

# トラス鉄筋を用いたハーフプレハブ合成床版の疲労設計のための一考察

## Discussions on Fatigue Durability of Composite Slabs based on Prestressed PCa Half Decks with Truss-Bars

岡本浩\*, 肥沼年光\*\*, 大田孝二\*\*\*, 松井繁之\*\*\*\*, 堀川都志雄\*\*\*\*\*

Hiroshi OKAMOTO, Toshimitsu KOINUMA, Koji OHTA, Shigeyuki MATSUI, Toshio HORIKAWA

\*工修 飛鳥建設(株)土木本部土木設計部 課長(〒102-8332 東京都千代田区三番町 2)

\*\*日本カイザー(株)技術部 課長(〒150-0011 東京都渋谷区東 3-15-7)

\*\*\*工博 ヤマト設計(株) 技師長(〒135-0031 東京都江東区佐賀 1-1-3)

\*\*\*\*工博 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

\*\*\*\*\*工博 大阪工業大学 工学部都市デザイン工学科 教授(〒535-0002 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1)

In this decade, new composite slabs composed of prestressed half-thickness PCa decks and in-situ concrete layer have been developed and were adapted to actual highway bridges. From experimental results of two types of specimen by wheel running tests and numerical analytical results for the slabs using thick plate theory, a clear linear relationship between the running cycles of the wheel running test and the density of cracks on the bottom surface, and also a linear relationship between crack width and the density of crack have been found. And by considering the amount of shear stresses along the boundary interface between PCa deck and in-situ concrete by numerical analysis, truss-bar reinforcements seem to be very effective to the composite action and durability of the composite slabs. A new S-N formula of the composite slab is derived based on the one of RC slabs. A PRC design method is also recommended from the viewpoint of economy.

**Keywords:** prefabricated half PCa deck installed truss-bar reinforcements, Composite slab of concrete and concrete, fatigue durability, cracking characteristics, S-N formula, PRC design

### 1. はじめに

平成 10 年に旧建設省土木研究所において実施された 2 体のハーフプレハブ合成床版(プレストレスの導入されたトラス鉄筋付プレキャスト版と場所打コンクリートとの合成床版,以降 HPCa 合成床版と称する)の輪荷重走行試験結果<sup>1)</sup>を用いて, 2 層からなる合成床版の疲労則(S-N 曲線)を提案する. また, ひびわれ密度と走行回数, 荷重強度とひびわれ幅およびプレキャスト版(以降 PCa 版と称する)と場所打ちコンクリートとの付着について評価を行い, 維持管理上の目安について検討する. 同時にひびわれを許す PRC 構造への適用に関しても言及する.

### 2. 疲労則に関する検討

HPCa 合成床版は, プレストレスを導入した PCa 版と場所打ちコンクリートの 2 層からなる合成床版であるため, RC 床版で得られた S-N 曲線<sup>2)</sup>や PC 床版で得られた S-N 曲線<sup>3)</sup>を直接適用することは困難である.

輪荷重走行試験を実施した 2 体の供試体の概要を表-1 に示す.

表-1 供試体の概要

	PCa版		場所打部		床版全厚 (mm)	実験結果
	厚さ(mm)	強度(N/mm <sup>2</sup> )	厚さ(mm)	強度(N/mm <sup>2</sup> )		
供試体1	100	50 (55.7)	125	30 (46.5)	225 (228)	未破壊
供試体2	100	50 (54.2)	100	30 (34.9)	200 (198)	破壊(42.5万回)

( ):実測値

供試体 2 は載荷途中で破壊に至った<sup>1)</sup>. 供試体 2 の破壊状況を以下に述べる.

- ① 破壊パターンは RC 床版とほぼ同様に, 亀甲状のひびわれが発達した後, 梁化して急激に耐荷力を失った.
- ② このときの梁化幅は, 松井の提案する S-N 曲線における梁化幅  $B$ (式(3))にほぼ一致した.
- ③ 写真-1 に示すように, 破壊形式は押し抜きせん断破壊であった.
- ④ また, PCa 版と場所打ちコンクリートの間には剥離は見られなかった.
- ⑤ ひびわれの角度は場所打ちコンクリート内ではほぼ 45 度, PCa 版内では若干緩やかになっていた.

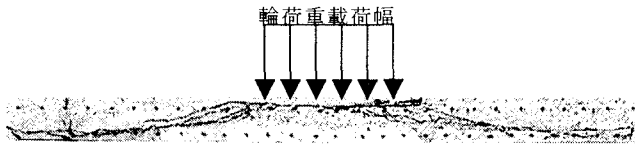


写真-1 押し抜き破壊状況(供試体2, 橋軸直角方向断面)

HPCa 合成床版の破壊形態に対する観察から、本床版の S-N 曲線を以下のように仮定した。

$$\log\left(\frac{P}{P_{SX}}\right) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.520 \quad (1)$$

$$P_{SX} = 2 \cdot B \cdot (\tau_{s,max,c} \cdot x_m + \alpha \cdot \tau_{s,max,p} \cdot \frac{t_p}{2} + \sigma_{t,max} \cdot \frac{t_p}{2}) \quad (2)$$

$$B = b + 2 \cdot d_d \quad (3)$$

ここに、 $t_p$  = PCa 版厚

$$\tau_{s,max,c} := 2.214 \cdot c \cdot \sigma_{ck}^{0.553}$$

$$\tau_{s,max,p} := 2.214 \cdot p \cdot \sigma_{ck}^{0.553}$$

$$\sigma_{t,max} := 0.583 \cdot p \cdot \sigma_{ck}^{2/3}$$

$c \cdot \sigma_{ck}$  : 場所打ちコンクリートの強度

$p \cdot \sigma_{ck}$  : PCa 版コンクリートの強度

ここに、 $\alpha$  は補正係数であり、実際の供試体データおよび実験結果 1), 4), 5), 6) を用いて、破壊時の累積損傷度が 1.0 になるようにパラメータ  $\alpha$  を決定する。試算の結果、表-2 に示すように、 $\alpha = 0.06461$  となった。

表-2 補正係数を求めるための累加損傷度の試算(供試体2)

P <sub>SX</sub> = 63.908 tf						
ni	Σ ni	Pi(tf)	Pi/P <sub>SX</sub>	Ni(回)	損傷度	累計
40000	40000	17.50	0.2738	3.1561E+09	0.0000	0.0000
40000	80000	19.80	0.3098	6.5267E+08	0.0001	0.0001
40000	120000	22.20	0.3474	1.5154E+08	0.0003	0.0003
40000	160000	24.50	0.3834	4.3061E+07	0.0009	0.0013
40000	200000	26.90	0.4209	1.3064E+07	0.0031	0.0043
40000	240000	29.30	0.4585	4.3889E+06	0.0091	0.0134
40000	280000	31.60	0.4945	1.6729E+06	0.0239	0.0374
40000	320000	34.00	0.5320	6.5721E+05	0.0609	0.0982
40000	360000	36.40	0.5696	2.7519E+05	0.1454	0.2436
40000	400000	38.80	0.6071	1.2181E+05	0.3284	0.5720
25004	425004	41.10	0.6431	5.8410E+04	0.4281	1.0000

式(1)~式(3)を用いて、供試体1の実験における累積損傷度を算定した。その結果を表-3に示す。

図-2において実線で示す供試体2の载荷荷重は、破線で示す計画した载荷荷重プログラム(供試体1で実施されたもの)と異なっていた。供試体2の载荷プログラムが供試体1と同じであった場合、今回提案した疲労則を用いて算定すると表-4となり、破壊に至らないことが予測される。

表-3 および表-4 に使用した数値は実際の供試体の寸法および強度であり、設計上の数値(規格値)を使用した場合の計算を行うことにより、部材寸法および強度を補正することが可能となる。

この計算を行った結果、供試体1は累積損傷度が1.0に達しなかったが、供試体2は45.7万回程度で破壊するという算定結果となった。旧建設省土木研究所で行われた既往の実験結果<sup>6)</sup>と疲労則を用いて補正した供試体1および供試体2の結果をそれぞれ図-1および図-2に示す。

図-1および図-2より、どちらの供試体も平成8年度版の道路橋示方書で設計した床版厚の大きいRC床版(床版厚250mm)に比べて高い疲労耐久性を有していることがわかる。

表-3 実験における累積損傷度(無補正, 供試体1)

P <sub>SX</sub> = 68.731 tf						
ni	Σ ni	Pi(tf)	Pi/P <sub>SX</sub>	Ni(回)	損傷度	累計
40000	40000	16.00	0.2328	2.5146E+10	0.0000	0.0000
40000	80000	18.00	0.2619	5.5923E+09	0.0000	0.0000
40000	120000	20.00	0.2910	1.4574E+09	0.0000	0.0000
40000	160000	22.00	0.3201	4.3179E+08	0.0001	0.0001
40000	200000	24.00	0.3492	1.4222E+08	0.0003	0.0004
40000	240000	26.00	0.3783	5.1202E+07	0.0008	0.0012
40000	280000	28.00	0.4074	1.9884E+07	0.0020	0.0032
40000	320000	30.00	0.4365	8.2429E+06	0.0049	0.0081
40000	360000	32.00	0.4656	3.6170E+06	0.0111	0.0191
40000	400000	34.00	0.4947	1.8684E+06	0.0240	0.0431
40000	440000	36.00	0.5238	8.0440E+05	0.0497	0.0928
40000	480000	38.00	0.5529	4.0344E+05	0.0991	0.1920
40000	520000	40.00	0.5820	2.0963E+05	0.1908	0.3828

表-4 荷重载荷を補正した累加損傷度(供試体2)

P <sub>SX</sub> = 63.908 tf						
ni	Σ ni	Pi(tf)	Pi/P <sub>SX</sub>	Ni(回)	損傷度	累計
40000	40000	16.00	0.2504	9.9053E+09	0.0000	0.0000
40000	80000	18.00	0.2817	2.2029E+09	0.0000	0.0000
40000	120000	20.00	0.3129	5.7409E+08	0.0001	0.0001
40000	160000	22.00	0.3442	1.7009E+08	0.0002	0.0003
40000	200000	24.00	0.3755	5.6024E+07	0.0007	0.0010
40000	240000	26.00	0.4068	2.0170E+07	0.0020	0.0030
40000	280000	28.00	0.4381	7.8328E+06	0.0051	0.0081
40000	320000	30.00	0.4694	3.2470E+06	0.0123	0.0204
40000	360000	32.00	0.5007	1.4248E+06	0.0281	0.0485
40000	400000	34.00	0.5320	6.5721E+05	0.0609	0.1094
40000	440000	36.00	0.5633	3.1698E+05	0.1262	0.2356
40000	480000	38.00	0.5946	1.5892E+05	0.2517	0.4873
40000	520000	40.00	0.6259	8.2578E+04	0.4844	0.9717

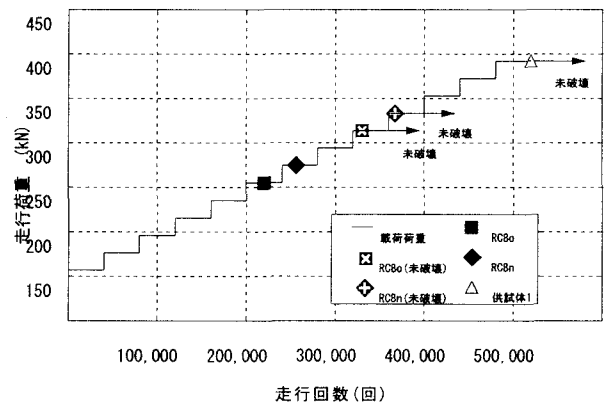


図-1 既往研究結果との比較(供試体1)

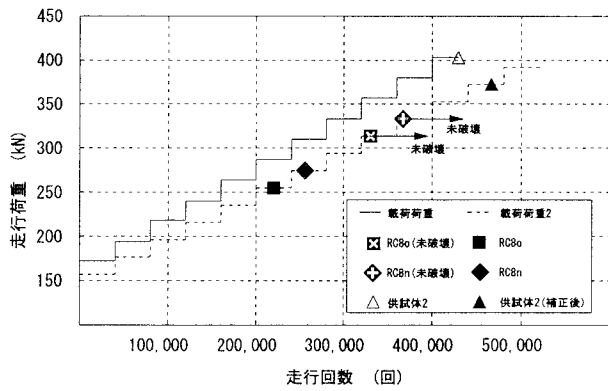


図-2 既往研究結果との比較(供試体 2)

### 3. ひびわれ密度に関する検討

供試体 1 および供試体 2 における走行回数とひびわれ密度の関係および走行回数とたわみとの関係をそれぞれ、図-3 および図-4 に示す。

床版の損傷度を表現する方法として格子密度法があり、多くの監督官庁で採用されている。例えば、東京都建設局管内の床版に対する損傷度判定基準<sup>7)</sup>は、表-5 のようである。

表-5 東京都建設局の床版のひびわれ判定ランク<sup>2)</sup>  
(ランク c 以下は割愛)

ランク	ひびわれの状態	ひびわれ密度	ひびわれ間隔	ひびわれ幅
a	1方向ひびわれが散在	2(m/m <sup>2</sup> )未満	1m以内	0.2mm以下
b	2方向ひびわれが発生	2~6(m/m <sup>2</sup> )未満	0.7~1.0m	0.2mm以上混在

表-5を参照して、図-3にはランク a の下限値であるひびわれ密度 2.0m/m<sup>2</sup>に対応する走行回数を、図-4にはランク a, b のそれぞれ下限値である 2.0m/m<sup>2</sup> および 6.0m/m<sup>2</sup> に対応する走行回数を示している。例えば、図-3 中のひびわれ密度 2.0m/m<sup>2</sup> に対応する走行回数は 274,000 回であり、これに対応したたわみは 0.27mm であることがわかる。全断面有効時とした 2 層版の数値解析<sup>8)</sup>を行い、PCa 版の弾性係数を適宜に変化させ、このたわみと一致するような弾性係数を求める。この弾性係数の計算結果を表-6 に示す。

表-6 推定した PCa 版の弾性係数

供試体	ひびわれ密度 (m/m <sup>2</sup> )	初期弾性係数 E <sub>0</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )	走行回数 (万往復)	推定弾性係数 E <sub>i</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )	E <sub>i</sub> /E <sub>0</sub>
供試体1	2.0	36.5	27.4	23.7	0.65
供試体2	2.0	32.3	13.3	19.9	0.62
	6.0	32.3	31.9	12.4	0.38

供試体 1 と供試体 2 は PCa 版の厚さは同一 (100mm) であるが、場所打ちコンクリートの厚さはそれぞれ、125mm および 100mm と異なるため、床版全厚に差があり、損傷の度合いは供試体 2 の方が大きいと言える。しかし、表-6 からは

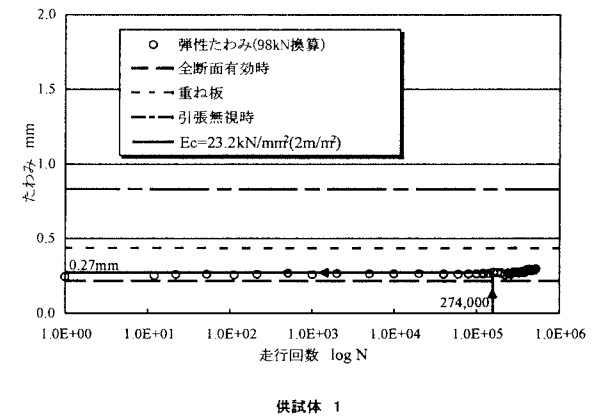
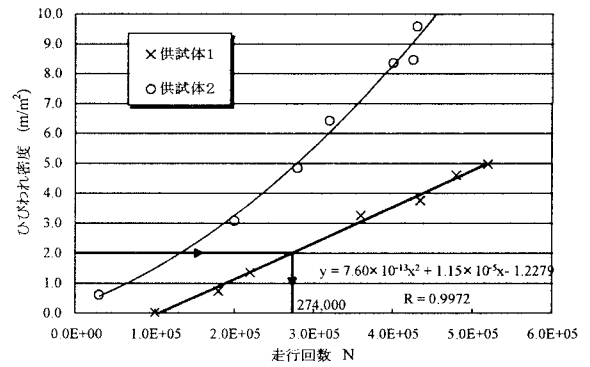


図-3 走行回数とひびわれ密度およびたわみの関係 (供試体 1)

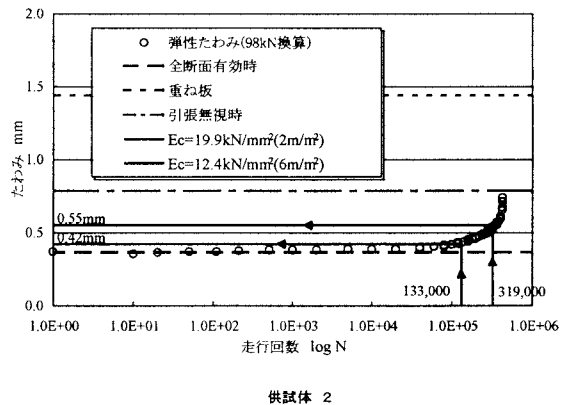
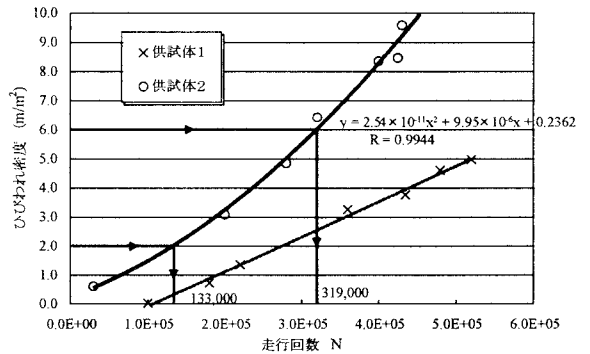


図-4 走行回数とひびわれ密度およびたわみの関係 (供試体 2)

走行回数および荷重履歴に関係なく、PCa版の見かけの弾性係数はひびわれ密度に対応していることが判断できる。同様に見かけの弾性係数の低下が床版の損傷度に直接的に影響するものとするれば、表-5の判定基準を参考にしてひびわれ幅を制限することによりひびわれ密度も制限できるものと判断できる。

#### 4. ひびわれ幅に関する検討

HPCa 合成床版のような2層構造を有する床版について荷重強度とひびわれ幅の関係を検討する。

ひびわれを許すⅢ種PC構造(PRC構造)に対する設計基準としては表-7に示すCP110 (BSI)<sup>9)</sup>が挙げられる。この方法はひびわれによる剛性低下を考慮する代わりに全断面を有効として得られる引張応力度(仮想引張応力度)の制限値とひびわれ幅を関係付ける簡便な方法である。なお、部材高さに応じて表-8に示す係数を乗じて補正する。

表-7 仮想引張応力度の制限値 (CP110)<sup>4)</sup>

	許容ひびわれ幅 (mm)	コンクリートの等級に対する制限値 (N/mm <sup>2</sup> )		
		30	40	50以上
プレテンション	0.10	—	4.1	4.8
	0.20	—	5.0	5.8
ボンド有りの ポストテンション	0.10	3.2	4.1	4.8
	0.20	3.8	5.0	5.8
断面引張線に近い位置に鋼材を 分散配置したプレテンション	0.10	—	5.3	6.3
	0.20	—	6.3	7.3

表-8 部材高さの修正係数 (CP110)<sup>4)</sup>

部材高さ (mm)	200以下	400	600	800	1000以上
修正係数	1.10	1.00	0.90	0.80	0.70

図-5および図-6は、それぞれ供試体1および供試体2における橋軸直角方向の応力分布を2層モデルの数値解析により求めたものであり、設計荷重(98.1kN)載荷時、150kN 載荷時およびPCa版下面が表-3のひびわれ幅0.1mmに対応する仮想引張応力度(図中の縦の破線)となるような載荷荷重時の応力分布をそれぞれ示している。また、図中の縦の一点鎖線は場所打ちコンクリートの許容圧縮応力度(=f<sub>ck</sub>/3)を示したものである。ただし、PCa版内のプレストレスの影響は、有効プレストレス(供試体1の上縁で5.9N/mm<sup>2</sup>、下縁で6.6N/mm<sup>2</sup>、供試体2は上下縁とも6.3N/mm<sup>2</sup>)を加算することにより考慮している。

図-5および図-6から、供試体1および供試体2ともに設計荷重時および150kN 載荷時には引張応力は発生しておらず、それぞれの供試体は324kN 載荷時および255kN 載荷時に初めて、表-7および表-8で示した引張応力度の制限値に達する。この引張応力は前述したように仮想引張応力度であり、CP110によれば、ひびわれ幅0.1mm

に相当する。

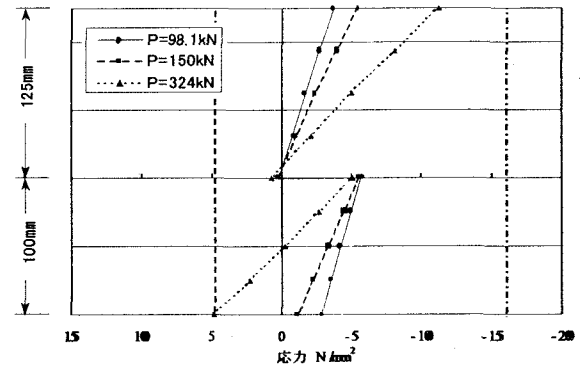


図-5 橋軸直角方向応力分布解析結果(供試体1)

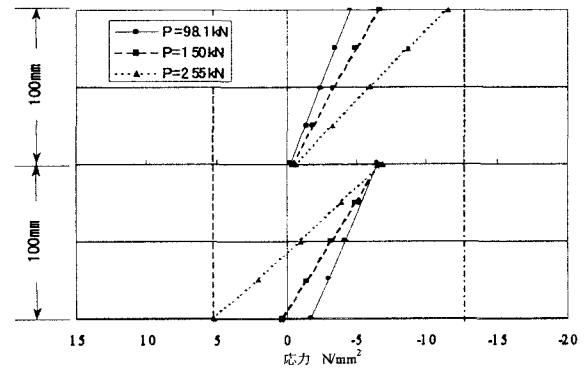


図-6 直角方向応力分布解析結果(供試体2)

供試体1および供試体2における輪荷重走行試験時のひびわれ密度が2m/m<sup>2</sup>となった走行回数とCP110の制限値を供試体に発生させる輪荷重強度の比較を、それぞれ図-7および図-8に示す。

図-7および図-8ともにひびわれ密度が2m/m<sup>2</sup>以内であれば、CP110の制限値に対応する荷重強度を満足していることがわかる。換言すれば、ひびわれ密度を2m/m<sup>2</sup>以内に押さえることにより、HPCa合成床版のひびわれ幅を0.1mm以内に押さえることが可能であると考えられる。

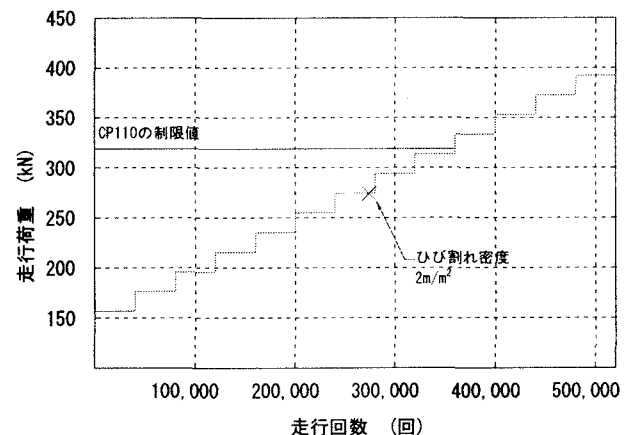


図-7 ひびわれ密度と荷重強度の関係(供試体1)

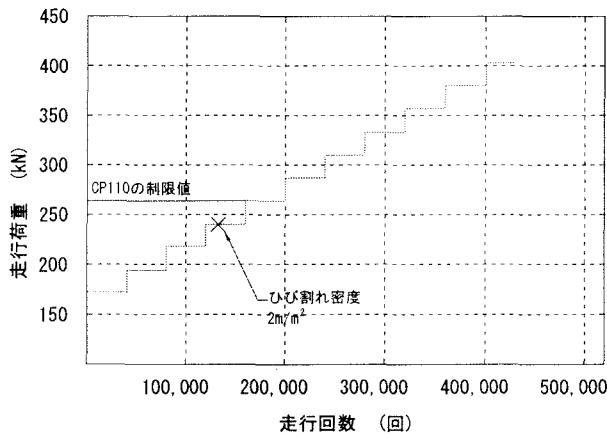


図-8 ひびわれ密度と荷重強度の関係(供試体 2)

図-9 および図-10 はそれぞれ供試体 1 および供試体 2 の橋軸方向の応力分布を示したものであり、図中の縦の破線は PCa 版コンクリートの引張強度を示し、縦の一点鎖線は許容圧縮応力度 ( $=f'_{ck}/3$ ) を示したものである。

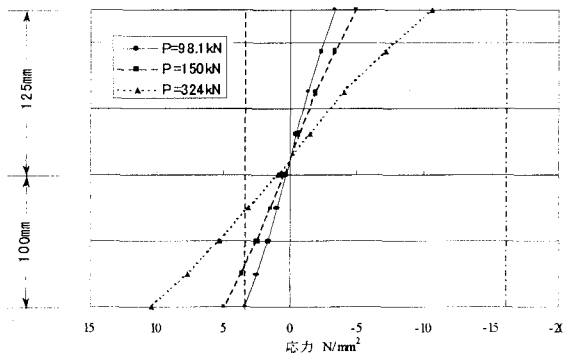


図-9 橋軸方向応力分布解析結果(供試体 1)

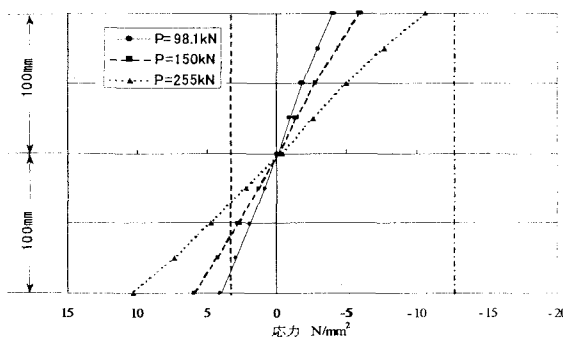


図-10 橋軸方向応力分布解析結果(供試体 2)

この算定結果から、供試体 2 については設計荷重時からひびわれが発生することが予想され、荷重強度 150kN 荷重時には供試体 1 および供試体 2 とともにひびわれが発生したものと考えられる。輪荷重走行試験の載荷荷重強度は 157kN から開始したことを考えると、両供試体ともに載荷開始直後から橋軸直角方向のひびわれが発生してい

たと考えられる。このため、橋軸直角方向のひびわれの発生により、異方性版として挙動していたものと考えられ、ひびわれの進展に伴い、橋軸直角方向の曲げモーメントの分担が次第に卓越していったものと考えられる。

HPCa 合成床版だけでなく、橋軸直角方向のみにプレストレスを導入し、橋軸方向が RC 構造として挙動する床版は、この異方性化による応力分担の急激な変化を防止するため、橋軸方向に十分な鉄筋を配置する必要がある。

## 5. PRC 構造への適用性に関する検討

道路橋示方書では、鉄筋コンクリート床版(RC 床版)とプレレストコンクリート床版(PC 床版)が規定されており、後者はフルプレストレス構造として扱われている。一方、日本道路公団ではひびわれを許さない範囲で引張応力を許容する床版構造が採用されている。

表-7 に示したように CP110 で規定された値(仮想引張応力の制限値)は日本道路公団で規定された許容曲げ引張応力の約 1.5~2.0 倍程度であり、ひびわれを許す構造(PRC 構造)として設計指針を決定するには一応の目安になると考えられる。

本床版構造の場合には、前述したひびわれ密度およびひびわれ幅の検討から、ある程度のひびわれを許しても、そのひびわれ幅を制限することによりひびわれ密度を制御することが可能と考えられる。すなわち、CP110 の規定値内に発生応力を制限すれば、十分な疲労耐久性を有していると考えられ、PRC 構造として経済的な設計が可能になると考えられる。

## 6. 打ち継ぎ面のせん断応力度に関する検討

図-11 および図-12 はそれぞれ、アスファルト舗装がない場合およびアスファルト舗装が床版上面にある場合の PCa 版と場所打ち部との接合面に作用するせん断応力度を 2 層版解析により算定した結果を示したものである。載荷モデルおよび支持条件は輪荷重走行試験(供試体 2)と同様とし、載荷荷重強度は 98.1kN、載荷位置は支間中央とした。また、アスファルトの弾性係数は冬場には 10.0~2.0kN/mm<sup>2</sup>、夏場には 0.6~0.1kN/mm<sup>2</sup> と言われているが、今回は 2.0kN/mm<sup>2</sup> とした。

道路橋示方書によれば接合面の許容せん断応力度は式(4)で求まる。

$$\tau_{ba} = 3.8 + 38p \cdot \sqrt{\sigma_{ck}} = 0.51N/mm^2 \quad (4)$$

図-11 および図-12 に示した計算結果からは、設計荷重時(荷重強度 98.1kN)に界面に発生するせん断応力度は、許容せん断応力度  $\tau_{ba}$  よりも小さ

いことがわかる。一方、輪荷重走行試験では、供試体 2 には最大で 403kN の荷重強度が作用しており、このとき発生したせん断応力度は許容値を大きく上回ることが予想される。

供試体 2 は、この荷重強度において押し抜きせん断破壊したものの PCa 版と場所打ち部との界面は剥離しなかったことから、HPCa 合成床版の界面の付着強度には問題がなかったことがわかる。

日野らの静的な実験<sup>10)</sup>によれば、HPCa 合成床版の剥離に抵抗する効果のうち、コンクリート同士の付着応力が支配的である。しかし、輪荷重走行試験のように繰り返しせん断力および曲げモーメントが作用する場合には、トラス鉄筋の影響が大きく寄与していることが考えられる。

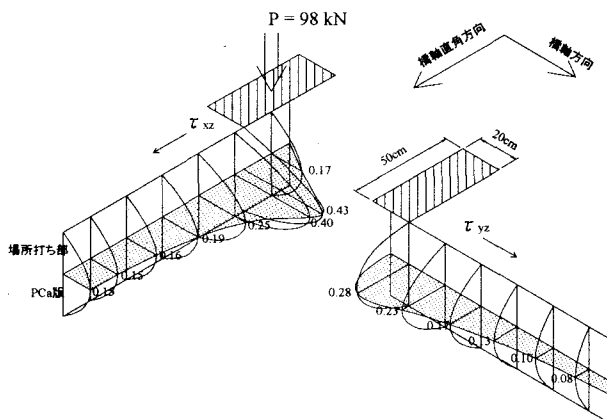


図-11 接合面での付着応力度分布(舗装なし)

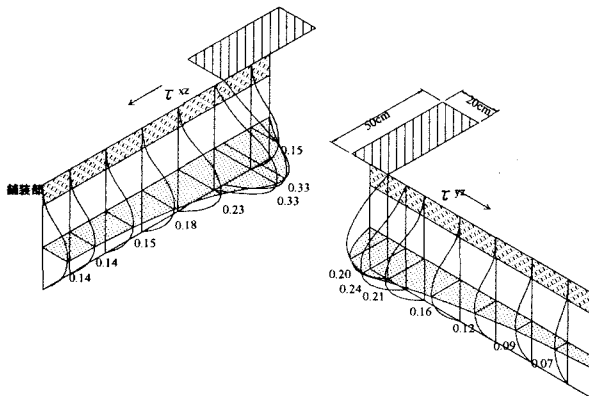


図-12 接合面での付着応力度分布(舗装あり)

## 7. 結論

本研究において、以下のことを明らかにした。

- ① 2層構造からなる合成床版に合致した新規の S-N 疲労則を設定し、輪荷重走行試験により評価を行い、疲労設計への取り組みを可能とした。
- ② 輪荷重走行試験結果および数値解析を用いて HPCa 合成床版の評価を行い、平成 8 年道路橋示方書で設計した RC 床版に比べて高い

疲労耐久性を明らかにした。

- ③ ひびわれ密度およびひびわれ幅に関して考察を行い、将来のメンテナンスに配慮した維持管理上の目安について言及した。
- ④ 十分な疲労耐久性を有した HPCa 合成床版の PRC 構造設計が可能であることを検証した。

## 8. おわりに

本論文はハーフプレハブ合成床版研究会(委員長：松井繁之 大阪大学大学院教授)における研究の一環として実施されたこと、および輪荷重走行試験は旧建設省土木研究所と民間との共同研究「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」の一環として実施されたことを付記し、関係各位の御助言と御指導を賜りましたことに感謝します。

## 参考文献

- 1) 肥沼年光, 岡本浩, 谷口義則, 松井繁之, 堀川都志雄: トラス鉄筋を用いたハーフプレハブ合成床版の階段載荷による輪荷重走行実験, 第 3 回床版シンポジウム予定原稿, 2003.6.
- 2) 阪神高速道路公団, 阪神高速管理技術センター: 道路橋 RC 床版のひびわれ損傷と耐久性, 1991.9.
- 3) 東山浩二, 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力, 構造工学論文集 Vol. 44A, 1998.3.
- 4) 建設省土木研究所: 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) 建設省土木研究所: 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 3), 2000.11.
- 6) 建設省土木研究所: 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)―評価編―, 2001.3.
- 7) 土木学会鋼構造委員会: 道路橋床版の新技术と性能照査型設計, 2000.10.
- 8) 谷口義則, 肥沼年光, 堀川都志雄: ハーフプレキャスト合成床版の応力と断面力について, 第 2 回道路橋床版シンポジウム, 2000.10.
- 9) 小林和夫: コンクリート構造学, 国民科学社, 1995.9.
- 10) 左東有次, 日野伸一 他: トラス鉄筋ハーフプレハブ合成床版の押し抜きせん断耐力に関する研究, 土木学会, 第 56 回年次学術講演会, 2001.10.