

(2) 逆T形PC合成床スラブの持続荷重時とその終了後の曲げ性状

(株)富士ビー・エス 建築事業部 正会員 ○山下正吾
 熊本工業大学 建築学科 正会員 岩原昭次
 長崎大学 構造工学科 小森清司

1. はじめに

近年、プレストレスを導入したプレキャスト板を埋設型枠とし、その上に現場打ちコンクリートを打設して得られるPC合成床スラブは、施工の合理化・スパンの長大化及びびびり対策等の面から、各種の断面のものが開発され実用化されている。その中の1つとして、フラットな底面を有し、天井の直仕上げが容易にでき、しかもスラブ全厚を薄く抑えることを目的とした、逆T形プレストレストプレキャスト板を埋設型枠に利用した場合の合成床スラブ(Ⅲ種PC)がある。著者等は、このPC合成床スラブの長期曲げ性状について実物大の試験体に対して約2年半持続荷重を行い、その後持続荷重が耐力等に及ぼす影響を検討する目的で破壊実験を行った。本研究は、この一連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、長期荷重下のこの種のPC合成床スラブの曲げ性状を明確にすることを目的とする。

2. 試験体及び実験概要

2.1 試験体

試験体は、工場で作製される逆T形プレキャスト板(以後FR板と略す)と現場で打設される現場打ちコンクリート部分の2層から構成される。FR板は1mの幅に2つのリブを有するが、このリブ部分に初期緊張力として1本当たり12tf/cm²を与えた7本よりPC鋼線(以下PC鋼材と略す)が2本配置されている。

逆T形プレキャスト板及び現場打ちコンクリート部の材料の性質を表1、表2に示す。

試験体は、両端固定とするために端部にスタブとなる型枠を設け、その型枠の上にFR板を架設し、また、そのスパン中央部に仮支柱を立てた状態で、FR板上のコンクリートとスタブ部分のコンクリートを同時に打設して製作した両端固定一方向合成スラブである。

図1に試験体形状図を示す。試験体の床スラブ部分の寸法は、幅1m・内法スパン5.6m・厚さ18cmである。図2に試験体の床スラブ部断面詳細図を示す。試験体の数は2体で、断面寸法・配筋等は同一である。なお、本試験体は仮設建物内に設置されており、外気の温・湿度の影響を受ける。

2.2 持続荷重方法
 2体の試験体のうち1体には、住宅用設計荷重として241kgf/m²を、もう1

表1 コンクリートの性質

種別	養生	材令	圧縮強度 kgf/cm ²	ヤング係数 kgf/cm ²	割裂強度 kgf/cm ²
FR コン クリ ート 板	試験体と 同一養生	53日	536	3.42×10 ⁶	42.3
	水中養生	57日	500	3.66×10 ⁶	44.5
	試験体と 同一養生	1058日	640	3.36×10 ⁶	49.7
現 場 打 ち コ ン ク リ ート	試験体と 同一養生	28日	200	2.46×10 ⁶	20.3
	水中養生	28日	187	2.42×10 ⁶	18.4
	試験体と 同一養生	1033日	228	2.44×10 ⁶	19.8

表2 鋼材の性質

種別	PC鋼より線(注)	異形鉄筋
品名	SWPR-7Aφ12.4mm	D10(SD295A)
公称断面積(cm ²)	0.929	0.71
降伏点応力(kgf/cm ²)	17707	3820
最大強度(kgf/cm ²)	18622	5559
ヤング係数(kgf/cm ²)	2.07×10 ⁶	1.92×10 ⁶

(注) ミルシートによる

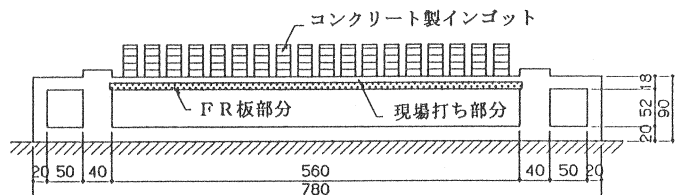


図1 試験体形状図および持続荷重状況 (単位:cm)

体には事務所用設計荷重として434kgf/m²を持続載荷させた。(以後、前者をCFR1、後者をCFR2と称する)

持続載荷は、スパン中央部の仮支柱を撤去した後、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した(図1)。但し、CFR2は一時的に超過荷重を加えて端部上面にひび割れを発生させた後、持続載荷を行った。

持続載荷は経過日数926日で終了し、インゴットを除去した後、約2週間無載荷の状態で放置した。

2. 3 破壊実験の加力方法

破壊実験は、図3に示す2台の加力ジャッキを用いて4等分点2点集中加力とした。CFR1は単調加力、CFR2は一方向繰り返し加力とした。

3. 実験結果の考察と検討

3. 1 持続載荷及び除荷時

(1) 乾燥収縮歪とクリープ係数

試験体が設置されている仮設建物内の温・湿度の影響による乾燥収縮歪とクリープ係数の経時変化を測定するために、試験体と同一要領でφ10cm×20cmの円柱テストピースを作製した。測定はテストピースの中央に埋込埋込み型歪ゲージによった。乾燥収縮歪はテストピースを試験体横に放置した状態で、FR板コンクリートで材令7日、現場打ちコンクリートで材令18日から測定した。クリープ係数は、スプリング式圧縮クリープ試験機を仮設建物内に据えて、テストピースに圧縮強度の1/3の応力を持続負荷させて測定した。クリープ係数の測定はFR板コンクリートに対し材令68日から、現場打ちコンクリートに対し材令43日から開始した。

FR板と現場打ちコンクリートの乾燥収縮歪の経時変化を図4に示す。同図中には最小2乗法を用いた回帰式 $\epsilon_{sh} = t / (A+Bt)$ によるグラフも示している。但し、A, Bは実験定数である。乾燥収縮歪の最終値は、FR板コンクリートで 5.41×10^{-4} 、現場打ちコンクリートで 8.26×10^{-4} と推定される。

クリープ係数の経時変化を図5に示す。図4と同様な回帰式によるグラフも示している。現場打ちコンクリートと蒸気養生したFR板コンクリートの特性の違いが顕著に現れている。FR板コンクリート及び現場打ちコンクリートのクリープ係数最終値は、各々、1.15及び5.75に収束するものと推定される。

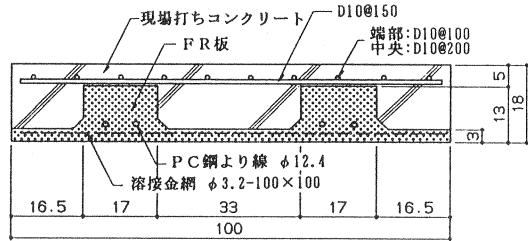


図2 合成床スラブ断面図 (単位:cm)

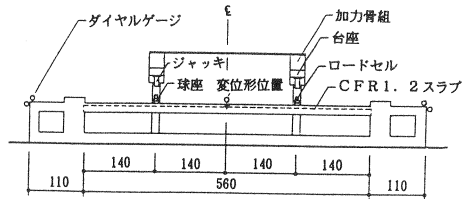


図3 破壊実験状況

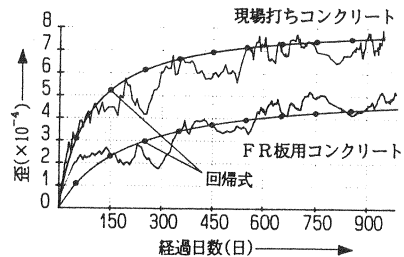


図4 乾燥収縮歪の経時変化

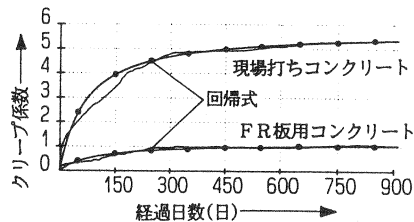


図5 クリープ係数

表3 たわみ測定値 (単位:mm)

経過時	CFR1	CFR2
支柱撤去時	1.01	1.00
載荷直後	1.85	3.05
102日	5.30	6.42
401日	8.29	9.35
926日	10.63	11.07
除荷直後	9.86	9.68
除荷後7日	9.71	9.50
除荷後14日	9.81	9.55

(2)経時たわみ

表3に持続載荷及び除荷前後の床スラブ中央点のたわみ測定値を、図6に経時たわみ変化を示す。図6のグラフの横軸は仮支柱撤去に伴う自重を含めた全載荷荷重を第1段階とし、持続載荷時の経時変化を第2段階、除荷後の経時変化を第3段階として示している。PC鋼材及び鉄筋歪の経時変化も同様の表示方法とした。たわみの測定は、仮支柱撤去前を基準にしている。

図6より、CFR1とCFR2共に、長期たわみはほぼ収束傾向にあることが示されている。また、両試験体は載荷レベルが異なるが、経過日数926日におけるたわみはほぼ同じ値を示している。

載荷時の荷重-たわみ曲線から、自重及び積載荷重が同時に作用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となる。表3の経過日数926日のたわみ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で4.6、CFR2で3.7となる。

一方、持続荷重除荷後14日におけるたわみ戻り量は、CFR1で載荷時弾性たわみの98%、CFR2で74%に達する。CFR2は、載荷時にひび割れを生じないと仮定すると、たわみ戻り量はそれの88%となる。このことから、除荷後のたわみ戻り量は載荷時のひび割れ発生の有無に関係なく、弾性たわみ量に近くなることが分る。

図6には、床スラブ端部の引張り鉄筋の拔出しによる付加たわみ計算値 δ_{SL} を含むたわみ $\delta = \delta_{*} + \delta_{SL}$ も示している。但し、クリープと乾燥収縮歪によるたわみ計算値は含んでいない。 δ_{SL} の計算にあたっては引張り鉄筋応力として鉄筋歪実測値(図9a,b)にヤング係数を乗じて(但し、降伏点応力を越える場合は降伏点応力とする)求めた。引張り鉄筋の拔出し量は文献3)による方法に乾燥収縮を考慮した有効弾性係数法を適用して求めた。また、この拔出しによる床スラブ中央点のたわみは、両試験体共中央部にひび割れが生じていないので、床スラブ両端に拔出しによる回転が生じているとした場合の弾性梁として計算した。また、 δ_{*} としてはCFR2では載荷時にひび割れを生じているので載荷終了後の瞬時たわみ δ_0 を、CFR1では経過日数9日でひび割れが生じているのを発見したのでその時のたわみを δ_9 を用いている。経過日数926日での δ_{SL} が長期付加たわみ(経時たわみ-瞬時たわみ)に占める割合はCFR1で33%、CFR2で39%を示している。このことから、クリープと乾燥収縮歪によるたわみはCFR1で67%、CFR2で61%を占めていると推測される。

なお、両試験体共、経時たわみは載荷開始直後から経過日数約250日まで急激に増大しているが、この経時的増大は $\delta_{*} + \delta_{SL}$ の計算結果から主に鉄筋の拔出しによる影響であることが推定できる。また、この床スラブ端部の鉄筋の拔出しによる付加たわみの解析結果から、経時的に両試験体の長期たわみがほぼ同じになるのは、2つの試験体のスラブ端部に生じたひびわれによる鉄筋の拔出しの影響等が、荷重レベルの違いによる影響より顕著であったためと考えられる。

なお、経過日数を経るに従い、両試験体共ひび割れが進展し、約80日頃になるとほぼ同様なひび割れ状況となった。ひび割れはFR板シェル部で止まり、それ以上は進展していない。最大ひび割れ幅はCFR1で0.2~0.25mmであった。一方、スパン中央部では持続載荷終了時までひび割れは発生しなかった。また、FR板と現場打ちコンクリートのはく離と思われるひび割れも生じていない。

(3)PC鋼材と鉄筋の経時歪

図7にFR板のPC鋼材と現場打ちコンクリート部分の鉄筋

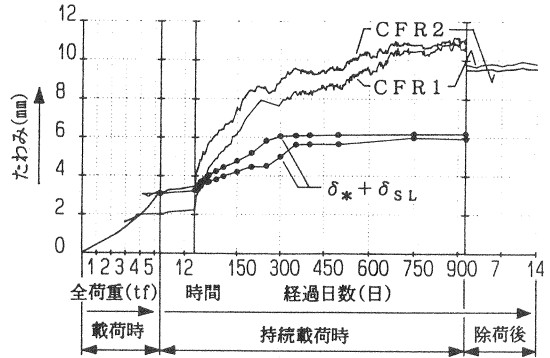


図6 経時たわみ

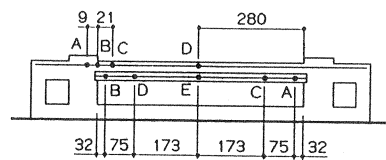


図7 PC鋼材、鉄筋の歪測定位置(単位:cm)

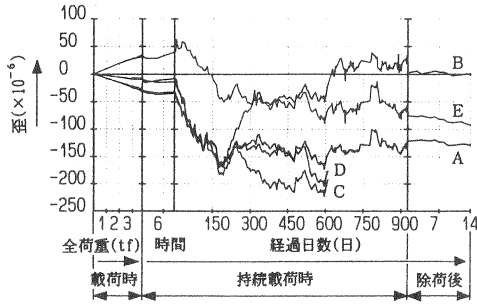


図8a PC鋼材の経時歪(CFR1)

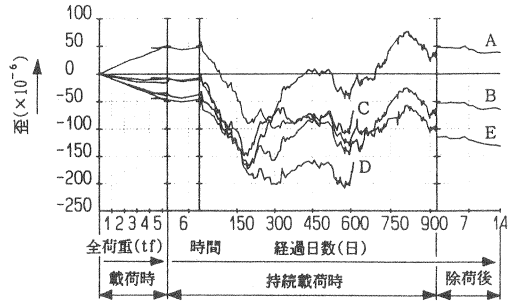


図8b PC鋼材の経時歪(CFR2)

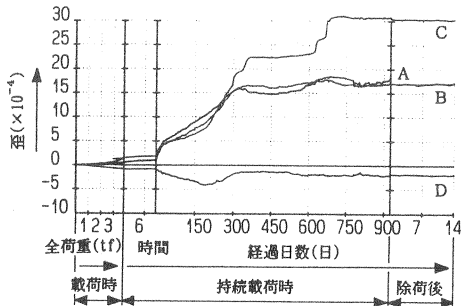


図9a 鉄筋の経時歪(CFR1)

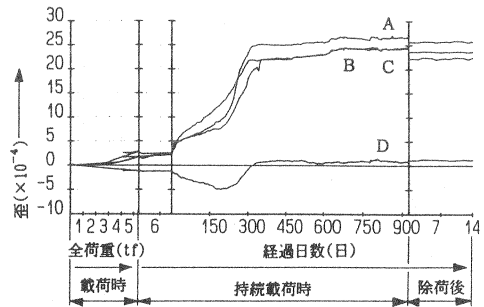


図9b 鉄筋の経時歪(CFR2)

の歪測定位置を示す。

図8a, bにCFR1, CFR2のPC鋼材経時歪を示す。ある程度の変動はあるもののPC鋼材の経時歪は概ね 200×10^{-6} 以下である。プレストレス導入による歪が $5200 \sim 5400 \times 10^{-6}$ であることからすると、長期的なPC鋼材の歪変化は無視できる範囲であると言える。

現場打ちコンクリート部の上端鉄筋の経時歪を図9a, bに示す。PC鋼材の経時歪に比べて、端部鉄筋の歪変化は大きく、300日頃まで増加し続けている。その後、一部を除いて変化は少なくほぼ一定に保たれている。両試験体を比較すると、CFR2の方がやや大きめの値を示しているが、両者はほとんど同様の経時変化を示している。

なお、CFR1, 2両試験体共固定端付近(測定点A, B, C)の鉄筋歪測定値が経過日数300日以後 15×10^{-4} 程度以上の大きな歪値を示しているが、このことについては実験事実として認めることができるのかあるいは歪ゲージの信頼性に問題があるのか不明である。ここではあえて実験結果として載せることにした。

3. 2 持続載荷終了後の破壊実験

(1) 荷重-たわみ曲線

経過日数926日で持続載荷を終了して除荷を行い、その後14日を経た時点で破壊実験を行った。試験体への加力の際、その左右に偏圧が生じないように、その位置に長さが100cmで断面が10cm×5cmの角鉄板を敷いている。また、荷重の測定は2台のジャッキの下にロードセルを挟み、変形の測定は

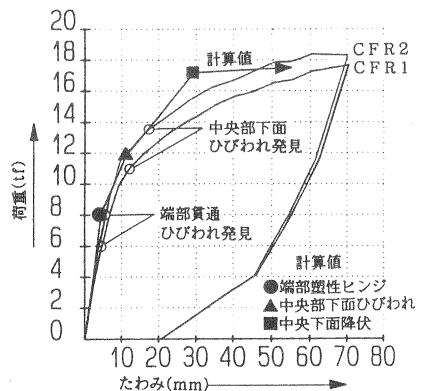


図10 荷重-たわみ曲線

試験体中央部の左右のスラブ側面に電動式変位計を取り付けて行った。破壊実験における荷重-たわみ曲線を図10に示す。図中の横軸のたわみは加力直前を基準にして、縦軸の荷重は2点集中荷重の和で示してある。表4には耐力と変形の実験結果を一覧する。

両試験体共スラブ端部で貫通ひび割れを発生するあたりまで、荷重の増大に伴ってたわみはほぼ直線状に増え、中央部下面でひび割れが発生した直後から明確に非線形性を示してくる。持続荷重時の載荷荷重が大きかったCFR2の方がスラブ端部貫通ひび割れ時荷重、中央部下面ひび割れ時荷重及び最大荷重のいずれに対してもCFR1のそれよりもいくぶんか高くなった。しかしながら、最大荷重についてみると両者の間にほとんど差は見られない。図10と表4に、加力時にひびわれを生じていないと仮定して、tri-linear型のモーメント-曲率関係を用いた変形解析結果も合わせて載せている。この変形解析の仮定及び結果は文献4) に示してある。解析結果は実験結果に追従しているといえる。このことは、少なくとも持続荷重期間が約900日程度で、しかも本研究で行なった持続荷重レベルに対して耐力的にほとんど低下していないことを示している。なお、最大耐力時のたわみが実験値の約50%程度しか評価されていないが、これは主にスラブ端部引張鉄筋の抜出しを考慮してないためと考えられる。

なお、ひび割れは、両試験体共、床スラブ端部付近においては持続荷重終了時までには発生した位置以外に新たに発生することはなく、固定端付近の1本のひび割れを拡大・進展させ、また、中央付近下面では曲げひび割れを生じて最大荷重に至った。図11に破壊実験終了後のひび割れ図を示す。

(2)PC鋼材歪と鉄筋歪

図12、図13にPC鋼材、鉄筋の荷重-歪曲線を示す。両試験体共、スラブ中央のPC鋼材はその下面にひび割れが生じた後、急激に歪を増大している。この中央位置の荷重-PC鋼材の歪曲線は図10の荷重-たわみ曲線と非常によく似た包絡線を描いており、両者の間に相関が認められるようである。鉄筋歪についてはCFR1,2共、同じような荷重-歪曲線を示している。スラブ端部付近の鉄筋についてCFR1で約11tf前後から、CFR2で約12tf以後でその歪の進行が鈍くなるのは負荷による引張の他に、プレストレスが導入されているPC鋼材から何らかの影響を受けた

表4 耐力と変形の実験結果一覧

		端部貫通ひびわれ発生時	中央部下面ひびわれ発生時	最大荷重時	
実験値	CFR1	荷重(tf)	6.00	11.11	17.65*2
		たわみ(mm)	4.60	12.55	70.05
	CFR2	荷重(tf)	8.00	13.51	18.38
		たわみ(mm)	5.55	17.15	60.50
計算値	荷重(tf)	8.07	11.83	17.17	
	たわみ(mm)	4.59	11.26	29.40	

(注1)計算値は加力実験開始時にはひびわれが生じていないとして求めた値である。また、“端部貫通ひびわれ発生時”と“最大荷重時”の計算値はそれぞれ端部と中央部で塑性ヒンジになったとして求めた値である。
(注2)CFR1の最大荷重時の値はたわみが70.05mmでの値である。

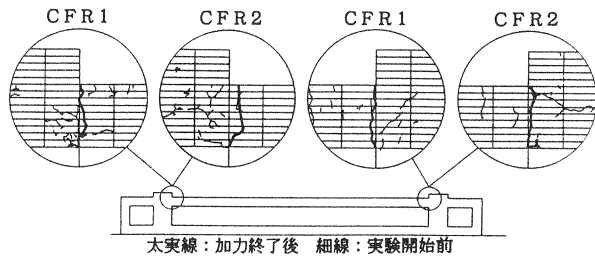


図11 加力終了後のひびわれ状況

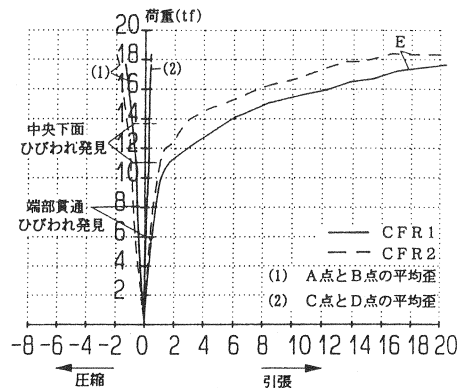


図12 CFR1,2スラブのPC鋼材歪(×10⁻⁴)

ためと考えられる。また、この引張鉄筋の歪の進行が鈍くなり始める時点以後で、スラブ中央点上端筋の圧縮歪が、両試験体共、荷重の進行とともに増大している。

4. まとめ

経過日数926日まで行った逆T形埋設型枠を用いた合成床スラブの持続荷重実験と、その後の破壊実験について考察・検討を行った。本研究の範囲内で次のような結果を得た。

- 1) それぞれ住宅用設計荷重 ($W \doteq 240 \text{kgf/m}^2$) と事務所用設計荷重 ($W \doteq 430 \text{kgf/m}^2$) を持続荷重した両試験体のたわみ性状・ひび割れ・PC鋼材歪及び鉄筋歪の諸性状については、定性的にも定量的にも顕著な違いが見られなかった。
- 2) 長期たわみは約2年半でほぼ収束傾向を示した。経過日数926日における長期たわみ倍率は住宅用設計荷重を載荷した試験体で4.6、事務所用設計荷重を載荷した試験体で3.7であった。
- 3) 持続荷重終了時で長期たわみに及ぼす要因を解析的に検討した結果、鉄筋の抜出しによるたわみが占める割合は両試験体で平均3.5割程度で、クリープと乾燥収縮が占める割合は6.5割程度であった。
- 4) 持続荷重後の除荷によるたわみ戻り量は、載荷開始時のひび割れ発生の有無に関係なく除荷後数日間積載荷重による弾性たわみ量に近くなる。
- 5) 解析的に検討した結果、持続荷重終了後の耐力低下は認められなかった。

(参考文献)

- 1) 山下正吾、岩原昭次、小森清司：逆T形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、vol.13-2、pp.249-254、1991
- 2) 岩原昭次、小森清司、山下正吾：逆T形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、pp.291~292、1992.8
- 3) 岩原昭次：使用荷重下における鉄筋コンクリート床スラブの長期曲げ問題に対する解析法に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.415、pp.63-73、1990.9
- 4) 岩原昭次、小森清司、山下正吾：載荷レベルを変えた逆T形PC板埋設型枠合成スラブの曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、vol.15、No.2、pp.335-358、1993

(謝辞) 本報告をまとめるにあたって、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。

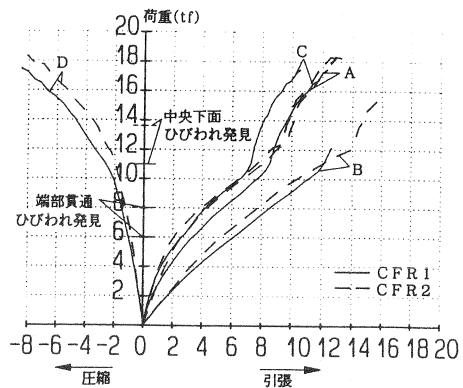


図1.3 CFR1,2スラブの鉄筋歪($\times 10^{-4}$)