

## 論文

# 低粘度エポキシ樹脂系補修材による砂利化した道路橋床版の 補修方法の考案と耐疲労性の回復効果

安達遥希\*, 皆川翔平\*\*, 飯土井剛\*\*\*, 前島拓\*\*\*\*, 子田康弘\*\*\*\*\*

\*日本大学大学院工学研究科,博士前期課程 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

\*\*工修, (株) 櫻エンジニアリング (〒963-8034 福島県郡山市島一丁目 22 番 30 号)

\*\*\*工博, (株) 復建技術コンサルタント (〒980-0012 宮城県仙台市青葉区錦町 1-7-25)

\*\*\*\*工博, 日本大学専任講師, 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

\*\*\*\*\*工博, 日本大学教授, 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

道路橋鉄筋コンクリート床版は、水が浸入した状態で疲労を受けると砂利化が発生し、耐疲労性を著しく低下させる。本研究では、低粘度エポキシ樹脂系補修材による砂利化床版の補修効果を検討した。具体的には、砂利化模擬供試体による強度回復の程度と、砂利化が生じた床版供試体の定点疲労試験と、輪荷重走行試験によって耐疲労性を評価した。その結果、考案した補修方法は、コンクリート砂利化部の空隙が充填されることで強度が増加すること、それによって、床版供試体の耐疲労性が回復することを確認した。

キーワード: RC 床版, 床版の砂利化, 耐疲労性, 低粘度エポキシ樹脂系補修材

## 1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC 床版)は、水が浸入した状態で疲労を受けると砂利化が発生する。この種の損傷は、RC 床版の耐疲労性を著しく低下させる。特に東北地方をはじめとする積雪寒冷地は、荷重作用に加え、凍結防止剤の散布に起因する塩害、凍害、ASR、およびそれらの複合劣化が発生する。写真-1 に示すように、RC 床版では、砂利化の発生も相まって、著しい損傷が生じている。近年は、RC 床版の取替更新を余儀なくされている現状にある<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、RC 床版の更新だけでなく、延命が可能な手法の開発も必要と考え、低粘度エポキシ樹脂系補修材<sup>2)</sup>(以下、エポキシ補修材)を床版の砂利化発生箇所に充填する補修方法を考案し、その補修効果と、補修後の砂利化した床版の耐疲労性の回復効果について検討した。具体的には、砂利化の進行状況を模擬した円柱供試体に補修材料を充填させ、健全なコンクリートと比較した際の強度回復の程度を評価した。次に、砂利化部を模擬した版状の供試体に対して、砂利化部を含めた床版上面全面に補修材を注ぎ込む補修を施し、定点載荷疲労試験によって耐疲労性を評価した。最後は、輪荷重走行試験により砂利化が発生し疲労破壊に至った RC 床版を対象に、考案する補修を施し、再び輪荷重走行試験を実



写真-1 RC 床版上面における砂利化と鉄筋露出

施して耐疲労性を評価した。

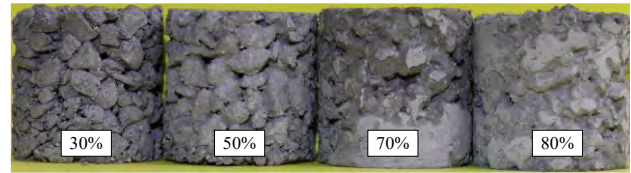
## 2. 実験概要

### 2.1 要素供試体を用いた砂利化箇所の補修方法の考案

表-1 に、要素供試体のコンクリートの配合表を示す。表より、本実験では、通常配合のコンクリート中のモルタル容積を Control(100%)とし、そこから容積比を変えバインダとなるモルタルの量を減らすことで砂利化を模擬した<sup>3)</sup>。写真-2 に、作製した供試体を示す。供試体形状は、直径 100mm、高さ 100mm の円柱供試体である。表-2 には、本実験シリーズで使ったエポキシ補修材の物性値を示す。表より、本実験では、エポキシアクリレート樹脂(以下、P)、浸透性エポキシ樹脂(以下、K)、の計

表－1 要素供試体のコンクリートの配合表

モルタル容積比	G max (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				AE減水剤 (kg)
					W	C	S	G	
Control	20	60	46	4.5	165	275	860	1033	2.75
80%					133	222	684	1346	2.22
70%					116	193	600	1502	1.93
50%					82	137	432	1815	1.37
30%					50	83	256	2128	0.83



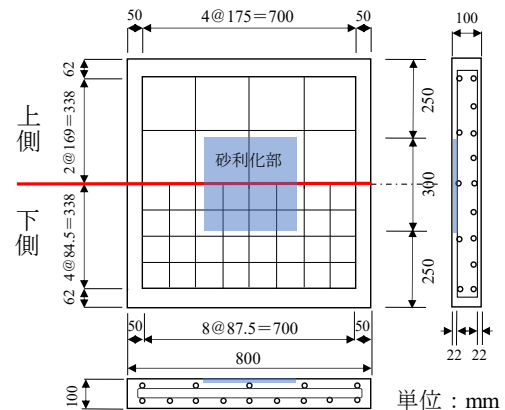
写真－2 モルタル容積を変えた供試体の概要

表－2 エポキシ補修材の物性値

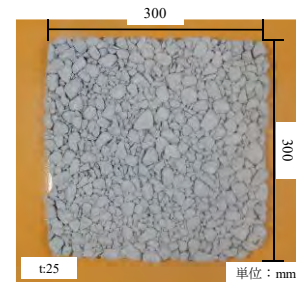
防水材名		超低粘性のエポキシアクリレート樹脂(P)			浸透性エポキシ樹脂(K)		
試験項目		温度(℃)	試験値	規格値	温度(℃)	試験値	規格値
せん断試験	強度	-10	3.44N/mm <sup>2</sup>	0.78N/mm <sup>2</sup> 以上	23	—	—
		23	0.30N/mm <sup>2</sup>	0.15N/mm <sup>2</sup> 以上			
せん断試験	伸び	-10	1.50%	0.5%以上	23	—	—
		23	3.70%	1.0%以上			
引張接着試験	強度	-10	3.3N/mm <sup>2</sup>	1.2N/mm <sup>2</sup> 以上	23	3.0N/mm <sup>2</sup>	1.6N/mm <sup>2</sup> 以上
		23	0.7N/mm <sup>2</sup>	0.59N/mm <sup>2</sup> 以上			
引張せん断接着強度		—	—	—	23	18N/mm <sup>2</sup>	10N/mm <sup>2</sup> 以上
粘度試験	常温下	20	19mPa・s	180mPa・s(従来品)	23	89mPa・s	200mPa・s以上
	低温下	5	35mPa・s	500mPa・s(従来品)			
曲げ <sup>a</sup>	強度	—	—	—	23	89N/mm <sup>2</sup>	35N/mm <sup>2</sup> 以上
圧縮	強度	—	—	—	23	71N/mm <sup>2</sup>	50N/mm <sup>2</sup> 以上
	弾性率	—	—	—	23	2.1×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	1.010N/mm <sup>2</sup> 以上

2条件とした。これらは低粘度型であり、ひび割れの他、砂利化したコンクリートにおける大小の空隙にも浸透すると考え選定した。また、可使(ゲル化)時間はPが20~30分、Kが約35分である。

本実験におけるエポキシ補修材を供試体に浸透させる方法は、補修材を供試体上面に注ぎ溜めた状態で脱気する方法と自然浸透させる2つの方法とした。具体的には、補修材が漏れないように供試体側面と底面に養生テープを貼るとともに上面に補修材が溜まるようにした。この準備の後、(1)脱気する方法は、真空チャンバーに供試体を入れ真空状態にすることで空気とエポキシ補修材を強制的に置換させた。(2)自然浸透させる方法は、モルタル容積比50%の供試体を対象に、上面に溜めた状態で硬化するまで静置させ、両方法とも補修材が浸透し上面の量が減った際は、その都度材料を追加した。試験項目は、補修前後の割裂引張強度である。また、供試体内部への浸透量を定量的に評価するため、割裂引張試験後の供試体割裂断面をコンクリートカッターで平滑にし、エポキシ補修材の浸透面積を、画像処理ソフトを用いて算出した。



図－1 RC版供試体の概要



写真－3 砂利化模擬版

## 2.2 版状供試体による定点疲労载荷試験

2.1節の結果より、後述するように要素試験において補修効果を確認した。そこで、RC供試体レベルの疲労試験により、砂利化補修後の耐疲労性を評価した。実験条件は、砂利化の進行の程度を2条件(モルタル容積比50%と30%)とし、砂利化部の補修の有無(有：R、無：N)を合わせた計4条件である。図－1に、本実験の供試体概要

表－3 RC版供試体のコンクリートの配合

G max (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE減水剤 (kg)
				W	C	S1	S2	G	
20	60	47.1	4.5	183	305	420	412	975	3.05

を示す。図より、RC床版は複鉄筋断面であり、その中央に砂利化部を模した部分を設けた。具体的な供試体の作製は、次の通りである。供試体寸法が長さ800mm×幅

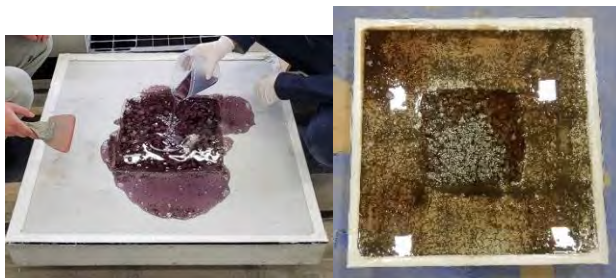


写真-4 RC版状供試体の補修状況

800mm×厚さ 100mm である。その中央部(図中の青色領域)に、写真-3 に示す長さ 300mm×幅 300mm×厚さ 25mm の砂利化模擬版を設置し、コンクリートを打ち込むことで砂利化部がある供試体とした。コンクリートの配合は、表-3 より、健全部が水セメント比(W/C)を 60%とするコンクリートであり材齢 28 日の圧縮強度が 27.5MPa である。また、砂利化部は、モルタル容積比 50%、30%の配合(表-1 参照)とした。砂利化部の圧縮強度は、50%が 14.2MPa, 30%が 1.52MPa であった。なお、本節のエポキシ補修材は、冬期施工を想定し、2.1 節の補修材とは異なる低温環境下対応の変性エポキシ樹脂(粘度 40mPa・s)を使用しており、材料の注ぎ込みは 5°C環境で行った。可使(ゲル化)時間は 50-60 分であった。写真-4 には、砂利化部の補修状況を示す。

定点疲労試験は、健全な版状供試体の静的载荷試験を実施し、その静的最大荷重の 60%を疲労载荷試験における上限荷重とした。载荷速度プログラムは、1 万回まで 0.5Hz, 50 万回まで 1Hz とする正弦波を与えた。また、RC 床版上面(800mm×800mm)に土手を作り、全ての载荷試験において湛水状態とした。測定項目は、静的試験が最大荷重と中央変位、また疲労試験では载荷回数と中央変位とした。载荷試験終了後は、供試体下面と供試体切断面のひび割れを観察した。

### 2.3 床版供試体による輪荷重走行試験

本研究では、前節までの実験で得られた砂利化部の補修効果について、床版レベルでその効果の再現と妥当性を評価するため、輪荷重試験を実施した。図-2 に、本実験の供試体概要を示す。まず、検討対象とした供試体は、水の浸入下においても耐疲労性の低下を抑制する RC 断面の検討に用いた供試体である<sup>4)</sup>。図より、RC 床版は、単鉄筋断面であり、コンクリートには体積比 0.5%(7.72kg)の PVA 繊維を外割添加し、加えて炭素繊維グリッドを縦配置しせん断補強とした特殊な断面である。しかし、後述するように、激しい砂利化が生じ疲労破壊に達した RC 床版であり、本検討の砂利化後の耐疲労性回復効果の検討には支障がないと考えている。供試体寸法は、長さ 3,000mm×幅 2,000mm×厚さ 160mm である。表-4 の配合より、使用したコンクリートの水セメント比は 64.8%である。輪荷重走行試験は、支持条件が長辺方向の2辺を単純支持、短辺方向の2辺は弾性支持とし、

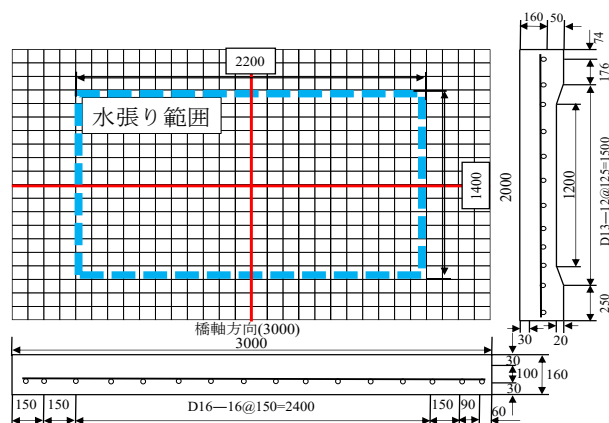


図-2 供試体概要

表-4 RC床版供試体のコンクリートの配合

G max (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				AE減水剤 (kg)
				W	C	S	G	
20	64.8	47	4.5	178	277	839	1005	2.77



写真-5 RC床版供試体の砂利化発生状況



写真-6 注ぎ込みによる補修状況

载荷ステップが 98kN を基本荷重とした 29.4kN ずつ増加させる段階载荷方式により実施した。また、図中の青線範囲(2,200mm×1,400mm)に土手を作製し、試験中は湛水状態とした。計測項目は、基本荷重 98kN を供試体中央に静的载荷した際の総たわみと、下面のひび割れ観察および強制振動試験による共振周波数比<sup>2)</sup>である。実験手順は、RC 床版を湛水状態で疲労破壊まで走行させ、床版上面の砂利化を確認した後、P 補修材を砂利化発生箇所に注ぎ込むと同時に湛水範囲全体にも行き渡らせる補修を実施した。次に本材料硬化後、再び湛水状態とし試験を再開した。写真-5 には砂利化発生状況を、写真-6 には注ぎ込みによる補修状況を示す。なお、床版打込み



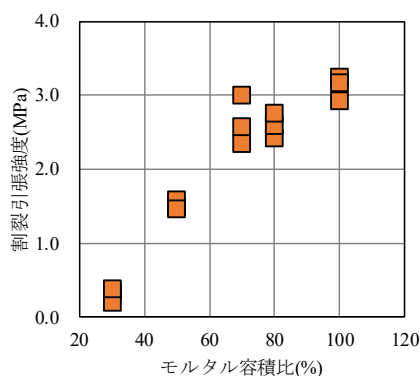


図-3 補修前割裂引張強度

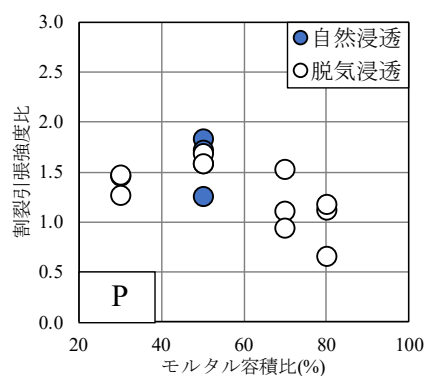


図-4 割裂引張強度比(補修後/Control)

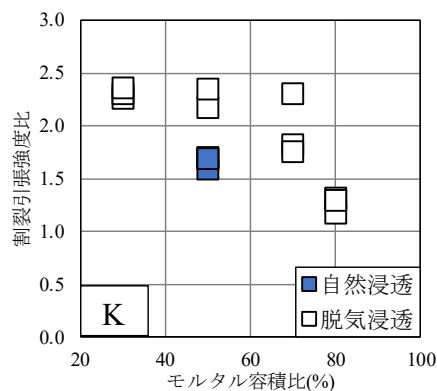


図-5 割裂引張強度比(補修後/Control)

時に作製した供試体による試験開始時の圧縮強度は、30.8MPa であった。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 砂利化箇所の補修方法の考案

図-3 に、補修前の割裂引張強度を示す。図より、Control(100%)は約 3MPa であった。これに対して、モルタル容積比が低くなるにつれて割裂引張強度は小さくなっており、バインダとしてのモルタルの量は割裂引張強度に影響した。図-4 に、P における Control(100%)の割裂引張強度に対する補修後の割裂引張強度の比(以下、補修後/Control)を示す。図中には、脱気浸透と自然浸透の結果を示した。図より、両者ともバラツキはあるがモルタル容積比が 50%以下において強度比が高い。このように、空隙が多い方が充填される補修材の量が増えることで強度比が高くなる傾向となった。図-5 には、K における補修後/Control を示す。図より、P 同様にモルタル容積比が小さくなるにつれ強度比が高くなる傾向であった。また、P と比較すると、P よりも K は強度比が全体的に高くなる傾向であった。これは、P より K の引張接着強度が高いことが理由と考えられた。以上より、本実験の範囲内では、K の方が補修効果が高い結果となった。この材料の違いによる供試体強度の回復効果の差異は、第 1 に表面から内部に材料が浸透する程度と、第 2 に材料自体の引張強度が関係すると考えられた。写真-7 は、K のモルタル容積比 50%供試体における脱気浸透と自然浸透による浸透状況である。浸透面積は、脱気浸透が平均 3004mm<sup>2</sup>、自然浸透は平均 2784mm<sup>2</sup>であり、両者の浸透状況に目視上違いはなく、モルタル容積比 50%以下の空隙ならば現場での実装を想定すると自然浸透によって十分充填が可能と考えられた。図-6 は、K と P の浸透量を浸透面積として評価した図である。この図より、モルタル容積比が小さくなると空隙が増加するため浸透面積も増加する傾向であり、空隙に充填されることが分かる。また、自然浸透においても脱気浸透と同様に砂利化上面からこの種の材料を注ぎ入れることでひび割れや砂利化部を伝って内部まで浸透するものと考えられた。

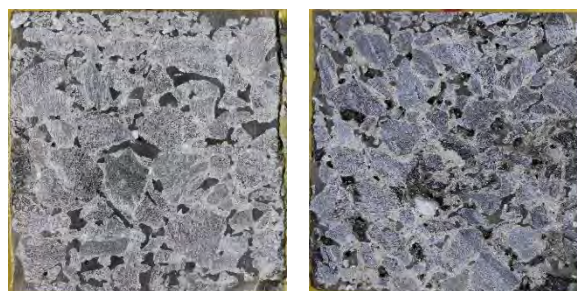


写真-7 K 供試体の浸透状況(モルタル容積 50%)

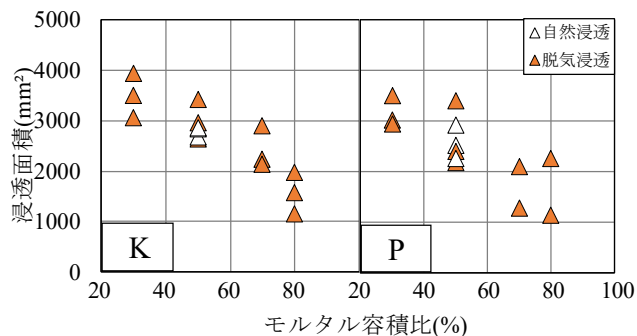


図-6 補修材の浸透面積

#### 3.2 版状供試体の定点疲労载荷試験による耐疲労性

図-7 に、疲労試験結果を示す。なお、疲労試験に先立ち、健全供試体の静的载荷試験を実施した。最大荷重は 110.3kN であった。よって、疲労载荷試験の上限荷重は、66kN とした。図より、補修なし(N)に着目すると、疲労

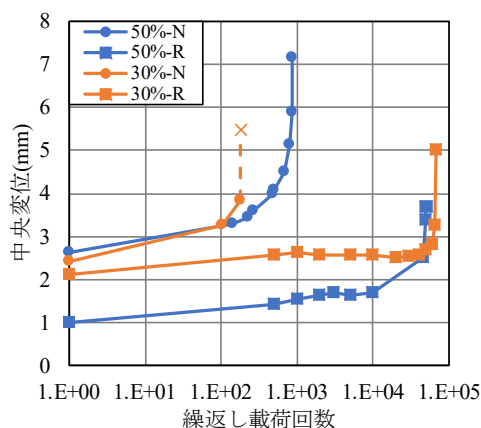


図-7 中央変位-繰返し载荷回数

破壊回数は、モルタル容積比 50%が 862 回、モルタル容積比 30%が 222 回と、载荷点直下に脆弱部分となる砂利化部があると、疲労破壊回数は 1000 回にも満たない。また、バインダであるモルタル容積が少ない 30%は 50%よりも回数が減少した。これに対して、補修ありの疲労破壊回数は、モルタル容積比 50%が約 5 万回、モルタル容積比 30%が約 7 万回になり、補修なしと比較すると 50%は約 58 倍、30%が約 315 倍となり明らかに耐疲労性が向上する結果を示した。この様に補修なしでは、モルタル容積が少ない方が疲労破壊回数も少なくなるのに対して、補修ありではその逆の傾向になった。この要因としては、まず、モルタル容積比 30%の疲労破壊回数が、モルタル容積比 50%よりも増加したのは、30%の方が砂利化部が粗となるため、エポキシ補修材の浸透量が当然増えることになる。強度の高い補修材が砂利化部の強度を増加させたことにより、耐疲労性が向上したと考えられた。次に、エポキシ補修材が砂利化部に浸透し空隙を充填することでバインダの役目を果たし、砂利化部が一体化することで防水効果を発揮したといえる。それにより水の浸入を防ぐため、耐疲労性が向上したと考えられる。また、繰返し载荷回数の増加に伴う変位の増加も補修することで抑制される傾向であった。なお、疲労破壊直前は、供試体を問わず、下面ひび割れからの漏水を確認している。写真-8 に、モルタル容積比 30%の供試体の切断面のひび割れ状況を示す。図より、疲労破壊時は、いずれも斜めひび割れを伴う押抜きせん断破壊であった。また、砂利化部を観察すると、補修なしは砂利化部が激しく破壊しているのに対して、補修ありは健全な部分との一体性を確保しており、写真-9 に示すように、補修材が空隙に充填している(写真中の矢印)ことが確認された。

### 3.3 補修した砂利化床版の耐疲労性の回復に関する輪荷重走行試験に基づく検証

図-8 に、総たわみと等価繰返し走行回数の関係を示す。なお、検討対象の床版(以下、本床版)と比較するため、既往の水張り床版の結果<sup>4)</sup>を併せて示した。図より、疲



写真-8 モルタル容積比 30%供試体の断面観察



写真-9 砂利化部補修材浸透状況

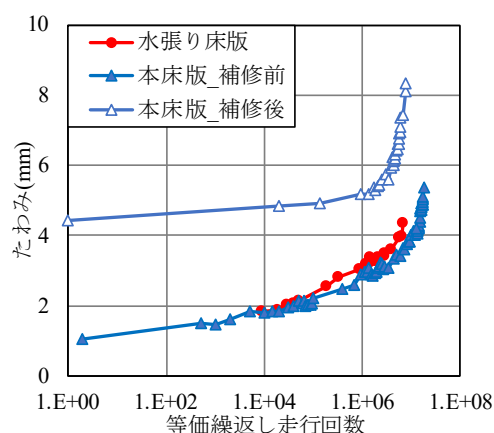


図-8 総たわみと等価繰返し走行回数

労破壊回数は、水張り床版約 680 万回に対して、補修前の本床版は約 1800 万回と水張り床版の約 2.6 倍に及ぶ結果であった。補修前本床版の試験の終了は、総たわみが急増し疲労破壊した時点とした。補修前後の総たわみは、補修前疲労破壊時が 5.35mm であった。これに対して、補修後の再開試験直前が 4.44mm と 0.91mm 総たわみが減少するなど剛性の回復が認められた。これは、上述までの検討した通り、エポキシ補修材の低粘度の特性より、砂利化した粗なコンクリート部の隅々にまで浸透したことで砂利化部が密になったためといえる。補修後の疲労破壊回数は約 800 万回と、1 度疲労破壊に達した RC 床版が健全な状態から水張りとした床版の回数を上回る結果となった。これより、この種の材料を床版内部のひび割れと砂利化部に浸透し充填することで損傷箇所が一体化し、かつ防水によって耐疲労性が回復することが輪荷重走行試験によって検証された。図-9 には、走行範囲周辺の共振周波数比コンター図を示す。共振周波数比は健全状態の共振周波数に対する各回数の共振周波数の比であり、共振周波数比が 1 の場合、健全とした。図は、(a)補修前疲労破壊時、(b)注ぎ込み補修完了時および(c)補修後再開試験終了時である。図より、(a)補修前疲労破壊時は走行範囲とその周辺は共振周波数比が約 0.2 と表面



に見える砂利化のみならず内部の著しい損傷が推察される。これに対して(b)注ぎ込み補修完了時は、(a)と比較し明らかに共振周波数比が増加している。加えて砂利化部(図中の赤枠)の値も増加している。これは、床版内部の損傷箇所へエポキシ補修材が浸透したことで弾性波が伝達されやすい状態、換言すればひび割れ等の損傷が健全相当とは行かないまでも充填・接着したと考えられた。この傾向は剛性や走行回数の増加など耐疲労性の回復が認められたことと合致する。最後、(c)補修後再開試験終了時を見ると床版中央部の共振周波数比の低下が大きく、この箇所で押抜きせん断破壊した。写真-10に、再開試験終了後の上面砂利化状況を示す。(a)は、補修前に著しい砂利化が発生した箇所(写真-5 参照)である。(b)から、砂利化が軽微だった箇所で、新たな砂利化の発生が認められた。写真-5 及び 10 より、図-9(c)の共振周波数比の低下が大きい箇所は、新たな砂利化発生箇所と一致していた。つまり、砂利化部は、エポキシ補修材が深部まで浸透しやすい箇所といえ、結果的に補修後の砂利化部は強度が増加し損傷が進行しなかったといえる。これより、砂利化部の方がエポキシ補修材の補修効果が大きく、供試体中央部の砂利化が軽微すなわち浸透量の少ない箇所で砂利化が進行したと考えられる。以上の実験結果より、砂利化した RC 床版に対してエポキシ補修材の注ぎ込みによる耐疲労性の回復効果を有すると考えられた。

#### 4. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- 1)砂利化を模擬した供試体に対して、エポキシ補修材による補修を行った結果、砂利化損傷の程度によって効果が異なった。具体的には、バインダとしてのモルタルの機能が残りつつ、砂利化の程度が進行している方の補修効果が高くなる傾向であった。
- 2)砂利化を模擬した RC 版状供試体の定点疲労载荷試験より、床版砂利化部の補修が可能であること、モルタル容積比 50%よりも 30%の方が砂利化箇所が粗なため補修材がより浸透し空隙を充填することで、耐疲労性が向上することを示した。
- 3)輪荷重走行試験による考案した補修方法の検証より、耐疲労性の回復効果が示された。これより、エポキシ補修材は、ひび割れの補修に加え、砂利化部の補修にも適用が可能な材料と考えられた。

#### 謝辞

本研究における実験遂行にあたり、コンクリート工学研究室の学生諸氏の多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1)NEXCO 東日本：高速道路リニューアルプロジェクト、

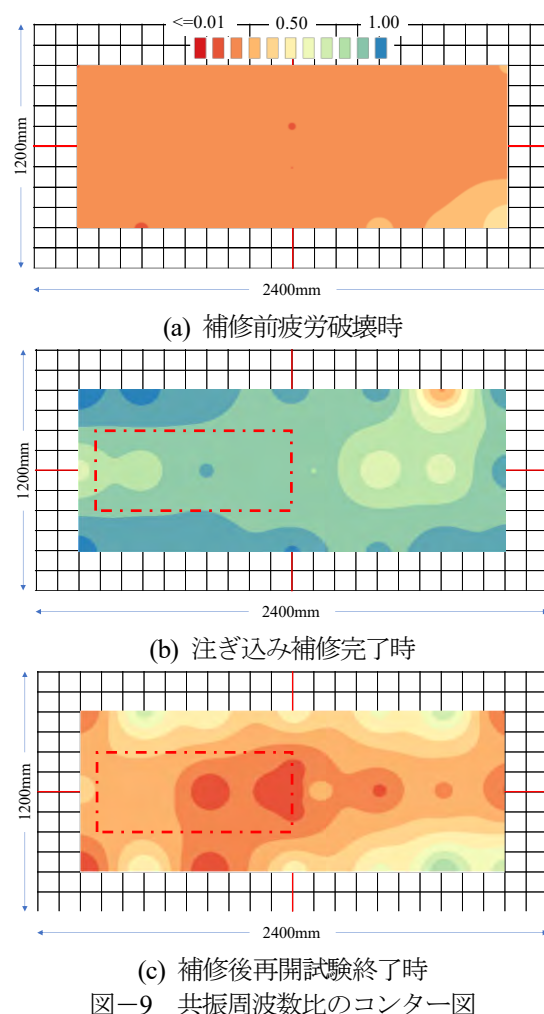


図-9 共振周波数比のコンター図



写真-10 再開試験終了後の床版上面状況

<https://www.e-nexco.co.jp/renewal/> (閲覧日：2024年6月19日)

- 2)前島拓他：高浸透型防水材による道路橋 RC 床版の補修効果に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，pp.445-450，2021.
- 3)藤山知加子他：砂利をモルタルで部分的に固結したコンクリートの力学特性に基づく橋梁床版の砂利化機構に関する検討，構造工学論文集 67A，pp.119-126，2021.
- 4)大内凌輔，子田康弘：水の浸入に起因した耐疲労性の低下を抑制する RC 床版断面に関する実験的検討，構造工学論文集，68A，pp.756-764，2022.

(2024年7月12日受付)