

論文 上面増厚工法施工後に劣化した RC 床版の補修工法における振動および疲労に対する検証

鈴木 真*1・神田 利之*2・樺山 好幸*3・東山 浩士*4

要旨：上面増厚工法により補修された RC 床版において、経年に伴い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、再劣化したケースが多数報告されている。著者らは、この劣化した RC 床版の補修工法として、水平ひび割れ部を洗浄した後、付着性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てきた。しかし、交通車両により RC 床版に発生する振動や疲労に対する充填材の耐疲労性が明確にされていない。そこで、実橋から撤去された RC 床版を用いて検証試験を行ったのでその結果を報告する。

キーワード：上面増厚工法、水平はく離、動的せん断付着試験、耐疲労性、充填材

1. はじめに

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、補強後、交通車両による輪荷重の繰返し载荷により、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、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した。しかし、以下に記す問題を解決するには至っていなかった。

- 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。また、所要の付着性能を確保することができるか。
- ② 充填材注入後、交通車両の輪荷重の繰返し载荷に対して付着性を持続することができるか。

上記に対して、実橋から撤去された RC 床版を用いて試験による検証を行ったので、その結果を報告する。

2. 提案する新たな補修工法

床版上面増厚工法を施した後に再劣化が顕在化した RC 床版に対し、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平成 13 年ごろより試行された（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、ウォーターサプライヤーおよびロータリーポンプ等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どう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、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、注入した充填材がすり磨き粉に浸透していかないため、所要の付着性能を期待することができない。

上記の従来工法に対し、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く、時間的制約を受けずに工程等を計画できる、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ことができる、といった特徴を有する。

本補修工法は、**図-1**に示すように、水平ひび割れ位置にノズル位置を合わせ、洗浄水を回転噴射させ、水平ひび割れ部内を洗浄することにより、充填材（水硬化型接着材）の付着性能をさらに向上させることができる。

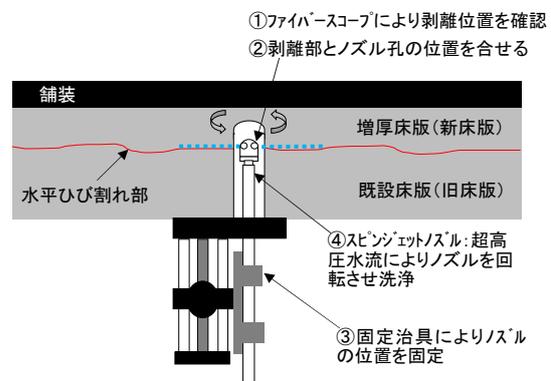


図-1 水平ひび割れ部の洗浄作業要領

*1 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)
 *2 (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)
 *3 西日本高速道路エンジニアリング関西(株) 技師長 博士(工学)(正会員)
 *4 近畿大学 理工学部社会環境工学科 准教授 博士(工学)(正会員)

3. 振動状況下における充填材の性能確認試験

3.1 試験要領

当試験では、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、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。試験体を採取した橋梁の断面図を図-2に、試験体（寸法：5000mm×2500mm）の写真を図-3に示す（写真中の1体を試験体として使用した）。

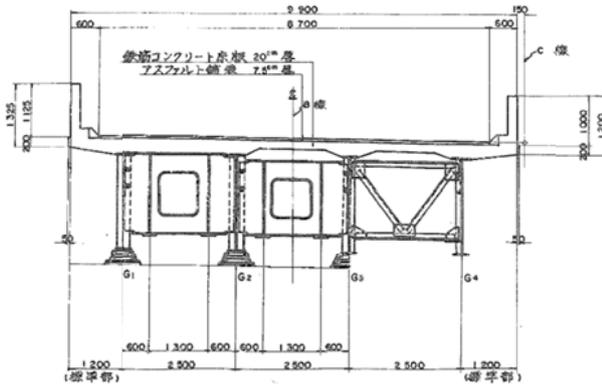


図-2 橋梁断面図



図-3 試験体

試験体の新旧床版境界部に発生している水平ひび割れは、試験体全体に発生するには至っていない（図-4参照）。よって、後項に述べる探査法にてひび割れ範囲を非破壊的に探査し、その結果に基づいて洗浄水および充填材の注入・排出孔の位置を決定した。注入・排出孔を設けるための削孔作業は、全て床版下方から実施した。その後、スピンドルジェットノズルを使用して、床版下方から水平ひび割れ内の洗浄試験を行い下面より排水した。試験体を切断した後に、動的荷重載荷試験機により振動を与えながら水平ひび割れ部への充填材注入試験を行った。充填材の強度発現を待って、試験体をさらに小さく切断し、静的せん断付着試験および動的せん断付着試験を実施した。当実験の作業手順を記したフローチャートを図-5に示す。

3.2 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

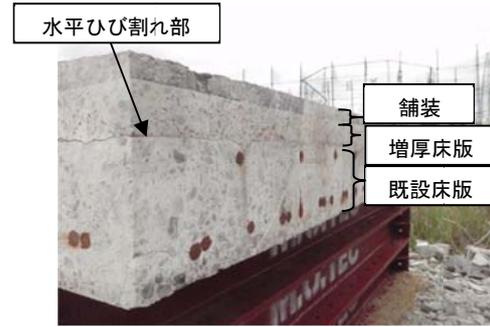


図-4 試験体の水平ひび割れ部の状況

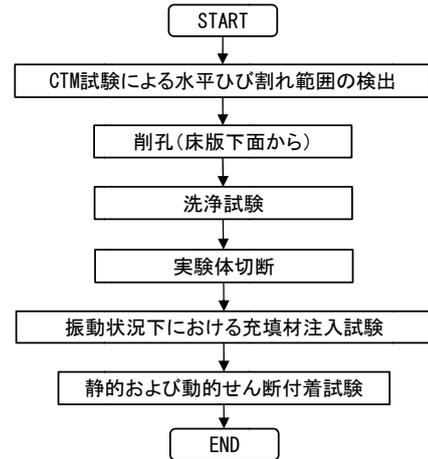


図-5 実験の作業フローチャート

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）を適用した。当該探査は、試験体下面から上向きに非破壊的に行い、水平ひび割れ部が試験体全面に生じていないことを確認し、洗浄試験および充填材注入試験を行う範囲を決定した。

試験体の側面（撤去工事を行った際に床版支間方向に切断を行った面）を確認すると、水平ひび割れが発生している範囲と発生していない範囲があった。また、その境界（以下、「境界ライン」という）から床版支間中央側に離れていくほどひび割れ幅が大きくなる傾向がみられた（ひび割れ幅は最大で2mm程度あった）。この要因として、通行車両のタイヤ走行位置との相関を見てみると、輪荷重が載荷されない壁高欄（路肩）側において水平ひび割れは確認されず、輪荷重が主に載荷される本線車線中央側においてひび割れ幅が大きくなっていることがわかる。探査結果を図-6に示す。試験体面積の約64%に水平ひび割れを確認した。

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、床版下方からハンマードリルおよびコアボーリングマシンにより行った。削孔径は $\phi 25\text{mm}$ とし、削孔深さは、床版下方から水平ひび割れの上方10～20mmまでとした（削孔深さは、1箇所あたり全長約180～

190mm とした)。削孔間隔は、水平ひび割れが発生している範囲内では 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 箇所の削孔（赤丸印）を行った。削孔位置を図-6 に示す。

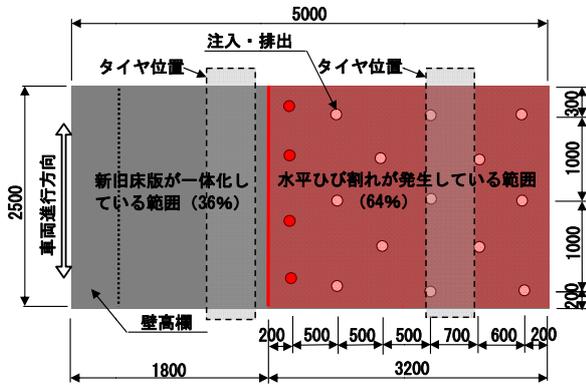


図-6 試験体に対する探査結果および削孔位置

3.3 洗浄試験

洗浄試験は、スピンドルジェットノズルを使用して試験体下面から行った。実床版から切断した部材を使用しているため、洗浄水を注水した際に増厚床版部が浮き上がらないように、試験体の上面に山留 H 鋼を設置し、試験体を支持する架台と固定した。また、洗浄水が試験体切断部から漏出しないように、試験体の側面に漏水防止のためエポキシ樹脂系パテ状シール材にてシールを行い、その上から鋼板を取り付けた。なお、シール材の圧縮降伏強さは 70N/mm^2 以上、引張せん断接着強さは 14N/mm^2 以上である。

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。洗浄に要した時間は、一つの孔当たり約 2 分、試験体全体の洗浄面積 8m^2 あたり約 45 分であった。当試験の結果、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。

3.4 振動状況下における充填材注入試験

(1) 試験の目的

水平ひび割れ部に充填材を注入する際に、通行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）との付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

なると、新旧床版間に十分な付着効果が期待できず、充填材と新床版間に生じた空隙内に雨水等が浸入すれば、再劣化を誘発する原因にも成り得る。よって、本試験において再現試験を行い、充填材の性能を確認した。

(2) 試験要領

洗浄試験後、試験体をコンクリートカッターにより切断し、 $2500\text{mm} \times 1250\text{mm}$ 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。各充填材の性能を表-1 に示す。

表-1 充填材の性能

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	$650\text{mPa}\cdot\text{s}$	1.30%
2 アクリル系樹脂	8.2N/mm^2	$300\text{mPa}\cdot\text{s}$	2.70%

切断した試験体は、図-7 および図-8 に示すように、 $P=70\text{kN}$ の荷重を試験体中央部に 3Hz の周波数で 24 時間継続して載荷した。充填材注入作業時においても荷重を繰り返し載荷した。荷重 ($P=70\text{kN}$) 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 (24 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設定した。

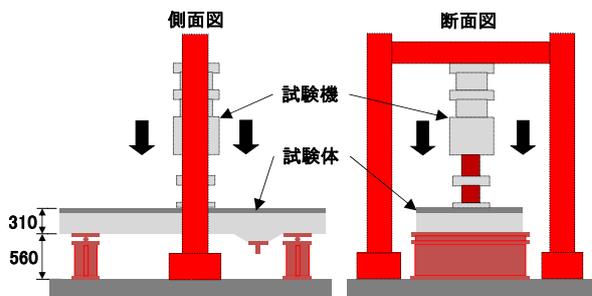


図-7 試験体設置要領



図-8 試験状況

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した。

(3) 試験結果

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空隙は確認できなかった（図-9 参照）。



図-9 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はく離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、図-10（探査結果の一例）に示すように、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。

3.5 静的せん断付着試験

(1) 試験の目的

当試験は、先述の試験体を使用して、充填材の付着性能について確認を行うものである。

(2) 試験要領

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①および試験体②から、それぞれ 200mm×200mm の大きさになるように、それぞれ 12 体を採取した。荷重の載荷は、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。載荷にあたり、図-11 に示す固定治具を製作し、4 本のボルトを手締めして試験片を固定し、荷重載荷時において接合面に曲げ応力が作用しないように配慮するとともに、固定治具の片側にはローラーを設置し、せん断変形時に生じる摩擦による抵抗が生じないように配慮した。

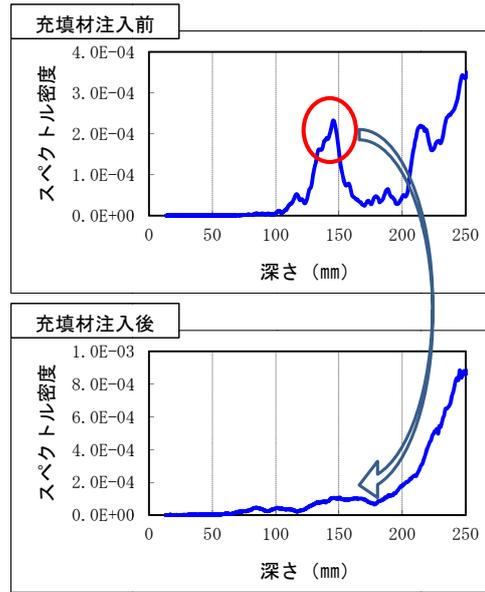


図-10 CTM 探査結果

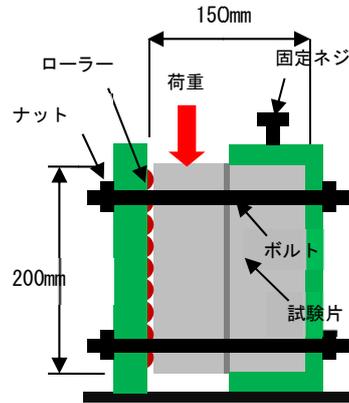


図-11 固定治具

(3) 試験結果

試験結果を表-2 および表-3 に記す。試験体①から採取した試験片に対して、概ね $\tau=2.5\text{N/mm}^2$ 以上のせん

表-2 静的せん断付着試験の結果（試験体①）

番号	ひび割れ幅 (mm)	せん断耐力 (kN)	せん断強度 (N/mm^2)	平均せん断強度 (N/mm^2)
①-1	0.7	94.0	2.34	2.73
①-2	0.7	98.0	2.41	
①-3	0.6	123.0	3.30	
①-4	0.9	113.0	2.99	
①-5	0.9	103.0	2.53	
①-6	0.8	107.0	2.81	

表-3 静的せん断付着試験の結果（試験体②）

番号	ひび割れ幅 (mm)	せん断耐力 (kN)	せん断強度 (N/mm^2)	平均せん断強度 (N/mm^2)
②-1	0.6	67.0	1.77	1.52
②-2	0.7	48.0	1.26	
②-3	0.7	59.0	1.55	
②-4	0.7	58.0	1.51	
②-5	0.6	51.0	1.36	
②-6	0.6	64.0	1.65	

断強度を確保することができた。一方、試験体②から採取した試験片においては、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、充填材の接着面積が小さくなり、試験体①の結果より45%程度小さい値を示した。最終的な破壊形態として、試験片①については充填材が破断するのではなくコンクリート部材が破壊し、試験片②については充填材とコンクリート片が剥離して破壊する傾向を示した。

この結果より、水平ひび割れ内の洗浄状態が、充填材の付着性能に影響を与えると思われる。せん断試験後の試験片②の破断面を見ると、固化したすり磨き粉が面内に点在するように残存しており、残存率は試験片の面積に対して40~50%程度であった。よって、洗浄が適切に行われると、先述のように $\tau=2.5\text{N/mm}^2$ 以上のせん断強度を確保することができる。仮に洗浄が不十分であった場合（新旧床版界面部の凹凸状態が顕著であれば洗浄が確実に行われない場合が想定される）、固化したすり磨き粉の残存率に応じたせん断強度の低下が、本試験の残存率と試験片②のせん断強度との関係から推察できる。なお、洗浄率が充填材の付着性能に与える検証は、別途模擬試験体を用いた室内実験により行っている⁴⁾。

「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、上面増厚したRC床版に対し「最近の研究では（新床版の）付着強度が 1.0N/mm^2 程度確保できれば設計上の規格値（輪荷重）の3倍程度の荷重が作用しても新旧コンクリートの一体化は十分確保できる」と記載されている。これより、洗浄が良好でなかった試験片②においても、平均せん断強度が 1.5N/mm^2 以上あったことから、新設した上面増厚床版と同等以上のせん断強度を確保できていると考える。

3.6 動的せん断付着試験

(1) 試験の目的

本試験は、静的せん断付着試験に引き続き、動的せん断付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。

(2) 試験要領

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（ $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ ）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。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。試験状況を図-12に示す。

(3) 試験結果

洗浄が良好であった試験片①に対する静的せん断付着試験の結果、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（ $P=30.75\text{kN}$ ）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



図-12 試験状況

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。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。試験結果を表-4に示す。試験終了後に試験片③-2の新旧床版の界面部を観察したところ、固化したすり磨き粉が付着している箇所があったことから、はく離の原因はすり磨き粉の洗浄が完全にできていなかったことに起因すると考える。

表-4 動的せん断付着試験の結果

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

このことに関しては、静的せん断付着試験と同様に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にはく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。

「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200万回の繰り返し載荷を実施しても、打継界面の付着切れは発生せず、付着・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（同マニュアルに記載されている条件を基に床版支間長を $2.0\sim 3.0\text{m}$ として算出）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。

4. せん断抵抗のメカニズムに関する考察

動的せん断付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 既往の研究結果⁴⁾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。
- ② 上面増厚床版を施工する際に、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（以下、「凹凸のかみ合わせ」という）によるせん断耐力を期待することができる。

ここで、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、静的せん断付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に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（以下、「仮想存置材」という）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付着試験を行った。試験要領は、先述の静的せん断付着試験と同様とした。試験結果を表-5に示す。

表-5 静的せん断試験の結果

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-5より、充填材が注入されていなくても1.3～1.7N/mm²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、充填材の付着性能だけでなく、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考えると考える。

5. 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

る。本試験により得られた知見と実施工を実施するにあたり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。現在、従来工法において採用されている洗浄は圧搾水によるものであり、確実に洗浄することができるとは言い難い。よって、スピンドル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) 交通が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、充填材の付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る。

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、ご指導いただいた松井繁之大阪大学名誉教授、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) 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 コンクリートの付着強度発現機構に関する研究，土木学会論文集，No577 IV，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) 神田利之，鈴木 真，緒方辰男，松井繁之：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，日本コンクリート工学会年次論文，2014，投稿
- 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