

# 論文 RC 床版における断面修復部の耐久性に関する研究

松本 政徳<sup>\*1</sup>・後藤 昭彦<sup>\*2</sup>・渡邊 晋也<sup>\*3</sup>・一瀬 八洋<sup>\*4</sup>

**要旨**：道路橋床版では、ポットホール等の変状が発生した箇所を対象として、一般的に断面修復による部分補修を実施している。しかし、断面修復後に再び短期間で変状が発生する場合もあり、維持管理上の課題となっている。本研究では、実施工と同様な方法で床版上面を部分的に断面修復した模擬床版の移動載荷実験を実施し、施工方法および補修材、補修深さ等の違いが打継ぎ界面のはく離挙動や断面修復部の耐久性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、打継ぎ界面を適切な方法で表面処理し、既設床版と同等の静弾性係数で収縮量が小さい補修材を用いることにより耐久性が向上することが判明した。

**キーワード**：RC 床版, 断面修復, 補修材, 表面処理, FEM 解析, 移動載荷実験

## 1. はじめに

舗装打換やポットホール補修時等における鉄筋コンクリート床版（以下、「RC 床版」という）の変状対策として、床版上層部分の部分打換（断面修復）工法が多く採用されている。しかし、断面修復後においても比較的短期間でポットホール等の舗装損傷や、断面修復部の界面はく離等の損傷が再発生する事例が多く見受けられる。床版上面の損傷は、重交通路線における疲労、寒冷地における凍害、凍結防止剤散布による塩害等の様々な要因が考えられるが、その断面修復部における再損傷メカニズムについては未だ十分には解明されていない。また、床版上面の損傷は走行車両の安全性へ直接影響するとともに、交通規制等によるサービス低下にもつながり、維持管理上の課題となっている。

既往の研究においても、断面修復部の表面処理方法等の違いが付着強度に及ぼす影響について検討している論文は多いが、本研究のように床版上面の部分的な断面修復部を対象とし、輪荷重走行試験により耐久性について確認している研究はほとんど見られない。

そこで本研究では、床版補修として実施している小規模な断面修復や、舗装全面打換および床版防水施工時に実施する中規模な断面修復を対象として、施工方法および補修材等が断面修復部の耐久性に及ぼす影響を FEM 解析および移動載荷実験により検討したものである。

## 2. 実験概要

本実験のフローを図-1 に示す。本実験は、以下に示す順序で検討を行った。

(1) 移動載荷実験に先立ち、着目項目が打継ぎ界面のはく離に及ぼす影響を把握するために FEM 解析を

実施した。

- (2) RC 床版を模擬した試験体を 2 体製作した。
- (3) 補修材の種類、表面処理方法、補修形状および深さ、接着剤の有無等を試験ケースとし、計 6 ケースの断面修復を実施した。
- (4) 断面修復後の試験体について移動載荷実験を行い、補修部の耐久性について検証した。
- (5) 試験体の切断後に断面を観察し、打継ぎ界面のはく離状況等を調査した。



図-1 実験フロー

## 3. FEM 解析

### 3.1 概要

断面修復部における劣化メカニズムを把握するための一検討とし、汎用プログラムを用いた 3 次元線形 FEM 解析を実施した。解析モデルは図-2 に示すように移動載荷実験用の試験体と同一形状とし、コンクリート部分をソリッド要素、鉄筋をバー要素とした。補修材と既設床版との境界は節点を共有する完全結合としている。床版モデルは、引張領域のコンクリートの弾性係数を低下させているが、せん断剛性の低下は行っていない。床版中央に荷重が載荷されると、曲げ変形により床版上側は圧

\*1 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 技術課長 (正会員)

\*2 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員 (正会員)

\*3 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 研究員 博士 (工学) (正会員)

\*4 鹿島道路 (株) 技術部 構造物解析・対策グループ

縮領域となるが、輪荷重の走行によってせん断力の作用方向が正負交番するため、打継ぎ界面のはく離に及ぼす影響が大きいと考えられる。このため、本解析では床版中央の補修材に輪荷重を載荷し、着目項目が補修材や既設コンクリートおよび打継ぎ界面に発生するせん断応力に及ぼす影響について検討を行った。本検討における主な着目項目と解析モデルの条件を表-1に、基本モデル(Mo1)および着目した比較モデルの補修断面のイメージを図-3に示す。

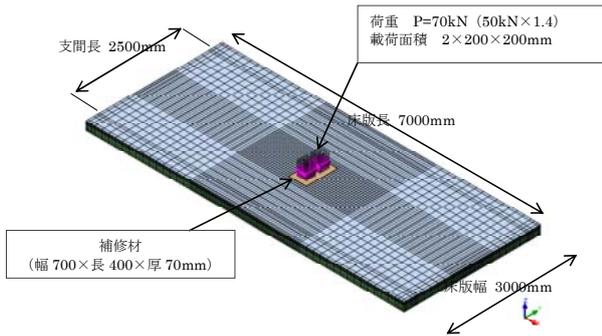


図-2 解析モデル

表-1 主な着目項目と解析モデルの条件

主な着目項目	解析モデルの条件	
	基本モデル	比較モデル
断面修復材の静弾性係数の影響	E=25,000 N/mm <sup>2</sup> (Mo1)	E=40,000 N/mm <sup>2</sup> (Mo1) E= 5,000 N/mm <sup>2</sup> (Mo1)
断面修復深さの影響	補修深さ 70mm (Mo1)	補修深さ 30mm (Mo2)
断面修復形状の影響	補修断面直角 (Mo1)	補修断面テーパ (Mo3)

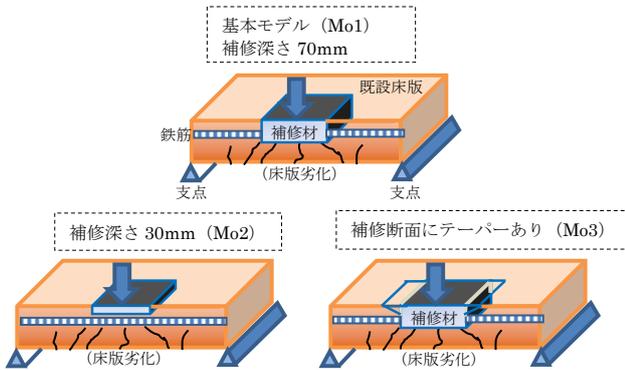


図-3 補修断面のイメージ

(1) 断面修復材の静弾性係数の影響

基本モデル(Mo1)について静弾性係数の大小が打継ぎ界面のせん断応力にどのように影響するのか検討を行った。解析の結果、図-4のように、既設床版よりも、静弾性係数の大きな補修材を用いた場合には、補修材に発生するせん断応力が大きくなり、静弾性係数が小さな補修材を用いた場合には、既設床版のせん断応力が大きくなる。したがって、補修材の静弾性係数は、既設床版の静弾性係数と同等程度とした方が、いずれかに応力が集中せず、界面はく離に及ぼす影響も小さいと考えられる。

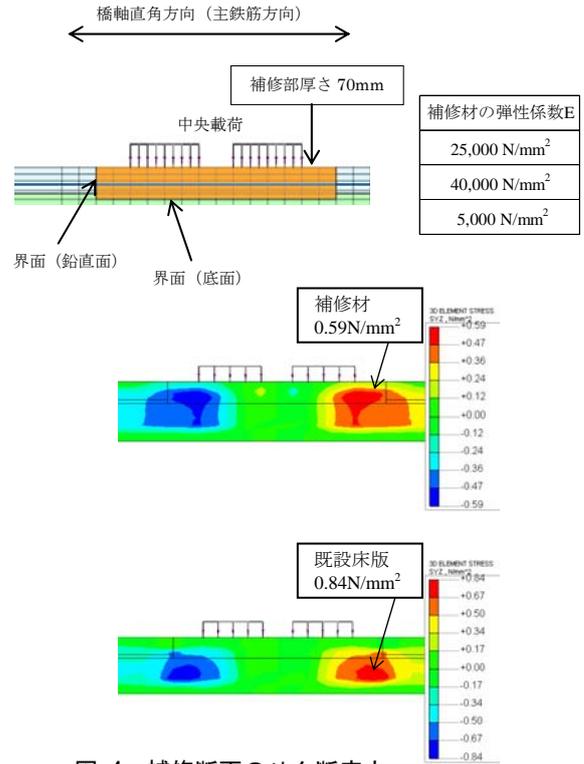


図-4 補修断面のせん断応力

(2) 断面修復深さの影響

上側鉄筋の裏側まで補修した Mo1 と、上側鉄筋かぶりを補修した Mo2 の比較を行い、補修深さがはく離に影響するか検討を行った。図-5のように補修深さは、上側鉄筋までの方が界面に発生するせん断応力は小さい結果となった。これは、せん断応力が上下鉄筋の間に位置する中立軸付近で大きくなるため、Mo1 の応力が大きくなったものと考えられる。

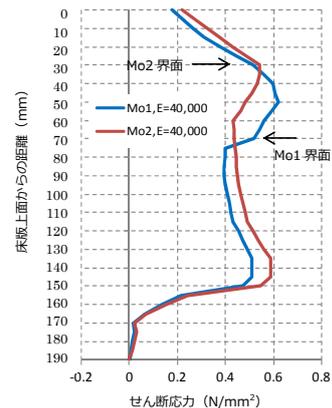
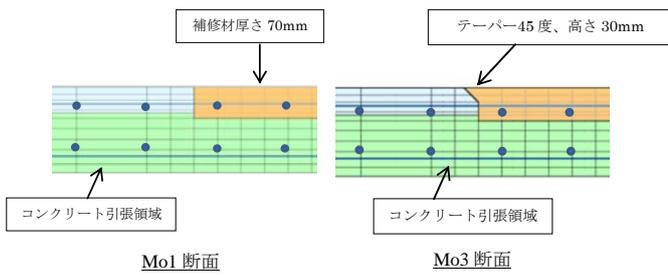


図-5 補修材のせん断応力図

(3) 断面修復形状の影響

図-6に示すように、端部を直角とした Mo1 と補修材の端部に 45 度のテーパを高さ 30mm で設けた Mo3 との比較を行った。解析の結果、Mo1 と Mo3 の補修材に発生するせん断応力はほとんど変わらなかった。しかし、図-7のように曲げ応力が大きな箇所にテーパを設けると、分力によるせん断応力が大きくなるため、断面修

復形状はできるだけ直角とした方が良いと考えられる。



Mo1 断面

Mo3 断面

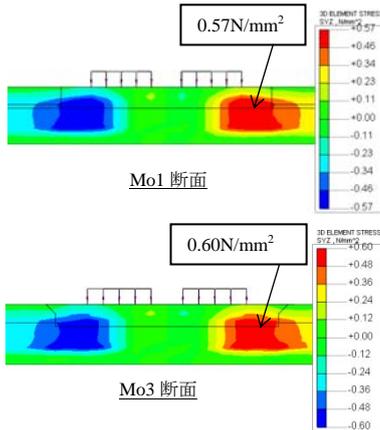


図-6 補修断面のせん断応力

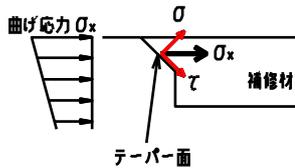


図-7 テーパー面の応力状態

#### 4. 移動載荷実験

##### 4.1 試験体

本実験では、昭和 39 年制定の鋼道路橋示方書に準じて RC 床版を模擬した試験体を 2 体製作した。製作した試験体の形状を図-8 に示す。試験体の形状寸法は、幅 3000mm、長さ 7000mm、厚さ 190mm とした。試験体は、床版支間 3.0m の連続版と支間中央の曲げモーメントが同様になるように、単純支持した際の支持間隔を 2500mm としている。試験体の長さは、載荷時に断面修復する 3 箇所の床版たわみが同等となるよう橋軸方向の連続性を考慮して設定した。使用したコンクリートの配合は表-2 に示すように 24-8-25N とし、材齢 28 日で呼び強度 24N/mm<sup>2</sup> を満足するものとした。鉄筋は SD295 を使用し、主鉄筋に D16 を、配力鉄筋に D10 (上側) および D13 (下側) を用いた。

表-2 コンクリートの配合

呼び強度	SL (cm)	Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	S/A (%)	単位量 kg/m <sup>3</sup>				
						C	W	S	G	混和剤 (AE)
24	8	25	4.5	54.5	47.0	285	155	878	1000	2.85

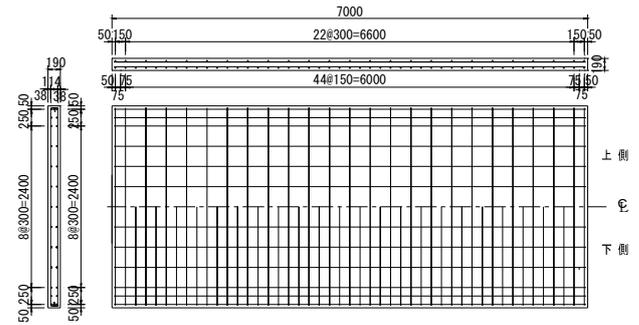


図-8 試験体の形状 (単位: mm)

##### 4.2 断面修復

断面修復は、輪荷重の走行する範囲 (3m) の 3 箇所について行った。床版 1 は表面処理および補修形状を変更した 3 ケース、床版 2 は補修材および補修深さを変更した 3 ケースの計 6 ケースとした。上面断面修復する 3 箇所の位置と輪荷重の走行範囲のイメージを図-9 に、断面修復の条件を表-3 に示す。

###### (1) ハツリおよび表面処理

###### a) ハツリ処理

床版上面のハツリ処理は、実施工と同様にコンクリートブレイカやピックハンマー等(以下、「手持式動力工具」という)を用いて行った。ハツリ処理では、コンクリートカッターでハツリ範囲の外側を深さ 20mm ほど切削した後、30kg 級のブレイカを用いて荒ハツリし、仕上げで 7.3kg のピックハンマーによる調整ハツリを行った。ハツリ深さは、上側鉄筋の裏側に約 20mm の隙間を設ける程度とした。

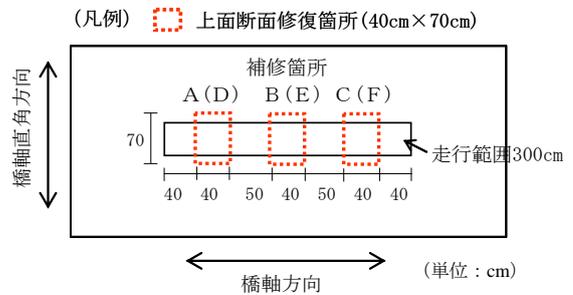


図-9 上面断面修復箇所と走行範囲

表-3 断面修復の条件

床版 1 (表面処理および断面修復形状を変更したケース)

補修箇所	補修材料	はつり方法	表面処理方法	接着剤の塗布	補修深さ
A	超速硬コンクリート	手持式動力工具 (テーパー有り)	-	無し	上側鉄筋裏側まで
B	"	手持式動力工具	-	"	"
C	"	"	スチールショットブラスト	有り	"

床版 2 (補修材および補修深さを変更したケース)

補修箇所	補修材料	はつり方法	表面処理方法	接着剤の塗布	補修深さ
D	超速硬セメント系材料	手持式動力工具	スチールショットブラスト	有り	上側鉄筋裏側まで
E	ポリマーセメントモルタル	"	"	"	"
F	"	"	"	"	上側鉄筋かぶり

b) 表面処理

手持式動力工具によるハツリ後は、ハツリ面に脆弱部や微細ひび割れが発生し、補修材を打ち継いだ場合に界面の付着強度が低下することが考えられる。このため、床版1の補修箇所C、床版2のD～Fについて、ハツリ後の脆弱部や微細ひび割れを除去し、付着力を改善させることを目的として、スチールショットブラスト(以下、「ブラスト」という)を用いて投射密度 150kg/m<sup>2</sup>で研掃処理を行った。

(2) 補修材

床版1は、床版上面を断面修復した3箇所ともに、最も使用実績の多い超速硬コンクリートを用いた。また、床版2は、収縮量が小さく静弾性係数が既設床版と同等のポリマーセメントモルタル(以下、「PCM」という)を2箇所で使用し、収縮量が小さい超速硬セメント系材料を1箇所で使用した。補修箇所C～Fでは、打継ぎ界面用のエポキシ系接着剤を塗布後に、補修材を打設している。

既設床版および補修材の力学性能を表-4に示す。各使用材料の静弾性係数は、FEM解析に用いた材料定数と概ね同等であった。

表-4 使用材料の力学性能

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
既設床版	34.7	25.1
超速硬コンクリート	54.6	34.9
超速硬セメント系材料	52.2	38.9
ポリマーセメントモルタル	37.9	25.8

(3) 断面修復形状および補修深さ

床版1の補修箇所Aは、補修断面端部に45度のテーパを設け、床版2の補修箇所Fは、補修深さを30mmとし、上側鉄筋かぶり部を補修した。試験体における断面修復の施工状況を写真-1に示す。



写真-1 断面修復部の施工状況

4.3 試験方法

(1) 載荷方法

載荷位置は、支持間隔の中央とした。床版は橋軸方向

を単純支持としているが、橋軸直角方向の端部は支持していない。床版の支点部には、輪荷重の走行時に端部の浮き上がりを防止する治具を設置した。

従来の疲労試験は、鋼製の載荷板(200×500mm)を床版上面の橋軸方向に敷き並べて、その上の鋼板上を鉄輪が走行する載荷方法で行われている。一方、本実験では図-10のように載荷板を使用せずに、緩衝用のベニヤ、ゴム板、鋼板の順に重ね合わせており、断面修復部の打継ぎ界面に輪荷重の走行によるせん断力を作用させ、はく離挙動を確実に検証することとした。

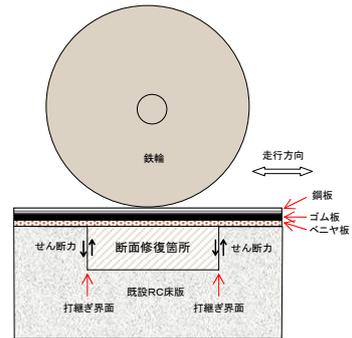


図-10 載荷方法

(2) 載荷条件

ステップ1(乾燥条件)では、載荷荷重137kNで10万回の載荷を実施した。載荷荷重137kNは設計輪荷重に衝撃を考慮した荷重である。ステップ2(乾燥条件)では、載荷荷重157kNで15万回の載荷を実施した。載荷荷重があまり大きすぎると、実橋で計測される軸重データと異なってくることから、157kNを上限に設定した。

水張り条件のステップ3では、載荷荷重157kNの移動載荷試験によって補修箇所の打継ぎ界面ではく離が進展し、さらにRC床版が押し抜ける状態が確認できるまで実施することとした。補修箇所と水張り範囲を図-11に、水張り条件の移動載荷実験状況を写真-2に示す。計測項目を表-5に示す。

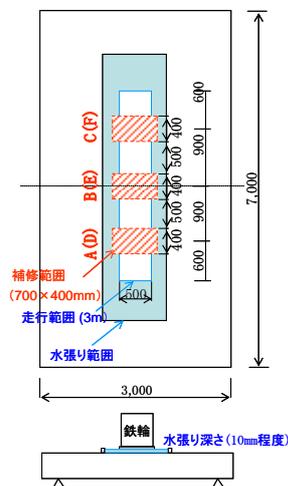


写真-2 移動載荷実験(水張り条件)

図-11 補修箇所と水張り範囲

表-5 計測項目

計測項目	計測位置	計測機器
床版たわみ	橋軸、橋軸直角方向	高感度変位計
打継ぎ界面のひずみ振幅	既設床版と補修材の打継ぎ界面	モールドゲージ
ひび割れ、漏水状況	床版上下面	目視、クラックゲージ

5. 試験結果

5.1 床版たわみ

各補修箇所活荷重たわみの経時変化を図-12 に示す。乾燥条件における活荷重たわみは、走行回数の増加とともに漸増する傾向にあるものの、3箇所とも N=25 万回までほとんど変化が見られなかった。水張り条件の繰返し載荷では、床版1の補修箇所 A,B で N=4 万回、床版2の補修箇所 D で N=10.5 万回から、活荷重たわみが急増する傾向が見られた。その後、床版1の4.4万回、床版2の13万回で活荷重たわみが急増した補修箇所付近において床版下面が押し抜けている状態となった。

このように、補修箇所 A,B には、ハツリによる微細ひび割れが生じていたこと、補修箇所 D の静弾性係数が既設床版より5割程大きいことから打継ぎ界面に应力集中が生じ、界面はく離の発生、進展に伴って活荷重たわみが急増したものと考えられる。なお、はく離が進展した補修箇所では床版たわみが大きくなるが、走行状態に支障なければ他の箇所への影響は少ないと考えられる。

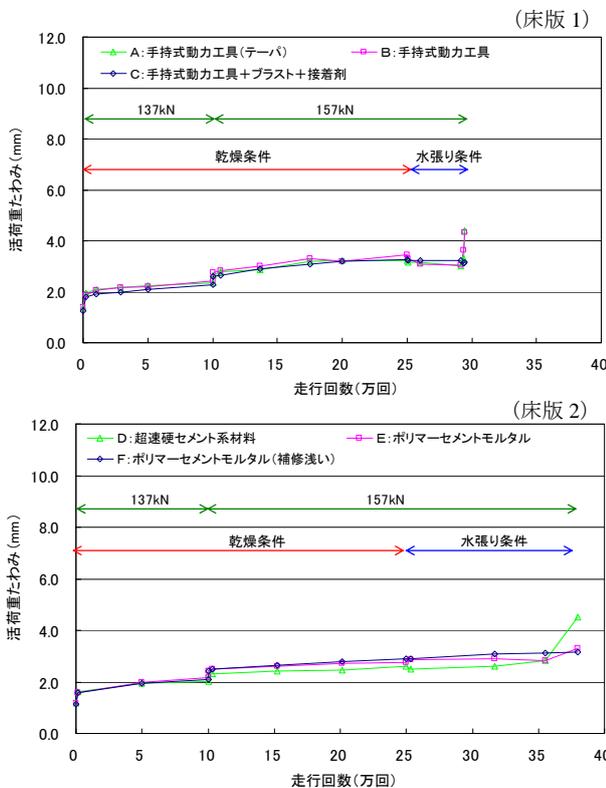


図-12 活荷重たわみの経時変化

5.2 モールドゲージのひずみ振幅

図-13 に打継ぎ界面に設置したモールドゲージのひずみ

み振幅の変化を示す。

床版1では、水張り条件の繰返し載荷で補修箇所 A,B におけるモールドゲージのひずみ振幅が急増しており、打継ぎ界面でははく離が進展している状況が表れていたが、補修箇所 C はほとんど変化が見られなかった。これは、ブラスト処理と接着剤塗布による付着力改善効果が表れていたものと考えられる。

一方、床版2では、補修箇所 D でモールドゲージのひずみ振幅が急増し、補修深さが浅い箇所 F においても底面のひずみ振幅がやや大きくなっている。しかし、補修箇所 E は試験終了時まで変化は見られなかった。このことから、収縮量が小さく、静弾性係数が既設床版と同等の補修材の方が耐久性の向上が図れることがわかった。

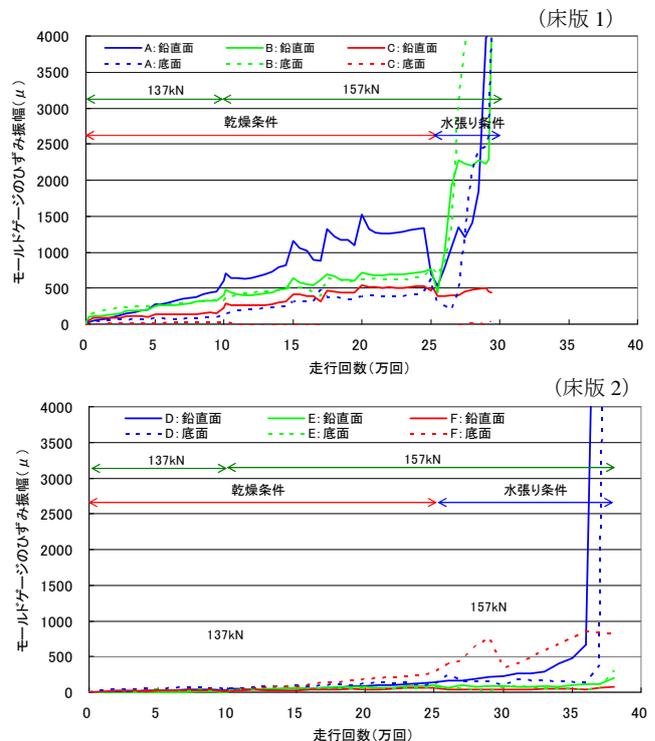


図-13 モールドゲージのひずみ振幅の変化

5.3 移動載荷実験後の切断面の観察

移動載荷実験後の試験体切断面を写真-3~4 に示す。

床版1の試験後の切断面を観察すると、補修箇所 A,B では鉛直面から底面にかけて界面ではく離が見られる。はつり面にテーパを設けた補修箇所 A では、テーパ面に沿って界面はく離が生じ、テーパ上端の補修材が割れている状況であった。一方、手持式動力工具+ブラスト+接着剤を用いた補修箇所 C では、界面はく離は部分的であり、付着状態の改善による補修効果が認められた。

床版2の切断面を観察すると、打継ぎ界面のはく離は、補修材の静弾性係数の大きい補修箇所 D で見られた。これは、既設床版との静弾性係数の違いにより、界面に应力が集中し、はく離が生じやすくなったものと推定される。一方、PCM を使用した補修箇所では F の底面の一部

ではなく離が見られるものの、その他の箇所では離は確認されなかった。このことから、手動式動力器具+ブラスト+接着剤を用いた条件で、要求性能を満足したPCM等の補修材を使用すれば、耐久性の改善が期待できることがわかった。

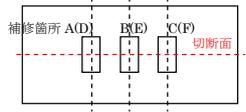


写真-3 床版1の切断面

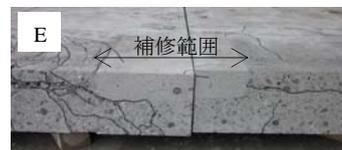
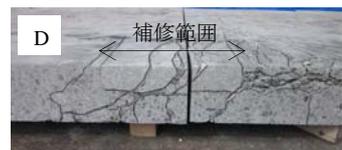


写真-4 床版2の切断面

## 6. 移動載荷実験結果のまとめ

補修深さ、表面処理方法、補修材等の違いが部分的な断面修復部の耐久性に及ぼす影響を総合的に評価した結果を表-6に示す。この表から、各試験ケースの中で補修箇所Eが最も効果が期待できる補修方法であることが明らかとなった。すなわち、手動式動力器具+ブラスト+接着剤を用いた実験条件で、乾燥収縮が小さく、静弾性係数が既設床版と同等で付着が良好なPCM等の補修材を使用すれば、超速硬系材料を使用したケースよりも耐久性が向上することがわかった。

なお、試験ケースFのように、上側鉄筋かぶり部を補修した条件では、打継ぎ界面(底面)の一部には離が確認された。実施工では本試験で再現できなかった腐食鉄

筋周辺の劣化部や塩分を多く含む部分が十分除去できないことなどの影響を受けることにより付着性能が低下し、再劣化の起点となり易いため、できるだけ上側鉄筋裏側のある一定の深さまで補修する方が良いと考えられる。

表-6 移動載荷試験結果のまとめ

試験結果	床版1			床版2		
	超速硬セメント系			超速硬セメント系	ポリマーセメントモルタル	
補修箇所	A	B	C	D	E	F
表面処理(ブラスト+接着剤)	無し	無し	有り	有り	有り	有り
静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	34.9			38.9	25.8	25.8
補修深さ	鉄筋裏側	鉄筋裏側	鉄筋裏側	鉄筋裏側	鉄筋裏側	鉄筋かぶり
モールドゲージの変化	×	×	○	×	○	△
活荷重たわみの変化	×	×	○	×	○	○
打継ぎ界面のはく離(切断面)	橋軸直角方向	×鉛直面 ×底面	×鉛直面 ×底面	○鉛直面 ○底面	○鉛直面 ×底面	○鉛直面 △底面
	橋軸方向	×鉛直面 ×底面	×鉛直面 ×底面	×鉛直面 △底面	○鉛直面 ×底面	○鉛直面 △底面
補修部のひび割れ	×	×	○	×	○	△
押抜きせん断破壊した回数	水張り条件のN=4.4万回			水張り条件のN=13.0万回		
移動載荷実験による耐久性	×	×	△	△	◎	○

## 7. 結論

移動載荷実験を行った結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) 手持式動力器具によるハツリ面にテーパーを設けると、はく離が生じやすくなり、耐久性が低下する。
- (2) 手持式動力器具+ブラスト+接着剤を用いた条件では、付着状態が改善されて耐久性が向上する。
- (3) 補修材は、収縮量が小さく、既設床版と同等の静弾性係数であるPCM等の補修材を用いた方が耐久性の向上が図れる。
- (4) 補修深さが浅いと上側鉄筋周辺のコンクリートの劣化状態の影響により、打継ぎ界面の付着を確実に確保することは難しいため、できるだけ上側鉄筋裏側まで補修することが望ましいと考えられる。

## 8. おわりに

本研究において、床版上面を部分的に断面修復した模擬床版を用いて移動載荷実験を行い、補修材や表面処理方法の違い等が打継ぎ界面のはく離挙動や断面修復部の耐久性に及ぼす影響について概ね検証することができた。本研究は、限られた実験条件のもとで、最善の成果が得られるよう創意工夫して進めたが、今後の課題として、施工環境温度の影響等についても検討する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 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 設計要領第二集 橋梁保全編, 2012.7
- 2) 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, 2012.7