

## 論文

## 道路橋床版の土砂化対策としての断面修復に関する実験的研究

横山広\*, 中村拓郎\*\*, 榎谷浩\*\*\*, 久保善司\*\*\*\*

\*博(工), 金沢大学連携講座特任教授, 大学院自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町)

\*\* 博(工), (国研)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

\*\*\*工博, 金沢大学教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

\*\*\*\*博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

近年, 床版疲労に続き新たに土砂化問題が顕在化し, その対応が急務となっている. 実橋で土砂化が発生した際に部分打ち替えや断面修復が施されるが, 打継面での縁切れなど再損傷が発生する事例が頻発しているのが実情である. そこで本研究では, 土砂化箇所を断面修復する際の材料条件を検討するために, 輪荷重走行試験で土砂化を再現させた実物大床版供試体を対象に断面修復を行い, 水張り環境下での輪荷重走行試験で土砂化までの走行回数に匹敵する延命効果を確認した.

キーワード: 道路橋床版, 輪荷重走行試験, 断面修復, ポリマーセメントモルタル

## 1. はじめに

道路橋床版の疲労劣化問題は, 昭和 40 年代に発生した鉄筋コンクリート床版 (以下, RC 床版と称す) の陥没損傷から研究が活発化し, 輪荷重走行試験機の開発によってそのメカニズムが解明されるに至った. RC 床版の疲労は通行車両による荷重が繰り返し載荷されることにより最終的に陥没破壊に至るもので, 補強鉄筋には損傷が無いという特徴がある. それらの研究成果を受けて道路橋示方書では, 疲労対策として設計床版厚さを大きくするよう改定され, RC 床版の疲労損傷問題はほぼ解決されたと言ってよい.

しかしながら近年, 新たな床版の損傷として土砂化が顕在化するようになり, その対応が急務となってきている. 写真-1 は寒冷地の道路橋床版の土砂化の事例であり, 主として凍害に起因すると想定されている損傷である. 土砂化が進展すると舗装にひび割れや床版からの噴出物が確認されるようになり, 放置すればポットホールなど通行車両に影響する損傷に繋がることになる. 既往の研究成果により, 土砂化は材料劣化の影響も受けることが分かってきており, 輪荷重走行試験の結果で ASR による微細ひび割れへの水の浸透から土砂化に進展することが示唆されている<sup>1)</sup>. 実橋で土砂化が発生した際には, その周辺部にもひび割れなど損傷が発生している場合が多く再損傷が頻発している状況である. 具体的には, 部分打ち替えや断面修復による補修を行っても, ひび割れ等に起因すると考えられる床版本体の剛性低下によって,



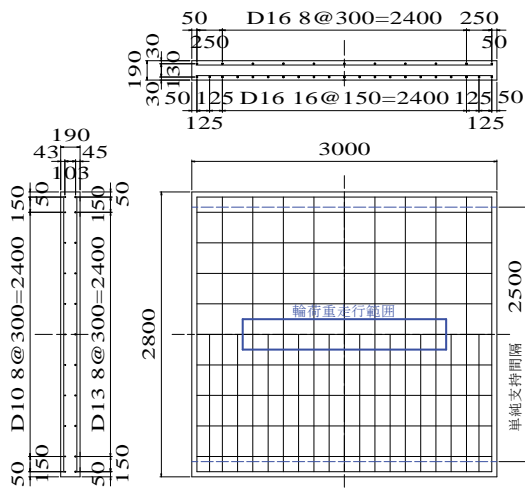
写真-1 寒冷地の道路橋床版の土砂化の事例

超速硬コンクリートのような比較的ヤング係数の高い材料を使用した際に, 打継面での縁切れに繋がっていることが多い. そこで本研究では, 土砂化箇所を断面修復する際の材料条件を検討するために, 輪荷重走行試験で土砂化を再現した実物大床版供試体に断面修復を行い, さらに試験を継続して延命効果を確認したのでその結果を報告する.

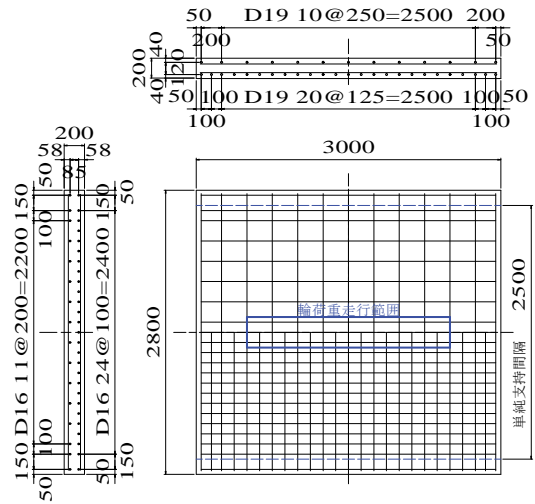
## 2. 試験の概要

## 2.1 試験供試体

試験に用いた供試体は昭和 39 年道示 (S39 供試体) と同 47 年道示 (S47 供試体) に準じた RC 床版で, コンク



(a) S39 供試体



(b) S47 供試体

図-1 供試体図 (単位: mm)

リートには反応性の細骨材を使用している。細骨材に反応性のものを使用した理由は、経験的に実橋梁で生じている ASR 損傷が反応性の細骨材によるものであることが分かっていることに加え、下部構造のようにマッシュでない乾燥しやすい薄板構造で ASR が進展する為には、表面積が大きく反応速度も大きい細骨材の影響と考えることが妥当であるからである。なお、ASR の反応を促進させるものとして NaCl を添加しており、その為、鉄筋にはエポキシ樹脂塗装したものを使用している。図-1 は両供試体の配筋図を示しており、S39 供試体の主鉄筋は D16 で 150mm 間隔で、S47 供試体では D19 が 125mm 間隔で配置されている。表-1 にセメント系材料の物性値を示すが ASR の影響で圧縮強度に対してヤング係数が低い傾向にある。表には断面修復用と指定使用したポリマーセメントモルタル (以下、PCM と称す) の物性値も示しているが、ヤング係数が使用したコンクリートに近く低い値であることが特徴となっている。

表-1 セメント系材料の物性値

材 料	供試体名	材 齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	S39	1270	26.8	10.2
	S47	1222	39.5	12.7
ポリマーセメントモルタル		28	32.6	14.5



写真-2 載荷試験の状況

## 2.2 試験方法

本研究では国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所が所有する輪荷重走行試験を用いて水張り環境下での繰り返し載荷で土砂化を発生させ、その後、断面修復を実施して輪荷重走行試験を再開するものとした。写真-2 は輪荷重載荷試験の状況である。供試体の走行方向の支持は回転可能な丸鋼でその間隔は 2500mm とし、走行軸に直角方向は H 形鋼 (広幅 175) による弾性支持としている。使用した試験機が鉄輪を装着したクランク式であるため、床版上に面的な荷重作用とするため、走行×直角方向=120×300mm の鋼製ブロックを敷並べ、車輪と接する位置には鋼板が敷設されている。水張り条件はそれらの軌道周りに堰を設けて、走行試験中は水を湛えるようにした。

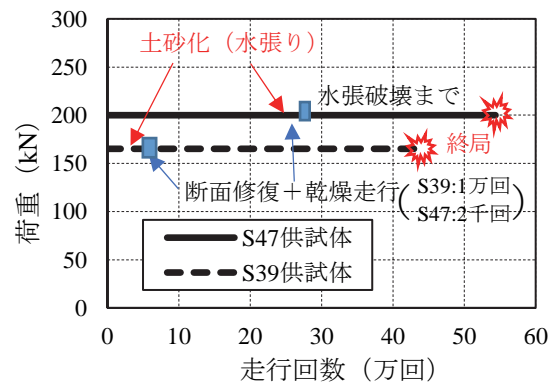


図-2 載荷プログラム

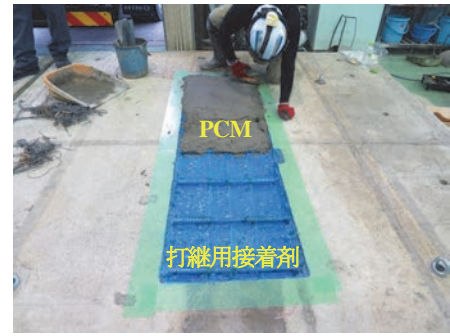
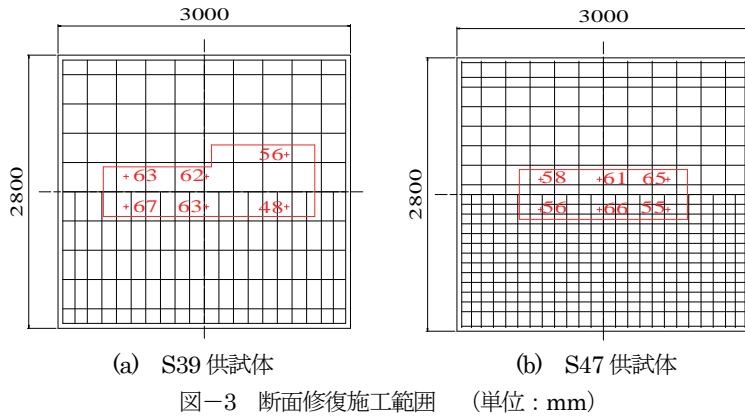
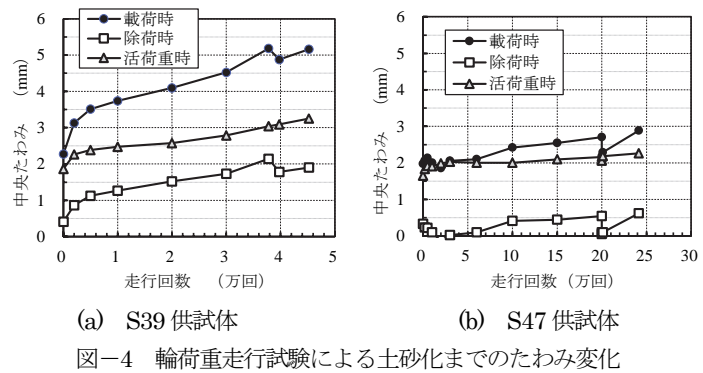
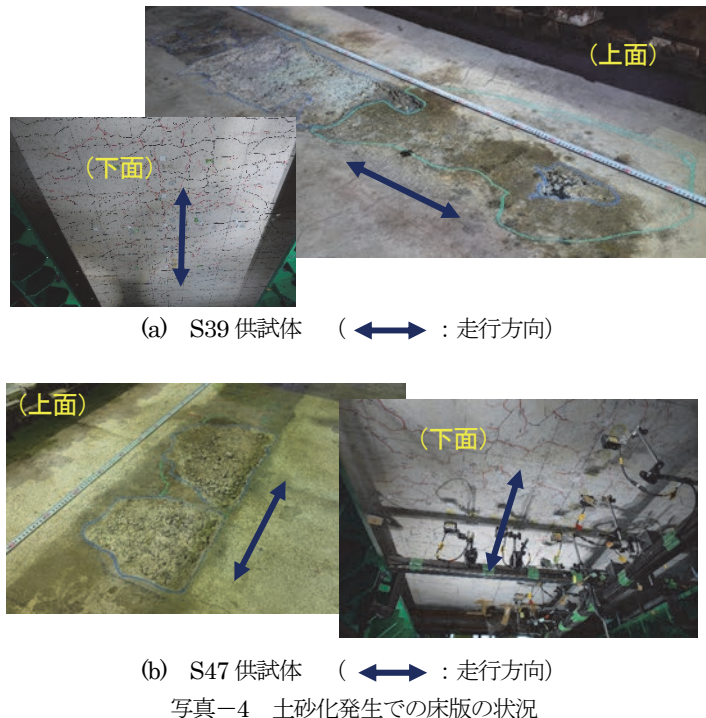


図-2 は載荷プログラムであり、荷重の大きさは試験スケジュールを加味して、可能となる試験回数をコンクリート強度を考慮して寒地土木研究所の既往試験結果から得られている S-N 関係を基に設定し、S39 供試体で 160kN、S47 供試体が 200kN とした。なお、断面修復後は乾燥状態で 100kN 載荷でのマイナー則による換算回数 が 200 万回となる輪荷重載荷を実施後に水張り環境に移行し結局まで載荷を続行した。



### 2.3 断面修復施工

土砂化部分の断面修復はたたき点検で浮き範囲も確認して設定し、図-3 の赤枠に示す範囲で実施した。赤枠内の数値はその位置の劣化コンクリート除去深さの計測値である。施工は土砂化や浮きの劣化部分を電動ピックで人力除去した後、細かな浮き部分をハンマーで除去し、さらに打継面処理として高圧洗浄を実施した。その後、打継面が乾燥してから低粘度エポキシ樹脂のひび割れ浸透補修剤を塗布し、それが指触乾燥後にエポキシ樹脂の打継用接着剤を塗布した。打継用接着剤の可使用時間内にハンドミキサーで混練りした PCM を打設しており(写真-3)、その養生期間は 28 日以上を確保している。



## 3. 試験結果

### 3.1 土砂化までの経時変化

土砂化発生までの輪荷重走行試験結果によるたわみと走行回数の関係を図-4 に、両供試体の試験終了時の状況を写真-4 に示す。S39 供試体は走行回数 37,780 回で試験機の変位リミッターが作動したため、走行軌道を撤去したところ土砂化が確認された。その後、試験機の性能上走行試験が困難となる 45,202 回まで試験を継続しており、この時点で上面鉄筋が露出するまで土砂化が進展

していた。それに対し S47 供試体は走行回数 200,000 回で浅い土砂化を確認しており、269,000 回まで試験を継続したところ S39 供試体と同様に上面鉄筋が露出した。

床版下面側のひび割れ発生は鉄筋量に応じて S47 供試体の方が少なく、S39 供試体のように主鉄筋方向が卓越する傾向も見られない。なお、何れの供試体も床版下面の漏水は確認されていない(写真-4)。土砂化に至る過



程として、ASRにより発生した上面ひび割れから水分が浸透することで、貫通ひび割れの発生に先行して土砂化に至ったと考えている。また、ASRによる微細ひび割れは水分の浸透に起因して発生するため、曲げひび割れに代表される外荷重による劣化とは関係なく、上面のみの劣化進展で土砂化に進展することも推察される。特に昭和61年以前のコンクリート中のアルカリ総量規制が反映されていない床版でその劣化が懸念されることになる。

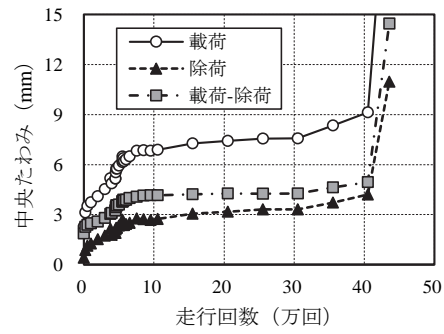
### 3.2 断面修復後の経時変化

断面修復前の土砂化発生までの結果に断面修復後のたわみ増加量を加える処理を行い連続したデータとして表現したたわみの経時変化を図-5に示す。S39 供試体は断面修復後の水張り走行開始後 380,394 回で押抜きせん断破壊が生じて試験を終了した。一方、S47 供試体では明確な押抜きせん断破壊は確認できなかったものの、272,300 回で大きくたわみが増加した。試験終了までの累計の走行回数は S39 供試体が 435,596 回、S47 供試体が 543,720 回である。土砂化までの走行回数と補修後の走行回数の倍率（断面修復後走行回数/断面修復までの走行回数）は S39 供試体で 8.64、S47 供試体で 1.02 であり、耐荷性能が変化していないことを考慮すれば、十分な補修効果を有していると言える。断面修復後の走行回数が土砂化試験よりも多くなり延命された理由として、使用した PCM のヤング係数が小さいことで ASR と荷重作用によるひび割れによってたわみ変形が大きくなっている床版の既存コンクリートとの一体性に効果があったことに加え、補修時に使用した浸透性エポキシ樹脂による微細ひび割れの補修効果や、打継用エポキシ樹脂と PCM それぞれの防水効果によるものと考えている。

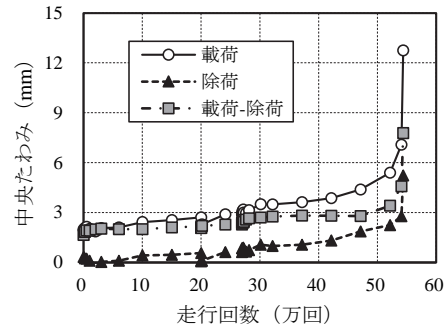
### 3.3 試験後供試体のひび割れ発生状況

輪荷重走行試験後の供試体下面のひび割れ発生状況を図-6に示す。試験前の段階で ASR によるひび割れ発生は鉄筋量に応じて S39 供試体が多くなっている。S47 供試体にも共通するが、ASR によるひび割れは拘束を受けない周辺部で多く発生する傾向にある。よって、鉄筋の拘束を受ける供試体中央付近では試験開始時点で面内方向のケミカルプレストレスが残存していた可能性がある。輪荷重走行試験で生じたひび割れは、S39 供試体では初期ひび割れを格子状に連結するようなひび割れ進展であり、S47 供試体では初期ひび割れが少なく、格子状のひび割れが多く発生していることが認められた。

試験終了後の切断面の状況を写真-5に示す。走行軸直角方向の切断面には押し抜き

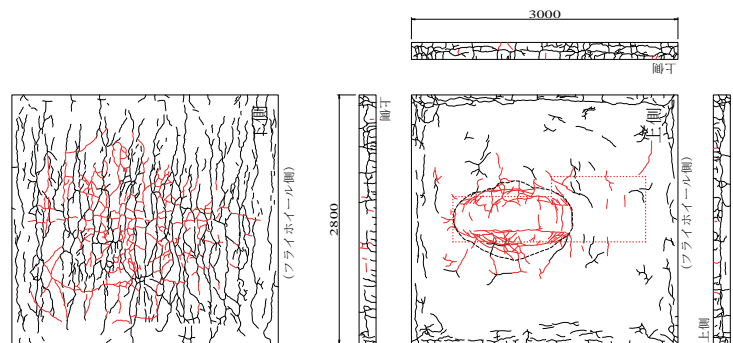


(a) S39 供試体

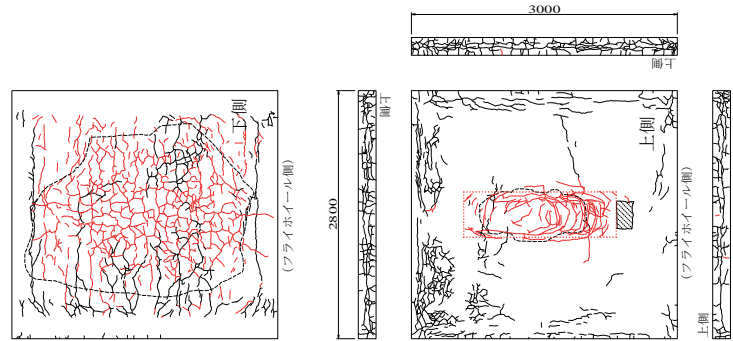


(b) S47 供試体

図-5 輪荷重走行試験による最終破壊までのたわみ変化

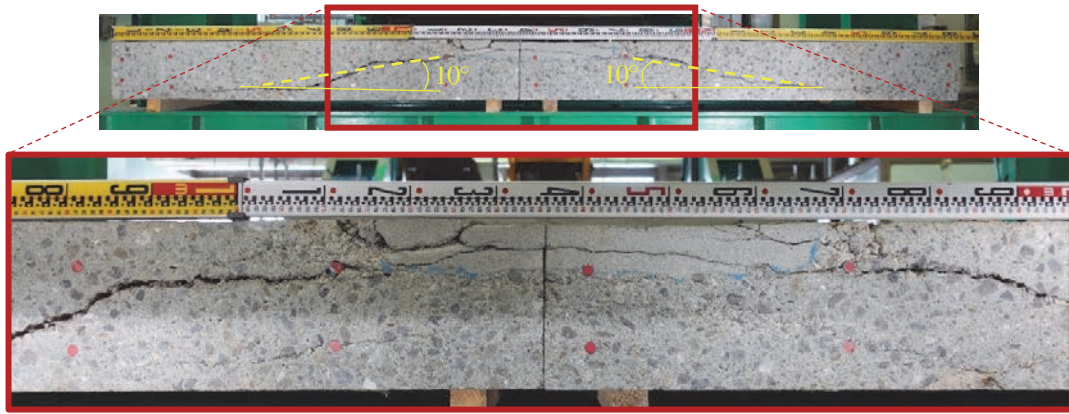


(a) S39 供試体



(b) S47 供試体

図-6 試験終了後のひび割れ図 (単位: mm)



(a) 走行軸直角方向切断面



(b) 走行軸方向切断面

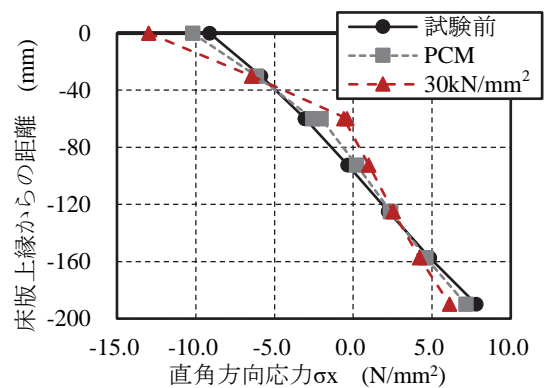
写真-5 試験終了後の切断面

ん断破壊面が形成されているが、その角度は約 10 度であり一般的な RC 供試体よりも緩やかな角度となっている。この理由は既往研究<sup>2)</sup>にもあるように ASR による水平方向の微細ひび割れが存在したことで押し抜きせん断によるひび割れと複合したためと考えている。軌道直下では走行軸に直角方向、走行方向共に断面修復材である PCM 内に押し抜きせん断に繋がるひび割れが進展しており、ひび割れ発生時期が不明ではあるものの、終局前まで PCM が床版コンクリートと一体となって荷重に抵抗し、PCM の剥離が先行した損傷進展ではないことが推察される。

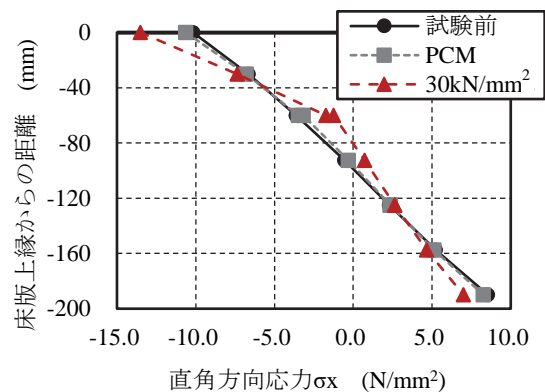
#### 4. 断面修復材に求められる性能

本研究による輪荷重走行試験の結果からは、補修後も耐荷性能を保持することが確認され、試験後の切断面の観察からも終局まで一体となっていたことが推察された。これらはヤング係数が低い PCM の効果であり、ひび割れ進展後の床版本体のたわみ挙動に追従できたためであると考えている。

図-7 は 3 次元弾性論から誘導される厚板理論<sup>3)</sup>による 3 層板の計算で、床版厚さ方向の走行軸直角方向応力度の分布を示したものである。ここでいう厚板理論とは Kirchhoff-Love の仮定を用いて誘導される薄板理論とは異なり、変位関数  $f_3$  (ガラーキネクトル) と  $\phi_3$  (ブー



(a) S39 供試体



(b) S47 供試体

図-7 走行軸直角方向応力の版厚方向分布

シネスクの関数)も基づく理論であり、直接応力や変位が算出できる。変位関数  $f_3$  と  $\phi_3$  の基礎微分方程式は式(1)のように示される。

$$\Delta \Delta f_3 = 0, \Delta \Delta \phi_3 = 0 \quad (1)$$

ここに、

$$\Delta = \partial^2 x + \partial^2 y + \partial^2 z$$

$$\partial^2 x = \partial^2 / \partial x^2, \partial^2 y = \partial^2 / \partial y^2, \partial^2 z = \partial^2 / \partial z^2$$

供試体の支持条件は4辺単純支持とし、床版寸法と支持間隔は試験を再現している。物性値は試験前のヤング係数による応力度分布に加え、断面修復後(表中のPCM)と、参考として超速硬コンクリートを模したヤング係数  $E_c=30\text{kN/mm}^2$  でも計算を実施した。採用した厚板理論では、部分的な断面修復のような材料設定が困難であるため、床版全体を層に分け、その層毎に物性値を設定しており、ポアソン比は0.2としているが、中央付近の着目では問題ないと考えている。因みに、S39 供試体のヤング係数の計測値による計算による中央たわみは2.35mmでS47 供試体は1.97mmであり、図-4に示した活荷重たわみに近似している。

計算結果によれば、S39 供試体、S47 供試体共に断面修復前後で応力度分布に大きな違いは無いが、 $E_c=30\text{kN/mm}^2$  ではその分布が異なり、縁圧縮応力度も大きく、値が零となる位置も上方に移動している。よって断面修復材のヤング係数は、たわみが増加した本体コンクリートに近ければ応力分布が大きく変化せず、このことが結果として耐久性に影響すると推察される。

以上より、断面修復材に求められる性能としては劣化状態に合わせたヤング係数を選定することであり、一般的なコンクリートに比較して低いヤング係数でも十分な耐久性が得られることが本研究で示された。ただし、ひび割れ浸透型補修剤や打継用接着剤を併用していることから、実橋への展開に当たってもその使用を考慮することが必要である。本研究ではASRを生じた供試体を使用しているが、ひび割れが発生しているRC床版でもたわみは増加することから、本試験結果が適用できると考える。

## 5. まとめ

本研究では、ASR反応性細骨材を用いた昭和39年道示と47年道示に準じた配筋の実物大床版供試体を用いて、水張り条件下での輪荷重走行試験により土砂化を再現したうえで、低弾性のPCMによりその損傷部分を断

面修復し、さらに試験を継続して断面修復の効果を確認した。得られた知見を列挙する。

- 1) 土砂化に至る走行回数はS39 供試体で45,202回、S47 供試体が269,000回であった。床版下面側のひび割れは鉄筋量に応じてS47 供試体が少なく、両供試体共に下面の漏水は確認されなかった。ASRによる微細ひび割れが生じた場合には上面のみの劣化進展で土砂化に繋がる可能性がある。
- 2) 断面修復後のS39 供試体、S47 供試体の修復前の走行回数に対する倍率(断面修復後走行回数/断面修復までの走行回数)はそれぞれ8.64倍と1.02倍であり、十分な補修効果が確認された。延命の理由としてPCMが低弾性であることに加え、浸透性エポキシ樹脂による微細ひび割れの補修効果や打継用接着剤とPCMの防水効果があったと考えられる。
- 3) 試験終了後の切断面では、PCM内に押し抜きせん断に繋がるひび割れが進展しており、終局前までPCMが床版コンクリートと一体となって荷重に抵抗し、剥離が先行した損傷進展ではないことが推察された。
- 4) 厚板理論による走行軸直角方向の床版厚さ方向の応力分布を計算した結果、低弾性のPCMでは走行前の状態と大きな変化はないが、超速硬コンクリートを模してヤング係数を  $30\text{N/mm}^2$  まで高くすると分布形状が異なる結果となった。よって、床版の劣化状態に合わせたヤング係数の断面修復材料を選定することが望ましいと考えられる。

## 謝辞

本研究は北陸・道路メンテナンス会議に設置された「道路橋の維持管理における各構成部材の限界状態ならびにAI技術の活用に関する検討ワーキンググループ」の研究成果をまとめたものである。ここに関係された皆様に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 横山広, 榎谷浩, 久保善司, 角間恒, 西弘明: ASR縮小モデル供試体の輪荷重走行試験, 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.155-158, 2018.11.
- 2) 田附伸一, 津吉毅, 石橋忠良, 松田芳範, 今井勉: ASRにより損傷したRC部材の耐荷力に関する実験的研究, 土木学会論文集E, Vol.63 No.1, pp.166-177, 2007.3.
- 3) 横山広: 等方弾性体における変位関数の拡張と橋梁床版への応用に関する研究, 金沢大学学位請求論文, 2013.9.

(2020年7月17日受付)