

論文 逆T形PCa板を用いた合成床スラブの長期曲げ性状に関する研究

山下正吾^{*1}, 岩原昭次^{*2}, 小森清司^{*3}

要旨: プレテンション方式の逆T形プレキャスト板を埋設型枠としたⅢ種PCの合成床スラブに、住宅用設計荷重、事務所用設計荷重、及び試験体としては過大な積載荷重（住宅用設計荷重の3倍）を長期持続載荷し、その長期たわみ性状について考察・検討を行った。その結果、長期付加たわみは3試験体とも定性的に同様の傾向を示した。また、この種の合成スラブに対して、クリープ・乾燥収縮及び端部引張鉄筋の抜出しを考慮した解析法を提案し、たわみ実験値と比較した結果、本解析法は十分有用であることが示された。

キーワード: 長期たわみ、クリープ、乾燥収縮、持続載荷、プレテンション、実験、解析

1. はじめに

建築現場において施工の合理化・工期の短縮および労務事情の悪化等から、様々な形でプレキャスト化が行われている。特に、在来工法への適応が比較的容易な床スラブにおいて、プレキャストコンクリート板を埋設型枠としたハーフPCa合成床スラブは、種々の断面形状が考案され実用化されている。なかでも、PC造の合成床スラブは、プレストレスの効果によりかなりの長スパン化と軽量化が可能で、小梁を省略した大型スラブとなることが多い。その際、部材断面が小さな長スパンの床スラブでは、長期たわみ・遮音・振動性状等の把握が必要であるが、なかでも長期たわみはその性能上回避できない問題である。ところが、この種の床スラブの長期たわみ性状の研究は、現在その緒に着いたばかりでまだ十分な研究が進められていない。

著者らは、天井の直仕上げが可能となる逆T形断面をしたPCa板に着目し、このPCa板を用いた合成床スラブについて、約2年半にわたり、載荷レベルを変えて持続載荷実験を行ってきた。本研究はこの実験結果について考察を行うと共に、解析的検討を加えこの種の合成床スラブの長期曲げ性状を明確にすることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 試験体お

よび使用材料

実験に用いたPCa合成床スラブの断面形状を図1に示す。埋設型枠となる逆T形

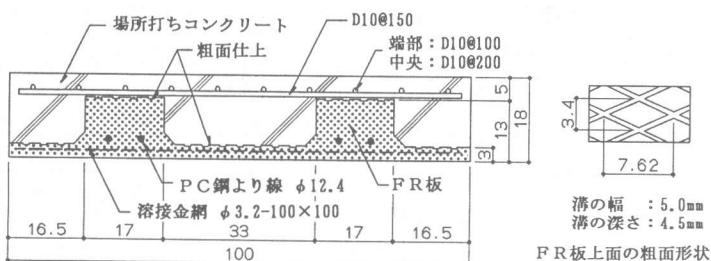


図1 合成床スラブ断面図 (形状寸法単位:cm)

断面のPCa板（以後FR板と呼ぶ）は、50cm毎に凸状のリブを有し、このリブ部に、初期緊張力として鋼材1本当たり $12f/cm^2$ を与えたPC鋼より線7本より（以後PC鋼線と略す）を2本配置している。FR板は約半日蒸気養生した後、プレテンション方式によりプレストレスを導入している。高強度コ

*1) (株)富士ピー・エス建築事業部(正会員)

*2) 熊本工業大学助教授 建築学科、工博(正会員)

*3) 長崎大学教授 工学部構造工学科、工博(正会員)

ンクリートを用いたFR板と場所打ちコンクリート部分(普通コンクリート)の合成効果はFR板上に菱目状の粗面を設けることにより一体化させている。

試験体の形状を図2、図3に示す。試験体は、FR板をスタブ型枠上に架設し、そのスパン中央に仮支柱を設けスタブ部分とFR板上部のコンクリートを同時に打設して製作した。試験体の養生は、場所打ちコンクリート打設後2日間はシートをかけ放置し、その後材令6日までは湿潤養生を保ち7日以降は自然放置とした。試験体の数は3体で、表1に試験体一覧を示す。CFR1,2は平成2年11月に、CFR3は平成4年9月に実験を開始し、前者2体は約2年半で載荷を終了している。CFR1,2は、仮設ハウス内に設置し、CFR3は実験室内に設置しPC鋼棒にて固定床に締め付けた。また、CFR3のみ床スラブ端部上面にひびわれ幅測定用の最大幅5mm、深さ14mmのV字形切り欠きを設けている。各試験体とも、断面・配筋などは同一である。表2、表3にFR板および場所打ちコンクリート部の材料の性質を示す。

2. 2 持続載荷方法および測定方法

持続載荷は、スパン中央部の仮支柱撤去後、コンクリート製インゴットをスパン全長にわたり均等に載荷することにより行った(図2,

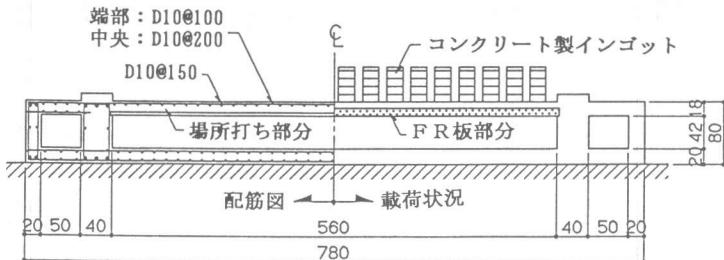


図2 CFR1, CFR2スラブ試験体図(形状寸法単位:cm)

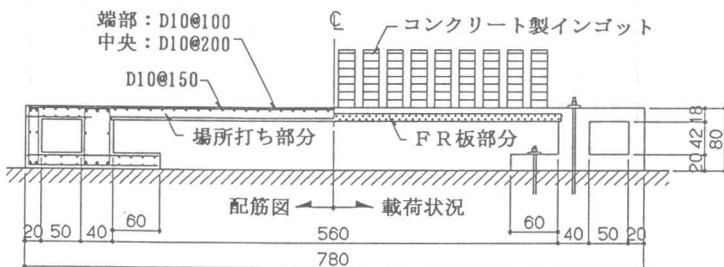


図3 CFR3スラブ試験体図(形状寸法単位:cm)

表1. 試験体一覧

試験体名	載荷荷重*	実験場所	載荷直後のひびわれ
CFR1	240	仮設ハウス内	無し
CFR2	430	仮設ハウス内	一時530kgfまで載荷して強制的にひびわれ発生
CFR3	720	大型実験室内	ひびわれ発生

* 自重は除く、単位はkgf/m²

表2. コンクリートの性質

種別	養生方法	材令(日)	圧縮強度(kgf/cm ²)	ヤング係数(×10 ⁵ kgf/cm ²)	割裂強度(kgf/cm ²)
高強度	湿潤	53(28)	536(601)	3.42(3.21)	42.3(43.5)
コンクリート	水中	57(28)	500(553)	3.66(3.21)	44.5(43.5)
	湿潤	1058(56)	640(568)	3.36(3.03)	49.7(43.7)
普通	湿潤	28(28)	200(238)	2.46(2.04)	20.3(24.7)
コンクリート	水中	28(28)	187(232)	2.42(2.35)	18.4(24.7)
	湿潤	1033	228	2.44	19.8

CFR3の性質は()内に示す

表3. 鋼材の性質

種別	PC鋼より線(注)	異形鉄筋
品質	SWPR-7A ϕ 12.4 mm	D10 {SD295A}
公称断面積(cm ²)	0.929	0.71
降伏点応力(kgf/cm ²)	17707(17355)	3820(4025)
最大強度(kgf/cm ²)	18622(18563)	5559(5793)
ヤング係数(×10 ⁶ kgf/cm ²)	2.07(1.95)	1.92(1.91)

(注)ミルシートによる

CFR3の性質は()内に示す

図3)。実験要因は表1に示すように載荷レベルのみとし、住宅用設計荷重を載荷したCFR1を基準にすると、CFR2でこの約1.8倍(事務所用設計荷重)、CFR3で約3.0倍となる。測定は、たわみを電動式変位計で、PC鋼線歪および場所打ちコンクリート部の鉄筋歪を歪ゲージ(FEL-1L, TML製)を貼付けて、それぞれ継続的に測定した。

長期付加歪(クリープ歪+乾燥収縮歪)と乾燥収縮歪は、 $\phi 10\text{cm}$ 或は $\phi 15\text{cm}$ の円柱テストピースの中央に配置した埋め込み型歪ゲージ(KM100B, TML製)により測定した。長期付加歪は、スプリング式圧縮試験機で圧縮強度の1/3を負荷して計測した。なお、各試験体とも外気の影響を受ける。仮設ハウスおよび大型実験室内の温度・湿度の経時変化を図4に示す。

3. 実験結果と考察

3. 1 乾燥収縮歪の経時変化

乾燥収縮歪の経時変化を図5に示す。また図中には最小2乗法による回帰式による値を破線で示している。この回帰式で推定される最終値は、FR板コンクリートで 5.41×10^{-4} 、場所打ちコンクリートで 8.26×10^{-4} となる。

3. 2 クリープ係数の経時変化

クリープ係数の経時変化を図6に示す。クリープ係数は長期付加歪から乾燥収縮歪を差し引いた値を載荷時の弾性歪で除して求めた。また図6に図5と同様に求めた回帰式による値を破線で示す。この回帰式から、クリープ係数の最終値は、FR板用コンクリートおよび場所打ちコンクリートで、各々1.19, 4.17に収束するものと思われる。FR板用コンクリートは蒸気養生をした早強コンクリートであることから、場所打ちコンクリートとの相違が顕著に現れている。

3. 3 経時たわみ

図7に各試験体の載荷直後を基準とした長期付加たわみの経時変化を、表4に載荷時のたわみ及び長期たわみ測定値を示す。図7より、3体の試験体とも、経過日数700日すぎから急速に収束傾向にあることが分かる。また、各試験体の長期付加たわみ最終値には顕著な違いが見られない。CFR1, 2載荷時の荷重～たわみ曲線から、自重および載荷荷重が同時に作用

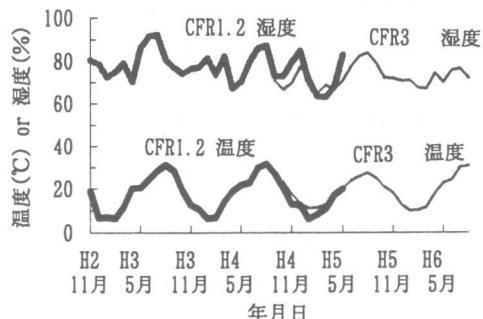


図4 温度、湿度の経時変化

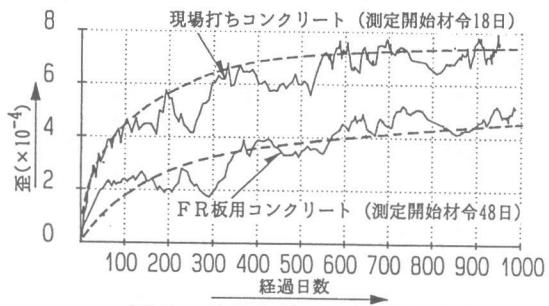


図5 乾燥収縮歪の経時変化

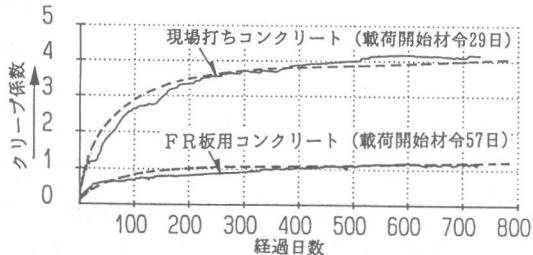


図6 クリープ係数の経時変化

表4. たわみ測定値

経過時	CFR1	CFR2	CFR3
支柱撤去時	1.01	1.00	1.18
載荷直後	1.85	3.05	4.96
102日	5.30	6.42	9.64
401日	8.29	9.35	12.30
926(720)日	10.63	11.07	(14.65)

するものとして弾性たわみを求める
と、CFR1で2.31mm、CFR2で2.98mm、
CFR3で3.96mmとなる。表4の最終日
たわみ値をこの弾性たわみで除した
ものを長期たわみ倍率とすると、CFR1、
CFR2、CFR3で各々、4.6、3.7、3.7とな
る。この値は場所打ち一体式スラブ
の一般的な長期付加たわみ倍率の約
1/4程度である。

3. 4 ひびわれ状況

図8に各試験体のひびわれ状況を
示す。経過日数を経るにしたがい、各試験体とも端部にひびわれが進展し、約80日頃になるとほぼ同様なひびわれ状況となり、その後大きな変化はなかった。ひびわれはFR板シェル部で止まり、それ以上進展していない。また、スパン中央部では3試験体ともひびわれは発生しなかった。最大ひびわれ幅は、各試験体とも0.2～0.25mmであった。

た。のことから、収縮によるひびわれは各試験体ともほぼ同程度であることが分かる。

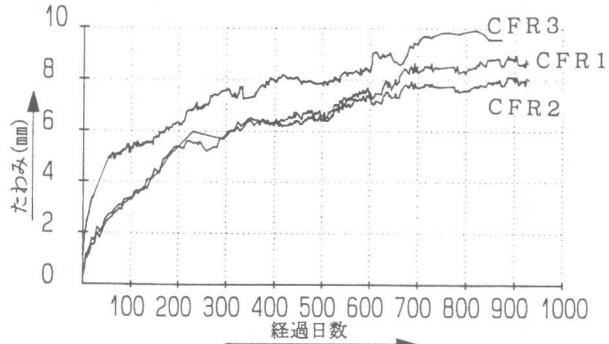


図7 長期付加たわみ

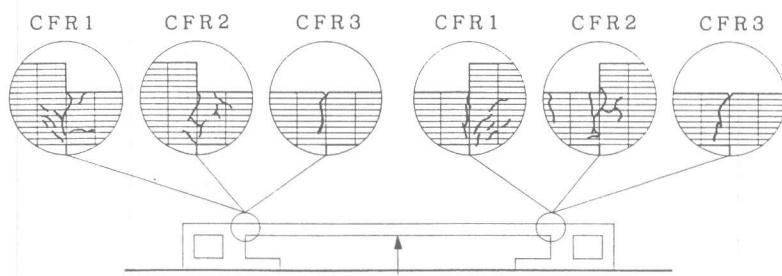


図8 ひびわれ状況

4. 長期たわみの解析的検討

本研究では、端部引張鉄筋の抜出しを解析的に明確にすることと、プレテンション方式のプレキャスト板を埋設型枠としたこの種の合成スラブの長期たわみをより簡便に行うという2つの観点などからその解析を試みた。解析方法は、基本的に一体打ちRC部材に対する長期たわみの算定に準じて行った。長期たわみ δ_t を次式で表わす。

$$\delta_t = \delta_0 + \Delta\delta_t \quad \Delta\delta_t = \Delta\delta_c + \Delta\delta_s \quad (1), (2)$$

但し、 δ_0 ：初期たわみ（載荷時に生じるたわみ）

$\Delta\delta_t$ ：長期付加たわみ（持続載荷開始後に新たに加わるたわみ）

クリープによる付加たわみ $\Delta\delta_c$ は、端部にひびわれを生じている場合、端部引張鉄筋の抜出しの影響を加えたたわみとなる。この場合、当然ながら、その抜出し算定においてはその部分でクリープの他に収縮も考慮される。 $\Delta\delta_s$ は収縮による付加たわみで、Brasonの提案式〔4〕を適用する。

4. 1 合成部材におけるクリープ係数と収縮歪

埋設型枠部分と場所打ち部分とでコンクリートのクリープと収縮が著しく異なるため、この種の合成スラブの解析は著しく繁雑となる〔5〕。しかしながら、合成部材としてのクリープや収縮

の挙動がそれぞれ1つずつのクリープ係数と収縮歪で表わすことができれば長期たわみ解析にRC部材系の長期たわみ解析手法が適用できることになる。埋設型枠部分と場所打ち部分との軸剛性が埋設型枠部分を基準とした等価な断面の軸剛性に等しいとすると次式を得ることができる。

$$\varphi_e = \frac{1+\gamma}{\varphi_N + \gamma\varphi_F}, \quad \varepsilon_{She} = \frac{\varphi_N \varepsilon_{ShF} + \gamma\varphi_F \varepsilon_{ShN}}{\varphi_N + \gamma\varphi_F} \quad (3), (4)$$

但し、
 $\varphi_e, \varepsilon_{She}$: FR板断面を基準とした合成断面と等価な断面のクリープ係数と収縮歪
 $\varphi_F, \varepsilon_{ShF}$: FR板コンクリートのクリープ係数と収縮歪
 $\varphi_N, \varepsilon_{ShN}$: 場所打ちコンクリートのクリープ係数と収縮歪
 A_F, E_F : FR板の断面積とヤング係数
 A_N, E_N : 場所打ちコンクリート部分の断面積とヤング係数
 $\gamma = (A_F E_F) / (A_N E_N)$

4. 2 ひびわれ断面における断面2次モーメントの経時変化の表示

ひびわれ発生後に経時に低下していく剛性を、断面2次モーメントを用いて次式のように仮定した。

$$I_t = \frac{\varphi_\infty I_0 I_c}{\varphi_e (I_0 - I_c) + \varphi_\infty I_c} \quad (5)$$

但し、
 I_0 : 全断面有効とした場合の断面2次モーメント
 I_c : ひびわれ断面の断面2次モーメント

上式によってひびわれ断面部分の経時的な剛性的低下を解析的に評価できる。例えば、載荷時にひびわれを生じる場合、即ち $\varphi_e = 0$ で $I_t = I_0$ 、終局時 $\varphi_e = \varphi_\infty$ で $I_t = I_c$ となる。

4. 3 ひびわれ断面で鉄筋の抜出しを考慮した $\Delta\delta_C$

$\Delta\delta_C$ は基本的にRC部材に対するBransonの提案式 [4] に従うが、その際、クリープ係数と収縮歪は前述の φ_e と ε_{She} を用いる。ひびわれ断面での鉄筋の抜出しを考慮した場合には、スタブ部分では片引き付着試験体での、スラブ部分では両引き付着試験体での抜出し算定式（通常、鉄筋応力が低いので、クリープと収縮を考慮した計算式）と、かつ鉄筋の抜出しによる回転角に関する条件を用いることによって、力学的に厳密に誘導でき、対称荷重が加わる場合、次の算定式を得る。

$$\Delta\delta_C = \frac{5K_r \varphi_e L^2}{48(EI)} \left(M_s + \frac{1}{5} M'_A \right) \quad (6)$$

但し、
 M_s : スパン中央の曲げモーメントで M'_A は引張りの抜出しを考慮した端部の曲げモーメントである。 M'_A は次式で示される。但し、 C_A は中間荷重による固定端モーメントである。

$$M'_A = (C_A + G \cdot \varepsilon_{shN}) / D \quad (7)$$

$$D = 1 + 2(EI)/(\varphi_e L), \quad G = 2EIB/(\varphi_e L) \quad (8)$$

$$A = \frac{1}{\alpha E_N I_C} \left(\frac{np + \cosh \alpha\ell}{\sinh \alpha\ell} + \frac{\cosh \alpha g - 1}{\sinh \alpha g} \right), \quad B = \frac{1}{\alpha(d - x_n)} \left(\frac{\cosh \alpha\ell - 1}{\sinh \alpha\ell} + \frac{\cosh \alpha g - 1}{\alpha \sinh \alpha g} \right) \quad (9)$$

但し、 α : ひびわれ断面における経時的な付着弾性剛性
 l, g : スタブ及びスラブ内の引張り鉄筋の定着長
 d, x_n : ひびわれ断面における有効せいと中立軸位置
 L : スラブ長さ
 EI : 合成スラブの平均曲げ剛性

4. 3 計算結果

長期たわみの解析結果と実験値との比較を主な経過日数でプロットして図9に示す。但し、高強度コンクリートと場所打ちコンクリートのクリープ係数と収縮歪は荷重載荷以降の実験値の回帰式を用いている。3つの試験体に対し、計算値は実験値によく対応している。しかしながら、経過日数 $t=10$ 日～300日程度位まではいずれも解析値は実験値に対して最大で約4割程上回っている。これは、

ひびわれ剛性の経時的变化を(5)式で仮定したことと、解析で用いた収縮歪回帰式がこの区間で実験でのその値とあまり良く適合していないためと考えられる。特に前者については今後に検討の余地を残している。一方、CFR1とCFR2スラブの最終日において解析値はそれぞれ実験値の約86%、103%であり、またCFR3の解析値は経過日数872日で実験値によく適合した。全体的に経過日数600日を過ぎると、解析値は実験値とよく対応するようである。

5. まとめ

住宅用設計荷重($W = 0.24 \text{ tf/m}^2$)、事務所用設計荷重($W = 0.43 \text{ tf/m}^2$)及び住宅用設計荷重の約3倍の持続載荷を行った3試験体について、その実験結果と解析結果をまとめると以下のようになる。

1. 3つの試験体ともその長期たわみは、経過日数約300日程度あたりまで著しく増大し、その後ゆるやかな傾向に変わり、経過日数約700日頃から収束する傾向が見られた。長期付加たわみは3試験体とも同じような経時変化を示した。
2. 本研究で提案した長期たわみ解析法によるたわみ値は、経過日数約300日程度までは実験値をやや大きめに評価するが、その後は比較的良く実験結果に追随し、最終日で解析値は実験値の約85～100%の範囲内に収まった。本解析法がかなり有用であることが示された。
3. 端部に生じたひびわれは、3試験体とも経時に進展していくが、最大ひびわれ幅は0.25mm程度であり、また、FR板シェル部で止まり、それ以上の進展は見られなかった。

(参考文献)

- 1) 山下正吾, 岩原昭次, 小森清司:逆T型PC板埋設型枠を用いた合成床スラブの長期曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、pp249～254、1991
 - 2) 岩原昭次, 小森清司, 山下正吾: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1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp291～292、1992.8
 - 3) 岩原昭次, 小森清司, 山下正吾: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2)、日本建築学会中国・九州支部研究報告、pp365～368、1993.3
 - 4) Branson, D.E., Deformation of Concrete Structures, McGRAW-HILL, pp133～137, 171～175, 1977
 - 5) 渡辺明ほか、プレストレストコンクリートの力学、技報堂、pp163～167、1981
- (謝辞)本報告をまとめるに当たって、熊本工業大学建築学科岩原研究室の大学院生鈴木功、永本寛両君に深謝いたします。

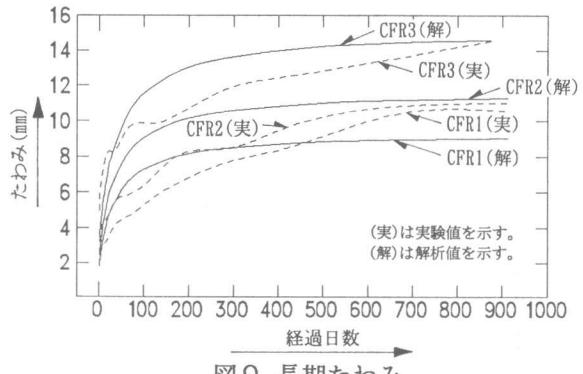


図9 長期たわみ