

論文

[2019] パーシャル PC はりの長期経過後の部材特性

正会員○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)

1. はじめに

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¹⁾。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 λ 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。

2. 試験概要

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。

供試はりには 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 ($=A_p \cdot f_{py} / (A_s \cdot f_{sy} + A_p \cdot f_{py})$, f_{py} : PC 鋼材の降伏点, f_{sy} : 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 500 kgf/cm^2 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

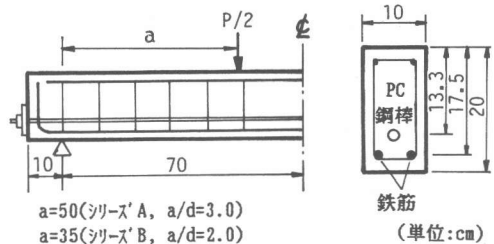


図 1 供試はりの形状・寸法

表1 供試はりの種類

供試体		鉄筋 As	*3 P C鋼材 Ap	緊張率 λ	*4 鋼材指数 q	持続載荷 荷重レベル (tonf)	*5 コンクリート強度(kgf/cm ²)		放置 場所	
							f'c	E _c		
シリーズA	*1 G 1	NO.1-A	2D10	φ7.4	0.49	0.13	I(1.56)	552	3.83×10 ⁵	屋外
		NO.2-A	2D10	φ7.4	0.49	0.13	II(2.24)	531	3.48×10 ⁵	屋内
		NO.3-A	2D10	φ7.4	0.49	0.13	III(3.08)	531	3.48×10 ⁵	屋内
		NO.4-A	2D10, φ7.4	—	0	0.13	III(2.37)	531	3.48×10 ⁵	屋外
	*2 G 2	NO.5-A	2D13	φ7.4	0.35	0.18	I(1.68)	552	3.83×10 ⁵	屋外
		NO.6-A	2D13	φ7.4	0.35	0.18	III(4.38)	531	3.48×10 ⁵	屋内
		NO.7-A	2D10	φ11	0.68	0.22	III(4.08)	583	3.58×10 ⁵	屋外
		NO.8-A	2D13, φ7.4	—	0	0.18	III(3.44)	583	3.58×10 ⁵	屋内
シリーズB	*1 G 1	NO.1-B	2D10	φ7.4	0.49	0.13	I(1.56)	552	3.83×10 ⁵	屋外
		NO.2-B	2D10	φ7.4	0.49	0.13	II(2.24)	531	3.48×10 ⁵	屋外
		NO.3-B	2D10	φ7.4	0.49	0.13	III(3.08)	531	3.48×10 ⁵	屋内
		NO.4-B	2D10, φ7.4	—	0	0.13	III(2.37)	531	3.48×10 ⁵	屋外
	*2 G 2	NO.5-B	2D13	φ7.4	0.35	0.18	I(1.68)	552	3.83×10 ⁵	屋外
		NO.6-B	2D13	φ7.4	0.35	0.18	III(4.38)	531	3.48×10 ⁵	屋内
		NO.7-B	2D10	φ11	0.68	0.22	III(4.08)	583	3.58×10 ⁵	屋外
		NO.8-B	2D13, φ7.4	—	0	0.18	III(3.44)	583	3.58×10 ⁵	屋内

*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 φ7.4:fsy=14400kgf/cm², φ11:fsy=14000kgf/cm²
 *4 $q=Ap \cdot fpy / (b \cdot dp \cdot fc') + As \cdot fsy / (b \cdot ds \cdot fc')$
 *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P C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P C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(φ6mm)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、P P C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。

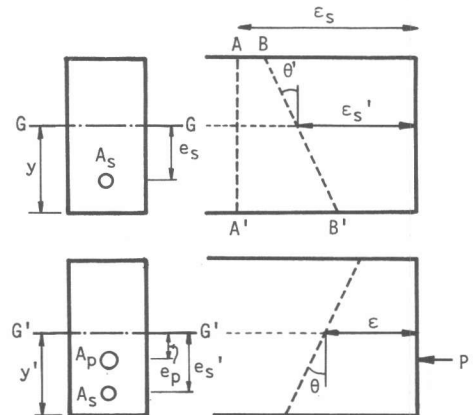


図2 ひずみ分布図

$$\varepsilon_s' = [1 - n_s \rho_s (1 + \phi_t / 2) / (1 + n_s \rho_s \mu)] \varepsilon_s = k_1 \varepsilon_s \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\theta' = [n_s A_s e_s (1 + \phi_t / 2) / \{(1 + n_s \rho_s \mu) I_c\}] \varepsilon_s = k_2 \varepsilon_s \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\mu = 1 + e_s^2 A_c / I_c, \quad n_s = E_s / E_c, \quad \rho_s = A_s / A_c \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 A_s 、 A_c ：それぞれ軸方向鉄筋、コンクリートの断面積、 I_c ：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_c ：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。

$$\phi_t' = [1 - (\alpha + \beta) / 2] \phi_t \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\alpha = A_s E_s / (A_s E_s + A_c E_c), \quad \beta = I_s E_s / (I_s E_s + I_c E_c) \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 I_s ：G-G軸に関する鉄筋の断面2次モーメント。

この ϕ_t' と ε_s' 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、

$$\Delta P = [n_p \rho_p / (1 + n_p \rho_p \mu')] \cdot [\mu' P \phi_t' + E_c A_c' (k_1 - k_2 e_p) \varepsilon_s] \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\mu' = 1 + e_p^2 A_c' / I_c', \quad n_p = E_p / E_c, \quad \rho_p = A_p / A_c' \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 A_p 、 A_c' ：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_c' ：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 ΔC は以下の式で与えられる。

$$\Delta C = E_s A_s (\varepsilon + \theta e_s') \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\varepsilon = (P \phi_t' - \Delta P) / (E_c A_c') - n_p \rho_p \gamma / [E_c A_c' (1 + n_p \rho_p \mu')] + k_1 \varepsilon_s \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\theta = e_p (P \phi_t' - \Delta P) / (E_c I_c') - e_p n_p \rho_p \gamma / [E_c I_c' (1 + n_p \rho_p \mu')] - k_2 \varepsilon_s \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\gamma = \mu' \phi_t'^2 P / 2 + E_c A_c' (k_1 - k_2 e_p) \varepsilon_s \phi_t' \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 e_s' ：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。

$$\sigma_{ct} = (P - \Delta P) / A_c' + (P - \Delta P) e_p y' / I_c' - \Delta C / A_c - \Delta C e_s y / I_c \quad \dots\dots\dots(12)$$

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NO.1~3とNO.5,6を比較すると鉄筋量の多いNO.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、PC鋼材量の多いNO.7は、NO.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。

表2 PPCはりの残存プレストレス

供試体	プレストレス導入時		載荷時							
	PC鋼材のプレ ストレス力 (tonf)	断面下縁 プレスト レス力 (kgf/cm ²)	計 算 値					実 験 値		
			残存 [°] プレ スト レス 力 (tonf)	プレ [°] *1 スト レス 力 減少 量 (tonf)	鉄筋移行 プレ スト レス 力 ΔC (tonf)	断面下縁 残存 プレ スト レス 力 (kgf/cm ²)	下縁 [°] *2 プレ スト レス 減少 量 (kgf/cm ²)	ひびわれ再 開口(発生) 荷重 (tonf)	断面下縁 残存 プレ スト レス 力 (kgf/cm ²)	下縁 [°] *3 プレ スト レス 減少 量 (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

- *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 (導入時断面下縁プレストレス) - (断面下縁残存プレストレス(計算値))
- *3 (導入時断面下縁プレストレス) - (断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。

表3 静的載荷試験結果

供試体	最大耐力 (tonf)			じん性率	
	計算値	実験値	実験値 (短期材令)	(短期材令)	
シリーズA	* NO.1-A		8.09		3.91
	G NO.2-A	6.54	8.30	7.85, 8.03	4.24
	NO.3-A		8.29		3.11
	NO.4-A		7.96		6.11
	* NO.5-A	9.26	11.50	11.34, 11.05	2.16
	G NO.6-A		10.83		2.83
	NO.7-A		11.96		3.02
	NO.8-A		10.75		3.43
シリーズB	* NO.1-B		12.23		3.12
	G NO.2-B	9.35	12.61	-	3.68
	NO.3-B		11.92		2.89
	NO.4-B		12.48		4.48
	* NO.5-B	13.23	16.89	-	2.95
	G NO.6-B		16.13		2.74
	NO.7-B		17.19		2.33
	NO.8-B		15.60		3.62

a/d=3.0のシリーズAのはりはすべて曲げ破壊を呈したのに対し、a/d=2.0のシ

リーズ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

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 W_{max} 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 W_{max} の値は、0.15mm 程度までの範囲内では緊張率 λ の最も大きな PPC はり (NO.7) で最も小さくなるが、 λ 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 (NO.4, NO.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 ($P-\delta$) 関係の一例を図4に示す。また、各はりのじん性率を表

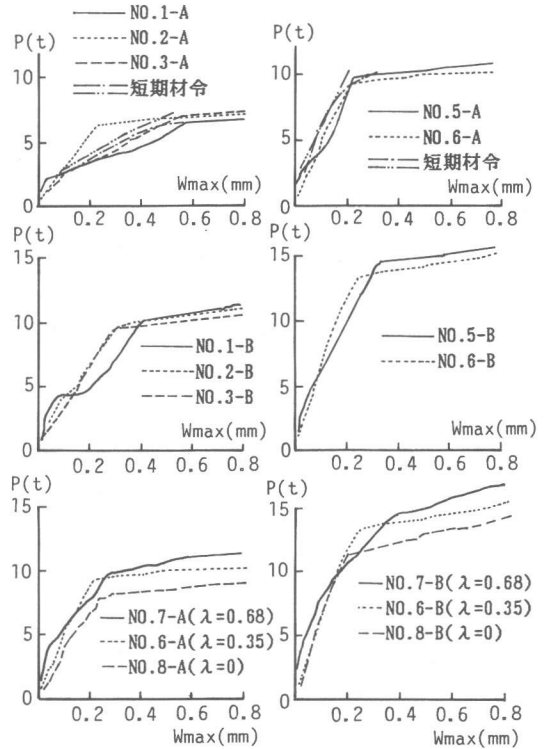


図3 荷重-最大ひびわれ幅関係

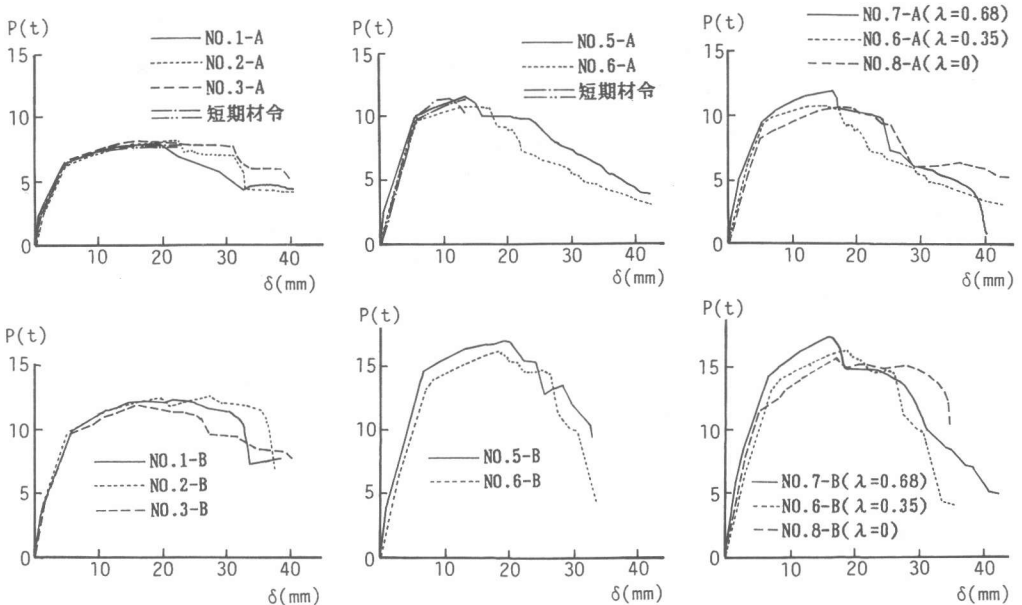


図4 荷重-たわみ関係

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 λ 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。

4. 結論

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增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 照: 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