論 文 [2019] パーシャル PC はりの長期間経過後の部材特性

- 正会員〇井上 晋(京都大学工学部)
- 正会員 宮川豊章(京都大学工学部)
- 正会員 藤井 学(京都大学工学部)
- 正会員 小林和夫(大阪工業大学工学部)

<u>1.はじめに</u>

パーシャルプレストレストコンクリート(以下PPCと略記)構造は、広義ではフルプレスト レストコンクリート(PC)と鉄筋コンクリート(RC)の中間領域をすべてカバーする構造を 意味するが、ここでは使用状態の全設計荷重作用下で曲げひびわれの発生を許容する従来のIII種 PCに相当する狭義のものを対象とする。PPC構造とすることにより、PC,RCの有する欠 点を補うことができるとともに、緊張鋼材(PC鋼材)と非緊張鋼材(鉄筋)の断面積比(プレ ストレスレベル)を変化させることにより自由度の高い断面設計が可能となる。しかし、PPC では鉄筋がコンクリートの乾燥収縮ひずみおよびプレストレスによるクリープひずみを拘束する ため、鉄筋には経時的に圧縮応力が移行する。これは、コンクリート断面に対してはPC鋼材に よるプレストレス力とは逆方向の作用力となり、コンクリートの有効プレストレスを減少させる ことになる¹¹。したがって、PPCの設計に際しては、長期間経過後のコンクリートの乾燥収縮 ・クリープに起因する有効プレストレスの減少ならびにそれに伴う諸耐荷性状の変化を明確にし ておく必要がある。

本研究は、4年間種々のレベルの持続荷重載荷試験を実施し、除荷した後、さらに屋内または 屋外に約3年間放置したPPCはりのコンクリートの残存プレストレスを実験・理論の両者より 推定するとともに、緊張率入およびせん断スパン有効高さ比 a/d等を主要因とした静的載荷試験 を実施し、その基本的耐荷性状を短期材令で載荷したものと比較検討したものである。

<u>2. 試験概要</u>

供試はりの形状・寸法を図1に示す。また,要因の詳細を各はりごとに表1に示す。

供試はりは2グループに分類し、各グループ内では最大曲げ耐力の計算値がほぼ等しくなるよう配筋した。PC鋼材緊張率 λ (=Ap·fpy/(As·fsy+Ap·fpy), fpy:PC鋼材の降伏点, fsy:鉄筋の降伏点)の値として、グループ1(G1)では0(RC), 0.49(PPC)の2種類、グループ2(G2)では0(RC), 0.35, 0.68(PPC)の3種類を選定した。本試験におい

ては、RCはりではPPCはりと最大曲げ耐力 を合わせるために、PPCと同一のPC鋼材を 断面内に非緊張のまま配置し、前述の式により 緊張率 λ を計算する際にはこれらを鉄筋と考え $\lambda = 0$ とした。なお、コンクリートの設計基準 強度はいずれも500kgf/cm²とした。

持続荷重は材令約9~11週でバネによる対称2 点集中荷重方式(せん断スパン50cm,曲げスパン40cm)によって与え,以後約4年間継続して



図1 供試はりの形状・寸法

供試体			*2	*3	周又引回支持	*4	持続載荷	コンクリート強度(kgf/cm²) *5		放置
			ахнл As	Ар	<u>派派</u> 平 入	g q	何里///// (tonf)	fc'	Ec	J-753/91
シリーズA	*1	NO.1-A	2D10	ø7.4	0.49	0.13	I (1.56)	552	3.83×10 ⁵	屋外
	G 1	NO.2-A	2D10	ø7.4	0.49	0.13	II(2.24)	531	3.48×10 ⁵	屋内
		NO.3-A	2D10	ø7.4	0.49	0.13	III(3.08)	531	3.48×10 ⁵	屋内
		NO.4-A	2D10, Ø7.4	-	0	0.13	III(2.37)	531	3.48×10^{5}	屋外
	*1 G 2	NO.5-A	2D13	¢7.4	0.35	0.18	I (1.68)	552	3.83×10 ⁵	屋外
		NO.6-A	2D13	ø7.4	0.35	0.18	III(4.38)	531	3.48×10 ⁵	屋内
		NO.7-A	2D10	¢11	0.68	0.22	III(4.08)	583	3.58×10⁵	屋外
		NO.8-A	2D13, Ø7.4	-	· 0	0.18	111(3.44)	583	3.58×10 ⁵	屋内
シリーズB	*1 G 1	NO.1-B	2D10	¢7.4	0.49	0.13	I (1.56)	552	3.83×10 ⁵	屋外
		NO.2-B	2 D 1 0	ø7.4	0.49	0.13	II(2.24)	531	3.48×10 ⁵	屋外
		NO.3-B	2D10	ø7.4	0.49	0.13	III(3.08)	531	3.48×10 ⁵	屋内
		NO.4-B	2D10, Ø7.4	-	0	0.13	III(2.37)	531	3.48×10 ⁵	屋外
	*1 G 2	NO.5-B	2D13	ø7.4	0.35	0.18	I(1.68)	552	3.83×10 ⁵	屋外
		NO.6-B	2D13	ø7.4	0.35	0.18	III(4.38)	531	3.48×10^{5}	屋内
		NO.7-B	2D10	ø11	0.68	0.22	III(4.08)	583	3.58×10 ⁵	屋外
		NO.8-B	2D13, Ø7.4	-	0	0.18	III(3.44)	583	3.58×10 ⁵	屋内

表1 供試はりの種類

*1 最大曲げ耐力の計算値がほぼ等しいグループ

*2 D10:fsy=4100kgf/cm², D13:fsy=4200kgf/cm²

*3 Ø7.4:fpy=14400kgf/cm², Ø11:fpy=14000kgf/cm²

*4 q=Ap·fpy/(b·dp·fc')+As·fsy/(b·ds·fc')

*5 持続試験開始時(材令9~11週)

載荷した。持続載荷荷重レベルは、グループ1では、Ⅰ.死荷重、Ⅱ.死荷重と設計荷重の中間 の荷重、および、Ⅲ.設計荷重の3レベルとした。一方、グループ2では、Ⅰ.死荷重およびⅢ. 設計荷重の2レベルとした。ただし、ここで用いた死荷重とは断面下縁コンクリート応力度が土 木学会PC標準示方書(昭和53年制定)に定められている許容曲げ引張応力度に達する時の荷重 の計算値であり、また、設計荷重とは同示方書で鋼材図心位置でのコンクリート応力度が0とな る状態からの鋼材応力度の増加量が2000kgf/cm²(最大ひびわれ幅0.2mm程度)に対応する荷重の 計算値である。これらの具体的な値は表1に示すとおりである。

すべてのはりには,土木学会PC標準示方書の規定により,せん断破壊が先行しないように, せん断スパン内に矩形スターラップ(ø6mm)を配置した。

載荷方法は2シリーズとし、シリーズAでは短期材令における載荷試験結果(持続載荷せず、 材令約11~12週で静的載荷試験を実施)と比較するために a/d=3.0とし、シリーズBでは a/d= 2.0とした対称2点集中載荷とした。

3. 試験結果および考察

1)残存プレストレス

本研究においては、PPCはりの断面下縁部コ ンクリートの残存プレストレスを載荷試験におけ るひびわれ再開口荷重または曲げひびわれ発生荷 重から算出するとともに(実測値),以下に示す ような方法²⁾で理論的に求めた(計算値)。

図2に示すように、コンクリートの一様な自由 乾燥収縮ひずみ ε_s (A – A')は、鉄筋が存在す る場合にはその拘束により(B – B')のように減 じられる。この時 ε_s '、 θ 'は次式で表すことがで きる。



図2 ひずみ分布図

-128 -

ここに、A_s、A_o: それぞれ軸方向鉄筋、コンクリートの断面積、I_o: コンクリート純断面 のG-G軸に関する断面2次モーメント、e_s: G-G軸から鉄筋までの距離、E_s、E_o: それ ぞれ鉄筋、コンクリートの弾性係数、 ϕ_t : コンクリートのクリープ係数、 ε_s : コンクリートの 乾燥収縮ひずみ。

ε_s'とθ'を鉄筋の存在下での軸方向乾燥収縮ひずみおよび回転角ひずみと考え,さらに,次 式³'で与えられる鉄筋コンクリート断面の見かけのクリープ係数φ_t'を導入する。

ここに、 I:: G-G軸に関する鉄筋の断面2次モーメント。

このφ₁'とε₅'を用いることにより,鉄筋を有する場合のPC鋼材のプレストレス損失量ΔP はそれを有しない場合と同様の方法⁴'で計算することができる。すなわち,

 $\Delta P = [n_{p} \rho_{p} / (1 + n_{p} \rho_{p} \mu')] \cdot [\mu' P \phi_{t}' + E_{o} A_{o}' (k_{1} - k_{2} e_{p}) \varepsilon_{s}] \cdots (6)$ $\mu' = 1 + e_{p}^{2} A_{o}' / I_{o}', n_{p} = E_{p} / E_{o}, \rho_{p} = A_{p} / A_{o}' \cdots (7)$ ここに、A_p, A_o': それぞれPC鋼材の断面積、鉄筋を考慮したコンクリートの換算断面積, I_o': 鉄筋を考慮したコンクリートの換算断面のG'-G'軸に関する断面2次モーメント、e_p : G'-G'軸からPC鋼材までの距離, E_p: PC鋼材の弾性係数, P:初期プレストレス力。

また、コンクリートの乾燥収縮・クリープに伴う鉄筋への圧縮力の移行量△Cは以下の式で与 えられる。

 $\Delta C = E_{s}A_{s}(\varepsilon + \theta e_{s}') \qquad (8)$ $\varepsilon = (P \phi_{t}' - \Delta P)/(E_{c}A_{c}') - n_{p} \rho_{p} \gamma / [E_{c}A_{c}'(1 + n_{p} \rho_{p} \mu')] + k_{1} \varepsilon_{s} \qquad (9)$ $\theta = e_{p}(P \phi_{t}' - \Delta P)/(E_{c}I_{c}') - e_{p} n_{p} \rho_{p} \gamma / [E_{c}I_{c}'(1 + n_{p} \rho_{p} \mu')] - k_{2} \varepsilon_{s} \qquad (10)$ $\gamma = \mu' \phi_{t}'^{2}P/2 + E_{c}A_{c}'(k_{1} - k_{2}e_{p})\varepsilon_{s}\phi_{t}' \qquad (11)$

ここに, es': G'-G'軸から鉄筋までの距離。

 ΔP , ΔC より, コンクリート断面引張縁の有効プレストレス σ_{ct} は次式によって求めることができる。

 $\sigma_{ct} = (P - \Delta P)/A_{c}' + (P - \Delta P)e_{p}y'/I_{c}' - \Delta C/A_{c} - \Delta Ce_{s}y/I_{c}$ ·······(12) ここに, y, y': それぞれコンクリート下縁からG-G軸およびG'-G'軸までの距離。

計算にあたって、コンクリートの乾燥収縮ひずみ ε_s およびクリープ係数 ϕ_t の値としては、土木学会コンクリート標準示方書(昭和61年制定)を参考にして、 $\varepsilon_s = 270 \times 10^{-6}$ 、 $\phi_t = 3.1$ とした。これらの計算値を実測値と併せて表2に示す。

表2のように,計算値と実測値はおおむね一致しており,PPCはりのコンクリート断面にお ける残存プレストレスは上述の方法により精度良く推定できることが示された。また,PC鋼材 量が等しい供試体N0.1~3とN0.5,6を比較すると鉄筋量の多いN0.5,6ではコンクリートの乾燥収 縮・クリープによるプレストレス力の鉄筋への移行量が大きくなるため,導入時に30kgf/cm²程 度存在していた断面下縁のプレストレスはほとんど消失していることが認められる。さらに,P C鋼材量の多いN0.7は,N0.1~3に較べて残存プレストレスは大きいものの,導入力が大きいた めクリープの影響が大となり,プレストレスの損失量も大きくなっている。

	プレストレス導入時		載 荷 時							
世話は			計算值				2017	実 験 亻	直	
БЩФ	PC鋼材	断面下縁	残存7°	7°V *1	鉄筋移行	断面下縁	下縁 *2	ひびわれ再	断面下縁	下縁 *3
		I I VALVA		「ハリハリ」		月	7 2412	開口(発生)	残仔	7 1211
		(1.0(.0))	11	一派シ里		J VAPVA	减少重	何里	TUXNUX	减少重
	(tonf)	(kgi/cm²)	(tonf)	(tonf)	(tonf)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(tonf)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)
NO.1-A	3.41	28.2	3.10	0.31	1.18	8.8	19.4	(2.02)	10.1	18.1
NO.2-A	3.38	28.0	3.06	0.32	1.20	7.8	20.2	0.25	8.8	19.2
NO.3-A	3.41	27.9	3.09	0.32	1.21	7.9	20.0	0.25	8.8	19.1
NO.5-A	3.71	24.1	3.42	0.29	1.87	-2.2	26.3	(1.74)	-2.4	26.5
NO.6-A	3.75	28.6	3.45	0.30	1.92	-3.1	31.7	0.0	0.0	28.6
NO.7-A	7.67	58.7	6.51	1.16	1.88	28.2	30.5	0.50	17.6	41.1
NO.1-B	3.40	27.4	3.09	0.31	1.18	8.7	19.7	(2.97)	12.2	15.2
NO.2-B	3.44	29.8	3.12	0.32	1.22	8.1	21.7	0.23	5.7	24.1
NO.3-B	3.41	28.6	3.09	0.32	1.21	7.9	20.7	0.23	5.7	22.9
NO.5-B	3.68	21.8	3.39	0.29	1.87	-2.3	24.1	(2.23)	-8.2	30.0
NO.6-B	3.74	26.5	3.44	0.30	1.91	-3.2	29.7	0.27	6.4	20.1
NO.7-B	7.67	58.7	6.51	1.16	1.88	28.2	30.5	0.75	18.4	40.3

表2 PPCはりの残存プレストレス

*1 (導入時プレストレス力)-(PC鋼材の残存プレストレス力(計算値))

*2 (導入時街面下縁プレストレス) - (街面下縁残存プレストレス(計算値)) *3 (導入時街面下縁プレストレス) - (街面下縁残存プレストレス(実験値))

なお,本実験では持続載 荷荷重レベルの影響に関し ては,グループ1で死荷重 レベル(I)のはり(NO.1) の残存プレストレスが他の レベルのもの(NO.2,NO.3)に 較べ若干大きくなっている ものの、有意な差異ははほ とんど認められなかった。 2)最大耐力·破壊性状

静的載荷試験の結果を表 3に示す。

a/d=3.0のシリーズAのは りはすべて曲げ破壊を呈し * 最大曲げ耐力の計算値がほぼ等しいグループ たのに対し, a/d=2.0のシリ

表3 静的載荷試驗結果

/## 1.1 /#*				最大耐力	じん性率				
	57	п ч, 14	計算值	実験値	実験値 (短期材令)		(短期材令)		
シリーズA	* G 1	NO.1-A		8.09		3.91			
		NO.2-A	6.54	8.30	7.85, 8.03	4.24	4.23		
		NO.3-A		8.29		3.11			
		NO.4-A	6.54	7.96	8.25, 8.00	6.11	4.76		
	* G 2	NO.5-A	0 9 6	11.50	11.34, 11.05	2.16	2.06		
		NO.6-A	9.20	10.83		2.83			
		NO.7-A	9.20	11.96	11.49, 11.90	3.02	2.52		
		NO.8-A	9.26	10.75	10.80, 11.10	3.43	4.00		
シリーズB	* G 1	NO.1-B		12.23		3.12			
		NO.2-B	9.35	12.61		3.68			
		NO.3-B		11.92		2.89			
		NO.4-B	9.35	12.48		4.48			
	* G 2	NO.5-B	10 00	16.89	-	2.95	-		
		NO.6-B	10.20	16.13		2.74			
		NO.7-B	13.14	17.19		2.33			
		NO.8-B	13.23	15.60		3.62			

ーズBのはりはすべてせん断圧縮破壊を呈した。しかし,最大耐力はいずれも終局曲げ強度理論 による計算値を上回っている。また短期材令での載荷試験結果との比較により、設計荷重レベル 以下の持続荷重載荷およびその後の長期間屋内・外放置による影響は全く認められず、屋外放置 の場合でも鋼材腐食等による耐力低下がなかったことを示している。

3)最大ひびわれ幅

荷重-最大ひびわれ幅(P-Wmax)関係を図3に示す。

一部の供試体を除き、長期間経過後のPPCはりは短期材令で載荷したものと比較して同一荷 重に対するWmaxが大きくなり,プレストレス損失の影響が明白にうかがえる。また,持続荷重 レベルが死荷重(I)と設計荷重(III)のはりを比較すると、いずれのグループにおいても設計 荷重付近(3tonf)までは持続荷重レベルを死荷重としたはりの方がWmaxは小さくなるが,設計荷

-130 -

重以降の荷重段階ではむしろその逆の傾 向を示すことがうかがえる。これは、持 続荷重を死荷重レベルとしたはりでは, 長期持続荷重載荷下でも曲げひびわれが 発生していないため、設計荷重付近で新 たに発生したひびわれの影響により、コ ンクリートの負担引張力が急激に鉄筋へ 移行することによりWmaxが増大すること、 すなわち、ひびわれの発生に伴う著しい 応力ジャンプによるものと考えられる。 一方, A, B両シリーズとも同一荷重に 対するWmaxの値は、0.15mm程度までの範 囲内では緊張率んの最も大きなPPCは り(NO.7) で最も小さくなるが, 入の小 さいPPCはり (NO.1~NO.3およびNO.5, NO.6)ではコンクリート下縁部のプレス トレスがほとんど消失しているため、そ れぞれ対応するRCはり(N0.4, N0.8) と顕著な差異は認められない。

4)たわみ性状およびじん性率
荷重-たわみ(P-δ)関係の一例を図

4に示す。また、各はりのじん性率を表



図3 荷重-最大ひびわれ幅関係



図4 荷重-たわみ関係

3に示す。なお,ここでいうじん性率は,降伏荷重時のたわみに対する最大荷重時のたわみの比 で定義したものである。

持続載荷荷重が死荷重レベルのはりではひびわれを生じていないため初期ひびわれ発生荷重ま での部材剛性が若干高くなるものの,持続載荷荷重による明瞭な差異は認められない。また,短 期材令で載荷したものと比較しても,その差異はほとんど認められない。

表3より,シリーズAのはりのじん性率は短期材令のものと較べほとんど変化なく,長期間経 過後においても部材じん性は低下しないことが認められる。また,同様に持続載荷荷重レベルに よる差異も顕著でない。一方,同一シリーズ内においては緊張率入の増加とともにじん性率が低 下する傾向が認められる。また,a/d=2.0としたせん断卓越型のシリーズBのはりでは,せん断 ひびわれの発達が顕著となり,a/d=3.0とした曲げ卓越型のシリーズAの対応するはりよりもじ ん性率が小さくなることが示された。

<u>4.結論</u>

本研究では,約4年間の持続荷重載荷試験を実施した後,除荷した状態で約3年間屋内または 屋外に放置したPPCはりの残存プレストレスと基本的な耐荷性状を検討した。得られた主な結 論を以下に示す。

1)長期間経過したPPCはりでは、コンクリートの乾燥収縮・クリープに伴いプレストレス力 が鉄筋に移行するため、コンクリート断面下縁部に作用する有効な残存プレストレスが著しく減 少する。その減少量は鉄筋量が増大するほど大きくなる。また、このような残存プレストレスは 本研究で採用した手法によりかなり精度良く推定できる。

2)コンクリートの残存プレストレスの減少に伴い、長期間経過したPPCはりのひびわれ幅制 御能力は短期材令で載荷したものと較べて低下する。また、荷重-最大ひびわれ幅関係は持続載 荷荷重レベルによって影響を受け、持続載荷荷重レベルを死荷重としたはりの設計荷重以降の同 一荷重に対する最大ひびわれ幅は、新しいひびわれの発生に伴う鉄筋への急激な引張応力の移行 (応力ジャンプ)のため、持続載荷荷重レベルを設計荷重としたものよりもむしろ大きくなる。 3)持続荷重レベルを設計荷重としたはりは既にひびわれを有しているため、短期材令で載荷し たはりおよび持続荷重レベルを死荷重としたはりに較べて初期剛性は低下する。しかし、降伏荷 重、最大耐力およびじん性率に関しては長期間放置および持続載荷荷重レベルによる影響はほと んど認められない。

参考文献

- 1) Abels, P.W. and Kung, R. : Prestress Losses Due to the Effect of Shrinkage and Creep on Nontensioned Steel, ACI Journal, January-1973, pp.19-27
- 2) Okada, K., Kobayashi, K. and Hatamura, H. :Effect of Supplementary Reinforcement on Flexural and Long-term Behaviors in Unbonded Prestressed Concrete Beams, Proc. of FIP Sym. on Partial Prestressing and Practical Construction in Prestressed and Reinforcement Concrete, Romania, 1980, pp.36-43
- 3)坂 静雄,岡田 清,六車 熙:プレストレストコンクリート,朝倉書店
- 4) 岡田 清,神山 一; プレストレストコンクリートの設計,国民科学社