

ハーフプレキャスト合成床版の応力と断面力について

Stresses and Resultant Forces of Half-Precast Composite Slab

谷口義則*, 肥沼年光**, 堀川都志雄***

Yoshinori TANIGUCHI, toshimithu KOINUMA and Toshio HORIKAWA

* 大阪工業大学大学院 工学研究科 (〒535-0002 大阪市旭区大宮5-16-1)

** 日本カイザー株式会社 技術部 (〒150-0011 東京都渋谷区東3-15-7)

*** 工博 大阪工業大学 工学部 土木工学科 (〒535-0002 大阪市旭区大宮5-16-1)

Recently new bridge system with a few main girders is widely noticed and carried out at several fields in the 2nd TOMEI highway. Forms of slab in such a bridge mainly are the full prestressed concrete slab and the composite slab combined by concrete and steel plate. It is generally necessary to introduce large magnitude about initial prestress-force. Then a new composite concrete slab consisting of precast prestressed concrete panel and in-suit concrete, so-called half-precast composite slab, is proposed as a substitution for PC slab and concrete-steel composite slab. Half-precast composite slab is designed by a method based on idea of partially prestressed concrete to allow cracking in concrete. In this paper, some arranged results of two specimens obtained by wheel running tests at DOBOKU laboratory in TUKUBA are compared with numerical values calculated by three-dimensional elasticity and fatigue characteristics of two slabs are discussed. A variation of stress distribution along depth of composite slab is calculated by means of a decreasing method of elastic modulus presumed from two relations between deflection and running cycle and then between density of crack and running cycle.

key words : half-precast slab , wheel running test , analysis of thick plate , density of crack

1. 概要

近年道路橋の建設に際して、製作および現場での省力化や工期短縮、建設全般に渡ってコスト縮減が強調され、少数の主桁からなる橋梁形式に注目が集められると伴に床版の果たす役割の重要性が認識されるようになってきた。

日本道路公団では、第2東名高速道において種々の少数主桁橋梁が実施・施工されている。少数主桁橋の床版は主としてプレキャストあるいは場所打ちのプレストレス床版、および鋼・コンクリートからなる合成床版の構造が採用されている。この橋梁形式での床版の支間長や張出し長さは、現行の道路橋示方書の値に比べて大きな次元を持ち、橋軸直角方向および橋軸方向に作用する曲げモーメントは従来に比べ卓越すると試算されている。プレストレス床版が用いられる場合、床版の断面内の曲げ応力はフルプレストレスの状態設計されることが多く、ひび割れ幅を制御して設計するPRCの概念を導入した床版も検討されている。PRCによる設計を取り入れた床版の一つに、ハーフプレキャスト合成床版が提案されている。この床版は下層部をプレキャストPC床版(以下、PCa版と呼ぶ)、上層部を場所打ちコンクリートで構成されており、PCa版と一体化させるため、トラス筋

がずれ止めとして採用されている。しかし、トラス筋の評価を含めてこの種の床版の設計法は未だ確立されておらず、現在建設省土木研究所での輪荷重走行試験による結果をもとに総括的な整理が精力的に進められている。

本研究では、土木研究所において行われたハーフプレキャスト合成床版2体の輪荷重走行疲労実験のデータ¹⁾を分析し、第一回鋼橋床版シンポジウムで示した厚板理論による多層板の解析手法²⁾の計算値と実験結果を比較し、実験床版の疲労特性を検討する。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験に用いたハーフプレキャスト合成床版は場所打ちコンクリート床版とPCa版の2層からなる構造系を示し、以下の特徴がある。

- ・PCa版に導入されるプレストレスによってひびわれ抑制の効果があり、耐久性に優れる。
- ・支保・型枠・足場が不要であるため、工期短縮とコスト縮減が図れる。

なお、2つの実験供試体ではいずれも床版中央部にループ継手が配置されている。

実験供試体2の寸法は橋軸方向4.5m×橋軸直角方向2.6m×板厚20cm(場所打ち部10cm+PCa版10cm)で、床版の支持条件は橋軸方向と平行な2辺を単純支持、橋軸直角方向に沿う2辺を弾性支承とした(図-1)。なお、供試体1の場所打ち部の版厚は12.5cmである。供試体1および2のコンクリートの材料定数を表-1に示す。

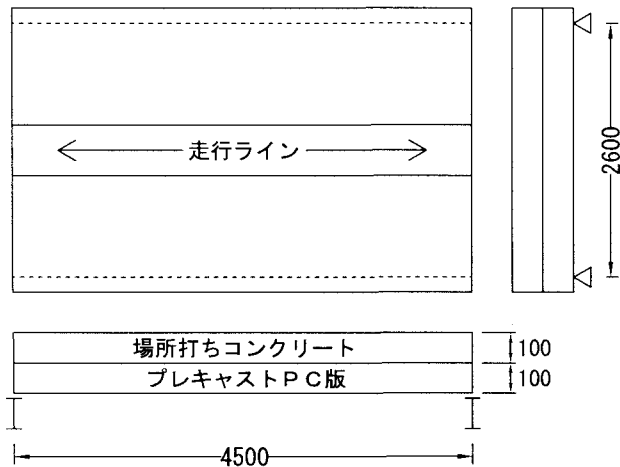


図-1 供試体2の形状・寸法

表-1 コンクリートの材料定数

		圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
供試体1	場所打ち部	45.1	33.9	0.213
	PCa床版	55.7	36.5	0.250
供試体2	場所打ち部	34.9	27.7	0.220
	PCa床版	54.2	32.3	0.177

2.2 実験方法

土木研究所が所有する輪荷重走行試験装置による走行実験を行った。輪荷重走行試験機の全体図を図-2に示す。

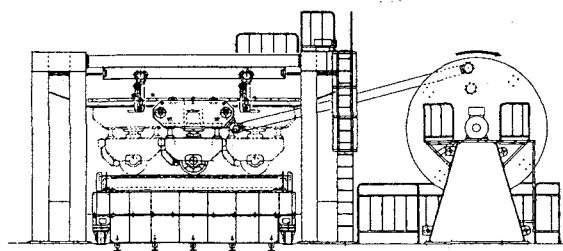


図-2 輪荷重走行試験機

表-2 輪荷重走行試験機の主要諸元

項目		仕様
形状・寸法	試験機寸法	フレーム:高さ約5m×長さ約8m フライホイール:直径3.5m,重さ:100kN
	供試体最大寸法	幅3.0m×長さ4.5m×厚さ0.35m(床版)
	車輪の種類	鉄輪:直径700mm×幅300mm 鉄輪:直径700mm×幅500mm ゴムタイヤ:9.00-R20-14PR相当(ダブル)
性能	走行範囲	±0.5/±1.0/±1.25/±1.5m
	最大回転速度	59.8/42.3/37.8/34.7rpm
	最大載荷力	走行時:490kN
		停止時:981kN
最大載荷ストローク	200mm	

実験に採用した載荷プログラムは図-3に示す階段載荷方式とした。初期荷重を157kNとし、4万回ごとに走行荷重を約20kN(=2tf)ずつ増加させ、520,000万回(412kN)まで繰り返し走行した。供試体2は429,000回(353kN)で破壊に至った。

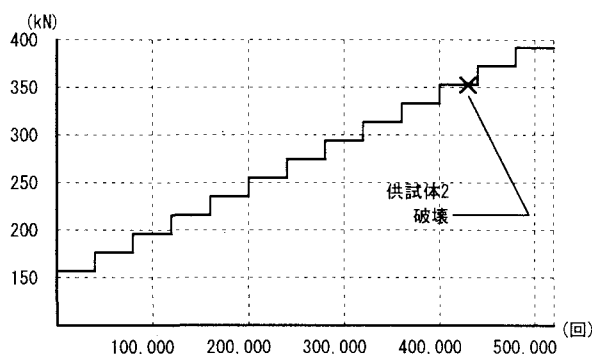


図-3 載荷プログラム

2.3 走行実験の結果

載荷方式に階段載荷を採用したため計測データには計測時の荷重の大きさによる影響が含まれる。そこで総成分と残留成分との差から弾性成分を求め、さらにB活荷重の後輪1輪あたりの大きさ98.1kN(=10tf)で換算することにより、荷重の大きさの影響が除去できる。床版の劣化を表すと推測される曲げ剛性の低下が読みとれ、床版の疲労性状の検討が可能となる。

計算値には厚板理論による2層板の解析に基づいている。全断面有効時の計算値は材料試験から得られた材料定数を用い、重ね板の値には層間のせん断力を無視した値、すなわち場所打ち版とPCa版の付着がなく、非合成になる状態を意味する。また、引張無視時の計算値にはPCa版のみにひび割れを考慮した断面と等価な曲げ剛性を持つように弾性係数を調整する。このときの供試体2の推定弾性係数は約8.1kN/mm²に相当する。

輪荷重の位置が床版中央部にある場合について、図-4に示す位置での床版のたわみとコンクリート上・下面、および床版内の鉄筋ひずみを計測した。

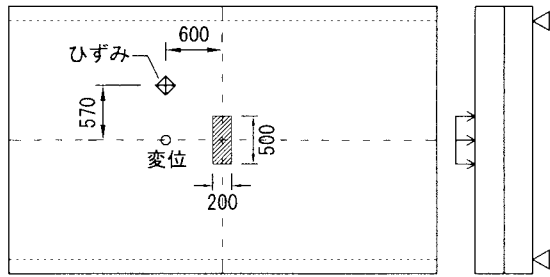
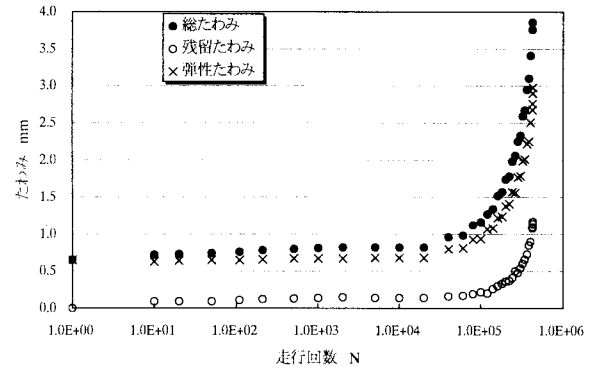


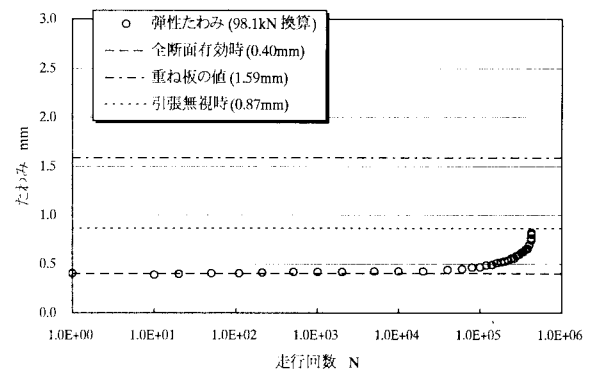
図-4 輪荷重載荷位置と計測位置

2.3.1 床版の変位

図-5と6に、供試体1および2での床版の鉛直変位(=たわみ)の経時変化を示す。いずれの図においても、a)は総たわみと残留たわみおよび弾性たわみを示し、b)は98kN換算された弾性たわみを表す。供試体1は実験終了までほぼ全断面有効時の計算値と同等な値を示し、床版の劣化がみられなかった。供試体2は約50,000回あたりで徐々に全断面有効時の計算値から離れ、その後も漸増傾向を示し引張無視時の値とほぼ同等の値で破壊に至った。また、たわみが重ね板の値にまで至らなかったことから、界面でのせん断力の伝達は破壊に至っても確保されており、トラス筋によるずれ止めの効果が現れていると推測される。



(a) 総たわみと残留たわみ

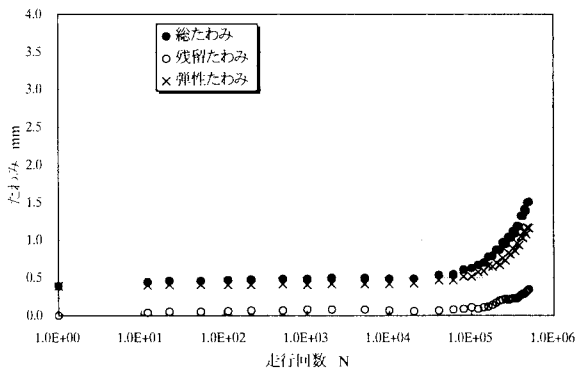


(b) 弾性たわみ(98.1kN換算)

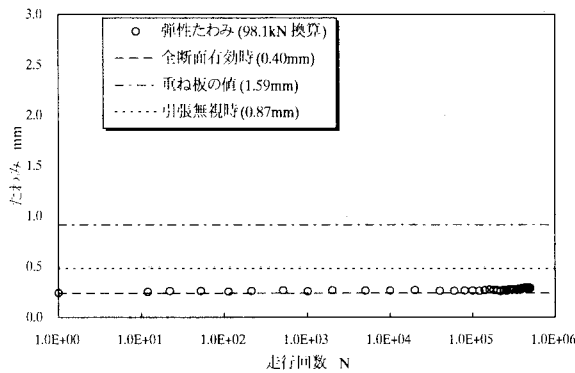
図-6 鉛直変位の経時変化(供試体2)

2.3.2 床版のひずみ

図-7はハーフプレキャスト合成床版の最上面におけるコンクリートの総ひずみと残留ひずみおよび弾性ひずみを表す。図-8と9に、各供試体の場所打ちコンクリートにおけるコンクリート上面および上端鉄筋、また、PCa版の下端鉄筋とコンクリート下面の橋軸直角方向の弾性ひずみの経時変化を示す。



(a) 総たわみと残留たわみ



(b) 弾性たわみ(98.1kN換算)

図-5 鉛直変位の経時変化(供試体1)

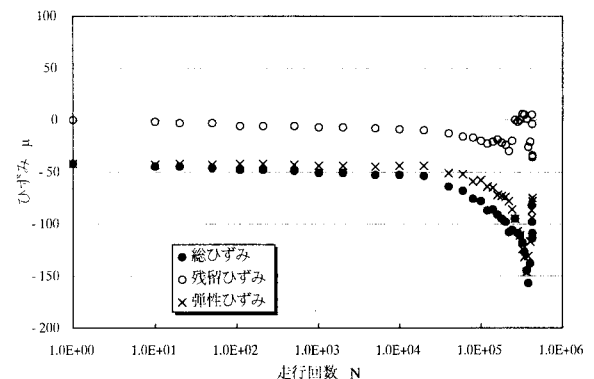
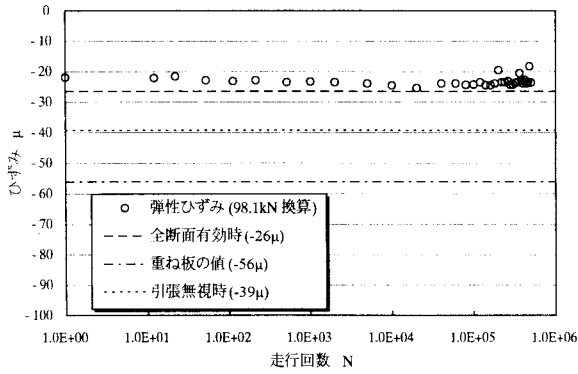


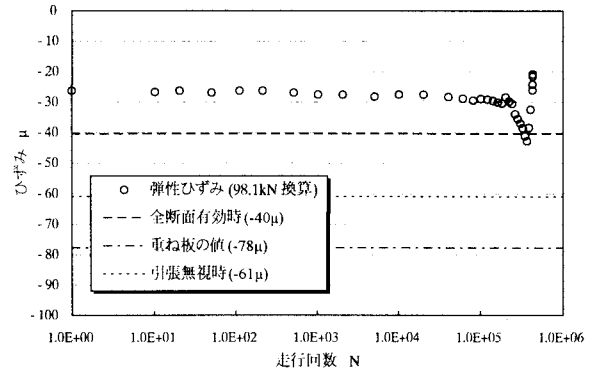
図-7 コンクリート上面の総ひずみと残留ひずみ

供試体1はたわみと同様に弾性値の増加がみられなかったため、実験終了時に至っても床版は健全であったと言える。また、供試体2は上端鉄筋に目立った増加がみられなかったが、下端鉄筋には漸増する傾向がみら

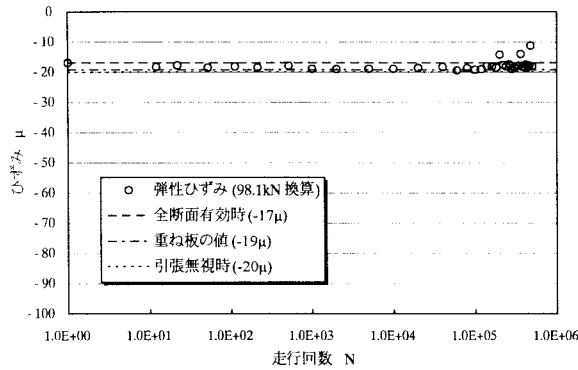
れ、さらに実験終了時まで漸増傾向を示したことから界面での付着破壊が局所的な部分に留まっていると推測される。



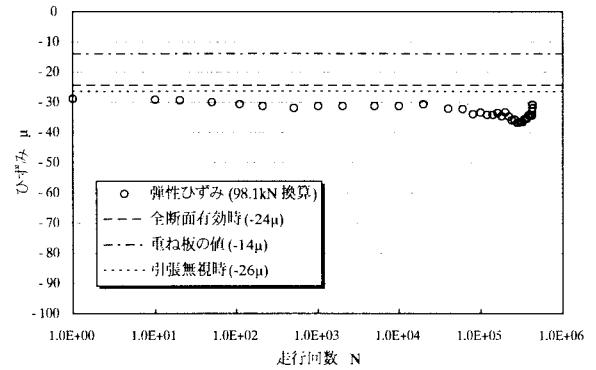
(a) コンクリート上面の弾性ひずみ



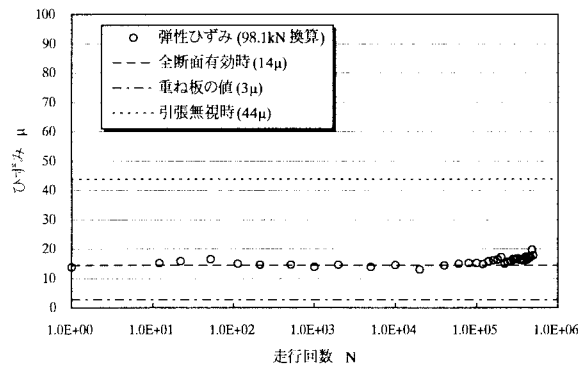
(a) コンクリート上面の弾性ひずみ



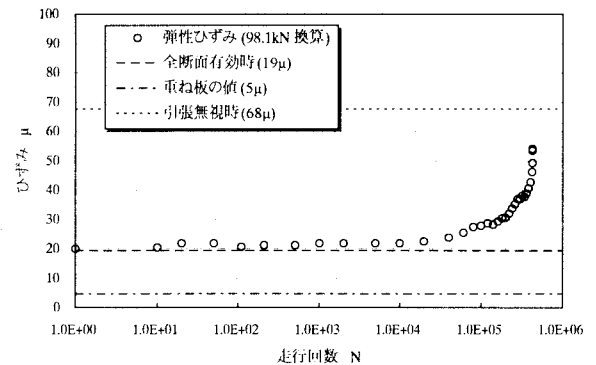
(b) 上端鉄筋の弾性ひずみ



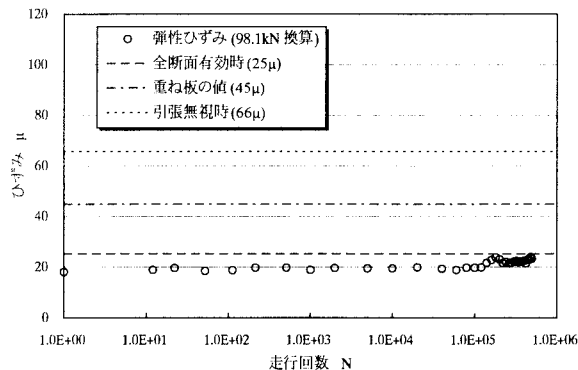
(b) 上端鉄筋の弾性ひずみ



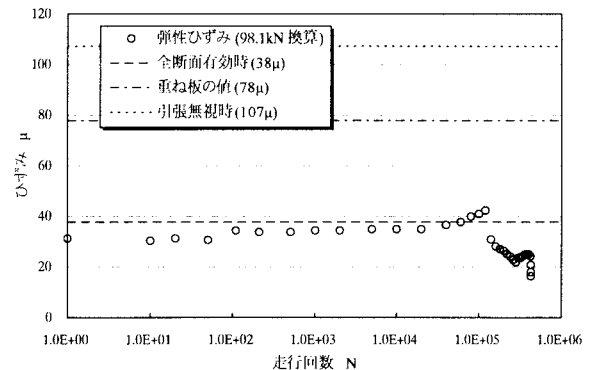
(c) 下端鉄筋の弾性ひずみ



(c) 下端鉄筋の弾性ひずみ



(d) コンクリート下面の弾性ひずみ



(d) コンクリート下面の弾性ひずみ

図-8 弾性ひずみの経時変化(供試体1)

図-9 弾性ひずみの経時変化(供試体2)

2.3.3 床版のひび割れ

走行実験による供試体1と2の床版下面に発生したひび割れ網を図-10と11に示す。約43万回時での観察結果であるが、供試体2は崩壊寸前のスケッチである。

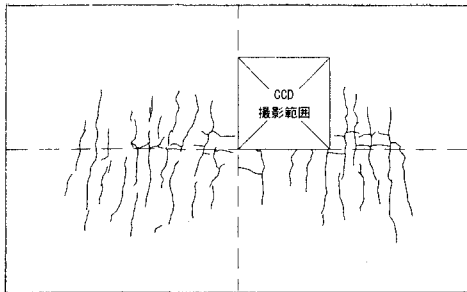


図-10 床版下面のひび割れ (供試体1)

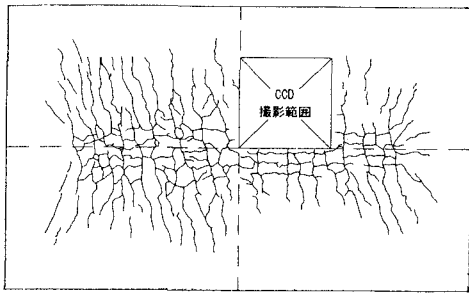


図-11 床版下面のひび割れ (供試体2)

RC床版と同様の手法を適用して各供試体のひび割れ密度を計算し、2次の回帰曲線によりひび割れ密度と走行回数の関係を推測した。その結果を図-12にまとめる。

供試体2がひび割れ密度 $2\text{m}/\text{m}^2$ と $5\text{m}/\text{m}^2$ に至る時の走行回数は、それぞれ20万回と42万回である。このときの弾性たわみは 0.53mm と 0.75mm 程度であり、このたわみと等価となるPCa版の弾性係数はそれぞれ $19\text{kN}/\text{mm}^2$ と $10\text{kN}/\text{mm}^2$ と推定される(図-13)。供試体1に同様の手法を用いると38万回でひび割れ密度が $2\text{m}/\text{m}^2$ に留まり、 $5\text{m}/\text{m}^2$ には至らなかった。ひび割れ密度 $2\text{m}/\text{m}^2$ のときの弾性たわみは 0.27mm 、PCa版の推定弾性係数は $28\text{kN}/\text{mm}^2$ に相当する。供試体1と2の推定弾性係数の差は場所打ちコンクリート部の版厚による影響と考えられる。

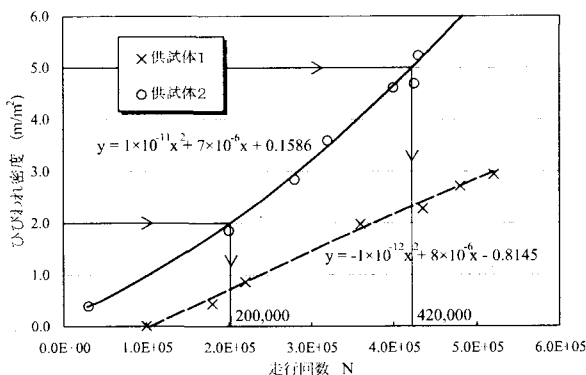


図-12 ひび割れ密度

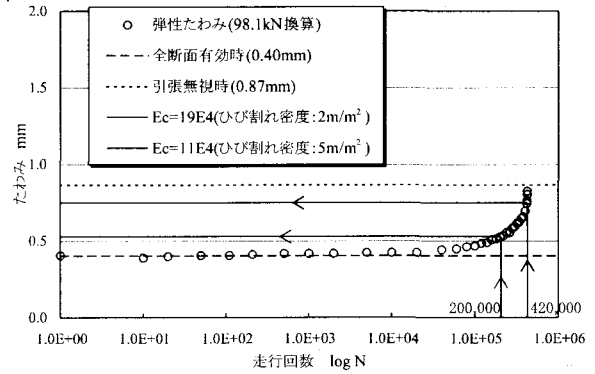


図-13 ひび割れ密度と弾性たわみ (供試体2)

3. ハーフプレキャスト合成床版の解析手法

物体力を考慮しない変位関数の基礎式は次のように示される。

$$\Delta \Delta f_3 = 0, \quad \Delta \phi_3 = 0 \quad (1)$$

ここで、

$$\Delta = \partial^2 x + \partial^2 y + \partial^2 z \text{ (3次元ラプラシアン)}$$

式(1)の変位関数を三角級数に展開すれば次式が得られる。

$$\begin{aligned} f_3 &= \sum_m \sum_n \left[C_1 \cosh \gamma z + C_2 \sinh \gamma z \right. \\ &\quad \left. + C_3 \gamma z \cosh \gamma z + C_4 \gamma z \sinh \gamma z \right] \\ &\quad \sin \alpha_m x \sin \beta_n y, \\ \phi_3 &= \sum_m \sum_n \left[C_5 \cosh \gamma z + C_6 \sinh \gamma z \right] \\ &\quad \cos \alpha_m x \cos \beta_n y \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_m = m\pi/a$, $\beta_n = n\pi/b$, $\gamma^2 = \alpha_m^2 + \beta_n^2$;
 a, b : x, y 方向の支間長 ;

$C_1 \sim C_6$: 板の上・下面の境界条件より決定される積分定数

変位関数と変位 u, v, w との関係式は以下のように得られる。

$$\begin{aligned} 2\mu u &= -\partial x \partial z f_3 + \partial y \phi_3, \\ 2\mu v &= -\partial y \partial z f_3 - \partial x \phi_3, \\ 2\mu w &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\partial^2 z + \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} (\partial^2 x + \partial^2 y) \right] f_3 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 λ, μ : Láméの定数

式(2)を式(3)に代入すれば変位と応力が得られる。ここでは z 方向についてのみ示すが、 x, y 方向についても同様に得られる。

$$\begin{aligned}
2\mu w &= -\sum_m \sum_n \left[C_1 \cosh \gamma z + C_2 \sinh \gamma z \right. \\
&+ C_3 \{ \gamma z \cosh \gamma z - 2(1-2\nu) \sinh \gamma z \} \\
&+ C_4 \{ \gamma z \sinh \gamma z - 2(1-2\nu) \cosh \gamma z \} \\
&\quad \left. \gamma^2 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y \right], \\
\sigma_z &= -\sum_m \sum_n \left[C_1 \sinh \gamma z + C_2 \cosh \gamma z \right. \\
&+ C_3 \{ \gamma z \sinh \gamma z - (1-2\nu) \cosh \gamma z \} \\
&+ C_4 \{ \gamma z \cosh \gamma z - (1-2\nu) \sinh \gamma z \} \\
&\quad \left. \gamma^3 \sin \alpha_m x \sin \beta_n y \right] \quad (4)
\end{aligned}$$

板の上・下面の境界条件により、積分定数 $C_1 \sim C_6$ が決定されれば、床版の変位および応力が力 X^u, \dots, Z^ℓ でそれぞれ表される。

さらに、2層の板について考えると、場所打ちコンクリート部とPCa版との接合条件が完全合成されているとき、以下のような変位の連続条件式が得られる。

$$u_1^\ell = u_2^u, v_1^\ell = v_2^u, w_1^\ell = w_2^u \quad (5)$$

ここで、上添字 u, ℓ 床版の上面と下面を意味する。

式(5)より、例えば z 方向の連続式は次のように示される。

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{2\mu_1} \sum_m \sum_n \left[\frac{\alpha_m}{\gamma} X_1^u \left\{ (1-\nu_1) \left(\frac{1}{Dm_1} - \frac{1}{Dp_1} \right) \right\} \right. \\
&+ \frac{\beta_n}{\gamma} Y_1^u \left\{ (1-\nu_1) \left(\frac{1}{Dm_1} - \frac{1}{Dp_1} \right) \right\} \\
&+ Z_1^u \left\{ (1-\nu_1) \left(\frac{\coth \zeta_1}{Dm_1} - \frac{\tanh \zeta_1}{Dp_1} \right) \right\} \\
&+ \frac{\alpha_m}{\gamma} X_1^\ell \left\{ 1 + (1-\nu_1) \left(\frac{1}{Dm_1} + \frac{1}{Dp_1} \right) \right\} \\
&+ \frac{\beta_n}{\gamma} Y_1^\ell \left\{ 1 + (1-\nu_1) \left(\frac{1}{Dm_1} + \frac{1}{Dp_1} \right) \right\} \\
&+ Z_1^\ell \left\{ -(1-\nu_1) \left(\frac{\tanh \zeta_1}{Dp_1} + \frac{\coth \zeta_1}{Dm_1} \right) \right\} \left. \right] \\
&\cdot \frac{1}{\gamma} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y \\
&= \frac{1}{2\mu_2} \sum_m \sum_n \left[\frac{\alpha_m}{\gamma} X_2^u \left\{ 1 + (1-\nu_2) \left(\frac{1}{Dm_2} + \frac{1}{Dp_2} \right) \right\} \right. \\
&+ \frac{\beta_n}{\gamma} Y_2^u \left\{ 1 + (1-\nu_2) \left(\frac{1}{Dm_2} + \frac{1}{Dp_2} \right) \right\} \\
&+ Z_2^u \left\{ (1-\nu_2) \left(\frac{\tanh \zeta_2}{Dp_2} + \frac{\coth \zeta_2}{Dm_2} \right) \right\} \\
&+ \frac{\alpha_m}{\gamma} X_2^\ell \left\{ (1-\nu_2) \left(\frac{1}{Dm_2} - \frac{1}{Dp_2} \right) \right\} \\
&+ \frac{\beta_n}{\gamma} Y_2^\ell \left\{ (1-\nu_2) \left(\frac{1}{Dm_2} - \frac{1}{Dp_2} \right) \right\} \\
&+ Z_2^\ell \left\{ (1-\nu_2) \left(\frac{\tanh \zeta_2}{Dp_2} - \frac{\coth \zeta_2}{Dm_2} \right) \right\} \left. \right] \\
&\cdot \frac{1}{\gamma} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y \quad (6)
\end{aligned}$$

さらに、1層目の上面と2層目の下面に作用する力は外力と一致し、既知である。また、1層目の下面と2層目の上面に作用する力は接合面に働く伝達力であり、つり合いの関係より一致する。

式(6)より接合面に作用する伝達力に関する3元の連立方程式がフーリエ級数の項数 m, n ごとに得られる。

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} \\
\mathbf{A} \mathbf{X} &= \mathbf{B} \quad (7)
\end{aligned}$$

ここで、

\mathbf{A} : 2層板の柔性行列、

\mathbf{B} : 外荷重による変位ベクトル

$\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$: 接合面に作用する伝達力によるベクトル

求められた伝達力 X, Y , および Z により、変位と応力が求められる。また、応力を板厚方向に積分することから各層に作用する断面力が求められる。

4. まとめ

ハーフプレキャスト合成床版はPCa版と場所打ちコンクリート部の2層からなる構造系である。輪荷重走行試験によれば、破壊に至るまで2層の版は分離していないことより、トラス筋が十分なずれ止めの効果を発揮している。供試体1は実験終了時に至っても剛性の低下は認められず、供試体2と比較してひび割れ密度は小さな値に留まっている。また、供試体2は実験では破壊に至ったが、B活荷重の後輪1輪あたりの大きさ98.1kN(=10tf)の載荷状態でプレストレス力を考慮すれば、コンクリート下面で引張応力は発生していないことが判る。したがって、本床版の疲労耐久性は十分高いと推察される。

参考文献

- 建設省土木研究所、共同研究報告書、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)、pp.198-218、1999.10.
- 加藤暢彦、堀川都志雄、園田恵一郎: 各種工法で補強された損傷床版の輪荷重点近傍の局所応力の解析、第1回鋼橋床版シンポジウム講演論文集、pp.61-66、1998.11.