

## 論文

## 鋼板接着補強床版の接着材再注入による補修効果に関する実験的検討

関口幹夫\*, 石田教雄\*, 今吉計二\*

\*東京都土木技術支援・人材育成センター 技術支援課 (〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15)

古い道路橋の鉄筋コンクリート (RC) 床版は、鋼板接着補強工法による延命化対策が過去に実施されており、すでに 40 年以上経過するものも存在する。重交通環境下では、接着した鋼板の剥離や浮きなどの再劣化や再損傷が生じることもある。そこで鋼板接着補強床版に輪荷重走行試験機により鋼板に剥離を発生させ、接着材を再注入する補修方法の補修効果を検討した。その結果、再接着により剛性が回復することで疲労耐久性も向上する効果が期待できることを確認した。

キーワード：鋼板接着補強床版、鋼板の剥離（浮き）接着材再注入による補修効果、輪荷重走行疲労実験

## 1. はじめに

東京都は、世界一安全安心の道路機能を確保するため道路橋の長寿命化を精力的に進めている。

昭和 47 年道路橋示方書<sup>1)</sup>以前の基準で設計された鉄筋コンクリート (RC) 床版は、都内の過酷な交通環境下では疲労損傷し易いため、建設局管理橋梁では、昭和 40 年代より鋼板接着補強工法による延命化対策が 60 橋ほど実施されている。実施後、既に 40 年以上経過するものも在り、接着した鋼板の剥離や浮きなどの再劣化や再損傷が定期点検により確認されており、鋼板の剥離が進展すると陥没などの重大事故の発生リスクが増大することが予測される。

本検討は、補強鋼板の維持管理を適切に行うために必要な、剥離（浮き）の点検結果の評価法や閾値を検討する。また、補修工法の一つであるエポキシ樹脂接着材（以下、接着材と略記）の再注入による補修効果について検討するものである。

## 2. 輪荷重走行実験の概要

## 2.1 実験シリーズ

実験の概要を表-1 に示す。試験体 PL-1・2 は、東京都の鋼板接着補強方法として、曲げ補強を目的にハンチ部を除く床版下面に鋼板を接着している実情を模擬した。

鋼板接着時の損傷レベルは、東京都建設局の橋梁の点検要領(案)<sup>2)</sup>の損傷ランク d「速やかに補強が必要のレベル」相当で、床版下面のひび割れ密度で概ね  $15\text{m}^2/\text{m}^2$  とした。本報告では、剥離面積の約 70%（実測値 68.2%）と 30%（実測値 33.4%）の実験結果を取りまとめる。

表-1 実験シリーズの概

試験体	ハンチ	鋼板接着時のひび割れ密度( $\text{m}^2/\text{m}^2$ )	再注入時の剥離面積(%)	再注入	備考
PL-1	なし	17.66	68.2	○	再注入の効果
PL-2	なし	14.84	33.4	○	

## 2.2 試験体

試験体の形状寸法と配筋図を図-1 に示す。昭和 39 年道路橋示方書<sup>3)</sup>の基準に基づいて設計した。床版の形状寸法は幅 2.8m（支間 2.5m）、床版厚 16cm、橋軸方向の長さは 3.5m である。なお、試験体の形状寸法と配筋は、この種の目的で検討されている佐野ら<sup>4)</sup>の試験結果と比較できるようにハンチなしの状態と同一としている。



図-1 試験体の形状寸法

## 2.3 使用材料

鉄筋 (SD295A) および接着用鋼板 (SS400 の  $t=4.5\text{mm}$ ) の試験結果は表-2 に示す。コンクリートは、材齢 28 日

目標強度を 25N/mm<sup>2</sup> とし、生コン(18-8-20-N)を使用し、配合表は表-3 に、特性値は表-4 に示す。

表-2 鉄筋・鋼板の特性値

種類	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	伸び %
鉄筋D10	370.8	504.2	199.7	20.5
鉄筋D13	338.4	460.7	171.4	20.5
鉄筋D16	362.4	507.6	196.0	19.8
接着鋼板	336.0	468.5	—	38.0

注) 鉄筋は3本の平均値、鋼板はミルシートの値

表-3 コンクリートの配合表

配合表(kg/m <sup>3</sup> )					
セメント	水	細骨材①	細骨材②	粗骨材	混和剤*1
239	160	627	269	1004	2.39

\*1: AE減水剤遅延形1種

表-4 コンクリートの特性値(材令 28 日)

供試体 No.	スラブ	空気量	粗骨材最大寸法	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1	10cm	5.3%	20 mm	24.6	29.3	0.173	1.93
2				22.7	29.7	0.174	1.86
3				25.8	30.5	0.188	1.93
平均				24.4	29.8	0.178	1.91

## 2.4 走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、写真-1 のゴムタイヤ自走式の走行載荷装置を使用し、図-2 に示す支持桁上に 2 体連続（試験体と試験体は接触しないように約 5mm の隙間を開けてゴム板を挿入）して配置した。走行載荷は、図-3 に示す載荷プログラムとした。走行荷重は、都内で観測される輪荷重の最大値に相当する 160kN を基本とする。また、PL-1 は 160kN 一定とし、PL-2 は鋼板接着後一部 200kN の階段裁荷方式とした。



写真-1 輪荷重走行装置

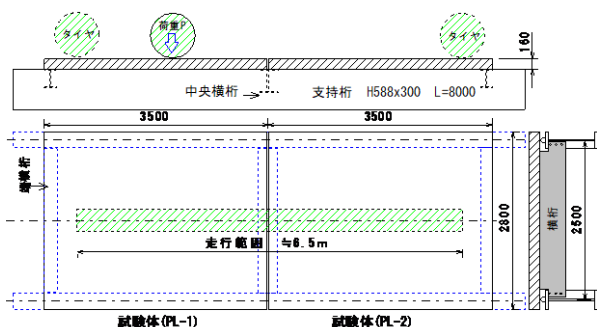


図-2 試験体の配置図

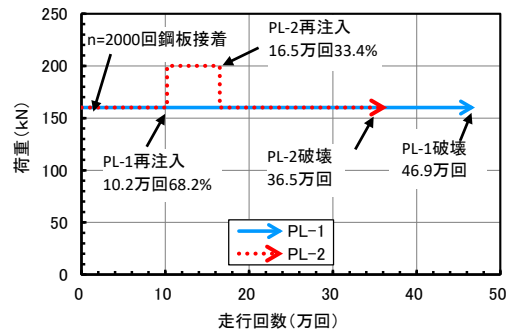


図-3 載荷プログラム

## 3. 予備載荷によるひび割れの導入

### 3.1 ひび割れの導入とたわみの推移

走行回数とひび割れの発生・進展状況は、図-4 示す。ひび割れのパターンは、版中央を中心にはほぼ偏りなく発生・進展した。PL-1 の走行回数 1 回でのひび割れ密度は、4.23m/m<sup>2</sup>、2,000 回で 17.66m/m<sup>2</sup> に増加した。一方、PL-2 は 1 回で 3.16m/m<sup>2</sup> であったが 2,000 回で 14.84m/m<sup>2</sup> となり、いずれも 2,000 回でひび割れの導入を完了した。

ひび割れ導入時の PL-1 の 1 回の中央たわみは 3.241mm、PL-2 は 3.669mm。100 回走行時はいずれも 6mm を超え、2,000 回走行時 PL-1 は 6.617mm、PL-2 は 7.124mm である。

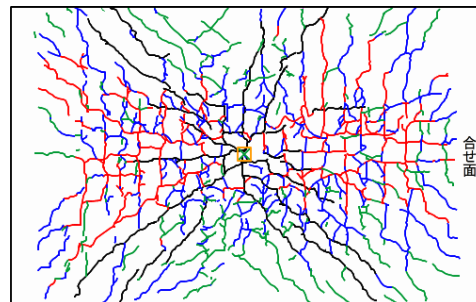


図-4(a) PL-1 のひび割れ導入（見下げ図）

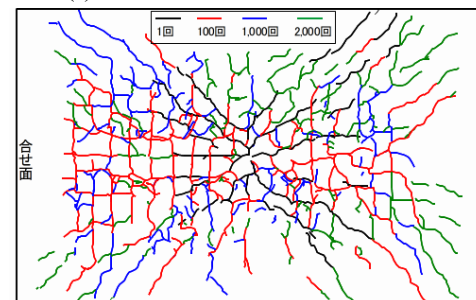


図-4(b) PL-2 のひび割れ導入（見下げ図）

### 3.2 ひび割れ導入時の劣化度

鋼板接着前に予備載荷を行った段階での RC 床版の劣化度を評価する。評価には、松井ら<sup>5)</sup>の RC 床版の活荷重たわみによる劣化度評価方法である式(1)を適用した。

$$D\delta = \frac{(w - w_0)}{(w_c - w_0)} \quad (1)$$

ここに、 $D\delta$  : 劣化度

$W$  : 実測活荷重たわみ(mm)

$W_o$  : 全断面有効のたわみ計算値(mm)

$W_c$  : 引張無視のたわみ計算値(mm)

たわみの計算には、三次元弾性論に基づく厚板理論を用いた<sup>6)</sup>。特に、引張無視時のたわみの計算では、ひび割れの発生した床版は、剛性の低下した均質弾性体と近似的に見なせるとして計算している。ここでは床版の剛性を便宜的に弾性係数比 ( $n=Es/Ec$ ) として取り扱っている。ここで、 $n=7$  : 全断面有効時、 $n=15$  : ひび割れ発生直後、 $n=31$  : ひび割れ引張断面無視相当と仮定する。

劣化度の計算結果を表-5 に示す。PL-1 の劣化度は 1.01, PL-2 の劣化度は 1.11 となり、1.0 をやや上回っていることから使用限界に達している状態と評価できる。

表-5 予備載荷における RC 床版の劣化度

試験体		PL-1	PL-2	備考
活荷重たわみ $W$ (mm)	1回	3.24	3.76	未走行
	2000回	6.62	7.12	走行
たわみ計算値	$W_o$ (mm)	1.50		$n=7$
	$W_c$ (mm)	6.58		$n=31$
劣化度	$D\delta$	1.01	1.11	2000回時
ひび割れ密度(m/m <sup>2</sup> )		17.66	14.84	

#### 4. 鋼板接着補強方法

補強の仕様は図-5 に示す。鋼板の接着寸法は、両支点側 400mm を除く幅 2m、走行方向は床版全長 3.5m とし、添接部とアンカーの配置は図-6 に示す。また、剥離を導入し易くする目的で、寸法 100×100mm 厚さ 2mm の鋼板を接着面積全体の 5% に相当する 16 枚 (図-7 の □印) を周囲のみシール材で取付けた。なお、この 5% の人為的な剥離は、試験結果に影響を与えなかった。

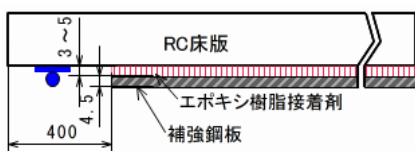


図-5 鋼板接着の仕様 (単位 mm)

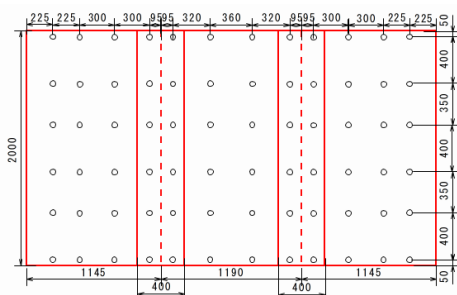


図-6 鋼板接着のアンカー配置図

#### 5. 鋼板接着補強後の疲労実験結果

##### 5.1 走行回数と鋼板剥離面積

鋼板の剥離の進展状況は、図-7(a)(b)に示す。剥離面積は、打音点検で剥離領域を判定して面積を算出した。剥

離面積率 (%) は (剥離面積 / 鋼板面積 × 100) で求めた。

剥離の進展状態は PL-1 と PL-2 を比較すると、PL-2 は過去の実験でも見られた正常な剥離パターンである。一方、PL-1 は 5 万回から 10 万回で一気に剥離が拡大しており、正常でないパターンである。施工時の状態を写真でチェックした結果、PL-1 はコンクリート面のサンダーによるケレンが不十分であった可能性が考えられる。

鋼板接着後の走行荷重と走行回数および剥離面積の関係は表-6 に示す。走行回数 10 万回までは 160kN 載荷とし、床版 PL-2 は 10 万 1 回以降では 200kN 載荷としている。表-6 の 160kN 換算走行回数は、RC 床版の松井<sup>7)</sup> の式 ( $m=12.76$ ) で換算している。

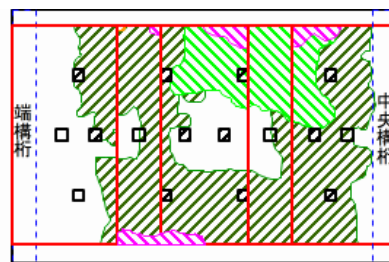


図-7(a) PL-1 鋼板剥離図(見下げ図)

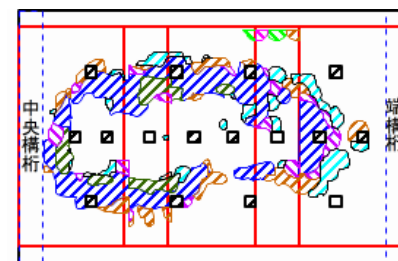


図-7(b) PL-2 鋼板剥離図(見下げ図)

表-6 走行回数と剥離面積

荷重(kN)	160	160	160	160	200	200	200	200
走行回数n	1	10,000	50,000	100,000	150,000	155,000	160,000	163,000
160kN換算n	1	10,000	50,000	100,000	962,068	1,048,275	1,134,482	1,186,206
PL-1剥離(%)	1.75	4.88	19.37	68.24	-	-	-	-
PL-2剥離(%)	2.06	2.20	2.56	5.64	21.22	24.10	28.64	33.43

##### 5.2 補強後のたわみ

PL-1 は、鋼板接着補強後は 1.156 mm に低下して補強効果が認められる。160kN の一定載荷により 102,000 回 (補強後 100,000 回) で鋼板の剥離面積が 68.2% に急増した。この時点の活荷重たわみの最大値は 3.14 mm であり、補強直後 1 回 (累計 2,001 回) に比べ約 3 倍に増加した。一方、PL-2 の補強後は 1.157 mm に低下した。160kN の一定載荷により 102,000 回の剥離面積は 5.6% と少ないことから以降の走行は、荷重を 200kN に上げて 63,000 回 (160kN 換算 1,186,206 回) にて剥離面積が 33% となり、160kN 換算活荷重たわみは 1.608mm であり、補強後の



1.39 倍の増加にとどまった。

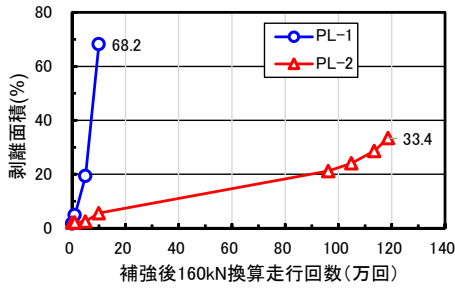


図-8 走行回数と鋼板剥離面積(%)

## 6. 剥離補修後（再注入後）の疲労実験結果

### 6.1 接着材再注入による補修方法

接着鋼板の剥離損傷に対する補修法は、一般的な方法である鋼板剥離部にドリルで穴を開け、接着材をゴム風船型注入器に入れ圧入して再接着させる方法を採用した。

PL-1 は図-9(a)に示す 103 か所に、PL-2 は図-9(b)に示す 65 か所に注入用インジェクションを設置した。なお、最初の接着材と区別するため再注入の接着材には、赤色の蛍光塗料を混ぜている。再注入量は、PL-1 では約 7kg、PL-2 は約 2kg であった。

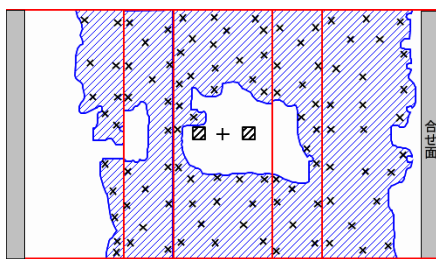


図-9(a) PL-1 剥離部再注入箇所(×印)

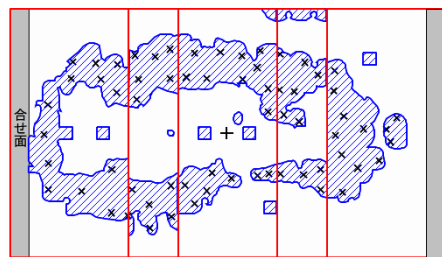


図-9(b) PL-2 剥離部再注入箇所(×印)

### 6.2 再注入後の破壊時走行回数と鋼板の剥離

再注入後の破壊回数は、PL-1 は 367,701 回、PL-2 は 173,468 回であった。再注入後の鋼板の剥離は、補強後の図-7(b)に示したのとほぼ同様にタイヤ側面のエッジ近傍から主桁方向に剥離が進展する図-10(a)(b)に示すパターンが見られた。

再注入量が少なく早期に破壊した PL-2 では、再注入後の剥離面積の推移は、図-11 に示すとおり 15 万回の剥離面積約 12%から 17.3 万回で 51.8%に急増し、鋼板の主桁側端部での剥離が生じている。一方、再注入量が多い PL-1 は、剥離の進行速度が緩慢であり、35 万回で剥離面

積約 50%越えになり急激に増加して、主桁側の端部が剥離した。両床版ともに剥離面積が 50%台で破壊しており、使用限界は 50%程度と考えられる。

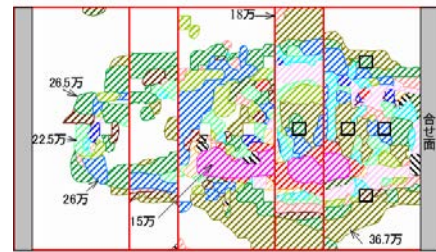


図-10(a) PL-1 再剥離分布

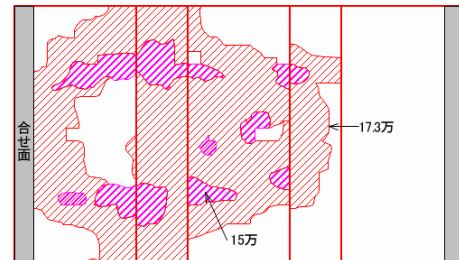


図-10(b) PL-2 再剥離分布

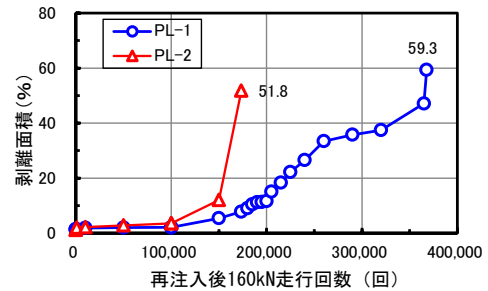


図-11 再注入後の走行回数と剥離面積

### 6.3 未補強・補強・再注入のたわみの推移

未補強→補強→再注入を経て破壊までの活荷重たわみの全体の推移は、図-12 のとおりであり、補強後のたわみは、補強前の PL-1 は 17% (1.156/6.62) に PL-2 は 16% (1.157/7.12) に低下し、ほぼ同等の補強効果である。再注入直後は 1.2~1.5mm で補強直後とほぼ同等のたわみ低減効果が確認できる。一方、破壊時のたわみは、再注入量の多い PL-1 の 3.171mm に対し、再注入量が少ない PL-2 は 6.872mm であり、再注入量が多いほど補修効果が高い結果となった。

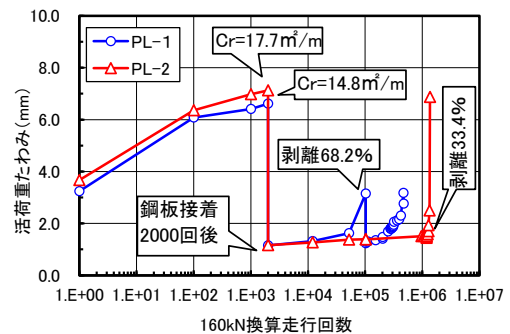
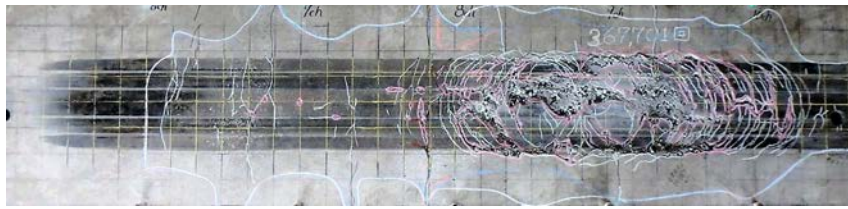


図-12 破壊までの走行回数とたわみの関係



(a) PL-1 上面



(b) PL-1 A-A 断面



(c) PL-2 上面

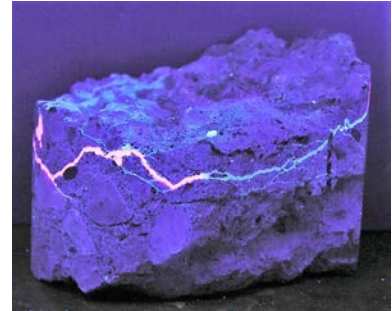


(d) PL-2 A-A 断面

写真-2 橋軸方向切断面



(a) コアの状態



(b) 接着時(緑色)・再注入(赤)  
写真-3 ひび割れと接着材

## 7. 切断面のひび割れの検討

### 7.1 上面と走行ライン切断面のひび割れ

破壊後に試験体内部のひび割れ状況を調べるため 6 分割にダイヤモンドカッターにて切断した。写真-2(a)(b)は橋軸方向(走行ライン)の切断前の走行面および走行中心線 A-A 切断面の状態である。写真-2(a)の PL-1 の左端は端横桁側、右端は中央横桁側であり、PL-2 は PL-1 の逆になる。

写真-2(b)の PL-1 切断面で床版下面右端から 30～40cm 位置に多数のせん断ひび割れが集中している個所は、上面のタイヤ両側面の外縁で押抜きせん断ひび割れの位置と一致し、骨材化(砂利化)の位置とも一致している。なお、タイヤ走行面を囲むようにフリーハンドのマーキング(白線)は、テストハンマーを使った打音点検でひび割れによる脆弱部が内部に存在すると推定される領域である。

一方、写真-2(c)(d)の PL-2 について走行面と切断面のひび割れを観察すると、概ね PL-1 同様な形態や傾向であり、両者に大きな違いはない。

### 7.2 接着材の状態

写真-3(a)は、鋼板接着時にひび割れに圧入された接着材の自然光での拡大写真である。一方、写真-3(b)はブラックライト照射での写真であり、接着材の色は蛍光色で鮮明に確認できる。やや緑色の接着時の接着材に連続して再注入接着材の赤色があり、赤色はひび割れ幅の細部(約 0.05mm)まで充填されている。

鋼板の剥離は、コンクリートと接着材界面での剥離で

あり、再注入の接着材は接着時の接着材とコンクリート界面の隙間に圧入されており、接着材が二層確認される箇所が多い。これらのことから再注入の接着材は、接着効果が期待できることを物語っている。

## 8. 劣化度と剥離面積の関係

図-13(a)は、補強後の PL-1 の剥離と劣化度の関係を示す。補強後の劣化度は、補強前の劣化度 1.01 に対して 0.29 に低減(回復)し、補強後 10 万回の剥離面積は 68.2%、その時点の劣化度は 3.33 で再注入した結果、剥離面積は 1.4%に減少して劣化度は 0.41 に回復した。再注入後 15 万回時に劣化度は 1.1 に、その時点の剥離は 5.4%に、その後の走行により再注入後 32 万回時の劣化度は 2.0 を超えて剥離面積は 37.4%に上昇した。なお、再注入後の剥離と劣化度の傾きは、概ね補強後の傾きと一致していた。

一方、図-13(b)は、補強後の PL-2 の剥離と劣化度の関係を示す。補強後の劣化度は、補強前の劣化度 1.11 に対して PL-1 と同じ 0.29 に低減(回復)し、補強後 160kN 換算で 118.6 万回の剥離面積は 33.4%、その時点の劣化度は 0.98 で再注入した結果、剥離面積は PL-1 同様に 1.2%に減少したが劣化度は 0.72 とわずかの回復に止まった。再注入後 10 万回の劣化度は 1.12 に、その時点の剥離は 3.5%に、その後の走行により再注入後 15 万回の劣化度は 2.34 を超えて剥離面積は 12.0%に上昇した。なお、再注入後の剥離と劣化度の傾きは、両試験体で全く異なった傾きになった。

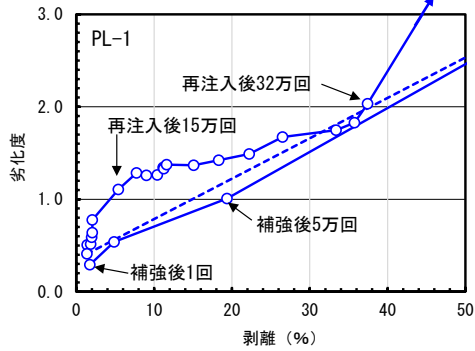


図-13(a) PL-1 剥離面積と劣化度の関係

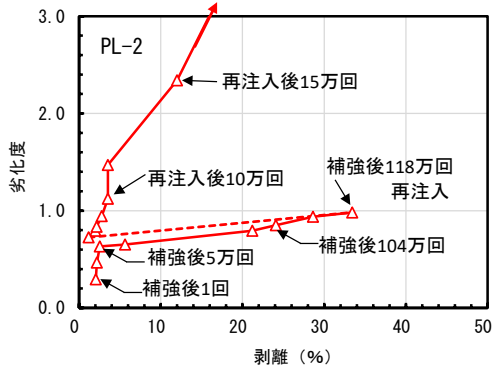


図-13(b) PL-2 剥離面積と劣化度の関係

すなわち、図-11の剥離面積に当てはめると剥離面積の閾値は、本実験の範囲では30%程度と考えられる。

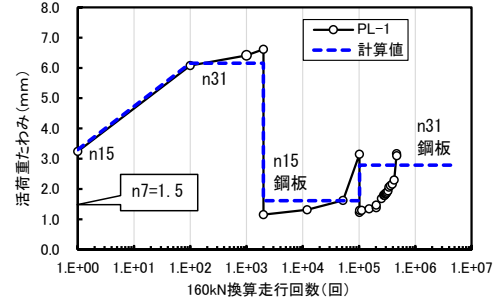


図-14(a) PL-1 活荷重たわみと計算値の関係

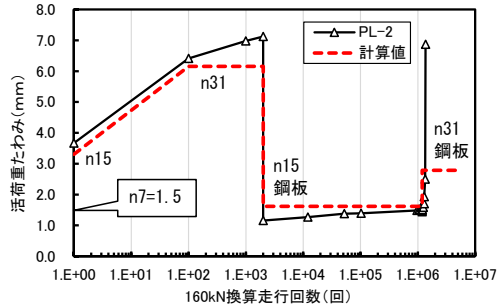


図-14(b) PL-2 活荷重たわみと計算値の関係

## 9. たわみによる維持管理水準の検討

図-14は、実験開始から破壊までの床版中央点の活荷重たわみとたわみ計算値の関係を示した。計算値は、前述3.2「ひび割れ導入時の劣化度」同様に厚板理論に基づく多層板解析により求めた。

図-14(a)の PL-1 補強後は、走行回数の増加とともにたわみも増加（剥離も増加）して、1.E+05 回において剥離面積 68.2% になり、この段階で3層板の計算値「n31 鋼板」を上回っている。その後、再注入により「n15 鋼板」の計算値まで剛性が回復し、その後の走行により再びたわみが増加して「n31 鋼板」の計算値を超えた時点で破壊に至っている。

一方、図-14(b)の PL-2 は、1.E+06 回の再注入直前の剥離面積は 33.4%、この段階でのたわみは、「n15 鋼板」の計算値と一致し、再注入後のたわみは「n15 鋼板」の計算値をわずかに下回った。しかしながら剛性の回復は PL-1 に比べ小さく、その要因は、再注入の接着材注入量が PL-1 に比べ少なかったことが影響していると考えられる。その後の走行回数の増加によって「n31 鋼板」の計算値を超え最終的に補強前のたわみ 7mm に達して破壊した。

これらの事実から、補強後の剛性回復および再注入後の剛性回復の評価は、厚板理論による多層板解析による計算値により、概ね「n15 鋼板」と仮定するたわみ計算値で評価できる。一方、再注入後の破壊の判断は、たわみ計算値「n31 鋼板」で評価できると考えられるが、管理限界の設定では、「n15 鋼板」と「n31 鋼板」の中間程度、

## 10. あとがき

鋼板接着補強後の RC 床版は、経年劣化や疲労損傷に起因する鋼板の剥離や浮きによる再損傷が生じる。乾燥条件下での本実験の結果からは、再損傷した鋼板接着補強 RC 床版に接着材を再注入する補修工法は、ある程度剛性が回復する。したがって、補修効果として疲労耐久性の向上が期待できる。今後さらに補強後の剥離のパラメータを増やす実験を行って検討を進める。

## 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（昭和 48 年 2 月）
- 2) 東京都建設局：橋梁の点検要領（案），平成 27 年 4 月
- 3) (社) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書（昭和 39 年 6 月）
- 4) 佐野正，山下幸生，松井繁之，堀川都志雄，久利良夫，新名勉（2011）：浮きを有する鋼板接着補強 RC 床版の疲労耐久性および樹脂再注入の評価，土木学会論文集，A1（構造・地震工学），Vol.67，27-38
- 5) 松井繁之，前田幸雄（1986）：道路橋 RC 床版の劣化度判定方法の一提案，土木学会論文集，第 374 号，419-426
- 6) 関口幹夫，佐々木俊平（2007）：IIS による各種床版の健全度の評価，平 19 都土木技術センター年報，229-240
- 7) 松井繁之（1991）：橋梁の寿命予測，安全工学 Vol.30，No.6，432-440

（2018 年 7 月 20 日受付）