

塩害に対応した高耐久性 PC 橋の建設に関する 16 年間にわたる研究

豊福 俊泰*¹, 神山 徳夫*², 上津 敏*³, 田中 和幸*⁴

屋嘉比(やかび)橋は、コンクリートに高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリート、PC 鋼材に全素線塗装型 PC 鋼より線、鉄筋にエポキシ樹脂塗装鉄筋、シースにプラスチックシース、橋面に防水工、高欄にアルミ高欄、支承にゴム支承を採用することにより、ミニмумメンテナンス(多手段の腐食防護)を考慮したわが国最初の高耐久性 PC 道路橋である。本報告は、これらの塩害対策工の効果を検証するため実橋梁と暴露供試体による追跡調査を計画し、16 年間にわたり「塩害に対応した高耐久性 PC 橋の建設」について産学官連携で研究活動した結果をまとめたものである。

キーワード：高耐久性 PC 橋、ミニмумメンテナンス、高炉スラグ微粉末 6000、全素線塗装型 PC 鋼より線

1. はじめに

一般国道 58 号(旧道)屋嘉比橋は、沖縄県国頭村浜の田嘉里川河口部に位置しており、昭和 40 年に架設した旧橋が塩害により著しく劣化したため、架替え架設した PC 橋である。沖縄県では、コンクリート構造物中の鋼材は腐食環境下にあり、塩害対策が不可欠である^{1~6)}。とくに、PC 構造物には高耐久性が要求されるが、材料として、高炉セメントを用いる効果⁷⁾は確認されていたが強度発現速度が遅いこと、PC グラウトの充填不良があること、PC 鋼材およびその定着部にも防食のための保護が必要であることが、課題であった。

そこで、本橋における塩害対策工の新技術を各種検討した結果、わが国最初である PC 道路橋として、コンクリートに高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリート⁸⁾、PC 鋼材に全素線塗装型 PC 鋼より線^{9~10)}、鉄筋にエポキシ樹脂塗装鉄筋^{2, 6)}、シースにプラスチックシース、橋面に防水工、高欄にアルミ高欄、支承にゴム支承を採用することにより、ミニмумメンテナンス¹¹⁾(多手段の腐食防護)を考慮した高耐久性 PC 構造物の建設を行った(写真 - 1, 図 - 1, 2, 表 - 1)^{11~15)}。工事は平成 10 年 12 月に竣工したが、これらの塩害対策工の効果を検証するため 10 年計画の追跡調査を計画し、同年 5 月、桁の製作時に同時に製作した供試体を、大宜味村海岸部の暴露試験場にて暴露して現地暴露試験を開始した。この暴露 3 年までの調査結果を検討後、さらに、平成 14 年 10 月に供試体を追加し暴露試験を開始した。

本報告は、暴露 15 年(平成 25 年 3 月)にわたりこれらの追跡調査した結果を総合的に解析することにより、塩害に対応した高耐久性 PC 構造物の建設について産学官連携で研究活動した結果^{16~19)}をまとめたものである。



写真 - 1 屋嘉比橋の全景(手前:田嘉里川上流側・山側)

2. 調査研究の概要

本橋で採用した塩害対策工の新技術の性能を調査するため、表 - 2 に示すように、10 年間の追跡調査計画を立案した。追跡調査は、高炉スラグ微粉末 6000 使用コンクリート(試験 I, 表 - 3)、全素線塗装型 PC 鋼より線(試験 II, 表 - 4)について、それぞれの効果を確認するため、事前試験、暴露試験(本試験および追加試験)および実橋調査を行うこととした^{16~19)}。暴露試験場としては、長期間にわたり供試体管理が確実にできるように、架設地点の南西約 10 km の大宜味村海岸部にある北部国道事務所の暴露試験場(飛沫帯にあり飛来塩分量 0.058 g / 100 cm² 程度)を選定した。

高炉スラグ微粉末使用コンクリートの供試体としては、無筋(塩分量・中性化、圧縮強度)、鉄筋埋設(鉄筋腐食)の 2 種類、4 材齢(1, 3, 5, 10 年)とした。供試体の配合は、実橋の配合 1・3・4・7 を含む 9 配合で、水結合材比 35, 40, 50, 65 % とした。配合 2 は水結合材比を配合 3 と同一とした比較供試体、配合 6 は張出し床版部、横組部、地覆部の近似供試体、配合 9 は水結合材比大の供試体、配

*¹ Toshiyasu TOYOFUKU:九州産業大学 工学部 都市基盤デザイン工学科 教授(前 日本道路公団 試験研究所 調査役)

*² Norio KAMIYAMA:沖縄県 国頭村役場 建設課 課長

*³ Satoshi UEZU:(株)イーエーシー 技術顧問(元 内閣府 沖縄総合事務局 北部国道事務所 副所長)

*⁴ Kazuyuki TANAKA:(株)日本ピーエス 福岡支店 支店長(元(株)日本ピーエス 福岡支店 屋嘉比橋上部工工事事務所 所長)

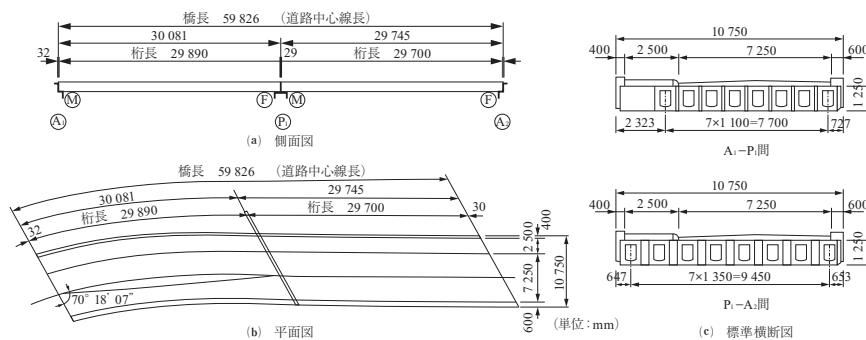


図 - 1 屋嘉比橋の一般図

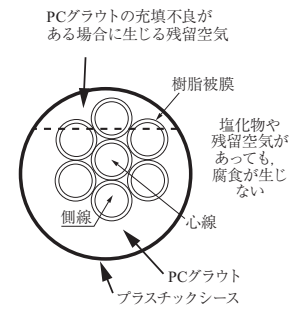


図 - 2 全素線塗装型 PC 鋼より線の防食効果

表 - 1 実橋のコンクリート配合

| 部 材 | 配合名 (配合 No.) | スラグ置換率 (%) | 水結合材比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | コンクリートの性質 | | |
|----------------|---------------|------------|-----------|----------|--------------------------|--------|----------|-------|-------|-------------|------|-----------|---------|-----------------------------|
| | | | | | 水 W | セメント C | 混和材 GBFS | 細骨材 S | 粗骨材 G | 化学混和剤*1 HWR | WR | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 圧縮強度*2 (N/mm ²) |
| A1-P1 間 PC 主桁部 | HB34.9 (配合 1) | 50 | 34.9 | 43.0 | 160 | 229 | 229 | 732 | 1143 | 2.29 | - | 11.5 | 2.1 | 55.4 |
| P1-A2 間 PC 主桁部 | H40 (配合 3) | 0 | 40.0 | 43.5 | 160 | 400 | - | 768 | 1173 | 3.20 | - | 8.4 | 2.0 | 55.8 |
| 張出し部・間詰部 | N48.4 (配合 4) | 0 | 48.4 | 46.0 | 165 | 341 | - | 813 | 994 | - | 2.05 | 7.5 | 4.6 | 35.4 |
| 地覆部 | N51.9 (配合 7) | 0 | 51.9 | 46.6 | 165 | 318 | - | 832 | 994 | - | 1.91 | 7.5 | 4.3 | 33.5 |

*1 HWR：高性能 AE 減水剤，WR：AE 減水剤遅延型 I 型
 *2 主桁部：PC 桁と同一養生した供試体の材齢 14 日の圧縮強度，張出し部・地覆部：標準養生供試体の材齢 28 日の圧縮強度

表 - 2 追跡調査計画

| 試験期間 | 試験名 | 試験項目 | 試験内容 |
|-------------------------|----------|---|---|
| 1998 年 5 月まで | 事前試験 | I-1 高炉スラグ微粉末使用コンクリートの加圧塩分浸透促進試験 | 高炉スラグ微粉末 6000 使用コンクリートの性能を促進試験で確認 (配合 1・2・3，供試体 $\phi 10 \times 20$ cm，材齢 28 日から人工海水を 9.8 N/mm ² で加圧) |
| | | II-1 全素線塗装型 PC 鋼より線の塩水噴霧試験 | JIS Z 2371「塩水噴霧試験試験方法」(噴霧塔方式)に基づき，塩水噴霧状況下において，全素線塗装型 PC 鋼より線 (塗膜厚 60・70・80・90・100・110・120・130・150・180・220 μ m) の性能を確認 |
| 1998 年 5 月～2012 年 10 月 | 本試験 | I-2 高炉スラグ微粉末使用コンクリート (無筋) の自然暴露試験 | 高炉スラグ微粉末 6000 使用コンクリートの性能を自然暴露試験で確認 [配合 1・2・3 (表 - 3 参照)，供試体 $10 \times 10 \times 40$ cm，圧縮強度 $\phi 10 \times 20$ cm] |
| | | I-3 高炉スラグ微粉末使用コンクリート (鉄筋埋設) の自然暴露試験 | 高炉スラグ微粉末 6000 使用コンクリートの性能を自然暴露試験で確認 [配合 1・2・3 (表 - 3 参照)，供試体 $15 \times 15 \times 26$ cm に鉄筋埋設] |
| | | II-2 全素線塗装型 PC 鋼より線の自然暴露試験 | 自然暴露状況下において，全素線塗装型 PC 鋼より線 (塗膜厚 0・150 μ m) の防錆性能を比較 |
| | | II-3 シース (PE・鋼製) 内グラウト充填埋設鋼材の自然暴露試験 | 自然暴露状況下でのシース (65 ϕ 用のポリエチレン，鋼製) 内において，全素線塗装型 PC 鋼より線 (塗膜厚 0・150 μ m) の防錆性能を比較 |
| 2002 年 10 月～2013 年 10 月 | 追加試験 I | I-4 普通コンクリート (無筋) の自然暴露試験 | 高炉スラグ微粉末 6000 使用コンクリートの性能を普通コンクリートと比較 [配合 2-1・3-1・5・6・8・9 (表 - 3 参照)，供試体 $10 \times 10 \times 40$ cm，圧縮強度 $\phi 10 \times 20$ cm] |
| | | I-5 普通コンクリート (鉄筋埋設) の自然暴露試験 | 高炉スラグ微粉末 6000 使用コンクリートの性能を普通コンクリートと比較 [配合 2-1・3-1・5・6・8・9 (表 - 3 参照)，供試体 $15 \times 15 \times 26$ cm に鉄筋埋設] |
| | | II-4 全素線塗装型 PC 鋼より線埋設普通コンクリートの暴露試験 | 普通コンクリート内で，全素線塗装型 PC 鋼より線 (塗膜厚 0・150 μ m) の防錆性能を比較 (供試体 $12 \times 7.3 \times 40$ cm，図 - 10 参照) |
| | | II-5 緊張力導入全素線塗装型 PC 鋼より線埋設普通コンクリートの暴露試験 | 普通コンクリート内で，全素線塗装型 PC 鋼より線 (塗膜厚 0・150 μ m) の防錆性能を，緊張力 0.6 Pu 導入ありとなしとで比較 (供試体 $12 \times 7.3 \times 100$ cm，図 - 11 参照) |
| 2003 年 7 月～2013 年 7 月 | 追加試験 II | II-6 緊張力導入全素線塗装型 PC 鋼より線の暴露試験 I | 鋼製カバー内で，全素線塗装型 PC 鋼より線 (塗膜厚 0・100・150・200 μ m) の防錆性能を，緊張力 0.6 Pu 導入ありとなしとで比較 |
| | | II-7 緊張力導入全素線塗装型 PC 鋼より線の暴露試験 II | 鋼製カバー内で，全素線塗装型 PC 鋼より線 (塗膜厚 0・70・110・150 μ m) の防錆性能を，緊張力 0.6 Pu 導入ありとなしとで比較 |
| 2006 年 8 月～2012 年 10 月 | 追加試験 III | II-8 全素線塗装型 PC 鋼より線の自然暴露試験 II | 紫外線を避けた自然暴露状況下において，全素線塗装型 (塗膜厚 0・40・60・200 μ m は新規，70・110・150 μ m は II-7 の再暴露) の防錆性能を比較 (図 - 13 参照) |
| | | II-9 ポリエチレン被覆全素線塗装型 PC 鋼より線の自然暴露試験 | 紫外線を避けた自然暴露状況下において，腹圧を受けた PE 被覆全素線塗装型 (塗膜厚 200 μ m) の防錆性能を比較 |
| | | II-10 全素線二重防錆 PC 鋼より線の自然暴露試験 | 紫外線を避けた自然暴露状況下において，塗膜傷と塗膜補修を有する全素線塗装型および全素線二重防錆 PC 鋼より線 (塗膜厚 200 μ m) の防錆性能を比較 |
| 2004 年 1 月～2013 年 3 月 | 実橋調査 | I-6 実橋コンクリートの塩分量・中性化試験 | 高炉スラグ微粉末 6000 の性能を実橋で確認。 $\phi 5 \times$ 約 7 cm のコア採取 (主桁：配合 1，主桁：配合 2，張出し：配合 4，地覆：配合 7，表 - 1 参照) |

合 5・8 は高炉セメント B 種使用の比較供試体である。以下の本文および図中の凡例は，表 - 1 および表 - 3 の配合名で記した。鉄筋埋設の供試体には，D 13，長さ 11 cm の普通鉄筋，磨き丸鋼，エポキシ樹脂塗装鉄筋，または 7

本より 12.7 mm の無塗装 PC 鋼より線 (0 μ m) と全素線塗装型 PC 鋼より線 (塗膜厚 150 μ m) を埋設した。

全素線塗装型 PC 鋼より線の供試体としては，塗装厚を基準値 $150 \pm 30 \mu$ m の範囲外 60～220 μ m まで 11 種類

表 - 3 供試体コンクリートの配合と試験結果表

| 試験名 | 配合 No. | 配合名 | スラグ置換率 (%) | 水結合材比※ (%) | 細骨材率 (%) | 単用量 (kg/m ³) | | | | | | フレッシュコンクリートの性状 | | | |
|-------------|--------|--------|------------|------------|----------|--------------------------|--------|----------|-------|-------|-------|----------------|-----------|---------|---------|
| | | | | | | 水 W | セメント C | 混和材 GBFS | 細骨材 S | 粗骨材 G | 化学混和剤 | | スランブ (cm) | 空気量 (%) | 温度 (°C) |
| | | | | | | | | | | | HWR | WR | | | |
| 本試験 I-2, 3 | 配合 1 | HB35-A | 50 | 34.9 | 43.0 | 160 | 229 | 229 | 732 | 1 143 | 2.29 | - | 11.5 | 2.1 | 19.0 |
| | 配合 2 | HB40-A | 50 | 40.0 | 43.5 | 160 | 200 | 200 | 762 | 1164 | 1.80 | - | 11.5 | 1.6 | 19.0 |
| | 配合 3 | H40-A | 0 | 40.0 | 43.5 | 160 | 400 | - | 768 | 1173 | 3.20 | - | 8.4 | 2.0 | 19.0 |
| 追加試験 I-4, 5 | 配合 2-1 | HB40-B | 50 | 40.0 | 43.5 | 160 | 200 | 200 | 768 | 1003 | 0.9 | - | 8.0 | 1.3 | 21.5 |
| | 配合 3-1 | H40-B | 0 | 〃 | 43.5 | 160 | 400 | - | 774 | 1003 | 2.8 | - | 8.5 | 1.6 | 22.5 |
| | 配合 5 | BB50-B | 45 | 50.0 | 43.9 | 165 | 330 | - | 773 | 1020 | - | 0.825 | 9.5 | 4.9 | 21.6 |
| | 配合 6 | N50-B | 0 | 〃 | 44.3 | 165 | 330 | - | 886 | 1020 | - | 0.825 | 10.0 | 5.0 | 20.8 |
| | 配合 8 | BB65-B | 45 | 65.0 | 46.8 | 165 | 254 | - | 854 | 1003 | - | 0.635 | 10.0 | 5.0 | 21.2 |
| | 配合 9 | N65-B | 0 | 〃 | 47.1 | 165 | 254 | - | 863 | 1003 | - | 0.635 | 9.5 | 3.6 | 22.3 |

配合 1・2・3・2-1・3-1: PCa コンクリート (蒸気養生) を対象とした配合
 配合 5・6・8・9: 現場打ちの普通コンクリートを対象とした配合
 ※以下の本文中では“W/B”と称した。(W: 水, B: 結合材 B=C+GBFS)

表 - 4 全素線塗装型 PC 鋼より線の暴露条件

| 試験名 | 内容 | 環境条件 | 緊張の有無 | 暴露期間 | 膜厚 (μm) |
|-------|-------------------|----------|-------|-----------------------------------|---|
| II-1 | 塩水噴霧 | 室内 | なし | 1000 時間 | 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 150, 180, 220 |
| II-2 | 自然暴露 | 紫外線あり | なし | 1 年 | 0, 150 |
| II-3 | シース・グラウト内 | 鋼製+PE | なし | 10 年 | 0, 150 |
| II-4 | コンクリート内 | W/C=65 % | なし | 6 年 | 0, 150 |
| II-5 | コンクリート内 | W/C=65 % | あり | 10 年 | 0, 150 |
| II-6 | 自然暴露 | 紫外線なし | あり+なし | 9 か月 | 0, 100, 150, 200 |
| II-7 | 自然暴露 | 紫外線なし | あり+なし | 2 年 3 か月 | 0, 70, 110, 150 |
| II-8 | 自然暴露 | 紫外線なし | なし | 新規: 3 年 再暴露: 5 年 3 か月 (II-7 分) | 新規: 0, 40, 60, 200 再暴露: 70, 110, 150 |
| II-9 | 自然暴露 (PE 被覆+腹圧部) | 紫外線なし | なし | 3 年 | 0, 200 |
| II-10 | 自然暴露 (塗膜傷部+亜鉛めっき) | 紫外線なし | なし | 2 年 | 0, 200 |

に変化させて製作し、無塗装 PC 鋼より線と対比して腐食条件が厳しい順に、塩水噴霧、自然暴露 (架台上で日照あり)、鋼製カバー内 (カバーの両端のみから塩分が進入し、日照はなし)、コンクリート内、シース内の 5 条件で試験を行った。さらに、緊張力導入の有無が及ぼす影響についても試験した。

3. 高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートに関する調査研究結果

3.1 暴露試験結果 (試験 I-2 ~ I-5)

(1) 圧縮強度

図 - 3 に、圧縮強度の経年変化を示す。PC 配合として、高炉スラグ微粉末 6000 (以下、GBFS6000 と略記) を混和した HB35-A・HB40-A・HB40-B は、19 時間で早強単味の H40-A、H40-B と同等の 40 N/mm² 前後に達し、PC 桁の製作に必要な初期強度を確保している。その後も安定した強度増進を示し、長期強度は 70 N/mm² 前後の高強度に達した。N65-B・BB65-B・N50-B・BB50-B を含め、ポルトランドセメント単味の配合 (以下、ポルト系と総称)、高炉セメント B 種および GBFS6000 を混和した配合 (以下、高炉系と総称) とともに暴露 1 年 ~ 3 年まで圧縮強度が増進した。それ以降の強度の伸びは小さいものの、高炉系では、長期材齢でも漸増する傾向が見られる。

(2) 中性化深さ

図 - 4 に、中性化深さ (I-4, 山側と海側の平均値) の経年変化を示した。中性化深さは同じ水結合材比 (以下、W/B と略記) で比較するとポルト系より高炉系の方が深い

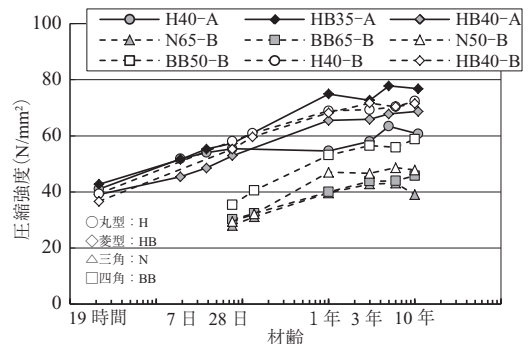


図 - 3 圧縮強度の経年変化 (I-2, I-4)

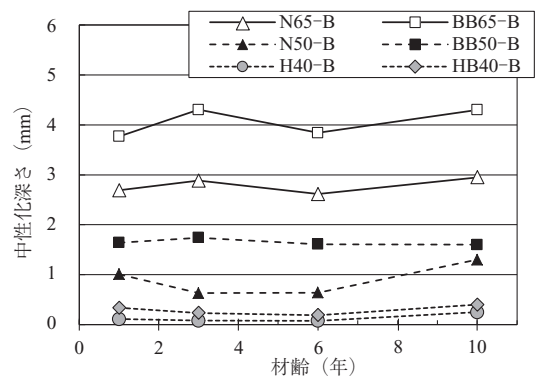


図 - 4 中性化深さの経年変化 (I-4)

が、その差は最大でも 2 mm 未満である。いずれの配合も暴露 1 年以降はほとんど中性化が進行せず、暴露 10 年で

も 2012 年制定コンクリート標準示方書設計編の中性化深さの設計式 (2.1.4) ²⁰⁾ で算定される 3 年程度の値であった。これは、降雨量の多い地域で雨がかりのある屋外に暴露したことから、地表面近くに設置 (厚さ 2 cm の角材の上) したことから、含水比が比較的高い状態で推移したためと考えられる。

(3) 塩分浸透

図 - 5 に、上面および底面をエポキシ樹脂で被覆し、両側面のみ解放した角柱供試体 (I-4) の塩分分布の経年変化を示す。W/B の高い N65-B では両側面から浸透した塩分が暴露 3 年頃には供試体中心に到達し、暴露 6 年以降は表層を除く断面全体で一般的な分布となった。一方、W/B の低い H40-B は暴露期間とともに表面付近の塩分量が増加しながら内部の浸透量も増加した。ポルト系では W/B が高いほど塩分の濃度勾配が緩やかとなり、表層の塩分量があまり増加しなくても内部の塩分量が増加していく傾向がある。これらに対して高炉系の塩分分布は表層付近の勾配が急である。BB50-B と HB40-B では暴露期間の経過とともに表層部の塩分量は増加したが、塩分浸透深さは約 25 mm に止まり、ほとんど変化していない。高炉系の配合では表面から侵入した塩分が表層部で固定されて内部への浸透量が減少していると考えられる。ここで、W/B = 50 %, 65 % の塩分分布において第 2 層～第 3 層にピークが生じる現象は中性化による塩分移動や表層塩分の流出などが原因と考えられる。また、山側の塩分が高くなる傾向は、暴露試験場の後方 5 ~ 6 m に迫っている山地からの海風の吹き返しが影響したと考えられる。

図 - 6 は 11 年間暴露した無塗装供試体 (I-3) の EPMA 画像 (断面寸法 15 cm × 15 cm の 1/4, 山側上部) である。白い部分は塩化物イオン濃度が高く、塩分は上面

および側面から浸透しており、塩分浸透深さは、H40-A では 40 ~ 50 mm に達しているが、HB35-A では 25 ~ 30 mm に抑制されており、GBFS6000 を混和して製作された PC 主桁の優れた遮塩性が窺われる。

(4) 供試体に埋設した鋼材の腐食状況

鋼材埋設供試体は、鋼材のかぶりが高側になるように配置した。写真 - 2 は暴露 10 年の供試体 (I-4) から取り出した磨き丸鋼をかぶり側から撮影した写真である。N65-B のかぶり 3 cm, 5 cm および BB65-B の 3 cm の丸鋼は全長に渡って腐食しており、BB65-B の 5 cm, N50-B, BB50-B でも部分的に軽微な腐食が認められた。しかし、W/B = 40 % の PC 配合 H40-B と HB40-B については、腐食は全く認められなかった。W/B = 65 % の配合では、発錆面積が大きくなっており、図 - 5 に示した海側の塩分分布と鋼材腐食限界濃度の関係ともおおむね整合している。

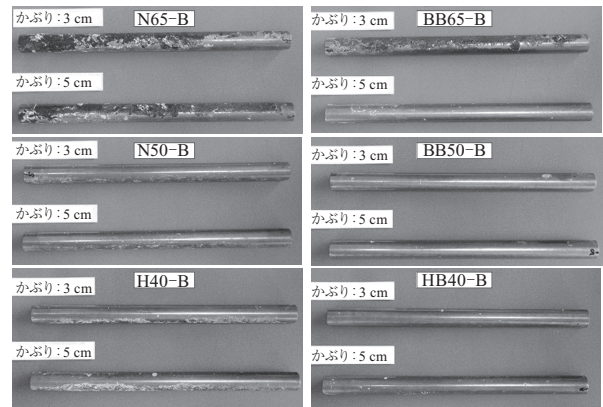


写真 - 2 埋設鋼材の腐食状況 (I-5, 暴露 10 年)

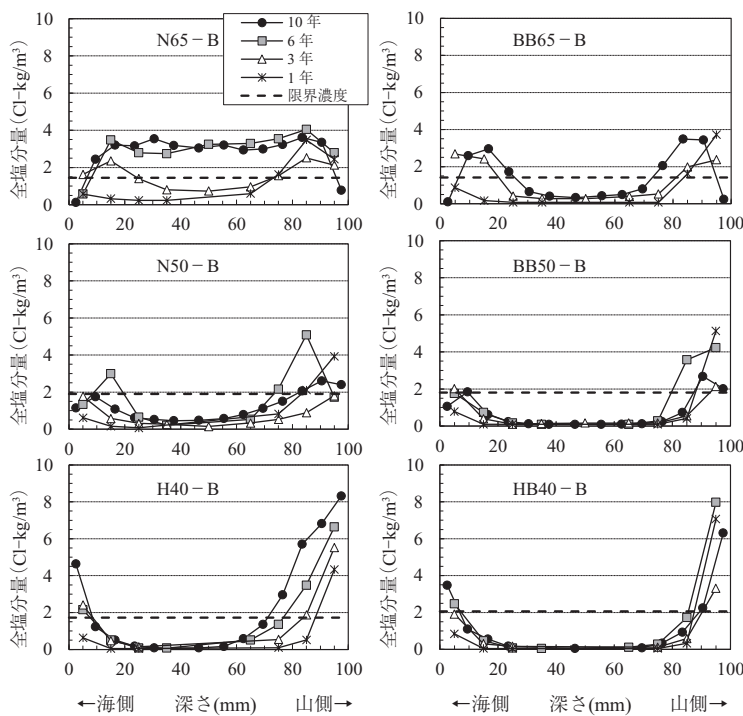
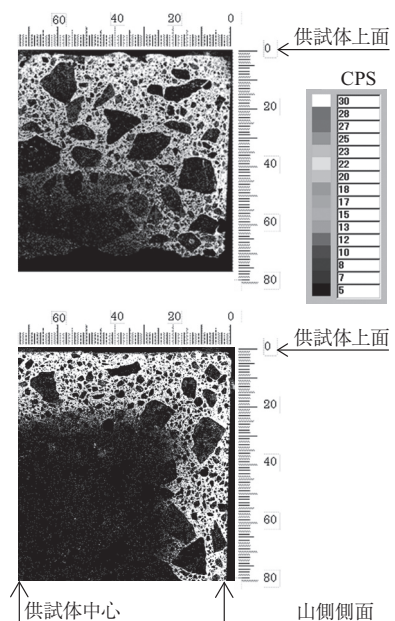


図 - 5 塩分浸透状況の経年変化 (I-4)



上図 H40-A (早強単味 W/B=40 %) 下図 HB35-A (スラグ置換率 50 % W/B=35 %)

図 - 6 EPMA による塩分の浸透状況測定結果 (I-3, 暴露 11 年)

(5) 細孔径分布

図 - 7 に、角柱供試体 (10 × 10 × 40 cm) の表面～5 mm と中心部から採取した試料の累積細孔径分布を示す (I-4, 暴露 10 年)。表層部の曲線は海側と山側の平均値である。図 - 7 より、総細孔容積は W/B とともに減少するが、 W/B によらず、表層、内部ともにポルト系よりも高炉系の方が小さい。これらの図に見られる累積曲線の傾きが増加し始める細孔径は閾径 (しきい径) と呼ばれ、物質移動に関係する連続した空隙構造の最大径と考えられている。 $W/B = 65\%$ と 50% の閾径は全体が 1000 ~ 2000 nm の範囲にあり、 $W/B = 40\%$ では 600 ~ 1000 nm で内部より表層の方が小さくなった。高炉系とポルト系の閾径の差は明確でないが、閾径以下の曲線の傾きは高炉系の方が緩やかである。閾径以下の範囲に見られる細孔容積の急増ポイントも高炉系の方が小さく、ポルト系に比べて細孔径の小さい緻密な組織になっている。

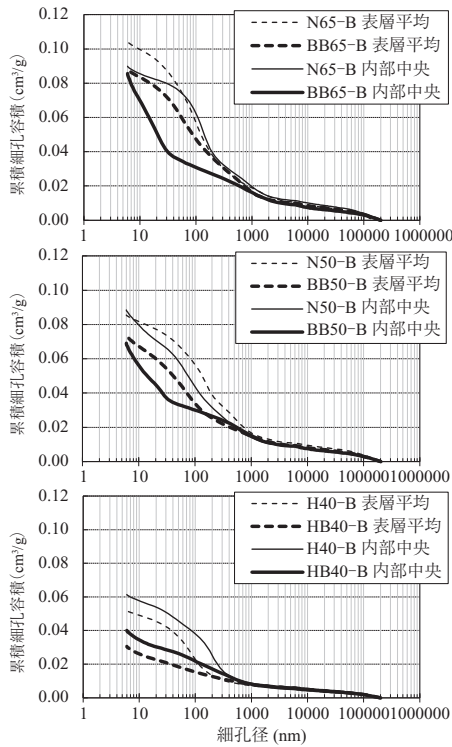


図 - 7 細孔径分布測定結果 (I-4, 暴露 10 年)

3.2 実橋調査結果 (試験 I-6)

(1) 中性化深さ

写真 - 3 は、暴露 14 年 6 ヶ月で実橋海側の各部材から採取したコア断面のフェノールフタレイン発色状況である。場所打ちコンクリートの張出し部と地覆では、暴露 5 年 4 ヶ月の調査でも中性化が認められたが¹⁶⁻¹⁸⁾、PC 主桁は、いずれもまったく中性化していない。雨がかりがなく、中性化が比較的進行しやすい桁下面でも、GBFS6000 を混和した HB34.9 は、早強ポルト単味の H40 と同等の高い中性化抵抗性を有することが確認された。

(2) 塩分浸透

図 - 8 に、コアの塩分分布を示す。張出し部および地

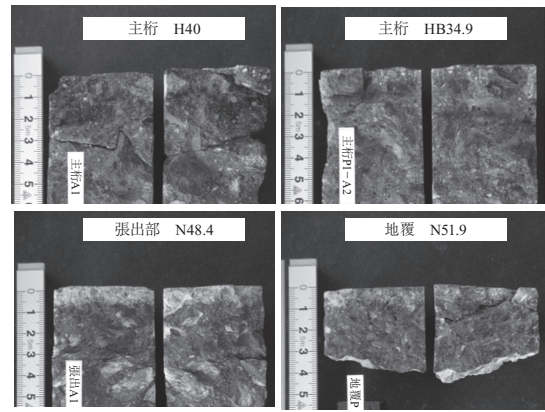


写真 - 3 実橋から採取したコアの中性化 (暴露 14 年 6 ヶ月, 海側)

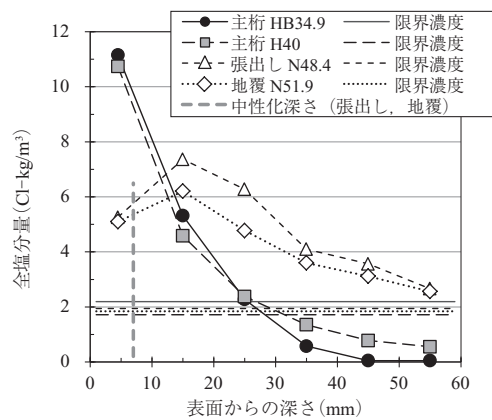


図 - 8 実橋から採取したコアの塩分分布 (暴露 14 年 6 ヶ月, 海側)

覆部の全塩分量は 2 層目 (10 ~ 20 mm) をピークとして、桁下面から深さ 50 mm の範囲は鋼材腐食限界濃度を超えていた。表層よりも 2 層目の方が高くなった理由は、塩化物イオンを固定していたフリーデル氏塩などの水和物が炭酸化により分解し、塩化物イオンが遊離して内部へ移動、濃縮したものと推察される。

主桁 H40 と主桁 HB34.9 については、暴露 15 年でも 30 mm 以深の塩分量は鋼材腐食限界濃度未満にあるが、主桁 HB34.9 の塩分量は主桁 H40 の半分以下であり、GBFS6000 の混和による塩分浸透抑制効果が確認された。

3.3 塩分の拡散係数

図 - 9 は、一連の暴露試験および実橋調査で得られた見掛けの拡散係数を、既往の調査結果²¹⁾ に示されている拡散係数と W/B の関係にプロットしたものである。図中の直線は 2012 年制定コンクリート標準示方書設計編の塩化物イオン拡散係数の予測式²²⁾ である。本調査で得られた見掛けの拡散係数は、既往の知見と同様にポルト系 ((a) 図) よりも高炉系 ((b) 図) の方が小さい。また、いずれも既往のデータと同じ範囲に分布しており、GBFS6000 を混和して蒸気養生した PC 配合に対しても示方書に示されている高炉セメント B 種相当の予測式²²⁾ が適用できると考えられる。

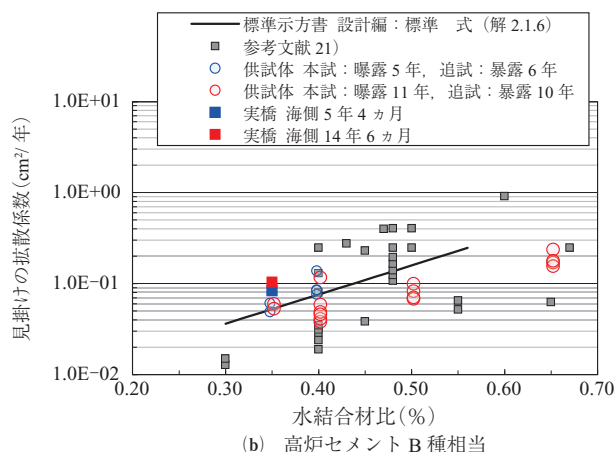
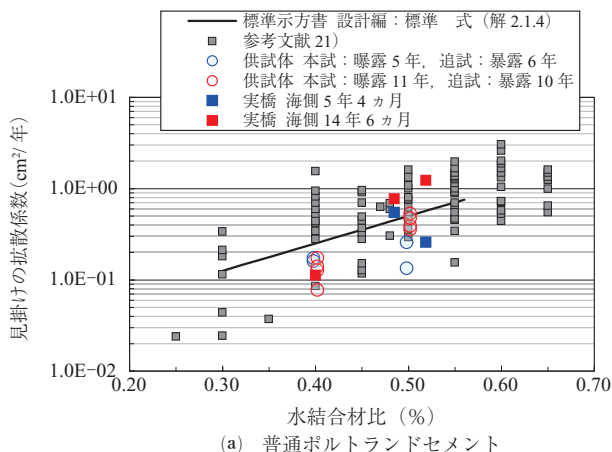


図 - 9 水結合材比と拡散係数の関係 (既往の報告値との比較)

4. 全素線塗装型 PC 鋼より線に関する調査研究結果

4.1 全素線塗装型 PC 鋼より線を埋設した普通コンクリート試験体の暴露試験結果 (試験Ⅱ-4)

本試験は、コンクリート内部への塩化物の浸透と埋設した PC 鋼材の腐食の関係を確認するために、無緊張の無塗装 PC 鋼より線と全素線塗装型をコンクリートに埋設し、6年間の暴露試験を行った。図 - 10 に、試験体の概要を示す。本試験でのコンクリートは、塩化物の浸透を促すために水セメント比を 65%とした。

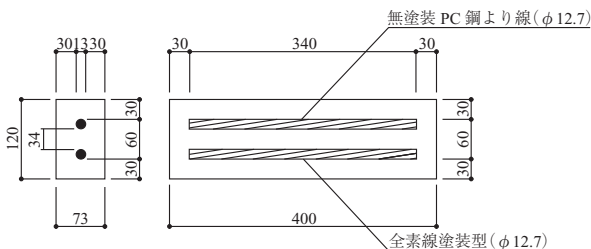


図 - 10 埋設コンクリート暴露試験体概要

腐食の進行の度合いを評価するために、暴露3年1ヵ月後に測定した線径の変化率は14.5%であったが、6年後では線径の計測が困難なほど腐食の進行が著しかったため、比較ができないが質量変化率を求めたところ26.7%減少していた。ここで質量変化率は、腐食生成物の膨張によりコンクリートが割裂し、埋設した環境ではなくなった試験体を除いて算出した平均値である。表 - 5 に、埋設した PC 鋼材の発錆面積率を示す。発錆面積率は、無塗装 PC 鋼より線では1年4ヵ月後に50%を超え6年後にはほぼ100%となったが、全素線塗装型では6年後まで0%であった。塗膜厚さの変化率は計測誤差の範囲にあり、コンクリートのひび割れや割裂に関係なく損耗などは確認されなかった。

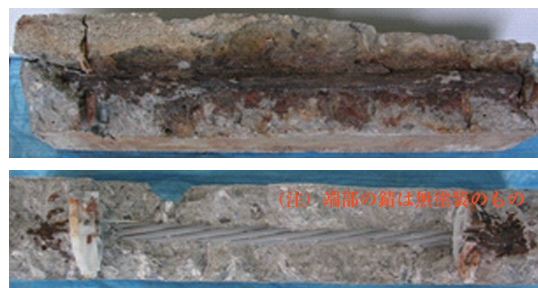
写真 - 4 に、回収した試験体の外観と内部の PC 鋼材の状況を示す。暴露3年1ヵ月後では、PC 鋼材のスペーサー部にひび割れが発生していた。さらに6年後には、無塗

表 - 5 埋設コンクリート内 PC 鋼材の発錆面積率

| 鋼材 | 発錆面積率 (%) | | |
|-------------|-----------|-------|------|
| | 1年4ヵ月 | 3年1ヵ月 | 6年 |
| 無塗装 PC 鋼より線 | 53.3 | 85.0 | 99.3 |
| 全素線塗装型 | 0 | 0 | 0 |



(a) 外観



(b) 内部 (上: 無塗装, 下: 全素線塗装型)

写真 - 4 埋設コンクリート試験体 (暴露6年)

装 PC 鋼より線の腐食による膨張が原因で軸方向に沿った割裂が発生した試験体があり、すべての試験体においてコンクリートに割裂もしくはひび割れが確認された。

埋設された無塗装 PC 鋼より線の腐食は如実に進行しており、6年後にはすべての試験体で腐食が激しく、断面が著しく減少しているのも一部見受けられた。一方、全素線塗装型では発錆などの変状は認められなかった。

4.2 全素線塗装型 PC 鋼より線が緊張した普通コンクリート試験体の暴露試験結果 (試験Ⅱ-5)

本試験は、実橋のコンクリートよりも塩分の浸透速度が速くなるように設定した水セメント比の高いコンクリート ($W/C = 65\%$) 中に、緊張力を導入した状態で無塗装 PC 鋼より線と全素線塗装型を埋設し、10年間の暴露試験を行いコンクリート中の塩分量と PC 鋼材の腐食の関係を調

査した。図 - 11 に、試験体の概要を示す。

図 - 12 に、塩分量および発錆面積率の推移を示す。参考比較として、前述の無緊張のまま埋設した無塗装 PC 鋼より線の発錆面積率も示す。無塗装 PC 鋼より線では、暴露 3 年から 10 年にかけて、孔食部の線径変化率は 8.67 % から 20.2 % へ増加し、発錆面積率は 66 % から 100 % に達しており、腐食の進行が確認された。コンクリート中の塩分量は、暴露 3 年から 6 年の間に発錆限界濃度である 1.2 kg/m^3 を超え、6 年後からさらに増加傾向を示した。また、暴露 10 年間で無塗装 PC 鋼より線の発錆面積率が 100 % になる環境下において、全素線塗装型の発錆面積率は 0 % であった。

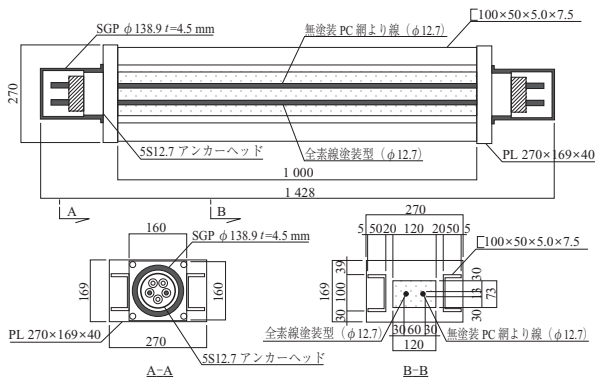


図 - 11 緊張埋設コンクリート暴露試験体概要

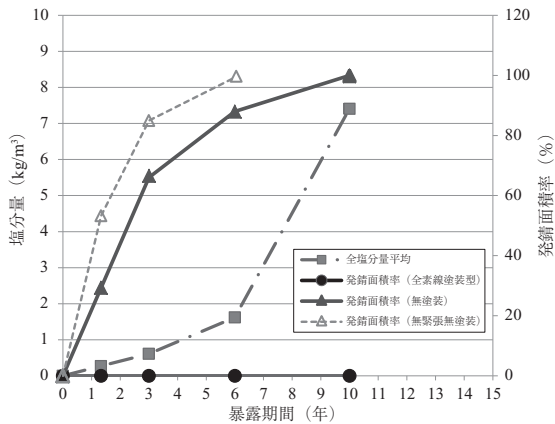


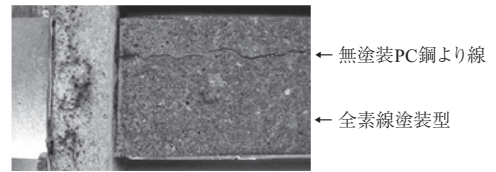
図 - 12 暴露材齢と塩分量および発錆面積率の関係

写真 - 5 に、試験体の端部外観と埋設 PC 鋼材の状況を示す。外観には、無塗装 PC 鋼より線の配置に沿ったひび割れが進展し、赤錆が表出していた。全素線塗装型について、発錆は確認されず機械的性質の低下も確認されなかった。

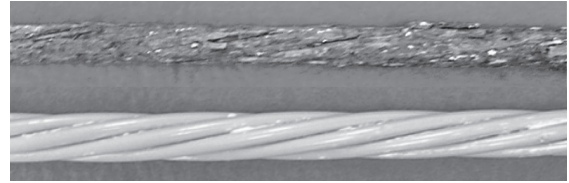
以上より、コンクリートに埋設し緊張力を導入した全素線塗装型は、暴露期間 10 年で無塗装 PC 鋼より線が腐食劣化し機械的性質が規格値を下回るような環境下で、健全性を有することが確認された。

4.3 全素線塗装型 PC 鋼より線の自然暴露試験結果 (試験 II-8)

試験 II-7 では、塗膜厚さが $70 \mu\text{m}$ 、 $110 \mu\text{m}$ および 150



(a) 外観 (端部)



(b) 内部 (上: 無塗装, 下: 全素線塗装型)

写真 - 5 緊張埋設コンクリート試験体 (暴露 10 年)

μm の全素線塗装型を、2 年 3 ヶ月にわたり鋼製カバー内にて緊張力を導入した場合と無緊張の場合について暴露試験を行ったが、発錆は確認されなかった。試験 II-8 では、紫外線を避けた状態で、平成 17 年 10 月に回収した試験 II-7 の試験体を無緊張の状態でも再暴露を行って 3 年間の追加調査をするとともに、より塗膜の薄い試験体も新たに暴露試験を実施して、塗膜厚さによる防錆性能の違いを追及した (図 - 13)。

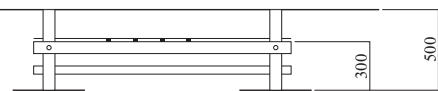
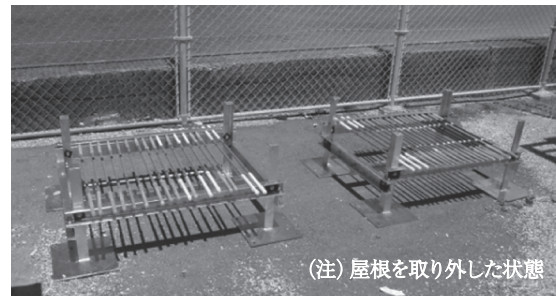


図 - 13 自然暴露試験体設置状況

(1) 外 観

無塗装 PC 鋼より線は、暴露開始から 14 日目で発錆面積率が 80 % に達し、28 日目では 100 % となった。それ以降は、赤錆が鱗片状にはく離する状態となった。

塗膜厚さが $100 \mu\text{m}$ 以下の全素線塗装型では、1 年半を超えた時期からピンホールに起因する発錆が顕著となった。塗膜厚さ $100 \mu\text{m}$ 以上の試験体については、塗膜傷を除きピンホールに起因する発錆がほとんど確認されなかった。再暴露した $70 \sim 150 \mu\text{m}$ の試験体では、暴露期間が 5 年を超え塗膜の光沢が消失しており、紫外線による白化が若干進行していた。

(2) 発 錆 面 積

発錆面積と暴露期間の関係では、暴露 1 年から 2 年後まで無塗装 PC 鋼より線の腐食の進行が鈍化していたが、3 年後には再度腐食が進行する傾向を示した。図 - 14 に塗

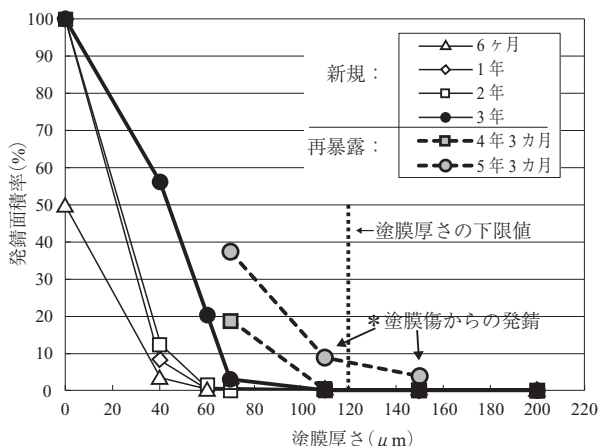


図 - 14 塗膜厚さ別の暴露材齢と発錆面積率の関係

膜厚さとピンホールに起因する発錆面積率の関係を示す。塗膜厚さ 70 μm 以下でピンホールからの発錆の増加傾向がみられ、100 μm を境に発錆面積率の分布に違いがある。

(3) 機械的性質

無塗装 PC 鋼より線は、腐食による機械的性質の低下が著しく、次に 100 μm 以下の薄い塗膜の全素線塗装型の試験体における低下が確認できた。再暴露試験体では、塗膜傷部での腐食による機械的性質の低下が確認できたが、それ以外による低下はみられなかった。

以上より、目安となる 100 μm より厚い塗膜を有する全素線塗装型の試験体は、紫外線を避けた条件での暴露試験 (3 年以上) でピンホールからの発錆がほとんどないことが確認された。

5. おわりに

本研究で、塩害環境下で暴露 15 年まで追跡調査した結果を総合的に解析した結果から、塩害に対応した高耐久性 PC 構造物の建設について、以下の結論が得られた。

- (1) 高炉スラグ微粉末 6000 使用コンクリートは、早強ポルトランドセメント単味の場合に比べ硬化体が緻密化し、長期強度の増進が大きく、塩化物の浸透を低減できる。
- (2) 全素線塗装型 PC 鋼より線は、より線の素線一本一本に塗装を施し再度より戻す工法で製造され、塗膜厚 100 μm 以上 (規格値 200 ± 80 μm) の場合、発錆が認められず防錆効果が確認された。
- (3) 本橋の性能評価の結果、防食性が効果的に発揮されており、塩害に対応したミニマムメンテナンス橋 (多手段の腐食防護) の実現が図られたものと考えられる。

謝 辞

本研究報告は、産学官連携で研究する「塩害に対応した高耐久性 PC 橋の建設に関する研究委員会」(活動期間：平成 10 年 5 月～平成 26 年 3 月、顧問：小林一輔、アドバイザー：大城 武、委員長：豊福俊泰、委員：上津 敏・

神山徳夫・田中和幸ほか 21 名) における 16 年間の委員会活動結果の内容をまとめたものである。関係各位に、厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針 (案)・同解説, 1984.2
- 2) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針 (案), 1986.2
- 3) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針 (案) 一改訂版一, 1990.3
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 1994.2
- 5) 土木学会：[平成 8 年制定] コンクリート標準示方書, 1996.3, 2002 年版コンクリート標準示方書, 2002.1
- 6) 星野富夫・魚本健人・小林一輔：15 年間の海洋暴露実験を行ったエポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.107-120, 1998.5
- 7) 小林一輔・白木亮司・星野富夫：高炉セメントコンクリートの塩化物遮へい性能(1) - EPMA による面分析結果 -, 生産研究, 41 巻 6 号, pp.56-59, 1989.6
- 8) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発, 1998.3
- 9) 土木研究センター：エポキシ樹脂全塗装 PC 鋼より線 SC ストラッド, 建設技術審査証明報告書 (建技審証第 0434 号), 2005.3
- 10) 土木研究センター：全素線塗装型 PC 鋼より線を使用した PC 構造物の設計・施工ガイドライン, 2010.3
- 11) 豊福俊泰・尼崎省二・中村一平：入門維持管理工学, 森北出版, 2009.4
- 12) 上津 敏・田中和幸・豊福俊泰：塩害に対応した高耐久性 PC 構造物の建設 - 屋嘉比橋上部工工事 -, コンクリート工学, Vol.37, No.3, pp.20-23, 1999.3
- 13) 豊福俊泰・上津 敏・田中和幸：塩害に対応した高耐久性 PC 構造物の施工, 平成 10 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.784-785, 1999.3
- 14) 田中和幸・上津 敏・豊福俊泰：塩害に対応した高耐久性 PC 構造物の建設 (屋嘉比橋上部工工事), プレストレストコンクリート技術協会第 9 回シンポジウム論文集, pp.257-262, 1999.10
- 15) 豊福俊泰・上津 敏：塩害に対応した高耐久性 PC 橋の施工, 第 23 回日本道路会議一般論文集 (B), pp.342-343, 1999.10
- 16) 小島孝昭・豊福俊泰・小林一輔：塩害に対応した高耐久性 PC 構造物の建設と性能評価に関する研究, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.235-253, 2005.3
- 17) 小島孝昭・豊福俊泰・小林一輔：塩害に対応した高耐久性 PC 構造物の性能評価 - 屋嘉比橋上部工追跡調査 -, コンクリート工学, Vol.44, No.11, pp.29-37, 2006.11
- 18) 小島孝昭・豊福俊泰・小林一輔：塩害に対応した高耐久性 PC 橋の性能評価 = 屋嘉比橋上部工追跡調査 =, 建設機械, 第 43 巻第 6 号, pp.41-47, 2007.6
- 19) 石井 豪・豊福俊泰・前田悦孝・松山高広：高炉スラグ微粉末を用いた PC 構造物の塩害劣化抵抗性に関する考察, プレストレストコンクリート技術協会第 17 回シンポジウム論文集, pp.111-114, 2008.11
- 20) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準], p.146, 2012.12
- 21) 土木学会：コンクリートライブラリー 138 2012 年制定コンクリート標準示方書改訂資料, 基本原則編・設計編・施工編, p.80, 2012.12
- 22) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準], pp.154-155, 2012.12

[2014 年 8 月 4 日受付]