

高強度軽量プレキャストPC床版接合部の疲労耐久性

ピーシー橋梁(株) 正会員 ○立松 博
 ピーシー橋梁(株) 正会員 中村 定明
 ピーシー橋梁(株) 正会員 小林 崇
 石川島建材工業(株) 小野辺 良一

1. はじめに

近年、車両の大型化や交通量の増加によって、既設道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）の損傷事例が報告されている。このような背景のもと、損傷を受けたRC床版の補修・補強工として、高強度軽量コンクリートを用いたプレキャストPC床版による床版取換え工法を開発した。この高強度軽量プレキャストPC床版は、従来のRC床版に比べ約20%の重量軽減が期待でき、車両の大型化や交通量の増加による既設主桁や下部工への応力負担を軽減することが可能である。また、プレキャストPC床版の軽量化は、運搬や架設機材を簡素化できるため、コスト縮減効果が期待できる。

高強度軽量プレキャストPC床版の耐久性に関する研究としては、これまで床版本体に注目した移動式輪荷重走行試験¹⁾および凍結融解性試験²⁾を実施し、力学的および材料的に耐久性を確認してきた。本研究では、橋軸方向に継手部を設けた試験体の移動式輪荷重走行試験を行い、高強度軽量プレキャストPC床版接合部の疲労耐久性を明らかにした。

2. 本研究の目的

プレキャストPC床版を採用する利点として、交通解放をしながらの施工を可能とすることが挙げられる。2車線以上の幅員を有する既設RC床版を、片側通行を確保しながらプレキャストPC床版に取り換える際、床版間に橋軸方向の接合部が必要となる(図-1)。このような工法で施工を行う場合、橋軸方向の接合部とプレキャストPC床版の付着伝達長部は、RC構造として考える。

多くの研究機関において、一般床版部の疲労特性は試験により確認されつつあるものの、接合部の疲労確認試験はほとんど行われていない。そこで、本研究は、橋軸方向の接合部が十分な疲労強度を有することを確認し、接合部の疲労強度の推定方法について検討を行うものである。

3. 接合部構造の概要

高強度軽量プレキャストPC床版の概要を図-2に示す。

橋軸方向のプレキャスト床版の接合は、

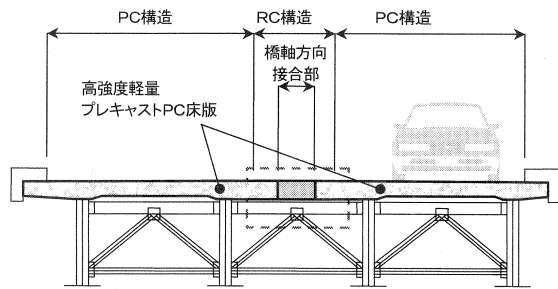


図-1 プレキャストPC床版の接合部

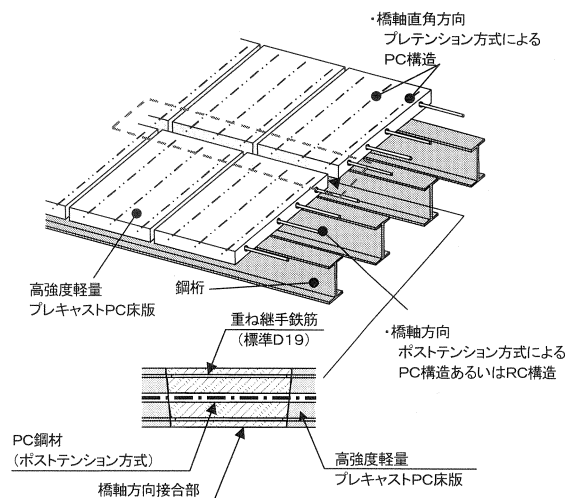


図-2 高強度軽量プレキャストPC床版の概要

RC構造で重ね継手による接合とする。RC重ね継手接合部の設計方針を以下に示す。

- 道示に従って鉄筋応力度が許容応力度 ($120\text{N}/\text{mm}^2$) 以下となるように、RC床版として鉄筋量を決定する。
- 耐久性の向上を目的として、コンクリートの平均圧縮応力度が $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 程度となるように、接合部に付加的なプレストレスを導入する。

4. 移動式輪荷重走行試験

4.1 使用材料

試験体に使用した軽量コンクリートの主な使用材料³⁾を表-1に、使用PC鋼材を表-2に示す。なお、橋軸方向接合部に後打ち打設するコンクリートは、収縮ひび割れ防止のため膨張材を添加した普通コンクリートである。

表-1 軽量コンクリートの使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント 密度 $3.14\text{ g}/\text{cm}^3$
細骨材	滋賀県日野町産 (砕砂) 密度 $2.634\text{ g}/\text{cm}^3$
粗骨材	膨張頁岩系人工軽量骨材 密度 $1.30\text{ g}/\text{cm}^3$
減水剤	高性能AE減水剤

表-2 使用PC鋼材

床版部橋軸直角方向	$\phi 12.7\text{mm}$ PC鋼より線
床版部橋軸方向	$\phi 23\text{mm}$ PC鋼棒
接合部橋軸直角方向	20ton 相当の中空PC鋼棒

4.2 試験体

(1) 試験体の設計

試験体は、有効幅員 7.0m および床版支間 3.0m の鋼プレートガーダー橋を想定して設計した。床版厚は、RC床版の最小厚あるいは (PC床版の最小厚+ハンチ高) のいずれか大きい方の厚さとした。本試験体の場合 (PC床版の最小厚+ハンチ高) で決まり、床版厚は 230mm となった。また、接合部の長さは、D19 鉄筋の必要重ね継手長以上で、かつ接合部にせん断力が作用するように輪荷重の載荷幅 500mm より大きくなるように定めた。接合部の設計を前述したとおりに行った結果、D19 の鉄筋を 125mm 間隔に配置し、付加的なプレストレスとして中空PC鋼棒を 6 本配置した。図-3 に試験体製作図を示す。

(2) 試験体の製作

試験体の製作順序として、まず 4 枚のプレキャスト版を工場で製作した。プレキャスト版を製作架台上に並べた後、接合部の配筋作業を行い、膨張材を添加した普通コンクリートを打設した。最後に、接合部の中空PC鋼棒と橋軸方向のPC鋼棒のプレストレスを導入した。

4.3 試験方法

(1) 試験体の設置

試験体の支持条件は、橋軸直角方向に回転可能な単純支持 (支間 2.5m)、橋軸方向は横桁で支持し、浮き上がりを防止して輪荷重走行試験機に固定した。図-4 に、クランク式輪荷重走行試験機および試験体設置状況を示す。

(2) 荷重載荷方法

所定のコンクリートの圧縮強度が発現し

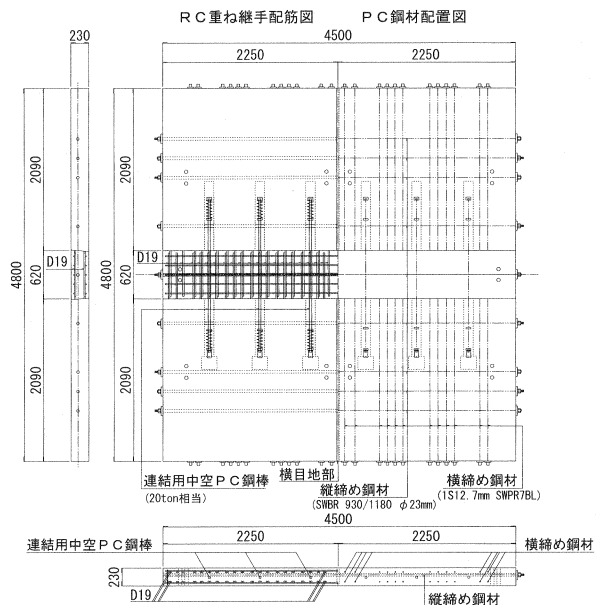


図-3 試験体製作図

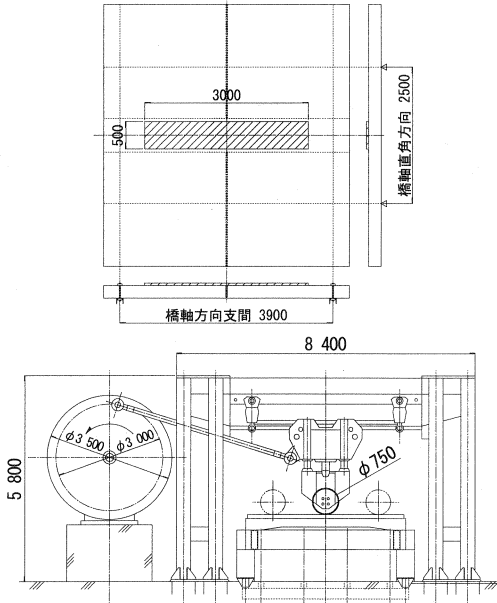


図-4 クランク式輪荷重走行試験機
および輪荷重走行範囲

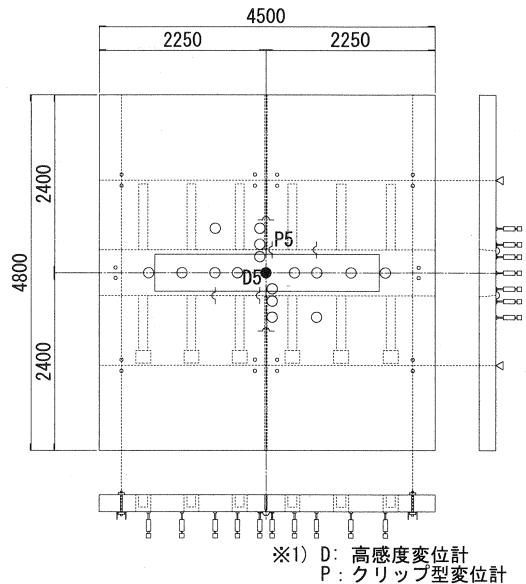


図-5 変位計取付け位置図

たことを確認した後、階段状荷重漸増載荷を開始した。輪荷重の載荷は、幅 500mm の鉄輪を 3m 往復させて行い、載荷速度は、毎分 40 回の走行とした。載荷方法は、国土交通省土木研究所で採用された方法⁴⁾で、初期荷重を 157kN とし、4 万回走行毎に 19.6kN ずつ荷重を増加させ、試験体が破壊に至るまで実施した。

(3) 計測項目

計測は、主要ポイントの床版たわみ、接合部の目開き量、鉄筋ひずみならびにコンクリートひずみとし、ひび割れは目視により観測した。図-5 に、床版たわみ、接合部の目開き量を計測するための変位計取付け位置図を示す。

5. 試験結果および考察

(1) 硬化コンクリートの試験結果

軽量コンクリートと膨張材を添加した普通コンクリートの材料試験結果を、表-3 に示す。軽量コンクリートの単位容積質量、圧縮強度、静弾性係数と膨張材を添加した普通コンクリートの圧縮強度は、所定の要求性能を満足する結果であった。

表-3 材料試験結果

部材	コンクリート種別	単位容積質量 (t/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
床版部	軽量コンクリート	1.85	58.2	2.89	24.2
接合部	膨張材を添加した普通コンクリート	2.30	52.8	3.40	27.3

(2) ひび割れ発生荷重および破壊荷重

ひび割れの発生は、輪荷重 200kN、走行回数 12 万回で、目視により確認された。その後、荷重と走行回数の増加によって、プレキャスト床版、接合部コンクリートのひび割れが進展し、輪荷重 471kN、走行回数 56 万回で急激な変位の増加がみられ、押抜きせん断破壊に至った。

(3) 床版のたわみ

図-6 に、たわみが最大となった試験体中央位置 (変位計 D5) のたわみ経時変化図を示す。ひび割れ発生後、荷重増加に対するたわみの増加量が大きくなっていることが分かる。これは、ひび割れの進展に伴う床版の剛性低下によるものと考えられる。

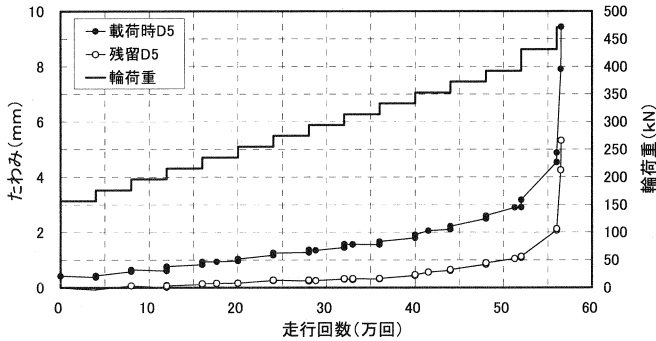


図-6 たわみ経時変化図

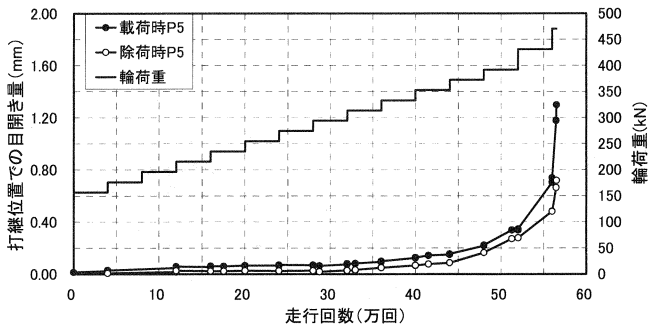


図-8 橋軸方向の接合部打継位置での目開き量

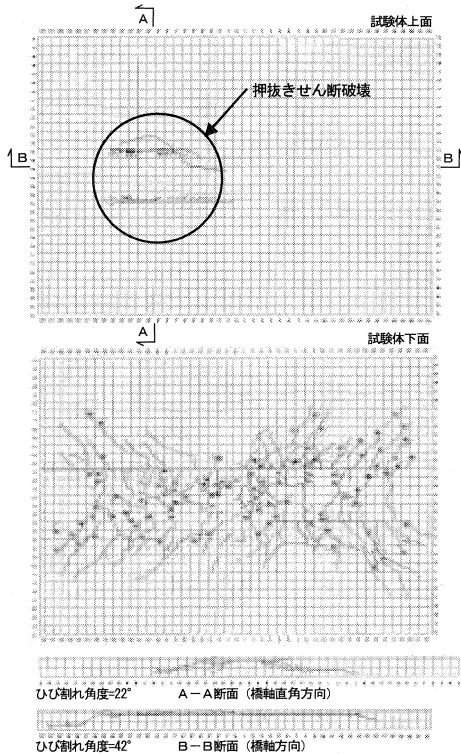


図-7 ひび割れおよび破壊状況

(4) ひび割れおよび破壊状況

図-7 に、ひび割れの進展状況および押抜きせん断破壊を起こした断面の状況を示す。ひび割れは、まず試験体下面の接合部に橋軸直角方向に発生した。その後、そのひび割れが接合部および本体に亀甲状に進展し、最終的には床版本体と接合部との打継位置で、床版上縁のコンクリートに押抜きせん断破壊が生じた。この時、破壊断面付近のせん断破壊角度は、橋軸直角方向には 22° 、橋軸方向には 42° であった。ここで、導入したプレストレス力は、コンクリートの平均圧縮応力度で橋軸直角方向に 1.0N/mm^2 、橋軸方向に 0.5N/mm^2 である。橋軸直角方向のせん断角度が橋軸方向に比べて小さいのは、プレストレス導入力の相違が一因であると考えられる。

(5) 橋軸方向接合部と本体部の目開き量

図-8 に、橋軸方向の接合部と本体部との目開き量を示す。この図は、破壊断面に一番近い位置(変位計 P5)での測定結果であり、計測した測点のうち最大の値を示したものである。目開き量は、試験開始直後(載荷荷重 157kN 、走行回数 4 万回)では載荷時 0.02mm 、除荷時 0.00mm であり、載荷荷重 373kN 、走行回数 48 万回では載荷時 0.2mm 、除荷時 0.16mm 程度であった。載荷荷重 400kN 以降では、目開き量も急激に増加していることが分かる。設計荷重 (100kN) の約 3.5 倍の荷重を載荷した状態でも 0.2mm 程度のひび割れ幅であること、設計荷重レベルでは目開き量がわずかであることから、橋軸方向接合部近傍の繰返し荷重に対する目開きの影響は、問題とはならないと考えられる。

6. PC床版接合部の疲労耐久性評価

6.1 床版本体部およびRC床版試験結果との比較

図-9 にたわみが最大となった試験体中央位置のたわみ計測結果を示す。この図には、床版本体に注目した高強度軽量プレキャストPC床版試験体 R のたわみ計測結果 (以下、軽 PC)、平成 8 年版道路橋示方書を適用した R

C床版試験体⁵⁾のたわみ計測結果(以下, RC8)を併せて示してある。ここで, 軽PCとRC8の床版厚は, 本試験体と同様に支間 3.0m の連続版を想定し決定され, それぞれ 180mm, 230mm である。

この図から分かるように, 本試験結果は, RC8 に比べて高い疲労耐久性を示しており, 軽PC と比較してもほぼ同等の強度を示す結果となっている。このことより, 高強度軽量プレキャストPC床版接合部は高い疲労耐久性を示すことが確認された。

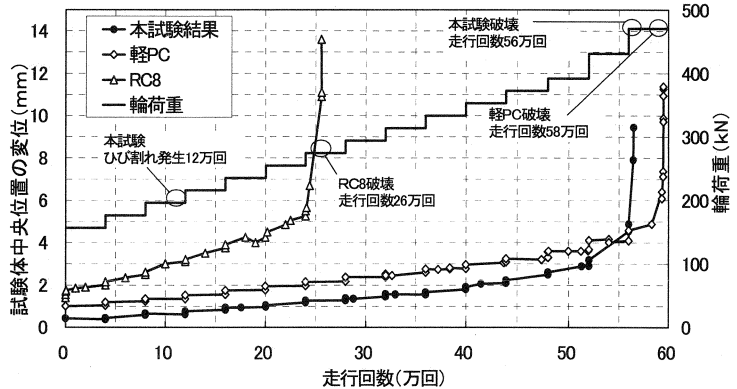


図-9 R C床版, 床版本体部の試験結果との比較

6.2 疲労強度の推定式

松井ら⁶⁾は, RC床版の疲労強度推定式として, 梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力に対する作用せん断力の割合と繰返し回数の関係, および貫通ひび割れが発生し梁状化したRC床版に適用する押抜きせん断耐力算定式を, それぞれ表-4の式(1), 式(2)のとおり提案している。

橋軸直角方向にプレストレスが導入されたPC床版に適用する押抜きせん断耐力算定式として, 安松⁷⁾らは, 式(3)を提案している。式(3)は, 松井らが提案する梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力式に, プレストレス導入による破壊角度の補正をしたものである。

一方, 著者ら⁸⁾は, 材料試験から得られた軽量コンクリートの引張強度およびせん断強度式 $\tau_{smax} = (\sigma_{tmax} \sigma_{ck})^{0.5/2}$ を用いて, 安松らの算定式(式(3))を適用することで, 高強度軽量プレキャストPC床版本体部の疲労強度を精度よく評価できることを確認している。

表-4 既存の疲労強度推定式

松井らの提案する S-N 曲線 $\log(P/P_{ax}) = -0.07835 \log N + \log 1.51965 \dots$ 式(1) ここに, P: 軸荷重 P_{ax} : 押抜きせん断耐力 N: 終局状態に達する回数(回)	
松井らの提案する RC床版に適用する 押抜きせん断耐力算定式 $P_{sx} = 2B(\tau_{smax} X_m + \sigma_{tmax} C_m) \dots$ 式(2) ここに, B: 梁状化した時の梁の幅(mm), $B = b + 2d_d$ b: 配筋鉄筋方向の辺長 (cm) d_d : 配筋鉄筋の有効高さ (cm) X_m : 主鉄筋断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸の有効高さ (cm) C_m : 引張側主鉄筋のかぶり (cm)	安松らの提案する PC床版に適用する 押抜きせん断耐力算定式 $P_{sx} = 2B(\alpha_m \tau_{smax} X_m + \sigma_{tmax} C_m) \dots$ 式(3) ここに, $\alpha_m = 1/\tan \theta$: 破壊角度に対する補正係数 $\theta = 0.5 \tan^{-1}(2 \tau_{cr} / \sigma_{pe})$: 破壊角度 $\tau_{cr} = 1.005(\sigma_{tmax}^2 + \sigma_{max}^2 \sigma_{pe}^2)^{1/2}$ σ_{pe} : 有効プレストレス(kgf/cm ²)

6.3 高強度軽量プレキャストPC床版接合部の疲労強度の推定

高強度軽量プレキャストPC床版の押抜きせん断強度算出結果を表-5 に示す。算定式内の引張強度とせん断強度は, 実測の材料強度に基づいている。式(1)より, 階段载荷の各載荷荷重時における破壊回数 N_i を用いて累積疲労損傷度 $\Sigma(n_i/N_i)$ を計算すると, 表-6 のようになる。累積疲労損傷度 $\Sigma(n_i/N_i) = 1.00$ となる載荷荷重および累積走行回数を高強度軽量プレキャストPC床版の疲労強度とすると, 表-7 の結果が得られる。ここで, CASE-1 は接合部の設計コンセプトどおり RC断面で評価し式(2)の算定式を用いたケースであり, CASE-2

表-5 せん断耐荷力の算出 (CASE-2)

計算記号	計算式および項目	単位	実測値および計算値	備考
σ_{ck}	圧縮強度	kgf/cm ²	593	実測値
σ_{pe}	有効プレストレス	kgf/cm ²	11.6	〃
σ_{tmax}	引張強度	kgf/cm ²	29.5	〃
τ_{cr}	$1.005(\sigma_{tmax}^2 + \sigma_{tmax}\sigma_{pe})$	kgf/cm ²	35.0	計算値
τ_{smax}	$(\sigma_s \sigma_s)^{0.5} / 2$	kgf/cm ²	66.1	〃
θ	$1/2 \tan^{-1}(2\tau_{cr} / \sigma_{pe})$	rad	0.703	〃
α_m	$1/\tan \theta$	-	1.179	〃
X_m	中立軸深さ(計算より)	cm	6.3	〃
C_m	主鉄筋かぶり深さ	cm	4.3	〃
b	載荷板の辺長	cm	20.0	〃
d_s	配力鉄筋の有効高さ	cm	19.4	〃
B	$b + 2d_s$	cm	58.7	〃
P_{sk}	$(2\tau_{smax} X_m \alpha_m + 2\sigma_{tmax} C_m) B$	kgf	72,551	〃

表-6 疲労強度の推定 (CASE-2)

載荷荷重 P _i (tf)	走行回数 n _i (回)	累積走行回数 Σ n _i (回)	押抜きせん断強度 P _{sk} (tf)	P _i /P _{sk}	N _i (回)	n _i /N _i	累積疲労損傷度 Σ (n _i /N _i)
16	40,000	40,000	72.6	0.221	5.000E+10	0.000 00	0.000 00
18	40,000	80,000	72.6	0.248	1.112E+10	0.000 00	0.000 00
20	40,000	120,000	72.6	0.276	2.898E+09	0.000 01	0.000 02
22	40,000	160,000	72.6	0.303	8.586E+08	0.000 05	0.000 06
24	40,000	200,000	72.6	0.331	2.828E+08	0.000 14	0.000 21
26	40,000	240,000	72.6	0.358	1.018E+08	0.000 39	0.000 60
28	40,000	280,000	72.6	0.386	3.954E+07	0.001 01	0.001 61
30	40,000	320,000	72.6	0.414	1.639E+07	0.002 44	0.004 05
32	40,000	360,000	72.6	0.441	7.192E+06	0.005 56	0.009 61
34	40,000	400,000	72.6	0.469	3.318E+06	0.012 06	0.021 67
36	40,000	440,000	72.6	0.496	1.600E+06	0.025 01	0.046 68
38	40,000	480,000	72.6	0.524	8.023E+05	0.049 86	0.096 54
40	40,000	520,000	72.6	0.551	4.169E+05	0.095 95	0.192 49
44	40,000	560,000	72.6	0.606	1.235E+05	0.323 87	0.516 36
48	19,675	579,675	72.6	0.662	4.068E+04	0.483 64	1.000 00

表-7 破壊荷重と走行回数

	プレストレスによる軸力の考慮	破壊荷重 (kN)	走行回数 (万回)
試験結果	-	471	56
CASE-1	×	431	52
CASE-2	○	471	58

は付加的に導入したプレストレス力を考慮し式(3)の算定式を用いたケースである。

本試験はデータ数が一体で、ばらつきを考えると十分な試験体数とは言えないが、本試験結果と疲労強度推定値との比較(表-7)を行い、得られた結果は次のとおりである。

CASE-1の疲労強度推定値は、試験結果をやや小さめに評価している。これは、付加的なプレストレス力の影響を考慮していないためであると考えられる。CASE-2の疲労強度推定値は、試験結果を大きめに評価しているが、比較的精度良く疲労損傷度を表している。

以上のことより、高強度軽量プレキャストPC床版接合部においても床版本体部と同様に、実測の材料強度に基づき安松らの算定式を適用することで、疲労強度を評価できることを確認した。

7. まとめ

高強度軽量プレキャストPC床版接合部の輪荷重走行試験を実施した。本研究より得られた結果を以下に示す。

- (1) 輪荷重走行試験を行った結果、載荷荷重 471kN、走行回数 56 万回で押抜きせん断破壊を生じた。これは、床版本体に注目した高強度軽量プレキャストPC床版とほぼ同等な結果であり、接合部においても十分な疲労耐久性が得られることも確認した。
- (2) 高強度軽量プレキャストPC床版接合部の疲労強度の推定方法について検討を行った。床版本体部と同様の推定方法により、接合部の疲労強度を評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 中村定明, 山下亮: 高強度軽量プレキャストPC床版の疲労耐久性評価, 石川島播磨技報, Vol.44, No.2, pp.83-90, 2004
- 2) 中村定明, 山下亮, 小野辺良一, 黒沢隆志: 高強度軽量プレキャストPC床版に使用する軽量コンクリートの耐凍結融解性, 第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.169-172, 2003
- 3) 財団法人土木研究センター: 道路橋RC床版取換用高強度軽量プレキャストPC床版「HS Lスラブ」技術審査証明報告書, 平成17年3月
- 4) 国土交通省土木研究所: 道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その5), pp.5-12, 2001
- 5) 国土交通省土木研究所: 道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その5), pp.13-17, 2001
- 6) 松井繁之: 橋梁の寿命予想 - 道路橋RC床版の疲労寿命予測 -, 安全工学, Vol.30, No.6, pp.432-440, 1991
- 7) 安松敏雄, 長谷俊彦, 篠原修二, 長瀬嘉理: 交通荷重実態を考慮した鋼橋床版の疲労設計に関する検討, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp.77-82, 1999