

6. 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

Experimental Examination in Effect of Repair by Adhesive Re-injection of Steel Plate Bonding Reinforcement Bridge Deck Slabs

技術支援課 関口幹夫、石田教雄、栗塚一範

1. はじめに

東京都は、最も多くの高齢化橋梁のストック量を抱えており、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強力に進めている。

昭和 47 年道路橋示方書¹⁾以前の基準で設計された鉄筋コンクリート (RC) 床版は、床版厚が薄く、配筋鉄筋量が少ないなどにより、過酷な交通環境下では疲労損傷しやすく、都管理橋梁では、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。この延命化対策は、既に 40 年以上経過するものも在り、接着した鋼板の浮きや剥離などの再劣化や再損傷が想定される。また、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。

本検討は、鋼板接着補強 RC 床版を対象に当センターの輪荷重走行疲労試験機を活用して、次の項目を実験的に検討する。

- ① 効果的な再補強・再補修技術を開発する。
- ② 効率的な再損傷・再劣化の点検手法と長期モニタリング手法を開発する。
- ③ 現行の東京都建設局の橋梁の点検要領(案)²⁾では、補強床版や再補修床版の健全度評価手法が規定されていないので合理的な健全度評価法を検討する。

2. 輪荷重走行実験の概要

(1) 実験シリーズ

実験シリーズの概要を表-1に示す。試験体 PL-1~PL-4 は、ハンチなしの実物大試験体である。東京都の鋼板接着補強方法は、ハンチを含まない曲げ補強を目的に鋼板を接着している実情を模擬している。なお、ハンチ「有り」と「なし」の比較は、本実験の次のシリーズで検討する計画である。

鋼板接着時のダメージのタイミングは、橋梁の点検要領(案)の損傷ランク C~d「速やかに補強が必要なレベル」相当であり、床版下面のひび割れ密度で概ね 10~15m/m²とする。実験パラメータは、接着材の再注入のタイミングを鋼板接着後の剥離面積 (%) とし、剥離面積の目標値は、鋼板面積の約 70、50、30、15%とする。

本報告での剥離面積は、約 70% (実測値 66.8%) と 30% (実測値 33.4%) で接着材を再注入した実験結果を取りまとめる。

表-1 実験シリーズの概要

試験体	ハンチ	鋼板接着時のひび割れ密度(m/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	○	
PL-3	なし	≒15	≒50	○	
PL-4	なし	≒15	≒15	○	

(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³⁾の基準に基づいて設計した。床版の形状寸法は幅 3m (支間 2.5m)、床版厚 16 cm、橋軸方向の長さは 3.5m である。なお、試験



図-1 試験体の形状寸法

体の形状寸法と配筋は、この種の目的で検討されている文献4)の試験結果と比較できるようにハンチなしの状態で作成している。

(3) 使用材料

鉄筋 (SD295A の D16、D13、D10) および接着用鋼板 (SS400 の板厚 4.5 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/mm² とした生コン (18-8-20-N) を使用した。コ

表-2 鉄筋・鋼板の特性値

種類	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	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 ³)					
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 ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)
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

ンクリートの配合表は表-3 に、特性値は表-4 に示す。また、コンタクトストレインゲージ法による試験体と同じ室内環境下での乾燥収縮量は図-2 に示す。実験終了時の収縮量は約 500 μ であった。なお、質量減少量は約 300g であった。

鋼板接着用の接着材は、エポキシ樹脂でパテ・シール材の品質は表-5 に示す。注入用接着材の品質は表-6 に示す。

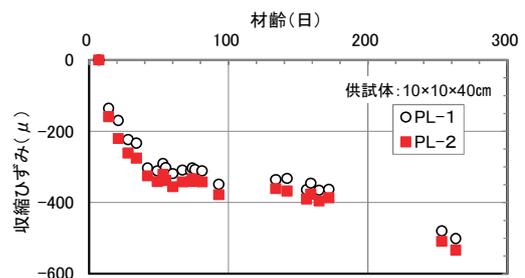


図-2 乾燥収縮ひずみ

表-5 パテ・シール材の品質

試験項目	試験方法	単位	規格値	試験値
比重	JIS K7112	-	1.70±0.10	1.72
粘度	垂直ダレ試験	-	ダレ認めず	合格
可使用時間	温度上昇法	分	60以上	76
圧縮降伏強さ	JIS K7208	N/mm ²	60.0以上	84.4
圧縮弾性率	JIS K7208	N/mm ²	4000~8000	7160
曲げ強さ	JIS K7203	N/mm ²	40.0以上	51.9
引張強さ	JIS K7113	N/mm ²	20.0以上	27.3
衝撃強さ	JIS K7111	KJ/m ²	1.50以上	3.35
硬さ	JIS K7215	HDD	85以上	86
引張せん断接着強さ	JIS K6850	N/mm ²	11.0以上	14.4

試験条件: 20°C7日間養生後20°Cにて測定

表-6 接着材の品質

試験項目	試験方法	単位	規格値	試験値
比重	JIS K7112	-	1.13±0.05	1.12
粘度	JIS K6833	mPa·s	1000~2000	1670
可使用時間	温度上昇法	分	30以上	65
圧縮降伏強さ	JIS K7208	N/mm ²	60.0以上	78.8
圧縮弾性率	JIS K7208	N/mm ²	1500~3500	2480
曲げ強さ	JIS K7203	N/mm ²	50.0以上	88.2
引張強さ	JIS K7113	N/mm ²	35.0以上	55.2
衝撃強さ	JIS K7111	KJ/m ²	3.00以上	23.39
硬さ	JIS K7215	HDD	80以上	83
引張せん断接着強さ	JIS K6850	N/mm ²	10.0以上	16

試験条件: 20°C7日間養生後20°Cにて測定

(4) 走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、写真-1のゴムタイヤの自走式走行載荷装置を使用した。試験体は、図-3に示す載荷装置の支持桁上に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、床版支間中央をタイヤが走行する方式である。

走行載荷は、階段載荷方式で図-4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。PL-1は160kN一定とし、PL-2は鋼板接着後一部200kNの階段載荷方式とした。



写真-1 輪荷重走行装置

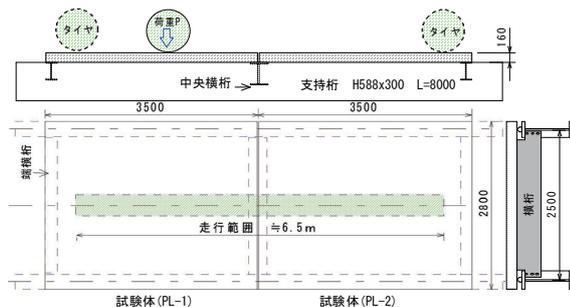


図-3 試験体の配置図

3. 予備載荷によるひび割れの導入

(1) ひび割れの導入

東京都建設局におけるRC床版への鋼板接着補強対策の適用は、床版下面のひび割れ密度で10~15m/m²程度の「損傷ランクC~d」で補強する。そこで、初期ひび割れの導入は、ひび割れ密度が10~15m/m²程度となる走行回数を目標とした。

走行回数とひび割れの発生・進展状況は、図-5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、図-6に示すとおり4.23m/m²、2,000回で17.66m/m²に増加した。一方、PL-2は1回で3.16m/m²であったが2,000回で14.84m/m²

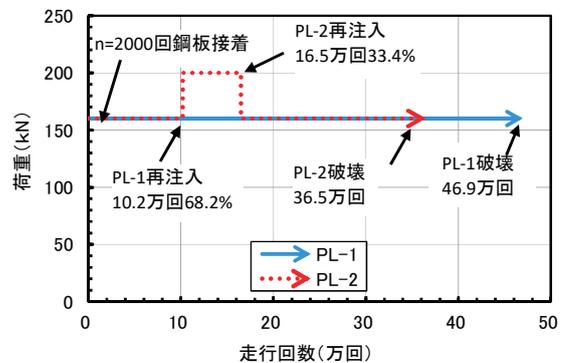


図-4 載荷プログラム

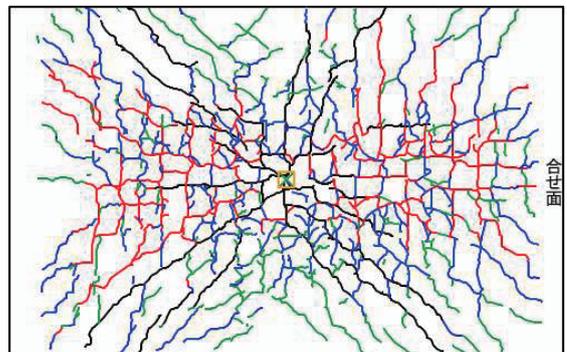


図-5(a) PL-1のひび割れ導入 (見下げ図)

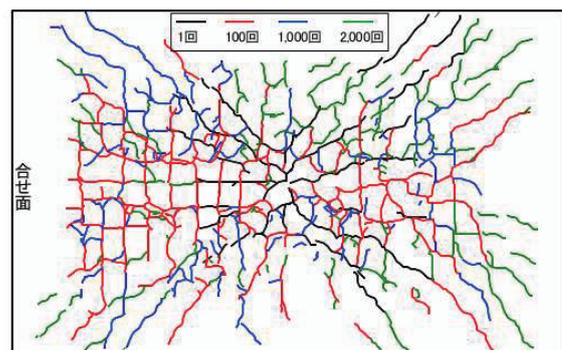


図-5(b) PL-2のひび割れ導入 (見下げ図)

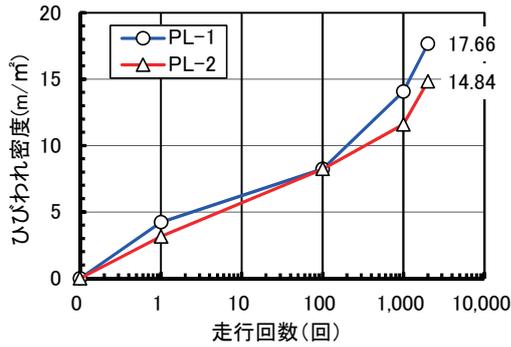


図-6 160kN 走行載荷ひび割れ密度の推移

m²となり、いずれも 2,000 回でひび割れの導入を完了した。なお、ひび割れ発生荷重は、PL-1 および PL-2 いずれも 100kN で確認した。

(2) ひび割れ導入時のたわみとひずみの推移

床版中央の総たわみと残留たわみ、および活荷重たわみと走行回数との関係を図-7 に示す。残留たわみは 1 回のみやや多かったものの 100 回以降は安定している。総たわみは、100 回以降は微増にとどまっている。また、ひび割れ導入時の 2,000 回までの橋軸直角方向の活荷重たわみ分布は、図-8(a)(b)に示す。PL-1 の 1 回の中央たわみは 3.241 mm、PL-2 は 3.669 mm。100 回走行時はいずれも 6 mm を超え、2,000 回走行時の PL-1 は 6.617 mm、PL-2 は 7.124 mm である。たわみの分布形状は、いずれの試験体も左右対称であったが、PL-2 は PL-1 に比較して中央たわみがやや大きい。

図-9 は、版中央の活荷重たわみとひび割れ密度の関係である。いずれの試験体もひび割れ密度が約 8m²/m²、その時点のたわみ 6 mm 強に変曲点を持つ概ね比例関係が認められる。

(3) 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、文献 5) で提案されている 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。

$$D\delta = \frac{(W-W_0)}{(W_c-W_0)} \dots \text{式(1)}$$

ここに、 $D\delta$: 劣化度

W : 実測活荷重たわみ(mm)

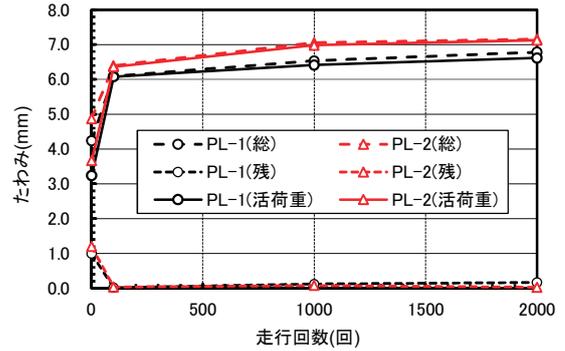


図-7 走行回数と中央たわみの関係

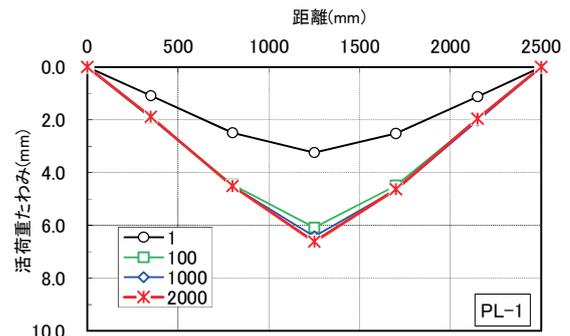


図-8(a) PL-1 のひび割れ導入時たわみ分布

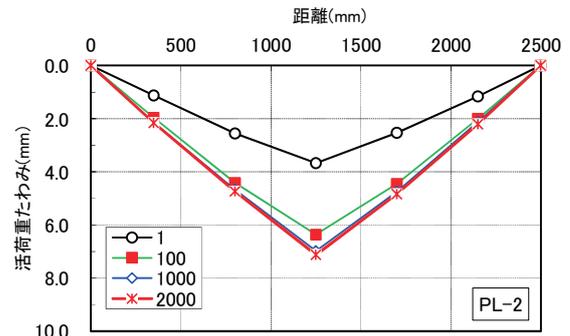


図-8(b) PL-2 のひび割れ導入時たわみ分布

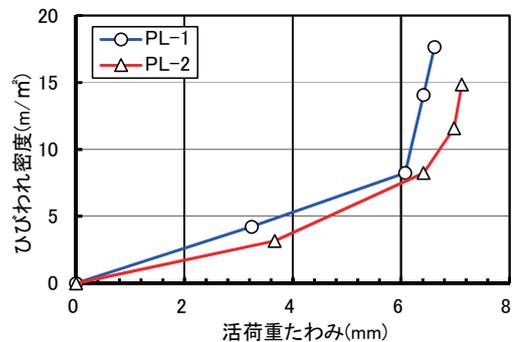


図-9 中央たわみとひび割れ密度の関係

W_0 : 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⁶⁾。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。

ここに、

E_s : 鉄筋の弾性係数は、表-2 の D16 主鉄筋の値 196.0 kN/mm^2 とする。

E_c : コンクリートの静弾性係数は、全断面有効時 $n=7$ と仮定して $E_c=Es/7=28.0 \text{ kN/mm}^2$ 、ひび割れ断面は $n=31$ と仮定して $E_c=Es/31=6.32 \text{ kN/mm}^2$ とする。

γ (ポアソン比) : 全断面有効時 0.178 (実測値)、ひび割れ断面 0.2 と仮定する。

劣化度の計算結果を表-7 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。

中央たわみの 1 回と 2,000 回のたわみ測定値と計算値の関係を図-10 に示す。1 回では、荷重 100kN でひび割れの発生を確認しており、剛性は 50kN 時 $n=7$ 相当の全断面有効の計算値と一致し、100kN 載荷時はひび割れ発生直後の $n=15$ 相当程度である。160kN 載荷時には $n=15$ と $n=31$ 計算値の中間に相当した。一方、2,000 回時の 160kN では、ひび割れ断面無視相当 $n=31$ の計算値とおおむね一致していることが確認できる。

主鉄筋の橋軸直角方向のひずみ分布は図-11 (a) (b) に示す。1 回は未走行時の初期値で、中央の最大値は 1000μ 前後である。走行 100 回以後の床版 PL-1 と PL-2 のひずみ分布は、ほぼ同じ分布形であり、100 回走行の最大値は、PL-1 および PL-2 いずれも $1,200 \mu$ をやや上回っている。1,000 回と 2,000 回は、PL-1 は 100 回とほぼ同程度である。PL-2 は、1,000 回で中央のひずみゲージが断線し、中央両サイドの測定値は、100 回に比べ増加し距離 1,700 では PL-1 より小さい値となっている。

表-7 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	Wo(mm)	1.50		n=7
	Wc(mm)	6.58		n=31
劣化度	D_δ	1.01	1.11	2000回時
ひび割れ密度(m/m^2)		17.66	14.84	

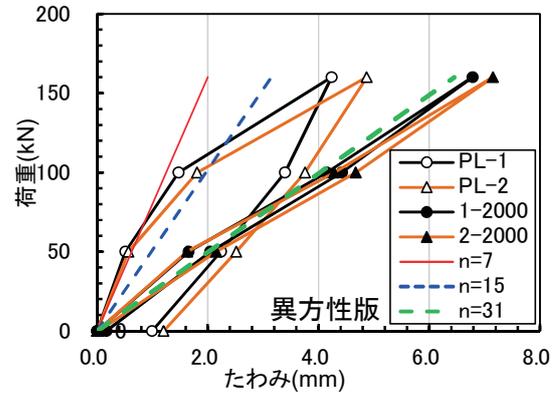


図-10 たわみとひび割れ密度の関係

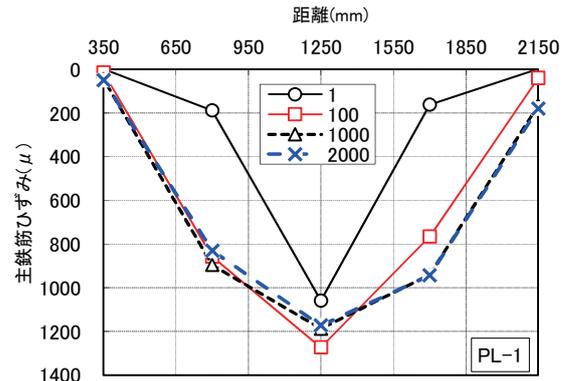


図-11 (a) PL-1 の主鉄筋ひずみ分布

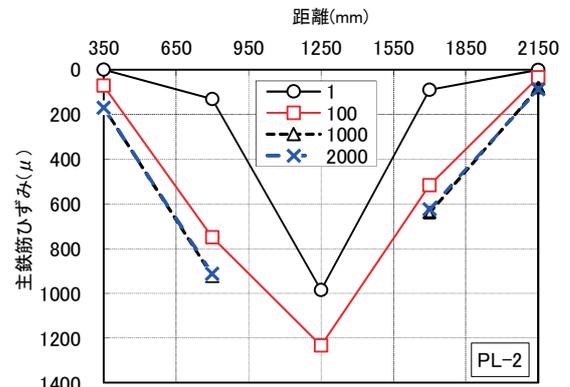


図-11 (b) PL-2 の主鉄筋ひずみ分布

4. 鋼板接着補強方法

初期ひび割れ導入後に試験体を野外に搬出して、鋼板接着補強を施工した。補強の様子は、東京都

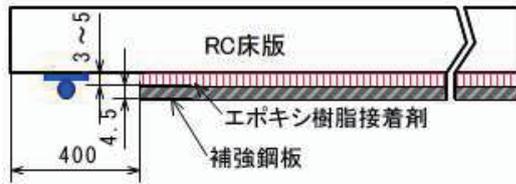


図-12 鋼板接着の仕様 (単位 mm)

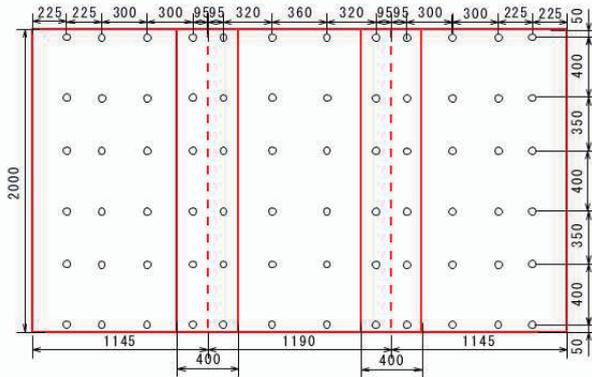


図-13 鋼板接着のアンカー配置図

の鋼板接着補強要領に準じて図-12に示したとおり、ハンチ手前のフラットな部分のみの施工とする。具体的な鋼板接着の割り付け図は図-13に示す3分割とし、添接板の重ね幅は $200\text{mm} \times 2 = 400\text{mm}$ である。

施工手順は、床版下面を写真-2(a)に示すサンダーにてケレンした後に接着鋼板のアンカー位置(床版1枚当たり $6 \times 12 = 72$ 本)の墨出しを行い、アンカー用穴あけ $\phi 10.5\text{mm}$ 、アンカー-M10 \times 80mmを設置した。なお、スパーサと人為的に剥離部を導入するため、寸法 $100 \times 100\text{mm}$ 厚さ 2mm の鋼板を接着面積全体の5%に相当する16枚を周囲のみシール材で取付けた。(写真-2(b))

スパーサ(4mm)を所定量設置し、アンカーで鋼板をセットして周囲をシール材でシールした。シール材の硬化に要する1日養生後に、エポキシ樹脂接着材は電動ポンプを使用して注入圧力 0.03N/mm^2 (0.3kgf/cm^2)以下で注入パイプ($\phi 10\text{mm}$)から、鋼板とコンクリート面の隙間に完全に充填した。(写真-2(c))

5. 鋼板接着補強後の疲労実験結果

(1) 走行回数と鋼板剥離面積

鋼板の剥離の進展状況は、図-14(a)(b)に示す。剥離面積は、打音点検で剥離領域を判定して図形ソフト(花子)により描写し面積を算出した。剥離



(a) サンダーケレン



(b) 鋼板取付け



(c) 接着材の注入(空気抜き)

写真-2 鋼板接着施工状況

面積率(%)は(剥離面積/鋼板面積 $\times 100$)で求めた。PL-1は1万回で鋼板重ね継手部の端部から剥離が発生し、5万回では走行タイヤエッジの外側まで拡大し、10万回時に広範囲に拡大した。一方、PL-2は、1万回時に鋼板重ね接手部で少量発生、その後10万回でタイヤエッジ外縁に相当する部分に剥離が点在するようになり、剥離のパターンは、タイヤエッジの外縁に沿って増加した。

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。施工時の状態をチェックした結果、PL-1は下地処理のサンダ

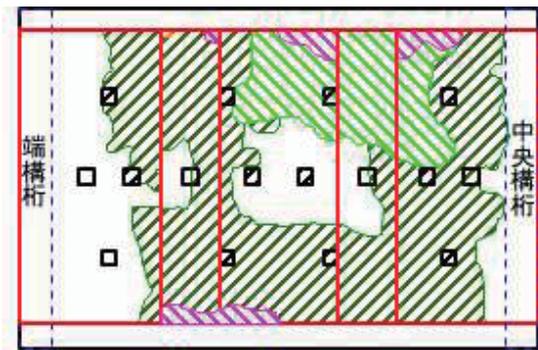


図-14(a) PL-1 鋼板剥離図(見下げ図)

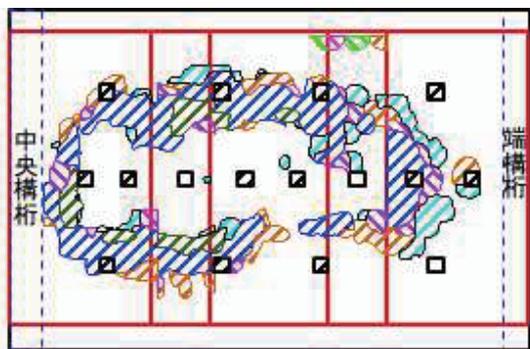


図-14(b) PL-2 鋼板剥離図(見下げ図)

一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-8に示す。走行回数10万回までは160kN 荷重とし、床版 PL-2 は10万1回以降では200kN 荷重としている。表-8の160kN 換算走行回数は、RC 床版の松井⁷⁾の式(2)で換算している。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{P_i}{P_0} \right]^m \cdot n_i \quad \dots \text{式(2)}$$

ここに、

N_{eq} : 基準荷重 $P_0=160\text{kN}$ 換算 (等価) 走行回数(回)

P_i : 荷重(kN)

n_i : 荷重 P_i の走行回数(回)

m : S-N 曲線の傾きの逆数 (12.76)

図-15は、160kN 換算走行回数と剥離面積の関

表-8 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

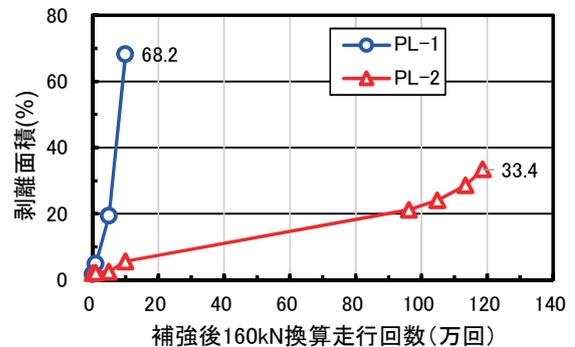


図-15 走行回数と鋼板剥離面積(%)

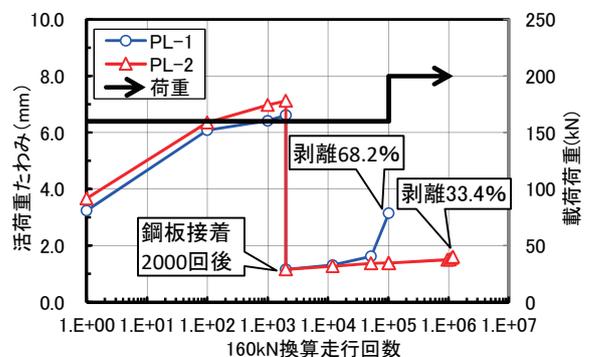


図-16 補強床版の走行回数とたわみ

係を示す。PL-1の剥離面積は、160kN10万回で68.2%に急増した。一方、PL-2の剥離面積は、160kN10万回時点で5.64%であり、荷重を200kNに増大して実験を行った結果、163,000回(160kN換算で1,186,206回)にて33.4%になり、この状態で剥離部へ接着材の再注入(鋼板剥離に対する補修)を実施することとした。

(2) 補強後のたわみ

鋼板接着補強後の走行回数と中央の活荷重たわみの関係を図-16に示す。PL-1は、ひび割れ導入時の活荷重たわみの最大値は6.61mmであったが、鋼板接着補強後は1.156mmに低下して補強効果が認められる。160kNの一定荷重により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3.14mm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の補強前は7.15

mmであったが補強後は 1.157 mmに低下した。160kN の一定载荷により 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 1.608 mmであり、補強後の 1.39 倍の増加にとどま

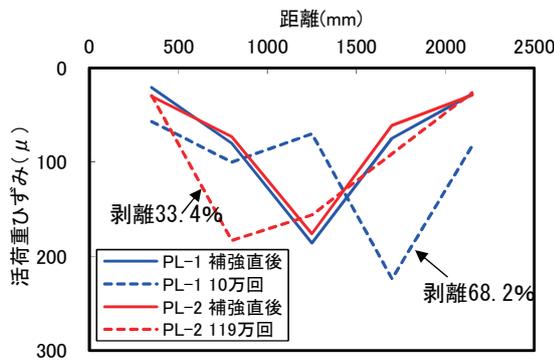


図-17 補強床版の鋼板ひずみ分布

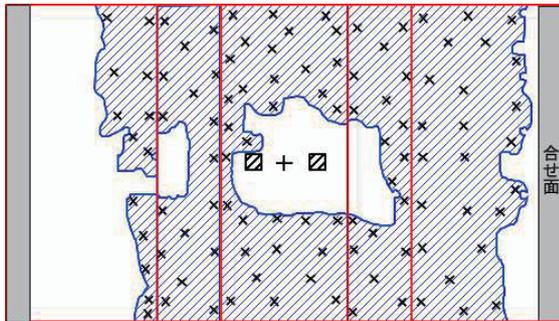


図-18(a) PL-1 剥離部再注入箇所(x印)

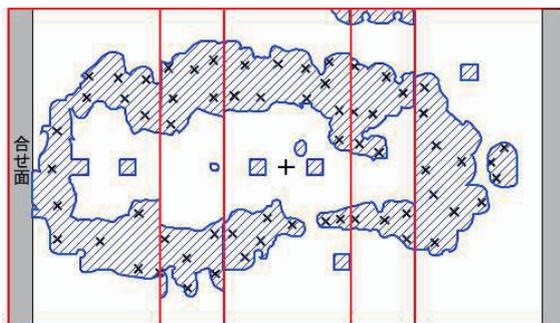


図-18(b) PL-2 剥離部再注入箇所(x印)

った。

(3) 補強後の鋼板ひずみ分布

補強鋼板の主鉄筋方向ひずみ分布を図-17に示す。補強直後のひずみ分布は、いずれの床版も中央点の最大値は 200 μ弱であり、分布形状は左右対称である。一方、剥離の進展は、走行タイヤ幅エッジから主桁方向へ進展するので、剥離が進展した後のひずみ分布は、図-17の PL-1 の 10 万回では距離 1,750 が最大値、PL-2 は 119 万回の距離 750 で最大値となる分布形を示した。

6. 剥離補修後（再注入後）の疲労実験結果

(1) 接着材再注入による補修方法

接着鋼板の剥離（又は浮き）損傷に対する補修方法は、一般的な方法である鋼板剥離部にドリルで穴を開け、エポキシ樹脂接着材を圧入して再接着させる方法である写真-3を採用した。注入孔には写真-4(a)の注入用インジェクションを接着材（パテ材）で取り付けた。PL-1 は図-18(a)に示す 103 か所に、PL-2 は図-18(b)に示す 65 か所にイ



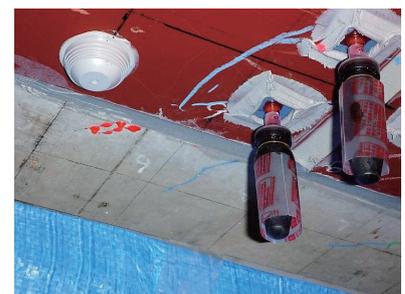
写真-3 接着剤再注入状況（床版 PL-2）



(a) インジェクター(左)と
ゴム風船型注入器(右)



(b) 再注入樹脂(蛍光顔料混入)



(c) 注入器のセット

写真-4 接着材再注入施工概要

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、写真-4(b)に示す赤色の蛍光塗料を混ぜている。インジェクション固定用の接着材が硬化した後に写真-4(c)のゴム風船型の低圧注入器に接着材を入れてインジェクションにセットして注入を行った。

再注入量は、PL-1 では約 7 kg、PL-2 は約 2 kg であった。また、再注入作業は、試験体を走行試験機の主桁上に設置したままの状態で行った。

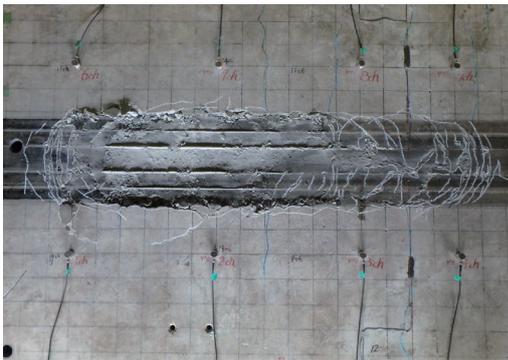


写真-5 PL-2 上面の破壊状況

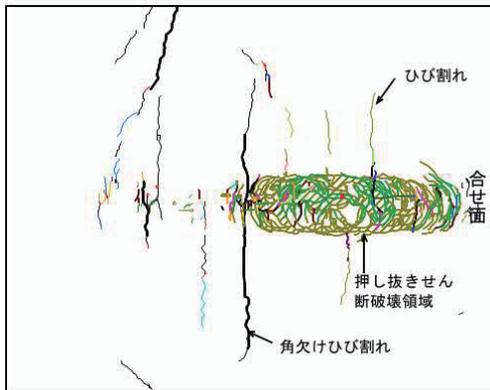


図-19(a) PL-1 走行面の破壊状況

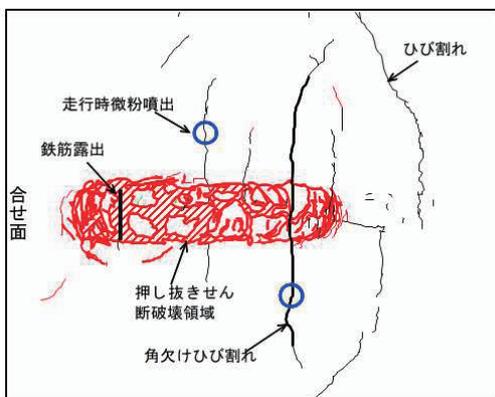


図-19(b) PL-2 走行面の破壊状況

(2) 再注入後の破壊時走行回数と上面ひび割れ

破壊後の PL-1 の床版上面のひび割れの状態は、写真-5 に示す。タイヤ走行面が 5~10mm 程度押し込まれている。ひび割れの状態を図-19(a) (b) に示す。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。再注入後の走行回数には、PL-1 は PL-2 の 2.1 倍多い違いがみられるが、PL-1 は接着材の再注入量が約 7kg で PL-2 の 2 kg に対し 3.5 倍と多いことが影響していることが考えられる。

一方、いずれも最終破壊回数の 1 万回前までは、橋軸直角方向のひび割れおよび同貫通ひび割れが徐々に増加し、破壊直前の数千回で押し抜きせん断破壊領域が走行方向に進展拡大して、走行面は骨材化（砂利化）現象に移行する破壊パターンが確認された。なお、骨材化の直前 1 万回から図-19(b)の PL-2 の貫通ひび割れ部「走行時微粉噴出」箇所の 2 か所では、骨材化（粉砕された脆弱部）部分を撤去したところ PL-1 は 2 か所で上側の主鉄筋が露出し、PL-2 での鉄筋露出も 2 か所であった。骨材化の深さは、概ね上側主鉄筋のかぶりよりやや浅い部分に留まっていた。

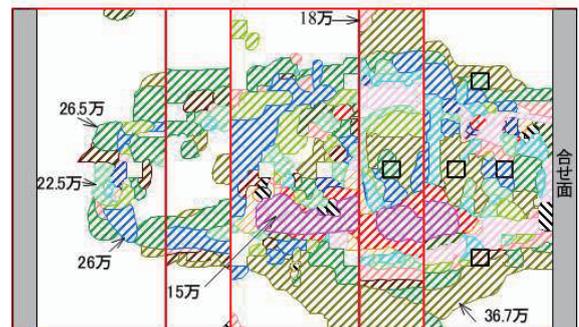


図-20(a) PL-1 再剥離分布

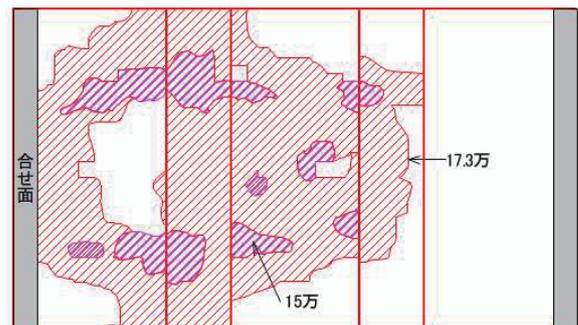


図-20(b) PL-2 再剥離分布

(3) 再注入後の破壊時走行回数と底鋼板の剥離

再注入後の底鋼板の剥離は、補強後の図-14(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-20(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率の推移は、図-21 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率が 50% 台で破壊しており、使用限界は 50% 程度と考えられる。

破壊時の走行回数の比較では、再注入量が多い PL-1 は PL-2 の約 2.1 倍である。

(4) 再注入後のたわみと鋼板ひずみ

再注入後の 160kN 荷重走行回数と床版中央点のたわみの関係を図-22 に示す。再注入直後の活荷重たわみは、図-16 に示した補強直後の活荷重たわみ量 (1.1 mm) とほぼ一致するたわみ量 1.2 mm まで低減しており補修効果は確認できた。接着材再注入時の剥離面積が大きかった PL-1 の破壊時のたわみは 2.764 mm であり、押し抜きせん断破壊領域は、図-19(a) に示した床版中央位置から合せ面にかけて分布している。一方、PL-2 の破壊領域は、床版中央を含む範囲が広いため、中央点のたわみは PL-1 に比べ約 2 倍強の 6.872 mm であり、この値は補強前の最終たわみ量とほぼ一致する。

底鋼板の主鉄筋方向床版中央点の活荷重ひずみは、図-23 に示す。再注入直後は、たわみ同様に補強直後のひずみ量 (約 180 μ) の 1.1 倍に回復しており補修効果は確認できる。破壊時のひずみは、たわみと同様に PL-2 は、PL-1 の約 2 倍のひずみ量となっている。

(5) 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 160kN

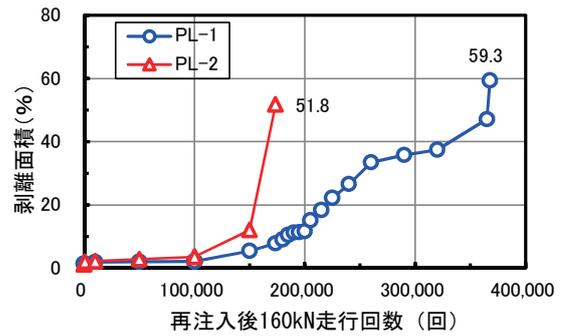


図-21 再注入後の走行回数と剥離面積

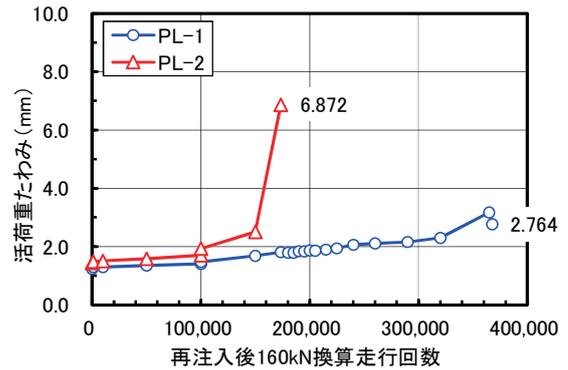


図-22 再注入後の中央点活荷重たわみ

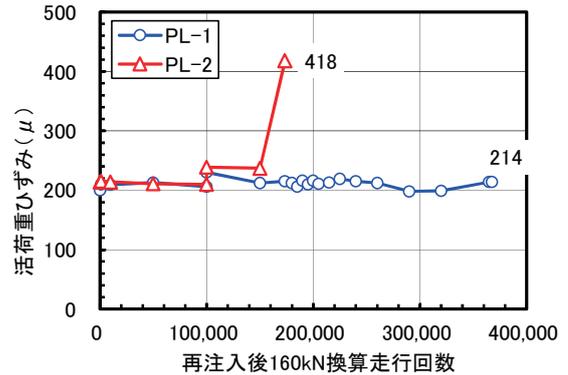


図-23 補強後の中央点鋼板活荷重ひずみ

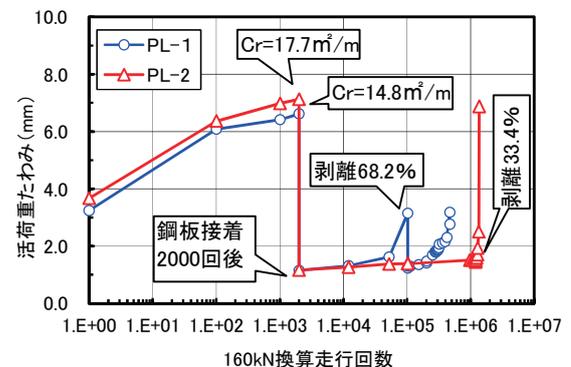


図-24 破壊までの走行回数とたわみの関係

換算活荷重たわみの全体の推移は、図-24 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、再注量が多い PL-1 の 3.171mm に対し、再注量が少ない PL-2 は 6.872mm であり、再注量が多いほど補修効果が高い結果となった。

7. 切断面のひび割れの検討

(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図-25 に示す位置で 6 分割にダイヤモンドカッターにて切断した。写真-6(a)(b)は橋軸方向(走行ライン)の切断前の走行面と A-A 切断面の状態である。写真-6(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-6(b)の PL-1 の右端側の中央構桁上フランジ端からほぼ 45 度の角度で床版上面に達するひび割れが、一番右側の押抜きせん断ひび割れである。写真-6(a)PL-1 上面のタイヤ接地面の外縁

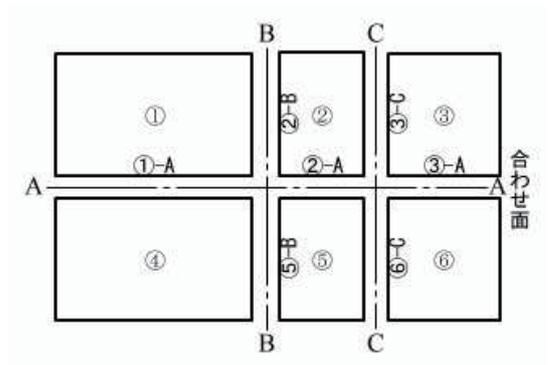
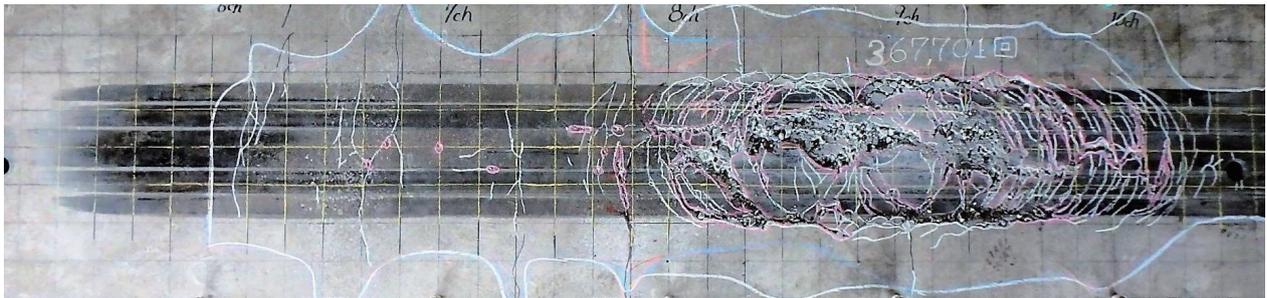


図-25 切断位置(PL-1)

に相当する円弧状のひび割れの右端と切断面の上面のひび割れの位置がほぼ一致している。また、切断面で床版下面右端から 30~40 cm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。

写真-6(a)タイヤ走行面の円弧形のひび割れの



(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-6 橋軸方向切断面



(a) PL-1 B-B 断面



(b) PL-1 C-C 断面



(c) PL-2 B-B 断面



(d) PL-2 C-C 断面

写真-7 橋軸直角方向切断面

向きに着目すると、骨材化の中心部から右側端に向かって右)型のひび割れは、タイヤが右側へ進行した際に発生したと推察される。一方、骨材化部分の中心から左側は、ひび割れの向きが左(型であり、左側にタイヤが走行した際に発生したと推察できる。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-6(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。

(2) 橋軸直角方向の切断面のひび割れの検討

写真-7 は、橋軸直角方向中央 B-B 断面と中央から端構桁側に約 70 cm 位置 C-C 切断面の切断面である。写真-7(a)の PL-1 の B-B 断面と写真-7(b)の PL-2 の B-B 断面を比較すると PL-1 は、押し抜きせん断破壊の円錐状のせん断ひび割れの山が上下二段になっているようにも見て取れる。一方、写真-7(c)(d)の PL-2 は圧縮鉄筋上のかぶりが大きく骨材化で欠損していることが見て取れる。ま

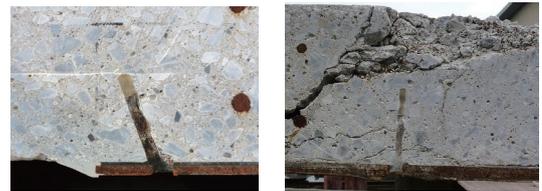


写真-8(a) アンカーの状態(左)健全、(右)ひび割れ発生



写真-8(b) 鋼板端部アンカーの押し抜きせん断破壊の状態

た、写真-7(b)(d)の C-C 断面では、両試験体ともに B-B 断面に比べると、押し抜きせん断破壊のひび割れの領域が支間方向にやや広がっている。

(3) アンカーの状態

写真-8 にアンカーの状態を示す。写真-8(a)は、橋軸直角方向の鋼板端部の剥離がない箇所のアンカーの状態であり、アンカーの抜け出しがなく、ひび割れも発生していない。写真-8(b)は、鋼板に剥離があり、アンカーの先端から凸型(円錐

状) のひび割れ (アンカーの引き抜き試験同様のコーン状) が発生していることから、アンカーは押し抜きせん断破壊まで有効に機能していたと推察できる。

(4) 接着及び再注入樹脂の状態

写真-9(a)は、PL-1の橋軸方向中央位置の接着時の樹脂 (やや緑色) の状態は、曲げひび割れ及びせん断ひび割れに注入されている。破壊時のひび割れは、注入樹脂のひび割れ以外で発生していることが見て取れる。同様に写真-9(b)は、PL-1のB-B断面の再注入樹脂 (赤色) の状態であり、破壊時のひび割れは、再注入樹脂のひび割れ以外で起こっていることが見て取れる。

写真-10(a)は、鋼板接着時にひび割れに圧入された樹脂の自然光での拡大写真である。一方、写真10-(b)はブラックライト照射での写真であり、樹脂の色は蛍光色で鮮明に確認できる。やや緑色の接着時の樹脂に連続して再注入樹脂の赤色があり、赤色はひび割れ幅の細部 (約0.05mm) まで充填されている。また、写真-11はコアの上側主鉄筋下面の隙間にも再注入の樹脂が確認できた。

鋼板下面の剥離は、コンクリート界面での剥離であり、再注入の樹脂も接着時の樹脂層とコンクリート界面の間に圧入されており、接着層が二層確認される箇所が多い。これらのことから再注入樹脂 (接着剤) 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

(1) 劣化度の推移

図-26(a)は、補強前→補強後→再注入後の全走行回数と劣化度の関係を示す。図-26(b)は、補強後からの拡大図である。補強前の劣化度は、厚板理論の1層板の計算値であり、鋼板接着後の劣化度は、厚板理論に基づく多層版 (RC床版と鋼板の2層板) 解析による計算値である。

図-26(a)によると補強前のPL-1およびPL-2の劣化度の推移は、ほぼ同一である。補強前の最大値は1.0をやや上回っていたが、補強後はいずれ



写真-9(a) 接着時の樹脂 (PL-1①-A断面)



写真-9(b) 再注入時の樹脂 (PL-1⑤-B断面)



写真-10(a) コアのひび割れと樹脂の状態

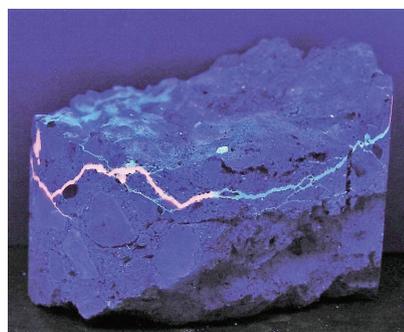


写真-10(b) 接着時 (緑色) ・再注入 (赤)



写真-11 鉄筋下面の再注入樹脂

の試験体も劣化度は 0.29 まで低下（回復）した。その後の走行により PL-1 は、図-26(b)の 5.2 万回時に劣化度は 1.0 に達し、10.2 万回で劣化度 3.33 に急増して接着材の再注入を行った結果、劣化度は 0.41 まで回復した。その後のさらなる走行により劣化度は増加して 25.2 万回時に劣化度 1.1 を超え、その後は急増して 42.2 万回で劣化度 2.0 をこえ破壊時の 46.7 万回時には劣化度 3.36 で終了している。

一方、図-26(a)の PL-2 は補強直後までは PL-1 と同一であったが剥離の進行が遅かったことから荷重を 200kN に上げた影響により、図-26(b)の 160kN 換算で 118.8 万回時に劣化度は 0.98 に上昇して、剥離面積が 33.4%において再注入を行っている。再注入後の劣化度は 0.72 まで回復したが、PL-1 ほどの回復は見られず、その後の走行 128.8 万回により劣化度は 1.12 を超え、133.8 万回で劣化度は 2.34 を超え急激に剥離が進む。最終的には 135.9 万回で剥離面積 51.8%、劣化度は 9.00 に急増して終了した。

(2) 劣化度と剥離の関係

図-27(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-27(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

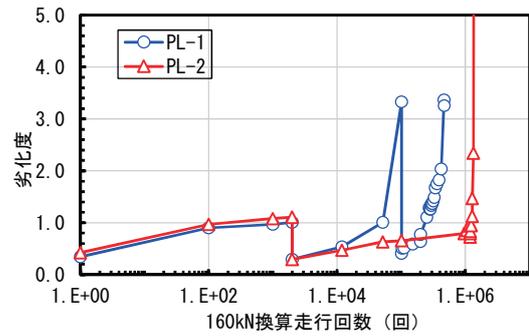


図-26(a) 走行回数と劣化度の関係

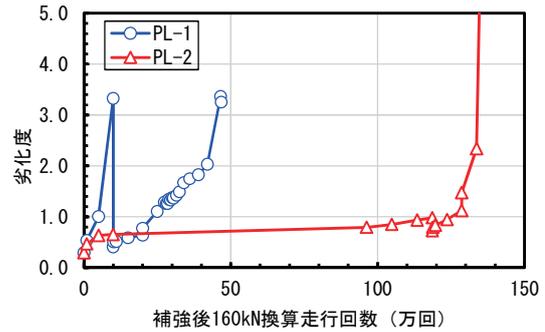


図-26(b) 補強後の劣化度の推移

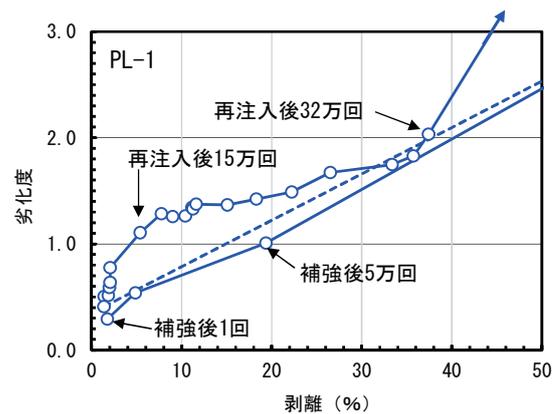


図-27(a) PL-1 剥離面積と劣化度の関係

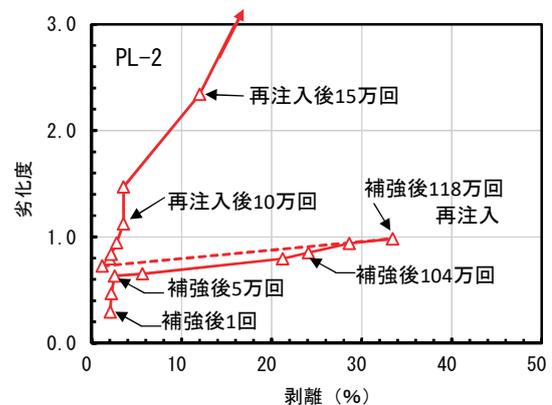


図-27(b) PL-2 剥離面積と劣化度の関係

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。

9. 重錘落下たわみ

(1) 測定方法

重錘落下たわみ測定機 (IIS) は、写真-12 に示す 100kg の重錘とたわみセンサー (速度計) とデータ収録解析装置を組み合わせたシステムを使用した。たわみセンサーは、床版中央点と両主桁上に配置して 3 か所のたわみを同時に測定し、両主桁の基線からの中央たわみを計測する。重錘の落下高さは 200mm 一定とし、重錘の落下開始から約 10 秒間 (サンプリング間隔は 500/秒) 計測した。また、載荷板 (直径 35cm) のロードセルの荷重値で 160kN 換算し 3 回の平均値で求めた。

(2) 重錘落下たわみと静的載荷たわみの関係

重錘落下たわみと静的載荷たわみの 160kN 換算での比較を図-28 (a) (b) に示す。図中の Cr はひび割れ密度 (m/m^2)、 Pr は再注入時点の剥離面積 (%) である。いずれの床版も補強前のたわみ初期値は、ほぼ同一であった。走行開始から補強前のたわみは、静的載荷に比べ重錘落下たわみの方が小さく推移した。一方、鋼板接着補強後は、両者の関係が逆転して再注入補強後の破壊までの関係は、静的載荷に比べ重錘落下たわみの方が大きい値で推移した。補強前後で両者の関係が逆転した理由は明確に説明できないが、試験体の支持条件が単純支持のため、桁上のコロと試験体の接触面が完全に接触していない箇所の影響が考えられる。

測定方法によるたわみの絶対値は、一致しなかったが、たわみの全体的な推移では、両者の傾向はほぼ一致している。したがって、疲労によるダメージをモニタリングする手法としては、IIS たわみ量の変化 (推移) は、有効な指標と考えられる。

(3) たわみによる維持管理水準の検討

図-29 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. (3) 「ひび割れ導入時の劣化度」



写真-12 重錘落下たわみ測定状況

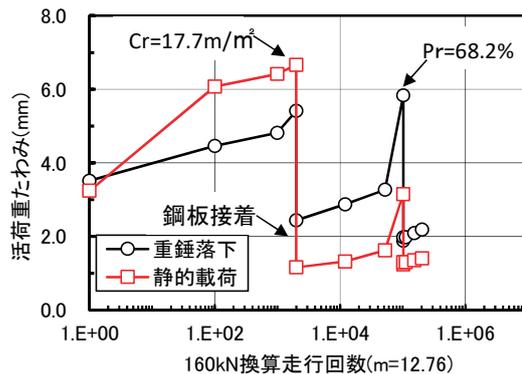


図-28 (a) PL-1 重錘落下と静的載荷のたわみ

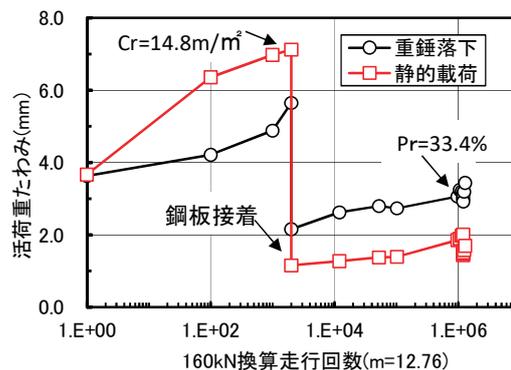


図-28 (b) PL-2 重錘落下と静的載荷のたわみ

同様に厚板理論に基づく多層板解析により求めた。なお、接着鋼板の静弾性係数は $E_s=200 \text{ kN/mm}^2$ と仮定する。

図-29 (a) の PL-1 補強前の走行回数 1 回でひび割れはすでに発生しており、活荷重たわみは「n15」の計算値と一致し、走行回数 100~2000 回では「n31」の計算値とほぼ一致している。補強直後のたわみは、鋼板を考慮した 2 層板の計算値「n15 鋼板」よりやや小さい。その後の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 2 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-29(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、再注入の樹脂の注入量が 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約 7 mm 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、すなわち、図-21 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。

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

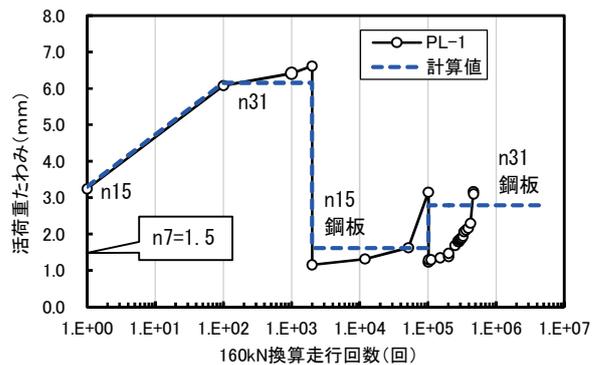


図-29(a) PL-1 活荷重たわみと計算値の関係

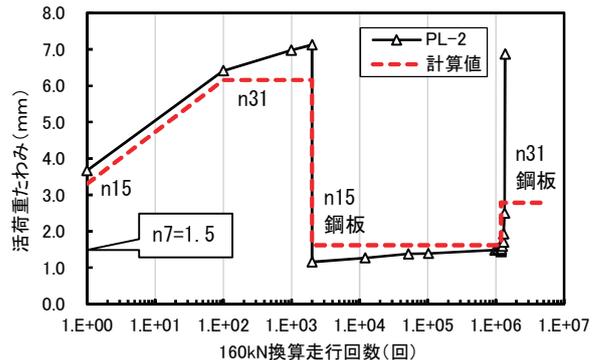


図-29(b) PL-2 活荷重たわみと計算値の関係

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