

論文 塩害により損傷を受けた PC 橋の補修効果に関する考察

松田芳範*¹・石橋忠良*²・豊岡昭博*³・天木儀一*⁴

要旨：海岸線に位置している PC 橋りょうにおいて飛来塩分による塩害を生じ補修が行われたがその後再び劣化損傷が生じた。当時の補修方法として選定された補修工法について再補修を行うに当たり劣化損傷程度の調査及びコンクリート中の含有塩分量などについて分析を行い、その補修効果について検証を行った。その結果、コンクリート中に含有塩分が残存している状況においては断面修復等による補修効果が期待できないことがわかった。また、各種遮塩用塗膜において無機系材料を含有する塗膜材が耐久性に優れていることがわかった。

キーワード：外的塩害, 補修, 再劣化, 塩分含有量, 残存塩分, 断面修復

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化原因のひとつに飛来塩分の付着によりコンクリート内部に塩分が浸透し、鋼材を腐食させ劣化・損傷を生じさせる外的塩害がある。これまでの補修工法として劣化損傷を生じた部分のコンクリートをはつり、ポリマーコンクリートやポリマーモルタル等を用いて欠損断面を修復する断面修復工法が経済性などで優位な工法として採用されてきた。この工法では、コンクリート中に含浸した塩分が取り除かれていないこと、また健全なコンクリートに打ち換えることにより補修部分においてマクロセルによる鋼材の腐食などが考えられる。今回、塩害により劣化損傷を生じ、断面修復工法により過去に大々的に補修を行った後、再度劣化損傷を生じた PC 桁について再補修を行うこととした。対策工を行うにあたり再劣化を生じたコンクリート桁について実態調査を行い補修効果の検証を行った。本報告では劣化損傷の現状について述べるとともに、遮塩対策として前回補修時に試験施工を行ったコンクリート塗

装について評価を行ったので報告する。

2. 概 要

対象橋りょうは、日本海沿岸に位置する、スパン 22.10m×2 連、31.30m×1 連の PC I 型単純桁構造である。図-1 に橋りょう概要を示し、図-2 に PC 桁の配置を示す。本橋りょうは、1968 年 3 月に建設されているが、建設当時の海岸線は、線路近傍であったとされている。その後、海側に道路が建設され海岸線が後退したため、本橋りょうは現在海岸線から 100m の位置におかれている。

本橋りょうは、日本海沿岸の厳しい環境条件の中に位置しており、建設後、海風に運ばれた海塩粒子がコンクリート表面に付着し、コンクリート内部へ塩化物が浸透拡散したものと考えられる。この塩化物の拡散によってコンクリート内部の鋼材腐食が早く進行し、建設後早い時期からひび割れ、錆汁の滲出といった変状が生じており、それまでにも部分的な補修が行われていた。

*1 東日本旅客鉄道(株)建設工事部構造技術センター 主席(正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株)建設工事部 部長 工博(正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株)新潟支社設備部施設課 課長

*4 東日本旅客鉄道(株)新潟支社設備部施設課 副課長

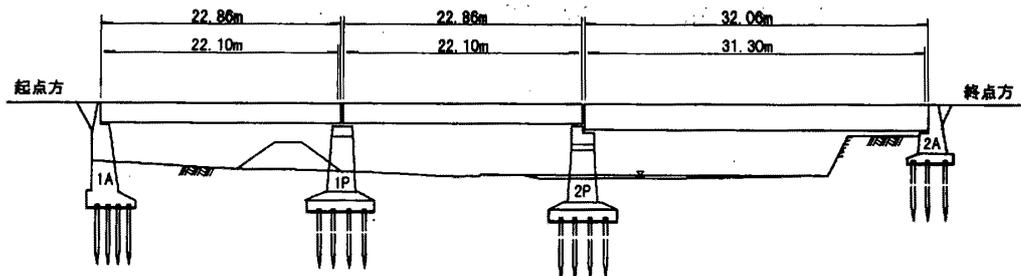


図-1 橋りょう全体図

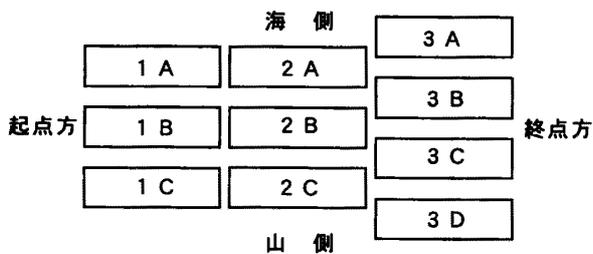


図-2 桁配置

1984年に詳細な劣化・損傷程度を把握するため調査を行った。その結果、劣化・損傷部分の撤去、打ち換えを基本とした断面修復工法により補修が行われたが、その後再び劣化・損傷が発生したものである。

3. 環境状況

本橋りょうは、日本海沿岸に位置しており、一般的に海から飛来する塩化物量は、太平洋側と比べて多いとされており、特に冬期の極めて強い季節風によって海から多量の塩分を飛来させており、かなり厳しい環境条件にさらされている。図-3に、コンクリート表面への付着塩分量、図-4に風向の測定データを示す¹⁾。このデータは1984年の調査の際に当該構造物において測定されたものである。

コンクリート表面の付着塩化物は、時間とともにコンクリート内部へ浸透拡散して行くことが知られており、コンクリートにひび割れのない場合、フックの拡散方程式を用いてその過程を求めることができる。本橋りょうの場合、配合推定結果から水セメント比43%と推定され、塩化物量の分析結果からコンクリート中の塩化物の拡散係数を $1.0 \sim 3.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ として、コンクリート表面の付着塩化物量によって鋼材

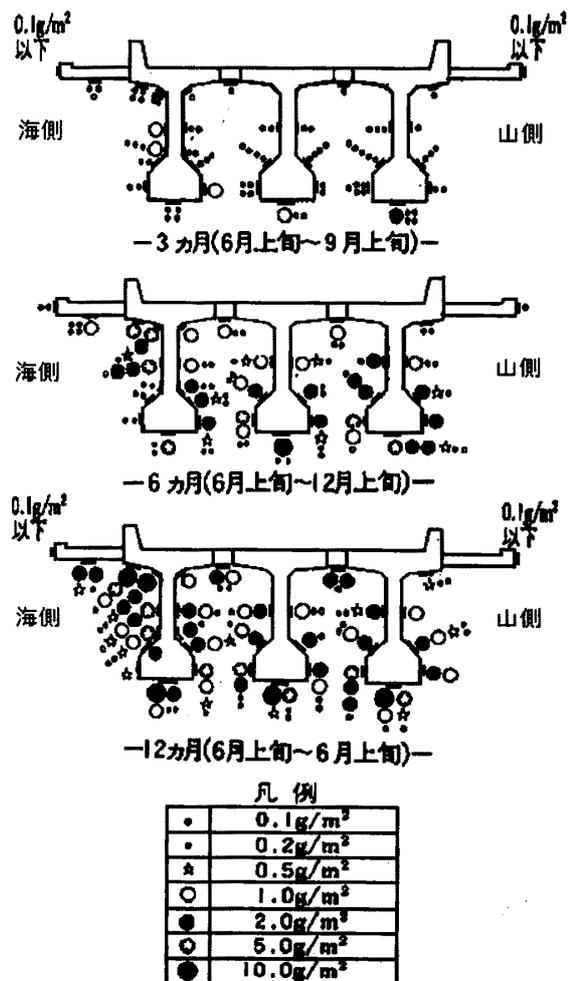


図-3 飛来塩分量 (Cl-) 調査¹⁾

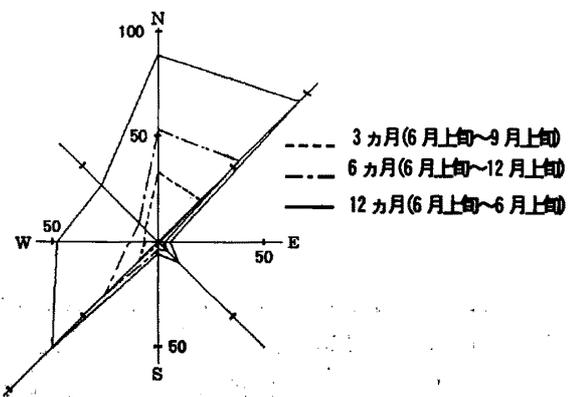


図-4 風向調査¹⁾

が腐食開始する塩分濃度（セメント重量に対して塩素イオン量を 0.4%とする）に達する年数を求めると約 10 年程度となる¹⁾としている。これは、ひび割れの生じていないコンクリートにおいて鋼材が腐食開始する時期と考えることができ、鋼材の腐食に対する対策を講じなければならない時期であるとも考えられる。また、ひび割れが生じた後は、ひび割れから直接塩化物が浸入することになり加速的に変状が進行していくといわれている。

4. 調査

調査は、次の様な内容で行った。

(1) 外観調査

外観調査は、桁全数を対象としてひび割れ本数、ひび割れ長さ及びコンクリートの剥離・剥落について調査を行った。

(2) 化学分析

化学分析は、コアボーリングマシンを用いて主桁コンクリートをφ50～100mmで採取し、コンクリート中の塩分含有量について分析を行った。下フランジでは、鋼材に近い箇所の塩分含有量を把握するため全桁で分析を行い、ウェブは補修後の経年に伴う塩分の浸透拡散について時系列を確認するために行った。

(3) 塗膜調査

前回補修時の各種塗膜について、塗膜のひび割れ、錆汁の発生、ふくれ爆裂及び汚れについて目視にて観察を行った。

(4) はつり調査

劣化・損傷した部分を撤去しコンクリート内部の鋼材の状況等について調査を行った。

5. 調査結果および考察

5.1 外観調査

図-5 にひび割れの調査状況の例を示す。外観的な劣化・損傷は、PC桁主桁の下フランジ下面のひび割れ、コンクリートの浮き、主桁下フランジ側面の橋軸方向へのひび割れなどである。

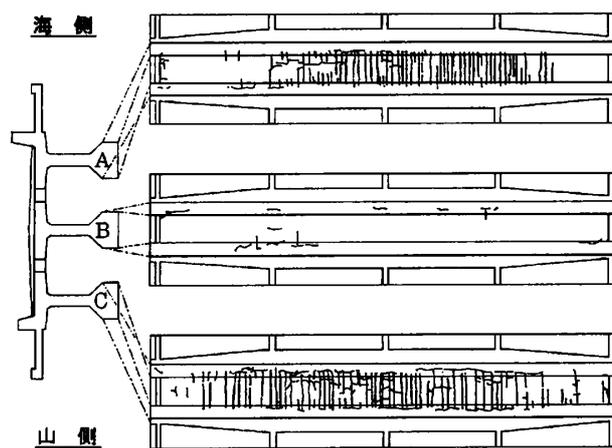


図-5 ひび割れ調査の例



写真-1 下フランジ側面の劣化損傷

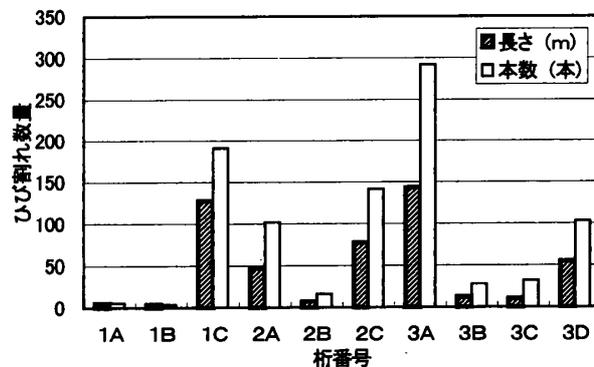


図-6 ひび割れ本数と長さ

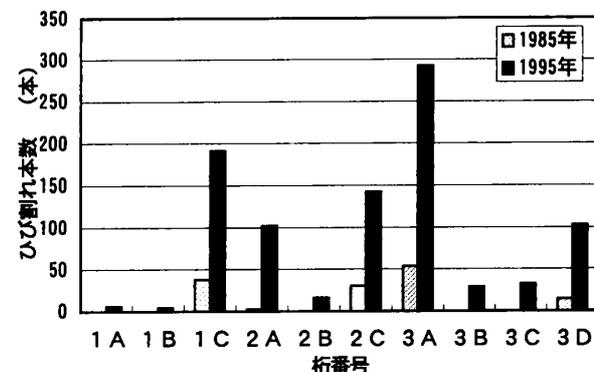


図-7 ひび割れ発生の変動

特に主桁下フランジ側面のひび割れは、前回補修した際の断面修復用のモルタルと劣化部をはり取った後の残った主桁コンクリートとの境界部付近で最大 10mm 程度と大きく開口している箇所も認められる。写真-1 に下フランジ側面のひび割れ状況を示す。主桁下フランジ下面のひび割れは、橋軸方向および橋軸直角方向へ無数に発生しており、橋軸直角方向のひび割れが多い。橋軸直角方向のひび割れには、規則的に発生している傾向が見られ、スターラップ位置での鋼材の腐食によるひび割れの発生その他、前回補修した際の打ち継ぎ部と思われる箇所でのひび割れも認められることから補修材料の硬化収縮によるひび割れも考えられる。ひび割れからは錆汁の滲出も認められた。

図-6 に各主桁毎のひび割れ本数と総ひび割れ長さを示す。図-7 に補修直後に調査した際のひび割れ本数と今回調査時のひび割れ本数の変動を示す。

ひび割れは、1C、2A、2C、3Aおよび3Dの桁に多く生じている。これらは海側、山側に位置している桁であり、1Aを除き同様の傾向を示している。この図からも明らかなように1連目から3連目の桁で劣化損傷の著しい海・山側に挟まれた中央部の桁ではひび割れ本数も少なくなっており、図-5の劣化損傷状況からも比較的劣化・損傷程度は軽微である。これらの傾向は、図-7に示すように補修直後から現れていたものと考えられる。

5.2 化学分析調査

主桁下フランジ部底面からシース最下端付近までコアを全桁から採取し、シース部付近（コンクリート表面から5cmの位置）の含有塩分量について分析試験を行った。分析試験は、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」によった。図-8に下フランジの塩分含有量を示す。

ウェブについては、海側、山側両端の桁から海側桁の海側および山側桁の山側からコアを採

取し、含有塩分量の分析試験を行った。分析試料はJCI-SC8「硬化コンクリート中に含まれる塩分分析用コア試料の採取方法」に準じて行い、採取したコアをコンクリート表面から2cmピッチにスライスしてそれぞれについて分析を行った。ウェブの分析結果を図-9に示す。

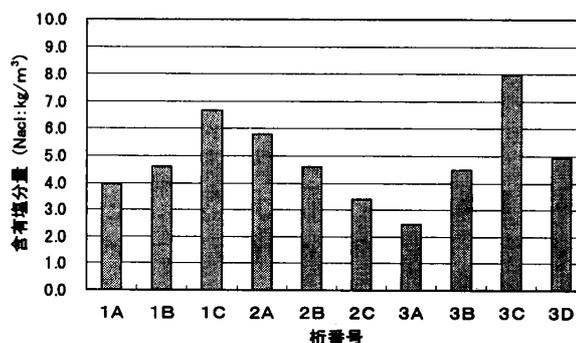


図-8 下フランジの含有塩分量

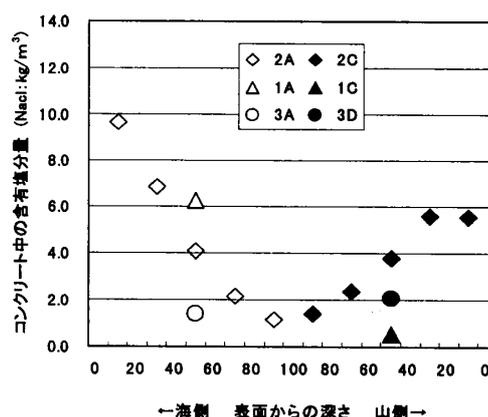


図-9 ウェブの含有塩分量

分析の結果、下フランジシース部付近の塩分量は $2.5 \sim 8.0 \text{ kg/m}^3$ と、かなりの塩分量が浸透していることがわかった。また、ウェブの塩分含有量は桁のコンクリート表面部でおよそ 10.0 kg/m^3 、ウェブ中心部ではおよそ 1.20 kg/m^3 であった。

図-10に1985年の調査における含有塩分量を示す。

この図から各桁ともにコンクリート表面付近に高濃度の含有塩分が認められ、一番少ない3D桁で 6.0 kg/m^3 以上となっており、どの桁においても含有塩分量は海側が多くなっているこ

とがわかる。この時の分析結果と今回分析したウェブコンクリート中の分析結果を検討した。

図-11 にウェブコンクリート中の含有塩分量の前回調査時の分析結果との比較を示す。

図を見ると桁表面から 10mm の位置での含有塩分量は、10 年前と比較して変化が見られない。10 年前の調査では 1 A 桁の海側から深さ 40mm の位置で 2.0kg/m^3 程度であった含有塩分量が今回の調査では深さ 50mm の位置で 4.0kg/m^3 程度と 2 倍近く増加していることがわかった。2 C 桁でも同様に山側から深さ 40mm の位置で 1.5kg/m^3 程度であった含有塩分量が深さ 50mm の位置でおよそ 4.0kg/m^3 に増加している。

これらの分析結果から主桁コンクリート内部の塩分含有量は、塩分が表面から浸透拡散し、内部に蓄積される傾向にあると考えられる。ウェブについては遮塩用塗膜が施工されていないことから外部から塩分が供給される状態であり、時間の経過とともに内部に浸透拡散したものと考えられるほか、塩化物イオンの移動も考えられる。下フランジは、塩化物の浸透防止の塗膜が施工されているにもかかわらず、含有塩分量が比較的多いが、これは前回の補修前に既に浸透した塩分が残留していたものと考えられる。

5.3 塗膜調査

前回補修時に塩化物の浸透防止対策としてコンクリート表面への塗装が試験施工として 10 本の主桁に 9 種類の施工が行われている。表-1 に塗膜材料の種類と評価を示す。

評価方法については、定量的な評価方法によることが困難であったため表に示すように劣化損傷が見られず良好と思われるほうから順に◎→○→△→×→××と定性的な評価を行った。

採用された塗膜材料は、ほとんどが有機系である樹脂系塗料である。ひび割れは、コンクリートのひび割れに対する追従性を評価すべきであるがほとんどがコンクリートのひび割れに伴って割れを生じているほか塗膜の材料劣化による

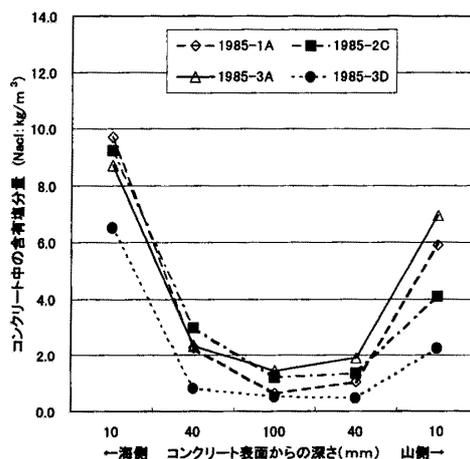


図-10 前回調査時のウェブ含有塩分量

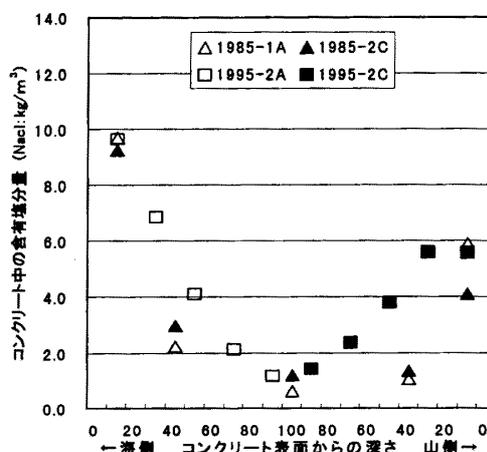


図-11 含有塩分量の変化

と見られるものもある。ひび割れの評価では、無機混合アクリル樹脂系弾性モルタルとシリコーン樹脂系が優位性を示している。これは図-6 のひび割れ発生本数との関連性からも遮塩効果の可能性を示しているとも考えられる。錆汁の発生は直接塗膜の評価となるものではないが美観上の評価について示している。ふくれ爆裂については、塗膜の基本的な耐久性について評価するものと考えられるが、ここでも無機混合アクリル樹脂系弾性モルタルのほかシリコーン系、ポリウレタン樹脂系、アクリルゴム系などの材料が特に変状などの異常を示さず良好な状態であった。1 B の桁は 5.2 のひび割れ調査では非常に少ないひび割れの発生状況であったにもかかわらず塗膜の剥離などが目立っており劣化が著しい。汚れについては、塗膜への汚れ

の付着状況を評価した。汚れの付着については比較的光沢のある材料に汚れが付着しにくく良好な結果を示しているが、これらはほとんどがひび割れを生じていた。

この結果から、塗膜表面に汚れがかなり付着して黒ずんだ状態であり美観的には良好とはいえないが、ひび割れ等の面から評価すると主桁コンクリートと同じ無機系材料を混合添加したアクリル樹脂系弾性モルタルが優位性を示していた。

5.4 はつり調査

補修に際し、劣化部を除去するため下フランジ下面のコンクリートをはつり、コンクリート内部の鋼材付近の劣化状況について観察を行った。

はつった部分のPC鋼材および鉄筋は腐食しており断面欠損を生じているが、前回の補修時に鋼材に防錆材を塗布されたところは防錆材がそのままの状態で維持されており、鋼材の腐食は抑制された状況であった。今回の再変状は前回の補修で防錆材が塗布されなかった部分がマクロセルによって腐食したものと考えられる。また、前回の補修で打ち換えが行われたモルタル部分は主桁コンクリートとの打ち継ぎ部分で容易に剥離・剥落した。これは、前回補修の打ち継ぎ部には空洞が見受けられる等もあり十分な一体化は難しいと考えられる。前回の補修では、補強筋としてステンレス製のアンカーおよびメッシュ筋を使用していたが、調査したところステンレスアンカー筋と接していた主桁鉄筋およびアンカー打ち込み部が腐食しているのが確認された。腐食程度はアンカー打ち込み部で断面欠損を生ずる程度に腐食していたほか、PC桁の鉄筋に接していた部分も腐食していた。これは、異種金属の接触により電位差が生じ腐食電流が流れたためと考えられる。

6. まとめ

塩害によって補修された橋りょうで再変状を

表-1 塗膜材料および調査結果

桁番号	塗膜分類	ひび割れ	錆汁の発生	ふくれ爆裂等	汚れ
1A	無機混合アクリル樹脂系弾性モルタル	◎	◎	◎	×
1B	特殊アクリル樹脂モノマー	×	◎	××	△
1C	特殊変性ポリエステル	××	×	×	◎
2A	エポキシ樹脂系	×	△	×	◎
2B	シリコーン樹脂系	○	○	◎	△
2C	ポリウレタン樹脂系	×	×	○	○
3A	ビニルエステル系	××	××	◎	◎
3B	シリコーン樹脂系	○	◎	○	△
3C	アクリルゴム系	△	◎	◎	△
3D	エポキシ樹脂系	×	×	○	○

生じた構造物について調査を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 3主桁および4主桁構造では海側及び山側の両外側にある桁の劣化・損傷程度が中央部に比較して損傷程度が大である。
- 2) コンクリート内部の塩化物を除去しない補修方法では再度劣化・損傷を生じる。
- 3) 遮塩対策が無い場合、コンクリート中への塩分の浸透拡散が継続し塩分物含有量が增大する。
- 4) 遮塩用塗膜は、コンクリート中への塩分の抑制効果が見られる。
- 5) 遮塩用塗膜材料では、無機材料を混合したアクリル樹脂系弾性モルタル塗膜が安定した耐久性を有した。
- 6) 異種金属を用いた補修では、鋼材腐食を誘引する可能性がある。

【参考文献】

- 1) 小林, 矢野, 高田: 海岸線付近のPC桁の補修, 構造物設計資料, No.85, PP14~17, 1986.3.
- 2) 宮本, 鳥取, 山住, 小林, 牛島: コンクリート構造の最適補修補強方法の開発, 鉄道総合技術研究所, No.Q71022-1, PP3~7, 1989.12.