施工条件制約下における乾式吹付工法と塩害対策の併用による桟橋補修

(株)大林組　正会員　○高岡　潤　　正会員　伊東　拓郎
正会員　富井　孝喜　　正会員　中村　裕司
川崎重工業(株)　　丘　牧人

1．はじめに

港湾・工場施設に設置された鉄筋コンクリート造桟橋では，海洋環境の影響と経年により塩害が進行し，鉄筋腐食，コンクリートの浮き・剥離および断面欠損が生じることがある．このような構造物の補修では，劣化部を単に断面修復するだけではなく，劣化状況，施工条件および補修後の再劣化リスクを踏まえ，防食対策と表面保護を適切に組み合わせることが重要である．一方，供用中の工場施設では，操業を継続しながら施工を行う必要があり，作業ヤードや設備配置に制約を受けることが多い（**写真-1**）．さらに，海面近傍に位置する桟橋では，潮位変動により施工可能な時間帯や作業範囲が制限されるため，補修工法の選定にあたっては，施工条件への適合性，施工性および品質確保を総合的に判断する必要がある．

本稿では，造船工場内の鉄筋コンクリート造桟橋の補修工事において，当初計画時と着工前調査時で確認された劣化状況の相違を踏まえ，補修方針を見直した経緯を整理する．また，施工条件に適合する断面修復工法を比較検討し，乾式吹付工法と部位別の鉄筋防食対策を組み合わせた補修方法について，施工上の課題および対応策を報告する．

2．工事概要

工事概要を**表-1** に示す．施工対象は，瀬戸内海に面した造船工場内に設置された鉄筋コンクリート造桟橋上部工の床版下面および梁部であり，対象の第 1 期工事の施工延長は約 170m である．対象桟橋は竣工後 54 年が経過しており，2018 年に実施された調査の結果，床版下面および梁部側面において，鉄筋腐食に起因するコンクリートの爆裂および断面欠損が確認された．調査結果に基づき補修計画が立案され，原状回復を目的に補修工事を実施した．

当初の補修計画は，過年度に隣接工区で実施された補修工事の内容および 2018 年の調査結果を踏まえて立案された．隣接工区では左官および充填工法を主体とした補修が採用されており（**写真-2**），本工事においても同様の補修方針を基に計画が策定された．



写真-1　桟橋上面の設備状況

表-1　工事概要

項　　目	内　　容
工事名称	Ｃ２．Ｃ３岸壁（本体部） 補修工事第一期
発注者	川崎重工業株式会社
施工場所	香川県坂出市　川崎重工業株式会社坂出工場　C2.C3 岸壁
主要数量	仮設足場工約 377 ㎡、 梁部補修面積 188.1 ㎡、 床版部補修面積 156.5 ㎡ 鉄筋加工組立 5.18ｔ，他
竣工年	昭和 47 年（1972 年）
構造	上部工：RC 床版・RC 梁 下部工：鋼管杭
調査実施年	2000 年，2018 年

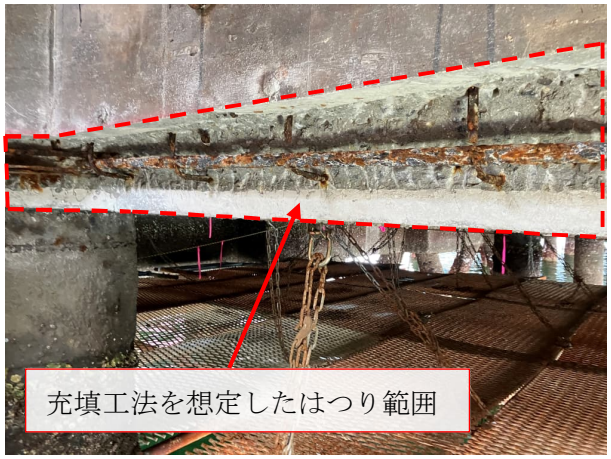


写真-2　過年度の補修状況

キーワード　塩害，桟橋補修，マクロセル腐食対策，亜硝酸リチウム，乾式吹付，エポキシ樹脂塗装鉄筋
連絡先　〒760-0007　香川県高松市中央町 11-11(株)大林組　四国支店　土木工事部　ＴＥＬ087-836-3111

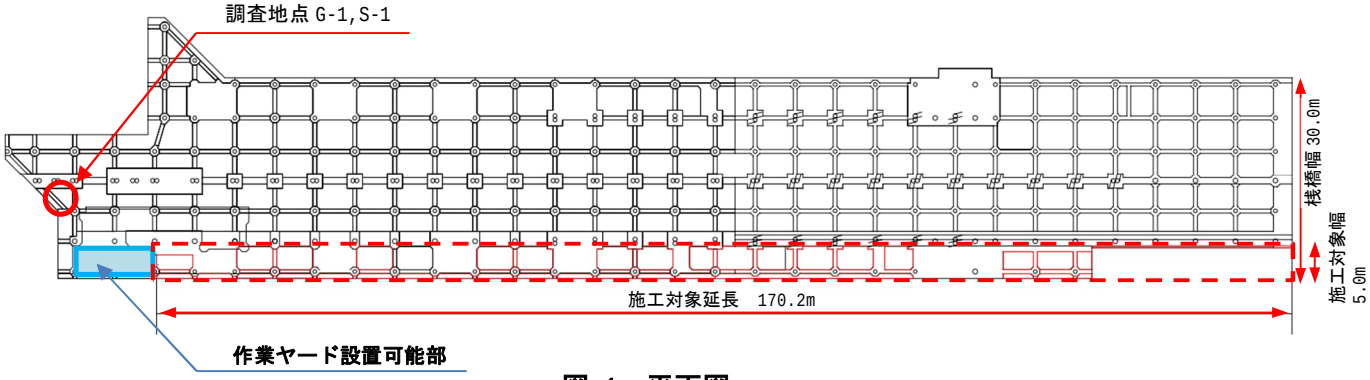


図-1　平面図

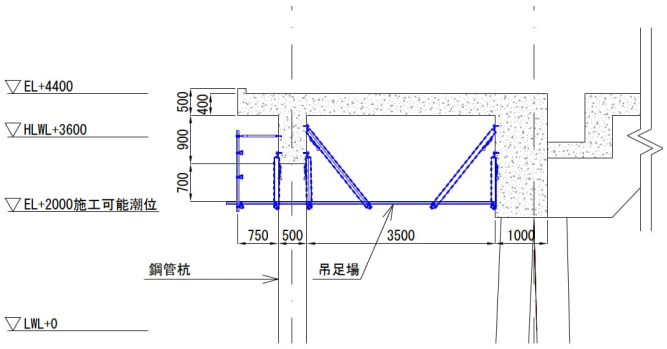


図-2　断面図



写真-3　補修前の劣化状況

3．施工上の課題

(1)塩害環境における耐久性確保

計画段階で提示された事前調査結果では，地点 G-1 梁部側面および地点 S-1 床版下面の深さ 80～100mm（鉄筋位置 100mm）における塩化物イオン量の平均は，それぞれ 10.59kg/m³ および 4.68kg/m³ であり，調査報告書で定めた塩害による鉄筋腐食を生じうる塩化物イオン量 2.5kg/m³ 以上[1] であった．このため，断面欠損が顕在化した範囲の補修を行う場合においても，補修部周辺に残存する塩化物イオンの影響を踏まえ，補修後の鉄筋腐食の発生リスクを確認する必要があった．したがって，劣化範囲や既設鉄筋周辺の塩化物イオン量を踏まえ，補修範囲および鉄筋防食対策の要否を検討することが課題であった．

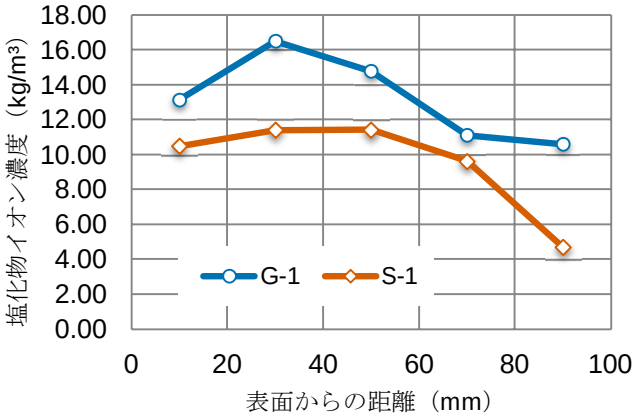


図-3　塩化物イオン量調査結果（2018 年）

(2)施工条件への適合性

a)潮位変動による施工時間の制約

本工事は瀬戸内海に面した桟橋を対象としている．瀬戸内海は潮位差が比較的大きく，特に当該海域では潮位差が 3～4m に及ぶことが知られており，海面近傍に位置する桟橋では潮位変動の影響を受けやすい環境

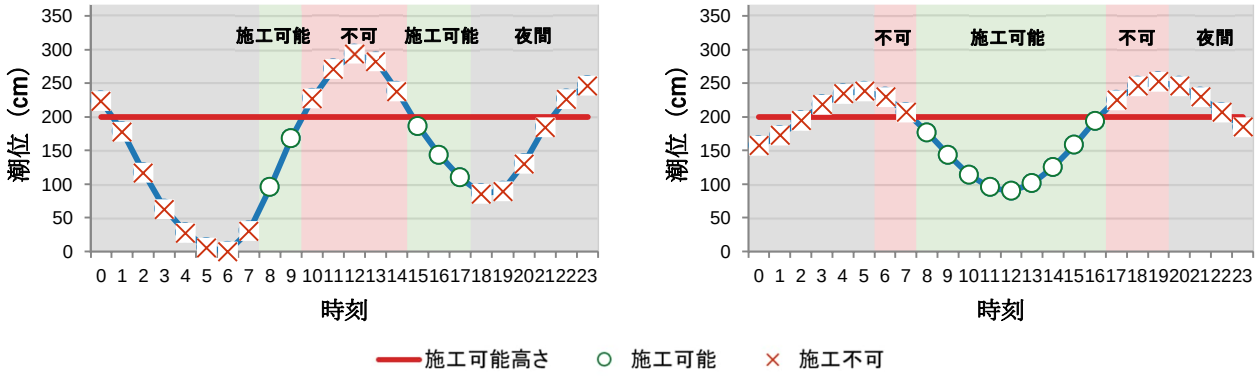


図-4　潮位変動による施工可能時間の例
（左：冬季難条件，右：夏季好条件）

であった．図-4 に潮位変動による施工時間の例を示す．満潮時には桟橋梁部が海水中に没するため，桟橋下面での補修作業は干潮時に限定された．したがって，1 日当たりの施工可能時間は限られ，長時間の養生や複数工程を要する工法の適用は困難であった．このため，限られた施工時間内で実施可能な工法および材料を選定することが課題であった．

b)補修範囲に対応した施工方法の選定

当初設計では，部分補修を前提として型枠注入工法や左官工法による断面修復を計画していた．しかし，着工前の現地確認およびはつり調査の結果，劣化範囲が設計時の想定を上回ることが判明した．また，残存塩化物イオンによる鉄筋腐食やマクロセル腐食の発生リスクについても考慮する必要があった．そのため，本工事の劣化状況および施工条件を踏まえ，補修範囲，適用工法および防食上の留意点を含めて再検討することが課題となった．

c)作業ヤードの制約に対応した施工方法の選定

本工事は，工場操業を継続した状態で実施する必要があり，桟橋上では中央部にジブクレーン走行用のレールが設置されていることから，レールを跨いだ設備配置や配管・ホースの敷設が制限された．また，**図-1** に示すとおり，材料供給設備を設置できる作業ヤードも限定されていたため，限られた作業ヤードから施工延長約 170m の全施工範囲へ対応可能な工法を選定することが課題であった．

4．解決策

(1)塩害環境における耐久性確保に対する解決策

塩害環境における耐久性確保に対しては，残存塩化物イオンによる鉄筋腐食およびマクロセル腐食の抑制を目的として，部位ごとに複数の防食対策を検討した．検討にあたっては，犠牲陽極，亜硝酸リチウム含有防錆ペーストおよびエポキシ樹脂塗装鉄筋への置換について，施工条件と耐久性確保の両面から適用性を整理した．なお，シラン系表面含浸材による表面保護は当初設計に含まれていた対策であり，上記の鉄筋防食対策と併用する表面保護対策として位置づけた．

a) 犠牲陽極　既設鉄筋を残置する範囲では，補修部と未補修部の電位差に起因するマクロセル腐食の抑制を目的として，犠牲陽極の適用が考えられる．犠牲陽極は，鉄筋よりも卑な金属を陽極材として設置し，陽極材から鉄筋へ防食電流を供給することで鉄筋の腐食反応を抑制する方法である．必要容量は，防食対象となる鉄筋表面積，必要防食電流密度，設計耐用年数，陽極材の電気化学的容量および利用効率に加え，陽極を設置する部位の環境条件を考慮して算定する必要がある．特に，本工事のように海面近傍で干満の影響を受ける桟橋では，陽極の発生電流や消耗速度が変化する可能性がある．本工事では，残存塩化物イオン量が多く，かつ海面近傍の広範囲な既設鉄筋を対象とする場合，必要となる陽極容量および設置数量が大きくなることが想定される．このため，犠牲陽極を適用する場合には，所定の耐久性を確保するための必要容量に加え，設置環境，施工性および経済性を含めて総合的に検討する必要がある．

b) 亜硝酸リチウム含有防錆ペースト　梁部など既設鉄筋を活用する範囲では，亜硝酸リチウム含有防錆ペー

ストの適用が解決策の一つとして考えられる．亜硝酸リチウムの使用量は，残存する塩化物イオン量に対して防錆効果を発揮するために必要な亜硝酸イオン量を確保する考え方に基づく．具体的には，塩化物イオン量に対する亜硝酸イオン量のモル比［NO_2^-］／［Cl^-］を指標とし，所定のモル比を満足するように亜硝酸リチウム量を算定する[2)]．本工事では，計画はつり深さ付近の最大塩化物イオン量 10.59kg/m³ を踏まえ，設計値を 11.0kg/m³ とした．［NO_2^-］／［Cl^-］モル比を 1.0 とすると，1m³ 当たりの必要亜硝酸リチウム量は 16.39kg/m³ となる．また，必要浸透深さを 20mm とした場合，単位面積当たりの必要量は 0.328kg/m² となる．これに対し，RIS111 防錆ペーストを 2mm 厚で塗布した場合の亜硝酸リチウム供給量は 0.56kg/m² であり，必要量を上回ることから，本工事では梁側面等の既設鉄筋を活用する範囲において，塗布厚 2mm で対応可能と判断した．これにより，塩化物イオンにより破壊された鉄筋表面の不動態皮膜の再形成を促進し，既設鉄筋の腐食反応を抑制する効果が期待される．

c) エポキシ樹脂塗装鉄筋への置換　床版下面のように劣化範囲が広く，鉄筋裏まで既設コンクリートを除去する範囲では，既設鉄筋を残置する場合，周辺の塩化物イオン量や鉄筋の腐食状態を踏まえた防食対策の検討が必要となる．このような範囲では，既設鉄筋を撤去し，エポキシ樹脂塗装鉄筋へ置換することも解決策の一つとして考えられる．これにより，既設鉄筋に対する防錆処理に依存せず，新設鉄筋自体の防食性能によって塩害環境下における腐食リスクを低減できる可能性がある．

d) シラン系表面含浸材　シラン系表面含浸材は，当初設計において断面修復後の表面保護対策として計画されていた．本工事では，補修部および未補修部を含む施工範囲に同材料を塗布し，コンクリート表層部に吸水防止層を形成することで，外部からの水分および塩化物イオンの再浸入を抑制する方針とした．特に，海面近傍の桟橋では，飛来塩分や海水の影響を継続的に受けるため，断面修復材および鉄筋防食対策に加え，当初設計で計画された表面保護対策を適切に実施することが重要であるが有効となる．

(2)施工条件への適合性に対する解決策

施工条件への適合性に対しては，潮位変動により施工時間が制約されること，補修範囲が当初想定より広いこと，および作業ヤードが限定されることを踏まえ，施工時間の短縮，広範囲施工への対応性，長距離搬送性を重視して補修工法を検討した．具体的には，当初計画で想定していた型枠注入工法および左官工法に加え，広範囲施工に適する湿式吹付工法および乾式吹付工法を候補とし，各工法の適用性を比較した．

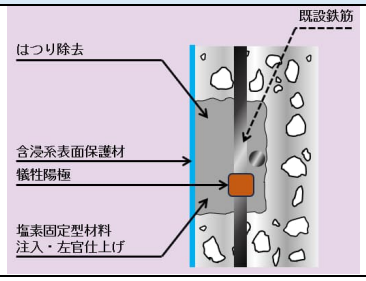
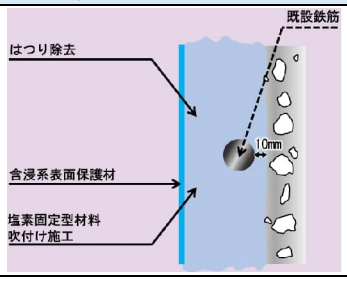
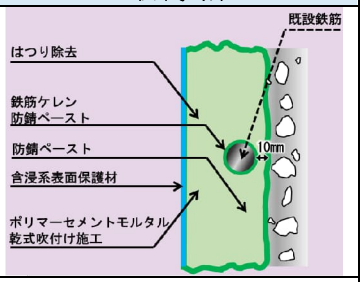
(3) 補修工法の比較検討

施工条件への適合性および塩害環境下での耐久性確保の観点から，補修工法の比較を**表-2** に示す．型枠注入工法および左官工法は部分補修には適するものの，広範囲補修および限られた施工時間への対応に課題があった．湿式吹付工法は，広範囲施工が可能であり，塩化物イオン固定機能を有する補修材料を適用できる点で有効であったが，材料供給設備を設置できる作業ヤードが限定され，必要な圧送距離を確保できないため，施工範囲全体への適用は困難であった．

比較検討の結果，本工事では，施工条件および塩害環境下での耐久性確保を踏まえ，以下の補修方針とした．

- 断面修復工法には，長距離搬送性に優れ，限られた作業ヤードから全施工範囲へ対応可能な乾式吹付工法を採用した．
- 乾式吹付材料には塩化物イオン固定機能を有する材料がないため，塩害対策については部位ごとの鉄筋防食対策を併用することとした．
- 犠牲陽極については，残存塩化物イオン量が多く，海面近傍で干満の影響を受ける設置環境であることから，必要陽極容量および設置数量が大きくなることが想定されたため，主たる防食対策としての採用は見送った．
- 床版下面では，既設鉄筋を撤去し，エポキシ樹脂塗装鉄筋へ置換することで，残存塩化物イオンの影響を受ける既設鉄筋を残置しない方針とした．

表-2　補修工法の比較

比較項目	型枠注入・左官工法	湿式吹付工法 （塩化物イオン固定型材料）	乾式吹付工法 ＋防食対策
概要図			
広範囲補修への適用性	× 部分補修向け	○ 広範囲施工が可能	○ 広範囲施工が可能
限られた時間内での施工性	△ 型枠設置等を要する	◎ 施工効率が高い 1.0m³/h	◎ 施工効率が高い 1.0m³/h
長距離搬送性	—	× 搬送距離 60m 必要圧送距離を確保できない	◎ 長距離搬送が可能 200m
残存塩分対策	◎ 塩化物イオン固定型材料	◎ 塩化物イオン固定型材料	◎ 亜硝酸リチウム含有防錆ペースト
	△ 犠牲陽極 必要量が過大になる	△ 犠牲陽極 必要量が過大になる	◎ エポキシ樹脂塗装鉄筋
総合評価	△	×	◎

- 梁側面では，既設鉄筋を活用するため，亜硝酸リチウム含有防錆ペーストを併用する方針とした．なお，本工事の塩化物イオン量に対する必要量を照査した結果，RIS111 防錆ペーストは塗布厚 2㎜ で必要な亜硝酸リチウム量を満足できることを確認した．
- 断面修復後には，当初設計で計画されていたシラン系表面含浸材を施工範囲に塗布し，水分および塩化物イオンの再浸入を抑制する表面保護を行う方針とした．

以上より，本工事では，施工条件に適合する乾式吹付工法に，部位別の鉄筋防食対策を組み合わせ，さらに当初設計で計画されていたシラン系表面含浸材による表面保護を適切に実施することで，施工条件への適合性と塩害環境下における再劣化リスクの低減を図る計画とした．

５．施工

施工フローを**図**-5 および**図**-6 に示す．

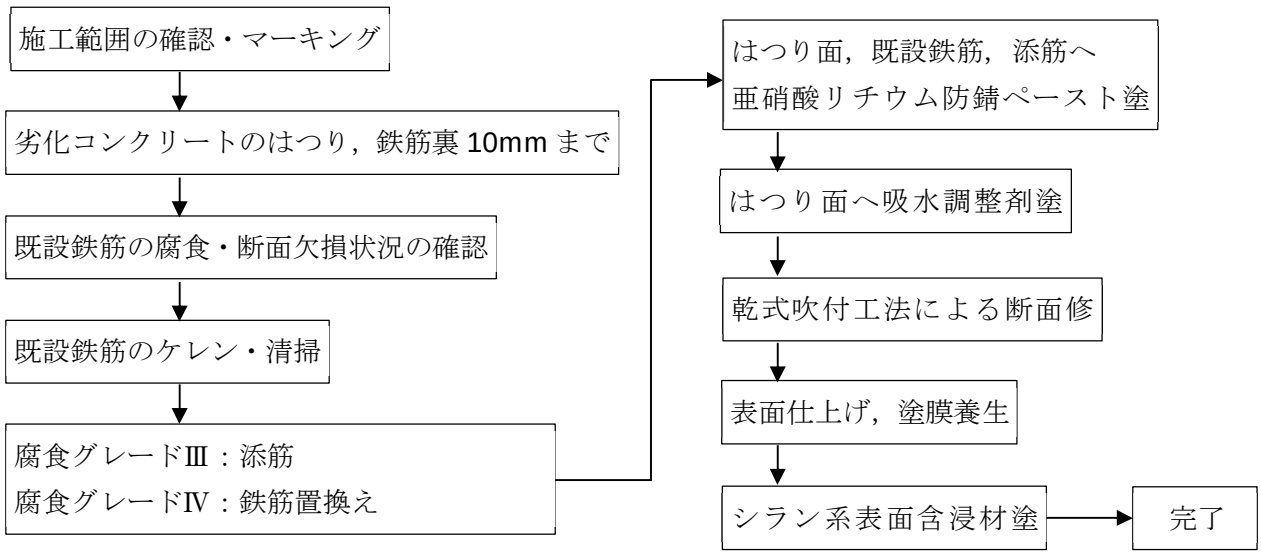


図-5　梁部側面の補修フロー

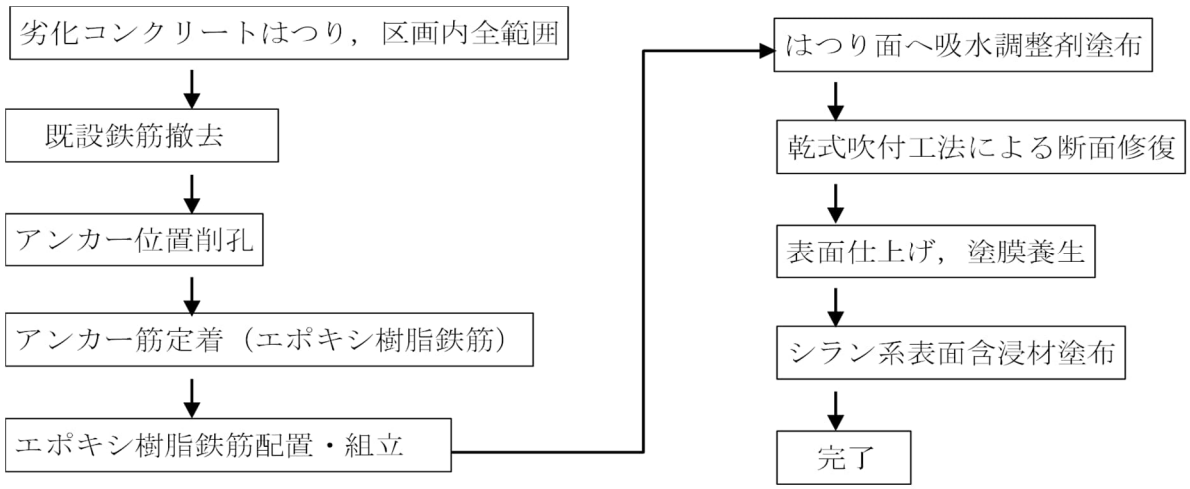


図-6　床版下面の補修フロー



写真-4　エポキシ樹脂塗装鉄筋配置状況



写真-5　亜硝酸リチウム防錆ペースト塗布状況

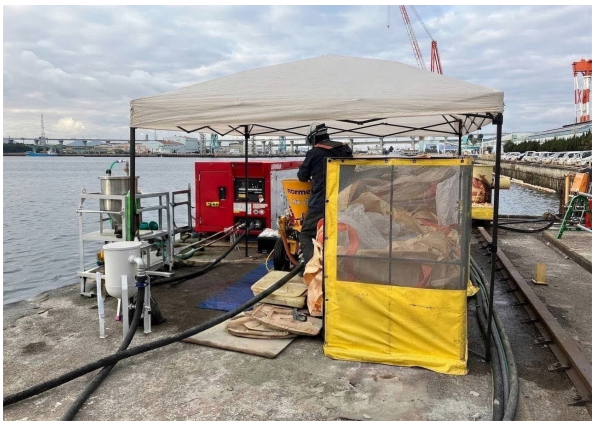


写真-6　作業ヤードの材料供給設備



写真-7　乾式吹付施工状況

床版下面では，補修範囲の既設コンクリートを鉄筋裏まではつり取り，既設鉄筋を撤去した後，エポキシ樹脂塗装鉄筋を配置して断面修復を行った（**写真-4**）．

梁部側面では，はつり後の既設鉄筋およびコンクリート面に亜硝酸リチウム含有防錆ペーストを塗布し，その後に断面修復を行った（**写真-5**）．乾式吹付では，限られた作業ヤードに配置した材料供給設備（**写真-6**）から施工地点へ材料搬送し吹付施工を実施した（**写真-7**）．施工時には，潮位に応じて干潮時を中心に作業を進めるとともに，工場操業および桟橋上の設備配置に配慮し，配管・ホース類の敷設位置を調整した．断面修復の完了後（**写真-8**），施工範囲にシラン系表面含浸材を塗布し表面保護を図った（**写真-9**）．



写真-8　乾式吹付完了状況



写真-9　表面含浸材塗布状況

６．おわりに

本工事では，限られた作業ヤードおよび潮位変動による施工時間の制約を受ける造船工場内桟橋を対象として，工場操業への影響を最小限に抑えつつ，塩害対策と品質確保を両立できる補修方法を検討した．その結果，長距離搬送性に優れる乾式吹付工法を採用し，部位ごとの鉄筋防食対策および表面含浸材による表面保護を組み合わせることで，施工条件の制約下でも所要の品質を確保しながら補修を行う施工方法を確立した．また，当初設計で計画されていたシラン系表面含浸材による表面保護を実施することで，補修後の水分および塩化物イオンの再浸入抑制を図った．

今後は，本工事で得られた施工上の知見を第 2 期工事に反映し，より厳しい施工条件下における施工性および品質確保について検証を進める予定である．

参考文献

1) 独立行政法人土木研究所，日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，p.92，技報堂出版,2003

2) 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会：コンクリート構造物を対象とした亜硝酸リチウムによる補修の設計・施工指針（案）第 2 版，p.77，2022