

一方向をプレストレスした PC 床版の疲労耐久性に関する検討

Examination about fatigue durability of PC slabs prestressed to one direction.

川間 重一* 西川 和廣** 内田 賢一***

Shigeichi KAWAMA, Kazuhiro NISHIKAWA, Kenichi UCHIDA

*工修 建設省土木研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)
 **工修 建設省土木研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)
 *** 建設省土木研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

In this study, authors conducted wheel running machine test in order to examine the fatigue durability of highway bridge PC slabs prestressed to transverse direction.

Specimens were designed in accordance with the specification in 1996. The thickness of specimens were designed as minimum in the specification. And the transverse direction of specimens were designed as full prestressed concrete.

The wheel running machine test were conducted as incremental loading test.

As a result of the test to PC slabs, the rapid increase of deflection and punching shear destruction of upper surface were confirmed.

In the examine of fatigue durability of PC slabs, authors considered some conditions as follows.

- The design bending moment of specification is used in the design of PC slabs.
- The test were accelerated test whose initial load was 157 kN.

key words: Wheel Running Test, RC slab, PC slab, fatigue durability

1. 目的

輪荷重を直接受ける道路橋床版は、交通量の増大および車両の大型化の影響を大きく受け過酷な状況が生じると予想される。筆者らは、既に実物大の各種鉄筋コンクリート床版（以下：RC 床版）の輪荷重走行試験を実施¹⁾しその破壊メカニズムの解明と疲労耐久性の確認を行っている。しかし、国内外におけるプレレストトコンクリート床版（以下：PC 床版）の破壊のメカニズムの解明および疲労耐久性の確認は十分行われているとはいえない。

そこで本研究は、PC 床版の破壊メカニズムの解明と疲労耐久性の確認を目的に、道路橋示方書に準じて設計された橋軸直角方向の一方向にプレストレスした PC 床版を対象にした輪荷重走行試験を実施し、既に実施した RC 床版供試体⁷⁾の試験結果と比較を行いそれぞれの破壊に至るメカニズムの解明と疲労耐久性に関して考察を行った。

2. 供試体

表-1 に供試体の一覧を示す。供試体は、床版支間 3.0m の連続版として平成 8 年道路橋示方書¹⁾（以下：道示）に準じて製作した RC8 供試体を各 6 体と同じく道示に準じて製作された PC8 供試体の 2 体とした。

なお RC8 供試体は、圧縮鉄筋量を鉄筋径で調整した RC8o と鉄筋の配置間隔で調整した RC8n の各 3 体ずつとした。

ここで RC8 供試体では、大型車交通量を道示に示す 2,000 台以上として最小全厚に 1.25 倍して、PC8 供試体は、プレストレスの導入より床版の最小全厚を 0.9 倍して床版厚さを決定し、プレストレス量および鉄筋量を決定した。

表-1 供試体の一覧

供試体名	床版厚 (mm)	鉄筋呼び径	有効高 (mm)	間隔 (mm)
RC8o	250	D19 (D16)	210 (40)	150 (150)
		D16 (D13)	195 (55)	125 (125)
RC8n	250	D19 (D19)	210 (40)	150 (300)
		D16 (D16)	192 (58)	125 (250)
PC8	180	D13 (D13)	143.5 (36.5)	250 (250)
		1S19.3	101	250
		D19 (D19)	127.5 (52.5)	125 (250)

上段：橋軸方向 下段：橋軸直角方向 ()：圧縮側の値

図-2、図-3 および図-4 に各供試体の形状・寸法を示す。供試体の橋軸方向の寸法は、輪荷重走行試験機の走行範囲 3.0m に対して 4.5m とした。さらに供試体の橋軸直角方向の寸法は、単純支持にて試験を行うため支間中央の曲げモーメントが設計を行った 3.0m の連続板と同様になる 2.5m で支持するものとし 2.8m で製作した。

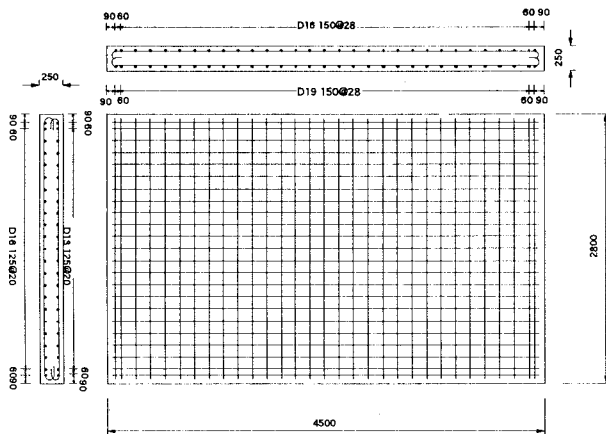


図-2 RC 80 供試体の形状・寸法 (単位: mm)

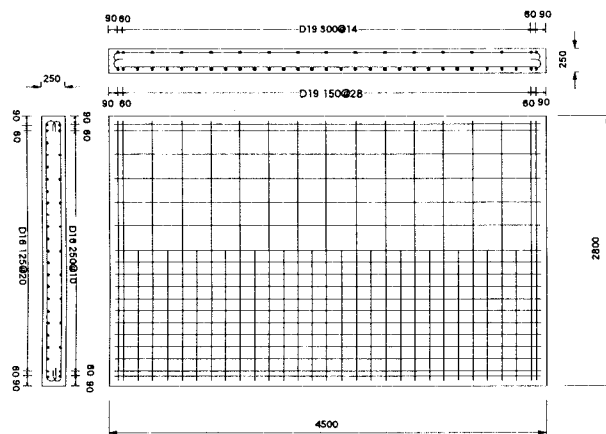


図-3 RC 8n 供試体の形状・寸法 (単位: mm)

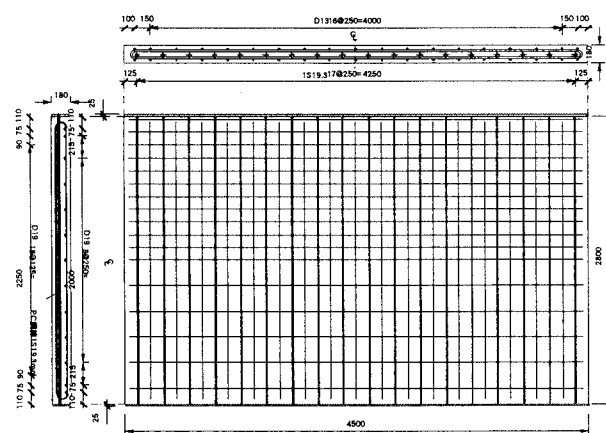


図-4 PC 8 供試体の形状・寸法 (単位: mm)

3. 試験方法

載荷試験は、図-5 に示す実際の輪荷重の走行を再現可能な輪荷重走行試験機で行った。輪荷重走行試験は、供試体上に 500×200 mm の載荷ブロックを一行に並べた軌道上を幅 500 mm 鉄輪が ±1.5m 往復して載荷するものとした。供試体は、輪荷重走行試験機に橋軸直角方向に単純支持し、橋軸方向には弾性支持した。さらに、供試体は、浮き上がりを防止するために回転拘束を与えないように支持桁に固定した。

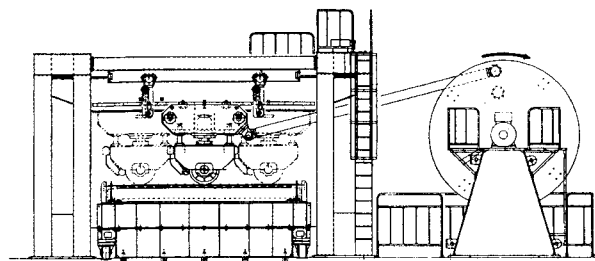


図-5 輪荷重走行試験機

載荷試験は、図-6 に示す 157kN を初期荷重として 4 万回走行毎に約 20kN づつ階段状に荷重を増加させる階段状荷重漸増載荷 (以下: 階段載荷) を行った。階段載荷は、大きな疲労耐久性を有する床版において荷重を漸増させる試験を行うことで一種の促進試験を行い、疲労耐久性の比較を容易に行えるように考慮したものである。

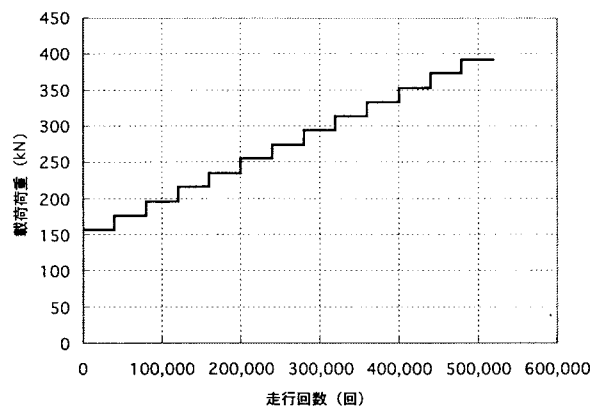


図-6 載荷方法 (階段載荷)

4. 試験結果

4.1 走行回数と破壊荷重の関係

表-2 および図-7 に各供試体の破壊荷重および走行回数を示す。ここで、RC8o-1 供試体は 255,649 回で、RC8n-1,2 供試体は 394,122 回および 489,555 回で、PC8-1,2 供試体では 403,748 回および 486,253 回で破壊に至った。しかし、RC8o-2,3 および RC8n-3 供試体においては階段載荷の最終荷重 392kN 走行回数 520,000 回においても破壊が生じず未破壊で試験を終了した。

これらの試験結果は同一な設計を行った床版においても大きくばらつく結果となった。これには、1. コンクリート強度の影響 2. 部材寸法の誤差 3. 輪荷重の走行における衝撃の影響が考えられた。コンクリート強度の影響については、表-2 に示す通り試験時のコンクリート圧縮強度が大きくばらついておりその影響が予想される。部材寸法の誤差および輪荷重の走行における衝撃の影響は、今回の供試体が実験に用いるため精度良く製作されこと、同一試験機を用いて試験を実施した事からコンクリート強度の影響と比較して影響が少ないものと予想される。

表-2 各供試体の破壊荷重および走行回数

供試体名	破壊荷重 (kN)	破壊時走行回数 (回)	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)
RC8o-1	275	255,649	27.1
RC8o-2	392	520,000 (未破壊)	46.5
RC8o-3	392	520,000 (未破壊)	45.4
RC8n-1	392	489,555	33.1
RC8n-2	333	394,122	38.3
RC8n-3	392	520,000 (未破壊)	37.4
PC8-1	353	403,748	42.9
PC8-2	392	486,253	50.0

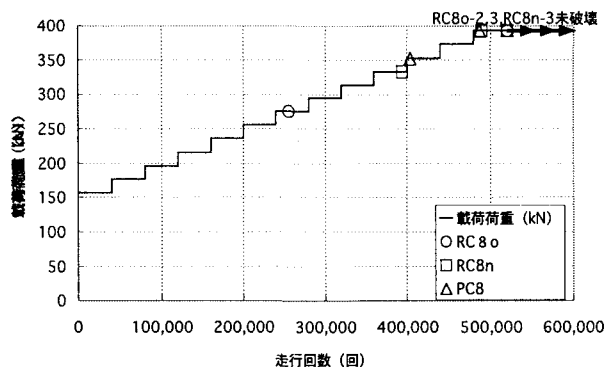


図-7 各供試体の走行回数と破壊荷重の関係

4.2 供試体の破壊状況

各供試体の破壊状況の例を図-8～図-10 に示す。ここで、破壊した供試体の断面図より破壊は載荷ブロック端部を始点とする床版上面から床版下面に広がる押し抜きせん断によるものである事がわかる。さらに PC8 供試体の押し抜きせん断破壊による広がり、RC8 供試体のそれと比較して大きい事がわかる。

各供試体の下面には、亀甲状の曲げひび割れが生じるが RC8o 供試体と RC8n 供試体に大きな差が見られなかった。しかし PC8 供試体では、プレストレスされていない方向が生じる橋軸直角方向のひび割れが卓越して生じた。

さらに上面にも輪荷重の走行により橋軸直角方向のひび割れが発生した。これらのひび割れは、破壊直前に急増し、供試体上面に配置した橋軸直角方向の鉄筋間隔と一致する間隔で発生した。

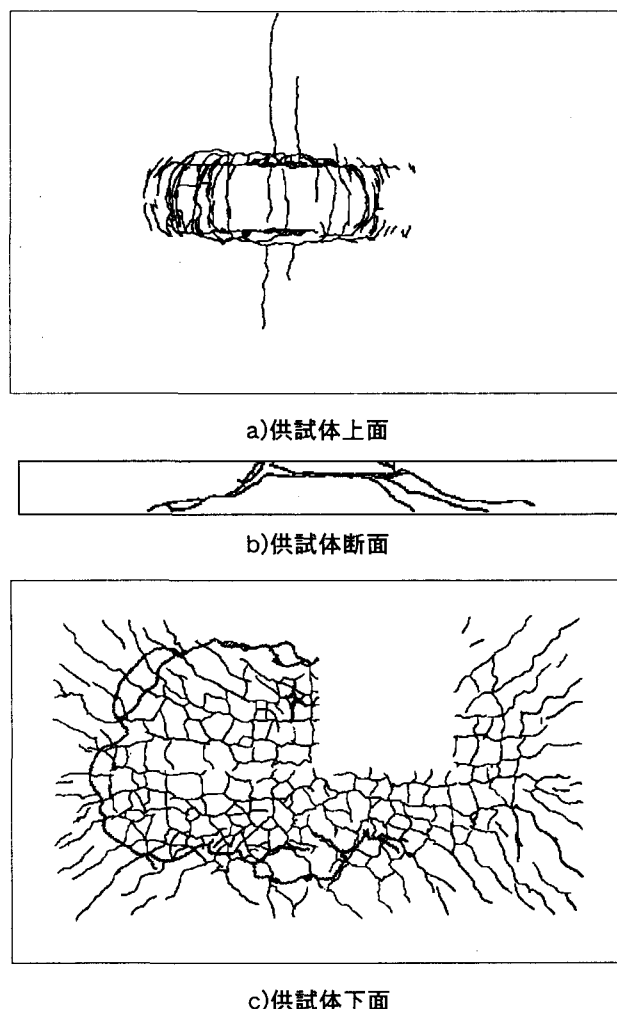
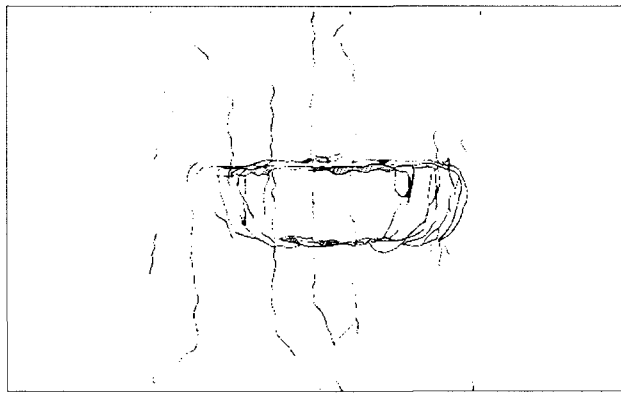
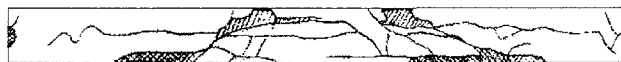


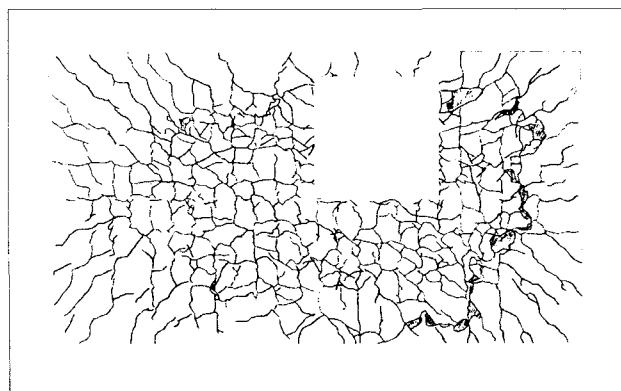
図-8 RC8o-1 供試体の破壊状況



a)供試体上面

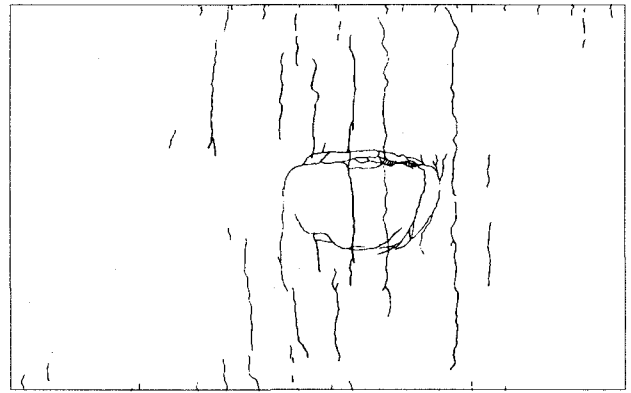


b)供試体断面

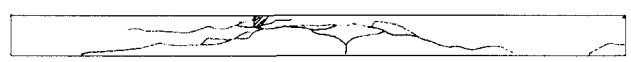


c)供試体下面

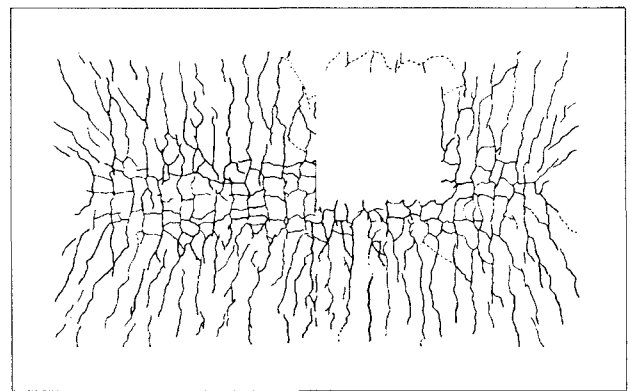
図-9 RC8n-2 供試体の破壊状況



a)供試体上面



b)供試体断面



c)供試体下面

図-10 PC8-1 供試体の破壊状況

4.3 走行回数と活荷重たわみの関係

図-11 に各供試体の走行回数と活荷重たわみの関係を示す。未破壊で終了した RC8 供試体は、破壊した RC8 供試体と比較して試験開始時から終了時まで小さな活荷重たわみを示した。また、PC8 供試体の活荷重たわみは、RC8o-1 供試体を除く RC8 供試体の活荷重たわみと比較して大きな値を示した。これには、床版厚さが

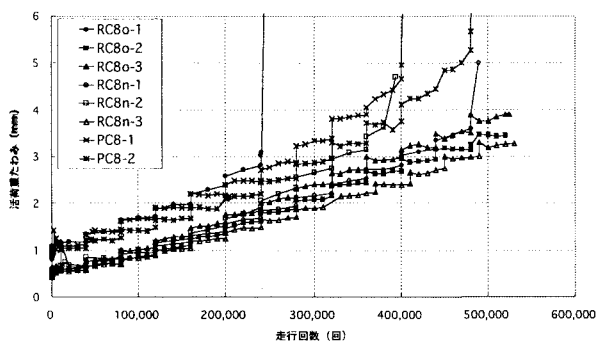


図-11 各供試体の走行回数と活荷重たわみの関係

RC8 供試体の 250mm に対して PC8 供試体が 180mm と薄い事が影響していると考えられる。

4.4 走行回数と中立軸位置の関係

図-12~15 に各供試体の中立軸位置と走行回数の関係を示す。図に示す各供試体の実測値は、実験時に計測した供試体中央部の上下鉄筋のひずみにより中立軸位置として求めたものである。また、鉄筋コンクリート断面の計算値は、コンクリートの引張領域を無視し計算により求めた中立軸位置である。

図-12 に示す RC8 供試体の主鉄筋方向の中立軸関係において各供試体の実測値は若干の減少の傾向を示すものの概ね計算値に近い値を示した。また、これらの中立軸位置の実測値は荷重を増加させた階段載荷においても変化が少なかった。また、図-14 に示す PC8 供試体の主鉄筋方向の中立軸関係でも RC8 供試体と同様に若干の減少傾向を示した。

図-13 に示す RC8 供試体の配力筋方向の中立軸関係では、いずれの供試体も実測値は、載荷初期にいったん増加したのち徐々に減少の傾向を示し、さらに破壊の直前において急激に再度増加するといった同様な傾向を示

した。また、図-15 に示す PC8 供試体の配力筋方向の中立軸関係でも RC8 供試体程の変化は見られないものと同様な傾向が伺える。

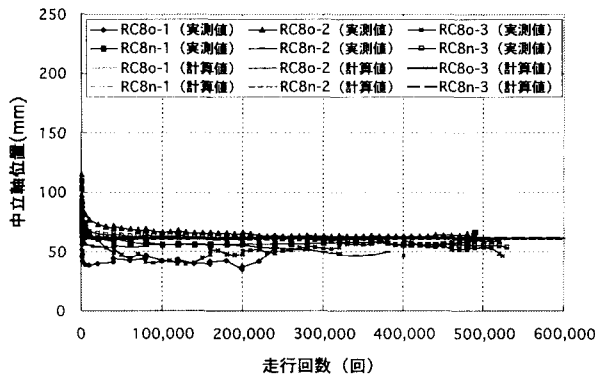


図-12 RC8 供試体の中立軸位置の変化 (主鉄筋)

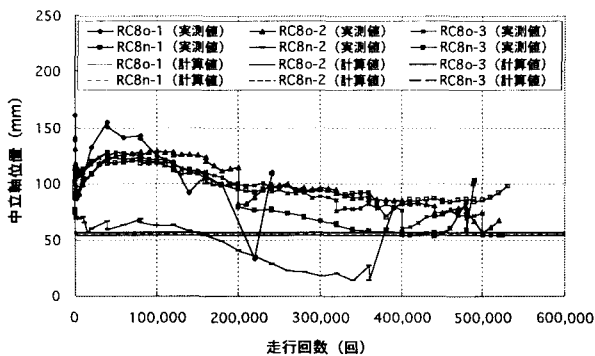


図-13 RC8 供試体の中立軸位置の変化 (配力鉄筋)

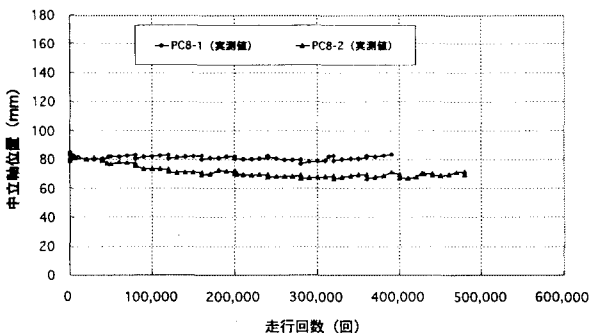


図-14 PC8 供試体の中立軸位置の変化 (主鉄筋)

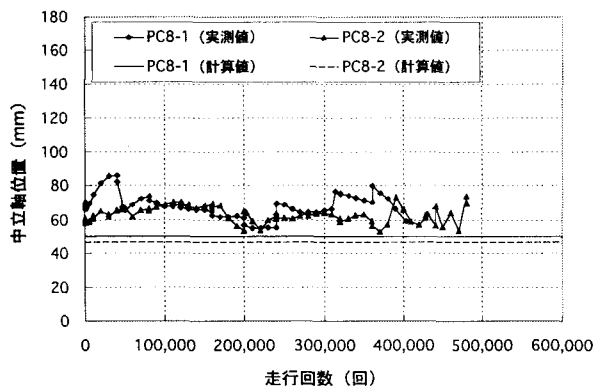


図-15 PC8 供試体の中立軸位置の変化 (配力鉄筋)

4.5 PC床版の疲労耐久性評価

図-7 で示した各供試体の走行回数と破壊荷重の関係は、4.1 に示す通りコンクリート圧縮強度のばらつきの影響を含んでいると考えられ、試験結果のみで各供試体の疲労耐久性を比較検討する事が困難と考えられた。そこで、各供試体の疲労耐久性を直接比較が可能とするため、コンクリート強度のばらつきを補正することとした。補正は、既往の研究から⁸⁾ 本研究で対象となる各供試体が以下に示す S-N 曲線²⁾に従うものと仮定して行った。ここで、主鉄筋断面の中立軸深さ x_m に関して RC8 供試体は 4.4 において中立軸が計算値と実測値で良く整合したので計算値を、PC8-1,2 供試体では破壊の直前で示した実測値の 80mm および 70mm を用いた。

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.07835 \text{Log}N + \text{Log}1.52 \quad (1)$$

P = 載荷荷重

N = 走行回数

P_{sx} = 有効幅 B のはりの押し抜きせん断耐荷力

$$= 2B (\tau_{\max} \cdot x_m \cdot \alpha_m + \sigma_{\text{tmax}} \cdot c_m) \quad (2)$$

B = はりの有効幅

$$b + 2d_d$$

b = 載荷ブロックの配力筋方向の辺長 (cm)

d_d = 配力鉄筋の有効高さ (cm)

τ_{\max} = コンクリートの最大せん断応力度 (kgf/cm²)

$$= 0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2 \quad (3)$$

$$= 2.214 \sigma_{ck}^{0.553} \quad (4)$$

σ_{tmax} = コンクリートの最大引張応力度 (kgf/cm²)

$$= 0.583 (\sigma_{ck})^{2/3} \quad (5)$$

σ_{ck} = コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

x_m = 主鉄筋断面の中立軸深さ (cm)

c_m = 主鉄筋断面のかぶり (cm)

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

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

$$\tau_{cr} = 1.005 \sqrt{\sigma_{\text{tmax}}^2 + \sigma_{\text{tmax}} \cdot \sigma_{pe}}$$

補正は、まず階段載荷により得られた各供試体の走行回数を文献²⁾により、一定荷重 P で載荷したときの N に換算した。次にこの N と材料試験結果で求めた P_{sx} および補正するコンクリート強度で求めた P_{sx} の関係から(1)式の傾きを用いて、コンクリート強度が補正された N を求めた。更に、先に行った手法により、この N を同様に階段載荷へ換算した。補正における RC8 供試体および PC8 供試体のコンクリート圧縮強度は、道示に規定されている最低設計基準強度の 24N/mm² および 30N/mm² とした。また、コンクリート圧縮強度を補正するにあたり、各供試体に使用されるコンクリートの材料試験結果から、引張強度は(5)式の比率をもって補正し、弾性係数は、道示の弾性係数を直線補間した値と実測値との比が設計基準強度での道示の弾性係数と補

正值との比が同じになるように求めた。なお、コンクリートの最大せん断応力度 τ_{max} の計算は、既往の文献⁵⁾を参考に RC8 で(3)式を PC8 で(4)式を用いている。

以上の結果より、図-16 に設計基準強度における階段載荷の補正結果を示す。図より各供試体の破壊時走行回数は、RC8 が約 22 万回以上の範囲に分布し、僅かではあるが、RC8n が RC8o より、やや多めの破壊時走行回数となった。さらに PC8 供試体と RC8 供試体を比較すると PC8 供試体は、RC8 供試体の破壊時走行回数の範囲内で破壊しており、階段載荷では床版厚さの異なる両供試体の疲労耐久性に差が見られなかった。

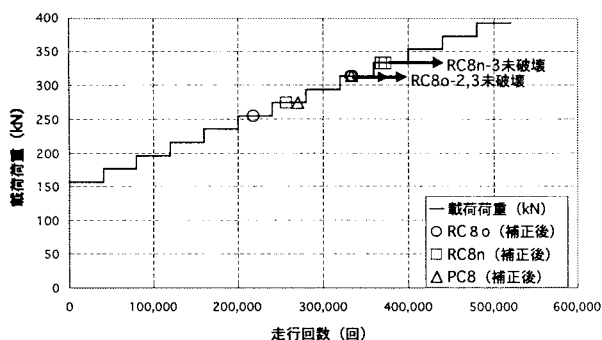


図-1 6 各供試体の走行回数と破壊荷重の関係
(コンクリート強度による補正後)

以上の検討により本試験における階段載荷での各供試体の疲労耐久性を直接比較する事が可能となったと考えられるが、これらは設計荷重と比較して大きな荷重を載荷する試験を実施した場合であり、実橋における疲労耐久性を正しく評価したと言えない場合があると考えられる。これは、PC8 供試体の様に床版の設計において橋軸直角方向の床版上下面に引張り応力度が発生しないように設計される床版において今回の階段載荷のように大きな荷重を載荷することによりひび割れが多数生じる状態での載荷試験を行った場合も考えられる。

PC8 供試体において設計曲げモーメントまでは、プレストレスの効果により床版下面に引張り応力度が生じないので(2)式に示すせん断に抵抗する断面が階段載荷を行った状態と比較して大きくなり、よって大きな押し抜きせん断耐荷力を有する事が理解される。このことから実橋における PC 床版は、RC 床版と比較して大きな疲労耐久性を有すると考えられる。

5. まとめ

道示に準じて床版厚さの異なる RC8 供試体と PC8 供試体の輪荷重走行試験を行った結果、以下の事が理解された。

- ・ PC8 供試体の押し抜きせん断破壊における床版下面の広がり、プレストレスの効果により RC8 供試体と比較して大きくなった。
- ・ 階段載荷を行った PC8 供試体は、RC8 供試体と同等な疲労耐久性を示したが、載荷試験における破壊形態と設計の条件から考察すると、PC8 供試体は、RC8 供試体と比較して大きな疲労耐久性を示す事ができると考えられる。

参考文献

- 1) 前田幸雄,松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式 土木学会論文集第 348 号/V-1 1984.8
- 2) 阪神高速道路公団阪神高速道路管理技術センター：道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性 1991.12
- 3) 西川和廣,内田賢一,神田昌幸：輪荷重走行試験機による道路橋床版の疲労試験 土木学会第 51 回年次学術講演会 1996.9
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 1996.12
- 5) 東山浩士,松井繁之：プレストレスしたコンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力 構造工学論文集 vol.44a 1998.3
- 6) 西川和廣,内田賢一：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討 土木学会第 53 回年次学術講演会 1998.10
- 7) 西川和廣,内田賢一：既設床版の疲労耐久性に関する検討 第 1 回鋼橋床版シンポジウム講演論文集 1998.11
- 8) 安松敏雄,長谷俊彦,篠原修二,長瀬嘉理：交通荷重状態を考慮した鋼橋床版の疲労設計に関する検討 第 1 回鋼橋床版シンポジウム講演論文集 1998.11
- 9) 川間重一,西川和廣,内田賢一：既設 RC 床版の階段状荷重漸増載荷における疲労耐久性評価手法に関する検討 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集 2000.9