

報告

上面増厚後に水平ひび割れが発生した RC 床版の補修工法に関する試験施工

鈴木 真*, 神田利之**, 松井隆行***, 東山浩士****

*西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社, 構造技術部 (〒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 (〒658-0024 神戸市東灘区魚崎浜町 5-5)

***西日本高速道路株式会社, 関西支社, 保全サービス事業部 (〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町 1-13)

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

鋼橋 RC 床版の補修工法として, 一般的に上面増厚工法が採用されている。しかし, 床版内に雨水等が浸入し, 再劣化に至った事例が多数報告されている。再劣化の顕在化と損傷の拡大を未然に防止するために, 筆者らは過年度より補修工法の基礎的研究を行なってきた。その成果を基に, 上面増厚工法施工後に再劣化が顕在化し, 床版取替え工事が行われることになった実橋 RC 床版に対して試験施工を行なったので報告する。

キーワード: RC 床版, 補修工法, 上面増厚工法, 水平ひび割れ, 試験施工

1. はじめに

鋼橋 RC 床版の劣化が顕在化した場合, 補修工法として, 上面増厚工法が多数採用されている。しかし, 補修後, 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, 鋼橋 RC 床版が再劣化した事例が多数報告されている¹⁾。写真-1に, 床版取替えを行なった際に切断撤去された RC 床版の一例を示す。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継続して行ってきた²⁾。

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。

従来工法に対して本補修工法は, 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, 図-1 に示すウォータージェットノズルを改良したスピジェットノズルを採用し, 洗浄効果を向上させ, 所要の接着性能を発揮する, といった特徴を有する。

これまでの研究結果を踏まえて, 本補修工法の実用化

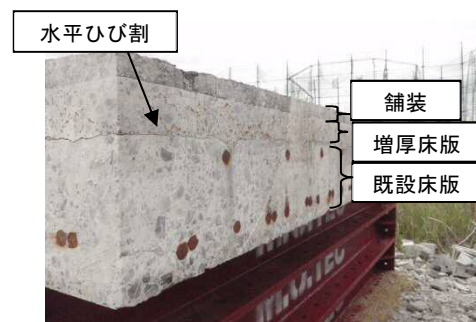


写真-1 水平ひび割れの一例

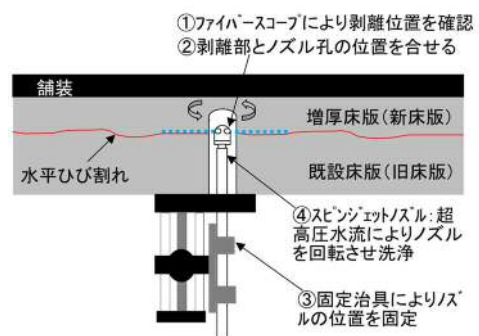


図-1 洗浄作業要領

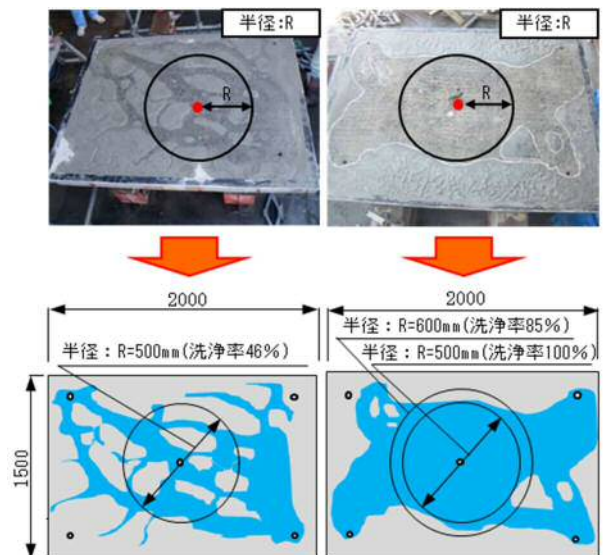
の段階にあると判断し, 実橋 RC 床版に対して試験施工を行い, 施工性等に関する検証を行なった。

2. これまでの研究結果

2.1 洗浄効果に関する基礎試験

本補修工法において, 充填材の接着効果を確保するために, 洗浄により水平ひび割れ内からすり磨き粉をい

に排出するかが大きな課題であった。そこで、2500mm×1500mm×70mm のコンクリート板2枚の間にスラッジを 1mm の厚さになるように敷き詰めて、山形鋼で挟み込むようにしてボルトで固定し、下段のコンクリート板中央部に設けた孔を介して、洗浄水を注入する試験を行った。図-2 に示すように、従来工法での洗浄率 46% (CASE1 参照) に対して、本補修工法での洗浄率は 100% (CASE2 参照) となり、洗浄効果は大きく向上した。また、床版取替えによる切断撤去された RC 床版を試験体とした模擬試験においても、基礎評価試験と同等の洗浄効果が得られ、充填材注入試験も良好な結果が得られた。なお、充填材にはエポキシ樹脂およびアクリル樹脂を使用した。充填材を注入した後に、試験体を切断した断面の一例を写真-2 に示す。



※着色部は洗浄された範囲を示す

(a)CASE1 (b)CASE2

図-2 洗浄試験結果の一例

2.2 充填材の性能確認試験

充填材の性能確認を目的として、撤去床版を使用した①静的せん断付着試験、②振動状況下における充填材注入試験、③すり磨き粉が残存した状態における充填材の性能確認を行なった。静的せん断試験については、2.1 に記した充填材注入試験後の RC 床版を 200mm×200mm の大きさに切断し、図-3 に示すような要領にて、せん断付着試験を行なった。エポキシ樹脂およびアクリル樹脂とも、概ね 2.0~4.0N/mm² のせん断強度を確保することができた。試験結果を表-1 に示す。試験片 7 および 8 は充填材が破断し、それ以外の全ての試験片において、充填材が破断するのではなく、充填材近傍のコンクリート部材が破壊する傾向を示した。



写真-2 充填材注入状況 (切断面)

振動状況下における充填材注入試験については、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おり、床版は常に振動している状態にあることが想定されたため、図-4 に示すように撤去床版を加振させながら充填材 (エポキシ系樹脂およびアクリル系樹脂) を注入した。充填材注入試験後において切断面を確認したところ、注入状況は良好であった。

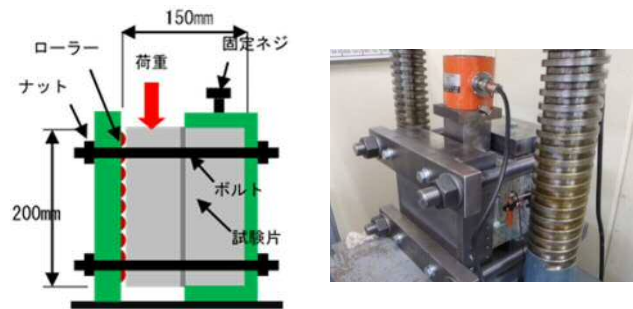


図-3 せん断接着試験要領および状況

すり磨き粉が残存した状態における充填材の性能確認については、新旧床版間に発生した水平ひび割れ内にすり磨き粉が完全に洗浄できずに残存した状態で充填材を注入した場合、せん断付着強度がどの程度低下するのかを FEM 解析により検討を行なった。本解析は、実際に上面増厚補修後に再劣化した RC 床版をモデルケースとし、橋軸方向に長さ L=5.0m、橋軸直角方向は幅員中央で対称とした。要素はソリッド要素とし、床版厚を 280mm、既設床版下面から 170mm の位置に樹脂層を 2mm の厚みで設定した。また、新旧床版間にすり磨き粉が残留し、注入された充填材が点在する状態を設定した。水平ひび割れ部の面積に対する充填材の接着面積率は、100%、80%、60%とした。交通車両の輪荷重 (P=100kN) 直下近傍において、すり磨き粉と充填材の境界部に、せん断応力が集中的に発生するが、最大で $\tau=0.95\text{N/mm}^2$ (接着面積率

表-1 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	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	7	2.0	69.8	1.83	2.50	14
	8	2.0	51.0	1.32		
	9	1.5	97.8	2.50		
	10	1.5	126.8	3.29		
	11	1.5	121.8	3.10		
	12	0.8	112.3	2.95		

※ 表中の平均せん断応力 1 は、試験片 3 体の平均値を示す。

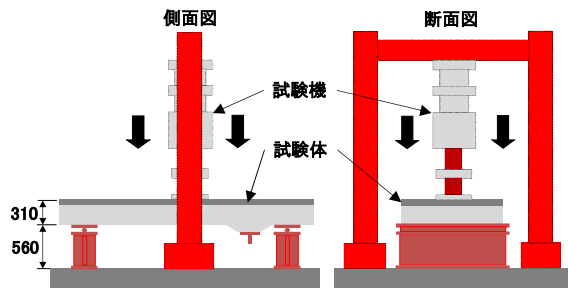


図-4 試験体設置要領

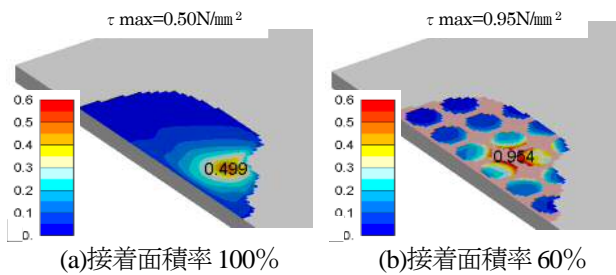


図-5 FEM 解析結果の一例

60%)であった。静的せん断付着試験において、最小でも $\tau=1.49\text{N/mm}^2$ であったことから、洗浄が不十分であっても、充填材の付着効果が低下する危険性はほとんどないと考える³⁾。解析結果の一例を図-5に示す。

3. 橋梁概要

3.1 構造概要

試験施工を行なった橋梁の構造概要を以下に記す。また、構造断面図を図-6に、現況を写真-3に示す。

構造形式：2+3 径間連続鋼桁橋

橋 長：226.700m

支 間 長：2@44.950m+3@44.950m

有効幅員：9.750m

桁 高：2.510m (主桁高 2.300m)

床 版 厚：210mm

設計荷重：TL-20

使用材料：鋼材 SM50Y, SM53B

コンクリート $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$

施工年度：昭和 50 年 10 月

本橋は、RC 床版の劣化に伴い、平成 15 年度に上面増厚工法を施したが、その後再劣化が顕在化したため、平成 29 年度に床版取替え工事が行なわれるに至った。本試験施工は、RC 床版の撤去工事が行なわれる直前のタイミングで実施した。また、本橋の路下には、施工に必要なヤードを確保することができ、試験施工を行うには最適な環境であった。

3.2 変状部の概要

RC 床版下面から撮影した変状部の一部を写真-4に示す。変状は、ひび割れ、遊離石灰の発生が橋軸方向に

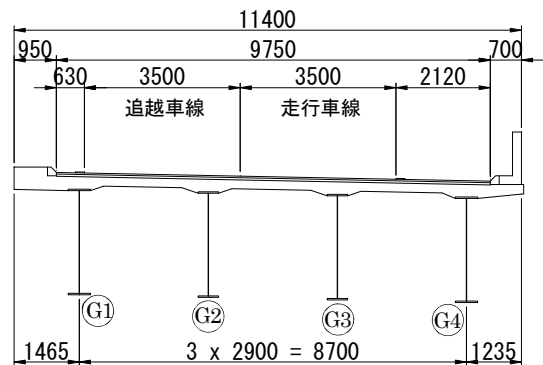


図-6 橋梁概要 (断面図)



写真-3 橋梁の現況



写真-4 変状部の状況



写真-5 変状部の状況

ほぼ全域に渡って発生しており、橋軸直角方向には走行車線直下にあたる G2 桁から G4 桁間において顕在化していた。また、舗装部においては、ポットホールが多数発生していた。このことから、本橋の RC 床版には、新旧床版コンクリートの境界部や鉄筋位置において、水平ひび割れが発生していることが推測された。このことは、写真-5に示すように、切断撤去された本橋の RC 床版の切断面を見れば、裏付けることができた。

4. 試験施工の手順

本試験施工における作業手順を記したフローチャートを図-7に示す。本試験施工の範囲は、比較の変状が顕在しているG2桁およびG3桁間において(主桁間距離は2.9m)、橋軸方向に7.0mとした。これまで行ってきた研究活動と同様に、実際に当該範囲内に水平ひび割れが発生しているか否かは、非破壊検査手法により確認した。その後、削孔を行って洗浄水および充填材の注入排出孔を設け、水平ひび割れ内の洗浄、充填材注入を順次行った。充填材の注入状況を確認するために、再度非破壊検査を行い、さらにRC床版の切断撤去後において切断面を外観目視により確認を行った。

5. 試験施工の結果

5.1 衝撃弾性波法による水平ひび割れの範囲の検出

本補修工法を行うにあたり、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、この作業は非常に重要な工程の一つとなる。

上記のように、本試験施工範囲において、水平ひび割れの有無およびRC床版下面からの深さを衝撃弾性波法による非破壊検査手法を適用して探査した。探査の結果、水平ひび割れは、新旧床版コンクリート境界面だけでなく、旧床版内に配置されている上段鉄筋位置においても発生している結果が得られた。図-8に水平ひび割れ位置において周波数スペクトルピークが卓越した探査結果の一例を、図-9に本試験施工範囲内における水平ひび割れの発生範囲を示す。また、水平ひび割れがあると判定された部位において削孔を行い、目視による確認も行った。写真-6に示すように、削孔を行って得られたコンクリートコアを見てみると、水平ひび割れ部において、すり磨き粉が固着していた。また、削孔後においては、約1日程度の漏水が続いた。

この測定結果を基に、実際に水平ひび割れ内の洗浄および充填材注入作業を行う試験施工範囲を選定した。

5.2 削孔

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、RC床版下面からハンマードリルにより行った。削孔径はφ25mmとし、削孔深さは、RC床版下面から水平ひび割れ位置より10~20mm上方までとした(長さは約230mm)。削孔の間隔は500mmとし、千鳥配置とした。削孔後において、充填材注入時に充填材が当該試験施工範囲外の水平ひび割れ内に流出し、作業時間と充填材の大きなロスを防止するために、試験施工の外周に位置する孔から、無機系注入式アンカーを水平ひび割れ内に注入し堰止めを行った。

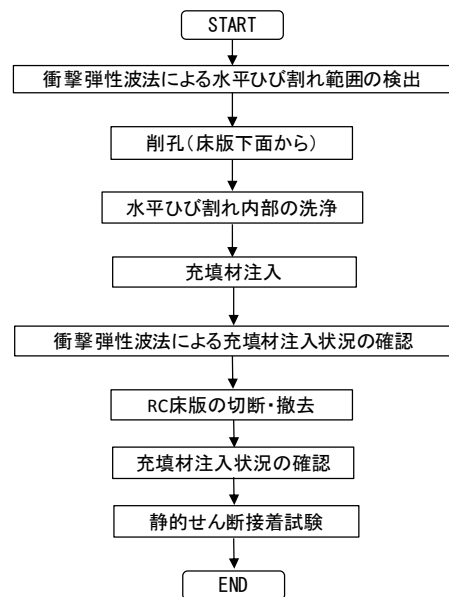


図-7 作業手順を記したフローチャート

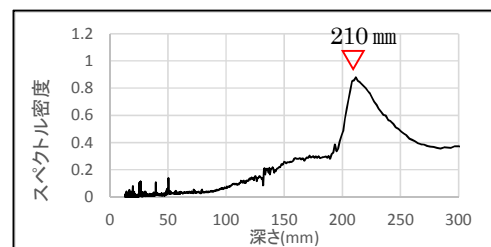


図-8 衝撃弾性波法による測定結果の一例

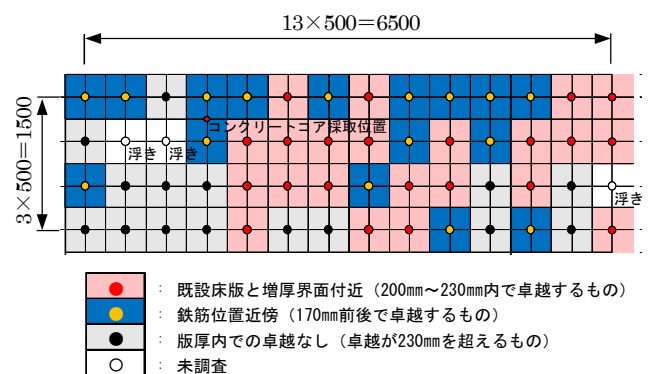


図-9 衝撃弾性波法による探査結果 (施工前)



写真-6 削孔調査の結果

5.3 水平ひび割れ内部の洗浄

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。洗浄作業の状況を写真-7に示す。スピンジェットノズルを注水孔に差し込み、写真-8に示す専用固定治具にて固定した。注水作業は、超高圧発生装置（写真-9参照）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。このような注水および排水作業を全ての孔に対して実施した。なお、注水排出された洗浄水は、吊り足場上に敷設したシート上に一旦集水し、高性能吸引車にて排出した（写真-10参照）。濁水の排出状況を写真-11に示す。

洗浄に要した時間は、一つの注入孔当たり約1分30秒であった。なお、注水後は圧搾空気を30秒程度送り込んで、水平ひび割れ内に残留する洗浄水の排出を行った。洗浄水の注水および排出は、全ての孔において確認することができた。このことから、当試験施工の範囲全域に渡って、水平ひび割れが発生していたことが裏付けられる。

5.4 充填材注入

充填材の注入作業もRC床版下面から実施した。充填材注入作業の状況を写真-12に示す。充填材には、湿潤状態でも所要の接着性能を確保することができるエポキシ樹脂材を使用した。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、透明なパイプを接着剤で取り付け、パイプを介して電動ロータリー注入機により隣接する孔から排出が確認されるまで順次行った。注入作業時の圧力管理は、0.3MPaを上限とし、過剰に圧力を加えないようにした。

注入時間は、各孔によって大きな差があったが、概ね10～20分程度であった。注入時間の差は、水平ひび割れの幅や（水平ひび割れ深さが変化するような）形状によって左右されたと推測する。

当該注入作業は、全ての孔から充填材が排出されたことを確認し終了した。

5.5 衝撃弾性波法による充填材注入状況の確認

充填材注入作業後において、再度衝撃弾性波法による探査を実施し、充填材注入前後におけるデータの比較検証を行い、充填材の注入状況の確認を間接的に行った。探査結果を図-10に示す。図-10中において、施工範囲の一部に水平ひび割れが残留しているような結果が見られるが、切断撤去したRC床版の切断面を外観目視により確認したところ、充填材は確実に充填されていた。よって、非破壊検査手法による充填材注入状況の確認作業については、今後も精度を向上させるための検討が必要であると考えられる。



写真-7 洗浄作業の状況



写真-8 固定治具



写真-9 超高圧発生装置



写真-10 高性能吸引車

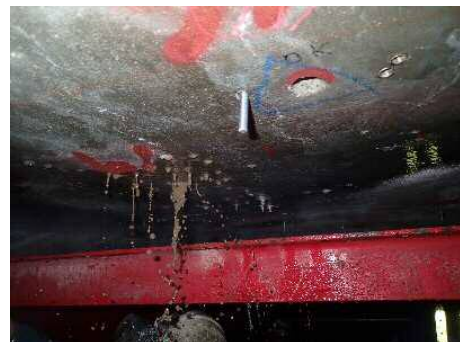


写真-11 濁水の排出状況



写真-12 充填材注入作業の状況

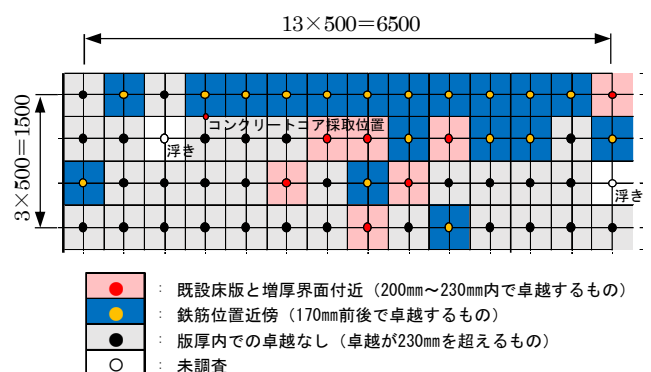


図-10 衝撃弾性波法による探査結果（施工後）

5.6 RC床版の切断・撤去および充填材注入状況の確認

充填材注入作業後に、床版取替工事に伴い、本橋のRC



写真-13 RC床版の撤去状況



写真-14 切断・撤去したRC床版

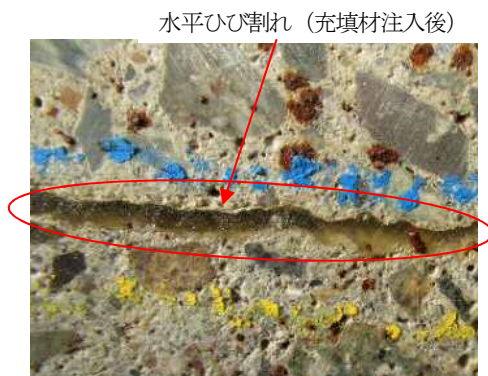


写真-15 切断面の一例

床版を切断・撤去作業が行われ、本試験施工を行った部位を入手することができた。RC床版の撤去作業状況を写真-13に示す。切断面に対して、目視による確認を行ったところ、充填材は空隙部を残すことなく注入されていることを確認した。撤去されたRC床版を写真-14に、切断面の一例を写真-15に示す。

5.7 静的せん断付着試験

上記の撤去されたRC床版を、200mm×200mmの大きさに切断し、7体の試験片を切り出した。試験片の一例を写真-16に示す。各試験片とも充填材の注入状況は良好であった。当該試験片に対し、図-3に記す要領にて、静的せん断試験を行なった。試験結果を表-2に示す。当該試験の結果、表-1に示す基礎評価試験と同等のせん断付着強度を有することが確認できた。なお、試験体のほとんどは、充填材ではなく充填材近傍の母材が破壊

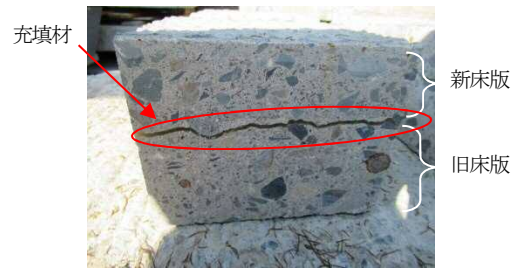


写真-16 試験片の一例

表-2 静的せん断付着試験の結果

試験体番号	せん断力 (kN)	せん断応力 (N/mm ²)	平均せん断応力 (N/mm ²)
1	98.6	2.47	2.49
2	94.8	2.37	
3	107.6	2.69	
4	64.8	1.62	
5	96.4	2.41	
6	131.1	3.28	
7	102.9	2.57	

する結果となった。

6. まとめ

上記より、現地施工においても本補修工法が十分に適用可能であることがわかった。本補修工法は必ずしも恒久的な補修対策とは考えていない。大規模更新事業が推進されている現状において、RC床版を含む構造物の効率的な維持管理を行うためには、LCCは考慮すべき重要な要素の一つになる。当然のことながら全ての劣化したRC床版に対して同時期に対策を講じることは不可能であるため、①RC床版の劣化進行度に応じて、抜本的な対策を講じるもの、②補修等により延命化させるもの、③経過観察を行うものに区分し、優先順位を定め、計画的に対策を講じることが重要になる。本補修工法は、重交通路線における対策工法として位置付けられ、将来更新することを前提とした一時的な延命化措置として適用可能と考える。

今後において、恒久対策としての適用性について検討を行なっていく。

参考文献

- 1) 長谷俊彦, 和田圭仙, 後藤昭彦: 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
- 2) 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集, Vol.36, No.2, pp.1225-1230, 2014.7.
- 3) 鈴木 真, 樺山好幸, 神田利之, 東山浩士: 上面増厚工法施工後に界面剥離により劣化したRC床版の補修工法に関する実験的研究, 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, Vol.16, pp.645-650, 2016.

(2018年7月20日受付)