

軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版の疲労耐久性

(株)IHIインフラ建設 正会員 ○小林 崇
 (株)IHIインフラ建設 正会員 博(工) 中村 定明
 (株)IHIインフラ建設 正会員 郷保 英之
 大阪大学名誉教授 工博 松井 繁之

Abstract : In Japan, the number of existing highway bridges working over fifty years is increasing and retrofitting of the deteriorated slabs on those bridges is required to extend the bridge lives another fifty years. For the retrofitting those slabs, precast pre-stressed concrete slabs using lightweight concrete of class-2 have been developed and a wheel load running test of the precast PC slab was carried out. As the result, the fatigue durability of the precast PC slab was proved to be very high for traffic loading on actual highway bridge. Also, it was confirmed that the longitudinal pre-stressing force was effective for improving the fatigue durability of the precast PC slabs using lightweight concrete.

Key words : Replacement of RC slab, Lightweight concrete of class-2, Precast PC slab, Fatigue durability

1. はじめに

近年、我国では橋梁のストック数が膨大になり、供用期間が50年に達する橋梁数も増加している。これらの橋梁では老朽化が進んでおり、各道路管理機関では、鋼橋RC床版の大規模補強や床版取替も検討されている。床版取替で主に採用されるプレキャスト床版では、既設の鋼主桁や下部工への負担を増加させないように軽量化が要求され、その一つとして、粗骨材に軽量骨材を使用した軽量コンクリート1種（以下、軽量1種）を用いたプレキャストPC床版（以下、軽量1種床版）が実用化されている¹⁾。しかし、既設RC床版に軽量コンクリートが使用されている場合や都市高速道など下部工の補強が困難な場合では、床版の更なる軽量化が求められる。このような要求に対して筆者らは、粗骨材および細骨材に軽量骨材を使用する軽量コンクリート2種（以下、軽量2種）を用いたプレキャストPC床版（以下、軽量2種床版）の開発を行っている。

本稿は、軽量2種床版の疲労耐久性の評価を目的として行った輪荷重走行疲労試験について報告するものであり、図-1に示すように橋軸方向および橋軸直角方向にプレストレスを導入する構造（以下、2方向PC構造）の床版として橋軸方向プレストレスと床版厚中央に配置する橋軸方向PC鋼材のはく離耐力を考慮した床版の疲労に対する押抜きせん断耐荷力算定式を提案、その有効性を既往の軽量1種床版の走行疲労試験結果により検証したものである。

2. 試験条件

2. 1 軽量コンクリート2種の使用材料特性

床版試験体に使用した軽量2種の使用材料を表-1に、配合を表-2に、走行疲労試験を開始した材齢28日における力学特性を表-3に示す。軽量2種の単位体積重量は、普通コンクリートの 23.0kN/m^3 に対して約30%の軽減となる 16.5kN/m^3 以下を目標値とし、圧縮強度は、通常のプレキャストPC床版に用いる普通コンクリートと同様にプレストレス導入

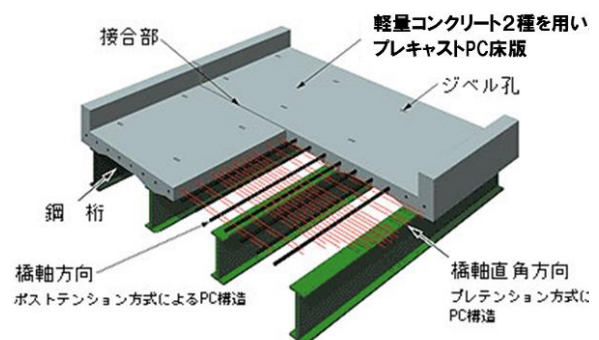


図-1 床版の構造概要

時で35N/mm²以上、材齢28日で50N/mm²以上を有するよう配合を設計している。また、一般に軽量コンクリートは低いと言われる凍結融解作用に対する抵抗性を向上させるため、軽量骨材を粗骨材、細骨材とも含水率2.0%以下の低含水状態で使用している。

2.2 床版試験体の概要

床版試験体の概要と輪荷重の走行範囲を図-2に示す。先に示したように軽量2種床版は、工場製作時にプレテンション方式により橋軸直角方向プレストレスを導入したプレキャストPC床版を、架設後にポストテンション方式により橋軸方向にプレストレスを導入して接合する2方向PC構造を考えている。このため、床版試験体は、実構造と同様に橋軸直角方向プレストレスを導入したPC版4体を、橋軸方向プレストレスを導入して接合する2方向PC構造とした。また、軽量2種床版は連続版を想定しているが、走行試験は床版支間2.5mの単純支持で行うため、荷重による支間中央の曲げモーメントが支間2.5mの単純支持版と同等となる床版支間3.0mの連続版を想定し、床版厚を180mmとした。

橋軸直角方向のプレストレス導入量は、死荷重および活荷重に対して下縁に引張応力を生じないようコンクリートの平均軸圧縮応力度で8.15N/mm²とした。また、橋軸方向は、活荷重に対して下縁に引張応力を生じず、かつ、活荷重および衝撃を考慮した活荷重の1.7倍による接合部の引張応力が許容曲げ引張応力度(-3.0N/mm²)に収まるよう床版厚中央にφ23mmのPC鋼棒を200mm間隔で配置、コンクリートの平均軸圧縮応力度で6.07N/mm²とした。

2.3 試験方法

輪荷重走行試験は、床版試験体上に一列に並べた幅500mmの載荷ブロック上を、幅320mmの鉄輪が床版中央より±1.5m(走行区間3m)の範囲で往復させる方法で行った。載荷プログラムは、(独)土木研究所が実施した階段状の荷重漸増載荷²⁾と同様とし、初期荷重157kNから4万回走行ごとに19.6kNずつ荷重を増加させ、破壊に至るまで行った。

3. 試験結果

床版試験体は、載荷荷重412kNで56万回まで走行後、荷重を431kNに上げて約5千回走行させた時点で図-3に示すようにプレキャスト床版部で押抜き

表-1 軽量2種の使用材料

種別	記号	種類	物性値等
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³
細骨材	S	石灰砕砂	表乾密度 2.67g/cm ³ 滋賀県犬上郡産
	SL	人工軽量骨材(低含水品)	絶乾密度 1.67g/cm ³ 含水率 0.3%
粗骨材	GL	人工軽量骨材(低含水品)	絶乾密度 1.26g/cm ³ 含水率 0.2%
水	W	水道水	
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
	AE	AE剤	変性アルキルカルボン酸化合物系

表-2 軽量2種の配合

W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	SL	GL
32.0	5.0	41.0	150	469	32	429	494

表-3 軽量2種の力学特性

材齢	単位体積重量 (kN/m ³)	強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)
		圧縮	引張	せん断	
28日	16.0	53.8	2.09	5.91	18.7

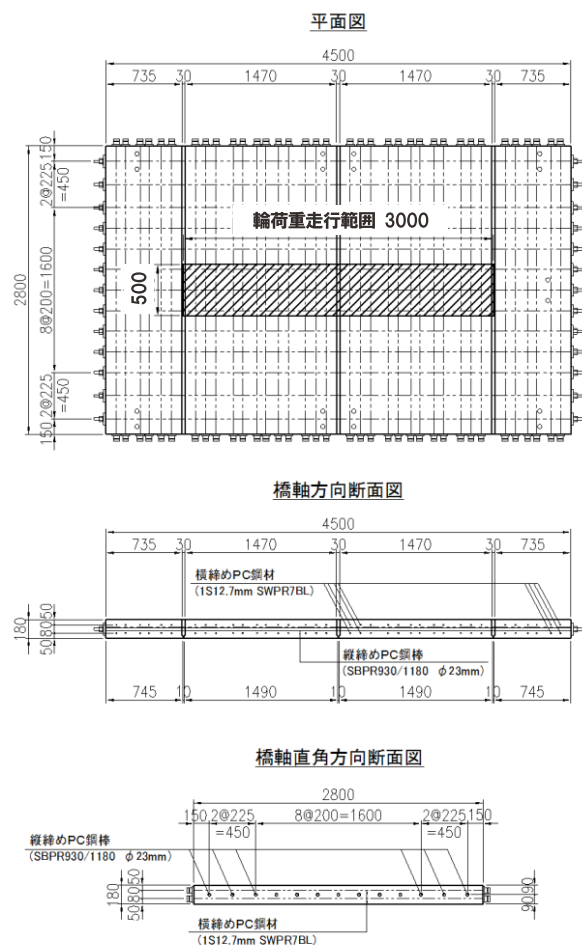


図-2 床版試験体概要と輪荷重走行位置

破壊に至り、試験を終了した。しかし、床版試験体は、この最終破壊以前に疲労限界状態に至っていたと思われる。既往の研究³⁾では、使用限界状態は活荷重たわみが引張側コンクリートを無視した理論たわみ量に達する時として式(1)による劣化度 D_δ が1.0となる時点とされている。

$$劣化度 D_\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_c - \omega_0} \quad (1)$$

ここに、 ω ：活荷重たわみの実測値(mm)、 ω_0 ：コンクリートの全断面を有効とした理論たわみ(mm)、 ω_c ：引張側コンクリートを無視した理論たわみ(mm)

今回の試験方法では、劣化度 D_δ が1.0となる活荷重たわみは4.6mmである。図-4に示すように活荷重たわみが4.6mmに達して以降、走行回数は伸びず変位が急激に増加している。これより今回の試験では、劣化度 D_δ が1.0となる使用限界状態を疲労限界とし、この時の走行回数56万回(≒560,390回)を最終走行回数、載荷荷重431kNを最大荷重とした。

図-5に走行回数と床版たわみの関係を示す。ここでは、土木研究所で実施された平成8年版道路橋示方書によるRC床版(RC8)とPRC床版(PCR50)の結果も併記している。軽量2種床版は、破壊に至らなかったPCR50の試験終了時の載荷荷重および走行回数であり、土木研究所方式の輪荷重走行試験で道路橋床版として十分な疲労耐久性を有するとされる最大載荷荷重392kN(40tf)、総走行回数52万回を超過しており⁴⁾、取替用床版に求められる疲労耐久性を有していると評価できる。

4. 押抜きせん断耐荷力 P_{sx} の検討

4.1 押抜きせん断耐荷力 P_{sx} の推定

前述のように土木研究所方式の階段状荷重漸増載荷により実施した軽量2種床版の走行試験は、載荷荷重431kN、走行回数56万回で破壊に至った。本結果をもとに、松井らが提案するRC床版のS-N曲線⁵⁾がPC床版にも適用できると仮定して式(2)を用いて推定した軽量2種床版の押抜きせん断耐荷力を表-4に示す。

$$\log(P/P_{sx}) = 0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (2)$$

ここで P_{sx} は、最終走行回数および載荷荷重で累積破壊損傷度 $\Sigma(n_i/N_i)$ が1.000となる値とし、本条件により推定された658.6kNを軽量2種床版の P_{sx} として算定モデルを検討する。

4.2 押抜きせん断耐荷力 P_{sx} 算定モデルの検討

東山らは、橋軸方向にプレストレスを導入したPC床版においても走行荷重の繰返しにより床版上面に橋軸直角方向ひび割れが発生し最終的に梁状化に至るとして、梁状化した梁幅にプレストレスの影響を考慮したPC床版の押抜きせん断耐荷力算定式(3)を提案している⁶⁾。



図-3 床版試験体破壊状況

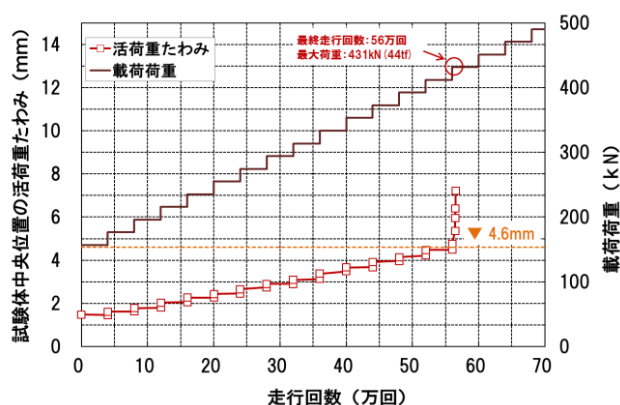


図-4 走行回数と活荷重たわみの関係

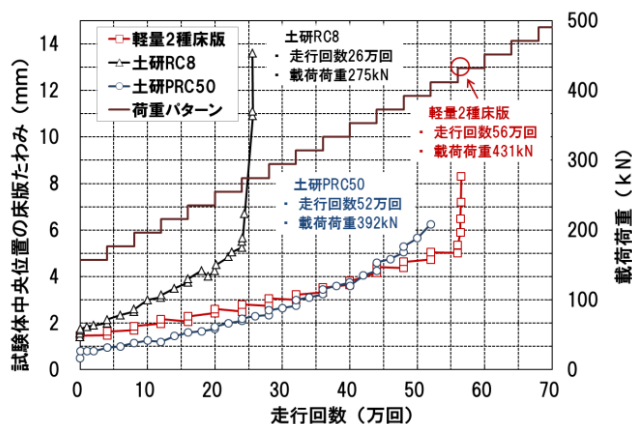


図-5 走行回数と床版たわみの関係

$$P_{sx} = 2B' (\tau_{smax} \cdot x_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \quad (3)$$

ここに、 B' : 梁状化した梁幅 ($=b+2\alpha_d \cdot d_d$) (mm), b : 輪荷重の橋軸方向の辺長 (mm), α_d : 橋軸方向の破壊面角度に対する補正係数 ($=1/\tan \theta_d$), θ_d : 橋軸方向の破壊面の角度 (rad), d_d : 橋軸方向鉄筋の有効高さ (mm), τ_{smax} : コンクリートのせん断強度 (N/mm²), x_m : 橋軸方向断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸 (mm), σ_{tmax} : コンクリートの引張強度 (N/mm²), C_m : 橋軸直角方向引張側鉄筋のかぶり (mm)

ここで、式(3)をもとに軽量2種床版の押抜きせん断耐荷力算定モデルを検討する。

(1)破壊面角度の検討

普通コンクリートを用いたPC床版の押抜きせん断耐荷力の算定において破壊面角度は、コンクリートの引張強度とプレストレスの導入による軸圧縮応力度 σ_p (N/mm²) から式(4)、式(5)による計算値が用いられる。

コンクリートのせん断ひび割れ強度 τ_{cr}

$$\tau_{cr} = 1.005 \sqrt{\sigma_{tmax}^2 + \sigma_{tmax} \cdot \sigma_p} \quad (4)$$

破壊面角度 θ

$$\theta = 1/2 \tan^{-1}(2\tau_{cr} / \sigma_p) \quad (5)$$

しかし、著者らは過去に実施した軽量2種床版の静的押抜き載荷試験⁷⁾において、破壊断面におけるひび割れの角度が式(4)、式(5)による計算値に対して大きいことを確認している。軽量2種は引張強度が小さく、同等のプレストレスを導入した普通コンクリートを用いた床版に比べて軽量2種床版の破壊面角度の計算値は小さくなる。しかし、破壊面角度には限界値がある可能性があり、ここではこの限界値を静的押抜き載荷試験で確認した30°として P_{sx} を算定する。

(2)軽量粗骨材の割裂破壊によるはく離耐力の低減

東山らは、軽量コンクリートを用いたRC床版のはく離破壊では軽量粗骨材の割裂破壊を伴うものとして、コンクリートの強度の低下を考慮した上でさらにせん断耐荷力、はく離耐力のそれぞれを低減する床版の静的押抜きせん断耐荷力算定式を提案している⁸⁾。

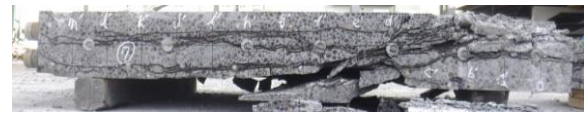
これに対して著者らは、軽量コンクリートを用いたPC床版では、はく離破壊では軽量粗骨材の割裂を伴うが、せん断破壊プレストレスの影響によって強度低減はないと仮定して、はく離耐力のみ低減した押抜きせん断耐荷力算定式を提案している⁷⁾。疲労に対しても同様と考えて、はく離破壊では軽量粗骨材の割裂破壊を伴うものとして、はく離耐力に低減係数 α_t ($=0.703$) を乗じるものとする。

(3)橋軸方向PC鋼材のはく離耐力の評価

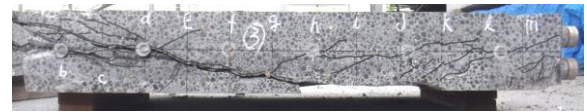
前述のように床版試験体は、橋軸・橋軸直角方向ともプレストレスを導入する2方向PC構造として、床版厚中央に橋軸方向のPC鋼材を配置している。図-6に示す橋軸直角方向の切断面では、床版厚中央に配置したPC鋼棒に斜め方向にひび割れを生じている。これより、押抜きせん断耐荷力 P_{sx} の算定では、橋軸方向PC鋼材によるはく離耐力を考慮する必要があるとして図-7(b)の赤斜線で示すPC鋼材から直角方向引張鉄筋までのコンクリート (C_{pm}) が、輪荷重幅に破壊面角度を考慮した範囲ではく離破壊耐力を P_{sx} に付加した。

表-4 押抜きせん断耐荷力 P_{sx} の推定 (軽量2種床版)

載荷荷重 P_i (kN)	走行回数 n_i (回)	累計走行回数 Σn_i (回)	押抜きせん断耐荷力 P_{sx} (kN)	P_i/P_{sx}	N_i (回)	n_i/N_i	累積疲労損傷度 $\Sigma(n_i/N_i)$
157	40,000	40,000	658.6	0.238	1.9E+10	0.000	0.000
177	40,000	80,000		0.268	4.2E+09	0.000	0.000
196	40,000	120,000		0.298	1.1E+09	0.000	0.000
216	40,000	160,000		0.328	3.2E+08	0.000	0.000
235	40,000	200,000		0.357	1.1E+08	0.000	0.001
255	40,000	240,000		0.387	3.8E+07	0.001	0.002
275	40,000	280,000		0.417	1.5E+07	0.003	0.004
294	40,000	320,000		0.447	6.1E+06	0.007	0.011
314	40,000	360,000		0.476	2.7E+06	0.015	0.026
333	40,000	400,000		0.506	1.2E+06	0.032	0.058
353	40,000	440,000		0.536	6.0E+05	0.067	0.125
373	40,000	480,000		0.566	3.0E+05	0.133	0.258
392	40,000	520,000		0.596	1.6E+05	0.256	0.514
412	40,000	560,000		0.625	8.4E+04	0.478	0.992
431	390	560,390		0.655	4.6E+04	0.008	1.000



(a) 切断面左側



(b) 切断面右側

図-6 橋軸直角方向切断面

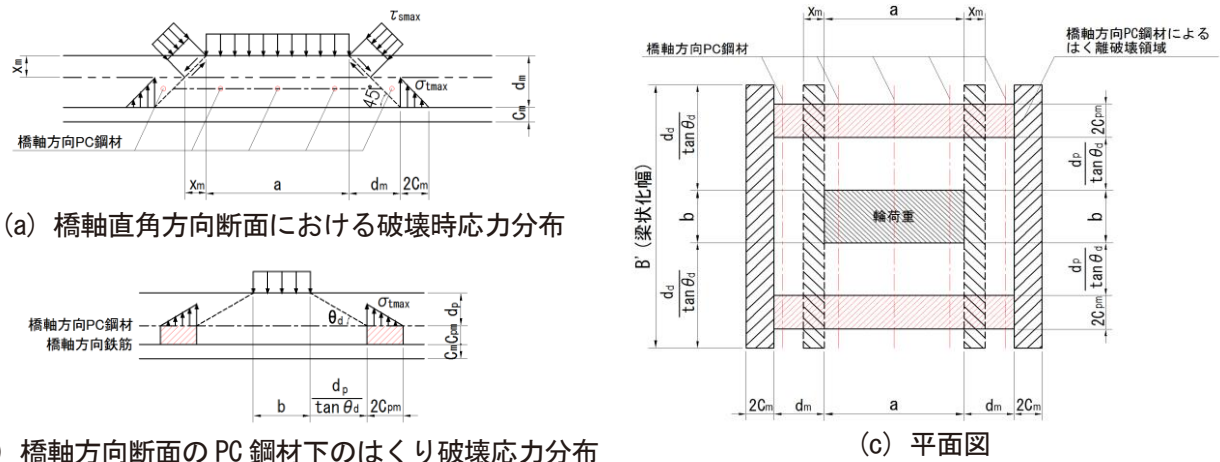


図-7 床版厚中央に配置したPC鋼材のはくり耐力の考慮

(4) 押抜きせん断耐荷力 P_{sx} 算定式の提案

(1)~(3)の検討をもとにした軽量2種床版の押抜きせん断耐荷力算定式は式(6)のようになる。

$$P_{sx} = 2B' (\tau_{smax} \cdot x_m + \alpha_t \cdot \sigma_{tmax} \cdot C_m) + \alpha_t \cdot \sigma_{tmax} (2B_p \cdot C_{pm}) \quad (6)$$

ここに、 B_p ：橋軸方向PC鋼材のはくり破壊領域長さ(= $a + 2\alpha_m \cdot d_p$) (mm)， a ：輪荷重橋軸直角方向の辺長(mm)， α_m ：橋軸直角方向の破壊面角度に対する補正係数(= $1/\tan\theta_m$)， θ_m ：橋軸直角方向の破壊面角度(rad)， d_p ：橋軸方向PC鋼材の有効高さ(mm)， C_{pm} ：橋軸方向PC鋼材と橋軸直角方向引張側鉄筋の距離(mm)

ここで、橋軸直角方向では、プレストレスは橋軸方向断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸 x_m の関数として考慮、破壊面角度はRC床版と同様 45° とし、橋軸方向の梁状化した梁幅、および橋軸方向PC鋼材によるはくり破壊の領域では、プレストレスによる破壊面角度に対する補正を考慮するものとした。表-5に示すように式(6)による軽量2種床版の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} の算定値は662.2kNであり、実験からの推定値658.6kNとほぼ一致した。算定した P_{sx} とRC床版のS-N曲線との関係を図-8に示す。 P_{sx} の算定値はRC床版のS-N曲線上にプロットできており、RC床版のS-N式によってPC床版である軽量2種床版の疲労寿命が算定できる可能性が示された。

4.3 押抜きせん断耐荷力 P_{sx} 算定モデルの検証

ここで、過去に実施された軽量1種床版の走行試験⁹⁾の結果により式(6)の有効性を検証する。軽量1種床版試験体は、前述の軽量2種床版と同様にプレテンション方式により橋軸直角方向プレストレスを導入したPC版4体をポストテンション方式により橋軸方向プレストレスを導入して接合する2方向PC構造である。表-6に軽量1種の力学特性など軽量2種床版と異なる試験条件と式(6)により算定した P_{sx} を示す。軽量1種床版の走行試験は、載荷荷重471kN、走行回数59.3万回でプレキャスト床版部が押抜き破壊しており、これより

表-5 軽量2種床版の押抜きせん断耐荷力の算定

記号	項目	単位	数値
α_c	コンクリートの圧縮強度	N/mm ²	53.8
σ_{tmax}	コンクリートの引張強度	N/mm ²	2.09
τ_{smax}	コンクリートのせん断強度	N/mm ²	5.91
x_m	橋軸方向断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸	mm	58.0
C_m	橋軸直角方向引張側鉄筋のかぶり	mm	43.5
C_{pm}	橋軸方向のPC鋼材と橋軸直角方向引張側鉄筋の距離	mm	40.5
a	輪荷重の橋軸直角方向の辺長	mm	500.0
b	輪荷重の橋軸方向の辺長	mm	200.0
d_d	橋軸方向鉄筋の有効高さ	mm	143.5
d_p	橋軸方向のPC鋼材の有効高さ	mm	90.0
α_{cpm}	橋軸直角方向のプレストレス導入量	N/mm ²	8.15
α_{cpd}	橋軸方向のプレストレス導入量	N/mm ²	6.07
τ_{crm}	橋軸方向のコンクリートのせん断ひび割れ強度	N/mm ²	4.15
θ_m, θ_d	橋軸直角方向、橋軸方向の破壊面の角度	rad °	0.524 30.0
B'	梁状化した梁幅 $B' = b + 2\alpha_d \cdot d_d$	mm	696.5
B_p	橋軸方向PC鋼材のはくり破壊領域長さ $B_p = a + 2\alpha_m \cdot d_p$	mm	811.4
α_m	橋軸直角方向の破壊面角度に対する補正係数 $\alpha_m = 1/\tan\theta_m$	-	1.730
α_d	橋軸方向の破壊面角度に対する補正係数 $\alpha_d = 1/\tan\theta_d$	-	1.730
α_t	はくり破壊に関する低減係数	-	0.703
P_{cv}	圧縮域コンクリートのせん断耐荷力	kN	477.6
P_t	鉄筋のはくり耐荷力	kN	88.0
P_{pm}	橋軸方向PC鋼材のはくり耐荷力	kN	96.6
P_{sx}	押抜きせん断耐荷力	kN	662.2

推定される P_{sx} は724.7kN (=73.9tf) とされている。これに対して式(6)で算定した P_{sx} は741.4kNと近い値を示し、式(6)の有効性が示された。また、 P_{sx} の算定値はRC床版のS-N曲線上にあり、ここでもRC床版のS-N式による疲労寿命算定の可能性が示された。

5. まとめ

軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版の疲労耐久性の評価を目的として実施した輪荷重走行試験により得られた知見を以下に示す。

- ・ 軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版は、土木研究所方式の評価目標値である最大載荷荷重392kN、総走行回数52万回を超える結果が得られ、道路橋床版として十分な疲労耐久性を有することが確認できた。
- ・ 橋軸方向のプレストレスを床版厚中央に橋軸方向PC鋼材を配置して導入した軽量PC床版は、破壊面角度の考慮した梁状化幅の増加と橋軸方向PC鋼材のはく離耐力を考慮することで押抜きせん断耐荷力の算定が可能である。
- ・ 疲労に対する押抜きせん断耐荷力の算定値をもとに、RC床版のS-N曲線を用いて軽量PC床版の疲労寿命が算定できる。

軽量コンクリートの使用による床版の軽量化では、押抜きせん断耐荷力の低下が懸念される。これに対してプレストレスの導入は有効であり、特に2方向PC構造として導入する橋軸方向のプレストレスは疲労耐久性に与える影響が大きく、その重要性が確認された。

【参考文献】

- 1) 堂前満・中村定明・澤大輔・立松博・小野辺良一：軽量化・高耐久化を実現する「HSLスラブ」道路橋RC床版取換用高強度軽量プレキャストPC床版，セメント・コンクリート，No. 702，2005. 8.
- 2) 中谷昌一・内田賢一・西川和廣・神田昌幸・宮崎和彦・川間重一・松尾伸二：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所資料第28号，2002. 3.
- 3) 松井繁之，前田幸雄：道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，第374号/I-6，1986. 10.
- 4) 松井繁之：床版研究の変遷と輪荷重走行試験機の役割，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2006. 7.
- 5) 松井繁之：橋梁の寿命の予測 - 道路橋RC床版の疲労寿命予測 - ，安全工学，Vol. 30，No. 6，1991.
- 6) 東山浩士，松井繁之：橋軸方向プレストレスしたコンクリート床版の走行荷重に対する疲労耐久性に関する研究，土木学会論文集，No. 605，I-45，1998. 10.
- 7) 小林崇・郷保英之・石川寛範・松井繁之：軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版に関する研究，プレストレストコンクリート工学会，第25回シンポジウム論文集，2016. 10.
- 8) 東山浩士・水越睦視・松井繁之・小田憲司：軽量コンクリートを用いたRC床版の押抜きせん断耐力の評価とその実用性に関する研究，コンクリート工学論文集，第16巻第1号，2005. 1.
- 9) 中村定明・深山清六・小野辺良一・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，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 2，2002.

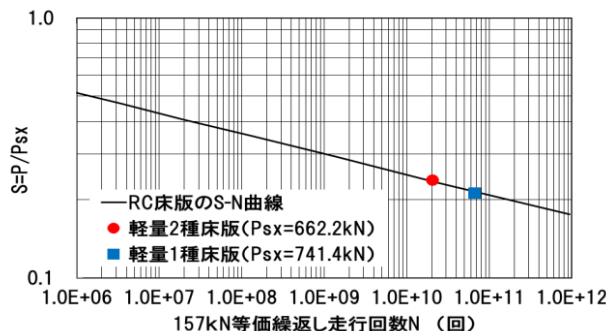


図-8 RC床版のS-N曲線と軽量PC床版のS-N結果

表-6 軽量1種床版の押抜きせん断耐荷力の算定

記号	項目	単位	数値
α_c	コンクリートの圧縮強度	N/mm ²	55.6
σ_{tmax}	コンクリートの引張強度	N/mm ²	2.67
τ_{smax}	コンクリートのせん断強度	N/mm ²	6.15
X_m	橋軸方向断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸	mm	59.0
σ_{pym}	橋軸直角方向のプレストレス導入量	N/mm ²	8.45
σ_{pzd}	橋軸方向のプレストレス導入量	N/mm ²	6.31
τ_{crm}	橋軸方向のコンクリートのせん断ひび割れ強度	N/mm ²	4.92
P_{cv}	圧縮域コンクリートのせん断耐力	kN	505.6
P_t	鉄筋のはく離耐力	kN	112.5
P_{pym}	橋軸方向PC鋼材のはく離耐力	kN	123.4
P_{sx}	押抜きせん断耐荷力	kN	741.4