

論文

上面増厚後に再劣化した鋼橋RC床版の補修工法に関する開発

鈴木 真*, 神田利之**, 縦山好幸***, 東山浩士****, 松井繁之*****

*西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社, 道路技術部 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前 5-26)

**株式会社ケミカル工事, 事業統括本部プロジェクト推進室 (〒658-0024 神戸市東灘区魚崎浜町 5-5)

***博 (工), 西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前 5-26)

****博 (工), 近畿大学, 理工学部社会環境工学科准教授 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

*****工博, 大阪大学名誉教授 (〒565-0824 吹田市山田西 4-2-70-1006)

鋼橋の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載荷により、既設床版部と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、再劣化した事例が多数報告されている。本論文では、このように劣化した鋼橋RC床版の補修工法として、水平ひび割れ部を洗浄した後、接着力を有する充填材を注入して再一体化を図る工法を提案し、交通車両により発生する振動や疲労に対する充填材の接着性能および耐疲労性について、実橋から撤去された鋼橋RC床版を用いて検証試験を行った結果を報告する。

キーワード：上面増厚工法，水平ひび割れ，充填材，せん断接着，耐疲労性

1. はじめに

鋼橋RC床版の補修工法として、上面増厚工法が採用されている¹⁾。しかし、補修後、交通車両による輪荷重の繰返し載荷により、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発生し、そこに雨水等が浸入して、鋼橋RC床版が再劣化した事例が多数報告されている^{2), 3)}。著者らは、このような再劣化した鋼橋RC床版を対象に、新旧床版を再一体化する補修工法の開発を行った。しかし、本補修工法適用後のRC床版に対して、解決すべき下記の問題点が残されている。

- ① 本工法は交通解放を行いながら施工するため、充填材の注入作業を、交通車両の走行による振動状況下において実施することになる。この時、充填材を確実に充填することができるか。
- ② 充填材注入後、交通車両による輪荷重の繰返し載荷に対して接着性能を確保することができるか。

そこで、これらの問題に対して、模擬試験体を用いた基礎データの収集を行い、さらに実橋から撤去された鋼橋RC床版を用いた検証試験を行った。

2. 提案する補修工法

これまでの補修工法は、新旧床版の水平ひび割れ内を床版上面から圧力ポンプにより洗浄し、水硬化型充填材

を注入して再一体化を図っていた(以下、従来工法という)。従来工法を採用する場合、床版上面からの実施のため、水平ひび割れ部内の洗浄が確実に行われたかどうかを確認することが難しい。洗浄が確実に行われないと、車両走行時のすり磨き現象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)を残留させることになり所要の接着性能を期待することができない。

今回提案する補修工法は、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い(床版上面からの施工も可能)、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を改良したスピンジェットノズルを採用し、洗浄効果の向上を図ることができる、といった特徴を有する(図-1)。

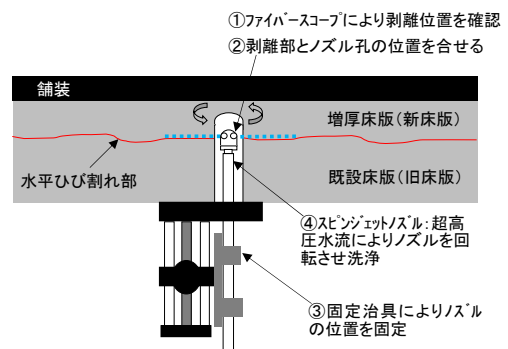


図-1 洗浄作業要領

3. 模擬試験

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、充填材の接着性能を確認するために静的せん断試験を行った。

3.1 洗浄方法の検討

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版 (図-2) 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使用した。

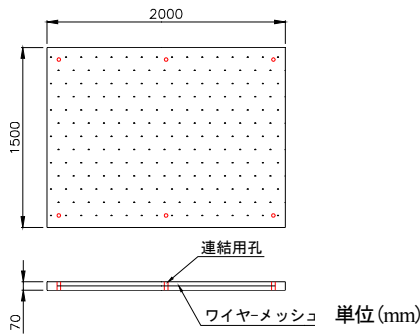


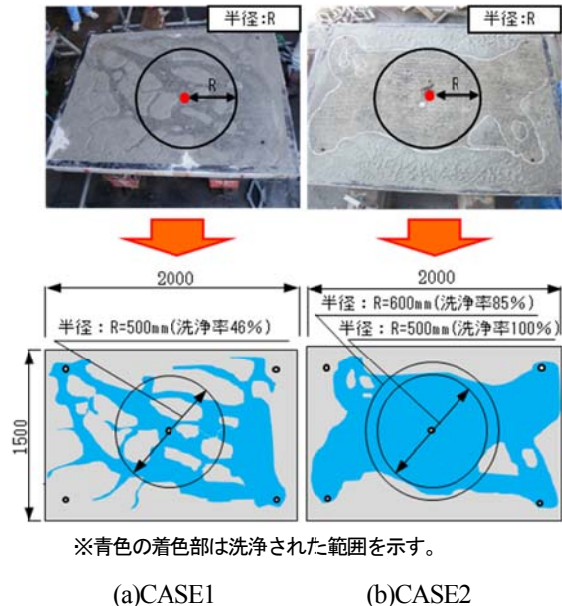
図-2 コンクリート版の構造図

本試験体は洗浄および充填材の注入状況を目視により確認することを目的とし、コンクリート版に対しては、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 (1~3mm) 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堆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4側面にシール材を塗布して密閉した。

洗浄試験は、2種類の機器を用いて実施した。CASE1は汚泥水の回収等に使用される電動ロータリー注入機 (圧力1.3MPa、水量16リットル/min) である。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である。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4隅に設けた排水孔から仮想存置材の排出を行った。CASE1およびCASE2の洗浄後における仮想存置材の残存状況をそれぞれ図-3に示す。

CASE1の場合、洗浄水は注入孔から排出孔に向かって、一定のルートを作りながら仮想存置材を押し流すように流れ、その後、同じルート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、注水孔 (試験体中央) から半径500mmの範囲における洗浄率は46%であった。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、CASE2の場合、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。この結果から、確実に洗浄が可能な半径として500mmを採用した。これにより洗浄孔は、500mm間隔の千鳥配置とすることにした。



※青色の着色部は洗浄された範囲を示す。

(a)CASE1

(b)CASE2

図-3 仮想存置材の残存状況 (試験体1)

3.2 水平ひび割れ部への充填材注入方法に関する検討

試験体による充填材注入試験は、空隙に仮想存置材を入れずに注入したケース (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-1に示す3種類の材料を使用した。

表-1 充填材の種類別

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は各充填材に対して1体ずつ試験を行った。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4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ず、試験体全面に充填材を注入することができた。

CASE4についても、CASE3と同様な試験を実施した。試験結果を下記にまとめる (表-2)。

- ① 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。
- ② 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。
- ③ 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。

- ④ 特にセメント系充填材の流動性が、他の材料と比べて良好な結果を示した。

表-2 充填材注入試験結果

材料名	気泡の状態	粘性	注入速度	注入圧力 (Mpa)	充填性
1 エポキシ樹脂	発生: 無	高	14分25秒	0.8	完全充填
2 アクリル樹脂	発生: 無	高	35分30秒	0.5~0.8	完全充填
3 セメント系	発生: 多数	低	10分15秒	0.1	完全充填

3.3 充填材のせん断接着試験とその結果

試験体は 1000mm×1000mm×70mm のコンクリート版を4枚製作し、2枚1組として重ね合わせ、2組を製作した。コンクリート版間にはあらかじめ仮想存置材を設置した。図-4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。

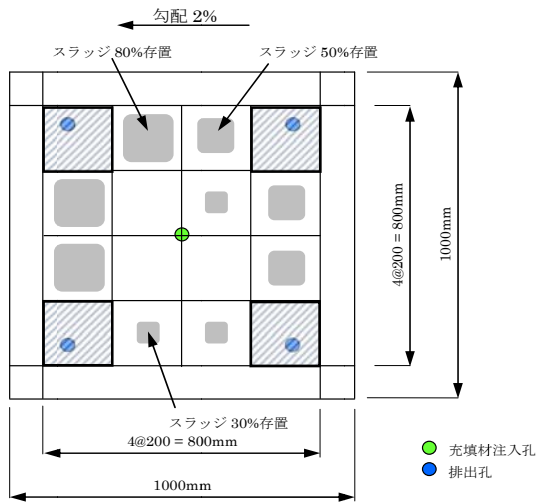


図-4 仮想存置材の設置要領

仮想存置材は、各区画の中央部に集中して正方形に配置した。また、4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、せん断接着試験を実施した。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載荷した。試験には図-5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。試験の状況を写真-1に、試験結果を表-3に示す。

各充填材に対するせん断接着強度と仮想存置材の存置率との関係を図-6に示す。ただし、相対的にせん断

強度が低かったセメント系充填材については除外した。図中には試験結果をプロットした点に対する近似直線を記載した。この近似直線より仮想存置材の存置率が100%であった場合でも、エポキシ樹脂は1.7N/mm²程度、アクリル樹脂は0.5N/mm²程度の接着強度を確保していることがわかる。このことから、実施工において水平ひび割れ内の洗浄が確実に行われず、すり磨き粉が100%残留してしまっても、ある程度のせん断強度を期待することができる。

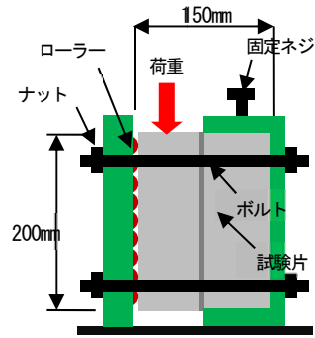


図-5 せん断接着試験要領



写真-1 せん断接着試験の状況

表-3 せん断接着試験結果

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		

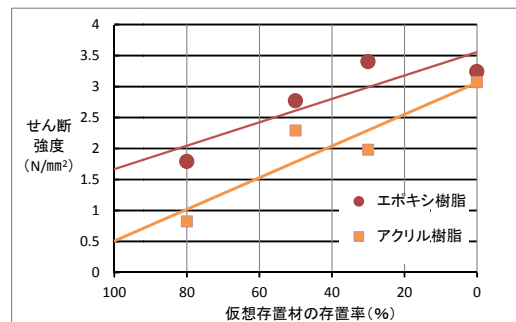


図-6 せん断接着試験結果

4. 撤去床版による充填材の性能確認試験

本試験は、試験体対象として昭和 44 年に供用され、その後、劣化・損傷が顕在化したため、床版上面増厚工法が実施されたが、再劣化が著しくなり平成 23 年に切断・撤去された鋼橋 RC 床版を使用した。試験体（寸法：5000mm×2500mm）を写真-2 に示す（写真中の 1 体を試験体として使用した）。また、本試験の作業手順を記したフローチャートを図-7 に示す。



写真-2 試験体

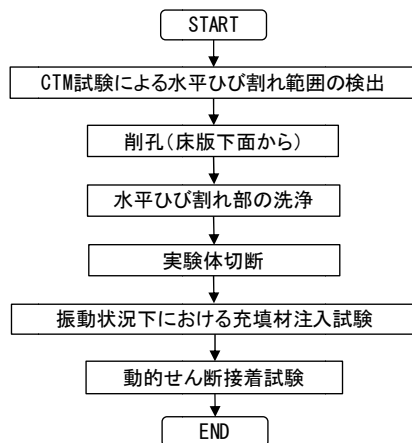


図-7 作業フローチャート

4.1 水平ひび割れ範囲の検出および削孔

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、衝撃弾性波による CTM (Concrete Thickness Measurement)⁴⁾ を適用した。当該探査を試験体下面から非破壊的に行って、水平ひび割れ部の位置および範囲を明確にし（写真-3）、洗浄試験および充填材注入試験を行うエリアを決定した。探査結果を図-8 に示す。

洗浄水および充填材の注入・排出孔を設けるための削孔作業は、床版下方からコアボーリングマシンにより行った。削孔径はφ25mm とし、削孔深さは、床版下面から水平ひび割れの上方10～20mm までとした（全長約180～190mm）。削孔間隔は、水平ひび割れの範囲内では500mm とし、洗浄試験時に水平ひび割れ内に滞留するすり磨き粉が排出しやすいように、CTM 探査の結果から判明した境界ラインに沿って4箇所（赤丸印）を行った。削孔位置を図-8 に示す。

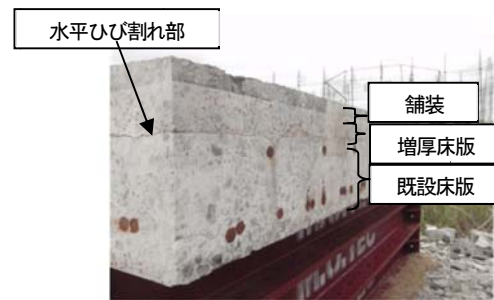


写真-3 試験体の水平ひび割れ部の状況

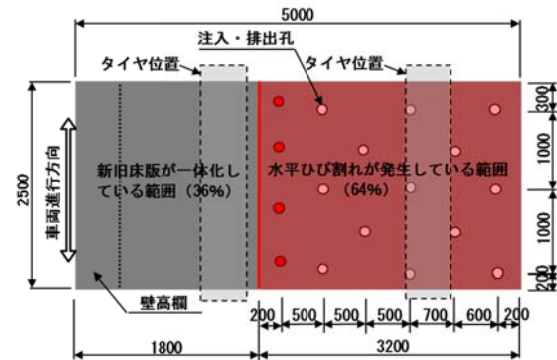


図-8 探査結果および削孔位置

4.2 水平ひび割れ部の洗浄

水平ひび割れ部の洗浄は、スピンジェットノズルを使用して試験体下面から行った。注水作業は、超高圧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るまで実施した。洗浄に要した時間は、ひとつの孔当たり約2分、試験体1体の洗浄面積 8m² あたり約 45 分であった。当該試験の結果、全ての排出孔に対し、洗浄水の排出を確認した。

4.3 振動状況下における充填材注入試験

水平ひび割れ部に充填材を注入する際に、交通車両が繰返し走行しているため、床版は常に振動している状態にあることが想定される。振動のメカニズムとして、新旧床版が剥離しているために新床版部のみが上下方向に振動（変位）すると想定された。このような状況下において注入された充填材は、新床版（上面）との接着がなされないまま硬化してしまう危険性が考えられる。そうすると、新旧床版間に十分な接着効果が期待できない可能性がある。よって、本試験において再現試験を行い、充填材の接着性能を確認した。

洗浄試験後の試験体をコンクリートカッターにより切断し、2500mm×1250mm の大きさのものを2体取り出した。それぞれの試験体を試験体①および試験体②と称す。注入する充填材には、試験体①および試験体②にそれぞれアクリル系樹脂、エポキシ系樹脂を適用した。

切断した試験体は、図-9 および写真-4 に示すように、P=70kN の荷重を試験体中央部に 3Hz（鋼橋の振動数と同等レベル）の周波数で 24 時間継続して载荷した。

充填材注入作業時においても荷重を繰返し載荷した。荷重 (P=70kN) は、実際に載荷される輪荷重相当とし、かつ試験体に最大で 1mm 程度のたわみを発生させる値とした。また、荷重載荷時間は、注入された充填材の強度が十分に発現する時間として 24 時間を設定した。

充填材の注入作業も、試験体下面から実施した。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、0.3MPa を上限とした。

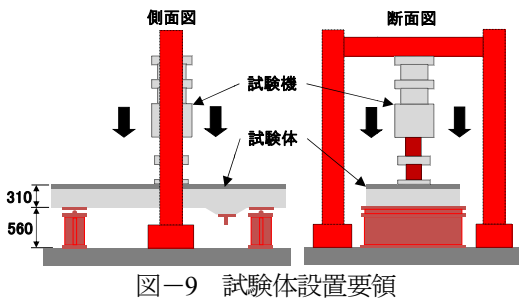


図-9 試験体設置要領



写真-4 試験状況

本試験を開始し、全ての孔から充填材が排出されたことを確認し、注入作業を終了した。注入時間については、エポキシ系樹脂 (試験体①) は約 18 分、アクリル系樹脂 (試験体②) は約 20 分を要した。また、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、充填不良による空隙等は確認されなかった。写真-5 に切断面の状況を示す。



写真-5 充填材注入状況

洗浄試験前に探査を実施したのと同じ箇所において、充填材注入後に再度 CTM 探査を実施した。洗浄試験前では水平ひび割れが存在すると判定されていたのに対し、充填材注入後に再度探査を行ったところ、水平ひび割れの存在を示さない結果となった。これらより、車両

走行による振動状況下において、充填材を注入しても充填性に影響がないことを確認した。

4.4 動的せん断接着試験

本試験は、動的せん断接着試験を行うことによって、振動状況下において注入した充填材および再一体化した新旧床版の耐疲労性に関する検証を行うものである。前節において記載したように、試験体①および試験体②から切断した試験片 (200mm×200mm) に対し、動的荷重載荷試験機によりせん断試験を実施した (写真-6)。試験片は 12 体ある中から、良好な状態にあると思われる 2 体を選定した。



写真-6 試験状況

過年度に同様な試験片に対して実施した静的せん断接着試験の結果、せん断耐力が 100kN 程度であったことから、設定荷重をその約 30% の荷重 (P=30.75kN) とし、試験片③-1 および③-2 に対して実施した。試験片③-1 はエポキシ樹脂を注入したもの、試験片③-2 はアクリル樹脂を注入したものである。表-4 に示すように、試験片③-1 および試験片③-2 とも 500 万回以上荷重を載荷して試験を終了した。試験終了後に新旧床版の剥離が確認された試験片③-2 の (新旧床版間の) 界面部を観察したところ、固化したすり磨き粉が接着している箇所があった。このことに関しては、洗浄後におけるすり磨き粉の残存状態が、本試験結果に影響を与えたと考える。しかし、試験片③-2 に剥離が発生した時期は 200 万回近く荷重を載荷した段階であり、さらに試験片が新旧床版の界面部でずれて破壊するような現象は確認されなかった。

表-4 動的せん断接着試験の結果

番号	充填材	設定荷重 (kN)	回数 (回)	剥離の有無	破壊の有無
③-1	エポキシ樹脂	30.75	5951196	無	無
③-2	アクリル樹脂		5658161	有	無

「上面増厚工法設計施工マニュアル (財団法人高速道路調査会)」⁵⁾によると、上面増厚後の RC 床版に対して、「設計で考慮すべき活荷重による発生応力の 30% を見込んだ振幅で 200 万回の繰返し載荷を実施しても、打継界面の接着切れは発生せず、接着・一体化は保持していることが判明した」と記載されている。実橋の床版諸

元にもよるが、このときの新旧床版界面に発生する水平せん断応力に対して、試験片の界面に作用させたせん断応力($\tau=0.77\text{N/mm}^2$)は3~5倍程度大きかったと考える。よって、洗浄が良好でなかった試験片③-2においても、同マニュアルに記載されているRC床版より厳しい応力状態で200万回の繰り返し載荷荷重を受けても破壊するに至らなかったことになる。このことから、本補修システムにより再一体化された新旧床版は、新設した上面増厚床版と同等以上のせん断耐力を有すると考える。

5. せん断抵抗のメカニズムに関する考察

動的せん断接着試験において試験片③-2に見られたように、実施工においてすり磨き粉の洗浄が適切に行われなかった場合においても、充填材のせん断強度をある程度期待することができる。その要因を以下に記す。

- ① 模擬試験結果より、すり磨き粉が水平ひび割れ内に残留していても、ある程度のせん断強度を有することがわかった(3.3参照)。
- ② 鋼橋RC床版に上面増厚工法を施工する際に、旧床版上面をブラスト処理するため、新旧床版の界面が粗面状態となっている。これにより、交通車両の輪荷重が載荷された際に発生する水平せん断に対し、新旧床版界面部の凹凸がかみ合い、せん断耐力を期待することができる。

ここで、この凹凸のかみ合わせによる効果を確認するために実施した検証試験結果をまとめる。試験片には、動的せん断接着試験に使用した試験片を再利用し、一旦、界面部から試験片を分離してすり磨き粉を除去した後、2~3mm程度の隙間を設け、その隙間部に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たスラッジ(仮想存置材)を注入したものを3体製作した。なお、仮想存置材は湿潤状態で注入および塗布し、乾燥させてから静的せん断接着試験を行った。試験結果を表-4に示す。

表-4 静的せん断接着試験の結果

番号	せん断耐力 (kN)	せん断強度 (N/mm^2)	平均せん断強度 (N/mm^2)
④-1	51.8	1.33	1.52
④-2	60.4	1.54	
④-3	66.8	1.70	

表-4より、充填材が注入されていなくても1.3~1.7 N/mm^2 のせん断強度を確保できることがわかった。これは、試験片境界部に見られる凹凸がせん断キーのような役割を果たし、200万回の繰り返し載荷荷重に対して抵抗したものと推測することができる。よって、水平ひび割れ部を洗浄し、充填材を注入した場合、充填材の接着性能だけでなく、凹凸のかみ合わせ効果が付加され、繰り返し荷重により発生する水平せん断力に抵抗するこ

とができるようになるかと考える。

6. まとめ

本試験結果より、本補修システムを実施工に適用し、所要の耐久性を確保することは十分に可能であると考ええる。本試験により得られた知見と今後の課題を下記に示す。

- ① 本補修システムにおいて、水平ひび割れ内に堆積するすり磨き粉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。よって、スピンジェットノズルによる水平ひび割れ内部の洗浄効果をさらに向上させる必要がある。
- ② 交通解放されている状況下において、床版が通行車両の輪荷重により振動している状態で充填材を注入しても、良好な充填性を有することを確認することができた。
- ③ 本試験の結果、本補修システムを採用するに当たり、充填材の接着性能および凹凸のかみ合わせ効果により所要の疲労耐久性を確保することができることを確認した。
- ④ 本試験において得られたデータから本補修システムは実施工に適用可能な段階にまで達していると考えられる。しかし、実施工では広範囲に及ぶ作業が必至となるため、想定外のアクシデントに遭遇する可能性も考えられる。そのため、実橋での試験施工を実施し施工性・経済性を踏まえた検証が必要であると考えられる。

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、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)の方々にご心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，2002.3
- 2) 樺山好幸，大友弘志，半田 実，五味秀明：床版上面増厚工法に関する超速硬 SF コンクリートの接着強度発現機構に関する研究，土木学会論文集，No540 IV-31, pp.241-250, 1996.6
- 3) 長谷俊彦，和田圭仙，後藤明彦：上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の検討，コンクリート工学，Vol.50, No.3, 2012.3
- 4) 樺山好幸，熊野賢二，宮川豊章，野村勝義，今田和夫：反射波法を用いた非破壊試験のコンクリート構造物空隙調査への適用性に関する研究，土木学会論文集，No665VI-49, pp.31-44, 2000.12
- 5) 財団法人高速道路調査会，上面増厚工法設計施工マニュアル，1995.11