

愛宕大橋橋梁補修工事

— T桁の塩害補修工事とモニタリングについて —

田村 誠一*1・九十九 圭*2・吉田 光秀*3・鬼塚 勝則*4

本橋は河口付近に建設された6径間の単純T桁橋である。環境条件などから、A2橋台側の主桁端部および端支点横桁に塩害によるものと思われるコンクリートの剥離、鉄筋の露出や発錆などの損傷が認められた。工事にあたって、塩分濃度分布の現状を把握するために簡易塩化物イオン量調査を実施し、その結果から断面修復の範囲を決定した。工事はウォータージェット工法により既設の断面をはつりとり、犠牲陽極を配置した後塩化物イオン固定化材を配合した断面修復材で吹付けを行った。そして、今後の調査で構造物への劣化因子の浸透を察知するために測定内容が異なるモニタリング装置を3種類設置した。

キーワード：塩害、モニタリング、ウォータージェット、吹付け工法、犠牲陽極、塩化物イオン固定

1. はじめに

愛宕大橋は平成7年に福岡市の室見川河口に架設された橋で、橋長283.5mの6径間単純ポストテンションT桁橋である。橋梁諸元を表-1、全景写真を写真-1、現場位置図を図-1に示す。本橋は海岸からの距離が200m以上と離れていたが、感潮区間の位置にある。そのため、A2橋台付近は干満と海から吹く風の影響を受けていると考えられた。調査の結果、A2橋台側の桁端部、および端支点横桁部のコンクリート中の塩化物イオン濃度が高く、鋼材の腐食が発生していた。

工事内容は、塩化物イオンが浸透した桁端部の下フランジとウェブの一部、端支点横桁を、ウォータージェット工法（以下WJ工法とする）によるコンクリートはつりとり、犠牲陽極材の設置、吹付け工法による断面修復、鋼材腐食環境検知システムの設置である。

本稿は、施工時に実施した調査と補修工事、モニタリングについて報告する^{1,2)}。

表-1 橋梁諸元

工事名	平成28年度橋梁補修工事（その2）
工事場所	福岡県福岡市西区管内
架設年次	平成7年
橋長	283.5 m
支間長	5 @ 48.0 + 43.5 m
有効幅員	22.0 m
設計活荷重	TL-25 t（架設年より推定）
適用示方書	H2 道路橋示方書（架設年より推定）
上部工形式	6径間単純ポストテンションT桁橋（プレキャストセグメント方式）
塩害地域区分	C（200 m以上、ただし、感潮区間）



写真-1 全景写真



図-1 現場位置図（地図出典：国土地理院ウェブサイト）

2. 工事概要

本橋の塩害が認められるA2橋台側は満潮時に主桁下面近くまで海水面上昇し、干潮時には干潟があらわれる。写真-2に干満時の状況、写真-3に代表的な劣化状況を示す。

断面修復範囲は簡易的な塩化物イオン量の現地調査結果をもとに決定した。その後、塩化物イオンが浸透した端支点横桁、桁端部の下フランジとウェブの一部のコンクリートをWJ工法ではつりとり、犠牲陽極材を設置し、塩化物イオン固定化材を配合した材料を用いた吹付け工法による断面修復を実施した。そしてもっとも劣化が進行していたG8、G9桁の間に計測方法の異なるモニタリング装置を設置した。平面図および断面図、主桁側面図および主桁断面図を図-2に示す。

*1 Seiichi TAMURA：(株)富士ピー・エス 土木本部 エンジニアリング部 メンテナンスグループ

*2 Kei TSUKUMO：福岡市 道路下水道局 管理部 道路維持課

*3 Mitsuhide YOSHIDA：(株)富士ピー・エス 技術研究センター

*4 Katsunori ONIZUKA：(株)富士ピー・エス 九州支店 工務部 工事チーム

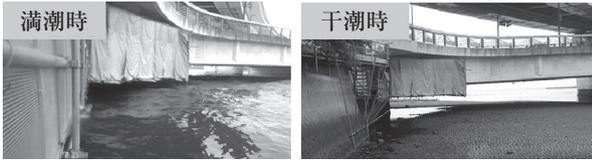


写真 - 2 干満時の状況

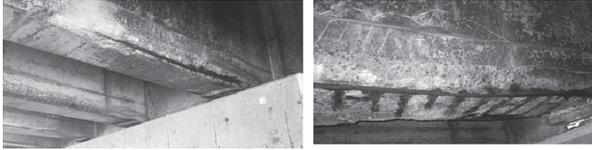
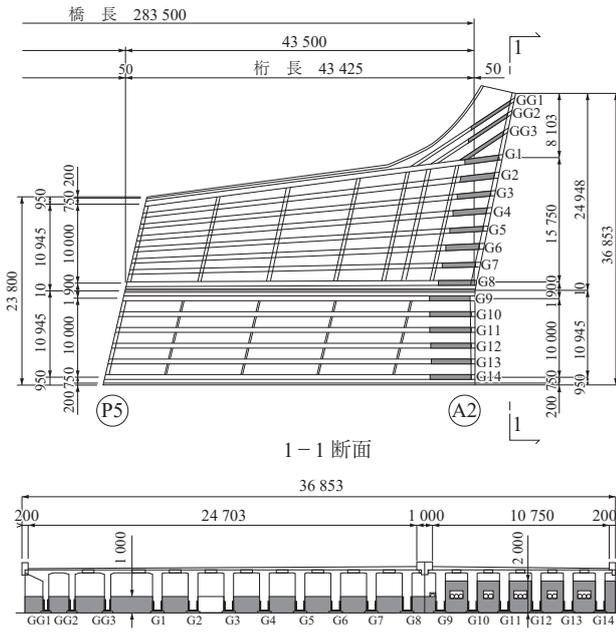
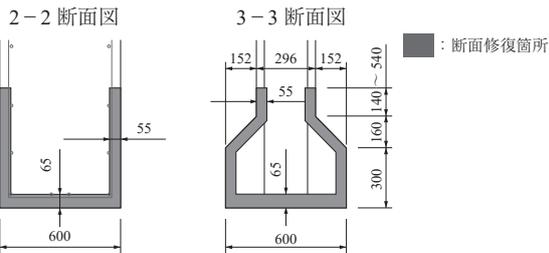


写真 - 3 劣化状況 (鉄筋腐食によるコンクリートの剥離)



(a) 平面図および断面図



(b) 主桁側面図および主桁断面図

図 - 2 平面図および断面図, 主桁側面図および主桁断面図

3. 補修工事

3.1 簡易塩化物イオン量調査

(1) 調査概要

詳細調査報告書の塩分含有量試験結果と劣化の状況から A2 橋台側の桁端部において、コンクリート表面に近い部分で塩化物イオン濃度が高いことは推定された。そこで、計画されている断面修復範囲の周辺の塩化物イオン濃度を測定し、断面修復範囲の妥当性を検討した。

調査は、採取したコンクリート粉末を電量滴定式デジタル塩分測定器を用いた迅速測定法で行った。コンクリート粉末はドリル法により 0～3 cm の深さから採取した。

試料採取が 1 点で 1 試料となることから、試料から見かけの拡散係数を算出することができない。そこで、鉄筋位置の塩化物イオン濃度（以下、内部塩化物イオン濃度とする）の推定値は、詳細調査報告書で採用している見かけの拡散係数を用いて、測定結果より表面の塩化物イオン濃度を推定し算出した。資料の採取および計測状況を写真 - 4 に、内部塩化物イオン濃度の推定値の算出例を図 - 3 に示す。

断面修復範囲は、今後調査により経時変化を確認できることを考慮して、すでに鉄筋位置まで塩化物イオンが浸透している箇所を拡大した。塩化物イオンの浸透の確認は、測定結果から算出した内部塩化物イオン濃度の推定値（現在 ($t=21$ 年) で 2.5 kg/m^3 以上) と、はつり前の損傷状況やはつり後の露出した鉄筋の発錆の有無から判断した。



写真 - 4 試料採取および計測

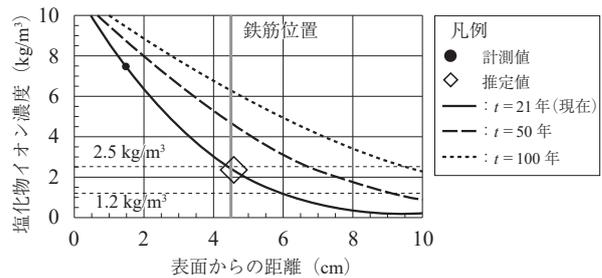


図 - 3 塩化物イオン濃度の推定値の算出例

(2) 主桁の調査

調査は、まず補修箇所内部の塩化物イオン濃度の差異を確認するために、橋台前面から同じ距離 (1 m 程度) の底面で各主桁の塩化物イオン濃度を測定し、主桁どうしの塩化物イオン濃度の差異を確認した。次に断面修復範囲内 (以下、断面修復部とする) と断面修復範囲の境界部 (以下、境界部とする) について測定した。

主桁橋軸方向の調査位置と推定値を図 - 4 に示す。図

- 4 (b) の主桁底面の推定値内の試験機関は、同じ箇所では採取した試料（表面から 1 cm の厚さで採取）を JIS A 1154 「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて試験機関が行った結果を用いて推定した値を示す。いずれの主桁においても内部塩化物イオン濃度は高い値を示した（図 - 4 (b)）。これは海から吹く風の影響で上部工に波しぶきがかかっていたためと考えられる。内部塩化物イオン濃度は G8 桁がもっとも高かった。G8 桁以外は下流側の主桁ほど高くなる傾向にあった。G8 桁は橋台の斜角が変化する位置にある。内部塩化物イオン濃度は、この G8 桁を境にして変化しており、上流側の G1, G4 桁に比べ、下流側の G11, G14 桁のほうが高くなっていた。これは現場で実施した調査と試験機関いずれの推定値でも同じであった。

主桁の橋軸方向における内部塩化物イオン濃度の推定値の算出は GG2 桁（斜桁）、G4 桁、G8 桁、G14 桁について行った（図 - 4 (c)）。G8 桁の調査位置②で高い濃度となり、①、③、④の調査位置においては下流側の桁（G14 桁）ほど内部塩化物イオン濃度が高くなる傾向がみられた。GG2 桁は、ほかの主桁とは下部工前面と桁との角度が異なるため調査したが、内部塩化物イオン濃度は最大で 1.37 kg/m³ となった。いずれの桁においても境界部付近の塩化物イオン濃度は 2.5 kg/m³ 以内となったため、橋軸方向の断面修復範囲は変更しなかった。

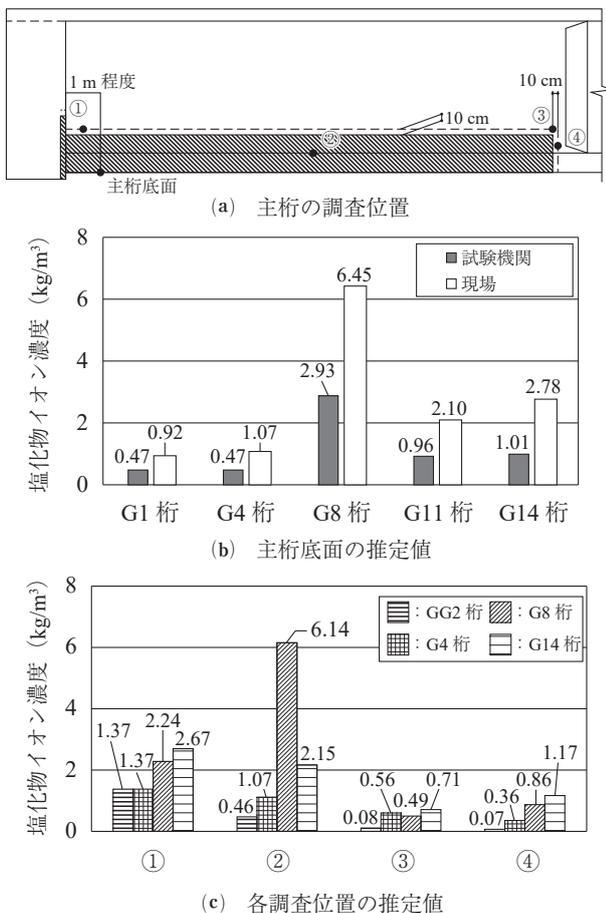


図 - 4 主桁橋軸方向の調査位置と推定値

(3) 端支点横桁の調査

調査は、最初に断面修復部を行い、内部塩化物イオン濃度の分布状況を確認した。次にこの分布状況から調査する端支点横桁を選定し境界部を調査した。端支点横桁の調査位置と推定値を図 - 5 に示す。

端支点横桁における内部塩化物イオン濃度の推定値を図 - 5 (c) 内部の推定値に示す。主桁底面、側面と同様に下流側になるにつれて塩化物イオン濃度が高くなる傾向が見られた。この結果と当初の損傷図から、GG2 - GG3, G4 - G5, およびもっとも損傷していた G12 - G13 間の境界部の調査を行った結果から得た推定値を図 - 5 (d) 境界部の推定値に示す。GG2 - GG3, G4 - G5 間は塩化物イオン濃度は 1.2 kg/m³ 未満となったため断面修復範囲の変更の必要はなかった。G12 - G13 間では 3.07 kg/m³ と高い数値となったが、はつり後に既設鉄筋を目視確認したところ、発錆はほとんど見られなかった。そのため、いずれの箇所においても断面修復範囲は変更しなかった。

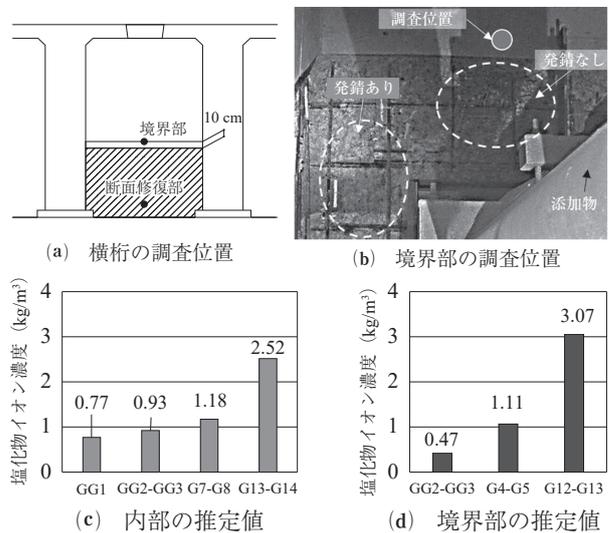


図 - 5 端支点横桁の調査位置と推定値

(4) 主桁側面（桁高方向）の調査

主桁と端支点横桁の計画時の断面修復範囲と調査位置を図 - 6 に示す。主桁側面は、端支点横桁の推定値から、端支点横桁を断面修復する高さ（図中の丸部：調査位置）まで塩化物イオン濃度が高いことが予想された。そこで、端支点横桁付近の主桁側面の調査を行った。調査結果から得られた内部塩化物イオン濃度の推定値を図 - 7 に示す。いずれも上流側は内部塩化物イオン濃度が低く、逆に下流側は高い傾向を示した。とくに G12 桁の下流側の側面は端支点横桁との境界線付近で、桁下から 1.4 m の高さまで内部塩化物イオン濃度が高い箇所と、塩化物イオン濃度が 2.5 kg/m³ 以下の低い箇所が混在していた。この主桁側面は主桁端部の定着部付近であることと、今後も外部からの塩分が供給され続けることが考えられるため、断面修復範囲を拡大した。同様の環境条件となる G9 ~ G14 桁についても同様に拡大した。

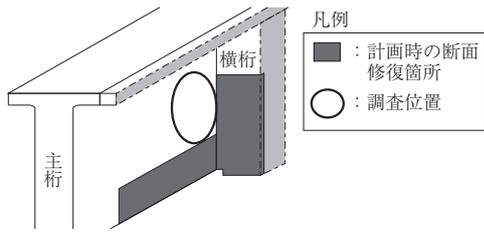


図 - 6 計画時の断面修復範囲と調査位置

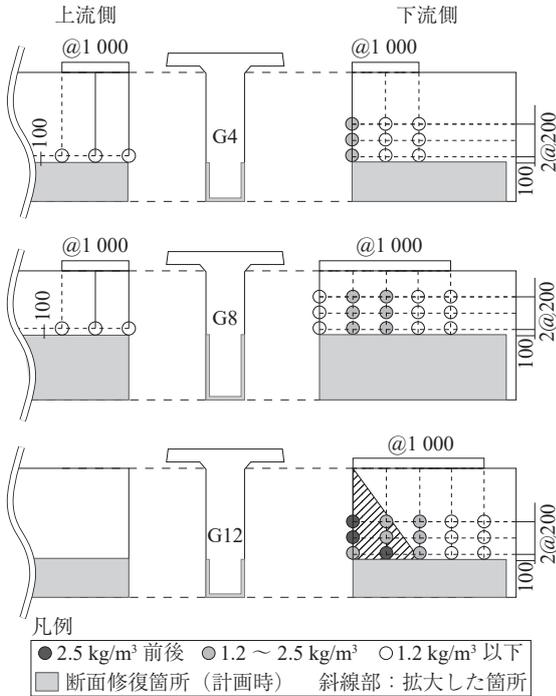


図 - 7 主桁の鉛直方向の推定値と断面修復範囲の追加

3.2 はつり工

コンクリート断面のはつり工は、躯体に悪影響の少ない超高压水を使用する WJ 工法で行った。

本工事は施工の制約を受ける市街地での工事であったため、高圧ポンプなどの機材を配置する施工ヤードの確保と、騒音対策が必要であった。そこで施工ヤードは隣接する車道と歩道を規制して確保し、騒音対策として超低騒音型の高圧水発生装置を使用した。施工中、機材近くを通行する歩行者、運転手からの苦情はとくになかった。

はつり作業は直射式のハンドガンを用いて 2 台使用し、約 210 MPa の水圧で鉄筋の背面（主桁側面 55 mm，主桁底面 65 mm，端支点横桁 55 mm，胸壁 115 mm）まで行った。なお、はつりを行った場合の主桁への影響は、設計当初、桁の応力度照査を行い安全性を確認している。また、施工範囲を拡大した桁の安全性も確認した。

施工時に発生する高アルカリの汚濁水は河川に流出させないように、足場内は防水用のゴムマットを敷設し、施工中は汚濁水を随時吸引車で回収した。回収した水は、本橋に隣接する空き地に設置した濁水処理槽で、pH と濁度を環境省の一律排水基準の規格値内（pH の規格値海域以外の公共用水域に排出されるもの：6.0 以上 8.5 以下、濁度の

規格値：150 mg/L 以下）まで調整した。調整後、水処理施設まで搬送し処理した。また、吸引車と水運搬用の散水車は施工ヤードが狭いため、歩道の一部を規制して設置した。施工状況写真を写真 - 5 に示す。

はつり後の鉄筋の発錆状況を図 - 8 に示す。GG1 桁は下流側の主桁下フランジの底面と側面に発錆がみられた、下流側の主桁になるにつれて発錆が底面全域に広がっていた。特に G8 桁の鉄筋の腐食が進行しており、鉄筋の断面積が半分程度になっていた。G9 桁～G14 桁は主桁底面に加えて下流側の主桁側面の高い位置（A2 橋台天端から 1.4 m 程度）にもみられた（G9 桁側面）が、G8 桁ほどの鉄筋腐食は見られなかった。端支点横桁は橋台天端との接地面に鉄筋の発錆がみられた。また、G9 桁以降は下流側の主桁側面と同様、高い位置にみられた。これらの発錆状況は前述した迅速測定法による内部塩化物イオン濃度の推定結果とも相関性がみられた。



写真 - 5 施工状況写真

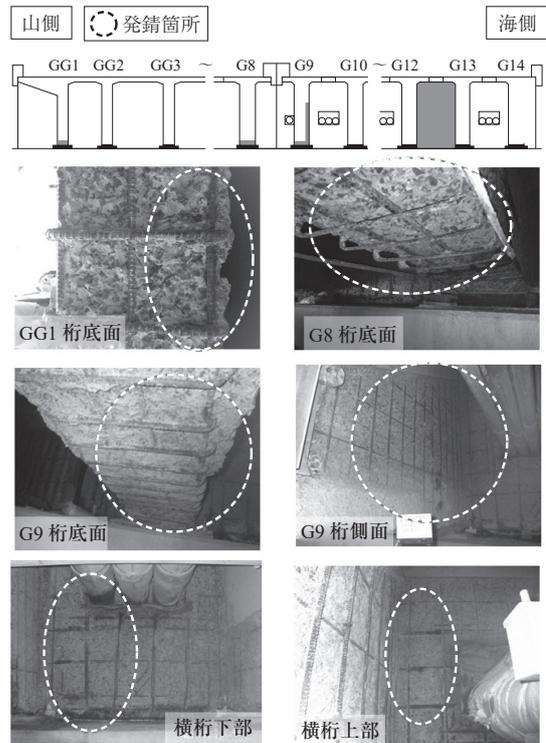


図 - 8 発錆状況

3.3 犠牲陽極材による防食工

断面修復部と未修復部のマクロセル腐食による再劣化とPC 定着部の腐食進行の抑制対策として、写真 - 6 に示す犠牲陽極材を設置した。防錆メカニズムの概要を図 - 9 に示す。犠牲陽極材の厚さは、かぶりを確保するために取り付ける鉄筋の径 (D13) に合わせて 13 mm とした。配置は、防食効果が補修範囲内で均等になり、かつ隣合う犠牲陽極材どうしの防食半径が重なるよう (図 - 10) にした。また、防食効果が PC 定着部鉄筋までおよぶように端支点横桁近傍に 1 主桁あたり 4 個以上配置した (図 - 11)。

取付けは、既設鉄筋との導通が確実に行われるように鉄筋をケレンし、犠牲陽極材がずれないように結束バンドで鉄筋に固定した。

設置後は取付けた鉄筋と犠牲陽極材の導通確認として電気抵抗値を測定 (当時の規格値 : 0.3 Ω 以下) した。また、離れた位置のスターラップや軸方向鉄筋と鉄筋の抵抗を測定して鉄筋どうしが導通していることを確認した。犠牲陽極材の設置状況を写真 - 7 に示す。

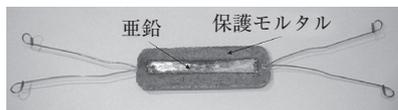


写真 - 6 犠牲陽極材

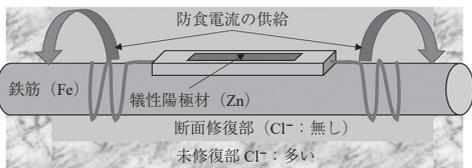


図 - 9 防錆メカニズムの概要

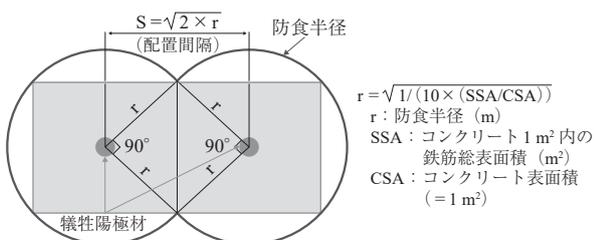


図 - 10 防食半径の考え方 (詳細調査報告書より)

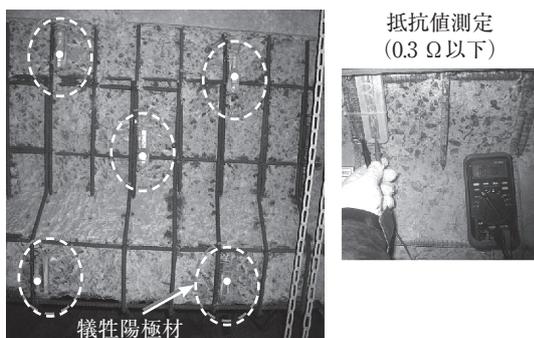


写真 - 7 犠牲陽極材設置状況

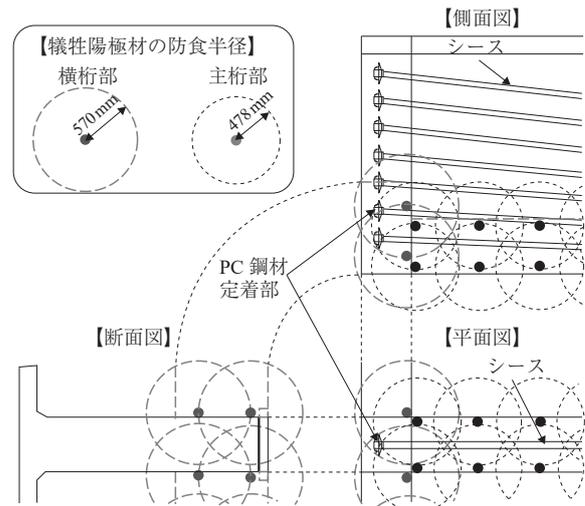


図 - 11 犠牲陽極材の防食半径

3.4 断面修復工

断面修復が広範囲であったため、吹付け工法が採用された。また予防保全を目的として、外部からの塩化物イオンを固定する効果のある塩化物イオン固定化材を配合したプレミックスタイプの吹付け用断面修復材を使用した。この材料はセメントの水和反応生成物が細孔中に存在する可溶性の塩化物イオンをフリーデル氏塩として固定化することで無害化を図る。塩化物イオンを固定化する機能を付与していることで、より鉄筋への防錆効果に優れた断面修復材となる。

吹付け工法の施工の性質として、形状が変化する断面に吹付けた際、角の部分が丸くなることによるかぶり不足や、不陸の大きい仕上り面となることが予想された。そこではつり前に計測した躯体寸法をもとに、吹付け用の型枠を作成し、出来形精度の向上と吹付け時の施工性を考慮して 50 cm 間隔で設置した。型枠使用時と不使用時の比較を図 - 12 に示す。型枠の設置により、吹付け前にかぶりが確認でき、吹付け後の角の仕上りもよく、大きな不陸も見られなかった。型枠設置状況と吹付け状況、完了を写真 - 8, 9, 10 に示す。

吹付けは、鉄筋に防錆剤および既設コンクリート境界面にプライマーを塗布したのち、2層に分けて行った。1層目で型枠に合わせて吹付け、脱枠後に2層目の吹付けを行い金ゴテで仕上げた。

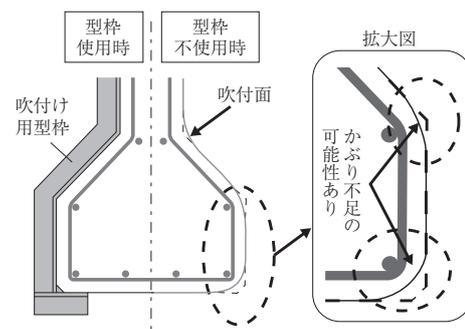


図 - 12 比較図

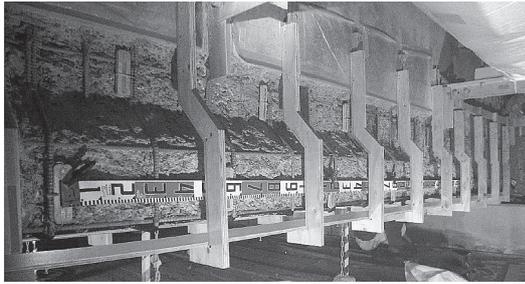


写真 - 8 型枠設置状況



写真 - 9 吹付け状況



写真 - 10 吹付完了

3.5 モニタリング装置などの設置

今後、調査の中で構造物への劣化因子の浸透を察知し、対策を講じることができるよう、事前調査で塩化物イオン濃度をもっとも高かった G8 桁の下流側に腐食環境検知システムと断面修復材の暴露試験体を設置した。

腐食環境検知システムは、感知部分に腐食因子が浸入しやすい被覆モルタルが塗布された箔状の鉄製のセンサと外部にデータを無線で送信するタグを躯体内に埋め込んで使用する。システムの概要および取付け状況写真を図 - 13 に示す。測定はセンサが劣化因子の浸入により発錆し、腐食が進行して断面欠損することで変化する電気抵抗値を計測することで腐食環境を判定する。このセンサを鉄筋と同じ位置に取り付けた。

断面修復と同じ材料による供試体を製作し、G8 桁の A2 橋台部に暴露した。この供試体で腐食因子の浸入深さを確認し、浸入状況の経時変化を確認する。

腐食環境検知システムを配置した桁内の鉄筋にリード線を直結した。リード線と検査装置のプロープを繋ぐことによりコンクリート表面と鉄筋間の自然電位などが簡単に測定可能となる。なお、リード線が海水の影響を受けないように鉄筋の内側を通して上流側に出し、プルボックスを設置して養生した。試験体の暴露状況およびリード線の設置状況を写真 - 11 に示す。

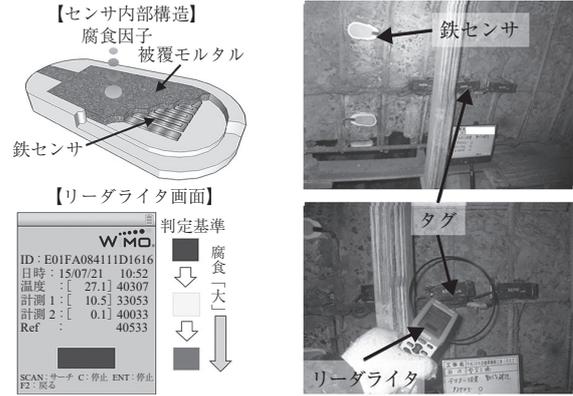


図 - 13 腐食環境検知システム



写真 - 11 設置状況

4. おわりに

本稿では、塩害劣化が認められる橋梁の事前調査、施工、モニタリングについて紹介した。今回の調査で同じ橋梁内でも、下部工の形状や風向きなどの環境条件により各桁、劣化状況が異なっていた。事前調査により、効果的な断面修復範囲を設定できたと考える。

施工は吹付け用型枠を使用して断面の変化に対応した。モニタリングは、さまざまな方法で内部への劣化因子の浸入を確認できるようにした。これにより今後の合理的な維持管理に寄与できると思われる。

竣工して1年後にこれらのモニタリング装置を使用して調査が行われた。腐食環境検知システムによる腐食度の判定および暴露した供試体から採取した試料を用いた塩化物イオン量測定結果はいずれも「健全」と判定された。リード線を使用した自然電位法による鉄筋腐食状況の調査では、今後経過観察を行うための指標として初期値を計測している。

最後に工事進行に協力していただいた関係者皆様に深く感謝の意を表すとともに、本報告が今後の補修工事の参考になれば幸いです。

参考文献

- 1) 田村, 池田, 九十九, 吉田: 断面形状変化する T 桁端部の塩害補修工事について, プレストレストコンクリート工学会 第 26 回シンポジウム論文集, pp.115-118, 2017.10
- 2) 田村, 九十九: 塩害を受けた PCT 桁橋の補修工事とモニタリングについて, 一般社団法人 日本構造物診断技術協会 第 30 回構造物の診断と補修に関する技術・研究発表会論文集, I-6, pp.31-35

【2019年3月15日受付】