

# 被覆系コンクリート補修補強材料の耐久性に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 17～平 21

担当チーム：材料地盤研究グループ（新材料）

研究担当者：西崎到、守屋進、木嶋健、佐々木巖

## 【要旨】

コンクリート補修補強材料の耐久性評価技術については、開発されている様々な工法の合理的な選定のために必要なライフサイクルを通じたコスト評価の基本となる、適用環境に応じた耐久性に関する基礎資料を得るとともに耐久性評価手法をまとめることを目標としている。塩害およびASR対策用表面被覆材料、連続繊維シート補強材、表面浸透性保護材等の材料・工法について、長期暴露供試体や補修構造物の調査結果から、各種被覆系工法の供用環境ごとの適用性や耐久性に関する情報を得た。さらに、被覆材料の補修効果に大きな影響を与える施工時の温湿度環境について、養生および塗布条件を変化させた材料試験を行い接着強度等への影響を評価した。その結果から、被覆材料の信頼性向上のための施工環境評価手法の基礎資料を整理し、耐久性向上を目指した被覆材料の選定法、施工条件、品質評価法をとりまとめた。

キーワード：塩害、ASR、表面被覆材料、施工環境、連続繊維シート、暴露試験

## 1. はじめに

コンクリート補修補強工法には様々な方法が開発されている<sup>1)</sup>が、その効率的な実施のためにはライフサイクルを通じたコスト評価が必要である。そのためには補修補強材料の適用環境に応じた耐久性に関する情報が必要であるが、このような基礎資料は不足しているのが現状である。このため本研究では、補修補強材料・工法の中で被覆系のものに着目し、長期暴露中の供試体ならびに補修された構造物を調査して、補修補強材料・工法の耐久性に関する情報を整理するとともに、耐久性の評価・向上に関する検討を行った。

塩害およびASR対策用表面被覆材料、連続繊維シート補強材、表面浸透性保護材等の材料・工法について、電気防食工法の効果持続性の検証などの、これまでに実施してきた長期暴露供試体や補修構造物の調査結果から、各種被覆系工法の供用環境ごとの適用性や耐久性に関する情報を整理するとともに、耐久性向上を目指した被覆材料の選定法、施工条件、品質評価法をとりまとめた。また、被覆系補修材料（以下、被覆材料）の補修効果に大きな影響を与える施工時の温湿度環境について、養生および塗布条件を変化させた材料試験を行い接着強度等への影響を評価した。また、電気防食工法の効果持続性の検証として、大型試験体を解体調査して長期耐久性を

評価した。

本報告の構成は以下の通りである。

- 1 概要
- 2 コンクリート表面被覆材料の評価試験方法
- 3 塩害対策用被覆系補修材料の耐久性
- 4 被覆系補修材料の塩害抑制効果
- 5 ASR対策用被覆系補修材料の耐久性
- 6 被覆系補修材料のASR抑制効果
- 7 連続繊維シート補強材料の耐久性
- 8 電気防食工法の効果持続性の検証
- 9 被覆材料の施工環境に関する調査

## 2. コンクリート表面被覆材料の評価試験方法

コンクリート表面被覆材料の評価試験方法には、その要求性能に応じて付着性や遮塩性などさまざまなものがある(表-2.1)。道路協会<sup>2)</sup>や土木学会<sup>1)</sup>をはじめとした各団体の試験法や基準に規定されている被覆材料の性能評価試験法は、材料選定等における基準試験を想定していることもあり、新規塗布材料の遊離塗膜(フリーフィルム)や特定の試験基盤に被覆施工して試料とすることになっている。しかしながら、本研究では、長期間暴露された後の被覆材料の残存性能を評価することを目的としている。施工後にコンクリート表面から被覆材料のみを分離することは困難であるため、試験調査においてはかぶりコンクリートとともに試験せざるを得ない。本研究では、まず、供用後の被覆材料の性能評価に適用するべく、既存の評価試験法規格の修正の検討を行った。

表-2.1 表面被覆材料の要求性能と評価項目

要求性能	評価項目
付着性	コンクリートとの付着強度
ひび割れ追従性	伸び量
遮塩性	Cl <sup>-</sup> 透過量
遮水性	透水量
遮湿性	透湿度
酸素遮断性	酸素透過量

### 2.1 付着性

コンクリート等の施工基盤への被覆材料の付着性には、一般に図-2.1、-2.2に示すプルオフ試験が用いられる。付着性については、試験の目的から、新設時の基準試験にも供用後の残存性能評価にも同じ試験方法が適用できる。

本研究では、コンクリートとの付着性を評価するために、付着治具に40mm×40mmの鋼板を用いたプルオフ式付着試験(建研式)を実施した。付着性試験は原則として現場において実施し、他の試験用にコア採取した箇所の近傍の3箇所において測定した。

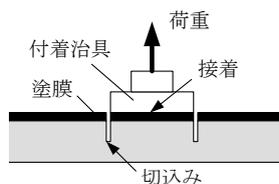


図-2.1 プルオフ式付着試験

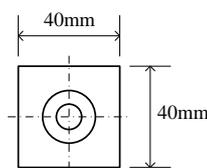


図-2.2 付着治具

### 2.2 ひび割れ追従性

被覆材料のひび割れ追従性を評価する方法にはJSCE-K 532があるが、これは、切り欠きを有する試験基板上に被覆材料を直接塗布して試験を行うものである。故に、今回の検討のように施工済みの被覆材料には、この方法は適用できない。そこで、図-2.3に示す試験を、次に示す手順により行った。

- 1) 直径50~75mm程度の被覆材料付きコアを厚さ10mm程度にスライスする。
- 2) スライス試料の中心軸(図-2.3参照)に沿って、100mm×25mm×1.6mmの研磨した鋼板をエポキシ系接着剤等で被覆材料に接着させる。
- 3) 接着した鉄板の中心軸と垂直な中心軸に沿ってコンクリートに切込みを入れ、供試体とする。切込みは、被覆材料下面から2mmまでを残すように入れる。
- 4) 引張試験機に供試体を設置し、5mm/minで載荷。
- 5) 被覆材料の破断時の伸びを測定する。破断の判定は、JSCE-K 532と同様に行う。

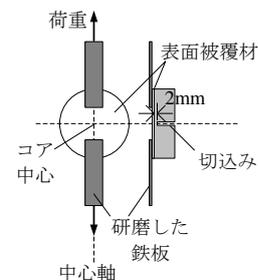


図-2.3 ひび割れ追従性試験

### 2.3 遮水性

被覆材料の遮水性を評価する方法には、JIS A 6909-7.12(常圧透水)やJIS A 1404-11(加圧透水)がある。本研究では常圧透水試験(図-2.4)を実施した。供試体は、原則としてコア試料から調整した直径100mm、厚さ20mmのかぶりコンクリート付のスライス試料を用いた。

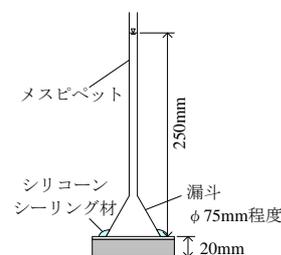


図-2.4 透水試験概要

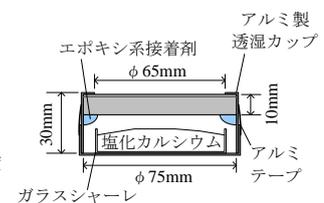


図-2.5 透湿試験

### 2.4 遮湿性(水蒸気透過性)

被覆材料の遮湿性を評価するために、直径75mm、厚さ10mmのコンクリート付きスライス試料を用いて、JIS A

1171-7.11の吸湿試験(図-2.5)と同様の試験を実施した。

## 2.5 酸素遮断性

被覆材料の酸素遮断性は、図-2.6に示す製科研式フィルム酸素透過測定装置を用いた試験(以下製科研式)で評価した。これは、供試体を透過した酸素が電極において還元反応する際に生じる電流変化から、式(2.1)および(2.2)によって酸素透過量を求める試験である。供試体は、直径17mm、厚さ1~2mmに加工したものをを用いた。

$$P = \frac{i^{\infty} l}{4 \times 965 / 224 \times 76 \times A} \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{P}{l \times 10^{-4}} \times \frac{32}{22400} \times 10^3 \times (24 \times 60^2) \times 76 \quad (2.2)$$

ここに、P : 酸素透過係数 (mL・cm/cm<sup>2</sup>・s・cmHg)  
 A : 試料と密着する白金電極の面積 (cm<sup>2</sup>)  
 i<sup>∞</sup> : 測定電流 (μA)  
 l : 試料膜厚 (μm)  
 Q : 酸素透過量 (mg/cm<sup>2</sup>・day)

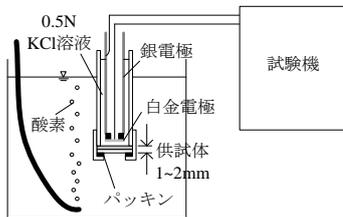


図-2.6 製科研式酸素透過性試験

## 2.6 遮塩性

被覆材料の遮塩性を評価する方法には、道路協会のしゃ塩性試験方法(拡散セル法)がある<sup>2)</sup>。これはフリーフィルムを供試体とする試験である。

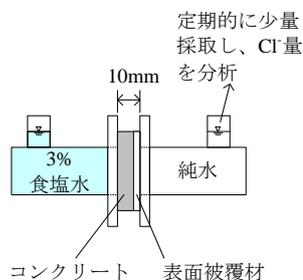


図-2.7 しゃ塩性試験(拡散セル法)

本研究では、実構造物および暴露供試体から採取したコンクリートコアを用いるため、コア表面をスライスし

た被覆コンクリート試料を用いてこれらの性能を評価した。そこで、試験片の設置方法等について、以下の実験検討を行った結果、供試体のコンクリート面を3wt%食塩水側に<sup>4)</sup>、被覆材料表面を純水側に配置することとした。

### 2.6.1 遮塩性試験条件決定のための予備試験

通常は、3%食塩水が表面被覆材料の表面側、純水が下面側となるように供試体を設置する。しかし、今回は塩害環境下であり、コンクリートに塩分が既に侵入している可能性がある。コンクリート中の塩分が純水に溶出する影響を避けるために、コンクリート側を3%食塩水となるように配置して試験を行った研究があり<sup>3)</sup>、本研究もこれを基本としたが、その影響を事前に評価して試験条件を決定する必要があるため、純水をコンクリート側に配置した場合も検討した。

表-2.2 予備試験に用いた供試体の塗装仕様

工程	材料	塗膜厚
プライマー	不明	—
パテ	不明	—
中塗り	エポキシ樹脂塗料	60μm
上塗り	ポリウレタン樹脂塗料	30μm

予備試験には、沖縄県大宜味村および茨城県つくば市にて平成元年度より17年間暴露していた表面被覆コンクリート供試体<sup>3)</sup>を用いた。表面被覆材料の仕様は表-2.2に示すとおりで、沖縄、つくばとも同時に製作された。沖縄の暴露供試体にはあらかじめコンクリートに塩分(NaCl)が10kg/m<sup>2</sup>混入されており、これを塩分含有供試体として用いた。一方、つくばの暴露供試体は練混ぜの段階ではコンクリートに塩分を混入させおらず、また塩害環境下に暴露していなかったことから、これを塩分非含有供試体として用いた。また、厚さ10mmのコンクリートが遮塩性試験結果に与える影響を調査するために、つくばの暴露供試体から採取した表面被覆材料の無いコンクリートのみの供試体でも試験を実施した。試験数は1種類の供試体当たり3回とした。

### 2.6.1 予備試験結果と遮塩性試験の試験条件

試験結果を図-2.8に示す。コンクリート中に塩分を含有していないつくばの供試体では、表面被覆材料のある供試体に比べてコンクリートのみの供試体の方が純水側の塩分濃度増加が認められた(図-2.8(a))。従って、コンクリートが付着している供試体を用いても、表面被覆材料の有無による遮塩性の差を明確に評価できることが

わかった。また、供試体の向きがどちらの場合でも、純水に溶出した塩分濃度の測定値はほぼ測定限界であった(図-2.8(b))。従って、遮塩性の評価は供試体の向きによらず行えることがわかった。一方、表面被覆材料のコンクリート中に塩分を含有している沖縄の供試体(図-2.8(c))については、コンクリートを3%食塩水側に配置した場合はつくばの供試体とほぼ同等の値を示したが、コンクリートを純水側に配置した場合は塩分濃度が高かった。即ち、コンクリート中の塩分が純水に溶出したものと考えられる。従って、コンクリート中に塩分が含まれる場合は、コンクリートを純水側に配置してはならないことがわかった。

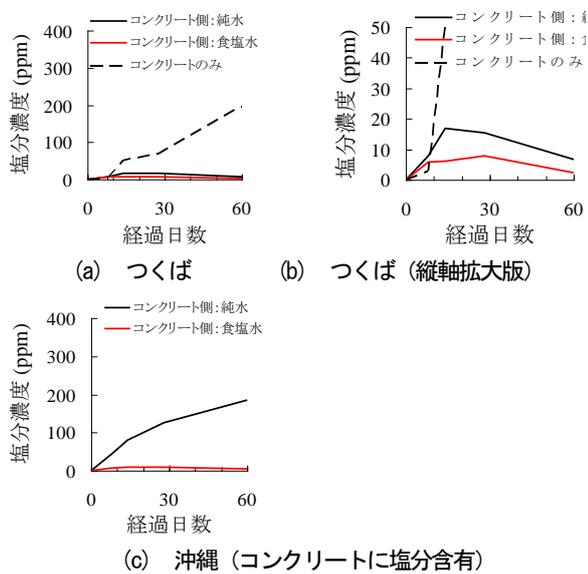


図-2.8 遮塩性予備試験の結果(純水側の塩分濃度)

以上の結果より、供試体はコンクリート側を3%食塩水側に、表面被覆材料上面側を純水側に配置して以後試験を実施することとした。

### 3. 塩害対策用の被覆系補修材料の耐久性

塩害対策に用いられる表面被覆材料の耐久性調査として、宮崎県、北海道、石川県の橋梁を調査対象に試験を行った。また、沖縄県の塩害環境に17年間暴露した暴露供試体も調査対象とした。さらに、同一箇所では様々な被覆材料を適用した塩害補修橋梁である新潟県内の橋梁の詳細調査を行った。

#### 3.1 腐食環境と被覆材料の耐久性

##### 3.1.1 調査対象橋梁

宮崎県、北海道、石川県の3つの補修塩害構造物および、沖縄県に17年間暴露した供試体<sup>4)</sup>の表面被覆材料を調査した。調査した表面被覆材料の仕様を表-3.1に示す。

橋1(宮崎)は、昭和50年に竣工されたPCT桁橋であり、平成17年度に土砂崩れに巻き込まれる形で落橋したものである(写真-3.1)。現在の表面被覆材料は、平成12年に塩害損傷部を断面修復した後に施工されたものである。また、一部には旧被覆材料(ポリブタジエンゴム系)が残存しており、その上から新被覆材料を施工した箇所もあった。なお、上フランジ側面には表面被覆が施されていない。試料は、P2-P3径間の陸側ウェブより採取した。

橋2(北海道)は、昭和60年に竣工されたPC箱桁およびPCI桁からなる橋梁であり、平成16年度に中央4径間が落下したものである。現在の表面被覆材料は、平成11年~12年にかけて施工されたものである。試料は、写真-3.2に示す箇所の海側および陸側の計6箇所から採取した。

橋3(石川)は、昭和57年に竣工されたPCI桁およびPC箱桁からなる橋梁であり、平成19年度に能登半島地震を経験したものである。試料は、図-3.3に示すP13橋脚4面の基礎から高さ5mの範囲から採取した。

供1~7(沖縄)<sup>5)</sup>は、平成2年11月から茨城県つくば市および沖縄県大宜味村で暴露していたコンクリート供試体で、表面に種々の表面被覆材料が施工されているものである。暴露供試体には、180mm×180mm×500mmの無筋コンクリート供試体と、200mm×200mm×1,000mmの塩分混入鉄筋コンクリート供試体の2種類がある。暴露状況を写真-3.4に示す。

表-3.1 補修塩害構造物・暴露供試体の塗装仕様

試料 No.	工程・材料・標準膜厚	総膜厚 ( $\mu$ m)	暴露 年数
橋 1(宮崎) クロロプレ ンゴム系	エポキシ樹脂プライマー	425	7 年
	クロロプレンゴム中塗り 55 $\mu$ m		
	ビニロンシート		
	クロロプレンゴム中塗り 55 $\mu$ m $\times$ 2 層		
一部に旧被 覆材料残存	ハイパロンゴム上塗り 35 $\mu$ m $\times$ 2 層	1,540	21 年
	エポキシ樹脂パテ		
	ポリブタジエンゴム料中塗り $\times$ 3 層 ポリウレタン樹脂上塗り $\times$ 2 層		
橋 2(北海 道) 柔軟型エポ キシ樹脂系	エポキシ樹脂プライマー	1,820	7~8 年
	エポキシ樹脂パテ		
	柔軟型エポキシ樹脂中塗り 60 $\mu$ m $\times$ 3 層 ポリウレタン樹脂上塗り 30 $\mu$ m		
橋 3(石川) エポキシ樹 脂系	エポキシ樹脂プライマー	240	14~ 15 年
	エポキシ樹脂パテ		
	エポキシ樹脂中塗り 60 $\mu$ m		
	艶消しふっ素樹脂上塗り 25 $\mu$ m		
供 1(沖縄) エポキシ樹 脂系	プライマー(詳細不明)	300	17 年
	パテ(詳細不明)		
	エポキシ樹脂塗料中塗り 60 $\mu$ m		
	アクリルシリコン樹脂塗料上塗り 30 $\mu$ m		
供 2(沖縄) エポキシ樹 脂系 (表-2.1 と同 一の試料)	プライマー(詳細不明)	278	17 年
	パテ(詳細不明)		
	エポキシ樹脂塗料中塗り 60 $\mu$ m		
	ポリウレタン樹脂塗料上塗り 30 $\mu$ m		
供 3(沖縄) ふっ素樹脂 系	エポキシ樹脂プライマー	280	17 年
	エポキシ樹脂パテ		
	ふっ素樹脂塗料中塗り 40 $\mu$ m		
	ふっ素樹脂塗料上塗り 40 $\mu$ m		
供 4(沖縄) 超柔軟型ポ リウレタン樹 脂系	ウレタン樹脂プライマー	1,767	17 年
	超柔軟型ポリウレタン樹脂塗料中塗り 1,500 $\mu$ m		
	柔軟型アクリルシリコン樹脂塗料上塗 り 30 $\mu$ m		
供 5(沖縄) ポリブタジ エンゴム系	プライマー(詳細不明)	913	17 年
	パテ(詳細不明)		
	ポリブタジエンゴム中塗り 1,000 $\mu$ m		
	柔軟型ふっ素樹脂塗料上塗り 30 $\mu$ m		
供 6(沖縄) 柔軟型ポリ マーセメント 系	プライマー(詳細不明)	593	17 年
	パテ(詳細不明)		
	柔軟型ポリマーセメント中塗り 1,000 $\mu$ m		
	柔軟型アクリル樹脂塗料上塗り 30 $\mu$ m		
供 7(沖縄) 柔軟型エポ キシ樹脂系	エポキシ樹脂プライマー	515	17 年
	エポキシ樹脂パテ		
	柔軟型エポキシ樹脂塗料中塗り 480 $\mu$ m		
	柔軟型ポリウレタン樹脂塗料上塗り 30 $\mu$ m		



写真-3.1 橋 1



写真-3.2 橋 2

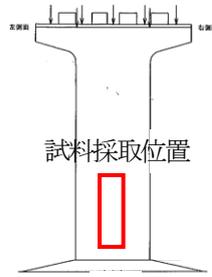


図-3.3 橋 3 の P13 橋脚



(a) 茨城県つくば市 (b) 沖縄県大宜味村

写真-3.4 供試体暴露状況



写真-3.5 P13 橋脚外観



写真-3.6 橋 3 の外観

### 3.1.1 調査試験結果

#### (1) 外観

橋1の外観は、落橋時の損傷と考えられる箇所を除くと、若干の点錆、腫れが見られた。また、表面被覆の施されていない上フランジ側面付近より錆汁が発生していた。その他大部分には特に異常は見られなかった。

橋2の外観は、一部にひび割れおよび錆汁が確認されたが、大部分には異常は見られなかった。

橋3の外観は、橋脚部分には地震の影響によるせん断ひび割れが発生し、調査のために表面被覆材料を除去した箇所があったが、その他には特に異常は見られなかった(写真-3.5)。また、写真-3.6に示すように上部工には多量の点錆やASR(アルカリ骨材反応)によるものと考えられるひび割れが多数発生していた。

暴露供試体の外観は、今回使用したものに限れば特に異常は見られなかった。

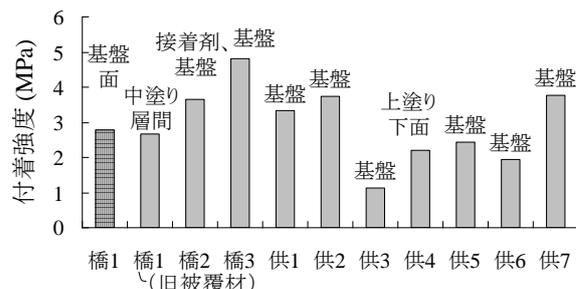
#### (2) 付着性

付着性試験結果を図-3.1に示す。橋1、橋2、供4を除く表面被覆材料は、コンクリート基盤における破壊形態を示した。つまり、これらの付着強度は主にコンクリートの物性を示しており、実際の付着強度はより大きいものと考えられ、十分な付着性を維持していることがわかった。橋2は、接着剤における破壊形態やコンクリート基盤における破壊形態を示した。従って、橋2についても実際の付着強度はより大きいものと考えられ、十分な付着性を維持していることがわかった。

橋1はコンクリート基盤面における破壊形態を示し、付着強度は2.8MPaであった。橋1の初期値は2.8MPaであった<sup>4)</sup>ことから、7年間では付着強度はほとんど変化しなかったことがわかった。

約21年が経過した旧被覆材料(ポリブタジエンゴム系)の付着強度は2.7MPaで新被覆材料とほぼ同等の値を示したが、破壊形態は中塗り層間での破壊であった。超柔軟型ポリウレタン系の供4も上塗りと中塗りの層間で破壊する形態を示した。両者は共に超柔軟型であり、膜厚も1,500 $\mu\text{m}$ を超える厚膜型であったことから、層間破壊が生じ易かったものと考えられる。

土木学会では、付着性の基準としてJSCE-K-531で測定した場合1.0MPa以上、柔軟型被覆材料の場合は0.7MPa以上を提案している<sup>1)</sup>。今回の試験結果はこれを全て上回っており、いずれも十分な付着性を維持していることがわかった。



※グラフ上部に破壊形態を記述

図-3.1 付着性試験結果

#### (3) ひび割れ追従性

ひび割れ追従性試験結果を図-3.2に示す。膜厚が1,000 $\mu\text{m}$ を超える柔軟型被覆材料の橋1(旧)、供4、供5は破断時伸びが2mm以上に達し、土木学会の提案する高追従タイプの基準値1.00mm以上(評価方法が本研究のものとは若干異なるJSCE K532における値)<sup>1)</sup>を示し、ひび割れ追従性に非常に優れていることがわかった。特に、膜厚が1,500 $\mu\text{m}$ を超える供4は、供試体の鉄板が剥離するまで試験を続けても破断しなかった。次いで、クロロプレンゴム系の橋1、柔軟型エポキシ樹脂系の橋2および供7となった。一方、柔軟型ではない被覆材料については、破断時伸びが0.4mm以下であり、柔軟型被覆材料に比べて低いひび割れ追従性を示した。これは、土木学会の提案する基準<sup>1)</sup>でも低追従に分類される程度である。また、膜厚が1,000 $\mu\text{m}$ を超える柔軟型ポリマーセメント系の供6は破断時伸びが0.14mmであり、柔軟型ではない被覆材料と同等のひび割れ追従性を示した。

以上の結果から、本研究で用いた柔軟型被覆材料は17~21年程度経過しても高いひび割れ追従性を有していることがわかった。

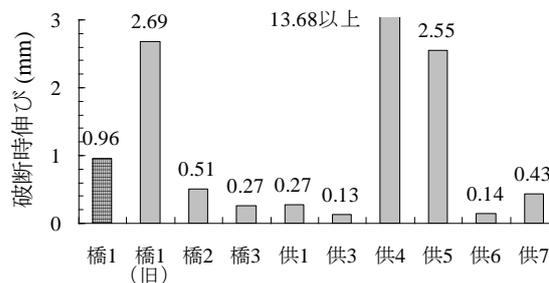


図-3.2 ひび割れ追従性試験結果

#### (4) 遮塩性

遮塩性試験の結果を図-3.3に示す。30日のCl<sup>-</sup>透過量はいずれの表面被覆材料も $12.5 \times 10^{-4} \sim 17.1 \times 10^{-4} \text{mg/cm}^2 \cdot \text{day}$ の範囲内にあり、表面被覆材料がない場合(コンクリートのみ)に比べて低い値を示した。試料間で目立った差は見られなかった。道路協会ではCl<sup>-</sup>透過

量の基準を  $10^{-2}$  mg/cm<sup>2</sup>·day 以下 (A、B 種) および  $10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup>·day 以下 (C 種) としている<sup>2)</sup>。橋3および供2が道路協会のA種に相当し、基準値も満たしていた。その他はC種またはそれに準じた表面被覆材料であり、基準値を満たさなかった。また、橋1の初期値は  $10^{-5}$  mg/cm<sup>2</sup>·day であった<sup>4)</sup> ことから、当初は高い遮塩性を示したが、徐々に低下していったものと考えられる。

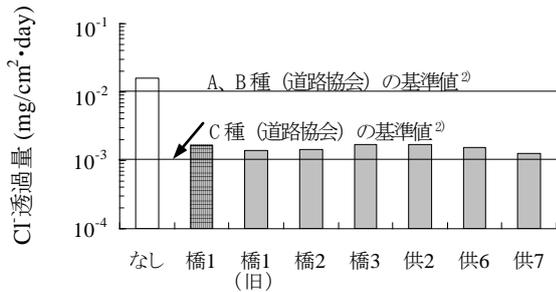


図-3.3 遮塩性試験結果 (30日のCl<sup>-</sup>透過量)

### (5) 遮水性

透水試験の結果を図-3.4に示す。表面被覆材料がない場合(コンクリートのみ)は、試験時間が24時間に達する前に全試験水が透水したが、表面被覆材料がある場合は、透水量が0~22.6mL/m<sup>2</sup>·dayに留まった。

橋1の初期値は0.07mL/m<sup>2</sup>·dayであった<sup>4)</sup> ことから、遮水性は7年間で低下が見られた。また、柔軟型ポリマーセメント系の供6が最も透水量が高かったが、建設省総プロのアルカリ骨材反応被害構造物(土木)の補修・補強指針(案)<sup>6)</sup>では、基準値として20mL/m<sup>2</sup>·day以下を提案しており、これを若干上回る程度であった。供6以外の表面被覆材料はこの基準を満たしており、7~21年程度はASR補修のための遮水性が期待できる程度の性能を維持していたことがわかった。

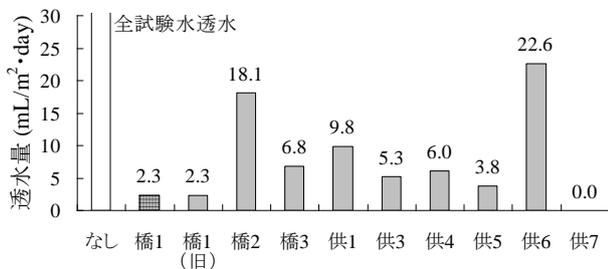


図-3.4 透水試験結果 (24時間の透水量)

### (6) 遮湿性

透湿(吸湿)試験の結果を図-3.5に示す。橋3(14~15年経過)および供1(17年経過)のデータを取得した。

土木学会では遮湿性の基準(案)として5g/m<sup>2</sup>·day以下を提案している<sup>1)</sup>が、これらの透湿度は既にこの値を上回っていた。

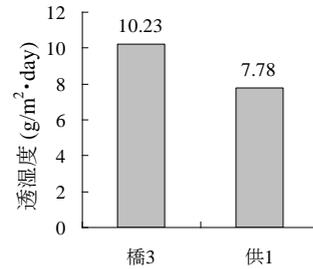


図-3.5 透湿(吸湿)試験結果

### (7) 酸素遮断性

酸素透過性試験の結果を図-3.6に示す。柔軟型ポリマーセメント系の供6およびクロロプレンゴム系(ビニロンシート付き)の橋1の酸素透過量が  $4.4 \times 10^{-2}$  ~  $5.1 \times 10^{-2}$  mg/cm<sup>2</sup>·dayと比較的多く、次いで超柔軟型ポリウレタン樹脂系の供4が  $1.1 \times 10^{-2}$  mg/cm<sup>2</sup>·dayを示した。その他の表面被覆材料は、 $0.1 \times 10^{-2}$  mg/cm<sup>2</sup>·day以下と少なく、特にエポキシ系およびポリブタジエンゴム系のは  $0.05 \times 10^{-2}$  mg/cm<sup>2</sup>·day以下を示し、7~21年が経過しても酸素はほとんど通さないことがわかった。

酸素透過量が  $4.4 \times 10^{-2}$  mg/cm<sup>2</sup>·dayと比較的多かった橋1は、図-3.4より遮水性はまだ十分に確保されており、塩害補修効果はまだ期待できるものと考えられる。

表面被覆材料がない場合(コンクリートのみ)では、図-2.6の電極部に水が浸透してしまい、試験を行うことができなかった。

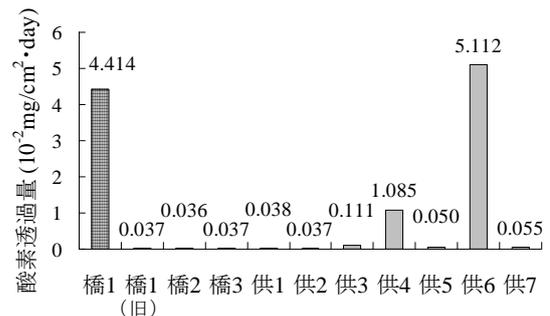


図-3.6 酸素透過性試験(製科研式)結果

### 3.2 同一地点における種々の被覆材料の耐久性

コンクリート補修工法として様々な表面被覆材料が開発されているが、その効果的な実施のためにはライフサイクルを通じたコスト評価が必要である。そのためには適用環境に応じた補修材料の耐久性に関する情報、たとえば、再劣化までの耐久性として何年程度期待できるのか等の知見が不可欠であるが、このような基礎資料は不足しているのが現状である。本研究では、塩害により補修された橋梁を調査して、被覆系補修材料の耐久性に関する情報を整理した。

上述の通り、宮崎県、北海道、石川県などの塩害補修構造物や、沖縄県に暴露した供試体の被覆材料を調査し、腐食環境が異なる場合の被覆材料の耐久性を評価した。そこで、被覆材料の耐久性の相対評価として、同一箇所でも様々な被覆材料を試験的に適用した塩害補修橋梁の詳細調査を行った。各種被覆材料の耐久性に関する情報を整理するとともに、表面被覆材料によりコンクリート内に封止された塩化物イオンの挙動を調べた。

#### 3.2.1 調査の概要



[橋の向こう側は海(砂浜)]

写真-3.7 各種塩害対策被覆を適用した調査対象橋梁  
海岸線の砂浜上に架設された塩害補修橋梁から各種被

表-3.2 調査橋梁(旧板貝橋)の概要

架橋位置	国道345号線、新潟県村上市北部の海岸	
施工年度	橋長13.6m 幅員6.5m 1径間・3主桁(RCT型)	
S43.2	1968	竣工
S59.12	1984	新橋完成により本線用途廃止
S60	1985	試験施工、室内試験
S61	1986	1年後追跡調査(外観調査)
S62	1987	2年後追跡調査(外観調査)
H20	2008	23年後追跡調査(詳細調査)

覆材料を採取して残存性能を評価することにより、表面被覆材料の塩害補修効果の耐久性について検討した。

#### 3.2.2 試験橋梁および被覆材料

調査対象とした橋梁(旧板貝橋)は、建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」の研究において、補修工法・材料の適用性や耐久性を調査する目的で、昭和60年に試験施工が行われた<sup>6)</sup>。試験橋の概要および経過を表-3.2に示す。今回の調査時には、被覆材料による補修から23年が経過している。

調査した橋梁の全景を写真-3.7に、全体図を図-3.7示す。調査対象の橋梁は全12工区に分けられ、有機系から無機系にわたる材料が選定され、それぞれ異なる被覆材料が施工されている。被覆材料の仕様と工区割りを図-3.8に示す。被覆材料の試験対象工区は、様々な被覆材料の耐久性データを得るため、実績等を勘案し図-3.8の太線枠に示す7工区の被覆材料を選定した。いずれの材料も、道路橋の塩害対策指針(案)・同解説<sup>2)</sup>の品質を満足するものである。被覆材料の試験体は、評価対象工区のRCT桁のウェブ(下部主鉄筋の直上)から、コアドリルを用いてかぶりコンクリートとともに採取し、2で設定した各試験法で評価した。

塩化物イオンの分布を調べるために、ウェブ2箇所(F-5, J-2)から貫通コアを採取した。これは、昭和60年補修時の調査において塩化物イオン濃度分布を測定した箇所の近傍である。なお、補修仕様は欠損部のみ部分パテ等による断面修復であるが、採取コアには部分修復箇所は見あたらなかった。

#### 3.2.3 調査結果

##### (1) 外観

外観は、工区により若干の膨れやひび割れが見られたものの、全体としては健全に近い状態であった。なお、桁下面に亀裂があり錆汁が発生している箇所があったが、これは被覆材料の施工以前から潜在的に存在した損傷が補強されることなく被覆されたことによるものと見受けられた。さらに、水分が滞留し湿気がこもりやすい支承周りのほか、桁間の内側では主にシリコン系の被覆材料において苔状のものが付着している工区があった。これは、表面の撥水効果ならびに格子状クロスパターンによる細かな表面凹凸により、被覆材料表面に水滴が滞留しやすい状態にあることが理由として考えられる。

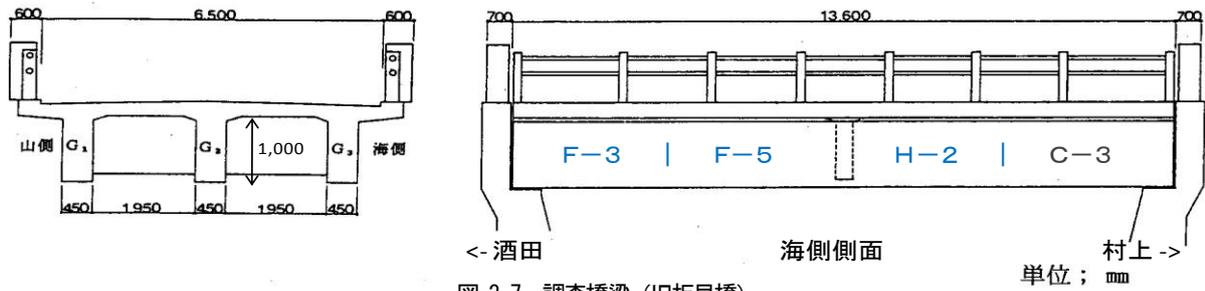


図-3.7 調査橋梁 (旧板貝橋)

位置	被覆材	仕様	被覆材	仕様	被覆材	仕様	被覆材	仕様
G3 (山側)	表面被覆: F-4	450 $\mu$	表面被覆: J-2	500 $\mu$	表面被覆: I-2	550 $\mu$	表面被覆: A-3	6,500 $\mu$
	中塗	エポキシ系塗料3層	中塗	シリコン系塗料2層	中塗	シリコン系塗料5層	中塗	SBR系ポリマーセメントモルタル3層
	上塗	ポリウレタン塗料2回	上塗	シリコン系塗料1回	上塗	シリコン系塗料1回	上塗	アクリル塗料1回
G2	表面被覆: B-3	2,600 $\mu$	表面被覆: E-3	2,700 $\mu$	表面被覆: G-2	1,000 $\mu$	表面被覆: D-3	6,000 $\mu$
	中塗	SBR系ポリマーセメントモルタル3層	中塗	PAE系ポリマーセメントビニロン樹脂1層	中塗	アクリル系塗料2層	中塗	PAE系ポリマーセメントモルタル4層
	上塗	アクリル塗料2回	上塗	アクリルウレタン塗料2回	上塗	アクリルウレタン塗料2回	上塗	シラン系化合物1回
G1 (海側)	表面被覆: F-3	1,200 $\mu$	表面被覆: F-5	1,000 $\mu$	表面被覆: H-2	1,370 $\mu$	表面被覆: C-3	11,500 $\mu$
	中塗	エポキシ系塗料ガラスクロス2層	中塗	ポリブタジエン系塗料2層	中塗	クロロプレン系塗料ビニロンシート1層	中塗	SBR系ポリマーセメントモルタル4層
	上塗	ポリウレタン塗料2回	上塗	ポリウレタン塗料2回	上塗	クロロホル化・ポリエチレン塗料2回	上塗	なし

図-3.8 被覆材料の仕様と工区割り —太線枠は今回調査した工区—

### (2) 付着性

被覆材料の付着性試験結果を図-3.9に示す。エポキシ系の被覆材料(F-3, F-4)は、全ての試験体でコンクリート基盤における破壊形態を示した。つまり、これらの付着強度は主にコンクリートの引張強度を示しており、実際の付着強度はより大きく、十分な付着性を維持していることがわかった。シリコン系被覆材料(I-2)は、長期供用後にもかかわらず被覆材料表面のぬれにより付着治具を十分に接着できないほどの表面活性を有し、被覆材料本来の付着性を測定できなかった。その他の被覆材料は、被覆層の界面、あるいは被覆層内で破壊した。

土木学会では、JSCE-K-531で測定した場合1.0MPa以上、柔軟型被覆材料の場合は0.7MPa以上の基準を提案している<sup>1)</sup>。今回の試験結果はいずれもこれを上回っており、23年の供用後においても十分な付着性を維持していることがわかった。

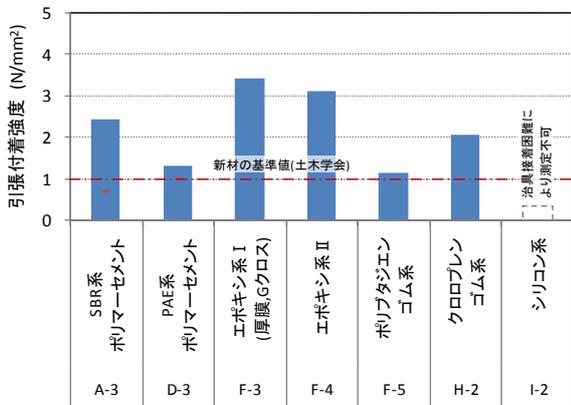


図-3.9 付着性試験結果

### (3) ひび割れ追従性

ひび割れ追従性試験結果を図-3.10に示す。図中に付記した土木学会の提案する基準値<sup>1)</sup>は、新設時の材料品質を対象とし、かつ評価方法が本研究のものとは若干異なるJSCE-K532における値による規定であり、参考として示したものである。ポリブタジエンゴム系は破断時伸びが4mm程度に達し、土木学会の提案する高追従タイプに相当する値<sup>1)</sup>以上を示し、ひび割れ追従性に非常に優れることがわかった。また、ガラスクロス入り厚膜型エポキシ、クロロプレンゴム系、シリコン系も、1mm以上の伸びを示した。一方、ポリマーセメント系およびエポキシ系の被覆材料は、破断時伸びが0.4mm以下であり、低追従に分類される比較的低いひび割れ追従性を示した。

以上の結果から、ポリマーセメントなど追従性の低い材料もあるものの、本調査で用いた被覆材料は23年経過しても高いひび割れ追従性を有するものもあることがわかった。

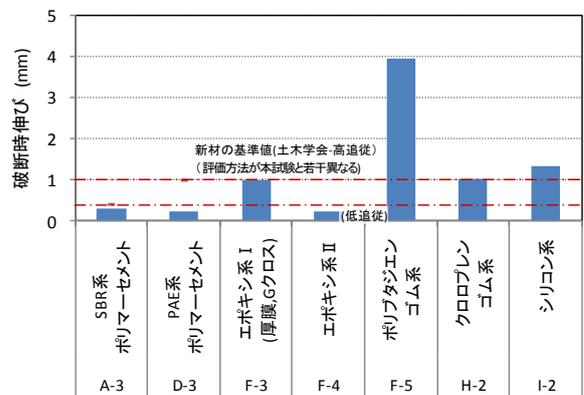


図-3.10 ひび割れ追従性試験結果

#### (4) 遮水性

透水試験の結果を図-3.11に示す。ポリブタジエンゴム系およびクロロプレンゴム系被覆材料が優れた値を示し、透水量が $20\text{mL}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以下であった。

塩害対策用ではないが、遮水性の基準としては建設省総プロのアルカリ骨材反応被害構造物（土木）の補修・補強指針（案）<sup>6)</sup>があり、新設時の材料品質として $20\text{mL}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以下を提案している。今回の評価試料でこの値を満足するものはゴム系の2試料のみであった。

その他の被覆材料は、いずれも $40\text{mL}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 程度以上を示しており、特にPAE系ポリマーセメントは $120\text{mL}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ を超えていた。これらの材料が当初からこのような物性であったとは考えにくく、供用中の劣化などを検証する必要がある。

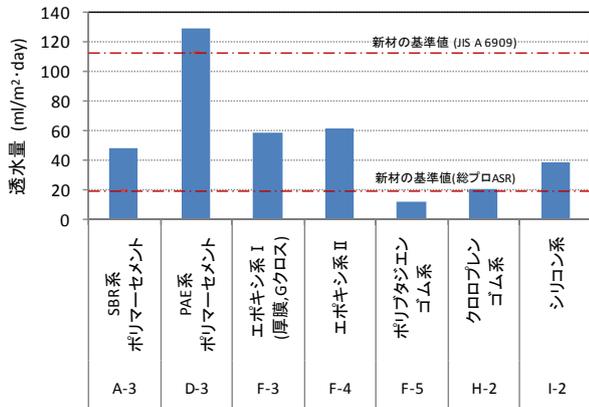


図-3.11 透水試験結果 (24時間の透水量)

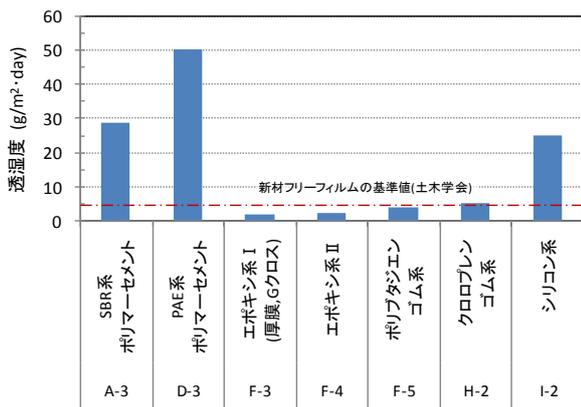


図-3.12 透湿試験(カップ法)結果

#### (5) 遮湿性 (透湿試験)

遮湿性を評価するための透湿試験の結果は、図-3.12に示す通り、 $5\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以下のものと、 $20\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ を超えるものに二分された。そして、エポキシ系を除き、透水と透湿の試験結果は同様な傾向を示していることが

わかる。なお、土木学会では、新材のフリーフィルムに対する遮湿性の基準（案）として、 $5\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以下を提案している<sup>1)</sup>。

#### (6) 酸素遮断性

酸素透過性試験の結果を図-3.13に示す。なお、ポリマーセメント系の被覆材料はいずれも6mm程度の厚さがあり試験機への装着が困難であったため、上塗り+中塗りの一部（膜厚は約半分）となるように中塗り下層を研磨して試験し、膜厚から透過係数として求めた結果である。

既往調査における同系統試料の測定結果<sup>4)</sup>と同様に、クロロプレンゴム系の酸素透過量が比較的多いほか、ガラスクロス入り厚膜型エポキシ系が大きな値を示した。また、やはり既往調査と同様に、ポリブタジエンゴム系のもは $0.05\times 10^{-2}\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$ 以下を示したほか、PAE系ポリマーセメントの酸素遮断性が非常に高かった。これらの材料は、23年が経過しても酸素はほとんど通さないことがわかった。なお、本試験法は水浸状態での酸素透過性を評価するもので、気相中（表面 or 被覆層乾燥、内部湿潤状態）での酸素供給を評価するものではないことに留意する必要がある。

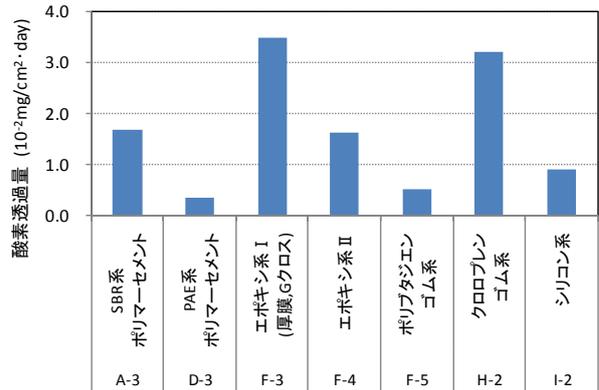


図-3.13 酸素透過性試験 (製科研式) 結果

#### (7) 遮塩性

遮塩性試験の結果を図-3.14に示す。30日のCl<sup>-</sup>透過量はいずれの被覆材料も $10^{-2}\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$ 未満である。今回はコンクリート付の被覆材料で評価試験方法がやや異なるものの、道路協会の基準値<sup>2)</sup>と対比してみると、いずれも $10^{-2}\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$ 以下 (A, B種) を満足し、さらに、SBR系ポリマーセメントとガラスクロス入り厚膜型エポキシ系は、 $10^{-3}\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$ 以下 (C種) に相当し、23年間供用後でも優れた遮塩性を有することがわかった。

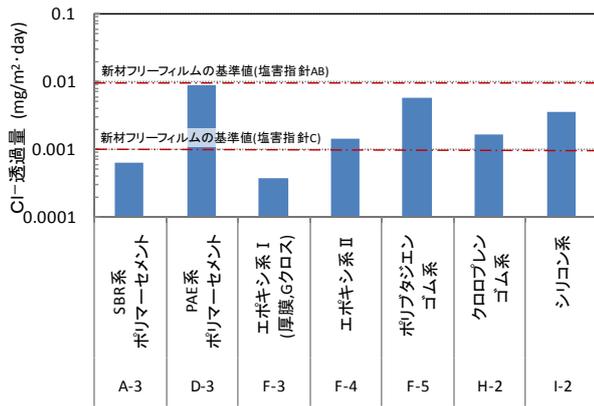


図-3.14 遮塩性試験結果 (30日のCl<sup>-</sup>透過量)

### 3.2.3 まとめ

塩害補修橋梁の調査から得られた、23年が経過した各種被覆材料の耐久性状をまとめると以下の通りある。道路橋の塩害対策指針(案)・同解説に適合した被覆材料は長期経過後も大きな性能低下はみられず、適切に選定施工される限り被覆材料の性能は長期間確保されるといえる。

- 1) 付着耐久性は、長期供用後もほとんどの材料が良好な性能を有するが、ひび割れ追従性がやや小さい材料もある。
- 2) ポリマーセメント系の被覆材料の中には長期供用後の水分や水蒸気の遮断性能が低いものがある。
- 3) 塩化物イオンの遮断性能は、いずれの材料についても長期供用後も良好な性能を有している。

## 4. 被覆系補修材料の塩害抑制効果

### 4.1 塩化物イオンの移動挙動

表面被覆工法による補修では、補修後の外部からの侵入は原則として排除されるものの、被覆により塩化物イオンを封じ込めてしまうことから、劣化段階を勘案して工法の選定と被覆の設計を行う必要がある。土木学会では、拡散モデルによる有限要素解析等から断面修復深さの設計のケーススタディを示している<sup>1)</sup>。被覆内部に封じ込められた塩化物イオンの実橋での再拡散挙動を確認するために、本調査の結果から拡散解析を行った。

#### 4.1.1 塩化物再拡散の試験結果

3.2で調査した橋梁は、相当量の塩化物イオンが侵入した橋梁を被覆材料により補修したものである。このため、各種被覆材料の比較評価とともに、塩化物再拡散の実証評価に好適な試験施工である。

補修後23年の塩化物イオンの移動挙動を、昭和60年補修時の試験結果とともに図-4.1、4.2に示す。採取工区は2.2に示す2箇所(F-5, J-2)で、RCT桁のウェブ(下部主鉄筋の直上で帯鉄筋の間)から貫通コアを採取した。なお、貫通コア試料は、補修前の調査時の資料から近傍と考えられる箇所を特定し採取したが、全面に表面被覆がなされていることもあり、同じ箇所であるとは限らない。

昭和60年の補修時調査における塩化物イオンは表面ほど濃度が高く、橋梁外面よりも内部の桁間(F-5の山側、J-2の海側)のほうが塩分浸透量は大きく、いずれも10kg/m<sup>3</sup>以上に達していることがわかる。

補修時点では、かぶりコンクリート内に高濃度の塩化物イオンが侵入していたものの、鉄筋位置では腐食限界濃度に達成していなかった。しかしながら、今回調査においては、内部の塩化物イオンが再拡散し、鉄筋位置の塩化物イオンが腐食限界濃度を超える可能性があることがわかった。前述の被覆材料の性能試験結果では遮塩性に問題はなく、また最表面付近の塩化物イオン濃度がその内側に比べて低いことから、補修後の新たな塩分供給はほとんどないものとみられる。なお、J-2の海側では補修時に比べて、塩化物イオン濃度が高くなっている。その理由としては、試料採取箇所が一致していないこともあり得るが、図中に示したように、この箇所のみが中性化がやや進んでおり、中性化により塩化物イオンが濃縮した可能性もある。

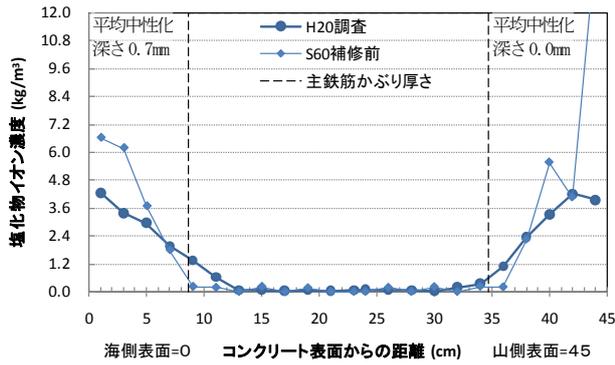


図4.1 補修前後の塩化物イオン濃度分布の変化(F-5)

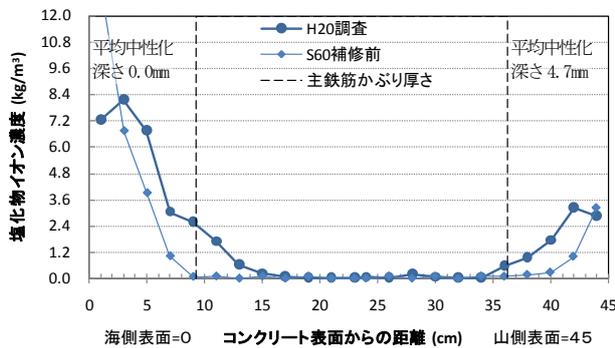


図4.2 補修前後の塩化物イオン濃度分布の変化(J-2)

#### 4.1.2 塩化物の再拡散解析結果

塩化物イオンの浸透を Fick 拡散則にもとづき解析した結果を図-4.3 に示す。コンクリート中の塩化物イオン

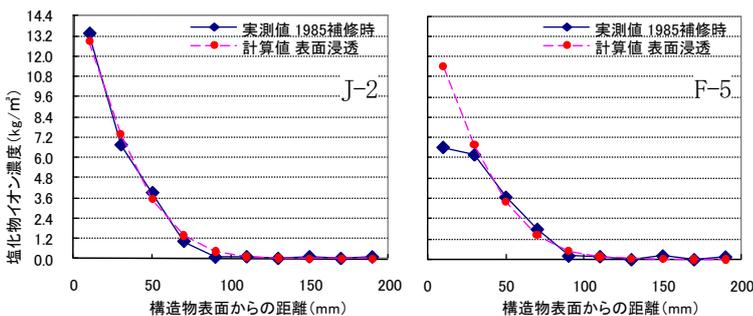


図-4.3 竣工～補修までの塩化物イオン拡散解析結果の例

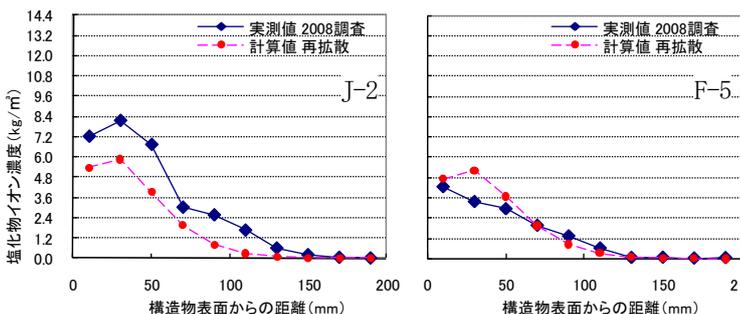


図-4.4 1985 補修～2008 調査の塩化物イオン拡散解析結果の例

の見掛けの拡散係数は、拡散式に基づく濃度分布曲線を、補修前調査時の塩化物イオン濃度分布測定結果と比較<sup>7)</sup>することにより設定した。新設から昭和 60 年補修時までの塩化物イオンの浸透はおおむね拡散則と一致していることがわかる。

そこで、ここから得られた当該箇所のコンクリート中の見かけの塩化物イオン拡散係数を用い、構造物表面からの塩化物イオンの供給が完全に遮断されているものとして、被覆材料適用以後の 23 年間の再拡散を推定したものが図-4.4 である。塩化物イオンの再拡散について、その移動挙動については仮定や既往の知見<sup>1)</sup>と一致しているものと言える。

今回の調査は被覆材料の性状変化に主眼をおいたコア調査であったため、鉄筋の腐食程度は現時点で不明であるが、塩化物イオン濃度から鉄筋腐食が進行しているものと考えられる。本調査の結果を用いて、前述の解析手法等の精度を向上させ、表面被覆材料による塩害補修の設計、特に断面修復深さ等の設定の高度化を図ってゆく必要がある。

## 4.2 駿河湾暴露供試体調査における被覆材料の塩害抑制効果

### 4.2.1 供試体概要

被覆系補修材料の耐久性及び塩害抑制効果を評価するために、20 年前から海洋技術総合研究施設 (写真-4.1、静岡県藤枝市沖合 250m) の第3デッキ (海上飛沫部) に暴露していた表-4.1 の塩害供試体<sup>8)</sup> (200mm × 200mm × 1,200mm、塩害抑制として種々の表面被覆を使用したかぶり 25mm の RC 供試体、A 種エポキシのみ PC 供試体) を回収して調査を行った。



写真-4.1 塩害供試体の暴露環境

#### 4.2.2 調査方法

調査項目は、表面被覆の損傷面積率、付着試験による付着耐久性評価、含有塩分量試験による遮塩性評価とした。損傷面積率は式(1)により求めた。

$$\text{損傷面積率 (\%)} = \frac{\text{損傷面積}}{\text{供試体表面積}} \times 100 \quad (1)$$

#### 4.2.3 調査結果

暴露 20 年後の供試体外観を写真-4.2 に、損傷面積率を図-4.5 に示す。「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」<sup>3)</sup> (以下、指針(案)) に規定された仕様の塗膜及び超厚膜エポキシ系、ウレタン系ではほとんど損傷が認められなかった。指針(案) に規定された塗膜の耐久性が高いことが改めて示された。その他に超厚膜エポキシ系とウレタン系も耐久性が高いことがわかった。一方、変性エポキシ系、セメント系、アクリルゴム系、及び無機系の塗膜は損傷が大きかった。

暴露 20 年後の付着強度を暴露後 6 年及び 10 年の値とともに図-4.6 に示す。アクリルゴムを除くいずれの塗膜についても、暴露年数の増加とともに付着強度の大きな低下は見られなかった。また、ほとんどの塗膜の付着強度は、暴露年数の増加とともに増加する傾向を示した。破壊形態については、いずれの塗膜もコンクリート基板における破壊であることから、これらの塗膜の付着性は概ね良好であると考えられる。

指針(案) に規定された仕様の塗膜に関する暴露 20 年後の含有塩分量試験結果を無塗装供試体の値とともに図-4.7

に示す。表面被覆がない場合は、表面において約 15kg/m<sup>3</sup> の塩化物イオン量が検出された。一方、指針(案) に規定された仕様の塗膜がある場合は、塩化物イオン量の大きなものでも 0.24kg/m<sup>3</sup> 程度であり、いずれも非常に高い遮塩性を有していたと考えられる。また、その他の塗膜の場合も、塩化物イオン量は 0.2kg/m<sup>3</sup> 以下であったことから、表-4.1 に示す表面被覆材料の遮塩性は非常に優れていたものと考えられる。鉄筋については、いずれの供試体も特に腐食は見られなかった。ただし、図-4.5 に示したように表面被覆の損傷面積率に差が生じていることから、今後、損傷面積率の大きなものから鉄筋腐食が発生することが十分に考えられる。



【表面の錆色は供試体固定枠によるもので、試験体から発錆したものではない】

写真-4.2 供試体外観

表-4.1 塩害供試体

表面被覆	プライマー	バテ	中塗り	上塗り	備考
A 種エポキシ系	エポキシ	エポキシ	エポキシ	ポリウレタン	「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」 <sup>3)</sup> に規定
B 種柔軟エポキシ系	エポキシ	エポキシ	柔軟エポキシ	柔軟ポリウレタン	
B 種柔軟ポリウレタン系	エポキシ	エポキシ	柔軟ポリウレタン	柔軟ポリウレタン	
C 種厚膜エポキシ系	エポキシ	エポキシ	厚膜エポキシ	ポリウレタン	
C 種ビニルエステル系	エポキシ	エポキシ	厚膜ビニルエステル	ポリウレタン	
超厚膜エポキシ系	エポキシ	エポキシ	超厚膜エポキシ	ポリウレタン	「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」 <sup>3)</sup> に非規定、当時次世代塗装と期待された
超厚膜ウレタン系	湿気硬化ポリウレタン	エポキシ	超厚膜ポリウレタン×2	ポリウレタン	
変性エポキシ系	エポキシ	エポキシ	特殊エポキシ×2	ポリウレタン	
セメント系	—	—	—	—	
ウレタン系	—	—	—	—	
シリコンゴム系	—	—	—	—	
アクリルゴム系	—	—	—	—	
無機系	無機系	エポキシ	無機系	無機系	
有機無機複合	有機無機複合	有機無機複合	有機無機複合	ポリウレタン	

恒小物イマノシマ

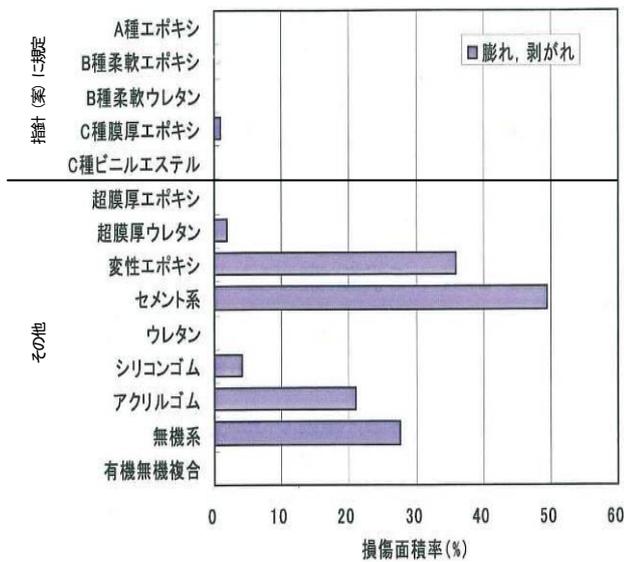


図-4.5 表面被覆の損傷面積率

#### 4.3 まとめ

##### 4.3.1 塩化物イオンの移動挙動

被覆材料の適用により内部に封じ込められた塩化物イオン濃度は、拡散解析で指摘される挙動と合致した移動を示すことが実橋試験から確かめられた。表面被覆材料による塩害補修においては、再拡散に留意した被覆材料および断面修復の設計を行う必要がある。

##### 4.3.2 被覆材料の長期耐久性

道路橋の塩害対策指針(案)に規定された仕様の表面被覆は、高い耐久性及び遮塩性を有していることが確認できた。

謝辞 本研究の塩害補修構造物の調査にあたり、新潟県村上地域振興局および村上市役所に多大なる御支援を頂いた、謝意を表する次第である。

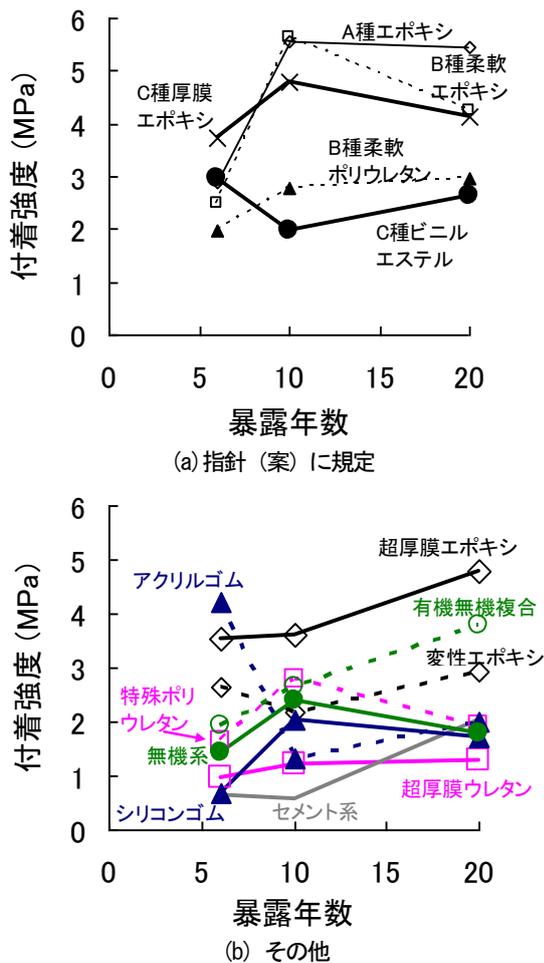


図-4.6 付着強度と暴露年の関係

## 5. ASR対策用被覆系補修材料の耐久性

### 5.1 調査概要

ASR補修のための被覆系補修材料（被覆材料）の耐久性に関するデータを取得するために、ASR対策用暴露供試体の調査を実施した。土木研究所構内に20～13年間暴露したASR供試体の被覆材料の耐久性調査を行った。

### 5.2 暴露供試体および試験方法

本研究で使用した暴露供試体は、3種類の反応性骨材（豊島、深谷、山口）を用いて製作したRC梁に、ASR抑制対策として期待される各種の表面被覆等を施したものである。どのような被覆材料等が劣化因子の侵入阻止に適しているのかを明らかにする目的で、表-5.1に経過を示す通り、昭和62年または平成5年から土木研究所構内にて暴露（写真-5.1）されていたものである。被覆材料による補修供試体は、ASRによる損傷が発生した1～2年後に補修を施し、20～13年間にわたり暴露した。また、一部試験体は7年後に再補修している。今回の調査では、暴露試験後の外観観察においてひび割れ等の異常がない供試体を被覆材料の詳細調査の対象とし、これらの試験体の被覆材料の性状を調べた。暴露試験体からコアドリルを用いてかぶりコンクリートとともに被覆材料を採取した。被覆材料の試験方法は、2.で設定した被覆材料の試験方法により実施した。



写真-5.1 ASR供試体の暴露状況

表-5.1 ASR暴露供試体の概要

暴露場所		(1) 土木研究所つくば構内	(2) 建設材料研究施設	
供試体形状		角柱供試体	角柱、擁壁供試体	
S62	1987	竣工、促進養生6ヶ月	竣工	
S63	1988	補修、暴露		
H1	1989	暴露5ヶ月、外観観察		
H5	1993	5年後追跡調査、再補修		
H6	1994	再補修1年後調査		
H7	1995			竣工2年後、補修
H12	2000			5年後追跡調査
H20	2008	15, 20年後追跡調査		13年後追跡調査(今回)

### 5.3 試験結果

被覆材料の付着性試験結果を、図-5.1に示す。長期間の暴露後も十分な付着力を有しており総じて良好であった。

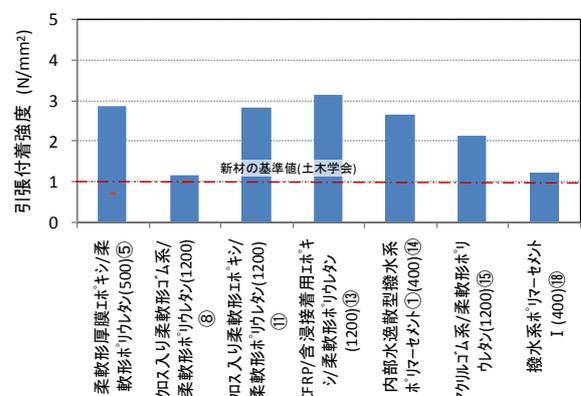


図-5.1 付着性試験結果

ひび割れ追従性試験結果を図-5.2に示す。CFRP補強層を有する試験体については、その強度特性上、今回

の方法 (図-2.3) で試験できなかった。今回試験したASRにより外観異常を生じない被覆材料は、ひび割れ追従性は全ての試験体が高追従の性状を示しており、規格値は妥当であるものと判断できる。

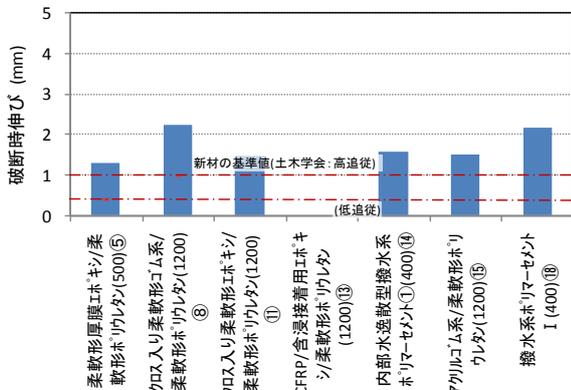


図-5.2 ひび割れ追従性試験結果

ASR抑制対策として、水分の遮断は最も重要な性能の一つである。透水試験の結果を図-5.3に、透湿(吸湿)試験の結果を図-5.4に示す。

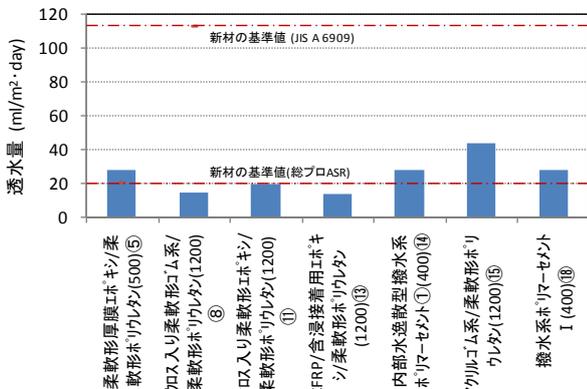


図-5.3 透水試験結果 (24時間の透水量)

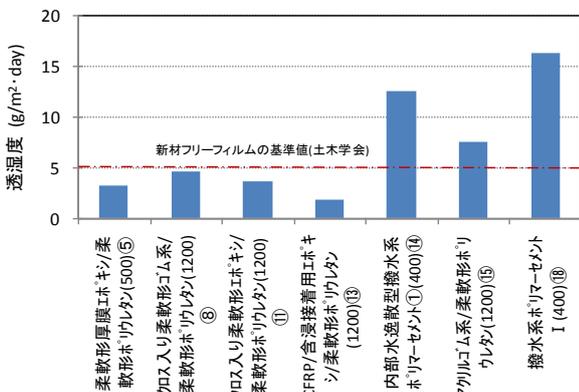


図-5.4 透湿(カップ法)試験結果

透水量が基準値 (20ml/m²·day : 総プロ<sup>4)</sup>) を超えている被覆材料もあるものの、ASR補修のための一定の遮水性が期待できる程度の性能を長期間にわたり維持していたことがわかった。

透湿度は、撥水性の被覆材料を除き、土木学会の提案する基準値を満足している。撥水性の被覆は、その物性から水蒸気を通しやすい性質を持っているため大きな値を示している。そして、撥水性材料以外については、透水と透湿の試験結果に相関が認められる。

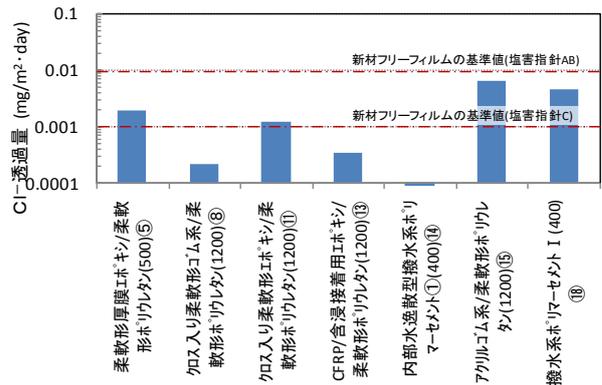


図-5.5 遮塩性試験結果 (30日のCl-透過量)

遮塩性試験の結果を図-5.5に示す。30日のCl-透過量はいずれの被覆材料も  $10^{-2}$ mg/cm²·day未満であり、ASR抑制効果のある被覆材料は塩害対策としても有効であるものと見られる。

## 6. 被覆系補修材料のASR抑制効果

### 6.1 調査概要

被覆系補修材料(表面被覆材料)のASR抑制効果に関するデータを取得するために、ASR対策用暴露供試体の調査を実施した。石川県に20年間暴露したASR供試体の解放および残存膨張率調査を行った。

### 6.2 暴露供試体

本研究で使用した暴露供試体は、能登半島産の反応性骨材および4種類のセメントを用いたRC梁に、ASR抑制対策として4種類の表面被覆等を施したものである<sup>7)</sup>。どのような表面被覆材料等が劣化因子の侵入阻止に適しているのかを明らかにする目的で、昭和61年より能登半島海岸にて20年間暴露されていた。

表-6.1 ASR暴露供試体の種類

表面被覆等 セメント	シラン系 表面含浸材	エポキシ系 表面被覆材	アクリル系 表面被覆材	特殊モルタル 吹付け
①低アルカリ (アルカリ総量 1.2kg/m <sup>3</sup> )	LS	LE	LA	LM
②低アルカリ (アルカリ総量を 3kg/m <sup>3</sup> に増加)	3S	3E	3A	3M
③低アルカリ (アルカリ総量を 5kg/m <sup>3</sup> に増加)	5S	5E	5A	5M
④高炉B種	SS	SE	SA	SM

表-6.2 ASR暴露供試体に使用した材料

水(W)	イオン交換水
セメント(C)	低アルカリ形ポルトランドセメント
	高炉セメントB種 (スラグ含有率: 53.4%)
細骨材(S)	富士川産川砂 (ASR反応性なし、密度: 2.62g/cm <sup>3</sup> 、吸水率: 1.97%)
粗骨材(G)	H産安山岩碎石 (ASR反応性あり、最大粒径 25mm、密度: 2.65g/cm <sup>3</sup> 、吸水率: 0.83%)
水酸化ナトリウム	試薬特級 (アルカリ量調節用)
鉄筋	異型鉄筋 SD30 D13

表-6.3 ASR暴露供試体のコンクリート配合

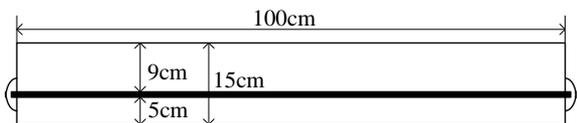
種別	実測値		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
	スランプ (cm)	空気量 (%)			W	C	S	G
①低アルカリ (アルカリ総量 1.2kg/m <sup>3</sup> )	8.5	1.2	50	44	198	396	762	983
②低アルカリ (アルカリ総量を 3kg/m <sup>3</sup> に増加)	10.6	1.4	50	44	198	396	762	983
③低アルカリ (アルカリ総量を 5kg/m <sup>3</sup> に増加)	15.0	1.9	50	44	198	396	762	983
④高炉B種	14.5	1.8	50	44	198	396	762	983

表-6.4 表面被覆等の仕様

表面被覆等	工程・材料	標準膜厚 (μm)	塗布量 (kg/m <sup>2</sup> )
シラン系 含浸材	シラン含浸材	—	0.30
	ポリウレタン樹脂 クリアー上塗り	30	0.15
エポキシ系 表面被覆材	エポキシ樹脂 プライマー	—	0.10
	エポキシ樹脂パテ	—	0.12
	エポキシ樹脂中塗り	60	0.26
	ポリウレタン樹脂 上塗り	30	0.12
アクリル系 表面被覆材	アクリル樹脂 プライマー	—	0.06
	エポキシ樹脂パテ	—	0.06
	アクリル樹脂中塗り	67	0.27
	アクリル樹脂上塗り	40	0.16
特殊モルタル 吹付け	ステンレス金網	—	—
	特殊モルタル	16,000	—

表-6.5 特殊モルタルの配合

水セメント比 W/C (%)	セメント骨材比 C:S	シリカフェーム (%)	膨張材 (%)	減水剤 (%)	ガラスファイバ (%)
45	1:1.5	15	4.16	1.0	1.5



鉄筋の露出部の腐食を防止するため同一配合のモルタルで補修した。

図-6.1 ASR暴露供試体の形状



写真-6.1 AS R供試体の暴露状況

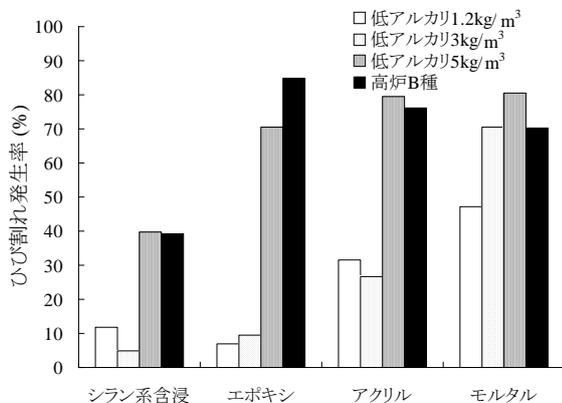


図-6.2 ひび割れ発生率

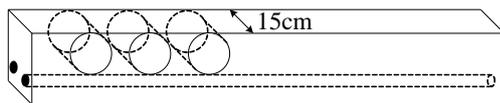


図-6.3 コア採取位置

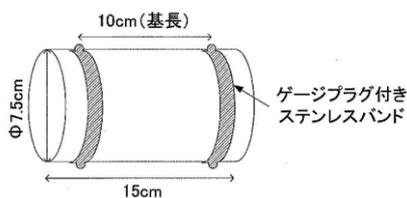


図-6.4 残存膨張率調査用供試体

供試体は、表-6.1に示すように①低アルカリセメント（アルカリ量は $\text{Na}_2\text{O}$ 換算で $1.2\text{kg/m}^3$ ）、②低アルカリセメントに水酸化ナトリウム（ $\text{NaOH}$ ）を添加してアルカリ量を $3\text{kg/m}^3$ に増加させたもの、③同様にアルカリ量を

$5\text{kg/m}^3$ に増加させたもの、④高炉セメントB種、の4種類のセメントを使用し、それぞれに4種類の表面被覆等を施したものの計16種類である。使用材料を表-6.2、コンクリートの配合を表-6.3、表面被覆等の仕様を表-6.4、モルタル吹付けに用いた特殊モルタルの配合を表-6.5に示す。

暴露供試体の形状を図-6.1に、暴露状況を写真-6.1に示す。暴露開始1年後に外観を観察した結果、表面被覆材料の一部が飛砂により磨耗していたため、再度表面被覆材料を塗布して飛砂の影響の少ない場所に移動した。特殊モルタル吹付け供試体には、特に異常は見られなかった。

供試体表面を5cmメッシュに区切り、ひび割れを含むメッシュ数を測定して式(6.1)によりひび割れ発生率を求めたところ（図-6.2）、Lおよび3シリーズはひび割れ発生率が少なく、5およびSシリーズのひび割れ発生率が多い結果となった。

ひび割れ発生率(%)

$$= \frac{\text{ひび割れを含むメッシュ数}}{\text{全メッシュ数}} \times 100 \quad (6.1)$$

### 6.3 AS R抑制効果試験方法

暴露供試体のAS R抑制効果を評価するために、JCI-DD2に準拠して残存膨張率を測定した。残存膨張率調査用の供試体は、暴露供試体を図-6.3に示すように鉄筋を避けるようにして直径75mm、長さ150mmのコンクリートコアを採取し、図-6.4に示すようにゲージプラグ付きステンレスバンドを締付けて、膨張率調査用供試体とした。

### 6.4 試験結果

経過日数-膨張率の関係を図-6.5、解放膨張率を図-6.6、残存膨張率を図-6.7に示す。解放膨張率はいずれの供試体も $\pm 0.01\%$ 以内であり、ほぼゼロであった。暴露供試体の寸法が $1,000\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ と小さく、また $\phi 75\text{mm} \times 150\text{mm}$ のコア供試体を採取したため、コア採取時の解放膨張はほとんど生じなかったものと考えられる。

アルカリ総量の最も低いLシリーズ（低アルカリ $1.2\text{kg/m}^3$ ）の残存膨張率はほぼゼロであり、AS Rはこれ以上生じない状態であると言える。また、ひび割れ発生率も低かったことから、表面被覆等の対策を実施しなくてもAS Rが発生しにくいものと考えられる。

AS R抑制対策におけるアルカリ総量規制値と同アルカリ量の3シリーズ（低アルカリ $3\text{kg/m}^3$ ）は、モルタル

吹付け供試体を除き、Lシリーズの次に残存膨張率が低かった。一方、モルタル吹付け供試体以外のひび割れ発生率はLシリーズと同等であったことから、シラン系含浸材、エポキシ系、アクリル系はASRの発生を抑制していたものと考えられる。モルタル吹付け供試体の残存膨張率は2番目に高く、ゲルの発生も見られた。ひび割れ発生率も高かったことから、外部から塩分が侵入してアルカリ金属イオン量が増加し、ASR発生のポテンシャルを増加させたものと推測される。従って、特殊モルタル吹付けのASR抑制効果は、他の表面被覆等よりは劣ることがわかった。

アルカリ総量規制値を上回るアルカリ量の5シリーズ（低アルカリ 5kg/m<sup>3</sup>）は、アクリル系供試体を除き、最も残存膨張率が高かった。ひび割れ発生率も高かったが、更にASRの進行が生じる状態であったと考えられる。ASR抑制が期待された高炉セメントB種を使用したSシリーズの残存膨張率は、5シリーズに順ずる値となった（アクリル系供試体は最も高かった）。

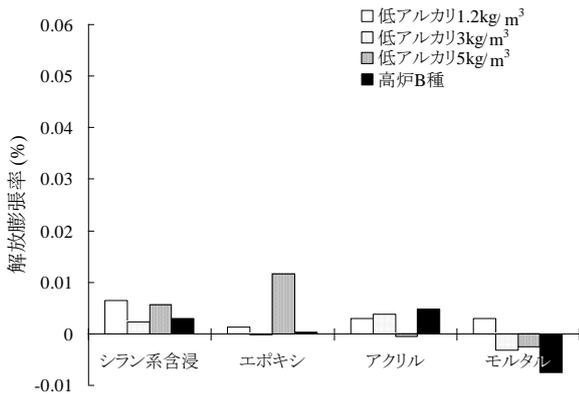


図-6.6 解放膨張率（試験開始 9～11 日のデータ）

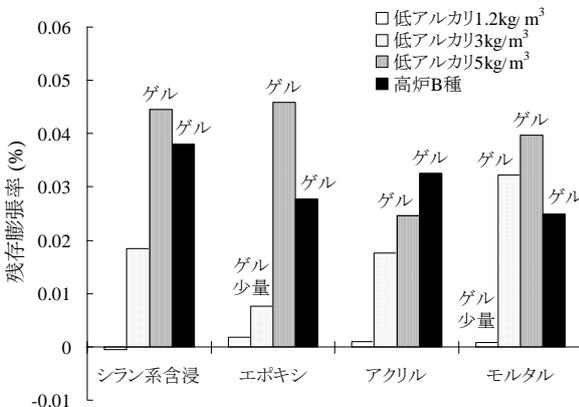
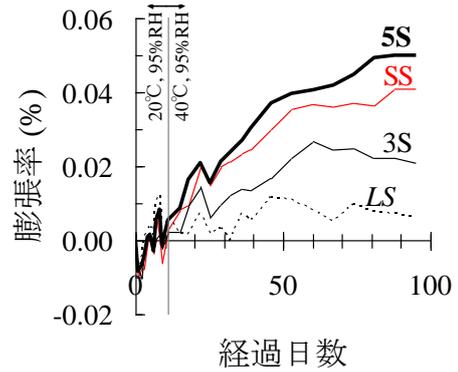
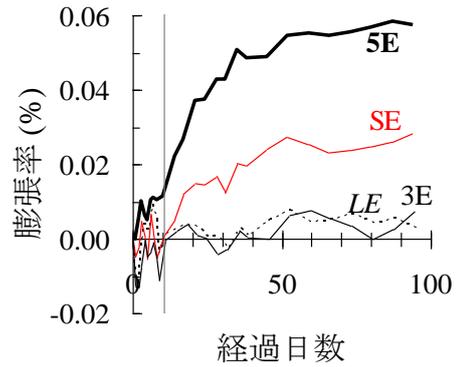


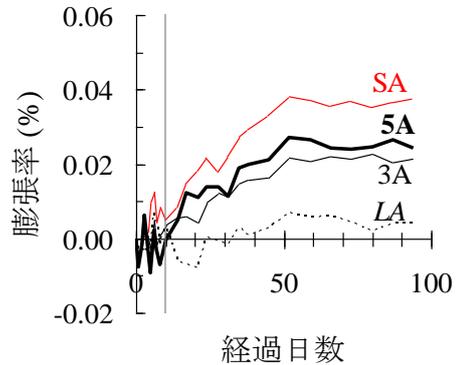
図-6.7 残存膨張率（試験開始 93～95 日のデータ）



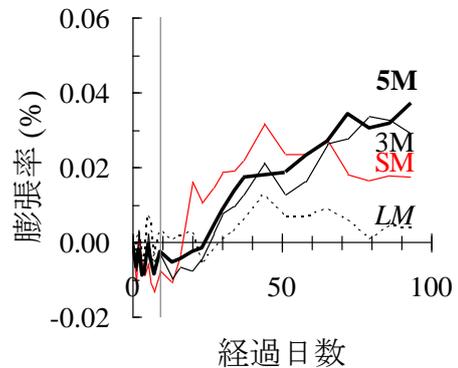
(a) シラン系表面含浸材



(b) エポキシ系表面被覆材料



(c) アクリル系表面被覆材料



(d) 特殊モルタル吹付け

図-6.5 経過日数-膨張率の関係

## 7. 被覆系補強材料の耐久性に関する調査

### 7.1 調査概要

被覆系補強材料の実環境での耐久性を調査するために、10年程度を試験期間とする屋外暴露試験を実施した。暴露試験は、連続繊維（CFRP）シート自体の力学的物性の耐久性評価と、連続繊維シートとコンクリートとの付着性能の耐久性評価の二点について実施した。

### 7.2 連続繊維シートの方学特性に関する暴露試験

#### 7.2.1 調査方法

調査した暴露供試体の仕様を表-7.1に示す。調査項目は引張特性および面内せん断特性とし、 $0^\circ$  積層板を引張強度評価に、 $\pm 45^\circ$  積層板を厚さ方向でない面内でのせん断強度評価に用いた。引張試験は ASTM D 3039-76 “Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites”、面内せん断試験は ASTM D 3518M-91 “Standard Practice for In-Plane Shear Stress-Strain Response of Unidirectional Polymer Matrix Composites” に準拠し、それぞれ5個のデータの平均値を結果とした。

暴露環境は、茨城県つくば市（温暖環境、写真-7.1）、沖縄県大宜味村（亜熱帯環境、写真-7.2）、カナダ・ケベック州・シェルブルック市（寒冷地環境、写真-7.3）の3カ所とし、環境条件の相違による耐久性への影響を調査することとした。なお、本研究項目については、日加科学技術協力協定（防災および建設）「A5:土木における繊維強化複合材料の耐久性」に基づくシェルブルック大学との研究協力により実施した。暴露試験は当初計画通り10年間実施され、回収した供試体について切断・加工および物性試験を行った。

表-7.1 CFRP 暴露供試体の仕様

供試体	材料	繊維シート配置方向
CFRP 積層板 ( $0^\circ$ )	PAN系炭素繊維 エポキシ樹脂	同一方向に 4層積層、引 張試験用
	PAN系炭素繊維 エポキシ樹脂	
	アクリルウレタン系上塗り	
CFRP 積層板 ( $\pm 45^\circ$ )	PAN系炭素繊維 エポキシ樹脂	$\pm 45^\circ$ 方向 に对称に4 層積層、面 内せん断試 験用
	PAN系炭素繊維 エポキシ樹脂	
	アクリルウレタン系上塗り	



写真-7.1 CFRPシート供試体の暴露状況(つくば)



写真-7.2 CFRPシート供試体の暴露状況(大宜味)



写真-7.3 CFRPシート供試体の暴露状況(シェルブルック)

#### 7.2.2 調査結果

引張強さの10年目までの変化を図-7.1に示す。上塗りなし、ありに係わらず、10年間の間の物性変化はほとんどなかったものと考えられる。図-7.2は引張弾性率の結果である。上塗り塗装の無い場合には5年目より多少の低下が認められたが、10年目でも初期値の0.8程度を保持していた。上塗り塗装がある場合は7年目において

も変化はないが10年目ではわずかな弾性率の低下と考えられる変化が認められ始めた。図-7.3および7.4は面内せん断強さおよび面内せん断弾性率の結果である。変化は暴露試験のかなり初期(1~3年目)から認められ、その後の変化はさほど顕著ではないことがわかった。面内せん断強さは初期値の0.7~8程度、面内せん断弾性率は初期値の0.6程度となった。

以上の結果より、連続繊維(CFRP)シートは、長期間の屋外暴露により、引張特性には大きな変化を示さなかったが、面内せん断強度および弾性率はある程度低下する可能性があることがわかった。引張特性は主に補強繊維の性能が現れていることから、炭素繊維自体には10年間の暴露でも変化はほとんど生じないものと考えられる。面内せん断特性の低下は、繊維と樹脂との界面や樹脂の性能がより強く現れる特性であり、繊維/樹脂界面や樹脂の劣化が比較的初期に現れるものと考えられる。

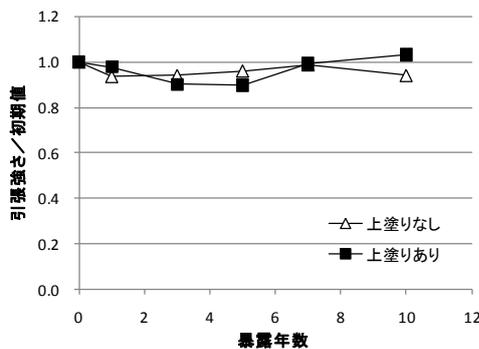


図-7.1 引張強さの変化

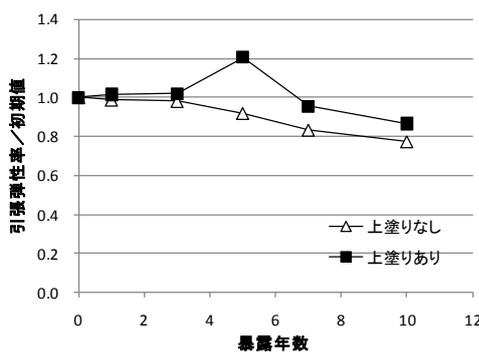


図-7.2 引張弾性率の変化

これらのことから、連続繊維シートの耐久性評価にあたっては、引張特性以外の特性が必要な場合にはその耐久性も評価することが望ましいことと、部材補強の上で最適な繊維方向を設定しておくことが重要であることが明らかとなった。なお、これらの物性変化は3年目から

10年目までほとんど進行していないなど、その進行特性についても新たな知見を得た。また、上塗り塗装はGFRPの劣化には通常大きな効果を発揮することがこれまでの研究で明らかになっているが、CFRPにおいてはその物性保護効果は限定的であることが明らかとなった。これはCFRPの場合には最外層の連続繊維シートが内部の樹脂層を日光を主とする劣化因子から保護する効果を発揮することによって考えられる。

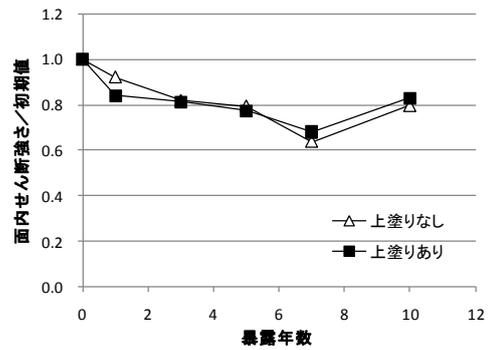


図-7.3 面内せん断強さの変化

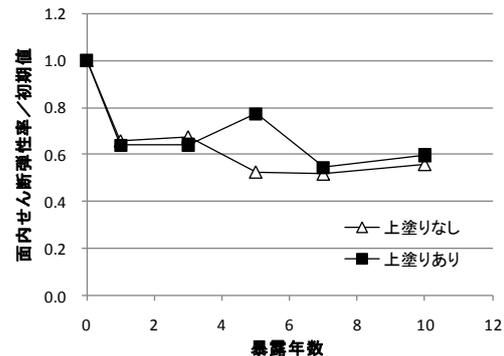


図-7.4 面内せん断弾性率の変化

### 7.3 連続繊維シートの付着耐久性に関する暴露試験

#### 7.3.1 調査方法

##### (1) 供試体

##### ① シリーズ1

本調査は1992年に屋外暴露試験に供されたシリーズ1の供試体と、シリーズ1にはない試験項目を追加するために本課題で新たに製作されたシリーズ2の2種類に分けられる。シリーズ1の供試体は、表-7.2に示す4種類である。

表-7.2 シリーズ1の使用材料

供試体	プライマー	パテ	炭素繊維の種類	マトリックス樹脂	上塗色
A	使用	使用	PAN系	エポキシ樹脂	白色
B	使用	使用	PAN系	エポキシ樹脂	白色
C	使用	使用	Pitch系	エポキシ樹脂	白色
D	使用	不使用	PAN系	エポキシ樹脂	白色

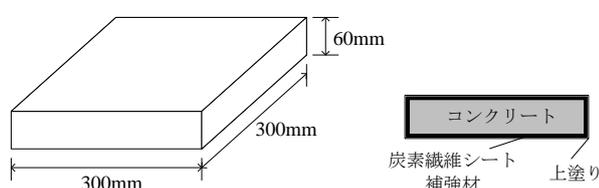


図-7.5 供試体

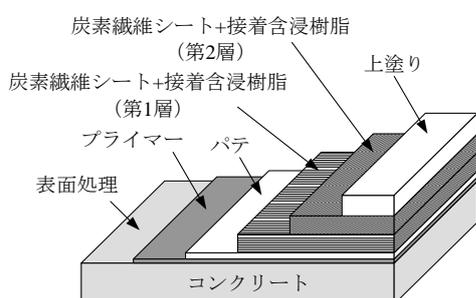


図-7.6 炭素繊維シート補強材の構成

連続繊維シートは1992年当時に国内で一般に使用されているものを選定した。これらのシートを、舗装用コンクリート平板(300mm×300mm×60mm)に、シートの製造会社の標準的な施工方法にもとづき施工したものをシリーズ1の供試体とした(図-7.5)。全てのコンクリートの表面はディスクサンダーにより研磨処理の上使用した。プライマーは全ての供試体で使用されたが、パテはいくつかの供試体では使用されなかった。連続繊維シートはそれぞれが直交するように2層施工し、最終的には白色の上塗り塗装を施工した(図-7.6)。各仕様について9個ずつの供試体を製作した。このうちの1個ずつはプルオフ試験による初期値測定に使用し、残りの8個ずつは暴

露試験に供した。

## ②シリーズ2

シリーズ1の供試体による当初の検討計画ではプルオフ試験のみにより付着耐久性を評価する予定であったが、その後の検討で、プルオフ試験にはいくつかの弱点があることが明確となってきた。その主たるものは破壊モードである。プルオフ試験においては付着特性が比較的良好な材料においては、コンクリートの表面部分で破壊が起きることが多い。このことは、プルオフ試験の結果(付着強さ)が連続繊維シートとコンクリートの付着特性を直接表していないことを意味する。連続繊維シートとコンクリートとの付着特性の耐久性の評価にあたっては、付着特性の劣化に伴って発生しているかもしれない微小な変化の評価が重要であると考えられるが、プルオフ試験ではコンクリート部分で破壊が起きてしまうことから、この微小な変化を見逃している可能性がある。そこで、本研究では、プルオフ試験以外の方法による、連続繊維シートとコンクリートとの付着特性の評価についても検討を行うこととした。連続繊維シートの実際の適用方法を考慮する場合、連続繊維シートとコンクリートとの付着の破壊は、プルオフのほかにはせん断あるいはひきはがしのモードがあるものと考えられる。また、せん断あるいはひきはがしによる付着特性の評価に関する研究事例もいくつか知られている。このことから、本研究ではシリーズ2を追加し、ひきはがし試験による付着特性の評価の可能性についても検討を行うこととした。

シリーズ2の供試体は2006年に製作した。製作にあたっては、1992年に製作したシリーズ1の供試体とできるだけ同様な供試体となるように材料選定および製作方法を設定した。しかし、各材料製造会社の協力にも係わらず、同一材料の入手が不可能となった材料もあった。このような場合には、現在入手可能な材料からもっとも性能的に近いと考えられる材料を代わりに選択することとした。シリーズ2は屋外暴露試験に供することをせず、代わりに水中浸せき試験を実施することとしたため、紫外線による表面保護のための表面塗装は省いた。表-7.3にはシリーズ2の供試体作成時のシリーズ1との相違点をまとめて示す。シリーズ2の付着特性の初期値は、プルオフ試験と引きはがし試験によって評価した。1種類の連続繊維シートあたり3個の供試体を製作した。このうち1個は初期値測定に使用し、残りの2個は水中浸せき試験に供した。

表-7.3 シリーズ2の材料のシリーズ1との相違

供試体	シリーズ2の材料			
	プライマー	パテ	連続繊維シート	マトリックス樹脂
A	同じ	同じ	類似品	同じ
B	同じ	やや柔軟	同じ	類似品
C	類似品	類似品	類似品	類似品
D	同じ	同じ	同じ	同じ

## (2) 屋外暴露試験

シリーズ1の供試体（初期値測定用を除く）は土木研究所建設材料研究施設（屋外暴露場、茨城県つくば市）内において、1992年から開始された。供試体は、南面向きに5°傾斜したステンレス製架台上に設置した。写真-7.4は暴露試験中の供試体の設置状況である。1種類について8個ある供試体のうち1個について、2006年に回収を行い、暴露14年目の付着特性を評価した。



写真-7.4 供試体の屋外暴露試験状況（シリーズ1）

## (3) 水中浸せき試験

シリーズ2の初期値測定用を除く2個ずつの供試体に対しては、40°C水中で浸せき試験を実施した。3ヶ月および6ヶ月間の浸せき試験実施後、供試体を回収し、プルオフ試験と引きはがし試験により付着特性の変化を評価した。

## (4) 評価試験

### ① プルオフ試験

シリーズ1の初期値用供試体を除く全ての供試体は、プルオフ試験と引きはがし試験により付着特性を評価した。シリーズ1の初期値はプルオフ試験のみを実施した。付着特性評価試験を実施する前には、ダイヤモンドカッターにより、図-7.7に示す切り込みを各供試体につけた。

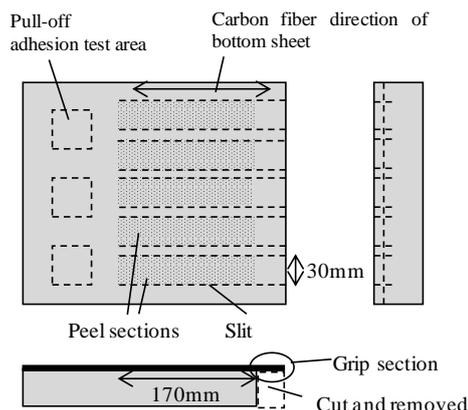


図-7.7 回収供試体の評価試験のための加工

プルオフ試験はASTM D 7234に準拠して実施した。付着金具の形状は40mm角の正方形である。

### ② 引きはがし試験

引きはがし試験は万能試験機を使用して、図-7.8のような構成により実施した。

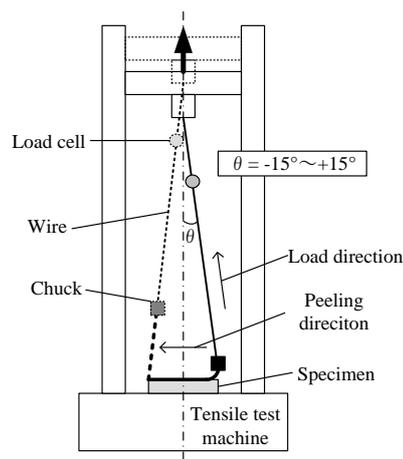


図-7.8 引きはがし試験方法の概要

手順は次によった。

- 1) 供試体は図-7.7に示すように、グリップ部を得るようにコンクリートをダイヤモンドカッターで切り取るとともに、試験面表面に帯状の切り込みをつける。帯状の切り込みの方向は、連続繊維シート第1層の繊維方向と同じ方向になるようにした。帯状切り込みの長さは、グリップ部を除き170mmとした。各帯状部分の幅は30mmとし、この部分を引きはがし試験で評価することとした。
- 2) 供試体は引きはがし部分（長さ170mm、幅30mm）の中心が万能試験機の中心に来るように試験機に設置する。

- 3) グリップ部と万能試験機のクロスヘッドを、途中に小型ロードセルを付けた600mmのワイヤーで接続する。引張力を載荷速度100mm/分で170mmの引きはがし部分が全て剥離するまで加える。引きはがし試験中の引張力は垂直方向から15°以内の範囲で変化することとなる。
- 4) 典型的な引張力の結果では、引きはがし力は試験開始直後から最初の引きはがし破壊が起きるまで増大する。最初の引きはがし破壊が発生時に通常は最大荷重を示す。その後は引きはがし荷重は低下し始め、引きはがしが定常的に継続して発生し、引きはがし力がほぼ一定を示す領域が観測される。この領域は、連続繊維シートの引きはがしへの抵抗性能を示していると考えられることから、本研究ではこの領域の引きはがし力を評価することとした。得られた各試験データの解析結果から、試験開始から50秒後から、試験終了の10秒前の間の引きはがし力のデータの最大値と最小値を得て、式(1)により引きはがし力の平均値を求めることとした。さらに式(2)により単位幅あたりの引きはがし力を算出することとした。

$$P_p = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} \quad (1)$$

$$F_p = \frac{P_p}{w} \quad (2)$$

- ここに、 $P_p$ ：定常引きはがし領域の引きはがし力 (N)  
 $P_{max}$ ：定常引きはがし領域（試験開始から50秒後から試験終了10秒前）の最大引きはがし力 (N)  
 $P_{min}$ ：定常引きはがし領域（試験開始から50秒後から試験終了10秒前）の最小引きはがし力 (N)  
 $F_p$ ：単位幅あたりの引きはがし力 (N/mm)  
 $w$ ：引きはがし部分の幅 (mm)

### 7.3.2 調査結果

#### (1) 屋外暴露試験（シリーズ1）

##### ①プルオフ試験

図-7.9はプルオフ試験の結果（平均値）をまとめた結果を示す。付着強さの初期値は全て3.0MPa以上でコンクリート部分の凝集破壊を示した。14年暴露から回収した供試体は、供試体Dについては初期値とほぼ同程度の付着強さを示したが、他の供試体については、初期値の64～76%の付着強さとなった。しかし、これらについては付着強さの低下が観測されたとはいえ、なお、絶対値としては十分な付着力を示していること、全てのケースで破壊がコンクリート部分の凝集破壊であることなどから、長期間の暴露試験によって、連続繊維シートとコンクリ

ート間の付着力が低下したことによるものとは考えにくい。むしろ、これらの付着力低下は、コンクリート表面の力学的な性能の変化によって説明されるものと考えられる。供試体Dのみが初期値とほぼ同程度のプルオフ付着性能を示したのは、供試体Dの他の材料との相違がパテの有無であることから、パテが用いられていないことに起因する可能性がある。プライマーを塗布したコンクリート表面とエポキシ樹脂層が直接接触していることが、環境劣化からのコンクリート表面のより良い保護効果を示した可能性がある。

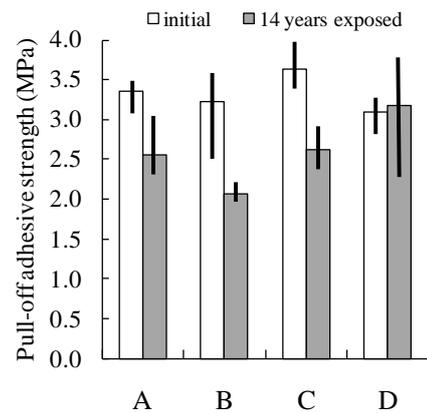


図-7.9 プルオフ試験による暴露試験後の付着強さ（平均値）の変化（シリーズ1、垂直線は繰り返し実施された試験のデータ範囲を示す。）

##### ①引きはがし試験

図-7.10は14年暴露試験から回収した供試体について実施した引きはがし試験の結果（平均値）を示す。供試体Bはもっとも大きな単位幅あたりの引きはがし力、0.29N/mmを示した。他の材料では0.10～0.16N/mmであった。引きはがし試験部分の連続繊維シートには、供試体Dのほぼ全面および供試体Bの70%程度の面積にわたって、コンクリート表層部分が付着しており、これらの供試体が主にコンクリート表層部分内で破壊したものと考えられる。一方、供試体AおよびCにおいては連続繊維シートの引きはがし部分にはコンクリート表層の付着はなく、連続繊維シートとコンクリート表層の界面で破壊が発生していた。これらの破壊の様相はプルオフ試験で得られた結果（全てコンクリート表層での凝集破壊）と相違している。プルオフ試験の結果は、試験領域の空隙に起因する部分的な応力集中の影響を受けやすく、表面部分での破壊を増加させることが分かっている。さらに供試体と載荷方向のわずかな軸のずれが、付着強度結果およびデータの分散に影響することも報告されている。連続繊維シートが補強に使われる場合には、引きはがし

試験の方がより実際の破壊モードに近い場合も多いとの視点から、この結果は連続繊維シートのコンクリートへの付着性能評価手法をプルオフ試験のみに頼ることについての疑問を呈するものと考えられる。

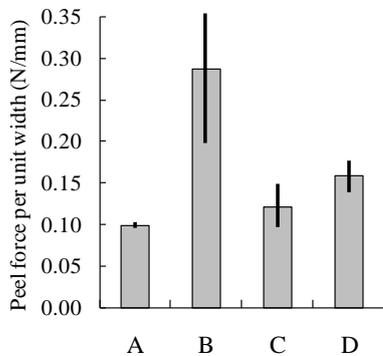


図-7.10 14年暴露試験から回収した供試体の引きはがし試験結果 (シリーズ1)

## (2) シリーズ2の初期値

### ① プルオフ試験

図-7.11 にシリーズ2のプルオフ試験の初期値の平均値を、シリーズ1のプルオフ試験の結果 (図-7.9 と同じデータ) と比較して示す。シリーズ2の破壊モードは全てコンクリート表層部の凝集破壊であったことから、シリーズ2の付着強さがシリーズ1よりも高い主要な要因は、シリーズ2のコンクリート表層の力学物性の高さによるものと考えられる。

### ② 引きはがし試験

図-7.12 にシリーズ2の引きはがし試験の結果 (平均値) の、シリーズ1の14年暴露試験からの回収後の試験結果との比較を紹介する。シリーズ2の試験結果はいずれも14年暴露試験からの回収結果と比べてかなり大きな値となった。シリーズ2供試体はシリーズ1と完全に同等に再製作されたものではないため、この結果は必ずしも14年の暴露期間の間の劣化により劣化したことを示すものではない。

供試体Aの破壊モードはパテ層内部の凝集破壊で破壊した。供試体BとCは連続繊維シートとコンクリート表面層との界面で破壊を示した。供試体Dはコンクリート表面層の凝集破壊であった。ただし供試体Bでは、引きはがし部分の20%では2つの連続繊維シート層の間およびコンクリート表面層内でも破壊したことを示している。

シリーズ2の引きはがし試験の結果から、その初期の破壊モードは、14年経過したシリーズ1の破壊モードと大きく異なるものではないと考えられる。引きはがし試

験においては、プルオフ試験とは非常に異なる破壊形態を示した。供試体AからCは、シリーズ1および2ともに、コンクリート表面層における破壊を示したプルオフ試験とは、明確な相違 (引きはがし荷重および破壊モード) を観測した。

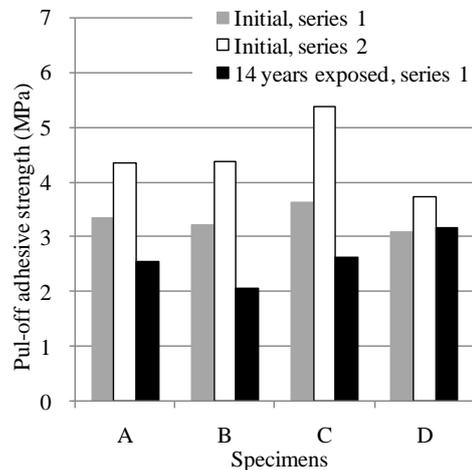


図-7.11 プルオフ試験結果 (シリーズ2初期値とシリーズ1の比較)

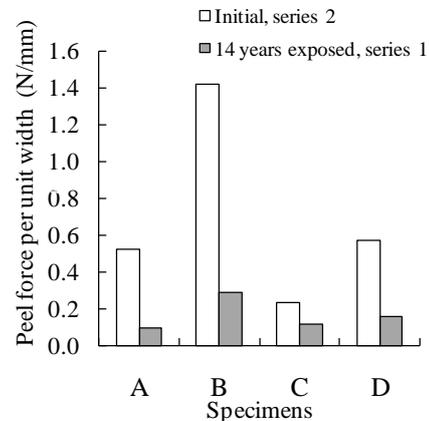
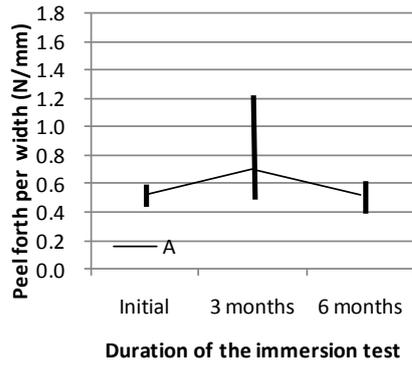


図-7.12 引きはがし試験結果 (シリーズ2初期値とシリーズ1 (14年暴露後) の比較)

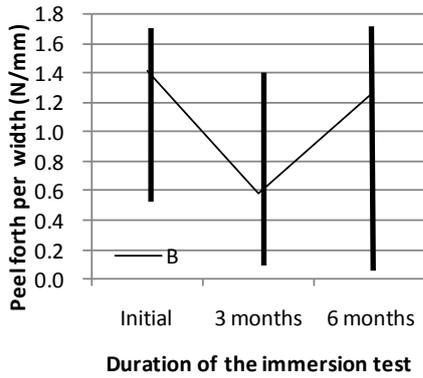
## (3) 浸せき試験 (シリーズ2)

### ① 引きはがし試験

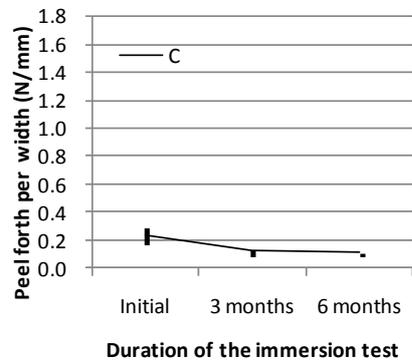
図-7.13 は単位幅あたりの引きはがし力の平均値の変化をグラフ化した結果を示す。



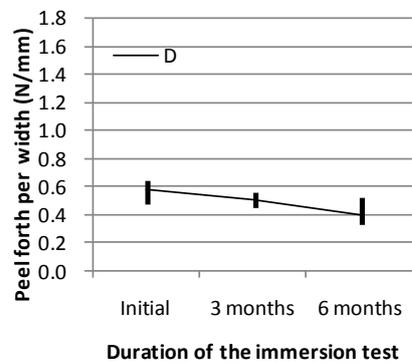
(a) 供試体 A



(b) 供試体 B

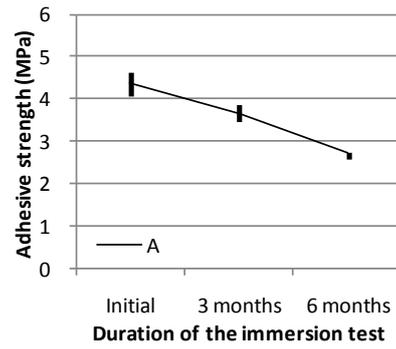


(c) 供試体 C

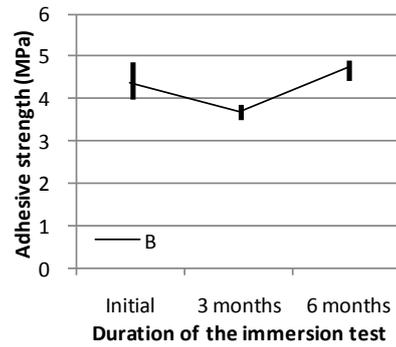


(d) 供試体 D

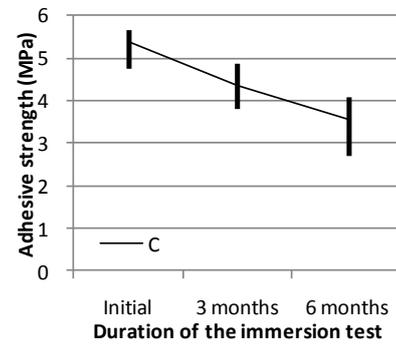
図-7.13 浸せき試験後の引きはがし試験の結果



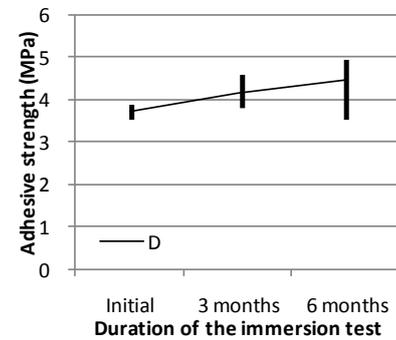
(a) 供試体 A



(b) 供試体 B



(c) 供試体 C



(d) 供試体 D

図-7.14 浸せき試験後のプルオフ試験の結果

供試体Aはあまり明確な変化が認められない。破壊モードは初期においてはパテ内部の破壊であったが、浸せき時間が進むに従って、パテとCFS界面、およびパテとコンクリート面の界面での破壊の面積が増えてきた。界面の付着力低下が進行しつつあるものと考えられる。供試体Bは大きなばらつきを含む結果となり、明確な情報が得られなかった。浸せき前後での破壊モードには、変化はなかった。供試体CとDでは、わずかながら低下が認められた。その変化はあまり大きくないが、6ヶ月目についてそれぞれの初期値と有意差の検定を実施したところ、有意水準1%で有意差があるとの結果となった。供試体Cの破壊モードは初期から6ヶ月目までCFSとコンクリート表面の界面であり、変化はない。界面付着力の低下が進行しつつあるものと考えられる。また供試体Dの破壊モードは初期から6ヶ月目までコンクリート内部であった。コンクリート内部での破壊であるにも関わらず、強度低下が認められるのは、コンクリート内部とはいえプルオフ試験に比べてずっと浅い位置で破壊が発生していることによるものと考えられる

## ②プルオフ試験

図-7.14はその付着強さの平均値の変化をグラフ化して示した。供試体AとCは付着力低下傾向が認められるが、BおよびDでは明確な低下は無かった。

供試体Aの破壊モードは初期はコンクリート内部であったが、6ヶ月目にはパテ内部が主と変化した。この変化は強度低下によるものと考えられる。この破壊位置は引きはがし試験と同じであり、パテ自身やパテの付着力の劣化により変化したものと考えられる。また供試体Cでも破壊モードの変化が認められる。3ヶ月目まではコンクリート内部での破壊であったが、6ヶ月目には3回の試験のうち1回でCFSとプライマー界面での劣化に変化している。この破壊位置は引きはがし試験と同様である。一方、BおよびDでは6ヶ月目においてもコンクリート内部のまま、破壊モードが変わりがなかった。

プルオフ試験で低下を示したケースでは、破壊モードがコンクリート内部から補強材内部あるいは界面に変化し、その変化した破壊位置はそれぞれのケースの引きはがし試験の破壊モードと同じであることがわかった。引きはがし試験とプルオフ試験の破壊モードが違う場合があるのは、先に述べた様に、ピールテストは荷重レベルが小さいために、プルオフに比べて、コンクリートを壊さずに連続繊維シートとコンクリートとの間の付着特性を見やすいためと思われる。しかし、連続繊維シートとコンクリートとの間の付着力の変化がかなり顕著になっ

た場合には、プルオフでも引きはがし試験と同様のモードの劣化が観察されるものと考えられる。

浸せき試験の試験結果の傾向が屋外暴露試験のものとは異なることは注目に値する。14年にわたる屋外暴露試験では変化が認められないのに、数ヶ月の浸せき試験によりいくつかの供試体についてプルオフ試験の強度や破壊モードの変化が認められている。これらについては多くの説明が可能である。

- ・浸せき試験は屋外暴露試験とは同等の劣化試験ではなく、より厳しい劣化条件となっている。
- ・プルオフ試験方法の実際の補強材の付着特性評価方法としての適性は、明確に確立されてはいない。多くの場合、コンクリートの破壊が観測され、プルオフ試験の結果は基本的にはコンクリート表面の特性（局所的な空隙による応力集中など）に依存していて、必ずしも実際の付着特性には依存しない。ある場合には破壊モードの変化が観測されるが、モードの変化を決定づける因子についてはよく分からないのが現状である。プルオフ試験の破壊モードに関するFEMなどによるモデル面からの検討など、さらなる研究が必要である。

引きはがし試験は付着特性の評価において、プルオフ試験に比べ、より詳細な情報を得やすいと思われる。環境劣化に起因する界面部分やFRP積層部分の微細な物性変化に敏感であるとも考えられる。このためこの方法は、付着特性の耐久性評価や劣化の進行を調べるのに適している様に思われる。

### 7.3.3 付着耐久性の評価法の提案

本研究で実施した連続繊維シートの被補強材への付着耐久性を評価する手法として、引きはがし試験方法を試験方法としてとりまとめ提案した。試験方法の概要は4.3.1で示したものと基礎とした。なお、本研究の結果からは、水中浸せき試験は補強シートの付着耐久性評価のための劣化試験方法としては非常に厳しく、より実態に適合した試験方法として屋外暴露試験との比較を十分に行うことが望ましいことがわかった。

## 8. 電気防食工法の効果持続性の検証

### 8.1 長期電気防食効果の検証

1998年10月より各種電気防食法（亜鉛アルミ溶射陽極、チタン溶射、チタンメッシュパネル陽極、チタンリボンメッシュ陽極、帯状ハイブリッド陽極および無防食）を施したプレテンションPC大型試験体（寸法：長さ5300mm、幅700mm、高さ350mm、初期塩分量：10kg/m<sup>3</sup>）を建設材料研究施設（つくば市土木研究所構内）に暴露試験を行った。暴露状況を写真-8.1に示す。暴露11年間後に、PC大型試験体を解体調査して電気防食の長期効果を検証した。写真-8.2に解体調査状況を示す。

電気防食効果により鉄筋の腐食がほとんどなかったのはチタン溶射陽極法のみで、亜鉛アルミ溶射陽極は早期に剥離が生じたため1年以内に再施工したが、11年目でも約80%が剥離していた。このため、無防食試験体より腐食率は小さいものの部分的に鉄筋に腐食が生じた。その他の陽極も、やはり小さいながら腐食が生じていた。このことから、電気防食の長期効果は、陽極材の耐久性によるところが大きいことが明らかとなった。コンクリート表面の付着耐久性をはじめとした被覆層の性能が重要である。

### 8.2 コスト削減を目指した電気防食法の検討

塩害地域のコンクリート構造物の塩害を完全に防止できる唯一の方法は電気防食法である。これを適用することが予防保全として有効であるが、電気防食法はコストが高く適用事例が少ないのが実情である。このため、コスト低減を目指した陽極材、および陽極材の耐久性を向上させて電気防食のライフサイクルコストを低減した方法などについて、2006年12月より親不知海岸の北陸建設材料耐久性試験施設で暴露試験を行っている。暴露状況を写真-8.3に示す。各工法の施工費の試算結果と特徴を表-8.1に示す。



写真-8.1 電気防食大型試験体の暴露状況(つくば)



写真-8.2 解体調査状況



写真-8.3 電気防食大型試験体の暴露状況(親不知)

表-8.1 電気防食工法の施工費の試算結果と特徴

工法	施工費(¥/m <sup>2</sup> )	従来工法との比較、特徴			
		耐久性	維持管理項目	維持管理頻度	
陽極板工法	¥85,000-	40年以上	電流調整、電位測定	1~2回/年	簡易な施工、第3者障害防止、死荷重少ない 躯体を傷付けない、粉塵発生が少なく作業環境 が良い、耐久性に優れる
導電性モルタル工法	¥65,000-	20年以上	電流調整、電位測定	1~2回/年	簡易な施工、第3者障害防止、死荷重増加なし
導電性塗料工法	¥45,000-	10~15年	電流調整、電位測定	1~2回/年	簡易な施工、付着力の増強
アルミ溶射工法	¥55,000-	15年	電位測定	1~2回/年	電源装置不要、死荷重増加なし
埋設型犠牲陽極工法	¥28,000- (4個/m <sup>2</sup> ) 補修部への適用 ※1	10~15年	必要なし	必要なし	断面修復工との併用、マクロセル抑制、簡易な 施工、メンテナンス不要
	¥55,000- (5個/m <sup>2</sup> ) 未補修部への適用 ※1				簡易な施工、メンテナンス不要
現行工法	¥65,000-~¥75,000-	20年以上	電流調整、電位測定	1~2回/年	-

※1 「補修部」は断面修復部への陽極設置を、「未補修部」はコア削孔による陽極設置を意味する。

施工費条件					
(1)	経費を含まない直接工事費とする				
(2)	足場架設費用、劣化による断面修復費用を含まない 純粋に電気防食工事のみとする				
(3)	標準的な構造物、作業空間、作業時間、標準的な設計とする				
(4)	施工面積は1000m <sup>2</sup> とする				
(5)	比較となる現行電気防食は網状、線状陽極方式電気防食工法とする				

## 9. 被覆系補修材料の施工環境に関する調査

### 9.1 被覆材料の破損要因

本研究では、塩害やASR補修をはじめとしたコンクリート表面に用いられる被覆材料について、適用環境に応じた耐久性に関する知見を長期暴露試験体や過去に補修された構造物の詳細調査により収集整理してきた。これらは、正常に施工された室内供試体や試験施工等を基本としており、材料が良好に施工され所定の性能を発揮することを前提としたもので、いわば理想的な性能と言える。しかしながら、現場で実際に生じる不具合は、材料工法の選定ミス等の計画設計上の事例も一部にはあるものの、局所的な接着不良等の施工管理上の問題であることが圧倒的に多い。表面保護工をはじめとした補修工事は現位置での施工となり、材料の基本性能に加えて、それらが確実に施工されていることが重要な要件となる。

施工の信頼性を損なう要因にはさまざまなものがある。表面保護工の不具合は、その原因により、施工直後に不具合を生じるものから、1~数年間の供用後、数十年等の長期供用後に機能低下を生じる場合もあるものと考えられる。本研究では、施工環境要因による施工直後の性能

確保に着目し、コンクリートの基盤状態や養生条件等の温湿度をはじめとした施工環境要因が、接着強度に与える影響に注目して実験検討を行った。

### 9.2 試験方法

コンクリート基盤の乾燥状態やプライマーの養生条件を変化させて、施工直後の被覆材料の接着力を評価した。試験材料には、国内で多く使用されているコンクリート保護工用のプライマー（2液溶剤型エポキシ樹脂系プライマー）から一つを選定し、水浸条件や温湿度を変化させた場合の接着強度をプルオフ試験により測定した。

### 9.3 試験結果

コンクリート基盤の乾燥状態や養生環境を変化させて施工したプライマーの接着強度を図-9.1に示す。水浸後の乾燥時間が短い場合の接着力が小さく、コンクリート表面の乾燥が十分でない場合に接着力が十分に確保できないことがわかる。湿度をはじめとしたその他の条件では、乾燥が十分であると試験条件に比べると接着力はやや低い傾向があるものの、基準値の目安となる1.0MPaをおおむね満足していた。

低温時の養生となる場合に着目して試験条件を設定しプライマーの接着強度を試験した結果を図-9.2に

示す。23°C65%RHの標準条件と比較すると、温度が低くなるほど、また湿度が高くなるほど、接着強度が小さくなることがわかる。特に、養生時間が短い場合はその影響が大きい。基盤が半水浸状態におかれる場合に関する試験条件については、本実験の材料については接着力への影響は見られなかった。

### 9.4 まとめ

被覆材料の施工時の温湿度環境を変化させて施工試験を行った結果、コンクリート基盤面が湿潤状態にある場合、ならびに低温での養生となる場合に、接着力が低下する可能性があることがわかった。

表面保護工をはじめとした補修工事は現位置での施工となり、材料の基本性能に加えて、それらが確実に施工されていることが重要な要件となる。施工の信頼性や品質の確保は現場での管理レベルに負うところが多いが、管理基準は不十分で現場技術者の経験や感覚等の主観的判断に頼るのが実情である。本研究により、これが簡易かつ定量的に評価、判定できるようになる。今後の構造物メンテナンス時代に向け、現場施工となる補修工事の品質確保方策を今後も戦略的に進めてゆく必要があると考えられる。

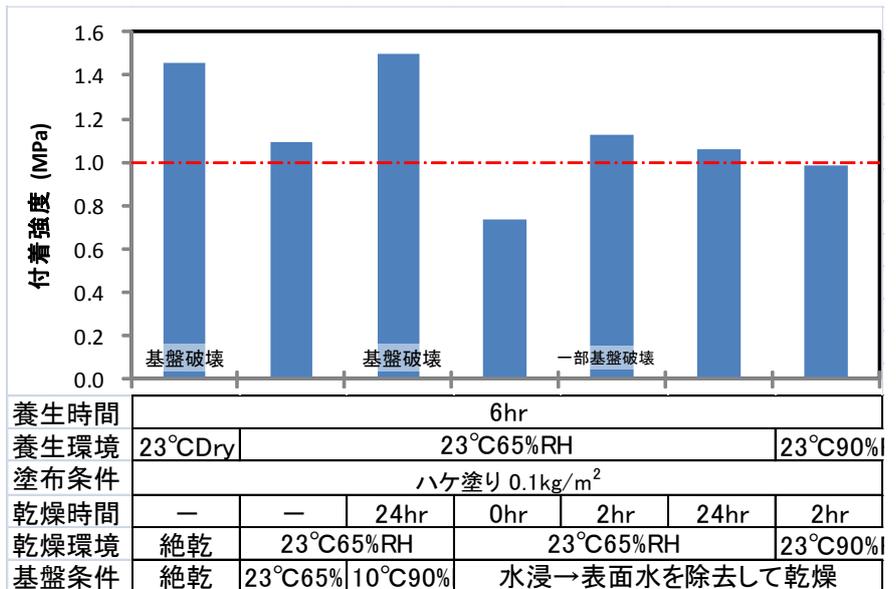


図-9.1 乾燥および養生条件とプライマー接着強度

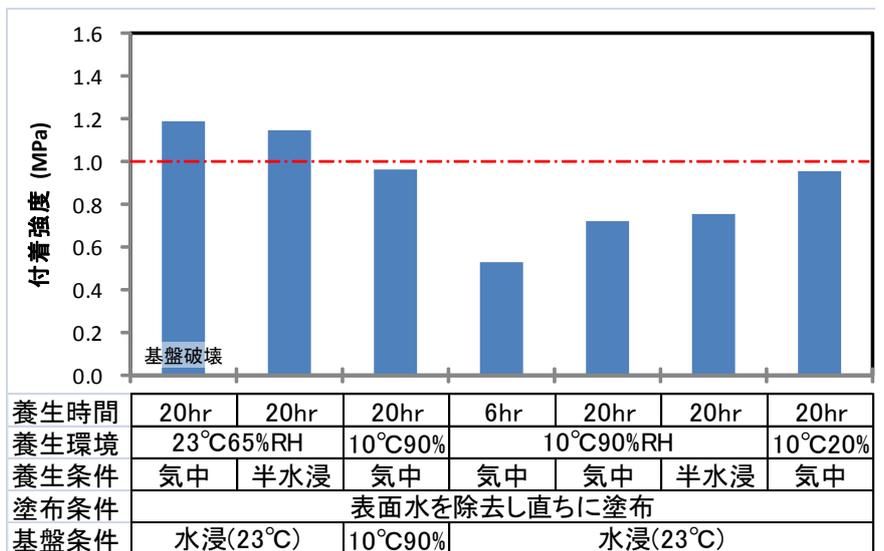


図-9.2 低温時の乾燥・養生条件とプライマー接着強度

## 参考文献

- 1) 社団法人日本土木学会：表面保護工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー119，2005
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説，pp. 58-59，61-63，1984
- 3) 守分敦朗，三浦成夫，長滝重義，大即信明：既設コンクリート構造物に施工した表面塗装材料の耐久性評価，土木学会論文集，No. 520，V-28，pp. 99-110，1995
- 4) 加藤祐哉，佐々木巖，守屋進，西崎到：コンクリート用表面被覆材の塩害抑制効果および耐久性に関する検討，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，pp. 357-364，2008
- 5) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト 建設事業への新素材・新材料利用技術の開発，1992
- 6) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書，第1編，pp. 115-127，1988
- 7) 独立行政法人土木研究所基礎材料チーム：コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート，<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/enkabutsu/enkabutsu.xls>
- 8) 建設省土木研究所，他：劣化部材の補修・補強技術の開発に関する共同研究報告書，第27号，p168，1989  
加藤祐哉，守屋進，西崎到：コンクリートの劣化抑制を目的とした被覆系材料などの効果に関する検討，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，7，207-212，2007. 11
- 9) 佐々木巖，加藤祐哉，守屋進，西崎到：コンクリート用表面被覆材の塩害抑制効果及び耐久性に関する検討，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，8，357-364，2008. 11
- 10) 佐々木巖，西崎到，守屋進：塩害環境におけるコンクリート表面被覆材の長期耐久性，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，（投稿中）
- 11) 「海洋構造物の耐久性向上に関する共同研究報告書」：共同研究報告書第348号（平成18年7月）
- 12) 大谷悟司，守屋進他：「暴露20年経過したコンクリート表面被覆材の性能」第14回プレストレストコンクリートの発展に関するシボジウム論文集，2005. 11
- 13) 西崎到，ピエール・ラボシエール，ケニス・W・ニール，：炭素繊維シート補強材の暴露試験による耐久性の検討，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5巻，pp. 99-104，平成17年10月.
- 14) Itaru Nishizaki, Pierre Labossière and Bodgan Sarsaniuc, "Durability of CFRP sheet reinforcement through exposure tests" Proceedings of the Seventh International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-7), Vol. 2, pp. 1419-1427, 2005. 11.
- 15) M. Demers, P. Labossiere, I. Nishizaki, B. Sarsaniuc and K. W. Neale, "Durability of CFRP sheets under natural climatic conditions" Proceedings of the Third International Conference on Durability and Field Applications of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction (CDCC2007), pp. 151-158, 2007. 5.
- 16) Y. KATO, T. TOMIYAMA and I. NISHIZAKI, "Study on the durability of adhesive properties of continuous fiber sheet reinforcement with concrete" 5th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-V), Paper No. 146, , 2008. 9
- 17) K. Benzarti, M. Quiertant, C. Aubagnac, S. Chataigner, I. Nishizaki and Y. Kato, "Durability of CFRP strengthened concrete structures under accelerated or environmental ageing conditions" ICCRRR2008, 2008. 11
- 18) K. Benzarti, M. Quiertant, C. Aubagnac, S. Chataigner, I. Nishizaki and Y. Kato, "Comparative French and Japanese studies on the durability of CFRP strengthened concrete structures" 11th Japanese-European Symposium on Composite Materials, pp. 65-68, 2008. 9