

10. 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 材料施工担当 課長代理 石田教雄、土木技術専門員 関口幹夫
技術支援担当 主任 今吉計二

1. はじめに

東京都は、多くの高齢化橋梁のストックを抱えており、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) 床板は、床版厚が薄く、配力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易い。都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 橋ほど実施された。この対策の実施は、既に 40 年以上経過し、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、最適な対策を講じなければ、鋼板の剥離が進展することで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、補強床板や再補修床板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のレベル」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、PL-3 の約 15% (実測値 17.6%) と PL-4 の 50% (実測値 47.2%) で接着材を再注入した実験結果を取りまとめる。なお、PL-1 (実測値 68.2%) と PL-2 (実測値 33.4%) については、平成 29 年度の年報³⁾に報告済みである。

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	14.33	17.6	○	
PL-4	なし	15.19	47.2	○	



図-1 試験体の形状寸法

(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⁴⁾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 16 cm、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文献⁵⁾の試験結果と比較できるようにハンチなしの状態で行っている。

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	362.1	503.8	175.8	20.2
鉄筋D13	332.0	475.3	174.0	21.2
鉄筋D16	340.7	490.1	189.1	19.9
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 (材齢 28 日)

供試体 No.	スランプ	空気量	粗骨材最大寸法	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)
1	12cm	5.20%	20mm	24.3	22,925	-	1.94
23.2				22,750	-	2.01	
24.3				22,785	-	1.94	
平均				23.9	22,820		1.96

(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。コンクリートの配合表は表-3 に特性値は表-4 に

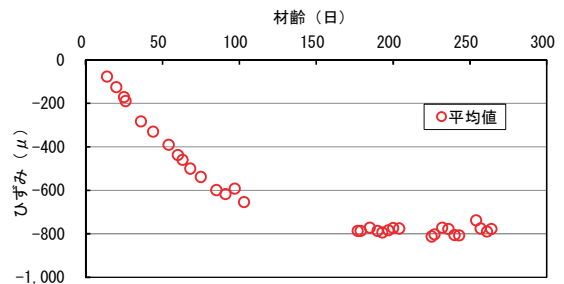


図-2 乾燥収縮ひずみ

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	1.7
粘度	垂直ダレ試験	-	ダレ認めず	合格
可使時間	温度上昇法	分	60以上	73
圧縮降伏強さ	JIS K7208	N/mm ²	60.0以上	81.3
圧縮弾性率	JIS K7208	N/mm ²	4000~8000	6790
曲げ強さ	JIS K7203	N/mm ²	40.0以上	49.9
引張強さ	JIS K7113	N/mm ²	20.0以上	33.8
衝撃強さ	JIS K7111	KJ/m ²	1.50以上	3.61
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	15.7

試験条件: 20°C 7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	1.13
粘度	JIS K6833	mPa·s	1000~2000	1500
可使用時間	温度上昇法	分	30以上	50
圧縮降伏強さ	JIS K7208	N/mm ²	60.0以上	82.2
圧縮弾性率	JIS K7208	N/mm ²	1500~3500	2350
曲げ強さ	JIS K7203	N/mm ²	50.0以上	82.2
引張強さ	JIS K7113	N/mm ²	35.0以上	57.4
衝撃強さ	JIS K7111	KJ/m ²	3.00以上	4.57
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	16.4

試験条件: 20°C7日間養生後20°Cにて測定

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(材齢264日)の収縮量は約800μ、質量減少量は約240g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。

(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



写真-1 輪荷重走行装置

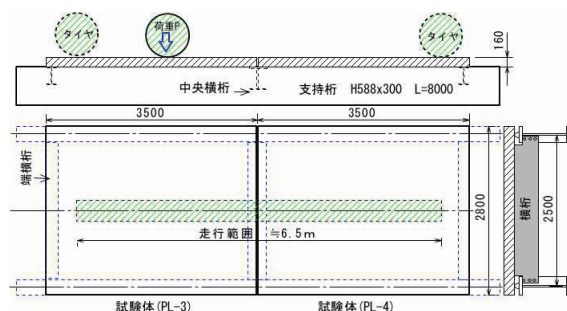


図-3 試験体の配置図

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。尚、補強後30万回から再注入直前の45.2万回は、180kNに荷重を上げて促進した。

3. 予備載荷によるひび割れの導入

(1) ひび割れの導入

ひび割れの導入は、東京都建設局におけるRC床

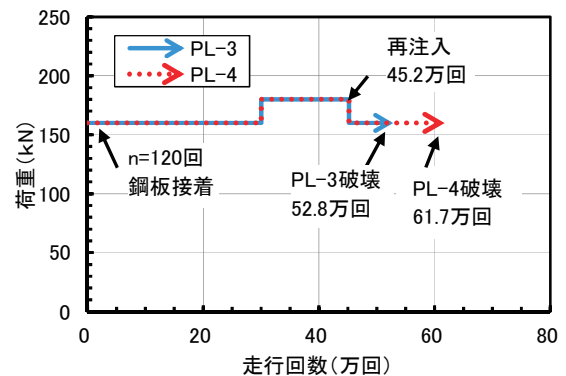


図-4 載荷プログラム

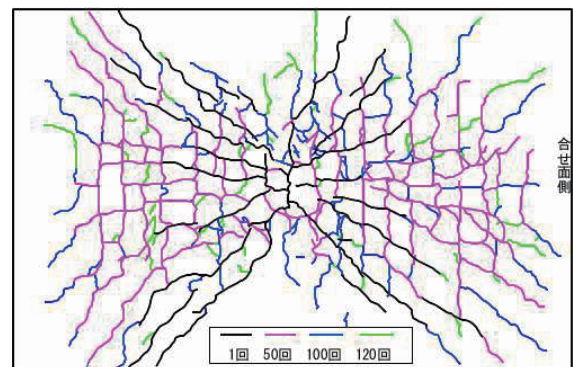


図-5(a) PL-3のひび割れ導入(見下げ図)

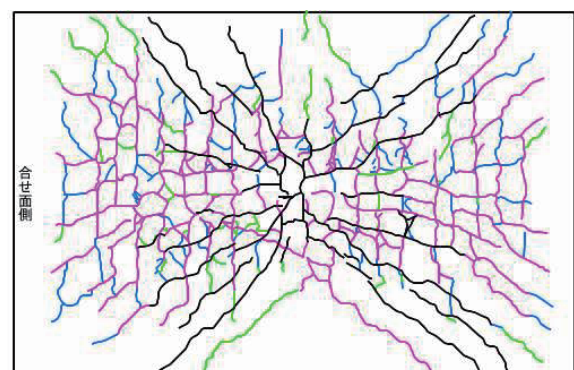


図-5(b) PL-4のひび割れ導入(見下げ図)

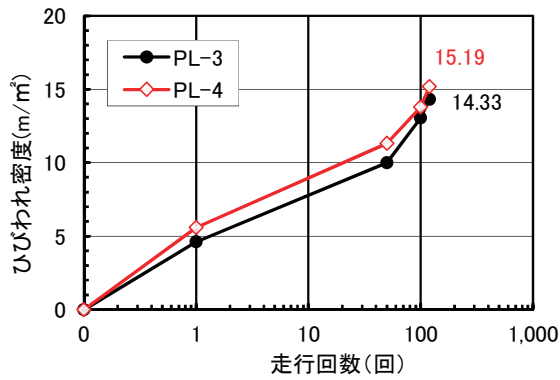


図-6 160kN 走行載荷ひび割れ密度の推移

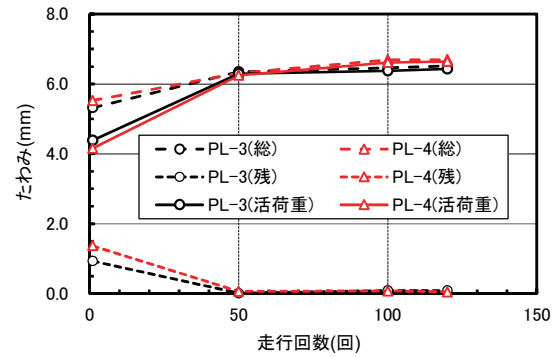


図-7 走行回数と中央たわみの関係

版への鋼板接着補強対策の適用では、床版下面のひび割れ損傷ランク c～d で補強するので、ひび割れ密度が約 15m²/m²となる走行回数を目標とした。ひび割れ密度の測定は、床版中央部 2m×2m の領域で格子密度法により算定した。

走行回数とひび割れの発生・進展状況は、図-5(a)(b)に示す。ひび割れのパターンは、版中央を中心にほぼ偏りなく発生・進展した。PL-3 の走行回数 1 回でのひび割れ密度は、図-6 に示すとおり 4.62m²/m²、120 回で 14.33m²/m²に増加した。一方、PL-4 は 1 回で 5.60m²/m²であったが 120 回で 15.19m²/m²となり、いずれも 120 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-3 および PL-4 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(総-残留)たわみと走行回数の関係を図-7に示す。残留たわみは 1 回のみやや多かったものの 50 回以降は安定している。総たわみは、50 回以降は微増にとどまっている。また、ひび割れ導入時の 120 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-3 の 1 回の中央たわみは 4.385 mm、PL-4 は 4.156 mm。50 回走行時はいずれも 6 mm を超え、120 回走行時の PL-3 は 6.428 mm、PL-4 は 6.641 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-4 は PL-3 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

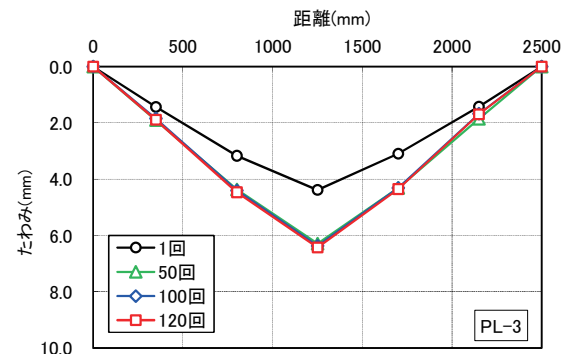


図-8(a) PL-3 のひび割れ導入時たわみ分布

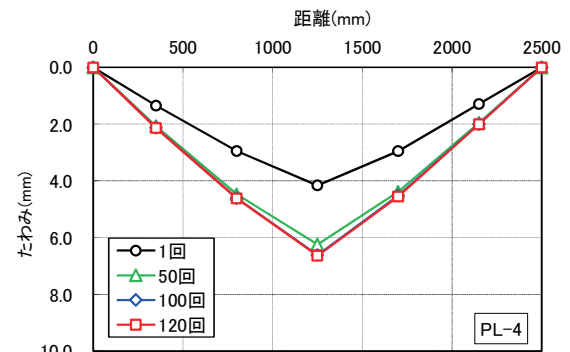


図-8(b) PL-4 のひび割れ導入時たわみ分布

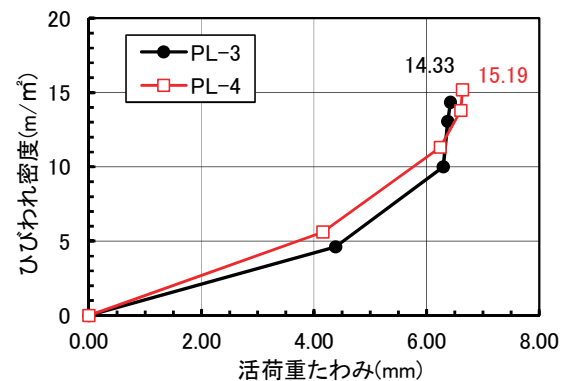


図-9 中央たわみとひび割れ密度の関係

が約 10m²/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

鋼板接着前に予備荷重を行った段階での RC 床版の劣化度を評価する。評価には、文献 6) 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)

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(多層板解析)を用いた⁷⁾。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、

Es : 鉄筋の弾性係数は、表-2 の D16 主鉄筋の値 189.1 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 $E_c=Es/7=27.0 \text{ kN/mm}^2$ 、ひび割れ引張断面無視は $n=31$ と仮定して $E_c=Es/31=6.1 \text{ kN/mm}^2$ とする。

γ (ポアソン比): 全断面有効時 0.17、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。劣化度は PL-3 で 0.93、PL-4 で 0.97 である。劣化度は 1.0 以上で使用限界と評価するので、平均値 0.95 では、ほぼ使用限界状態と評価できる。

中央たわみの 1 回と 120 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、剛性は荷重 50kN 時 $n=7$ 相当の全断面有効の計算値と一致し、100kN 荷重時はひび割れ発生直後の $n=15$ 相当程度

表-7 予備荷重における RC 床版の劣化度

試験体	PL-3	PL-4	備考
活荷重たわみ $W(\text{mm})$	1回	4.385	未走行
	120回	6.428	走行
たわみ計算値	$W_0(\text{mm})$	1.559	
	$W_c(\text{mm})$	6.820	
劣化度	$D\delta$	0.93	0.97
ひび割れ密度(m/m^2)		14.33	15.19

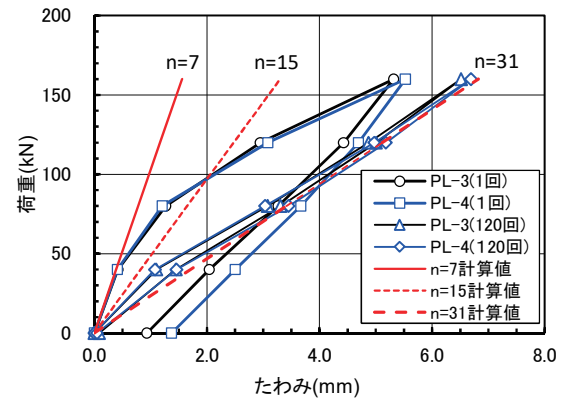


図-10 予備荷重のたわみ測定値と計算値

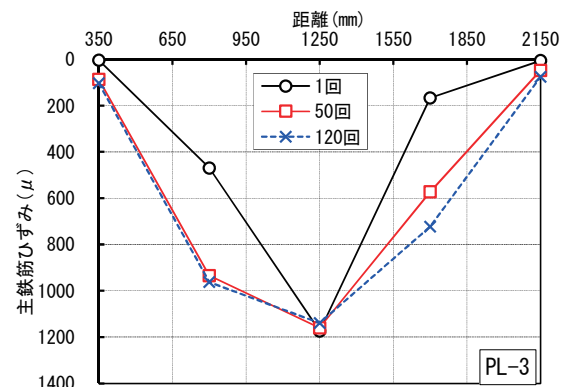


図-11(a) PL-3 の主鉄筋ひずみ分布

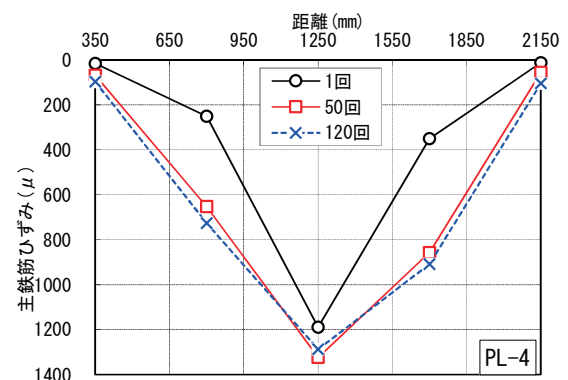


図-11(b) PL-4 の主鉄筋ひずみ分布

である。160kN 荷重時には $n=15$ と $n=31$ 計算値の中間に相当した。一方、120 回時の 160kN では、ひび割れ断面無視相当 $n=31$ の計算値とほぼ一致し

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 1200μ 前後である。走行50回以後の床版PL-3とPL-4のひずみ分布は、ほぼ同じ分布形であり、120回走行の最大値は、PL-3では約 $1,200\mu$ であり、L-4では $1,300\mu$ をやや上回っている。50回と120回では、PL-3はほぼ同程度である。PL-4の中央点は、PL-3より全体に 100μ ほど大きくなっている。

4. 鋼板接着補強方法

初期ひび割れ導入後試験体を野外に搬出して、鋼板接着補強を施工した。補強の仕様は、東京都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。

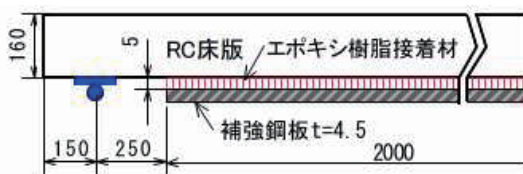


図-12 鋼板接着の仕様 (単位 mm)

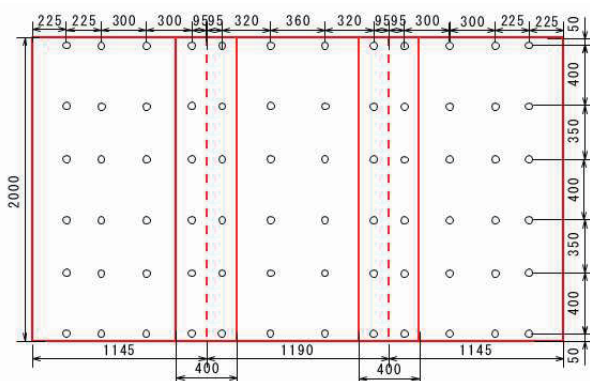


図-13 鋼板接着のアンカー配置図

スペーサ(5 mm)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手動ポンプを使用して注入圧力 $0.03\text{N}/\text{mm}^2$ ($0.3\text{kgf}/\text{cm}^2$)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



(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

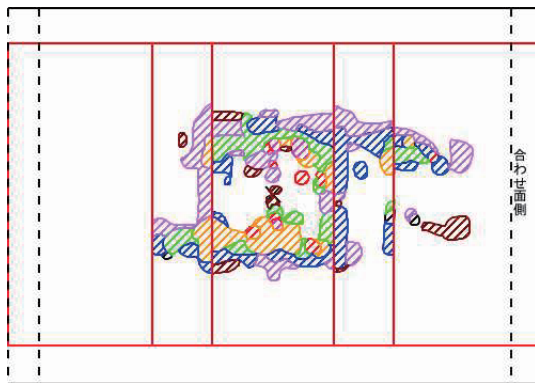


図-14(a) PL-3 鋼板剥離図(見下げ図)

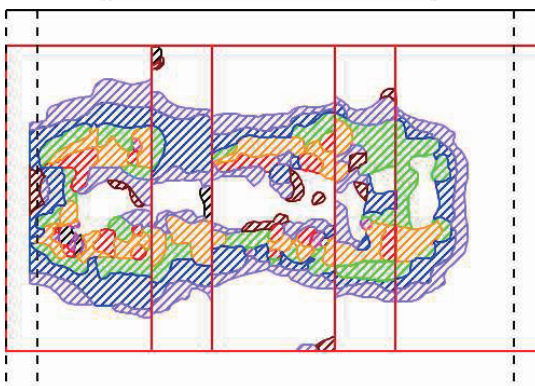


図-14(b) PL-4 板剥離図(見下げ図)

ソフトにより描写し面積を算出した。剥離面積(%)は(剥離面積/鋼板面積×100)で求めた。PL-3とPL-4いずれも30万回までは、ほとんど剥離は発生しなかった。30万1回から荷重を180kNに上げて走行するにしたがって剥離が発生・進展した。PL-3の剥離は、床版中央点近傍において走行タイヤエッジ辺りから発生して、回数の増加に伴って外側に拡大するパターンが見られた。なお、端構桁側への発生・進展は緩慢であった。

一方、PL-4は、31万回時に少量発生、その後40万回以降45万回でタイヤエッジ外縁に相当する部分に剥離が連続するようになり、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-3とPL-4を比較すると、PL-4の方が剥離の発生・進展スピードが大であるものの、剥離パターンは過去の実験でも見られた正常な剥離パターンである。

表-8 走行回数と剥離面積

荷重(kN)	160.0	160.0	160.0	160.0	180.0	180.0	180.0	180.0
走行回数	0	10,000	200,000	300,000	310,000	375,000	425,000	452,000
160kN換算回数	0	10,000	200,000	300,000	344,948	637,107	861,845	983,203
PL-3(%)	0.1	0.1	0.2	0.2	0.6	4.2	11.6	17.6
PL-4(%)	0.5	0.5	0.6	0.6	1.1	11.9	33.6	47.2

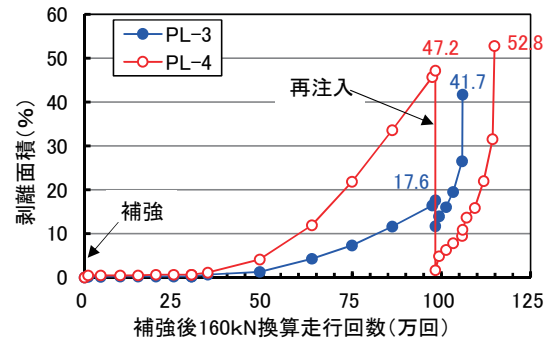


図-15 走行回数と鋼板剥離面積(%)

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30万回までは160kN荷重とし、30万1回以降再注入前まで荷重は20kNアップして180kNで走行している。なお、表-8の160kN換算走行回数は、RC床版の松井⁸⁾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係を示す。160kN荷重30万回時点の剥離面積は、PL-3で0.2%、PL-4で0.6%と微増であったことから、以後は荷重を180kNに上げて載荷した。その結果、160kN換算約63.7万回でPL-3は4.2%に増加、98.3万回で17.6%(目標値15%)に急増した。一方、PL-4は98.3万回で47.2%(目標値50%)に急増した。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。

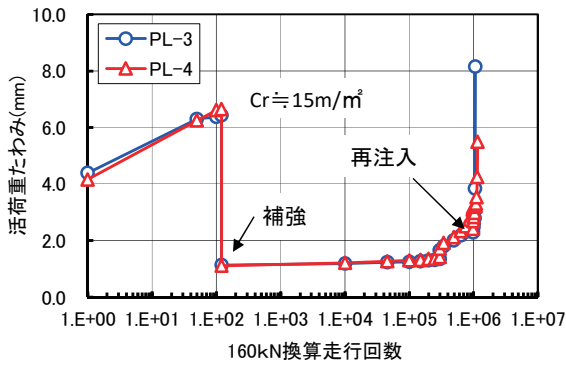


図-16 たわみの推移

(2) 補強後のたわみ

走行回数と中央の活荷重たわみの関係を図-16に示す。PL-3は、ひび割れ導入時の活荷重たわみの最大値は6.428mmであったが、鋼板接着補強後は1.132mm ($1.132/6.428=17.6\%$)に低下して補強効果が認められる。160kN 一定荷重により補強後300,000回で鋼板の剥離面積は0.2%で剥離の進展はない。この時点の活荷重たわみの最大値は1.345mmであり、補強直後1回の1.132に比べ18.5%の増加に留まっていたが、剥離面積17.6%の98.3万回では2.63mm、補強後の2.32倍に増加した。一方、PL-4の補強前は6.641mmであったが補強後は1.108mm ($1.108/6.641=16.7\%$)に低下した。160kNの一定荷重により300,000回の剥離面積は0.6%と少なく、たわみも1.412mmと小さい。以後の走行は、荷重を180kNに上げて15.2万回(160kN換算98.3万回)にて剥離面積が47.2%となり、160kN換算活荷重たわみは3.169mmであり、補強後の2.86倍の増加にとどまった。

(3) 補強後の鉄筋及び鋼板ひずみ分布

図-17(a)は、主鉄筋活荷重ひずみの補強前と補強後の推移を示す。補強前の主鉄筋ひずみは図-11(a)(b)に示したとおり約1200 μ であったものが鋼板接着により約8.3%の100 μ (PL-3と4の平均値)に低減され、再注入以降も200 μ を超えることがない補強効果が確認できる。また、配力鉄筋については、図-17(b)に示すように補強前約1300 μ だったものが補強後4.6%の約60 μ に低減する補強効果が確認できた。

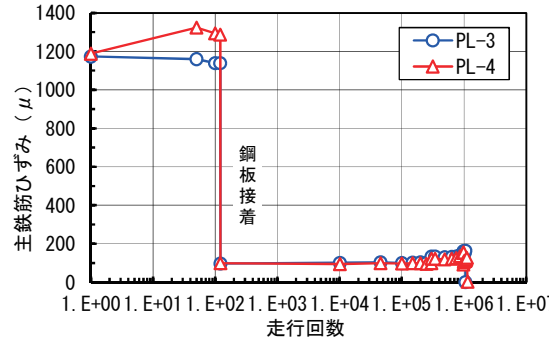


図-17(a) 主鉄筋ひずみの推移

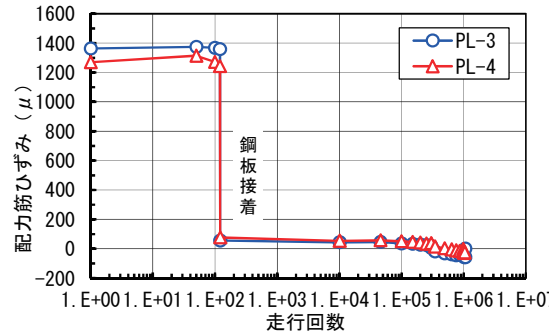


図-17(b) 配力筋ひずみの推移

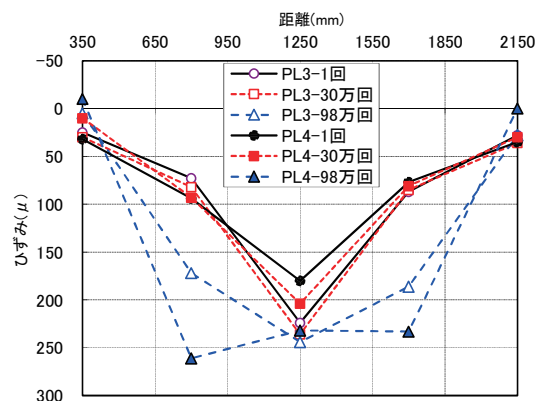


図-18 鋼板ひずみ主鉄筋方向分布

補強鋼板の主鉄筋方向ひずみ分布を図-18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。また、剥離の進展が微増の30万回では補強直後の形状を維持している。一方、剥離が急増した末期状態の160kN換算98.3万回では、走行タイヤ幅エッジから主桁方向へ剥離が進展することにより、剥離が進展した後のひずみ分布は、鍋底状に大きく変化した。

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



(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)
写真-4 接着材再注入施工概要



(c) 注入器のセット

接着鋼板の剥離（又は浮き）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、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-3 は図-19(a)に示す73か所に、PL-4 は図-19(b)に示す120か所に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、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。

一回目の再注入量は、PL-3 で約 1.40kg、PL-4 で約 3.71kg であった。ただし、再注入実施の3日間は気温 33℃、室内でも 30℃以上と高温であったことから、再注入用接着材は夏季用（20℃可使用時間30分以上）を使用したものの注入開始後から硬化が始まり、たたき点検を行い未充填の個所に二回目の再注入を実施した。二回目の注入量は PL-3 ではインジェクション 22 本で 0.72 kg（未充填 11.7%）、PL-4 ではインジェクション 12 本で 0.38kg（未充填 1.7%）であった。

(2) 再注入後の破壊時走行回数と上面ひび割れ

破壊後の床版上面のひび割れの状態は、図-20(a) (b)に示す。タイヤ走行面が 5~15mm 程度押し込まれている。再注入後の破壊回数は、PL-3 は 160 kN 走行で 75,959 回、PL-4 は 165,169 回であ

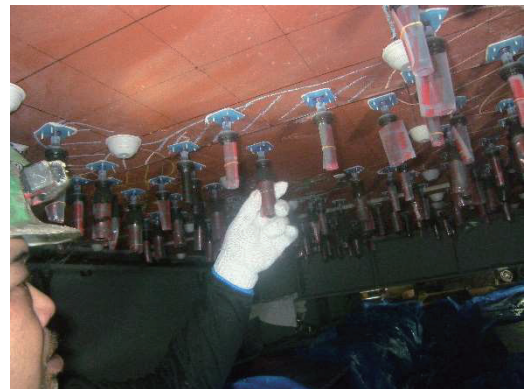


写真-3 接着材再注入状況（床版 PL-4）

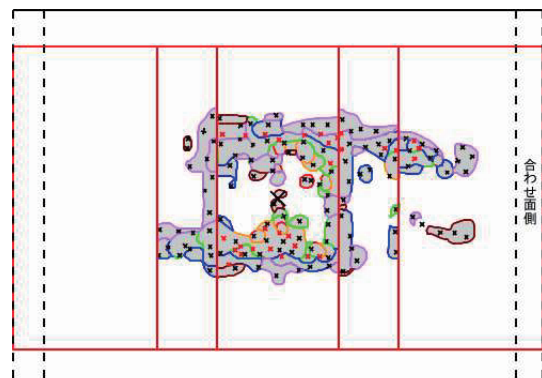


図-19(a) PL-3 剥離部再注入箇所(×印)

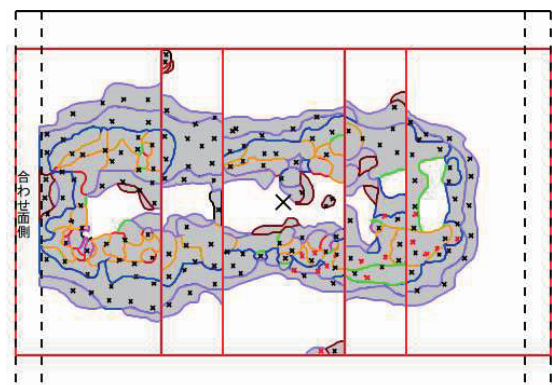


図-19(b) PL-4 剥離部再注入箇所(×印)

った。再注入後の走行回数には、PL-4 は PL-3 の 2.1 倍多い違いがみられるが、PL-3 は接着材の再

注入量が約 2.12kg で PL-4 の 4.09 kg に対し 1/2 と少ないことが影響している可能性が考えられる。

一方、いずれも最終破壊回数 of 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、図-20(b)の PL-4 の貫通ひび割れ部「図中○印（微粉噴出）」3 か所では、破壊直前 1000 回辺りから微粉が噴出するのが確認できた。微粉噴出は、貫通ひび割れ内の微粉がタイヤ走行によるひび割れ開閉に伴う息継ぎ現象となって生じているものと推察される。骨材化（粉砕された脆弱部）部分を撤去したところ主鉄筋が露出した。骨材化の深さは、両試験体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。

(3) 再注入後の破壊時走行回数と底鋼板の剥離

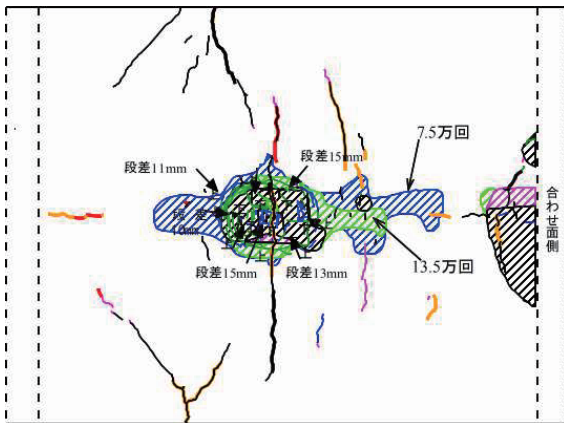


図-20(a) PL-3 走行面の破壊状況

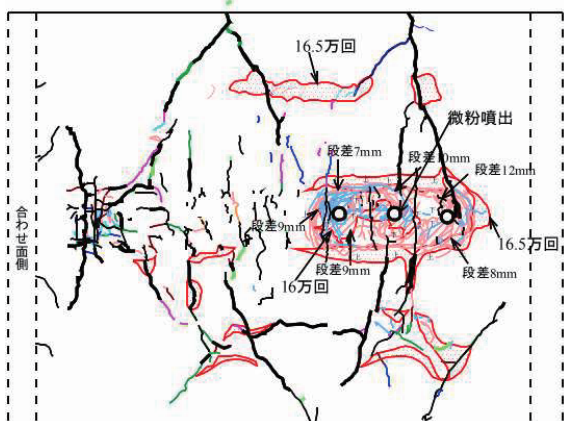


図-20(b) PL-4 走行面の破壊状況

再注入後の底鋼板の剥離は、補強後の図-14(a) (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-21(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-3 では、再注入後の剥離面積率の推移は、図-22 に示すとおり 7.5 万回の剥離面積約 26.5%から 7.6 万回で 41.7%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-4 は、剥離の進行速度が PL-3 に比べやや緩慢であり、16 万回 31.6%越えから急激に増加して 52.8%で主桁側の端部が剥離した。両床版ともに剥離面積が約 50%で破壊しており、剥離面積での使用限界の評価は 40~50%程度と考えられる。

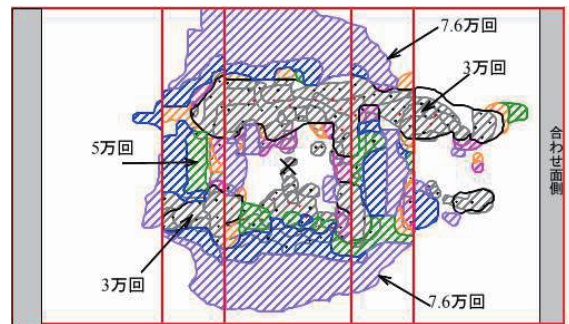


図-21(a) PL-3 再剥離分布

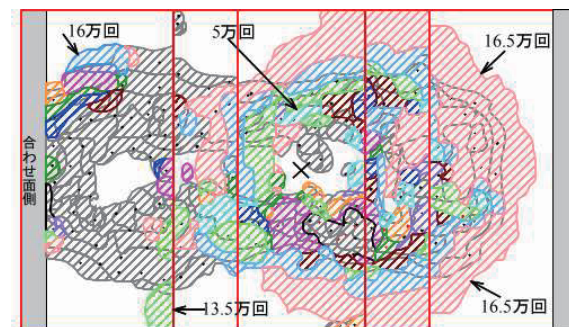


図-21(b) PL-4 再剥離分布

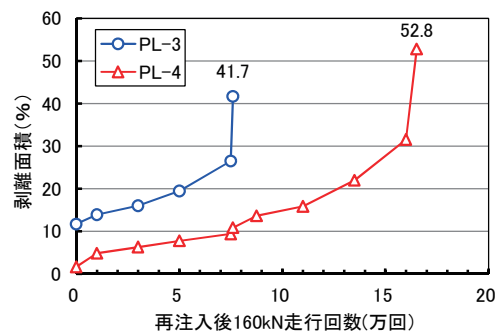


図-22 再注入後の走行回数と剥離面積

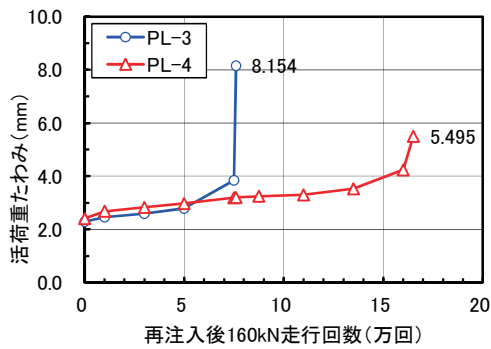


図-23 再注入後の中央点活荷重たわみ

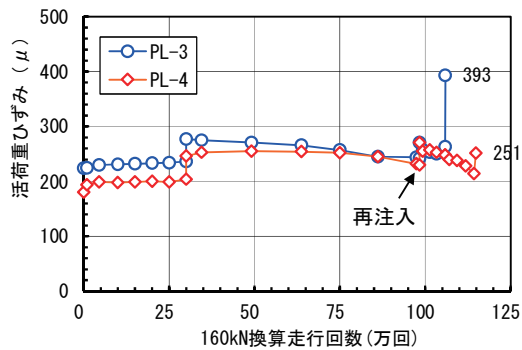


図-24 補強後の中央点鋼板活荷重ひずみ

破壊時の走行回数の比較では、再注入量が2倍と多いPL-4は、PL-3の約2倍の走行回数で破壊していることから、剥離部に十分再注入を行って未充填部を残さないことが重要と言える。

(4) 再注入後のたわみと鋼板ひずみ

再注入後の160kN 載荷走行回数と床版中央点のたわみの関係を図-23に示す。再注入直後の活荷重たわみは、再注入直前の活荷重たわみ量2.63mmから13%減の2.289mmであり、PL-4は3.169mmから24%減の2.409mmの補修効果であった。接着材再注入時の剥離面積が小さいかったPL-3の破壊時のたわみは8.154mmであり、押し抜きせん断破壊領域は、図-20(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-4の破壊領域は、床版中央を含む範囲が広いいため、中央点のたわみはPL-3に比べ小さい5.495mmであり、この値は補強前の最終たわみ量約6mmと概ね一致する。

底鋼板の主鉄筋方向床版中央点の活荷重ひずみは、図-24に示す。再注入直後は、補修効果によってひずみ量がやや増加している。破壊時のひずみは、たわみと同様にPL-4は、PL-3の約1.5倍

のひずみ量となっている。

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-5(a)~(d)は橋軸方向(走行ライン)の切断前の走行面(上面)とA-A切断面の状態である。写真-5(a)のPL-3の左端は端横桁側、右端は中央横桁側(合せ面側)であり、PL-4はPL-3の逆になる。

写真-5(a)(b)のPL-3および(c)(d)のPL-4の上面押し抜きせん断破壊面からほぼ45度の角度で床版下面に達するひび割れが確認できる。

写真-5(c)PL-4上面のタイヤ接地面の外縁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、写真-5(c)のタイヤ走行面の円弧形のひび割れの向きに着目すると、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のPL-3の青色、PL-4の黄色は、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。PL-4は、脆弱部の範囲が広く、写真-5(d)の中央から左にかけての水平ひび割れが影響していると推察できる。

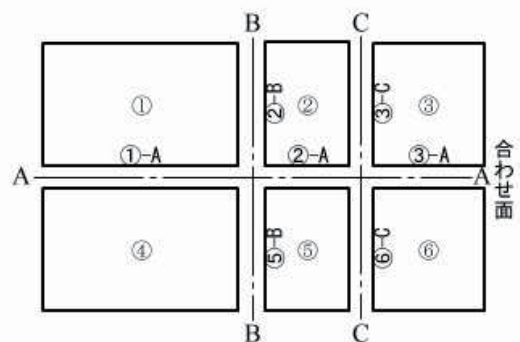
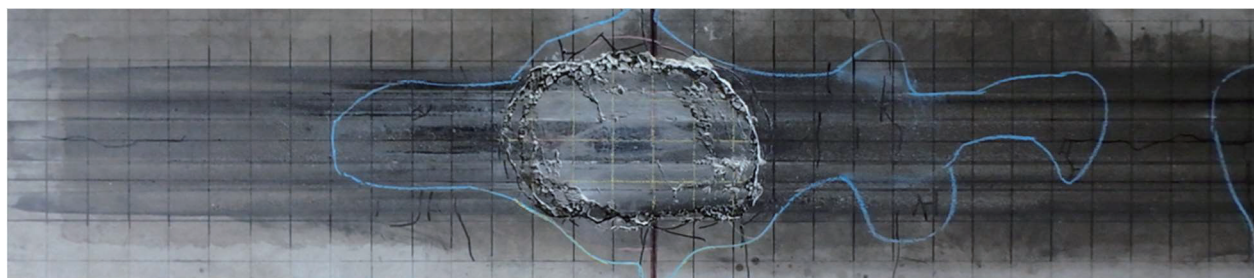


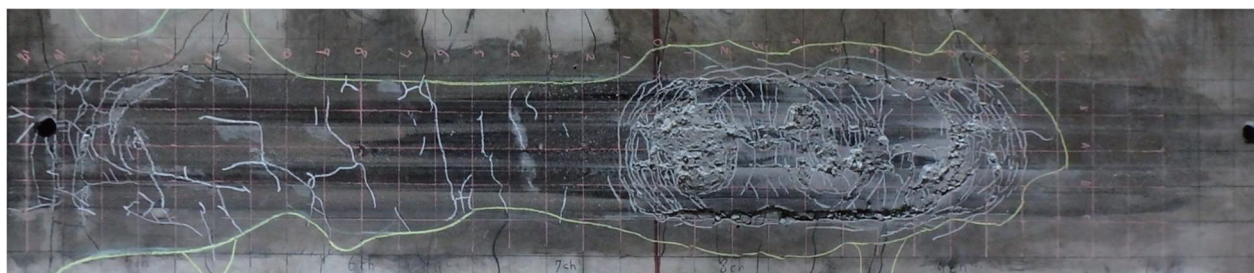
図-25 切断位置(PL-3)



(a) PL-3 上面



(b) PL-3 A-A 断面



(c) PL-4 上面



(d) PL-4 A-A 断面

写真-5 橋軸方向切断面



(a) PL-3 B-B 断面



(b) PL-3 C-C 断面



(c) PL-4 B-B 断面



(d) PL-4 C-C 断面

写真-6 橋軸直角方向切断面

(2) 橋軸直角方向の切断面のひび割れの検討

写真-6 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-6(a)(c)の B-B 断面を比較すると

PL-3 は、押抜き押し抜きせん断破壊の領域が狭く、PL-4 は押抜きせん断破壊の領域が広く、かつ中央部破壊面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



写真-7 PL-4の上鉄筋位置の水平ひび割れ

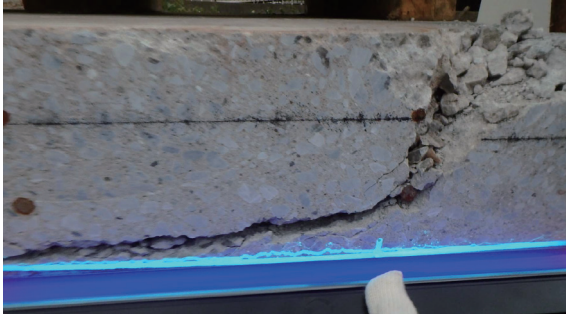


写真-8 少量の再注入樹脂(PL3①-A断面)

-6(c)(d)のPL-4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。

(3) 上鉄筋位置の水平ひび割れ

写真-7は、PL-4の走行ライン切断面の上鉄筋位置に発生している水平ひび割れの状態を示す。一方PL-3では、明確な水平ひび割れは確認できなかった。

(4) 接着及び再注入樹脂の状態

写真-8は、PL-3①-A断面の再注入樹脂の状態をブラックライト照射により確認している。補強時の接着材剥離部に再注入の樹脂が注入されているものの、少し奥のコンクリートひび割れ部にまで充填されていない状態が確認できた。

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-3およびPL-4の劣化度の推移はほぼ同一である。補強前の最大値

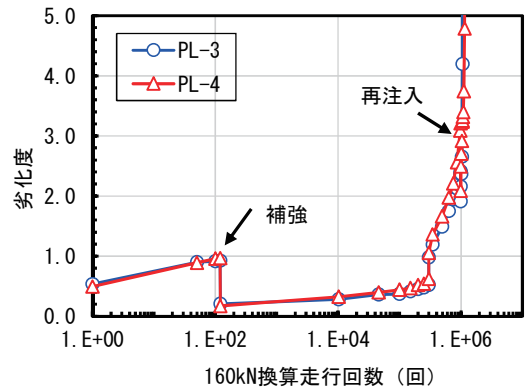


図-26(a) 走行回数と劣化度の関係

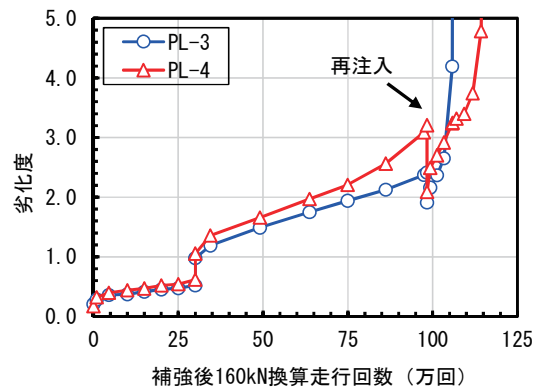


図-26(b) 補強後の劣化度の推移

はPL-4の0.97で使用限界の1.0に近い。補強後の劣化度はPL-3で0.21、PL-4で0.17まで低下(回復)した。その後の走行によりPL-3は、図-26(b)の30万回後の荷重180kN走行で劣化度は1.0に達し、160kN換算98.3万回で劣化度2.41に急増して接着材の再注入を行った結果、劣化度は1.91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100万回で劣化度2.37を超え、その後は急増して105.9万回で劣化度10を超えて破壊し終了した。

一方、図-26(b)のPL-4は補強直後まではPL-3と同一であったが剥離の進行が遅く、160kN換算で98.3万回時に劣化度は3.24に上昇して、剥離面積が47.2%において再注入を行っている。再注入後の劣化度は2.09まで回復し、その後の走行105万回で劣化度は3.24を超え、最終的には114.8万回で劣化度は6.63(剥離面積52.8%)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-3 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 0.93 に対して 0.21 に低減（回復）し、補強後 160 kN 換算 98.3 万回の剥離面積は 17.6%、その時点の劣化度は 2.41 で再注入した。

再注入は、室温 30℃ の高温の中で実施した。接着材の硬化が早く、再注入を 2 回行ったものの未充填の剥離面積は 11.7% も残り、劣化度は 1.91 とわずかの回復に止まった。以降の载荷で再び剥離が増加するに伴い劣化度も図-27(a) に示したとおり、剥離 30% で劣化度 5 を超えて増加した。

一方、図-27(b) は、PL-4 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 0.97 に対して PL-3 と同じ 0.17 に低減（回復）し、補強後 160kN 換算で 98.3 万回の剥離面積は 47.2%、その時点の劣化度は 3.21 で再注入した結果、未充填の剥離面積は 1.7% に減少し、劣化度は 2.09 に回復した。その後の走行により剥離の増加に伴って劣化度も増加、剥離 30% 越えて劣化度 5 を超えるパターンで終了している。

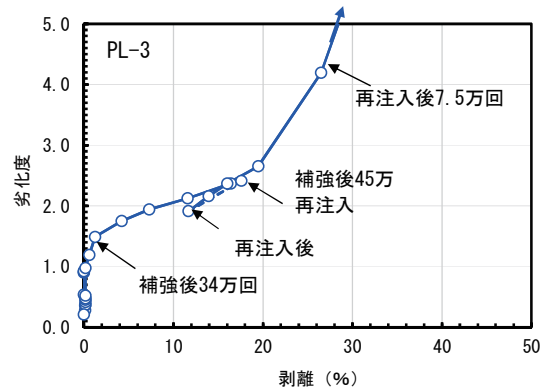


図-27(a) PL-3 剥離面積と劣化度の関係

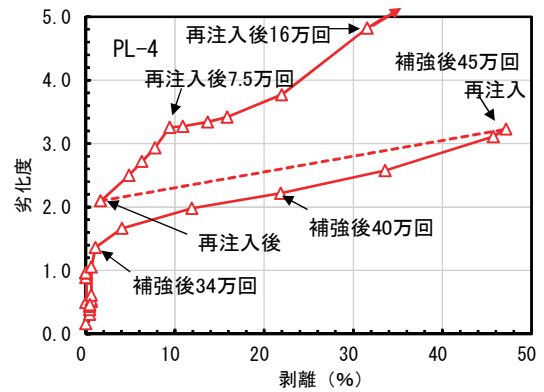


図-27(b) PL-4 剥離面積と劣化度の関係

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-9 に示す 980N (100kg f) 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载荷たわみの関係

重錘落下たわみと静的载荷たわみの 160kN 換算での比較を図-28(a) (b) に示す。いずれの床版も補強前（予備载荷）のたわみの値は、静的载荷に比べ重錘落下のたわみ値は 1/3~1/2 小さく推移し、安



写真-9 重錘落下たわみ測定状況

定していない。重錘落下たわみ法が安定して測定されない理由は、支持桁と床版の接触面の隙間の影響があると考えられる。補強後は 30 万回辺りまでは、静的载荷に比べ重錘落下たわみの方がやや大きく推移したものの、おおむね破壊まで一致している。したがって、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。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、有効な指標になる。

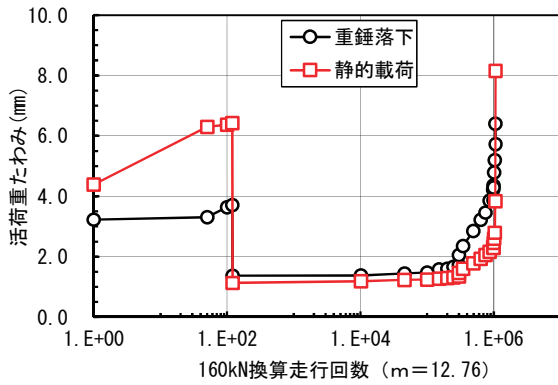


図-28(a) PL-3 錘落下と静的載荷のたわみ

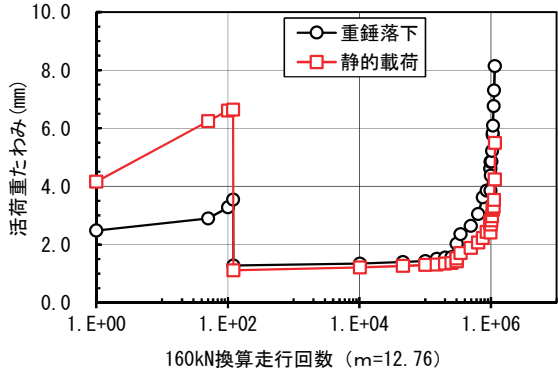


図-28(b) PL-4 重錘落下と静的載荷のたわみ

表-9 補強断面のたわみ計算値 (mm)

弾性係数比(n)	n7	n15	n31
RC断面	1.559	3.299	6.820
鋼板補強断面	1.000	1.672	2.750

(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」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 (E_s) = 200 kN/mm² と仮定する。鋼板補強断面のたわみ計算値は表-9に示す。

図-29(a)のPL-3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」のひび割れ発生直後の計算値3.299mmと概ね一致し、走行回数50~120回では「n31」引張り断面無視の計算値6.82mm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」の1.672mm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、30万回において「n15鋼板」を超え、98.3

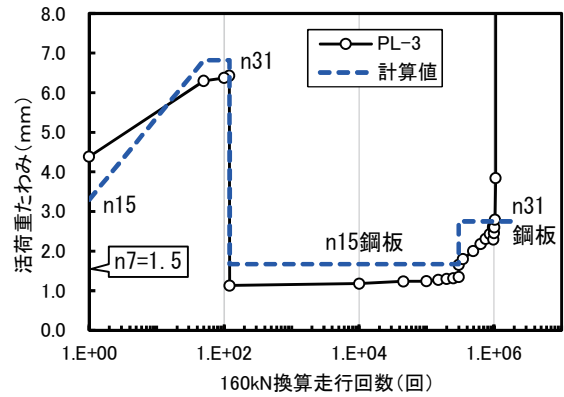


図-29(a) PL-3 活荷重たわみと計算値の関係

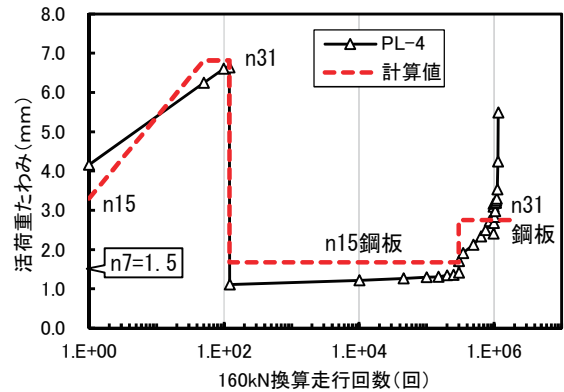


図-29(b) PL-4 活荷重たわみと計算値の関係

万回にてこの段階ではほぼ「n31鋼板」の計算値2.75mmに達したことから再注入により「n15鋼板」計算値1.672mmまで剛性は回復しなかった。剛性が回復しなかった理由は、高温下での再注入で未充填が11.7%も生じたことが影響している可能性が大きい。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2.75mmを超えた時点で破壊に至っている。

一方、図-29(b)のPL-4は、98.3万回の再注入直前の剥離面積は47.2%でたわみは3.169mmで「n31鋼板」計算値2.750mmをやや上回っていた。再注入後のたわみは2.409mmに低下して「n31鋼板」計算値2.750mmを下回り、補修効果が確認できる。その後の走行回数の増加によって「n31鋼板」の計算値2.75mmを超え最終的に補強前のたわみ約5mmを超えて破壊した。

これらの事実から、補強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。なお、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-15 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. まとめ

PL-3 と PL-4 の実験結果より、以下の知見が得られた。

- ① 健全度ランク d 相当のひび割れ密度約 15m/m²で鋼板接着補強を実施した結果、たわみは約17%に、主鉄筋ひずみは約 8.3%に低減させる補強効果が確認できた。
- ② 160kN 換算 98.3 万回で剥離面積 17.6% (PL-3) と剥離面積 47.2% (PL-4) で接着材を再注入した場合の補修結果は、PL-3 では 7.6 万回 (補強の 7.7%)、PL-4 では 16.5 万回 (補強の 16.8%) の延命効果が確認できた。
- ③ 夏季高温時 30℃ 超えでの再注入の施工では、接着材の硬化が早く、床版内部ひび割れへの充填不足が PL-3 では未充填面積 11.7% 生じた。一方、PL-4 は、未充填面積 1.7% であり、充填量の差が補修効果に影響を与える。したがって、エポキシ

接着材は、施工時の温度管理に制約があることから、施工時の温度に適した接着材を選定することも重要である。

- ④ 未補強床版のダメージを評価する松井ら⁶⁾の劣化度は、鋼板接着補強および再注入の補修効果の評価に適用できる。
- ⑤ 補強床版のダメージのモニタリングでは、たわみの推移を測定することが有効である。重錘落下たわみ法 (IIS) でのたわみのモニタリングは、静的載荷と相関があり有効である。
- ⑥ 床版のダメージの評価では、多層弾性理論による版のたわみは、弾性係数比 ($n=Es/Ec$) をパラメータに解析的に評価する方法が有効である。
- ⑦ 維持管理水準の設定は、剥離面積率とたわみの関係から適切な剥離面積率の閾値を設定することが合理的であり、橋梁の点検要領の健全度に反映させる必要がある。
- ⑧ 乾燥条件下での再損傷した鋼板接着補強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。今後さらに補強後の剥離のパラメータを増やす実験や水張実験などを実施するほか、実橋での剥離面積とたわみの関係についても検証を進めていく予定である。

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) 関口幹夫、石田教雄、栗塚一範 (2017)：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、平 29 都土木技術支援・人材育成センター年報、53-68
- 4) (社) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書 (昭和 39 年 6 月)
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 松井繁之 (1991)：橋梁の寿命予測、安全工学 Vol. 30、No.6、432-440