

## 5. 鋼板接着補強床版の上面ひび割れの走行疲労耐久性への影響

### Effect of Upper Surface Crack on Running Fatigue Durability of Steel Plate Bonded Bridge Slab

技術支援課 名児耶薫、○関口幹夫  
今吉計二（現 第五建設事務所葛飾西工区）

#### 1. はじめに

昭和 48 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、床版厚が薄く、配力鉄筋量が少ないなどの要因により、都道の過酷な交通環境下では疲労損傷し易い。建設局の管理橋梁では、昭和 40 年代後半から損傷した RC 床版に対して鋼板接着補強工法による補強対策が 60 橋ほど実施され、対策後既に 40 年以上経過するものも存在する。近年、定期点検時に接着した鋼板の剥離（浮き）が確認されているが、その原因は、特定されていない状況にある。

こうした中、当センターのゴムタイヤ式輪荷重走行試験機を活用して、主に鋼板剥離部への接着材再注入による補修効果の検証や剥離率による再補修の可否を判断するため、表-1 に示す実験シリーズを平成 27 年度から開始した。

本実験シリーズにおいて鋼板接着時の床版の損傷状態は、健全度ランク d 相当<sup>2)</sup>のひび割れ密度 15m/m<sup>2</sup>を標準としている。試験体 PL-1~PL-4 については、平成 29 年度までに再注入を実施する剥離面積率を 4 段階（17.6~68.2%）に変化させ乾燥状態での再補修効果を検討した結果、いずれの剥離面積率でもある程度の補修効果が確認される<sup>3) 4)</sup>。また PL-5 と PL-6 では、鋼板接着補強を行った直後から床版上面に水を滞水させた水張り条件下での実験により、乾燥条件下に比較して疲労耐久性が低下すること、また PL-7 と PL-8 では、無補強での実験により補修・補強効果を比較することを

平成 30 年度までに各々検討<sup>5) 6)</sup>を行った。

本稿では、令和元年度に実施した「水および上面ひび割れの影響と鋼板接着の補強効果」として試験体 PL-9 と PL-10 による実験結果を取り纏め報告する。

#### 2. 輪荷重走行実験の概要

##### (1) 試験体

表-1 実験シリーズの概要

実施年度	目的	試験体	ハンチ補強	補強後水張り	下面再注入	鋼板接着時のひび割れ密度 (m/m <sup>2</sup> )	再注入時の剥離面積 (%)	接着時特記
H27-H28	再注入の効果	PL-1	無	無	有	17.66	68.2	下地不良
		PL-2	無	無	有	14.84	33.4	通常施工
H28-H29	再注入の効果	PL-3	無	無	有	14.3	47.2	夏季高温
		PL-4	無	無	有	15.2	17.6	
H29-H30	水張りの影響	PL-5	有	有	無	15.45	—	通常施工
		PL-6	無	有	無	14.64	—	
H30	基準床版の確認	PL-7	—	—	—	17.2 (破壊時)	—	無補強
		PL-8	—	—	—	18.0 (破壊時)	—	
R1	上面ひび割れの影響	PL-9	無	有	有	14.9	1.9	下地良好
		PL-10	無	有	有	14.7	17.5	

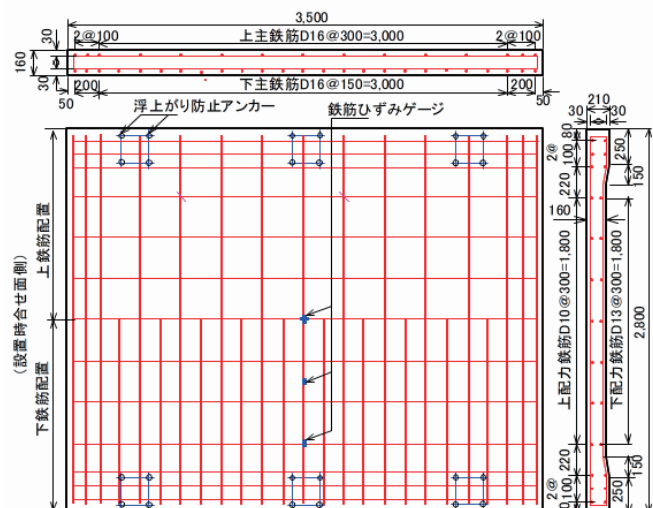


図-1 試験体の形状寸法

昭和39年道路橋示方書<sup>7)</sup>の基準に基づいて設計した試験体の形状寸法と配筋図を図-1に示す。形状寸法は、幅2.8m(支間2.5m)橋軸方向の長さは3.5m、床版厚16cmである。なお、試験体の形状寸法と配筋は、佐野ら<sup>8)</sup>の試験結果と比較できるように同一としている。

## (2) 使用材料

鉄筋はSD295AのD16、D13、D10および接着用鋼板はSS400板厚4.5mmであり、その試験結果を表-2に示す。コンクリートは、材齢28日目標強度25N/mm<sup>2</sup>とする生コン(18-8-20-N)を使用した。コンクリートの配合表を表-3に、特性値を表-4に示す。図-2に示すコンクリートの乾燥収縮ひずみは、試験体と同じ室内環境下でコンタクトストレーンゲージ法による測定結果である。実験終了時(材齢250日)の収縮ひずみは約300μである。なお、質量減少量は約250gであった。

鋼板接着用接着材は、エポキシ樹脂でパテ・シ

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	359.2	507.1	182.1	20.9
鉄筋D13	364.3	529.9	174.2	20.7
鉄筋D16	347.6	500.1	178.2	16.3
接着鋼板	333.0	457.0	-	37.0

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

w/c=66.9

表-4 コンクリート特性値(材齢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	10.5 cm	4.7 %	20 mm	25.3	28.9	0.20	2.39
2				26.0	29.7	0.19	2.26
3				26.2	28.8	0.21	2.10
平均				25.8	29.1	0.20	2.25

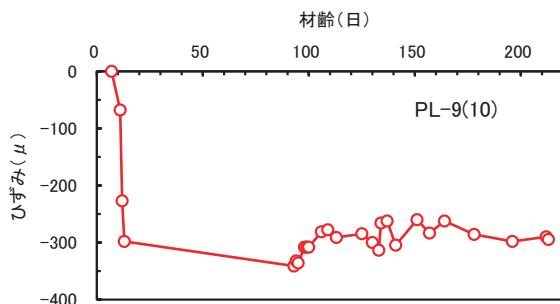


図-2 乾燥収縮ひずみ

ール材の品質を表-5に示す。注入用接着材の品質を表-6に示す。

## (3) 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する。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。なお、補強後11.3万回から再注入直前の37.5万回まで荷重を180kN・200kN・225kNに上げ、PL-9

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	-	1.13±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 <sup>2</sup>	60.0以上	82.2
圧縮弾性率	JIS K7208	N/mm <sup>2</sup>	1500~3500	2350
曲げ強さ	JIS K7203	N/mm <sup>2</sup>	50.0以上	82.2
引張強さ	JIS K7113	N/mm <sup>2</sup>	35.0以上	57.4
衝撃強さ	JIS K7111	KJ/m <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	10.0以上	16.4

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	-	1.70±0.10	1.7
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	73
圧縮降伏強さ	JIS K7208	N/mm <sup>2</sup>	60.0以上	81.3
圧縮弾性率	JIS K7208	N/mm <sup>2</sup>	4000~8000	6790
曲げ強さ	JIS K7203	N/mm <sup>2</sup>	40.0以上	49.9
引張強さ	JIS K7113	N/mm <sup>2</sup>	20.0以上	33.8
衝撃強さ	JIS K7111	KJ/m <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	11.0以上	15.7

試験条件: 20°C7日間養生後20°Cにて測定



写真-1 輪荷重走行装置

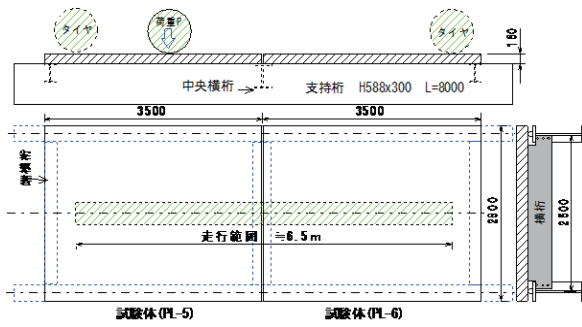


図-3 試験体の配置図

のみ再注入後 43.5 万回から 56.1 万回まで同様の階段荷重方式で損傷を促進した。

### 3. 予備荷重によるひび割れの導入

#### (1) ひび割れの導入

建設局における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。このため本実験での初期ひび割れ導入は、ランク d のひび割れ密度が約 15m/m<sup>2</sup>となる走行回数を目指した。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・進展状況を図-5 に示す。ひび割れの発生パターンは、版中央を中心にほぼ偏りなく発生・進展した。走行回数とひび割れ密度の関係は、図-6 に示すとおりであり、PL-9 は 1 回で 3.19m/m<sup>2</sup>、300 回で 14.93m/m<sup>2</sup>に増加した。一方、PL-10 は 1 回で 2.62m/m<sup>2</sup>であったが 300 回で 14.69m/m<sup>2</sup>となり、いずれも 300 回で目標とするひび割れの導入を完了した。なお、ひび割れ発生荷重は、目視観察により両試験体ともに 1 回目の静的荷重 100kN で確認した。上面では、走行面を横断するひび割れは発生していなかった。

#### (2) ひび割れ導入時のたわみの推移

床版中央の総たわみと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 回のみやや多く、50 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、橋軸直角方向の活荷重たわみ分布を図-8(a) (b) に示す。PL-9 の 1 回の中央たわみは 3.634 mm、PL-10 は 3.695 mm。50 回走行時はいずれも 5 mm 程度であり、300 回走行時はいずれも約 5.9 mm である。たわみ

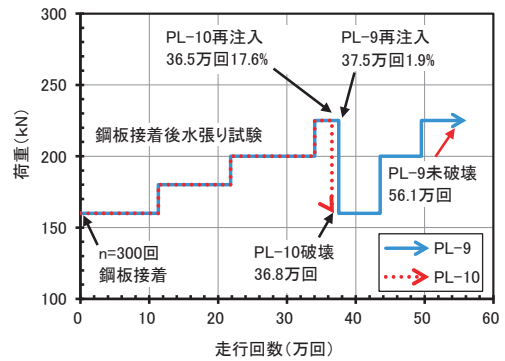


図-4 荷重プログラム

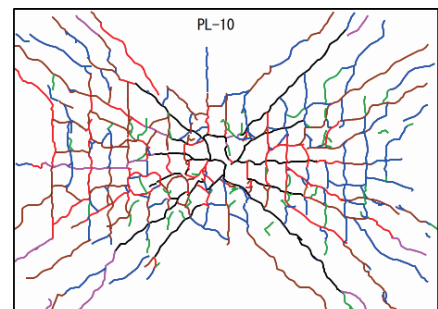
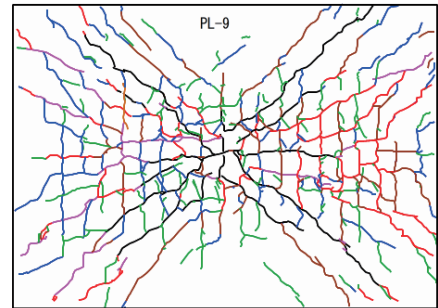


図-5 下面のひび割れ導入 (見下げ図)

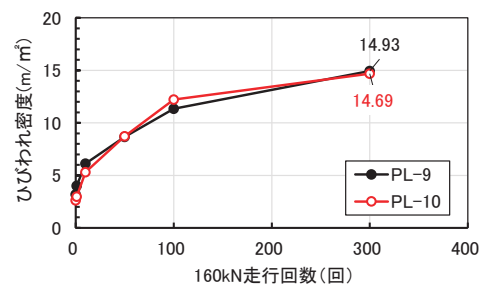


図-6 160kN 走行荷重ひび割れ密度の推移

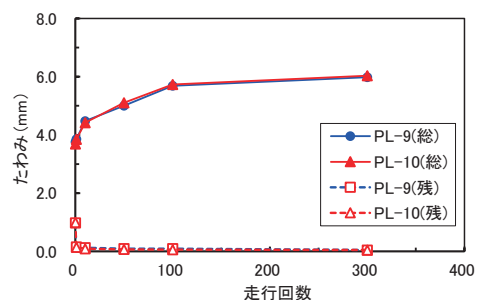


図-7 中央たわみの推移

の分布形状は、いずれの試験体も左右対称である。

厚板理論によるたわみ計算値との関係は、両試験体とも1回走行後は、ひび割れ発生直後を想定した「n=15」たわみ計算値とほぼ一致し、走行300回では、ひび割れが十分進展した状態の「n=31」たわみ計算値より約11%小さい測定値である。

### (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、松井ら<sup>9)</sup>が提案しているRC床版の活荷重たわみによる劣化度

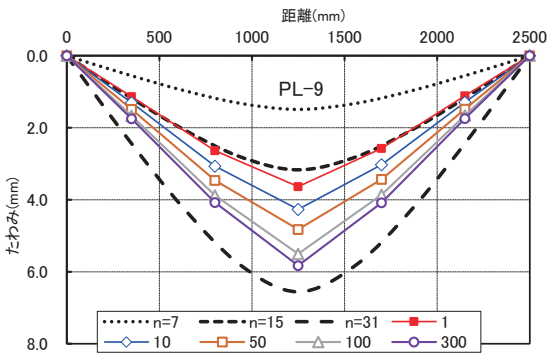


図-8(a) PL-9のひび割れ導入時たわみ分布

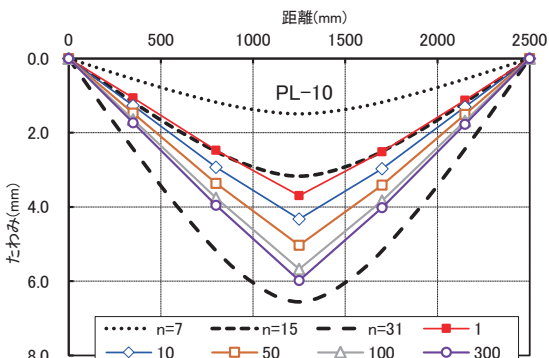


図-8(b) PL-10のひび割れ導入時たわみ分布

表-7 断面の特性値

弾性係数比 ( $n=Es/Ec$ )	床版断面の状態	RC床版 (160mm)	
		弾性係数 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 (%)
n=7	全断面有効	28.00	0.18
n=15	ひび割れ発生直後	13.07	0.20
n=31	引張断面無視	6.32	0.20

表-8 予備荷重におけるRC床版の劣化度

たわみ計算値		走行回数	PL-9 W (mm)	PL-10 W (mm)
Wo (mm)	n			
1.49	n=7	0	2.75	2.67
3.18	n=15	1	3.63	3.7
6.56	n=31	300	5.83	5.98
走行回数300回時 計測値		劣化度 $D\delta$	0.86	0.89
		ひび割れ密度 (m/m <sup>2</sup> )	14.93	14.69

評価方法である式(1)を適用した。

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

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)

たわみの計算は、三次元弾性論に基づく厚板理論(多層版解析)を用いた<sup>10)</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する。ここでは床版の剛性を便宜的に弾性係数比 ( $n=Es/Ec$ )として取り扱い、表-7に示す断面の状態を仮定する。なお、走行疲労で十分にひび割れが発生・進展した状態は、 $n=31$ として扱っている。また、ポアソン比は、全断面有効時0.18、ひび割れ断面0.2と仮定する。

劣化度の計算結果を表-8に示す。劣化度はPL-9では0.86、PL-10は0.89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0.875では、ほぼ使用限界状態と評価できる。

中央たわみの1回(初期値)と300回走行後のたわみ測定値と計算値の関係を図-9に示す。1回(初期値)では、荷重100kNでひび割れの発生を目視で確認しており、剛性は荷重50~80kN時まで $n=7$ 相当の全断面有効のたわみ計算値と一致し、160kN載荷時にはひび割れ発生直後の $n=15$ のたわみ計算値よりやや大きく、 $n=31$ のたわみ計算値との中間に相当した。一方、300回時では、ひび割れ

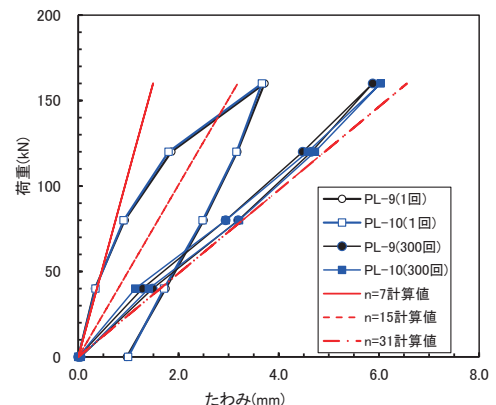


図-9 予備荷重のたわみ測定値と計算値

断面無視相当  $n=31$  のたわみ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を図-10(a)(b)に示す。1回(初期値)の最大値は1100

$\mu$  前後である。走行100回以後のPL-9とPL-10のひずみ分布は、ほぼ同じ分布形であり、300回走行の最大値は、PL-9は956 $\mu$ であり、PL-10は1091 $\mu$ である。

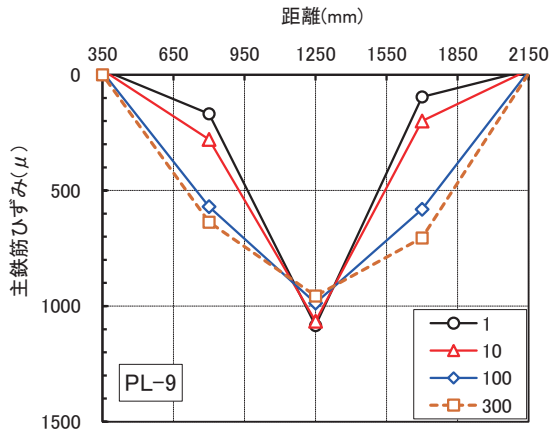


図-10(a) PL-9の主鉄筋ひずみ分布

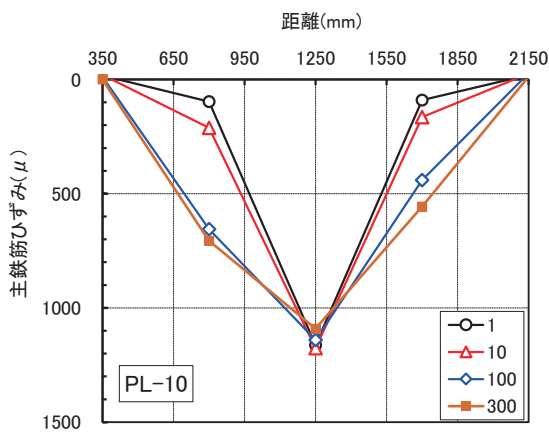


図-10(b) PL-10の主鉄筋ひずみ分布

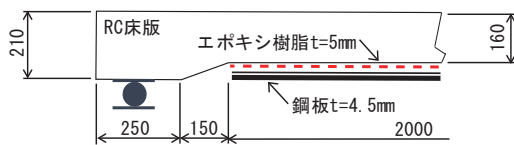


図-11 鋼板接着の仕様(単位 mm)

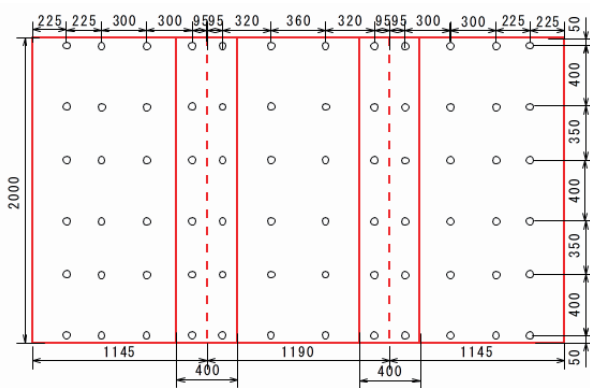


図-12 鋼板接着のアンカー配置図

#### 4. 鋼板接着補強方法

300回走行のひび割れ導入後に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-11に示すハンチ補強なしである。具体的な鋼板接着の割り付けは、図-12に示す3分割とし、添接板の重ね幅は400mmである。

施工手順では、床版下面を写真-2(a)に示すようにサンダーによるケレンは、PL-5・PL-6の疲労耐久性への水の影響(ひび割れからの浸透)を抑制するため、補強鋼板との付着力を高め剛性が上がるよう床版下面の素地調整(地肌を完全露出)を通常の約2倍程度の時間を掛けて行った。

その後、補強鋼板のアンカーの穴あけ $\phi 10.5$ mm、アンカーM10 $\times$ 80mmを設置した。接着材の厚さを確保する厚さ5mmのスペーサを所定量設置し、アンカーで鋼板をセットして周囲をシール材でシール



(a) サンダーケレン



(b) 鋼板取付け接着材圧入  
写真-2 鋼板接着施工状況

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0.03N/mm<sup>2</sup>以下で注入パイプ(φ10mm)から、鋼板とコンクリート面の隙間に充填した。(写真-2(b))

### 5. 水張り試験方法

鋼板接着後は約10日間の養生を行い、床版上面に水張り用のプラスチック製の目地棒(高さ20mm幅50mm)を額縁状に接着材で設置した。写真-3に示す走行面を除く範囲にスポンジ製養生シートを敷設して注水を行った。水張りは、1日1~2回約10ℓの水道水を注水して、走行面がわずかに滞水している状態とした。

水張り試験開始前の床版上面のひび割れは、水張り領域外に数か所発生していたが、輪荷重の走行面におけるひび割れや貫通ひび割れは確認されなかった。



写真-3 水張り試験状況

### 6. 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

剥離面積は、打音点検で剥離領域を判定して図形ソフトにより描写し算出した。剥離面積率(%)は(剥離面積/鋼板面積×100)で求めた。

走行回数と剥離面積率の関係を図-13に、剥離の進展状況を図-14(a)(b)に、補強後の載荷荷重、走行回数および剥離面積の関係は表-9に示す。

走行11.3万回までは160kN載荷、走行21.8万回までは180kN載荷、走行34万回までは200kN載荷、34万1回以降は再注入まで225kN載荷で走行した。表-9の160kN換算走行回数は、RC床版の松井<sup>11)</sup>の式(2)で換算している。

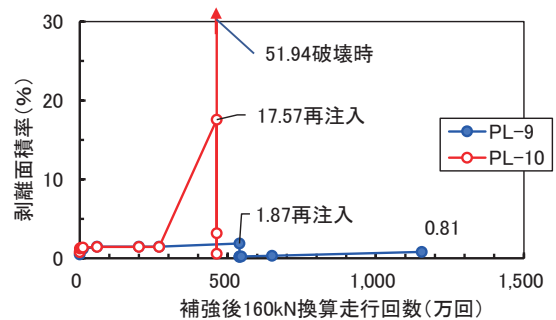


図-13 走行回数と鋼板剥離面積率(%)

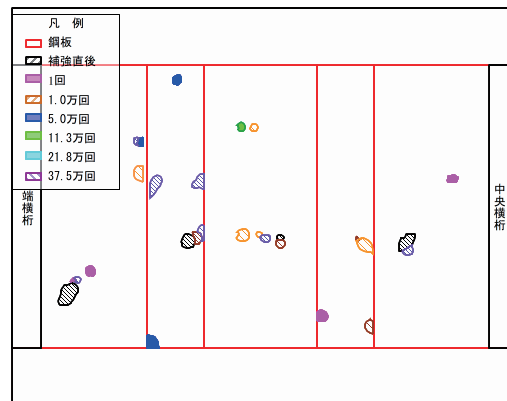


図-14(a) PL-9 鋼板剥離図(見下げ図)

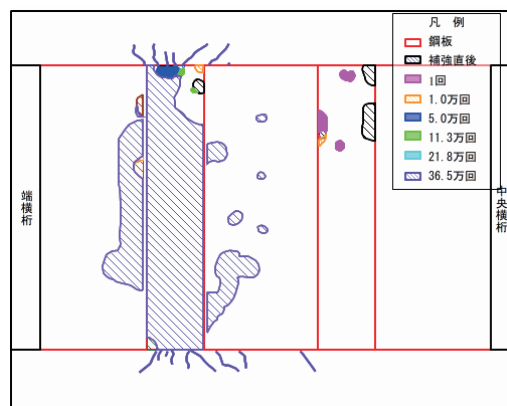


図-14(b) PL-10 鋼板剥離図(見下げ図)

表-9 鋼板接着後の走行回数と剥離面積

載荷荷重(kN)	160	160	160	180	200	225
PL-9走行回数	0	10,000	113,000	218,000	340,000	375,000
160kN換算回数	0	10,000	113,000	584,949	2,688,397	5,400,748
PL-9剥離面積(%)	0.50	0.97	1.18	1.46	1.46	1.87
PL-10走行回数	0	10,000	113,000	218,000	340,000	365,000
160kN換算回数	0	10,000	113,000	584,949	2,688,397	4,625,791
PL-10剥離面積(%)	0.80	1.24	1.37	1.45	1.45	17.57

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

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)

160kN 荷重走行 11.3 万回時点で剥離面積率は、PL-9 で 1.18%、PL-10 で 1.37%であった。水張り試験で行われた PL-5 および PL-6 と比べて剥離の進展が認められないことから、荷重を 180kN、200kN と階段荷方式に上げた。しかしながら、34 万回時点 PL-9 で 1.46%、PL-10 で 1.45%と微増であり、それ以降最大荷重の 225kN で荷重した。

PL-9 は 160kN 換算走行約 540 万回でも床版上面のひび割れがほとんど確認されず面積率も 1.87%と微増で水の影響を受けない状態であった。一方、PL-10 は 160kN 換算走行約 462.5 万回で写真-4 に示す床版のハンチ部にひび割れが発生し、剥離面積率は 17.6%まで増加した。これ以上走行を続けるとハンチ部を起点として疲労破壊する恐れがある状態であったことから、PL-9 および 10 は、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。



写真-4 PL-9 鋼板端部ハンチの破壊

## (2) 補強後のたわみ

走行回数と床版中央の活荷重たわみの関係を図-15 に示す。PL-9 は、ひび割れ導入時の活荷重たわみの最大値は 5.829 mmであったが、補強後は 1.014 mm ( $1.014/5.829=17.4\%$ ) に低下して補強効果が認められる。補強後 160kN 荷重走行 113,000 回までは鋼板の剥離面積率は 1.18%で剥離の大きな進展はなかった。この時点の活荷重たわみの最大値は 1.040 mmであり、補強直後の走行 1 回で 1.021 とほぼ同じであり進展がなかった。これ以降、階段荷方式で荷重を 225kN まで上げ、375,000 回 (160kN 換算走行 540 万回) まで走行し

たが、たわみの最大値は 1.032 mm (160 kN 換算)、剥離面積率は 1.87%とほぼ進展がなかった。

一方、PL-10 の補強前は 5.984 mmであったが補強後は 1.051 mm ( $1.051/5.984=17.6\%$ ) に低下した。補強後 160kN 荷重の走行 113,000 回までは鋼板の剥離面積率は 1.37%で剥離の大きな進展はなかった。たわみも 1.079mm と小さく、補強直後の走行 1 回の 1.052 と同じで進展がなかった。これ以降 PL-9 と同様に荷重を行い、365,000 回 (160kN 換算走行 462.6 万回) では、剥離面積率は 17.57%となり、たわみの最大値は 2.725 mm (160 kN 換算 1.937 mm) で補強後の 1.79 倍の増加にとどまり、この時点で再注入を行うことにした。

補強後のたわみ分布を図-16(a) (b) に示す。PL-9

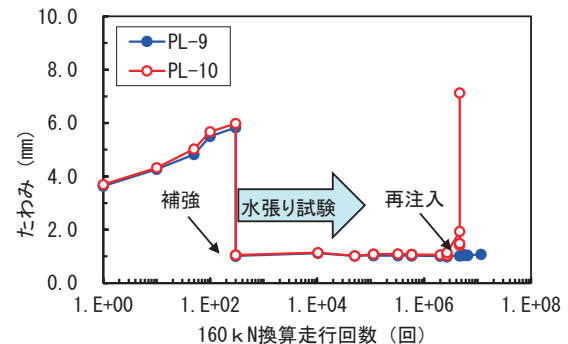


図-15 中央たわみの推移

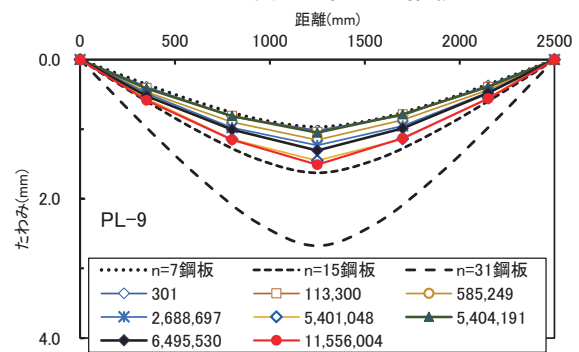


図-16(a) PL-9 たわみ分布

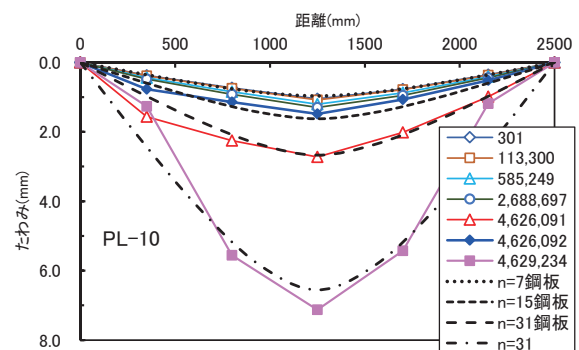


図-16(b) PL-10 たわみ分布

の補強後のたわみ分布は、実験終了時まで計算値  $n=7$  鋼板と  $n=15$  鋼板の間に分布する結果となっている。一方、PL-10 は、再注入時点で計算値  $n=31$  鋼板と一致し、試験終了時は押し抜きせん断破壊であり、鋼板なしの  $n=31$  計算値とほぼ一致した。

### (3) 補強後の鉄筋及び鋼板ひずみ

図-17(a) (b) (c) は、主鉄筋活荷重ひずみの補強前と補強後の推移と分布を示す。補強前の主鉄筋ひずみは平均約  $1200\mu$  であったものが鋼板接着により約 6% の  $72\mu$  (PL-9 と 10 の平均値) に低減し、再注入以降も  $200\mu$  を超えることがなく補強効果が確認できる。また、配力鉄筋については、図

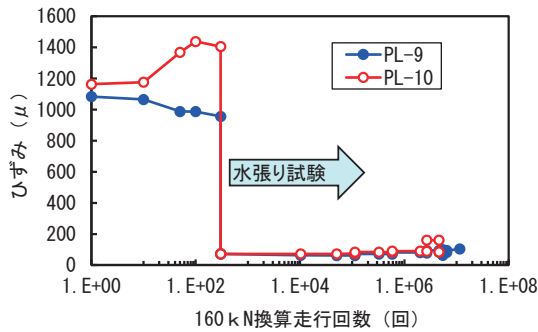


図-17(a) 主鉄筋ひずみの推移

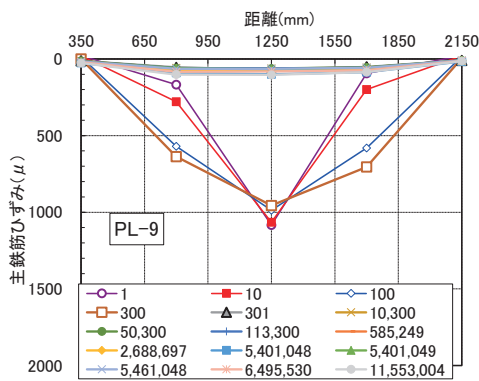


図-17(b) PL-9 主鉄筋ひずみ分布

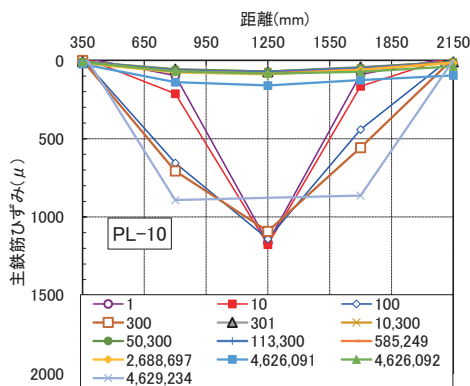


図-17(c) PL-10 主鉄筋ひずみ分布

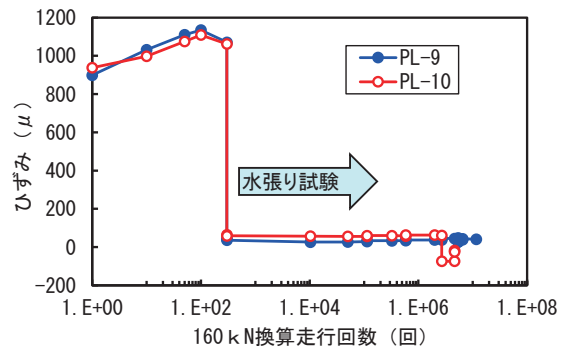


図-17(d) 配力鉄筋ひずみの推移

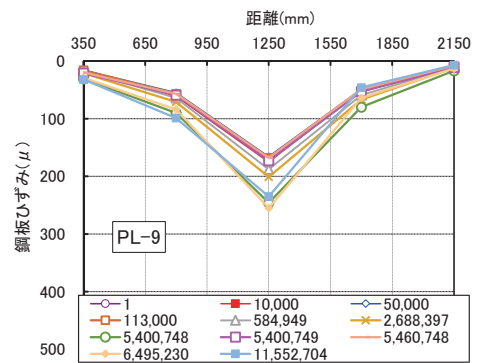


図-18(a) PL-9 補強鋼板ひずみ分布

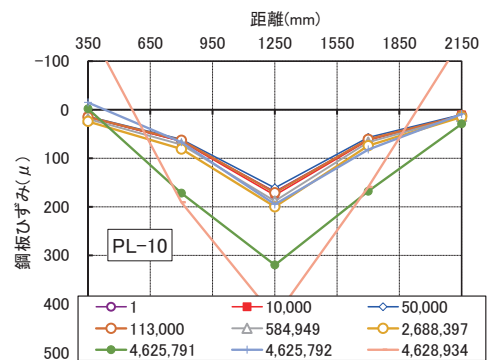


図-18(b) PL-10 補強鋼板ひずみ分布

-17(d) に示すように補強前約  $1067\mu$  だったものが補強後 4.5% の約  $48\mu$  に低減する補強効果が確認できた。

補強鋼板の主鉄筋方向ひずみ分布を図-18(a) (b) 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  $200\mu$  弱であり、分布形状は左右対称である。また、剥離の進展が微増した走行 34 万回 (160kN 換算 268.8 万回) までは補強直後の形状を維持している。

## 7. 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



補強鋼板の剥離（または浮き）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を採用した（写真-5）。注入孔には注入用インジェクションを接着材（パテ材）で取り付けた（写真-6(a)）。PL-9 は図-19(a)に示す 73 か所に、PL-10 は図-19(b)に示す 120 か所にイン



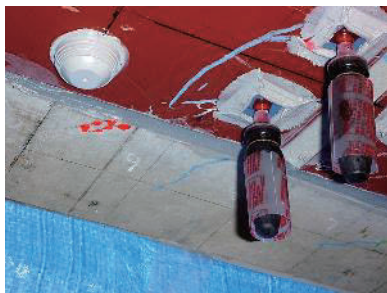
写真-5 接着材再注入状況



(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-6 接着材再注入施工概要

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-6(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-6(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。

一回目の再注入を行い、接着材の硬化後、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。計二回の再注入量は PL-9 ではインジェクション 42 本で 1.22 kg (未充填 0.18%)、PL-10 ではインジェクション 55 本で 1.72kg (未充填 0.57%) であった。

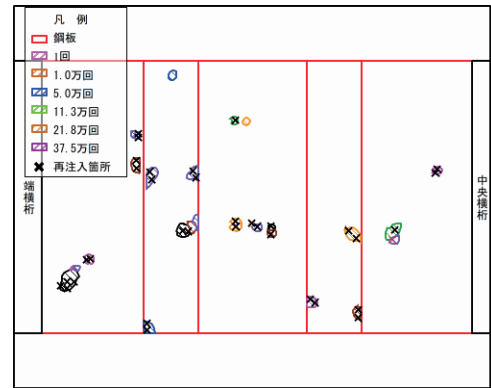


図-19(a) PL-9 剥離部再注入箇所(×印)

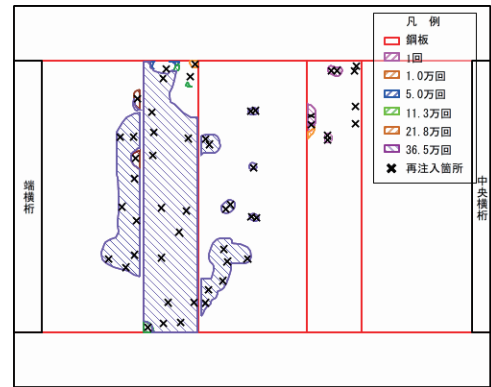


図-19(b) PL-10 剥離部再注入箇所(×印)

## (2) 再注入後の走行回数と上面ひび割れ

未破壊となった PL-9 について、ひび割れなどの床版上面の損傷状況を図-20(a)に示す。PL-9 の疲労進展状況は、再注入前に床版中央部でコンクリートの浮きが一部確認された。その後、実験終了まで 160kN 換算走行約 615 万回走行したが、上面の浮きが少し進展した程度で、またひび割れは橋軸方向に一部確認された程度であった。

破壊した PL-10 の疲労破壊状況を図-20(b)に示す。PL-10 の床版上面は、写真-7 に示すタイヤ走行行が 5~15mm 程度押し込まれている。再注入後の破壊回数は、160kN 載荷走行で 3,143 回であった。また、補強後から破壊までの走行回数は、160kN 換算走行約 463 万回であった。乾燥状態で行った PL-1~4 と比べ約 4 倍の疲労耐久性があることが確認された。



写真-7 PL-10の破壊状況

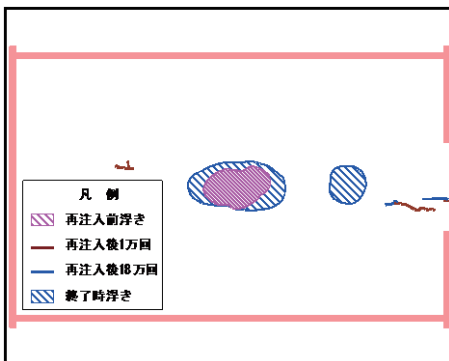


図-20(a) PL-9再注入後の走行面の破壊状況

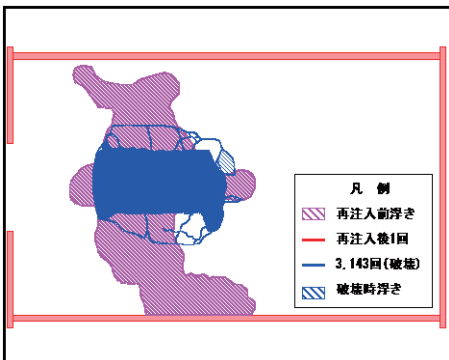


図-20(b) PL-10再注入後の走行面の破壊状況

### (3) 再注入後の走行回数と補強鋼板の剥離

再注入後の補強鋼板の剥離は、PL-9 では補強後の図-14(a) とほぼ同様の箇所で剥離が生じ、図-21(a) に示す 160kN 換算走行約 615 万回走行した時点で剥離面積率 0.81% と少なく健全な状態で実験を終了した。一方、PL-10 では補強後の図-14(b)

に示したハンチ付近に発生したひび割れの床版中央部から剥離が進展する図-21(b) に示すパターンが見られた。再注入後の剥離面積率の推移は、図-13 に示すとおり走行前の 0.57% から走行回数 1 回で 3.17% と剥離面積率が急増し、再注入した箇所でハンチ部ひび割れ発生した床版支間中央部あたりで剥離が生じた。その後、走行回数 3,143 回で走行回数 1 回の剥離箇所を中心に 51.94% まで剥離が急速に広がり押抜きせん断破壊が生じた。その要因としては、再注入前に確認された床版上面の変状（浮き）は、内部水平ひび割れの発生であり、再注入を行ったがすでに床版内部では、疲労が進行した状態となっていたと推察される。

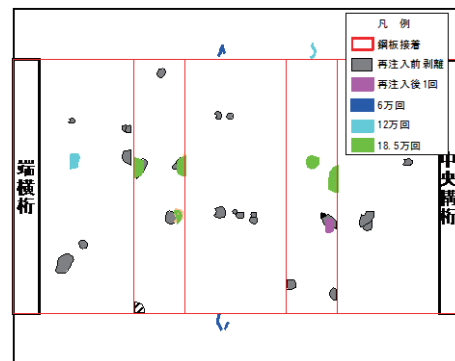


図-21(a) PL-9再注入後の鋼板剥離図

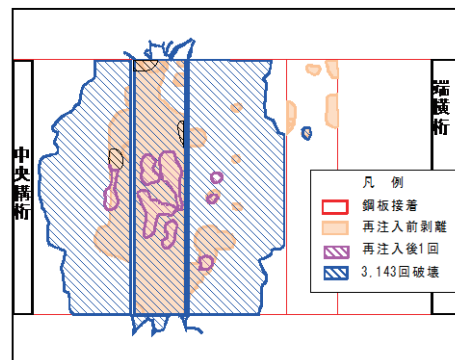


図-21(b) PL-10再注入後の鋼板剥離図

### (4) 再注入後のたわみと鋼板ひずみ

再注入後の 160kN 換算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、PL-9 では再注入時に剥離がほとんどなかったこともあり実験完了時でもたわみ量の増加と剥離面積の拡大が確認されなかった。一方、PL-10 で再注入直前の活荷重たわみ量 1.937 mm から 17% 減の 1.416 mm と補修効果が確認され、破壊

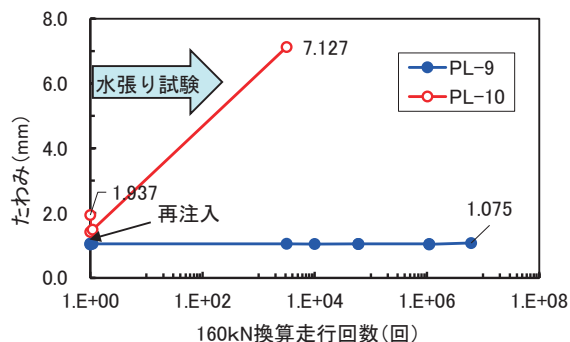


図-22 再注入後の中央点活荷重たわみ

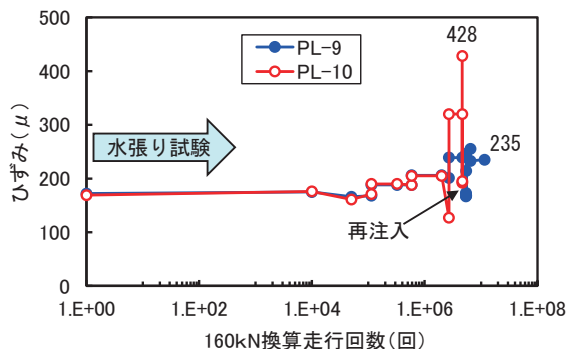


図-23 補強後の中央点鋼板活荷重ひずみ

時のたわみは 7.127 mm であった。

補強鋼板の主鉄筋方向床版中央点の活荷重ひずみを図-23 に示す。再注入前後は、PL-9 で 246 $\mu$  から 171 $\mu$  と PL-10 で 320 $\mu$  から 192 $\mu$  とやや減少して若干の補修効果がみられた。また、試験終了時の PL-9 のひずみは 235 $\mu$ 、破壊時の PL-10 のひずみは約 2 倍の 428 $\mu$  となっている。これは、試験の中断と再注入したことによる耐荷力の回復や鋼板と床版下面の付着力が高く鋼板全体で静的荷重を受けていたことなどが考えられる。

## 8. 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-24 に示す位置で 6 分割にダイヤモンドカッターにより切断した。写真-8(a)～(d) は切断前の走行面(上面)と橋軸方向の A-A 切断面を矢印方向から見た状態である。写真-8(a)の PL-9 の左端は端横桁側、右端は中央横桁側(合せ面側)であり、PL-10 は PL-9 の逆になる。

写真-8(c)の PL-10 上面の押抜きせん断破壊の箇所(骨材化)は、橋軸方向中央部から中央横桁寄りに分布している。通常であればひび割れは上面

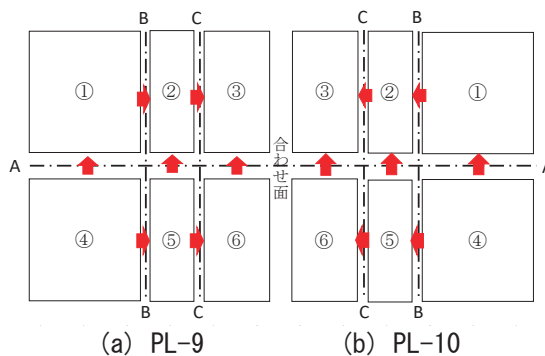


図-24 切断位置

からほぼ 45 度の角度で床版下面に達する。写真-8(d)の PL-10 では、破壊範囲内ではほぼ垂直に近いひび割れが数箇所発生している。

### (2) 橋軸直角方向の切断面のひび割れの検討

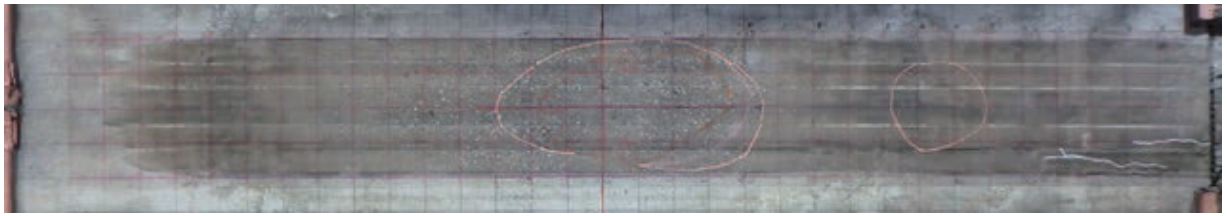
写真-9(a)～(d)は、図-24 の橋軸直角方向の中央 B-B 切断面と C-C 切断面を矢印方向から見た状態である。写真-9(a) (b)の PL-9 では破壊に至っていないこともあり、ほとんどひび割れが発生していない状態であった。また、床版上面で浮きが確認された B-B 断面では、上側主鉄筋付近に水平ひび割れが確認された。

一方、写真-9(c) (d)の PL-10 では、通常、床版上面の抜け落ちた領域からほぼ 45 度の角度でひび割れが下面まで達するが、C-C 断面ではひび割れが水平に伸び、鋼板接着補強されていないハンチ部まで延びている。また、B-B 断面では再注入前にハンチ部に発生したひび割れと繋がるひび割れが確認された。これらの要因としては、補強鋼板と床版下面の付着力が高いため、鋼板接着補強床版の耐荷力が想定より強いことで、鋼板で補強されていないハンチ部が終点となるひび割れの進展が発生したと考えられる。また、輪荷重の走行位置の上側鉄筋付近から水平ひび割れが発生し、そこから水平にひび割れが外側に広がっていき破壊に至ったと推察される。

## 9. 劣化度と剥離面積の関係

### (1) 劣化度の推移

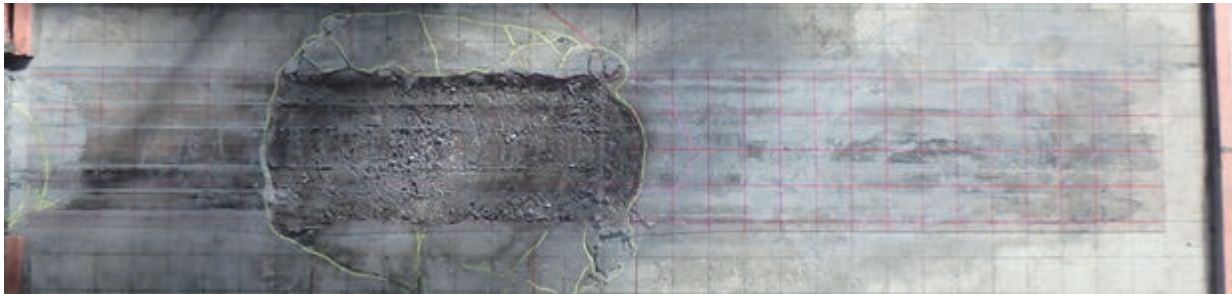
補強前→補強後→再注入後の全走行回数と劣化度の関係を図-25 示す。補強前の劣化度は、厚板



(a) PL-9 上面



(b) PL-9 A-A 断面



(c) PL-10 上面

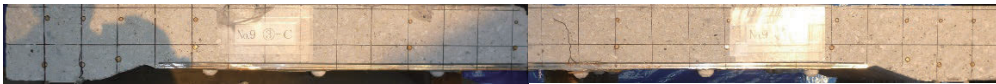


(d) PL-10 A-A 断面

写真-8 橋軸方向切断面



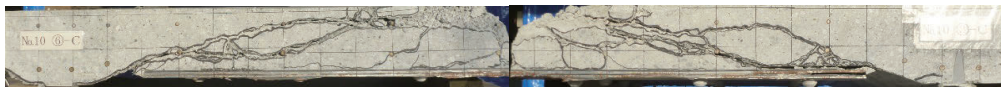
(a) PL-9 B-B 断面



(b) PL-9 C-C 断面



(c) PL-10 B-B 断面



(d) PL-10 C-C 断面

写真-9 橋軸直角方向切断面

理論の1層版のたわみ計算値であり、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層版）解析によるたわみ計算値である。

補強前のPL-9およびPL-10の劣化度の推移はほぼ同一である。補強前の最大値はPL-9で0.86、PL-10で0.89と使用限界の1.0に近い。補強後の劣化度はPL-9で0.04、PL-10で0.06まで低下（回復）した。

補強後、PL-9は、160kN換算540万回にて劣化

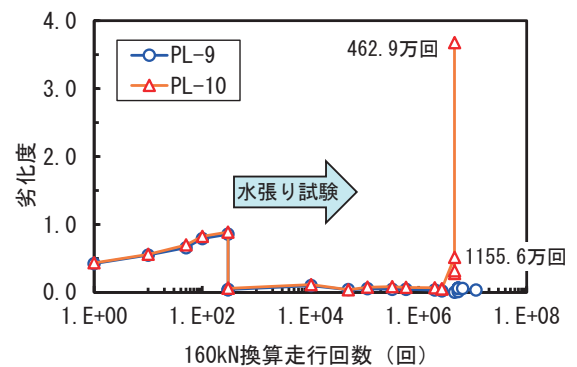


図-25 走行回数と劣化度の推移

度 0.01 で接着材を再注入し、その後劣化度は 0.06 程度で推移し、約 1156 万回まで走行したが破壊に至らず、劣化度 0.04 で走行終了した。一方、PL-10 は 160kN 換算走行約 269 万回までは PL-9 と同一であったが、約 463 万回で劣化度 0.52 に達した。その際、鋼板接着補強を行っていないハンチ部にひび割れが発生したため、走行をやめて再注入をした。再注入後、劣化度 0.28 と低下（回復）したが、その後、160kN 載荷での走行 3,143 回で劣化度 3.68 に急増して押抜きせん断破壊に至った。

## (2) 劣化度と剥離の関係

図-26 は、補強後の剥離と劣化度の関係を示す。PL-9 の劣化度は、補強・再注入・実験終了まで 0.06 以下で推移し、剥離面積率は補強後 1.87%、再注入後 0.81% までになった。補強後水張り試験を行ったが、床版上面からの水の影響がなく、乾燥状態で走行した PL-1~4 と比べても耐力が高く、補強効果が大きい試験体となった。

一方、PL-10 の補強後の劣化度は、160kN 換算走行 462.6 万回時点で剥離面積率は 17.6%、劣化度は 0.52 であった。その後、再注入した結果、未充填の剥離面積率は 0.6% に減少し、劣化度は 0.28 に回復した。再注入後、走行 3,143 回で上面ひび割れへの透水による水の影響を受け、剥離面積率と劣化度が急速に増加し、剥離面積率 51.9%・劣化度 3.68 で終了している。

## 10. 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-10 に示す 980N (100kgf) 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、両主桁を基線とする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 1000/秒) 計測した。また、載荷板 (直径 35cm) のロードセル荷重値を 160kN 換算し 3 回の平均値で求めた。

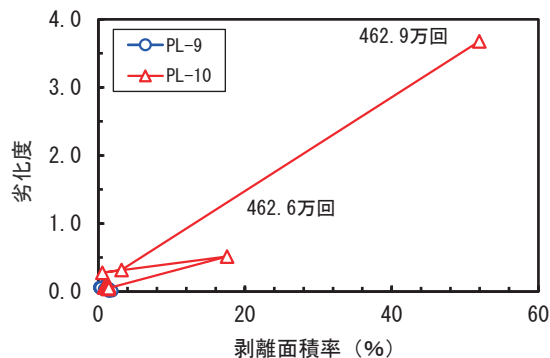


図-26 剥離面積率と劣化度



写真-10 重錘落下たわみ試験機

### (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-27(a) (b) に示す。いずれの床版も補強前 (予備載荷) のたわみの値は、1 回走行ではほぼ一致したが、1 回以外は静的載荷に比べ重錘

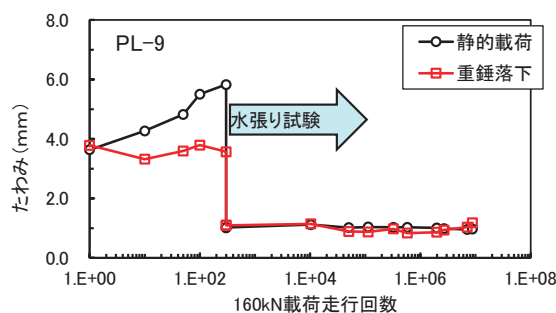


図-27(a) PL-9 重錘落下たわみと静的たわみ

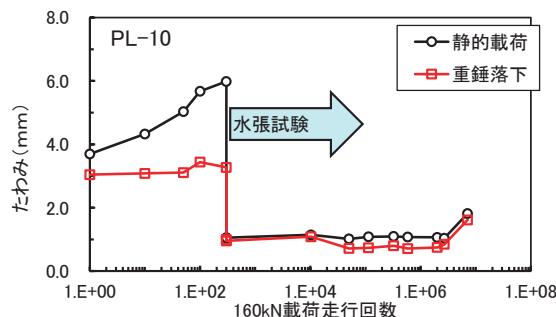


図-27(b) PL-10 重錘落下たわみと静的たわみ

落下のたわみ値は概ね 1/3 小さく推移して安定していない。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と浮き上がり防止の影響が考えられる。

一方、補強後は、ほぼ両者は一致して推移していることが図-27(a) (b)より読みとれる。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 IIS たわみ量の変化(推移)は、有効な指標になると考えられる。

### (3) たわみによる維持管理水準の検討

図-28 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す。たわみ計算値は、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版解析により求めた。なお、補強鋼板の静弾性係数 ( $E_s$ ) =200 kN/mm<sup>2</sup> と仮定する。鋼板補強断面のたわみ計算値は表-10 に示す。

図-28 の PL-9 と PL-10 では補強前の走行回数 1 回でひび割れはすでに発生しており、活荷重たわみは「n=15」のひび割れ発生直後のたわみ計算値 3.18mm よりやや小さく概ね一致している。走行回数 100~300 回では「n=31」引張り断面無視のたわみ計算値 6.56mm よりやや小さい値だが概ね一致している。

補強直後のたわみは、鋼板を考慮した 2 層版のたわみ計算値「n=7 鋼板」の 0.95mm よりやや大きい。PL-9 では、その後走行回数が増加させたが、たわみは 1.00 mm 前後、剥離面積率が 2% 未満で推移し、約 1155.6 万回に達した時点で未破壊のまま走行を完了した。

一方、図-28 の PL-10 は、462.6 万回の再注入直前の剥離面積は 17.6%、たわみは 1.816mm で「n=15 鋼板」のたわみ計算値 1.600mm をやや上回った。再注入後のたわみは 1.416mm に低下して「n=15 鋼板」のたわみ計算値を下回り、補修効果が確認できる。その後の走行 3, 143 回で「n=31 鋼板」のたわみ計算値 2.630mm を超え最終的に補強前のたわみ約 6 mm を超えて破壊した。これらの

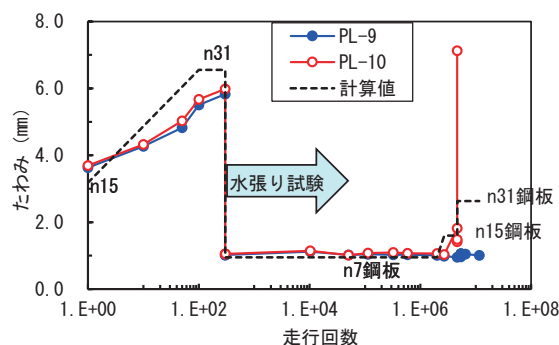


図-28 活荷重たわみと計算値の関係

表-10 たわみ計算値

160kN換算 走行回数	1	100	300	300	2,688,697	4,626,091
たわみ(mm)	3.18	6.56	6.56	0.95	1.60	2.63
弾性係数比 ( $n=E_s/E_c$ )	n=15	n=31	n=31	n=7鋼板	n=15鋼板	n=31鋼板

事実から、補強後の剛性回復の評価は、水張り条件下でも厚板理論による多層版解析によるたわみ計算値で評価できる。また、再注入後の破壊の判断は、たわみ計算値「n=31 鋼板」で評価できるが、管理限界の設定では、水張り条件下では急速に疲労が促進することを考慮して、安全側に一段階高めた「n=15 鋼板」たわみ計算値を超えると脆性的に破壊すると考えるのが妥当である。

## 11. まとめ

ハンチ補強なしの PL-9 と PL-10 の水張り試験結果の概要を表-11 に示す。以下の知見が得られた。

### (1) 補強効果について

健全度ランク d 相当のひび割れ密度約 15m/m<sup>2</sup> で鋼板接着補強を実施した結果、たわみは図-16(a)に示したとおり補強前の約 17.5%に、主鉄筋ひずみは図-17(a)に示したとおり約 6%に低減させる補強効果が確認できた。

補強効果を過去の試験結果と比較とすると、表-12 に示すとおり、PL-2~4 の補強~再注入の平均走行回数を基準の 1.0 倍とすると、PL-9 は、5.1 倍、PL-10 は、4.4 倍となる。また、PL-2~4 の補

表-11 実験結果の概要

試験体	ひび割れ導入時		補強~再注入		再注入~破壊	
	回数	Cr(m/m <sup>2</sup> )	回数	P(%)	回数	P(%)
PL-9	300	14.9	5,400,745	1.9	6,154,956	0.8
PL-10	300	14.7	4,625,791	17.5	3,143	51.9

注) 回数: 160kN換算走行(回)、Cr: ひび割れ密度、P: 剥離(浮き)面積率

強～破壊の平均走行回数を基準の 1.0 倍とすると、PL-10 は、3.89 倍、PL-9 は未破壊で参考値となる。水張り条件下の PL-5・6 とは 27 倍以上の倍率となった。なお、PL-1 は下地ケレン不足の条件下であったため評価対象から除外した。今回の水張り条件下では、乾燥条件下より補強効果が高い結果となった。主な要因は以下のように考えられる。

### 1) 床版上面のひび割れの影響

ひび割れ導入時の床版下面のひび割れ密度は、約 15m/m<sup>2</sup>で目標値あったが、床版上面には走行位置を横断するひび割れや貫通ひび割れが確認されなかった(他の試験体では数本確認)ことから、水張りの水が床版内部に浸透しない状態を実験終了直前まで維持していた。

### 2) 予防保全的な鋼板接着補強の実施

補強前の PL-9・10 のたわみと劣化度は、表-13 に示すように PL-1～6 の試験体の平均値と比べると一割程度小さいことで、疲労が十分進んでいない状態で鋼板接着補強を施したことがわかる。

以上により、水張り条件でも床版上面のひび割れ発生が補強により抑制された今回の場合では、水の影響を受けない状態となったと推察する。

## (2) 鋼板の付着強度が疲労耐久性に与える影響

補強後の PL-9・10 のたわみと劣化度は、表-14 に示す PL-1～6 の平均値と比べると、たわみで 1 割程度、劣化度で 5 割以下に低減されたことから、補強効果が高いことがわかる。主な要因としては、補強鋼板の付着強度がサンダーケレンの作業時間を通常の約 2 倍掛けた素地調整により、想定より大きくなったと推定される。なお、付着強度の測定は、令和 2 年度に過年度の疲労試験の試験体で実施し、疲労耐久性との関係性を検証する予定である。

### (3) ひび割れ発生と水の影響

床版上面にひび割れがない水張り条件下の試験では、鋼板接着補強により耐力力が向上した場合、水の影響を受けず乾燥条件下と同等以上の疲労耐

表-12 走行回数による補強効果の比較

試験体	補強～再注入			補強～破壊	
	回数	P(%)	倍率	回数	倍率
PL-2(乾燥)	1,186,206	33.4	1.13	1,359,692	1.14
PL-3(乾燥)	983,203	47.2	0.94	1,059,162	0.89
PL-4(乾燥)	983,203	17.6	0.94	1,148,372	0.97
<b>PL-2～4平均</b>	<b>1,050,871</b>	<b>—</b>	<b>1.0</b>	<b>1,189,075</b>	<b>1.0</b>
PL-5(水張り)	—	—	—	166,317	0.14
PL-6(水張り)	—	—	—	162,478	0.14
PL-9(水張り)	5,400,745	1.9	5.1	(11,556,004)	9.72
PL-10(水張り)	4,625,791	17.5	4.4	4,628,934	3.89

注) 回数: 160kN換算、P: 剥離(浮き)面積率、(未破壊)

表-13 補強前のたわみ・劣化度の比較

試験体	たわみ(mm)	倍率	劣化度	倍率
PL-1	6.617	1.01	1.007	1.03
PL-2	7.124	1.09	1.108	1.13
PL-3	6.428	0.98	0.925	0.94
PL-4	6.641	1.01	0.966	0.99
PL-5	6.272	0.96	0.944	0.96
PL-6	6.179	0.94	0.926	0.95
<b>PL-1～6平均</b>	<b>6.544</b>	<b>1.0</b>	<b>0.979</b>	<b>1.0</b>
PL-9	5.829	0.89	0.857	0.88
PL-10	5.984	0.91	0.887	0.91

表-14 補強後のたわみ・劣化度の比較

試験体	たわみ(mm)	倍率	劣化度	倍率
PL-1	1.156	0.98	0.087	0.75
PL-2	1.157	0.98	0.088	0.76
PL-3	1.132	0.96	0.075	0.65
PL-4	1.108	0.94	0.062	0.53
PL-5	1.327	1.12	0.224	1.93
PL-6	1.221	1.03	0.161	1.39
<b>PL-1～6平均</b>	<b>1.184</b>	<b>1.0</b>	<b>0.116</b>	<b>1.0</b>
PL-9	1.014	0.86	0.038	0.33
PL-10	1.051	0.89	0.060	0.52

久性が確認された。

未破壊となった PL-9 では、図-20(a)に示した上面に浮きが、写真-9(a)に示した切断面では上側鉄筋付近に水平ひび割れが確認されている。破壊に到った PL-10 では、写真-9(d)に示した破壊断面から、輪荷重の走行位置の上側鉄筋位置に水平ひび割れが発生する。次に、通常破壊に至るひび割れは走行位置からほぼ 45 度の角度で床版下面に達するが、想定以上の補強効果が高いことにより、中央に発生した水平ひび割れから鋼板補強を行っていない床版ハンチ部に向かってひび割れが進行する。さらに、上面に発生した貫通ひび割れに起因して水の影響を受けたと推定される。その後、再注入を行ってから走行 3 千回程度で押抜きせん断破壊に到った。

主な要因としては、上面ひび割れが発生してか

ら水が浸透し、写真-9(c)(d)に示した内部に発生したひび割れに沿って急速に砂利化(幅2~3cmの骨材分離)が進行して脆性的な破壊に到ったと推定される。このことから、床版上面での舗装切削やハツリ作業などによるマイクロクラックなどのひび割れに対して、適切に補修・補強を施すことが維持管理上重要となる。

#### (4) たわみと劣化度による評価

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。また、未補強床版のダメージを評価する松井ら<sup>9)</sup>の劣化度は、鋼板接着補強の補修効果の評価にも適用できることを確認した。

#### (5) 維持管理水準とモニタリング方法

補強床版を維持管理するためには、鋼板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、橋梁の点検要領の損傷評価に反映させる必要がある。

重錘落下たわみ法(IIS)によるたわみ測定は、適切なキャリブレーションを行うことで静的載荷と相関があるため、たわみ量の推移を測定することは、床版の疲労損傷状態を類推可能であり、モニタリングとして有効である。

#### (6) 今後の展開

水張り条件下での試験では、PL-10でも乾燥条件下と比べ、たわみ計算値「n15鋼板」を超えると押抜きせん断破壊が脆性的に発生する可能性があることが判明した。引き続き、接着材を再注入する補修工法が水張り条件下でも剛性が回復することを検証する予定である。併せて、鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性の向上を目的として、床版上面のひび割れを考慮した上面からの補修・補強工法の検討も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29年7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) 石田教雄、関口幹夫、今吉計二(2018)：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30都土木技術支援・人材育成センター年報、85-100
- 5) 名児耶薫、今吉計二、関口幹夫、石田教雄(2019)：鋼板接着補強床版の水張り条件下での走行疲労耐久性、令元都土木技術支援・人材育成センター年報、121-134
- 6) 名児耶薫、今吉計二、関口幹夫、石田教雄(2019)：昭和39年道路橋示方書に基づくRC床版の疲労耐久性、令元都土木技術支援・人材育成センター年報、135-144
- 7) (社)日本道路協会：鋼道路橋設計示方書(昭和39年6月)
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 松井繁之(1991)：橋梁の寿命予測、安全工学Vol.30、No.6、432-440