

プレストレスにより連続化されたRCプレキャスト床版の疲労耐久性評価

Fatigue Durability of Post-tensioned RC Precast Slabs

横山広^{*1}・栗原慎介^{*2}・加藤暢彦^{*3}・松井繁之^{*4}

Hiroshi YOKOYAMA, Shinsuke KURIHARA, Nobuhiko KATOU, Shigeyuki MATSUI

- *1 ショーボンド建設(株)補修工学研究所 (〒305-0003 つくば市桜 1-17)
 *2 ショーボンド建設(株)補修工学研究所 (〒305-0003 つくば市桜 1-17)
 *3 工博 ショーボンド建設(株)補修工学研究所 (〒305-0003 つくば市桜 1-17)
 *4 工博 大阪大学大学院 教授 工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

RC precast slabs integrated by post-tensioning in the bridge axis were tested with the wheel-running machine simulating actual traffic loading. The viewpoint of this research is to make the durability of the slab clear against decreasing the thickness of slab and/or the total pre-stress introduced into slabs. The viewpoint will make it possible to optimize the design of these slabs. It is confirmed that remarkably high fatigue durability of the precast slabs comparing with RC slab designed in accordance with the current design specifications.

Key Words: precast RC slab, post-tensioning, fatigue durability, thickness of slab

1. はじめに

道路橋床版を構築する方法に鉄筋コンクリート(以下、RCとよぶ)構造のプレキャスト床版パネルを敷き並べ、橋軸方向にプレストレスを導入して連続一体化後、支持桁と固定させる工法がある¹⁾。この工法は損傷したRC床版の打換え工法としての実績が多いが、既設桁を継続使用することから床版重量の軽量化、ならびに交通規制の時間を短縮する省力化が望まれている。現行のプレキャストRC床版の設計は平成8年に改訂された道路橋示方書(以下、道示とよぶ)に準じて行われており、床版厚さの設計では大型車交通量に対応した割増係数を考慮している。また、プレキャスト床版が全断面で抵抗するように、床版下縁で引張応力を許さないフルプレストレスとなるようにプレストレスを導入している。このため、床版重量が増加し、緊張用鋼材が密に配置されることになる。

一方、著者らは実物大床版の輪荷重走行実験で、本形式の床版は疲労耐久性に優れていることを明らかにしており²⁾、床版厚さ低減の可能性について言及した。また、東山、松井³⁾はプレストレス量を変化させた供試体の小型輪荷重走行実験で、プレストレス量が増加すると疲労寿命が指数関数的に増加することを明らかにしている。ほかにも、静的押抜きせん断実験⁴⁾や定点繰返し載荷実験⁵⁾が実施されており 3N/mm^2 程度のプレストレス導入量で連続一体化性が確保できると推察される。

そこで本研究では、現行の設計床版厚さとプレストレ

ス量を低減した場合の疲労強度を把握するため、実物大床版供試体の破壊までの輪荷重走行実験を行った。ただし、プレキャストRC床版では目地が弱点になるため、供試体は目地を中央に設けた1枚ものの床版にし、プレストレス量を変化させた2体とした。同じ輪荷重載荷装置で行われた通常のRC床版(以下、RC8とよぶ)との比較を行い、疲労強度と寿命へのプレストレスの効果について考察した。

2. 実験供試体

供試体は、支間3.0mの連続版を想定しB活荷重で設計した。ただし、大型車交通量による床版厚さの割増係数を無視する床版厚さを基本とし、25cmのRC床版での必要厚さに対して20cmとした。橋軸方向プレストレス量は、1体目の供試体SB75ではフルプレストレスの75%(3N/mm^2)、供試体SB50では50%(2N/mm^2)と2段階の応力状態を設定した。本形式の床版は、完成時で支間方向がRC構造、橋軸方向がプレストレストコンクリート(以下、PCとよぶ)構造となる。しかし、施工条件により床版を連続一体化する前に交通を仮解放する場合があるので、橋軸方向の配力鉄筋量は支間方向の主鉄筋と同様に道示によって計算した必要鉄筋量としている。

供試体を図-1に示した。SB50、SB75両供試体ともに工場製作した2枚のパネルを中央で連結したものとした。供試体は支間3.0mの連続版とほぼ同じ曲げモーメ

ントになる 2.5m を支間とし、支持条件は供試体の走行方向、すなわち橋軸直角方向の端部は単純支持し、橋軸方向は端部で弾性支持した。また、浮き上がり防止を目的で供試体の周辺 10 ヶ所で回転拘束を与えないように支持桁に固定した。

図-1(c)に過去に行われた道示RC床版供試体を示した。目地は図-1(d)に示すように凹型のせん断キーとし、無収縮モルタルを充填した。PC鋼材を配置したダクト内は緊張後にセメントグラウトを充填した。表-1~4 に使用したコンクリートの配合、材料特性、無収縮モルタル、鋼材の材料特性値を示す。SB 両供試体に使用したコンクリートの設計基準強度は 40N/mm²である。

3. 実験方法

写真-1 に輪荷重載荷装置を示す。この装置はフライホイルの回転を輪荷重の往復運動に変換するもので、橋軸方向の供試体中央から±1.5m の範囲で走行し、最大載荷力は走行時で 490kN である。荷重は連続して敷設した 20×50cm の鋼製の載荷板を介して鉄輪から供試体へ伝達される。本実験では支間方向中央に載荷されるように供試体を設置している。

本実験の載荷プログラムは図-2 のとおりである。すなわち、SB75 供試体、RC8 供試体では初期荷重 157kN から、SB50 では 172kN から実験を開始し、走行回数 4 万回毎に約 20kN 増加させる階段型で建設省土木研究所が標準試験法として提案⁶⁾しているものである。

計測項目は、床版中央でのたわみ、目地に最も近い位置の鉄筋ひずみ、目地の開き・段差で、一定回数走行毎に静的に載荷時と除荷時の計測を行った。また、ひび割れの進展状況も調査した。

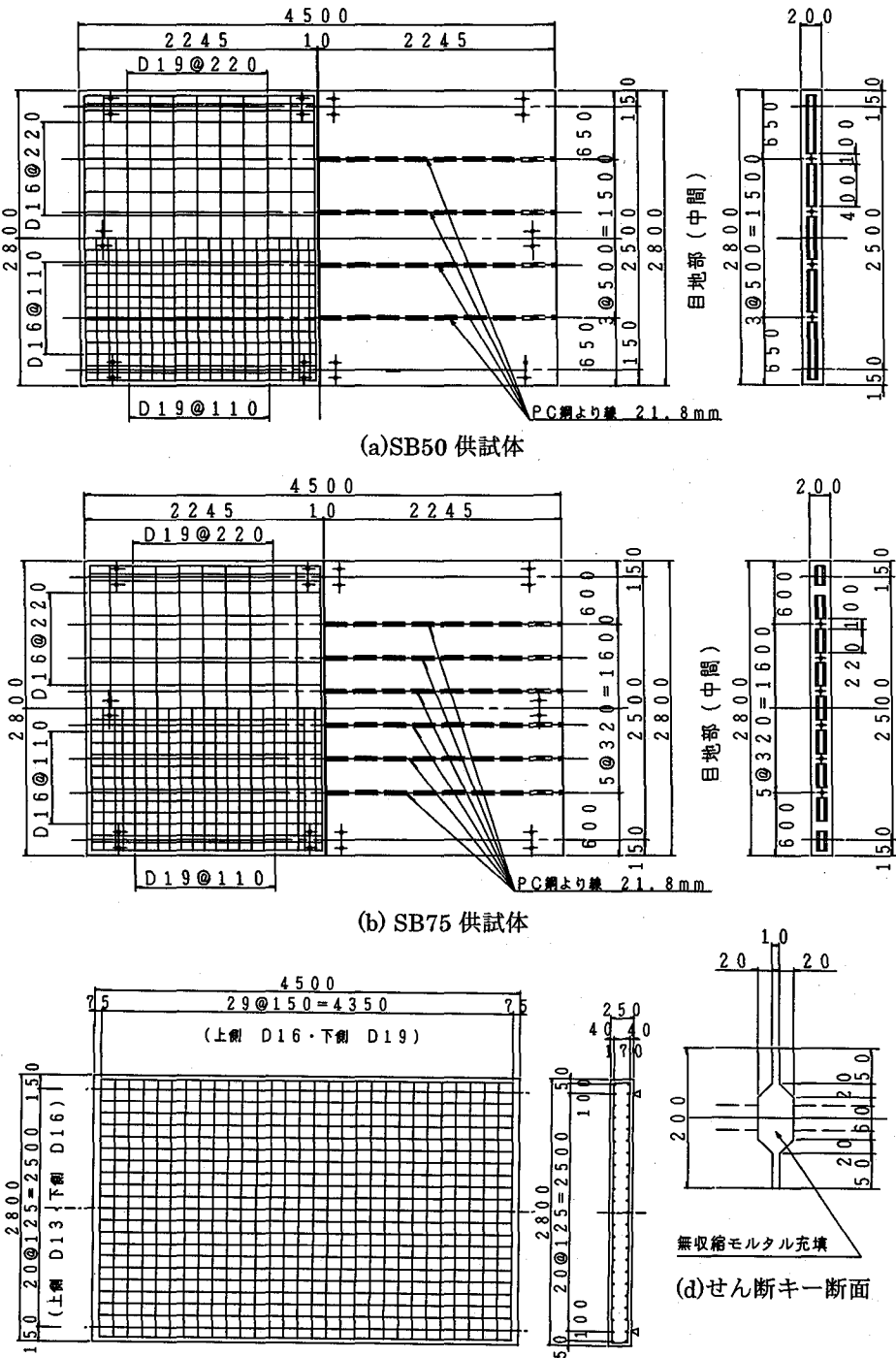


図-1 供試体形状 (単位: mm)

表-1 コンクリートの配合 (SB50, SB75)

配合強度 (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					C	W	S	G	混和剤
47.5	39.0	40.0	8.0±2.5	5.0±1.5	410	160	676	1026	3.28

表-2 コンクリートの材料特性(実験開始時)

供試体 種類	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	ポアソン比
SB50	55.3	3.7	32	0.126
SB75	52.1	3.3	33	0.166
RC8	27.1	2.3	24	0.168

表-3 無収縮モルタルの材料特性
(材令 4 日 SB50, SB75)

供試体種 類	圧縮強度 (N/mm ²)
SB50	40.2
SB75	48.9

表-4 鋼材の試験成績表による特性値 (SB50, SB75)

種類	径 (mm)	降伏点応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
鉄筋	D16	350	519
	D19	339	526
P C鋼より線	φ 21.8	1774	1918

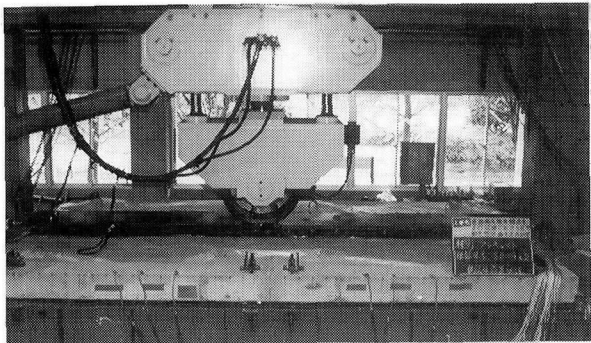


写真-1 輪荷重装置

4. 走行実験の結果

4.1 破壊荷重と走行回数

図-3 に破壊荷重と走行回数の関係を示す。SB50 供試体は載荷荷重 381kN、走行回数 365,585 回で破壊し、SB75 供試体は載荷荷重 373kN、走行回数 453,625 回で破壊した。図中には RC8 供試体の結果も示しているが、SB50 および SB75 の両供試体が RC8 供試体を上回る荷重、走行回数で破壊しているのがわかる。

破壊形態は図-4 の切断面に示されるように、床版中央付近での押し抜きせん断型であった。

4.2 たわみ

図-5 にたわみと走行回数の関係を示す。RC8 供試体の破壊直前の段階で、SB75 供試体のたわみは載荷時、除荷時ともに RC8 供試体のたわみの約 1/2 であった。SB50 供試体は載荷荷重の大きさの影響で、SB75 より大きい値で推移した。破壊直前のたわみが急増する直前の値は載荷時で約 6mm、除荷時で約 2.5mm であり、すべての供試体でほぼ同じ値で破壊に至ったことは注目すべき事であろう。

4.3 鉄筋ひずみ

図-6, 7 に SB50, SB75 各供試体中央の目地に最も近い位置の支間方向鉄筋ひずみと走行回数の関係を示す。ひずみは鉄筋の両側面に貼付したゲージの値を平均している。目地を挟んだ両側の上下鉄筋のひずみの発生状況は両供試体ともにほぼ同じ傾向を示し、実験終了まで降伏ひずみを超えることはなかった。SB50 供試体では走行回数 28 万回からは下側鉄筋のひずみが増加せず、最大で 600μ 程度であった。一方、SB75 では走行回数 44 万回で下側鉄筋のひずみが最大値を示し、平均で 650μ であった。

4.4 目地の挙動

図-8 に床版中央の目地の開きと走行回数の関係を示す。SB50 供試体では走行回数 20 万回で一度増加し、

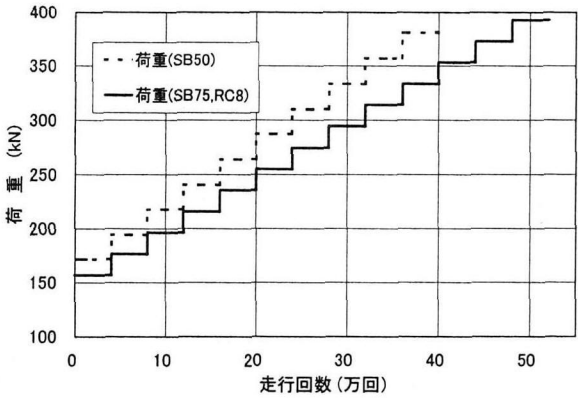


図-2 載荷プログラム

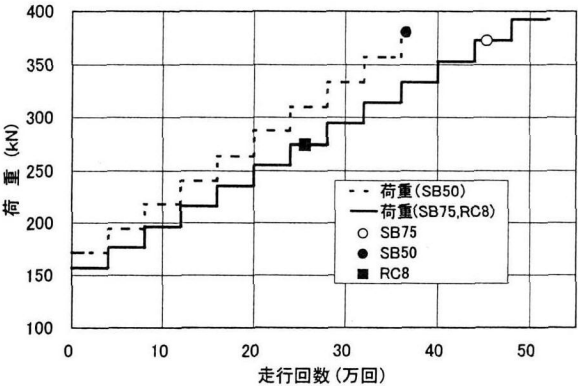


図-3 破壊荷重と走行回数の関係

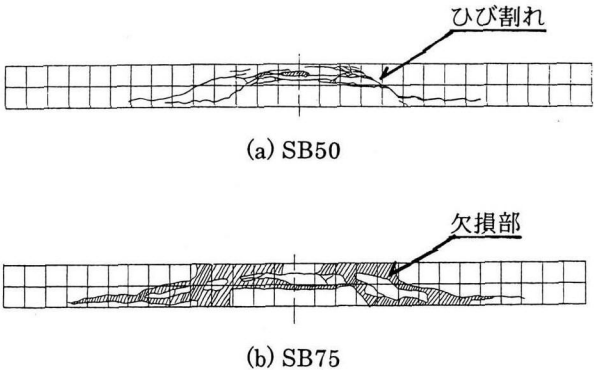


図-4 実験終了後の切断面(橋軸方向断面)

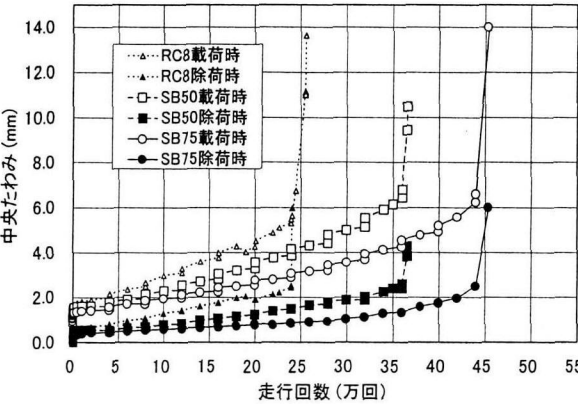


図-5 たわみと走行回数の関係

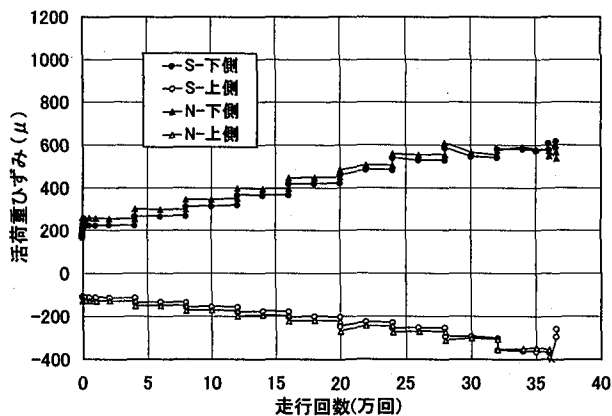


図-6 鉄筋ひずみと走行回数の関係 (SB50)

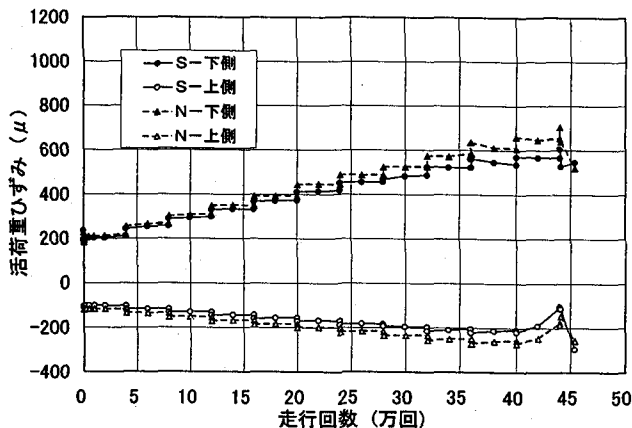


図-7 鉄筋ひずみと走行回数の関係 (SB75)

さらに28万回で約0.11mmから0.23mmまで倍増した。

SB75 供試体では走行回数20万回から増加傾向を示し40万回から急増した。図-9はSB50 供試体の破壊前約200回走行での目地の動きを連続で計測した結果である。実験終了までに異常な動きはなく、目地が先行した破壊ではないことがわかる。SB75 供試体でも同様の結果であった。

目視による目地充填材打継ぎ部のひび割れ(縁切れ)は、SB50 供試体で走行回数28万回から、SB75 供試体で走行回数36万回から確認されている。

4.5 ひび割れ発生状況

床版下面のひび割れは、載荷初期には橋軸方向のものが発生し、その後の荷重増加に伴い支間方向のひび割れが発生した。実験終了時には図-10に示すように格子状に進展していた。支間方向のひび割れ発生時期は、SB50 供試体で走行回数9.3万回、SB75 供試体で29.5万回であった。

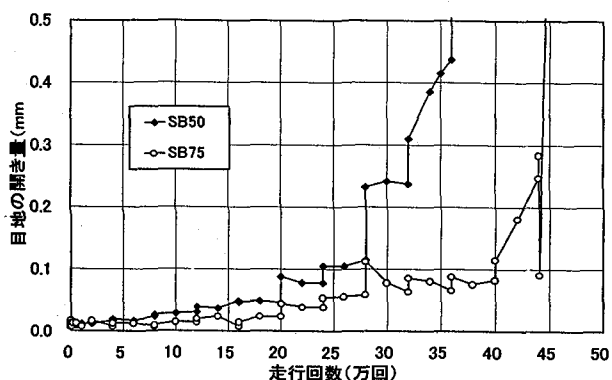


図-8 目地の開きと走行回数の関係

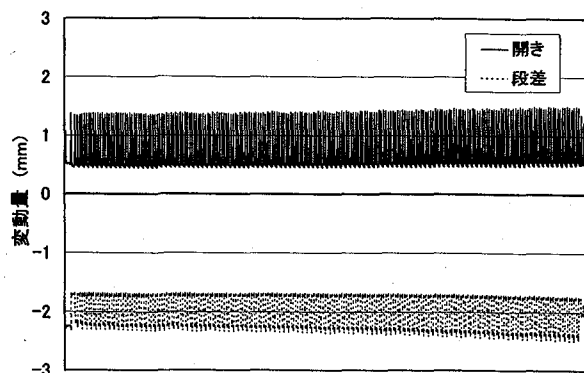


図-9 破壊前の目地の動き (SB50)

5. 考察と評価

5.1 計算値との比較

図-11に載荷荷重を157kNに想定して換算した活荷重たわみと走行回数の関係を示す。本論文での活荷重たわみを、載荷時たわみから除荷時たわみを減じたものと定義する。橋軸方向にプレストレスを導入する本形式では、ひび割れの発生していない全断面有効時の状態から、橋軸方向のみにひび割れが発生する直交異方性板の段階を経て、ひび割れが格子状に成長する引張無視時となる状態へ移行する。よって、図中の全断面有効時と引張無視時の計算では、厳密には異方性と扱わねばならないが、等方性版と考え式(1)でたわみ値を算出した。計算は、実験と同様の支持条件を持つ床版に、部分等分布荷重が作用するものとして行った⁷⁾。

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q(x, y)}{D} \quad (1)$$

ここに、 D : 版剛度 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$

E : ヤング率
 ν : ポアソン比

図-11の供試体中央の活荷重たわみと走行回数の関係によれば、実験開始当初の活荷重たわみは全断面有効時の値に近く、荷重増加に伴い引張無視時の値に近づいている。活荷重たわみの増加量が大きくなる変化点は、SB50 供試体で走行回数約28万回、SB75 供試体で約40万回である。破壊直前のたわみ急増点はSB50 供試体では引張無視時の計算値とほぼ同じで、SB75では約10%下回るものとなった。

5.2 累積損傷

東山, 松井³⁾は橋軸方向にプレストレスを導入した床版のS-N曲線に関して考察しており, 終局限界状態について式(2) (ただし, α_k の係数はない)を提案している. 本研究では, その提案式に階段型載荷による比較的大きな荷重載荷の影響を考慮するため α_k という補正係数を設定するものとした.

終局限界状態

$$\log\left(\frac{P}{V_{cpx}}\right) = -0.07835 \log(N \cdot \alpha_k) + \log 1.25 \tag{2}$$

ここに, P : 荷重

N : 走行回数

α_k : 階段状載荷による補正係数(=0.3)

V_{cpx} : セン断耐力

$$= 2B(f_{cv}x_m + f_t c_m)$$

x_m : 支間方向に直角な断面の中立軸深さ (cm)

c_m : 支間方向の下側鉄筋のかぶり (cm)

B : 橋軸方向プレストレスを考慮した
はり幅 (cm)

$$= b + 2\alpha_d d_d$$

f_{cv} : コンクリートのせん断強度 (kgf/cm²)

$$= 2.214 f_c^{0.553}$$

f_t : コンクリートの引張強度 (kgf/cm²)

$$= 0.583 f_c^{2/3}$$

b : 載荷板の橋軸方向の辺長 (cm)

d_d : 橋軸方向の下側鉄筋の有効高さ (cm)

$$\alpha_d = 1/\tan \theta_d$$

θ_d : セン断破壊面の角度

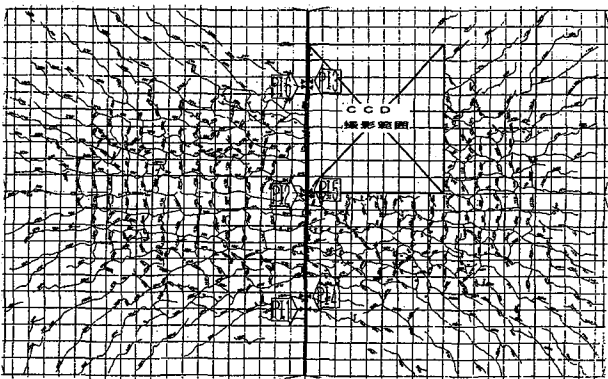
$$= \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{cr}}{\sigma_{pe}} \right)$$

τ_{cr} : セン断ひび割れ発生応力度 (kgf/cm²)

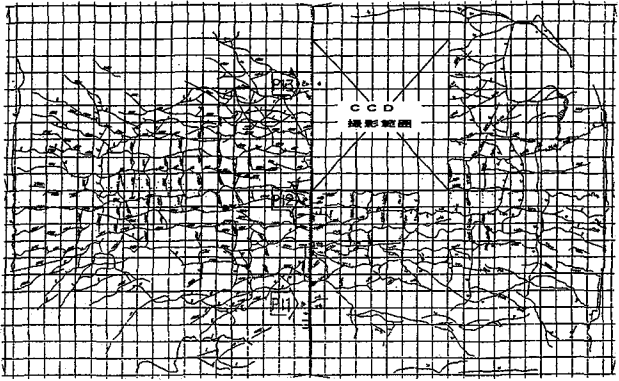
$$\tau_{cr} = 1.005 \sqrt{f_t^2 + f_t \sigma_{pe}}$$

σ_{pe} : プレストレス (kgf/cm²)

式(2)にマイナー則を適用して累積損傷度(損傷度の累計が1で破壊)を計算した結果が表-5, 6である. SB50供試体は載荷荷重 381kNで破壊しており, 計算による累積損傷度は1.134となった. 同様に SB75 供試体における



(a) SB50



(b) SB75

図-10 床版下面のひび割れ発生状況

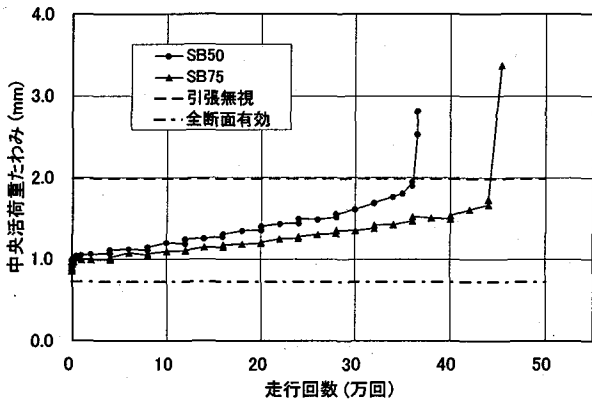


図-11 活荷重たわみと走行回数の関係 (157kN 換算)

表-5 累積損傷度の計算結果 (SB50)

載荷荷重 (kN)	走行回数	損傷度	累積損傷度
172	40,000	0.000	0.000
194	40,000	0.000	0.000
218	40,000	0.001	0.001
240	40,000	0.004	0.005
263	40,000	0.012	0.017
287	40,000	0.036	0.053
310	40,000	0.094	0.147
334	40,000	0.238	0.385
357	40,000	0.569	0.954
381	5,585	0.180	1.134

累積損傷度は 0.921 となり、何れの計算結果もほぼ 1 に近い結果となった。供試体数が 2 体の結果であるため今後のデータの蓄積、他の床版形式による実験結果の検証が必要であるが、文献 3) の提案式に補正係数を考慮した方法は大きな荷重下での階段型載荷試験の疲労寿命の予測に適用できるものと考えられる。

5.3 RC8 供試体との比較による評価

表-7 に各供試体の破壊荷重と破壊までの走行回数の一覧を示す。表によれば SB50 および SB75 両供試体の破壊時の荷重、走行回数はいずれも RC8 供試体を上回っていること、また、目地部のひび割れ（縁切れ）が確認された走行回数と活荷重たわみが増加傾向を示す走行回数でも RC8 供試体の破壊時の走行回数を上回っていることから、床版厚さ、ならびに連続一体化するためのプレストレスを低減した本実験供試体は、道示の保証する耐荷性能を有していると判断される。

疲労耐久性では、RC8 供試体破壊時における SB50, SB75 両供試体の累積損傷がほぼ 0.02 から 0.05 の範囲にあり小さいことがわかる。また、階段型載荷の走行回数をマイナー則を用いて RC8 供試体の破壊荷重 275kN における等価回数に換算すると、SB50 供試体の破壊までの走行回数が RC8 供試体の約 58 倍、SB75 供試体が約 64 倍とプレストレスの効果による大幅な疲労耐久性の伸びが認められる。

6. まとめ

プレキャスト RC 床版の床版厚さと連続一体化させるための橋軸方向プレストレスを低減するため、中央に目地を配置した実物大床版供試体の輪荷重載荷装置による繰り返し走行実験を行った。供試体の種類は、床版厚さを 20%低減し、プレストレス量をフルプレストレスの 50% (2N/mm²) と 75% (3N/mm²) とした 2 体である。本実験の範囲で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- ①実験供試体は平成 8 年道路橋示方書に準じて製作された RC 床版を上回る荷重と走行回数で破壊した。破壊形態はいずれも押抜きせん断型であった。観察の結果、破壊直前でも目地には異常な動きが見られなかった。
- ②供試体は、活荷重たわみが引張無視時の値に達するか、もしくはその値に近づいた段階で破壊した。
- ③本実験における床版形式の疲労寿命の予測には、東山、松井による提案式に階段型載荷の補正係数を考慮する方法が適用できるものと考えられる。
- ④床版厚さと連続一体化のためのプレストレスを低減した本実験供試体は、道示の保証する耐荷性能を有していると判断され、また、プレストレスの効果による大幅な疲労耐久性の伸びが認められた。

表-6 累積損傷度の計算結果 (SB75)

載荷荷重 (kN)	走行回数	損傷度	累積損傷度
157	40,000	0.000	0.000
177	40,000	0.000	0.000
196	40,000	0.000	0.000
216	40,000	0.001	0.001
235	40,000	0.002	0.003
255	40,000	0.006	0.009
275	40,000	0.015	0.024
294	40,000	0.036	0.050
314	40,000	0.081	0.131
334	40,000	0.176	0.307
353	40,000	0.366	0.673
373	13,625	0.248	0.921

表-7 各供試体の破壊荷重と破壊までの走行回数

供試体名	破壊荷重 (kN)	走行回数 (万回)		
		破壊時	目地部の縁切れ	活荷重たわみ増加
SB50	381	36.6	28.0	28.0
SB75	373	45.4	36.0	40.0
RC8	275	25.6		

なお、本実験は、建設省土木研究所、(財)土木研究センター、民間 17 社 (15 工法) による「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」で行われたものである。

参考文献

- 1) 松井・大田・西川：講座鋼橋の床版⑤プレキャスト床版、橋梁と基礎、Vol. 32, No. 9, pp. 36-41, 1998.
- 2) 栗原・金崎・金田・松井：橋軸方向にプレストレスを導入した RC プレキャスト床版の疲労性状、構造工学論文集、Vol. 44A, pp. 1365-1372, 1998.
- 3) 東山・松井：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, pp. 79-90, 1998.
- 4) 松井・中井・袴田・竹中：プレストレスを導入するプレキャスト床版の継目部の連続性と耐荷力に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 34A, pp. 275-284, 1988.
- 5) 横山・佐藤・栗原・木田：プレキャスト床版の連続化に対するプレストレス量の実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 21, No. 3, pp. 841-846, 1999.
- 6) 建設省土木研究所・(財)土木研究センター・民間 17 社：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 1) - 標準試験方法および第 1 回試験報告 - , pp. 1-14, 1999.
- 7) (社) 建設コンサルタンツ協会大阪支部・建設技術資料センター：平板とシャイベの解析, pp. 10-37, 1973.

(1999 年 9 月 17 日受付)