

[96] 高変位繰返しを受ける第3種プレストレストコンクリート梁の力学的性質

正会員 六車 熙 (京都大学工学部)

渡辺 史夫 (京都大学工学部)

深井 悟 (日建設計構造部)

正会員 ○那須 正 (京都大学工学部)

1. 序文

第3種プレストレストコンクリート(以下PCと略記)構造とは、いわゆるRC断面に軽度のプレストレスを導入することにより、長期応力のもとでの曲げひびわれ幅およびたわみをできるだけ小さくおさえようとする構造である。しかし、日本のような地震地帯では、長期荷重下における挙動だけでなく、地震時に生ずるような高変位レベルでの挙動が問題となる。

本報告は、プレストレスレベルが $0 \sim 45 \text{ kgf/cm}^2$ の各種はり24本の単調および繰り返し載荷試験を行ない、与えられたプレストレス力の大きさや、高応力繰り返しのひびわれ幅制御に対する影響、および、これらの変形性能に対する影響などについて比較検討したものである。

2. 供試体

供試体は、図1および表1に示す各種のはり計24体で、ひびわれ幅の比較を主体としたBSシリーズと、変形性能の比較を主体としたBRシリーズの2シリーズに分けられる。BSシリーズは、プレストレスレベルが、0, 10, 17.5, 25, 35, 45 kgf/cm^2 の6タイプ、BRシリーズは、35, 45 kgf/cm^2 を除いた4タイプとした。タイプ0は、複筋断面を持つRCはりで、設計曲げ破壊モーメント2.9 $\text{t} \cdot \text{m}$ で設計した。プレストレスを導入する他の供試体については、曲げ破壊モーメントが、上記の値にほぼ一致するように、それぞれのプレストレスレベルに応じて、引張側普通鉄筋を設計した。なお、ひびわれ幅比較の基準となる長期許容曲げモーメントは、コンクリートの長期許容圧縮限応力 $F_c/3$ にもとづいて決めたもので、その値は、いずれの供試体も $0.9 \text{ t} \cdot \text{m}$ である。

供試体に使用したコンクリートの配合および力学的性質を表2に示す。PC鋼材および普通鉄筋の力学的性質を表4に示す。供試体は、材令2週でプレストレス導入を行ない、導入後直ちに、セメントベーストによりグラウトを行なった。セメントベーストグラウトの力学的性質を表3に示す。断面の導入プレストレス力および試験時の有効プレストレス力を表5に示す。

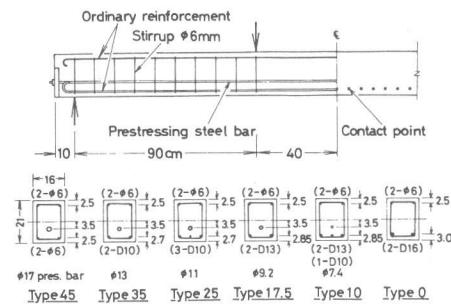


図1. 供試体

表1. 供試体の詳細

Specimen No.	Prestressing Steel bar in mm	Ordinary reinforcement in mm		Steel ratio in %		
		Tens. side	Comp. side	Ordinary	Prestress.	Total
BS-0-1-2 BR-0-1-3	---	2-Ø16	2-6	1.182	0	1.182
BS-10-1-2 BR-10-1-3	Ø7.4 bonded	2-Ø13	2-6	0.966	0.119	1.085
BS-17.5-1-2 BR-17.5-1-3	Ø9.2 bonded	2-Ø13	2-6	0.794	0.198	0.992
BS-25-1-2 BR-25-1-3	Ø11 bonded	3-Ø10	2-6	0.637	0.283	0.920
BS-35-1-2 BR-35-1-2	Ø13 bonded	2-Ø10	2-6	0.426	0.395	0.821
BS-45-1-2	Ø17 bonded	2-6	2-6	0.167	0.676	0.843

表2. コンクリートの力学的性質

Test series	Series BS	Series BR
The age of tests in weeks	5~8	6~9
Mix proportion by weight	1 : 2.346 : 2.940	
Water-cement ratio in %	51.94	
Admixiture in % (Pozzolite No.10L)	1.0 per unit cement content	
Compressive strength in kgf/cm^2	260.4	289.1
Tensile strength in kgf/cm^2	25.6	28.6
Elastic modulus in kgf/cm^2	1.65×10^5	2.01×10^5
Stress block coefficient k_1	0.7305	0.7412
coefficient k_2	0.422	0.419
Maximum flexural comp. strain*	0.0041	0.0039

*The strain at which the average stress in stress-strain curve of concrete with strain softening region becomes maximum is defined as the maximum flexural compressive strain.

表3. グラウトの力学的性質

Water-cement ratio in %	45	45
Compressive strength in kgf/cm^2	383.5	312.4
Tensile strength in kgf/cm^2	33.0	40.2

3. 試験方法

試験は、表2に示す材合で行なった。載荷は、図1に示すように、支点間距離260 cm、曲げスパン80 cm、せん断スパン90 cmの3分点載荷とした。BSシリーズの同一の配筋を持つ2本の供試体のうち1本は、基礎的挙動を得るために単調載荷試験を行なった。残りの1本の供試体と、BRシリーズの全供試体は、履歴挙動を得るために、正方向漸増高応力繰り返し試験を行なった。BSシリーズの繰り返し履歴は、引張側鉄筋降伏時および、そのときの中央断面曲率の1.5倍の場合に対し中央たわみ制御で、BRシリーズでは、引張側鉄筋降伏時および、中央断面圧縮縁ひずみ2.5, 3, 3.5および4%の場合に対して、それぞれ圧縮縁ひずみ制御で、各10回の繰り返しとした。

測定は、荷重、中央たわみ、および曲げスパンにおけるコンクリートの縁ひずみ(検長50 cm)、相対たわみについて行なった。BSシリーズにおいては、ひびわれ幅を、曲げスパンにおいて図1に示すように下縁より3 cmの位置のコンタクトポイントにより測定した。

4. 試験結果と考察

1) ひびわれモーメントおよび曲げ破壊耐力

ひびわれモーメントおよび曲げ破壊耐力の実験値および計算値を表5に示す。ひびわれモーメントはプレストレスレベルの増加に伴い大きくなっている。又、RCの長期許容曲げモーメント(0.9 t・m)では、タイプ35, 45にはひびわれは発生しておらず、両タイプはフルプレストレスに近いことを意味している。曲げ破壊耐力は、コンクリート圧縮縁ひずみが圧縮限界ひずみに達した時の値を用いているが、曲げ破壊耐力はほぼ等しくなるよう設計されたため、プレストレスによる相違はみられない。供試体の破壊性状は、いずれも曲げスパンにおける圧縮側コンクリートの圧壊による曲げ破壊であった。

2) 最大ひびわれ幅

BSシリーズの単調載荷の供試体において測定されたモーメント-最大ひびわれ幅曲線を図2に示す。又、長期許容曲げモーメント時および、引張側普通鉄筋長期許容応力時(本研究では2200 kgf/cm²)の最大ひびわれ幅を表6に示す。ひびわれ幅が問題となるのは、長期許容曲げモーメント程度の大きさのモーメントが作用している状態のときである。図よりあきらかなように、長期許容曲げモーメント(0.9 t・m)程度のモーメント作用時には、プレストレスレベルが大きくなるにつれて最大ひびわれ幅は減少しており、わずか10 kgf/cm²程度の断面平均プレストレス導入であっても、ひびわれ幅を十分に制御できることを示している。又、図より、プレストレスレベルが大きくなるほど、モーメントの増加に対するひびわれ幅の増加の割合が大きくなり、曲げ破壊耐力の約2/3の2 t・m付近以上の載荷モーメントに対しては、ひびわれ幅は

表4. PC鋼材および普通鉄筋の力学的性質

	Diameter in mm	Grade	Nominal sectional area in mm ²	Yield stress in kgf/cm ²	Tensile strength in kgf/cm ²	Elastic modulus in kgf/cm ²
Prestressing Steel bar (bonded)	D7.4	D1	0.40	14200	14800	2.05×10 ⁶
	ø9.2	D1	0.6648	14000	14700	1.88×10 ⁶
	ø11	D1	0.9503	14500	14900	1.99×10 ⁶
	ø13 (bonded)	D1	1.327	14300	14800	1.99×10 ⁶
Ordinary Reinforcement	ø17	C1	2.270	12200	13200	2.20×10 ⁶
	D16	SD40	1.886	4650	6440	2.06×10 ⁶
	D13	SD40	1.267	4710	6510	2.12×10 ⁶
	D10	SD40	0.7133	5170	7110	2.08×10 ⁶
	ø6	—	0.2827	2250	3070	—

* The Yield stress for prestressing steel bar is 0.2% off-set stress.

表5. ひびわれモーメントおよび曲げ破壊耐力

Beam No.	Prestressing force in tons		Initial cracking moment in ton-m		Ultimate flexural moment in ton-m	
	Transferred	Effective	Measured	Calculated	Measured	Calculated
BS-0-1*	0	0	0.36	0.38	2.813	2.817
BS-0-2	0	0	0.36	0.36	2.817	2.88
BS-10-1*	3.520	3.35	0.63	0.61	3.087	3.05
BS-10-2	3.520	3.32	0.54	0.77	2.810	2.876
BS-17.5-1*	6.170	5.95	0.72	0.77	2.810	2.89
BS-17.5-2	6.170	5.85	0.54	0.94	3.147	3.15
BS-25-1*	8.820	8.33	0.81	0.94	(3.069)	3.15
BS-25-2	8.820	8.18	0.81	0.94	2.870	3.10
BS-35-1*	12.930	12.12	1.17	1.21	(2.916)	3.10
BS-35-2	12.930	11.97	1.08	1.21	2.870	3.10
BS-45-1*	16.630	14.88	1.26	1.40	(2.660)	3.01
BS-45-2	16.630	14.05	1.26	1.40	(2.653)	3.01
BR-0-1	0	0	0.43	0.42	2.667	2.95
BR-0-2	0	0	0.36	0.42	2.954	2.93
BR-0-3	0	0	0.41	0.41	2.832	—
BR-10-1	3.520	3.36	0.63	0.64	3.182	3.12
BR-10-2	3.520	3.39	0.62	0.64	3.196	—
BR-10-3	3.520	3.28	0.63	0.63	2.900	—
BR-17.5-1	6.170	5.75	0.77	0.81	(2.843)	2.96
BR-17.5-2	6.170	5.97	0.79	0.81	2.739	—
BR-17.5-3	6.170	5.78	0.79	0.81	2.922	—
BR-25-1	8.820	8.33	0.81	0.97	3.122	3.24
BR-25-2	8.820	8.32	0.83	0.97	2.861	—
BR-25-3	8.820	8.19	0.86	0.97	2.982	—

* Beam for monotonic loading test.

** The ultimate flexural moment was calculated by using the stress block coefficients of concrete and maximum flexural compressive strain.

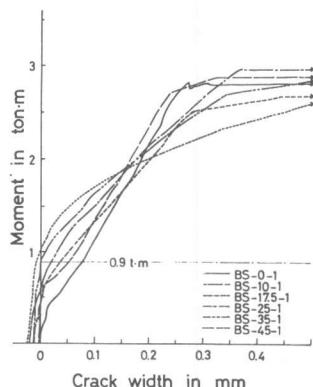


図2. 最大ひびわれ幅

むしろ、プレストレスレベルが大きいものほど大きくなっています。引張側鉄筋量がひびわれ幅制御に大きな影響をおよぼしていることがわかる。

図3に、BSシリーズの繰り返し載荷供試体において、各繰り返し段階の最初と最後(10回目)の載荷時のモーメントー最大ひびわれ幅関係を示す。図よりあきらかに、引張側鉄筋降伏時の繰り返しにおいては、除荷後の残留ひびわれ幅はどの供試体も0.1mmより小さく、使用性に問題はない。しかし、引張側鉄筋降伏時中央たわみでの10回繰り返しの後の載荷により、引張側鉄筋の降伏による流動がおきてしまうと、ひびわれ幅は急激に増大する。その増え方は、引張側鉄筋量が少なくなるほど、すなわちプレストレスレベルが大きな供試体ほど大きくなる。けれども、プレストレスレベルが大きくなるにつれて、プレストレス力による復元力のため除荷した時の残留ひびわれ幅は小さくなっている。第3種程度の軽度のプレストレスレベルの供試体では、このプレストレス力による復元性は期待できず、引張側鉄筋が一度塑性流動をおこすと、RCとあまりかわらない残留ひびわれ幅が残ることになる。すなわち、地震時等の高応力繰り返しの後の使用性に大きな影響を与えるので、今後、この問題についての研究が必要であろう。

表6に、各種のひびわれ幅提案式による最大ひびわれ幅計算値と実験値とを示す。図4には、ひびわれ幅提案式のうち、CEB/FIP'78年提案式と実験値の比較曲線が示されている。各種ひびわれ幅提案式による計算に際して、ポストテンションのボンドPC鋼材の付着強度は小さく、その付着力がひびわれ幅制御に役立つことはほとんど期待できないので、鉄筋比の中にはPC鋼材は含めていない。しかし、プレストレス力の影響は考慮している。ひびわれ幅提案式にはCP110のようなコンクリート仮想引張応力度とひびわれ幅を関係づけるようなものと、鋼材引張応力度増分と直接関係づけるCEB/FIP'78年式のようなものと2種類が存在するが、この実験結果とよく一致しているのは、図4にみられるようにCEB/FIP'78年式であった。CEB/FIP'78年提案式は、鉄筋のかぶり、鉄筋間隔、鉄筋の付着特性、鉄筋の影響範囲、ひびわれ間にあるひびわれていないコンクリート区間の協同作用等多数の要因を取りいれており、複雑な計算を要するが、タイプ17.5, 35においてひびわれ幅曲線の傾きが小さくなる傾向などをうまくあらわしていた。

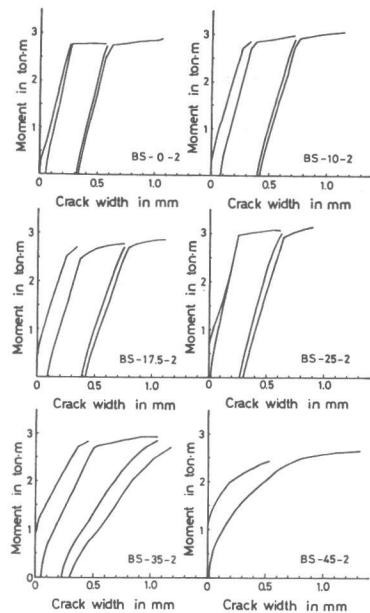


図3. モーメントー最大ひびわれ幅履歴曲線

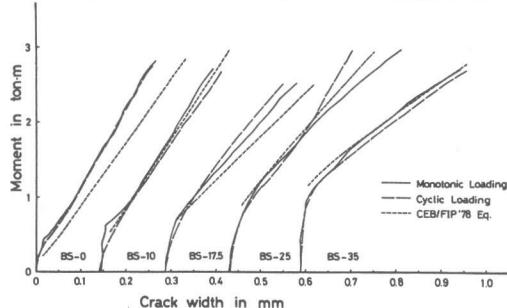


図4. CEB/FIP'78年提案式との比較

表6. 最大ひびわれ幅

Beam Type	MAXIMUM CRACK WIDTH in mm									
	At design service load (0.9 t-m)									
	Test		Calculated							
	BS-1	BS-2	CP110 '72	Bebby C & CA	CEB/FIP '70 Class 3	CEB/FIP '78	Gergely Lutz (ACI)	Nawy Huang	Bennett '72	
TYPE 0	0.079	0.081	0.035	0.061	0.070	0.103	0.083	0.118	0.094	
TYPE 10	0.052	0.057	0.019	0.034	0.020	0.056	0.050	0.072	0.071	
TYPE 17.5	0.038	0.046	0.006	0.020	--	0.047	0.042	0.072	0.052	
TYPE 25	0.021	0.033	--	--	--	0.011	0.018	0.031	0.029	
TYPE 35	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
At allowable stress for sustained loading of reinforcement ($\sigma_{st} = 2200 \text{ kg/cm}^2$)										
TYPE 0	0.122	0.123	0.059	0.096	0.176	0.156	0.125	0.176	0.133	
TYPE 10	0.142	0.130	0.056	0.085	0.176	0.124	0.105	0.151	0.134	
TYPE 17.5	0.140	0.124	0.051	0.099	0.176	0.162	0.124	0.214	0.133	
TYPE 25	0.141	0.137	0.052	0.091	0.176	0.131	0.105	0.182	0.135	
TYPE 35	0.175	0.178	0.043	0.106	0.176	0.172	0.122	0.277	0.135	

3) 変形性能

図5に、単調載荷供試体より得られた荷重-中央たわみ曲線を示す。図6に、BR-2シリーズにおいて得られた荷重-中央たわみ履歴曲線を示す。単調載荷の図5よりあきらかにように、第3種程度のプレストレス導入ではRC並みの十分な変形能力が得られることがわかる。使用上問題となるような、長期許容曲げモーメント時にも、プレストレス力によりたわみが十分に制御されていることがわかる。しかし、ひびわれ幅と同様に、2t・m付近以降の作用モーメント時には、プレストレスの大きな供試体ほど大きなたわみを生じている。

繰り返し載荷の図6より、与えられた断面平均プレストレス力が大きくなるほど除荷時の残留たわみが小さくなっていることがわかる。履歴曲線の形も、RC型からPC型のしほれた形への移行がみられる。又、繰り返しによるヒステレスループの面積が、プレストレス力が大きくなるにつれて増えている。

各供試体の変形性状の量的比較のため、曲げスパンにおける圧縮縁ひずみがコンクリートシリンダーの圧縮試験より得られた圧縮限界ひずみ ($\kappa_1 k_3$ の値が最大になる点) をコンクリートの曲げ破壊時と定義し、その時のたわみおよび曲率を破壊時たわみ δ_u および破壊時曲率 ϕ_u と定義した。表7に δ_u および ϕ_u の値を示す。又、

引張側普通鉄筋の降伏時の降伏たわみ δ_y 、降伏曲率 ϕ_y 、

$\mu_\delta = \delta_u / \delta_y$ で計算されるたわみじん性、 $\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$ で計算される曲率じん性の値も表7に示す。表より、検長外で破壊している供試体を除き、各シリーズとも、プレストレスレベルが大きくなるほど、たわみじん性、曲率じん性は小さくなり、変形性能は低くなることがわかる。又、たわみじん性よりも曲率じん性の方が大きな値となっていることがわかる。同一断面供試体を比べても、たわみ、曲率、じん性の値に顕著な差はみられず、繰り返しによる影響はあらわれていないようである。

5. 結論

1) 長期許容曲げモーメント程度の作用モーメント時には、プレストレス力によりひびわれ幅は制御されるが、引張鉄筋が降伏した後の高応力繰り返しの際には、第3種PC部材には大きな残留ひびわれが残る。2) 本実験における供試体の最大ひびわれ幅は、CEB/FIP 1978年提案式による値とよく一致した。3) 変形能力は、プレストレスレベルが大きくなるほど低下し、RC型からPC型へと移行していく。

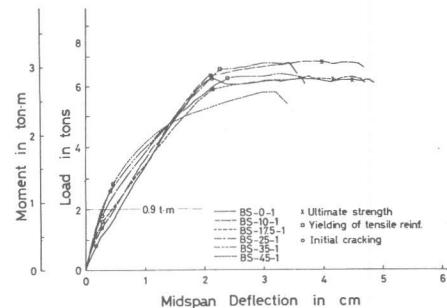


図5. 荷重-たわみ曲線(単調載荷)

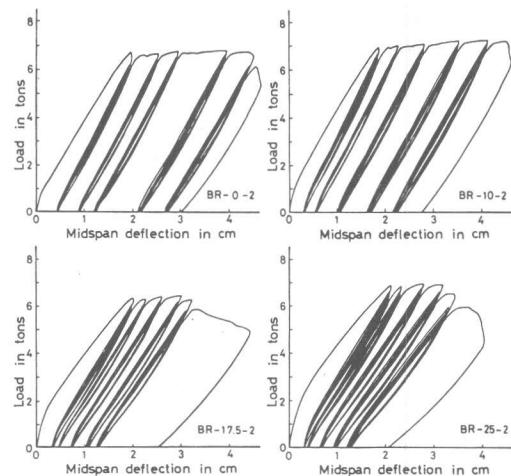


図6. 荷重-たわみ曲線(繰り返し載荷)

表7. 載荷試験結果

Beam No.	At design service load (0.9 t-m)			At the Yield load			At the ultimate flexural failure load			Ductility factor	
	δ_D in cm	$\phi_p \cdot 10^{-3}$ in 1/cm	Moment $\delta_y \cdot 10^{-3}$ in t-m	δ_y in cm	Moment $\delta_u \cdot 10^{-3}$ in t-m	δ_u in cm	Moment $\delta_{u_f} \cdot 10^{-3}$ in t-m	δ_{u_f} in cm	$\phi_u \cdot 10^{-3}$ in 1/cm	μ_δ	μ_ϕ
BS-0-1	0.54	0.07	2.84	2.11	0.29	2.81	4.43	0.73	2.10	2.71	
BS-10-1	0.47	0.06	2.88	2.08	0.27	3.09	3.99	0.65	1.92	2.40	
BS-17.5-1	0.43	0.05	2.70	2.25	0.30	2.81	4.22	0.62	1.88	2.05	
BS-25-1	0.39	0.03	2.97	2.26	0.31	(2.90)	(3.57)	(0.55)	(1.58)	(1.76)	
BS-35-1	0.26	0.03	2.84	2.38	0.32	(2.88)	(3.62)	(0.46)	(1.52)	(1.40)	
BS-45-1	0.28	0.03				(2.66)	(3.20)	(0.37)			
BS-0-2	0.58	0.07	2.76	2.03	0.25	2.87	4.17	0.70	2.05	2.76	
BS-10-2	0.47	0.06	2.85	2.08	0.28	3.05	3.87	0.64	1.87	2.27	
BS-17.5-2	0.42	0.05	2.70	2.12	0.27	2.88	4.36	0.67	2.06	2.47	
BS-25-2	0.32	0.04	2.97	2.02	0.29	3.15	4.05	0.58	2.00	1.97	
BS-35-2	0.28	0.03	2.84	2.11	0.27	2.87	3.81	0.50	1.81	1.85	
BS-45-2	0.29	0.03				2.65	3.59	0.55			
BR-0-1	0.48	0.06	2.87	1.98	0.24	(2.67)	(3.67)	(0.55)	(1.85)	(2.26)	
BR-10-1	0.39	0.06	3.02	2.08	0.28	2.90	3.94	0.56	1.90	2.00	
BR-17.5-1	0.34	0.04	2.82	2.06	0.26	--	--	--	--	--	
BR-25-1	0.28	0.04	3.12	2.21	0.30	3.12	3.70	0.59	1.67	1.98	
BR-0-2	0.48	0.07	2.94	2.01	0.26	2.93	4.37	0.73	2.17	2.85	
BR-10-2	0.38	0.05	3.06	1.94	0.25	3.18	4.11	0.62	2.12	2.49	
BR-17.5-2	0.33	0.05	2.79	2.04	0.28	2.74	3.24	0.59	1.59	2.12	
BR-25-2	0.27	0.04	3.02	2.19	0.29	2.86	3.38	0.46	1.55	1.65	
BR-0-3	0.47	0.06	2.97	1.93	0.24	2.85	4.67	0.69	2.42	2.94	
BR-10-3	0.37	0.05	3.07	2.02	0.29	3.20	3.56	0.66	1.82	2.31	
BR-17.5-3	0.36	0.05	2.94	2.07	0.30	2.92	3.67	0.63	1.77	2.13	
BR-25-3	0.26	0.04	3.08	2.18	0.31	2.96	3.65	0.54	1.68	1.77	