

10.3 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、加藤祐哉

【要旨】

様々なコンクリートの補修補強工法が開発されているが、その合理的な選定のためにライフサイクルを通じたコスト評価が必要である。それ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だが、このような基礎資料は不足している。本研究では、長期暴露中の供試体や補修構造物の調査から、被覆系を始めとした補修補強材料・工法の耐久性に関する情報を整理すると共に、耐久性の評価・向上に関する検討を行っている。平成 19 年度は、宮崎、北海道、石川の補修構造物及び茨城、沖縄、石川の暴露供試体の調査を実施した。その結果、使用された被覆系補修補強材料の塩害及び ASR の補修・抑制効果や付着耐久性等に関する情報が得られた。

キーワード：塩害、ASR、表面被覆材、連続繊維シート、炭素繊維、暴露試験、補修構造物調査

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だが、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ている。

平成 19 年度は、北海道・石川県の塩害補修橋梁より採取した試料の調査、並びに茨城県・石川県・沖縄県に暴露した暴露供試体の調査により、被覆系補修材料（以下、表面被覆材）の塩害及び ASR 補修・抑制効果の耐久性について検討した。また、これらの評価方法のための予備的な試験を実施した。

2. 表面被覆材の遮塩性試験条件決定のための予備試験

2.1 方法

表面被覆材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¹⁾。これは遊離塗膜（フリーフィルム）を供試体として使用する試験であるが、今回は実構造物及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、コンクリート付きのスラ

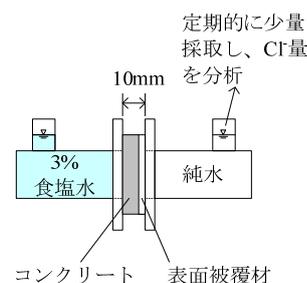


図-1 遮塩性試験概要（拡散セル法）

表-1 予備試験に用いた供試体の塗装仕様

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

イスした試料を用いてこれらの性能を評価した。

通常は、3%食塩水が表面被覆材の表面側、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²⁾、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。

予備試験には、平成元年度より沖縄県大宜味村及び茨

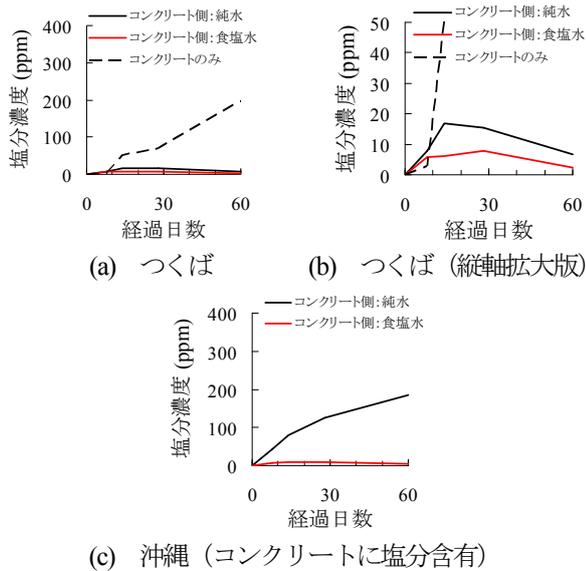


図-2 遮塩性予備試験の結果（純水側の塩分濃度）

城県つくば市にて 17 年間暴露していた表面被覆コンクリート供試体³⁾を用いた。表面被覆材の仕様は表-1 に示すとおりで、大直味、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 $10\text{kg}/\text{m}^2$ 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ておらず、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。

2.2 試験結果

試験結果を図-2 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(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、表面被覆材の有無による遮塩性の差を明確に評価できることが分かった。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(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分かった。一方、表面被覆材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(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より高かった。即ち、

表-2 塩害補修用表面被覆材に対する要求性能

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 ⁻ 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

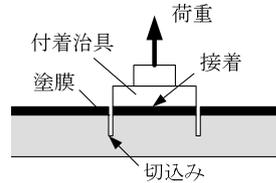


図-3 プルオフ式付着試験概要

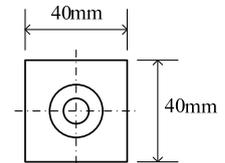


図-4 付着治具

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分かった。

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. 被覆系補修材料の塩害補修・抑制効果の耐久性に関する調査

3.1 概要

平成 19 年度は、前年度に一部調査した宮崎県の橋梁に加え、北海道及び石川県の橋梁を調査対象とした。また、沖縄県の塩害環境に 17 年間暴露した暴露供試体を調査対象とした。

3.2 評価方法

塩害補修・抑制のための表面被覆材に求められる性能として、表-2 に示す項目が挙げられる。本研究では、補修塩害構造物や暴露供試体から表面被覆材の付着したコンクリートコアを採取し、可能な限り薄くスライスした試料を用いてこれらの性能を評価した。

3.2.1 付着性

コンクリートとの付着性を評価するために、図-3 に示すようなプルオフ式付着試験 (建研式) を実施した。付着治具には図-4 に示すような 40mm×40mm のものを用いた。

3.2.2 ひび割れ追従性

表面被覆材のひび割れ追従性を評価する方法には JSCE-K 532 があるが、これは試験基板上に直接表面被覆

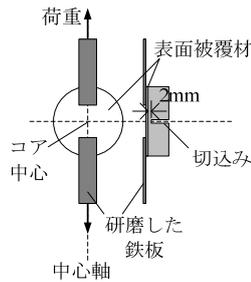


図-5 ひび割れ追従性試験概要

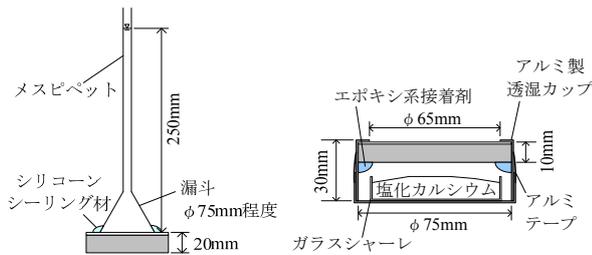


図-6 透水試験概要

図-7 透湿試験概要

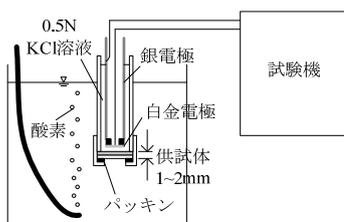


図-8 製科研式酸素透過性試験概要

材を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表面被覆材には、この方法は適用できない。そこで、図-5 に示すような試験¹⁾を行った。試験は、次に示す手順により行った。

- (1) 直径 50～75mm 程度の表面被覆材付きコアを厚さ 10mm 程度にスライスする。
- (2) スライス試料の中心軸(図-3 参照)に沿って、100mm×25mm×1.6mm の研磨した鉄板をエポキシ系接着剤等で表面被覆材に接着させる。
- (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、表面被覆材下面から 2mm までを残すように入れる。
- (4) 引張試験に供試体を設置し、5mm/min の速度で引張る。
- (5) 表面被覆材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。

3.2.3 遮塩性

表面被覆材の遮塩性の評価は、2.で検討した方法で行った(図-1)。

3.2.4 遮水性

表面被覆材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。平成 19 年度は、JIS A 6909-7.12 に準拠した常圧透水試験(図-6)を実施した。供試体には、直径 100mm、厚さ 20mm のものを用いた。

3.2.5 遮湿性

表面被覆材の遮湿性を評価するために、JIS A 1171-7.11 の吸湿試験と同様の試験を実施した(図-7)。供試体には、直径 75mm、厚さ 10mm のコンクリート付きスライス試料を用いた。

3.2.6 酸素遮断性

表面被覆材の酸素遮断性は、図-8 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の電極における還元反応によって生じる電流変化から、式(1)及び(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 に加工したものを用いた。

$$P = \frac{i^{\circ} l}{4 \times 965 / 224 \times 76 \times A} \quad (1)$$

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

- ここに、
- P : 酸素透過係数 (mL・cm/cm²・s・cmHg)
 - A : 試料と密着する白金電極の面積 (cm²)
 - i° : 測定電流 (μA)
 - l : 試料膜厚 (μm)
 - Q : 酸素透過量 (mg/cm²・day)

3.3 試料の概要

平成 19 年度は、宮崎県(一部は平成 18 年度に実施)、北海道、石川県の 3 つの補修塩害構造物及び、沖縄県に 17 年間暴露した供試体³⁾の表面被覆材を調査した。調査した表面被覆材の仕様を表-3 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-1)。現在の表面被覆材は、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(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かった。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 箱桁及

表-3 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 (μm)	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 55μm		
	ビニロンシート		
	クロロプレンゴム中塗り 55μm×2層		
	ハイパロンゴム上塗り 35μm×2層		
一部に旧被覆材残存	エポキシ樹脂パテ ポリブタジエンゴム料中塗り×3層 ポリウレタン樹脂上塗り×2層	1,540	21年
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 60μm×3層		
	ポリウレタン樹脂上塗り 30μm		
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 60μm		
	艶消しふっ素樹脂上塗り 25μm		
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 60μm		
	アクリルシリコン樹脂塗料上塗り 30μm		
供2 (沖縄) エポキシ樹脂 系 (表-2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 60μm		
	ポリウレタン樹脂塗料上塗り 30μm		
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 40μm		
	ふっ素樹脂塗料上塗り 40μm		
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 1,500μm		
	柔軟型アクリルシリコン樹脂塗料上塗り 30μm		
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 1,000μm		
	柔軟型ふっ素樹脂塗料上塗り 30μm		
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 1,000μm		
	柔軟型アクリル樹脂塗料上塗り 30μm		
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 480μm		
	柔軟型ポリウレタン樹脂塗料上塗り 30μm		

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-2 に示す箇所の海側及び陸側の計 6 箇所から採取した。

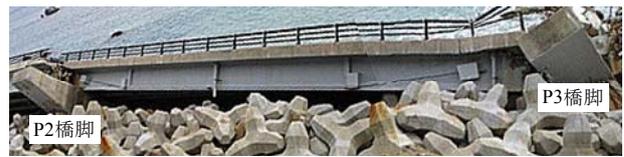


写真-1 橋1



写真-2 橋2

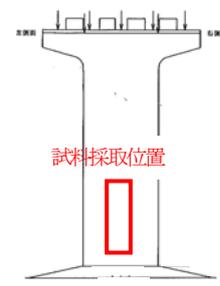


図-9 橋3のP13橋脚



(a) 茨城県つくば市 (b) 沖縄県大宜味村

写真-3 供試体暴露状況

橋3 (石川) は、昭和 57 年に竣工された PCI 桁及び 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-9 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) ³⁾ は、平成 2 年 11 月から茨城県つくば市及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 に示す。



写真4 P13 橋脚外観



写真5 橋3の外観

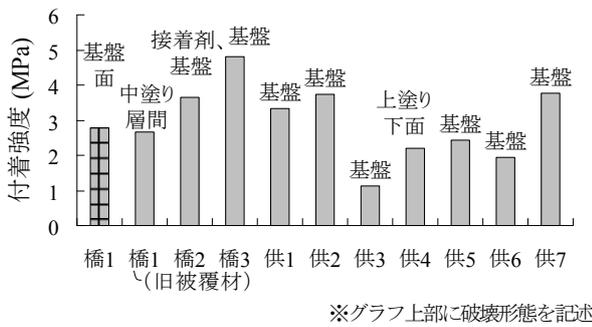


図-10 付着性試験結果

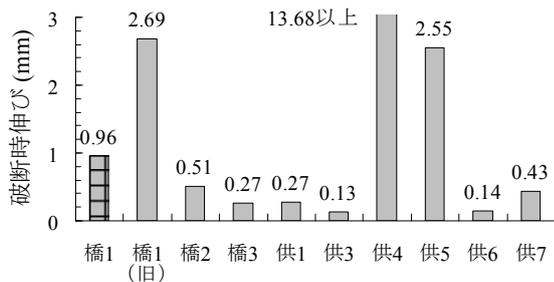


図-11 ひび割れ追従性試験結果

3.4 試験結果

3.4.1 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、膨れが見られた。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、一部にひび割れ及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4)。また、写真5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。

3.4.2 付着性

付着性試験結果を図-10に示す。橋1、橋2、供4を除

く表面被覆材は、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分かった。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分かった。

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⁴⁾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分かった。

約21年が経過した旧被覆材(ポリブタジエンゴム系)の付着強度は2.7MPaで新被覆材とは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 μ 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(本研究で実施した試験とは載荷制御方式が異なる)で測定した場合1.0MPa以上、柔軟型被覆材の場合は0.7MPa以上を提案している⁵⁾。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分かった。

3.4.3 ひび割れ追従性

ひび割れ追従性試験結果を図-11に示す。膜厚が1,000 μ mを超える柔軟型被覆材の橋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における値であるが)⁵⁾を示し、ひび割れ追従性に非常に優れていることが分かった。特に、膜厚が1,500 μ 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及び供7となった。一方、柔軟型ではない被覆材については、破断時伸びが0.4mm以下であり、柔軟型被覆材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⁵⁾でも低追従に分類される程度である。また、膜厚が1,000 μ 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分かった。

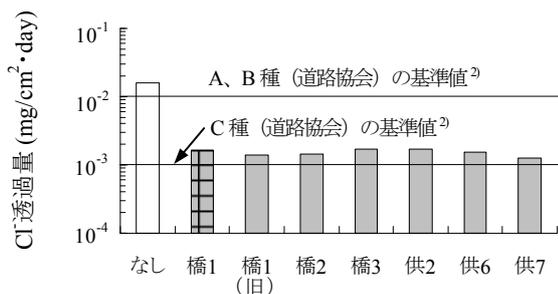


図-12 遮塩性試験結果 (30日のCI透過量)

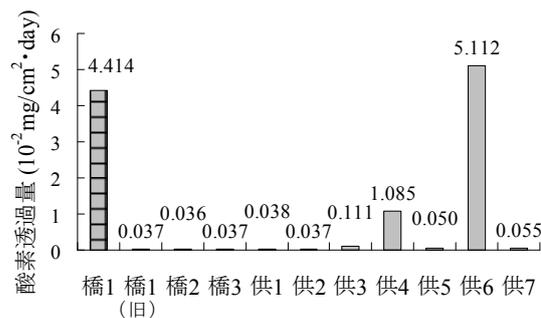


図-15 酸素透過性試験 (製科研式) 結果

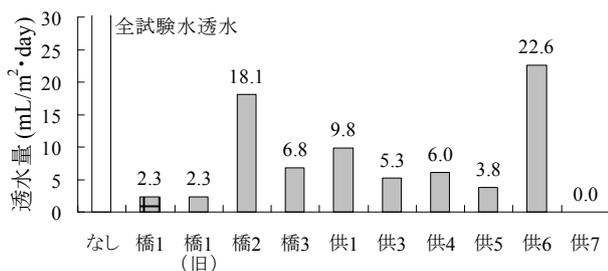


図-13 透水試験結果 (24時間の透水量)

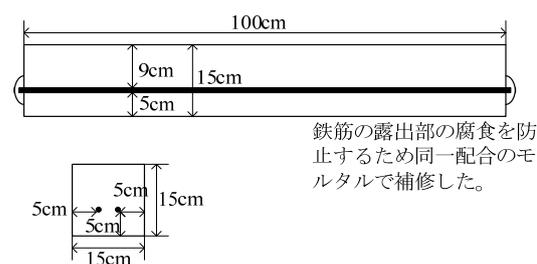


図-16 ASR 暴露供試体の形状

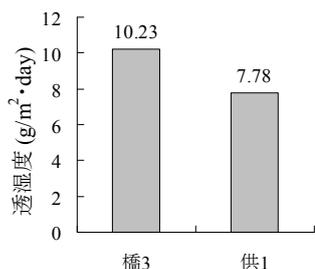


図-14 透湿 (吸湿) 試験結果

3.4.4 遮塩性

遮塩性試験の結果を図-12に示す。30日のCI透過量はいずれの表面被覆材も $12.5 \times 10^{-4} \sim 17.1 \times 10^{-4} \text{mg/cm}^2 \cdot \text{day}$ 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CI透過量の基準を $10^2 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{day}$ 以下 (A、B種) 及び $10^3 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{day}$ 以下 (C種) としている²⁾。橋3及び供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 $10^5 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{day}$ であった⁴⁾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。

3.4.5 遮水性

透水試験の結果を図-13に示す。表面被覆材がない場合 (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、表面被覆材がある場合は、

透水量が $0 \sim 22.6 \text{mL/m}^2 \cdot \text{day}$ に留まった。

橋1の初期値は $0.07 \text{mL/m}^2 \cdot \text{day}$ であった⁴⁾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)⁶⁾では、基準値として $20 \text{mL/m}^2 \cdot \text{day}$ 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分かった。

3.4.6 遮湿性

透湿 (吸湿) 試験の結果を図-14に示す。平成19年度末の段階では、橋3 (14~15年経過) 及び供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 $5 \text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ 以下を提案している⁵⁾が、これらの透湿度は既にこの値を上回っていた。遮湿性に関しては、まだ取得データ数が少ないため、引続きデータの取得を実施したいと考えている。

3.4.7 酸素遮断性

酸素透過性試験の結果を図-15に示す。柔軟型ポリマーセメント系の供6及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 $4.4 \times 10^2 \sim 5.1 \times 10^2 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{day}$ 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 $1.1 \times 10^2 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{day}$ を示した。その他の表面被覆材は、 $0.1 \times 10^2 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{day}$ 以下と少なく、特にエポキシ系及びポリブタジエンゴム系のものは $0.05 \times$

表-4 ASR 暴露供試体の種類

セメント	表面被覆等	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 ³)		LS	LE	LA	LM
②低アルカリ (アルカリ総量を 3kg/m ³ に増加)		3S	3E	3A	3M
③低アルカリ (アルカリ総量を 5kg/m ³ に増加)		5S	5E	5A	5M
④高炉 B 種		SS	SE	SA	SM

表-5 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 ³ 、吸水率: 1.97%)
粗骨材(G)	H 産安山岩砕石 (ASR 反応性あり、最大粒径 25mm、密度: 2.65g/cm ³ 、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 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 ³)			
	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 ³)	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 ³ 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 ³ 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

10² mg/cm²·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分かった。

酸素透過量が 4.4×10² mg/cm²·day と比較的多かった橋 1 は、図-13 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。

表面被覆材がない場合 (コンクリートのみ) では、図-8 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。

4. 被覆系補修材料の ASR 補修・抑制効果の耐久性に関する調査

4.1 概要

被覆系補修材料 (表面被覆材) の ASR 補修・抑制効果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。平成 19 年度は前年度に引続き、石川県に 20 年間暴露した ASR 供試体の残存膨張率調査を行った。

4.2 暴露供試体概要

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及び 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⁷⁾。どのような表面被覆材等が劣化因子の侵入阻止に適して

表-7 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 ²)
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-8 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 (%)	ガラスファイバー (%)
45	1:1.5	15	4.16	1.0	1.5

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。



写真-6 ASR 供試体の暴露状況

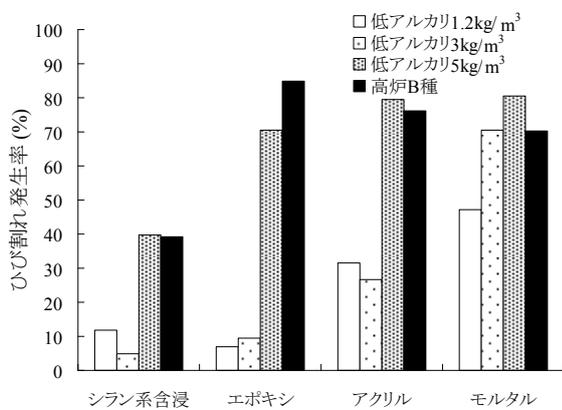


図-17 ひび割れ発生率

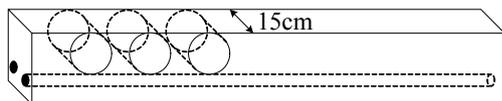


図-18 コア採取位置

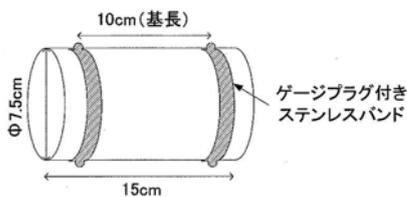


図-19 残存膨張率調査用供試体

暴露供試体の形状を図-16 に示す。供試体は、表4 に示すように①低アルカリセメント（アルカリ量は Na₂O 換算で 1.2kg/m³）、②低アルカリセメントに水酸化ナトリウム（NaOH）を添加してアルカリ量を 3kg/m³ に増加させたもの、③同様にアルカリ量を 5kg/m³ 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

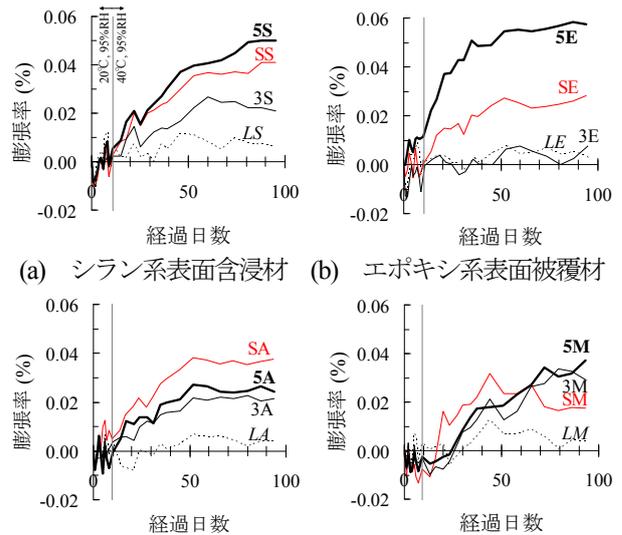


図-20 経過日数-膨張率の関係

である。使用材料を表-5、コンクリートの配合を表-6、表面被覆等の仕様を表-7、モルタル吹付けに用いた特殊モルタルの配合を表-8 に示す。

暴露状況を写真-6 に示す。暴露開始1年後に外観を観察した結果、表面被覆材の一部が飛砂により磨耗していたため、再度表面被覆材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。

前年度の調査において、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(3)によりひび割れ発生率を求めたところ（図-17）、L 及び 3 シリーズはひび割れ発生率が少なく、5 及び 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(%)

$$= \frac{\text{ひび割れを含むメッシュ数}}{\text{全メッシュ数}} \times 100 \quad (3)$$

4.3 残存膨張率試験方法

暴露供試体の ASR 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-18 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-19 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、残存膨張率調査用供試体とした。

4.4 残存膨張率試験結果

経過日数-膨張率の関係を図-20、解放膨張率を図-21、

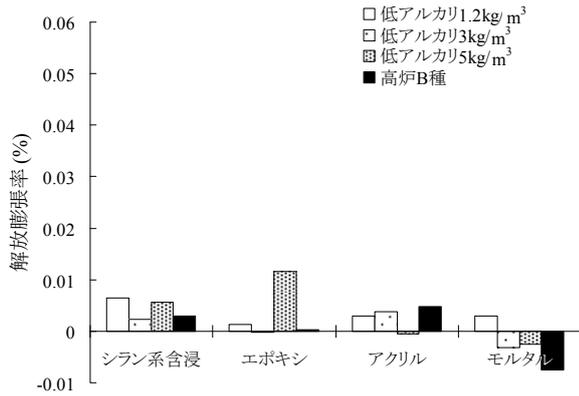


図-21 解放膨張率 (試験開始9~11日のデータ)

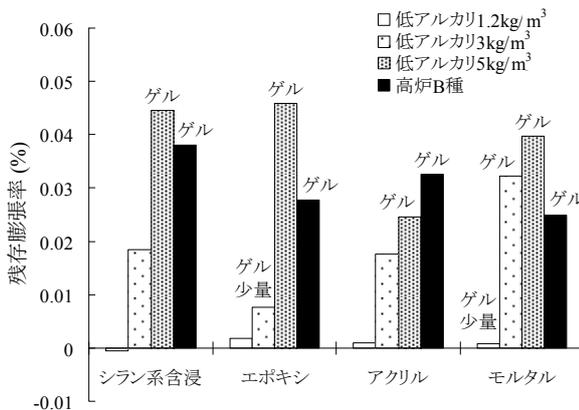


図-22 残存膨張率 (試験開始93~95日のデータ)

残存膨張率を図-22 に示す。解放膨張率はいずれの供試体も±0.01%以内であり、ほぼゼロであった。暴露供試体の寸法が 1,000mm×150mm×150mm と小さく、またφ75mm×150mm 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 1.2kg/m³) の残存膨張率はほぼゼロであり、ASR 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 ASR が発生しにくいものと考えられる。

ASR 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 3kg/m³) 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

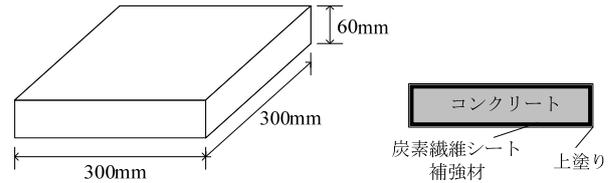


図-23 供試体

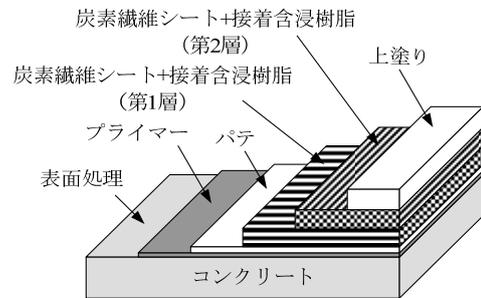


図-24 炭素繊維シート補強材の構成

表-9 炭素繊維シート補強材の仕様

試料	プライマー	パテ	炭素繊維種類	接着含浸樹脂種類	上塗りの色
A	あり	あり	PAN系	エポキシ	白
B	あり	あり	PAN系	エポキシ	白
C	あり	あり	ピッチ系	エポキシ	白
D	あり	なし	PAN系	エポキシ	白

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分かった。

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/m³) 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)。

5. 被覆系補強材料の付着耐久性に関する調査

5.1 概要

被覆系補強材料の付着耐久性を調査するために、暴露供試体の調査を実施した。平成 19 年度は、連続繊維シートで補強したコンクリート供試体を用いて、付着性評価を行った。

5.2 試験方法

5.2.1 供試体

供試体は、図-23 に示すように 4 種類の炭素繊維シー



写真-7 暴露状況



図-25 暴露供試体設置角度

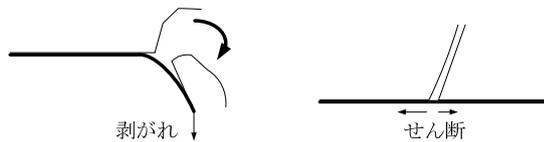


図-26 実際の剥離形態

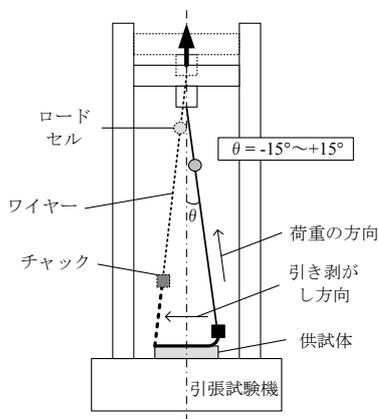


図-27 引き剥がし試験概要

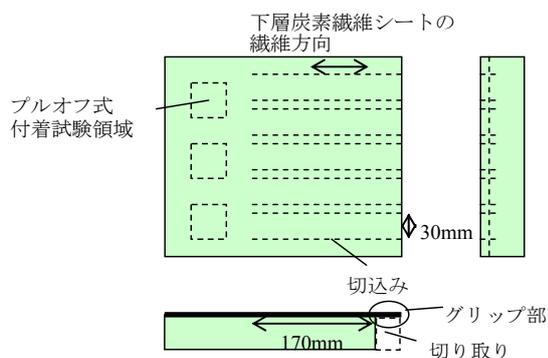


図-28 引き剥がし試験供試体

ト補強材を貼り付けたコンクリート平板であり、平成4年に1種類当たり9枚、計36枚を製作した。9セット中1セットを初期値用の供試体とし、残りの8セットを暴露用とした。コンクリート平板は、舗装用のものを用いた。コンクリート平板に貼り付けた炭素繊維シート補強材は、図-24に示すように、主にプライマー、パテ、2枚の炭素繊維シート、接着含浸樹脂、上塗り塗料（仕上げ材）から構成されている。2枚の炭素繊維シートは、繊維方向が互いに直交するように貼り付けた。4種類の炭素繊維シート補強材には、平成4年当時国内の主要な4社の製品を用いた。炭素繊維シート補強材の仕様を表9に示す。

5.2.2 暴露試験

供試体（8セット）は、平成4年より茨城県つくば市で暴露を開始した。暴露状況を写真-7に示す。供試体は、表面に雨水等が残らないように、図-25に示すように南側に5度の傾斜角度を付けて設置した。暴露14年後の平成18年に、8セット中1セットを回収して付着性の評価を行った。

5.2.3 プルオフ式付着試験

炭素繊維シート補強材の付着性を評価するために、3.2.1に示すプルオフ式付着試験を実施した。

5.2.4 引き剥がし試験

当初の研究計画では、炭素繊維シート補強材の付着性評価はプルオフ式付着試験のみで行う予定であったが、最近では、実際の剥離形態は図-26に示すような剥がれまたはせん断が考えられている⁸⁾。そこで、引き剥がし試験やせん断試験による付着性評価も実施することにした。平成19年度は、図-23の供試体が利用できる引き剥がし試験を実施した⁹⁾¹⁰⁾。

引き剥がし試験には、プルオフ式付着試験で使用した供試体を流用した。試験は図-27に示すような一般的な引張試験機を用い、次に示す手順で行った⁸⁾¹⁰⁾。

- (1) 図-27のチャックを取り付けるグリップ部を確保するために、図-28に示すように供試体のコンクリート基盤の一部を切り取る。
- (2) 第1層(下層)炭素繊維シートの繊維方向に沿って、コンクリート基盤にまで達する切込みを入れる。切込みの長さはグリップ部を除き170mmとし、切込み間の幅は30mmとする。この部分を引き剥がし部とする。
- (3) 引き剥がし部(長さ170mm、幅30mm)の中央部と試験機の鉛直軸が一致するように、供試体を設置する。
- (4) 長さ600mmのワイヤー(途中にロードセルがある)

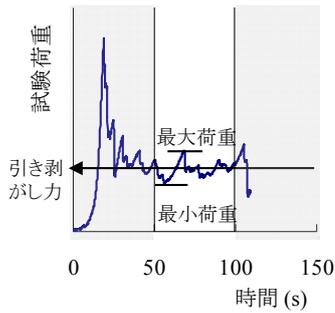


図-29 引き剥がし力の定義

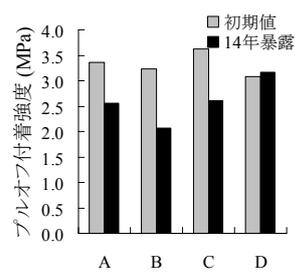


図-30 プルオフ付着強度 (暴露供試体)

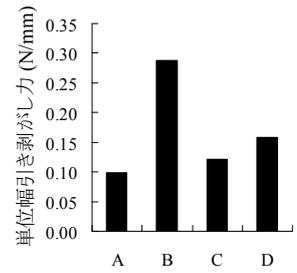


図-31 単位幅引き剥がし力 (暴露供試体)

表-10 プルオフ式付着試験結果

試料	プルオフ付着強度 (MPa)		14年暴露 / 初期値 (%)
	初期値	14年暴露	
A	3.36	2.55	76.1
B	3.22	2.07	64.3
C	3.63	2.61	72.0
D	3.09	3.17	102.6

を試験機のクロスヘッドに接続し、もう一端をチャックにより供試体のグリップ部に接続する。

- (5) 100mm/min の速度で引張荷重を行い、剥離長さが170mmに達するまで試験を行う。この時の荷重方向は、試験機の鉛直軸から±15°の範囲で変化する。
- (6) 引き剥がし特性は、引き剥がし力及び単位幅引き剥がし力で評価する。引き剥がし力は、図-29 に示すように試験開始後 50s~試験終了前 10s の範囲における最大荷重と最小荷重の平均値と定義され、式(4)に

より計算する。また、単位幅引き剥がし力は、式(5)により計算する。

$$f_p = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} \quad (4)$$

$$F_p = \frac{f_p}{w} \quad (5)$$

- ここに、 f_p : 引き剥がし力 (N)
 L_{\max} : 試験開始後 50s~試験終了前 10s の範囲における最大荷重 (N)
 L_{\min} : 試験開始後 50s~試験終了前 10s の範囲における最小荷重 (N)
 F_p : 単位幅引き剥がし力 (N/mm)
 w : 引き剥がし部の幅 (mm)

表-11 引き剥がし試験における破壊形態 (暴露供試体)

試料	試験後の状況 (上: 引き剥がし部裏面 下: コンクリート基盤面)	破壊形態
A		連続繊維シート/コンクリート基盤界面
B		70%: コンクリート基盤 30%: 連続繊維シート/コンクリート基盤界面
C		連続繊維シート/コンクリート基盤界面
D		コンクリート基盤

表-12 再現供試体に用いた材料と当時の材料違い (上塗りを除く)

試料	再現供試体に用いた材料			
	プライマー	パテ	炭素繊維シート	接着含浸樹脂
A	同じ	同じ	ほぼ同じ	同じ
B	同じ	少し柔らかい	同じ	ほぼ同じ
C	ほぼ同じ	ほぼ同じ	ほぼ同じ	ほぼ同じ
D	同じ	なし(同じ)	同じ	同じ

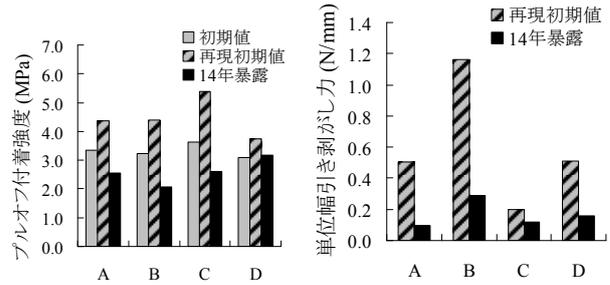


図-32 プルオフ付着強度 図-33 単位幅引き剥がし力 (再現初期値追加)

表-13 引き剥がし試験における破壊形態 (再現供試体)

試料	試験後の状況 (上: 引き剥がし部裏面 下: コンクリート基盤面)	破壊形態
A	パテ コンクリート基盤表面	パテ
B	コンクリート 炭素繊維シート 補強材 基盤表面	80%: 連続繊維シート/コンクリート基盤界面 (少量のコンクリートが引き剥がし面に付着) 20%: 炭素繊維シート層間
C	炭素繊維シート補強材 コンクリート基盤表面	連続繊維シート/コンクリート基盤界面
D	コンクリート	コンクリート基盤

5.3 試験結果

5.3.1 プルオフ式付着試験

初期値用供試体及び暴露供試体のプルオフ式付着試験結果を表-10及び図-30に示す。全試料の初期値が3.0MPa以上を示し、破壊形態はコンクリート基盤における破壊であった。暴露供試体については、Dの付着強度は初期値とほぼ同等で、A、B、Cの付着強度は初期値の64~76%程度であった。破壊形態は初期値の場合と同様、全てコンクリート基盤における破壊であった。14年間で付着強度は低下したが、コンクリート基盤における破壊形態を示したことから、実際の付着強度はより大きいと考えられ、基準類で必要とされる基準値1.5MPa¹⁾を満足することから、現在でも十分な付着性を有していると判断できる。

5.3.2 引き剥がし試験

暴露供試体の単位幅引き剥がし力を図-31に示す。Bが最も高い値を示した。

引き剥がし試験による破壊形態を表-11に示す。BとDの引き剥がし面にコンクリートが付着した。これらの引き剥がし試験による破壊形態は、コンクリート基盤における破壊であったと考えられる。引き剥がし面に付着したコンクリートの量は、Bの方が多かった。一方、AとCの引き剥がし面にはコンクリートは付着せず、破壊形態は連続繊維シート/コンクリート基盤界面における破壊であった。これより、全試料がコンクリート基盤における破壊を示したプルオフ式付着試験とは異なる結果を示すことが分かった。

5.4 単位幅引き剥がし強度の初期値の検討

当初の研究計画では引き剥がし試験を実施する予定はなかったことから、引き剥がし試験の初期値は得られていなかった。そこで、初期値を得るために新しい供試体(再現供試体)を作製した。材料は平成4年当時のもの

とできる限り同じものを用いた。当時の材料との比較を表-12 に示す。全ての材料が、当時のものと完全に同じにすることはできなかつたことから、付着性の再現性を評価するために、引き剥がし試験のみならずプルオフ式付着試験も実施した。

図-30 に再現供試体のプルオフ付着強度を加えたものを図-32 に示す。全試料の再現初期値は、当時の初期値に比べて高い値を示した。材料が当時と全く同じ D については、再現初期値と当時の初期値の差が他の試料と比べて小さかつた。破壊形態は、全てコンクリート基盤における破壊であつた。

暴露供試体と再現供試体の単位幅引き剥がし力を図-33 に示す。全試料の再現初期値が、暴露供試体の値よりも大きかつた。しかし、再現供試体は完全に当時の初期値を再現できていないため、必ずしも単位幅引き剥がし力が 14 年で低下したとは言えない。

再現供試体の破壊形態を表-13 に示す。A はパテにおける凝集破壊、B と C は連続繊維シート/コンクリート基盤界面における破壊、D はコンクリート基盤における破壊を示した。B については、厳密には剥離面の 20% 程度が 2 枚の炭素繊維シート層間における破壊であり、残りの 80% 程度に少量のコンクリートが付着している状態であつた。

引き剥がし試験による再現供試体の破壊形態は、全試料がコンクリート基盤における破壊を示したプルオフ式付着試験とは異なることが分かつた。従つて、引き剥がし試験とプルオフ式付着試験は異なつてゐることが、この結果からも明らかとなつた。また、引き剥がし試験は実際の剥離形態と類似していることから、炭素繊維シート補強材の剥離を評価する上で適した試験方法である可能性があることが分かつた。

6. まとめ

平成 19 年度に得られた結果は、次のとおりであつた。

- ・ 補修塩害構造物及び塩害対策暴露供試体を調査して、7~21 年が経過した表面被覆材の耐久性に関するデータを取得した。その結果、以下のことが分かつた。
 - (ア) コンクリート付きの表面被覆材で遮塩性を評価する際は、表面被覆材の向きによらず評価が行えることが分かつた。ただし、コンクリート中に塩分が混入している場合は、コンクリートを純水側に配置しないよう注意が必要である。
 - (イ) 超柔軟型で 1,500 μm を超える厚膜型の表面被覆材は、付着性評価においては層間破壊が生

じ易かつた。一方、このような表面被覆材のひび割れ追従性は非常に高かつた。

- (ウ) 今回調査した表面被覆材については、付着性及び酸素遮断性は良好な水準であつたが、遮塩性及び遮水性は基準値²⁾⁵⁾を満足しない程度にまで、低下が確認された。
- (エ) 付着性以外では、ポリマーセメント系表面被覆材はその他有機系に比べて性能が低かつた。
- ・ ASR 対策用暴露供試体を調査して、使用セメントや表面被覆等の ASR 抑制効果を調査した。その結果、以下のことが分かつた。
 - (ア) アルカリ総量が 1.2kg/m² 程度では、ASR はほとんど生じないことが分かつた。
 - (イ) 今回使用した高炉セメント B 種には、ASR 抑制効果が認められなかつた。
 - (ウ) アルカリ総量が規制値の 3kg/m² 以下では、今回調査したシラン系含浸材、エポキシ系及びアクリル系表面被覆材に ASR 抑制効果があることが分かつた。
- ・ 被覆系補強材料の付着性を評価した結果、14 年経過後でも十分な付着性を示した。また、より実際の剥離特性に近い引き剥がし試験が、付着性の評価方法としてプルオフ式付着試験より適している可能性のあることが分かつた。

謝辞

本研究の補修塩害構造物の調査に当たり、九州地方整備局宮崎河川国道事務所、宮崎県日南市役所、北海道開発局小樽開発建設部岩内道路事務所、石川県道路整備課より、多大なるご協力を頂きました。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 建設省土木研究所材料施工部化学研究室、他：高耐久性被覆材料の利用技術の開発に関する共同研究報告書、第 253 号、pp.193-204、2000
- 4) 倉成裕之、鈴木瑞男、岡崎健：小弥太郎橋上部工補修補強工事報告、オリ建技報、第 12 号、pp.85-93、2001
- 5) 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、pp.147-154, 181-188、2005
- 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

10.3 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

- の耐久性向上技術の開発報告書、第2編、pp.205-273、1988
- 7) 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.284-285、1988
 - 8) Ching Au, and Oral Büyüköztürk : Peel and Shear Fracture Characterization of Debonding in FRP Plated Concrete Affected by Moisture, Journal of Composites for Construction, pp.35-47, 2006
 - 9) L. Bizindavyi, and K. W. Neale : Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete, Journal of Composites for Construction, pp.153-160, 1999
 - 10) 藤澤健一、富山禎仁、大島敏幸、稗田省三：引き剥がし試験による防食ライニング材のふくれ評価手法の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.943-948、2005
 - 11) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領、pp.328-333、2006