

(64) 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したプレストレスト鉄筋コンクリート合成はりの曲げ性状

大阪大学 正会員 鈴木計夫 同○大野義照
大阪大学 鍋沢斤吾
東急建設(株) 斉藤駿三

【1. はじめに】

近年、工期短縮、品質確保および省力化をめざし、鉄筋コンクリートのスラブや梁の一部をプレキャスト化し、これを型枠代わりに用いて後打ちコンクリートを現場で打設して一体化する合成部材が注目されている。筆者等は、このプレキャスト部材に高強度鉄筋を緊張してプレストレスを導入し、合成後には常時荷重下においてひび割れの発生を許すプレストレスト鉄筋コンクリート(以下P R Cと略する)合成部材についての研究を行ってきた¹⁾²⁾³⁾、これは常時荷重下で強度に見合う高い応力を許すと過大なたわみやひび割れを生じ、その利点を生かすことができない高強度鉄筋を、鉄筋自身の緊張によってプレストレスを導入し、たわみやひび割れ幅を制御し有効に利用しようとするものである。この場合、高強度鉄筋はプレストレス導入用のP C鋼材とひび割れ分散用の普通鉄筋の役割を合わせ持つことになる。

本研究では、鉄筋の緊張応力、荷重履歴を実験要因に合成はりと比較のための一体打ちのはりの曲げ載荷試験を行い、ひび割れやたわみ等の曲げ性状を調べ、高強度鉄筋SD50を緊張したP R C合成曲げ部材の有用性を確認した。

【2. 実験概要】

2. 1 使用材料

コンクリートはプレキャスト部には呼び強度270kgf/cm²、後打ちコンクリートには同じく210kgf/cm²の早強ポルトランドセメントを用いた目標スランプ18cmのレディミクストコンクリートを使用した。その力学的性状を表1に示す。鉄

筋は、降伏点応力度6180kgf/cm²、引張強度7800kgf/cm²のD13を用いた。

2. 2 試験体の種類

表1 コンクリートの力学性状

	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
プレキャスト部(B)	7	279	25.2	2.49×10 ⁵
	26	362	29.3	2.62×10 ⁵
後打ち部(B)	7	206	—	2.08×10 ⁵
Aシリーズ	14	243	21.6	2.39×10 ⁵

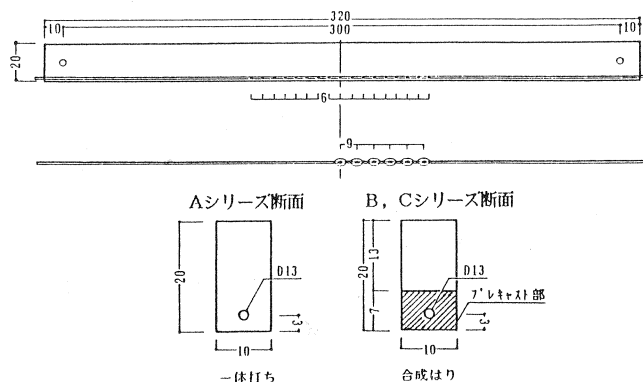


図1 試験体形状

表2 試験体の概要

試験体名	目標緊張応力 (kgf/cm ²)	備考
A-0	0	一体打ち
A-1	1000	
A-3	3000	
B-0	0	合成はり
B-1	1000	
B-2	2000	
B-3	3000	
C-0	0	合成はり*
C-2	2000	

*: 施工荷重を想定して後打ちコンクリート打設前にひび割れ荷重以上の荷重を載荷する。

試験体の形状を図1に、その種類を表2に示す。試験体は断面 $10 \times 20(\text{cm})$ 、長さ $310(\text{cm})$ の単筋長方形はりである。Aシリーズは比較用の一体打ちのはりで、B、Cシリーズは断面 $10 \times 7(\text{cm})$ のプレキャストコンクリートはりに $10 \times 13(\text{cm})$ のコンクリートを打ち継いだ合成はりである。Cシリーズは施工荷重を想定して、後打ちコンクリートの打設前にプレキャストコンクリートのはりにひび割れを生じさせた。また鉄筋の緊張応力は、目標緊張応力度を 1000kgf/cm^2 、 2000kgf/cm^2 、 3000kgf/cm^2 および無緊張としプレストレスの効果を調べた。

2. 3 試験体の製作

Aシリーズの試験体およびB、Cシリーズのプレキャスト部分のプレストレスの導入は、プレテンション方式で、コンクリート材令7日に行った。なお緊張ベッドでの鉄筋の緊張力は、導入時にコンクリートが弾性変形した後、所定の値となるように30%程度割増した。プレストレスの導入は材令7日に行った。

B、Cシリーズの試験体はプレキャスト部分を現場施工時を想定して両端(各)3.0mで支持し、これを型枠の一部としてプレキャストコンクリート材令10日に後打ちコンクリートを打設した。この時の自重+後打ちコンクリート重によるスパン中央の曲げモーメントは $0.0498\text{t}\cdot\text{m}$ で、この曲げモーメントによるプレキャスト部分の下縁のコンクリートの引張応力は 59.8kgf/cm^2 である。Cシリーズについては施工時の超過荷重を想定してプレキャスト部材にひび割れ荷重以上の荷重、すなわち、C-0は 0.217kgf/cm の等分布荷重(スパン中央の曲げモーメント: $0.0244\text{t}\cdot\text{m}$)をC-2は 0.122t の3等分点荷重(同じく $0.061\text{t}\cdot\text{m}$)を一時的に加え除荷した後、後打ちコンクリートを打設した。なおプレキャスト部分の接合面は木ゴテ仕上げとした。

Aシリーズ試験体は、B、Cシリーズの後打ち用コンクリートにより製作した。

試験体はすべて屋外で製作し、コンクリート打設後荷重までシート養生を行い、その間鉄筋ひずみの経時変化をワイヤーストレインゲージで測定し、鉄筋の緊張応力の変化を調べた。

Aシリーズ試験体はコンクリート材令11~13日に、Bシリーズ試験体はプレキャストコンクリート材令23~25日、Cシリーズは同じく材令17~18日に載荷した。

2. 4 載荷及び測定方法

載荷は図2に示すように等曲げスパン 1.0m の三等分点載荷とし、ひび割れ発生を確認した後、鉄筋の降伏に至るまでの間の3つの荷重階で各1回、荷重0まで除荷して復元性を調べた。たわみは変位計で、ひび割れ幅は試験体中央部はり側面下端から 3cm の鉄筋位置において16区間(換長 6cm)をコンタクトストレインゲージにより測定した。鉄筋ひずみは、換長 2mm のワイヤーストレインゲージを中央より片側に 9cm 間隔で5ヶ所に貼付して測定した。

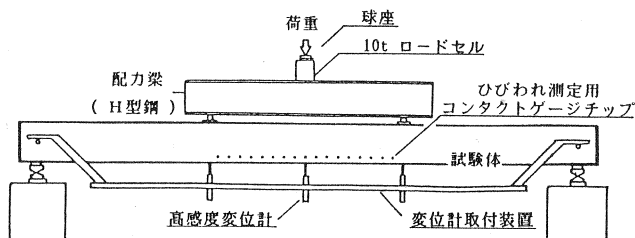


図2 載荷装置

【 3 実験結果及び考察】

3. 1 有効プレストレスト力

表3 プレストレスの損失および有効率

試験体名	導入直後			載荷直前			導入～載荷 の期間(日)	プレストレス 力の損失(t)	有効率
	鉄筋応力 (kg/cm ²)	引張力 (t)	下縁プレスト レス(kg/cm ²)	鉄筋応力 (kg/cm ²)	引張力 (t)	下縁プレスト レス(kg/cm ²)			
A-0	0	0	0	-235	-0.30	-4.6	5	0.30	—
A-1	947	1.20	18.6	761	0.97	15.0	4	0.23	0.81
A-3	2720	3.45	53.5	2350	2.98	46.3	6	0.47	0.86
B-0	0	0	0	-242	-0.31	-6.3	16	0.31	—
B-1	747	0.95	19.4	604	0.77	15.7	17	0.18	0.81
B-2	1690	2.15	43.8	1360	1.73	35.2	17	0.42	0.80
B-3	2500	3.18	64.8	2150	2.73	55.7	18	0.45	0.86
C-0	0	0	0	162	0.21	4.2	10	-0.21	—
C-2	1570	1.99	40.7	1480	1.88	38.37	11	0.11	0.94

注) * 試験体A-0およびB-0, C-0の(導入～載荷)の期間はそれぞれAシリーズおよびB, Cシリーズの日数である。
 ** 試験体A-0およびB-0, C-0のプレストレス力の損失(t)はコンクリートの乾燥収縮などによって生じた鉄筋の圧縮力である。

載荷時のプレストレス力の損失量および有効率等を表3に示す。緊張力が大きくなる程有効率が大きくなる傾向が認められる。試験体A-0, B-0についてはコンクリートの乾燥収縮によって鉄筋が圧縮され、負のプレストレスが生じている。

3. 2 M_{cr} , M_y , M_u , l_{av}

ひび割れモーメント M_{cr} 、降伏モーメント M_y 、終局モーメント M_u 及び平均ひび割れ間隔 l_{av} の実験値と計算値を表4に示す。なお、 M_{cr} , M_y および M_u の値には自重による曲げモーメント0.0498 t・mを確認している。

M_{cr} の計算値はコンクリート下縁の有効プレストレスを用いコンクリートの曲げ強度を引張強度の5/3倍として求めた計算値である。降伏モーメント M_y 、終局モーメント M_u の計算値は、日本建築学会RC規準の略算式による値であり、平均ひび割れ間隔 l_{av} の計算値は同じくPRC指針解説式⁴⁾⁵⁾による値である。 M_y , M_u および l_{av} については計算値と実測値はほぼ一致する。 M_{cr} についてはBシリーズの実測値が計算値より大きいとその理由として、計算では後打ちコンクリート打設時に後打ちコンクリート重を全てプレキャスト部単体で支持しているとしているが実際には側型枠でも負担していたことが考えられる。

表4 M_{cr} , M_y , M_u および l_{av} 一覧表

試験体名	ひびわれ モーメント $M_{cr}(t \cdot m)$		降伏 モーメント $M_y(t \cdot m)$		終局 モーメント $M_u(t \cdot m)$		平均 ひびわれ間隔 $l_{av}(cm)$	
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
A-0	0.15	0.18	1.21	1.17	1.24	1.20	11.2	12.8
A-1	0.30	0.28	1.06	1.17	1.12	1.20	11.3	12.8
A-3	0.55	0.49	1.10	1.17	1.20	1.20	12.1	12.8
B-0	0.15	<0	1.10	1.17	1.15	1.20	12.8	12.8
B-1	0.20	0.023	1.19	1.17	1.23	1.20	9.80	12.8
B-2	0.40	0.16	1.18	1.17	1.25	1.20	12.7	12.8
B-3	0.60	0.30	1.19	1.17	1.25	1.20	11.4	12.8
C-0	—	—	1.06	1.17	1.14	1.20	11.8	12.8
C-2	—	—	1.10	1.17	1.15	1.20	10.5	12.8

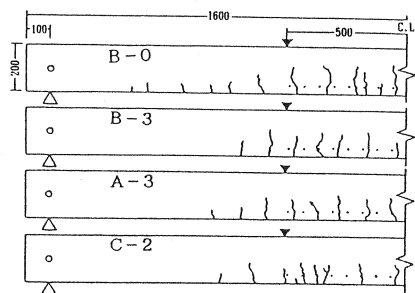


図3 ひび割れ状況図

3. 3 ひび割れ分布図

図3にひび割れ状況の一例を示す。等曲げ区間におけるひび割れ本数や間隔などの分散性には試験体による差は見られない。スパン全体で見るとプレストレスの効果によりひび割れ発生範囲が狭まる傾向が認められる。ひび割れの進展についても、同一荷重階では、プレストレスが大きい程進展が遅いことが確認された。

3. 4 ひび割れ性状

図4に載荷荷重Pと平均ひび割れ幅Wavの関係を示す。導入プレストレス力に応じてひび割れ幅が制御されていることが分かる。すべての試験体は同じ鉄筋を使用しているのひび割れ幅の増大傾向は同じである。Bシリーズは後の鉄筋応力の計

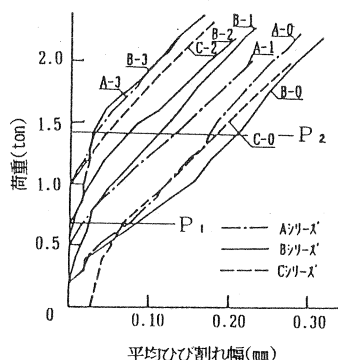


図4 荷重—平均ひび割れ幅関係

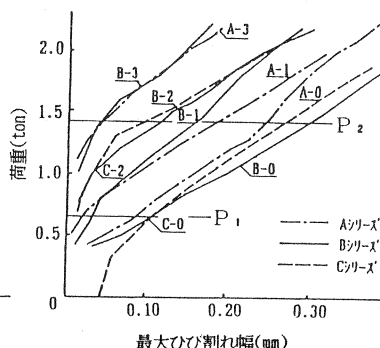


図5 荷重—最大ひび割れ幅関係

算結果で示すようにAシリーズに比べて、鉄筋位置のコンクリート応力が0の時点からの鉄筋応力変化量が大きくなるが、ひび割れ幅にはその影響は表れず、Bシリーズの荷重—ひび割れ幅関係はAシリーズのそれとほぼ同じである。後打ちコンクリートの打設の前にひび割れを発生させた試験体C-0には、載荷前に0.04mmのひび割れが残留していたが、低荷重時はひび割れ幅の増加量が少なく、後打ちコンクリートにひび割れが入ってから他の無緊張試験体A-0、B-0と同じひび割れ幅の増加傾向を示した。試験体C-2も、プレキャスト時に超過荷重を加え、ひび割れを生じさせたが、後打ちコンクリート打設時にはプレストレスによりひび割れは閉じており、プレキャスト時の荷重履歴の影響は現れていない。

プレストレスのひび割れ制御効果を見るために、試験体A-0において鉄筋応力が2000kgf/cm²と4000kgf/cm²となる2つの荷重階P₁(0.66t)、P₂(1.44t)でのひび割れ幅を表5に示す。この表から無緊張(B-0)であると荷重P₂では平均ひび割れ幅Wavは0.2mmであるが、2000kgf/cm²緊張する(B-2)と無緊張の場合の荷重P₁におけるWav0.08mmまで制御できることがわかる。また荷重P₂においてB-3の平均ひび割れ幅はB-0の平均ひび割れ幅の1/8に制御されている。すな

表5 2つの荷重階におけるたわみとひび割れ幅

P₁:試験体A-0の鉄筋応力σ_sが2000kgf/cm²となる荷重(≒0.66t)
P₂:試験体A-0の鉄筋応力σ_sが4000kgf/cm²となる荷重(≒1.44t)

試験体名	平均 ひび割れ幅 Wav (×10 ⁻² mm)		最大 ひび割れ幅 Wmax (×10 ⁻² mm)		全 たわみ量 δ ₁ (mm)		鉄筋応力変 化量Δσ _s (計算値) (kgf/cm ²)	
	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂
A-0	7.12	17.8	8.83	24.8	4.7	14.0	2250	4250
A-1	1.56	13.6	2.12	18.9	1.9	10.3	1180	3180
A-3	0	3.41	0	5.12	1.9	5.3	*	1562
B-0	8.04	21.3	10.1	30.0	5.3	15.6	2310	4260
B-1	2.10	11.2	3.14	16.3	2.5	11.0	1380	3340
B-2	0.23	7.55	0.90	11.7	2.1	8.1	640	2510
B-3	0	2.75	0	4.40	1.9	5.4	220	1680
C-0	7.52	19.8	11.0	27.0	2.3	9.1	1850	3830
C-2	0.30	6.10	1.11	10.1	2.3	7.8	550	2390

* ひび割れ未発生

わち、緊張によりひび割れ幅を制御し、鉄筋の高強度特性をフルに活用できることが示されている。

これらのことは図5に示す荷重 P と最大ひび割れ幅 W_{max} についても言えることである。プレストレスの違いにより4つのグループに分かれ、プレストレス力に応じてひび割れ幅が制御されている。図中、試験体A-0、B-1については $P-W_{max}$ 曲線の傾きに変化が見られるが、これは最大のひび割れ幅を有するひび割れが変わったことによる。

3. 5 たわみ性状

図6にBシリーズ試験体の荷重たわみ関係を示す。緊張力が大きくなる程復元性がよく、またPC特有の履歴が見られプレストレスの効果が現れている。

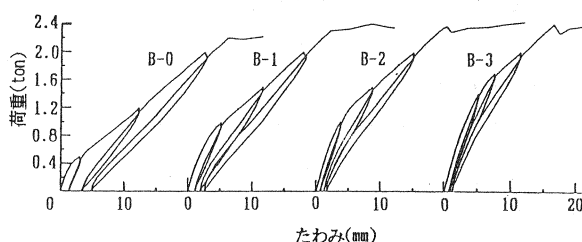


図6 荷重—たわみ関係(Bシリーズ)

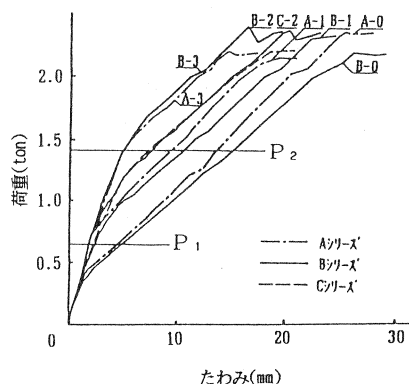


図7 荷重—たわみ関係

図7に包絡線で全試験体の荷重—全たわみ関係を示す。AシリーズとBシリーズでは目標緊張力は同じでも実際に導入されたプレストレス力が異なることなどのため多少の差異が見られるものの両シリーズはほぼ同じたわみ性状を示し、プレストレス力によるたわみ制御の効果が認められる。

先に設定した P_1 、 P_2 の各荷重階におけるたわみを前掲の表5に示した。荷重 P_2 におけるたわみはB-0が15.6mmなのに対しB-3では5.4mmに制御されている。また P_2 におけるB-2のプレストレスによるそり上がり(2.6mm)を考慮したたわみ量(5.5mm)は P_1 におけるB-0のたわみ量(5.3mm)にほぼ一致している。すなわち、無緊張の場合ならば鉄筋応力 2000kgf/cm^2 の荷重におけるたわみが、 2000kgf/cm^2 緊張することによって、無緊張の場合の鉄筋応力 4000kgf/cm^2 の荷重においても制御できることが示されている。

3. 6 応力計算

両端で支持され自重と後打ちコンクリート重が作用する後打ちコンクリート打設時、および前述の荷重 P_1 の作用時の部材中央におけるコンクリート応力ならびに鉄筋応力の変化量 $\Delta\sigma$ 。(鉄筋位置のコンクリート応力が0の時点からの変化量)の計算結果の一例を図8に示す。また、荷重 P_1 、 P_2 における鉄筋応力変化量 $\Delta\sigma$ を前掲の表5に示す。

本研究の対象部材は、プレキャスト部材の時にひび割れが生じなくても(生じる場合もある)、合成部材には使用荷重下でひび割れが発生するので、従来のフルプレストレスの合成はりの応力計算のように、プレキャスト部材単体時のコンクリート応力と合成後の作用荷重によるコンクリート応力を加え合わせる方法⁶⁾を用いることはできない。本計算ではプレキャスト単体時の応力分

布を考慮して導かれたひび割れの生じた合成部材の応力計算式³⁾を用いた。

ひび割れ幅に対応している $\Delta\sigma_s$ のプレストレスによる低減によってひび割れは制御されるが、表5に示した荷重 P_1 、 P_2 における各試験体のひび割れ幅の大きさと $\Delta\sigma_s$ はよく対応している。本実験の場合、試験体B-1、B-3の $\Delta\sigma_s$ は試験体A-1、A-3の $\Delta\sigma_s$ より100~200kgf/cm²大きいだけなので、試験体A、B間においてひび割れ幅に大きな差は生じてはいない。しかし、スパンが長くなりプレキャスト部材単体に作用する荷重の割合が大きくなる程、合成はりの鉄筋応力は一体打ちのはりより大きくなる³⁾ので注意を要する。

【4. まとめ】

高強度鉄筋の緊張によりプレストレスを導入したプレキャスト部材からなる合成はりの曲げ性状を一体打ちのはりと比較した本実験の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 合成はりにおいても高強度鉄筋の緊張応力に応じてひびわれ幅やたわみが制御された。
- 2) 合成はり是一体打ちのはりとたわみ、ひびわれ、強度等の点で同等の性能を示した。
- 3) プレキャスト単体時に超過荷重が作用してもプレストレスの導入によってひびわれが閉合していれば合成はりとしての性能に影響は認められなかった。
- 4) ひび割れの生じた合成断面における鉄筋応力変化量の計算結果はひび割れ幅の実測値とよく対応していた。

『謝辞』

本研究は中国派遣研究員紀敬雷氏(上海鉄道学院)、本学院生 堀裕弘氏ならびに本校技官 中川隆夫氏の協力によって実施したものであり、記して謝意を表します。

《参考文献》

- 1) 鈴木、大野、白井：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したP R Cはりの曲げ性状；コンクリート工学年次論文報告集、第9巻2号、pp.489~494、1987
- 2) 鈴木、大野、白井：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したP R Cはりの持続荷重下における曲げ性状；日本建築学会近畿支部研究報告集、昭和63年、pp.117~120
- 3) 鈴木、大野、紀：プレストレス鉄筋コンクリート合成断面部材の応力計算；プレストレスコンクリート技術協会第29回研究発表会講演概要、1989
- 4) 日本建築学会：プレストレス鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説
- 5) 鈴木、大野：P R C部材の曲げひび割れ幅計算法、プレストレスコンクリート、Vol124、No1、Jan. 1982
- 6) 日本建築学会：プレストレスコンクリート設計施工基準・同解説

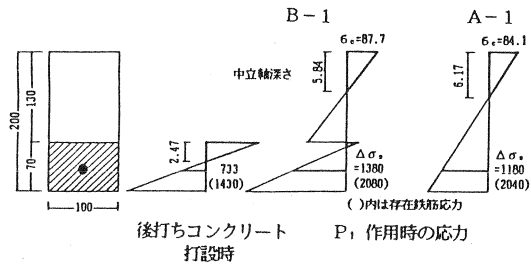


図8 B-1, A-1試験体の応力分布