

13.3 コンクリート構造物の長寿命化に向けた補修対策技術の確立

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：材料資源研究グループ（基礎材料、新材料チーム）
寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

研究担当者：渡辺博志、西崎到、田口史雄、島多昭典、片平博、佐々木巖、櫻庭浩樹、三原慎弘、内藤 勲、吉田行、遠藤裕丈、野々村佳哲、水田真紀、川村浩二、数馬田貢、渡邊尚弘、村中智幸、渡辺淳、鈴木哲

【要旨】 コンクリート構造物の長寿命化の実現には補修対策の確立が重要である。コンクリートの補修材策には主に表面被覆、断面修復、および、ひび割れ補修などがあり、これらを3チームで分担して研究を行っている。25年度は補修全体の共通認識として、要求性能に基づく各種補修工法の選定方法について整理した。また、不具合事例を調査しその原因を考察し整理した。断面修復工法に関しては、母材の表面粗さと付着強度の関係および断面修復材の耐久性に関して検討した。表面被覆工法に関しては、低温や高温条件等の施工環境による不具合発生の原因と、その抑制のための施工管理について検討した。ひび割れ修復工法に関しては、注入工法の低温環境における注入充填性や凍結融解後の遮塩性、および充填工法の凍結融解後の付着性能に関して検討した。

キーワード：コンクリート、補修、再劣化、表面被覆、断面補修、ひび割れ注入

1. はじめに

今後大幅に増加する高齢化したコンクリート構造物を安心して利用するには、適切な補修等によるコンクリート構造物の長寿命化技術が必要不可欠である。補修対策技術には、様々な補修材料や補修工法が存在するものの、的確な補修効果が担保されていないなど、未だ十分に確立していないのが現状である。

本研究課題は、補修技術の妥当性を検証する標準的な考え方（補修メカニズムとこれに基づく要求性能、性能評価方法など）を検討し、コンクリート補修に関わる体系化されたマニュアルとして取り纏めるものである。また、補修には断面修復、表面保護、ひび割れ修復など様々な工法がある。これらをコンクリートに関連する3チームで分担し、かつ、横断的に連携しながら総合的補修技術の体系化を目指すものである。

25年度は補修全体の共通認識として、要求性能に基づく各種補修工法の選定方法について整理し、また、不具合事例を調査した。断面修復工法に関しては、母材の表面粗さと付着強度の関係および断面修復材の耐久性に関して検討した。表面被覆工法に関しては、低温や高温条件等の施工環境による不具合発生の原因と、その抑制のための施工管理に関して検討した。ひび割れ修復工法に関しては、注入工法の低温環境における注入充填性や凍結融解後の遮塩性、および充填工法の凍結融解後の付着

性能に関して検討した。

2. 要求性能に基づく補修工法の選定方法

コンクリート構造物の補修を考える場合は図-1.1に示すような流れとなり、補修に対する要求性能を設定したうえで、対策工法の選定を行うことが原則となる。

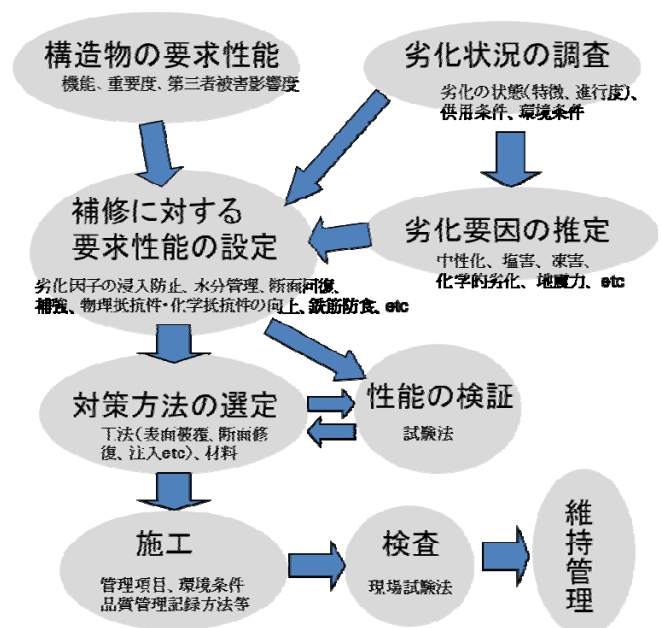


図-1.1 補修工法検討の流れ

⑬-3 コンクリート構造物の長寿命化に向けた補修対策技術の確立

表-1.1 ISO(案)での要求性能と対策の例

No	要求性能	対策の例
1	劣化因子の浸透防止	1.1 撥水系含浸材 1.2 含浸材 1.3 表面被覆 1.4 ひび割れの表面被覆 1.5 ひび割れ注入 1.6 ひび割れのジョイントへの導入 1.7 外部パネルの設置 1.8 メンブレンの適用
2	水分コントロール	2.1 撥水系含浸材 2.2 含浸材 2.3 表面被覆 2.4 外部パネルの設置 2.5 電気化学的処理
3	断面の回復	3.1 パッチング 3.2 モルタル、コンクリートの打ち込み 3.3 吹き付け 3.4 部材の取り替え
4	構造的補強	4.1 補強鋼材の追加 4.2 アンカー 4.3 鋼板接着補強 4.4 増し打ち 4.5 クラック注入、内部空洞注入 4.6 クラック充填、空洞充填 4.7 プレストレスの導入、FRP
5	力学的抵抗性の向上	5.1 被覆あるいはメンブレン 5.2 表面含浸材 5.3 増厚
6	耐化学薬品抵抗性	6.1 被覆 6.2 表面含浸材 6.3 増厚
7	不動態皮膜の保護、回復	7.1 増厚、塗装 7.2 コンクリートの取り替え 7.3 電気化学的再アルカリ化 7.4 再アルカリ化(浸透性) 7.5 電気化学的脱塩 7.6 メンブレン
8	電気抵抗の増加	8.1 撥水系含浸材 8.2 含浸材 8.3 表面被覆
9	カソード抑制	9.1 飽水もしくは表面被覆による酸素供給量の抑制
10	カソード防食	10.1 防食電流の印加による防食電位の維持
11	アノード領域の抑制	11.1 鉄筋の表面被覆 11.2 鉄筋の表面保護 11.3 防錆剤の適用 11.4 犠牲陽極の設置

表-1.2 劣化要因、劣化レベルに応じた要求性能の概要と主な補修方法の例

()の数値は対応するISO(案)の要求性能No.

劣化状態	変状無し			表面的な劣化			骨材の露出や剥落			かぶりコン剥落、鉄筋露出・腐食					
	劣化現象	要求性能	補修方法例	劣化現象	要求性能	補修方法例	劣化現象	要求性能	補修方法例	劣化現象	要求性能	補修方法例			
凍害	なし	水分の遮断(1)	止水、排水	表面的なスケーリング、微細ひび割れ、ポツアクト	水分の遮断(1)	止水、排水	スケーリング、ひび割れ、ポツアクト	水分の遮断(1)	止水、排水	剥落	断面の回復(3)	断面修復			
			表面被覆			撥水剤			表面被覆材				剥落防止	断面の回復(3)	断面修復
			断面修復			表面被覆材			ひび割れ注入				剥落防止	断面の回復(3)	断面修復
			脱塩			断面修復 (ポツアクト部)			剥落防止				断面の回復(3)	断面修復	

劣化状態	変状なし(塩分量が発錆限界以下)			変状無し(鉄筋腐食が始まる)			ひび割れや浮き、錆汁			耐力値低下が懸念される劣化				
	劣化現象	要求性能	補修方法例	劣化現象	要求性能	補修方法例	劣化現象	要求性能	補修方法例	劣化現象	要求性能	補修方法例		
塩害	なし(塩分量閾値以下)	水分、塩分の遮断(1,2)	止水、排水	鉄筋腐食開始	水分、塩分の遮断(1,2)	止水、排水	鉄筋腐食、ひび割れ発生	水分、塩分の遮断(1,2)	止水、排水	鉄筋腐食、ひび割れ進展	水分、塩分の遮断(1,2)	止水、排水		
			撥水剤			撥水剤			表面被覆			剥落防止	断面の回復(3)	断面修復
			表面被覆			表面被覆			ひび割れ注入			剥落防止	断面の回復(3)	断面修復
			断面修復			断面修復			剥落防止			断面の回復(3)	断面修復	

劣化状態	膨張はあるが、ひび割れ無し			ひび割れ発生			ひび割れ進展			ひび割れ増大、耐力低下が懸念される劣化				
	劣化現象	要求性能	補修方法例	劣化現象	要求性能	補修方法例	劣化現象	要求性能	補修方法例	劣化現象	要求性能	補修方法例		
ASR	膨張のみ	水分の遮断(1)	止水、排水	ひび割れ発生	水分の遮断(1)	止水、排水	ひび割れ進展	水分の遮断(1)	止水、排水	ひび割れ増大	水分の遮断(1)	止水、排水		
			撥水剤			撥水剤			表面被覆*			剥落防止	断面の回復(3)	断面修復
			表面被覆			表面被覆			ひび割れ被覆・充填*			剥落防止	断面の回復(3)	断面修復
			断面修復			断面修復			ひび割れ注入			剥落防止	断面の回復(3)	断面修復

なお、このような要求性能の考え方に基づく補修の設計方法は現在策定中の国際規格でも採用されている表-1.1 に、コンクリート構造物の維持管理、補修補強にかかる ISO 規格(案)、ISO 16311 Maintenance and repair of concrete structures (コンクリート構造物の維持管理

と補修)の補修に対する要求性能の分類を示す。表-1.1 によると、補修に求める性能が非常に原的に分類されている反面、補修対象となる構造物の劣化原因や劣化の程度と結びつけられていないため、このままでは現場への適用が難しいものとなっている。

25年度は、表-1.1に基づきつつ、想定される劣化機構ならびに劣化程度と、それに応じて選択される補修原理と要求性能の関連付けを行うこととした。具体的には、劣化の種類（要因）として比較的報告例の多い凍害、塩害、アルカリ骨材反応（ASR）を挙げ、それぞれの劣化要因毎に劣化のグレーディングを4段階に設定して、それぞれの外観変状に応じて、補修に求める要求性能の概要とその一般的な対策工法の例について整理した。なお、表-1.1のNo.9～11は「鉄筋防食」として統合し、また、「剥落防止」と「鉄筋の回復」を追加した。この結果を表-1.2に示す。このように要求性能と補修方法を関連づけることで、誤った補修工法選定のリスクが軽減できるものとする。

表-1.2中の最左段は、劣化の兆候としてはほとんど認められない状況であり、予防保全的な位置づけである。この段階では、劣化因子である水や塩の遮断が主な対策となる。なお、水分の遮断は、凍害・塩害・ASRいずれに対しても効果的ではあるが、水分による劣化メカニズムは異なっている。例えば、凍害であれば、水分が凍結し、その膨張圧ならびに水部移動に伴う水圧の発生によって劣化がもたらされるが、塩害では水分の存在はカソード反応やアノード反応に寄与するものである。ASRではアルカリシリカゲルの生成ならびに水分による膨張が水分の寄与となる。このため、水分の遮断をどの程度行えば効果が得られるかについては、劣化機構毎に異なる。すなわち、コンクリート中への水分遮断という方向性は同じであるが要求レベルは、劣化機構毎さらには劣化状況に応じて異なるものである。

劣化の進行に応じて補修に求められる要求性能が変化し、それに応じた対策工法を選定することとなる。

劣化の要因ごとに、主な特徴と留意点を述べる。

(1) 凍害

凍害は主に水の凍結融解の繰返し作用によって発生することから、予防保全としては、コンクリート表面に滞水が生じないように、水回りを検討し、排水処理を行うことが第一に重要である。

凍害はコンクリート表面から深部に向かって徐々に進行することから、劣化の初期では表面被覆等の表面的な対策となる。ただし、表面を覆っても劣化を完全に止めることは難しい場合が多く、やがて、ポップアウトやスケーリング等の劣化が進行する。この段階の補修でも、水分の浸透を抑えることが主な要求性能となる。また、断面欠損部や脆弱部分については、はつり取っての断面修復、はく落危険箇所へはアンカー等の対処が必要となる。さらに劣化が進行し、鉄筋腐食やコンクリート断面

の欠損等が顕著になると、構造体の機能を保持するために鉄筋交換や耐力回復のための各種対策が必要となる。

(2) 塩害

塩害は、コンクリート中に侵入した塩化物イオンによってコンクリート中の鉄筋が腐食し、さらにその腐食による膨張圧によってコンクリートにもひび割れ等の劣化が生じる現象である。他の劣化要因に比較して劣化の進行が早く、また、鉄筋の腐食が始まると、補修を行っても劣化の進行を抑えることが困難な場合が多い。その一方で、表-1.2に示すように劣化の初期段階では外観に変状が現れにくいので、塩害環境にある構造物では特に注意深い点検が必要となる。

劣化の初期段階、あるいは予防保全としては、劣化因子である塩と水を遮断する対策がとられる。また、電気防食が行われる場合もある。さらに、塩分の浸透が明確な場合には浸透した塩分を除去して、塩分によって損傷した鋼材の不動態被膜を回復させるか、もしくは電位制御により腐食の進行を防止させる方法を採用することとなる。

また、はく落防止の目的でアンカーや巻立て工法が用いられる。劣化がさらに進行すると、構造体の機能を保持するために鉄筋交換や耐力回復のための各種対策が必要となる。

(3) ASR

ある種のシリカ鉱物もしくはガラス質物質を含む骨材は、コンクリート中の高いアルカリ水溶液と反応して、膨張性のゲルを発生し、このゲルの膨張圧によってコンクリートにひび割れが発生する現象である。凍害や塩害と異なり、劣化が確認されても、その劣化が必ずしも加速していくとは限らず、次第に劣化速度が収束する場合もある。

ASRの反応はアルカリ、シリカ、水の3要素によって生じるので、対策としてはコンクリート中への水分の遮断が主となる。また、ひび割れが進展した場合には鉄筋への劣化因子（水、塩）の侵入防止の目的からひび割れ注入、充てん等が行われ、また、はく落防止のためにアンカーや巻立て工法が用いられる。劣化がさらに進行すると、鉄筋曲げ加工部において破断が生じる例も認められる。表中ではそのような場合も想定して鉄筋の回復を含めている。

3. 不具合事例の調査

コンクリートの補修対策には表面被覆、断面修復、およびひび割れ補修などがある。これらの工法はコンクリート構造物の主要な補修対策として古くから実施されており、国内の各機関が要求性能や品質規格等を提案している。しかしながら、期待した性能が発揮されず、早期に再劣化する事例も見られる。これは現場条件をあまり考慮していない工法選定や施工不備等に起因したものと考えられる。ところが、補修工事には統一した工法選定基準があるわけではなく、また環境に応じた適用条件や他の補修工法との使い分けなども定まっていらない状況である。

その背景として、補修工事は新設工事とは大きく異なり、標準化がなじみにくいことが挙げられる。典型的な損傷事例ごとに定石とも言うべき標準形としての対策工法はあるとしても、正解は一つではなく、具体的な対応策には非常に幅広い選択肢が存在する。補修対象構造物の置かれた状況や履歴、将来の管理計画がそれぞれ異なるほか、使用された材料の品質や当初施工の不備等の不確定要素が多数存在し、同じ症例であっても案件によりとるべき対応策が全く異なることも少なくない。

また、指針類や施工要領資料等には、品質を確実に保証するための理想的な処置が原則論として書かれている。しかしながら、工事現場では、例えば表面被覆材の塗布面を完全に乾かしてから施工するなどといった施工条件をいつでも必ず実現できるわけではない。

一方で、早期再劣化につながる“すべきでない”事項は現場状況によらず共通していることが多い。たとえば、塩化物が高濃度に浸透したコンクリートを表面被覆した等の対応は案件によらず原則として誤りであり、これらに留意した工法設計と材料選定の考え方が体系的に盛り込まれた照査システムが構築されれば、全体の不具合発生率を低下させることにつながるものといえる。

本研究課題では、そのような背景のもと、設計施工の信頼性の向上と不具合発生を抑止をはかるために、失敗例から学んだ教訓を類型化して整理したうえで、これらを共有することにより補修の信頼性の向上を目指すこととした。具体的には、補修後に再劣化が生じている不具合事例を調査し、劣化状況、存置環境、工法選択理由、施工方法等から不具合原因を推測して、改善策を取り纏めた不具合事例集の作成を行った。

不具合事例は一般に公表されにくい、具体的な物件を紹介するのではなく、劣化機構や避けるべき行為を明示することに留意し、事例収集および技術資料としてとりまとめを行った。そのなかから、図-3.1 にその一例を

示す。作成方針として、構造物中の水等の劣化因子の移動経路、塩化物の蓄積状況などの劣化機構に直接影響するの必要に応じて単純化したイラストを活用し、不具合の理由を判りやすく見せつつ分類解説している。

事例Ⅰ 橋梁：直轄国道（本線主桁）	
構造物諸元： PC5径間単純ボス TENT 工橋、1960年代建設、17年後（1回目）補修、34年後（2回目）補修	
補修工法： 断面修復（ポリマーセメント）、表面被覆（有機系）	
不具合の概要： 塩害劣化したRC桁を断面修復ならびに表面被覆（有機系）したが、断面修復箇所の下側境界付近を中心に、表面被覆材に多数のふくれが生じた。	
不具合箇所と発生状況： ・日本海沿岸の河口に位置する中央径間PC桁の海側最外面（北北西面） ・ウェブ断面修復箇所とその外周（1回目補修で厚膜弾性エポ系、2回目では上塗りのみを塗り重ね） ・断面修復箇所下端からの漏水、断面修復部の外周に密着した表面被覆のふくれ（内部には液体）	
	 <p>桁の切断面（断面修復部が見える）</p>
 <p>密着した膨れ</p>	 <p>断面修復部と現状コンクリートの境界に沿って、ひび割れ・漏水跡。その延長上に密着した膨れが発生。</p>
劣化因子（想定）： 水（内部浸透水：被覆されていない地覆部からの浸透、舗装や継目部分からの浸入） → コンクリート中（主に打ち継ぎ界面）の浸透水の流れと、表面被覆膜裏面での滞留付着不良塗膜 → 施工時の表面水分による接着不良 日射等の温度上昇による被覆内部滞留水のブリストリングで塗膜の接着が破壊	
再劣化機構の模式図：  <p>被覆されていない地覆部や舗装端部等から浸透した塩化物を含む水分が、側面と下面を被覆された桁内に浸透滞留した。特に、主桁ひび割れや断面修復背面の肌すき等を伝った水分が、断面修復箇所下部等を中心に集中し、多数のふくれを生じさせたと考えられる。</p>	
考える（とるべきであった）対策： ・***** ・*****	
その他：	

図-3.1 不具合事例集の作成イメージ

4. 断面修復工法に関する研究報告

4.1 概要

断面修復工法はコンクリート構造物の補修工法の一つとして古くから実施されているが、要求性能や評価試験方法に関して、国内において統一した基準が確立するには至っていない。そこで断面修復工法に必要な要求性能およびその検査試験方法を確立することを目的に研究を行っている。

断面修復材の重要な性能として、母材コンクリートとの付着性能があげられる。現在、断面修復材の付着強度の試験方法に関しては、JIS や土木学会規準、あるいはNEXCO の社内規格等において、いくつかの方法が提案されているが、断面修復材を塗布する基板コンクリートの表面粗さの設定が様々で統一されていない。すなわち、試験規準によって、研磨紙で磨いて平滑とする条件からウォータージェット工法で凹凸をつける試験条件まで様々である。試験条件の統一的な考え方を確立するためには、断面修復材と母材コンクリートの接着界面の凹凸の影響を明確にしておく必要がある。そこで25年度は、基板コンクリートの表面粗さの程度が断面修復材の付着強度に与える影響について検討した。

また、断面修復材の特に耐久性の確認方法には、多大な手間と期間を必要とする現状にあり、簡易で適切な性能確認方法の確立が望まれている。25年度は、主に付着強度と塩分浸透に関して、断面修復材の配合条件が耐久性に与える影響について検討し、そのうえで評価試験方法の簡略化の可能性等について検討した。

4.2 断面修復材の配合

実験に使用した断面修復材の配合を表-4.1 に示す。市販の断面修復材の標準的な配合条件を参考として水結合材比を46%と固定し、粘性を確保するため一般的に使用されている石灰石微粉末を添加した。また、はく離抵抗性やひび割れ抵抗性を確保するために短繊維が用いられることが多いことから、ここではそれに従って、いずれの配合においてもビニロン短繊維を混入した。ただし、

収縮低減剤の使用の有無や、混合するポリマーの種類と混合率、あるいは使用するセメントの種類は、製品によって異なるとともに、使用材料の詳細が市販品では示されない可能性があるため、ここでは収縮低減剤の有無、ポリマーの種類と添加量、セメントの種類を種々に変化させて、計7配合を設定した。配合名は、「セメントの種類」-「ポリマー種類と添加率」を表している。

表面粗さの試験と暴露試験に用いる配合は、標準な配合としてH-0とH-A5を選択した。塩分浸透試験は全配合を選択した。

4.3 表面粗さと付着強度

付着強度試験の供試体は、図-4.1 に示すように100×100×400mmの角柱供試体の型枠を使用し、型枠天端よりも12mm低い位置まで基板コンクリート(G_{max}20mm、W/C50%)を打ち込み、コンクリート表面の粗さを表-4.2示す4段階に設定した。作製した凹凸の外観状態を図-4.2に示す。

作製した基板コンクリートは28日間水中養生を行い、その後約4ヶ月間気乾状態で静置した。

断面修復材を塗布する際に基板コンクリート表面が乾燥していると、断面修復材の水分が基板コンクリートに吸収され、水和に必要な水分が不足する、いわゆるドライアウトが発生する。このドライアウト防止対策として、断面修復材塗布前の基板コンクリート表面に対して、水湿し処理とプライマー処理(アクリル系ポリマーを塗布)の2種類の下地調整方法を設定した。

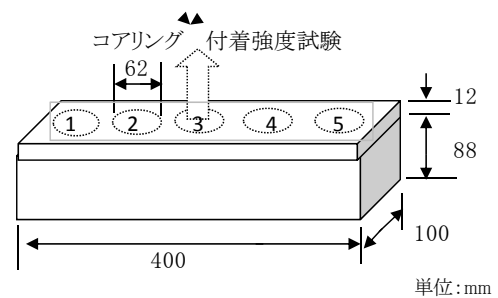


図-4.1 付着強度試験の概要

表-4.1 断面修復材の配合表

配合名	水結合材比 (wt%)	ポリマー結合材比 (wt%)	ポリマー種類	目標空気量 (vol%)	単位量(kg/m ³)									実験の種類		
					水	結合材				微粉石灰石粉	細骨材	ビニロン繊維	収縮低減剤	表面粗さ	暴露後の付着	塩分浸透◎RCPTも実施
						早強セメント	普通セメント	超早強セメント	膨張材							
H(non)	46	0	-	3	356	744	-	-	30	244	712	2.6	-			◎
H-0	46	0	-	3	356	744	-	-	30	244	712	2.6	16.7	○	○	◎
H-A5	46	5	アクリル	3	356	744	-	-	30	244	712	2.6	16.7	○	○	○
H-A10	46	10	アクリル	3	356	744	-	-	30	244	712	2.6	16.7			◎
H-S5	46	5	SBR	3	356	744	-	-	30	244	712	2.6	16.7			◎
N-A5	46	5	アクリル	3	356	-	744	-	30	244	712	2.6	16.7			○
HH-A5	46	5	アクリル	3	368	-	-	770	30	203	699	2.6	16.7			○

表-4.2 基板コンクリートの表面粗さの程度と作製要領

表面粗さの程度	作製要領
洗出	コンクリート打込み後に、超遅延剤を散布し、翌日に洗い出し
中間	凝結時間を見計らい、ワイヤーブラシで表面を目荒らし(洗出と砂目の中間的な状態)
砂目	凝結時間を見計らい、たわしで軽く表面を撫でる(砂の粒子が出る程度)
平滑	コンクリート硬化後に、ベルトサンダーに装着した180番研磨紙によって研磨

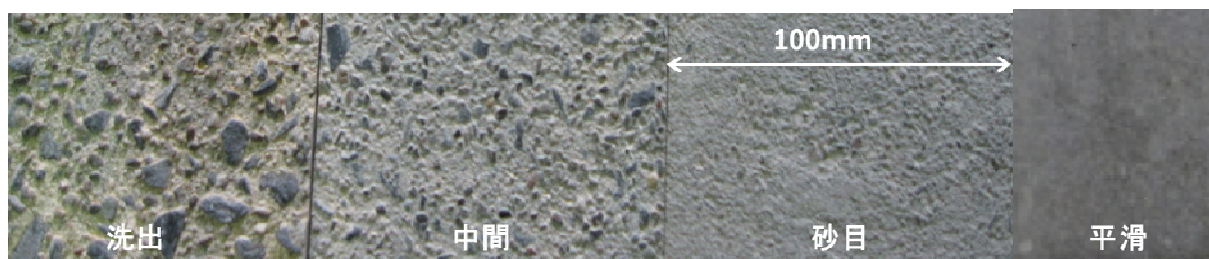


図-4.2 コンクリート表面の状態

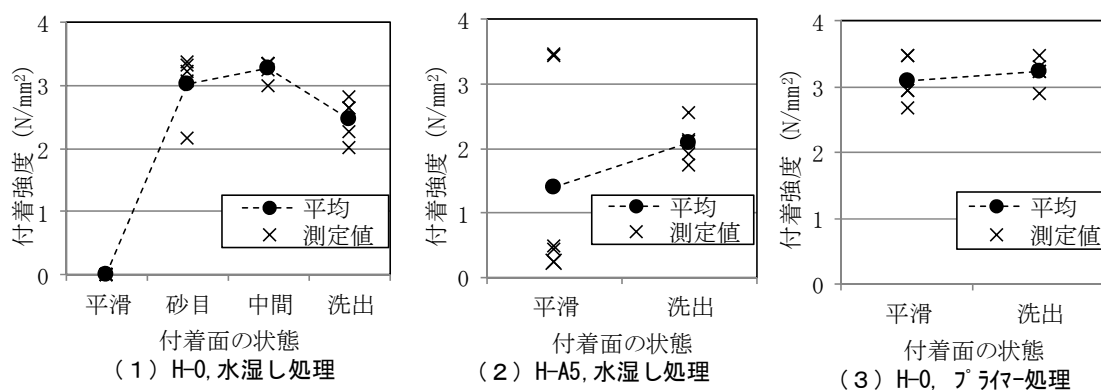


図-4.3 表面粗さと付着強度の関係

断面修復材塗布後、7日間の湿布養生を行い、その後、図-4.1 に示すように建研式接着力試験機による付着強度試験を実施した。

付着強度試験結果を図-4.3に示す。水湿し処理にH-0を塗布した(1)の結果では、「平滑」の条件では付着試験前に剥離してしまい、付着強度が得られなかった。「砂目」、「中間」、「洗出」の条件では2 N/mm²以上の良好な付着強度が得られた。

水湿し処理にH-A5を塗布した(2)の結果では、ポリマーの効果により(1)に比較して「平滑」の付着強度が大きくなり、表面粗さの影響は幾分小さくなる傾向を示した。

プライマー処理にH-0を塗布した(3)では、「平滑」と「洗出」の2条件とも高い付着強度が得られた。

以上のように、表面の凹凸の影響はプライマー処理では小さかった。水湿し処理では、砂の表面が僅かに見える程度の僅かな不陸(砂目)があれば安定した付着強度を示すものの、一部の試験規格に示されている平滑の条件(150番研磨紙による研磨)では、付着強度がかなり小さくなる可能性が確認された。

このように、断面修復材の付着強度は、母材側コンクリートの打継界面の凹凸状況や、断面修復材の打ち込み前に実施するプライマー処理等の下地調整の方法によって大きく変化し、使用する断面修復材の配合仕様のみでは決定しないことが確認できた。

この結果からすると、断面修復材の付着強度試験は、実際に施工される面の凹凸状況を再現するとともに、下地調整の方法も実際に施工される仕様に合わせる事が基本となるといえる。ここで、下地調整の方法としては、一般には断面修復材の施工システムとして仕様が示されるので、それに準拠して試験を実施すればよいが、打継面の凹凸を忠実に再現する試験供試体を作ることは容易ではない。ただし、図-4.3(1)の水湿し処理の実験結果によると、平滑条件では著しく付着強度が低下するものの、砂目・中間・洗出の条件では、付着強度の結果にあまり大きな差は生じていない。このため、打継面の凹凸の再現については、ある程度の凹凸ができていれば、十分であるといえる。このため、今後は打継面の凹凸の定量化手法について検討を行い、その結果に応じて試験条件設定の簡略化の在り方について明らかにすることが

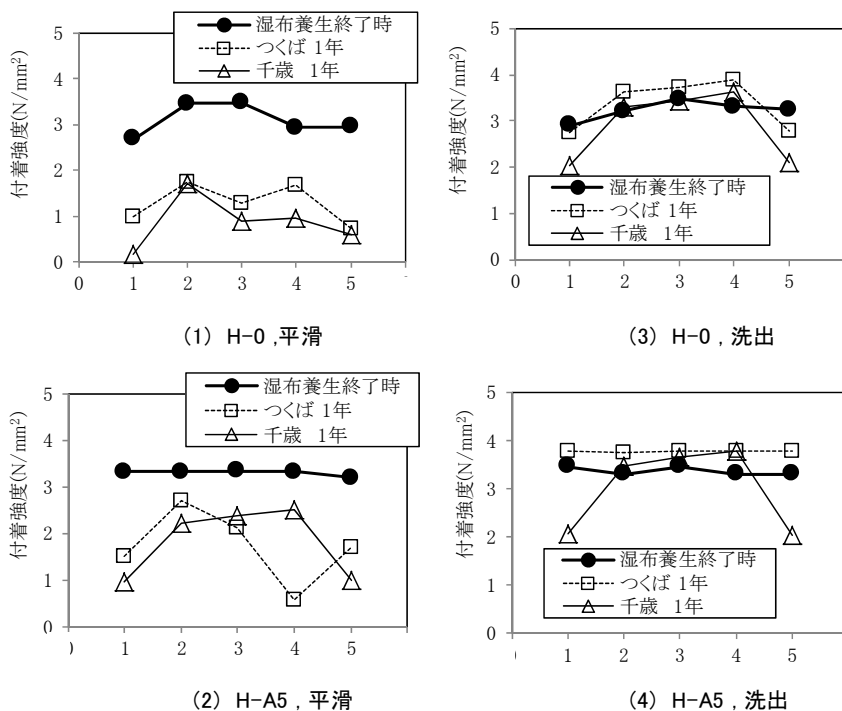


図-4.4 暴露前後の付着強度試験結果

課題となろう。

4.4 付着強度に関する暴露試験

4.3 と同様の方法で図-4.1 に示すような試験体を作製した。基板コンクリートの表面粗さは「平滑」と「洗出」の2種類とし、プライマー処理を行った後に断面修復材 H-0 または H-A5 を塗布した。7日間の湿布養生の後に、北海道千歳市と茨城県つくば市に暴露した。図-4.1 に示す付着強度試験を暴露開始前と暴露1年後に1体ずつ実施した。

付着強度試験結果を図-4.4 に示す。図の横軸の1～5の数字は図-4.1 のコアリングの箇所に対応している。

湿布養生終了後（暴露開始前）の状態では、いずれの試験体でも 3 N/mm² 程度の付着強度が測定されている。これに対して暴露1年後の結果については次のような傾向が見られた。

平滑の条件 ((1)と(2)) では付着強度が大きく低下した。これに対して洗出の条件 ((3)と(4)) での付着強度の低下量は小さく、付着面の凹凸の程度が付着強度の耐久性に影響を与える結果となった。

いずれの試験体でも試験体の中央部よりも端部（1と5の箇所）での強度低下が大きく、乾燥収縮や凍結融解等の影響で試験体の端部から徐々に剥離が進行している傾向が確認できた。このことより、付着強度の耐久性の評価においては、試験体端部からの距離を考慮に入れる必要がある。

ポリマーを含有しない H-0 とポリマーを含有する

H-A5 を比較すると付着強度の低下量は H-A5 のほうが僅かに小さいようだが、大きな差ではなかった。今回の暴露試験体では、いずれの付着面にもプライマーを塗布しており、付着強度には断面修復材中のポリマー量よりもプライマーの影響のほうが大きいことが予想される。

つくばと千歳を比較すると、千歳のほうが付着強度の低下量がやや大きかった。両地における一日の温度差には大きな差が無く、差が出た原因は凍結融解の違いと考えられる。

今回の暴露試験体は、4.3 の検討で比較的高い付着強度を発揮した条件で作製したが、暴露1年で付着強度の低下が見られ、付着強度の耐久性は重要な検証事項である

ことが判った。暴露試験は長期間を必要とすることから、促進試験等との対応を検討し、より短時間で確認が行える照査方法の確立が課題といえる。また、付着強度試験では1つの試験体で劣化の過程を追跡できないので、非破壊による測定方法の確立が望ましい。

4.5 塩分浸透性

断面修復材の塩分浸透性の試験については、まず、土木学会規準 JSCE-G 572 「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオン分布の測定方法」を参考に試験を行った。φ100×200mm の円柱供試体を作製し、7日間の湿布養生の後、両端面 25mm を切断し、打ち込み側の円形の1面を残してエポキシ樹脂塗料で被覆し、材齢 28 日後から室温 20℃、の環境で濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液中に浸せきした。また、比較試料として W/C35,50,65%のコンクリート試験体を作製し、同様の方法で浸せきを行った。

浸漬後、1年経過後に試験体を溶液中から取り出し、浸透面から厚さ 10mm ごとに輪切り状に切断した。切断した各試料中の全塩化物イオン量を測定し、浸透面からの塩化物イオン量の分布から、見掛けの拡散係数を求めた。

図-5.5(1)はコンクリートの試験結果、(2)は断面修復材の試験結果である。コンクリートの結果から分かるように見かけの拡散係数は水セメント比によって大きく異なっており、水セメント比の影響を強く受けることが分

⑬-3 コンクリート構造物の長寿命化に向けた補修対策技術の確立

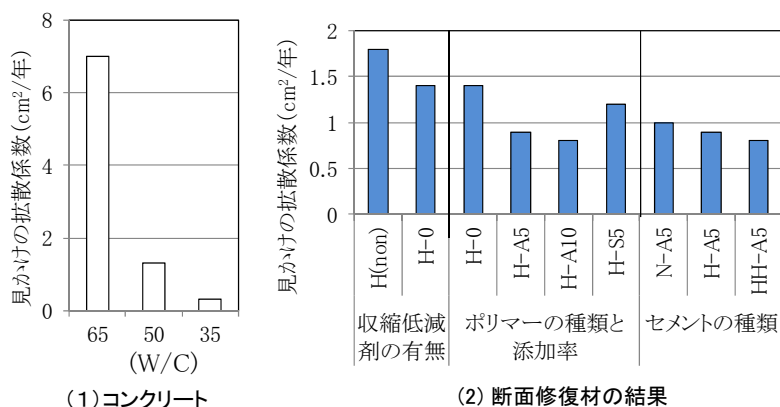


図-4.5 塩分浸漬試験の結果

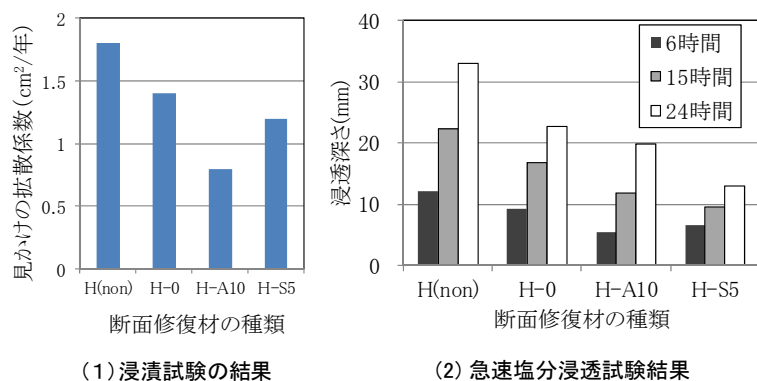


図-4.6 塩分浸漬試験結果と急速塩分試験結果の比較

かる。(2)の断面修復材については、いずれも W/C=46% の配合であるが、配合によって見かけの拡散係数の値がやや異なっていた。すなわち、H(non)に対して収縮低減剤を添加した H-0 ではやや小さくなり、更にポリマーを混入した H-A5、H-A10、H-S5 では更に小さくなる傾向を示した。セメントの種類の違いについては、凝結速度が速いセメントほど僅かながら見かけの拡散係数が小さくなる傾向を示したが、その差は僅かであった。

4つの断面修復材の配合に対して電気泳動による塩分浸透試験を実施した。この試験法は試験体に電気的な負荷を掛けることで塩化物イオンを強制的に浸透させる方法で、短時間で塩分浸透性を評価することが可能である。この試験法の断面修復材への適用性について検討した。供試体は配合毎にφ100×200mmの円柱供試体を1本ずつ作製し、7日の湿布養生の後に材齢28日まで気乾養生した。上下25mmをカットし、残りから高さ50mmの円柱を3体作製した。所定の通電時間後に塩分の浸透深さを測定するが、今回の試験では印加電圧30V、通電時間を6、15、24時間の3段階に設定した。

試験結果を図-4.6に示す。なお、比較のために(1)には同じ4配合の塩分浸漬試験結果を示し、(2)にRCPT試験結果を示す。(1)と(2)について、配合の違いによる傾向を比較すると、まず、H(non)に対してH-0の拡散係数

が小さくなる傾向は一致した。ポリマーを混入したH-A10やH-S5の変化については、通電時間が6時間の結果は浸漬試験の結果と一致したが、通電時間が15時間と24時間の結果についてはH-A10とH-S5の大小関係が逆転する結果となった。しかしながら、図-4.5(1)のコンクリートの値の違いに比較すれば、その変化量は小さく、概略的な拡散係数の推定に関してはRCPTも有力であると考えられる。また、いずれの試験結果でも、収縮低減剤やポリマー混入によって拡散係数はやや低下する傾向を示していることから、配合のベースとなるセメントモルタルの塩化物イオン拡散係数を用いれば、安全側の照査となることが考えられる。

4.6 まとめと今後の課題

(1) 母材コンクリートの表面粗さと付着強度との関係については、プライマー処理では、表面粗さに関係無く高い付着強度が得られるものの、水湿し処理の場合

では「平滑」の条件では付着強度が低下する傾向が見られた。このように、母材コンクリートと断面修復材の付着強度は、断面修復材の使用材料のみではなく、打継面の凹凸や打継面の下地調整の方法によって、大きく変化することとなる。このため、付着強度試験の標準化に当たっては、打継面の凹凸や実際の施工条件を再現した試験方法を採用するのが妥当である。しかし、凹凸の再現はあまり高精度でなくてもよい可能性があり、凹凸の評価方法について検討を進める必要がある。

(2) 初期付着強度が良好であっても1年の凍結融解が作用する暴露後には付着強度の低下が見られた。特に、打継面の縁の部分で付着強度の低下が顕著となり、打継面全体にわたって平均的に付着強度が低下するわけではないことが分かった。このことから、凍結融解作用に対する付着強度の耐久性の評価に当たっては、気象作用の影響により剥離を生じやすい端部を付着試験の対象箇所とすることが望ましい。今後、耐久性の照査方法について検討を進める必要がある。

(3) 塩化物イオン拡散係数はポリマー等の混入でやや小さくなる傾向が見られた。ただし、今回実験で用いた配合条件の範囲（ポリマー含有率が結合材に対して5~10%）では、その影響はわずかであった。今後、合理的な照査方法について検討を進める必要がある。

5. 表面被覆工法に関する研究報告

5.1 概要

表面被覆工は、エポキシ樹脂等の有機系材料やポリマーセメント系の材料をコンクリート構造物の表面に塗付することで、遮蔽性の高い被膜を形成し、コンクリート構造物を保護する工法である。しかしながら、ふくれや内部の滞水等を生じ早期に再劣化する事例が見られる。これは現場条件をあまり考慮していない工法選定や施工不備等に起因したものと考えられる。材料品質については国内の各機関が要求性能や試験方法等を提案しているが、環境に応じた適用条件や他の補修工法との使い分けなども定まっているとは言えない状況であり、基盤技術として設計施工の管理技術の確立をはかる必要がある。

本研究では、コンクリート表面被覆材の要求性能や耐久性の設定とともに、不具合発生要因に注目し、その要因把握と対策としての施工管理方法を提案することを目的としている。これまでに、湿潤や低温時の施工が、硬化被膜の遮蔽性や付着性にも影響を与えることを明らかにしている。25年度は、性能に影響を与える要因についてさらに実験研究を進めるとともに、留意すべき施工環境の項目や被覆を適用すべき箇所の検討などを実施した。

5.2 施工条件が遮蔽性能に及ぼす影響

表面被覆材の酸素、水蒸気および塩化物イオン等の劣化因子に対する遮蔽性は、施工時の環境条件等によって大きな影響を受けることがこれまでの調査等でわかっており、その影響について定量的な評価を進めた。

コンクリートの表面被覆に用いられる一般的なエポキシ系中塗り塗料を用いて、ポリプロピレン板にフィルムアプリケーションで260g/m²のフリーフィルム（遊離塗膜）を20℃にて作製した。この試料について、酸素透過係数、水蒸気透過係数の対数および塩化物イオン拡散係数の測定を行った。

コンクリート内部に侵入する劣化促進物質としての、酸素、水蒸気、塩化物イオンの透過度の試験結果を図5.1～5.3に示す。透過度はいずれの因子でも同様な挙動を示し、膜厚の減少に伴い増加し、試験温度の増加に伴って増加することがわかる。この理由は、温度の上昇に伴い、酸素等の侵入物質の分子運動が活発になること、ならびに、マイクロブラウン運動と呼ばれる分子鎖の熱振動により気体が透過する高分子膜上の孔が拡大するためと推察される¹⁾。

酸素透過度、透湿度および塩化物イオン透過量と膜厚の逆数の関係を、図5.4に示す。酸素透過度および透湿度は膜厚と高い相関性を示すことが確認できる。

高分子膜の気体透過の法則によると、膜厚の逆数と気

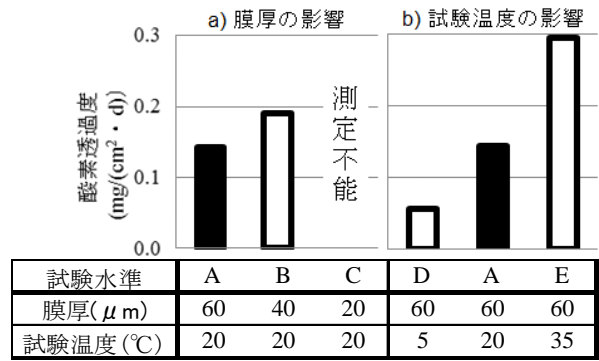


図-5.1 酸素透過性

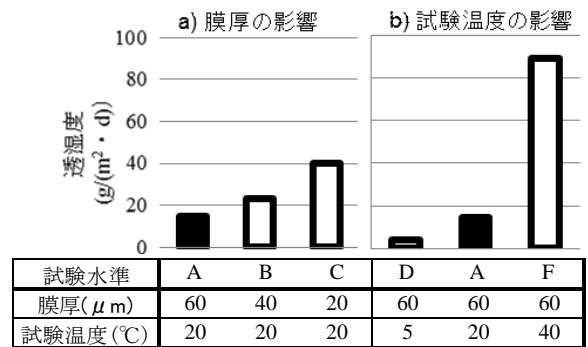


図-5.2 水蒸気透過性

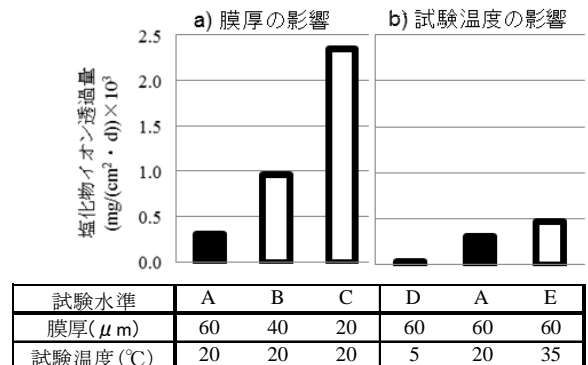


図-5.3 塩化物イオン透過性

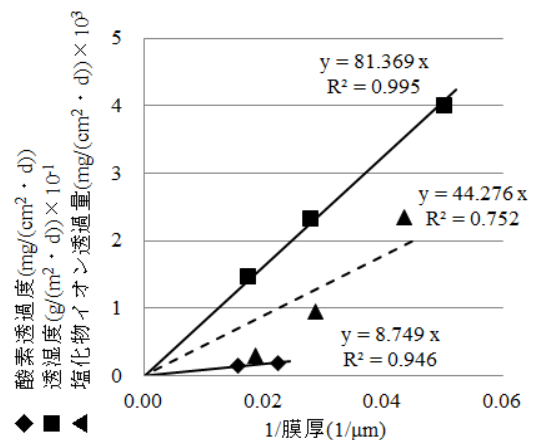


図-5.4 劣化促進物質拡散係数の膜厚影響

体の透過度は比例することが知られており、本研究でもこれを裏付ける結果が得られた¹⁾。一方、塩化物イオン

透過量は膜厚の逆数との比例直線からはずれることを確認した。今回の様な薄膜の試験では、局所的に極薄膜部分が存在し、塩化物イオンの浸透が促進されたためと考えられる。実際のコンクリート表面被覆では、膜厚の不均等は避けることができず一定の膜厚分布をもつことから、実態に即した評価と必要膜厚の設定が求められる。

酸素透過係数、透湿度および塩化物イオン拡散係数の対数と、試験温度の逆数の関係を図-5.5 に示す。高分子膜の気体透過の現象では、絶対温度の逆数と透過係数の対数が比例するアレニウス則が知られている。本研究でもこれを裏付ける相関を示し、被覆中の劣化促進物質の透過はアレニウス則により評価できることがわかった。

これらの知見をもとに、素地調整の程度や施工条件、供用中に受ける環境履歴、あるいは構造物の重要度等に応じて、膜厚に関する信頼性設計を行うことが望ましい。

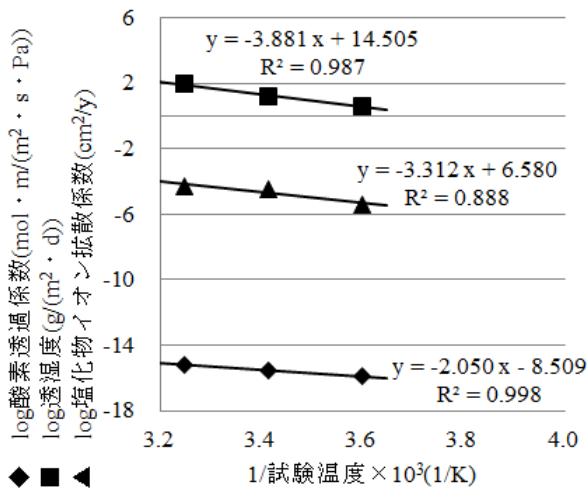


図-5.5 劣化促進物質拡散係数の温度影響

5.3 被覆材塗布部位と塩化物イオン浸透挙動

コンクリート橋梁の桁の側面と下面に表面被覆が施された場合、桁下面に水分が滞留する傾向があることが報告されている²⁾。表面被覆は、外部からの水分の浸入を防ぐ効果があるが、塗布していない部位から水分が浸入した場合、水分の排出を妨げ、コンクリートの含水状態を変化させると考えられる。

また、積雪寒冷地に建設された橋梁では、凍結防止剤による塩害が報告されている^{3), 4)}。凍結防止剤が、降雪・降雨等によって、伸縮装置部等から橋梁の桁へ浸透する場合もある⁵⁾。一方、コンクリートの含水状態が塩分浸透に影響を及ぼすことが報告されている⁶⁾。表面被覆工を適用した橋梁が、凍結防止剤による塩分浸透を受け、コンクリートの含水状態によっては、塩分の桁への浸透性状は、表面被覆が無い場合と異なると思われる。

ここでは、表面被覆材の塗布部位が含水状態および塩化物イオンの分布に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、表面被覆材の塗布部位を変化させた矩形モルタル梁について、梁の上面から塩水を浸透させる塩水浸透実験を行った。表面被覆材の塗布部位が塩化物イオンの浸透性状に及ぼす影響について、モルタルに含まれる全塩化物イオン濃度の測定から検討する。

5.3.1 表面被覆供試体の塩水浸透試験

表-5.1 に示す配合で、寸法 10×10×40cm の矩形モルタル梁を成形し、20°C60%RH の室内で、2 日気中+5 日水中+21 日気中養生を行い、供試体を作製した。細骨材は、けい砂 4 号 : 5 号 : 6 号を質量比で 1:1:1 に混合したものを用いた。

図-5.6 には、供試体の種類を示す。供試体は、表面被覆材が塗布された梁の上面から塩水が浸透することを想定して作製した。供試体の種類は、被覆無し、側面被覆、側面・下面被覆、の 3 つとした。被覆無しは、供試体に表面被覆材を塗布していない。側面被覆は、供試体の側面に表面被覆材を塗布し、側面・下面被覆は、供試体の側面および下面に表面被覆材を塗布した。両梁端部は、乾燥面となるように、表面被覆材を塗布せず、開放面とした。

表-5.1 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)		
		水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)
60	3.0	290	484	1452

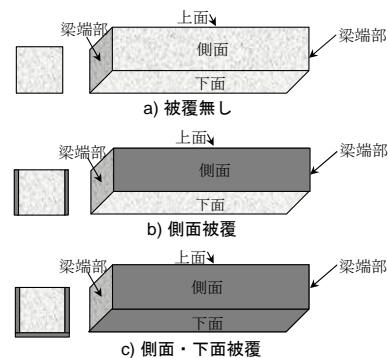


図-5.6 矩形モルタル梁の種類

図-5.6 に示す部位に、エポキシ樹脂系のプライマー、パテ、中塗りおよびアクリルウレタン樹脂系の上塗りを標準仕様に従って塗布した。各塗布間隔は 1 日とし、表面被覆材の養生は、上塗りの塗布後、20°C60%RH の室内で 7 日とした。

供試体は、塩水を浸透させる前に、72 時間水中浸漬させた。塩水は、供試体の上面にアクリル製の水槽を設置し、20°C60%RH で 14 日浸透させた。塩水は 10%NaCl 水溶

液とし、塩水浸透開始時の10%NaCl水溶液の量は2000mlとした。水槽と供試体の隙間は、シリコーン樹脂系シーリング材を用いて止水した。なお、塩水浸透終了後に塩水の密度を測定し、塩水浸透前の密度とほぼ同じであることを確認した。また、塩水浸透終了後、水槽に残った塩水の容量を測定し、塩水浸透開始時からの減少分から、塩水浸透量を算出した。

浸透試験後の供試体中央部から試料採取し、全塩化物イオン濃度を測定した。梁の断面位置を図-5.7に示す。

5.3.2 表面被覆供試体の塩化物浸透分布

図-5.8に、梁中央部の全塩化物イオン濃度の分布を示す。被覆無しとした場合の断面上部の全塩化物イオン濃度は、0cm位置よりも側面の方が高い値となっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.12～0.67kg/m³の値を示している。

側面被覆とした場合、側面・下面被覆とした場合とも、断面上部の全塩化物イオン濃度は被覆無しの場合と同傾向が異なり、0cm位置の値と同程度の値になっている。断面中央部と断面下部の全塩化物イオン濃度は、0.11～0.16kg/m³の範囲の値である。

表面被覆が全塩化物イオン濃度に及ぼす影響として、被覆無しの断面上部では、表面に近い位置の方が、断面の中央位置よりも全塩化物イオン濃度は高いことが確認された。これは、表面に近い位置では、乾燥により水分が蒸発し、塩分濃縮が生じるためと推察される。

側面被覆および側面・下面被覆の断面上部では、表面に近い位置の全塩化物イオン濃度は、断面の中央位置の値と同程度となる傾向があり、被覆無しの場合と比較して異なることが確認された。これは、表面に近い位置においても、表面被覆による乾燥による水分の蒸発が抑制され、塩分濃縮が生じなかったためと考えられる。

この結果から、表面被覆材を塗布して表面からの水分蒸発を妨げた場合、表面に近い部位では、水分蒸発による塩分濃縮が生じず、塩分濃縮による全塩化物イオン濃度の増加が抑制されるものと考えられる。

本実験は融雪剤や飛来塩が床版や地覆から浸透するモデルとしての実験であるが、コンクリート構造物においては、全面にわたり被覆が適用できるものではない。たとえば桁端部の橋台に向けた面には被覆は施せないほか、地覆や舗装端部からの漏水などもしばしば見られる。表面被覆を適用する部位によって水分および塩化物の移動挙動は異なるので、本実験での挙動等も参考に表面被覆適用部位の設計方法を高度化する必要がある。

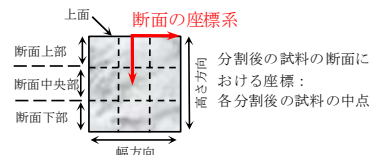
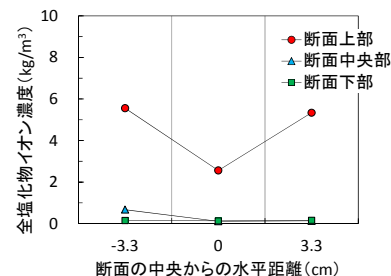
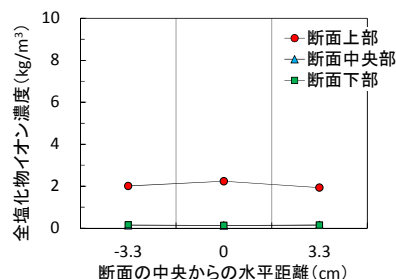


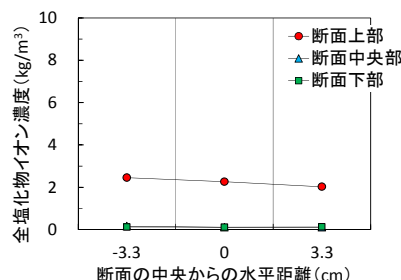
図-5.7 塩分測定のための試料分割



a) 被覆無し



b) 側面被覆



c) 側面・下面被覆

図-5.8 梁中央部の全塩化物イオン濃度分布

5.4 不具合事例からみる表面被覆の不具合要因

5.4.1 現地調査における表面被覆の変状例

コンクリート構造物の補修における表面被覆工は現場施工になるため、環境条件や対象部材の状態などによってはふくれや割れ等の変状が生じることがあり、変状が生じた場合には、表面被覆材の遮蔽性の低下につながる。そこで、海岸付近に建設されたコンクリート橋梁の現地調査で確認された桁端部の密集したふくれについて、水の挙動に着目した再現試験を行い、局所的なふくれの原因について検証した。

表面被覆材を用いて補修されたコンクリート橋梁を対象に2013年に日本海沿岸地域で現地調査を実施した⁷⁾。ここでは、桁端部に変状が認められた物件の例を示す。

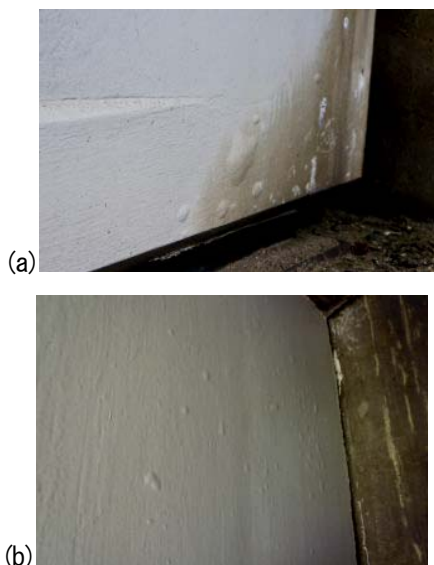


写真-5.1 桁端部に発生したふくれの例

写真-5.1(a)は、側面と下面が樹脂系材料で被覆されたPC-T桁の桁端部の例である。密集したふくれが生じているとともに、水が流れた跡と思われる茶色の汚れが確認され、施工時および供用時に、桁と橋台の接続部付近からの水分供給の影響を受けやすいことが推察される。

写真-5.1(b)は、前記とは別の橋梁であるが、同様に側面と下面が樹脂系材料で被覆されたPC-T桁の桁端部に表面被覆材のふくれが確認される。この桁は多連PC桁の内側に位置し、その周囲は下部工にも囲まれており、湿気が滞留しやすい箇所である。

5.4.2 現地調査における表面被覆の変状例

これらの調査結果で確認された表面被覆材のふくれなどの変状は、水分供給が生じている箇所、もしくは、湿気が滞留している箇所で生じていることから、水分がふくれに影響を及ぼしているものと思われる。水分供給のある箇所および湿気が滞留している箇所では、コンクリートの含水状態が高くなると考えられることから、密集したふくれは、コンクリートの含水状態が高い状態で、表面被覆材が塗布されたことが一因であると推察し検証実験を行った。

表-5.2により供試体を作製し、20°C60%RHの室内で一般的なエポキシ系表面被覆材を、塗装間隔1dで塗装した。

中塗りの塗装後、20°C60%RHの室内で7d養生したところ、湿潤時の塗装条件に写真-5.2のふくれが発生した。乾燥状態の場合は、表面被覆材に変状は見られないが、湿潤状態の場合は、その表面にふくれが観察され、塗膜評価基準に基づくふくれ面積率とふくれ径は、それぞれ、6-10% (等級4) と2-3mm (等級L) であった。

表-5.2 供試体の作製条件

1) 基材モルタルの作製	2) 基材モルタルの含水状態の調整	3) 表面被覆材の塗布工程	4) 表面被覆材の養生
配合：W/C=90%、セメント：砂=1:6 (質量比)	a) 乾燥状態：基材モルタルを20°C60%RHの室内で1d静置	20°C60%RH室内、プライマー、バテ、中塗りを1d間隔で塗布	20°C60%RH室内、7d
養生：20°C60%RH室内、2d気中+5d水中+21d気中	b) 湿潤状態：20°C60%RHの室内で、バットに水を張り、1d水浸させた後、基材モルタルの厚みの半分まで水浸するように水位を調整し、ウェスをういてその表面水を除去		
	a) 乾燥状態 b) 湿潤状態	a) 乾燥状態 b) 湿潤状態	a) 乾燥状態 b) 湿潤状態



写真-5.2 湿潤状態での塗布で生じたふくれ

本試験から、水蒸気による背面圧が表面被覆材にふくれを生じさせたことが一因であると考えられ、湿潤状態で表面被覆材が塗布された場合、ふくれが生じやすいことが確認できた。

付着強さは、ふくれが生じていない乾燥状態で、ふくれが生じた湿潤状態の平均付着強さは、それぞれ、2.86N/mm² および4.02N/mm²であった。破壊状態は、基材モルタルの材料破壊となり、表面被覆材と基材モルタルの一体性は確保されていた。ただし、ふくれの径と面積率によっては、一体性が確保されない場合もあると考えられ、前述の現地調査で見られた大きなふくれの場合など、一体性の確保が困難となることも懸念される。

5.5 まとめと今後の課題

低温や高温条件での被覆施工がもたらす不具合について現地調査や実験検討を行った。これらの結果から、表面被覆の不具合発生を最小限に抑えるための、材料選定および施工管理の留意点が明らかになった。表面被覆材の早期再劣化は、初期不良や損傷がかなり進行したコンクリート面で生じることが多いため、低品質な基材で評価することも有効と考え、表面被覆の適用性評価用の劣化を模擬した試験用コンクリートの提案も進めている。また、被覆材を適用すべき部位や含浸材を含めた材料の使い分けについて調査を行う必要がある。施工条件を変化させた表面被覆試験体の屋外暴露試験については、環境条件等を拡大して継続中である。今後、補修面の状態や塗布時の施工条件、供用中に受ける環境履歴、あるいは構造物の重要度等に応じて、材料選定に関する信頼性設計やおよび施工管理項目を提案する予定としている。

6. ひび割れ修復工法に関する研究報告

6.1 概要

コンクリートに発生したひび割れは、水や塩分等の浸入口となり、コンクリートの劣化を早める原因⁸⁾⁹⁾となることから、ひび割れ対策に対する現場のニーズは非常に高い。ひび割れ修復工法は、古くから多くの現場で使用されているが、修復後の検査方法が確立していないことから、注入不足や接着不良等による再劣化が生じている事例が見受けられる。平成25年度は、前年度に引き続き、実際の補修工事におけるひび割れ注入材（以下、注入材）の充填確認調査、模擬ひび割れ供試体を用いた室内試験における注入充填性試験と凍結融解試験による注入後の塩分浸透状況や耐凍害性の検証を行った。また、模擬ひび割れ供試体にひび割れ充填材を施工した試験体を作製し、凍結融解作用を受けた充填材の付着強度試験と屋外暴露試験による耐久性の検証を開始した。

6.2 ひび割れ注入工法

6.2.1 実工事の注入充填率の確認調査

過年度の調査結果において、ひび割れ注入工の充填率が低い事例に施工時の低温が影響したと思われる事例¹⁰⁾があったことから、平成25年度は、注入作業時期と注入材の充填割合（以下、注入充填率）との関係を調べた。注入充填率の確認調査は、平成25年9月～平成26年1月の間に、北海道の直轄国道でひび割れ注入作業が実施された橋梁補修工事において、計10橋梁のひび割れ27箇所から計27個のコア（径50mm、削孔深さ200mm程度）を未充填が生じ易いと思われる注入器と注入器の間の位置で注入方向に採取した。写真-6.1に示すように、採取コアのひび割れ部の両側面をルーペで観察し、表面から垂直深さ10cmまでに注入材が充填されている割合（以下、注入充填率）を求めた。なお、使用されていた注入材は、メーカーはそれぞれ異なるが、エポキシ樹脂系注入材（以下、エポキシ系）、アクリル樹脂系注入材（以下、アクリル系）、およびセメント系注入材（以下、セメント系）であった。また、注入方法はすべて自動低圧注入工法が採用されていた。

図-6.1に注入施工時期と注入充填率との関係を示す。両者の相関は特に見られないが、10月以降に注入充填率の低い事例が多い傾向があることから低温による影響が疑われる。なお、エポキシ系は1月に実施されておらず、アクリル系は1月のみに施工されていたが、比較的高い注入充填率であった。また、11月及び1月施工のセメント系は注入充填率が非常に低く、厳寒期におけるセメント系の施工実施の良否を検討する必要がある結果となった。このことから、注入充填率が低くなる要因の一つと

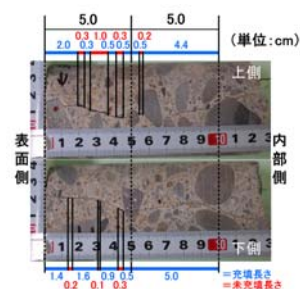


写真-6.1 注入材の充填確認方法

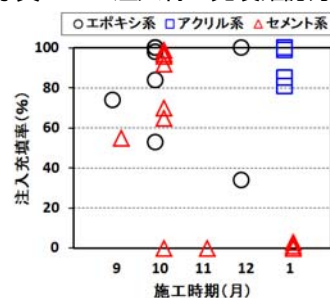


図-6.1 注入施工時期と注入充填率

して、施工時の低温環境が影響していると考えられることから、次項に記述する室内実験による注入充填性試験において事例検証を実施した。

6.2.2 注入充填性試験

注入充填性試験は、コンクリート試験体の温度や含水等の条件を変化させた模擬ひび割れ試験体にひび割れ注入を実施し、注入性の確認や注入充填率による施工性に関する評価を行った。模擬ひび割れ試験体（以下、ひび試験体）は、山本らの研究¹¹⁾を参考に、内径107mm（厚3.1mm）×長さ200mmの塩ビ管を型枠として、表-6.1に示す配合のコンクリートを打設して作製した円柱供試体を、脱型せずに28日間水中養生した後、割裂引張載荷により0.2～0.4mm程度のひび割れを発生させて作製した。その後、表-6.2に示す条件をひび試験体に与え、表-6.1に示す6種類の注入材を用いて注入作業を実施し、注入材の排出時間と固化後に注入充填率を測定する試験を行った。注入は、試験体を水平にして縦ひび割れにした状態で打設面から注入し、貫通ひび割れを想定して排出面は開放して実施した。注入材排出時間は、注入開始から背面排出までの時間とした。注入充填率の測定は、注入材の固化が安定する一般的な期間として、注入後から樹脂系注入材は1週間、セメント系は4週間、20℃の恒温室に静置・養生した後、写真-6.2に示すように、試験体の打設面から5cm、10cm、15cmの位置で輪切りに切断し、切断面のひび割れに充填されている注入材をルーペで目視計測して注入材の充填分布を1mm間隔で測定した。試験は、注入作業時の室温20℃において、ひび試験体の乾湿と温度を変えたケースで実施した。乾湿では、乾燥機

⑬-3 コンクリート構造物の長寿命化に向けた補修対策技術の確立

で40°C8時間乾燥させたひび試験体と水に7時間浸漬したひび試験体の2条件とした。浸漬ケースは試験体全体浸漬と半分浸漬の2ケースとした。温度では、常温(20°C)と低温の2条件とし、低温はひび試験体を-30°Cの低温室に10時間静置した後、室温で自然融解させ、注入面の温度が3~5°Cに上昇した時点で注入を開始した。なお、低温条件は乾湿作業後に実施し、ひび割れ内部が凍結した状態になるように工夫した。

図-6.2 および図-6.3 に、注入材別の注入時間と注入充填率および深さ5cm 毎の注入材の充填分布(一例)を示す。

樹脂系注入材は、低温のケースで注入時間が非常に長くなったが、ほとんどのケースでひび試験体の温度上昇と共に背面側から注入材が排出され、注入充填率は高い結果となった。これは、図-6.4 に示すように、ひび試験体の表面と内部の温度変化に差があり、注入面が一般的な注入可能温度である5°C程度となっても、深さ10cmではまだ0°C前後であることから、流入してきた注入材はひび割れ内部で冷やされて流動性が低下して注入は滞るが、注入材の可使用時間内にひび割れ内部の温度が上昇すると流動性は復活し、注入材は充填されることを意味する。しかし、アクリル系において、背面側からの排出がなく、注入充填率が低くなるケースがあった。アクリル

系は0°Cでも固化する性能を有しているが、可使用時間は比較的短く、常温では固化が早いことから、今回のケースでは、作業室温が高い(常温20°C)ために注入口付近の注入材のゲル化が早まり、途中で注入が停止してしまった結果となった。これは、ひび割れ内部の温度上昇がなければエポキシ系でも起こり得る結果であると考えられる。

一方、セメント系は、ひび割れ内部が低温であっても注入時間はほとんど遅くならないが、常温、低温ともに試験体の縦ひび割れの上部和下部に未充填部が発生する結果となった。これは、ひび試験体の背面を開放していることから、粘性が非常に低いセメント系では、注入材がひび割れ内部の空隙が大きい箇所を通過して排出され

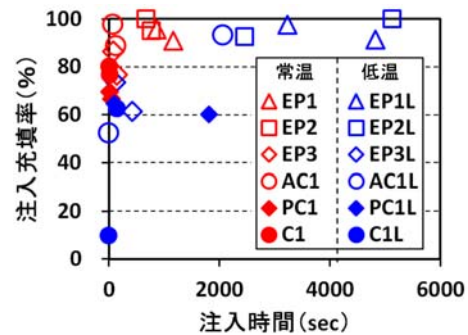


図-6.2 注入時間と注入充填率

表-6.1 コンクリートの配合と注入材の種類

セメントの種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				Slump (cm)	Air (%)	Cl⁻ (kg/m³)
				W	C	S	G			
普通ポルト	20	52.1	43.8	156	300	812	1032	7.5	5.5	0.054

注入材の種類と記号	エポキシ系			アクリル系	セメント系	
	硬質系低粘度形			AC1	ポリマー含有	
	EP1	EP2	EP3		PC1	PC1
注入方法	自動低圧			自動低圧	自動低圧	

表-6.2 試験ケース

注入材と注入方法	試験体の条件	常温			低温	
		乾燥	奥湿潤	前湿潤	乾燥	奥凍結
エポキシ系	自動低圧	EP1-1	EP1-2		EP1-1L	EP1-2L
	手動低圧	EP2-1	EP2-2		EP2-1L	EP2-2L
アクリル系	自動低圧	AC1-1	AC1-2		AC1-1L	AC1-2L
	手動高圧	C1-1			C1-1L	C1-2L
セメント系 ポリマー含有	自動低圧	PC1-1		PC1-2	PC1-1L	PC1-2L
	手動高圧	C1-2			C1-1L	C1-2L

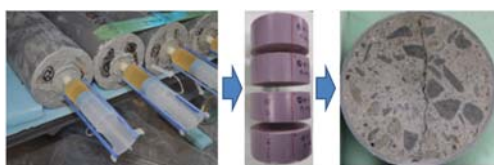


写真-6.2 注入材充填性試験

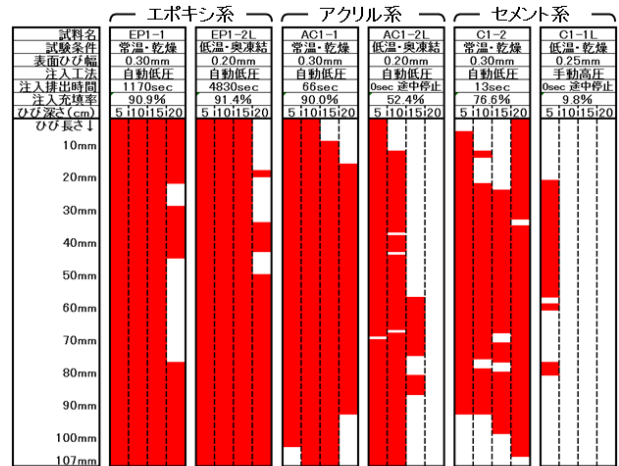


図-6.3 注入材の充填分布(一例)

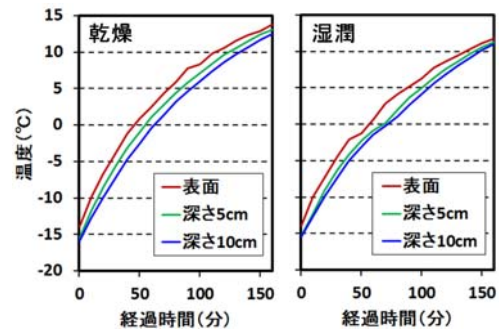


図-6.4 ひび試験体の内部温度変化

⑬-3 コンクリート構造物の長寿命化に向けた補修対策技術の確立

てしまい、幅の狭いひび割れ部に十分に行き渡らなかったと考えられる。

なお、低温のケースでは、先行水が凍結して注入が停止したケースもあった。このことから、低温環境におけるひび割れ注入工法の施工上の注意点として、躯体内部温度を 0℃以下（凍結温度）にしないこと、注入時の躯体内部温度と作業室温の温度差をなるべく少なくし、注入材の固化までにその温度を一定に保つことが重要である。また、貫通ひび割れにセメント系を適用する場合は未充填部が発生し易いことが言える。さらに、手動式の注入方法による低温のケースにおいて、注入が途中で停止すると、そこで注入終了（作業継続不可）となり、必然的に未充填となることから、低温環境で手動式を用いる場合は、ひび割れ内部の温度管理がより重要であると言える。

6.2.3 CIF/CDF 試験

凍害と塩害の複合環境における注入後の耐久性等を検討するため、RILEM の CIF/CDF 試験法に準じた一面凍結融解試験を行い、スケーリング量と塩化物イオン量を測定して注入後の遮塩効果について検証実験を行った。試験に用いた試験体は、10×10×20cm の角柱供試体を 28 日水中養生した後、半分に切断し、切断面を電動ニードルで軽くチップングしてから注入材をハケで塗布して接着して作製した。この時、ひび割れ幅は 0.5mm を想定し、注入材の厚みが 0.5mm 程度になるように切断面の 4 隅にアルミ箔を挟んで厚さを調整した。図-6.5 に試験体作製と CIF/CDF 試験の概要図を示す。CIF/CDF 試験法による凍結融解試験は、+20℃～-20℃を 10K/h の定速で 4 時間冷却→-20℃で 3 時間保持→同じ定速で+20℃まで 4 時間加熱→+20℃で 1 時間保持し、12 時間 1 サイクルで 28 サイクル行った。コンクリートの配合は表-6.1 と同じであり、試験ケースは表-6.3 に示すように、注入材 4 種類、接着面積率 100%と 80%、試験水は淡水と 3% NaCl 水溶液（以下、塩水）による試験面浸漬の組合せで 13 ケースとした。サイクル毎の測定は 6、12、18、24、28 サイクルに実施し、サイクル終了後、JIS A1154 に準拠した電位差滴定法による塩化物イオン量を試験面から深さ 1cm 毎に測定した。

図-6.6 および図-6.7 にサイクル毎のスケーリング量およびサイクル終了後の塩化物イオン量を示す。淡水ではスケーリング量は微量であるが、塩水では耐凍害性を保持しうるスケーリング量の限界値とされている 1500g/m² を大きく超えている¹²⁾。塩化物イオン量では、塩水の試験水に浸っている試験面から深さ 1cm までは塩化物イオン量が多くなっているが、深さ 2cm 以降は注入

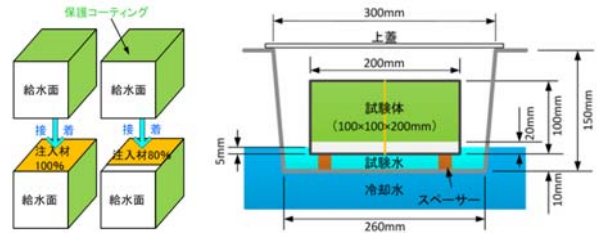


図-6.5 試験体作製と CIF/CDF 試験の概要図

表-6.3 試験ケース

注入材の種類 (記号)	エポキシ系						セメント系					
	硬質系低粘度形						ポリマー含有		ポリマーなし			
	注入材A (EP1)		注入材B (EP2)		注入材C (PC)		注入材D (C)					
接着面積率 (%)	100	80	80	100	80	80	100	80	80	100	80	80
試験水の種類	塩水 (3%NaCl)		淡水		塩水 (3%NaCl)		淡水		塩水 (3%NaCl)		淡水	

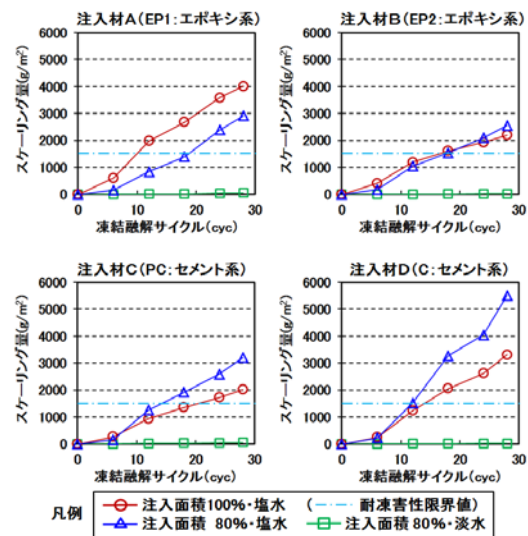


図-6.6 サイクル毎のスケーリング量

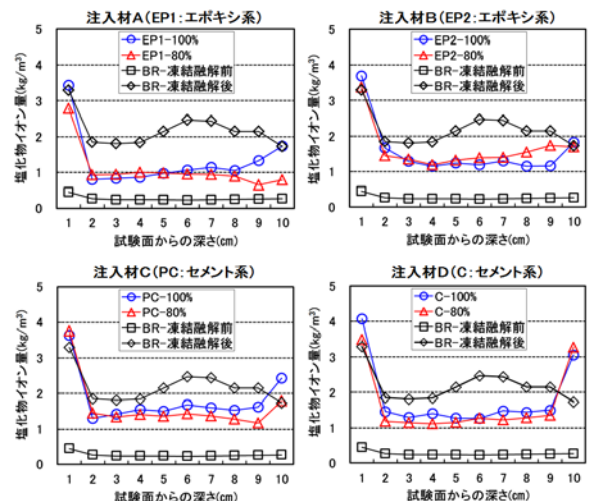


図-6.7 塩化物イオン量

していないケース（BR-凍結融解後）と比べると塩化物イオン量は少ない結果となった。しかしながら、塩化物イオン量は鉄筋の発錆量である 1.2kg/m³前後であることから、注入材とひび割れの界面が劣化により剥離し、そこ

⑬-3 コンクリート構造物の長寿命化に向けた補修対策技術の確立

から内部に浸入したと思われる。このことから、凍害・塩害の複合環境において、複合劣化によりコンクリート表面は非常に激しく劣化し、ひび割れ注入部も劣化することからひび割れ内部への塩分浸透は防止できないが、注入によって塩分浸透量は低減する。

6.3 ひび割れ充填工法

6.3.1 凍結融解作用による付着性能への影響

ひび割れ充填材の耐凍害性を検討するため、図-6.8に示すような充填供試体を作製し、試験面に水および塩水を張った状態で+5℃～-18℃を1日1サイクルとした凍結融解試験を300サイクル行う実験を実施した。25年度は100サイクル終了後時点での測定を行った。コンクリートの配合は表-6.1と同様とし、試験ケースは表-6.4に示すように、充填材5種類、表面水を淡水と塩水の2種類の計10ケースとした。25年度はサイクル途中の100サイクルにおいて、試験面に付着強度試験用として作製した10×40×10mmの充填材に建研式の金属ジグに接着して精密万能試験機で付着強度試験を実施した。

表-6.5に試験結果を示す。凍結融解100サイクルにおいて、塩水のケースではコンクリート表面にスケーリング劣化が大きく生じたが、サイクル前と100サイクル後の充填材の付着強度には大きな差は見られなかった。なお、充填材の種類によって付着破壊の形態に相違があり、充填材が破断するケースのほか、金属ジグと充填材との界面で剥離する。金属ジグ界面での剥離は、固化後に若干の弾性がある可とう性エポキシ系と金属を強力に接着する接着剤がないため、金属ジグとの接着が物理的に弱い生じている。また、写真-6.3のように、固化後の弾性が大きい変性シリコン系やポリウレタン系は、充填材が大きく変形し、金属ジグと充填材、充填材とコンクリートの両方が剥離する「はがれ」現象が生じたケースもあった。このことから今後の課題として、充填材の固化後の性能に対応した付着強度試験手法を改良・開発する必要がある。さらに、今後、サイクル数が増加した後の付着強度を測定し、充填材の耐凍害性について検証していく。

6.4 まとめと今後の課題

- (1)平成25年度のひび割れ補修工事において、10月を越えた施工において、注入充填率が低くなる傾向があり、低温施工の影響が一因と考えられる。特に厳寒期のセメント系は施工実施の良否を検討する必要がある。
- (2)ひび割れ内部が低温の場合の注入充填性試験において、樹脂系注入材は内部で流動性が低下して滞り、注入材の可使時間を超えると注入が停止し、未充填が発生する。セメント系注入材は先行水が凍結して注入が停止し、

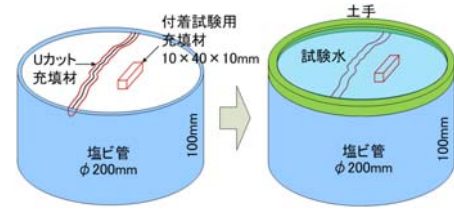


図-6.8 充填供試体の作製

表-6.4 試験ケース

充填材の種類と記号	可とう性エポキシ系		エポキシ系	変性シリコン系	ポリウレタン系
	充填材A	充填材B	充填材C	充填材D	充填材E
	EJ1	EJ2	EJ3	SJ1	PJ2
試験水の種類	淡水				
	塩水(3%NaCl)				
凍結融解サイクル	100サイクル(最終300サイクル)				

表-6.5 付着強度試験結果

試験体	EJ1 (可とう性エポキシ系)				EJ2 (可とう性エポキシ系)			
	淡水		塩水		淡水	塩水		
サイクル数	0	100	0	100	0	100	0	100
付着強度(N/mm ²)	0.1	1.8		1.5	4.3	2.6	2.7	
伸び(mm)	11.9	5.0		6.8	5.9	7.1	4.5	
剥離位置	ジグ面		ジグ面		ジグ面		材破断	

試験体	EJ3 (エポキシ系)			
	淡水		塩水	
サイクル数	0	100	0	100
付着強度(N/mm ²)	7.0	8.5	8.0	7.7
伸び(mm)	2.5	4.4	1.8	3.3
剥離位置	試験面		試験面	

※「ジグ面」:ジグと充填材の界面剥離
 ※「材破断」:充填材の破断
 ※「試験面」:充填材とコンクリートの界面剥離

試験体	SJ1 (変性シリコン系)		PJ1 (ポリウレタン系)			
	淡水	塩水	淡水	塩水		
サイクル数	0	100	0	100	0	100
付着強度(N/mm ²)	1.0	0.8	0.7	0.9	1.2	0.7
伸び(mm)	27.8	42.9	17.0	28.5	17.8	17.0
剥離位置	試験面	試験面	試験面	試験面	試験面	試験面



写真-6.3 付着強度試験実施状況

未充填が発生するケースがある。また、手動式注入は、低温による注入材の滞りで作業終了となるケースで未充填部が発生するケースもある。

(3)セメント系注入材は、貫通ひび割れの場合、空隙の大きい箇所を通過して排出され易く、ひび割れ細部に未充填部が発生し易い。

(4)CIF/CDF試験による一面凍結融解作用において、凍害と塩害の複合作用により、コンクリート表面は非常に劣化し、ひび割れ注入部からも塩分は浸透するが、注入によって塩分浸透量は低減する。

(5)ひび割れ充填材の種類によって剥離形態に相違があり、今後、充填材の固化後の性能に対応した付着試験方法の改良・開発が必要である。

今後とも、ひび割れ修復工法に関する課題を整理し、ひび割れ修復工法マニュアルの作成を目指すものである。

7. おわりに

25年度は、構造物の要求性能に基づく各種補修工法の選定方法について整理するため、ISO規格（ISO16311）に示される要求性能をベースに、補修全体に共通するコンクリートの劣化要因に対して、それぞれの要因の劣化レベル毎に実施される一般的な対策工法を取り纏めた。

また、補修後に再劣化が生じている不具合事例を調査し、劣化状況、存置環境、工法選択理由、施工方法等から不具合原因を推測して改善策を取り纏めた不具合事例集の作成を行った。

各種補修工法において、断面修復工法では、母材との付着強度は、断面修復材の材料物性のみではなく、打継面の凹凸や下地調整の方法によって大きく変化すること、長期的には供試体の端部から徐々に強度低下すること、塩分浸透性はベースとなるモルタルの拡散係数で評価できる可能性があること等が明らかとなった。

表面被覆工法では、これまでの調査試験から、材料選定に関する信頼性設計や早期再劣化等の不具合を抑制するための施工管理項目を把握した。今後、施工条件の相違による耐久性への影響について追跡調査をすすめる。さらに、施工環境として重要となる構造物周辺の温湿度の長期観測を続けており、定量的な施工管理項目の設定資料として活用してゆく。

ひび割れ修復工法では、注入工法において、ひび割れ内部の低温の影響により注入が停止して未充填部が発生すること、注入によって塩分浸透量は低減することなどが明らかとなった。

今後、要求性能に基づく各種補修工法の選択方法について更に考察を深める。また、各種補修工法の性能に影響を与える要因についてさらに実験研究を進め、課題を整理しつつ、補修マニュアルを作成し、これらを取り纏めることで、総合的な補修技術の体系化を目指していきたい。

参考文献

- 1) 仲川勤：膜のはたらき 気体透過膜を中心に、共立出版、pp.27-41、1985.9
- 2) 上田洋、松田芳範、栗林健一、水野清、上原元樹、飯島亭：断面修復および表面被覆がコンクリート構造物の水分分布に与える影響、土木学会第65回年次学術講演会、pp.611-612、V-306、2010.9
- 3) 青山實伸、松田哲夫：凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.807-812、2004.7
- 4) 渡辺暁央、小保田剛規、河野成弘：凍結防止剤による下部工の塩化物イオンの浸透性に関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.741-746、2008.7
- 5) 田中良樹、村越潤：道路橋桁端部における腐食環境の評価と改善方法に関する検討、土木技術資料、Vol.50、pp.16-19、2008.11
- 6) 佐伯竜彦、二木央：不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動、コンクリート工学年次論文集、Vol.18、No.1、pp.963-968、1996.7
- 7) 櫻庭浩樹、熊谷慎祐、宮田敦士、佐々木巖、西崎到：水の挙動に着目した表面被覆材の変状に関する一考察、第31回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集、5-106、pp.350-353、2013.11
- 8) 竹田宣典ほか：凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.427-432、2001
- 9) 渡辺博志：コンクリート構造物の信頼性の向上ーひび割れの影響ー、土木技術資料 平成24年1月号、pp.42-45、2012.1
- 10) 内藤勲ほか：ひび割れ注入工法の現状調査と凍結融解作用が注入後の耐久性に及ぼす影響、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、第13巻、pp.517-522、2013.11
- 11) 山本昌宏ほか：微細なひび割れを持つコンクリート試験体の作製方法とそれを用いたひび割れ補修材の性能確認試験方法に関する研究、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、第12巻、pp.467-472、2012.11
- 12) Jochen Stark ほか（訳：太田利隆ほか）：コンクリートの耐久性第2版、社団法人セメント協会、pp.200-202、2003.8

ESTABLISHMENT OF REPAIR TECHNOLOGIES TO PROLONG THE SERVICE LIFE OF CONCRETE STRUCTURES

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2011-2015

Team : Materials and Resources Research Group (Concrete and Materials Team, Advanced Materials Research Team), Cold-Region Technology Promotion Division (Materials Research Team)

Author : Hiroshi WATANABE, Itaru NISHIZAKI, Fumio TAGUCHI, Akinori SHIMATA, Hiroshi KATAHIRA
Iwao SASAKI, Hiroki SAKURABA
Norihito MIHARA, Isao NAITOH, Susumu YOSHIDA,
Hirotake ENDOH, Yoshinori NONOMURA, Maki MIZUTA, Koji KAWAMURA, Mitsugu KAZUMATA,
Masahiro WATANABE, Tomoyuki MURANAKA, Jun WATANABE, Satoshi SUZUKI

Abstract :

In this fiscal year, we identified performance requirements for common concrete repair methods with considering deterioration mechanisms of concrete structures. The performance requirements are introduced in reference to the newly developed ISO 16311 “Maintenance and repair of concrete structures”. The experimental study on three conventional repair methods for concrete structures, which are surface coating, recasting mortar, and filling of cracks are carried out as well. As for repair method with recasting mortar, bond strength between repair mortar and substrate concrete are discussed. As for repair method with surface coating, failure conditions due to painting construction environments such as low temperature and high humidity and the quality control to prevent various failure conditions are discussed. As for repair method with filling of cracks, the performance of filling under low temperature, the resistance of chloride penetration after freeze-thaw and the performance of adhesion after freeze-thaw are discussed.

Key words : Concrete, Repair, Re-deterioration, Surface coating, Recasting mortar, Filling of cracks