

論文 高強度軽量プレキャストPC床版の疲労耐久性評価

中村 定明*1・深山 清六*2・小野辺 良一*3・山下 亮*4

要旨：高強度軽量プレキャストPC床版は、高強度軽量コンクリートを使用した既設道路橋RC床版の取替え用プレキャストPC床版である。従来のコンクリート系床版に比べ約20%の重量軽減効果が期待でき、活荷重の増加による既設鋼主桁や下部工への応力負担を軽減できる特長がある。本研究は、クランク式輪荷重走行試験により高強度軽量プレキャストPC床版の疲労耐久性の評価を行ったものである。試験の結果から、高強度軽量プレキャストPC床版は、高い疲労耐久性を有することが確認された。また、高強度軽量プレキャストPC床版の疲労強度の推定を行い、高い精度で推定できる可能性があることを示した。

キーワード：高強度軽量プレキャストPC床版，クランク式輪荷重走行試験，疲労耐久性

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¹⁾。損傷を受けたRC床版の補修・補強工法の1つにプレキャスト床版による床版取替え工法が考えられる。床版取替え工法において、プレキャスト床版を軽量化することは、車両の大型化や交通量の増加による鋼主桁や下部工への応力増加の負担を軽減できる。また、プレキャスト床版の軽量化は、運搬や架設機材を簡素化できるためコスト縮減効果も期待できる。これらの利点を活かした高強度軽量プレキャストPC床版の開発を行った。著者らが行った既往の研究²⁾では、高強度軽量プレキャストPC床版は、静的な曲げモーメントおよび押抜きせん断力に対して、十分な耐力・変形性能等を有していることを確認した。また、道路橋床版においては、輪荷重による疲労荷重に対しても高い耐久性が要求されるが、高強度軽量プレキャストPC床版の耐疲労特性の研究は、ほとんど行われていない。本研究では、クランク式輪荷重走行試験（以下、輪荷重走行試験）により高強度軽量プレキャスト

PC床版の疲労耐久性について検討を行うものである。

2. 高強度軽量プレキャストPC床版の概要

高強度軽量プレキャストPC床版の構造形式を図-1に示す。高強度軽量プレキャストPC床版に使用するコンクリートは、設計基準強度 50N/mm^2 、単位体積重量 19.0kN/m^3 以下および静弾性係数 22.0kN/mm^2 以上の性能を有するものとした。

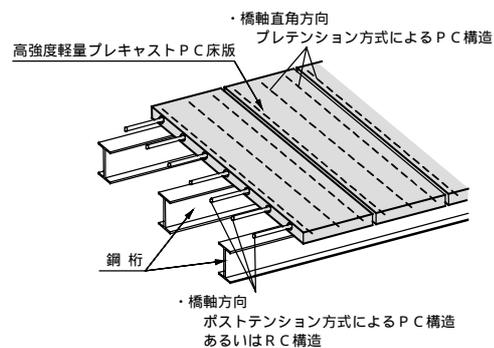


図-1 高強度軽量プレキャストPC床版の構造形式

3. 輪荷重走行試験

3.1 高強度軽量プレキャストPC床版の設計

高強度軽量プレキャストPC床版は、有効幅

*1 ピーシー桥梁(株) 東京本社技術部 工修 (正会員)

*2 ピーシー桥梁(株) 常務取締役

*3 石川島建材工業(株) 事業本部 第二土木技術部

*4 ピーシー桥梁(株) 東京本社技術部 (正会員)

員 7.0m および床版支間 3.0m の 3 主桁の鋼桁橋を想定して設計した。床版厚は、道路橋示方書³⁾に従い式(1)で決定した。床版の設計は、B 活荷重に対し、フルプレストレスとして行った。有効プレストレスによるコンクリート応力度は、軸圧縮応力で橋軸直角方向に 8.45N/mm² および橋軸方向に 6.31N/mm² となった。

$$t=(3L+11) \times 0.9=18\text{cm} \quad (1)$$

t:床版厚(cm), L:床版支間(m)

3.2 使用材料およびコンクリートの配合

(1) 使用材料

高強度軽量コンクリートの主な使用材料を表-1に示す。

表-1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント 比重3.14
細骨材	滋賀県愛知川産 比重2.60 粗粒率2.59 吸水率0.82%
粗骨材	真珠岩系人工軽量骨材 比重1.17
減水剤	高性能 A E 減水剤

(2) コンクリートの配合

表-2 に高強度軽量コンクリートの配合を示す。

表-2 コンクリートの配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤
10.0	3.0	35.0	42.0	175	500	692	431	2.50

3.3 供試体の製作

高強度軽量プレキャストPC床版供試体は、図-2に示すように橋軸方向 4.5m、橋軸直角方向 2.8m とした。設計は、支間 3.0m の連続版として行ったが、走行試験は単純支持で行うため、支間中央で連続版と同等の曲げモーメントとなるように支間を 2.5m とした。コンクリート打込み後、蒸気養生を行い、コンクリート強度を確認した後、材齢 2 日でプレテンション方式によって橋軸直角方向に所定のプレストレスを導入した。その後、ポストテンション方式で橋軸方向にプレストレスを導入した。図-3に接合部の構造詳細を示す。

3.4 試験方法

(1) 供試体の設置

供試体は、橋軸直角方向を回転可能な単純支

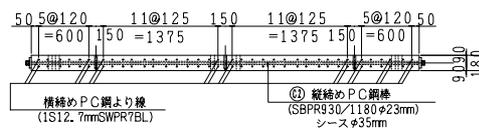
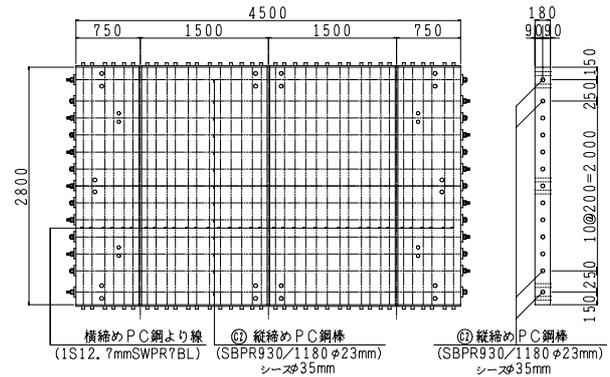


図-2 供試体製作図

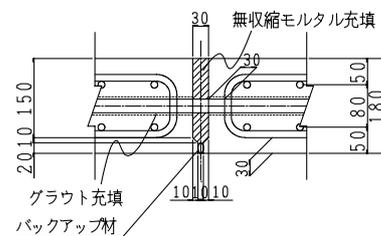


図-3 接合部の構造詳細

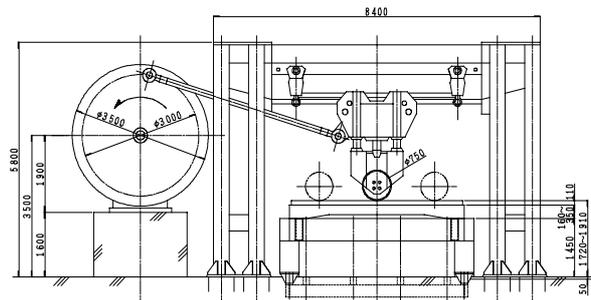
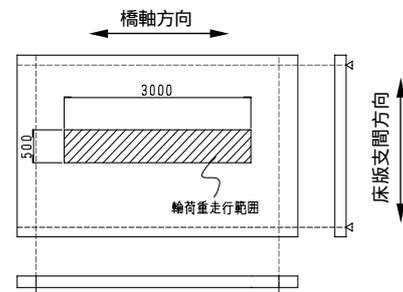


図-4 クランク式輪荷重走行試験機

持、橋軸方向を横桁で支持し、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に供試体設置状況およびクランク式輪荷重走行試験機を示す。

(2) 荷重載荷パターン

所定のコンクリートの圧縮強度発現を確認し

た後、図-5 に示す階段状荷重漸増載荷を行った。この載荷方法は、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 20kN づつ荷重を増加させるものである。載荷速度は毎分 40 回とし、載荷は供試体が破壊に至るまで継続した。

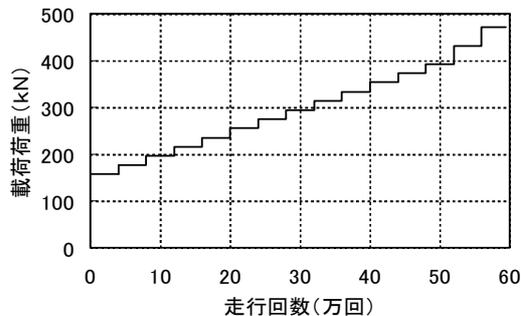


図-5 階段状荷重漸増荷重パターン

(3) 計測項目

計測項目は、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、P C 鋼材ひずみ、コンクリートひずみおよびひび割れ観測とした。図-6 に床版たわみおよび接合部目開き量を計測するための変位計の取付け位置を示す。

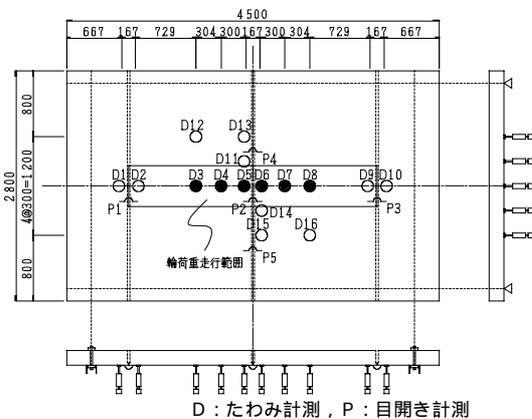


図-6 変位計の取付け位置

4. 試験結果および考察

4.1 硬化コンクリートの試験結果

表-3 に硬化コンクリートの試験結果を示す。単位体積重量、圧縮強度および静弾性係数は所定の要求性能を満足している。

4.2 ひび割れ発生荷重および破壊荷重

目視によるコンクリートのひび割れ発生は、載荷荷重 373kN、走行回数 48 万回で、先ず橋軸方向のひび割れが確認された。その後、荷重と

表-3 硬化コンクリート試験結果

材齢 (日)	単位体積重量 (kN/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
2	18.5	50.2	1.87	24.8
28	18.5	56.1	2.77	28.6
34	18.1	55.6	2.67	26.3

表-4 たわみ計測結果

	走行回数 (回)	載荷荷重 (kN)	載荷時たわみ (mm)	除荷時たわみ (mm)
初期荷重載荷時	0	157	1.00	0.02
ひび割れ発生時	480,000	373	3.30	0.51
終局荷重載荷時	580,000	471	4.87	0.79
試験終了時	593,000	471	10.94	7.70

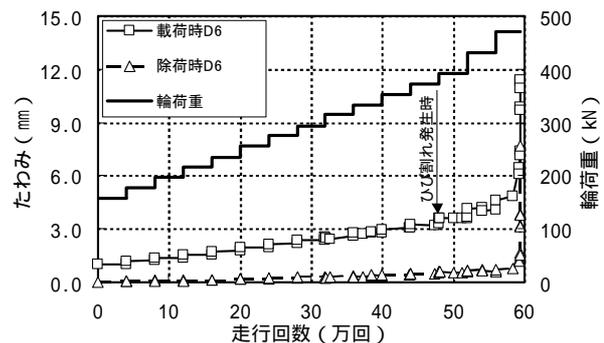


図-7 たわみ経時変化図

走行回数の増加によってひび割れが進展し、載荷荷重 471kN、走行回数 59.3 万回で急激な変位の増加が見られ、押抜きせん断破壊に至った。

4.3 床版のたわみ

表-4 および図-7 にたわみが最大となった変位計 D6 のたわみの経時変化を示す。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わかる。これは、ひび割れに伴う剛性低下によるものと考えられる。

4.4 ひび割れおよび破壊状況

図-8 に高強度軽量プレキャスト P C 床版のひび割れおよび破壊状況を示す。供試体下面には、亀甲状の曲げひび割れが見られるが、橋軸直角方向ひび割れの方が橋軸方向のひび割れより多く発生していることがわかる。また、供試体上面には、橋軸直角方向のひび割れは見られない。

破壊形状は押抜きせん断破壊で、せん断破壊面の角度は、橋軸直角方向に約 15° となっている。

4.5 P C 床版相互の目開き

図-9 に供試体中央位置(図-6 中の変位計 P2)

でのPC床版相互の目開き量変化を示す。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，終局荷重付近（載荷荷重 471kN，走行回数 58 万回）でも載荷時 0.2mm 除荷時 0.05mm 程度であった。また，目開き量の変化に着目すると，終局荷重状態近傍まで大きく変化していないことがわかる。これは，終局荷重状態近傍まで，プレストレスが有効に作用しており，PC床版相互の目開きを抑えているためと考えられる。接合部鋼材の許容目開き量として，コンクリート標準示方書に示されているPC鋼材使用時の許容ひび割れ幅⁵⁾を適用すると， $w_a=0.004c=0.004 \times 30=0.12\text{mm}$ となるが，試験開始直後では載荷時および除荷時とも目開き量は許容値以下となっている。ここで，輪荷重走行試験開始時の載荷荷重 157kN は，道路橋示方書におけるT荷重=100kN に衝撃係数 $i=20/(50+L)=0.377$ を考慮した荷重（138kN）より大きいことを考えると，接合部の目開き量は，疲労耐久性上，問

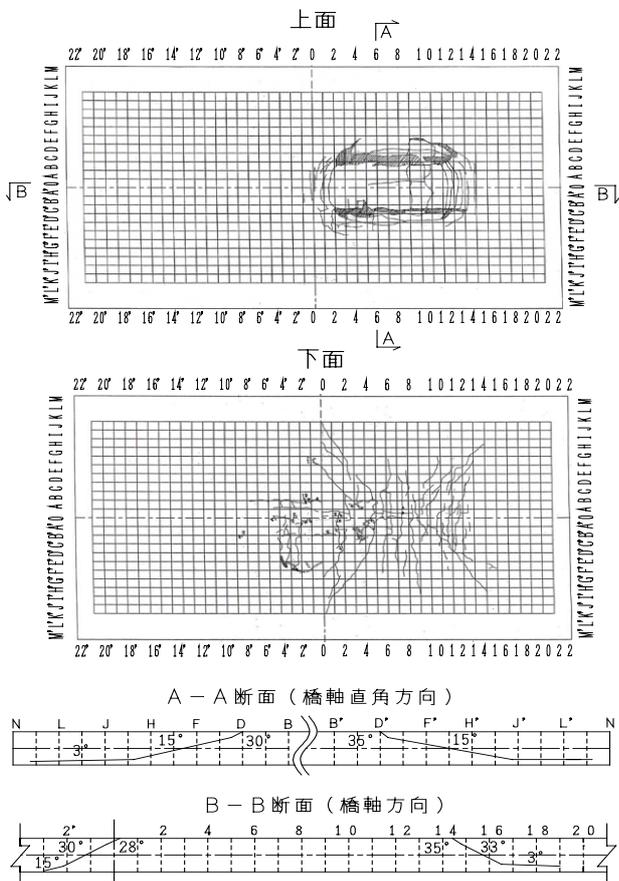


図-8 ひび割れおよび破壊状況

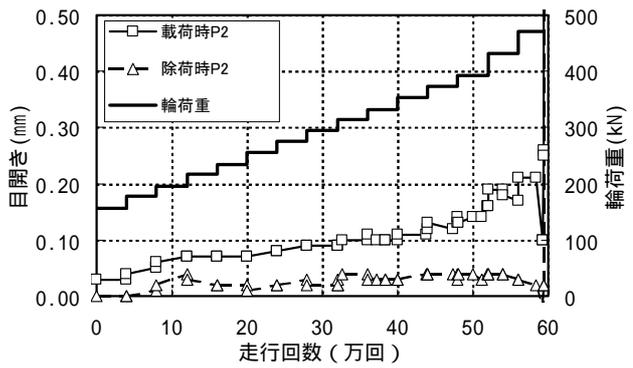


図-9 PC床版相互の目開き量

題とはならない。

5. 高強度軽量プレキャストPC床版の疲労耐久性評価

5.1 RC床版との比較

図-10 に国土交通省土木研究所で行われた平成8年版道路橋示方書によるRC床版⁴⁾(以下，RC8)および高強度軽量プレキャストPC床版の輪荷重走行試験結果の比較を示す。RC8は載荷荷重 275kN，走行回数 26 万回で押抜きせん断破壊を示したと報告されている。ここで，RC8の床版厚は 250mm で，コンクリートの圧縮強度は 27.6N/mm^2 であった。一方，高強度軽量プレキャストPC床版の床版厚は 180mm であるにもかかわらず，図-10 に示されるようにRC8に比べ，破壊時荷重および走行回数とも大きく上回っている。また，同じ載荷荷重に対する供試体中央位置でのたわみも小さくなっており，RC8より高い剛性を示すことがわかる。高強度軽量プレキャストPC床版が，RC8に比べて高い疲労耐久性を有する理由として，

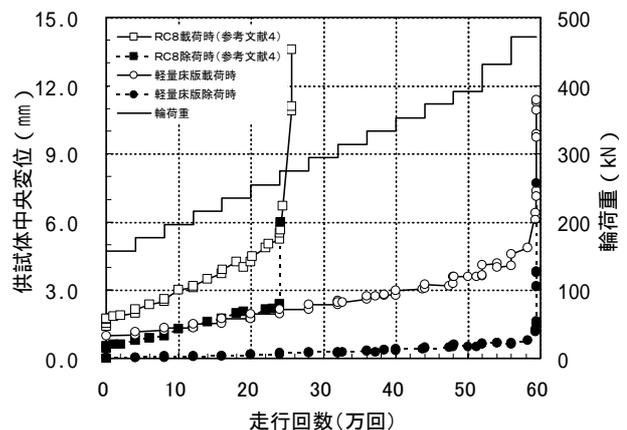


図-10 RC床版との比較

以下の要因が考えられる。

- ・プレストレスの効果により、ひび割れ発生耐力が大きく、ひび割れの進展が小さいため、RC8より床版剛性が大きくなり、たわみは小さくなる。
- ・高強度コンクリートとしているため、軽量コンクリートによる引張強度やせん断強度の低下を考慮しても、RC8より押抜きせん断耐力が大きくなる。
- ・プレストレスによって、部材内の圧縮領域がRC8に比べて大きくなり、押抜きせん断に対する抵抗面積が大きくなる。
- ・プレストレスにより押抜きせん断破壊面の角度が小さくなり、押抜きせん断抵抗面積が大きくなるため押抜きせん断耐力が向上する。

5.2 高強度軽量プレキャスト床版の疲労強度の推定

(1) 疲労強度の推定に関する既往の研究

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(P_{sx})に対する作用せん断力(P)の割合 P/P_{sx} と、繰返し回数(N)の関係に対数式を用いて式(2)を提案している。また、貫通ひび割れが発生し梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力(P_{sx})の算定式として式(3)を提案している。

その後、橋軸直角方向にプレストレスが導入されたPC床版の押抜きせん断耐力の算定に、プレストレス導入による破壊角度の補正を考慮

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = 0.078351 \text{Log}N + \text{Log}1.52 \quad (2)$$

$$P_{sx} = (2\tau_{s\max}X_m + 2\sigma_{t\max}C_m)B \quad (3)$$

ここに、 τ_{cr} : コンクリートのせん断ひび割れ

発生応力度 (kgf/cm^2)

$$\tau_{cr} = 1.005 \sqrt{\sigma_{t\max}^2 + \sigma_{t\max} \sigma_{pe}}$$

$\tau_{s\max}$: コンクリートの最大せん断応力度 (kgf/cm^2)

$$\tau_{s\max} = 2.214 \sigma^{0.553}$$

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm^2)

X_m : 主鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した中立軸深さ (cm)

$\sigma_{t\max}$: コンクリートの最大引張応力度 (kgf/cm^2)

$$\sigma_{t\max} = 0.583 \sigma_{ck}^{2/3}$$

C_m : 引張側主鉄筋のかぶり深さ (cm)

B : 梁状化した梁幅 (mm) = $B = b + 2d_d$

b : 載荷版の配力鉄筋方向の辺長 (cm)

d_d : 配力筋の有効高さ (cm)

した式(4)が安松ら⁷⁾により提案されている。

$$P_{sx} = (2\tau_{s\max}X_m\alpha_m + 2\sigma_{t\max}C_m) \quad (4)$$

$$\alpha_m = 1/\tan\theta$$

$$\theta = 1/2 \tan^{-1}(2\tau_{cr}/\sigma_{pe})$$

ここに、 α_m : 破壊角度に対する補正係数

θ : 破壊角度

σ_{pe} : 有効プレストレス (kgf/cm^2)

(2) 高強度軽量プレキャストPC床版の疲労強度の推定

式(3)によるPC床版の押抜きせん断強度は、圧縮側のコンクリートの純せん断強度と引張鉄筋側のダウエル作用によるコンクリートの剥離強度の合計で表されることがわかる。軽量骨材を使用した高強度コンクリートでは、同じ圧縮強度の普通骨材を使用したコンクリートより引張強度およびせん断強度が減少することが一般に知られている。コンクリート標準示方書では、細・粗骨材とも軽量骨材としたコンクリートの場合、せん断強度および引張強度は、普通コンクリートの70%⁵⁾と定めているが、既往の研究²⁾から、粗骨材のみを軽量骨材としたコンクリートでは、これらの強度は80%程度が適切であると判断した。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。

式(2)より、階段載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 (n_i/N_i) を計算すると表-6のようになる。載荷荷重、累積走行回数および累積損傷度の関係を図-11に示す。累積疲労損傷度 (n_i/N_i)=1.00となる載荷

表-5 押抜きせん断強度

	計算式および項目	単位	実測値および計算値
ck	圧縮強度 (実験開始時)	kgf/cm ²	556
pe	有効プレストレス	kgf/cm ²	84.5
tmax	$0.583 \sigma_{ck}^{2/3} \times 0.8$	kgf/cm ²	31.5
cr	$1.005 \sqrt{(\sigma_{t\max}^2 + \sigma_{t\max} \cdot \sigma_{pe})}$	kgf/cm ²	60.8
max	$2.214 \sigma_{ck}^{0.553} \times 0.8$	kgf/cm ²	58.4
	$1/2 \tan^{-1}(2\tau_{cr}/\sigma_{pe})$	rad	0.482
m	$1/\tan$	----	1.911
X_m	中立軸 (計算より)	cm	5.6
C_m	主鉄筋かぶり	cm	4.3
b	載荷幅	cm	20
d_d	配力鉄筋の有効高	cm	14.3
B	$b+2d_d$	cm	48.6
P_{sx}	$(2 \tau_{s\max} X_m + 2 \sigma_{t\max} C_m) B$	kgf	73913

表-6 疲労強度の推定

載荷荷重 Pi(tf)	走行回数 ni(回)	累積走行回数 ni	押抜きせん断耐力 P _{sx} (tf)	Ni(回)	累積疲労損傷度 (ni/Ni)
16	40000	40000	73.9	6.343E+10	0.00000
18	40000	80000	73.9	1.411E+10	0.00000
20	40000	120000	73.9	3.676E+09	0.00001
22	40000	160000	73.9	1.089E+09	0.00005
24	40000	200000	73.9	3.588E+08	0.00016
26	40000	240000	73.9	1.292E+08	0.00047
28	40000	280000	73.9	5.016E+07	0.00127
30	40000	320000	73.9	2.079E+07	0.00319
32	40000	360000	73.9	9.124E+06	0.00758
34	40000	400000	73.9	4.209E+06	0.01708
36	40000	440000	73.9	2.029E+06	0.03679
38	40000	480000	73.9	1.018E+06	0.07610
40	40000	520000	73.9	5.288E+05	0.15173
44	40000	560000	73.9	1.567E+05	0.40702
48	30603	590603	73.9	5.161E+04	1.00000

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、破壊荷重471kN(48tf)、走行回数59.1万回と推定される。輪荷重走行試験結果では、破壊荷重471kN、走行回数59.3万回であった。また、図-11では、累積疲労損傷度は44~48万回付近で大きく変化して、損傷が急激に進行することを示しており、輪荷重走行試験において48万回付近でひび割れ発生が観察され、その後破壊に至った経緯と良く一致している。しかし、今回の試験はデータ数が1体で、ばらつきを考えると十分とは言えないため、推定方法の検証については今後の課題とする。

6. 結論

本研究は、高強度軽量プレキャストPC床版の疲労耐久性を評価するため輪荷重走行試験を実施し、疲労強度の推定について検討を行ったものである。本研究の範囲で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 高強度軽量プレキャストPC床版に階段状荷重漸増荷重による輪荷重走行試験を実施した結果、載荷荷重471kN、走行回数59.3万回で押抜きせん断破壊を生じた。
- (2) 高強度プレキャストPC床版相互の目開き量は、設計荷重以上の荷重を載荷しても、許容ひび割れ幅以下となり、接合部の高い疲労耐久性が確認された。

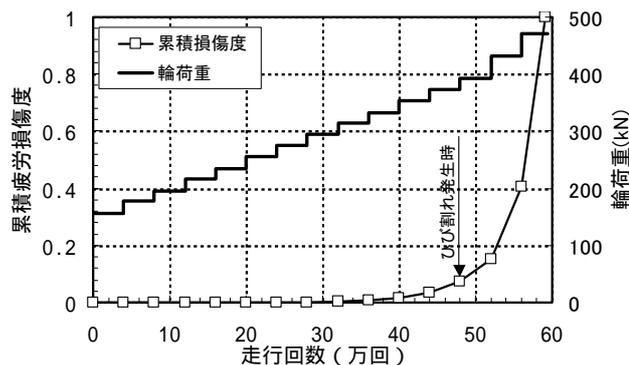


図-11 累積疲労損傷度

- (3) 床版厚180mmの高強度軽量プレキャストPC床版と床版厚250mmのRC床版(RC8)を比較したところ、床版厚が薄いにも関わらず高強度軽量プレキャストPC床版は、破壊荷重、走行回数ともRC8を大きく上回る結果となり、高い疲労耐久性を有していることが確認された。
- (4) 高強度軽量プレキャストPC床版の疲労強度の推定方法について検討を行った。今回の試験では推定値と試験結果は良く一致したが、データ数が十分でないため、疲労強度の推定方法の検証については今後の課題である。

参考文献

- 1) 例えば、関口幹夫：供用27年間のRC床版追跡調査結果，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.259-264，1998.11
- 2) 中村定明，深山清六，山崎淳：高強度軽量コンクリートを用いたプレキャストPC床版に関する研究，第二回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.101-106，2000.10
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，コンクリート橋編，1996
- 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2)，1999.10
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，1996
- 6) 松井繁之：橋梁の寿命予測 - 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) 安松敏夫，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