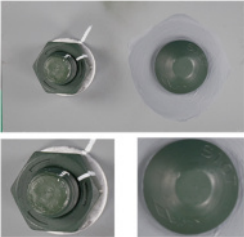
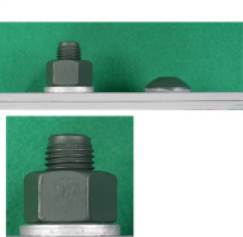
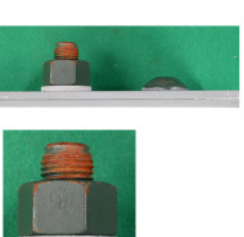
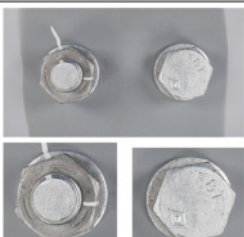
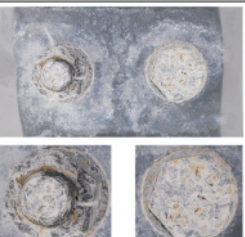
ボルトの種類	試験開始前			発錆時	サイクル数
ステンレスフレーク含有塗装高力ボルト					120
防錆処理高力ボルト					30
溶融亜鉛めっき高力ボルト					30

写真 2 締付け試験体の複合サイクル試験結果

ステンレスクラッド鋼の腐食促進試験による耐食性の評価Ⅱ

J F Eエンジニアリング(株) ○田中 裕明

J F Eスチール(株) 栗原 康行

琉球大学 下里 哲弘

1. はじめに

ステンレスクラッド鋼は、溶接構造用圧延鋼材（炭素鋼）を母材とし、合せ材としてステンレス鋼を重ね合わせた複合鋼板であり、北陸自動車道の新手取川橋リニューアルプロジェクトにおいて本邦で初めて鋼橋の主構造に採用された。新手取川橋では、架橋地点は日本海に面した極めて厳しい塩害環境下にあり維持管理の負荷軽減が求められたことから、合せ材には最も耐食性が高い「耐海水性ステンレス鋼」に分類されるオーステナイト系ステンレス鋼 JSL310Mo が採用された。一方、今後のステンレスクラッド鋼の鋼橋への適用拡大を検討する上では、架橋環境に応じた最適な合せ材の材質選定が重要となると考えられる。

そこで、本検討では、ステンレスクラッド鋼の耐食性の基礎的検討として、各種合せ材について溶接部を含む試験体を用いた腐食促進試験を実施した。

2. 合せ材の材質について

検討対象とする合せ材の材質は、JSL310Mo に加え、参考文献 1)で示されている耐食性区分を参考とし、圧延法により製造可能な材質として SUS304, SUS316L, SUS329J3L を選定した。各材質の孔食指数 PI (Pitting Index) を表-1 に、合せ材の被覆溶接に使用した溶接材を表-2 に示す。

表-1 合せ材材質の孔食指数

合せ材材質	系	主成分	PI値
SUS304	オーステナイト系	18Cr+8Ni	18
SUS316L	オーステナイト系	17Cr-12Ni-2.5Mo	25
SUS329J3L	二相系	22Cr-5Ni-3Mo-0.15N	34
JSL310Mo	オーステナイト系	25Cr-23Ni-4.5Mo-0.2N	43

表-2 合せ材の溶接材

合せ材材質	溶接材
SUS304	DW309L
SUS316L	DW309MoL
SUS329J3L	GFW329J4L
JSL310Mo	ハステロイ HC-22

3. 溶接部耐孔食性試験

(1) 試験方法

ステンレスクラッド鋼は複合鋼板であり、炭素鋼を溶接した後にステンレス鋼を被覆溶接するため、母材である炭素鋼成分の溶け込みによって成分希釈が発生し、溶接部の耐食性能が低下する懸念がある。そこで複合サイクル腐食促進試験に先立ち、溶接部の耐食性を確認することを目的として JIS G 0578 ステンレス鋼の塩化第二鉄腐食試験を実施し、PI と相関性のある孔食発生臨界温度(CPT)を把握した。試験体は図-1 に示すとおりステンレスクラッド鋼を板継溶接した後に溶接部を含む合せ材のみを切り出したものとし、上面のみを評価対象として下面を養生して試験を実施した。

(2) 試験結果

試験結果を表-3 に示す。各材質について概ね PI 値から期待される孔食発生臨界温度となったが、SUS329J3L の溶接部は一般部より耐食性が劣る結果となった。

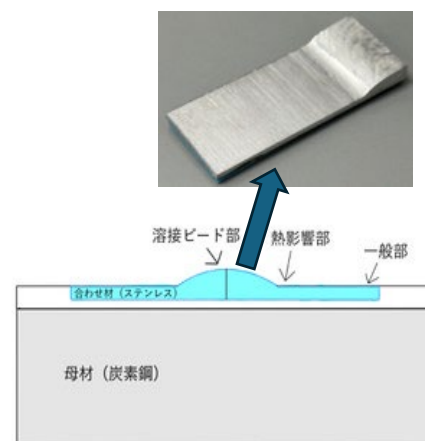


図-1 塩化第二鉄腐食試験の試験片

キーワード ステンレスクラッド鋼, 孔食指数, 複合サイクル腐食促進試験

連絡先 〒100-0005 東京都千代田区丸の内1丁目8番1号 J F Eエンジニアリング(株) TEL: 03-6212-0057

4. 複合サイクル腐食促進試験

(1) 試験方法

実施する複合サイクル腐食試験は、各種腐食促進と屋外暴露試験の相関に関する既往の研究²⁾を参考に沖縄での暴露試験との相関性と促進倍率が比較的高いJASO M609に準拠する方針とし、使用する恒温高湿器の制御範囲を踏まえて試験条件を設定した(図-2)。ステンレスクラッド鋼を板継溶接した後に溶接部を含む試験体を切り出し、炭素鋼露出部を養生して複合サイクル腐食試験を行った。実施サイクル数は、155 サイクルとし5 サイクル毎に表面を観察した。

(2) 試験結果

155 サイクル完了時における各材質の試験体表面の状態を図-3 に示す。目視による観察では、SUS304 には一般部、溶接部ともに腐食が見られ、とくに熱影響部(HAZ)において腐食が大きい結果となった。SUS316L、SUS329J3L については溶接部に局所的に腐食が生じたものの一般部には目立った腐食はなく健全な状態であった。JSL310Mo は一般部、溶接部ともに健全な状態であった。次に、一般部と溶接部(熱影響部(HAZ)含む)に区分し、参考文献³⁾を参考にレイティングナンバーに準拠して試験体表面のさび発生程度を整理した。結果を図-4 に示す。腐食が生じた SUS304 の一般部、溶接部、SUS316L と SUS329J3L の溶接部では初期の段階から腐食が進展するものの、いずれも 80 サイクル程度以降は腐食の進展が限定的となる傾向が見られた。また、塩化第二鉄試験において SUS329J3L の溶接部は一般部より耐食性が低い結果となったが、複合サイクル試験の結果から SUS316L の溶接部と同程度の耐食性であったと推察される。合せ材の材質選定に際しては、溶接部を含む耐食性の評価が重要であると考えられる。

5. まとめ

ステンレスクラッド鋼の各種合せ材について溶接部を含む試験体で腐食促進試験を実施し、耐食性の基礎的検討を行った。今後はマイクロスコープ等による表面の腐食状態の分析を行うとともに、長期暴露試験を実施し、環境に応じたステンレスクラッド鋼の合せ材の耐食性の研究を進める予定である。

参考文献

- 1) ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針(案) 一般社団法人 日本鋼構造協会, 2015.11
- 2) 藤原 博, 田原 芳雄: 鋼橋塗装の長期防錆性能の評価に関する研究, 土木学会論文集 No570, I-40, 1997.7
- 3) JIS G 0595:2004 ステンレス鋼の表面さび発生程度評価方法

表-3 塩化第二鉄腐食試験結果

合せ材材質	試験実施温度(°C)	孔食発生臨界温度	
		一般部	溶接部
SUS304	0, 5, 10	5°Cで孔食発生	5°Cで孔食発生
SUS316L	10, 15, 20	15°Cで孔食発生	20°Cで孔食なし
SUS329J3L	40, 45, 50	50°Cで孔食なし	40°Cで孔食発生
JSL310Mo	60, 65, 70, 75	70°Cで孔食発生	75°Cで孔食なし

※太字: PI値から期待される孔食発生臨界温度を示す。

試験条件		
塩水噴霧	乾燥	湿潤
5%NaCl	⇒ 相対湿度40%	⇒ 相対湿度90%
35°C	⇒ 60°C	⇒ 50°C
2時間	4時間	2時間

図-2 複合サイクル腐食試験条件

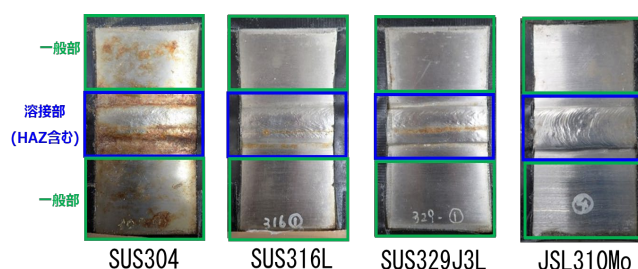


図-3 腐食試験 155 サイクル完了時の試験体表面状態

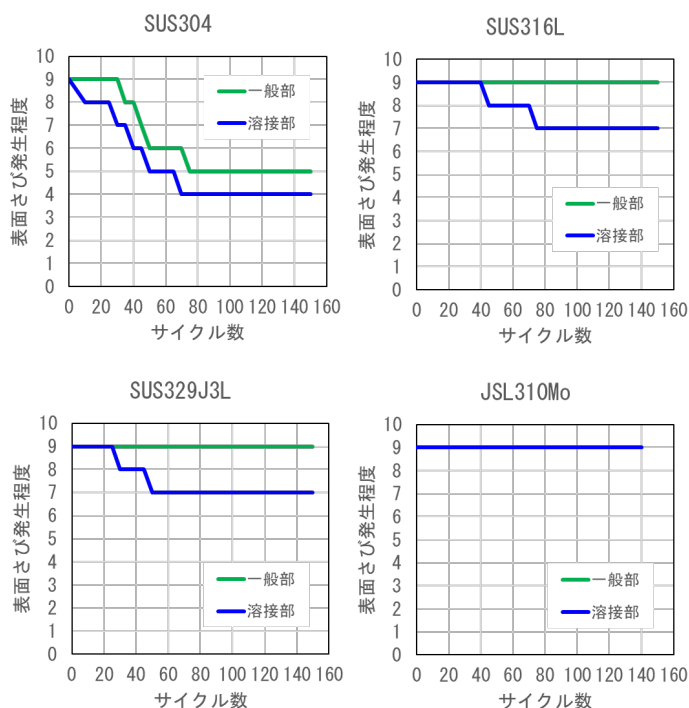


図-4 表面さび発生程度の変化

ステンレス鋼と炭素鋼を異材溶接接合した十字断面長柱の圧縮载荷実験

横河ブリッジホールディングス 正会員 ○加藤健太郎 山田悠作 結城洋一 石井博典

1. はじめに

ステンレス鋼は従来の構造用炭素鋼に比べて優れた耐食性を有するものの、材料価格が高価である。そのため、土木鋼構造物に活用するには腐食環境が厳しい部位に部分的に使用することが経済的である。鋼道路橋では鋼桁の桁端部に著しい腐食が発生する場合があります。ここにステンレス鋼を適用することで耐久性の向上が期待できる。本研究では、桁端部に位置するI形断面桁の支点上補剛材部が道路橋示方書¹⁾(以降、道示)にて軸方向圧縮力を受ける柱として設計されることに着目し、ステンレス鋼と炭素鋼を異材溶接した十字形断面長柱の圧縮耐力を载荷実験により調べた。

2. 実験方法

本研究で対象とする鋼材は、リーニ二相系ステンレス鋼 SUS821L1 および炭素鋼 SM490Y である。表1および図1には、引張試験により得られた対象鋼材の機械的性質および応力ひずみ関係の一例を示す。引張試験片は、後述の供試体板パネルの板厚 t と同じ $t=9\text{mm}$ および $t=12\text{mm}$ の JIS 1A 号試験片とし、载荷軸方向である圧延方向から採取した。

図2には対象とする十字形断面長柱供試体の形状を、図3には試験ケースである供試体の鋼材配置を示す。供試体は、柱の全体座屈が卓越するように表1の降伏強度で算出する式(1)に示す細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が道示の耐力曲線における限界細長比パラメータ ($\bar{\lambda}=0.2$) より大きくなるように設計した。

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l}{r} \quad (1)$$

ここで、 σ_y : 降伏応力、 E : 弾性係数 ($=200\text{GPa}$)、 l : 有効座屈長 ($=\beta L$)、 β : 座屈長係数 ($=0.7$)、 r : 断面二次半径

ただし、SUS821L1 (Case3) の場合は σ_y を $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力で置き換え、Case1 および Case2 の降伏応力は $(1/2)\sigma_y + (1/2)\sigma_{0.2}$ 、 $(3/4)\sigma_y + (1/4)\sigma_{0.2}$ とした。

一方、板パネルの幅厚比パラメータ R については、実際の材料強度が公称値に比べて大きく、公称値で計算していた設計時に対して、 $t=9\text{mm}$ の板パネルで限界幅厚比パラメータ ($R=0.7$) よりも若干大きな値となっている。

圧縮载荷実験は、2,000kN 万能試験機を用いて、試験機定盤上に設置した供試体に、球座を有する耐圧盤で軸方向に加力して行った。試験体数は各実験ケースで1体である。

表1 対象鋼材の機械的性質

鋼種	板厚 t [mm]	弾性係数 E [GPa]	0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ [MPa]	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ [MPa]	降伏応力 σ_y [MPa]	引張強度 σ_u [MPa]	伸び [%]
SUS821L1	9	193	351	518	—	718	42
	12	192	356	523	—	716	42
SM490Y	9	209	—	—	391	554	26
	12	210	—	—	407	565	26

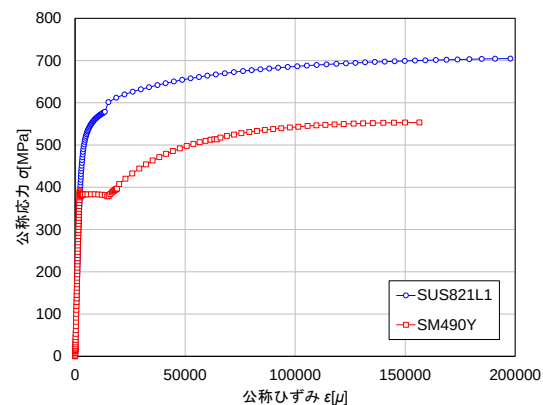


図1 対象鋼材の応力ひずみ関係 ($t=9\text{mm}$)

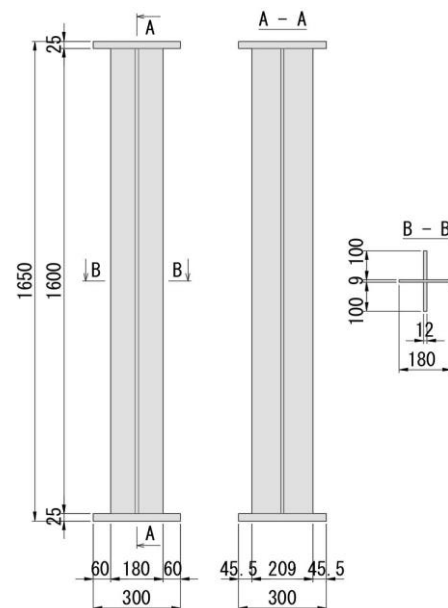


図2 十字形断面長柱供試体の形状

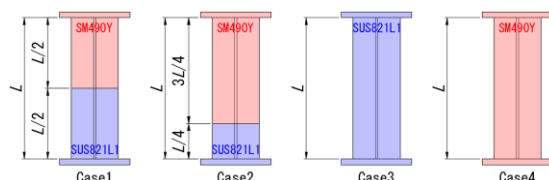


図3 供試体の鋼材配置 (実験ケース)

キーワード ステンレス鋼, SUS821L1, SM490Y, 異材溶接柱, 圧縮耐力

連絡先 〒261-0002 千葉県千葉市美浜区新港88 (株) 横河ブリッジホールディングス TEL 043-247-8411

3. 実験結果

写真1には、載荷終了後（除荷後）の供試体の残留変形状を示す。同写真より、供試体の変形はすべてのケースで柱全体の変形に伴って発生した板パネルの局部座屈がみられ、弱軸回りの全体座屈が卓越した。異材溶接供試体である Case1 および Case2 は SM490Y の範囲で局部座屈が発生しているものの、その位置は単一材料で構成される Case3 および Case4 と概ね同等であり、異材溶接線が全体座屈に影響を及ぼす変形状でないことがわかる。

図4には、圧縮載荷実験により得られた荷重と軸方向変位の関係を示す。同図の縦軸は試験機の荷重計で計測した荷重値を、横軸は供試体上側載荷板に柱軸方向で設置した4本の変位計の計測値を平均した値である。また、同図中の拡大点は各ケースの最大荷重点を、破線または一点鎖線は SUS821L1 または SM490Y の降伏荷重 P_y および降伏変位 δ_y を示す。なお、最大荷重後の軟化領域の計測データが少ない理由は、全体座屈発生後に急激に面外変形が進行し、上端ピン支持の回転角が大きくなり変位計の許容量を超えたためである。同図より、荷重と軸方向変位の関係は概ねすべてのケースで同様な挙動となり、SUS821L1 の適用比率が大きくなるにつれて最大荷重も大きいことがわかる。これは、材料強度が同クラスとして選定した鋼材であったが、表1に示すように実際の材料強度の違いが明確に現れた結果と考えられる。

図5には、十字形断面長柱の圧縮耐力と道示¹⁾の耐力曲線の比較を示す。同図の縦軸は載荷実験で得られた最大荷重を降伏荷重で除した値、横軸は細長比パラメータである。同図より、Case3 の圧縮耐力は道示の耐力曲線に比べて10%程度大きくなるものの、Case1, Case2 および Case4 は5%程度小さくなる。これは、残留応力や初期たわみなどの初期不整の影響によって圧縮耐力が低下したと考えられるが、板パネルの幅厚比パラメータが限界幅厚比パラメータよりも大きいいため、連成座屈していることも考えられる。そこで、表2には道示の長柱および自由突出板の耐力曲線から算出した圧縮耐力より、積公式を用いて算出した連成座屈強度をまとめた。同表より、載荷実験で得られた圧縮耐力はすべてのケースで道示の耐力評価と同等以上となった。以上の結果より、異材溶接した十字形断面長柱の圧縮耐力は既往の耐力評価を適用できると考えられる。

4. おわりに

本研究では、ステンレス鋼と炭素鋼を異材溶接接合した十字形断面長柱の圧縮載荷実験を行い、圧縮耐力を調べた。対象とした異材溶接十字形断面長柱は、異材溶接線が面外変形に及ぼす影響がみられないこと、積公式による連成座屈強度評価を用いることで、従来の構造用炭素鋼と同様に圧縮耐力を評価できる可能性がある。

参考文献

1)公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017。



(a)Case1 (b)Case2 (c)Case3 (d)Case4

写真1 載荷後の供試体の残留変形状

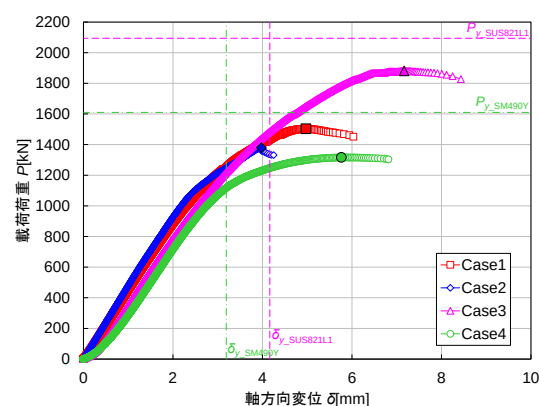


図4 荷重と軸方向変位の関係

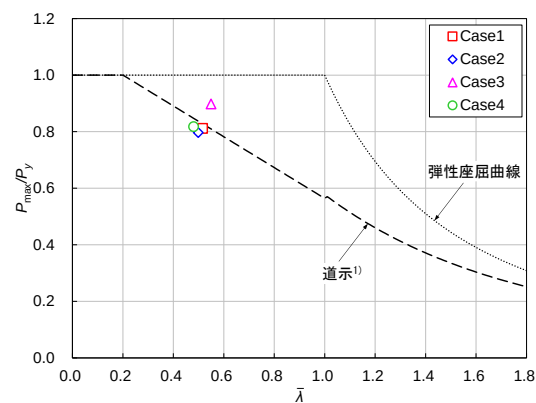


図5 圧縮耐力と耐力曲線の比較

表2 十字形断面長柱の連成座屈強度

ケース	全体座屈 強度	局部座屈強度		連成座屈 強度(A)	実験値 (B)	(B)/(A)
		t=9	t=12			
Case1	0.83	0.89	1.0	0.74	0.81	1.10
Case2	0.84	0.93	1.0	0.78	0.80	1.02
Case3	0.81	0.83	1.0	0.67	0.90	1.34
Case4	0.85	0.98	1.0	0.83	0.82	0.99

大気暴露したステンレス鋼桁端部構造の外観評価

建設技術研究所 ○案浦宏太 荒牧聡 羽根航
琉球大学 下里哲弘 城間大

1. はじめに

鋼道路橋の桁端部は、腐食劣化が生じやすい環境であるため、図-1 に示すように桁端部のみステンレス鋼を適用することで、橋梁全体の LCC 抑制と耐久性向上が期待される¹⁾。しかし、炭素鋼とステンレス鋼の腐食形態は全面腐食と局部腐食で異なる²⁾ため、橋梁構造物としての性能評価手法や維持管理手法が十分に確立されているとは言えない。

本稿では、約 4 年間大気暴露したステンレス桁端部構造を対象とした目視観察および表面さび発生面積率による外観評価結果を報告する。

2. ステンレス鋼桁端部構造の暴露環境と外観評価方法

対象は、図-1 に示す鉄桁橋³⁾で、観察箇所はワッペン鋼板のさび厚が大きな西側 G2 桁とした。該当箇所は、桁端部に孔食指標 $PREN (=Cr+3.3Mo+16N) = 25$ のリーニ二相系ステンレス鋼 SUS821L1、炭素鋼 SM490 との溶接部は低炭素鋼用ステンレスワイヤ DW-309L が採用されている。なお、2020 年の建設時に発錆はなく、炭素鋼の塗膜も健全であった。

暴露環境は、琉球大学工学部付属地域創生研究センターの暴露場であり、年平均温度 22.5℃、年平均相対湿度 81.5%、飛来塩分量 0.473 mdd、年間さび厚量 160 μm の厳しい暴露環境といえる。

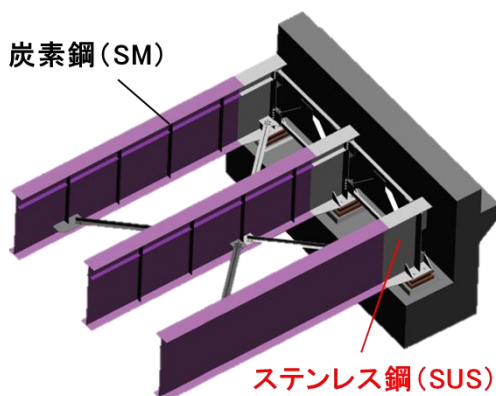
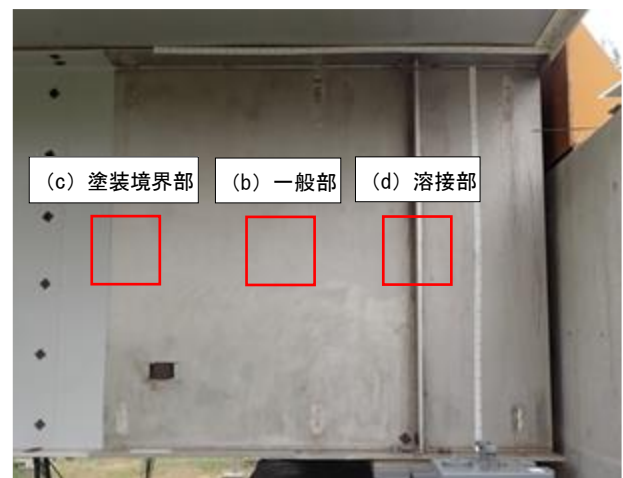
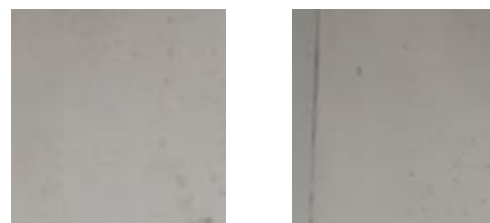


図-1 提案する桁端部
ステンレスハイブリッド構造

外観評価方法は、カメラ(OLYMPUS 社 Tough TG-6)により撮影した桁端部ウェブの JPEG 画像を、200×200 mm 程度の範囲に着目して分割し、治具等を削除する。その後、表面さび発生の有無で 2 値化し、表面さび発生面積率が 0~100 %で変化した 10 種類の標準写真と比較してレイティングナンバ $RN = 9 \sim 0$ で評価する⁴⁾。(RN=9 が表面さび発生面積率 0%)

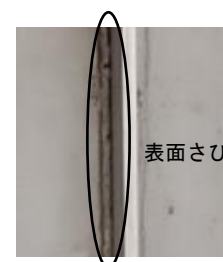


(a) ハイブリッド桁端部



(b) 一般部

(c) 塗装境界部



(d) 溶接部

写真-1 暴露 1 年後の目視観察

3. 外観評価結果

写真-1 に暴露 1 年後, 写真-2 に暴露 4 年後の目視観察結果を示す. 写真-1(b), 写真-2(b)より, 一般部では, 暴露 1 年後および 4 年後で表面さびの発生が確認できない. 一方, 写真-1(c), 写真-2(c)より, 塗装境界部では, 暴露 1 年後では表面さびが確認できず, 暴露 4 年後では, 表面さびを確認した. また, 写真-1(d), 写真-2(d)より, 溶接部では, 暴露 1 年後から表面さびが確認できる. 従って, 今回の対象では, 溶接部, 塗装部, 一般部の順で表面さびの発生が進行していると考えられる.

図-2 に 2 値化した画像をもとに作成したレイティングナンバ RN のコンターを示す. 結果, 目視観察とレイティングナンバ RN による評価は概ね一致しており, 一般部のレイティングナンバ RN は 9~7 (表面さび発生面積率 0~0.4%), 塗装境界部のレイティングナンバ RN は 7~6 (表面さび発生面積率 0.4~2.7%), 溶接部のレイティングナンバ RN は 6~5 (表面さび発生面積率 2.7~15.0%) であった.

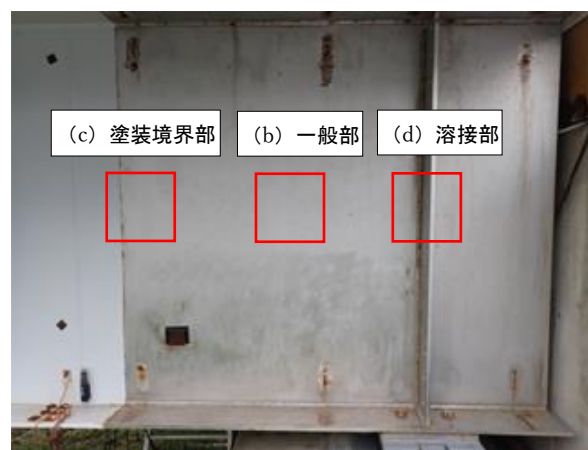
4. まとめ

本稿では, 約 4 年間大気暴露したステンレス鋼桁端部構造を対象として, 目視観察および画像撮影による外観評価を行った. 結果, 目視観察から, 溶接部および塗装境界部にて表面さびの発生を確認した. また, 画像計測から, 表面さび発生面積率を定量的に評価した.

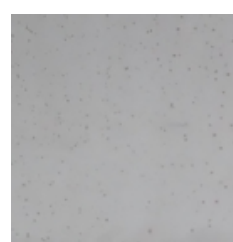
今後は, 溶接部や塗装境界部の表面さびを化学的に分析し, 孔食の評価を行う. また, 表面さびの外観評価が, 断面変化量 (例えば, 孔食深さ), 耐荷性能, 疲労耐久性性能等に与える影響を検討する予定である.

参考文献

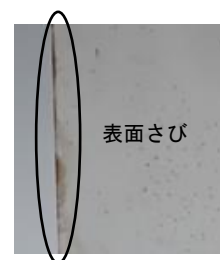
- 1) 日本鋼構造協会: 鋼橋の頑強な防食技術及び合理的な腐食診断と補修技術, JSSC テクニカルレポート, 2023.
- 2) 土木研究所: 沖ノ島島における建設材料耐久性試験-第II期金属材料の暴露 19 年の結果-, 土木研究所資料, 2012.
- 3) 下里哲弘, 荒牧聡, 山下修平, 志村保美, 松下裕明, 長嶺由智: 高耐久性鋼橋を目的としたステンレス鋼桁端部構造の製作, 橋梁と基礎, pp.80-83, 2022.
- 4) 日本工業規格: ステンレス鋼の表面さび発生程度評価方法, 2004.



(a) ハイブリッド桁端部



(b) 一般部



(c) 塗装境界部



(d) 溶接部

写真-2 暴露 4 年後の目視観察

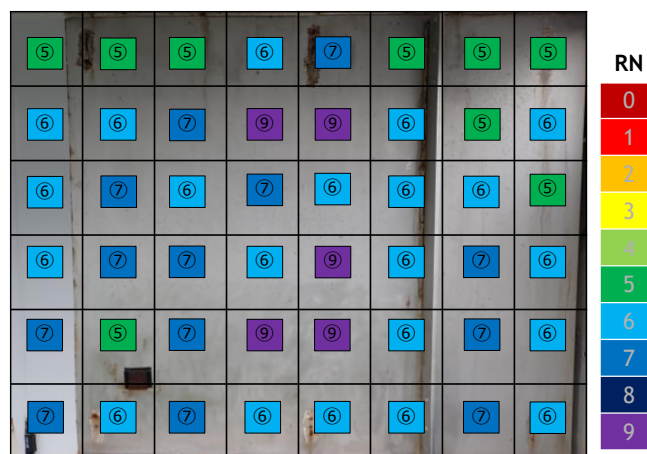


図-2 暴露 4 年後の外観評価 (RN コンター)

電気化学的手法を用いた炭素鋼とステンレス鋼間で発生する異種金属接触反応の抑制技術の研究

琉球大学 ○城間大 下里哲弘 建設技術研究所 案浦宏太、荒牧聡

1. 研究背景・目的

社会基盤設備の一つである鋼橋は、腐食が劣化要因の一つとなっている。特に桁端部は腐食が進行しやすい部位となっており、その課題に対し、写真1のようにステンレス鋼を桁端部にのみ用いる対策が検討されている。しかし、炭素鋼とステンレス鋼のような自然電位の異なる金属間で水膜などの電解質が形成されると、金属間での電位差による異種金属接触反応が発生する。

そこで本研究では、電気化学的手法を用いて、炭素鋼とステンレス鋼間で発生する異種金属接触反応を確認し、それを抑制する方法として塗装技術の研究を行った。

2. 試験方法

本試験で使用する試験体は既往研究¹⁾に基づき、鋼材と絶縁体を交互に配置し、試験体表面以外は樹脂固めたものを用いる。また、各鋼材に導線を繋げ、一か所の基盤に集約した。

本試験では、試験条件として無塗装・亜鉛含有塗装・エポキシ含有塗装の3種類の塗装条件を設定した。また、亜鉛含有塗装とエポキシ含有塗装については、炭素鋼試験体のみを塗装した塗装法①（写真2）、炭素鋼試験体5体とステンレス鋼試験体1体を塗装した塗装法②（写真3）の2種類の塗装方法を比較した。検討ケース一覧を表1に示す。

試験の手順として、試験体を0.003%NaCl水溶液内に設置し、自然電位が安定する24時間経過後に試験を行った。試験では鋼材表面での自然電位と鋼材に流れる電流密度を、以下に示す方法で計測した。

- ・自然電位測定法（図1）…銀塩化銀参照電極を測定鋼材の表面付近に固定し、2分間回収したデータを平均化する。
- ・電流密度測定法（図2）…測定鋼材の導線と、他鋼材の導線が接続されている基盤を電流計に接続し、10分間回収したデータを平均化する。

3. 解析方法

上記の試験に加え、エポキシ含有塗装①・②について、COMSOL Multiphysics®ソフトウェア²⁾による解析で自然電位及び電流密度の解析を行った。解析には図3のモデルと表2のパラメータ（炭素鋼・ステンレス鋼の分極曲線より測定）を用いて、炭素鋼側で【 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ 】、ステンレス側で【 $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ 】の化学反応が発生するものとして解析を行った。



写真1 桁端部にステンレスを使用した鋼橋

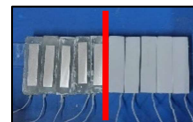


写真2 塗装法①

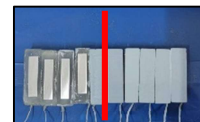


写真3 塗装法②

表1 検討ケース一覧

	無塗装	塗装法①	塗装法②
無塗装	○		
亜鉛含有		○	○
エポキシ含有		○	○

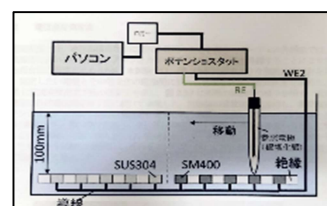


図1 自然電位測定法概略図¹⁾

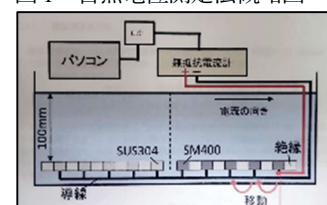


図2 電流密度測定法概略図¹⁾

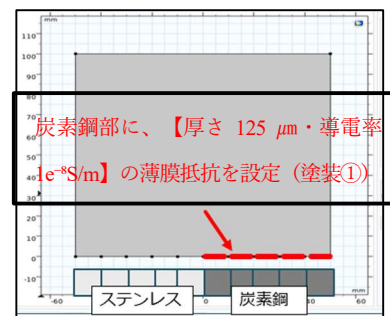


図3 解析モデル

キーワード：炭素鋼、ステンレス鋼、異種金属接触反応、電気化学的手法

連絡先 〒901-0213 西原町千原一番地 琉球大学工学部工学科 E-mail: e215501@eve.u-ryukyu.ac.jp

4. 結果・考察

図4の自然電位測定結果より、亜鉛含有塗装時の自然電位は-0.630V～-0.650V程度を示し、炭素鋼単独の自然電位である-0.605V¹⁾と同程度の値となった。また、異種金属間での電位差はほぼ0Vであった。エポキシ含有塗装時の自然電位は-0.060V～-0.070V程度を示し、ステンレス鋼単独の自然電位である-0.027V¹⁾に近づいている。また、異種金属間での電位差はほぼ0Vとなった。この結果より、亜鉛含有塗装時は炭素鋼単独時、エポキシ含有塗装時はステンレス鋼単独時に近い腐食進行をすることが考えられる。

図5の電流密度測定結果を元に算出した各鋼材の腐食速度を図6に示す。腐食速度の式³⁾は以下とする。

$$\text{腐食速度} \left(\frac{\text{mm}}{\text{y}} \right) = \frac{\text{電流密度} \times 1 \text{ 年の時間} \times \text{鉄の原子量}}{\text{イオン価数} \times \text{ファラデー定数} \times \text{鉄の密度}}$$

また、ステンレス側で発生するカソード反応は直接金属が腐食減肉する反応ではないため、腐食速度は炭素鋼側でのみ算出する。図6の結果より、亜鉛含有塗装①の腐食速度が0.061mm/y、亜鉛含有塗装②の腐食速度が0.006mm/yを示しており、炭素鋼のみ塗装した塗装法①より、ステンレス側まで塗装をオーバーラップさせた塗装法②の方が腐食速度を抑えられている。また、エポキシ含有塗装は塗装法①、②共に腐食速度が0.000mm/yを示しており、炭素鋼部を塗装していれば、それ以上塗装範囲を広げても腐食速度がほぼ変わらない結果となった。

5. 結論

本試験で得られた結果を以下に示す。

- (1) 亜鉛含有塗装は、炭素鋼部の塗装に加え、ステンレス側まで塗装をオーバーラップさせることで防食効果がより高くなる。
- (2) エポキシ含有塗装は、炭素鋼部を塗装していれば腐食速度がほぼ0mm/yとなり、それ以上塗装範囲を広げても防食効果にあまり差が出ない。
- (3) 亜鉛含有塗装よりもエポキシ含有塗装の方が防食効果が大きい。

今後の展望として、亜鉛含有塗装時の解析を行い、自然電位・電流密度を本試験結果と比較していく。

参考文献

- 1) 佐藤志保：炭素鋼とステンレス鋼の溶接部における異種金属接触反応特性の電気化学的評価 2024.3
- 2) COMSOL Multiphysics®, <https://www.comsol.jp>
- 3) 和田浩司、山上達也：異種材料接触腐食の評価技術（腐食原理、試験・CAE解析）、こべるにくす APR, No.52, 2021
- 4) 佐藤幸弘：金属材料の腐食とその防止、大阪府立産業技術総合研究所報告, No.10, 1997

表2 解析パラメータ

-0.6 V	SM平衡電位
-0.1 V	SUS平衡電位
0.02 A/m ²	SM交換電流密度
0.002 A/m ²	SUS交換電流密度
0.12 V	SMアノードターフェル勾配
-0.12 V	SMカソードターフェル勾配
0.12 V	SUSアノードターフェル勾配
-0.12 V	SUSカソードターフェル勾配

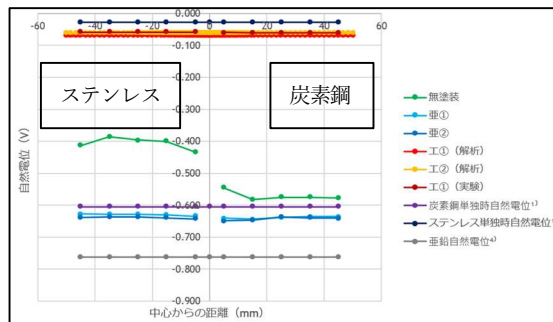


図4 自然電位測定結果

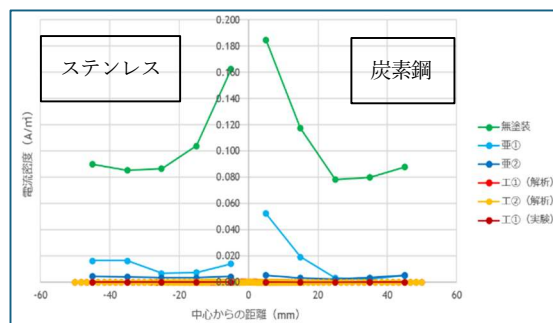


図5 電流密度測定結果

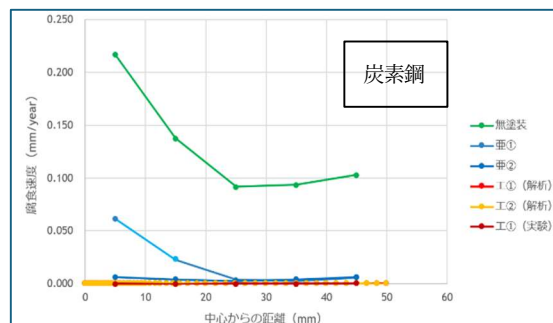


図6 腐食速度

炭素鋼-ステンレス鋼横突合せ溶接継手の疲労強度特性

建設技術研究所 羽根航, 案浦宏太, ○荒牧聡
琉球大学 下里哲弘, 川東優香

1. はじめに

鋼道路橋の桁端部は、腐食劣化が生じやすい環境であるため、図-1 に示すように桁端部のみステンレス鋼を適用することで、橋梁全体の LCC 抑制と耐久性向上が期待される¹⁾。しかし、炭素鋼-ステンレス鋼を横突合せ溶接継手とした場合の疲労試験結果は炭素鋼単体と比較して少なく、ステンレス鋼単体の基準²⁾においても炭素鋼と同様の疲労等級が採用されている。

本稿では、炭素鋼-ステンレス鋼の横突合せ溶接継手に対して、異強度溶接金属を用いた場合の疲労試験結果について報告する。

2. 試験方法

図-2 に疲労試験で用いた試験体形状、表-1 に検討ケースを示す。鋼種の組み合わせは、SM490YA-SUS821L1 とし、溶接金属は SM490YA に対して引張強さがオーバーマッチの二相系溶接金属 (DW-329AP) とイーブンマッチのオーステナイト系溶接金属 (GFW-309L) とした。開先形状は K 形開先とし、溶接は下向きでの炭酸ガスアーク溶接により行った。また、物理特性や機械的性質の違う異材継手の疲労強度特性を把握するため、止端仕上げは余盛削除とした。

疲労試験は、最大荷重 200 kN または 100 kN の油圧式疲労試験機 2 台を用いて荷重制御で実施した。荷重波形は正弦波、荷重速度は応力範囲に応じて 5 から 10 Hz とし、応力比 $R = 0$ で試験を実施した。また、SM490YA、溶接金属、SUS821L1 の位置の表裏にひずみゲージを貼り、試験時のひずみも計測した。

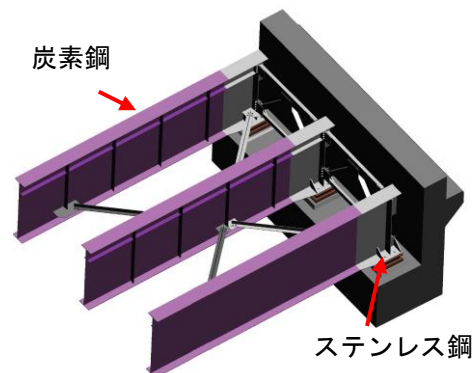


図-1 桁端部にステンレス鋼を適用する提案構造

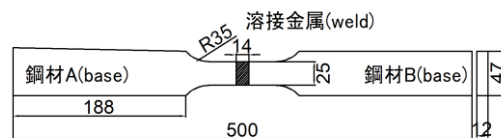


図-2 試験体形状 (単位 : mm)

表-1 検討ケース

No.	鋼材A	溶接金属	鋼材B	止端仕上げ	試験体数
1	SM490YA	DW-329AP	SUS821L1	余盛削除	5
2	SM490YA	GFW-309L	SUS821L1	余盛削除	13

表-3 疲労試験結果

(a) SM490YA-SUS821L1 (余盛削除, DW-329AP) (b) SM490YA-SUS821L1 (余盛削除, GFW-309L)

No.	$\Delta\sigma$ (N/mm ²)	N (cycles)	き裂位置
1-1	333	4.38×10^5	SUS
1-2	333	4.21×10^5	SUS
1-3	333	3.99×10^5	SUS
1-4	300	-	-
1-5	267	-	-



No.	$\Delta\sigma$ (N/mm ²)	N (cycles)	き裂位置
2-1	350	1.22×10^5	SM
2-2	280	4.83×10^5	weld
2-3	260	3.77×10^5	weld
2-4	240	5.86×10^5	weld
2-8※	240	7.25×10^5	weld
2-5	220	1.11×10^6	weld
2-6	200	7.90×10^5	weld
2-7	200	2.50×10^6	weld
2-8	180	-	-
2-9	333	4.16×10^5	weld
2-10	333	6.99×10^5	weld
2-11	333	3.63×10^5	weld
2-12	266	-	-
2-13	400	3.01×10^5	weld

表-2 各鋼材の機械的性質

	降伏強さ (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
SM490YA	>365	>490
SUS821L1	>400	>600
DW-329AP	>630	>820
GFW-309L	>205	>520

— : 未破断

※ : 未破断試験体の再試験

キーワード ステンレス鋼, 異種金属溶接, 疲労強度特性, 横突合せ溶接継手
連絡先 〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12 TEL 092-714-2211

疲労試験は試験片が破断するか 4×10^6 サイクルを超えるまで行い、 4×10^6 サイクル以降は破断しないとして载荷を停止した。また、 4×10^6 サイクル载荷後に未破断であった全ての試験片に対して応力範囲を変化させて再試験を実施し、試験片が破断するまで载荷した。

3. 試験結果

表-3 に疲労試験結果、図-3 に S-N 曲線を示す。図表の記号は、 $\Delta \sigma$ が応力範囲、N が最終サイクル数である。図-3 には JSSC 疲労指針³⁾における横突合せ溶接継手の疲労等級を併せて示している。表-3、図-3 より、横突合せ溶接継手（余盛削除）では、JSSC 疲労指針の B 等級と同程度であるが、一部これを下回る値も見られた。これらは、すべて SUS821L1 に対してイーブンマッチのオーステナイト系の溶接金属（GFW-309L）No.2 シリーズの試験体で、下回った 3 試験体の中では、最も高応力範囲としたケースで最も大きく下回った。JSSC 疲労指針の直線の勾配よりも大きくなる傾向が見える。

また、表-3 のき裂位置は、一部を除き、異なる溶接金属を用いた No.1 と No.2 シリーズの試験体で溶接金属（Weld）と SUS 母材となっており、異なっている。図-4 に、No.2 シリーズで別途実施した引張試験において 3 次元画像相関法を用いて計測したひずみ分布を示す。継手各部位の発生ひずみは不均一となっている。また、表-4 に疲労試験時の各部位のひずみ範囲を示す。これより、最も大きな繰返しひずみが生じた部位はき裂位置と一致している。

これらより、ステンレス鋼母材およびステンレス溶接金属は、ラウンドハウス型の応力ひずみ線関係となるため、引張強さや降伏強さ（ステンレス鋼の場合は、一般に 0.2%耐力）だけではなく、繰返し応力範囲におけるひずみ発生量を考慮することが重要であることが推察される。

4. まとめと今後

異強度溶接金属を使用して余盛を削除した炭素鋼とステンレス鋼の横突合せ溶接継手の疲労試験結果より、いずれの試験体の疲労強度も炭素鋼単体の疲労強度と同程度であることがわかった。ただし、イーブンマッチの溶接金属を使用した場合、疲労強度曲線の傾きが大きくなる傾向が認められた。そのため、ステンレス鋼の機械的性質の特徴であるラウンドハウス型の応力ひずみ関係を考慮して、溶接金属を選定することが重要である。

謝辞

本研究は、日本鋼構造協会 鋼橋の構造性能と耐久性性能研究会 腐食耐久性研究部会の活動の一環として実施したものであり、日鉄ステンレス株式会社から試験体の提供を受けた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- (1) 日本鋼構造協会：鋼橋の頑強な防食技術及び合理的な腐食診断と補修技術、JSSC テクニカルレポート、2023。
- (2) 日本鋼構造協会：ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針（案）、JSSC テクニカルレポート、2015。
- (3) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、2012。

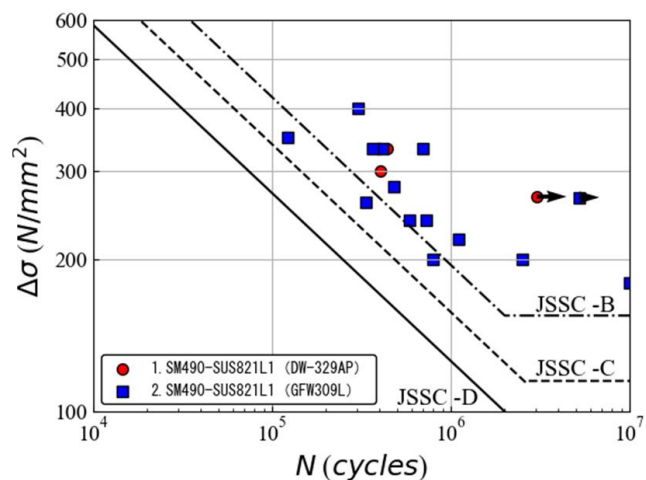


図-3 S-N 曲線

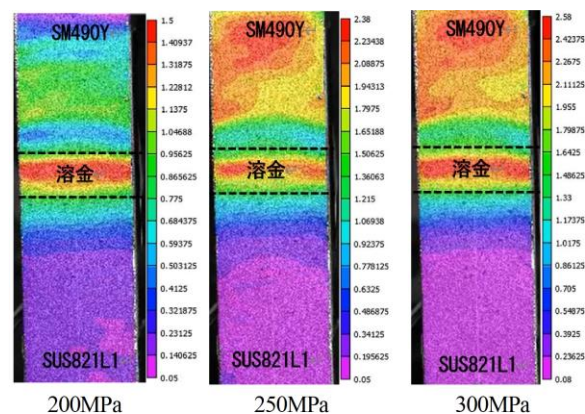


図-4 各応力状態におけるひずみ分布

表-4 各部位におけるひずみ範囲 (μ)

試験体 No.	項目	SM		weld		SUS	
		①表	②裏	①表	②裏	①表	②裏
1-5	最大値	1008	3366	1290	598	1953	203
	最小値	366	2548	505	-45	1011	-384
	最大値－最小値	642	818	785	643	942	587
	①と②の平均	730		714		765	
2-10	最大値	1931	1151	1101	2341	668	1448
	最小値	1077	250	356	1209	22	309
	最大値－最小値	854	901	745	1133	645	1139
	①と②の平均	877		939		892	