

論文 上面増厚工法施工後に劣化した RC 床版の補修工法に関する開発

神田 利之^{*1}・鈴木 真^{*2}・緒方 辰男^{*3}・松井 繁之^{*4}

要旨：RC床版の補修工法として、高速道路では上面増厚工法が多く採用されている。しかし、交通車両による輪荷重の繰返し载荷により、既設床版部および増厚床版部との境界部に水平ひび割れが生じ、そこに打継目等から雨水等が浸入することにより、RC床版が再劣化した事例が多数報告されている。本補修工法は、上面増厚後に水平ひび割れが生じた RC 床版に対して、水平ひび割れ内をウォータージェット工法で洗浄した後、水硬化型接着材（以下、「充填材」と称す）を注入して再一体化を図るものである。本稿では、本工法の適用性を確認するために、試験体を対象に実施した検証試験と得られた知見を報告する。

キーワード：上面増厚工法、水平はく離、ウォータージェット工法、充填材

1. はじめに

既存鋼橋の床版厚さ 230mm 以下の RC 床版において、交通車両の荷重による変状が発生している^{1), 2)}。RC 床版の補修方法は種々あり、その評価は国土交通省土木研究所で全面的に実施されている。本稿で対象とするのは上面増厚工法である。この工法は、平成元年ごろから試験・施工が実施され、各高速道路で適用されている。しかし、補強後、交通車両による輪荷重の繰返し载荷により、RC 床版が再劣化した事例が多数報告されている。そのメカニズムとして、下記が想定される。

- ① 車両交通荷重により、既設床版（旧床版）部と増厚床版（新床版）部との境界部に水平ひび割れが急速に進む。
- ② 水平ひび割れ部にコンクリート打継目等より雨水等が浸入、車両走行時の「すり磨き現象」²⁾により、コンクリート同士が擦れ合い発生した粉体（以下、「すり磨き粉」という）が堆積する。
- ③ 新旧床版が2層となり、再劣化が生じる。

本稿では既設床版の補強工法として上面増厚工法が採用され、その後の供用に伴い新旧床版の層間に水が浸透し再劣化した橋梁 RC 床版を対象に、再一体化する補修工法を開発するに至った経緯と得られた成果を報告する。

2. 上面増厚床版の新たな補修工法の検討

2.1 上面増厚工法が施された RC 床版の実態

図-1 に、床版上面増厚工法を施した後に再劣化が顕在化し、床版取替工事において撤去された RC 床版の一例を示す。図-1 より、新旧床版の境界付近で水平ひび割れが生じ、すり磨き粉が介在していることがわかる。

この水平ひび割れ部内に雨水等が浸入すれば、常に水

が滞留し、旧床版のひび割れ、鉄筋腐食、下面部のはく離・はく落へと進展していく可能性が大きくなる。



図-1 新旧床版に水平ひび割れが発生した事例

2.2 劣化した上面増厚床版の新たな補修工法の開発

このような新旧床版の水平ひび割れに対する補修工法として、これまで床版上面または下面から新旧床版の水平ひび割れ内を洗浄し、水硬化型樹脂充填材を注入して再一体化を図る工法が実用化されている（以下、「従来工法」という）。従来工法を採用する場合、水平ひび割れ部内の洗浄には、ウォータースプライヤーによりエアと洗浄水を交互に押出す洗浄機を使用しているが、水平ひび割れ部内の洗浄が確実に行われたか否かを確認することができないという欠点を有する。洗浄が確実に行われないと、すり磨き粉を残留させることになり、注入した充填材がすり磨き粉に浸透していかないため、所要の性能を期待することができない。

上記の従来工法に対し、更なる効果を期待するために、下記に示す開発目標を設定した。

- ① 一連の作業を床版下面から行えること
- ② 水平ひび割れ部内に滞積するすり磨き粉を確実に除去すること

*1 (株)ケミカル工事 事業統括本部 プロジェクト推進室 課長代理 (正会員)

*2 西日本高速道路エンジニアリング関西 (株) 道路技術部 課長代理 (正会員)

*3 西日本高速道路 (株) 建設事業部技術計画課 課長 (正会員)

*4 大阪大学 名誉教授 (正会員)

- ③ 水平ひび割れ部近傍に複雑な状態で発生しているひび割れにも確実に充填を行うこと
 - ④ 洗浄後、水平ひび割れ内の洗浄水が残存する状態においても、充填材は所要の接着性能を発揮すること
- これらの検証を行い、従来工法に対し新たな知見を加えることによって、新しい補修工法の研究開発を試みた。提案する補修工法の概要を下記に示す。

- ① 床版下面から施工を行うことにより、交通規制を行う必要がなく、時間的制約を受けずに工程等を計画できる（床版上面からの施工も可能である）。
- ② 水平ひび割れ部の洗浄機器として、ウォータージェットノズルのヘッド部を改良したスピンジェットノズルを開発し、洗浄効果の向上を図る。

本補修工法の適用性を確認するために、第一段階としてコンクリート版を製作して模擬試験を実施し、基礎データの収集を行った。次に、第二段階として実際に供用されていたが劣化が顕在化し、取替え工事が行なわれた際に撤去された RC 床版を使用して施工試験を実施した。

3. 模擬試験

3.1 試験方法

模擬試験は試験体製作後、洗浄試験および充填材注入試験を行い、充填材の付着性能を確認するために静的せん断付着試験を行った。

模擬試験体は、RC 床版を設計する際に必要とされる強度 ($f_{ck}=24\text{N/mm}^2$) を有するコンクリート板（図-2 参照）を製作し、その上面に透明なアクリル板を重ね合わせたものを試験体 1、同様のコンクリート板を別途製作し 2 枚重ね合わせたものを試験体 2 とした。

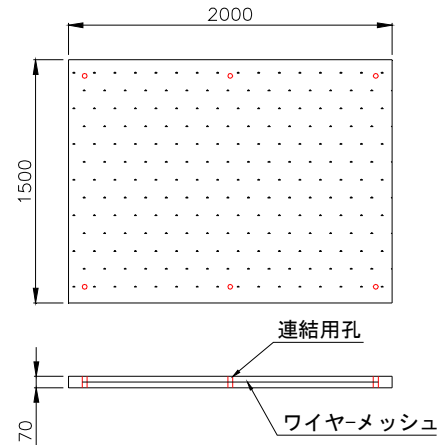


図-2 コンクリート板の構造図

試験体 1 は洗浄および充填材の注入状況を目視により確認する目的とし、試験体 2 は上面増厚工法を施した RC 床版を再現することを目的とした。コンクリート板に対しては、重ね合わせる面をウォータージェットにより粗面仕上げし、各試験体とも重ね合わせる面にスペーサーを設置して空隙 (1~3 mm) を設けた。



空隙内には、車両走行時のすり磨き現象により水平ひび割れ部内に滞積するすり磨き粉を想定して、ウォータージェットによるコンクリート部材のはつり工事の際に回収されるスラッジ（以下、「仮想存置材」という）を敷き詰め、試験体の四辺にシール材を塗布して密閉した。各試験体の仕様、設置状況等を表-1 に記す。

3.2 洗浄方法の検討

(1) 試験体 1

試験体 1 による洗浄試験は、2 種類の機器を用いて実施した。CASE1 は一般的に汚泥水の回収等に使用される

表-1 模擬試験体の仕様

	試験体 1 (洗浄試験, 充填材注入試験)	試験体 2 (洗浄試験のみ)
材料	コンクリート板: 1 枚, アクリル板: 1 枚	コンクリート板: 2 枚
寸法	コンクリート板: 2000mm × 1500mm × 70mm アクリル板: 2000mm × 1500mm × 15mm	2500mm × 1500mm × 70mm (コンクリート板 1 枚当たり)
空隙	洗浄試験: 中央部 3mm, 端部 1mm 充填材注入試験: 1mm (全面)	1mm
洗浄機器	CASE1: ロ-リーポン (圧力 1.3MPa, 水量 16 リットル/min) CASE2: ウォータージェット (圧力 240MPa, 水量 38 リットル/min)	ウォータージェット (圧力 240MPa, 水量 38 リットル/min)
勾配	長手方向に 2%	
仮想存置材	ウォータージェットによるコンクリート部材のはつり作業時に採取したスラッジ	
仮想存置材の状態	湿潤状態のスラッジを計画高さにコテで張り付け試験体内に密閉乾燥。試験時には粘土状に固化した状態。	
注入・排出孔	試験体下方から 500mm 間隔で削孔 (φ 20mm)	
設置状況	 <p>※充填材注入時のアクリル板の浮き上がりを防止する押さえ金具を設置している。</p>	 <p>※浮き上がり防止のための押さえ金具を設置していない (コンクリート板の自重があるため)。</p>

ロータリーポンプ(圧力 1.3MPa, 水量 16 リットル/min)を使用して行った。CASE2 は超高圧水発生装置(圧力 240MPa, 水量 38 リットル/min) およびスピンジェットノズルを使用して同様な試験を実施した。試験は試験体下方から試験体中央に設けた注水孔から注水を行い、試験体四隅に設けた排水孔から仮想存置材の排出を行った。

ロータリーポンプを使用する場合、ノズルの先端を試験体下方から注水孔に差し込んで、一定間隔で洗浄水を試験体に対して上方に向けて圧送することになり、注水方向とは直角方向を成す空隙部の洗浄は効率的ではない。これに対し、スピンジェットノズルを使用する場合、ノズルの先端が回転しながら洗浄水を水平方向(水平ひび割れと同じ方向)に噴出するため、洗浄効果は格段に向上する。試験体1に対し、ロータリーポンプおよびスピンジェットノズルを使用して洗浄試験を行った後の仮想存置材の残存状況をそれぞれ図-3に示す。

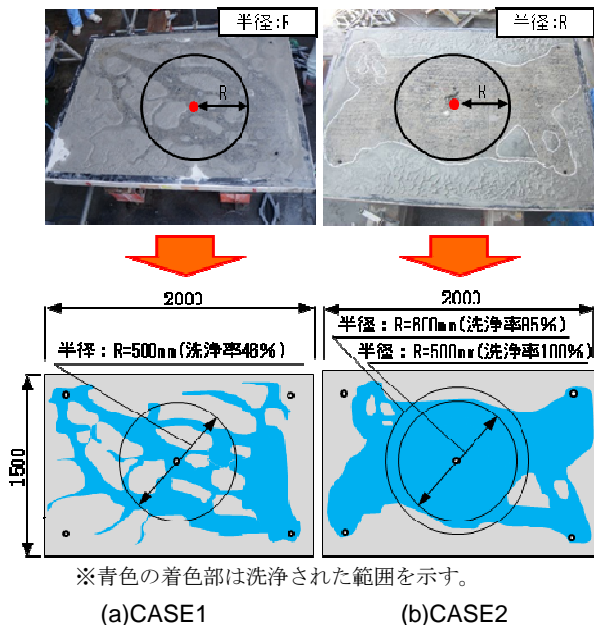


図-3 仮想存置材の残存状況(試験体1-①)

ロータリーポンプを使用した場合、洗浄水は注入孔から排出孔に向かって、いくつかのルート(以下、「水道(みずみち)」という)を作りながら仮想存置材を押し流すように流れ、その後、水道だけを流れる傾向を示した。したがって、仮想存置材は点在するように残存した(洗浄率46%)。ここでいう洗浄率は、一定範囲におけるスラッジ部と洗浄部の面積割合から算出した値とする(洗浄率=(スラッジ部/全面積)×100)。これに対し、スピンジェットノズルを使用した場合、ノズル先端が回転しながら全方向に洗浄水を噴出するため、CASE1と同様に半径500mmで評価すると100%の洗浄率となった。なお、半径600mmとした場合の洗浄率は85%である。よって、確実に洗浄可能な半径500mmによる洗浄方法を採用し

た。これにより洗浄孔は500mm間隔の千鳥配置とした。

(2) 試験体2

試験体2は2500mm×1500mm×70mmのコンクリート板を2枚製作し、下コンクリート板に1mm厚さで湿潤状態にしたスラッジをコテにて敷き詰め、その上に上コンクリート板にて密閉乾燥させた。この試験体下面からスピンジェットノズルを使用して洗浄試験を行った。洗浄率は約100%と試験体1に対して向上する結果となった。

これらの試験結果から、模擬試験体レベルでは100%の洗浄率を期待することができる。しかし、上面増厚工法を施した後に劣化した実橋のRC床版の水平ひび割れ面を目視調査したところ、ひび割れ面には±10mm程度の起伏があり、一様に平面な状態ではないことが想定され、洗浄水の圧力が低下してしまう可能性がある。そこで、実床版に対して洗浄試験を行い、洗浄効果に関する検証を行った。

3.3 水平ひび割れ部への充填材注入方法に関する検討

試験体1における充填材注入試験は、仮想存置材を入れないで注入したケース(CASE3)および仮想存置材を空隙全面に敷き詰めておき、一旦洗浄を行った後に充填材を注入したケース(CASE4)の2つのケースを実施した。充填材には、表-2に示す3種類の材料を使用した。

表-2 充填材の種類

	材 料 名	付着強度	粘性度	収縮率
1	エポキシ系樹脂	6.5N/mm ²	650mPa·s	1.30%
2	アクリル系樹脂	8.2N/mm ²	300mPa·s	2.70%
3	セメント系	5.1N/mm ²	50mPa·s	0.20%

CASE3は試験体1と同様なものを3体準備し、各充填材に対して1体ずつ試験を行った。試験要領として、試験体中央に設けた注入孔から電動ロータリー注入機により充填材を注入し、試験体の四隅に設けた排出孔から排出させた。各材料とも所要時間に差は見られたが、試験体全面に充填材を注入することができた。その状況を図-4に示す。

CASE4は、試験体1と同様に洗浄した試験体を3体並べて実施した。試験結果を下記にまとめる。

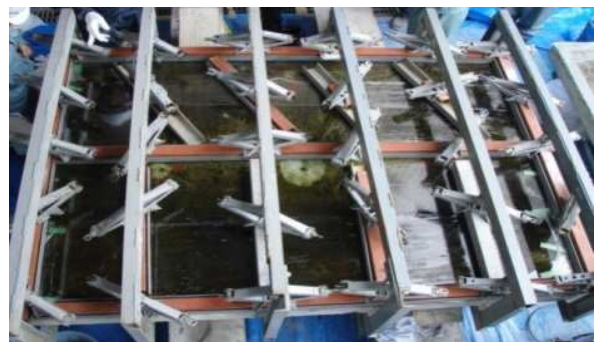


図-4 充填材注入状況

- ・3種類の材料とも、試験体全面に充填材を注入することができた。
- ・仮想存置材が残留している部位に対して、充填材の浸透は確認できなかった。
- ・仮想存置材が残留している部位の周辺に、空隙等が生じることなく充填することができた。
- ・特にセメント系の充填材の流動性が、他の材料と比べて良好な結果を示した（表-3参照）。

表-3 充填材注入試験結果

材料名	気泡の有無	粘性	注入時間	注入圧力 (MPa)	充填性
1 エポキシ樹脂	無	高	14分25秒	0.8	完全充填
2 アクリル樹脂	少	高	35分30秒	0.5~0.8	完全充填
3 セメント系	多	低	10分15秒	0.1	完全充填

3.4 充填材の静的せん断付着試験とその結果

1000mm×1000mm×70mmのコンクリート板を4枚製作し、2枚を1組として重ね合わせ、2組の試験体を製作した。試験体にはあらかじめ仮想存置材を設置した。図-5に示すように、仮想存置材は1体の試験体に対して16の区画分け（1区画：200mm×200mm）を行い、仮想存置材の残留率ごとに80%、50%、30%、0%の仮想存置材を空隙部に設置した区画をそれぞれ3区画ずつ設けた。

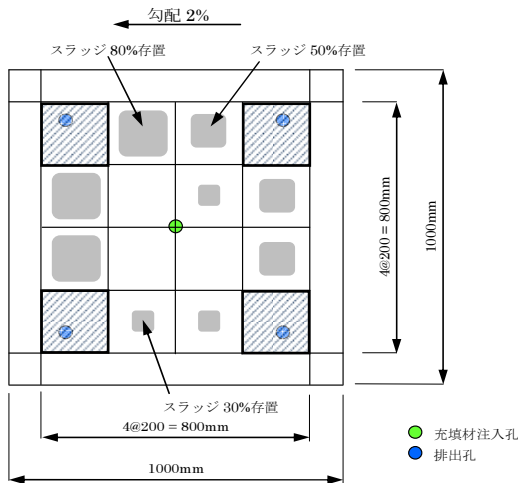


図-5 仮想存置材の設置要領

仮想存置材は、各区画の中央部に集中的に正方形に配置した。また、四隅の4つの区画には排出孔を設置したため、試験の対象から除外した。

充填材の注入硬化後、試験体を区画したラインに沿ってコンクリートカッターを用いて切断し、200mm×200mmの試験片（12体）を採取して、静的せん断付着試験を実施した。当該試験はアムスラー試験機を使用し、荷重を漸増させながら载荷した。試験には図-6に示す治具を製作して使用し、試験片を固定することによって、荷重

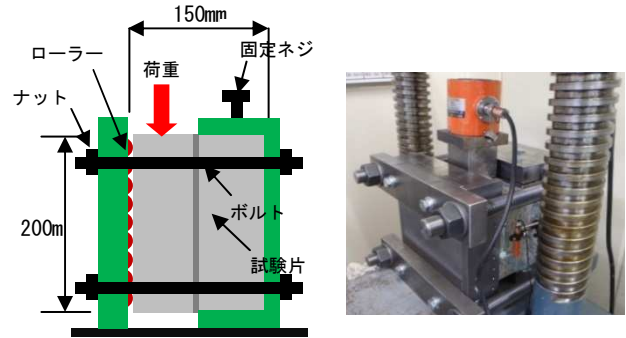


図-6 静的せん断付着試験の概要と状況

載荷時において接合面に開きが生じないようにした。また、固定治具の片側にローラーを設置し、摩擦による抵抗が生じないように配慮した。試験結果を表-4に示す。

表-4 静的せん断付着試験結果

材料名	仮想存置材の存置率 (%)	せん断強度 (N/mm ²)	材令 (日)	備考
エポキシ樹脂	0.0	3.24	14	せん断強度は3つの供試体の平均値とした。
	30.0	3.40		
	50.0	2.77		
	80.0	1.79		
アクリル樹脂	0.0	3.07	14	
	30.0	1.98		
	50.0	2.29		
	80.0	0.82		
セメント系	0.0	0.27	28	
	30.0	0.14		
	50.0	0.05		
	80.0	0.02		

各充填材に対するせん断強度と仮想存置材の存置率との関係をグラフ化して図-7に示す。比較的せん断強度が小さかったセメント系充填材については除外した。表中には試験結果をプロットした点に対する近似曲線を記載した。この近似曲線より仮想存置材の存置率が高いほどせん断強度が低くなり、80%になった場合において、エポキシ樹脂については2.0N/mm²程度、アクリル樹脂については1.0N/mm²程度のせん断強度を確保することができる。せん断強度と仮想存置材の存置率の関係については、今後、詳細な検討を加えていくことにする。

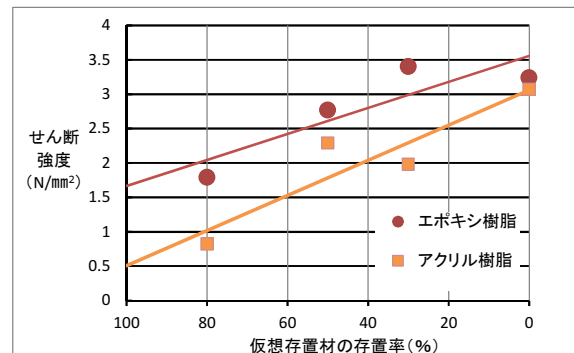


図-7 静的せん断付着試験結果

4. 撤去床版への施工試験と評価

4.1 試験概要

3章で得られた知見を基に、撤去床版を対象として実施工を想定した試験を行った（以下、「実橋試験体」という）。

実橋試験体は、昭和44年に供用され、その後、劣化・損傷が顕在化したため、23年後の平成4年に床版上面増厚工法が実施されたが、再劣化が著しくなり19年後の平成23年に切断・撤去されたRC床版（コンクリート： $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 、鉄筋：SD295）を使用した。実橋試験体の一例を図-8に示す。

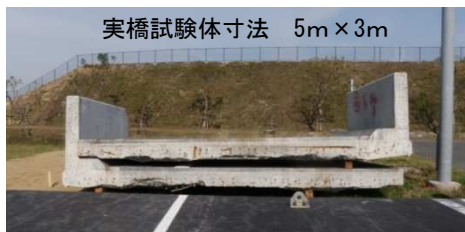


図-8 実橋試験体

実橋試験体4体を用いて実施した試験内容を表-5に示す。全ての試験体において、既設床版部と増厚床版の境界部が広範囲にわたってはく離しており、水平ひび割れ部の隙間は最大で3mm程度あった（図-9参照）。

表-5 実橋試験体と試験内容

名称	試験内容	確認事項	備考
1 試験体 A	洗浄試験後、充填材注入試験を実施し、切断して水平ひび割れ部の状況確認後、静的せん断試験を実施	・充填材注入状況 ・せん断付着応力	試験体1体 充填材：Eポキシ樹脂
2 試験体 B			試験体1体 充填材：アクリル樹脂
3 試験体 C	試験は実施せず、試験体を切断して水平ひび割れ部の状況を確認	水平ひび割れ部の状況	試験体1体
4 試験体 D	洗浄試験のみ実施後、試験体を切断し水平ひび割れ部の状況を確認	洗浄後の水平ひび割れ部の状況	試験体1体



図-9 試験体の水平ひび割れ部の状況

表中の試験体Cについては、水平ひび割れ部内の状況を確認するために、洗浄試験および充填材注入試験を行わずに、増厚床版部のみを撤去し、水平ひび割れ部内に

おけるすり磨き粉の堆積状況、床版表面の不陸の状態等を確認した。試験体Dに対しては、洗浄試験実施後に、試験体Cと同様に増厚床版部のみを撤去し、水平ひび割れ部内の状態を確認した。また、試験体AおよびBに対しては、洗浄試験、充填材注入試験、静的せん断付着試験を実施した。

4.2 水平ひび割れ部の探査

実施工を行うにあたり、あらかじめ水平ひび割れ部の範囲、深さを的確に知ることができれば、施工性の向上およびコストの削減を図ることができる。よって、本補修工法を適用するにあたり、この探査法は非常に重要な工程の一つとなる。

本試験において、各試験体に対する水平ひび割れ部の範囲および下面からの深さの測定は、衝撃弾性波によりコンクリート部材の厚さを測定することができるCTM（Concrete Thickness Measurement）試験を適用した。当該探査は、試験体下面から実施し、水平ひび割れ部の範囲を確認し、洗浄試験および充填材注入試験を行う範囲を決定した。

4.3 洗浄試験とその結果

洗浄試験は、試験体A、BおよびDに対し、模擬試験と同様にスピンドルノズルを使用して試験体下面から行った。注水作業は、超高压発生装置により注水孔を介して洗浄水を水平ひび割れ部に圧送し、注水孔に隣接する排出孔から洗浄水が排出され、さらに洗浄水の濁度がなくなりすり磨き粉が排出されたことが確認されるまで実施した。また、洗浄作業後には水切りを行うため、コンプレッサーにより圧搾空気を約30秒間圧送した。全ての試験体において、CTM試験により水平ひび割れ部が検知された範囲に設けた全ての排出孔に対し、洗浄水の排出を確認することができた。

試験体Dについては、試験体の増厚床版部をコンクリートカッターにて切断し、水平ひび割れ部の洗浄状態を目視確認した。洗浄試験を行わないで同様に増厚床版部を切断・撤去した試験体Cと比較すると、試験体Cには図-10中の太線枠に示すように、固化したすり磨き粉が残存している状況が確認できた。これに対し、試験体Dについては、注水時に破碎された細かなコンクリート片が点在していたものの、すり磨き粉の残存はなかった。

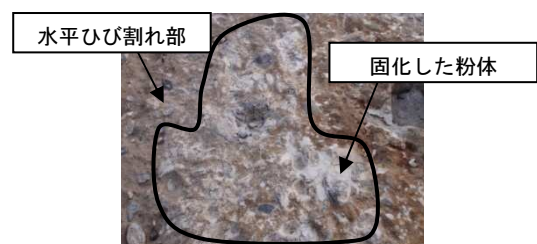


図-10 未洗浄時の水平ひび割れ部の状態（試験体C）

4.4 充填材注入試験および試験結果

充填材注入試験についても、模擬試験と同様に試験体下面から実施した。充填材にはエポキシ樹脂およびアクリル樹脂を採用した（セメント系充填材については、所要する付着性能を確保することができなかつたため、本試験では採用しないこととした）。注入作業は、洗浄水を注入および排出した全ての孔に対し、電動ロータリー注入機により孔ごとに順次行い、隣接する孔から排出が確認されるまで行った。注入作業時の圧力管理は注入機に設置されている圧力計を用いて行い、0.3MPaを上限とした。0.3MPaを超えるような場合は一時的に注入機を停止して、圧力が0.2MPa程度まで低下したことを確認してから再注入を行った。本試験の結果、全ての孔から充填材が排出されたことを確認することができた。注入時間については、エポキシ系樹脂（試験体A）は約60分、アクリル系樹脂（試験体B）は約90分を要した。

充填材の注入状況を確認するために試験体を切断し、水平ひび割れ部を目視確認したところ、空隙等は確認されなかつた。充填材は水平ひび割れ部だけでなく平行する細かいひび割れ部にまで注入されていた（図-11参照）。また、洗浄試験前に探査したポイントに対し再度CTM試験を実施したところ、洗浄試験前においては、水平ひび割れが存在すると判定されていたが、充填材注入試験後においては、全ての探査ポイントにおいて水平ひび割れの存在を示さない結果となった。このことから、実施工においても充填材が注入されたか否かをチェックする方法として、CTM試験を適用することが適切であると判断される。

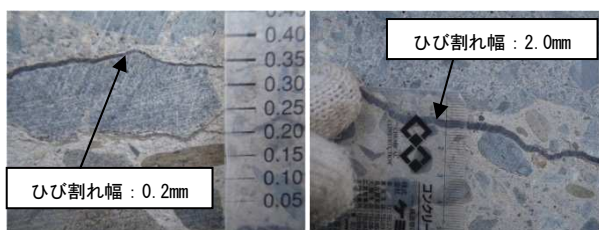


図-11 充填材注入状況（切断面）

4.5 静的せん断付着試験および試験結果

静的せん断付着試験は、充填材注入試験後に切断した試験片を使用して実施した。試験片は試験体AおよびBから、それぞれ200mm×200mmの大きさになるように切断して6体ずつ採取した。当該試験は、模擬試験と同様にアムスラー試験機を使用し、荷重を漸増させながら載荷した。

静的せん断付着試験結果を表-6に記す。試験体Bから採取した試験片1および2において、水平ひび割れ部に若干ではあるがすり磨き粉が堆積していたため、充填

材が接着する面積が小さくなり、他の試験片に対して小さな値を示した。他の試験片については概ね2.0～4.0N/mm²のせん断強度を確保することができた。ほとんどの試験片において、充填材が破断するのではなくコンクリート部材が破壊する傾向を示した。

表-6 静的せん断付着試験の結果

材料名	試験片番号	水平ひび割れ幅 (mm)	せん断力 (kN)	せん断強度 (N/mm ²)	平均せん断強度 (N/mm ²)	材令 (日)
エポキシ樹脂 (試験体A)	1	0.8	59.0	1.49	2.67	14
	2	1.2	101.8	2.58		
	3	1.5	76.5	1.99		
	4	1.5	158.5	4.06		
	5	2.0	138.3	3.57		
	6	2.0	92.3	2.31		
アクリル樹脂 (試験体B)	1	2.0	69.8	1.83	2.50	14
	2	2.0	51.0	1.32		
	3	1.5	97.8	2.50		
	4	1.5	126.8	3.29		
	5	1.5	121.8	3.10		
	6	0.8	112.3	2.95		

5. まとめ

本試験結果より、試験体レベルでは本補修システムを適用することは十分に可能であると考えられる。本試験で得られた知見と今後の課題を下記に示す。

- (1) 水平ひび割れ内に存在する堆積物を確実に洗浄することが、耐久性の向上に大きく影響する。
- (2) 本補修工法により、水平ひび割れ部だけでなく、平行する細かいひび割れにも確実に充填できることを確認した。
- (3) 本補修工法は、供用中の床版で実施するため、床版が振動している状態で充填材を注入することになる。このような状況においても、充填材が所要の付着性能を確保することができるか否かを検証する。
- (4) 供用中の床版で実施することを想定し、今後は動的せん断付着試験を行うことにより、本補修システムを適用したRC床版の疲労耐久性について確認する必要がある。

謝辞

本研究にあたり、御指導を戴いた近畿大学の東山浩士准教授とご協力いただいた電気化学工業(株)、コニシ(株)、住友大阪セメント(株)の方々に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 松井繁之, 移動荷重を受ける道路橋RC床版の日疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集9-2, pp627-632, 1987.10
- 2) 松井繁之: 床版損傷に対する水の振る舞い, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, 第1部PS1-3, pp.6, 1988.10