

撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の補修補強 技術の高度化に関する共同研究報告書

—塩害を受けた既設 PC 橋の耐久性評価および補修技術に関する研究—

令和4年8月

国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター
一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

Copyright © (2022) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、この報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の補修補強技術の高度化に関する共同研究報告書

—塩害を受けた既設 PC 橋の耐久性評価および補修技術に関する研究—

執筆者名簿

国立研究開発法人土木研究所

上席研究員	石田	雅博			
主任研究員	大島	義信	主任研究員	山本	将
主任研究員	藤木	裕二	主任研究員	内田	雅一
研究員	山口	岳思	研究員	吉田	英二
交流研究員	渡辺	遼	交流研究員	末宗	利隆
交流研究員	塚崎	翔太	交流研究員	佐藤	純弥
交流研究員	水戸	健介	交流研究員	小田部	貴憲
交流研究員	角田	貴也			

一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

委員長	北野	勇一			
副委員長	國富	康志			
委員	小林	崇	委員	西須	稔
〃	石井	智大	〃	東	洋輔
〃	白浜	寛	〃	三本	竜彦
〃	小瀬戸	弘樹	〃	櫻井	義之
〃	村井	弘恭	〃	小野塚	豊昭
〃	谷口	正輝	〃	栗原	勇樹
〃	細江	泰規	〃	坂口	尚大
〃	正木	守	〃	杉江	匡紀
〃	清水	宏一			

要 旨

本共同研究では、プレストレストコンクリート（PC）橋の維持管理技術の高度化を目指し、撤去橋梁を活用した臨床研究を推進している。この研究では、既設 PC 橋の塩害対策として実施される表面保護工法の補修技術の信頼性向上を図ることを目的に、各種表面保護工法が適用された撤去橋梁を用いて補修効果に関する検討を行った。その結果、塩害環境を簡易的に評価できる非破壊検査手法を提案するとともに、表面保護工法による補修効果が確実に発揮される限界を確認した。これらの得られた知見より、塩害環境にある既設 PC 橋に表面保護工法を適用する際の留意事項について整理した。

キーワード：PC 橋，撤去桁，塩害，表面保護工法，非破壊検査

目 次

1章	はじめに	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	既設PC橋の維持管理と課題	5
1.3	本報告書の構成	6
1.4	用語の定義	8
2章	塩害を受けた既設PC橋の塩化物イオン濃度調査手法に関する検討	11
2.1	検討概要	11
2.2	簡易な調査手法の選定	11
2.3	対象橋梁の概要	12
2.4	塩化物イオン濃度分布の実態調査	14
2.5	塩化物イオン濃度調査手法に関する検討	20
2.6	本章のまとめ	26
3章	塩害を受けた既設PC橋に適用した表面被覆工法の補修効果に関する検討	28
3.1	検討概要	28
3.2	対象橋梁の概要	28
3.3	実橋における表面被覆工法の性能確認・調査	30
3.4	塩化物イオン濃度の経年変化分析	40
3.5	補修効果に関する考察および表面被覆工法の適用上の留意点	50
3.6	本章のまとめ	51
4章	塩害を受けた既設PC橋に適用した表面含浸工法の補修効果に関する検討	53
4.1	検討概要	53
4.2	対象橋梁の概要	53
4.3	撤去桁を用いた表面含浸工法の試験施工による性能確認・調査	54
4.4	実橋を用いた現地調査による塩化物イオン濃度の経年変化分析	68
4.5	補修効果に関する考察および表面含浸工法の適用上の留意点	70
4.6	本章のまとめ	71

5章 塩害を受けた既設 PC 橋に適用した鋼板接着工法の補修効果に関する検討.....	72
5. 1 検討概要.....	72
5. 2 対象橋梁の概要.....	72
5. 3 実橋における鋼板接着工法の性能確認・調査.....	74
5. 4 鋼板接着工法の補修効果と留意事項.....	87
5. 5 本章のまとめ.....	88
6章 塩害を受けた既設 PC 橋への表面保護工法の適用に関する検討.....	89
6. 1 検討概要.....	89
6. 2 塩害に対する補修効果が確実に発揮可能な限界に関する検討.....	90
6. 3 塩害による劣化の可能性のある PC 橋上部構造の点検手法に関する検討.....	96
6. 4 塩害環境にある既設 PC 橋に表面保護工法を適用する際の留意点.....	99
6. 5 本章のまとめ.....	102
7章 まとめ.....	104
7. 1 本研究の成果.....	104
7. 2 今後の展望.....	105
謝辞.....	108
付 録.....	109
付録1 表面被覆された撤去桁の解体調査（第4・8 径間）～中性化・塩化物イオン量～.....	110
付録2 長期供用された表面被覆材の調査（第4・8・20 径間）.....	118
付録3 表面含浸された PC 桁の現地調査（第13 径間）～中性化・塩化物イオン量・含浸深さ・はつり調査～.....	149

1章 はじめに

1. 1 本研究の背景と目的

プレストレストコンクリート（以下、PC）橋は、プレストレスの導入によりひび割れが制御されているため、高い耐久性を有する。1951年に架設されたプレテンション方式のPC橋である長生橋¹⁾や1954年に架設されたポストテンション方式のPC橋である第一大戸川橋梁²⁾などは、半世紀以上の供用を経ても健全な状態であったことからそれを実証するものである。その一方で、供用を開始して比較的早い時期から劣化現象が見られるPC橋も実在する。過酷な塩害環境下におけるPC橋では鋼材腐食やコンクリートの剥離等の劣化現象が確認されており、一部ではグラウトの充填不良に起因したPC鋼材の破断により、通行規制などを余儀なくされる変状も発生している。このような劣化問題が顕在化して以来、技術指針類の改定がおこなわれてきており、所要の品質で設計・施工されたPC橋については、供用期間中の早期に塩害による劣化現象が現れる可能性は限りなく低い。しかし、これら技術指針等以前に設計・施工された橋梁は、将来的に劣化進行する可能性が高く、劣化が顕在化する前に適切に維持管理を行い、必要に応じて措置を行う必要がある。すでに膨大な数のPC橋が供用されている中、それらをいかなる方法で維持管理していくかが重要な課題になっている。

それら膨大な数のPC橋について、効率的な維持管理を行うために「点検診断技術の効率化や高度化」「現場条件に適合した合理的な補修補強方法」が求められる。一方で、多種多様な使用環境下にあるPC橋は、種々の条件によって現有の耐荷性能や耐久性能が異なるため、汎用的な診断や対策技術が通用できない場合もあり、個別の対策が必要となることもある。そのため、効率的な維持管理を行うためには、精度の高い調査診断を行い、劣化が軽微な段階での適切な予防保全的な措置を講じることが重要である。併せて、再劣化を生じさせない信頼性の高い対策技術の確立が必要となる。

そこで、国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター（以下、CAESAR）と一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会（以下、PC建協）は、第二期共同研究（「撤去橋梁を用いた既設PC橋の補修補強技術の高度化に関する研究（2017～2020年度）」）を設置し、メンテナンスサイクルを適切に回していくために必要となる調査・診断・対策技術の信頼性向上を図ることを目的に、PC橋の劣化状況を考慮した耐荷性能の評価や補修補強効果の確認など、劣化した撤去PC橋梁を活用し各種検討を行っている。具体的には、図1.1.1に示すように「既設PC橋の各種条件に応じた性能評価法の確立」および「再劣化などに至らせないための信頼性の高い補修補強技術の確立」を目標に研究を進めることとしている。

なお、第一期の共同研究では、「撤去橋梁を用いた既設PC橋の診断技術高度化に関する共同研究（2013～2015年度）」に取り組み、振動測定によるPC橋の異状検知と解体調査によるグラウト充填調査に関する共同研究報告書^{1) 3)}、¹⁻⁴⁾を公表している。

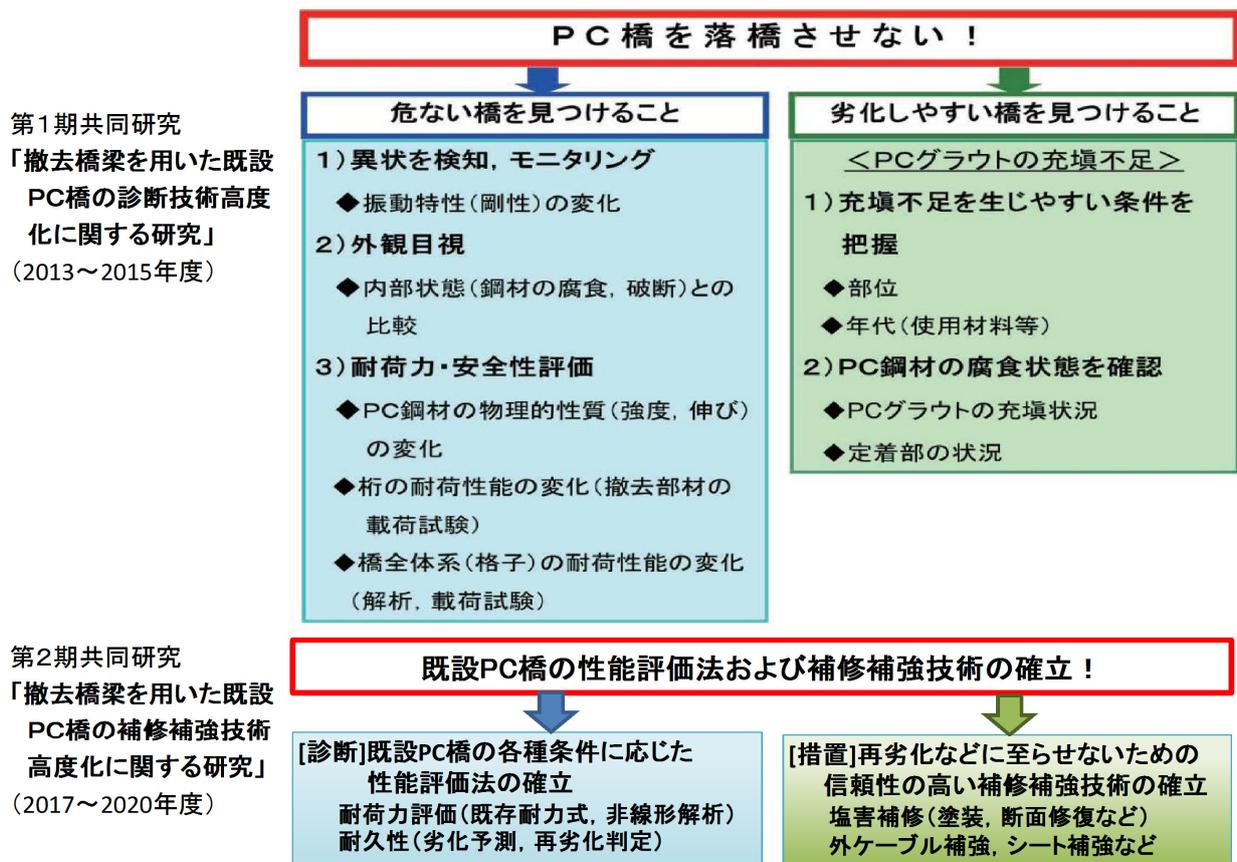


図 1.1.1 研究全体の流れ

写真 1.1.1, 写真 1.1.2 に本研究で対象とした橋梁を示す。写真 1.1.1 に示す橋梁は、日本海沿岸に位置しており、鋼単純鈹桁橋 (1 径間) とポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋 (31 径間) である (図 1.1.2, 図 1.1.3)。波浪の影響を受ける厳しい塩害環境下で供用され、橋齢 19 年目の 1994 年から断面修復工法や表面保護工法などの補修が繰り返し施工されてきた。本橋からは、表面保護工法 (表面被覆, 表面含浸) で補修された主桁を一部譲り受けた。なお、本橋は新橋への切換え後、撤去が進められている。

写真 1.1.2 に示す橋梁は、1962 年に海岸から約 70m の河口上に建設された 3 連のポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋である (図 1.1.4)。本橋は、主桁に塩害補修のための表面保護工法として鋼板接着工法などが行われてきた。2017 年には新橋建設に伴い撤去されることになり、鋼板接着による補修工法で補修された主桁を一部譲り受けた。

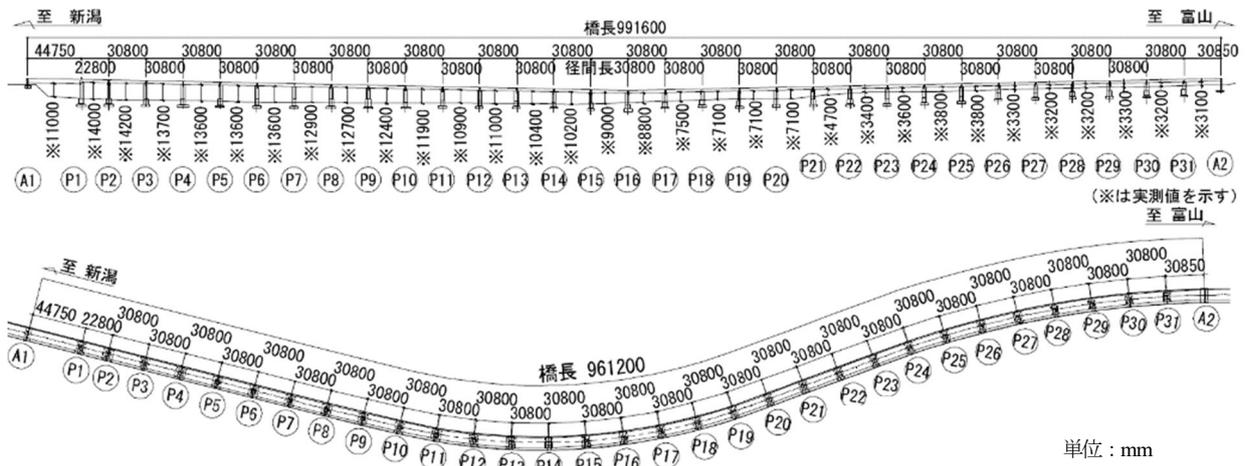


図 1.1.2 本研究で対象とした調査橋梁の側面図

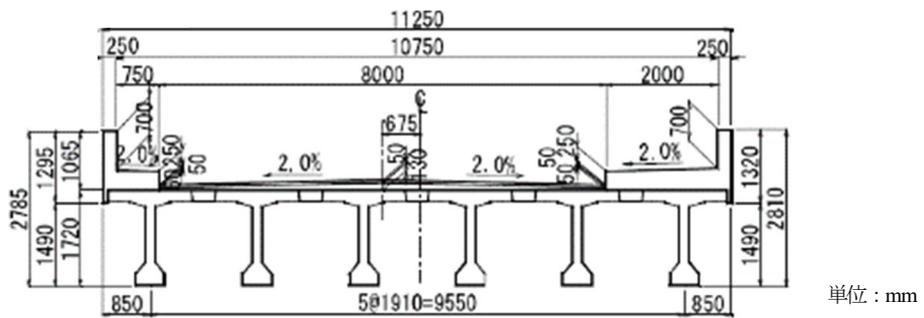


図 1.1.3 本研究で対象とした調査橋梁の断面図



写真 1.1.1 本研究で対象とした調査橋梁の全景

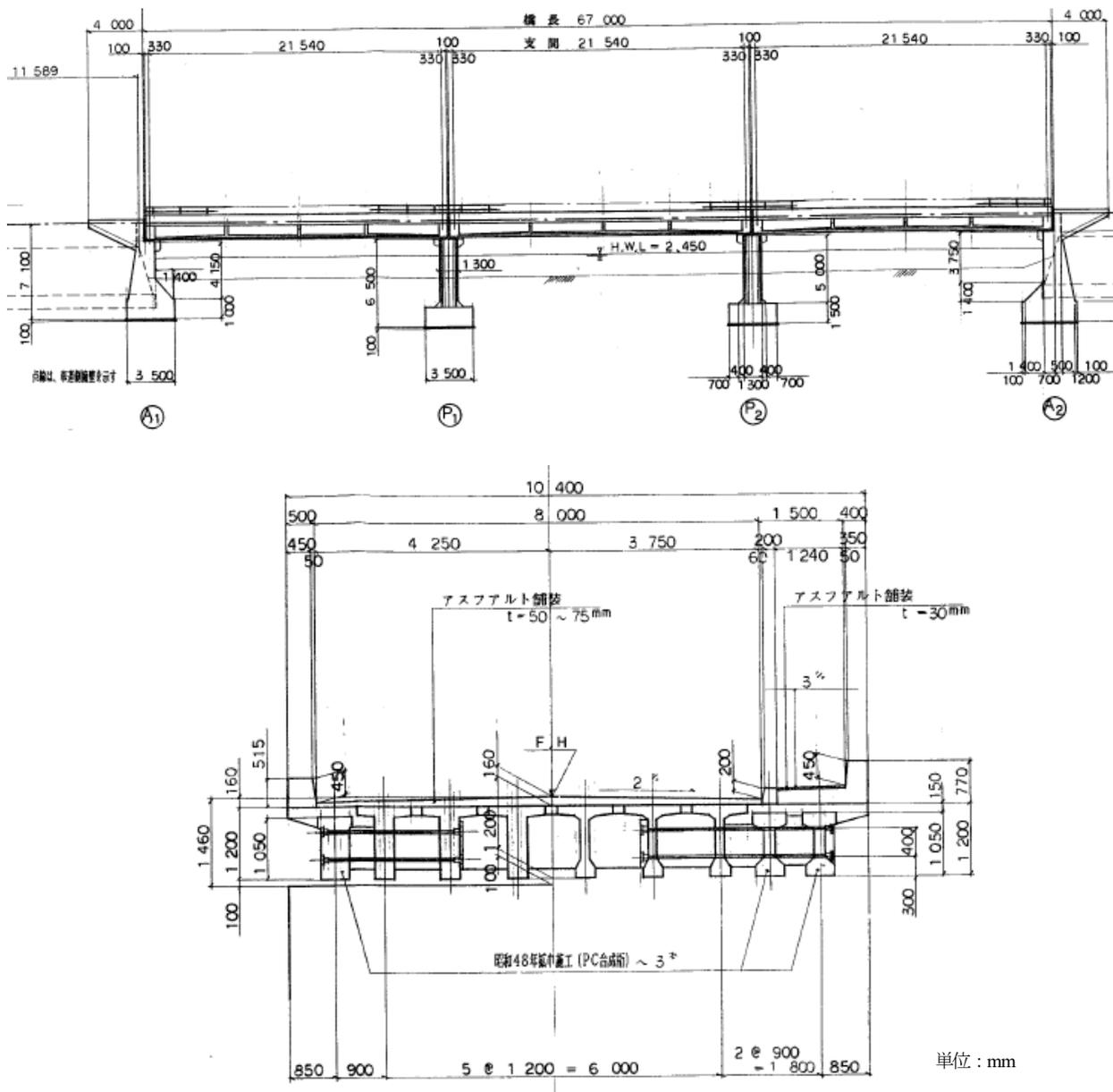


図 1.1.4 本研究で対象とした撤去橋梁の側面図（上）と断面図（下）



写真 1.1.2 撤去橋梁の全景（左）と譲り受けた鋼板接着された主桁の一部（右）

1. 2 既設 PC 橋の維持管理と課題

前述のとおり、PC 橋の効率的な維持管理を行うためには、精度の高い調査診断を行い、劣化が軽微な段階において予防保全的な措置を講じることが重要であると考えられる。そのため、PC 橋の維持管理は現有性能の不確かさを最小にすることに尽きるものと考えられる（図 1.2.1）。

PC 構造のメリットは、RC 構造と比較して、劣化が進行しても弾性範囲であり続ける（耐荷性能を保持し続ける）期間が寿命に対し長いことだが、逆に劣化が顕著になってからの性能低下の期間は寿命に対し短く、弾性範囲を超えて現有性能の不確かさが増大する際にも大きい。すなわち、前者の現有性能が低下していない状況において補修補強を適切に行うことで補修補強効果が確実に得られる可能性が高い（予防保全が有効）と考えられる。逆に、後者のように現有性能が低下している状況においては適切な補修補強を行うために現有性能の不確かさを正確に見積もらないと確実な補修補強効果が得られない可能性が高いと考える。

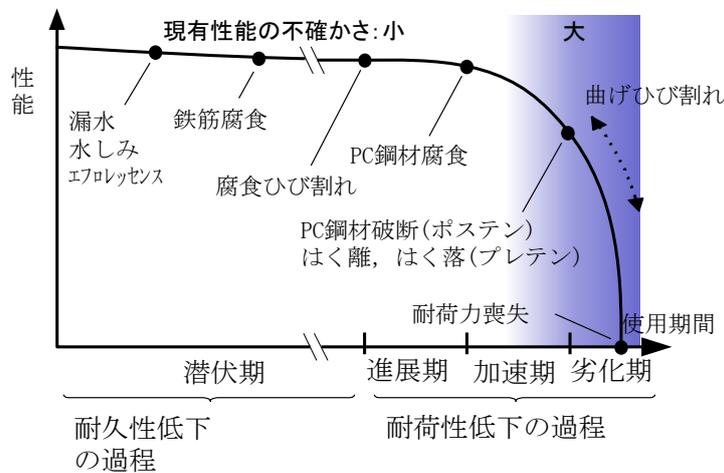


図 1.2.1 PC 構造物で予想される劣化シナリオ（文献 1-3）図 1.2.1 に加筆

PC 橋における変状のなかでも最も深刻な劣化の一つと考えられている塩害は、劣化の進行が著しく変状が外観に現れた時点では既に内部で鋼材の腐食が進んでいることがほとんどであり、劣化が重篤化する前の軽微な劣化の段階で早期に塩分量を把握して対処することが重要であり計画的な予防保全が不可欠である。

現状における塩害地域における塩分量の把握はコンクリート橋の塩害に関する特定点検要領¹⁻⁵⁾に準じて、コア採取による評価が行われることが一般的である。コア採取により塩分量の定量的な結果の入手が可能であるが、塩分量は構造物の部位によって大きく異なり、採取した箇所での塩分量が必ずしも橋の代表値とは限らない。したがって、劣化度合いの進行度を適切に把握し、的確な措置につなげていくためには、代表となる塩分量を把握するための合理的なスクリーニング技術の提案が望まれる。

また、塩害を受けた既設 PC 橋の補修対策として、表面保護（表面被覆、表面含浸など）、断面修復、電気防食、脱塩など種々の方法があるが、戦略的な予防保全の実現には、現有性能が低下していない段階で塩分の侵入を適切に防止・抑制することが必要である。それを達成する手段としては表面保護工法が最も有効であり、既に多くの既設 PC 橋の補修対策で実施されている。しかしながら、期待された補修効果が発揮されず早期に再劣化が生じてい

る事例が散見されており¹⁶⁾、補修を行ってもその効果が持続せず、再劣化が生じ再補修を求められる場合がある。そのような状況に陥った要因を解明し、補修対策の信頼性向上につなげていく必要がある。

そこで本研究では、写真 1.1.1、写真 1.1.2 に示す橋梁を対象に、塩分量調査のためのスクリーニング技術の提案に向け、補修前後の塩化物イオン濃度分布などの調査や、対象橋梁に施された各種表面保護工法に対する再劣化の要因に関する分析や補修効果が確実に得られるための施工上の留意点などについて整理した。

1. 3 本報告書の構成

本報告書の構成を図 1.3.1 に示す。

- 2章では、PCT 桁橋のように部材の断面形状に起伏を有する構造の場合、塩化物イオン濃度の分布が一様ではないため塩分量が多い箇所の特が困難であるという課題に対し、最適なコア採取位置の選定を目的に、簡易な非破壊検査手法を用いた実橋調査を実施し、スクリーニング手法について検討した。
- 3章では、PC 橋の塩害補修としてコンクリート内部への塩化物イオンの侵入抑制を目的に採用される表面被覆工法について期待される補修効果が発揮されないケースがあるという課題に対し、その要因を究明するために、実際に塩害対策として表面被覆工法で補修された PC 桁について、塗膜調査、補修前後の塩化物イオン濃度の経年変化分析、コンクリートの配合調査を行った。
- 4章では、塩害補修として近年用いられている表面含浸工法を PC 桁のような低水セメント比のコンクリートへ適用した際に含浸しにくい事象があるという課題に対し、長年供用された PC 桁を用いて表面含浸工法の試験施工を行い、施工性や含浸深さ、撥水性について調査した。また、同橋から現地にて試料を採取し塩化物イオンや含浸材の浸透状況、はつり調査により表面含浸工法の効果確認を行った。
- 5章では、鋼板接着工法について一般的な表面保護工法としては認知されていないものの、同じ補修工法を適用した場合の補修の効果について検証することが重要であると考え、PC 桁主桁下面の塩害対策に鋼板接着工法が適用された撤去桁を用いて補修後 40 年以上が経過した現在の補修効果を検証した。
- 6章では、2～5章の検討結果および既往研究に基づき、塩害を受けた既設 PC 橋への表面保護工法の適用に関する各種検討を行った。
- 7章では、本研究の成果と今後の課題を示した。

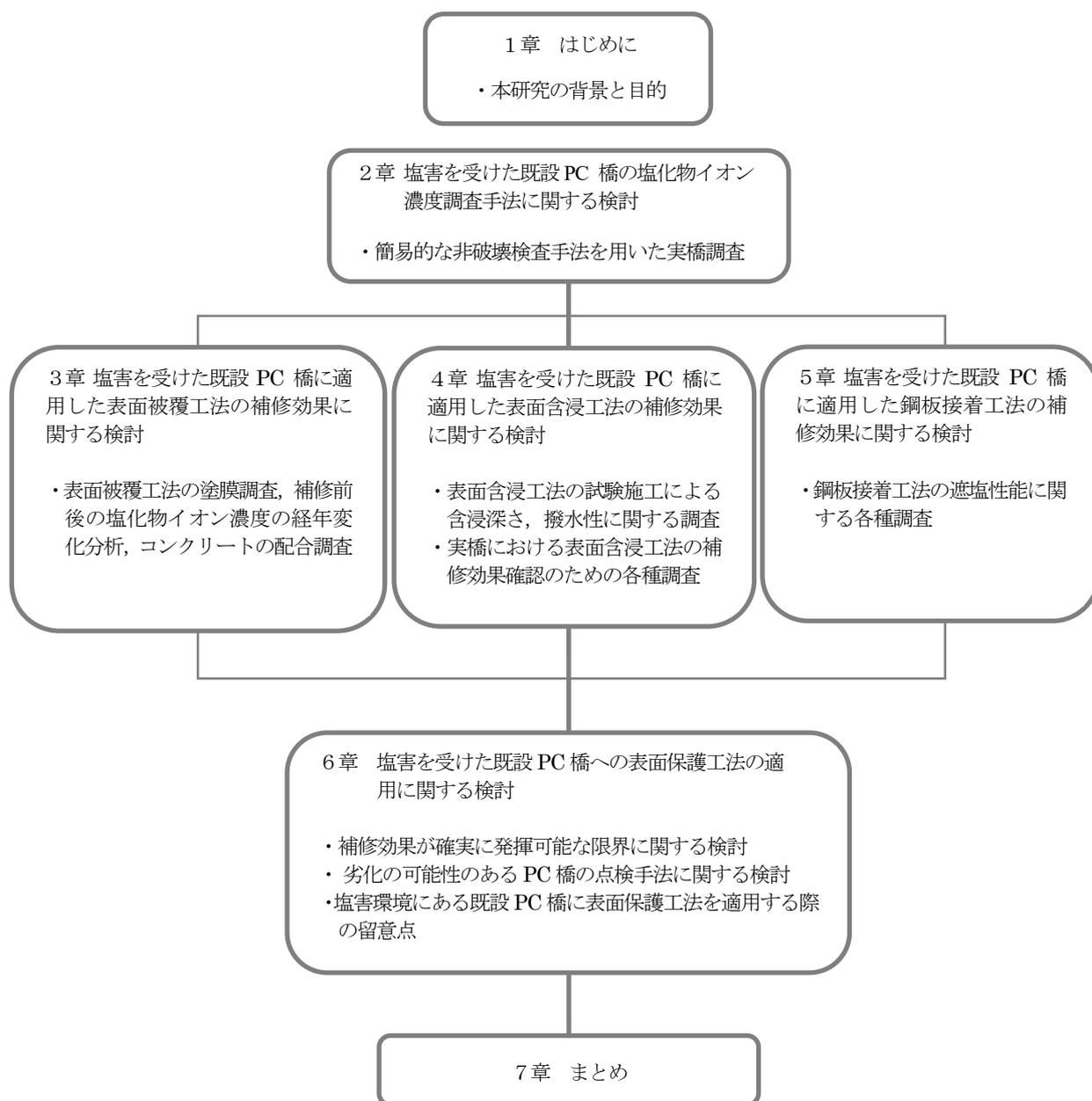


図 1.3.1 本報告書の構成

1. 4 用語の定義

補修補強技術にかかわる用語は国や団体において種々の考え方が存在する。そのため、本報告書で使用する用語を次のように定義する。

- ・変状：通常とは異なる状態または前回点検時から変化が生じた状態。
- ・劣化：時間の経過にともなって進展する現象。なお、本報告書では、塗膜などの補修補強部材自体が経年的に変質する場合は「劣化」と表記する。劣化例を写真 1.4.1, 1.4.2 に示す。
- ・損傷：橋の性能を低下させる根源となる現象。なお、本報告書では、構造本体の劣化に起因して塗膜などの補修補強部材に発生した変状は「損傷」と表記する。損傷例を写真 1.4.3, 1.4.4 に示す。
- ・維持管理：構造物の供用期間において、構造物の性能を所要の水準以上に保持するための全ての行為。
- ・耐久性：構造物が予定供用期間にわたり安全性、使用性、復旧性を保持する性能で、本書では劣化を発生あるいは顕在化させない性能。
- ・予防保全：構造物に劣化を発生あるいは顕在化させない、もしくは、性能低下を生じさせないための予防的な措置を計画的に実施する維持管理。
- ・事後保全：構造物の性能低下の程度に対応して対策を実施する維持管理。
- ・補修：構造物建設時に保有していた耐久性まで回復・向上を目的とした対策。ただし、構造物建設時に保有していた耐荷性まで回復させる対策も含む。
- ・補強：構造物建設時に保有していた耐荷性よりも高い性能まで性能を向上させる対策。
- ・表面保護工法：コンクリートの劣化や鋼材の腐食の原因となる劣化因子の侵入を防止・抑制することを主目的として、コンクリート構造物の表面に施された保護的な措置。



写真 1.4.1 紫外線による塗膜の変質（劣化例）



写真 1.4.2 鋼板自体の腐食（劣化例）



写真 1.4.3 構造本体の塩害による塗膜の剥離（損傷例）



写真 1.4.4 構造本体の塩害による鋼板の剥がれ（損傷例）

1 章の参考文献

- 1-1) 小門前亮一, 西垣義彦, 竹腰勇ノ介, 鳥居和之: わが国で最初の PC 橋 (長生橋) の解体調査と PC 桁の載荷試験, プレストレストコンクリート, Vol.44, No.5, pp.39-46, 2002.9
- 1-2) 土木学会: 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (335 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ 80, 2008.4
- 1-3) 国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター, 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会:撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の診断技術高度化に関する共同研究報告書ー振動測定による既設 PC 橋の異状検知に関する研究一, 共同研究報告書第 466 号, 2015.9
- 1-4) 国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター, 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会: 撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の診断技術高度化に関する共同研究報告書ー既設 PC 橋のグラウト充填状況に着目した解体調査一, 共同研究報告書第 488 号, 2016.3
- 1-5) 国土交通省道路局: コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領 (案), 2004.3
- 1-6) 国立研究開発法人土木研究所: コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル (案), 土木研究所資料第 4343 号, 2016.8

2章 塩害を受けた既設 PC 橋の塩化物イオン濃度調査手法に関する検討

2. 1 検討概要

塩害を受けた既設 PC 橋の塩分量調査を行う場合、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）」または「塩害橋梁維持管理マニュアル（案）」に準じて、一般的にコア削孔を実施する^{2-1) 2-2)}。コア削孔に際しては、既設橋をむやみに削孔しないことなどに配慮して削孔箇所を選定する必要があるが、架橋条件、橋梁形式などによって削孔すべき箇所は異なることが想定される。特に、PCT 桁橋のように部材の断面形状に起伏を有する構造の場合、塩化物イオン濃度の分布が一様²⁻³⁾ではなく、塩分量が多い箇所の特定が困難であるため、コア採取箇所のスクリーニングが重要である。構造物に与える影響を鑑みるとスクリーニングの手法は非破壊による方法が望ましい。加えて、広範囲にわたって構造物や部材に作用する塩分量が多い箇所を特定するため、調査手法は簡易的な設備で完結する手法が望ましい。また、橋軸方向にわたって採取したコアを用いて塩分量がどのように分布しているのか実態を把握し、整理した例は少なく、橋軸方向でコアを複数採取して整理評価することは有用である。そこで、本検討では、実橋梁から採取したコアの塩化物イオン濃度に対し、橋軸方向および劣化部からの距離の相関について整理するとともに、最適なコア採取位置のスクリーニングを目的に、簡易的な非破壊検査手法を用いた実橋調査を実施した。

2. 2 簡易な調査手法の選定

簡易的な非破壊検査手法を決定するため、コアの採取が不要な調査手法の整理を行った。調査手法の一覧を表 2.2.1 に示す。調査手法として、ドライガーゼ法、ガーゼ拭き取り法²⁻⁴⁾（以下、拭き取り法）、薄板モルタルを設置する方法²⁻³⁾、蛍光 X 線による方法²⁻⁵⁾、近赤外線分光分析法²⁻⁶⁾が挙げられる。

ドライガーゼ法は調査地点の飛来塩分を調査する目的で実施検討される機会が多く、その手法は JIS Z 2382 にて規準化されている。

拭き取り法は鋼道路橋防食便覧²⁻⁴⁾にて規定され、部材表面に対して飛来する塩分量を把握することができ、安価で簡易的に実施できる調査方法である。例えば富山らは T 桁に対して拭き取り法を適用し、部材形状や桁位置における付着塩分量の分布を評価している²⁻⁷⁾。

薄板モルタルをコンクリート表面に設置する方法は、そのモルタルに付着・浸透した塩分量を電位差滴定などにより分析・把握する手法である。

蛍光 X 線による方法は近年小型・可搬型のポータブル蛍光 X 線装置が市販されており活用の機会が増えている手法である。同装置は X 線管と検出器が内蔵されていることで現地にて簡易的に試料の元素分析が可能である。例えば渡辺らはドリル削孔粉を用いた分析方法や精度を検証しており、分取した試料を用いて蛍光 X 線で直接測定して得られる値が電位差滴定にて求めた値と相関性を有すると報告がなされている²⁻⁵⁾。

最後に、近赤外線による方法は近赤外分光法を用いた近赤外線イメージングにより現場で塩化物イオン濃度に応じたスペクトル強度を把握することが可能である。

本検討における目的は、表面塩化物イオン濃度を把握することであるが、付着塩分量が大きい場合、Fick の第 2 法則に従えば、内部の塩化物イオン量が多いと想定されるため、環境作用の程度を把握することが目的に即したものと考えられる。また、ドライガーゼ法や拭き取り法は規準化された方法であるため標準的な評価手法であるといえる。これに加えて、ドライガーゼ法や拭き取り法から得られるコンクリート表面の塩化物イオンとコアを採取して求めた表面塩化物イオンとの比較検証を行った事例は見受けられない。そこで、最適なコア採取位置の選定のためのスクリーニング手法としてドライガーゼ法および拭き取り法を採用し、実橋梁から採取したコア供試体を用いて、両手法の適用性を検討した。

表 2.2.1 コアの採取が不要な塩分量調査手法

調査手法名	概要
ドライガーゼ法	調査地点に暴露したガーゼを塩分分析し、飛来塩分を評価 JIS Z 2382 にて基準化
拭き取り法	部材表面をガーゼで拭き取り塩分分析を行い、付着した塩分を評価 鋼道路橋防食便覧 ²⁴⁾ にて規定
薄板モルタルを設置する方法	評価部材に設置した薄板モルタルに付着・浸透した塩分量を分析により評価
蛍光 X 線法	X 線管と検出器が内蔵されている携帯型の装置を用いて、現地にて試料の元素分析を評価
近赤外線の分光分析法	塩化物イオン濃度に応じたスペクトル強度について近赤外分光法を用いた近赤外線イメージングで評価

2. 3 対象橋梁の概要

表 2.3.1 に橋梁諸元、図 2.3.1 に橋梁一般図と調査位置を示す。対象橋梁は鋼単純鉸桁橋（1 径間）と単純 PC ポストテンション T 桁橋（31 径間）にて構成される。対象橋梁は写真 2.3.1 に示すように日本海沿岸に位置し、波浪の影響を受ける厳しい塩害環境下で供用され、橋齢 19 年目の 1994 年から断面修復工法や表面保護工法などの補修が繰り返し施工されてきた（表 2.3.2）。なお、対象橋梁は新橋への切換え後、撤去が進められている。

表 2.3.1 橋梁諸元

構造形式	単純 PC ポストテンション T 桁橋（6 主桁）
架設年	1975 年（昭和 50 年）
橋長	991.6m
支間割	30.8m ほか
全幅員	11.3m
架橋条件	海岸（日本海）

2. 4 塩化物イオン濃度分布の実態調査

2. 4. 1 コア採取による塩化物イオン濃度の測定概要

塩化物イオン濃度分布の実態を把握するため、調査対象径間（第4径間、第8径間）のウェブあるいは下フランジ部42箇所を対象に、橋軸方向で複数のコアを採取した（図2.4.1～図2.4.4）。図中に記すコア番号を赤青で色分けしているのは、劣化部（赤）と健全部（青）を区別している。コア採取位置に関して、調査対象桁は腐食ひび割れや浮きなどの劣化があるため、劣化部近傍からもコアを採取した。さらに、後述する簡易的な調査手法（ドライガーゼ法、拭き取り法）にて得られる結果を比較するための代表値として、簡易的な調査手法の評価箇所近傍でもコアを採取した。簡易的な方法による調査箇所を一覧として表2.4.1に、位置図として図2.4.5に示す。

採取したコア（φ50×80mm）は表面から深さ20mmごとにスライスし、JISA1154に準拠し電位差滴定法により全塩化物イオンの定量分析を行った。得られた塩化物イオン濃度の分布を最小二乗法によりFickの拡散方程式の解にフィッティングして見掛けの拡散係数（以下、 D ）と表面塩化物イオン濃度（以下 C_0 ）を求めた。なお、中性化や内部拡散の影響を受けた表層部のデータは除外した。なお、下フランジの両側面の結果を平均した値を下フランジにおける C_0 および D の代表値とした。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (\text{式2.4.1})$$

ここに、 $C(x, t)$: コンクリート表面からの距離 x (mm)、 t (年)における塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_0 : 表面塩化物イオン濃度(kg/m³)、 D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/年)、 erf : 誤差関数。

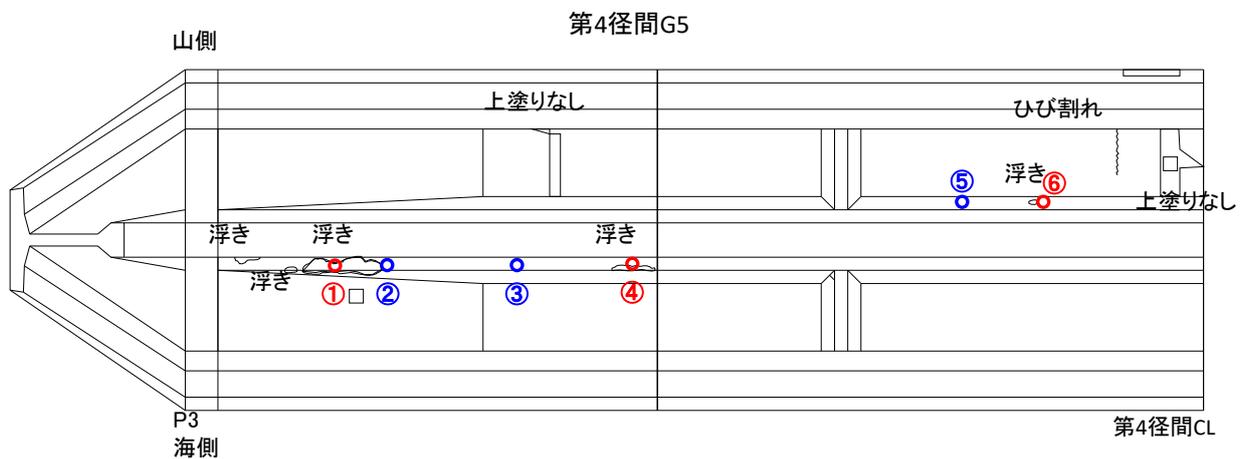


図2.4.1 塩化物イオン濃度の分布の実態把握測定位置（第4径間G5）

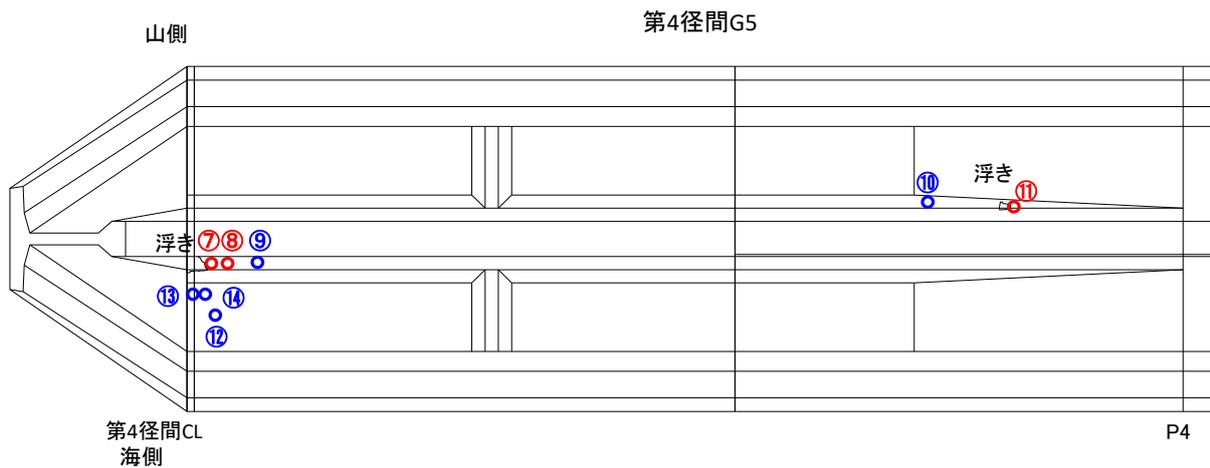


図 2.4.2 塩化物イオン濃度の分布の実態把握測定位置 (第 4 径間 G5 その 2)

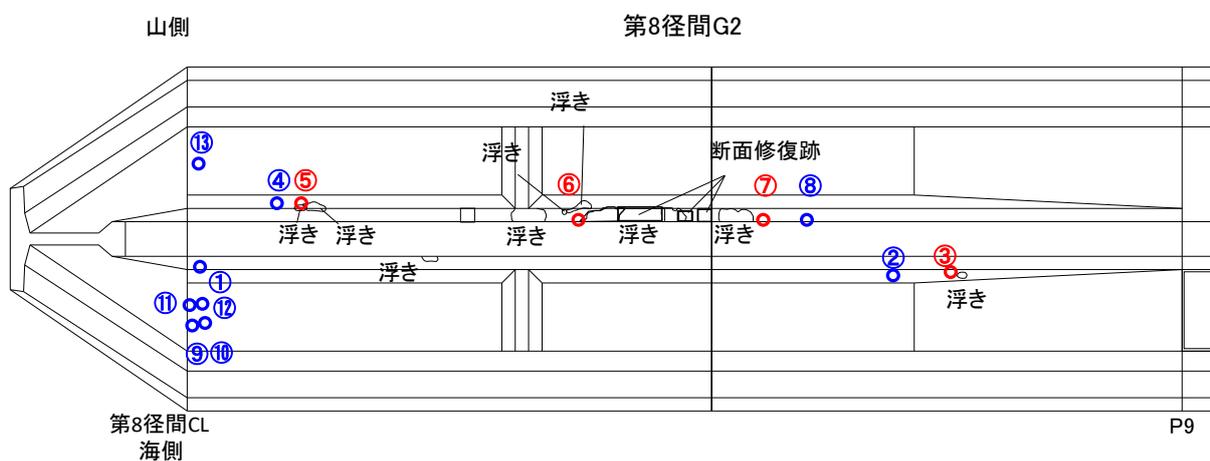


図 2.4.3 塩化物イオン濃度の分布の実態把握測定位置 (第 8 径間 G2)

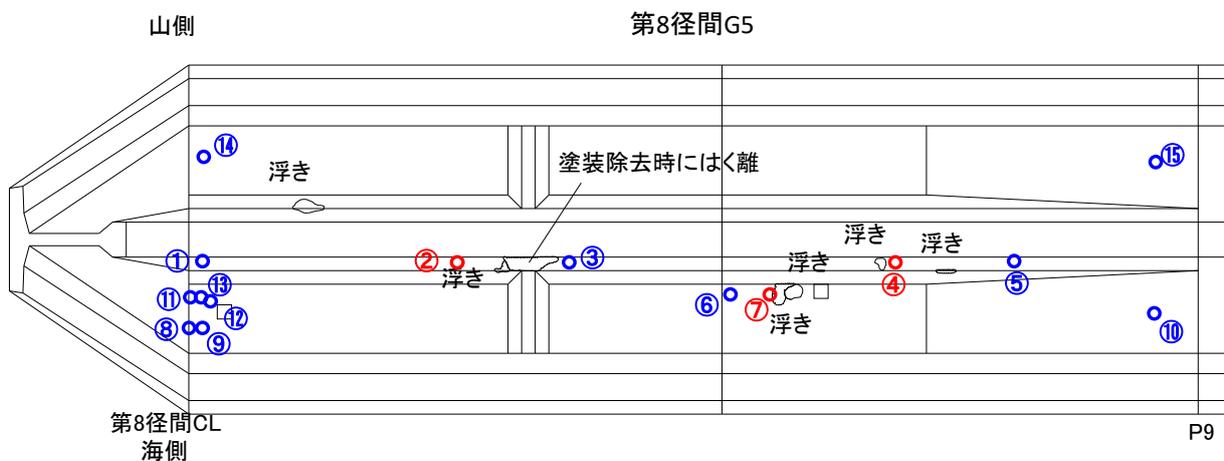


図 2.4.4 塩化物イオン濃度の分布の実態把握測定位置 (第 8 径間 G5)

表 2.4.1 簡易的な調査手法を比較するために採取したコア採取箇所一覧

調査項目	コア採取
測定箇所 および補修工法	コア採取
第8径間 表面被覆工法	G2・G5端部 ・中央部
第13径間 表面含浸工法	G6端部 ・中央部
第20径間 表面被覆工法	G5中央部

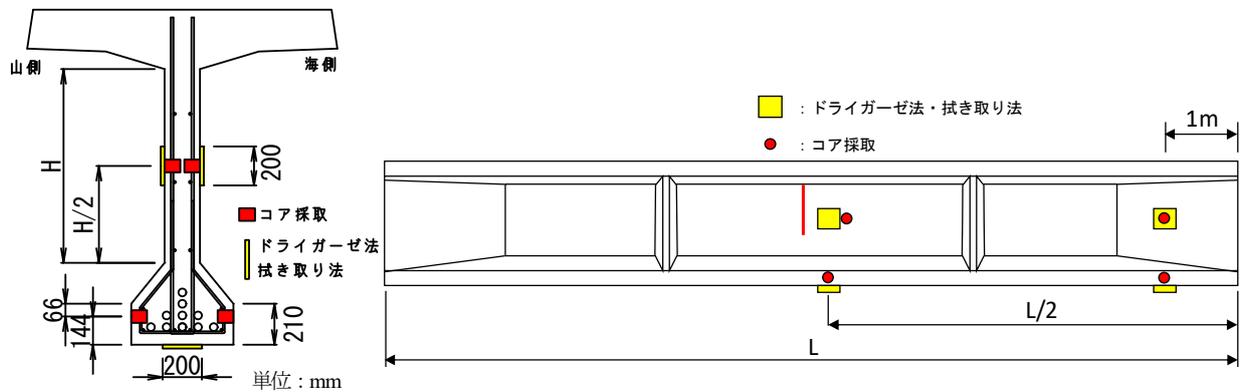


図 2.4.5 簡易な調査手法の比較のためのコア採取位置

2. 4. 2 実態調査結果

コアから求めた C_0 および D の橋軸方向分布を図 2.4.6 および図 2.4.7 に示す。対象橋梁は汀線上に立地しているため、図 2.4.6 にコンクリート標準示方書で示される汀線付近の C_0 (9.0kg/m^3) を破線で示した。また、 C_0 を求める際、 $0\text{mm}\sim 20\text{mm}$ の値が $20\text{mm}\sim 40\text{mm}$ の結果と同程度もしくは低くなっている箇所については使用せずに、 20mm 以深のデータから算出した。

図 2.4.6 および図 2.4.7 の結果から、ウェブから採取したコアの C_0 および D は下フランジよりも相対的に小さくなる傾向が確認されたが、同じ桁端からの距離でもばらつきが見受けられた。また、測定した桁が異なると測定位置が同様であっても得られる値にばらつきがあることがわかる。

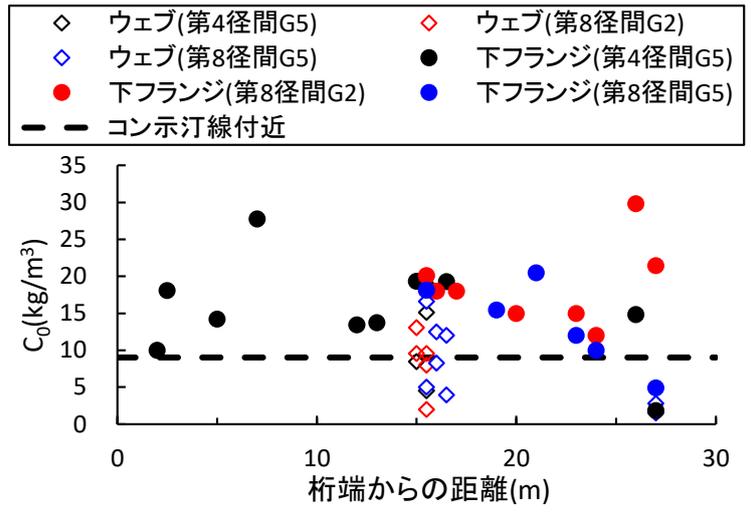


図 2.4.6 コアから求めた C_0 の橋軸方向の分布

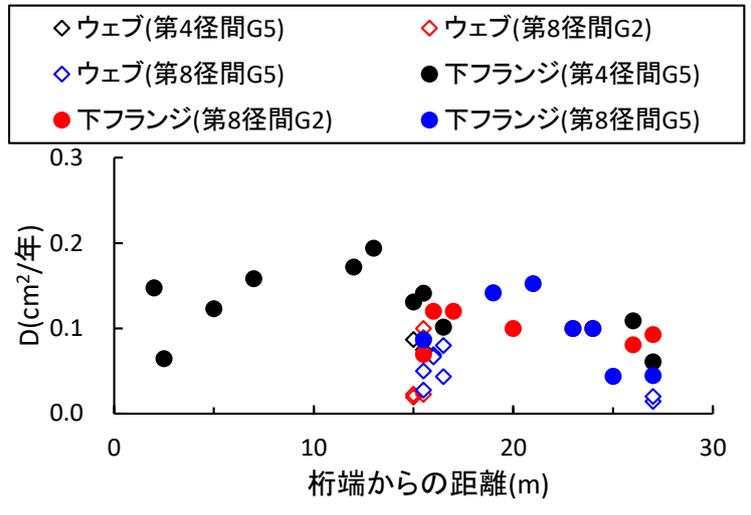


図 2.4.7 コアから求めた D の橋軸方向の分布

次に、コアの C_0 および D から鉄筋位置の塩化物イオン濃度（以下、 C_s ）を求め、腐食ひび割れや浮きなどの劣化部からの距離との関係を整理した（図 2.4.8）。なお、劣化部からの距離は劣化部位置を 0 としてコア採取した橋軸方向距離を整理している。また、劣化部の例を写真 2.4.1 に示す。劣化部近傍から採取したコア（13 箇所、図中の距離 0m）はすべて下フランジであり、うち 12 箇所の C_s は $2.1 \text{ kg/m}^3 \sim 10.4 \text{ kg/m}^3$ であった。一方、劣化部からの距離が大きくなるにつれて C_s が低下し、距離 2.0m を超えると C_s は $0 \text{ kg/m}^3 \sim 2.1 \text{ kg/m}^3$ になることが確認された。また、劣化部からの距離が同じ場合でも C_s にばらつきが見受けられた。なお、劣化部近傍では塩化物イオン濃度が高い傾向を示すことが確認された。

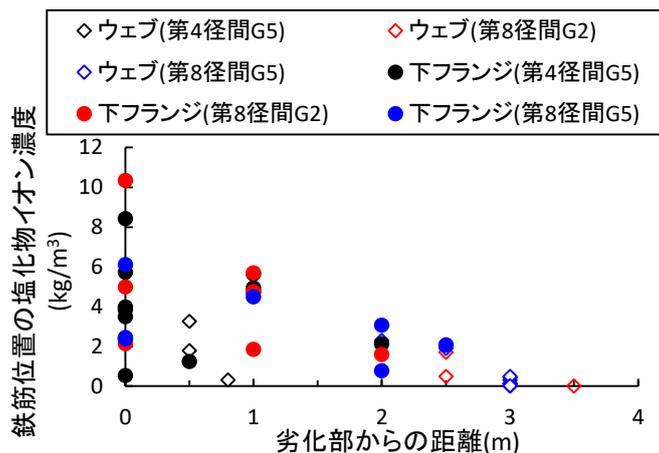


図 2.4.8 鉄筋位置の塩化物イオン濃度と劣化部からの距離との関係



写真 2.4.1 劣化部の例

次に、計 4 径間から採取したコアの C_0 について、測定する断面内での位置に分けて整理した。桁端部で測定した結果を整理したものを図 2.4.9 に、支間中央部で測定した結果を図 2.4.10 に示す。なお、部位によっては測定していない箇所もあるため、その場合にはグラフ結果に図示されていない。

桁端部の結果（図 2.4.9）から、ウェブや下フランジなどの部位の違いが C_0 に与える影響は確認されなかった。

一方で、海側あるいは山側に着目すると、海側の方が値が高くなるのがウェブで顕著になっており、下フランジでは同程度であった。しかしながら、山側の下フランジでは海側よりも値が高くなっている。これは海側の耳桁であり、海側では雨掛かりの影響を受けるが、山側ではその影響が小さいことが影響したと考えられる。また、13径間は全体的に得られる値が大きくなったが、該当径間は表面含浸工法、他径間では表面被覆工法が適用されており、表面含浸工法は表面被覆工法よりも塩分浸透抵抗性が低いことが影響したものと考えられる。

支間中央部の結果（図 2.4.10）から、ウェブや下フランジなどの部位の違いによるコア採取位置の影響として、ウェブに比べ下フランジの方が高くなる傾向であった。海側あるいは山側の影響としては、海側の方が値が高くなった。なお、各径間で海面からの高さも異なるがそれに応じた傾向はない。主桁位置では、ウェブの海側の面を比較すると G5 や G6 桁で値が高くなり、G2 桁で小さい。また、下フランジ部では主桁位置の影響はみられなかった。

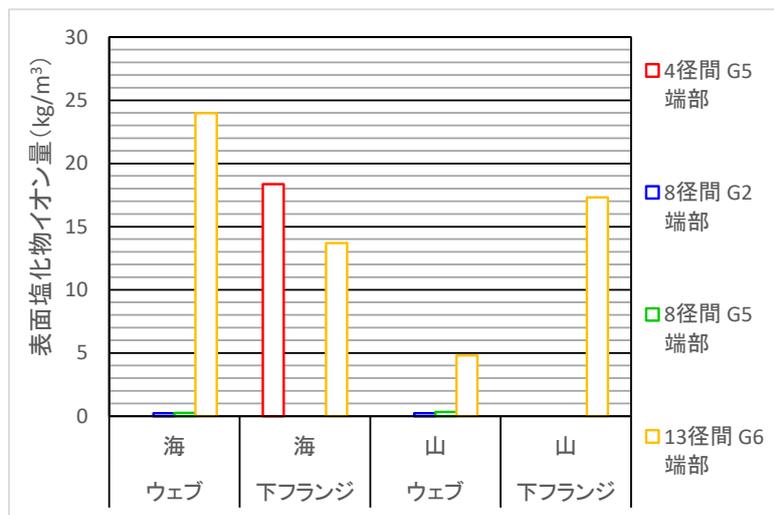


図 2.4.9 コアから求めた C_0 の結果（桁端部で整理）

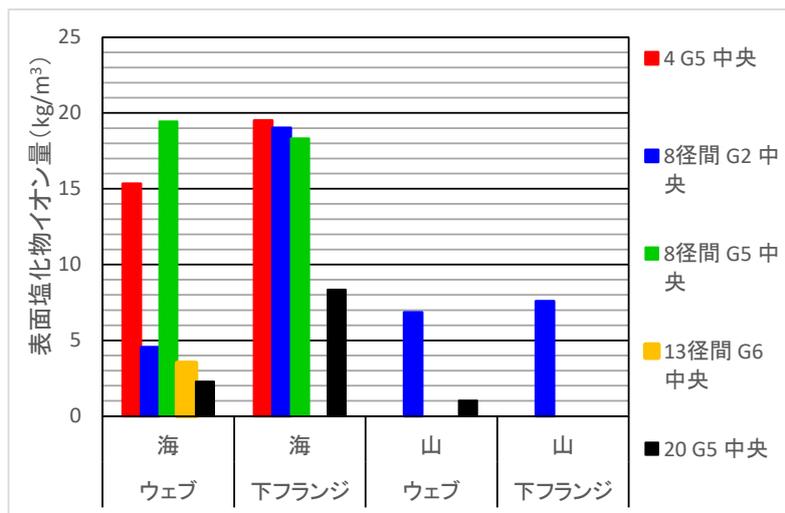


図 2.4.10 コアから求めた C_0 の結果（支間中央部で整理）

図 2.4.9 および図 2.4.10 の 4 径間分のコアから求めた C_0 の結果から、桁断面の海側の面でウェブや下フランジ

で C_0 が高い結果となった。さらに、ウェブよりも下フランジの方が C_0 は高くなりやすい傾向となった。これは、**図 2.4.8**の結果で示された、劣化部の近傍で C_s が高い箇所は下フランジである結果と整合する。

以上の実態調査から、塩化物イオン濃度は部位（ウェブ、下フランジ）が同じ場合や桁端からの距離や劣化部からの距離が同じ場合でもばらつく傾向であることが確認された。したがって、塩化物イオン濃度が高い箇所を特定するためには多くの調査箇所が必要と判断されるが、コア採取による方法は構造物へ与える影響が懸念され、調査数を増やすことは容易ではない。よって、簡易な調査手法により塩化物イオン濃度が高い箇所をスクリーニングする手法が望まれる。

2. 5 塩化物イオン濃度調査手法に関する検討

2. 5. 1 簡易な調査手法の概要

2.4節では、橋梁の部位によって表面塩化物イオン濃度がばらつくことを示した。そこで、本節では、最適なコア採取位置を選定するためのスクリーニング手法について検討する。簡易的な非破壊検査手法の検討を行うにあたり、対象部材から採取したコアから求めた表面塩化物イオン濃度 C_0 を代表値とした。ドライガーゼ法あるいは拭き取り法の調査結果とコアから求めた C_0 を比較する理由としては、ドライガーゼ法や拭き取り法はコンクリート表面に付着した塩分量を評価するものである。一方で、コアから求まる塩化物イオン濃度はコンクリート内部の測定値であり、これはコンクリート材料の浸透抵抗の影響を受けた結果である。そのため、コアからコンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 を求めて、ドライガーゼ法や拭き取り法と同じ表面位置での塩化物イオン濃度で比較することとした。ここで、調査対象を**表 2.5.1**に、調査対象位置を**図 2.5.1**に示す。コア採取位置は、支間中央部および桁端部のウェブおよび下フランジとした。なお、主ケーブルを考慮して下フランジでは側面をコア採取位置とした。支間中央部と桁端部では、橋台の存在等により環境条件が異なると考えられる。また、部材高さ方向で塩化物イオン濃度が異なることが想定される。以上の調査対象位置から採取したコアの塩化物イオン濃度に対して、ドライガーゼ法 7 箇所および拭き取り法 16 箇所において測定した塩化物イオン濃度を比較した。

表 2.5.1 簡易な調査手法の検討調査対象

調査項目 測定箇所 および補修工法	ドライガーゼ法	拭き取り法
第8径間 表面被覆工法	G2・G5端部	G2・G5端部 ・中央部
第13径間 表面含浸工法	G6端部	G6端部 ・中央部
第20径間 表面被覆工法	—	G5中央部

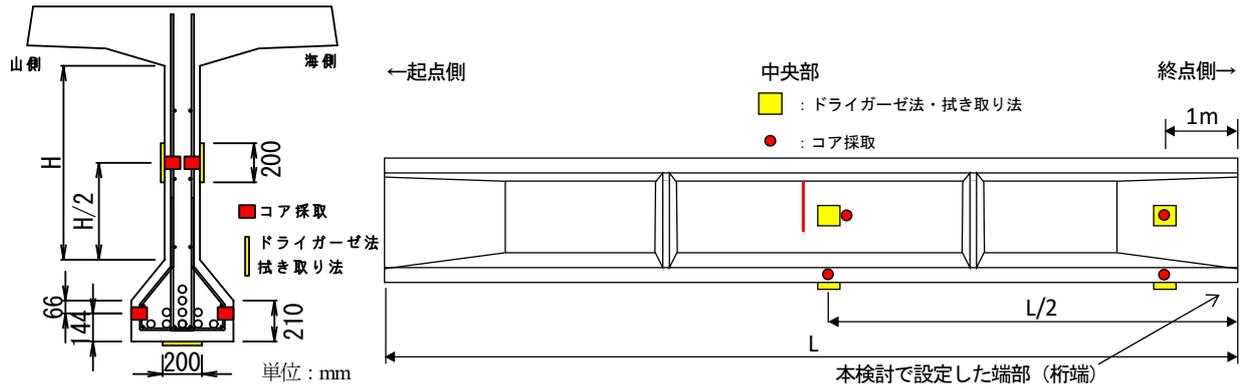


図 2.5.1 簡易な調査手法の検討調査位置

(1) ドライガーゼ法による調査

ドライガーゼ法について、JIS Z 2382 では捕集面積を 200cm^2 (ガーゼ面積 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の両面) とし暴露期間を 1 ヶ月と規定されているが、本検討では部材表面に付着する塩化物イオン濃度を短期間で把握するため、捕集面積を 400cm^2 (ガーゼ面積 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ の片面) とし、暴露期間は 2017 年 10 月 17 日～2017 年 11 月 1 日までの 2 週間とした (写真 2.5.1, 写真 2.5.2)。回収したドライガーゼから電位差滴定法により付着塩分量を求めた。付着塩分量を暴露期間で除して飛来塩分量に換算し、コンクリート標準示方書²⁻⁸⁾に示される式 2.5.1 を用いて C_0 を算出した。

$$C_0 = -0.016 \times C_{ab}^2 + C_{ab} + 1.7 \quad (\text{式}2.5.1)$$

ここに、 C_0 : 表面塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_{ab} : 飛来塩分量($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{日}$)。



写真 2.5.1 ドライガーゼ法の調査状況 (下フランジ暴露状況)



写真 2.5.2 ドライガーゼ法の調査状況（暴露状況全景）

(2) 拭き取り法による調査

拭き取り法について、鋼道路橋防食便覧²⁴⁾ではゴム手袋を装着して純水で湿らせたガーゼを用いて 500mm×500mm の範囲に付着した塩分を拭き取ると規定されているが、本検討ではドライガーゼ法の捕集面積と揃えて評価するため、1 箇所あたりの調査範囲は主桁ウェブあるいは下フランジ部の表面部 200mm×200mm とした（写真 2.5.3, 写真 2.5.4）。調査は 2017 年 10 月 16 日に実施した。拭き取りによりガーゼに付着した塩分を電位差滴定法により定量分析し、捕集面積で除した値を付着塩分量とした。なお、捕集箇所に付着した塩分は雨水の影響などを受け洗い流されるなど、付着に要した暴露期間が一定と評価できないため、暴露期間などを用いて算出する C_0 ではなく、付着塩分量をそのまま用いて評価した。



写真 2.5.3 拭き取り法の調査状況（下フランジ拭き取り状況）



写真 2.5.4 拭き取り法の調査状況（ウェブ拭き取り状況）

2. 5. 2 測定結果

(1) ドライガーゼ法による調査

コアから求めた C_0 とドライガーゼ法から求めた C_0 の相関関係を図 2.5.2 に示す。この結果、コアの C_0 が 1.0kg/m^3 より小さい場合はドライガーゼ法では $2.6\sim 4.5\text{kg/m}^3$ と相対的に大きくなった。一方で、コアの C_0 が 1.0kg/m^3 以上 ($4.8\text{kg/m}^3\sim 24.0\text{kg/m}^3$) の場合はドライガーゼ法では $3.3\text{kg/m}^3\sim 9.4\text{kg/m}^3$ と相対的に小さくなった。これは、調査時期により飛来塩分量に差異があることなどが影響したと推察される。

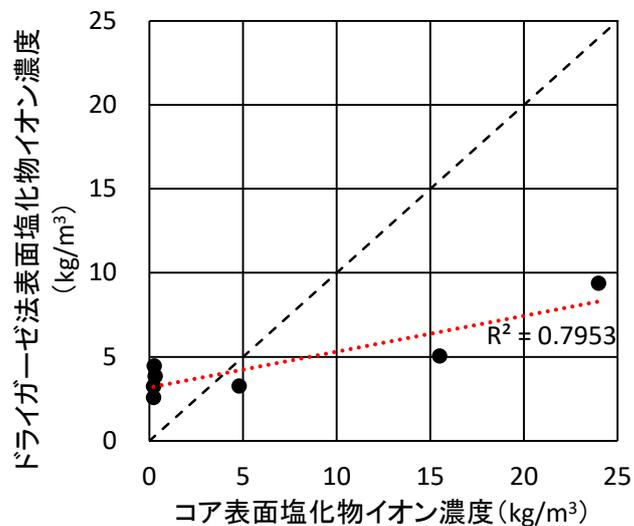


図 2.5.2 コアから求めた C_0 とドライガーゼ法から求めた C_0 の相関関係

(2) 拭き取り法による調査

コアから求めた C_0 と拭き取り法から求めた付着塩分量の相関関係を図 2.5.3 に示す。両者の相関性はドライガーゼ法と比較すると低い傾向が見受けられた。図 2.5.3 に乖離が大きい箇所を破線で囲ったが、評価した場所や部位による傾向や規則性は確認されなかった。したがって、両者の相関が低くなった要因として、評価するデータ数が少なかったことが影響して明瞭な傾向を捉えることができなかつたと推察される。

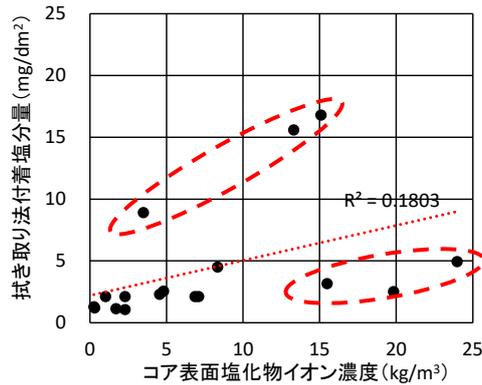


図 2.5.3 コアから求めた C_0 と拭き取り法から求めた付着塩分量の相関関係

(3) 簡易な調査手法における相関性の再整理

ドライガーゼ法あるいは拭き取り法の調査結果とコアから求めた C_0 に明確な相関性がなく、定量的な評価が難しいと判断された。そこで、定性的な評価を行えないか検討するため、コアから求めた C_0 をある程度の範囲で分類し整理した。再整理にあたり、コアの C_0 の幅は過年度の暴露試験結果²⁹⁾を参考に、 $0 \sim 2\text{kg/m}^3$ を腐食発生限界、 $2 \sim 5\text{kg/m}^3$ をひび割れ発生限界、 5kg/m^3 以上をひび割れ発生と定義し分類した。なお、上記の分類は鉄筋位置における塩化物イオン濃度を指標としているが、本検討では表面の塩化物イオンが将来的に拡散移動により鉄筋位置に達することを想定し準用することにした。再整理の結果を図 2.5.4 および図 2.5.5 に示す。

図 2.5.4 から、コアから求めた C_0 が 5kg/m^3 以上の場合に、ドライガーゼ法の C_0 も 5kg/m^3 以上に分類された。したがって、ドライガーゼ法の C_0 が 5kg/m^3 以上の場合において、幅を持たせた分類でコアによる調査結果と相関性を有することが確認された。しかしながら、 C_0 が 5kg/m^3 付近であった場合、分類の精度を欠くおそれもある。したがって、一定の傾向を確認できたものの、本調査では調査数が少ないことから今後のデータの拡充を行い、分類の精度を向上することが求められる。次に図 2.5.5 から、コアから求めた C_0 が 5kg/m^3 以上の場合、拭き取り法の付着塩分量が $2 \sim 17\text{mg/dm}^2$ とばらつきが見受けられ、幅を持たせた分類でも相関性は低いことが確認された。

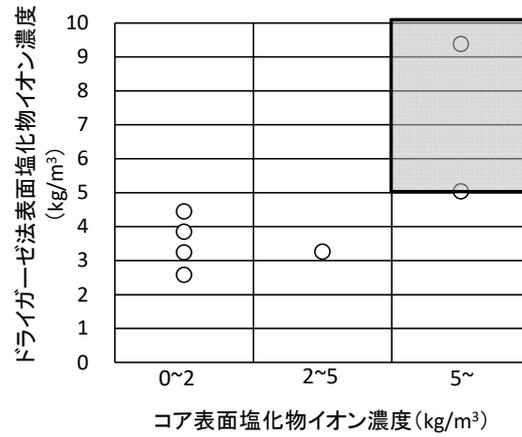


図 2.5.4 幅を持たせたコアから求めた C_0 とドライガーゼ法から求めた C_0 の相関関係

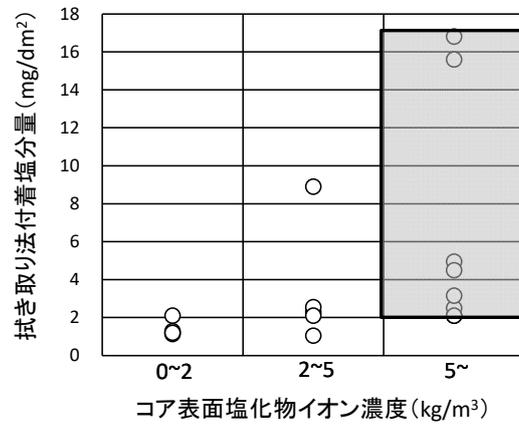


図 2.5.5 幅を持たせたコアから求めた C_0 と拭き取り法から求めた付着塩分量の相関関係

2. 6 本章のまとめ

本章では、最適なコア採取位置のスクリーニングを目的に、簡易的な非破壊検査手法を用いた実橋調査を実施した。また、コア採取位置を最適に選定するため、実橋から採取したコアの塩化物イオン濃度に対し、橋軸方向および劣化部からの距離の相関についても整理した。本章で得られた結果を以下にまとめる。

- ・塩化物イオン濃度の分布は、部位が同じかつ桁端からの距離や劣化部からの距離が同じ場合でもばらつく傾向であることが確認された。なお、劣化部付近では、塩化物イオン濃度が高く、部位としては下フランジであった。
- ・ドライガーゼ法から求めた表面塩化物イオン濃度が 5kg/m^3 以上の場合において、幅を持たせた分類でコアによる調査結果と相関性を有することが確認された。

以上より、ドライガーゼ法により、PCT 桁橋のような部材に起伏を有する構造に対して、表面塩化物イオン濃度が高い箇所をある程度の精度で把握できることが確認された。したがって、ドライガーゼ法は、径間、桁位置、橋軸方向位置、断面位置においてコアを採取する位置の優先度を決定する場合に有効である。ただし、中性化が進行しやすい湿度環境下では、中性化による塩分濃縮によって表面近傍より深い位置で塩化物イオン濃度が高くなっていることも考えられるため、中性化の発生の有無に留意する必要がある。

2章の参考文献

- 2-1) 国土交通省 道路局 国道・防災課：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案），2004.3
- 2-2) 橋梁塩害対策検討委員会：塩害橋梁維持管理マニュアル（案），2008.4
- 2-3) 吉次優佑，富山 潤，松田愛子，佐伯竜彦：薄板モルタル供試体を用いた PCT 桁橋上部工における塩害環境調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.727-732，2017
- 2-4) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，pp.II-158-II-160，2014.3
- 2-5) 渡辺暁央，平野誠志，青山實伸：蛍光 X 線法によるドリル採取試料の塩化物イオン濃度測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1987-1992，2009
- 2-6) 石川幸宏，金田尚志，魚本健人，矢島哲司：近赤外分光イメージングによるコンクリート中の塩分の定量化に関する提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1865-1870，2006
- 2-7) 富山 潤：コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.874-879，2014
- 2-8) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp.163-164，2018.3
- 2-9) 北野勇一，渡辺博志，久田真，北山良：補修 RC 梁中の残留塩分と鋼材腐食に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1107-1112，2007

3章 塩害を受けた既設 PC 橋に適用した表面被覆工法の補修効果に関する検討

3. 1 検討概要

塩害が発生した橋梁の塩害対策としてコンクリート内部への塩化物イオンの侵入抑制を目的に表面被覆工法が採用されてきたが、期待される補修効果が発揮されず塩害が進行する事例³⁻¹⁾ ³⁻²⁾が散見される。本検討では表面被覆工法施工後に補修効果が発揮されない要因を確認するため、塩害対策として表面被覆工法で補修されたPC桁について、塗膜調査、補修前後の塩化物イオン濃度の経年変化分析、コンクリートの配合調査を行った。

3. 2 対象橋梁の概要

対象橋梁は、橋長991.600m、標準支間30.800m、全幅員11.250mで1975年に日本海の海岸に架橋された橋梁である。本橋は新橋への切換え後、撤去が進められており、調査はこの撤去中の橋梁の一部を用いている。本橋は鋼単純鈎桁橋およびPC単純ポストT桁橋31連の橋梁であり、PC橋部分の上部工は6主桁で構成されている。本調査の対象は、表面被覆工法により補修された第4径間G5桁、第8径間G2桁とG5桁の一部と、本橋撤去前に現地調査した表面被覆工法により補修された第20径間G5桁とした。調査位置図を図3.2.1に、対象橋梁の補修履歴を表3.2.1に、調査のため土木研究所に運搬し仮置きした撤去桁の状況を写真3.2.1に示す。

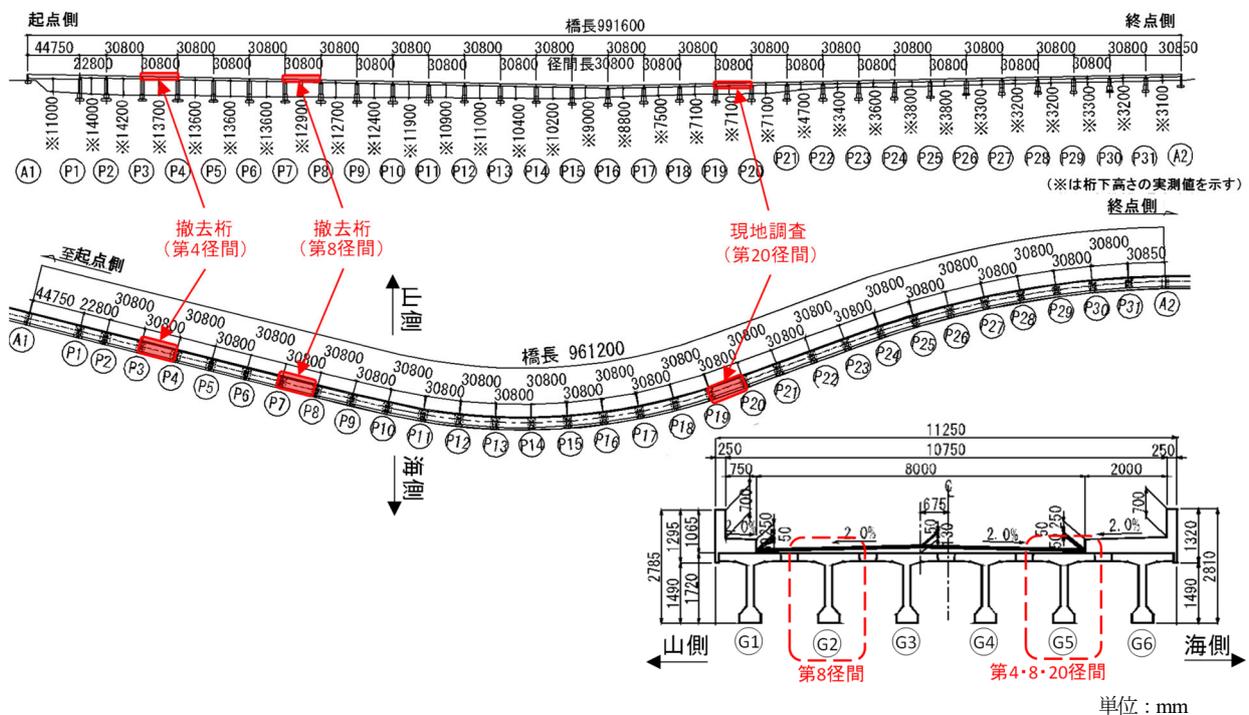


図 3.2.1 調査位置図

表3.2.1 補修履歴

年度	実施項目
1975年	架設
1994年	第17～25径間 表面被覆, 断面修復
2001年	第21～27径間 表面被覆, 断面修復
2002年	第27～29径間 表面被覆, 断面修復
2003年	第23～26径間 表面被覆, 断面修復
2006年	第2, 14～16径間 表面被覆, 断面修復, ひび割れ補修
2007年	第3～8径間 表面被覆, 断面修復
2009年	第2, 9～15径間 表面含浸, 断面修復, ひび割れ補修
2010年	第16～19径間 表面被覆 (部分塗装), 断面修復 (犠牲陽極設置含む), ひび割れ補修
2017年	上部工架替え開始



a) 第4径間G5桁



b) 第8径間G5桁

写真3.2.1 撤去桁仮置き状況 (土木研究所敷地内)

3. 3 実橋における表面被覆工法の性能確認・調査

3. 3. 1 調査概要

塩害対策として表面被覆工法により補修されたPC桁について、部分的に塗膜の割れやコンクリートの浮き等の損傷が確認された。損傷が生じた要因の1つとして塗膜の性能低下が想定される。よって、塗装の状態や性能を確認することを目的として、塗膜調査（遮塩性等）を実施した。なお、第4・8径間は2007年（平成19年）度に補修されたもので補修後10年程度、第20径間は1994年（平成6年）度に補修されたもので補修後25年程度経過している。当時の補修記録等から確認した塗装仕様を表3.3.1に示す。

表3.3.1 塗装仕様

種類	第4・8径間		第20径間	
	使用量 (kg/m ³)	膜厚 (μm)	使用量 (kg/m ³)	膜厚 (μm)
シリコーン樹脂系上塗り	0.12	25		
柔軟型ウレタン樹脂系上塗り			0.12	30
柔軟形エポキシ樹脂系中塗り3層目	0.35	160		
柔軟形エポキシ樹脂系中塗り2層目	0.35	160		
柔軟形エポキシ樹脂系中塗り1層目	0.35	160	0.35	160
エポキシ樹脂系パテ	0.50	-	0.50	-
エポキシ樹脂系プライマー	0.10	-	0.10	-

※中塗り塗装の仕様は、第4・8径間が3層、20径間は1層である。

3. 3. 2 調査項目および調査方法

はじめに、塗膜の状態を確認するため、外観調査を行い、塗膜の割れやコンクリートの浮き等の損傷（以下、損傷部）の有無について確認した。次に、塗膜の性能を確認するため、損傷部とその近傍の健全部、過年度にコンクリート内の塩化物イオン量調査が実施された箇所近傍（以下、過年度調査部近傍）に対して、膜厚、塗膜の組成および遮塩性について調査を実施した。塗膜に関する調査項目の一覧を表3.3.2に示す。

表3.3.2 調査項目

調査項目	調査方法
外観調査	目視、触診および打音
膜厚	デジタルマイクロスコープを用いた測定
塗膜の組成	赤外分光法
塗膜の遮塩性	鋼道路橋防食便覧の遮塩性試験方法

(1) 外観調査

外観調査は、すべての撤去桁を対象に、目視、触診および打音により損傷部を確認した。以降の調査は、外観調査結果から選定した調査対象位置より試料を採取し、各種調査を実施している。

(2) 膜厚

塗膜の遮塩性等の所要の性能を確保するためには、規定値以上の膜厚が必要となる^{3,3)}。塗膜劣化に伴う減耗や施工不良などにより膜厚が規定値以下の場合、本来の性能は得られず、想定よりも早期にコンクリートが劣化することが予測される。よって試料の断面を、デジタルマイクロスコープにて観察し、各層の膜厚を測定して評価した。対象は遮塩性能を担う中塗り、および中塗りの保護を担う上塗りとした。各層において3点の平均値として評価した。

(3) 塗膜の組成調査

塗膜の遮塩性等の性能は、塗膜の劣化に伴い低下していく。また、塗膜の必要な性能を得るためには、施工に関する諸条件を厳守し正しく成膜する必要があるが、諸条件を逸脱した場合、正しく成膜されず本来の性能は得られない。よって、成分分析にて樹脂成分の劣化や変質について評価した。成分分析は赤外分光法^{3,4)}で行い試料の各層の赤外吸収スペクトルで表した。測定結果の判定は、調査に先立ちマニュアルに則って製作した各塗料の塗膜を標準塗膜とし、試料と比較することにより行った。ただし、第20径間は製造中止の塗料があり標準塗膜を準備できなかったため、健全部の塗膜を標準塗膜と見なして損傷部の塗膜と比較した。塗膜の判定は、赤外吸収スペクトル図を定性的に比較し、次の場合において塗膜の成分が標準塗膜と異なる場合を塗膜が劣化していると判断した。

- a) 新たな位置（波長域）に吸収の存在が認められる場合、ならびに標準塗膜に認められた特定波長域の吸収が認められなくなった場合。
- b) 標準塗膜と同一の吸収であっても、吸収の大きさが変化して主要吸収帯の相対比に著しい変化が認められる場合。

試験片はディスクグラインダー等を用いて撤去桁からコンクリートと共に塗装を採取した。試験片の例を写真3.3.1に示す。組成調査の試料は、遮塩性を担う中塗り、および中塗りの保護を担う上塗りの塗装を対象に、試験片から10mm×10mmで採取し、試料数は調査箇所1箇所につき1試料とした。

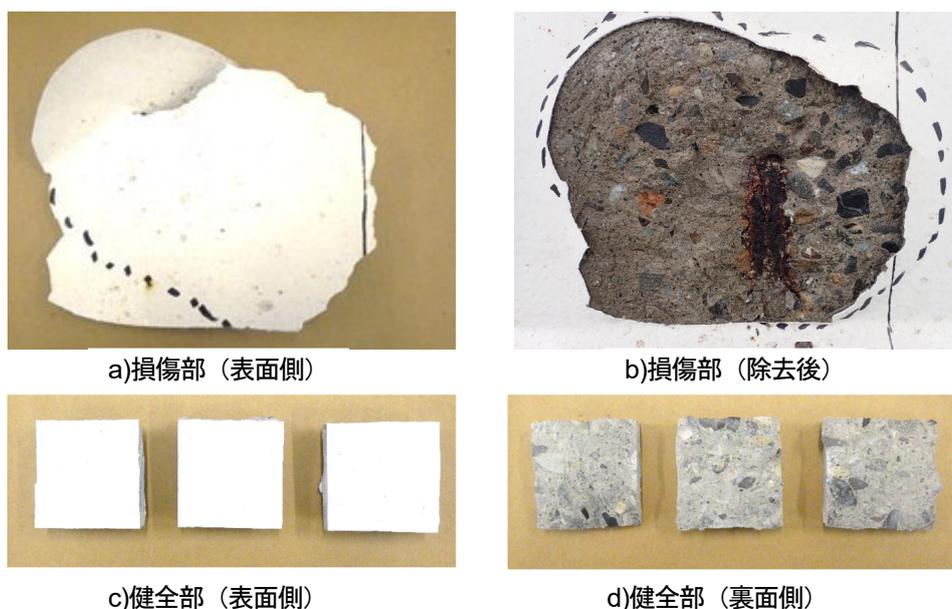


写真 3.3.1 試験片の一例

(4) 塗膜の遮塩性調査

塗膜の遮塩性調査は、組成調査と同じ調査箇所を対象とした。遮塩性試験の試料は、写真3.3.2に示すように中塗り、および上塗りの塗膜を対象に、試験片から強制的に剥離させて採取し、ピンホール等の欠陥が無いことを確認したうえで、カッターナイフを用いて約φ60mmに成形して作製した。試料数は調査箇所1箇所につき3試料とした。作製した試料を、図3.3.1に示すような鋼道路橋防食便覧³⁻⁵⁾の遮塩性試験方法により塩化物イオン透過量 Q を算出し、遮塩性を調査した。なお、塩化物イオン透過量の算出は、蒸留水側のセルより採取した溶液をイオンクロマトグラフによって測定した塩化物イオン量をもとに、式3.3.1を用いて算出した。

$$Q = \frac{V \times m \times 10^{-3}}{A \times t} \quad (\text{式3.3.1})$$

ここに、 Q ：塩化物イオン透過量($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日}$)

V ：蒸留水の水量(g)=実測値200g

m ：塩化物イオン量の測定結果(ppm)

A ：拡散セルの透過面積(cm^2)=19.63(内径φ50mmを使用)

t ：試験時間(日)=30日



写真 3.3.2 試料（遮塩性試験）の作成方法

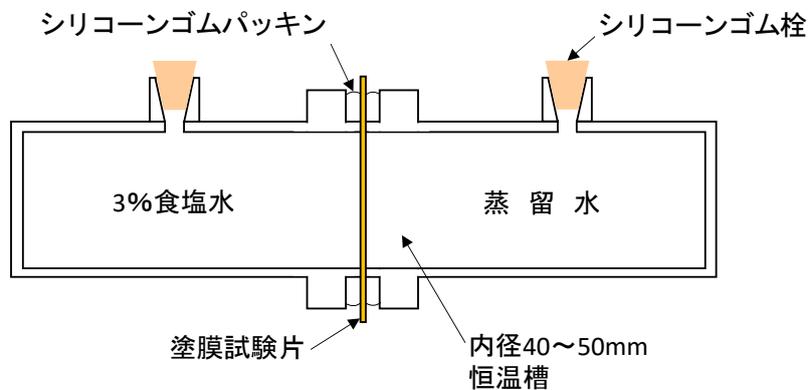


図 3.3.1 遮塩性試験方法³⁻⁵⁾

3. 3. 3 調査結果および考察

(1) 外観調査

外観調査結果の展開図を図3.3.2に示す。外観調査の結果、目視や触診により塗膜の段差や割れ、打音によりコンクリートの浮きを確認した。コンクリートの浮きは鉄筋の腐食に起因するものであり、コンクリートと塗膜界面の浮きは確認されなかった。外観調査結果より、塗膜の組成・遮塩性を確認する箇所として、試験片の作製が可能な程度大きい範囲の損傷部を選定した。選定箇所数は、損傷部4箇所およびその近傍の健全部4箇所、上塗り未塗装部1箇所、過年度調査部近傍1箇所の計10箇所を対象とした。選定箇所を図3.3.2に示し、選定箇所の記号、特徴等を表3.3.3に示す。

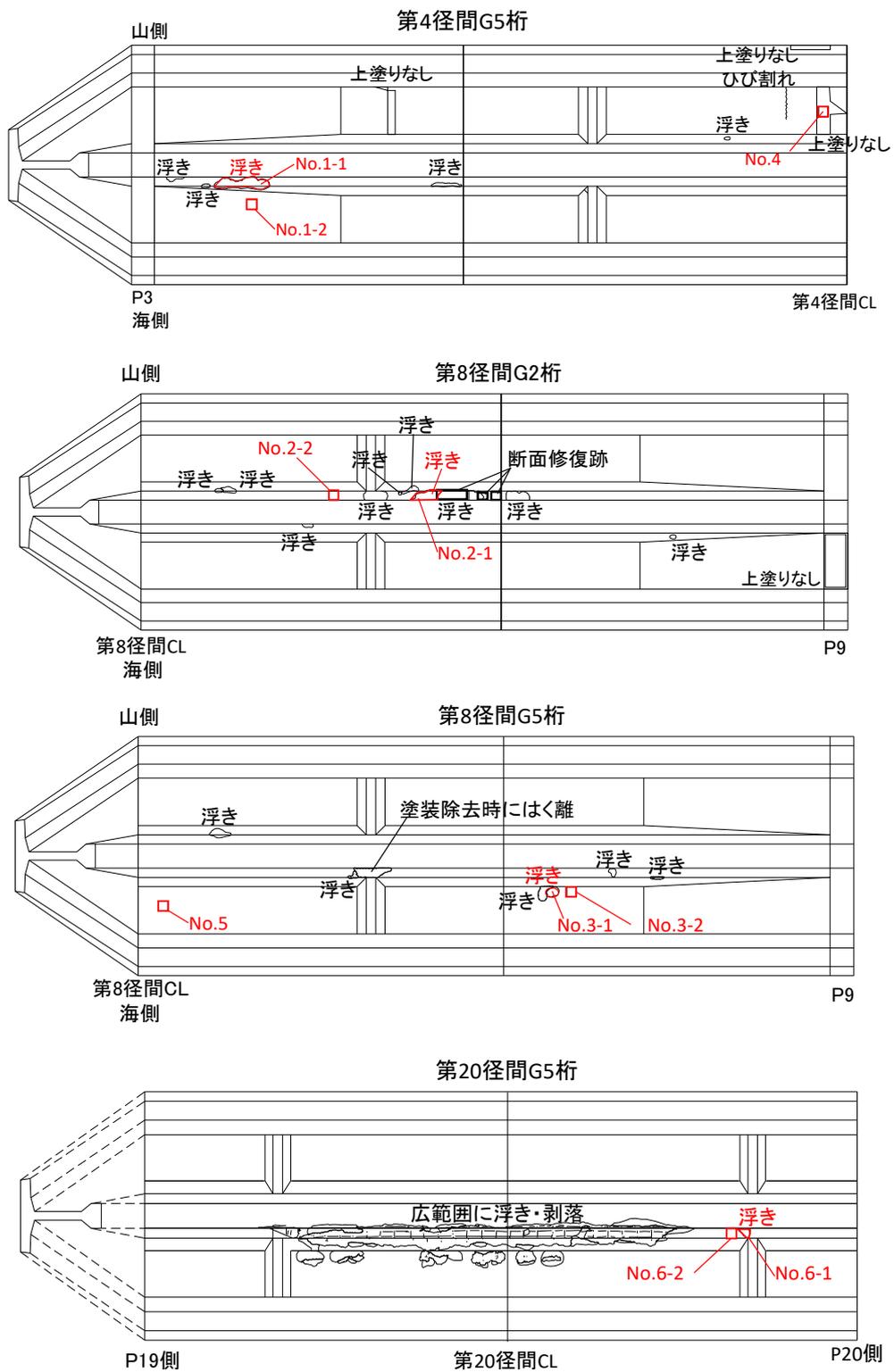


図 3.3.2 外観調査結果 (展開図)

表3.3.3 外観調査結果

No.	外観調査結果		備考
	目視・触診	打音	
1-1	塗膜の段差を確認	コンクリートの浮きを確認	損傷部
1-2	損傷なし	損傷なし	1-1近傍の健全部
2-1	塗膜の段差を確認	コンクリートの浮きを確認	損傷部
2-2	損傷なし	損傷なし	2-1近傍の健全部
3-1	塗膜の段差を確認	コンクリートの浮きを確認	損傷部
3-2	損傷なし	損傷なし	3-1近傍の健全部
4	損傷なし	損傷なし	上塗り未塗装部
5	損傷なし	損傷なし	過年度調査部近傍
6-1	塗膜の段差を確認	コンクリートの浮きを確認	損傷部
6-2	損傷なし	損傷なし	6-1近傍の健全部

※表中の各No.の調査箇所は図3.3.2に記載。

(2) 膜厚

外観調査にて確認した10箇所を対象に各層の膜厚を測定した。膜厚測定結果を表3.3.4に示す。

損傷部と健全部で膜厚に大きな差はみられなかった。

表3.3.4 膜厚測定結果

(単位：μm)

No	中塗り				上塗り		備考
	1層目	2層目	3層目	計	第4・8径間	第20径間	
標準膜厚	160	160	160	480	25	30	
1-1	104	92	138	334	47	-	損傷部
1-2	109	100	125	334	52	-	1-1 近傍の健全部
2-1	134	245	217	597	70	-	損傷部
2-2	180	169/187 ^{※1}	139	675	52	-	2-1 近傍の健全部
3-1	192/99 ^{※2}	201	120	612	86	-	損傷部
3-2	158	157	112	427	60	-	3-1 近傍の健全部
4	164	199	199	562	- ^{※3}	-	上塗り未塗装部
5	126	221	181	528	46	-	過年度調査部近傍
6-1	192	-	-	-	-	28	損傷部
6-2	148	-	-	-	-	40	6-1 近傍の健全部

※中塗り塗装の仕様は、第4・8径間が3層、20径間は1層である。

※1：2層目が2回塗られていた。

※2：1層目が2回塗られていた。

※3：上塗りが塗られておらず、また表層に変色が見られた。

(3) 塗膜の組成調査

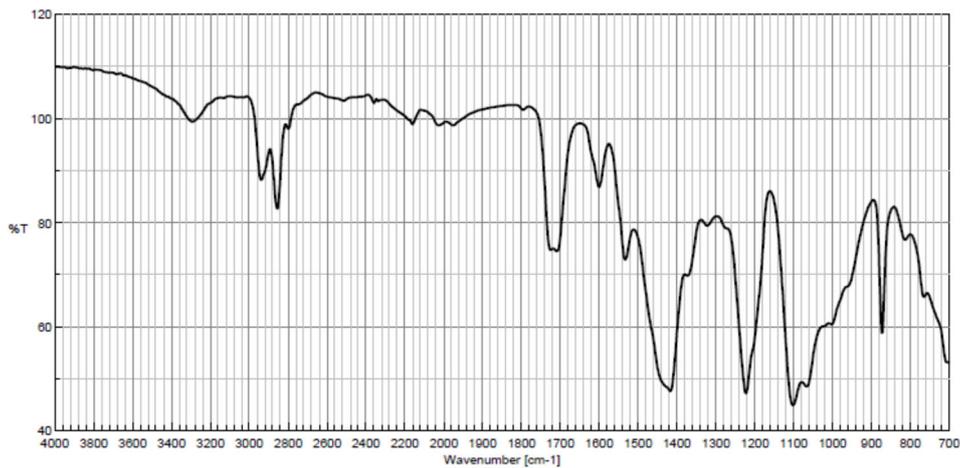
外観調査にて確認した10箇所を対象に各層の組成を調査した結果を表3.3.5に示す。測定結果の判定は、No.1～No.5に関しては標準塗膜との比較、No.6-1に関しては、近傍の健全部であるNo.6-2を標準塗膜と見なして比較した。赤外吸収スペクトル図の抜粋を図3.3.3と図3.3.4に示す。図3.3.3と図3.3.4には、第4・8径間の中塗りの標準塗膜、および第4・8径間の正常な塗膜の例と異常な塗膜、第20径間の標準塗膜と見なした塗膜と損傷部の塗膜を示す。なお、赤外吸収スペクトルの測定結果は、横軸を波数(cm^{-1})、縦軸を透過率(%T)で示され、吸収が大きい波数ほど下向きに凸型のグラフとなる。

No.4以外においては、全ての層に樹脂の劣化は見られず健全な状態を保っていた。一方でNo.4は中塗り3層目に変色を伴う樹脂の劣化が見られた。No.4は上塗りが塗られておらず、中塗り3層目が露出した状態であったため、中塗り剤の主成分であるエポキシ樹脂が紫外線によって劣化したと推測される。

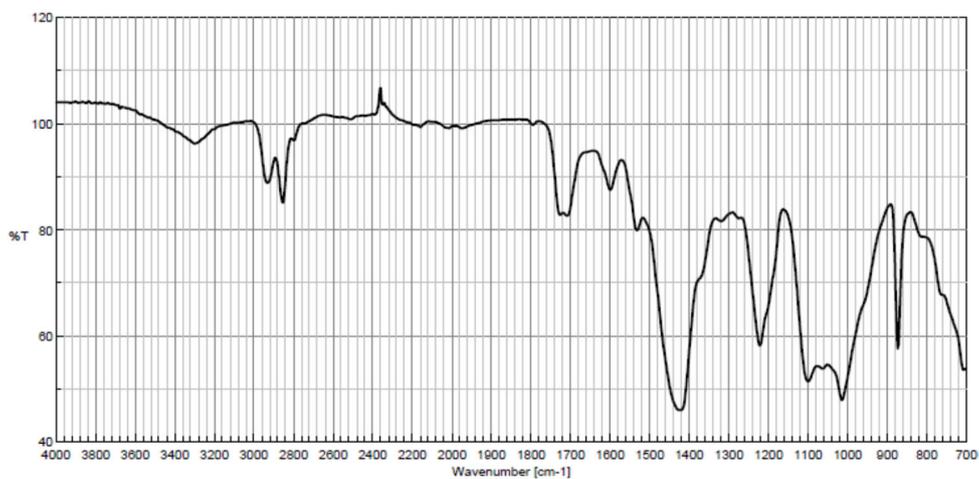
表3.3.5 塗装の組成分析結果

No.	塗装の組成分析結果				備考
	中塗り			上塗り	
	1層目	2層目	3層目		
1-1	○	○	○	○	損傷部
1-2	○	○	○	○	1-1の健全部
2-1	○	○	○	○	損傷部
2-2	○	○	○	○	2-1の健全部
3-1	○	○	○	○	損傷部
3-2	○	○	○	○	3-1の健全部
4	○	○	×	-	上塗り未塗装部
5	○	○	○	○	過年度調査部近傍
6-1	○	-	-	○	損傷部
6-2	-	-	-	-	6-1の健全部

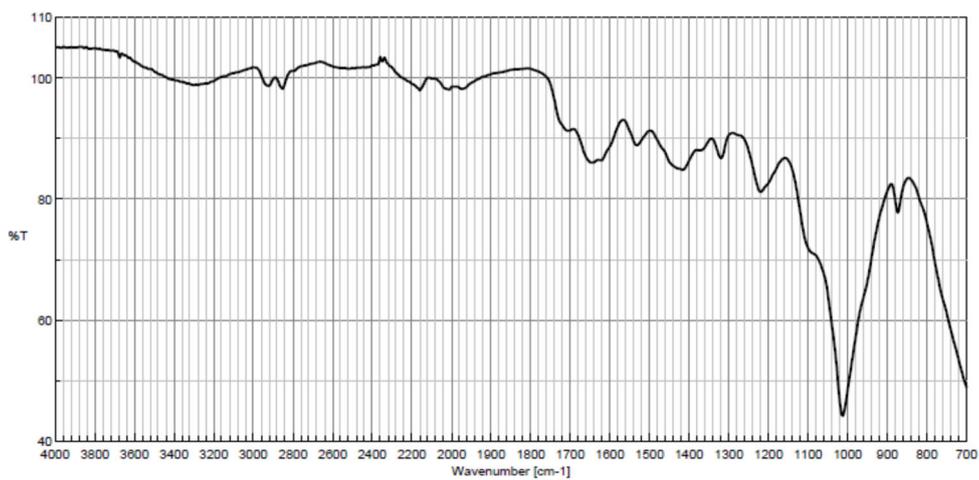
凡例 ○：樹脂劣化なし，×：樹脂劣化あり



a)第4・8 径間 中塗り標準塗膜

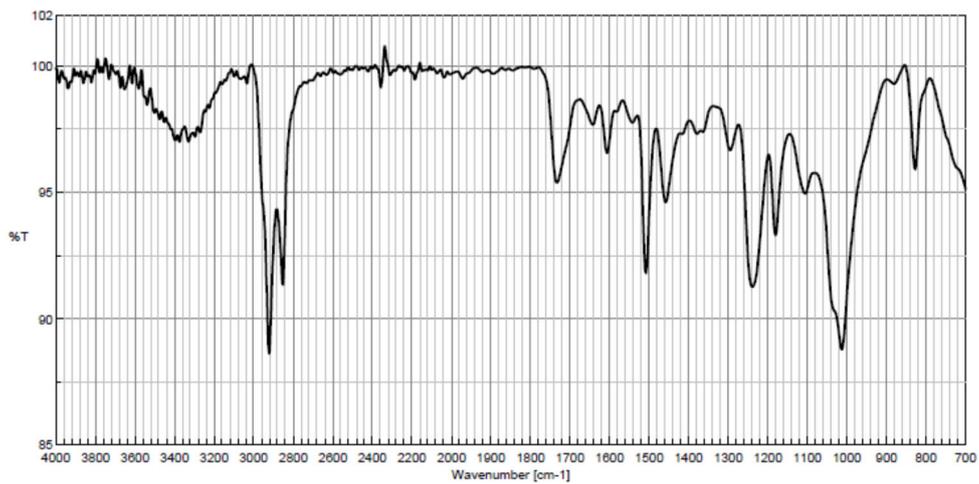


b)第4・8 径間 中塗りの正常な塗膜の例 (No.1-1 中塗り3層目)

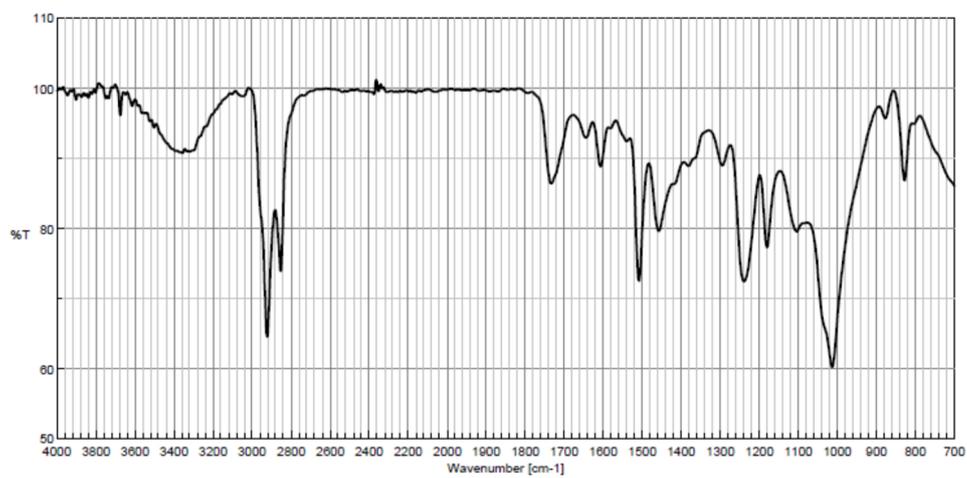


c)第4・8 径間 中塗りの異常な塗膜 (No.4 中塗り3層目)

図 3.3.3 塗膜の赤外吸収スペクトル図 その1



d)第20 径間 中塗り標準塗膜 (No.6-2 中塗り)



e)第20 径間 損傷部の中塗り塗膜 (No.6-1 中塗り)

図 3.3.4 塗膜の赤外吸収スペクトル図 その2

(4) 塗膜の遮塩性

塗膜の遮塩性調査結果を表3.3.6に示す。塗膜の組成調査を実施したすべての試料で、塩化物イオン透過量は、道路橋の塩害対策指針³⁾⁶⁾における厳しい環境下で用いられるC種（長期防錆型）の管理値である $1 \times 10^{-3} \text{mg/cm}^2 \cdot \text{日}$ 以下であり、十分な遮塩性を有していることを確認した。

表3.3.6 塗装の遮塩性調査結果

No.	塗装の遮塩性調査結果			備考
	試料数	蒸留水中の塩化物イオン測定量 (ppm)	塩化物イオン透過量 ($\text{mg/cm}^2 \cdot \text{日}$)	
1-1	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	損傷部
1-2	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	1-1の健全部
2-1	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	損傷部
2-2	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	2-1の健全部
3-1	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	損傷部
3-2	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	3-1の健全部
4	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	上塗り未塗装部
5	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	過年度調査部近傍
6-1	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	損傷部
6-2	3	0.1以下	0.34×10^{-3} 以下	6-1の健全部

塗膜自体の遮塩性に直接影響はないが、第4・8径間の試料作成時において塗膜がパテと中塗り部で容易に剥離したため、パテと中塗りの層間の塩分量を測定したところ、約200～400ppmの塩分が検出された。本来、パテと中塗りで容易に剥離することはないが、本試料ではパテと中塗りの層間に塩分が多く付着していたことにより、容易に剥離が生じたと推測する。なお、道路橋の塩害対策指針³⁾⁶⁾には、付着塩分量の管理値として 100mg/m^2 以下の記述がある。本調査対象のようにパテと中塗り間で容易に剥離した場合、長期耐久性に懸念が生じるため、施工時の管理方法についても留意が必要である。

(5) 表面被覆材の性能確認結果

塗膜に関わる各種調査の結果、塗膜の膜厚、組成、遮塩性において、性能低下は認められず、塗膜の割れやコンクリートの浮き等の損傷原因は塗膜の性能低下でないことが確認できた。次節では、損傷原因として表面被覆材以外の要素について確認する。

3. 4 塩化物イオン濃度の経年変化分析

3. 4. 1 塩化物イオン濃度の調査方法

調査位置は、図3.4.1に示すとおり補修前に塩化物イオン濃度分布調査が実施されている箇所近傍とした。調査項目は、塩化物イオン濃度分布と中性化深さとした。塩化物イオン量測定は、図3.4.1に示す位置から採取したコアを表面から20mmごとにスライスし、JIS A 1154に準拠し電位差滴定法により全塩化物イオンの定量分析を行った。中性化深さはJIS A 1152に準拠し、塩化物イオン量測定を行う前のコアを用いて測定した。

3. 4. 2 塩化物イオン濃度の調査結果

(1) 表面被覆工法による補修前後の塩化物イオン濃度分布の比較

補修前後の塩化物イオン濃度分布を表 3.4.1 と図 3.4.2 に示す。表面被覆工法で補修された PC 桁は、補修前に比べ表層付近である 0~2cm の位置の塩化物イオン濃度が減少し、鉄筋位置である 2~4cm の位置の塩化物イオン濃度が上昇していた。後述する表面含浸工法では塩化物イオンの上昇が見られなかったが(4章参照)、表面被覆工法では施工後に中性化深さ位置より深い位置で塩化物イオン濃度がピークとなる再拡散現象が見受けられた。

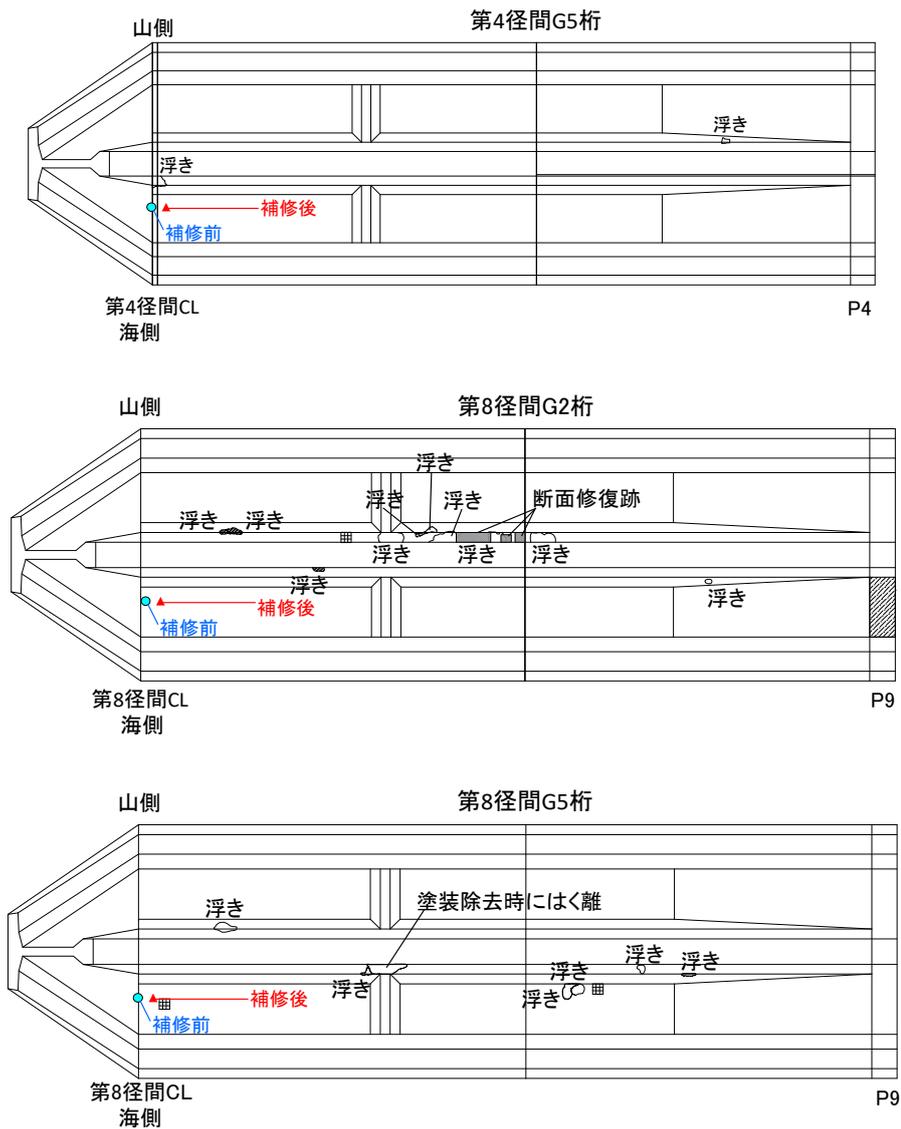


図 3.4.1 塩化物イオン濃度調査位置（展開図）

表 3.4.1 表面被覆工法による補修前後の塩化物イオン濃度分布

		表面被覆前(kg/m ³)			表面被覆後(kg/m ³)		
		2007年（橋齢32年）			2020年（橋齢45年）		
		第4径間 G5桁	第8径間 G2桁	第8径間 G5桁	第4径間 G5桁	第8径間 G2桁	第8径間 G5桁
表面からの距離	0-2cm	6.26	6.10	8.92	3.21	2.39	3.99
	2-4cm	2.81	0.51	1.14	4.56	2.49	4.19
	4-6cm	0.56	0.21	0.28	1.39	0.81	0.90
	6-8cm	0.23	0.23	0.26	0.34	0.30	0.22
中性化深さ(mm)		13.8	11.4	10.2	9.5	11.2	7.8

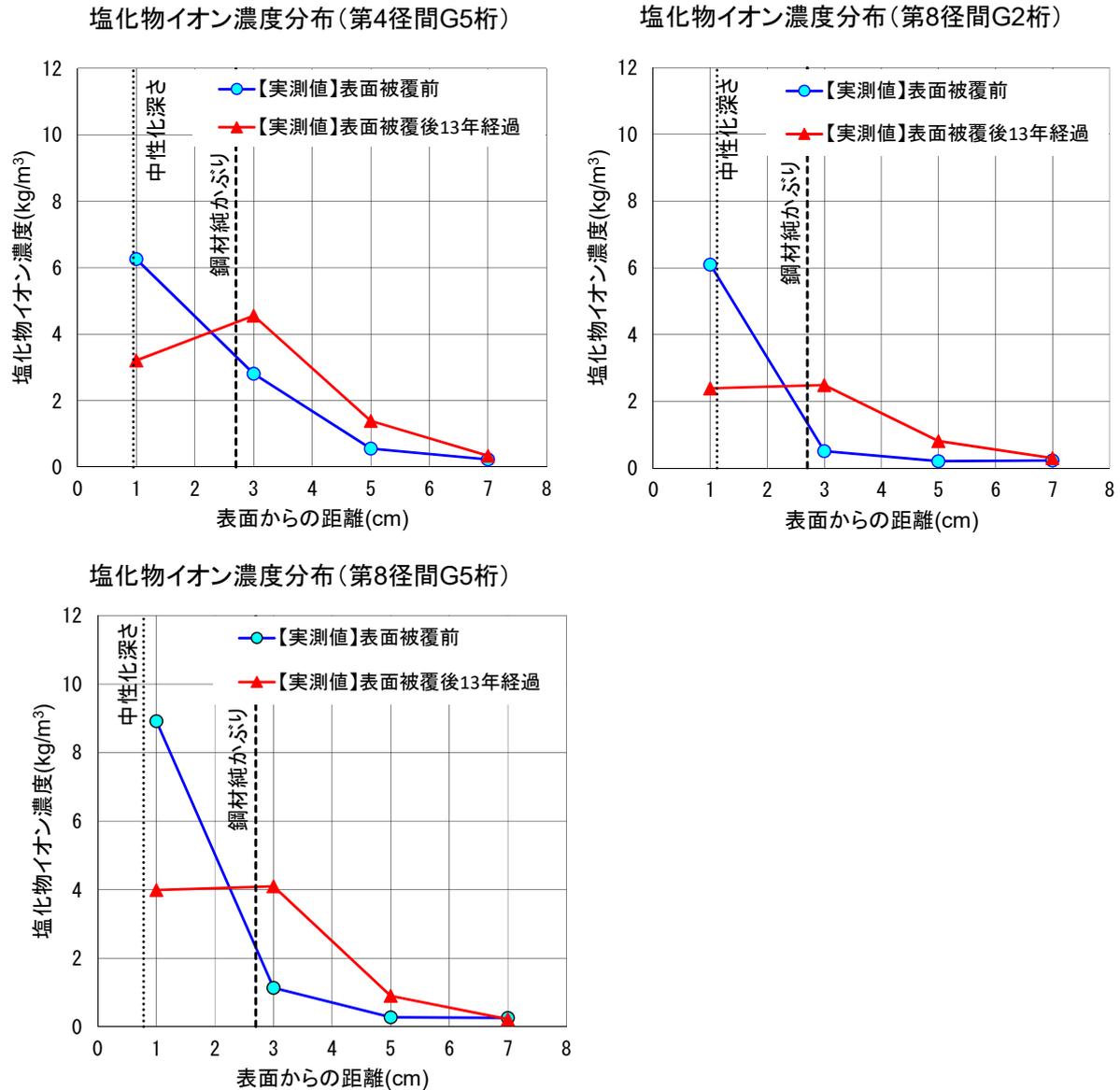


図 3.4.2 塩化物イオン濃度分布図 (測定値)

(2) 塩化物イオンの拡散予測と実測値の比較

見かけの拡散係数が塩化物イオンの再拡散へ与える影響を確認すべく、塩化物イオンの拡散予測と実測値を比較した。塩化物イオンの拡散予測は、表面からの塩化物イオン供給が遮断される際に、既往の研究³⁻⁷⁾において実測値と一致することが報告されている差分法³⁻⁸⁾を用いて行った。なお、差分法で使用する見掛けの拡散係数 D と表面塩化物イオン濃度 C_0 は、コンクリート標準示方書【規準編】³⁻⁹⁾のJSCE-G573-2018附属書2(参考)に基づき、中性化した領域(0~20mm)の測定値を除いた補修前の塩化物イオン濃度分布を式3.4.1に示すFickの第2法則に基づく拡散方程式の解で回帰分析することにより求めた。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (\text{式3.4.1})$$

ここに、 $C(x,t)$ ：コンクリート表面からの距離 x (mm)、 t (年)における塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_0 ：表面塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 D ：塩化物イオンの見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 erf ：誤差関数

表3.4.2および図3.4.3に実測値、理論値、解析値を示し、差分法の解析条件を表3.4.3に示す。

解析値は、表面被覆工法による補修前の実測値と中性化領域を除いた回帰分析結果を用いて、表面被覆工法による補修後の塩化物イオン濃度分布を差分法により求めた数値を表す。

理論値は、中性化領域を除いた回帰分析結果を用いて、表面被覆工法による補修前の塩化物イオン分布をFickの第2法則に基づく拡散方程式の解で求めた数値を表す。

表 3.4.2 塩化物イオン拡散予測 1

塩化物イオン濃度の単位： kg/m^3

		第4径間G5桁			第8径間G2桁			第8径間G5桁		
		実測値 (補修後)	理論値 (補修前)	解析値 (補修後)	実測値 (補修後)	理論値 (補修前)	解析値 (補修後)	実測値 (補修後)	理論値 (補修前)	解析値 (補修後)
D($\text{cm}^2/\text{年}$)		----	0.105	0.105	----	0.467	0.467	----	0.159	0.159
Co(kg/m^3)		----	11.4	11.4	----	0.842	0.842	----	3.23	3.23
表面からの距離	0-2cm	3.21	7.96	6.61	2.39	0.72	0.52	3.99	2.43	1.93
	2-4cm	4.56	2.80	3.58	2.49	0.49	0.45	4.10	1.12	1.28
	4-6cm	1.39	0.61	1.17	0.81	0.30	0.34	0.90	0.38	0.59
	6-8cm	0.34	0.08	0.26	0.30	0.17	0.23	0.22	0.09	0.21

表3.4.3 差分法による拡散予測の解析条件（解析値）

入力条件		入力値		
		第4径間G5桁	第8径間G2桁	第8径間G5桁
補修前	補修時経過年数（年）	32	32	32
	見掛けの拡散係数（ D : $\text{cm}^2/\text{年}$ ）	0.105	0.467	0.159
	表面塩化物イオン濃度（ C_0 : kg/m^3 ）	11.4	0.842	3.23
	初期塩分量（ kg/m^3 ）	0.00	0.00	0.00
補修後	補修後計算年数（年）	13	13	13
	浸透深さ刻み幅（ Δx : cm ）	0.1	0.2	0.1
	時刻刻み幅（ Δt : 年）	0.03	0.03	0.03
	補修後の表面塩化物イオン濃度（ kg/m^3 ）	0.00	0.00	0.00

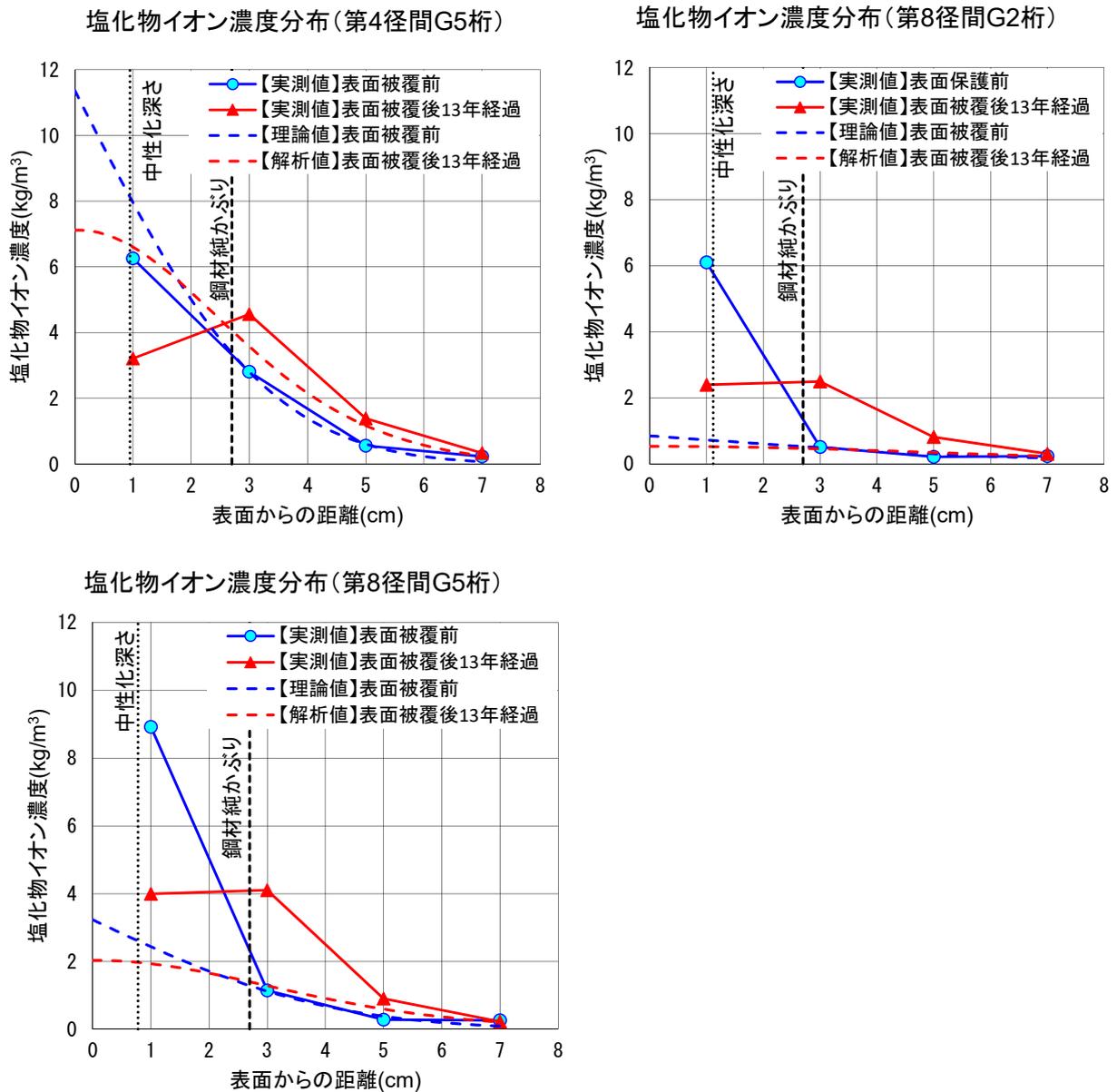


図3.4.3 塩化物イオン濃度分布図

拡散予測について、解析値では特に第8径間において表面被覆後の実測値との間に顕著な乖離が見られた。

補修前の実測値は、表層が中性化しているものの、中性化による塩分濃縮によって表層より内部の塩化物イオン濃度が高くなったとは断定できない。そこで、中性化による塩分濃縮を考慮して実測値を除外するという対応はせず、すべての実測値を用いて回帰分析を行った。この回帰分析結果から、差分法により求めた数値を解析値（案）、Fickの第2法則に基づく拡散方程式の解で求めた数値を理論値（案）として、その結果を表3.4.4および図3.4.4に示す。また、差分法の解析条件を表3.4.5に示す。

表 3.4.4 塩化物イオン拡散予測 2

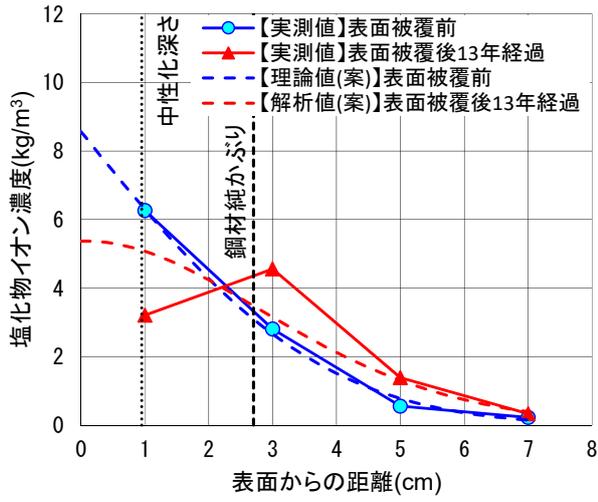
塩化物イオン濃度の単位：kg/m³

	第4径間G5桁			第8径間G2桁			第8径間G5桁			
	実測値 (補修後)	理論値 (案) (補修前)	解析値 (案) (補修後)	実測値 (補修後)	理論値 (案) (補修前)	解析値 (案) (補修後)	実測値 (補修後)	理論値 (案) (補修前)	解析値 (案) (補修後)	
D(cm ² /年)	---	0.137	0.137	---	0.034	0.034	---	0.043	0.043	
Co(kg/m ³)	---	8.56	8.56	---	12.2	12.2	---	16.0	16.0	
表面からの距離	0-2cm	3.21	6.30	5.08	2.39	6.10	5.89	3.99	8.92	8.41
	2-4cm	4.56	2.66	3.15	2.49	0.52	1.06	4.10	1.17	2.08
	4-6cm	1.39	0.78	1.31	0.81	0.01	0.05	0.90	0.04	0.19
	6-8cm	0.34	0.15	0.39	0.30	0.00	0.00	0.22	0.00	0.01

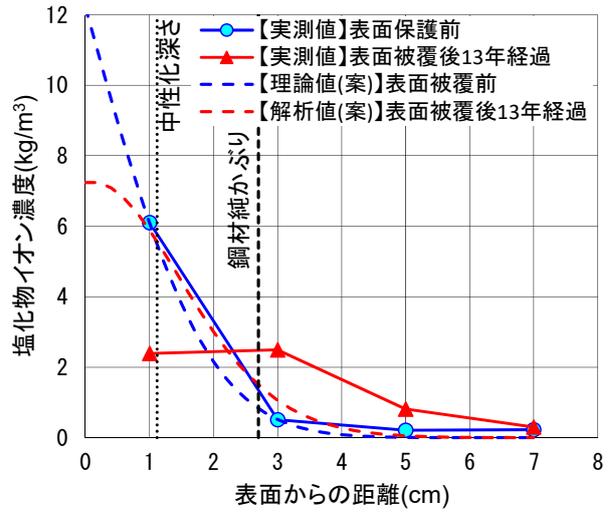
表3.4.5 差分法による拡散予測の解析条件（解析値（案））

入力条件		入力値		
		第4径間G5桁	第8径間G2桁	第8径間G5桁
補修前	補修時経過年数（年）	32	32	32
	見掛けの拡散係数（D：cm ² /年）	0.137	0.034	0.043
	表面塩化物イオン濃度（C ₀ ：kg/m ³ ）	8.56	12.2	16.0
	初期塩分量（kg/m ³ ）	0.00	0.00	0.00
補修後	補修後計算年数（年）	13	13	13
	浸透深さ刻み幅（Δx：cm）	0.1	0.2	0.1
	時間刻み幅（Δt：年）	0.03	0.03	0.03
	補修後の表面塩化物イオン濃度（kg/m ³ ）	0.00	0.00	0.00

塩化物イオン濃度分布 (第4径間G5桁)



塩化物イオン濃度分布 (第8径間G2桁)



塩化物イオン濃度分布 (第8径間G5桁)

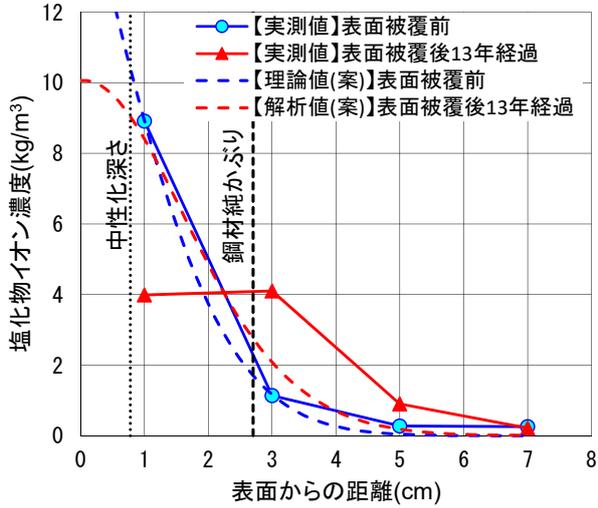


図 3.4.4 塩化物イオン濃度分布図 (拡散予測に中性化領域を含んだ回帰分析結果を使用)

解析値（案）では、第8径間において解析値より、実測値との乖離が小さくなる傾向になったが、等しいと判断できる程には至らなかった。また、第4径間においては、解析値（案）と実測値の乖離が大きくなる傾向にあった。

第8径間について、解析値（案）に用いた塩化物イオンの見掛けの拡散係数Dが、コンクリート標準示方書【維持管理編】³⁾⁹⁾に示されるポルトランドセメントの場合の見かけの拡散係数（水セメント比30%） $0.178 \text{ cm}^2/\text{年}$ に比べて、G2桁では $0.034 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、およびG5桁では $0.043 \text{ cm}^2/\text{年}$ と極端に小さな値となっている。そこで、表面被覆工法の施工により、表層を含めた見掛けの拡散係数が、コンクリート内部の値に近づいたと仮定して試算を行った。仮定では、表面塩化物イオン濃度 C_0 には解析値（案）で用いた値、見掛けの拡散係数Dには解析値および理論値で用いた値を使用し、差分法を用いて拡散予測を行った（以下、解析値（仮））。その結果を表3.4.6および図3.4.5に示す。また、差分法の解析条件を表3.4.7に示す。

表 3.4.6 塩化物イオン拡散予測 3

塩化物イオン濃度の単位 : kg/m^3

	第8径間G2桁			第8径間G5桁			
	実測値 (補修後)	理論値(案) (補修前)	解析値(仮) (補修後)	実測値 (補修後)	理論値(案) (補修前)	解析値(仮) (補修後)	
D($\text{cm}^2/\text{年}$)	----	0.034	0.467	----	0.043	0.159	
$C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$	----	12.2	12.2	----	16.0	16.0	
表面からの距離	0-2cm	2.39	6.10	2.81	3.99	8.92	6.35
	2-4cm	2.49	0.52	2.12	4.10	1.17	3.25
	4-6cm	0.81	0.01	1.19	0.90	0.04	0.86
	6-8cm	0.30	0.00	0.50	0.22	0.00	0.12

表3.4.7 差分法による拡散予測の解析条件（解析値（仮））

入力条件		入力値	
		第8径間G2桁	第8径間G5桁
補修前	補修時経過年数（年）	32	32
	見掛けの拡散係数（D : $\text{cm}^2/\text{年}$ ）	0.034	0.043
	表面塩化物イオン濃度（ C_0 : kg/m^3 ）	12.2	16.0
	初期塩分量（ kg/m^3 ）	0.00	0.00
補修後	補修後計算年数（年）	13	13
	見掛けの拡散係数（D : $\text{cm}^2/\text{年}$ ）	0.467	0.159
	浸透深さ刻み幅（ Δx : cm）	0.2	0.1
	時間刻み幅（ Δt : 年）	0.03	0.03
	補修後の表面塩化物イオン濃度（ kg/m^3 ）	0.00	0.00

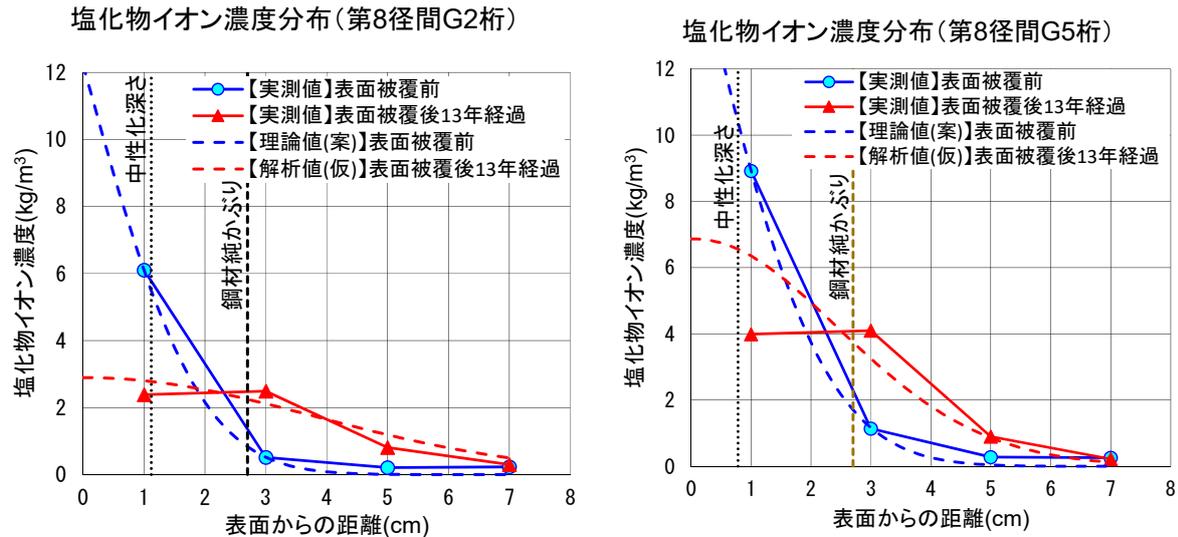


図 3.4.5 塩化物イオン濃度分布図（見掛けの拡散係数を大きくした試算）

試算の結果、実測値と解析値（仮）の乖離は小さくなる傾向となった。このことより、見掛けの拡散係数が表面被覆工法を施工することにより大きくなる可能性が確認できた。また、本橋の第8径間のようなケースでは、単純に差分法を用いるのみでは、表面被覆施工前の塩化物イオン濃度分布より、表面被覆施工後の塩化物イオン濃度分布を予測することができない結果であった。

（3）表面被覆工の施工後における塩化物イオンの拡散について

（1）において本橋で表面被覆工の施工後に塩化物イオンの拡散が顕在化した要因として、コンクリート中に存在する自由塩化物イオンの内部拡散が考えられる。また、中性化（炭酸化）が進行していたことから、フリーデル氏塩が遊離¹¹⁾することで内部拡散する自由塩化物イオンが増加したと推察される。加えて、表面被覆によりコンクリート内部の相対湿度が増加したことで、自由塩化物イオンの内部拡散が促進されたと考えられた。そこで、本橋と架橋環境の異なるポストテンション桁橋（N橋³⁻¹²⁾および文献³⁻¹³⁾記載の橋梁）の中性化速度から本橋のコンクリート中の相対湿度の程度を推定し、本橋で塩化物イオンの拡散が顕在化した要因について考察する。

これら3橋のデータから得られた中性化速度と圧縮強度の関係を図3.4.6に示す。これによると、本橋の中性化速度の分布は文献³⁻¹³⁾に記載のポストテンション桁の分布より大きい傾向にあり、N橋³⁻¹²⁾の中性化速度の分布は文献³⁻¹³⁾に記載のポストテンション桁の分布より小さい傾向にある。理由として、架橋環境の違い（海面から桁下までの距離が本橋調査箇所は10m以上、N橋は4m程度）により、本橋はN橋³⁻¹²⁾より相対湿度が低く、かつ中性化の進行が速くなる中程度の相対湿度³⁻¹⁵⁾であった可能性がある。したがって、本橋は、中性化しやすい湿度環境であり、上述の要因により塩化物イオンの内部拡散が顕在化したものと考えられる。

次に、N橋の塩化物イオンの拡散状況を図3.4.7に示す。N橋は橋齢33年目に表面被覆工にて補修されている。なお、補修を行う前の中性化深さは0mmである。図3.4.2の本橋と比較すると、N橋は表面被覆工の施工前後で見かけの拡散係数の予測値が0.57cm²/年程度とほとんど変化がなく再拡散も顕著ではない。その理由としては、N橋は海面から4m程度に位置し、相対湿度が比較的高い状況³⁻¹²⁾にあることから、中性化が発生せず、中性化による塩化物イオンの濃縮現象が発生しなかったと考えられる。

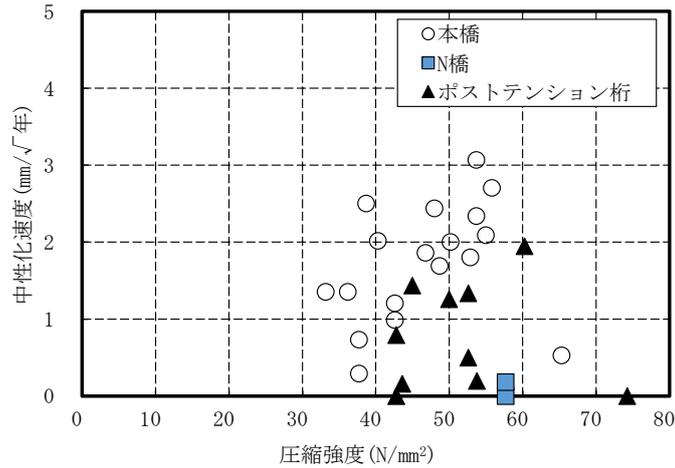


図3.4.6 圧縮強度と中性化速度の関係

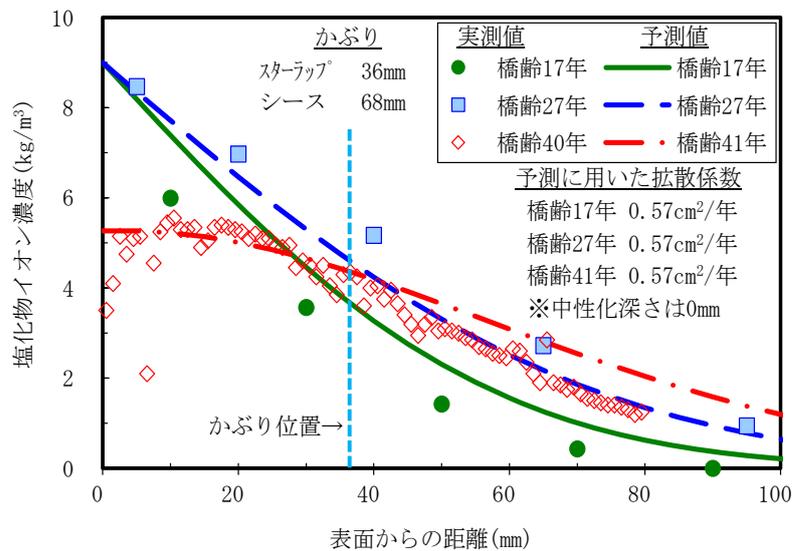


図 3.4.7 N 橋の塩化物イオン拡散状況

(4) コンクリート配合調査

1) 調査概要

コンクリートの品質の良し悪しによって、塩分浸透程度は大きく異なる。そこで、本橋のコンクリートの品質を確認するため、セメント協会法に準じて配合推定試験³⁻¹⁶⁾を行った。調査箇所数は計 24 箇所（第 4 径間 G5 桁から 10 箇所、第 8 径間 G2 桁から 7 箇所、第 8 径間 G5 桁から 7 箇所）である。

2) 配合推定試験結果

表 3.4.8 および表 3.4.9 に配合推定試験により算出した水セメント比の結果を示す。表 3.4.8 より、水セメントの平均値は 38~40%であった。また、90%信頼区間 ($\mu \pm 1.64\sigma$) においては、全体として水セメント比が 34~46%であった。なお、配合推定試験は採取した箇所のブリーディングや粗骨材の沈降などの影響を受けるため、当時打設されたコンクリート配合と本調査の配合推定試験結果が合致するとは必ずしもいえない点に留意する必

要がある。標準的な水セメント比の目安として、例えば、道路橋示方書³⁾⁷⁾では、工場で製作されるプレストレストコンクリート構造以外のプレストレストコンクリート構造では43%とされている。これに比べて、本橋の水セメント比は比較的小さいが、ばらつきを考慮すると概ね標準的なものと考えられる。

以上より、本調査の対象径間のコンクリートの品質は、概ね標準的なコンクリートであると推察される。

表3.4.8 配合推定試験結果 水セメント比

対象径間・桁	箇所数	平均 μ (%)	標準偏差 σ (%)	$\mu-1.64\sigma$ (%)	$\mu+1.64\sigma$ (%)
第4径間・G5桁	10	40	3.4	34	46
第8径間・G2桁	7	40	1.4	37	42
第8径間・G5桁	7	38	0.7	36	39

表 3.4.9 サンプルデータ

対象径間・桁	水セメント比 (%)									
第4径間・G5桁	36	42	44	41	45	43	40	37	37	35
第8径間・G2桁	41	37	39	39	41	40	41			
第8径間・G5桁	39	37	38	37	38	37	37			

3. 5 補修効果に関する考察および表面被覆工法の適用上の留意点

本研究でのデータ整理・分析および詳細調査の結果、表面被覆工の塗膜およびコンクリートの品質（水セメント比）に異常は認められないにもかかわらずコンクリートの浮きやひび割れなど再劣化と思われる損傷が確認された。表面被覆工の施工後に再劣化が発生した要因としては、表面被覆工により外部からの塩化物イオンを遮断しているものの、表面被覆工の施工前にコンクリート中に侵入した塩化物イオンの内部拡散により、鉄筋位置で腐食発生限界濃度を上回ったことによる鉄筋腐食であると考えられる。

この塩化物イオンの内部拡散は、既にコンクリート中に浸透していた自由塩化物イオンの拡散に加え、フリーデル氏塩として固定されている塩化物イオンが中性化により分解される事が一般的な要因として考えられるが、これに加え、本橋では表面被覆により乾燥状態であったコンクリート表層部分の湿度が上昇することで分解された塩化物イオンが内部へ拡散し、表層より深部の塩化物イオン濃度が上昇したことが考えられた。イメージを図3.5.1に示す。また、中性化が深部に及んでいるほど、この傾向が強くなる可能性がある。なお、この図は、本検討で調査した塩化物イオンの分布をもとに推察したものである。この検証にあたっては、今後さらなるデータの収集と整理が必要である。

本研究における調査結果をもとに、表面被覆工法を適用する上での留意点を以下に示す。

施工前において、鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食限界に達していない場合であっても、中性化の影響を受けていて、かつ、表面被覆後にコンクリート中が湿潤となる環境においては、施工後に内部拡散が顕在化する可能性がある。したがって、表面被覆工の補修効果を確実に発揮させるためには、補修前のコンクリート内部の塩化物イオン濃度や中性化深さに加え、相対湿度を把握し、塩化物イオンが既に浸透している場合には適切に除去したうえで施工することが重要である。

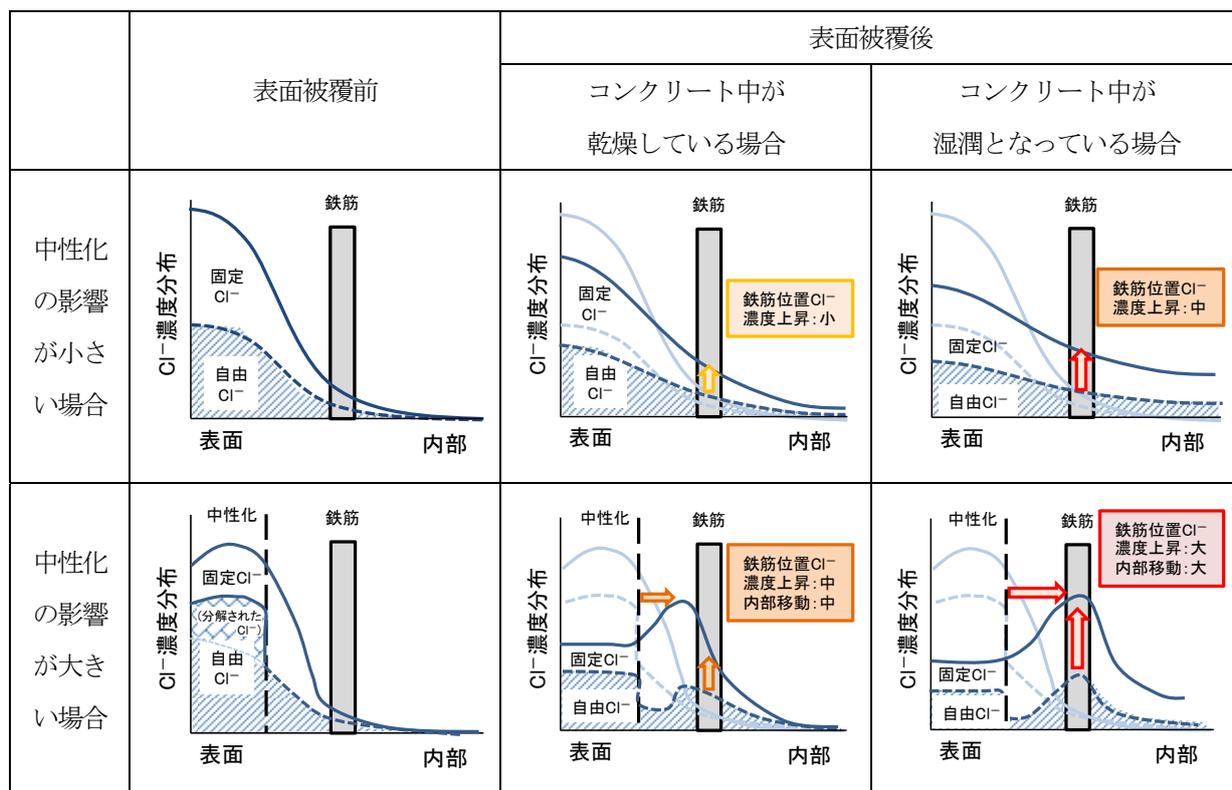


図 3.5.1 表面被覆による塩化物イオンの拡散イメージ図

3. 6 本章のまとめ

塩害対策として表面被覆工法が用いられたPC桁の補修効果を確認するため、塗膜、コンクリート配合、およびコンクリート内部の塩化物イオンの状態に着目し検討した結果、以下の知見が得られた。

- 本調査橋梁においては、表面被覆工の施工から25年程度経過しても、塗膜の膜厚、組成、遮塩性等の表面被覆材の性能低下は認められなかった。一方で、表面被覆工の補修後にコンクリート内部の塩化物イオンの拡散により鉄筋位置の塩化物イオン濃度の上昇が確認され、これに伴い塗膜の割れやコンクリートの浮き等の損傷が発生した部位が確認された。
- 表面被覆工の施工後の塩化物イオンの拡散について、中性化の影響が大きい場合において拡散が顕在化する可能性がある。
- 本橋の拡散予測と実測との乖離について、表面被覆工の施工前後の見掛けの拡散係数の変化が考えられ、従来手法の差分法による拡散予測が適用できないケースがあると考えられる。
- 表面被覆工の施工において、施工時に鋼材位置の塩化物イオン濃度が低くても内在塩化物イオンを適切に除去しなければ、塩化物イオン濃度の内部拡散に伴う鋼材腐食により塗膜の割れやコンクリートの浮き等の損傷が発生する場合がある。

3章の参考文献

- 3-1) 加藤絵万：表面被覆を施した栈橋上部工の補修効果調査，コンクリート工学，Vol.47，No.7，pp.75-78，2009.7
- 3-2) 上原勇賢，川間重一：再劣化した塩害コンクリート橋の維持管理に向けた取り組み，土木学会第68回年次学術講演会，V-187，pp.373-374，2013.9
- 3-3) 土木学会：コンクリートライブラリー119号・表面保護工法設計施工指針（案），2005.4
- 3-4) 藤岡裕二：表面分析講座V 赤外発光分光法，防錆管理，Vol.47，No.5，pp.22-26，日本防錆技術協会，2003.5
- 3-5) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，2014.3
- 3-6) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説，1984.2
- 3-7) 守分敦郎，長滝重義，大即信明，三浦成夫：既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工法の適用性，土木学会論文集，No.520，V-28，pp.111-122，1995.8
- 3-8) 山路徹，審良善和，小牟禮建一：Excelを用いたコンクリート構造物の塩害劣化予測手法，セメント・コンクリート，No.773，pp.22-28，2011.7
- 3-9) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【基準編】土木学会基準および関連規準，2018.10
- 3-10) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，2018.10
- 3-11) 小林一輔：コンクリートに対する二酸化炭素の作用，生産研究，42巻，9号，pp.1-10，1990
- 3-12) 北野勇一，谷口秀明，花井拓，木村嘉富：PCT桁橋の振動特性と安全性評価に関する基礎検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，vol.12，pp.149-156，2012.11
- 3-13) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC構造物の維持保全ーPC橋の更なる予防保全に向けてー[2015年版]，2015.3
- 3-14) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2018.3
- 3-15) 鄭載東，平井和善，三橋博三：モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，第1巻第1号，pp.85-94，1990.1
- 3-16) セメント協会：コンクリート専門委員会報告F1-F18合本版，pp.353-411，1967
- 3-17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編，pp.185-186，2017

4章 塩害を受けた既設 PC 橋に適用した表面含浸工法の補修効果に関する検討

4. 1 検討概要

表面含浸工法は、コンクリート表面に塗布した表面含浸材がコンクリート内部に含浸して、劣化因子の侵入抑制、または新たな性能を付与する効果をもたらす工法である⁴¹⁾。この工法は比較的新しく、その特徴は、コンクリート表面の外観を損ねることなく、表面被覆工法と比較して少ない工程で短期間に施工でき、工法適用後もコンクリート表面の変状を目視点検できることにある。しかし、表面含浸工法をPC桁などに用いられる低水セメント比のコンクリートへ適用した際に含浸しにくい事象が散見されている。また、既往の研究では低水セメント比に対する含浸材の含浸深さについて検討されているものの、新設構造物や供試体を対象とした検証^{42)、43)}であり、長期間供用された実構造物を用いた検証は十分にはなされていない。そこで、実橋から撤去されたPC桁を用いて表面含浸工法を試験的に施工（以下、試験施工）し、施工性や含浸深さ、撥水性について検証を行った。また、同橋の一部の径間では表面含浸材による補修が実施されていたため、その径間から現地にて試料を採取し塩化物イオンや含浸材の浸透状況、はつり調査により表面含浸工法の効果確認（以下、現地調査）を行った。

4. 2 対象橋梁の概要

本調査の対象橋梁は3章記載の橋梁と同じである。本橋では表面被覆工法による補修と表面含浸工法による補修が施されていた。調査対象の径間を図4.2.1に示す。

試験施工 試験施工では含浸材の施工性や含浸深さの確認が目的であるため、含浸材が未塗布であり、含浸深さへ影響を与えるひび割れなどの存在がないことが必要である。さらに、試験施工は天候の影響を受けるため、作業時間に制約がある架橋位置で実施することは現実的ではない。そのため、受領した撤去桁を用いることとした。本条件より、対象とするPC桁は3章に記載の撤去桁から選定し第8径間のG2桁とした（写真4.2.1）。なお、撤去桁は全ての桁で表面被覆工法による補修がなされていた。

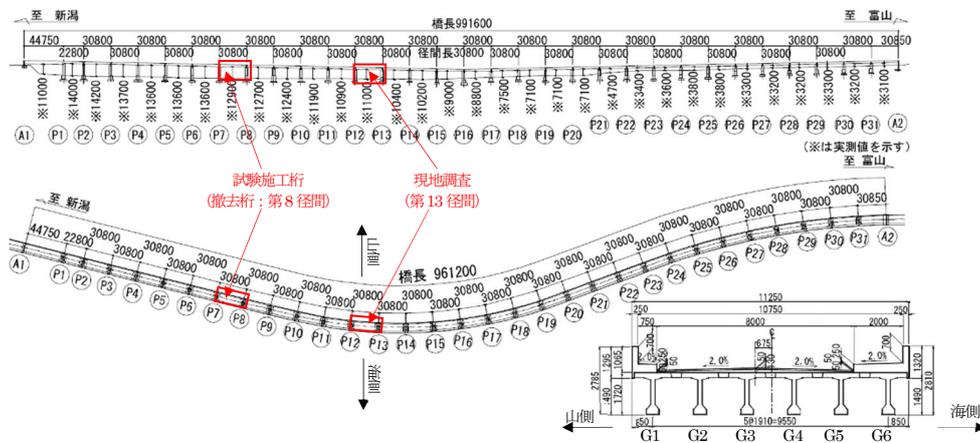


図 4.2.1 調査位置図

単位：mm

現地調査 表面含浸工法による補修が行われていた径間は、撤去時期の関係などからPC桁を受領することが困難

であったため、試料採取によって実施可能な調査のみを行った。対象桁は、表面含浸材が塗布されていた径間のうち、過去に塩分量調査が実施されていることと、劣化が比較的激しいことから、13径間のG6桁（海側外桁）とした（写真4.2.2）。

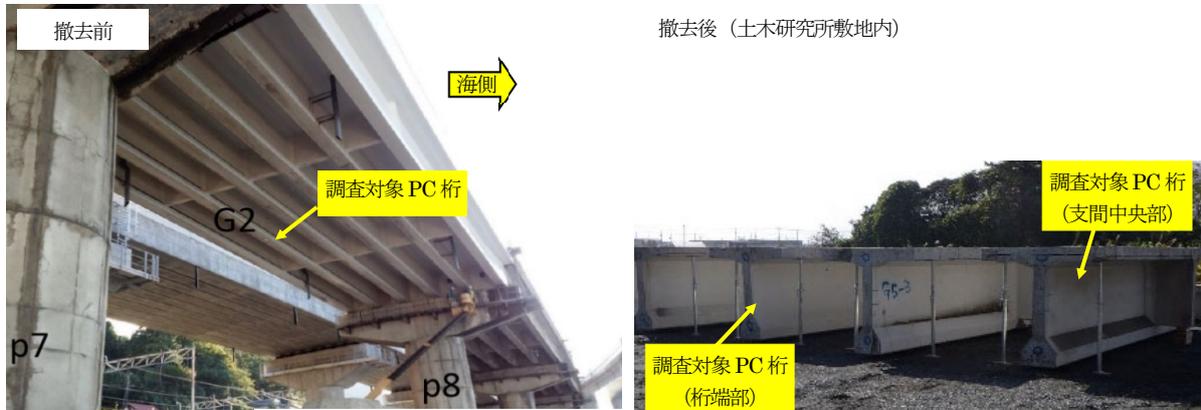


写真 4.2.1 試験施工対象桁（第 8 径間）の撤去前と撤去後

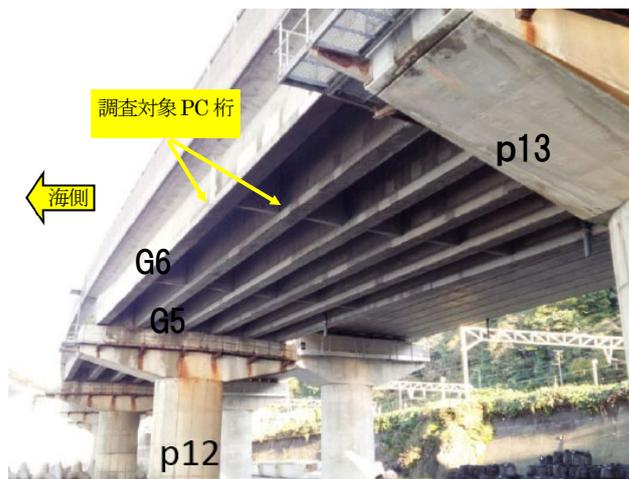


写真 4.2.2 現地調査対象桁（第 13 径間）の撤去前

4. 3 撤去桁を用いた表面含浸工法の試験施工による性能確認・調査

4.3.1 調査概要

表面含浸材の試験施工による施工性と、試験施工前後での各種調査により、表面含浸工法の初期性能（施工性・表面撥水性・浸透性）について検証した。試験施工の実施は、対象とするPC桁に対し、支間中央部と桁端部のウェブおよび下フランジの側面（海側）とした。含浸材の塗布範囲は、それぞれ桁側面の幅1.0m×高さ1.3mの範囲とした（図4.3.1）。試験施工に先立ち、対象PC桁には表面被覆工が施されているため、含浸材塗布範囲の表層3～5mmを切削し、周囲を養生シートで覆ったうえで、下地コンクリートが十分に乾燥するまで土木研究所の屋外で保管した。

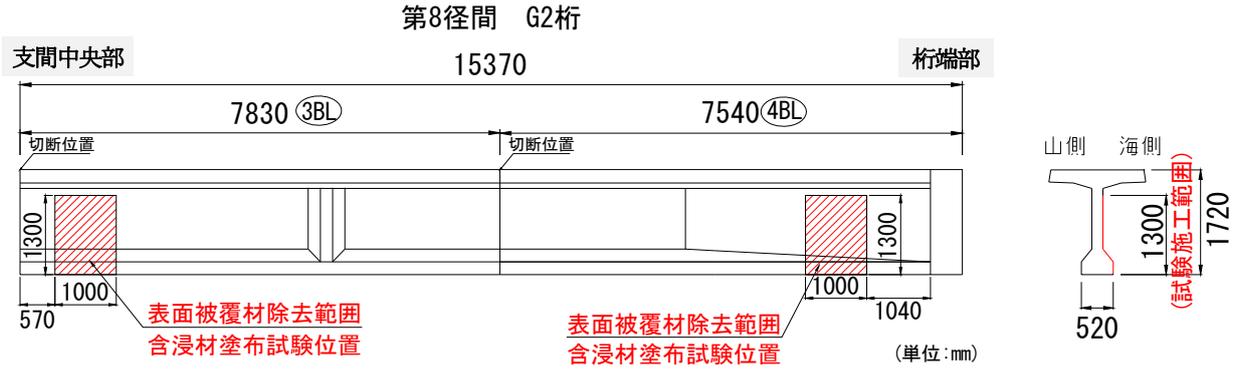


図 4.3.1 試験施工の対象位置

4.3.2 調査項目および調査方法

調査項目を表4.3.1に、調査位置を図4.3.2に示す。調査項目は施工性①、含浸深さ②に加え、含浸深さや含浸材の塗布有無を確認する方法などを評価する手法の検討として、圧縮強度③、表層品質④、表層湿度⑤、撥水性⑥とした(表4.3.1)。

表4.3.1 調査項目

No	調査項目	調査方法	調査時期	
			塗布前	塗布後
①	施工性 (塗布回数・間隔・量)	試験施工による	—	—
②	含浸深さ	JSCE-K571(参照)		○
③	圧縮強度	採取コア (φ75mm) の圧縮強度試験		○
④	表層品質	表層透気試験【Torrent 法】	○	○
⑤	表層湿度	ドリル削孔内の湿度測定	○	○
⑥	撥水性	表面水分測定【塗布判別方法 (案) 44)】		○

【調査位置凡例】

○: ②含浸深さ, ④表層品質 △: ③圧縮強度, ④表層品質 □: ⑤表層湿度 ▨: ⑥撥水性確認

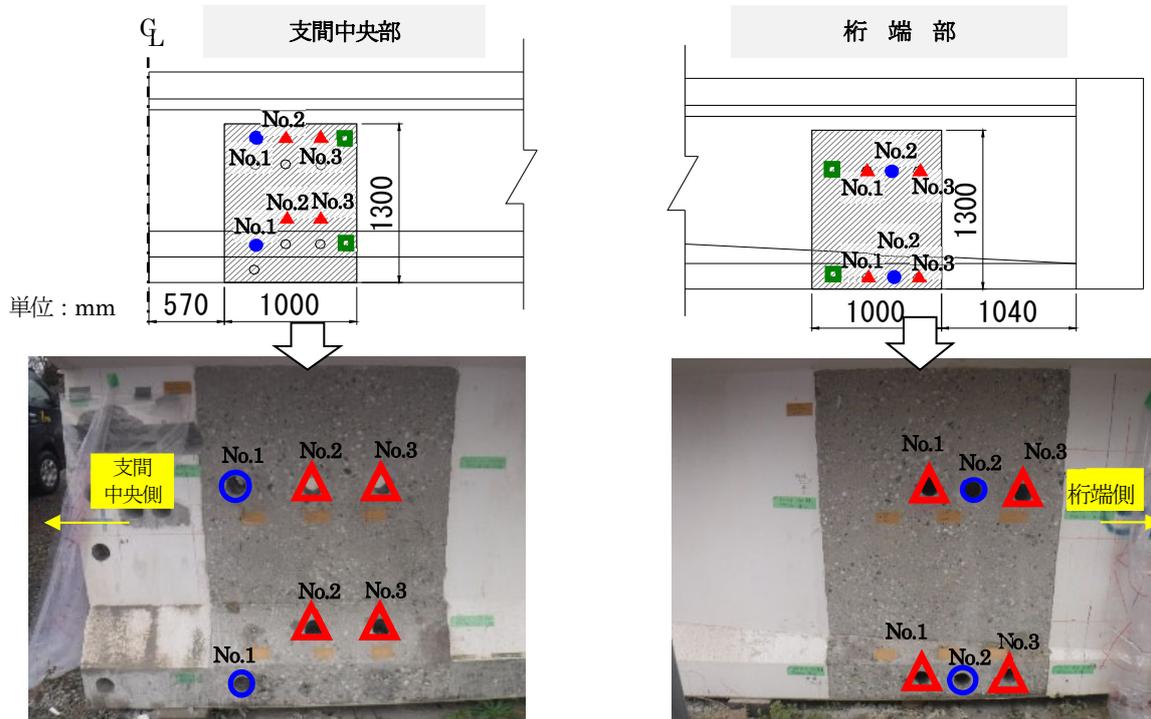


図 4.3.2 試験施工の概要および調査位置

各調査の要領を以下に示す。

①施工性：表面含浸材の施工性の確認と、塗布回数、塗り重ね施工間隔および1回ごとの塗布量を記録した。含浸材の施工は以下の手順で実施した。

試験施工は2020年10月の初旬に実施した（気象条件：天候曇り，気温22℃，相対湿度84%）。試験施工に用いた表面含浸材は，対象橋梁の別径間に適用されていたアルキルアルコキシシランにアミノ基を化学結合したもの（文献4-1）に示される含浸材分類のうち「その他の系」に該当される材料）で，撥水機能と鉄筋腐食抑制機能を併せ持った材料である。この表面含浸材の性能は土木学会による劣化要因に対する性能グレードでAグレード⁴⁾に該当する。また，標準的な施工は塗布量を600mL/m²，塗布回数を平均3回以上（垂直面），施工間隔を指触乾燥後（20分以上）とする事となっている。なお，標準的な施工とは，PC桁などに用いられる低水セメント比のコンクリートではなく，RCの様なコンクリートを対象としている。以下に作業手順を示す。

- 1) コンクリート表面の清掃：コンクリート表面を刷毛で清掃する（写真4.3.1(a)）。
- 2) コンクリート表面の含水率確認：高周波容量式水分計を用いて水分率8%以下であることを確認する（写真4.3.1(b)）。
- 3) 計量：設計塗布量に対して5%の損失量を考慮した塗布量を計量する（写真4.3.1(c)）。

必要量は式4.3.1により求める。

$$A \times (B \times 1.05) \times W \quad (\text{式4.3.1})$$

ここで、A：塗布面積(m²)、B：設計塗布量 600(mL/m²)、W：含浸材の単位体積質量 0.88(g/L)

4) 含浸材の塗布：塗布作業はウェブ上端から刷毛を用いて実施する (写真4.3.1(d))。



写真 4.3.1 含浸材塗布作業状況

②含浸深さ：施工完了1か月後に試験施工面から採取したコアφ75mmを割裂し、JSCE K571を参考に、割裂面における表面含浸材の含浸深さを測定した。

③圧縮強度：施工完了1か月後に試験施工面から採取したコアφ75mm×150mmを用いてJISA 1107に従い試験を実施した。

④表層品質：施工1週間前と施工完了1か月後に、スイス標準規格SIA262/1に示される表層透気試験 (Torrent法) により、コンクリート表層の透気係数を評価した。

⑤表層湿度：施工1週間前と施工完了1か月後に、コンクリート表面よりドリル削孔 (直径15mm、深さ約30mm) し、防塵型湿度センサを設置し、ブチルゴムにて密閉した状態としてコンクリートの表層湿度を測定した。

⑥撥水性：施工完了の2か月程度経過後に試験施工面に散水し、余分な水分を拭き取った後、文献(4-4)の要領に従い、電気抵抗式水分計により表面水分率を継続的 (噴霧水の拭き取り後1分間隔) に測定した (図4.3.3)。測定位置は、支間中央および桁端部に対して、ウェブの上段・下段 (コア採取位置の上下) と下フランジ側面で3箇所ずつ測定した (例えば下フランジであれば図4.3.3のガムテープ貼付け位置直下部)。



図 4.3.3 撥水性確認の測定概要

4.3.3 調査結果および考察

(1) 施工性

塗布間隔と塗布量を表4.3.2に、含浸材塗布開始前と塗布直後の状況を写真4.3.2に示す。今回の試験施工で対象とした低水セメント比のコンクリートは、表層が緻密であるため含浸材の浸透性が低く表層に留まり易い（乾燥し難い）。このことに着目し、今回用いた含浸材の施工性について確認された結果を以下に示す。

- ・粘性がなく懸念した液ダレも少ないことから施工性は良好であった。
- ・含浸材の乾燥のし難さを想定していたが塗布1回目は塗布直後から表面の乾燥が目視確認された。しかし、塗布2回目以降は含浸材の乾燥に時間を要し、塗り重ねの施工間隔（標準20分以上）を40～60分（4回目は昼休憩あり）ほど確保する必要があった。
- ・標準塗布量（600mL/m²）の塗布回数について、上記と同様に浸透性が低い影響により標準塗布回数3回に比べて7回の塗り重ねが必要であった。
- ・すべての施工完了後、表面状態は塗布前の乾燥状態に戻ることを目視により確認した。

以上より、試験施工に用いた表面含浸材の施工にあたっては、RC構造物を念頭にした標準施工に対し、施工間隔と塗布回数を増加させる必要があることが確認された。

表 4.3.2 含浸材の塗布間隔と塗布量

塗布回数	塗布間隔		桁端部	
	塗布間隔 (分)	塗布量 (g)	塗布間隔 (分)	塗布量 (g)
AM	1回目	---	---	163
	2回目	35	25	125
	3回目	40	115	100
昼休憩				
PM	4回目	70	70	117
	5回目	50	45	100
	6回目	50	55	106
	7回目	60	56	107
合計		305	296	818
必要塗布量		809.4		803.9



写真 4.3.2 含浸材塗布時の状況（桁端部）

(2) 含浸深さ

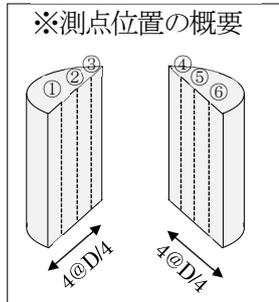
含浸深さの測定は、試験施工の他に現地の桁でも実施しているため、それぞれの結果について記載する。

1) 試験施工の結果

含浸深さの測定結果を表4.3.3と写真4.3.3に示す。含浸深さは、下フランジに比べてウェブの方が、支間中央部に比べて桁端部の方が大きい傾向にあった。なお、支間中央ウェブの含浸深さは他の測定位置に比べて、測点位置ごとの測定値のばらつきが大きい結果であった。写真4.3.3の支間中央ウェブ位置の含浸深さに着目すると、含浸材塗布面（塗膜材切剖面）に露出した骨材付近を中心に含浸材が深く含浸したように読み取ることもできる。これは、表面切削時に骨材とコンクリート界面に僅かな空隙が発生し、その空隙を通して含浸材が深くまで浸透した可能性も考えられる。なお、骨材の影響で深くなった部位を除いた平均値（測点位置③④の平均値）は10.3mmとなり、上述した含浸深さの傾向（下フランジに比べてウェブの方が大きい、支間中央部に比べて桁端部の方が大きい）と同様である。骨材の影響は推察の域であるため、本検討で得られた測定値を用いて以降の検証を行った。

表 4.3.3 含浸材の含浸深さ測定結果（第8 径間 G2 桁）

コア位置 (No)		含浸深さ (mm)						平均値	最大値
		測点位置*							
		①	②	③	④	⑤	⑥		
支間中央	ウェブ (No.1)	22.9	26.8	10.1	10.5	26.6	22.6	19.9	34.5
	下フランジ (No.1)	3.4	5.5	4.9	5.2	5.7	3.5	4.7	5.7
桁端部	ウェブ (No.2)	21.3	25.8	19.5	18.8	23.2	20.0	21.4	28.0
	下フランジ (No.2)	18.0	17.4	20.5	20.4	16.3	18.9	18.6	20.5



※コア割裂面の各面を4等分したうちの中央3点

測定は、コアの割裂面に上水道水を噴霧し、コア表面から濡れ色までの距離をノギスで測定した。

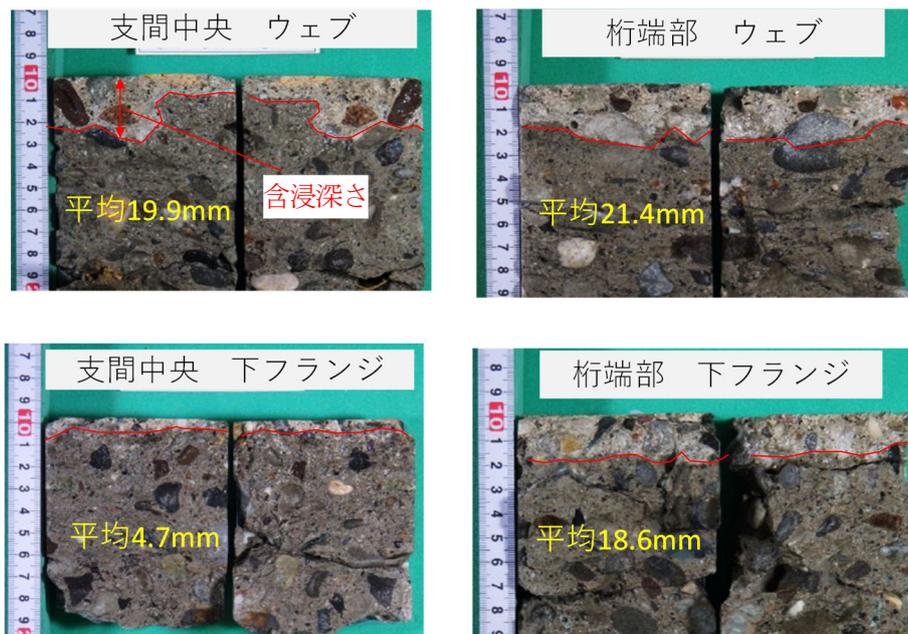


写真 4.3.3 含浸深さの測定状況

2) 現地調査の結果

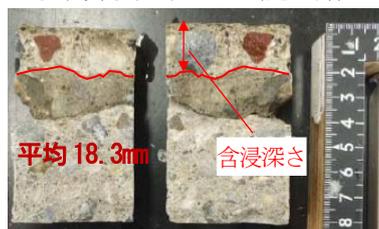
現地で採取したコアを用いて試験施工で実施した調査と同様の方法で含浸深さを測定した。表面含浸工法による補修は2009年に実施（調査は2020年）されたものである。コア採取は、塩害劣化の激しいG6桁の1/4径間付近の下フランジに対して、広範囲に浮きが生じた劣化部付近（海側）および健全部（山側）を対象に実施した。また、健全部として支間中央付近のウェブ中段付近（山側）からもコア採取を行った。試験結果を表4.3.4と写真4.3.4に示す。調査の結果、下フランジでは劣化の有無にかかわらず含浸深さが0.0mmであった。一方で、支間中央ウェブでは18.3mm含浸しており、支間中央ウェブの結果は試験施工の結果と同様の含浸深さであった。また、ウェブに比べて下フランジが含浸し難い傾向は、試験施工の結果と同様であった。

下フランジの含浸深さが0.0mmであったことに関して、使用された材料は塩害対策として選定されたもので、塩化物イオンの侵入を阻止する吸水防止層の形成に加え、鉄筋周りに保護層を形成することを目的としている材料である。また、コンクリート表層に形成される撥水層は紫外線劣化の影響を受けるため、撥水の確認のみで当該材料の含浸深さを精度よく評価することは困難である。そのため、本橋では含浸材塗布部で損傷が生じていたことから補修効果を喪失したと考えられるが、今回使用したような複数の機能を有する材料では撥水性の確認のみで含浸材が全く浸透していないと判断するのではなく、材料分析など追加の調査を実施して効果確認する必要がある。ただし、各調査箇所の相対比較として傾向を把握することは可能である。

表 4.3.4 含浸材の含浸深さ測定結果（現地測定）（第 13 径間 G6 桁）

コア位置	含浸深さ (mm)							
	測点位置						平均値	最大値
	①	②	③	④	⑤	⑥		
支間中央ウェブ	17.4	19.0	18.5	19.7	18.3	16.9	18.3	19.7
1/4 径間下フランジの劣化部付近	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1/4 径間下フランジの健全部	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

支間中央 ウェブ（健全部）



1/4 径間 下フランジ（劣化部）



1/4 径間 下フランジ（健全部）



写真 4.3.4 含浸深さの測定状況（現地測定）

(3) 圧縮強度

コンクリート圧縮強度試験の結果を表4.3.5に、圧縮強度と含浸深さの関係を図4.3.4に示す。なお、図4.3.4に示す圧縮強度は各調査位置の平均値を用いている。圧縮強度はウェブに比べて下フランジの方が高い結果であった。また、橋軸方向の比較では下フランジで支間中央側が高く、ウェブでは同等の結果となった。下フランジの圧縮強度が橋軸方向で異なる結果となったのは、下フランジハンチ部の形状が一つの要因として影響したものと考えられる。図4.3.1に示すように支間中央と桁端部の下フランジの形状が異なっており、桁端部の下フランジはウェブの横幅に伴って下フランジとウェブの部材厚差が小さくなっている。コンクリート打設を行う際、型枠への側圧を考慮するが、下フランジではコンクリート打設時に下フランジのハンチと側面の2方向から側圧を受けるため、強度が高くなったと考えれば今回の結果の傾向が説明できる。

圧縮強度と含浸深さの関係については、55N/mm²を超えた辺りで含浸深さが小さくなる結果であった。

表 4.3.5 コンクリート圧縮強度

コア位置 (No)			直径(mm)	高さ(mm)	比	荷重(kN)	圧縮強度(N/mm ²)	
			D	H	H/D			平均
支間	ウェブ (W)	(No.2)	73.5	151.7	2.1	201.2	47.4	48.6
		(No.3)	73.5	150.7	2.1	211.0	49.8	
中央	下フランジ (F)	(No.2)	73.5	151.7	2.1	260.8	61.6	58.3
		(No.3)	73.5	149.6	2.0	233.0	55.0	
桁端部	ウェブ (W)	(No.1)	73.4	149.4	2.0	186.0	44.0	49.6
		(No.3)	73.5	147.8	2.0	234.4	55.3	
	下フランジ (F)	(No.1)	73.6	150.0	2.0	227.5	53.5	53.3
		(No.3)	73.5	151.5	2.1	227.0	53.6	

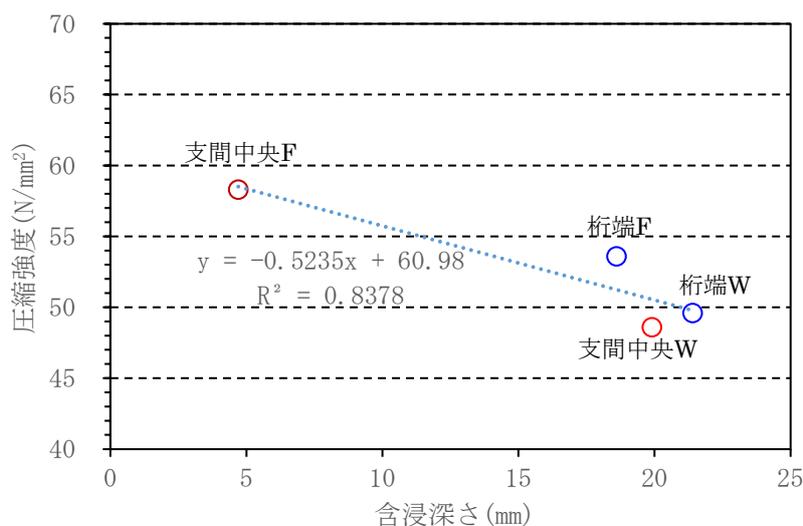


図 4.3.4 圧縮強度と含浸深さの関係

(4) 表層品質 (表層透気係数)

表層透気試験 (Torrent法) により測定した表層透気係数の結果を表4.3.6に、表層透気係数と含浸深さの関係を図4.3.5に示す。なお、図4.3.5に示す透気係数は各調査位置の平均値を用いている。表4.3.6に示す各測定位置の透気係数のうち、支間中央ウェブでは測点の1箇所で大きな値を示していた。これは、測定位置近傍にひび割れが生じており、この影響を受けた可能性が考えられたため、平均値を算出する際に除外した。

表層透気係数は、含浸材塗布前後ともにウェブに比べて下フランジの方が低く、橋軸方向の比較では下フランジで支間中央側が低く緻密な結果となり、ウェブは同等の結果となった。一方で、含浸材塗布前後で透気係数による判定結果が改善されなかった。これは、使用した含浸材が撥水機能と鉄筋防錆機能を付与する材料であり、水分を遮断するものの空気は透過する。そのため、透気係数に影響を与えなかったと考えられる。

表層透気係数と含浸深さの関係は正比例の関係が認められ、透気係数の増加に伴い含浸深さも増大することが確認された。

表 4.3.6 コンクリート表層透気係数

測定位置 (No)			透気係数 $kT(\times 10^{-16}m^2)$			
			含浸材塗布前		含浸材塗布後	
			平均	平均		
支間中央	ウェブ (W)	(No.1)	25.300*	3.890 (判定:劣)	22.140*	7.391 (判定:劣)
		(No.2)	3.456		2.942	
		(No.3)	4.323		11.840	
	下フランジ (F)	(No.1)	0.040	0.034 (判定:良)	0.011	0.133 (判定:一般)
		(No.2)	0.042		0.262	
		(No.3)	0.020		0.126	
桁端部	ウェブ (W)	(No.1)	3.385	5.383 (判定:劣)	1.422	4.110 (判定:劣)
		(No.2)	7.762		7.997	
		(No.3)	5.003		2.910	
	下フランジ (F)	(No.1)	0.645	0.686 (判定:一般)	1.192	1.014 (判定:劣)
		(No.2)	0.955		0.665	
		(No.3)	0.459		1.186	

※測定付近のひび割れの影響が懸念されたため除外

判定区分

優	良	一般	劣	極劣
0.001~0.01	0.01~0.1	0.1~1.0	1.0~10	10~100

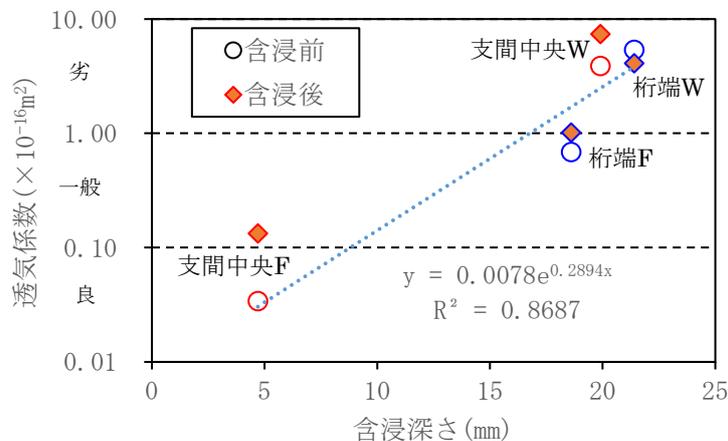


図 4.3.5 透気係数と含浸深さの関係

表層品質に関して、表層透気試験の他に透水試験（SWAT）も実施した。なお、透水試験は試験時に水漏れが発生するなど、コンクリート表面を切削したために表面全体の平坦性が不十分でありその影響を大きく受けた状況であった。平坦性に関して、透気試験の場合は測定する位置のみが平坦性を確保されていれば測定できるものの、透水試験の装置（写真4.3.5）は装置を吸着させる吸引箇所と水の吸水部の各々4か所全体が平坦である必要がある。このことから、今回の透水試験の結果は精度に疑問が残るため、参考として紹介する。

透水試験は支間中央および桁端部に対して実施し、測定位置は写真4.3.5に示すように、ウェブおよび下フランジのコア採取箇所近傍で実施した（支間中央の下フランジではハンチ部でもコア採取を行ったが、透水試験は下フランジ側面を実施）。吸水試験の結果を表4.3.7、図4.3.6示す。なお、図4.3.6に示す吸水速度は各調査位置の平均値を用いている。測定の結果、ウェブに比べて下フランジの方が吸水速度は小さくなる傾向（支間中央側の塗布後は除く）であった。



写真 4.3.5 吸水試験装置（SWAT）の概要と測定位置

表 4.3.7 10分時点の表面吸水速度（参考値）

測定位置			表面吸水速度 (mL/m ² /s) (参考値)			
			含浸材塗布前		含浸材塗布後	
支間中央	ウェブ (W)	(左)	0.136	平均 0.128 (判定: 良)	0.039	平均 0.088 (判定: 良)
		(右)	0.119		0.136	
	下フランジ (F)	(左)	0.034	平均 0.022 (判定: 良)	水漏れ	平均 0.104 (判定: 良)
		(右)	0.010		0.104	
桁端部	ウェブ (W)	(左)	0.082	平均 0.114 (判定: 良)	水漏れ	平均 0.135 (判定: 良)
		(右)	0.146		0.135	
	下フランジ (F)	(左)	0.050	平均 0.040 (判定: 良)	0.022	平均 0.031 (判定: 良)
		(右)	0.030		0.039	

判定区分 (注水完了から 600 秒時点での吸水速度 (mL/m ² /s))		
良	一般	劣
0.25以下	0.25を超え0.50以下	0.50を超えるもの

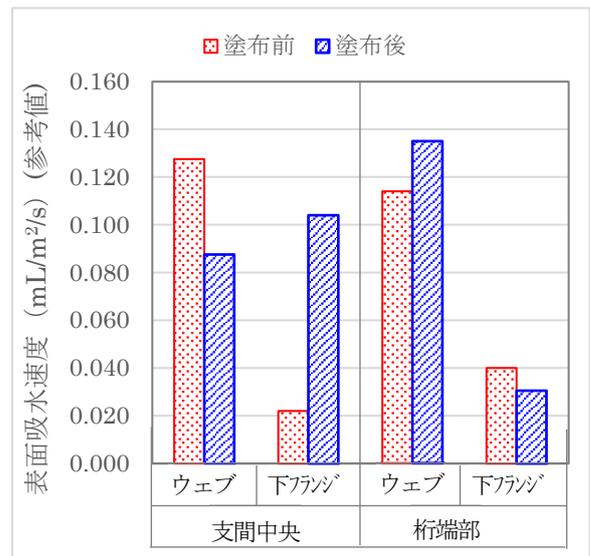


図 4.3.6 10分時点の表面吸水速度（参考値）

(5) 表層湿度

表層湿度の測定結果を表4.3.8, 図4.3.7に示す。表層湿度は, 測定位置ごとの明確な差は確認されなかったが, 含浸材の塗布後にいずれも低下することが認められた。

表 4.3.8 コンクリートの表層湿度

測定位置		表層湿度 (%)	
		含浸材塗布前	含浸材塗布後
支間中央	ウェブ	86.4	65.0
	下フランジ	84.2	69.7
桁端部	ウェブ	93.9	58.3
	下フランジ	91.6	59.4

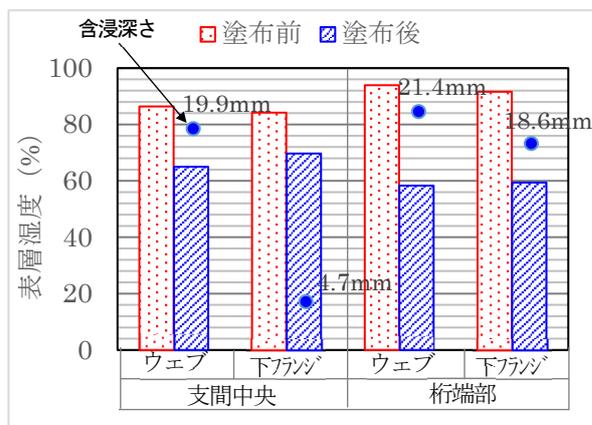


図 4.3.7 表層湿度の測定結果

(6) 撥水性

撥水性の測定結果を表4.3.9, 図4.3.8に示す。各測定位置の測点 (No.1~No.3) の関係性は概ね同様の経時変化を示しているが, 支間中央ウェブ上段のNo.3のみバラツキが大きくNo.1およびNo.2と異なる結果となっている (図4.3.8)。これは, 測定位置の不陸などによってセンサの接触性が悪かったなどが考えられるが, 原因は不明であるため測定不良と判断し, 表4.3.9に記載の平均値算出時には除外した。

表 4.3.9 撥水性 (コンクリート表面の水分率 (%))

水拭取後 経過時間	支間中央													桁端部												
	ウェブ上段					ウェブ下段				下フランジ				ウェブ上段				ウェブ下段				下フランジ				
	無塗布	No.1	No.2	No.3	※ 平均	No.1	No.2	No.3	平均	無塗布	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均
水噴霧前	1.4	0.9	0.9	1.3	1.0	1.4	1.0	1.0	1.1	2.6	2.3	1.9	2.6	2.3	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1	0.9	0.9	1.0	1.1	1.0	1.3	1.1
1分後	3.6	3.1	2.9	4.5	3.0	2.8	3.9	4.0	3.6	4.5	4.5	4.3	4.5	4.4	3.5	4.5	4.1	4.0	3.6	4.5	3.6	3.9	3.2	4.0	4.3	3.8
2分後	3.5	2.0	2.1	4.5	2.1	2.9	3.3	3.1	3.1	3.9	4.5	4.5	4.5	4.5	3.0	4.5	3.7	3.7	3.2	4.5	3.2	3.6	3.3	3.9	3.9	3.7
3分後	3.6	1.7	1.8	3.0	1.8	2.2	2.5	2.6	2.4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.3	4.1	3.4	3.3	2.6	3.7	2.9	3.1	2.8	3.5	3.5	3.3
4分後	3.2	1.5	1.3	3.5	1.4	1.7	2.0	.7	1.8	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.1	3.7	2.8	2.9	2.4	3.6	2.7	2.9	2.5	3.3	3.3	3.0
5分後	3.3	1.3	1.3	4.2	1.3	1.3	1.5	1.5	1.4	3.8	4.5	4.5	4.5	4.5	2.0	3.4	2.5	2.6	2.4	3.3	2.6	2.8	2.3	2.7	3.1	2.7
6分後	3.2	1.1	0.9	4.0	1.0	1.2	1.6	1.4	1.4	4.2	4.5	4.5	4.5	4.5	1.8	3.2	2.2	2.4	2.2	2.9	2.2	2.4	2.1	2.1	2.4	2.2
7分後	3.1	1.2	0.9	2.0	1.1	1.1	1.5	1.1	1.2	4.1	4.5	4.5	4.5	4.5	1.3	2.8	1.9	2.0	2.1	2.6	2.1	2.3	1.7	1.9	2.0	1.9
8分後	2.7	1.1	0.9	2.6	1.0	1.0	1.5	0.9	1.1	3.6	4.5	4.5	4.5	4.5	1.6	2.3	1.8	1.9	1.9	2.3	2.0	2.1	1.8	1.6	1.9	1.8
9分後	2.4	0.9	0.9	2.7	0.9	1.1	1.4	0.9	1.1	3.6	4.5	4.5	4.2	4.4	1.5	2.3	1.7	1.8	1.8	2.3	1.7	1.9	1.8	0.9	2.0	1.6
10分後	2.5	0.9	0.9	2.6	0.9	0.9	1.3	0.9	1.0	3.3	4.5	4.5	3.7	4.1	1.5	1.8	1.5	1.6	1.8	2.0	1.6	1.8	1.5	1.4	1.7	1.5
11分後	2.1	0.9	0.9	2.3	0.9	0.9	1.3	1.1	1.1	3.5	4.0	4.0	3.7	3.9	1.4	1.2	1.4	1.3	1.6	1.9	1.4	1.6	1.4	1.3	1.8	1.5
12分後	2.6	0.9	0.9	1.4	0.9	0.9	1.2	1.1	1.1	2.9	4.3	4.3	3.6	4.1	1.3	0.9	1.5	1.2	1.4	1.7	1.0	1.4	1.4	1.3	1.6	1.4
13分後	2.7	0.9	0.9	1.5	0.9	0.9	1.2	0.9	1.0	3.1	4.1	4.1	3.6	4.1	1.3	1.1	1.3	1.2	1.4	1.7	0.9	1.3	1.2	0.9	1.6	1.2
14分後	2.8	0.9	0.9	1.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	3.5	4.0	4.0	3.4	3.8	1.2	0.9	1.1	1.1	1.1	1.6	1.2	1.3	1.3	1.0	1.3	1.2
15分後	2.6	0.9	0.9	1.4	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	3.3	3.8	3.8	3.8	3.8	0.9	1.2	1.2	1.1	1.2	1.3	0.9	1.1	1.0	1.1	1.6	1.2

※支間中央ウェブ上段の平均値は, No.3の結果が測定不良と判断し未考慮で算出。

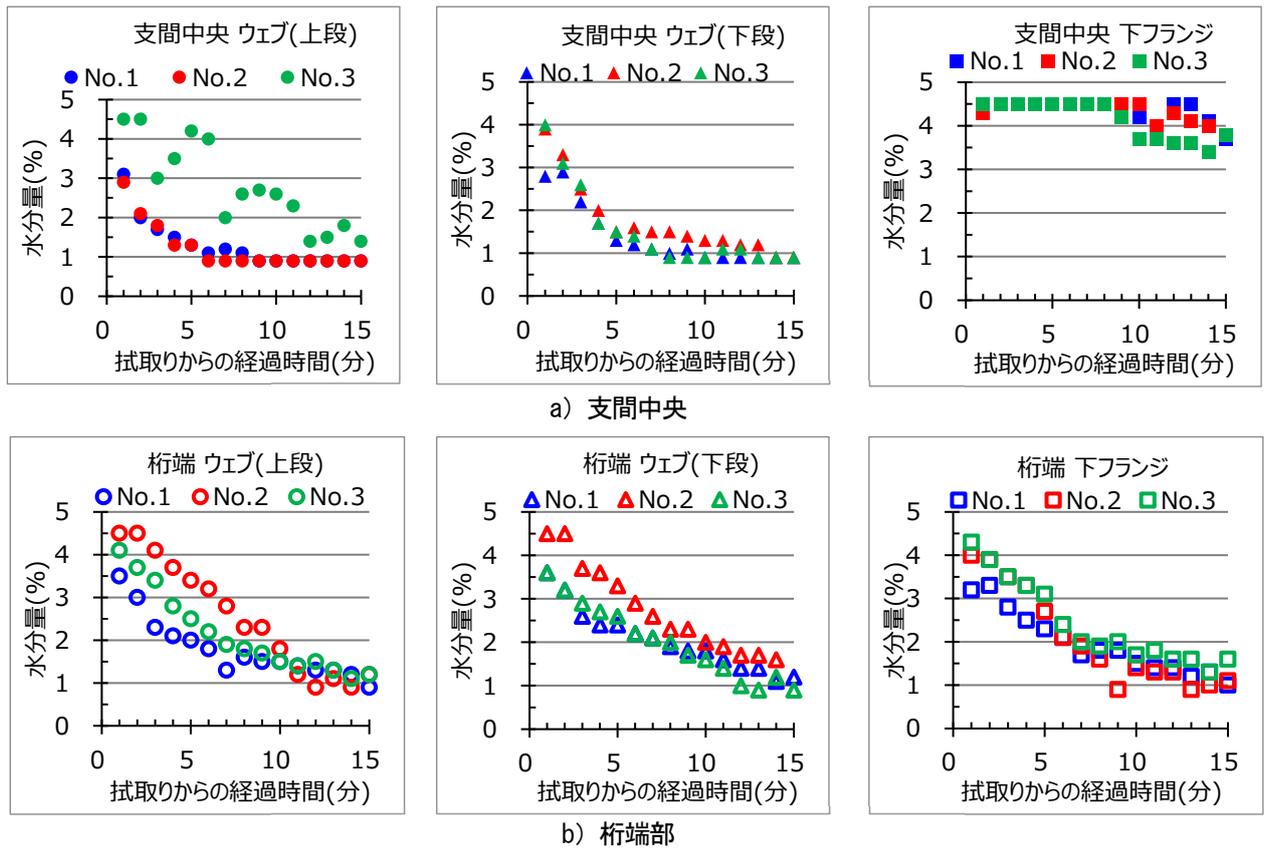


図 4.3.8 測定位置ごとの撥水性経時変化

測定位置ごとの平均値で整理した撥水性の経時変化を図4.3.9に示す。なお、図中に示すウェブ (W) の結果は、ウェブ上段と下段の測定値全ての平均値を示している。また、含浸材を塗布していない位置での測定結果 (無塗布部) も図に示す。ここで、経過時間0分の各測点のプロットおよび破線の水平線は水噴霧前の測定値 (乾燥状態となる初期値) を示しており、水噴霧後の表面水分率が初期値まで戻れば乾燥状態になったと判断できる。支間中央部下フランジの表面水分率は水噴霧前の結果 (経過時間0分の値) まで戻ることがなかった。これは、無塗布部と同様の結果であった。その他の部位 (支間中央のウェブと桁端部のウェブおよび下フランジ) では水噴霧直後から表面水分率の大幅な低下が認められた。乾燥が早まったことはコンクリート表面が撥水性を保有していたためであり、含浸材の効果を確認できた。

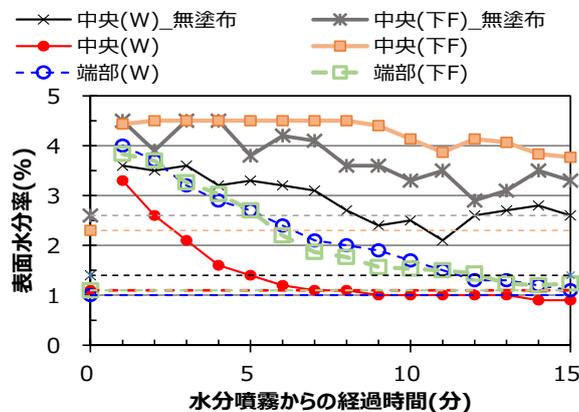


図 4.3.9 撥水性の測定結果

4.3.4 含浸材塗布の評価指標に関する検討

含浸材は、PC桁などに用いられる低水セメント比のコンクリートでは含浸しにくく施工に時間を要することや、含浸材の塗布効果を確認することが困難であるなどの課題がある。塗布効果確認については各種検討が行われているものの、これらは表層の撥水性や間接的に含浸深さを確認する方法であり、含浸材を塗布する前に施工するコンクリートの含浸し易さなどに着目した検討は見受けられない。そこで、含浸材塗布前や塗布後の評価方法に着目し、今回実施した各調査（圧縮強度、表層品質、表層湿度、撥水性）の有用性について考察する。

(1) 含浸材塗布前の含浸性評価

含浸材の施工において、含浸のし易さは施工に要する時間に直結するため、施工時の労務や工程に大きな影響を与える。そのため、事前に含浸のし易さを把握することは重要である。今回実施した調査のうち、含浸材塗布前の調査結果のみで含浸のし易さを評価できる可能性のある項目は、圧縮強度と表層品質（透気係数測定）となる。ここで、含浸材は水分に反応することで撥水層を形成するため、長い時間をかければ深くまで含浸が進むわけではない。よって、含浸のしにくさは含浸深さと相関があると考えられる。そこで、圧縮強度および表層品質の試験結果で評価した含浸深さに対する関係図（図4.3.4、図4.3.5）を比較すると、含浸深さとの相関性は、圧縮強度に比べて表層品質（透気係数）の方が高い結果である。なお、圧縮強度は試験規格がJIS化されており高い精度で定量評価できる指標であるのに対し、透気係数は国内での規格がなく、調査で使用したTorrent法は測定値に幅を持たせて評価される方法である。また、本来は新設コンクリートの透気係数を測定するために開発されたものであるため、既設コンクリート構造物の補修効果の判定に用いることにはさらなる検討が必要である。

(2) 含浸材塗布後の効果確認

今回実施した調査のうち、含浸材の塗布効果（含浸材塗布前後の比較が可能）を評価できる可能性のある項目は、表層品質（透気係数測定）、表層湿度、撥水性となる。

表層品質および表層湿度、撥水性の測定結果を元に式4.3.2より求めた抑制率と含浸深さの関係を図4.3.10～図4.3.12に示す。

$$R = 100 - (D \div C) \times 100 \quad (\text{式4.3.2})$$

ここに、R:抑制率(%), C:塗布前の測定値（撥水性は無塗布部の15分後測定値）、D:補修後の測定値（撥水性は塗布部の15分後測定値）。なお、撥水性の無塗布部の測定値はウェブと下フランジの平均値とした。

図4.3.10～図4.3.12より、相関性は表層湿度、表層品質、撥水性の順に高くなる結果である。なお、表層品質に関しては抑制率が負側(-側)となっている。含浸材塗布により表層品質が悪くなるとは考えにくいことから、表層の透気性は今回使用した含浸材が影響を与えるものではないと言える。さらに、調査で使用したTorrent法は測定値に幅を持たせた評価法であるため、塗布前後の比較は同等の結果と判断できる。このことから、含浸材の効果確認にTorrent法を用いることは困難であると言える。

表層湿度および撥水性では、支間中央下フランジを除いて含浸材塗布後の改善が確認された。支間中央下フランジでも含浸材が浸透していることは確認されており、改善効果が確認されなかった原因は不明であるが、長年供用

された低水セメント比のコンクリートに対する効果確認として表層湿度や撥水性の測定は利用できる可能性があると考えられる。また、両調査手法とも測定原理上、定量評価が可能であり、かつ、精度も高いと言える。

含浸材の塗布効果確認として、含浸深さの測定結果のみで評価される事もあったと考えられるが、PC桁などに用いられる低水セメント比のコンクリートに対して含浸深さのみで評価することは必ずしも正しい評価とは言えない。これは、低水セメント比のコンクリートでは表層が緻密であるため、含浸深さは浅いが劣化因子も浸透しにくくなることから、表層部の撥水性と付与された機能の浸透が成されれば含浸材の効果は十分に得ることができている。そのため、低水セメント比のコンクリートに対しては、含浸深さの確認に加えて、表層湿度や撥水性を確認することで効果確認の精度が向上すると思われる。

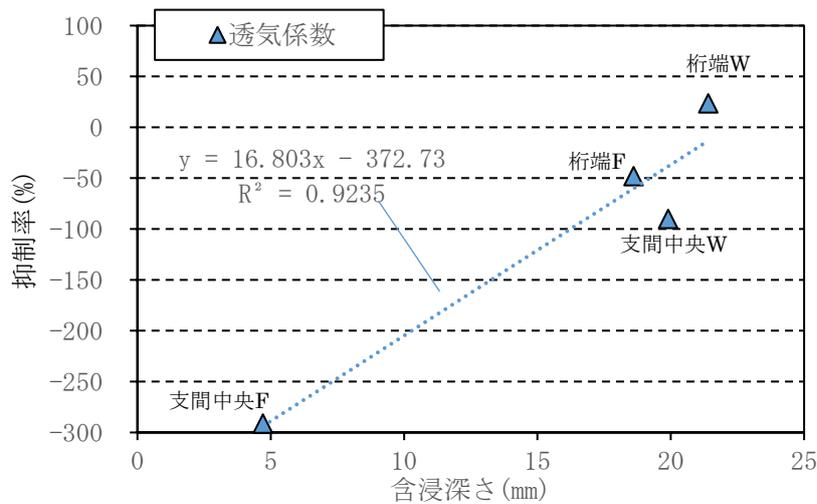


図 4.3.10 抑制率と含浸深さの関係（表層品質）

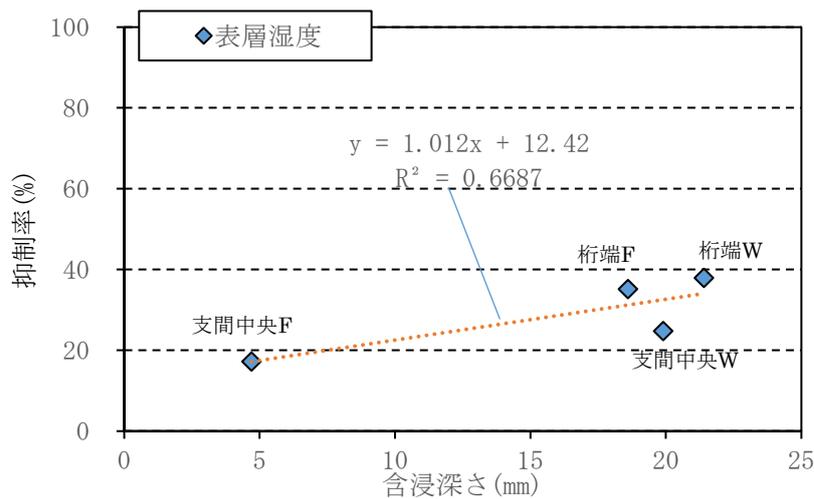


図 4.3.11 抑制率と含浸深さの関係（表層湿度）

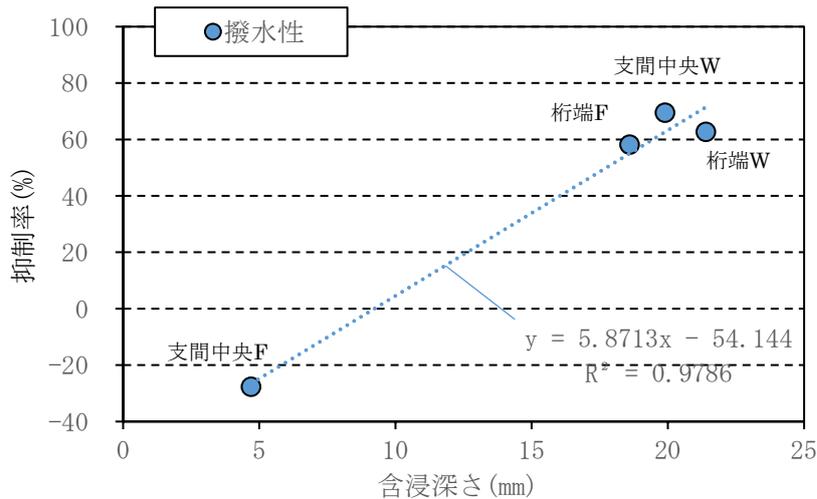


図 4.3.12 抑制率と含浸深さの関係（撥水性）

4. 4 実橋を用いた現地調査による塩化物イオン濃度の経年変化分析

4. 4. 1 塩化物イオン濃度の調査方法

本橋では塩害対策として一部の径間で表面含浸工法が2009年に実施されており、第13径間では塩化物イオン濃度の過年度調査が補修後ではあるが1箇所で行われていた。対象径間は補修後の劣化が激しい径間の一つであり、海側外桁となるG6桁の海側面は特に劣化が激しい状況であった（図4.4.1）。そこで、過年度に調査された近傍と劣化有無に着目した5箇所の調査を行った（調査位置は図4.4.1参照）。調査方法は、3章と同様に、塩化物イオン量（JIS A 1154に準拠した電位差滴定法による全塩化物イオンの定量分析）と中性化深さ（JIS A 1152に準拠）を測定した。

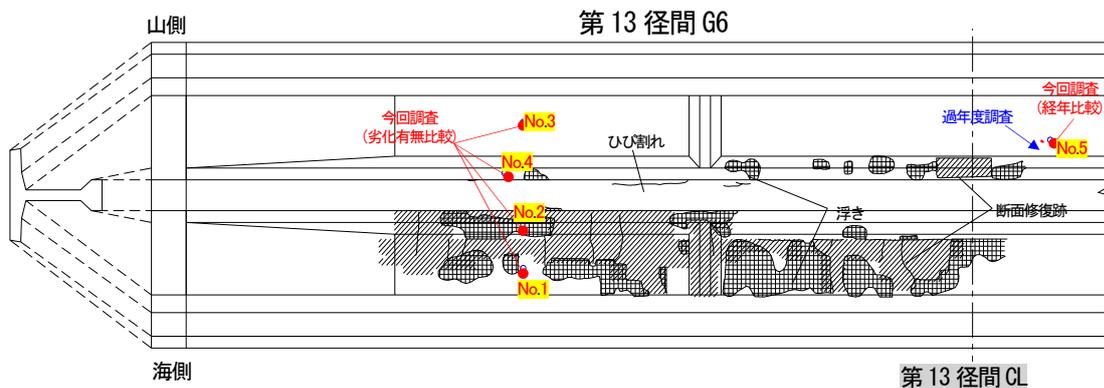


図 4.4.1 塩化物イオン濃度調査位置（展開図）

4. 4. 2 塩化物イオン濃度の調査結果

補修後の塩化物イオン濃度分布を表 4.4.1 と図 4.4.2 に示す。また、表 4.3.4 に記載した第 13 径間の含浸深さ（現地調査結果）も表 4.4.1 に併記する。表 4.3.4 に示した「支間中央部ウェブ」「1/4 径間下フランジの劣化部付近」「1/4 径間下フランジの健全部」が、それぞれ表 4.4.1 の No.5, No.2, No.4 に対応している。

表面含浸工法で補修された PC 桁は、補修直後との比較において塩化物イオン濃度分布に差異がほとんどなく、10 年程度ではあるが遮塩効果はあったものと考えられる。一方で、3 章の表面被覆工法の検討では遮塩効果を有していたものの、塩化物イオンの再拡散現象により鉄筋付近の塩化物イオン濃度が経年で増加していたが、本調査で対象とした径間では塩化物イオンの再拡散現象は確認されなかった。これは、表面被覆ではコンクリート内の水分が放出されにくいことに対し、含浸材は表面被覆に比べて水分が放出されやすく乾燥環境となった（表 4.3.8）ため、塩化物イオンの浸透が抑制されたことが一つの要因として考えられる。

劣化有無の比較では、ウェブおよび下フランジともに劣化部の塩化物イオン濃度が高い結果であったが、下フランジでは健全部（No.4）の鉄筋付近塩化物イオン濃度も鋼材腐食発生限界濃度を超える値を示している。塩化物イオン濃度のみに着目すると、下フランジ健全部の鉄筋も腐食していると想定されるが、下フランジの劣化有無部（No.2 と No.4 付近）ではつり調査による鉄筋腐食状況を確認した結果、健全部の鉄筋はわずかに発錆している程度で鋼材に断面欠損などの劣化は生じていなかった（写真 4.4.1）。この高い塩化物イオン濃度でも鉄筋腐食が生じなかったのは、先に腐食した部位が犠牲陽極となり防食されたことが一つの要因として考えられる。

表 4.4.1 表面含浸工法による補修後の塩化物イオン濃度分布

		過年度調査(kg/m ³)	今回調査(kg/m ³)				
		2012年 (橋齢37年)	2020年 (橋齢45年)				
		経年比較		劣化有無比較			
				劣化部 (海側)		健全部 (山側)	
		ドリル法	No.5	No.1(Web)	No.2(下フ)	No.3(Web)	No.4(下フ)
表面からの距離	0-2cm	5.10	4.89	9.36	6.96	3.96	5.88
	2-4cm	1.23	1.23	8.57	6.61	0.97	5.20
	4-6cm	0.26	0.35	3.39	3.75	0.28	1.63
	6-8cm	0.20	0.17	0.48	1.30	0.28	0.41
中性化深さ(mm)		13.0	18.0	13.6	9.0	14.0	18.0
含浸深さ (mm)		-----	18.3mm	----	0.0mm	----	0.0mm

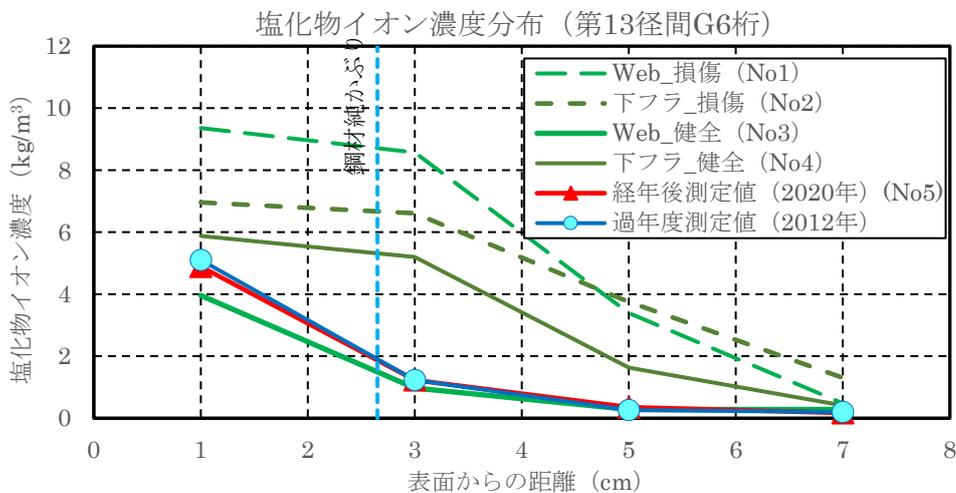


図 4.4.2 塩化物イオン濃度分布図 (測定値)

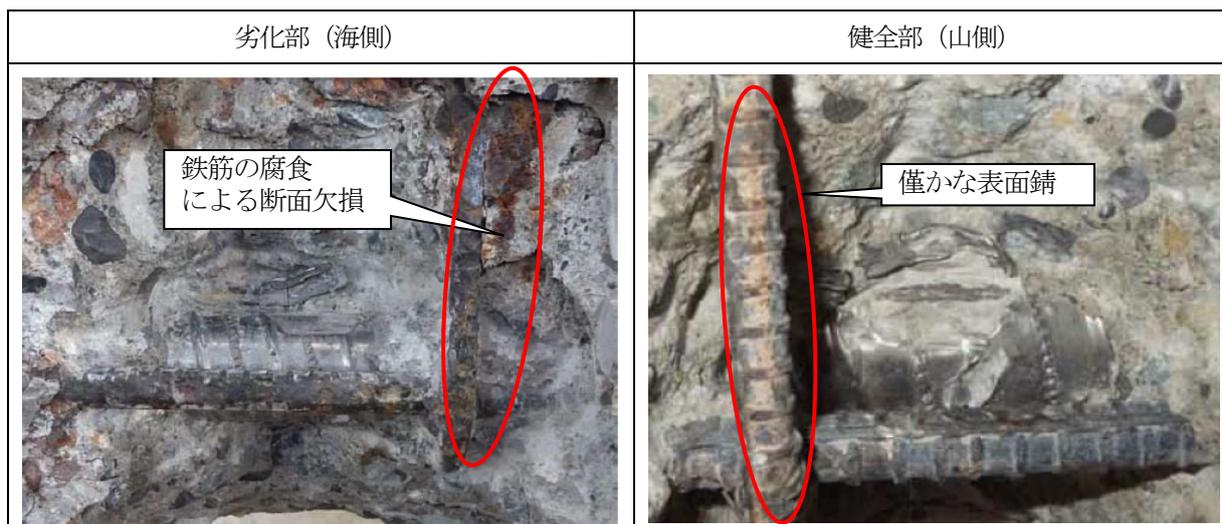


写真 4.4.1 下フランジのはつり調査結果

鉄筋位置の塩化物イオン濃度（表面からの距離 2-4cm）と含浸深さに着目すると、含浸深さが 0.0mm であった No.2 と No.4 は、過去の調査結果はないものの塩化物イオン濃度が高い結果であり、補修後も塩化物イオンが表面から浸透した可能性が伺える。一方で、含浸深さが 18.3mm であった No.5 では塩化物イオン濃度が低く、過年度調査結果からの変化が確認されていないことから、含浸材が残っている位置では塗布後 10 年程度経過しても遮塩効果はあるものと思われる。

4. 5 補修効果に関する考察および表面含浸工法の適用上の留意点

4.3および4.4より、表面含浸工法のうち、今回調査を行った撥水性を付与する含浸材は低水セメント比のコンクリートでも含浸し、表面の撥水性が概ね確保される結果であった。また、10年程度経過しても含浸材が表層部に残っている場合は、遮塩性も保有されており補修効果を十分に得ることができる材料であることが確認された。なお、現地調査結果より含浸材が残っていない部位（含浸深さ0.0mm）では内部鋼材が腐食している部位と健全な部位が混在したことから、補修効果について評価することは困難な結果であった。

今回の調査結果より、表面含浸工法を既設PC橋へ適用する場合で、含浸材塗布後再劣化する要因として、①PC桁などに用いられる低水セメント比のコンクリートでは含浸材が浸透しにくいこと、②ウェブに比べて下フランジの方が強度および緻密性が高いため含浸材は浸透しにくいこと、が考えられる。施工時には、この特徴を理解した上で施工することが重要となる。なお、低水セメント比のコンクリート表層部は緻密であり劣化因子は浸透しにくいため、含浸深さのみで含浸材の効果を評価するのではなく、表層湿度や撥水性も確認することで評価精度が向上すると思われる。さらに、今回使用した含浸材（防錆機能を保有）のように撥水性以外の効果を付与した材料では、表層部の撥水性や含浸深さが小さい場合（例えば今回の結果の支間中央下フランジ部など）でも、内部コンクリートの成分分析を併用した評価が必要となる材料があることも把握しておくべきである。

本研究における調査結果をもとに、施工上の留意事項を以下に整理する。

- ・含浸材の塗布管理は設計塗布量のみであるが、無色透明の材料であるため塗布忘れが生じても気付かない懸念

がある。そのため、施工後の塗布有無確認については撥水性など非破壊手法により評価するのが良い。

- ・塗布効果の確認は含浸深さのみではなく、表層湿度や撥水性を併用することや、使用する含浸材の特徴も考慮した評価法を実施する必要がある。
- ・鋼材位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度 (C_{lim}) を超過している場合、表面含浸工法を適用しても腐食が進行し続ける懸念がある。そのため、事前に鋼材位置の塩化物イオン濃度が C_{lim} 以上となっていないか確認し、浸透した塩化物イオンを除去してから含浸材を塗布する必要がある。
- ・低水セメント比のコンクリートは含浸し難いことに加え、浸透性の違い（ウェブに比べて下フランジが含浸し難い）により塗りムラが懸念されるため、施工時間を確実に確保して施工を行う必要がある。

4. 6 本章のまとめ

本章における検討を通じ、以下の知見が得られた。

- ・PC桁などに用いられる低水セメント比のコンクリートでは、RC構造物を想定したコンクリートに比べ表面含浸材の施工間隔と塗布回数を増加させる必要がある。
- ・含浸深さは、下フランジに比べてウェブで、支間中央部に比べて桁端部で大きくなる傾向が確認された。
- ・含浸深さを含浸材塗布前に評価する手法として、透気係数が圧縮強度よりも相関性が高いことが確認されたが、定量評価が困難であり更なる検討が必要である。
- ・含浸効果を補修後に評価する手法としては、撥水性が表層湿度よりも相関性が高いことが確認されたが、撥水性のみでは評価困難な位置（支間中央下フランジ）も存在したため、複数の調査手法（含浸深さ・表層湿度・撥水性）を組み合わせることで評価精度が向上する。
- ・現地調査での含浸深さは、試験施工と同様に下フランジに比べてウェブで大きいことが確認された。
- ・含浸材塗布から10年程度経過しても含浸深さが確認された部位では、含浸材の遮塩性能が保持されていることが確認された。
- ・本稿3章の表面被覆工法においては、補修後の塩化物イオンの再拡散が確認されたが、同一環境で施した含浸材ではコンクリート表層部が乾燥することで再拡散が生じていない結果であった。

4章の参考文献

- 4-1) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針（案），コンクリートライブラリー第119号，2005.4
- 4-2) 細田暁，今野拓也，松田芳範，小林薫：シラン系表面含浸材を用いた最適な表面保護システムのための基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol.64，No.2，pp.323-334，2008.5
- 4-3) 中嶋亮介，鶴田浩章：劣化を生じたコンクリートにおける表面含浸材の併用による劣化抑制効果に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1681-1686，2013
- 4-4) 土木研究所：コンクリート表面保護工の施工環境と耐久性に関する研究，土木研究所資料第4186号，2011.1

5 章 塩害を受けた既設 PC 橋に適用した鋼板接着工法の補修効果に関する検討

5. 1 検討概要

鋼板接着工法は、コンクリート部材の下面または側面に鋼板をアンカーボルトで取付け鋼板の縁をシーリング後、部材と鋼板の隙間にエポキシ樹脂を注入し、既設部材との一体化を図り劣化や活荷重増などにより不足した耐荷力を回復または向上させる工法である。

今回調査した沿岸部の橋梁で、鋼板接着工法が塩害補修のための表面保護工法として用いられた可能性があることが確認された。この採用の経緯については確認することができなかったが、本事例と同様の補修工法が適用された構造物に対する点検時の着眼点や対応などの参考として、本補修工法の効果について記録が残されていることは重要であると考えられる。

本研究では、PC 桁の塩害対策に鋼板接着工法が適用された撤去桁を用いて、補修後 40 年以上が経過した現在の補修効果を検証するため、鋼板接着工法の遮塩性能について各種調査を実施した。

5. 2 対象橋梁の概要

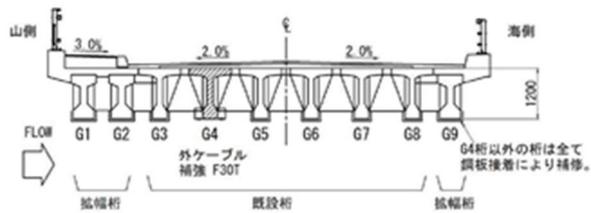
対象はポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋（3 径間）であり、その一部（主桁）を調査対象とした。表 5.2.1 に橋梁諸元、図 5.2.1 に径間内の調査対象桁の位置を示す。対象の橋梁は北海道の太平洋沿岸に位置し、風も強く波浪の影響を受ける厳しい塩害環境下で供用されていたが、橋齢 14 年目の 1976 年（昭和 51 年）から補修対策としてひび割れ補修工や主桁下面の鋼板接着工や主桁・床版の断面修復工が、補強対策として主桁の外ケーブル補強工が繰り返し施工されてきた。表 5.2.2 に調査対象橋梁の維持管理履歴、写真 5.2.1 に調査対象 PC 桁の保管状況を示す。

なお、対象橋梁は新橋への切換え後、2017 年（平成 29 年）に撤去されて、このときに調査対象として譲り受けた。

表 5.2.1 橋梁諸元

構造形式	ポストテンション方式 3 径間 PC 単純 T 桁橋
架設年	1962 年（昭和 37 年）
橋 長	67.0m
支間割	3×21.54m
全幅員	10.4m
架設条件	沿岸（太平洋）

断面図



平面図

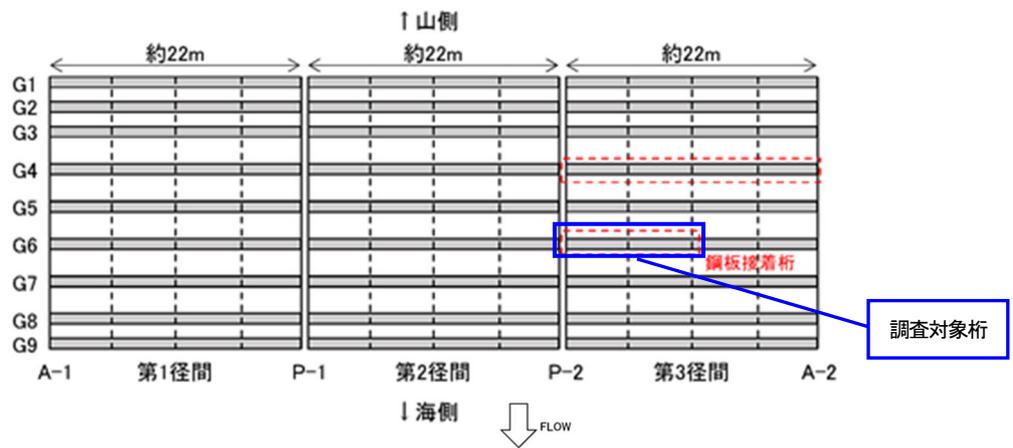


図 5.2.1 橋梁一般図と調査位置 (単位 : mm)

表 5.2.2 調査対象橋梁の維持管理履歴

年度	補修・補強内容
——	1962年(昭和37年)度:車道部架設 ==> 1973年(昭和48年)度:橋梁拡幅(両側拡幅)
1976年(昭和51年)度	主桁下面に鋼板接着による補修を実施(既存資料に採用経緯や設計計算書などがなく補修と想定)
1988年(昭和63年)度	定期点検(排水装置土砂つまり,排水管腐食,橋体にひび割れや剥離,支承の塗装劣化)
1992年(平成4年)度	橋体塗替塗装(橋体完成からどこかの時点で橋体に塗装が施されたことが想定される)
1995年(平成7年)度	杏座モルタル補修,主桁下面に鋼板接着による補修を実施(追加) 橋梁調査(鋼板と樹脂の剥離があり,要樹脂再注入)
1996年(平成8年)度	主桁・床版断面修復,主桁外ケーブル補強,伸縮装置取替,排水管取替,塩害塗装
2003年(平成15年)度	橋梁定期点検
2004年(平成16年)度	塩害点検(下部工鉄筋位置で0.88kg/m ³ より上部工鉄筋位置では1.2kg/m ³ 以上と推定)
2005年(平成17年)度	杏座縁端拡幅,落橋防止装置追加
2008年(平成20年)度	塩害点検(上部工鉄筋位置で3.14kg/m ³)
2009年(平成21年)度	橋梁定期点検
2010年(平成22年)度	損傷の大きい部分で載荷試験を実施し,供用に対する安全性を確認
2011年(平成23年)度	防護柵取替,地覆補修を実施
2012年(平成24年)度	塩害点検(上部工鉄筋位置で3.7kg/m ³)
2014年(平成26年)度	橋梁定期点検
2017年(平成29年)度	撤去



写真 5.2.1 調査対象 PC 桁の保管状況（土木研究所敷地内）

5. 3 実橋における鋼板接着工法の性能確認・調査

5. 3. 1 調査概要

補修後 40 年以上が経過した鋼板接着工法の補修効果を確認するため、撤去後に調査対象として受領した PC 桁を土木研究所に運搬し、表 5.3.1 に示す調査項目の実施を計画⁵⁻¹⁾した。

表 5.3.1 調査項目一覧（当初計画）

	調査項目	調査方法		調査箇所
1	外観変状	目視・打音調査		下フランジ底面および側面 鋼板接着部：幅 0.6m×長さ 12m
2	鋼板の接着強度	付着調査	付着試験	健全部 浮き部（軽度の浮き）
3	接着剤の材料分析	樹脂の 状態調査	FT-IR 分析 (フーリエ変換赤外分光分析)	健全部 浮き部（軽度の浮き、重度の浮き）
4	接着剤の断面観察、 元素調査		反射電子像観察、 EDS 分析 (X 線分析)	健全部 浮き部（軽度の浮き、重度の浮き）

5. 3. 2 調査項目および調査方法

調査対象の鋼板接着工法による補修断面を図 5.3.1 に示す。

写真 5.2.1 に示すように PC 桁は山側面を下側にして倒した状態での保管であったため、調査範囲は図 5.3.1 に示すように保管時上面（海側面）と保管時側面（底面）とした。

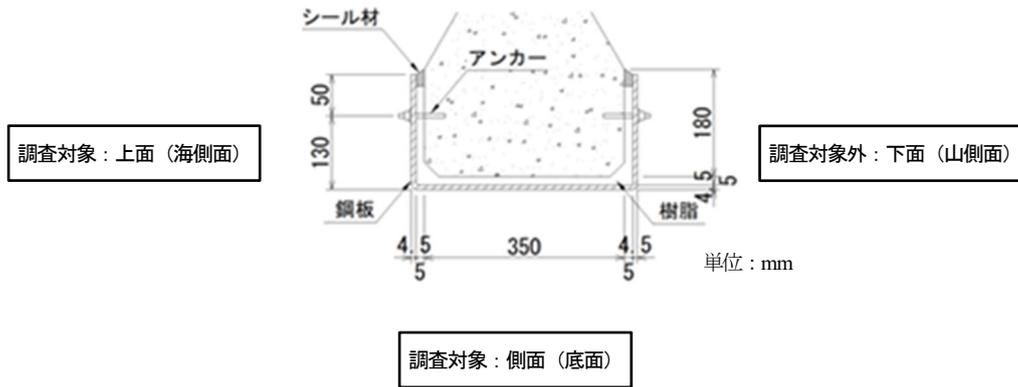


図 5.3.1 鋼板接着補修断面

(1) 目視・打音調査

PC 桁下フランジの鋼板取付け部において、打診棒を用いて打音調査を行い(写真 5.3.1)、鋼板の浮きの範囲を確認した。浮きは軽微な浮きと完全な浮きを打音の違いで判別し、その結果から付着試験および分析試料採取箇所を選定した。

付着試験については、打音調査により完全な浮きがあった場合には切削した際に鋼板が剥がれ落ちる可能性があるため、健全部と軽微な浮きがある箇所に対して行うこととした。

分析試料採取箇所は、打音調査による浮きの状態（健全、軽微な浮き、完全な浮き）のすべてを対象として選定した。



写真 5.3.1 下フランジの打音調査状況

(2) 付着調査

建研式引張試験により鋼板とコンクリートの接着性能を確認した。調査対象は目視・打音調査で健全部と判定された箇所とした。試験の概要を図 5.3.2 に示すが、以下の理由により当初計画と異なる方法で実施した。該当箇所の鋼板表面の錆等をグラインダーで除去し(写真 5.3.2, 写真 5.3.3), 鉄筋カッターおよびコンクリートカッターを用いて鋼板表面からコンクリート躯体まで 40mm×40mm の切れ込みを入れた。カッターによる切削の際にすべての箇所で鋼板が剥離したため、樹脂層の表面に二液性のエポキシ樹脂接着剤(ポンドトップクイック アオイ化学工業(株)社製)を用いて載荷用治具(アタッチメント)を貼付した。接着剤硬化のため約1日間養生した後、付着試験を実施した(写真 5.3.4)。付着試験には、サンコーテクノ(株)製 R-20000ND を用いた。

なお、剥離した鋼板の接着面側には防錆剤と思われる灰色の付着物が確認された。また、健全部以外の箇所ににおいては、切削の際に樹脂層までもが剥離したため、本調査の対象は健全部のみとしている。

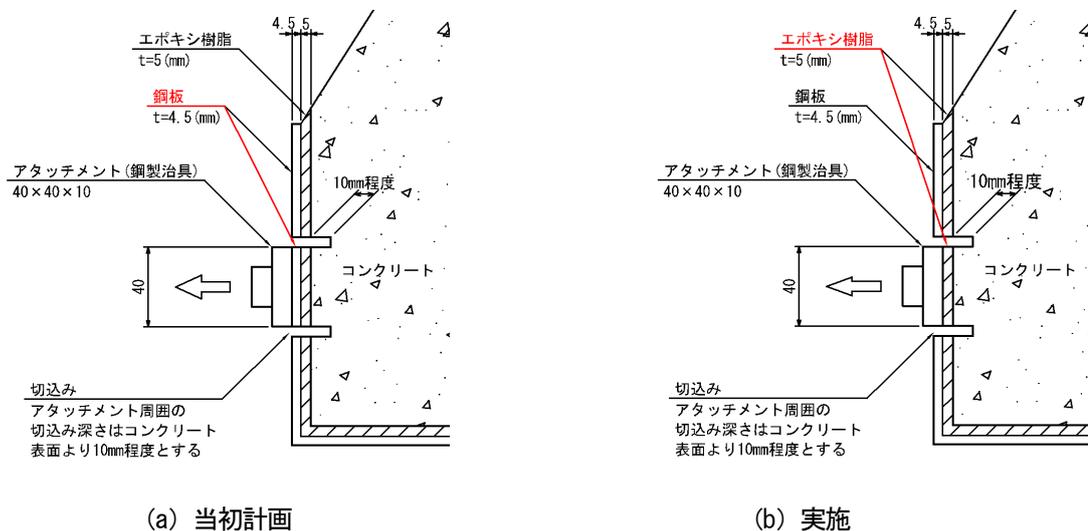


図 5.3.2 付着試験概要



写真 5.3.2 鋼板表面錆除去状況

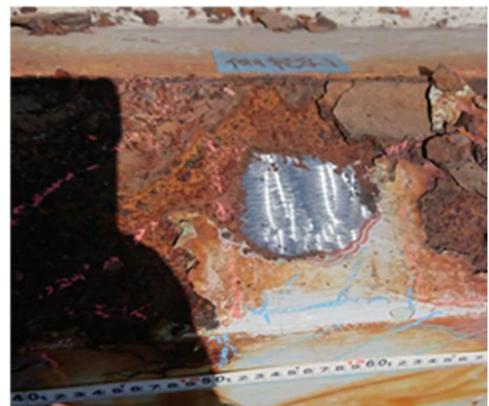


写真 5.3.3 鋼板表面錆除去



写真 5.3.4 付着試験の実施状況

(3) 樹脂の状態調査

FT-IR 分析（フーリエ変換赤外分光分析）と反射電子像観察および EDS 分析により樹脂の状態調査を実施した。調査対象は目視・打音調査で鋼板の浮きの状態が異なる部位（健全部・軽浮き部・浮き部）を選定し、試料（40mm×40mm）を採取した。

1) FT-IR 分析

採取した試料の接着剤の状態や劣化の有無を確認するために FT-IR 分析（フーリエ変換赤外分光分析）を実施し、樹脂に対して赤外線吸収スペクトルの測定を行った。

2) 反射電子像観察および EDS 分析

コンクリートと樹脂の接着部の状態を確認するため、走査型電子顕微鏡（SEM）により反射電子像を観察し、合わせて SEM 付属のエネルギー分散型 X 線分析装置（EDS）を用いて構成元素の定性分析を行った。観察・分析を行うため、表 5.3.3 の樹脂試料を 1cm 角程度の小片とし、別途硬化性樹脂を用いて包埋し、観察面を鏡面研磨および炭素蒸着を行った。

5. 3. 3 調査結果および考察

(1) 目視・打音調査

目視・打音調査結果を図 5.3.3 に、打音調査による分類の条件と付着試験および試料分析の分類について表 5.3.2 に、樹脂の状態調査（試料分析）を行った採取試料の外観を表 5.3.3 に示す。

表 5.3.2 打音調査による分類

呼称	打音調査による状態	付着試験	試料分析
底軽浮	下フランジ底面に鋼板の軽微な浮きがあった箇所	—	1 箇所
側軽浮	下フランジ側面に鋼板の軽微な浮きがあった箇所	—	—
底浮	下フランジ底面に鋼板の完全な浮きがあった箇所	—	1 箇所
側浮	下フランジ側面に鋼板の完全な浮きがあった箇所	—	—
底健	下フランジ底面に鋼板の浮きがなく健全であった箇所	3 箇所	1 箇所

図 5.3.3 より桁端から 4m 程度までの下フランジ底面では、鋼板の浮きもなく PC 桁と密着し腐食もしていない箇所（底健 2）が広範囲に認められた。一方で、それ以外の支間中央側の底面の鋼板には完全な浮きが発生している範囲が多く、一部の僅かな範囲で軽微な浮きが発生していた。また、側面の鋼板は全体的に浮いている状態であり、腐食による断面欠損も著しい状態となっていた。

補修跡（写真 5.3.5）については、過去の点検調査時に鋼板を切断撤去して塩化物イオン濃度などを測定した後にポリマーセメントモルタルなどで後埋めした位置と推察される。

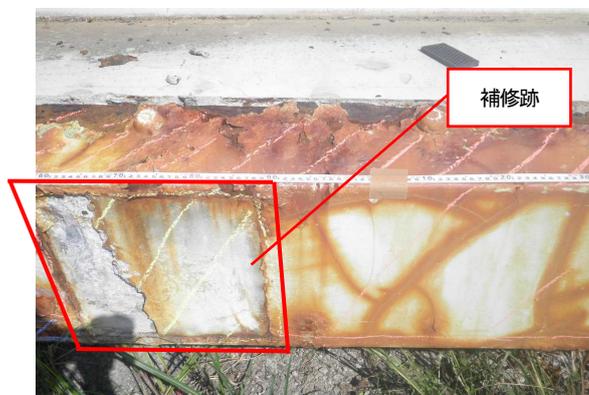


写真 5.3.5 補修跡

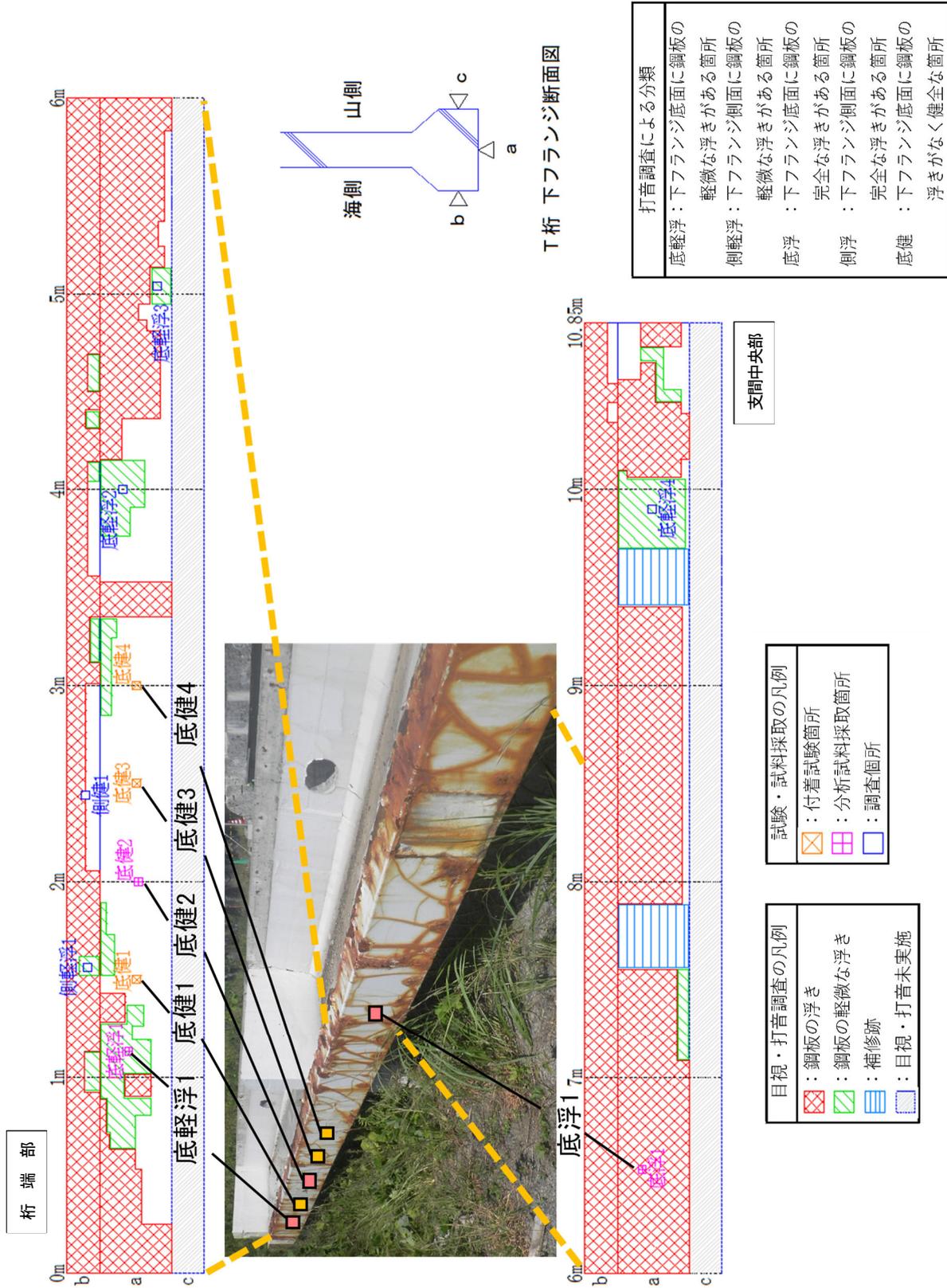
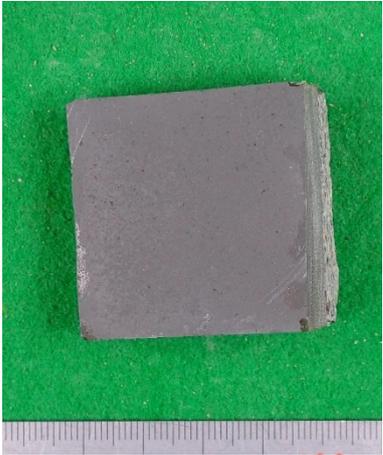
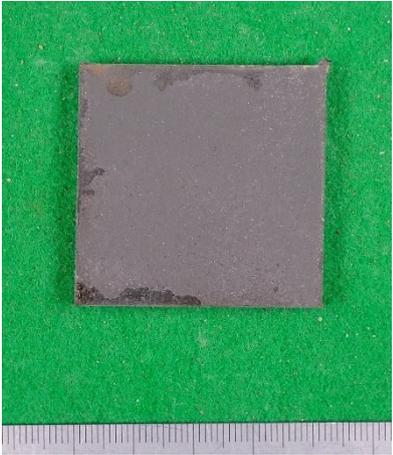


図 5.3.3 下フランジの目視・打音調査結果

表 5.3.3 採取試料の外観

試料名	試料外観	
	樹脂層面	鋼板面
底健 2		
底軽浮 1		
底浮 1		

(2) 付着調査

付着試験結果を表 5.3.4 に示す。ここでは、参考として、接着剤を用いて貼付した炭素繊維シートとコンクリートの付着試験の規格値 (構造物施工管理要領⁵⁻²⁾) より、「コンクリート母材破壊もしくは、付着強度 1.5N/mm² 以上」を比較対象とした。

付着試験の結果、健全部の樹脂と PC 桁表面コンクリートとの付着強度は、1.15~2.14N/mm²あり、参考とした規格値にはわずかに及ばない箇所もあるが試験後の剥離面に水分などが侵入した痕跡なども見られなかった。このことから、外部からの劣化因子の侵入を防止する密着した状態を維持し続ける程度の付着は確保されていたと言える。健全部以外の箇所についても、剥離面に水分などの侵入の痕跡がないものについては密着した状態を維持し続ける程度の付着は確保されていたと推定される。

なお、破断面 (位置) については、試験により破断した材料の状況を目視で確認し判断した。

表 5.3.4 付着試験結果

部 位			調査 記号	破断面寸法* (mm)	断面積 (mm ²)	最大荷重 (N)	付着強度 (N/mm ²)	破断面 (位置)
T桁 下フランジ	底面	健全部	底健1	37.4 × 40.4	1511	1740	1.15	樹脂-PC桁躯体界面
			底健4	38.4 × 40.0	1536	2457	1.60	樹脂-PC桁躯体界面
			底健3	39.0 × 39.1	1525	3270	2.14	樹脂-PC桁躯体界面, PC桁躯体面

※破断面寸法は、試験で破断させた断面寸法の実測値を示す

(3) 樹脂の状態調査

試料はいずれも防錆剤と思われる物質が付着していた (表 5.3.3)。これらの試料を対象に FT-IR 分析 (フーリエ変換赤外分光分析) と反射電子像観察および EDS 分析を実施した。

1) FT-IR 分析

FT-IR 分析結果を図 5.3.4 に示す。反射率の評価は、底健 2(赤)が健全で劣化していないものと判断し、この結果を標準と仮定したうえで、底軽浮 1 と底浮 1 の結果と比較した。なお、図示する結果に関して、全ての結果が一致したため、各々の結果が確認できるよう、底軽浮 1 (青) は 5%、底浮 1 (緑) は 10% ずらした値で表示した。図より、鋼板の浮きの状態の違いによる樹脂層の反射率と波数に明確な差は認められなかった。また、調査した桁は中桁であり下フランジ上面の鋼板とコンクリートの界面にも直接紫外線が当たらない位置にあり、更に鋼板に囲まれていたため樹脂層自体は密封された状態にあったと推定できる。このため、樹脂層自体は変質していないものと考えられる。

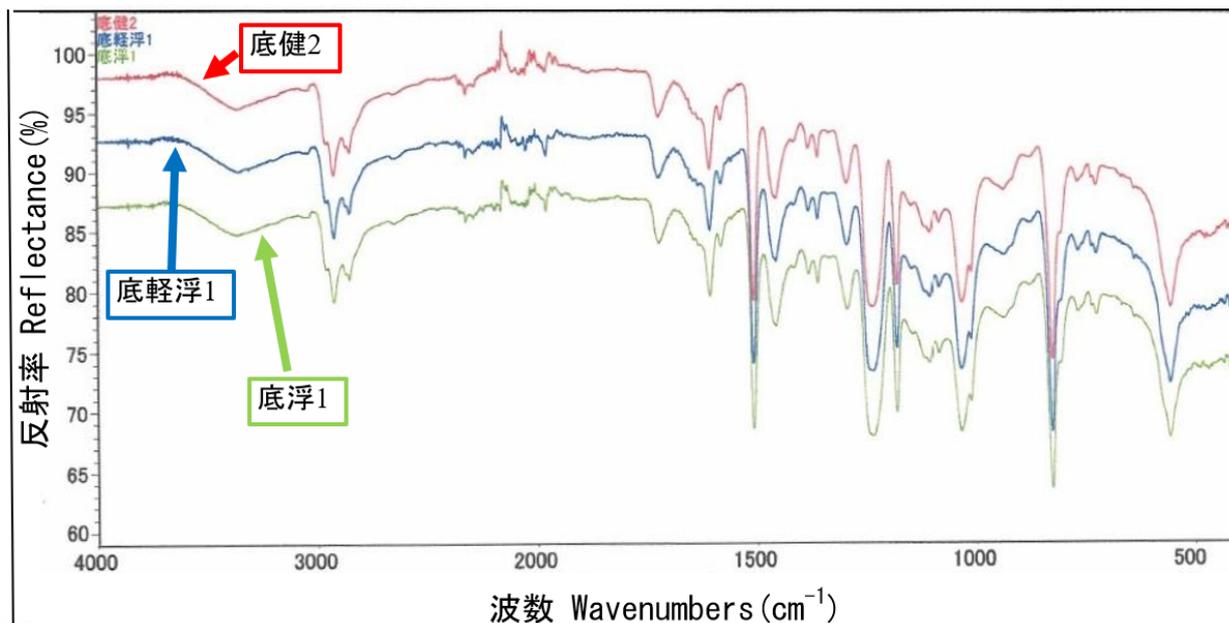


図 5.3.4 FT-IR 分析結果の各試料の比較

2) 反射電子像観察およびEDS 分析

反射電子像観察およびEDS 分析結果を図 5.3.5～図 5.3.7 に示す。

(a) 防錆剤と思われる付着物について

いずれの試料にも樹脂と鋼板の界面に防錆剤層 1 が確認された。底健 2 (図 5.3.5) の反射電子像 2,000 倍によると、白色に観察される粒子が認められ、この粒子は EDS1 の分析結果より亜鉛 (Zn) の粒子であると判断された。以上より、防錆剤は亜鉛系防錆剤と特定された。なお、防錆剤層 2 も同様の亜鉛系防錆剤であると推測されるが、防錆剤を 2 層とした理由は特定できなかった。観察された防錆剤と思われる層のおおよその厚さを表 5.3.5 に示す。

表 5.3.5 防錆剤と思われる層のおおよその厚さ

試料名	防錆剤層 1*	防錆剤層 2	1 と 2 の間隔
底健 2	10~40 μm	10 μm	1.5 mm
底軽浮 1	30 μm	10 μm	1.5 mm
底浮 1	50 μm	15 μm	0.6 mm

※樹脂表面に付着していた厚さ。

(b) 鋼板裏面が健全な場合の鋼板と樹脂の接着性状について

観察された防錆剤層 1 のおおよその厚さを反射電子像 50 倍の欄中に表記したが、底軽浮 1 (図 5.3.6) が 30 μm 、底浮 1 (図 5.3.7) が 50 μm とほぼ一定の厚さであるのに対し、底健 2 (図 5.3.5) は 10~40 μm と厚さが場所によって異なり、鋼板側との剥離面に凹凸が形成されていた。この理由は、底軽浮 1 (図 5.3.6) と底浮 1 (図 5.3.7) については防錆剤層の外側の層で破断したため、防錆剤層が塗布された当時から変わらず一定の厚さだったのに対して、表 5.3.2 中の底健 2 (図 5.3.5) より試料の外観において樹脂側と鋼板側の双方の破断面に灰色の防錆剤が確認されたことから、底健 2 (図 5.3.5) については防錆剤層内で破断したため樹脂側と鋼板側に分かれ厚さが一定とならなかったと考えられる。以上より、健全部は鋼板と樹脂が密着している状態であるものの、カッター切込み程度の力で防錆剤層が簡単に破壊し、樹脂による接着性が容易に失われる状態であったものと推察される。

(c) 鋼板裏面が腐食した場合の鋼板と樹脂の接着性状について

底軽浮 1 (図 5.3.6) では防錆剤層 1 の上部に暗い灰色を呈するごく薄い層が、底浮 1 (図 5.3.7) では防錆剤層 1 の上部に厚さ 20~100 μm のやや暗い灰色を呈する層が認められた。これは EDS3 や EDS5 の分析結果において亜鉛の他に鉄 (Fe) が検出されたことから、鋼板の鉄錆が付着したものと推測された。また、底浮 1 (図 5.3.7) の亜鉛粒子間に帯状に認められる暗色の物質は、EDS6 の分析結果において、亜鉛と酸素 (O) が強く検出されており、亜鉛の酸化物、あるいは水酸化物が生成していると考えられる。以上より、底軽浮 1 (図 5.3.6) と底浮 1 (図 5.3.7) で確認された浮きの原因は、鋼板裏面の腐食に加え、鋼板裏面に施された亜鉛系防錆剤の酸化に起因すると推察される。

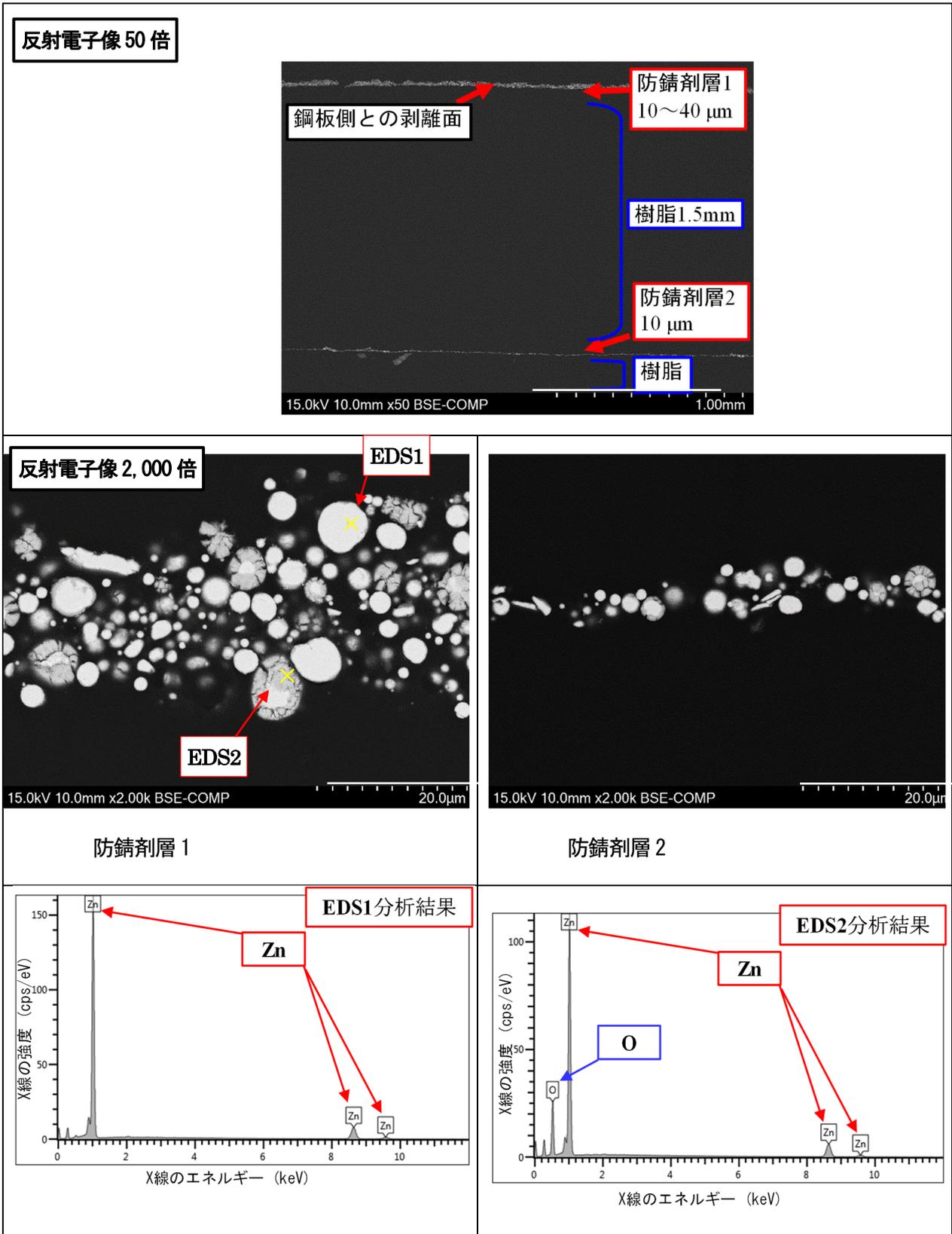


図 5.3.5 防錆剤と思われる層の反射電子像観察および EDS 分析結果 試料名：底健 2

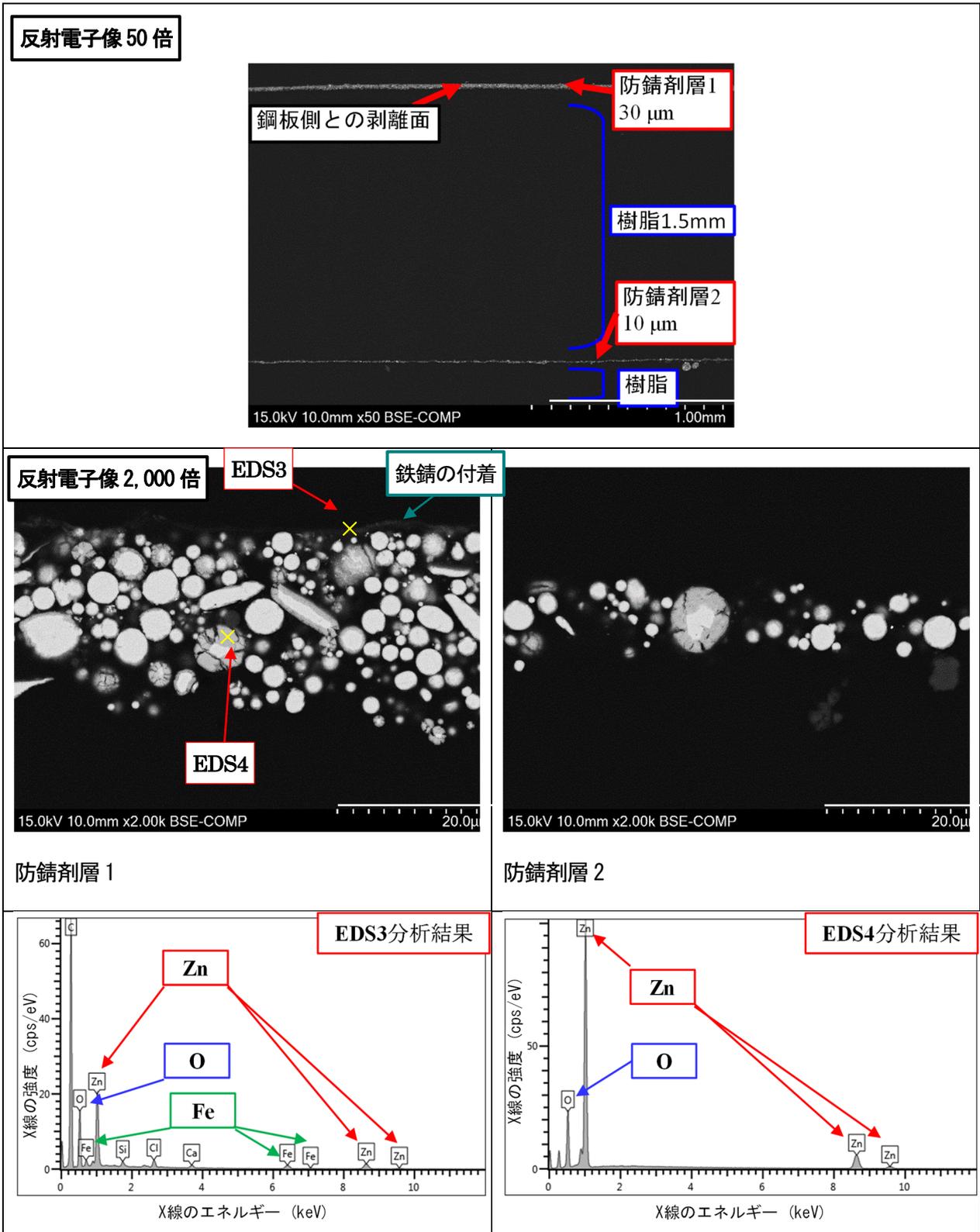


図 5.3.6 防錆剤と思われる層の反射電子像観察および EDS 分析結果 試料名：底軽浮 1

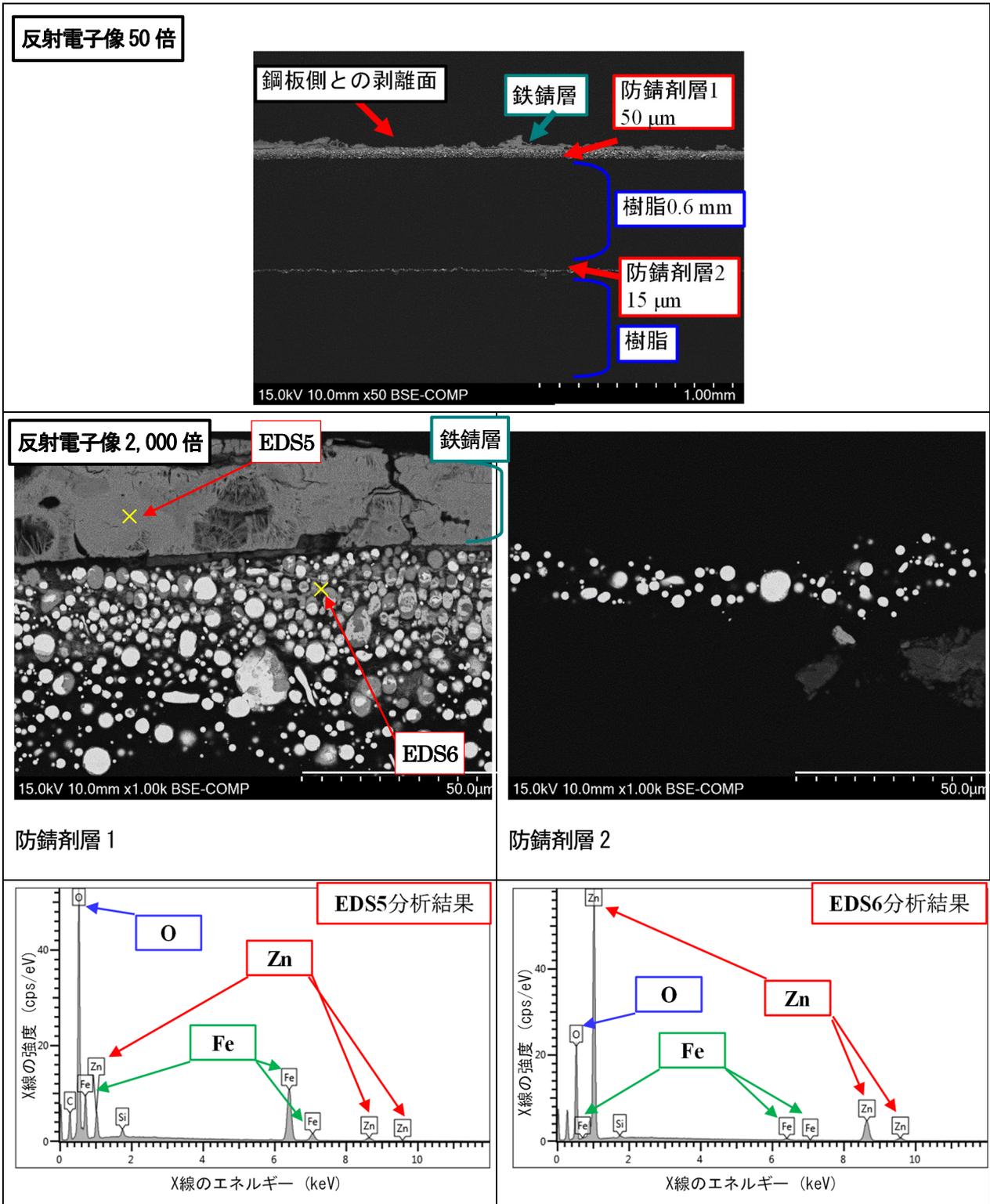


図 5.3.7 防錆剤と思われる層の反射電子像観察および EDS 分析結果 試料名：底浮 1

5. 4 鋼板接着工法の補修効果と留意事項

表 5.2.2 に示す過去の維持管理記録によると、鋼板接着による補修が行われた 1976 年（昭和 51 年）度以降の支間中央付近鋼材位置での塩化物イオン濃度は、2004 年（平成 16 年）度で 1.2kg/m^3 以上（下部工調査からの推定）、2008 年（平成 20 年）度で 3.14kg/m^3 、2012 年（平成 24 年）度では 3.7kg/m^3 と、徐々に増加していることが確認できた。

ここで、1995 年（平成 7 年）度の調査報告書に、既設鋼板接着部分に樹脂と鋼板の剥離が見られるため樹脂の再注入を行う必要があると記されていることから、鋼板に浮きが生じていたと想定される。鋼板の浮きは、コンクリート内部の鋼材腐食やコンクリート内部から鋼板との接着面へ水が供給されることで発生すると考えられるが、本調査において山側に鋼板の腐食と浮き（海側よりは軽微）が確認された位置で内部鋼材の状態を確認した結果、健全であることが確認された（図 5.4.1 参照）。このことから、鋼板の腐食や浮きはコンクリート内部からの影響ではなく、外部からの水の浸入が主要因であると考えられる。

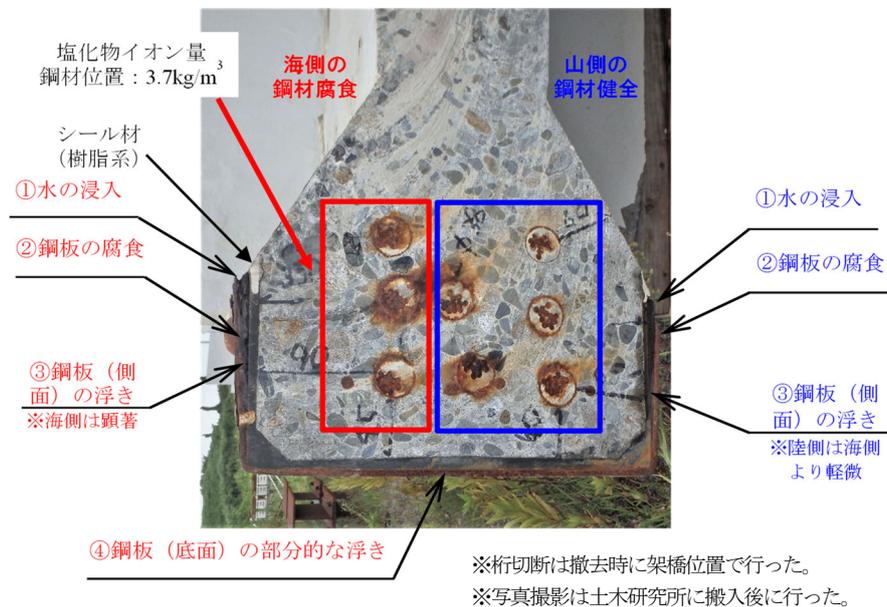
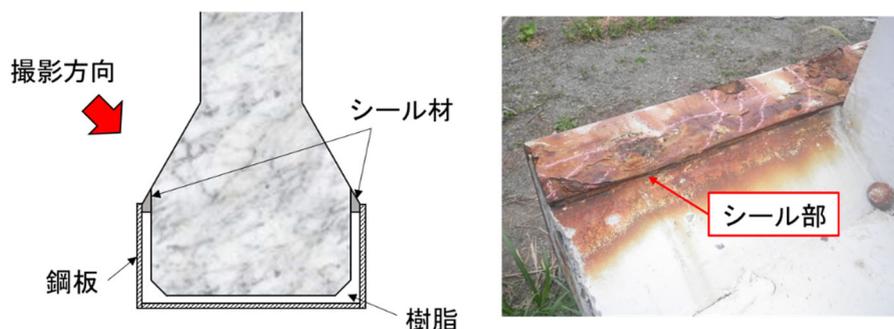


図 5.4.1 PC 桁切断面の劣化状況

水の浸入は、鋼板とコンクリート界面のシール部の状況（写真 5.4.1）より、シール部の劣化が確認されることから、シール材が止水機能を失い水が容易に浸入しやすい状態だったと想定される。さらには水が鋼板と接着剤の界面に浸入したことで、亜鉛系防錆剤の酸化により防食効果も低下し、鋼板腐食の進展に伴い鋼板の浮きが側面から底面側へ徐々に進行したものと考えられる。すなわち、コンクリートと鋼板の界面付近の止水処理を適切かつ継続的に確保しなければ鋼板の腐食を回避することは困難となる。したがって、点検時においては U 型に鋼板が接着されている場合には、フランジ側面に接着した鋼板の天端付近のシール材の状態を確認し確実に止水が行われているか確認する必要がある。

一方で、鋼板接着工法施工部においては補修後 40 年以上にわたり樹脂の変質がなく、鋼板と接着剤の界面に塩分が付着していないことからコンクリートへの劣化因子の侵入がなかったものと判断できる。



※写真撮影は土木研究所に搬入後に行った。
 ※ハンチ部の錆汁は、下フランジの鋼板の錆汁が伝わったもの

写真 5.4.1 シール部の状況

5. 5 本章のまとめ

鋼板接着工法が主桁下面に適用された撤去桁を用い、本工法施工後 40 年以上が経過した時点の補修効果を検証することを目的に各種調査を実施した結果、次のことが確認された。

- ・目視・打音検査により鋼板の腐食と浮きが確認されたものの接着剤には塩分の付着がなかったことから、鋼板接着面からの塩分の侵入は防止できていたものと判断される。
- ・鋼板の浮きは、下フランジ上側の鋼板と接着剤の界面の止水効果が消失し、そこから水が浸入したことが原因と考えられる。
- ・点検時において鋼板が U 型に接着されている場合には、鋼板の天端付近のシール材の状態を確認し確実に止水が行われているか確認する必要がある。

5章の参考文献

- 5-1) 阿南匡範：接着接合部の実環境劣化を考慮した促進評価技術，技術ノート「こべるにくす」，No.50，Vol.28，pp.1-4，2020.APR
- 5-2) 高速道路総合技術研究所：構造物施工管理要領，2020.7

6章 塩害を受けた既設PC橋への表面保護工法の適用に関する検討

6.1 検討概要

塩害を受けた既設PC橋の補修には、表面保護（表面被覆、表面含浸など）、断面修復、電気防食、脱塩など種々の方法がある。このうち、塩害が顕在化する前の予防的な対策は表面保護が一般的（表6.1.1参照）であるが、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布によっては補修後の再劣化が懸念される。

表 6.1.1 塩害によるコンクリート構造物の性能低下に対する標準的な補修工法の例⁶⁻¹⁾

劣化過程	定 義	期待する効果	標準的な補修工法例
潜伏期	鋼材の腐食が開始するまでの期間	塩化物イオンの浸透量の低減	表面保護
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	塩化物イオンの浸透量の低減	表面保護
		塩化物イオンの除去	脱塩, 断面修復
		鋼材の防食	電気防食
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	塩化物イオンの除去	断面修復, 脱塩
		鋼材の防食	電気防食
劣化期	腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間	力学的な性能の回復	断面修復, その他（連続繊維接着, 外ケーブル, 巻立て工法等の適用の検討）

そこで本章では、既設PC橋の各種条件に応じた表面保護工法の性能評価法の確立および信頼性の高い補修技術の確立を目的に、塩害を受けた既設PC橋への表面保護工法の適用に関し、以下の検討および留意点を整理した。

- 6.2 節 塩害に対する補修効果が確実に発揮可能な限界に関する検討
- 6.3 節 塩害による劣化の可能性のあるPC橋上部構造の点検手法に関する検討
- 6.4 節 塩害環境にある既設PC橋に表面保護工法を適用する際の留意点

6. 2 塩害に対する補修効果が確実に発揮可能な限界に関する検討

6. 2. 1 検討概要

表面被覆工法により補修された PC 橋上部構造を対象に、塩化物イオン試験が実施された既往データを収集し、式 6.2.1 に示すとおり、Fick の第 2 法則に基づき表面塩化物イオン濃度 C_0 および拡散係数 D_c を推定するとともに、塩化物イオン浸透性状に関する分析を行った。これらの検討結果に基づき、塩分浸透性状を数値計算するとともに、実橋の維持管理記録と照合することで考察を行った。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) + C_i \quad (\text{式6.2.1})$$

ここに、 $C(x, t)$: コンクリート表面からの距離 x (mm)、 t (年)における塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_0 : 表面塩化物イオン濃度(kg/m³)、 D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/年)、 erf : 誤差関数、 C_i : コンクリート中の初期塩化物イオン濃度(kg/m³)。

6. 2. 2 塩化物イオン試験が実施された既往データの収集結果

既往データ^{6-2)~6-6)}の収集結果を表 6.2.1 に示す。橋数は 5 橋 (写真 6.2.1 参照) であり、E 橋は 1965 年に建設された既設桁と 1988 年に縦目地を設けて拡幅された桁で構成されている。

いずれも設計基準強度 40N/mm² のポストテンション方式 PCT 桁道路橋 (以下、ポスト T) である。A~E 橋既設桁のかぶり(C)は 35mm 程度以下であり、現行の基準⁶⁻⁷⁾を満足しない。E 橋拡幅桁のかぶりは、現行の基準⁶⁻⁷⁾を満足する。これは、1984 年の指針 (案)⁶⁻⁸⁾を受け、C=70mm とした塩害対策が実施されたと推察される。調査箇所はウェブや横桁などであり、中性化深さの調査が実施されている場合はその結果を記した。また、塩化物イオン濃度は、表面からの深さ 10mm あるいは 20mm ごとにスライスし、電位差滴定法などにより分析されている。ここでは、 C_0 と D_c を同じ条件で推定するため、スライス幅を 20mm ごとに統一した。なお、 C_0 と D_c の推定は表面から深部に向かって塩化物イオン濃度が漸減する部位を対象とした。

表 6.2.1 表面保護工法により補修が実施された PC 橋上部構造の塩化物イオン試験の結果

橋梁名	完成年	上部工形式	設計基準強度 (N/mm ²)	架橋地点	補修実施年	調査時の年数 (年)	最小かぶり (mm)	調査箇所	中性化深さ (mm)	調査位置(mm)ごとの塩化物イオン濃度(kg/m ³)				表面濃度 C_0 (kg/m ³)	拡散係数 D_c (cm ² /年)
										0-20	20-40	40-60	60-80		
A橋 ⁶⁻²⁾	1965	ポストT	40	海上 (日本海側)	1991	26	35	横桁劣化部	—	10.00	9.00	9.00	5.00	25.1	0.88
										9.00	11.50	9.50	7.50	14.8	2.14
B橋 ⁶⁻³⁾	1976	ポストT	40	海岸線より10m (日本海側)	1998	31	30	ウェブ劣化部	7	16.00	10.00	8.00	4.00	16.0	0.69
									ウェブ健全部	5	9.00	7.00	5.50	4.00	8.9
C橋 ⁶⁻⁴⁾	1967	ポストT	40	海岸線より80m (日本海側)	1984	17	36	ウェブ劣化部	0	5.99	3.57	1.43	0.43	7.6	0.436
									ウェブ健全部	0	4.71	1.28	0.29	0.14	7.1
D橋 ⁶⁻⁵⁾	1976	ポストT	40	海岸線より20m (日本海側)	2007	31	27	ウェブ健全部	14	6.26	2.81	0.56	0.23	8.6	0.137
									11	6.10	0.51	0.21	0.23	12.2	0.034
									10	8.92	1.14	0.28	0.26	16.0	0.043
E橋 ⁶⁻⁶⁾	1965	ポストT	40	海岸線より250m (日本海側)	1999	50	35.5	ウェブ劣化部	8	5.24	7.01	3.51	1.17	15.2	0.164
									4.27	4.44	2.23	0.84	9.4	0.171	
	1988 (拡幅)	ポストT (塩害対策)	27	70	ウェブ健全部 (劣化部無)	2	1.65	1.43	0.79	0.48	2.6	0.242			
										2.78	3.45	1.80	0.90	6.8	0.291

注) 中性化深さは1mm単位で表記した。塩化物イオン濃度に表示した数値のうち、取消線があるものは C_0 と D_c の推定の対象外とした。

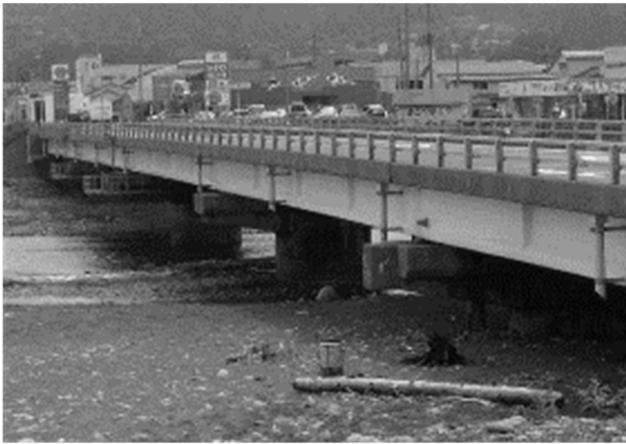
なお、塩化物イオン試験の実施時期は、A・C・D橋が補修前、B・E橋は補修後である。



A橋中間支柱の設置後の状況



B橋外ケーブル設置後の状況



C橋表面被覆の状況



D橋表面含浸（手前）と表面被覆（奥）の状況



E橋全景



E橋既設桁（左側）と拡幅桁（右側）

写真6.2.1 塩化物イオン試験を実施した橋梁（B橋は文献⁶⁻³より引用）

6. 2. 3 塩化物イオン浸透性状に関する分析結果

C_0 の算定値を図6.2.1に示す。図中には、コンクリート標準示方書（以下、コン示）⁶⁻⁹⁾の設計値を示した。A橋は海上橋のため海岸からの距離2m未満の飛沫帯の位置にプロットした。これによると、 C_0 の算定値は、A橋を除く陸上橋に限定すると、最大16kg/m³程度であり、設計値と同程度かやや大きいことが確認された。

D_c の算定値を図6.2.2に示す。図中には、コン示の式6.2.2による設計値（W/C=40%と仮定し、 $D_c=0.25\text{cm}^2/\text{年}$ ）に加え、コンクリート中の含水率が大幅に低下する大気中環境における塩化物イオン拡散係数がコン示の0.2倍に低下するとの報告⁶⁻¹⁰⁾に基づく値を示した。

$$\log_{10} D_c = 3.0W/C - 1.8 \quad (\text{cm}^2/\text{年}) \quad (\text{式6.2.2})$$

D_c の算定値は、海岸からの距離が近いほどコン示の設計値より大きな値を示し、A橋とB橋で1~2cm²/年程度と設計値の5倍程度以上に達することが確認された。海岸からの距離が20m以上となるC~E橋は、コン示の設計値程度以下となり、D橋は最小0.034cm²/年と設計値の1/5程度である大気中環境の値に近づいた。D橋はコンクリート表層が乾燥を受けていると想定され、塩分浸透速度が遅延した可能性がある。

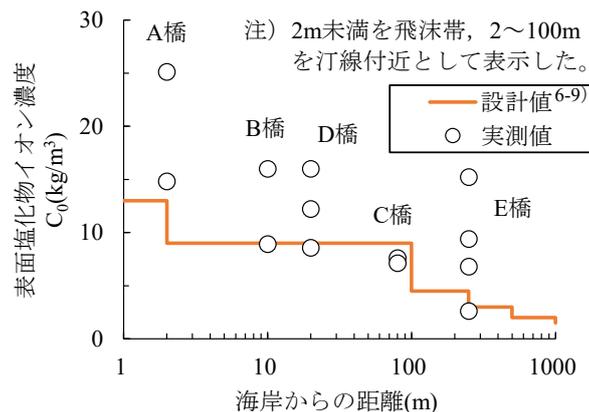


図6.2.1 表面塩化物イオン濃度の実測値

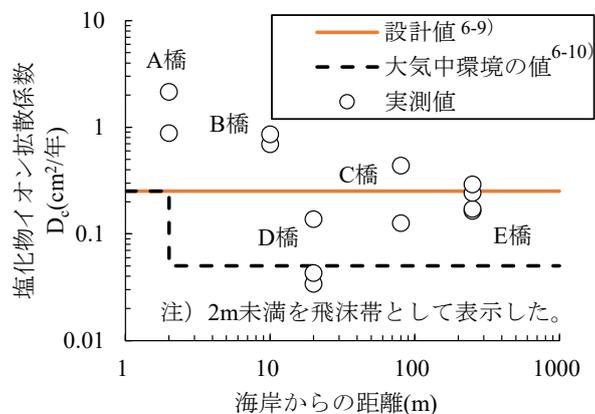


図6.2.2 塩化物イオン拡散係数の実測値

図6.2.3は、A～E橋の鉄筋位置における塩化物イオン濃度 C_s と外観目視による劣化の関係を整理した結果である。図中には、 $W/C=40\%$ と仮定し、コン示の式6.2.3による鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} を示した。

$$C_{lim} = -3.0W/C + 3.4 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{(式6.2.3)}$$

図より、 C_s は健全部でも C_{lim} を超える場合もあるが、 C_{lim} に達していない部位については、塩害による劣化がまだ生じていないと評価できる。

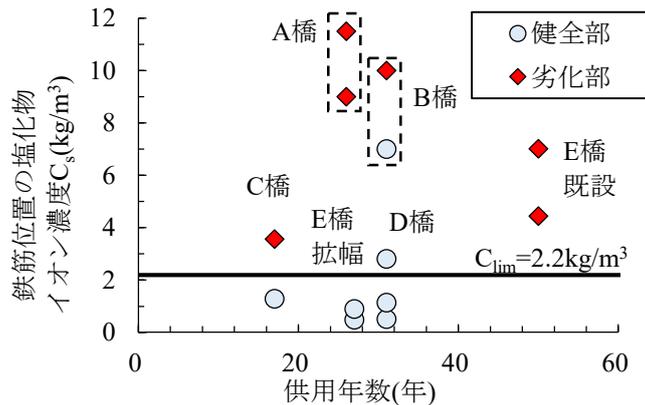


図6.2.3 鉄筋位置の塩化物イオン濃度と外観目視による劣化の関係

6. 2. 4 塩分浸透性状に関する数値計算結果

上記の結果に基づき表6.2.2のとおり計算条件を設定し、式6.2.1に示したFickの第2法則に基づいた拡散方程式を用い、塩分浸透性状を試算した。なお、初期塩化物イオン濃度 C_i は 0.3kg/m^3 とした。

表6.2.2 計算条件

ケース	C_0 (kg/m^3)	C_i (kg/m^3)	D_c ($\text{cm}^2/\text{年}$)	C (mm)	対象 橋梁
15M3	15	0.3	0.25	30	B,C
15L3			1.25		A
15S3			0.05		D
9M3	9		0.25	30	E 既設
9M7				70	E 拡幅
4.5M3	4.5		0.25	30	—
4.5M7		70			

A・B橋の数値計算結果を図6.2.4に示す。A・B橋の C_s はおおむね15L3と15M3の間にプロットされており、計算条件の設定は妥当であったと判断される。 C_s が C_{lim} に到達する年数は15L3で1.5年、15M3で8年であった。実際の補修時期はA橋で16年目、B橋で22年目であり、その時点の C_s は2章で整理した腐食ひび割れ発生限界の 5kg/m^3 を超えている。その後、両橋とも再劣化と再補修を繰り返し、PC鋼材破断に対する外ケーブル補強や中間支柱の設置などが実施されたものの、供用30余年にて撤去・架け替えを余儀なくされたと報告されている^{(6.2), (6.3)}。

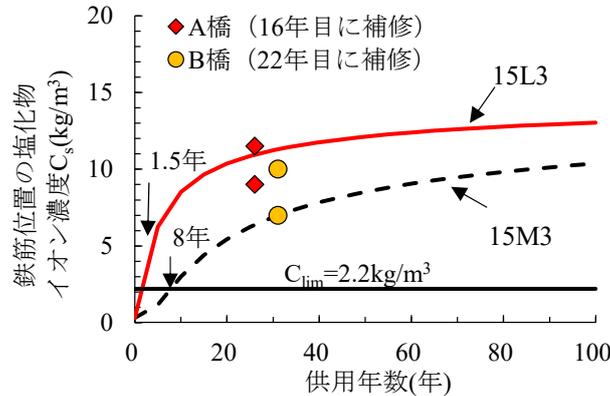


図6.2.4 A・B橋の数値計算結果

C・D橋の数値計算結果を図6.2.5に示す。C橋の C_s は15M3と15S3の間、D橋の C_s は15S3と同程度であった。 C_s が C_{lim} に到達する年数は15S3で38年であった。実際の補修時期はC橋で17年目、D橋で31年目であり、 C_s が 5kg/m^3 に到達する前であった。両橋とも最終的に供用40余年にて供用が停止されているが、外ケーブル補強などの耐力補強は未実施であったと報告されている^{(6.4), (6.5)}。

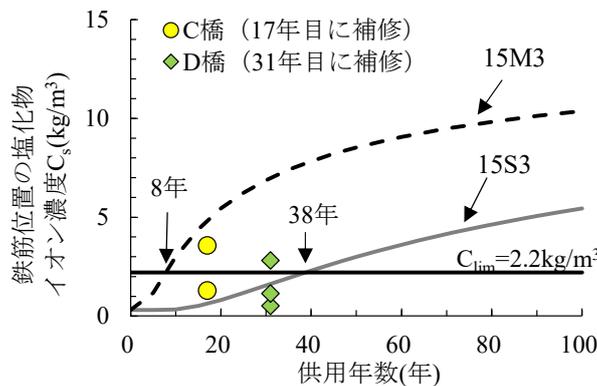


図6.2.5 C・D橋の数値計算結果

E 橋の数値計算結果を図 6.2.6 に示す。E 橋既設の C_s は 9M3、E 橋拡幅の C_s は 9M7 とおおむね一致する。 C_s が C_{lim} に到達する年数は 9M3 で 12 年、9M7 で 64 年であった。実際の補修時期は E 橋既設で 34 年目、E 橋拡幅で 17 年目であった。補修時の C_s は E 橋既設で 5kg/m^3 程度であり、供用 50 余年にて上部構造の架け替えが行われている。E 橋拡幅の補修時の C_s は 1kg/m^3 程度以下であり、供用 30 年弱で既設桁と同時に撤去されたが、表面被覆工による補修後約 15 年間、劣化が見られず健全な状況であった⁶⁰⁾。

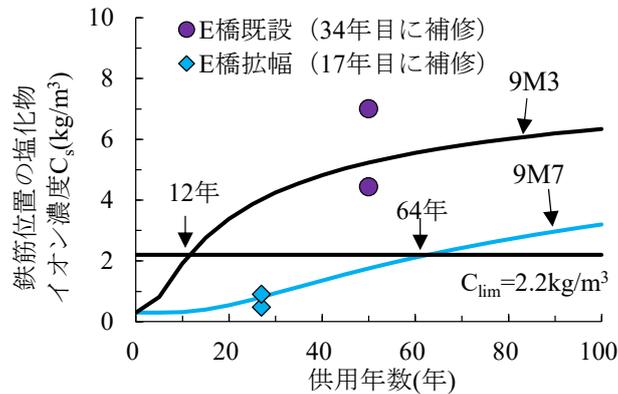


図6.2.6 E橋の数値計算結果

6. 2. 5 知見の整理

C_0 の実測値は海上橋を除外すると設計値と同程度かやや大きいこと、 D_c の実測値は架橋環境によって設計値の5倍~1/5倍程度に変動することが確認された。また、補修時点における C_s が 5kg/m^3 を超える場合はその後に PC 鋼材破断に伴う耐荷力低下が顕在化した。が、 5kg/m^3 未満であれば PC 鋼材破断に至らず、さらに C_{lim} の設計値 (2kg/m^3 程度) 以下であれば、E 橋拡幅の 1 事例のみであるが、架け替えのため撤去されるまでの補修後約 15 年の間、劣化が見られず健全な状況であったことが確認された。

6. 3 塩害による劣化の可能性のあるPC橋上部構造の点検手法に関する検討

6. 3. 1 検討概要

塩害による劣化の可能性のあるPC橋上部構造については、定期点検を補完する目的で「コンクリート橋の塩害に対する特定点検要領（案）」（以下、塩害特定点検）が定められている⁶⁻¹¹⁾。

塩害特定点検に示されている標準的なフローを図6.3.1に示す。塩害特定点検では、点検の容易さや重要度を考慮して下部構造の調査を優先させ、その結果に基づいて上部構造の調査の流れが決定される。点検頻度は原則10年に1度であり、厳しい環境またはかぶりが小さい場合は5年に1度と定めている。また、構造物の対策の要否に関する評価・判定をコンクリート内部の塩化物イオン濃度に基づいて実施するものとし、劣化予測が簡略化されている。下部構造における、上部構造と同等のかぶり位置の塩化物イオン濃度が 1.0kg/m^3 以上の場合には、上部構造の塩化物イオン試験の実施が必要と判定され、1橋当たり原則1箇所からドリル削孔または小径コアの採取を行い、 C_0 、 D_c 、 C_s および C_i を算定するものとしている。

ここでは、前節6. 2の検討結果に基づき、これらの点検手法の妥当性と技術課題について検討した。

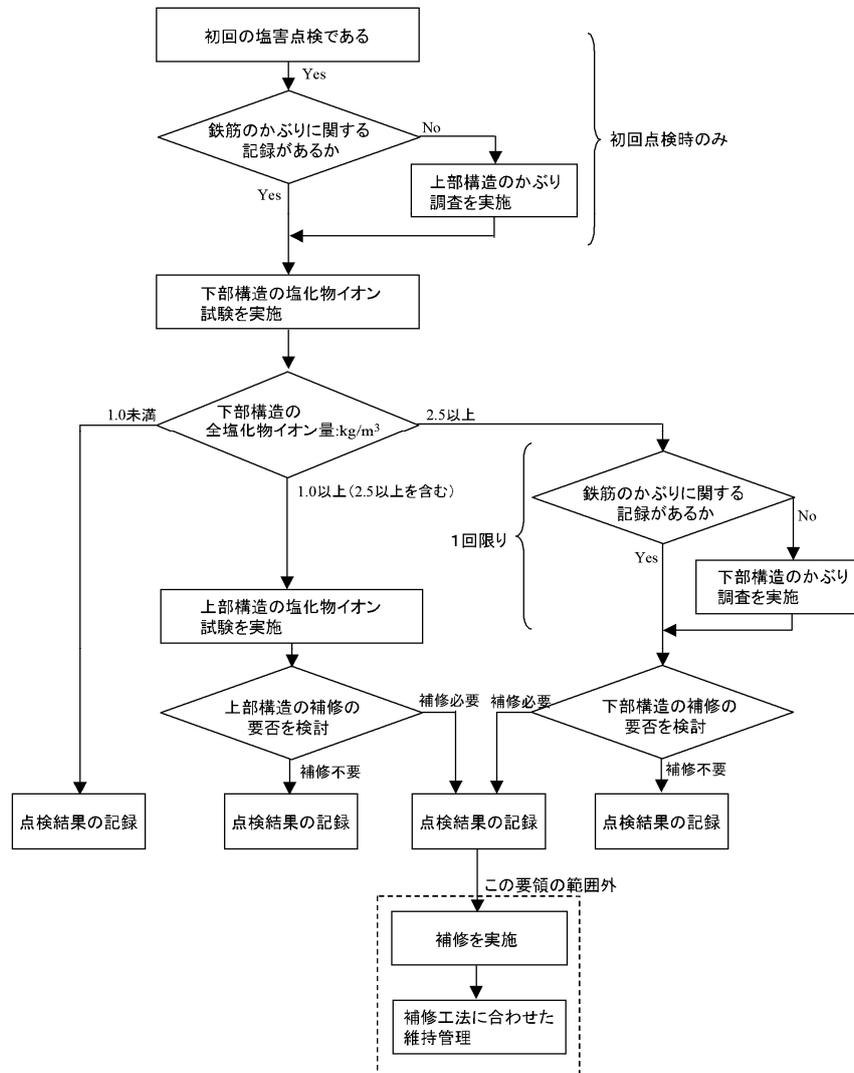


図 6.3.1 塩害特定点検に示されている標準的なフロー⁶⁻¹¹⁾

6. 3. 2 点検頻度についての検討概要

前節6. 2の図6.2.4～図6.2.6と、4.5M3と4.5M7の数値計算結果（図6.3.2）に基づき、点検頻度の目安を整理した。

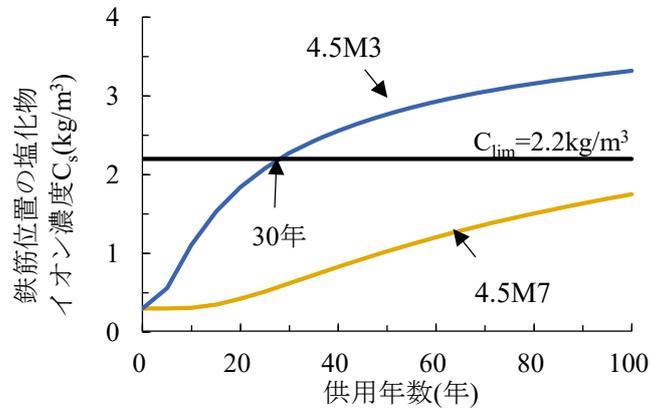


図 6.3.2 4.5M3 と 4.5M7 の数値計算結果

その結果を表6.3.1に示す。表中の海岸からの距離に応じた C_0 の設計値はコン示による。たとえば、汀線付近に架橋されたPC橋上部構造 ($C_0=9\text{kg/m}^3$) を対象に10年に1度の塩害特定点検を実施した際、かぶり70mmが確保されるPC橋では C_s が C_{lim} に到達するのに64年を要するが、旧基準^{例えば6-12)}のかぶり30mm程度が適用されたPC橋（おおむね1984年以前）に関しては12年で到達するため、点検頻度が妥当でない可能性がある。

また、実橋データから得られた C_0 は、海岸からの距離が250mの地点に建設されたPC橋においても、これを上回る場合があり、注意を要する（前節の図6.2.1）。

表6.3.1 点検頻度の目安

海岸からの距離	C_0 設計値(kg/m^3)	かぶり (mm)	C_s が C_{lim} に 到達する年数	判定
飛沫帯	13.0	30	8年以下	×
汀線付近	9.0	30	12年	△
		70	64年	○
100m	4.5	30	30年	○
		70	100年超	○

注) 判定は塩害特定点検の頻度の設定が妥当の場合を○、妥当でない可能性がある場合を△、明らかに妥当でない場合を×で表記した。

6. 3. 3 塩化物イオン試験の箇所数について

前節6. 2に示した実橋の塩化物イオン試験によると、 C_0 と D_c は変動が大きく、補修の要否判定に用いる C_S も試験の数によって異なる結果が得られると想定される。そこで、2章で整理した C_S の推定結果より、サンプルサイズを検証した。

C_S の推定結果を表6.3.2に示す。調査はD橋の異なる径間と主桁の桁下フランジ部について実施された。これによると、 C_S の平均値は $3.05\sim 4.22\text{kg/m}^3$ 、標準偏差は $1.62\sim 2.76\text{kg/m}^3$ であり、変動係数は60%程度、90%信頼区間は $0.1\sim 7.6\text{kg/m}^3$ になることが確認された。全箇所の推定結果に基づき、式6.2.4によりサンプルサイズを算出すると、許容誤差 0.75kg/m^3 （平均の20%）で $n_{90} = 24.9$ 、 1.55kg/m^3 （平均の40%）で $n_{90} = 5.84$ となった。

$$n_{90} = (1.64\sigma/E_a)^2 \quad (\text{式6.2.4})$$

ここに、 n_{90} ：90%信頼区間におけるサンプルサイズ、 σ ： C_S の標準偏差(kg/m^3)、 E_a ： C_S の許容誤差(kg/m^3)。

表6.3.2 C_S の推定結果 (kg/m^3)

	第4径間 G5	第4径間 G2	第8径間 G5	全箇所
箇所数	11	8	7	26
平均	4.07	4.22	3.05	3.84
標準偏差	2.14	2.76	1.62	2.28

6. 3. 4 知見の整理

表6.3.1より、旧基準のかぶり30mm程度が適用されたPC橋は C_S が C_{lim} におおよそ8~12年で到達するため、塩害特定点検にしたがって点検頻度を5年もしくは10年とした場合、塩害の兆候を早期に発見できない可能性がある。つまり、コンクリート中の鋼材が塩害により腐食する前に予防保全的な補修を行うためには、点検頻度をこれより密にする必要がある。

また、6. 3. 3より、塩化物イオン試験結果のばらつきを考慮すると、1度に1橋1箇所の塩化物イオン試験で補修の要否を判断することは妥当ではなく、複数箇所の調査を行うことが望ましいことが明らかになった。たとえばD橋では、許容誤差 1.55kg/m^3 （平均の40%）として、信頼水準90%のサンプルサイズを試算すると $n_{90} = 5.84$ となり、1度に6箇所以上の試験を行うことで測定結果の信頼性を高めることができる。しかし、構造物へ与える影響を考慮すると塩化物イオン試験の調査数を増やすことは好ましくない。この解決策として、たとえば2章では、ドライガーゼ法は塩害による劣化の可能性が高い箇所をスクリーニングする手法になり得ることを確認している。このように、非破壊による点検手法を活用することが今後の技術課題である。

6. 4 塩害環境にある既設 PC 橋に表面保護工法を適用する際の留意点

6. 4. 1 検討概要

塩害特定点検において、上部構造の塩化物イオン試験を行った結果、かぶりの代表値近傍の深さから採取した試料に多くの塩化物イオンが含まれていた場合には、調査したPC橋が塩害による劣化の影響を既に受けていることも考えられるので、補修について検討するとしている^{6-2),6-11)}。また、補修方法は、供用年数、塩化物イオン量、環境条件、橋梁諸元等を総合的に勘案して検討し、目安として表6.4.1に示す工法を示している。一方、PC橋の特有の視点からは、補修方法の適否を勘案する留意点が示されていない。ただし、その後、表6.4.1に示される断面修復、電気防食および脱塩についてはPC橋の特有の視点から補修の適否を含めた報告書が作成されている^{6-13)~6-15)}。

そこで、残る表面塗装を含む表面保護工法の補修の適否を勘案する留意点について、3~6章の調査結果および既往研究⁶⁻⁶⁾⁷⁾に基づき整理を行った。

表6.4.1 鋼材周辺での全塩化物イオン量と適用できる補修方法の例^{※2} (数値は目安^{※3}) 6-11)

橋梁上部構造の種類	補修工法の種類と適用できる全塩化物イオン量の範囲		
	表面塗装	断面修復	電気防食/脱塩
プレテンション式 プレストレストコンクリート	0.6kg/m ³ 以下	1.2kg/m ³ 以下 ^{※1}	1.2kg/m ³ 以上
ポストテンション式 プレストレストコンクリート	0.9kg/m ³ 以下	1.2kg/m ³ 以下	1.2kg/m ³ 以上
鉄筋コンクリート	0.9kg/m ³ 以下	1.2kg/m ³ 以下	1.2kg/m ³ 以上

※1：この表で用いる全塩化物イオン量は、構造物表面に最も近い鉄筋（スターラップなど）の近傍における測定結果とする。

※2：ここでは、代表的な補修工法を紹介した。塩害の補修方法には、この他にも、断面修復工法による補修と外ケーブル工法による補強を組み合わせる方法などもある。

※3：補修方法の適用性は塩化物イオン量以外に、種々の要因を考慮する必要がある。ここではあくまでも塩化物イオン量の情報のみから判断する場合の目安を示す。

※4：プレテンション式プレストレストコンクリート部材は、一般に断面積が小さいので、断面修復工法を採用した場合、コンクリートのはつり時にPC鋼材に導入されているプレストレス力が影響を受ける度合いが大きいものと予想される。したがって、プレテンション式プレストレストコンクリート部材の補修に断面修復工法を適用する場合には、はつりによるプレストレス力への影響について事前に特に入念な検討を行わなければならない。

※5：現場条件により断面修復と表面塗装を併用してよい。

6. 4. 2 検討結果

表6.4.2に、塩害環境にある既設PC橋に表面保護工法を適用する際の留意点を示す。なお、鋼板接着工法は、表面保護工法としての役割として、主に塩害に対する耐久性の観点で示した。

表面被覆工法は、3章で整理したように、劣化因子の遮断性能と塗膜の耐久性に優れるという報告が増えつつあるものの、塩分量が多い(2kg/m³以上)場合の塩化物イオンの再拡散による再劣化が課題として残されている。

表面含浸工法は、4章で整理したように、補修後の目視点検が可能などメリットもあるものの、PC橋への適用に関しては補修効果が適切に得られるかを予め確認する必要がある。

鋼板接着工法は、5章で整理したように、鋼板とコンクリートの隙間に注入する樹脂接着剤により一体化を図ることで部材の補強に用いられることが多い。樹脂接着剤の耐久性は改めて高いことが実証されたものの、水の浸入に対し脆弱であるとともに、鋼板裏面に施した亜鉛系防錆剤が長期的に酸化することで防食効果が低下すること、あるいは、接着剤の付着を阻害することに注意を要する。

表6.4.2 塩害環境にある既設PC橋に表面保護工法を適用する際の留意点

工法	留意点
表面被覆工法	<ul style="list-style-type: none"> ● 施工後 25 年程度が経過しても、塗膜の膜厚、組成、遮塩性等の表面被覆材の性能低下は認められなかった。 ● コンクリート表層部に多量の塩化物イオンが存在する状態で表面被覆工を施工した場合、施工後に内在塩化物イオンの濃度勾配を駆動力とした内部拡散が生じ、鋼材位置の塩化物イオン濃度が増加することが懸念される。したがって、施工前にコンクリート内部の塩化物イオン濃度の調査を実施し、内在塩化物イオンを適切に除去したのち、表面被覆工法を施工する必要がある。 ● 特に、中性化の影響を受けていて、かつ、表面被覆後にコンクリート中が湿潤となる環境においては、施工後に内部拡散が顕在化する可能性がある。したがって、表面被覆の施工前に鋼材位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達していない場合であっても、中性化の影響が顕著となる湿度環境の場合には適切に塩化物イオンを除去する必要がある。 ● 表面被覆工の施工前後で、相対湿度の変化や中性化の影響により見掛けの拡散係数が変化するため、従来手法の差分法による拡散予測が適用できないケースがある。 ● 以上を踏まえて、適切な施工の実施、ならびに、施工後の経過観察や再塗布等の適切な維持管理計画を策定する。
表面含浸工法	<ul style="list-style-type: none"> ● 施工後 10 年程度が経過しても、含浸効果が維持されていることが確認された。 ● コンクリート表層部に多量の塩化物イオンが存在する状態で表面含浸工を施工した場合、施工後に内在塩化物イオンの濃度勾配を駆動力とした内部拡散が生じ、鋼材位置の塩化物イオン濃度が増加することが懸念される。ただし、表面含浸工法では施工後にコンクリート表層部が乾燥することから、本調査の範囲内では内部拡散が顕在化しない場合があることが確認された。 ● PC 構造物に用いられる低水セメント比のコンクリートに表面含浸工法を適用する場合、含浸剤が十分な深さまで浸透しない恐れがあるため、RC 構造物に適用する場合と比べ施工時間間隔と塗布回数を増加させる必要がある。また、塗布する部位によっても含浸深さが変化することから、含浸剤の性能を十分に発揮できるように適切な施工計画を策定する。なお、本調査で対象とした PCT 桁橋では、含浸深さは下フランジに比べてウェブで、支間中央部に比べて桁端部で大きくなる傾向が確認された。 ● 以上を踏まえて、適切な施工の実施、ならびに、施工後の経過観察や再塗布等の適切な維持管理計画を策定する。
鋼板接着工法	<ul style="list-style-type: none"> ● 鋼板接着工法を塩害対策として適用する場合、鋼板とコンクリートとの界面のシール部からの水等の劣化因子が侵入する恐れがあるため、シール部の状態を近接目視により確認することが重要である。

6. 5 本章のまとめ

既設 PC 橋の各種条件に応じた性能評価法の確立および信頼性の高い補修技術の確立を目的に、塩害を受けた既設 PC 橋への表面保護工法の適用に関する各種検討を行った結果、次の知見が得られた。

- 塩害に対する補修効果が確実に発揮可能な限界について検討した結果、 C_0 および D_c の実測値は架橋環境によって変動すること、補修時点における C_S が C_{lim} 以下であれば、1事例のみであるが補修後も健全な状況であったことが確認された。
- 塩害による劣化の可能性のある PC 橋上部構造の点検頻度について検討した結果、旧基準のかぶりが適用された PC 橋に関して、コンクリート中の鋼材が塩害により腐食する前に予防保全的な補修を行うためには、塩害特定点検に示される点検頻度5年もしくは10年よりも点検間隔を密にする必要がある。
- 塩化物イオン試験の箇所数について検討した結果、調査結果の信頼性確保のためには、1度の調査において複数箇所でもコアを採取して塩化物イオン試験を実施する必要がある。ただし、削孔による構造物に与える影響を考慮し、ドライガーゼ法等による非破壊検査技術を用いて削孔箇所を適切に選定し、削孔数を極力削減することが望ましい。
- 塩害環境にある既設 PC 橋に表面保護工法を適用する際の留意点を整理し、各工法とも PC 橋特有の視点から補修方法の適否を検討する必要があることを示した。

6章の参考文献

- 6-1) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2018.10
- 6-2) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[栈橋上部工編]/2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]に基づくコンクリート構造物の維持管理事例集(案)，コンクリートライブラリー116号，pp.137-161，2005.3
- 6-3) 岩城一郎，上原子昌久，子田康弘，内藤秀樹，皆川浩，鈴木基行：著しい塩害を受けた道路橋PC桁内部のコンクリートおよび鋼材の物性評価，土木学会論文集E，Vol.66，No.4，pp.413-432，2010.11
- 6-4) 北野勇一，谷口秀明，花井拓，木村嘉富：PCT桁橋の振動特性と安全性評価に関する基礎検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，vol.12，pp.149-156，2012.11
- 6-5) 杉江匡紀，小瀬戸弘樹，山本将，塚崎翔太：表面処理工法施工後の塩化物イオン濃度分布に関する調査，第30回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.139-142，2021.10
- 6-6) 國富康志，谷口正輝，栗原勇樹，石田雅博：塩害劣化で撤去された架設年の異なるポストテンションT桁橋の解体調査，第25回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.179-182，2016.10
- 6-7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IIIコンクリート橋・コンクリート部材編，2017.11
- 6-8) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説，1984.2
- 6-9) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018.3
- 6-10) 皆川浩，中村英佑，藤井隆史，綾野克紀：大気中環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設定に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.767-772，2019
- 6-11) 国土交通省道路局：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案)，2004.3
- 6-12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IIIコンクリート橋編，1978
- 6-13) プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き(案)[断面修復工法]，2009.9
- 6-14) 土木研究所：共同研究報告書382号，塩害を受けたコンクリート構造物の脱塩工法に関する共同研究報告書，2008.3
- 6-15) 土木研究所：共同研究報告書501号，電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書—電気防食工法の維持管理マニュアル(案)—，2018.7

7章 まとめ

7. 1 本研究の成果

本研究では、既設PC橋の塩害対策として実施される表面保護工法の補修技術の信頼性向上を図ることを目的に、各種表面保護工法が適用された撤去橋梁を用いて補修効果に関する検討を行った結果、次の成果が得られた。

- 2章では、PCT 桁橋のように部材の断面形状に起伏を有する構造の場合、塩化物イオン濃度の分布が一様ではないため塩分量が多い箇所の特長が困難であるという課題に対し、最適なコア採取位置の選定を目的に、簡易的な非破壊検査手法を用いた実橋調査を実施した。その結果、ドライガーゼ法から求めた表面塩化物イオン濃度が 5kg/m^3 以上の場合において、幅を持たせた分類でコアによる調査結果と相関性を有することが確認された。したがって、ドライガーゼ法が、塩害によるひび割れ発生の可能性が高い箇所をスクリーニングする手法になり得る可能性があることを示した。
- 3章では、PC橋の塩害補修としてコンクリート内部への塩化物イオンの侵入抑制を目的に採用される表面被覆工法について期待される補修効果が発揮されないケースがあるという課題に対し、その要因を究明するため、実際に塩害対策として表面被覆工法で補修されたPC桁について、塗膜調査、補修前後の塩化物イオン濃度の経年変化分析、コンクリートの配合調査を行った。その結果、表面被覆工法施工後の塩化物イオン濃度は再拡散により鉄筋付近の数値が上昇する事象が見受けられたこと、実橋の塩分浸透状況より確認された拡散係数を用いた再拡散の予測値は実測値と乖離することを考察した。
- 4章では、塩害補修として近年用いられている表面含浸工法をPC桁のような低水セメント比のコンクリートへ適用した際に含浸しにくい事象があるという課題に対し、実際に表面含浸工法が適用されたPC橋の現地調査を行うとともに、実橋から撤去されたPC桁を用いて表面含浸工法の試験施工を行い、施工性や含浸深さ、撥水性について検証を行った。その結果、PC桁の試験施工ではRC構造物を念頭にした標準施工に対して施工間隔と塗布回数を増加させる必要があること、含浸深さは下フランジに比べてウェブ、支間中央部に比べて桁端部が大きい傾向にあることを確認した。また、含浸深さを含浸材塗布前に評価する手法としては透気係数、含浸効果を補修後に評価する手法としては撥水性を確認することが有効であることを示した。以上の結果より、低水セメント比のコンクリートに対して含浸効果を評価する際は、含浸深さに加えて、撥水性なども合わせて実施することで評価精度が向上すると考察した。
- 5章では、40年以上前に塩害補修のための表面保護工法として鋼板接着工法が用いられたPCT桁橋について、その補修効果を検証するため、外観変状調査、付着試験、接着剤の材料分析等の調査を行った。その結果、広範囲にわたり鋼板の浮きや腐食が確認された。また、鋼板の浮きが生じている箇所の樹脂は、浮きが生じていない箇所の樹脂と同様に変質していないこと、塩分が付着していないことが確認された。一方で、浮きが生じ

ている箇所の鋼材裏面に施されていた亜鉛系防腐剤は酸化している状態であった。鋼板の浮きの原因は、下フランジ側面まで巻き込まれた鋼板の天端付近のシール部から水が浸入したことで亜鉛系防錆剤の防食効果が低下したことが原因として考えられた。これらを踏まえ、類似橋の点検において、鋼板がU型に接着されている場合には、鋼板の天端付近のシール材の状態を調査し確実に止水が行われていることを確認する必要があると考察した。

- 6章では、2～5章の検討結果および既往研究に基づき、塩害を受けた既設PC橋への表面保護工法の適用に関する各種検討を行った。塩害に対する補修効果が確実に発揮可能な限界について検討した結果、 C_0 および D_c の実測値は架橋環境によって変動すること、補修時点における C_S が C_{lim} 以下であれば、1事例のみであるが補修後も健全な状況であったことが確認された。また、塩害による劣化の可能性のあるPC橋上部構造の点検頻度について検討した結果、旧基準のかぶりが適用されたPC橋に関して、コンクリート中の鋼材が塩害により腐食する前に予防保全的な補修を行うためには、塩害特定点検に示される点検頻度5年もしくは10年よりも点検間隔を密にする必要があることを考察した。さらに、塩害環境にある既設PC橋に表面保護工法を適用する際の留意点を整理し、各工法ともPC橋特有の視点から補修方法の適否を検討する必要があることを示した。

7. 2 今後の展望

本研究を通じ、塩害を受けた既設PC橋への表面保護工法の適用にあたっては、塩害に対する既往の調査・診断・施工技術をそのまま適用しても予防保全が達成できないケースがあることが検証された。これを回避するためには予め実構造物を調査して実際に起きている事象を把握し、既設PC橋の各種条件に応じて性能を評価したうえで補修効果が確実に得られる信頼性の高い補修技術を選定することが望まれる。

また、塩害に対する補修効果を確実に得るためには、本研究の限られた検討範囲および文献(7-2)をもとに、潜伏期では鋼材位置の塩化物イオン濃度が $2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度以下、進展期では同 $2\sim 5\text{kg}/\text{m}^3$ 程度以下であることを定義し、これらの知見を6章に示した表6.1.1に反映し、再整理した結果を表7.2.1に示す。これによると、塩害に対する補修効果が確実に得られるのは、従来の考え方と同様に表面保護工法については、潜伏期における適用が適切である。なお、進展期に表面保護工法を採用する際には、補修効果が確実に得られることを塩分浸透予測等によりあらかじめ確認することが望ましく、今後、塩分浸透予測精度技術の向上が望まれる。

本共同研究の前報²³⁾において補強効果が確実に発揮可能な限界に、本報の補修効果が確実に発揮可能な限界を追記し、再整理した結果を図7.2.1に示す。図示したとおり、補強は縦軸の性能低下(=ある時点の耐荷性)に対し補強効果を確実に発揮するための検討が主であり、補修は横軸の時間軸における性能低下(=耐久性)に対し補修効果を確実に発揮するための検討が肝要であることを付記する。

表7.2.1 塩害に対する補修効果が確実に発揮可能な補修工法例の素案（表6.1.1に加筆修正）

劣化過程	定義 (PC の場合)	期待する効果 (補修効果が得られる限界)	補修効果が確実に 発揮可能な補修工法の例
潜伏期	鋼材の腐食が開始するまでの期間 (最外縁鉄筋の腐食ひび割れ発生までの期間)	塩化物イオンの浸透量の低減 (鋼材位置の塩化物イオン濃度が 2kg/m^3 程度以下)	表面保護
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間 (PC 鋼材腐食までの期間)	塩化物イオンの浸透量の低減 (鋼材位置の塩化物イオン濃度が $2\sim 5\text{kg/m}^3$ 程度以下)	表面保護 (補修効果が確実に得られることを予め確認する)
		塩化物イオンの除去	脱塩, 断面修復
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	鋼材の防食	電気防食
		塩化物イオンの除去	断面修復, 脱塩
劣化期	腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間	力学的な性能の回復	断面修復, その他 (連続繊維接着, 外ケーブル, 巻立て工法等の適用の検討)

※文献⁷⁻¹⁾に基づき表を一つに統合し、表面保護に関わる記述の部分を灰色で着色した表6.1.1に、さらに下線部を加筆修正した。

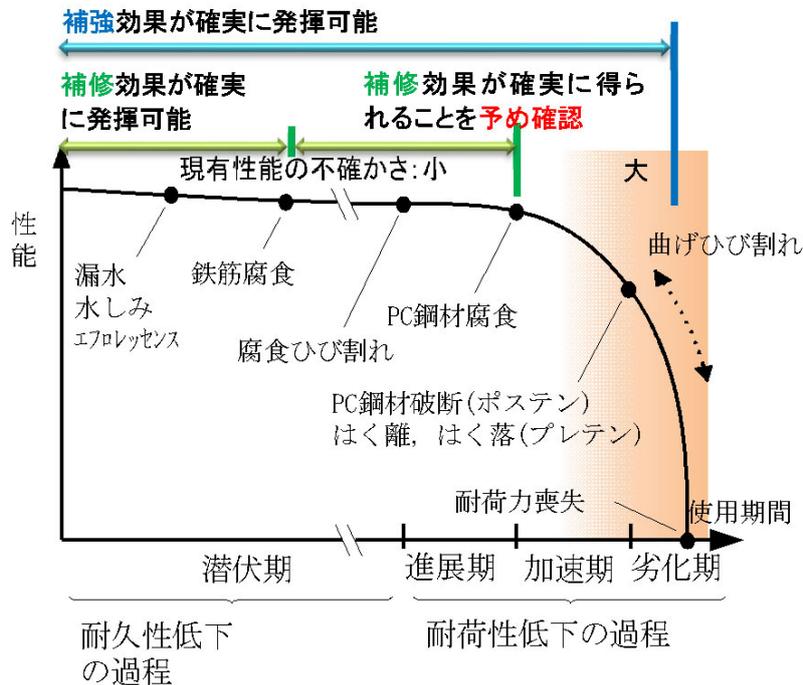


図 7.2.1 PC 構造物で予想される劣化シナリオと補修補強効果が確実に発揮可能な限界のイメージ
(文献⁷⁻³⁾に加筆)

7章の参考文献

- 7-1) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2018.10
- 7-2) 北野勇一，渡辺博志，久田真，北山良：補修 RC 梁中の残留塩分と鋼材腐食に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1107-1112，2007
- 7-3) 土木研究所：共同研究報告書第 520 号，撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の補修補強技術の高度化に関する共同研究報告書—既設 PC 橋の性能評価法および外ケーブル補強技術に関する研究—，2020.12

謝辞

現地調査や撤去桁の提供および資料提供にご協力いただいた方々をはじめ，本調査研究に関連してご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

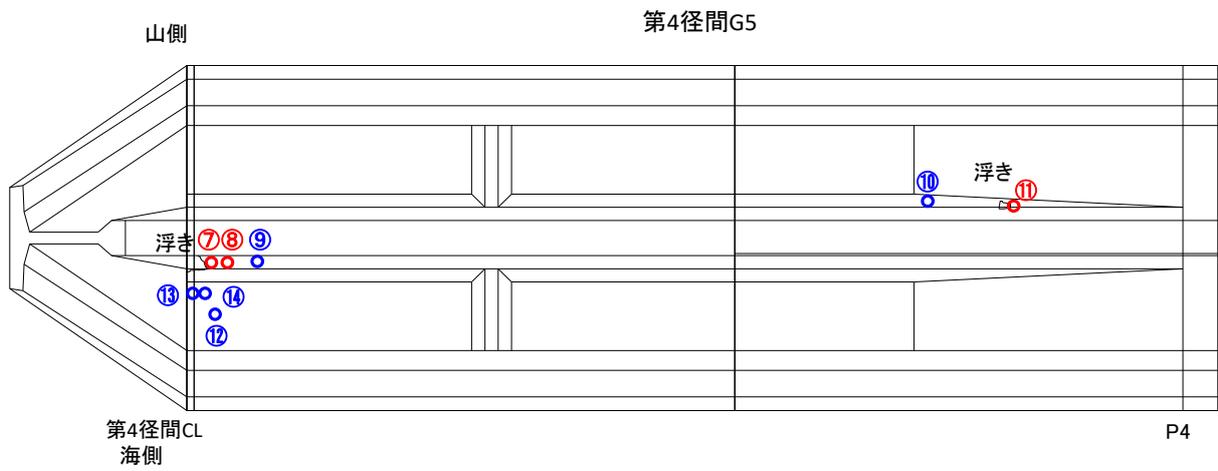
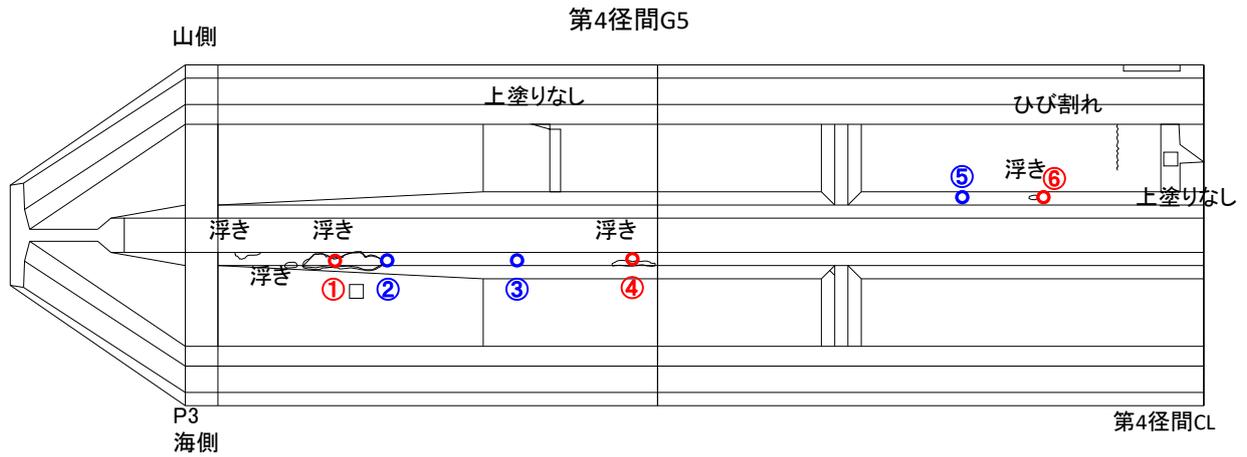
付 録

付録1 表面被覆された撤去桁の解体調査（第4・8径間）

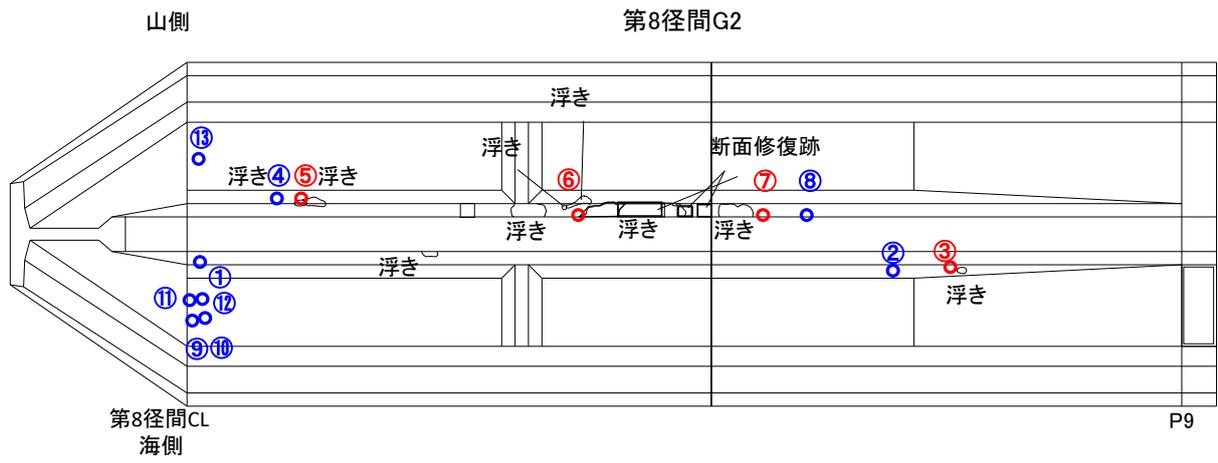
～中性化・塩化物イオン量～

・ 試料採取位置

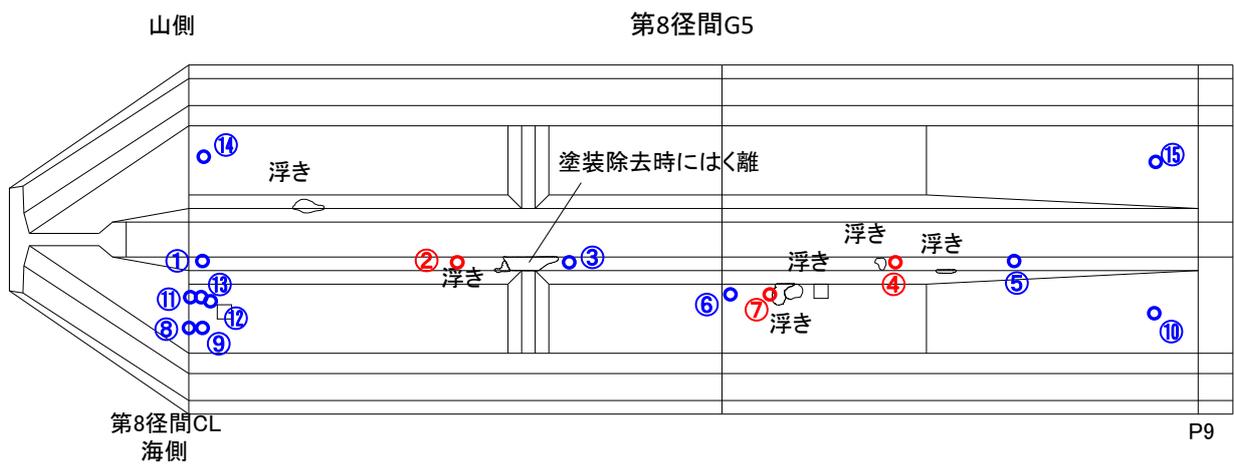
青字：健全部，赤字：劣化部



付図 1.1 試料採取位置（第4径間G5桁）



付図 1.2 試料採取位置 (第 8 径間 G2 桁)



付図 1.3 試料採取位置 (第 8 径間 G5 桁)

・調査結果

①中性化深さ(JIS A 1152)

1) 第4 径間 G5 桁

付表 1.1 中性化深さ測定結果 (第4 径間 G5 桁)

試料番号	中性化深さ(mm)								最大値 (mm)	平均値 (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8		
No.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No.2	1.5	8.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	4.0	8.5	1.8
No.3	9.7	9.1	8.9	6.8	8.1	5.3	9.1	14.1	14.1	8.9
No.4	18.4	15.7	7.2	6.9	9.6	9.7	9.3	8.2	18.5	10.6
No.5	9.8	10.6	6.1	9.0	11.0	9.9	14.1	10.7	14.1	10.2
No.6	6.5	5.1	12.3	7.6	10.3	15.7	6.7	6.5	16.3	8.8
No.7	9.0	8.5	8.5	10.5	2.5	4.5	6.0	8.5	10.5	7.3
No.8	9.6	7.6	8.8	5.1	4.6	7.1	9.0	8.14	14.2	7.5
No.9	6.7	3.8	0.0	2.3	4.0	8.1	14.1	6.2	14.1	5.7
No.10	8.0	4.1	5.7	3.9	3.6	8.5	7.5	3.8	11.2	5.6
No.11	14.3	8.6	4.7	2.8	2.3	1.3	1.4	3.9	14.3	4.9
No.12	10.9	14.4	13.4	12.1	10.3	9.8	14.2	10.4	14.7	11.9
No.13	12.0	10.5	17.0	16.5	9.0	12.5	17.0	15.5		13.8
No.14	6.0	9.5	10.5	10.0	10.0	10.0	10.5	9.5	11.0	9.8

※最大値は測定位置以外の場所を表す場合あり

※No.13 は過年度 (2007 年度) の調査結果より引用 (補修前の結果)

2) 第8 径間 G2 桁

付表 1.2 中性化深さ測定結果 (第8 径間 G2 桁)

試料番号	中性化深さ(mm)								最大値 (mm)	平均値 (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8		
No. 1	10.0	11.0	10.5	10.0	10.5	9.0	9.5	7.5	12.0	9.8
No. 2	11.2	10.6	9.9	13.8	8.2	15.8	9.3	5.5	17.0	10.5
No. 3	0.0	9.2	6.8	6.3	6.4	4.2	6.6	7.5	17.1	5.9
No. 4	11.0	9.9	8.2	10.5	8.2	15.7	10.0	9.4	15.0	10.4
No. 5	15.9	12.3	11.7	14.3	12.5	8.4	10.5	7.8	19.1	11.7
No. 6	5.0	4.0	8.5	9.0	10.0	4.0	4.5	3.5	10.5	6.1
No. 7	14.5	7.8	11.1	11.6	13.8	15.1	11.9	14.7	19.6	12.6
No. 8	17.2	12.1	15.4	11.6	12.3	10.7	12.4	8.9	17.5	12.6
No. 9	7.5	18.7	8.7	10.4	11.4	9.3	15.7	19.5	20.1	12.7
No. 10	11.0	10.0	15.0	10.0	12.0	11.0	10.0	10.5	15.5	11.2
No. 11	10.0	7.5	13.5	12.0	11.5	13.0	10.5	13.5		11.4
No. 12	8.0	14.5	8.0	15.5	9.0	12.0	0.0	0.0	15.5	8.4
No. 13	13.5	10.0	10.5	10.0	9.5	9.5	12.0	11.0	13.5	10.8

※最大値は測定位置以外の場所を表す場合あり

※No.11 は過年度 (2007 年度) の調査結果より引用 (補修前の結果)

3) 第8径間G5桁

付表 1.3 中性化深さ測定結果 (第8径間G5桁)

試料番号	中性化深さ(mm)								最大値 (mm)	平均値 (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8		
No.1	6.0	6.5	5.5	5.0	4.0	7.0	9.0	6.0	9.5	6.1
No.2	7.6	9.8	8.8	6.6	7.9	8.9	5.6	5.3	11.3	7.6
No.3	11.5	2.6	4.6	2.3	4.5	7.9	6.4	4.6	16.4	5.6
No.4	5.5	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	8.2	2.0
No.5	5.3	8.2	11.5	0.0	6.0	1.9	5.5	5.2	13.5	5.5
No.6	9.8	6.2	6.8	4.6	11.4	11.8	12.0	15.7	17.8	9.8
No.7	9.2	5.2	4.5	5.1	6.0	3.3	7.3	9.4	11.2	6.3
No.8	6.8	9.8	9.7	9.7	8.5	9.4	11.1	16.7	20.1	10.2
No.9	11.0	12.0	9.0	10.0	15.0	7.0	7.0	8.0	15.5	9.9
No.10	6.0	7.0	6.5	7.0	5.0	3.0	5.5	8.5	9.5	6.1
No.11	11.5	11.0	7.5	8.0	9.0	11.1	12.0	11.5		10.2
No.12	---	---	---	---	---	---	---	---		---
No.13	10.0	11.0	6.0	5.5	4.0	8.0	10.0	7.5	12.0	7.8
No.14	11.0	8.0	9.0	8.5	9.0	11.0	11.0	11.5	12.0	9.9
No.15	10.0	8.0	10.0	11.0	12.5	11.0	7.5	11.0	13.5	10.1

※最大値は測定位置以外の場所を表す場合あり

※No.11 は過年度 (2007 年度) の調査結果より引用 (補修前の結果)

※No.12 は過年度調査で中性深さの測定無し

②塩化物イオン濃度(JIS A 1154)

1) 第4径間G5桁

付表 1.4 塩化物イオン量測定結果 (第4径間G5桁)

試料番号	試料採取位置(mm)	試料採取量 W(g)	定量 (mL)	コン単位容積質量 (kg/m ³) ※標準値	分取量 X(mL)	硝酸銀フアクターf	硝酸銀滴定量 V(mL)	溶液のCl ⁻ 濃度(%)	試料中のCl ⁻ 濃度 C(%)	コンCl ⁻ (kg/m ³)	
No.1	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	2.389	0.01694	0.3388	7.79
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.515	0.01074	0.2148	4.94
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.482	0.00342	0.0683	1.57
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.090	0.00064	0.0128	0.29
No.2	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.527	0.01083	0.2165	4.98
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.249	0.00886	0.1771	4.07
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.275	0.00195	0.0390	0.90
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.074	0.00052	0.0105	0.24
No.3	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.169	0.00829	0.1658	3.81
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.666	0.01181	0.2362	5.43
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.643	0.00456	0.0912	2.10
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.214	0.00152	0.0303	0.70
No.4	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.518	0.00367	0.0735	1.69
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.965	0.00684	0.1368	3.15
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	1.639	0.01162	0.2324	5.35
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.603	0.00428	0.0855	1.97
No.5	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.108	0.00786	0.1571	3.61
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.899	0.01346	0.2693	6.19
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.918	0.00651	0.1302	2.99
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.357	0.00253	0.0506	1.16
No.6	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.288	0.00913	0.1826	4.20
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	2.039	0.01446	0.2891	6.65
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	1.072	0.00760	0.1520	3.50
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.416	0.00295	0.0590	1.36
No.7	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.138	0.00807	0.1614	3.71
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	2.318	0.01643	0.3287	7.56
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.948	0.00672	0.1344	3.09
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.268	0.00190	0.0380	0.87
No.8	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.045	0.00741	0.1482	3.41
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	2.329	0.01651	0.3303	7.60
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	1.026	0.00727	0.1455	3.35
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.279	0.00198	0.0396	0.91
No.9	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.723	0.01222	0.2443	5.62
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.960	0.01390	0.2779	6.39
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.628	0.00445	0.0891	2.05
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.205	0.00145	0.0291	0.67
No.10	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.767	0.01253	0.2506	5.76
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.598	0.01133	0.2266	5.21
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.566	0.00401	0.0803	1.85
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.168	0.00119	0.0238	0.55
No.11	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.444	0.00315	0.0630	1.45
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.169	0.00120	0.0240	0.55
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.092	0.00065	0.0130	0.30
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.086	0.00061	0.0122	0.28
No.12	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.959	0.00680	0.1360	3.13
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.860	0.00610	0.1219	2.80
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.275	0.00195	0.0390	0.90
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.084	0.00060	0.0119	0.27
No.13	1	0~20									6.26
	2	20~40									2.81
	3	40~60									0.56
	4	60~80									0.23
No.14	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.984	0.00698	0.1395	3.21
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.399	0.00992	0.1984	4.56
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.426	0.00302	0.0604	1.39
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.104	0.00074	0.0147	0.34

※No.13 は過年度 (2007年度) の調査結果より引用 (補修前の結果)

※No.13・No.14 は4章の過年度比で使用したコア

2) 第8 径間 G2 桁

付表 1.5 塩化物イオン量測定結果 (第8 径間 G2 桁)

試料 番号	試料採取 位置(mm)	試料 採取量 W(g)	定量 (mL)	コン単位 容積質量 (kg/m ³) ※標準値	分取量 X(mL)	硝酸銀 フアク ターf	硝酸銀 滴定量 V(mL)	溶液のCl ⁻ 濃度(%)	試料中の Cl ⁻ 濃度 C(%)	コンCl ⁻ (kg/m ³)	
No.1	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.128	0.00800	0.1600	3.68
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.483	0.01051	0.2103	4.84
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.351	0.00249	0.0498	1.14
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.073	0.00052	0.0104	0.24
No.2	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	2.628	0.01863	0.3727	8.57
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	2.493	0.01768	0.3535	8.13
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.655	0.00464	0.0929	2.14
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.114	0.00081	0.0162	0.37
No.3	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.974	0.01400	0.2799	6.44
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	2.024	0.01435	0.2870	6.60
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.636	0.00451	0.0902	2.07
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.107	0.00076	0.0152	0.35
No.4	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	2.003	0.01420	0.2840	6.53
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	2.368	0.01679	0.3358	7.72
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.646	0.00458	0.0916	2.11
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.104	0.00074	0.0147	0.34
No.5	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	2.459	0.01743	0.3487	8.02
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	2.413	0.01711	0.3422	7.87
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.815	0.00578	0.1156	2.66
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.148	0.00105	0.0210	0.48
No.6	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.283	0.00910	0.1819	4.18
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.699	0.01205	0.2409	5.54
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.764	0.00542	0.1083	2.49
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.105	0.00074	0.0149	0.34
No.7	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.036	0.00735	0.1469	3.38
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.645	0.01166	0.2333	5.37
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.343	0.00243	0.0486	1.12
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.085	0.00060	0.0121	0.28
No.8	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.213	0.00860	0.1720	3.96
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.322	0.00937	0.1875	4.31
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.245	0.00174	0.0347	0.80
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.077	0.00055	0.0109	0.25
No.9	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.477	0.01047	0.2094	4.82
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.349	0.00247	0.0495	1.14
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.069	0.00049	0.0098	0.23
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.077	0.00055	0.0109	0.25
No.10	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.157	0.00820	0.1641	3.77
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.159	0.00113	0.0225	0.52
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.074	0.00052	0.0105	0.24
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.066	0.00047	0.0094	0.22
No.11	1	0~20									6.10
	2	20~40									0.51
	3	40~60									0.21
	4	60~80									0.23
No.12	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.734	0.00520	0.1041	2.39
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.762	0.00540	0.1081	2.49
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.249	0.00177	0.0353	0.81
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.093	0.00066	0.0132	0.30
No.13	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.138	0.0080	0.1600	3.68
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	2.318	0.00203	0.0406	0.93
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.948	0.00055	0.0109	0.25
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.268	0.00045	0.0091	0.21

※No.11 は過年度 (2007 年度) の調査結果より引用 (補修前の結果)

※No.11・No.12 は4章の過年度比で使用したコア

3) 第8径間G5桁

付表 1.6 塩化物イオン量測定結果 (第8径間G5桁)

試料番号	試料採取位置(mm)	試料採取量 W(g)	定量 (mL)	コン単位容積質量 (kg/m ³) ※標準値	分取量 X(mL)	硝酸銀フアクターf	硝酸銀滴定量 V(mL)	溶液のCl ⁻ 濃度(%)	試料中のCl ⁻ 濃度 C(%)	コンCl ⁻ (kg/m ³)	
No.1	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.629	0.01155	0.2310	5.31
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.627	0.01154	0.2307	5.31
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.494	0.00350	0.0700	1.61
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.065	0.00046	0.0092	0.21
No.2	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.635	0.01159	0.2318	5.33
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.939	0.01375	0.2750	6.32
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.922	0.00654	0.1307	3.01
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.169	0.00120	0.0240	0.55
No.3	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.932	0.01370	0.2740	6.30
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	2.668	0.01892	0.3783	8.70
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	1.264	0.00896	0.1792	4.12
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.320	0.00227	0.0454	1.04
No.4	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.967	0.01395	0.2789	6.42
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.686	0.01195	0.2391	5.50
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.208	0.00147	0.0295	0.68
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.072	0.00051	0.0102	0.23
No.5	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.996	0.00706	0.1412	3.25
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.265	0.00188	0.0376	0.86
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.088	0.00062	0.0125	0.29
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.065	0.00046	0.0092	0.21
No.6	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.414	0.01003	0.2005	4.61
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.636	0.01160	0.2320	5.34
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.408	0.00289	0.0579	1.33
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.084	0.00060	0.0119	0.27
No.7	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.768	0.01254	0.2507	5.77
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.295	0.00918	0.1836	4.22
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.244	0.00173	0.0346	0.80
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.087	0.00062	0.0123	0.28
No.8	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.798	0.01275	0.2550	5.86
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.634	0.01159	0.2317	5.33
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.224	0.00159	0.0318	0.73
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.067	0.00048	0.0095	0.22
No.9	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.805	0.00571	0.1141	2.63
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.559	0.00396	0.0793	1.82
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.084	0.00060	0.0119	0.27
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.073	0.00052	0.0104	0.24
No.10	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.389	0.00276	0.0552	1.27
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.076	0.00054	0.0108	0.25
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.062	0.00044	0.0088	0.20
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.066	0.00047	0.0094	0.22
No.11	1	0~20									8.92
	2	20~40									1.14
	3	40~60									0.28
	4	60~80									0.26
No.12	1	0~20									8.67
	2	20~40									3.18
	3	40~60									0.25
	4	60~80									0.25
No.13	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	1.222	0.00866	0.1733	3.99
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	1.286	0.00912	0.1824	4.19
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.275	0.00195	0.0390	0.90
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.067	0.00048	0.0095	0.22
No.14	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.444	0.00315	0.0630	1.45
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.394	0.00279	0.0559	1.28
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.064	0.00045	0.0091	0.21
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.063	0.00045	0.0089	0.21
No.15	1	0~20	10.00	200	2300	50	1.000	0.307	0.00218	0.0435	1.00
	2	20~40	10.00	200	2300	50	1.000	0.076	0.00054	0.0108	0.25
	3	40~60	10.00	200	2300	50	1.000	0.056	0.00040	0.0079	0.18
	4	60~80	10.00	200	2300	50	1.000	0.069	0.00049	0.0098	0.23

※No.11 と No.12 は過年度 (2007 年度と 2012 年度) の調査結果より引用 (補修前と補修後の結果)

※No.13・No.14 は 4 章の過年度比で使用したコア

・測定結果から求めた C_0 (表面塩化物イオン量) および D (見かけの拡散係数) の結果

表中の着色箇所は C_0 を求める際に使用したものを意味し、0mm~20mm の値が 20mm~40mm の結果と同程度もしくは低くなっている箇所については使用せずに、20mm 以深のデータから算出した。これは、外来塩分が内部に浸透する場合、深さに応じて塩化物イオン濃度が低くなるが、表層部の塩化物イオン濃度が低いもしくは同程度になると、拡散係数を設定した際のフィッティング誤差が大きくなり、推定精度が低くなるためである。

付表 1.7 コア採取による塩化物イオン濃度の結果 (第4径間 G5 桁)

測定場所	第4径間G5桁【海側】													
	下フランジ											ウェブ中		ウェブ下
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
コアNo.														
0-20mm	7.79	4.98	3.81	1.69	3.61	4.20	3.71	3.41	5.62	5.76	1.45	3.13	6.26	3.21
20-40mm	4.94	4.07	5.43	3.15	6.19	6.65	7.56	7.60	6.39	5.21	0.55	2.80	2.81	4.56
40-60mm	1.57	0.90	2.10	5.35	2.99	3.50	3.09	3.35	2.05	1.85	0.30	0.90	0.56	1.39
60-80mm	0.29	0.24	0.70	1.97	1.16	1.36	0.87	0.91	0.67	0.55	0.28	0.27	0.23	0.34
表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m ³)	10.0	18.1	14.2	27.8	13.5	13.7	19.3	18.6	19.3	14.8	1.9	4.5	8.5	15.1
見掛けの拡散係数 D (cm ² /年)	0.15	0.06	0.12	0.16	0.17	0.19	0.13	0.14	0.10	0.11	0.06	0.08	0.09	0.09
桁端からの距離 (m)	2.0	2.5	5.0	7.0	12.0	13.0	15.0	15.5	16.5	26.0	27.0	15.5	15.0	15.5
損傷からの距離 (m)	0.0	0.5	2.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.8	0.5	0.5
損傷種類	浮き	-	-	浮き	-	浮き	浮き	浮き	-	-	浮き	-	-	-
鉄筋位置の塩化物イオン濃度 C_s (kg/m ³)	3.5	1.2	2.1	8.4	4.9	5.7	3.9	4.0	5.7	4.8	0.5	0.3	1.8	3.3

塩化物イオン濃度の単位: kg/m³

付表 1.8 コア採取による塩化物イオン濃度の結果 (第8径間 G2 桁)

測定場所	第8径間G2桁【海側】						第8径間G2桁【山側】									
	下フランジ			ウェブ中			ウェブ下			下フランジ				ウェブ中		
	1	2	3	9	10	11	12	4	5	6	7	8	13	14	15	
コアNo.																
0-20mm	3.68	8.57	6.44	4.82	3.77	6.10	2.39	6.53	8.02	4.18	3.38	3.96	3.68			
20-40mm	4.84	8.13	6.60	1.14	0.52	0.51	2.49	7.72	7.87	5.54	5.37	4.31	0.93			
40-60mm	1.14	2.14	2.07	0.23	0.24	0.21	0.81	2.11	2.66	2.49	1.12	0.80	0.25			
60-80mm	0.24	0.37	0.35	0.25	0.22	0.23	0.30	0.34	0.48	0.34	0.28	0.25	0.21			
表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m ³)	20.1	29.9	21.5	9.6	9.6	13.1	8.0	18.0	18.0	15.0	15.0	12.0	2.0			
見掛けの拡散係数 D (cm ² /年)	0.07	0.08	0.09	0.02	0.02	0.02	0.09	0.12	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10			
桁端からの距離 (m)	15.5	26.0	27.0	15.5	26.0	15.5	26.0	16.0	17.0	20.0	23.0	24.0	26.0			
損傷からの距離 (m)	2.0	1.0	0.0	3.5	3.0	3.0	2.5	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.5			
損傷種類	-	-	浮き	-	-	-	-	-	浮き	浮き	浮き	-	-	-		
鉄筋位置の塩化物イオン濃度 C_s (kg/m ³)	1.6	4.8	10.4	0.0	0.1	0.1	1.7	5.7	5.0	2.1	2.4	1.9	0.5			

塩化物イオン濃度の単位: kg/m³

付表 1.9 コア採取による塩化物イオン濃度の結果 (第8径間 G5 桁)

測定場所	第8径間G5桁【海側】														第8径間G5桁【山側】	
	下フランジ							ウェブ中				ウェブ下			ウェブ中	
	1	2	3	6	7	4	5	8	9	10	11	12	13	14	15	
コアNo.																
0-20mm	5.31	5.33	6.30	4.61	5.77	6.42	3.25	5.86	2.63	1.27	8.92	8.67	3.99	1.45	1.00	
20-40mm	5.31	6.32	8.70	5.34	4.22	5.50	0.86	5.33	1.62	0.25	1.14	3.18	4.19	1.28	0.25	
40-60mm	1.61	3.01	4.12	1.33	0.80	0.68	0.29	0.73	0.27	0.20	0.28	0.25	0.90	0.21	0.18	
60-80mm	0.21	0.55	1.04	0.27	0.28	0.23	0.21	0.22	0.24	0.22	0.26	0.25	0.22	0.21	0.23	
表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m ³)	18.2	15.4	20.5	12.0	10.0	40.3	4.9	8.3	4.0	2.8	16.6	12.5	12.0	5.0	1.5	
見掛けの拡散係数 D (cm ² /年)	0.09	0.14	0.15	0.10	0.10	0.04	0.04	0.07	0.04	0.01	0.03	0.07	0.08	0.05	0.02	
桁端からの距離 (m)	15.5	19.0	21.0	23.0	24.0	25.0	27.0	16.0	16.5	16.5	15.5	16.0	16.5	15.5	16.5	
損傷からの距離 (m)	2.5	0.0	2.0	1.0	0.0	0.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.0	3.0	3.0	
損傷種類	-	浮き	-	-	浮き	浮き	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
鉄筋位置の塩化物イオン濃度 C_s (kg/m ³)	2.1	2.4	3.1	4.5	6.1	2.4	0.8	0.1	0.3	0.0	0.4	1.9	2.3	0.5	0.0	

塩化物イオン濃度の単位: kg/m³

付録2 長期供用された表面被覆材の調査（第4・8・20径間）

・保護塗装の仕様

付表 2.1 保護塗装仕様

種類	商品名	第4・8径間		第20径間	
		使用量 (kg/m ²)	膜厚 (μm)	使用量 (kg/m ²)	膜厚 (μm)
シリコン樹脂系上塗り	レジガード#200SC 上塗	0.12	25	/	/
柔軟形ウレタン樹脂系上塗り	AU-1	/	/	0.12	30
柔軟形エポキシ樹脂系中塗り (3層)	レジガード#200EH 中塗	0.35	160	/	/
柔軟形エポキシ樹脂系中塗り (2層)	レジガード#200EH 中塗	0.35	160	/	/
柔軟形エポキシ樹脂系中塗り (1層)	レジガード#200EH 中塗	0.35	160	/	/
	ネオライナー#100	/	/	0.35	160
エポキシ樹脂系パテ	レジガードパテSH	0.50	-	/	/
	ネオパテ	/	/	0.5	-
エポキシ樹脂系プライマー	レジガードCFプライマー	0.10	-	/	/
	ネオプライマー	/	/	0.5	-

・試料採取箇所 【 P119～P120 】

採取日：2019年9月11日

付表 2.2 採取箇所

No	径間	桁	BL	特徴
1-1	4	G5	1	損傷部
1-2	4	G5	1	1-1 近傍の健全部
2-1	8	G2	3	損傷部
2-2	8	G2	3	2-1 近傍の健全部
3-1	8	G5	4	損傷部
3-2	8	G5	4	3-1 近傍の健全部
4	4	G5	2	上塗り未塗装部
5	8	G5	3	健全部
6-1	20	G5	1	損傷部
6-2	20	G5	1	6-1 近傍の健全部

※損傷部とは、コンクリート内部鉄筋の発錆に起因するコンクリートの浮きや割れが発生している箇所である。

・調査項目 【 P121～P122 】

付表 2.3 調査項目

No	項目	方法
1	膜厚	デジタルマイクロスコープによる断面観察
2	遮塩性	鋼道路橋防食便覧 遮塩性試験方法
3	塗膜の組成	赤外吸収スペクトル測定

・調査結果

①膜厚 【 P123～P134 】

付表 2.4 膜厚測定結果

[単位:μm]

No	中塗り				上塗り
	1層目	2層目	3層目	計	
標準膜厚	160 (160) ※1	160	160	480 (160)	25
1-1	104	92	138	334	47
1-2	109	100	125	334	52
2-1	134	245	217	597	70
2-2	180	169 / 187 ※2	139	675	52
3-1	192 / 99 ※3	201	120	612	86
3-2	158	157	112	427	60
4	164	199	199	562	— ※4
5	126	221	181	528	46
6-1	(148)			(148)	40
6-2	(192)			(192)	28

※1：() は第 20 径間の膜厚

※2：2層目が2回（合計4回）塗られていた

※3：1層目が2回（合計4回）塗られていた

※4：上塗りが塗られておらず，また表層に変色が見られた

②遮塩性能 【 P135 】

付表 2.5 遮塩性能測定結果

No	遮塩性
1-1	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)
1-2	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)
2-1	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)
2-2	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)
3-1	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)
3-2	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)
4	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)
5	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)
6-1	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)
6-2	測定下限値 (0.34×10 ⁻³ 以下)

[単位: mg/cm²・日]

③塗膜の組成 【 P136~P146 】

付表 2.6 塗膜組成分析結果

No	中塗り			上塗り
	1層目	2層目	3層目	
1-1	○	○	○	○
1-2	○	○	○	○
2-1	○	○	○	○
2-2	○	○	○	○
3-1	○	○	○	○
3-2	○	○	○	○
4	○	○	×	—
5	○	○	○	○
6-1	○			○
6-2	○			○

○ : 樹脂劣化無し × : 樹脂劣化あり

【 試料採取箇所】 塗膜サンプル採取箇所と作業状況

単位：mm

 : 損傷部 : 健全部

	<p>1-1, 1-2</p> <p>第4径間 G5 桁 (1BL)</p> <p>損傷部 (1-1) および健全部 (1-2)</p>
	<p>2-1, 2-2</p> <p>第8径間 G2 桁 (3BL)</p> <p>損傷部 (2-1) および健全部 (2-2)</p>
	<p>3-1, 3-2</p> <p>第8径間 G5 桁 (4BL)</p> <p>損傷部 (3-1) および健全部 (3-2)</p>

単位：mm

 ：異常部

 ：健全部

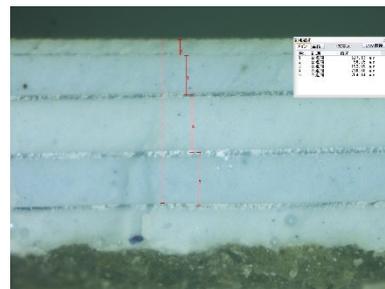
	<p style="text-align: center;">4</p> <p style="text-align: center;">第4径間 G5 桁 (2BL)</p> <p style="text-align: center;">上塗りに塗装部</p>
	<p style="text-align: center;">5</p> <p style="text-align: center;">第8径間 G5 桁 (3BL)</p> <p style="text-align: center;">健全部</p>
	<p style="text-align: center;">6-1, 6-2</p> <p style="text-align: center;">第20径間 G5 桁</p> <p style="text-align: center;">損傷部 (6-1) および健全部 (6-2)</p>

【 調査項目 】 評価項目と目的, 試験方法

1. 膜厚

1.1 目的

塗膜の遮塩性等の性能は膜厚に依存するため, 本来の性能を得るには規定以上の膜厚が必要となる。塗膜劣化に伴う減耗や施工不良などにより膜厚が規定値以下の場合, 本来の性能は得られず, 想定よりも早期にコンクリートが劣化することが予測される。よって対象サンプルの膜厚を測定し評価する。



付写真 2.1 測定例

1.2 方法

対象サンプルの断面を, デジタルマイクロスコープを用いて各層の膜厚を測定する。対象は遮塩性能を担う中塗り及び上塗りとする。測定は各層3点とし平均値によって表す。

2. 遮塩性

2.1 目的

本橋梁は過酷な塩害地域に架設されており, 最も遮塩性能が求められる。室内試験では優れた遮塩性能が明らかとなっているが, 何らかの理由によって正しく成膜していない場合や, 塗膜の劣化が著しい場合, 本来の遮塩性能は期待できず, 想定よりも早期にコンクリートが劣化することが予測される。よって対象サンプルの遮塩性を測定し評価する。

2.2 方法

対象サンプルを, 「鋼道路橋防食便覧 遮塩性試験方法」に基づき測定する。対象は遮塩性能を担う中塗り及び上塗りとする。測定は3点とし平均値によって表す。

サンプルの調整: 採取した試験体より中～上塗り塗膜を採取し(※1, 付図 2.1), 表裏面を蒸留水で洗浄する。ピンホール等の欠陥が無いことを確認し, カッターナイフを用いて約 $\phi 60\text{mm}$ に成形する。

※1 採取した試験体は, パテと中塗りの層間で容易に剥離が生じたことから, 塗膜は試験体より強制的に剥離させて採取した。

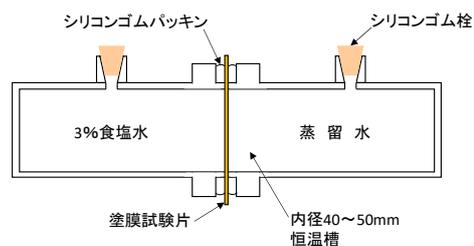
なお, パテと中塗りの層間の塩分量を測定したところ, 約 200~400ppm の塩分が検出された。本来, パテと中塗りで容易に剥離することは無く, パテと中塗りの層間に塩分が多く付着していたことにより, 容易に剥離が生じたと推測する。なお, 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説(日本道路協会)3.3 施工管理(p.56)に付着塩分量の管理値として 100ppm 以下の記述がある。



付図 2.1 サンプル調整イメージ

2.3 測定方法

右図に示す測定セルに塗膜を挟み、塗膜表面側（上塗り側）に3%食塩水、塗膜裏面側（中塗り1層目側）に蒸留水を、それぞれ約200g入れる。23℃環境下にて30日間静置後、蒸留水側のセルより溶液を採取し、イオンクロマトグラフによって溶液中の塩化物イオン量を測定する。



付図 2.2 測定概要図

$$\text{透過量の算出} : Q = (V \times M \times 10^{-3}) / (A \times T)$$

Q : 塩化物イオン量 (mg/cm²/日)

V : 蒸留水量 (g)

M : 分析結果 (ppm)

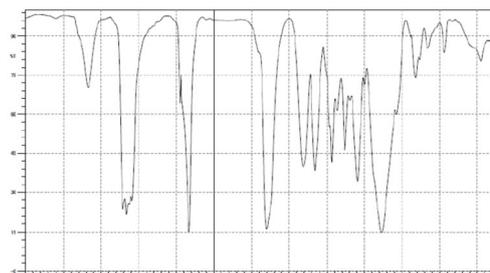
A : 拡散セルの透過面積 (cm²)

T : 試験時間 (日)

3. 塗膜の組成

3.1 目的

塗膜の遮塩性等の性能は、劣化に伴い低下していく。また、塗膜の遮塩性等の性能を得るためには、施工に関する諸条件を厳守し正しく成膜する必要があるが、諸条件を逸脱した場合、正しく成膜されず、本来の性能は得られない。よって、成分分析にて樹脂成分の劣化や変質について評価する。なお、チャートの横軸は波長、縦軸は吸収強度である。



付図 2.3 測定例（チャート図）

3.2 方法

対象サンプルの各層を、赤外吸収スペクトルにて測定する。対象は遮塩性能を担う中塗り及び上塗りとする。測定結果を各塗料の標準塗膜と比較し、樹脂の劣化や変質について判定する。

上塗りは3000～2800, 1760～1620, 1580～1500, 1500～1410, 1410～1340, 1300～900, 800～700cm⁻¹の波長により判定する。

中塗りは3000～1800, 1760～1660, 1640～1580, 1580～1340, 1300～1160, 1160～900, 900～840, 800～700cm⁻¹の波長によって判定する。

【 調査結果 ①膜厚 】 断面観察による膜厚測定

標準膜厚：付表 2.4 参照

付表 2.7 膜厚測定結果 (μm)

No.	測定点	中塗り						上塗り
		1層目	+α	2層目	+α	3層目	計	
1-1	n1	97	----	88	----	129	314	54
	n2	98	----	98	----	128	324	38
	n3	119	----	88	----	157	364	51
	Ave	104	----	92	----	138	334	47
1-2	n1	117	----	99	----	117	333	52
	n2	101	----	92	----	141	334	53
	n3	110	----	110	----	116	335	51
	Ave	109	----	100	----	125	334	52
2-1	n1	125	----	219	----	238	581	54
	n2	121	----	210	----	195	526	86
	n3	156	----	307	----	220	683	72
	Ave	134	----	245	----	217	597	70
2-2 ^{※1}	n1	198	----	122	162	209	691	49
	n2	158	----	179	141	127	605	56
	n3	185	----	207	258	81	730	51
	Ave	180	----	169	187	139	675	52
3-1 ^{※2}	n1	155	80	255	----	91	581	50
	n2	261	146	93	----	158	658	161
	n3	158	71	256	----	111	597	46
	Ave	192	99	201	----	120	612	86
3-2	n1	137	----	160	----	116	413	49
	n2	123	----	148	----	102	373	40
	n3	213	----	164	----	119	496	89
	Ave	158	----	157	----	112	427	60
4 ^{※3}	n1	94	----	96	----	211	400	----
	n2	201	----	242	----	195	638	----
	n3	198	----	259	----	191	648	----
	Ave	164	----	199	----	199	562	----
5	n1	78	----	146	----	173	396	47
	n2	160	----	278	----	174	612	43
	n3	140	----	239	----	197	576	48
	Ave	126	----	221	----	181	528	46
6-1	n1	248					248	36
	n2	148					148	62
	n3	180					180	23
	Ave	192					192	40
6-2	n1	85					85	31
	n2	200					200	28
	n3	161					161	26
	Ave	148					148	28

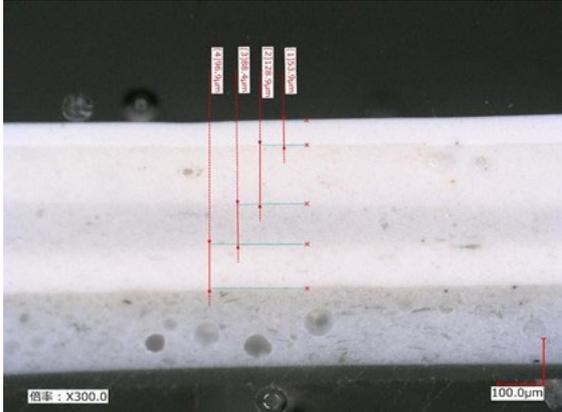
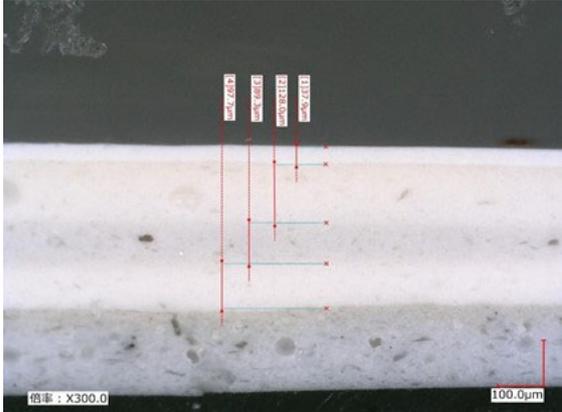
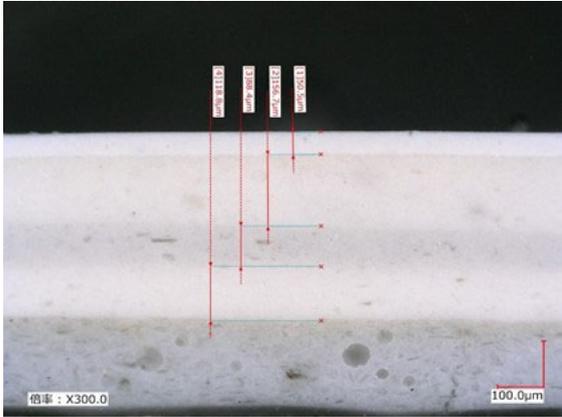
参考：設計膜厚は中塗り計 480μm以上，上塗り 25μm以上。

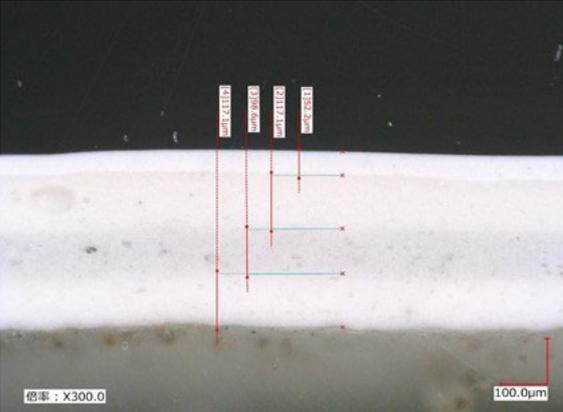
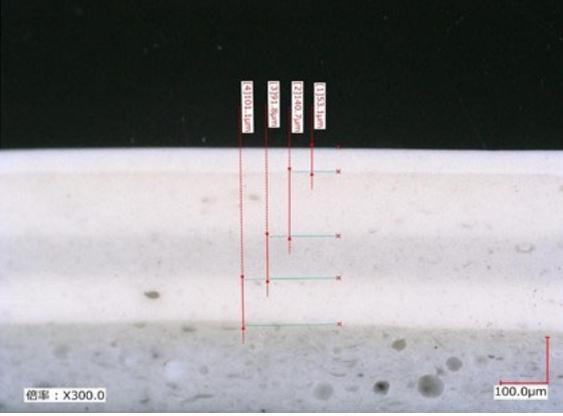
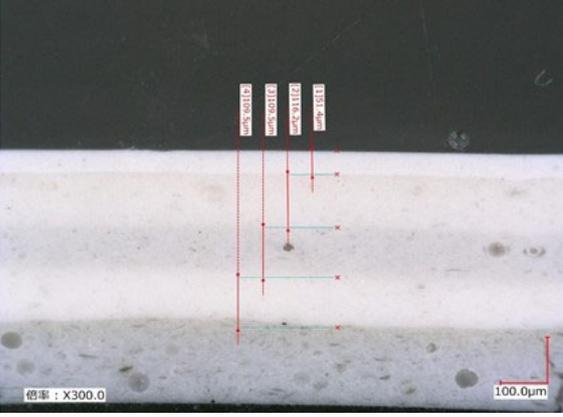
※1：2-2 は中塗りの 2 層目が 2 回塗られていた。

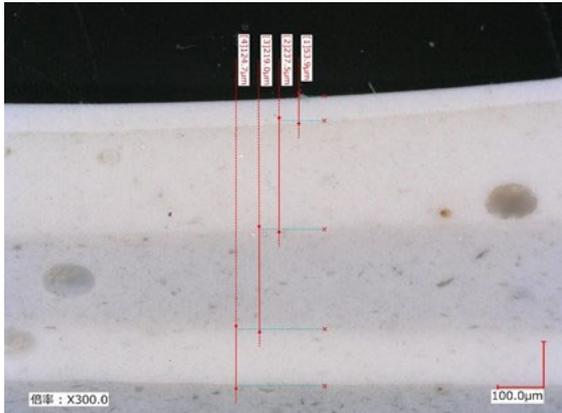
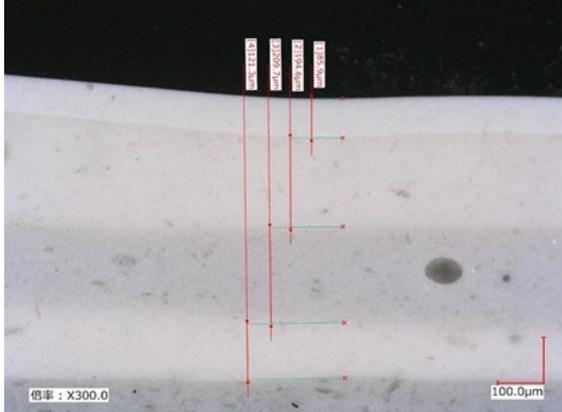
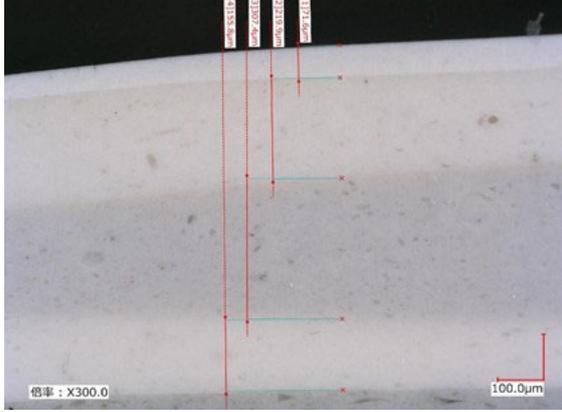
※2：3-1 は中塗りの 1 層目が 2 回塗られていた。

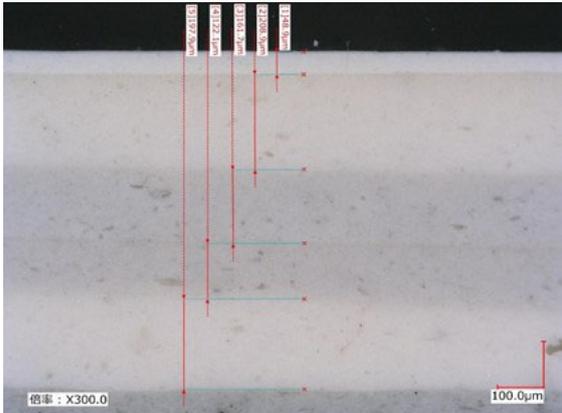
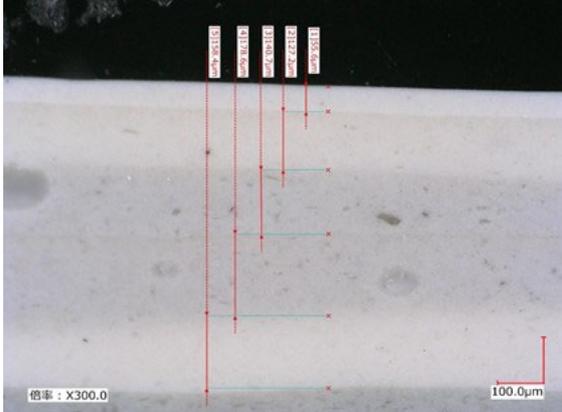
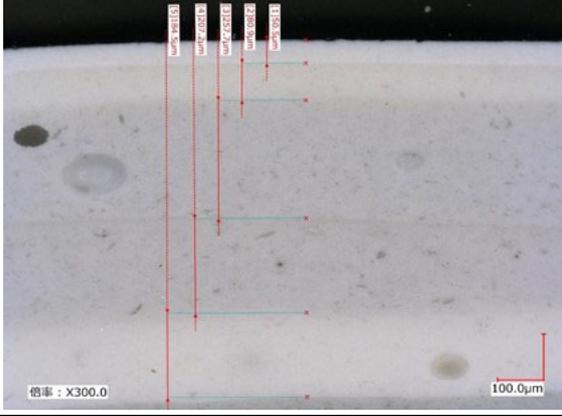
※3：4 は上塗りが塗られていなかった。

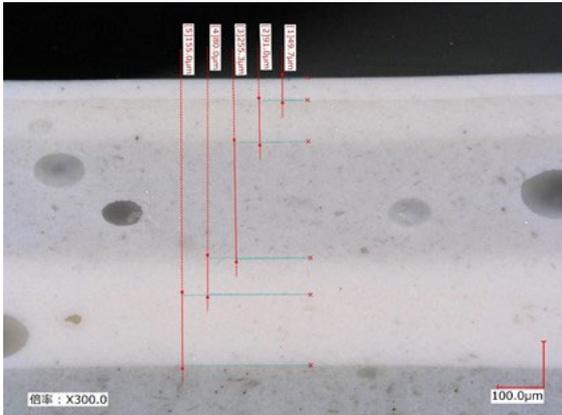
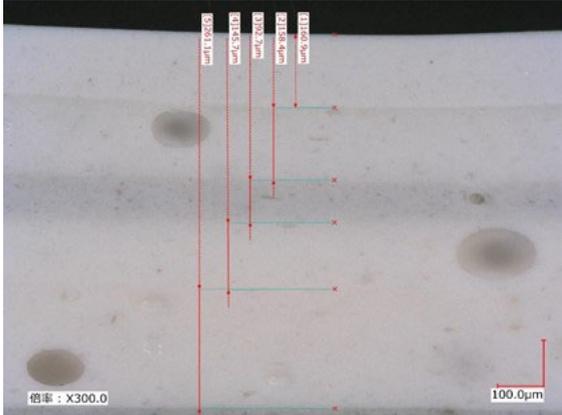
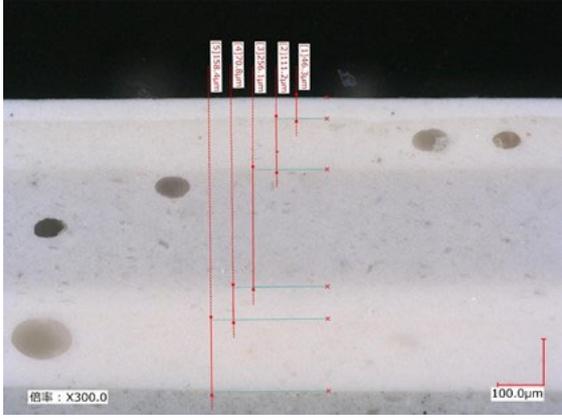
膜厚測定写真

	<p>1-1</p> <p>n 1</p>
	<p>1-1</p> <p>n 2</p>
	<p>1-1</p> <p>n 3</p>

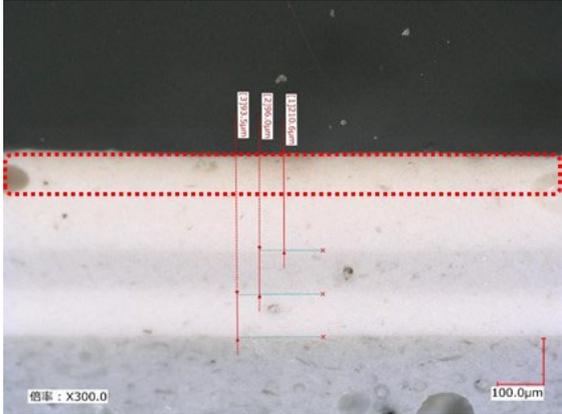
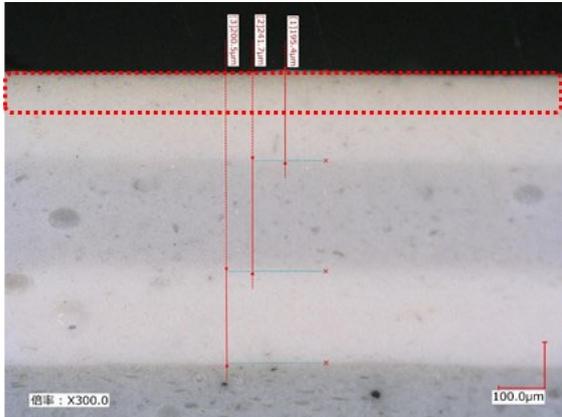
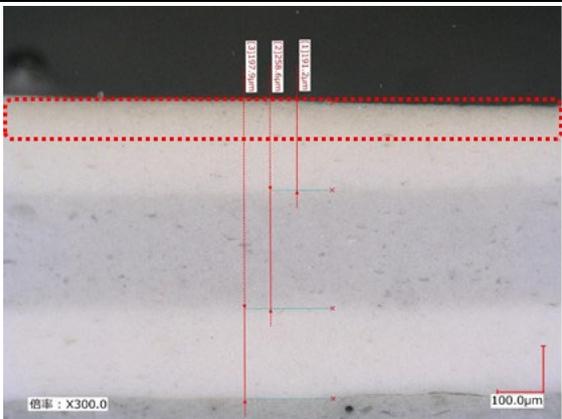
 <p>倍率 : X300.0 100.0µm</p>	<p>1-2</p> <p>n 1</p>
 <p>倍率 : X300.0 100.0µm</p>	<p>1-2</p> <p>n 2</p>
 <p>倍率 : X300.0 100.0µm</p>	<p>1-2</p> <p>n 3</p>

	<p>2-1</p> <p>n 1</p>
	<p>2-1</p> <p>n 2</p>
	<p>2-1</p> <p>n 3</p>

	<p>2-2</p> <p>n 1</p>
	<p>2-2</p> <p>n 2</p>
	<p>2-2</p> <p>n 3</p>

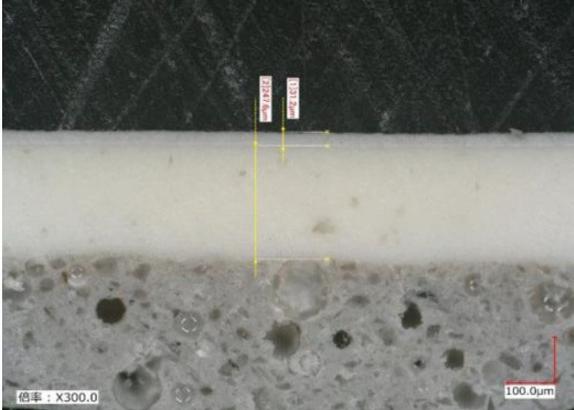
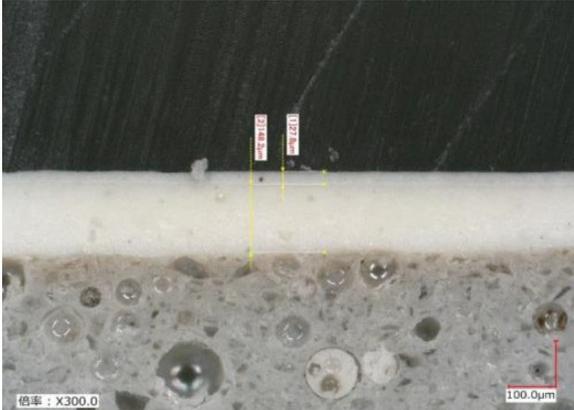
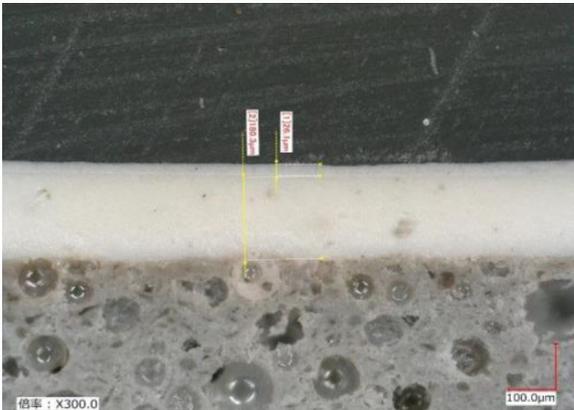
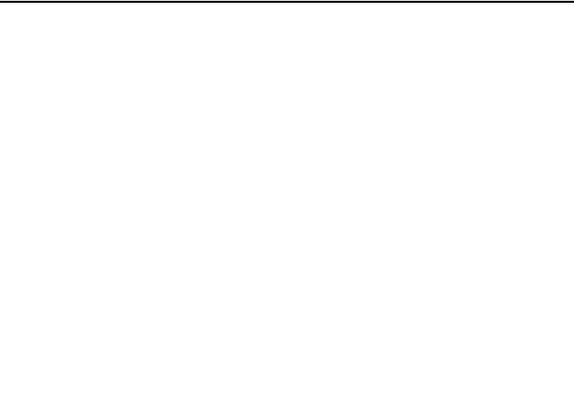
	<p>3-1</p> <p>n 1</p>
	<p>3-1</p> <p>n 2</p>
	<p>3-1</p> <p>n 3</p>

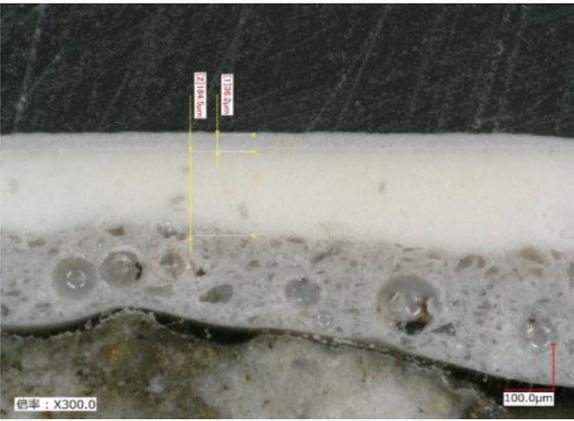
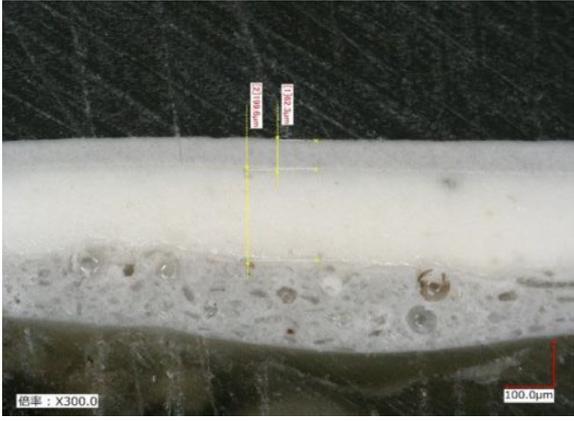
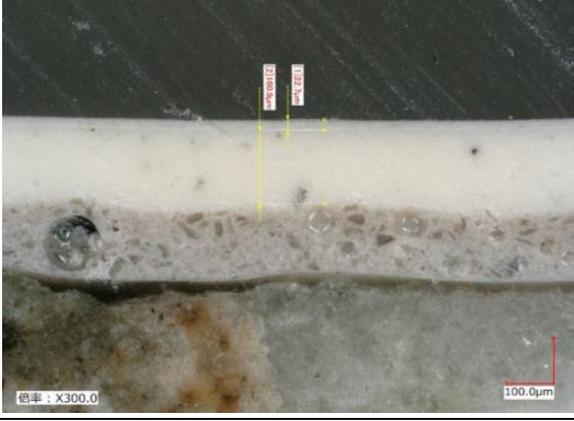
	<p>3-2</p> <p>n 1</p>
	<p>3-2</p> <p>n 2</p>
	<p>3-2</p> <p>n 3</p>

	<p>4</p> <p>n 1</p> <p>上塗りなし</p> <p>赤点線：表層約 100 μ m が変色している</p>
	<p>4</p> <p>n 2</p> <p>上塗りなし</p> <p>赤点線：表層約 100 μ m が変色している</p>
	<p>4</p> <p>n 3</p> <p>上塗りなし</p> <p>赤点線：表層約 100 μ m が変色している</p>

	<p>5</p> <p>n1</p>
	<p>5</p> <p>n2</p>
	<p>5</p> <p>n3</p>

膜厚測定写真

	<table border="1"> <tr><td>6-1</td></tr> <tr><td>損傷部</td></tr> <tr><td>n 1</td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>	6-1	損傷部	n 1			
6-1							
損傷部							
n 1							
	<table border="1"> <tr><td>6-1</td></tr> <tr><td>損傷部</td></tr> <tr><td>n 2</td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>	6-1	損傷部	n 2			
6-1							
損傷部							
n 2							
	<table border="1"> <tr><td>6-1</td></tr> <tr><td>損傷部</td></tr> <tr><td>n 3</td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>	6-1	損傷部	n 3			
6-1							
損傷部							
n 3							
	<table border="1"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>						

	<table border="1"> <tbody> <tr><td>6-2</td></tr> <tr><td>健全部</td></tr> <tr><td>n 1</td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </tbody> </table>	6-2	健全部	n 1							
6-2											
健全部											
n 1											
	<table border="1"> <tbody> <tr><td>6-2</td></tr> <tr><td>健全部</td></tr> <tr><td>n 2</td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </tbody> </table>	6-2	健全部	n 2							
6-2											
健全部											
n 2											
	<table border="1"> <tbody> <tr><td>6-2</td></tr> <tr><td>健全部</td></tr> <tr><td>n 3</td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </tbody> </table>	6-2	健全部	n 3							
6-2											
健全部											
n 3											
	<table border="1"> <tbody> <tr><td> </td></tr> </tbody> </table>										

参考資料：他の道路管理者の現行仕様との比較

付表 2.8 仕様比較

工程	歌高架橋	鋼道路橋防食便覧 CC-B塗装系	東中西日本高速道路(株) 表面保護工の品質基準
プライマー	エポキシ樹脂系 レジカートCF7ライマー 0.10kg/m ² -μm	エポキシ樹脂系 レジカートEP7ライマー 0.10kg/m ² -μm	エポキシ樹脂系 レジカートEP7ライマー 0.10kg/m ² -μm
パテ	エポキシ樹脂系 レジカートパテSH 0.50kg/m ² -μm	エポキシ樹脂系 レジカートパテSH 0.30kg/m ² -μm	エポキシ樹脂系 レジカートパテSH 0.30kg/m ² -μm
中塗り	エポキシ樹脂系 レジカート#200EH中塗り 0.35kg/m ² 160μm	エポキシ樹脂系 レジカート#200EH中塗り 0.26kg/m ² 60μm	エポキシ樹脂系 レジカート#200EH中塗り 0.35kg/m ² 160μm
中塗り	エポキシ樹脂系 レジカート#200EH中塗り 0.35kg/m ² 160μm	----	----
中塗り	エポキシ樹脂系 レジカート#200EH中塗り 0.35kg/m ² 160μm	----	----
上塗り	シリコン樹脂系 レジカート#200SC上塗り 0.12kg/m ² 25μm	ふっ素樹脂系 レジカート#200F上塗り 0.12kg/m ² 30μm	ウレタン樹脂系 レジカート#200上塗り 0.12kg/m ² 30μm

【 調査結果 ②遮塩性能 】 遮塩性試験結果

塩化物イオン量の制限値： $1.0 \times 10^{-3}(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{日})$

付表 2.9 遮塩性試験結果

No	測定点	V (g)	A (cm^2)	t (日)	m (ppm)	Q ^{※1} ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{日}$)
1-1	n1	200.0	19.63	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.3	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.0	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$
1-2	n1	200.1	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.1	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.2	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$
2-1	n1	200.0	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.0	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.3	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$
2-2	n1	200.1	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.0	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.3	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$
3-1	n1	200.3	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.3	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.1	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$
3-2	n1	200.0	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.0	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.2	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$
4	n1	200.0	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.1	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.0	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$
5	n1	200.1	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.1	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.2	19.6	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$
6-1	n1	200.2	19.63	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.0	19.63	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.0	19.63	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$
6-2	n1	200.2	19.63	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n2	200.0	19.63	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	n3	200.0	19.63	30	0.1> ^{※2}	$0.34 \times 10^{-3}>$
	Ave	-	-	-	-	$0.34 \times 10^{-3}>$

※1：計算式

$$Q = \frac{(V \times m \times 10^{-3})}{(A \times t)}$$

ここに、Q：塩化物イオン透過量 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{日}$)、V：蒸留水量 (g)、m：塩化物イオン量の測定結果 (ppm)、A：拡散セルの透過面積 (cm^2)、t：試験時間 (日)

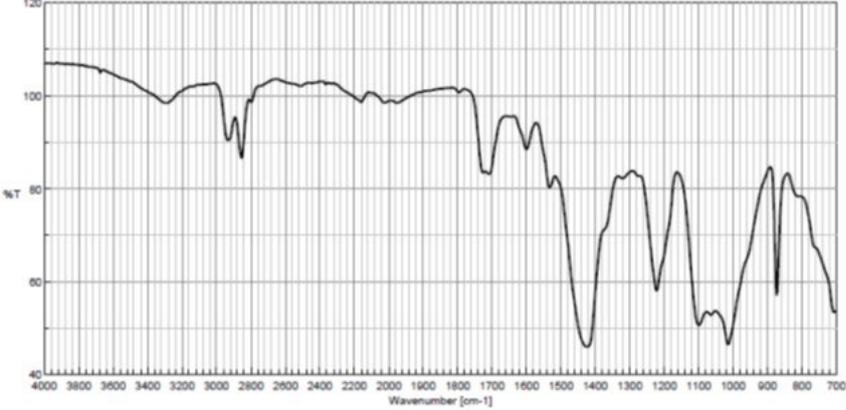
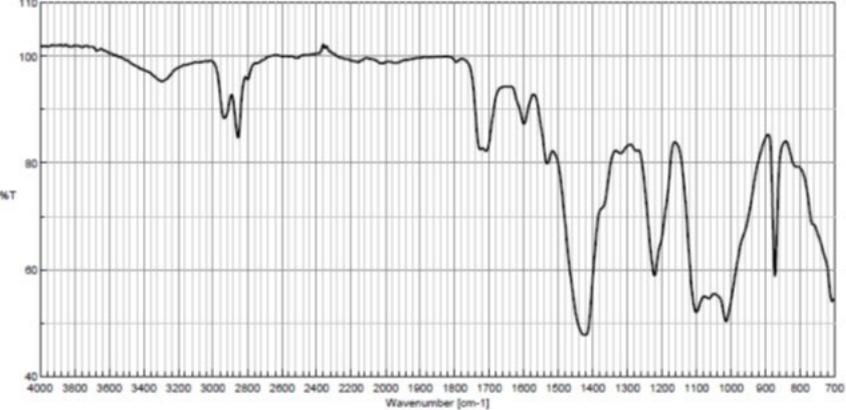
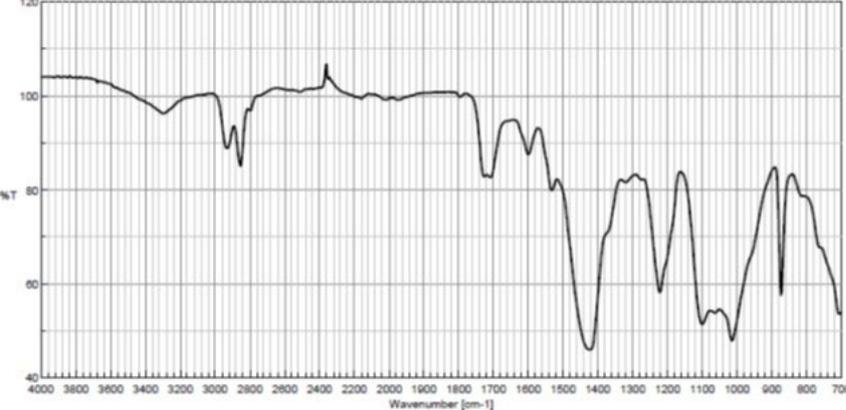
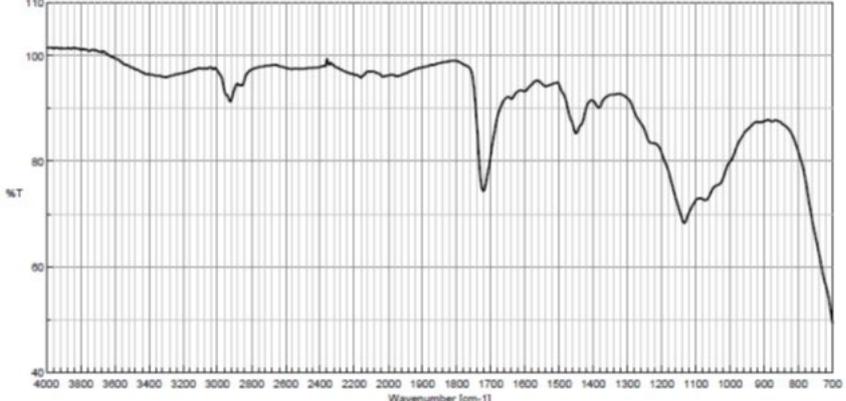
※2：塩化物イオン量測定下限値 (0.1ppm 以下)

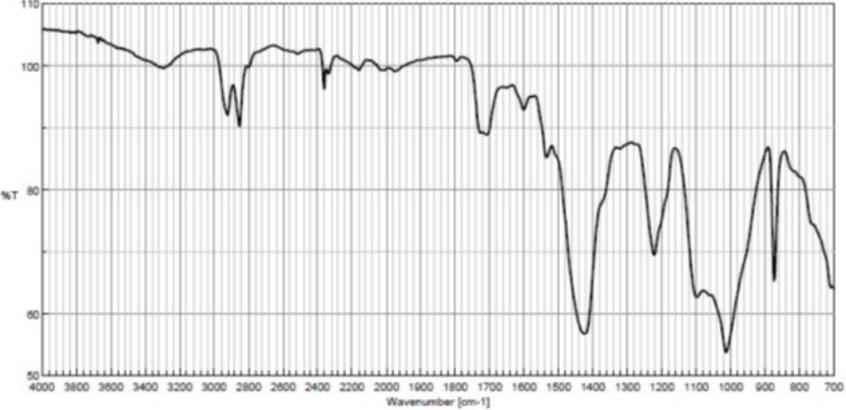
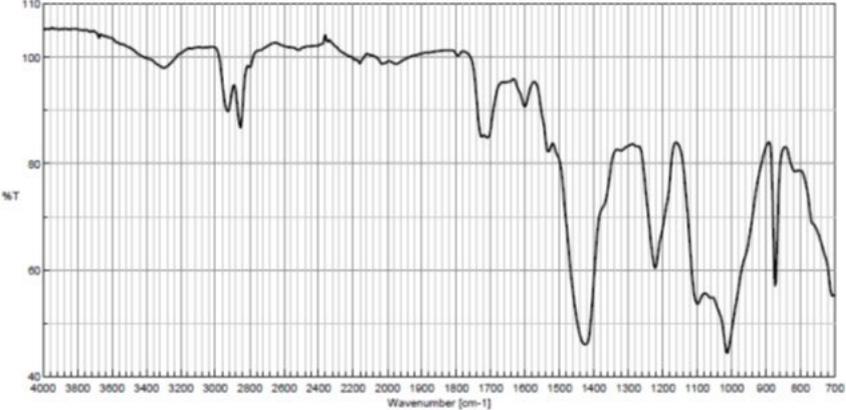
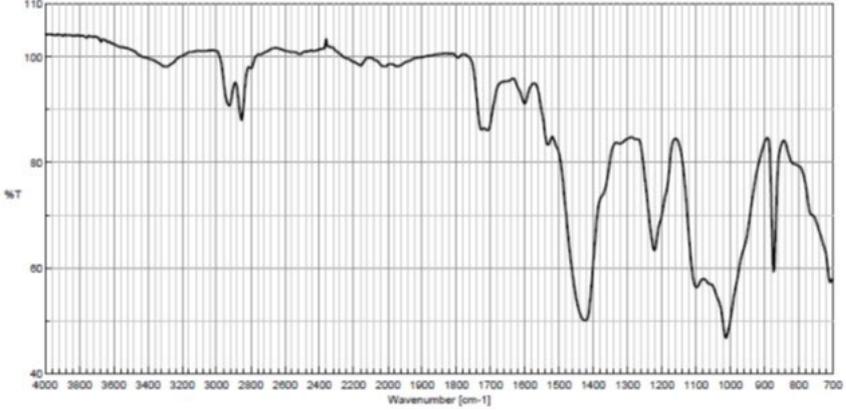
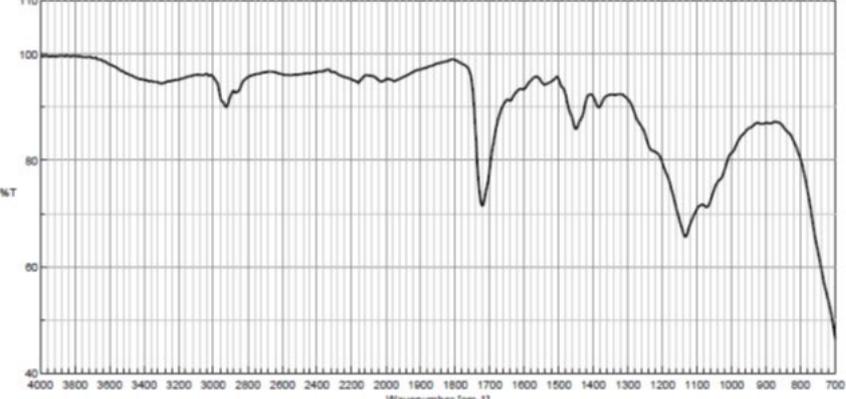
【 調査結果 ③塗膜の組成 】 塗膜組成の測定結果

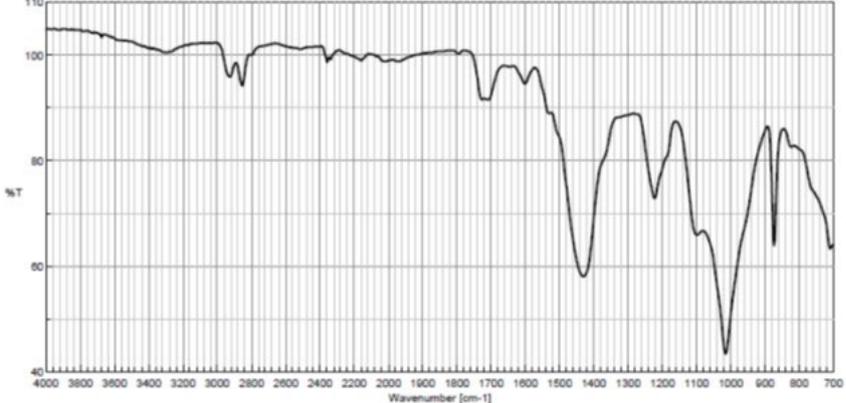
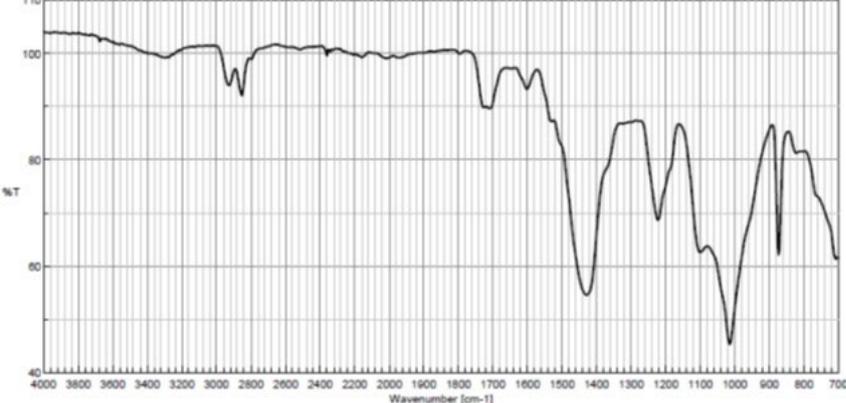
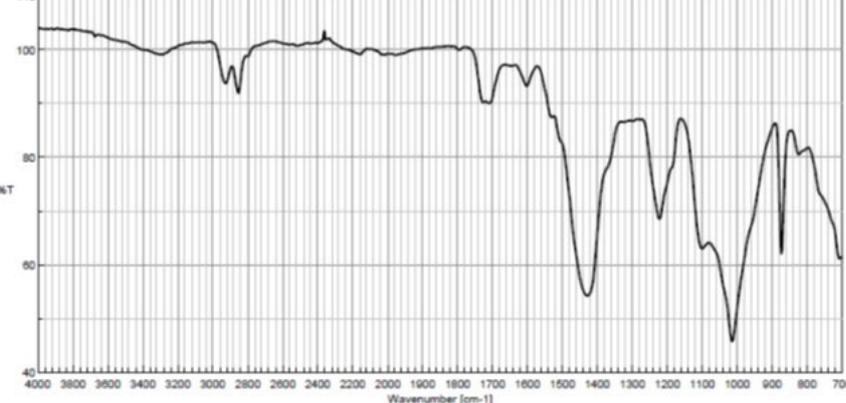
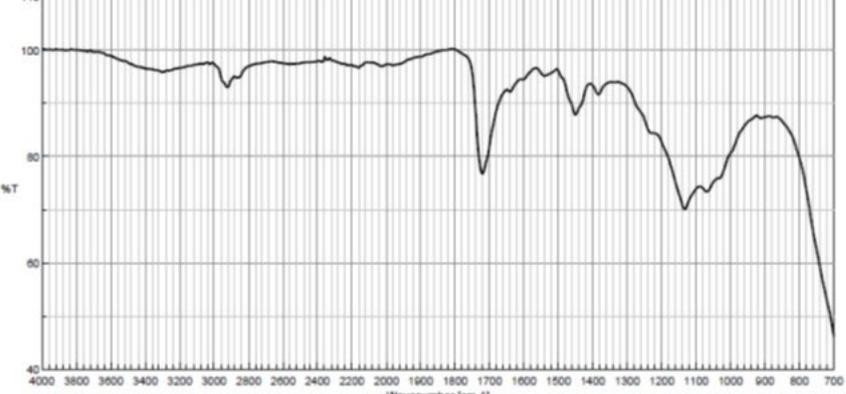
付表 2.10 塗膜組成判定結果

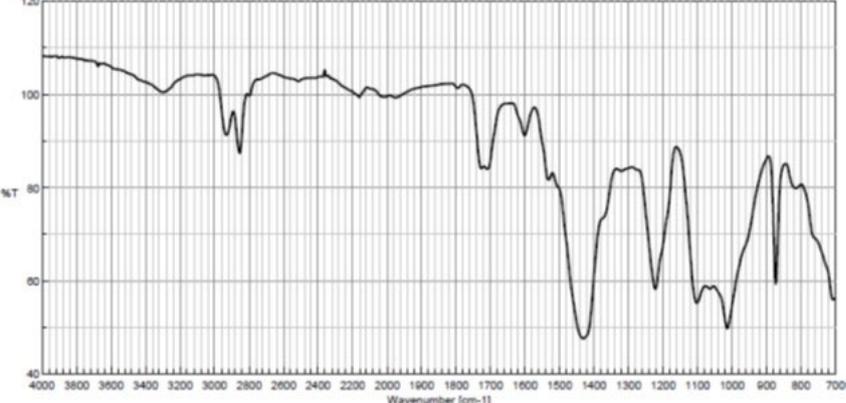
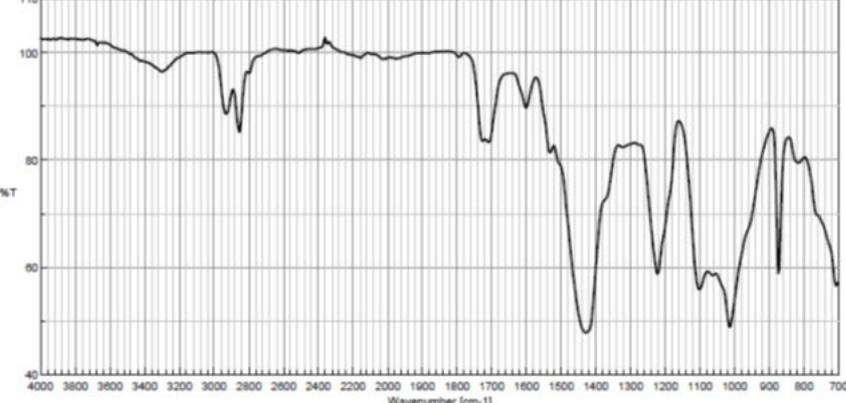
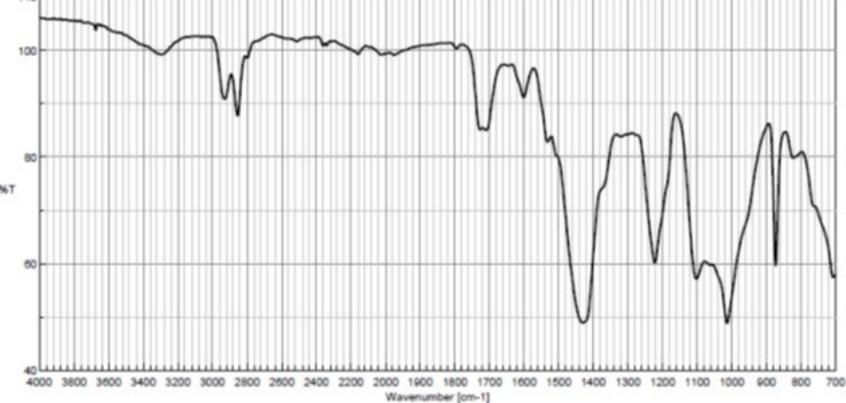
No.	中塗り			上塗り
	1層目	2層目	3層目	
1-1	○	○	○	○
1-2	○	○	○	○
2-1	○	○	○	○
2-2	○	○	○	○
3-1	○	○	○	○
3-2	○	○	○	○
4	○	○	×	----
5	○	○	○	○
6-1	○			○
6-2	○			○

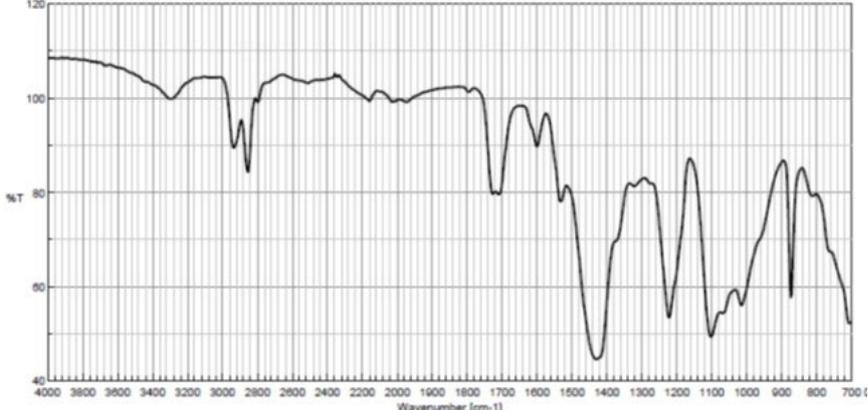
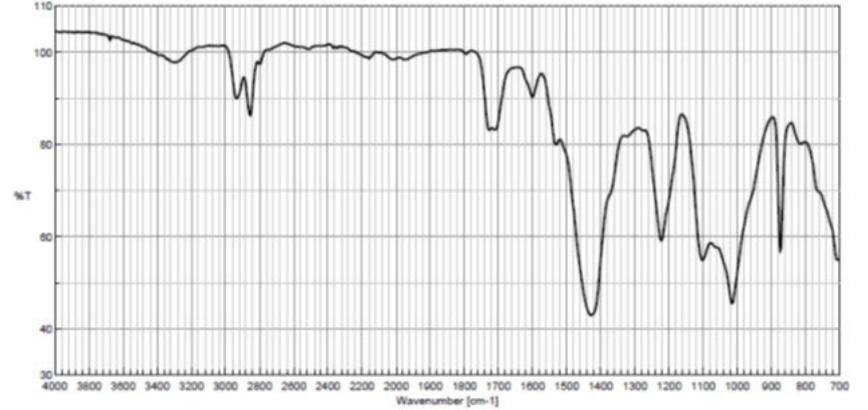
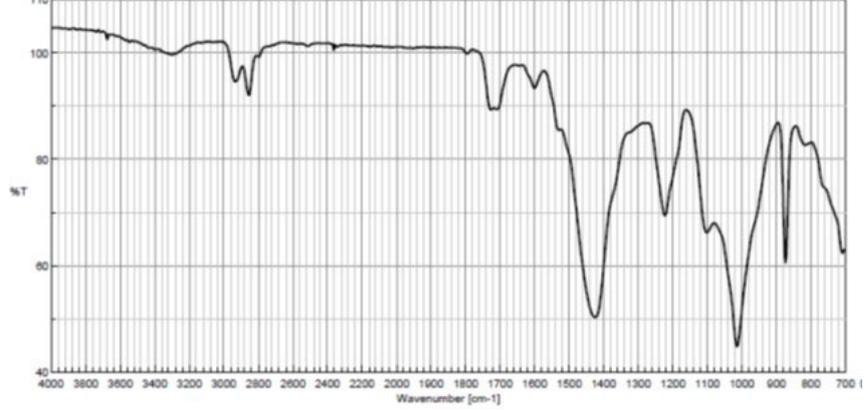
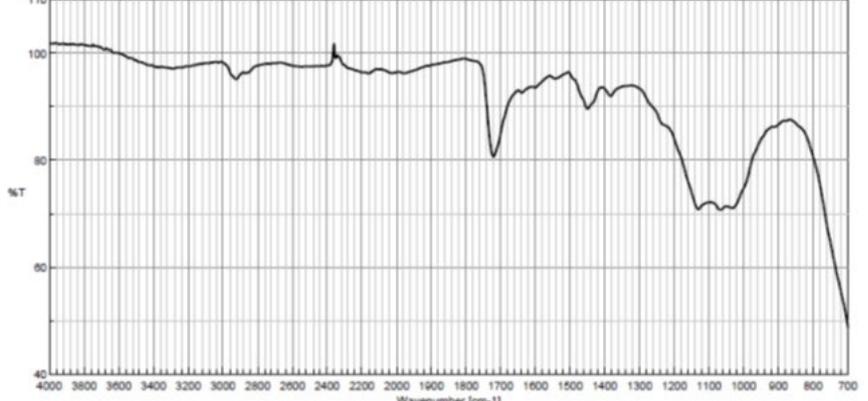
赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p>中塗り 標準</p>
	<p>上塗り 標準</p>

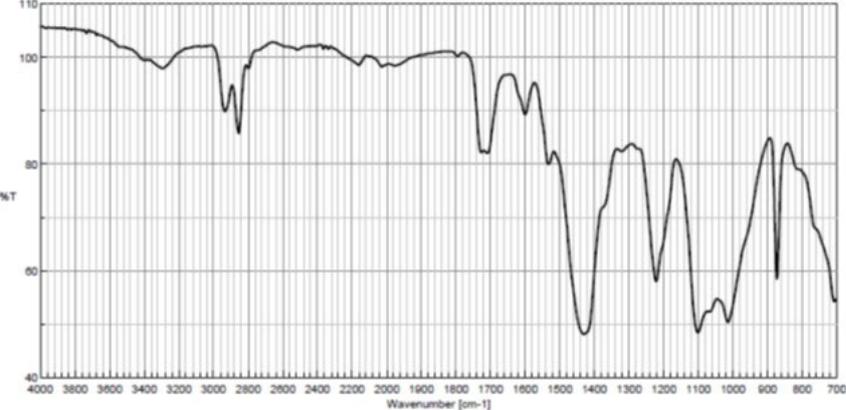
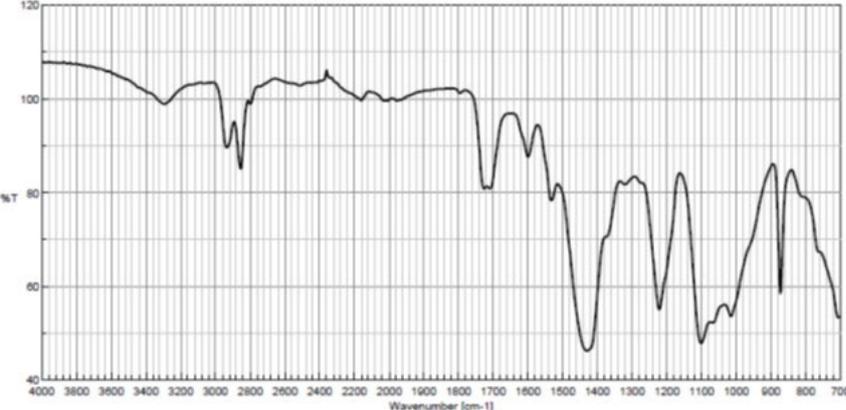
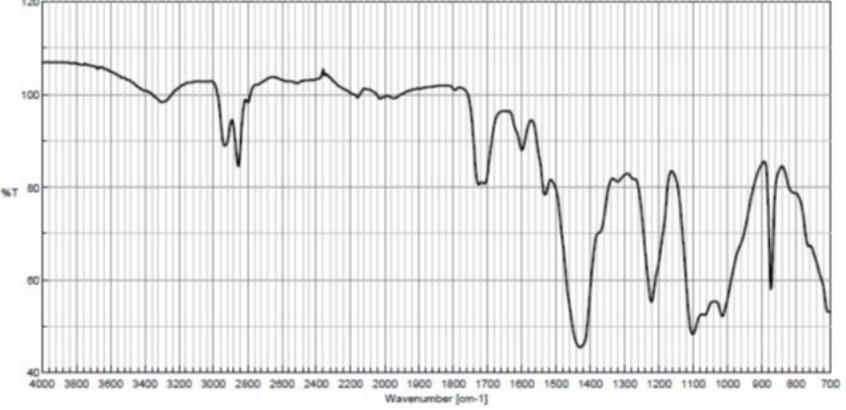
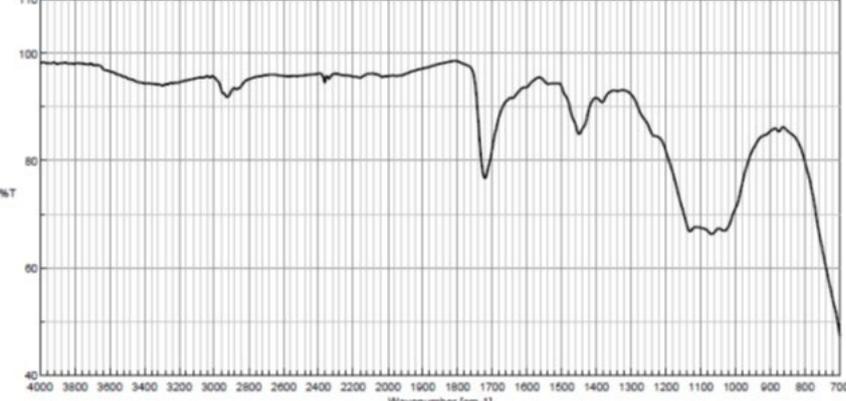
赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p>1-1 中塗り 1層目</p>
	<p>1-1 中塗り 2層目</p>
	<p>1-1 中塗り 3層目</p>
	<p>1-1 上塗り</p>

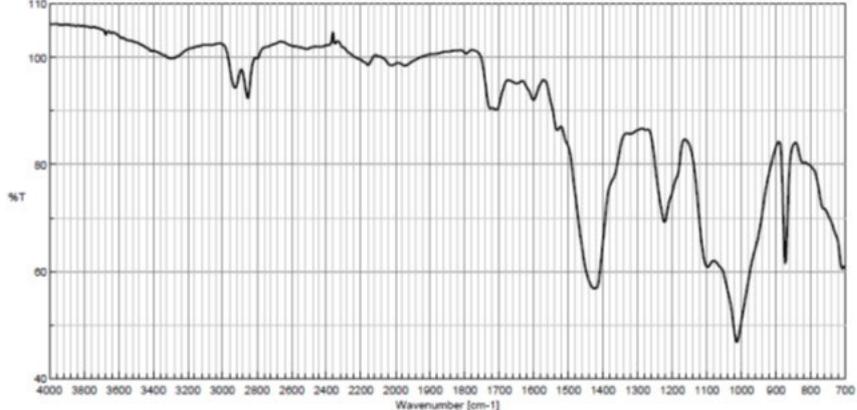
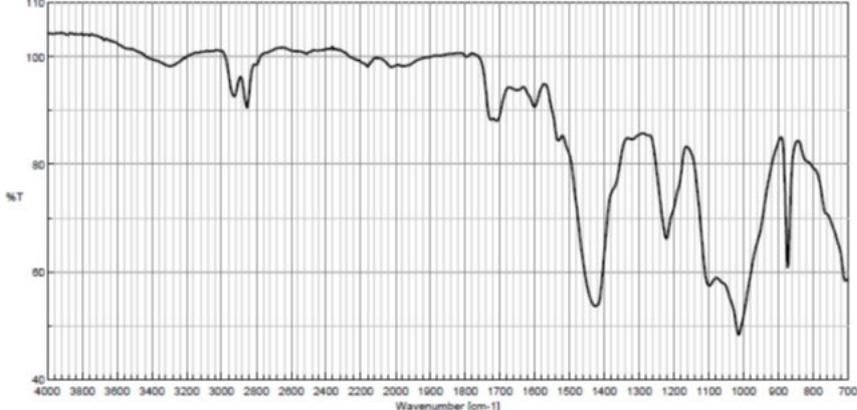
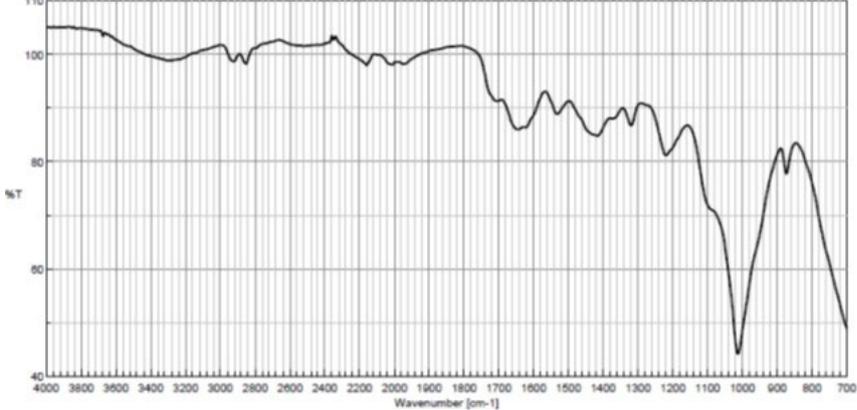
赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p>1-2 中塗り 1層目</p>
	<p>1-2 中塗り 2層目</p>
	<p>1-2 中塗り 3層目</p>
	<p>1-2 上塗り</p>

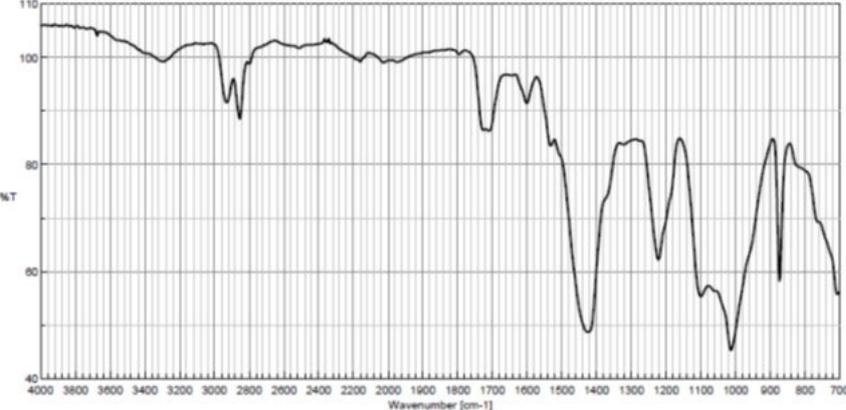
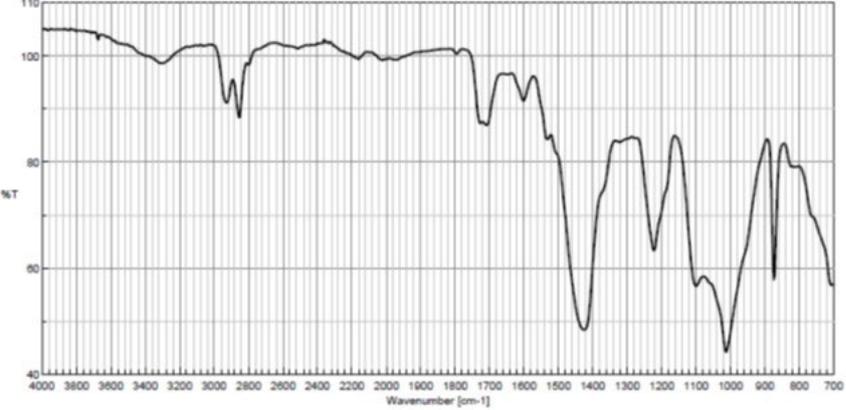
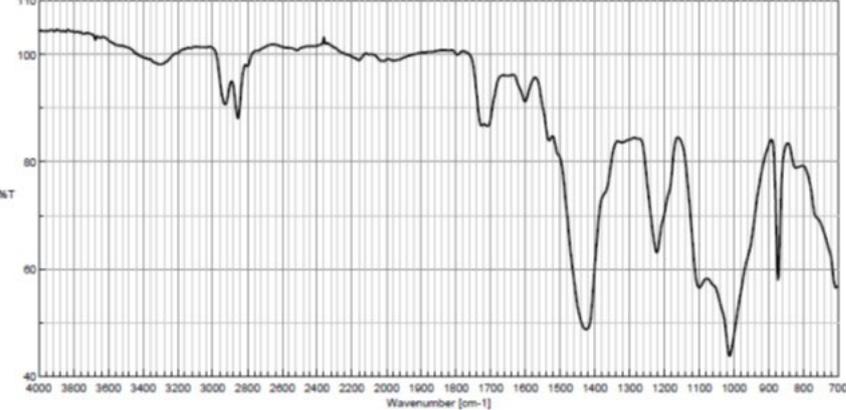
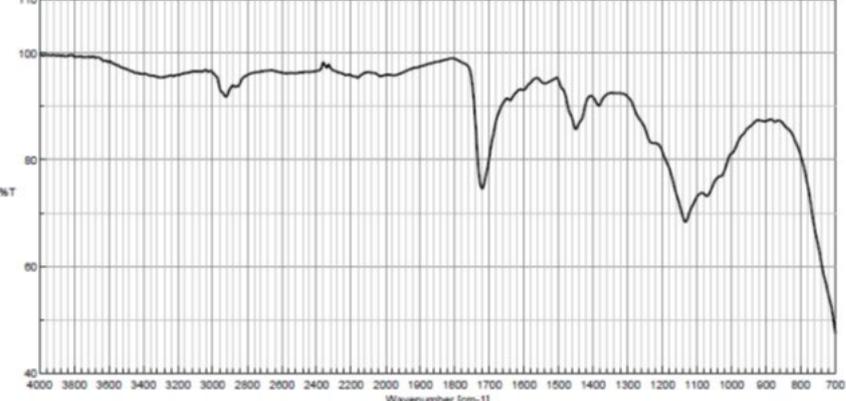
赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p>2-1 中塗り 1層目</p>
	<p>2-1 中塗り 2層目</p>
	<p>2-1 中塗り 3層目</p>
	<p>2-1 上塗り</p>

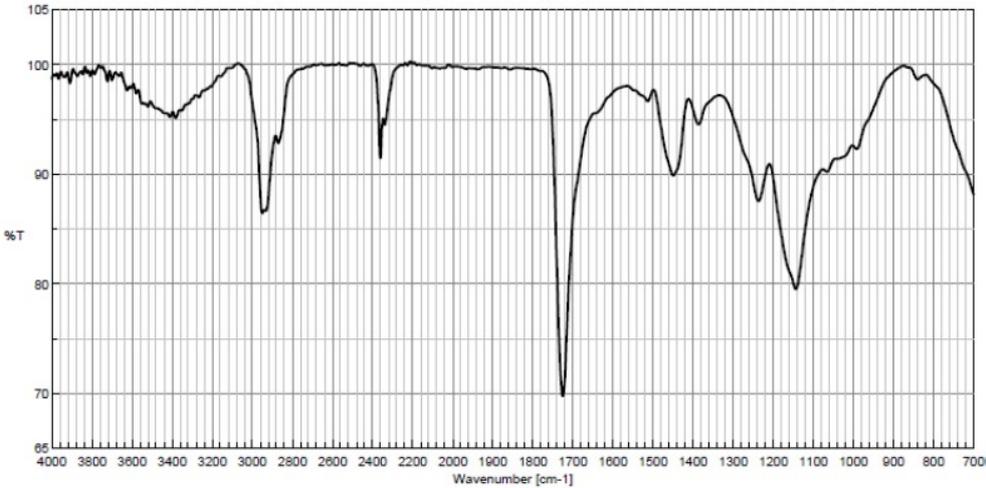
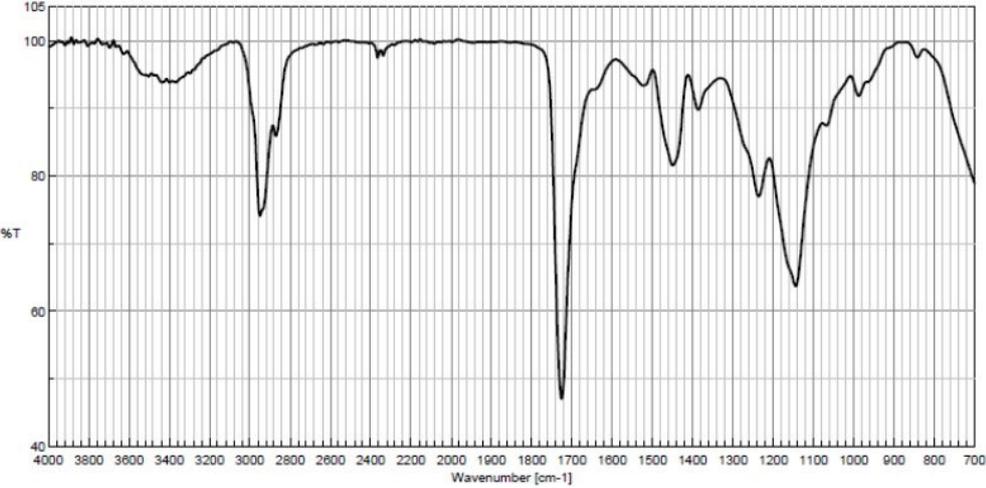
赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p>2-2 中塗り 1層目</p>
	<p>2-2 中塗り 2層目</p>
	<p>2-2 中塗り 3層目</p>
	<p>2-2 上塗り</p>

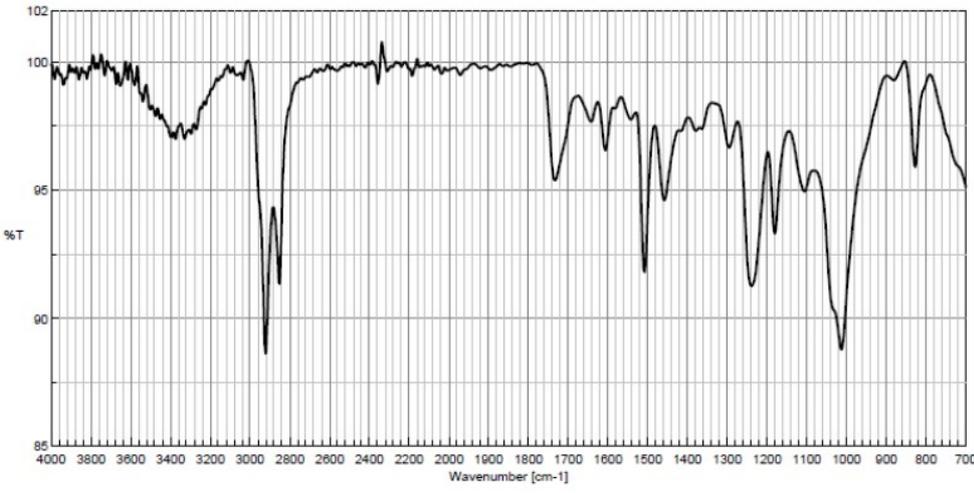
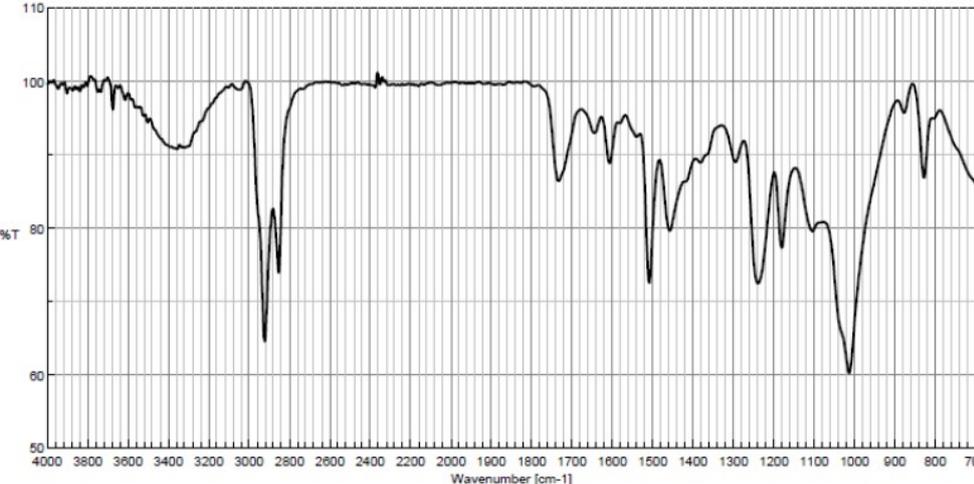
赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p>3-1 中塗り 1層目</p>
	<p>3-1 中塗り 2層目</p>
	<p>3-1 中塗り 3層目</p>
	<p>3-1 上塗り</p>

赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p>3-2 中塗り 1層目</p>
	<p>3-2 中塗り 2層目</p>
	<p>3-2 中塗り 3層目</p>
	<p>3-2 上塗り</p>

赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p>4 中塗り 1層目</p>
	<p>4 中塗り 2層目</p>
	<p>4 中塗り 3層目</p>
	

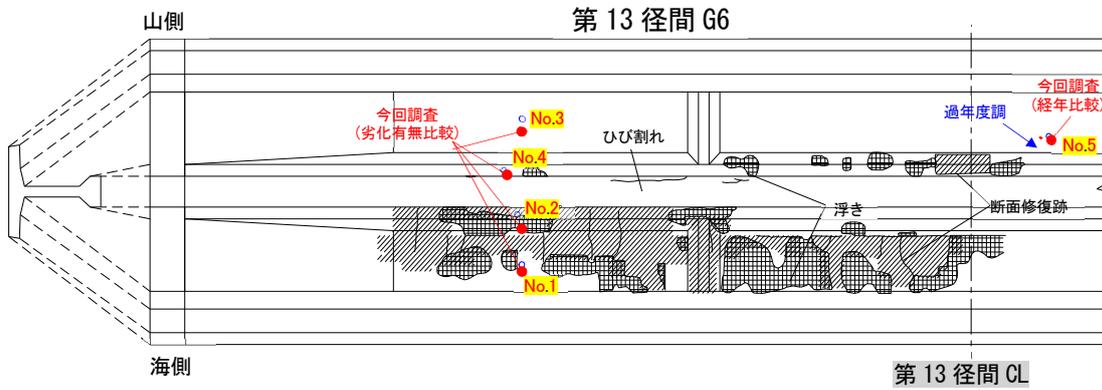
赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p>5 中塗り 1層目</p>
	<p>5 中塗り 2層目</p>
	<p>5 中塗り 3層目</p>
	<p>5 上塗り</p>

赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p data-bbox="1268 309 1345 342">6-1</p> <p data-bbox="1268 360 1345 394">中塗り</p>
	<p data-bbox="1268 831 1345 864">6-1</p> <p data-bbox="1268 882 1345 916">上塗り</p>

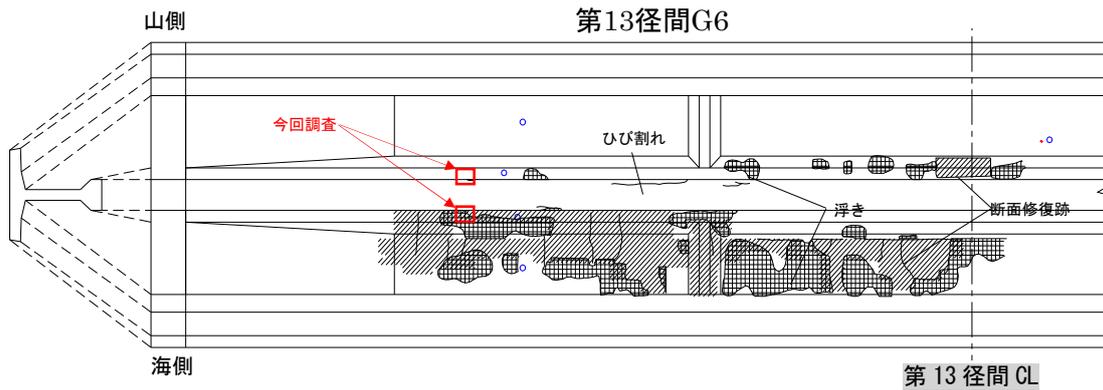
赤外吸収スペクトル (IR) チャート	コメント
	<p data-bbox="1268 309 1332 340">6-2</p> <p data-bbox="1268 362 1348 394">中塗り</p>
	<p data-bbox="1268 831 1332 862">6-2</p> <p data-bbox="1268 884 1348 916">上塗り</p>

付録3 表面含浸されたPC桁の現地調査（第13径間）
 ～中性化・塩化物イオン量・含浸深さ・はつり調査～

・試料採取位置



付図 3.1 試料採取位置（第13径間 G6 桁）



付図 3.2 はつり調査位置（第13径間 G6 桁）

・調査結果

①中性化深さ(JIS A 1152)

付表 3.1 中性化深さ測定結果

試料番号	呈色面積 (mm ²)	延長 (mm)	平均値 (mm)	最大値 (mm)	最小値 (mm)	備考
No.1 ^{※1}	----	----	----	13.6	----	第13径間G6桁(健全部)
No.2	535	102	5.3	9	2	第13径間G6桁(健全部)
No.3 ^{※1}	----	----	----	14.0	----	第13径間G6桁(劣化部)
No.4	1333	96	13.8	18	9	第13径間G6桁(劣化部)
No.5	1300	95	14.6	18	11	第13径間G6桁(過年度近傍)

※1：追加調査により測定時期が異なるため、別機関により最大値のみ測定

②塩化物イオン濃度(JIS A 1154)

付表 3.2 塩化物イオン量測定結果

試料番号	試料採取位置 (mm)		塩化物イオン 含有量 (%)	塩化物イオン量 (kg/m ³)	コン単位容積 質量 (kg/m ³) ※標準値	備考
	1	2				
No.1	1	0~20	0.41	9.36	2300	第13径間G6桁 (健全部)
	2	20~40	0.37	8.57	2300	
	3	40~60	0.15	3.39	2300	
	4	60~80	0.02	0.48	2300	
No.2	1	0~20	0.30	6.96	2300	第13径間G6桁 (健全部)
	2	20~40	0.29	6.61	2300	
	3	40~60	0.16	3.75	2300	
	4	60~80	0.06	1.30	2300	
No.3	1	0~20	0.17	3.96	2300	第13径間G6桁 (劣化部)
	2	20~40	0.04	0.97	2300	
	3	40~60	0.01	0.28	2300	
	4	60~80	0.01	0.28	2300	
No.4	1	0~20	0.26	5.88	2300	第13径間G6桁 (劣化部)
	2	20~40	0.23	5.20	2300	
	3	40~60	0.07	1.63	2300	
	4	60~80	0.02	0.41	2300	
No.5	1	0~20	0.21	4.89	2300	第13径間G6桁 (過年度近傍)
	2	20~40	0.05	1.23	2300	
	3	40~60	0.02	0.35	2300	
	4	60~80	0.01	0.17	2300	
	2	20~40	0.07	1.53	2300	
	3	40~60	0.04	0.89	2300	
	4	60~80	0.03	0.69	2300	

③含浸深さ(JSCE K571 参考)

付表 3.3 含浸材浸透深さ測定結果

試料 番号	含浸材深さ (mm)									備考
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	平均	最小	最大	
No.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	第13径間 G6 桁 (健全部)
No.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	第13径間 G6 桁 (劣化部)
No.5	17.4	19.0	18.5	19.7	18.3	16.9	18.3	16.9	19.7	第13径間 G6 桁 (過年度近傍)

※：表面含浸材の試験方法（JSCE K 571-2013）準拠

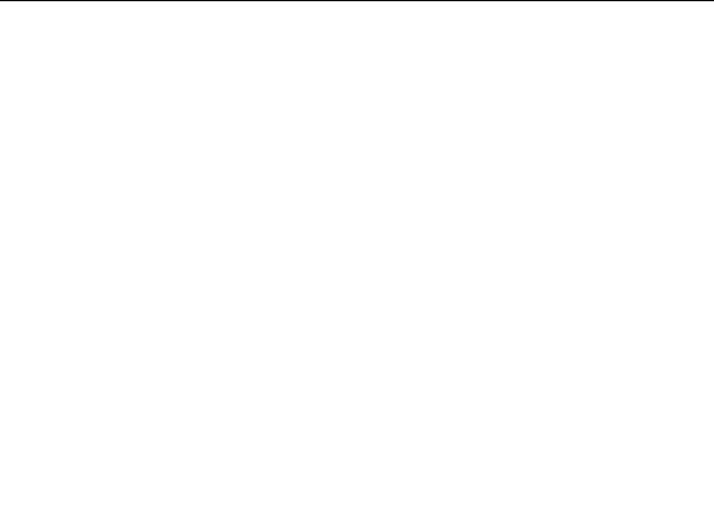
※：測定までの時間 水浸 1 分間後

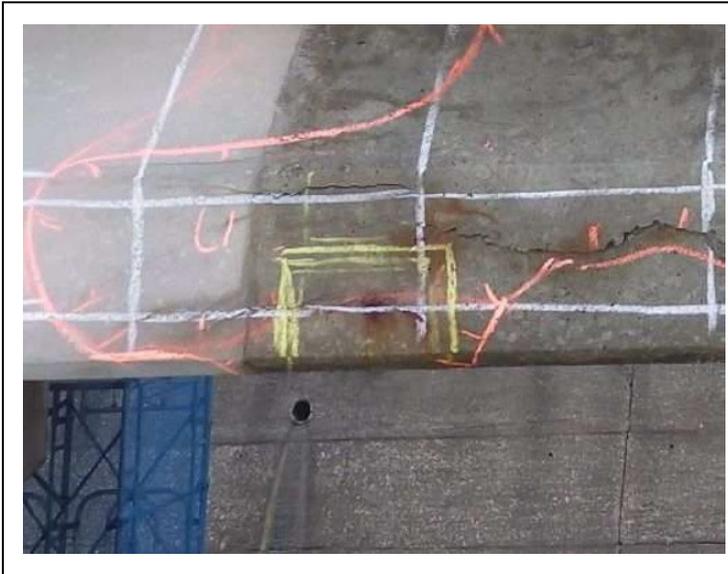
※：No.2, No.4 全体的に吸水が見られ、撥水している箇所は確認できなかった

※：No.5 1 分間の水浸後、表面側にわずかな吸水が見られたが、表面から 20 mm 程度の深さまで撥水が確認された

④はつり調査

	<p>第13径間G6桁（山側）</p> <p>はつり調査箇所</p> <p>着手前状況</p> <p>健全</p>
	<p>第13径間G6桁（山側）</p> <p>はつり調査箇所</p> <p>はつり状況</p>
	<p>第13径間G6桁（山側）</p> <p>はつり調査箇所</p> <p>はつり後状況</p>

	<p>第13 径間 G6 桁 (山側)</p> <p>はつり調査箇所</p> <p>はつり後状況 (拡大)</p> <p>配力筋に軽微な腐食</p>
	<p>第13 径間 G6 桁 (山側)</p> <p>はつり調査箇所</p> <p>はつり後状況 (拡大)</p> <p>シース管 40mm</p> <p>PC 鋼線異常なし</p>
	<p> </p>



第13径間G6桁（海側）

はつり調査箇所

着手前状況

浮き・錆汁発生



第13径間G6桁（海側）

はつり調査箇所

はつり状況



第13径間G6桁（海側）

はつり調査箇所

はつり後状況

	<p>第13径間G6桁（海側）</p> <p>はつり調査箇所</p> <p>はつり後状況（拡大）</p> <p>配力筋・主筋共に腐食により断面欠損</p>
	<p>第13径間G6桁（海側）</p> <p>はつり調査箇所</p> <p>はつり後状況（拡大）</p> <p>シース管 40mm</p> <p>PC鋼線異常なし</p>
	<p>第13径間G6桁（海側）</p> <p>はつり調査箇所</p> <p>はつり後状況</p>

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.566 August 2022

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6