プレストレスを導入した合成床スラブのたわみ性状に関する研究

STUDIES ON BEHAVIOR OF THE DEFLECTION OF COMPOSITE SLABS WITH PRESTRESSED PRECAST PANELS

田中恭哉*, 小森清司**, 原田哲夫***

Kyouya TANAKA, Kiyoshi KOMORI and Tetsuo HARADA

It is known that the deflection of composite slabs with prestressed precast panels on long-time bendings is small. Although only a few tests have been carried out, there were no analytical research. The authors proposed the analytical method to be useful for design and compared with the test results. The following results were obtained.

- ① This analytical method was able to estimate the deflection of composite slabs on short-time and long-time bendings accurately.
- ② From trial calculations, it was confirmed that the ratios of the deflections on long-time bendings to elastic deflections were from 5 to 8.

Keywords: composite slab, deflection curve, long-time bending, precast member, prestressed concrete

1. はじめに

プレストレス構造のプレキャスト板（以下、PC板という。）と場所打ち鉄筋コンクリートを合成した床スラブが、建築現場で使い始められておおよそ10年になる。近年では、施工の省力化、スパンの長大化などのニーズから、施工量も伸びつつある。これは、プレストレスを導入した合成床スラブが、施工面の優位性は勿論であるが、構造面でも長期たわみやひびわれが少ない点で特に優れた性能を有しているためと考えられ、この事は筆者ら^{1)~4)}をはじめ松崎ら⁷⁾等の実験で確認されている。

しかしながら、床スラブにおける最大の関心事は長期たわみ性状の把握であると考えられるが、解析的には唯一鈴木ら⁸⁾の提案が見受けられるだけで、学会規準等^{9),10)}でも具体的な記述はない。現時点で使用されている合成床スラブの設計は、それぞれの実験結果をもとに独自のクライテリアを設定して行っているのが実情である。これらの背景としては、この種の合成床スラブの断面形状はリブ付きのものやフラット型のものなど様々有り、さらに、設計方法が引張応力を許さないフルプレストレス

からひびわれを許容したⅢ種プレストレスまで広範囲にわたっており、この事が瞬時（弾性）および長期たわみの算定をより複雑にしていると考えられる。

今後、省力化、プレキャスト化の傾向はますます強まり、用途、必要性能に応じた合成床スラブの研究・開発が行われるものと推測される。長期たわみについて実験的に検討する場合には、長期間の歳月を必要とするの言うまでもなく、たわみ算定法の確立はますます重要性を増すものと思われる。そこで、より合理的な解析手法の提案が望まれるが、筆者らとしては現況を勘案すると煩雑な解析法より、むしろ設計を対象とした簡便で精度のよい解析法の確立が必要と考えている。

これまでに、鉄筋コンクリート床スラブのたわみ解析方法については、長期たわみの主要因と考えられる端部上ば筋の梁部からの拔出し（以下、鉄筋の拔出しという。）やその経日変化についての研究がなされ、すでにいくつかの解析方法が提案^{たとえ11),12)}されている。また合成床スラブの特性であるコンクリートのクリープ、収縮差による挙動についても坂ら¹³⁾の研究がある。そこで本論では、

本論文は、文献1)~6)で報告したものを加筆、補足してまとめたものである。

* 長崎大学大学院海洋生産科学研究科

** 長崎大学工学部構造工学科 教授・工博

*** 長崎大学工学部構造工学科 助教授・工博

Graduate School of Marine Science and Engineering, Nagasaki Univ.

Prof., Dept. of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Nagasaki Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Nagasaki Univ., Dr. Eng.

これら既往の研究成果を活用した任意形状断面の解析に適用できる簡便な一解析法の提案を行い、その計算結果を筆者らが行った短期、長期載荷実験結果と比較し妥当性を検証した。また、同解析法を用いて実設計を対象とした試算を行い、合成床スラブのたわみ性状について検討を行った。

2. 短期載荷によるたわみ性状

2.1 実験概要

1) 試験体

試験体は、チャンネル型（C型）、逆T型（R型）断面を有するPC板と場所打ち鉄筋コンクリートからなる実大の合成床スラブであり、断面詳細を図-1に、使用材料の性質等を表-1、2、3に示す。試験体は断面形状が3種類からなり、それぞれに両端の支持状態が単純支持（S）、両端固定（F）の2種類を設定し、計6体とした。スパンはいずれも5.60mである。また、PC板にはプレテンション方式により表-3に示す所定のプレストレスが導入されており、場所打ち部との一体性を確保するためPC板上面にはひし形網目上の粗面仕上げ¹⁹⁾を施した。なお、R20S、R20F（それぞれ文献⁶⁾におけるPRCS 2-(S)-1、PRCS2-1試験体であるが、本稿では試験体記号をR20S、R20Fとして表記する。）は断面内に中空部を有する床スラブであるが、両端から中央へ向かって30cmの区間だけ中空部を場所打ちコンクリートで埋め殺しており、図-1に示す中空断面はスパン中間部の5m区間だけとなっている。また、R18S、R18F（それぞれ文献⁵⁾におけるPRCS(S)-1、PRCS-1試験体であるが、本稿ではR18S、R18Fとして表記する。）はスラブ作成時にスパン中央部の応力を軽減するため、中間に支保工を設けて場所打ちコンクリートを打設し場所打ち部の材令28日目で支保工を撤去して作製した。他の試験体については、すべて無支保工状態で場所打ちコンクリートを打設し、作製した。

2) 実験方法

載荷は、30tf油圧式門型試験機を用い、図-2に示すようにスパン5.60mに対し、3等分点2点集中載荷とした。加力サイクルは、①弾性範囲内（端部ひびわれ発生荷重計算値の60%）、②端部上面ひびわれ発生（両端固定

図-1 試験体断面詳細

表-1 コンクリートの性質

	P C 板 部		場 所 打 ち 部	
	圧縮強度 $\sigma_{b, pc}$ (kgf/cm ²)	弾性係数 E_{pc} (kgf/cm ²)	圧縮強度 $\sigma_{b, ca}$ (kgf/cm ²)	弾性係数 E_{ca} (kgf/cm ²)
R18S	580	3.3×10^5	290	2.9×10^5
R18F	602	3.3×10^5	312	3.0×10^5
R20S	588	2.9×10^5	260	2.4×10^5
R20F	542	2.9×10^5	280	2.6×10^5
C25S	588	2.9×10^5	260	2.4×10^5
C25F	542	2.9×10^5	280	2.6×10^5

表-2 PC鋼材および鉄筋等の性質

	種類の記号	断面積 A (mm ²)	引張強度		降伏強度		弾性係数 E_p, E_s (kgf/cm ²)
			σ_{pu}, σ_{su} (kgf/mm ²)	σ_{py}, σ_{sy} (kgf/mm ²)	σ_{py}, σ_{sy} (kgf/mm ²)	σ_{py}, σ_{sy} (kgf/mm ²)	
PC鋼材	R18	SWPR7Aφ12.4	92.90	182	174	1.9×10 ⁵	
	R20, C25	SWPR7Aφ12.4	92.90	186	173	1.9×10 ⁵	
鉄筋	R18	SD30-D10	71.33	49	35	1.9×10 ⁵	
	R20, C25	SD30-D10	71.33	55	38	1.9×10 ⁵	
溶接金網	φ3.2-100×100	8.04	—	—	24	2.0×10 ⁵	

表-3 試験体のプレストレス

	緊張力 P (tf)	プレストレス	
		PC上縁 (kgf/cm ²)	PC下縁 (kgf/cm ²)
R18用PC板	18.64	38.8	73.8
R20用PC板	39.48	41.1	78.1
C25用PC板	41.80	3.0	152.4

図-2 載荷要領図（両端固定の場合）

試験体のみ), ③ PC 板下面のひびわれ発生, ④終局までの3~4サイクルとした。測定は, 荷重をロードセルで, スパン中央部および端部の変位を変位計で測定した。また, R20 および C25 については, 試験体側面のスラブ上, 下縁より1.5cm内側線上の伸縮を検長10cm, 30cmのパイゲージで測定した。

2.2 短期たわみの算定法

短期載荷時のたわみは, 断面の釣合いよりモーメント-曲率関係 (以下, $M-\phi$ 関係という。) を求め, モールの定理により計算を行う。

解析上の仮定は, 以下のとおりである。

1) 材料の性質

図-3に各材料の応力度-ひずみの関係を示す。コンクリートの応力度-ひずみの関係は, PC 板部を二次関数で, 場所打ち部を e 関数で表示する。なお, 引張に対してはフックの法則に従い, 所定のひずみを越えた場合は引張力を無視する。また, PC 鋼材の場合は, Tri-linear 型, 鉄筋等の場合は Bi-linear 型とする。

2) $M-\phi$ 関係

a. スパン中央部

合成断面では, プレストレスが導入された PC 板と場所打ちコンクリートとの合成部材となるため, 断面内のひずみ分布は不連続になる。ここで, PC 板断面および合成断面においてそれぞれに作用する曲げ応力に対し平面保持を仮定し, 合成断面のひずみ分布はそれらが合成されたものとする。図-4 a に示すひずみ分布が得られる。よって, 同図より下式を得ることができる。

$$cC = C_1 + C_2 + C_s \quad (1)$$

$$cT = T_1 + T_2 + T_s + (P_0 + \Delta P) \quad (2)$$

軸方向力の釣合いより

$$cC = cT \quad (3)$$

曲げモーメントは,

$$cM = cC \cdot c_j = cT \cdot c_j \quad (4)$$

$$cM_p = cM - cM_d \quad (5)$$

よって, cM_p による断面曲率は,

$$c\phi = \frac{\epsilon_{ctu}}{X_1} \quad (6)$$

ここに,

$$C_1 = \int_{D-X_1}^D \{ \sigma_p(x) \cdot b_p(x) + \sigma_c(x) \cdot b_c(x) \} dx \quad (7)$$

$$C_2 = \int_{h-X_2}^h \{ \sigma_p(x) \cdot b_p(x) + \sigma_c(x) \cdot b_c(x) \} dx \quad (8)$$

$$T_1 = \int_h^{D-X_1} \{ \sigma_p(x) \cdot b_p(x) + \sigma_c(x) \cdot b_c(x) \} dx \quad (9)$$

$$T_2 = \int_0^{h-X_2} \{ \sigma_p(x) \cdot b_p(x) + \sigma_c(x) \cdot b_c(x) \} dx \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} C_s &= \epsilon_{sc} \cdot A_c \cdot E_s \\ T_s &= \epsilon_{st} \cdot A_s \cdot E_s \\ \Delta P &= \Delta \epsilon_p \cdot A_p \cdot E_s \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

図-3 材料の応力-ひずみ関係

図-4 ひずみ分布および力の釣合い

ただし, $\epsilon < 0$ の時 $\sigma_p(x) = \epsilon \cdot E_{pc}$

$\epsilon < 0$ の時 $\sigma_c(x) = \epsilon \cdot E_{ca}$

$\sigma_p(x) < -0.07 \cdot \sigma_{B,pc}$ の時 $\sigma_p(x) = 0$

$\sigma_c(x) < -1.2 \sqrt{\sigma_{B,ca}}$ の時 $\sigma_c(x) = 0$

ここに,

P_0 : PC 鋼材緊張力

ΔP : PC 鋼材の増加軸力

$\sigma_p(x)$: PC 板部のコンクリート応力度

$\sigma_c(x)$: 場所打ち部のコンクリート応力度

$b_p(x)$: PC 板部の断面幅

$b_c(x)$: 場所打ち部の断面幅

A_c : スパン中央部の圧縮鉄筋断面積

A_s : スパン中央部の引張鉄筋断面積

A_p : PC 鋼材断面積

E_s : 鉄筋の弾性係数

E_p : PC 鋼材の弾性係数

E_{pc} : PC 板部コンクリートの弾性係数

E_{ca} : 場所打ち部コンクリートの弾性係数

ϵ : コンクリートのひずみ

cM_p : 載荷荷重による曲げモーメント

cM : 断面に作用する全曲げモーメント

c_j : 圧縮合力と引張合力の応力中心間距離

cM_d : 荷重載荷前に作用した曲げモーメント

$c\phi$: 載荷荷重による中央断面の曲率

x_1 : 中立軸位置

次にたわみ算定上は、ひびわれのない区間を含む平均的な曲率を用いる必要がある。ここでは、下式のように猪股¹⁴⁾による平均曲率 $c\phi_{av}$ に修正して用いた。

$$c\phi_{av} = (1 - c\xi)c\phi' + c\xi \cdot c\phi \quad (12)$$

$$c\xi = 1 - \left(\frac{cM_c - M_0}{cM - M_0} \right)^2 \quad (13)$$

ただし、 $cM < cM_c$ の時 $c\xi = 0$

ここに、

$c\phi'$: ひびわれなしと仮定して求めた曲率

cM_c : スパン中央部のひびわれ発生曲げモーメント

M_0 : 引張縁応力度が 0 となる時の曲げモーメント

cM : スパン中央断面に作用する曲げモーメント

b. 端 部

端部断面においても同様に、図-4b に示すひずみ分布を想定すれば下式が得られる。なお、材端部のプレストレスの分布は、文献9) より図-5 に示すように仮定し考慮した。

$$eC = \int_0^x \{ \sigma_p(x) \cdot b_p(x) \sigma_c(x) \cdot b_c(x) \} dx \quad (14)$$

$$eT = \epsilon_{st} \cdot A_s' \cdot E_s \quad (15)$$

$$eC = eT \quad (16)$$

$$eM = eC \cdot e_j = eT \cdot e_j \quad (17)$$

$$e\phi = \frac{\epsilon_c}{x} \quad (18)$$

$$e\phi_{av} = (1 - e\xi)e\phi' + e\xi \cdot e\phi \quad (19)$$

$$e\xi = 1 - \left(\frac{eM_c}{eM} \right)^2 \quad (20)$$

ただし、 $eM < eM_c$ の時 $e\xi = 0$

ここに、

A_s' : 端部断面の上ば筋量

$e\phi'$: ひびわれなしと仮定して求めた曲率

eM_c : 端部のひびわれ発生曲げモーメント

eM : 端部断面に作用する曲げモーメント

e_j : 圧縮合力と引張合力の応力中心間距離

$e\phi_{av}$: 端部断面に平均曲率

なお計算では、部材断面を 5 mm ピッチで高さ方向に細分して行うこととし、そのフローを図-6 に示す。

3) 曲げモーメントの分布

M- ϕ 関係を用いるにあたり、各断面位置に作用する曲げモーメントを決定する必要がある。曲げモーメントの分布は、端部および中央部の剛性で変化するため、ここでは端部断面に作用するモーメントの値を完全固定とした場合による値で除した分布係数 α を用いて表す。 α は、端部降伏までとそれ以後で区別した。まず端部降伏まで (α_1) は、スタブ固定部を等価な剛性、断面積を有す

図-5 材端部のプレストレスの分布

図-6 M- ϕ 関係の計算フロー

図-7 分布係数 α_2 の算定方法

る骨組みに置き換え、応力解析した結果で決定した。

次に終局まで (α_2) は、スパン内の曲率の釣合いと荷重による仕事量の釣合いから下記の算定方法によった。(図-7 参照)

$$\Delta_c M = \frac{\Delta_c \phi}{\beta_c}, \quad \Delta_e M = \frac{\Delta_e \phi}{\beta_e} \quad (21)$$

$$cB \cdot \Delta_c \phi = eB \cdot \Delta_e \phi \quad (22)$$

$$\beta_c = \frac{(c\phi_y - c\phi_c)}{(cM_y - cM_c)}, \quad \beta_e = \frac{(e\phi_u - e\phi_y)}{(eM_u - eM_y)} \quad (23)$$

ここで

$\Delta_c M, \Delta_e M$: 端部降伏以後のスパン中央部, 端部の増加モーメント

cB, eB : それぞれスパン中央部, 端部において, 端部降伏後に曲率が增大するものと仮定した部分の長さ (本論では, $cB=93.3\text{cm}$, $eB=10\text{cm}$ に設定)

$\Delta_c \phi, \Delta_e \phi$: cB, eB 区間における平均増加曲率

$c\phi_y, c\phi_c$: 中央断面の降伏時曲率, ひびわれ時曲率

$e\phi_u, e\phi_l$: 端部断面の圧縮ひずみ $\epsilon_c = 2500\mu$ 時曲率, 降伏時曲率

cM_y, cM_c : 中央断面の降伏モーメント, ひびわれ時モーメント

eM_u, eM_y : 端部断面の圧縮ひずみ $\epsilon_c = 2500\mu$ 時モーメント, 降伏時モーメント

ここで, 増加荷重を ΔP_L とすると, 3 等分点 2 点集中荷重による場合の全仕事量は $\Delta P_L \cdot L/6$ であり, この値が中央部と端部の増加モーメントの合計と等しくなるので

$$\Delta_c M + \Delta_e M = \Delta P_L \cdot L/6 \quad (24)$$

となる。 a_2 は, 完全固定梁の 3 等分点 2 点集中荷重時の端部増加曲げモーメント $\Delta_e M_{com} = \Delta P_L \cdot L/9$ に対する比であるので, 下式で与えられる。

$$a_2 = \frac{\Delta_e M}{\Delta_e M_{com}} = \frac{1.5 \cdot \beta_c}{(\beta_e \cdot cB/eB + \beta_c)} \quad (25)$$

4) 端部ひびわれによる曲げモーメントの再配分

図-8 に示すように, 端部のひびわれ発生モーメント eM_c , コンクリートの引張を無視した場合の同曲率でのモーメントを eM_c' とすると, 瞬時にひびわれが中立軸位置まで達した場合 $M' (=eM_c - eM_c')$ のモーメントが不足することになる。次にその不足分が分布係数 a_1 にしたがって端部, 中央部に配分されるとすれば, 端部の曲げモーメント eM は,

$$eM = eM_c' + M' \cdot 2/3 \cdot a_1 \quad (26)$$

となり, 結果的には, 下式の正曲げモーメントが作用したものと同値となる。

$$M'' = eM_c - eM \\ = (1 - 2/3 \cdot a_1) \cdot (eM_c - eM_c') \quad (27)$$

ここでは, この値を付加モーメントとして, ひびわれ発生から端部降伏までの荷重に比例させて加算する。

5) たわみの計算

スパン中央部のたわみ δ_p は, 部材をスパン方向 n 節点 ($n=26$) に分割し各点での曲率を求め下式を用いて計算する。

$$\delta_p = (L/2) \cdot \int_0^{L/2} \phi(X) dx - \int_0^{L/2} \phi(X) \cdot (L/2 - X) dx \\ = (L/2) \cdot \sum_{i=1}^{n/2} \phi(X_i) - \sum_{i=1}^{n/2} \phi(X_i) \cdot (L/2 - X_i) \quad (28)$$

2.3. 実験結果と解析結果の比較

図-8 端部ひびわれによる応力再配分概念

図-9 たわみの算定方法

表-4 実験結果と解析結果の比較

		ひび荷重 (tf)		降伏荷重 (tf)		最大荷重 (tf)
		端部	中央部	端部	中央部	
R18S	実験値	---	3.8	---	7.5	7.8
	計算値	---	3.8	---	7.4	8.1
	計/実	---	1.00	---	0.99	1.04
R20S	実験値	---	4.6	---	9.9	10.1
	計算値	---	3.8	---	9.1	9.9
	計/実	---	0.83	---	0.92	0.98
C25S	実験値	---	3.6	---	10.7	11.0
	計算値	---	4.4	---	10.2	11.5
	計/実	---	1.22	---	0.95	1.05
R18F	実験値	3.6	8.0	10.4	13.2	13.9
	計算値	2.7	7.6	8.4	12.8	13.6
	計/実	0.75	0.95	0.81	0.97	0.98
R20F	実験値	3.2	6.0	10.8	15.8	16.1
	計算値	3.0	7.8	9.2	15.5	16.4
	計/実	0.94	1.30	0.85	0.98	1.02
C25F	実験値	3.0	6.8	9.8	14.8	16.6
	計算値	4.0	6.5	7.4	14.5	15.7
	計/実	1.33	0.96	0.76	0.97	0.95

表-4, 図-10, 11に実験結果と解析結果を示す。表-4はひびわれ, 降伏および最大荷重を, 図-10は曲率について, 図-11は, 荷重-たわみ関係について比較したものである。表-4よりわかるように, 端部の降伏荷重計算値が実験値に比べやや低くなっているものの, 中央部のひびわれ, 降伏, 最大荷重は実験値とよく合致しており, 耐力的にはほぼよい対応をしているものと考えられる。また, 図-10, 11においては, 固定支持試験体の端部曲率計算値が端部降伏荷重計算値以後は実験値に比べ相当大きな値を示し, たわみ計算値も実験値に対しや

図-10 曲率 - 荷重関係

図-11 荷重 - たわみ関係

や大きめな値を示しているが、それ以外の範囲や単純支持試験体については曲率、たわみ共によく合致している。この傾向は、50cm幅の試験体である R18F に比較よく現れているところから、小森¹⁵⁾が指摘している面内圧縮力などの影響が考えられる。しかし、耐力を含め全般的にはおおよそい対応を示しており、さらに通常の使用状態では端部上ば筋が降伏以前であることを勘案すると、精度上は支障ないものと考えられる。

3. 長期載荷によるたわみ性状

3.1 実験概要

1) 試験体

試験体は、チャンネル型断面を有する PC 板と場所打ちコンクリートからなる実物大の合成床スラブ 4 体である。断面詳細を図-12に、形状および寸法を図-13に、使用材料の性質および規格などを表-5, 6に示す。試験体は、I, II 型とも PC 板形状はほとんど同じであるが、表-6に示すように I 型では異形 PC 鋼棒 $\phi 9.2\text{mm}$ と PC 鋼より線 $\phi 2.9\text{mm}$ 、II 型では異形 PC 鋼棒 $\phi 11\text{mm}$ を使用しており、導入プレストレス量を変えている。また、A 型試験体の PC 板は健全で

図-12 試験体面詳細

表-5 コンクリートの性質

	プレキャスト部分				場所打ち部分			
	材令 (日)	圧縮強度 $\sigma_{s, pc}$ (kgf/cm ²)	引張強度 $\sigma_{t, pc}$ (kgf/cm ²)	弾性係数 E_{pc} (kgf/cm ²)	材令 (日)	圧縮強度 $\sigma_{s, ca}$ (kgf/cm ²)	引張強度 $\sigma_{t, ca}$ (kgf/cm ²)	弾性係数 E_{ca} (kgf/cm ²)
仕上げ荷重載荷時	35	580.9	38.7	2.6×10^5	7	131.5	12.7	1.8×10^5
積載荷重載荷前	42	626.3	40.5	2.6×10^5	14	158.7	15.9	1.9×10^5
各 4 週強度	28	554.5	33.2	2.5×10^5	28	178.1	15.9	1.9×10^5
各材令 30 週	210	676.9	43.4	2.8×10^5	210	206.8	12.9	2.0×10^5
各材令 1 年	365	641.0	39.0	2.8×10^5	365	212.6	16.1	2.1×10^5
各材令 1 年半	550	708.3	43.8	2.8×10^5	545	206.3	17.8	2.1×10^5
各材令 3 年 1 カ月	1124	652.7	---	2.6×10^5	1097	199.0	---	2.0×10^5

表-6 使用鋼材およびプレストレス

	I 型 試験 体	II 型 試験 体
PC鋼材	SBPD130/145 ϕ 9.2mm SWPR 2 2- ϕ 2.9mm	SBPD130/145 ϕ 11 mm
溶接金網	ϕ 3.2-100 $\times$ 50 $^{\circ}$	ϕ 3.2-100 $\times$ 50 $^{\circ}$
PC板有効 プレストレス (kgf/cm 2)	上縁	0.9
	下縁	147.2

表-7 クリープ係数および乾燥収縮度

	I A, II A	I B, II B
クリープ 係 数	PC板部	2.00
	場所打部	4.00
乾 燥 収 縮 度	PC板部	250×10^{-6}
	場所打部	400×10^{-6}

図-13 長期載荷試験体概要図

あるが、B型試験体は場所打ちコンクリート打設時（施工時）におけるオーバーロードを想定し、合成する前にPC板中央部下縁にあらかじめひびわれを発生させた。試験体は、これらPC板に10cm打ち増して、リブ高を25cmとした合成床スラブであり、全試験体ともスパン5.6mの両端固定スラブとなっている。

2) 実験方法

長期設計荷重としては、仕上げ荷重 60kgf/m 2 、積載荷重 180kgf/m 2 、の合計 240kgf/m 2 を設定し、ゴム性樹脂コーティング加工したコンクリートブロック（B×H×L=15×15×52cm、平均重量27kg/個）を、全長にわたって均等に載荷した。実験日程は実際の施工工程を模擬し、PC板製作後28日目に場所打ちコンクリートを打設し、36日目（場所打ちコンクリートの材令で8日）に仕上げ荷重を載荷、43日目（場所打ちコンクリートの材令で15日）に積載荷重を載荷した。また測定は、合成床スラブのスパン中央部および両端部のたわみを1/100mm精度のダイヤルゲージで、また床スラブ上下縁から2.5cm内側線上の検長間隔10cm、30cmの伸縮をバリー式ストレインゲージとノギスで測定した。そのほか、湿度を乾湿度計で測定した。

3.2 長期たわみの算定法

長期たわみの計算フローを図-14に示す。長期たわみは2.2と同様に、部材をスパン方向37節点に分割し、それぞれの点での増加曲率を計算しモーメントの定理により計算する。長期たわみの算定上考慮する項目は、①クリープ、②乾燥収縮、③端部上ば筋の抜出しの3項目とした。解析上の仮定を以下に示す。

1) クリープ係数および乾燥収縮度

クリープ係数および乾燥収縮度は、コンクリートの材

図-14 長期たわみの計算フロー

料諸元、試験体の環境条件に基づき CEB-FIP 国際指針に従い算出した。結果を表-7に示す。

2) 増加曲率の計算

増加曲率の計算は、PC板部、場所打ち部でそれぞれ自由乾燥収縮するものと仮定して導いた坂ら¹³⁾の提案式によることとし、図-15にその概要を示す。

3) 端部ひびわれによる曲げモーメントの再配分

2.2 4)と同様に、端部ひびわれ発生による付加モーメント $L M''$ は次式で算定する。

$$L M'' = \frac{(e M_c - M'') \cdot e M}{e M_y} \dots \dots \dots (29)$$

4) スラブ上ば筋の拔出し

鉄筋の拔出しは、小柳¹²⁾による提案式に従うものとした。瞬時の拔出し量および付着クリープ係数は、下記のとおりである。

$$\Delta S = 5 \cdot \sigma_s \times 10^{-6} \quad (30)$$

$$K_t = \frac{t}{1.28 \cdot t + 17.5} \quad (31)$$

ここに、 ΔS ：瞬時の拔出し量 (cm)

σ_s ：鉄筋の引張応力度 (kgf/cm²)

K_t ：付着クリープ係数

t ：経過日数 (日)

さらに、鉄筋の拔出しによる影響は、下式¹⁶⁾により付加モーメント ${}_L M_s$ として考慮した。

$$\begin{aligned} \theta_s &= {}_s \theta + {}_{cr} \theta \\ &= \frac{\Delta S \cdot (1 + K_t)}{d_s - x} \\ {}_L M_s &= 2 \cdot \theta_s \cdot E_c \cdot I_c / L \quad (33) \end{aligned}$$

ここに、

θ_s ：鉄筋の拔出しによる端部の回転角

${}_s \theta$ ：鉄筋の瞬時拔出しによる回転角

${}_{cr} \theta$ ：鉄筋の経時的拔出しによる回転角

E_c ：弾性係数

I_c ：断面二次モーメント

x ：圧縮縁から中立軸までの距離

3.3 実験結果と解析結果の比較

まず、実験結果について述べる。試験体 I A, II A は、

図-15 収縮およびクリープによる影響

a. I A, II Aの端部断面

b. I A, I Bの中央断面

c. II A, II Bの中央断面

図-16 曲率-経過日数関係

図-17 付加たわみ-経過日数関係

図-18 付加たわみ-経過日数関係 (文献¹⁷⁾による)

載荷後約100日で端部にひびわれが発生し、端部10cm区間の平均曲率が経過日数1500日で約 $300 \sim 350 \times 10^{-6}$ まで達した。上ば筋量は、 $A_s/b \cdot d_s = 0.09\%$ と非常に小さく、曲率の増加量から判断し、上ば筋による補強効果はほとんどなかった。またIB、IIBは、A型とは対照的に載荷後約1500日まで端部にひびわれは発生しなかった。これらの相違の原因としては、端部の固定度の違いが考えられる。解析上は、以上の結果に基づきIA、IIAでは材令100日以後を単純支持として、IB、IIBではひびわれによる応力分配や鉄筋の拔出しは無視することとした。図-16、17に実験結果と解析結果を示す。図-16は、スパン中央部および端部の曲率変化について、図-17は付加たわみについて比較したものである。同図からわかるように曲率の増加および付加たわみともに計算値はおおよそ実験値をとらえているようである。また図-18は、岩原¹⁷⁾が行ったプレストレス構造の合成床スラブの長期たわみ実験結果と本解析法による計算結果を比較したものである。試験体の断面は、2.1のR18Fと同じでスパン $L=5.60\text{m}$ であり、CFR1では $w_l=240\text{kgf/m}^2$ 、CFR2では 430kgf/m^2 の積載荷重を載荷している。両試験体とも経過日数が小さいうちから計算値と実験値がよく合致しており、解析的には十分な精度であると判断される。

4. 合成床スラブの長期たわみについて

図-19は、本解析法を用いた長期たわみ量の試算結果である。試算条件としては、R18F、C25Fの断面を対象とし、支持条件は両端固定、積載荷重 $w_l=240\text{kgf/m}^2$ 、スパン $5.0 \sim 7.5\text{m}$ とした。また端部のひびわれは、載荷直後に発生するものと仮定した。スラブ施工時の支持条件は実情に合わせ、R18Fでは場所打ちコンクリートを打設する際中央1点サポート、C25Fでは中間サポートなしとした。なお、図中の弾性たわみは、全荷重が両端固定の合成断面に作用したとして求めた値である。図によると、C25Fは D/L (スラブ全せい/スパン) $= 1/20 \sim 1/30$ であり、上ば筋の影響はあまりなくたわみも学会RC規準¹⁸⁾の推奨値 $L/400$ の約半分程度であることがわかる。

図-19 長期たわみの試算結果

一方R18Fは、同じく $D/L=1/28 \sim 1/42$ となり、7m近辺では $L/400$ を越え、このあたりでは鉄筋量により4~5mmのたわみ制御が可能であることがわかる。両断面とも設定したスパン内であればⅢ種PRC造の床スラブ¹⁰⁾としての設計が可能であるが、 D/L が $1/35$ 程度からは応力による配筋量算定の他にたわみ制御の観点からも検討を加える必要があるものと判断される。また、弾性たわみに対する長期たわみの比は、おおよそ5~8倍となり、鉄筋コンクリート床スラブの場合¹⁸⁾に比べ $1/3 \sim 1/2$ となることがわかった。

5. 結 論

プレストレスを導入したPC板を用いた合成床スラブのたわみ算定法を提案し検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 合成床スラブの荷重-たわみ関係は、偏心軸圧縮力を受ける合成断面として算定した $M-\phi$ 関係を用いることにより、実験結果とよく対応した合理的な解析結果が得られた。
- (2) 合成床スラブの材令-曲率関係は、坂らによる増加曲率算定の提案式で推定可能であり、これにより長期

たわみを解析的に追跡できる。

- (3) 試算によると、合成床スラブの場合 $D/L=1/35$ 以下で長期たわみが学会 RC 規準の推奨値を越えることが予想されるので、端部上ば筋の算定においてはたわみ制御の観点から配筋を増すことが望ましいと考えられる。
- (4) 合成床スラブの長期たわみ倍率は、5～8 倍と推定され、鉄筋コンクリート造床スラブに比べ、 $1/3 \sim 1/2$ と小さいことがわかった。

〔謝 辞〕

実験にあたり本学技官永藤政敏氏および学生諸氏に多大なるご協力をいただいた。また、熊本工業大学岩原助教より貴重な資料を提供していただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小森清司ほか3名：PC 板埋設型枠を用いた合成床スラブの長期載荷実験，第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp. 349～352，1981
- 2) 小森清司ほか2名：PC 板埋設型枠を用いた鉄筋コンクリート床スラブの載荷実験（その2，長期載荷実験の中間報告），日本建築学会大会学術講演講概集，pp. 1393～1394，昭和56年9月
- 3) 小森清司ほか2名：PC 板埋設型枠を用いた鉄筋コンクリート床スラブの載荷実験（その3，長期載荷実験の中間報告），日本建築学会九州支部研究報告，pp. 161～164，昭和57年3月
- 4) 小森清司ほか2名：PC 板埋設型枠を用いた鉄筋コンクリート床スラブの載荷実験（その4，長期載荷実験の中間報告），日本建築学会大会学術講演講概集，pp. 1397～1398，昭和57年10月
- 5) 小森清司ほか2名：逆 T 形の PC 板埋設型枠を用いた合成床スラブの載荷実験，日本建築学会九州支部研究報告，pp. 257～260，1991.3
- 6) 田中恭哉ほか1名：空洞部を設けた合成床スラブに関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演講概集，pp. 1081～1082，1993.9
- 7) 松崎育弘ほか1名：空洞プレストレストコンクリートパネル合成床スラブに関する実験研究，日本建築学会大会学術講演講概集，pp. 2027～2028，昭和59年10月
- 8) 五味久忠ほか7名：高強度鉄筋にてプレストレスを導入したプレキャスト板を用いた中空合成床板の持続載荷実験（その1，持続載荷実験5ヶ月間の挙動）日本建築学会大会学術講演講概集，pp. 1073～1074，1992.10
- 9) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説（1987年版）
- 10) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種 PC）構造設計・施工指針・同解説（1986年制定）
- 11) 東洋一，小森清司：鉄筋コンクリート帯スラブの長期たわみに関する実験的研究(2)，日本建築学会大会講演講概集，pp. 1837～1838，昭和52年10月
- 12) 小柳光生：鉄筋コンクリート床スラブの長期たわみに関する研究，学位論文，pp. 87，昭和60年11月
- 13) 坂，岡田，六車：プレストレストコンクリート，pp. 403～416，朝倉書店
- 14) 猪股俊司：構造コンクリート曲げ部材使用限界状態の統一設計計算法，コンクリート工学論文，Vol. 26，No. 12，Dec. 1988
- 15) 小森清司：鉄筋コンクリートスラブの耐力とたわみ性状に関する研究(1)（変動面内力を考慮した RC 一方向スラブの耐力とたわみの算定法），日本建築学会論文報告集，第269号，昭和53年7月
- 16) 井野智ほか3名：鉄筋コンクリート床スラブの端部上ば鉄筋定着部の伸びによる付加たわみの概算法，コンクリート工学年次論文報告集，pp. 149～154，Vol. 14，No. 2，1992
- 17) 岩原昭次ほか2名：逆 T 型 PC 埋設型枠を用いた合成床スラブの持続荷重下における力学的研究（その3，経過日数約900日までの長期変形実験結果），日本建築学会九州支部研究報告，pp. 241～244，1994.3
- 18) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（1991年版），付録13
- 19) 小森清司ほか2名：ひし形網目状の粗面を打継ぎ面に有する合成床スラブの打継ぎ部せん断耐力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第458号，pp. 89～98，1994.4

（1994 年 1 月 7 日原稿受理，1994 年 10 月 4 日採用決定）