

# 論文 水の影響を受けた鋼板接着補強 RC 床版の疲労耐久性

今吉 計二\*1・関口 幹夫\*2・名兒耶 薫\*3

**要旨** : RC 床版は、水張り条件下での鉄輪方式の輪荷重走行試験では、乾燥条件下に比較して疲労耐久性が低下することが確認されている。本実験では、RC 床版下面に鋼板接着補強を行った後から、ゴムタイヤ式の輪荷重走行試験機を使用して、床版上面に水を滞水させた条件下で鋼板接着補強の効果と疲労耐久性の低下について検討した。実験結果から、補強後から水張り条件下の補強効果は、無補強床版に比べると 17 倍程度で、乾燥条件下に比べると 1/6~1/7 程度低下することが確認された。

**キーワード** : 鋼板接着補強 RC 床版, 疲労耐久性, 水張り試験, 輪荷重走行試験

## 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。東京都建設局の管理橋梁では、昭和 40 年代後半から鋼板接着補強工法による補強対策が 60 橋ほど実施され、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。点検で確認された剥離 (浮き) の原因は、特定されていない状況にある。

こうした中、建設局が所有する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剤再注入による補修効果の検証や剥離率による再補修の有無の判断を可能とするため、表-1 に示す実験シリーズを平成 27 年度から開始した。試験体 PL-1~PL-4 について、平成 29 年度までに再注入を実施する剥離面積率を 4 つ設定し乾燥状態での再補修効果を検討した<sup>2),3)</sup>。

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	夏季高温
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	-	通常施工
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)	-	無補強

RC 床版は、水張り条件下での鉄輪方式の輪荷重走行試験では、乾燥条件下に比較して疲労耐久性が低下することが知られている<sup>4)</sup>。今回、平成 30 年度までに実施した試験体 PL-5 と PL-6 (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条件下での実験)、試験体 PL-7 と PL-8 (補修・補強効果を比較できるような無補強での実験) の走行疲労実験の結果から、水の影響を受けた疲労

耐久性の検討を行った。

## 2. 輪荷重走行試験の概要

### 2.1 試験体

#### (1) 試験体の形状寸法

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>5)</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) 橋軸方向の長さは 3.5m、床版厚 16 cm である。

#### (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 とし、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。コンクリートの特性値を表-2 に示す。

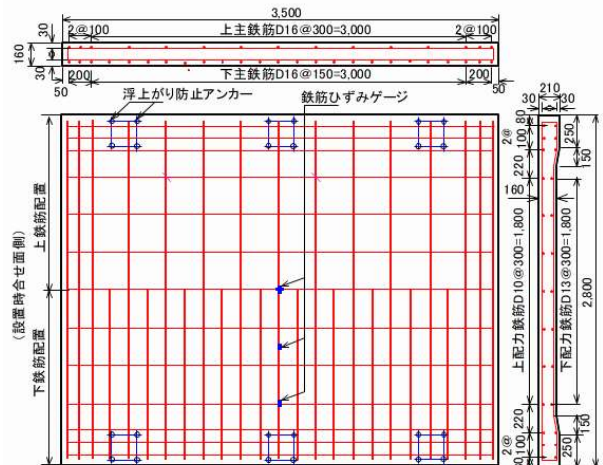


図-1 試験体の形状寸法

表-2 コンクリート特性値 (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 <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	6.5cm	4.2%	20 mm	26.5	27.6	0.19	2.13
2				27.3	27.9	0.19	2.11
3				27.9	29.8	0.19	2.57
平均				27.2	28.4	0.19	2.27

\*1 東京都 建設局 土木技術支援・人材育成センター 技術支援課 (正会員)

\*2 東京都 建設局 土木技術支援・人材育成センター 技術支援課

\*3 東京都 建設局 土木技術支援・人材育成センター 技術支援課

## 2.2 試験方法

輪荷重走行試験では、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-2 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。走行荷重は、都内で観測される輪荷重の最大値に相当する160kN一定とした。



写真-1 輪荷重走行装置

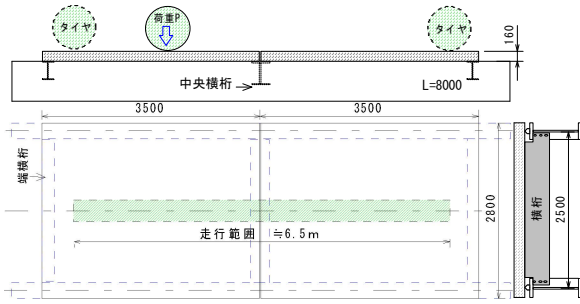


図-2 試験体の配置図

## 3. 予備載荷によるひび割れ導入

東京都建設局では、床版下面のひび割れ損傷ランク c～d<sup>0</sup>を目安に下面から補強を行うため、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<sup>2</sup>となる走行回数を目標とした。走行回数とひび割れ密度の関係は、図-3 に示すとおり、PL-5 及び PL-6 とともに125回でひび割れの導入を完了した。

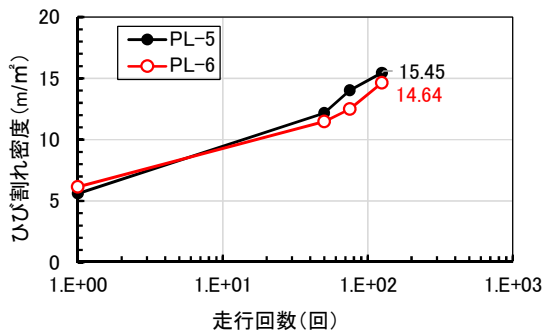


図-3 160kN 走行載荷ひび割れ密度の推移

## 4. 接着補強鋼板の設置及び水張り試験の準備

### 4.1 鋼板接着補強方法

初期ひび割れを導入した試験体2体に対して、東京都の鋼板接着補強要領に準じてり図-4 (a)ハンチ補強なし (PL-5)、図-4 (b)ハンチ補強有り (PL-6) の鋼板接着補強を施工した。具体的な鋼板接着の割り付けは、図-5 に示す3分割とし、添接板の重ね幅は400mmである。

施工手順としては、サンダーによる床版下面のケレン、接着鋼板のアンカー用の穴あけφ10.5mm削孔、アンカーM10×80mmの設置、セットした鋼板の周囲に2液型エポキシ樹脂系パテ・シール材によるシールの施工（シール材の硬化に要する1日養生）、2液型エポキシ樹脂接着材を注入圧力0.03N/mm<sup>2</sup>以下で手動ポンプにより注入パイプ（φ10mm）から、鋼板とコンクリート面の隙間に充填し10日間の養生を行った。

### 4.2 水張り試験方法

床版上面に水を張るため、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。床版上面は、約10ℓ/回の水道水を1日2回注水して、走行面がわずかに滞水している状態とした。タイヤ走行面を除く範囲の保水と蒸発防止のため、写真-2 に示すスポンジ製養生シート+合成樹脂製シートを敷設した。

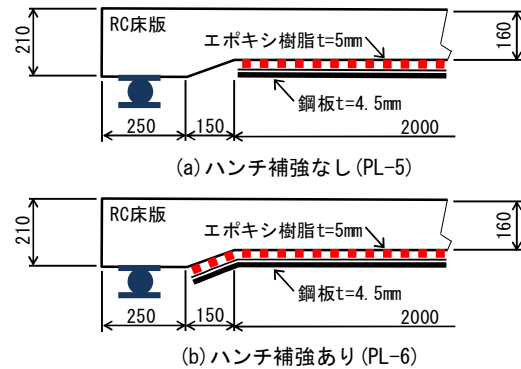


図-4 鋼板接着の仕様 (単位 mm)

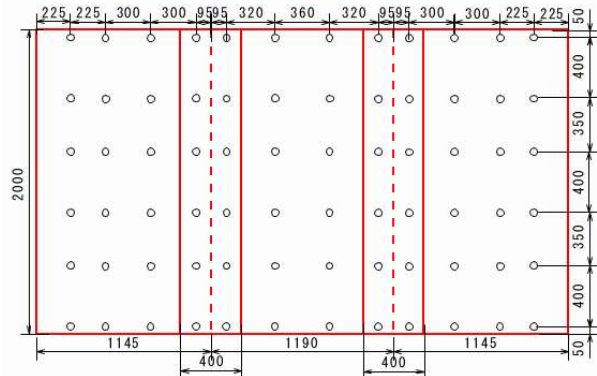


図-5 鋼板接着のアンカー配置図

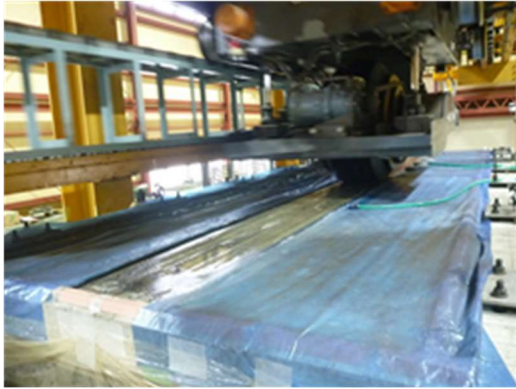


写真-2 水張り試験状況



写真-3 PL-6 中央横桁上面シール材のはみ出し

## 5. 補強後の疲労実験結果

### 5.1 走行回数と鋼板剥離面積率

剥離面積は、各試験と併せて剥離領域を打音点検で判定して図形ソフトで面積を算出し、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は図-6に、剥離の進展状況は図-7に示すように、PL-5とPL-6いずれも10万回を超えて以降徐々に剥離面積が増加していった。また、PL-6は16万回以降に写真-3に示す中央横桁上の調整モルタルの抜出しが起こった後、その床版端部上面(中央横桁近傍)でせん断ひび割れが発生し漏水が確認された。

鋼板剥離の傾向と実験終了状況については、PL-5では、図-7(a)に示すように床版中央の走行タイヤエッジ寄り

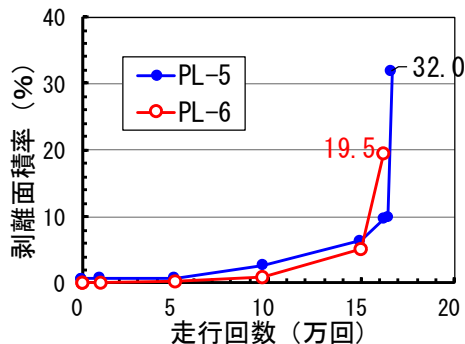


図-6 走行回数と鋼板剥離面積率

から発生して、回数の増加に伴って外側に拡大する通常パターンと同様なことが確認され、16.5万回以降急激に剥離が進展して床版中央部で局部的に押抜きせん断破壊が発生し、その段差により走行不能となり終了した。一方、PL-6では図-7(b)に示すとおり中央横桁端部を起点に剥離が広がり、15万回を超えてから急激に剥離が進展して中央横桁端部で押抜きせん断破壊が発生した。

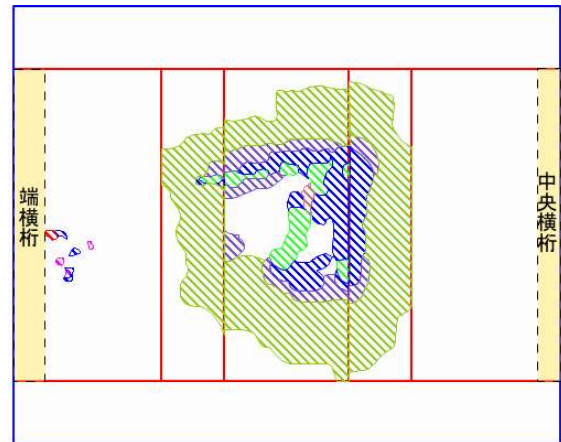


図-7(a) PL-5 鋼板剥離図(見下げ図)

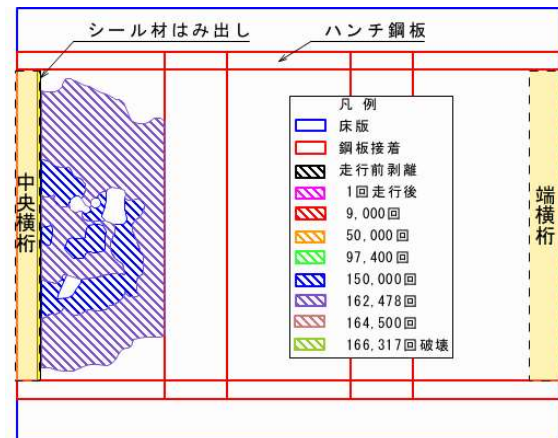


図-7(b) PL-6 鋼板剥離図(見下げ図)

### 5.2 たわみの計算

本実験シリーズでは、鋼板接着補強床版のダメージ評価方法として、弾性係数比 ( $n=Es/Ec$ ) をパラメータとし三次元弾性論に基づく厚板理論(多層版解析)<sup>78)</sup>により算出した補強前後のたわみ量と実験での活荷重たわみを用いて解析的評価を行っている。なお、多層版解析では引張無視状態の応力分布を直接扱えないため、RC床版の弾性係数の代わりにたわみが等価となる換算弾性係数で置き換える解析方法を導入している。RC床版の弾性係数については、床版の状態(剛性)に合わせて、便宜的に剛性の低下した均質弾性体と近似的に見なし、弾性係数比から算出している。

弾性係数比は、過去の解析的評価<sup>78)</sup>から、損傷無い状態でコンクリート断面がすべて有効である状態を  $n=7$ ,

床版下面にひび割れが発生した直後の状態を  $n=15$  としている。特に走行疲労で十分にひび割れが発生・進展したコンクリートのひび割れ断面（引張断面无視）の状態を  $n=31$  としている。ここでは表-3 に示す断面の状態を仮定する。鋼板接着補強前後の実験を通した床版のたわみ計算値について、表-3 に示す条件下で厚板理論の多層版解析によりたわみ計算を行った結果を表-4 に示す。

表-3 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)		鋼板(4.5mm)	
		弾性係数 $E_c(kN/mm^2)$	ポアソン比 ( $\nu$ )	弾性係数 $E_s(kN/mm^2)$	ポアソン比 ( $\nu$ )
$n=7$	全断面有効	28.00	0.18	196.00	0.30
$n=15$	ひび割れ発生直後	13.07	0.20	196.00	0.30
$n=31$	引張断面无視	6.32	0.20	196.00	0.30

表-4 多層版解析によるたわみ計算値と測定値

弾性係数比 ( $n=Es/Ec$ )	床版断面の状態	たわみ計算値	走行回数 (実験時)	たわみ PL-5	たわみ PL-6
$n=7$	全断面有効	1.49mm	0	2.36mm	2.91mm
$n=15$	ひび割れ発生直後	3.18mm	1	3.30mm	3.70mm
$n=31$	引張断面无視	6.56mm	125	6.27mm	6.18mm
$n=7$ 鋼板	全断面有効	0.95mm	126	1.33mm	1.22mm
$n=15$ 鋼板	ひび割れ発生直後	1.60mm	162,603	1.59mm	1.18mm
$n=31$ 鋼板	引張断面无視	2.63mm	164,625	1.79mm	-

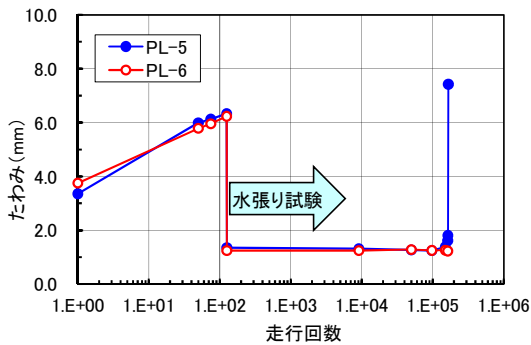


図-8(a) 中央たわみの推移み分布

### 5.3 補強後のたわみ

実験開始から走行回数と中央点の活荷重たわみの関係を図-8(a)に示す。また、橋軸直角方向のたわみ分布をPL-5は図-8(b)、PL-6は図-8(c)に示す。

PL-5は、ひび割れ導入時の活荷重たわみの最大値は6.339mmであったが、補強後は、1.357mm ( $1.357/6.339=21.4\%$ )に低下して補強効果が認められる。補強後は164,500回まで活荷重たわみの最大値は1.814mmで補強直後1回の33%の増加に留まっていた。16.6万回の破壊時のたわみは7.427mmに急増した。なお、 $n=15$ 鋼板のたわみ計算値を超えるとたわみ及び鋼板剥離が急激に増加するのが確認された。

一方、PL-6は、補強前は6.234mmであったが補強後は1.244mm( $1.244/6.234=19.9\%$ )に低下した。実験終了時は、破壊領域が中央横桁よりであったことから、測定位置は離れており剥離もない状態で $n=15$ 鋼板の計算値を超えることなく破壊後も補強直後1.224mmと大差ない

1.235mmであった。

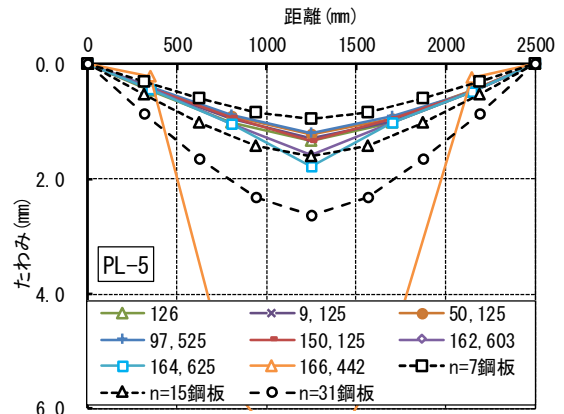


図-8(b) PL-5たわみ分布

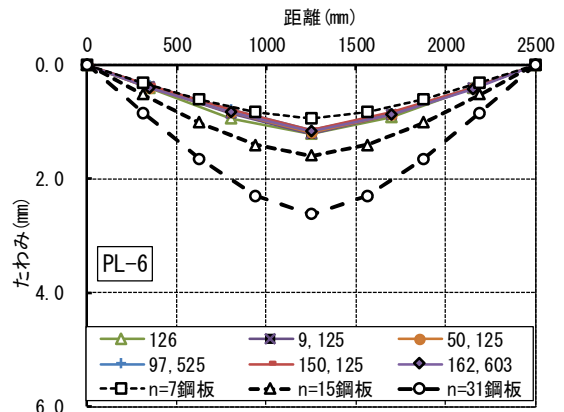


図-8(c) PL-6たわみ分布

## 6. 切断面のひび割れ調査

### 6.1 切断位置

破壊後に試験体内部のひび割れ状況を調べるため、図-9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。

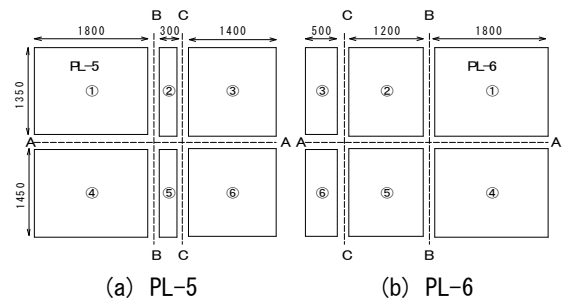


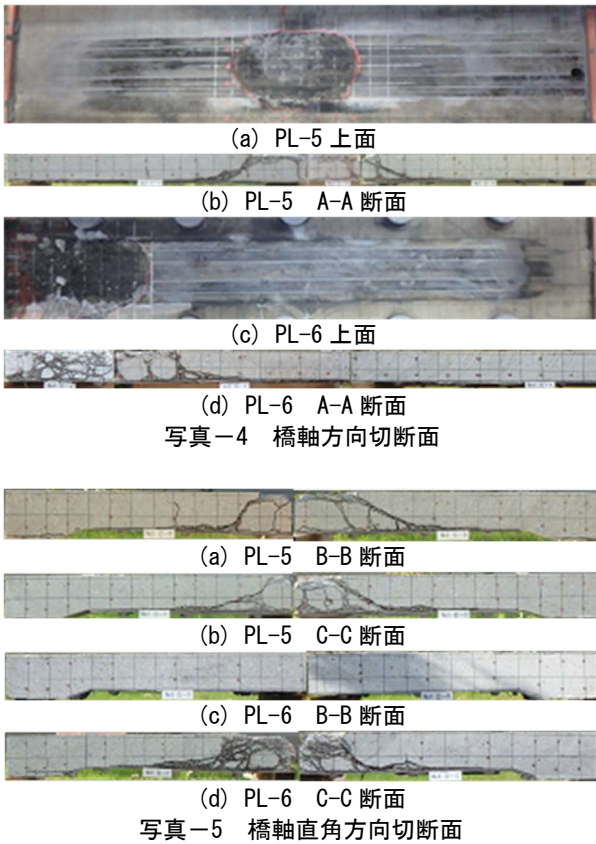
図-9 切断位置

### 6.2 切断面のひび割れ

写真-4(b)ではPL-5上面押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た。写真-4(c)のPL-6上面の破壊箇所(砂利化)は、中央横桁から右側に分布していた。

写真-5(a)(c)のB-B断面を比較すると、PL-5は押抜きせん断破壊の領域が広く、PL-6は破壊位置から離れているため押抜きせん断破壊領域がなかった。

なお、以前に実施されたPL-1~4での乾燥状態の実験で確認された走行ライン切断面の鉄筋位置に発生した水平ひび割れは、PL-5とPL-6では確認されなかった。しかしながら、乾燥状態での疲労促進実験では確認されなかった現象として、浸透した水が輪荷重の影響を受けて発生したひび割れを起点として砂利化が急速な進行したことを示すひび割れに沿った幅2~3cmの骨材分離が確認された。



## 7. 劣化度と剥離面積率の関係

### 7.1 たわみに基づく劣化度

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>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)

$W_0$ ：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)

たわみ計算値は、表-4に示す多層版解析<sup>78)</sup>による計算結果を用いた。

### 7.2 劣化度の推移

全走行回数と劣化度の関係を図-10に示す。予備載荷の走行回数125回における劣化度はPL-5では $D\delta=0.94$ 、PL-6は $D\delta=0.93$ である。劣化度 $D\delta$ は1.0以上で使用限界と評価するので、補強前の劣化度 $D\delta$ が平均値0.935では、ほぼ使用限界状態と評価できる。

補強後の劣化度はPL-5で $D\delta=0.16$ 、PL-6で $D\delta=0.13$ まで低下(回復)した。その後PL-5の劣化度は、15万回を超えた付近から徐々に増加し、16.63万回で押抜きせん断破壊により急増して $D\delta=3.6$ で終了した。

一方、PL-6の劣化度は、中央横桁近傍で剥離が進行し押抜きせん断破壊が生じたことで、劣化度を計算する床版中央部のたわみに影響が及ばなかったため、実験終了までほとんど変化のない状態だった。

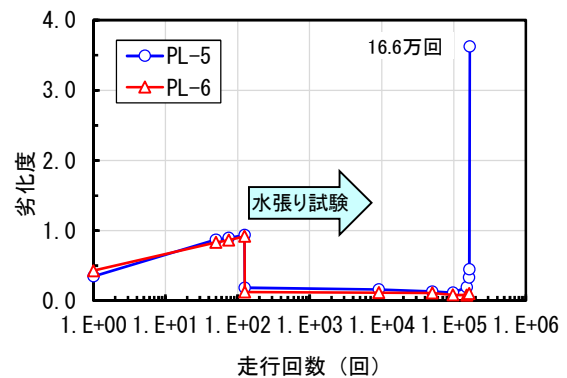


図-10 走行回数と劣化度の推移

### 7.3 劣化度と剥離面積率の関係

補強後の剥離と劣化度の関係を図-11に示す。PL-5の劣化度は、剥離面積率10%まで微増し、剥離面積率10%を超えてから約2,000回走行後に押抜きせん断破壊が生じて剥離面積率は32%、劣化度 $D\delta$ は3.6まで急増した。

一方、PL-6の劣化度は、床版端部付近で剥離が増加し押抜きせん断破壊が生じたためほとんど増加しなかった。

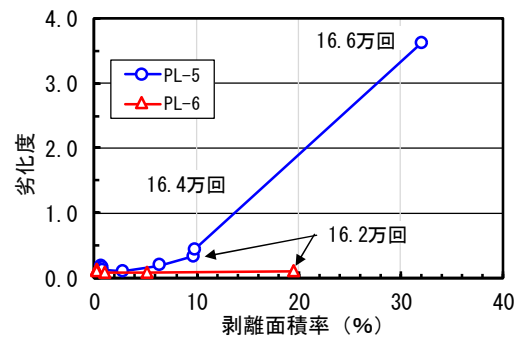


図-11 剥離面積率と劣化度

## 8. まとめ

### 8.1 補強効果

補強後に実施した水張り条件下の補強効果は、試験体 PL-5 および PL-6 とともに、同一仕様の無補強の基準床版の破壊回数の平均を 1 倍にすると、表-5 に示すように約 17 倍となった。

表-5 補強効果

試験体	試験条件	走行回数	倍率(水張り/無補強)
PL-5	水張り	166,442	17.5
PL-6		162,603	17.1
PL-7	未補強	9,782	1.0 平均
PL-8	乾燥	9,281	

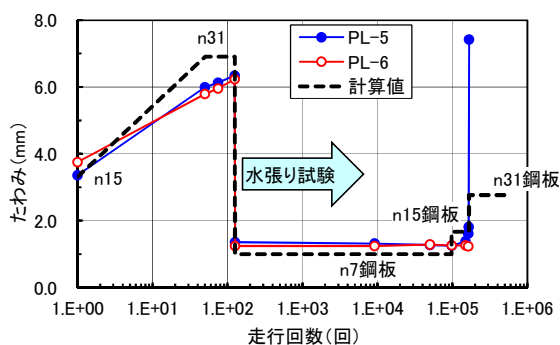


図-12 活荷重たわみと計算値の関係

表-6 水の影響

試験体	試験条件	走行回数	倍率(乾燥/水張り)
PL-2	乾燥	1,186,206	7.2
PL-3		983,203	6.0
PL-4		983,203	6.0
PL-5	水張り	166,442	1.0 平均
PL-6		162,603	

### 8.2 水の影響

水張り試験による疲労耐久性への水の影響については、松井<sup>4)</sup>の研究では乾燥条件に比べ 1/250 に低下するのに対して、本実験の結果は表-6 に示すとおり、PL-5 および PL-6 の破壊走行回数の平均に比べ、平均で 1/6.4 に低下する結果となった。なお、PL-1 は、下地ケレン不足の条件下であるため評価対象から除外した。

また、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図-12 から、PL-5 は  $n=15$  鋼板の計算値 1.60mm 超え急激に破壊したことが確認できる。水張り条件下では、補強後のたわみの推移がたわみ計算値「 $n=15$  鋼板」を超えると脆性的に破壊する可能性があることが判明した。

### 8.3 たわみと劣化度の適用

本実験でも、走行回数に対する図-12 のたわみと図-

10 の劣化度の推移から、たわみの解析値と実験値は類似した傾向を示し、無補強床版のダメージを評価する松井<sup>9)</sup>の劣化度は、鋼板接着補強の補強効果にも適用できることを確認した。

### 8.4 今後の展開

本実験では、表-6 に示すように水張り条件下の補強効果は乾燥条件に比べて 1/6~1/7 に低下するとともに、押抜きせん断破壊も乾燥条件に比べ脆性的に発生する可能性があることが判明した。また、乾燥条件で再損傷した鋼板接着補強床版に接着剤を再注入する補修工法はある程度剛性が回復することが確認されている。しかしながら、水張り条件下の再補修については、剥離部への水や微粉などの影響により付着力が低下し、剛性の回復効果が期待できない可能性もあるので、引き続き疲労耐久性への水の影響について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) 関口幹夫，石田教雄，栗塚一範：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，pp.53-68，2017
- 3) 石田教雄，関口幹夫，今吉計二：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，pp.85-100，2018
- 4) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集 Vol9，No.2，pp.627-632，1987
- 5) (社)日本道路協会：鋼道路橋設計示方書（昭和 39 年 6 月）
- 6) 東京都建設局：橋梁の点検要領（案）（平成 27 年 4 月）
- 7) 関口幹夫，佐々木俊平：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，pp.229-240，2007
- 8) 関口幹夫，横山広，堀川都志雄：リブ付き多層版解析による各種補強床版の実測たわみの評価，土木学会構造工学論文集，Vol54A，pp.442-451，2008.3
- 9) 松井繁之，前田幸雄：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，pp.419-426，1986.10