

第9回 補修・補強材料（その1）

講師：藤原 保久*1・徳光 卓*2・北野 勇一*3・岡田 繁之*4

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以後、PCと略す）は、高強度のコンクリートを用い、ひび割れの発生を抑制できるため比較的耐久性に優れた構造であるといえます。PCが耐久性に優れるという意味は、鉄筋コンクリート（以後、RCと略す）に比べて劣化が顕在化するまでの時間が長いことであり、劣化をしないという意味ではないことに注意が必要です。全国の道路橋約16.9万橋のうち、PC橋は橋数で約44%、橋梁延長では約35%を占めます¹⁾。国土技術政策総合研究所の調査結果によれば²⁾、点検結果の判定区分は建設後40年を経過した橋梁のうち、速やかに補修を行う必要があるC判定の橋梁が5割以上を占めます。

さて、フルプレストレスのPCに耐荷性の低下を示す曲げひび割れが発生した場合、すでに耐荷性が大きく低下しているため、気が付いたときには手遅れとなりかねません。事後保全を前提にした場合、PCにはこのようなリスクがあるため、PC橋では潜伏期が長いことを利用した計画的な予防保全を行うことが有効です。プレストレスト・コンクリート建設業協会ではPC橋の予防保全を推進するため、平成22年に「PC構造物の維持保全」の初版を発刊し、平成27年に改訂版を発刊しています³⁾。本書にはPC構造物の維持保全の基本、維持保全計画、診断、対策事例などが紹介されています。

本講座の第9回、第10回では維持保全にかかわる技術のうち、補修・補強材料について紹介します。

2. 補修工法と材料

2.1 概要

補修とは、「構造物の耐久性を回復、もしくは向上させることを目的とした対策、ならびに材料などの劣化によって発生する器物や人的被害への影響を改善するための対策」とされています⁴⁾。

本稿では、現在使用されている主要な補修工法のうち、ひび割れ補修工法、表面被覆工法、表面含浸工法、断面修復工法、電気化学的防食工法、およびPCグラウト再注入

工法について解説します。また、これらの工法に適した材料やその選定方法についても説明します。

2.2 ひび割れ補修工法

ひび割れ補修工法は、コンクリート構造物に生じたひび割れを塞ぎ劣化因子（水分、炭酸ガス、酸素、塩分など）の侵入を防止する工法です。ひび割れ補修工法は、ひび割れの挙動とひび割れ幅に応じて補修方法とその材料が表-1のように区分されています。

表-1 ひび割れ補修工法の区分と適応材料⁵⁾

| 幅 | 0.2 mm 未満 | 0.2~1.0 mm | 1.0 mm 以上 |
|----------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 区分 | 被覆工法 | 注入工法 | 充填工法 |
| ひび割れ部の挙動 | 小 | <ul style="list-style-type: none"> エポキシ樹脂系注入材 アクリル樹脂系注入材 注入用ポリマーセメント 超微粒子セメント | <ul style="list-style-type: none"> ポリマーセメントモルタル 可とう性エポキシ樹脂 |
| | 大 | <ul style="list-style-type: none"> 塗膜弾性防水材料 | <ul style="list-style-type: none"> エポキシ樹脂系注入材(3種) アクリル樹脂系注入材 |

(1) ひび割れ被覆工法

ひび割れ被覆工法は、ひび割れ注入工法が適用できない微細なひび割れ（幅0.2mm未満）に対し、図-1に示すようにコンクリート表面を被覆し防水性や耐久性を向上さ

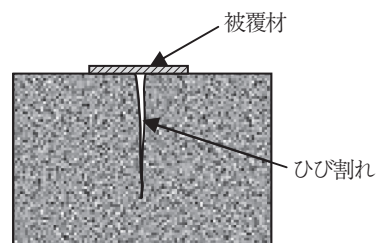


図-1 ひび割れ被覆工法概念図

*1 Yasuhisa FUJIWARA：プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会 部会長（三井住友建設(株)）

*2 Suguru TOKUMITSU：プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会 副部会長（㈱富士ビー・エス）

*3 Yuichi KITANO：プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会 副部会長（川田建設(株)）

*4 Shigeyuki OKADA：プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会（極東興和(株)）

せる工法です。ひび割れ表面を塞ぐ工法でありひび割れ内部を塞ぐことはできません。

ひび割れ被覆工法の材料には、塗膜弾性防水材やポリマーセメントペーストなどが用いられます。ひび割れ表面の補修であり、被覆材の経年劣化に対する注意が必要です。

(2) ひび割れ注入工法

ひび割れ注入工法は、図 - 2 に示すようにひび割れ内部に樹脂系あるいはセメント系の注入材を注入しひび割れを塞ぎ、防水性や耐久性を向上させる工法です。

ひび割れ注入工法の材料には有機系と無機系があります。無機系注入材には、超微粒子セメントと水を混合させたもの、あるいはこれらにポリマーエマルジョンを混合して使用するものがあります。また、亜硝酸リチウムを先行注入することで防錆やアルカリ骨材反応の抑制効果を付与することができます。無機系注入材は、躯体が湿潤状態であっても付着性がよいという特長がありますが、ひび割れ追従性に劣るのでひび割れの挙動が大きい場合には十分注意する必要があります。

有機系注入材には、エポキシ樹脂などの合成樹脂が使用されています。無機系に比べ接着性やひび割れ追従性に優れますが湿潤状態にある箇所に適用する場合は、接着不良を起こす可能性があるため湿潤面用のものを使用するなどの注意が必要です。

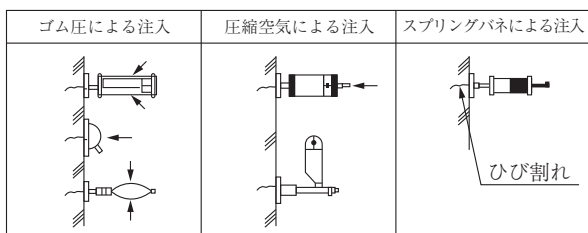


図 - 2 ひび割れ注入工法概念図⁵⁾

(3) ひび割れ充填工法

ひび割れ充填工法は、図 - 3 に示すようにひび割れに沿ってコンクリートをV字あるいはU字型にカットし補修材料を充填する工法です。ひび割れ充填工法は、カットした部分には補修材が充填されるものの、その奥のひび割れには充填されない可能性があるため、塩害環境にある鉄筋コンクリート構造物への適用には十分注意する必要があります。

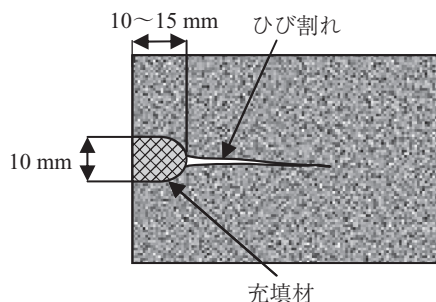


図 - 3 ひび割れ充填工法概念図

ひび割れ充填工法の材料には、ひび割れの挙動が大きい場合、シーリング材（ウレタンおよびシリコン樹脂など）や可とう性エポキシ樹脂など追従性のよいものが用いられます。ひび割れの挙動が小さい場合は、ポリマーセメントモルタルが用いられます。

2.3 表面被覆工法

表面被覆工法は、コンクリートの表面に塗膜を形成し劣化因子の侵入を防止して構造物の耐久性の向上または劣化の進行を抑制する工法です。また、表面被覆工法のなかにはコンクリート片の剥落を防止する機能を持たせた被覆材（連続繊維シート含む）を塗布する剥落防止工法があります。表面被覆工法の概念図を図 - 4 に、施工状況を写真 - 1 にそれぞれ示します。

表面被覆工法の材料は、無機系および有機系被覆材に分類されます。無機系被覆材は、セメント系材料を主成分としており紫外線劣化に対する抵抗性や耐候性および透湿性（水蒸気透過性）に優れるという特長があります。また中塗り材に有機溶剤を用いないことから環境負荷の低減を図ることができます。有機系被覆材は、合成樹脂材料を主成分としており被覆が緻密で劣化因子の遮断性に優れるという特長があります。また一般的に耐薬品性が高く下水道施設における硫酸劣化対策としても用いられています⁶⁾。

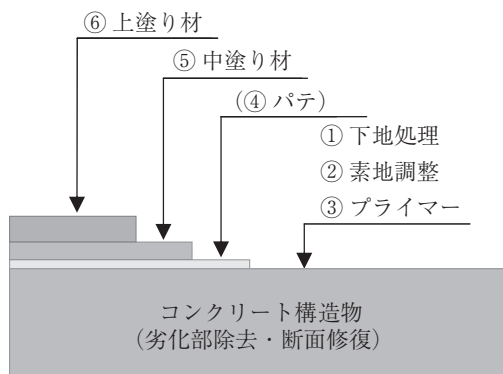


図 - 4 表面被覆工法の概念図



写真 - 1 表面被覆工法の施工状況

2.4 表面含浸工法

表面含浸工法は、表面含浸材をコンクリート表面から含浸させコンクリート表層部の組織を改質し、劣化因子のコンクリート内部への侵入抑制、あるいはコンクリート表面強度を回復または向上させコンクリート構造物の耐久性を確保するものです。表面含浸材の多くは無色透明でコンク

リートの外観を損ねることがなく経過観測が可能です。また、表面被覆工法よりも少ない工程で短期間に施工できます。

表面含浸材は、目的に応じてさまざまなものが開発されており、その主な成分から図 - 5 に示すように、シラン系、けい酸リチウム系とけい酸ナトリウム系からなるけい酸塩系およびその他に分類できます。以下この分類にしたがって解説します。

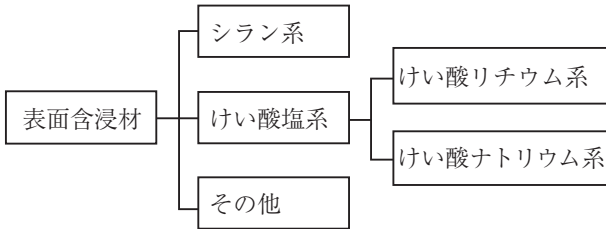


図 - 5 表面含浸材の分類⁷⁾

(1) シラン系表面含浸材

シラン系表面含浸材は、シランモノマー、シランオリゴマーまたはこれらの混合物を主成分とするもので、「浸透性吸水防止材」と称されています。コンクリート表層部に含浸させることにより吸水防止層を形成し、外部からの水や塩化物イオンの侵入を抑制することでコンクリートの耐久性を向上させます。

(2) けい酸塩系表面含浸材

けい酸塩系表面含浸材は、けい酸リチウム系とけい酸ナトリウム系に分類されます。

けい酸リチウム系には、「浸透性固化材」や「浸透性アルカリ付与材」があり、これらをコンクリート表層部に含浸させることにより、弱いコンクリート表層部を固化させたり、中性化したコンクリート表層部にアルカリ性を付与して鉄筋の腐食環境を改善することができます。

けい酸ナトリウム系表面含浸材には、「浸透性固化材」や「浸透性防水材」あるいは「コンクリート改質材」があります。これらをコンクリート表層部に含浸させると、コンクリート内部の水酸化カルシウムと反応してけい酸カル

シウム水和物を生成し、表層部の微細なひび割れや空隙を充填して緻密化することができます。コンクリート表層部の緻密化により水や炭酸ガスなどの劣化因子の侵入を抑制しコンクリートの耐久性を向上させることができます。

(3) その他の表面含浸材

上記以外の含浸材として、亜硝酸カルシウム、亜硝酸リチウムおよび亜硝酸ナトリウム等の亜硝酸塩系化合物を主材とした塗布型防錆材があります。これらをコンクリート表層部に塗布含浸させ、亜硝酸イオンを鉄筋位置まで到達させることで防錆効果を得ることができます。また、亜硝酸リチウムはリチウムイオンの働きによりアルカリ骨材反応を抑制する効果があるのでアルカリ骨材反応対策としても用いられています。

2.5 断面修復工法

断面修復工法は、コンクリート構造物の耐久性の向上、劣化の抑制または補修を目的として、既設コンクリート構造物の変状が顕在化した部分、塩化物イオンなどの劣化要因が許容限度を超えて残存している部分を除去したのちに、断面修復材を用いてその当初の性能および形状寸法に戻すために用いられる工法です。断面修復材はモルタル系、コンクリート系、樹脂系に大別され、要求性能や施工条件に応じて適切な材料を選定します^{7, 8)}。

モルタル系断面修復材は多様な施工条件に応じて左官工法、充填工法、吹付け工法による施工が可能であり(表 - 2)、かつ、所要の性能が得られるプレミックス材料が市販されていることから、既設コンクリート構造物の補修工事に広く利用されています。とくに、モルタル系断面修復材の一種であるポリマーセメントモルタルは付着強度が大きく乾燥収縮量が小さいことから、断面修復部のひび割れや剥離が生じにくいという特長があります。

コンクリート系断面修復材は、型枠内に粗骨材を詰めたのちにモルタルを注入するプレパックドコンクリートとして、従来より大断面を修復する場合の充填工法に用いられます。とりわけ、既存コンクリートを断面修復したのちに外ケーブル補強する場合は、断面修復材の弾塑性変形の大小が追加プレストレスの減少に影響を及ぼすことから、静

表 - 2 断面修復に用いる工法の特徴⁸⁾

| | 左官工法 | 充填工法 | 吹付け工法 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 概要 | 断面修復材を現地で練り混ぜ、左官コテを用いて施工する。断面修復材には、補修箇所に応じて適度な流動性や粘性が求められる。 | 補修範囲の形状に合わせて型枠を組み、ポンプを用い断面修復材を注入口より充填する。断面修復材には、高い流動性などが求められる。 | 断面修復材を圧縮空気により吹付けて施工する。断面修復材には、適切な作業時間が確保できる凝結特性などが求められる。 |
| 施工状況 |  |  |  |
| 備考 | 小規模(修復面積 10 m ² 以下)の断面修復に適する。 | 小～大規模の断面修復に適する。 | 大規模(修復面積 10 m ² 以上)の断面修復に適する。 |

※文献 8) に加筆

弾性係数が大きくクリープ・収縮ひずみが小さいコンクリート系断面修復材の採用を検討する必要があります。ただし、PC部材の下面のように鋼材が密な箇所ではプレバッキングコンクリートの適用が難しいため、近年、自己充填性に優れ、低収縮かつ既存コンクリートとの付着が良好である高流動コンクリートも開発されています⁹⁾。

樹脂系断面修復材は、エポキシ樹脂などの液状樹脂と骨材を練混ぜたものが使用されています。この材料は、静弾性係数や線膨張係数などの物性がコンクリートと大きく異なるとともに、電気絶縁性が高く電気防食工法や脱塩工法との併用が困難となるため、適用にあたっては注意を要します。

なお、以下のようなケースでは他工法との併用もしくは断面修復工法以外の対策に変更することを検討します。

- 1) 多量の塩化物イオンが侵入し、十分な断面はつりが行えない場合（マクロセル腐食を抑制するための電気防食工法や脱塩工法との併用を検討する）
- 2) PC鋼材の腐食や破断により構造物の耐荷力が低下している場合（たとえば、プレストレス導入工法との併用を検討する）
- 3) はつりが耐荷性能に及ぼす影響が大きい場合（一度に大断面をはつらないように補修範囲を見直すか、あらかじめ補強し耐荷性能を確保することを検討する）
- 4) 補修後も塩分の供給があり、断面修復のみでは鋼材保護性能が確保できない場合（たとえば、表面被覆工法との併用を検討する）

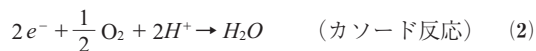
2.6 電気化学的防食工法

電気防食工法や脱塩工法などは総称して電気化学的防食工法と呼ばれます。これらの工法は塩害対策として有効な工法ですが、これを理解するには塩害のメカニズムを理解する必要があります。健全なコンクリートのpHは12.5～14に保たれており、コンクリートに接する鉄筋やPC鋼材などの鋼材の表面には不動態被膜と呼ばれる薄く緻密な酸化被膜が生じます。不動態被膜は錆の一種ですが、成長がきわめて遅いため、鋼材は事実上良好な防食状態に置かれます。

一方、塩化物イオンなどは不動態被膜破壊アニオンと呼ばれ、不動態被膜を局部的に破壊する作用があります。被膜の破壊機構については不明な点もありますが、鋼材をとり巻く環境溶液中の水酸化物イオンに対する塩化物イオン

のモル比が一定の閾値を超えたときに連続的な腐食を生じることが知られています。鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度はこの閾値に相当します。

鉄の腐食は下記の化学式(1)・(2)で表わされます。



鋼材の腐食を防止するには上式の化学反応を止めればよく、「不動態被膜破壊アニオンの除去」とともに、「鉄のイオン化の防止」「酸素や水素等の酸化剤の供給の防止」が有効であることがわかります。

2.6.1 電気防食工法

電気防食工法は鉄のイオン化を防止することで腐食の発生を防ぐ防食工法です。電気防食工法は一般にカソード防食と呼ばれる方法が用いられます。この方法では鉄がイオン化しない電位（アノード平衡電位）以下となるよう5～20 mA/m²程度の防食電流を供給します。電気防食工法には流電陽極方式と外部電源方式の二通りがあり、用いられる機材や材料が異なります。

(1) 流電陽極方式

流電陽極方式の電気防食は鋼材よりも卑な金属（イオン化傾向が大きな金属）を電気的に接続し、これを腐食させて防食電流を流す方法で、この金属を流電陽極あるいは犠牲陽極と呼びます。流電陽極には単位重量あたりの電気発生量が大きく溶解が均一な、亜鉛、マグネシウム、アルミニウムなどの金属あるいは合金が用いられます。

流電陽極の設置方法には、コンクリートの外部に配置する方法と、コンクリートの内部に配置する方法の二とおりがあります。前者の施工例を写真-2に示します。この現場は塩害で劣化したPC桁を断面修復したあと、アノードの接地抵抗を下げ流電陽極の溶解を容易にするバックフィル材を介して亜鉛シートを貼り付けています。最近、亜鉛に代わりアルミニウム合金製のものも登場しています。また、流電陽極材にはパネルではなく、亜鉛・アルミニウム擬合金をコンクリート表面に溶射する方法も用いられています。

後者の施工例を写真-3に示します。この材料は特殊モルタルの中に流電陽極として亜鉛が埋め込まれており、断面修復のはつりを行ったあと、鋼材に結束します。現在、



写真 - 2 外部配置式の流電陽極の施工例

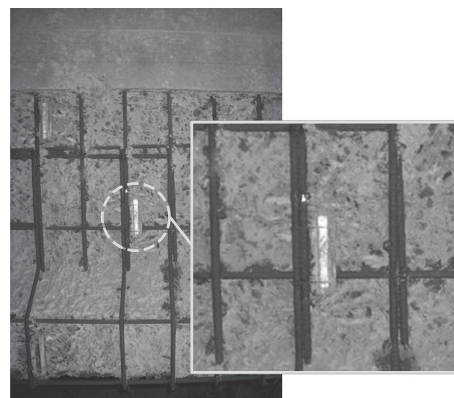


写真 - 3 埋込型の流電陽極の施工例

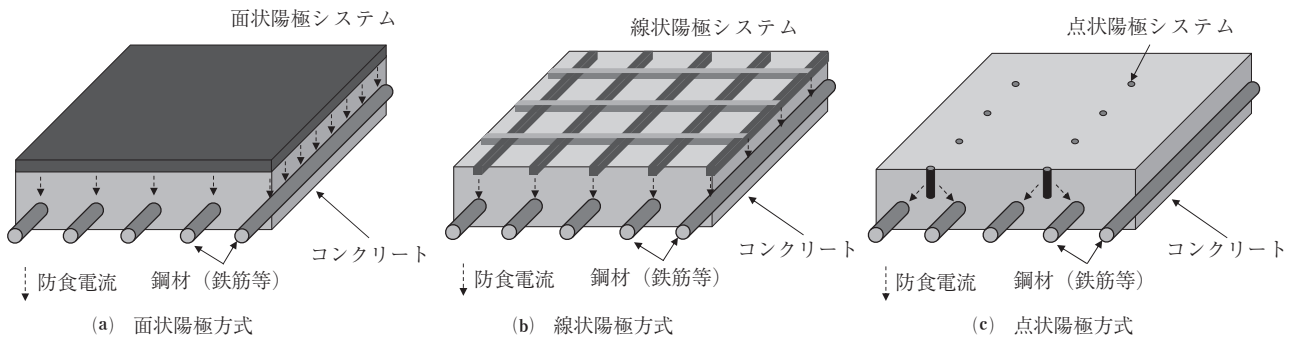


図 - 6 外部電源方式の陽極システムの種類

埋込み型の流電陽極は、マクロセル腐食の防止から全体的な腐食防止まで、目的に応じた製品が市販されています。

(2) 外部電源方式

外部電源方式の電気防食は商用電力を用いて、鋼材に防食電流を流す方法です。この方法では内部の鋼材を陰極とし、外部に設置した陽極材との間に直流電流を流します。外部電源方式の場合の陽極材には、電食を防止するためチタンに貴金属系酸化物をコーティングした材料やバックフィル材にカーボンを用いた材料など、電食に強い材料が用いられますが、耐用年数は電流密度によって変わります。

外部電源方式の電気防食は陽極システムの形状によって、大きく面状陽極方式、線状陽極方式、点状陽極方式の3種類に分類されます(図-6)。面状陽極方式の陽極材には網目状の材料や溶射した金属、導電性塗料・モルタルなどが、線状陽極方式の陽極材には棒状や細板状の材料が、点状陽極方式の陽極材には短尺の棒状の材料が使用されます。

外部電源方式の電気防食では、通電を安定的に維持するため直流電源装置や配線配管材料、照合電極などの装置と材料が必要になります。これらの装置と材料は厳しい腐食環境に置かれるため、装置と材料の腐食に対する耐久性が必要となります。電源装置に用いるコンデンサー等の電気部品は10~20年程度での交換や、設備の更新が必要となります。また、事後保全の場合には、断面修復材やひび割れ補修材なども必要です。断面修復やひび割れ補修を行う場合には、安定的な通電を確保するため、電気抵抗が高すぎない材料のなかから性能を満足する材料を選定します。

2.6.2 脱塩工法

脱塩工法は不動態被膜破壊アニオンである塩化物イオンを除去することで鋼材の防食性を確保する工法です。脱塩工法は電気防食工法と同様にコンクリートの外部に陽極材を配置し、内部を陰極として直流電流を通電します。脱塩ではコンクリート内部の塩分を排出するため、電気防食に比べて50~200倍大きな1 A/m²程度の直流電流を用い、施工後は通電が不要なため陽極を仮設材とする点が電気防食と異なります。また、PC構造物に対してはPC鋼材の水素脆化を防止するため間欠通電を行います。仮設陽極には白金等の貴金属がコーティングされたチタンメッシュを用います。

仮設陽極は電解質溶液槽内に配置します。電解質溶液槽は溶液の保持方法により、ファイバー法とパネル法に大別

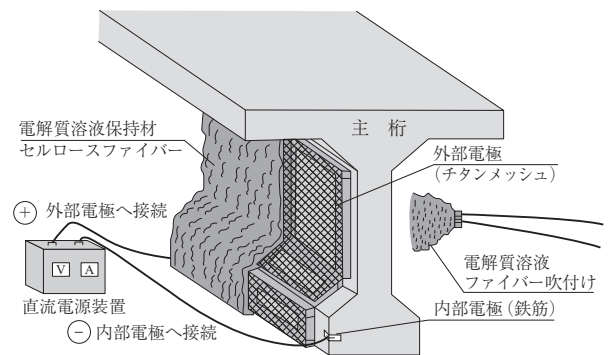


図 - 7 ファイバー法の模式図

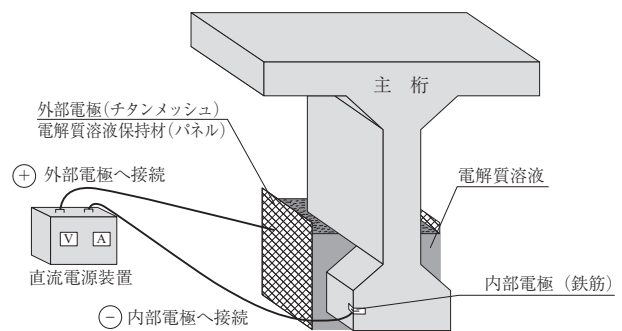


図 - 8 パネル法の模式図

されます。図-7にファイバー法、図-8にパネル法の模式図を示します。ファイバー法はコンクリート表面にセルロースファイバーを吹き付けて、紙粘土状の電解質溶液槽を形成する方法です。パネル法はコンクリート外面に電解質溶液を保持するための水槽を設ける方法です。水槽は漏電などによる影響を避けるためプラスチック製などの電気を通さない材質のものを使用します。ファイバー法においても脱塩量の推移を管理するため部分的にパネル法を用います。

脱塩によって抜き出された塩化物イオンは塩酸となり、電解質溶液のpHを低下させ、コンクリートの酸荒れを引き起こしますので、電解質溶液には高アルカリ性のホウ酸リチウムやホウ酸カリウム等の水溶液を用います。脱塩では施工中のみ通電するため、電流の供給は定電流直流電源装置を用います。脱塩においても、施工後の鋼材電位を計

表 - 3 PC グラウトの流動性別タイプ¹¹⁾

| タイプ | JP 漏斗試験による 流下時間の目安 (秒) |
|-------|---------------------------|
| 高粘性型 | 14 以上 |
| 低粘性型 | 6 ~ 14 |
| 超低粘性型 | 3.5 ~ 6 |

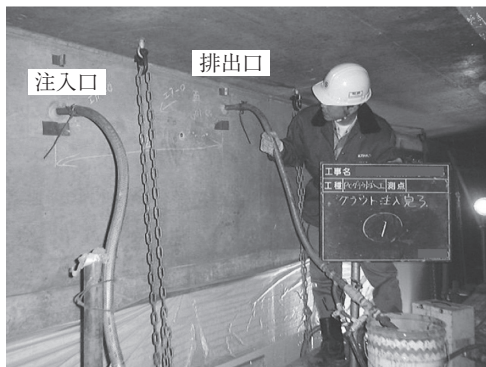


写真 - 4 PC グラウト注入作業状況 (2 穴式)

測するため、電気防食工法の場合と同様な照合電極を設置します。断面修復材などは電気防食工法と同様に電気抵抗が大きすぎない材料のなかから選定します。

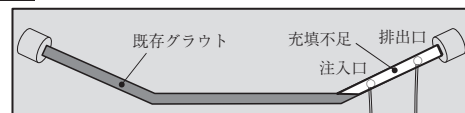
2.7 PC グラウト再注入工法

本工法は、既設 PC 構造物における PC グラウト充填不足の箇所に PC グラウトを再注入し、PC 鋼材の腐食防止と付着一体性の確保を図る補修工法です。本工法に用いる材料は充填性、防錆効果および施工性を考慮して選定します。上記の要求性能を満たす材料としては、非膨張かつノンブリーディング型のセメント系 PC グラウトが一般に用いられます¹⁰⁾。とりわけ、シース径も空隙率も小さい場合は、高粘性型の PC グラウトを使用すると注入圧が過大になる可能性があるため、粘性の低いタイプの PC グラウトを選定します (表 - 3)。また、再注入する材料は、施工条件や注入方法を考慮して選定する必要があります。

たとえば、PC グラウトの注入・排出口は、一つの充填不足区間にそれぞれ一箇所ずつつける 2 穴式が一般的ですが (写真 - 4、図 - 9)、構造上の制約により排出口が設けられない場合は注入口と排出口を兼用する 1 穴式を用います。一方、充填不足区間がケーブル全長にわたるなどの場合は、注入口をケーブルの最下部付近に設け、排出口はできるだけ上側に設ける 3 穴式が採用されます。いずれのケースも、PC グラウトの再注入方法は PC グラウトの充填性確保の観点から、グラウトポンプと真空ポンプを併用することが基本になります。シース内の空隙率が大きく、シース内に異物の混入がないなど、減圧なしで充填可能と判断できる場合や、充填不足区間が短い場合はグラウトポンプ単独あるいは自然流下方式が適用されることがあります。

さらに、既存グラウト部に高濃度な塩化物イオンの含有が確認された場合は、再注入された PC グラウトと既存グラウトとの境界部でマクロセル腐食が生じるおそれがあることから、このような再劣化を防止する適切な材料を選定する必要があります。いずれにしても、PC グラウトの再

2 穴式



1 穴式



3 穴式

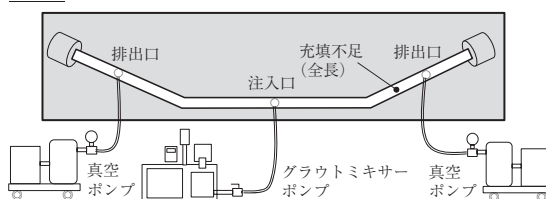


図 - 9 PC グラウト再注入方式 (グラウトポンプと真空ポンプを併用する場合)

注入に用いる材料は、新設における PC グラウトの保有すべき性能と同等の性能を有する材料であることを確認する必要があります。

3. おわりに

第 9 回の講座では補修材料について説明しました。補修材料の要求性能は施工条件や環境条件によっても変わってきますので、適切な材料選定をするよう心掛けてください。本講座が皆様のお役に立てば幸いです。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報 (平成 28 年度) 表 52
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成 25 年度道路構造物に関する基本データ集、国総研資料第 822 号、2015 年 1 月
- 3) 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 - PC 橋の更なる予防全に向けて - [2015 年版]、平成 27 年 3 月
- 4) プレストレストコンクリート工学会：コンクリート構造診断技術、2017.4
- 5) 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針、2013
- 6) セメント協会：セメント系補修・補強材料の基礎知識、第 2 版、2011.8
- 7) 土木学会：表面保護工法設計施工指針 (案)、2005.4
- 8) 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
- 9) 谷口秀明、渡辺博志、竹中秀樹、三加崇：PC 橋の改造技術に関する研究 - その 4：大規模な断面修復の材料および施工に関する検討 -、プレストレストコンクリート Vol.50, No.2, pp.92-100, 2008.3
- 10) プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針、2016.9
- 11) プレストレストコンクリート工学会：PC グラウトの設計施工指針 - 改訂版 -、II - 23, 平成 24 年 12 月

[2017 年 10 月 30 日受付]