

[96] 第3種プレストレストコンクリート梁の力学的性質に関する基礎研究

正会員 六 車 熙 (京都大学)

渡 辺 史 夫 (京都大学)

正会員○深 井 悟 (京都大学)

那 須 正 (京都大学)

1. 序文

第3種プレストレストコンクリート(以下P Cと略記)構造は、長期荷重下での曲げ材のたわみおよびひびわれ幅の制御が容易であるため注目されている構造である。しかし、地震地帯において第3種P C構造を使用する場合、長期荷重下における挙動だけでなく、地震時に生じるような高応力レベルでの挙動が基本的に問題となる。

本報告は、プレストレスレベルを0, 20, 35, 60kgf/cm²の4種類に変化させたボンドおよびアンボンドP C鋼材を持つ24本のはりの単調および漸增高応力繰返し試験を行い、ひびわれ幅制御性能および変形性能について比較検討したものである。

2. 供試体

供試体は、グラウトの有無により2シリーズに分類される。すなわち、シリーズBは、セメントペーストによってグラウトされたボンドP C鋼材を持つ供試体である。シリーズUは、防錆材により被覆されたアンボンドP C鋼材を持つ供試体である。各シリーズは、それぞれ12本で、導入プレストレスレベルおよび普通鉄筋の量により4タイプに分類される。タイプ0は、複筋断面を持つRCはりである。タイプ20およびタイプ35は、断面に一様プレストレス力が、それぞれ約20kgf/cm²、約35kgf/cm²である第3種P Cはりである。タイプ60は、断面の一様プレストレス力が約60kgf/cm²である第1種P Cはりである。シリーズBのタイプ20、タイプ35およびタイプ60のP Cはりの普通鉄筋の量は、それぞれタイプ0のRCはりを基礎として、曲げ破壊耐力が等しくなるように決定した。シリーズUの各タイプは、シリーズBの対応するタイプのボンドP C鋼材をアンボンドP C鋼材に置き替えたものである。タイプ0のRCはりの長期設計モーメントおよび短期設計モーメントは、それぞれ1.14t·mおよび2.54t·mである。供試体の詳細は、図1および表1に示す。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。P C鋼材および普通鉄筋の力学的性質を表3に示す。シリーズBの供試体は、材令2週でプレストレス導入を行い、導入後直ちに水セメント比45%のセメントペーストグラウトを行った。グラウトの試験時圧縮および引張強度は、それぞれ245kgf/cm²、21.5kgf/cm²であった。シリーズUの供試体は、載荷直前にシリーズBの対応する供試体の有効プレストレス力に等しくなるように、プレストレス導入を行った。導入

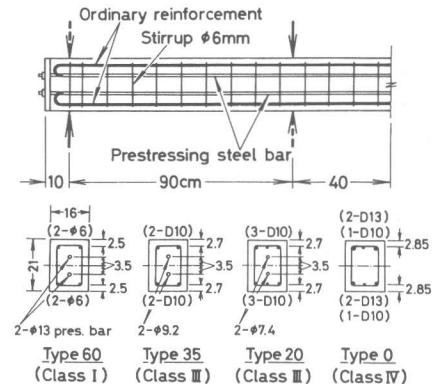


図1 供試体

表1 供試体の詳細

Test series	Beam No. *	Prestressing Steel bar in mm	Ordinary reinforcement in mm		Prestressing force in tons **		Class
			Tens. side	Comp. side	Transferred	Effective	
B	B-0-1-3	—	2-D13 1-D10	2-D13 1-D10	0	0	IV
	B-20-1-3	2+ø7.4 unbonded	3-D10	3-D10	(2.20) (1.94)	(1.94)	III
	B-35-1-3	2+ø9.2 bonded	2-D10	2-D10	(1.20) (37.2)	(1.14) (34.0)	III
	B-60-1-3	2+ø13 bonded	2+ø6 2+ø6	2+ø6 2+ø6	(23.10) (88.6)	(20.27) (60.5)	I
U	U-0-1-3	—	2-D13 1-D10	2-D13 1-D10	—	0	IV
	U-20-1-3	2+ø7.4 unbonded	3-D10	3-D10	—	(6.74) (30.1)	III
	U-35-1-3	2+ø9.2 unbonded	2-D10	2-D10	—	(1.34) (46)	III
	U-60-1-3	2+ø13 unbonded	2+ø6	2+ø6	—	(20.34) (60.5)	I

* Beam No.3 in each group was tested under monotonic load.
** The value in parenthesis is the prestress in concrete section in kgf/cm².

表2 コンクリートの力学的性質

Test series	Series B	Series U
The age of tests in weeks	5 ~ 9	8 ~ 13
Mix proportion by weight	1 : 2.175 : 2.648	
Water-cement ratio in %	45	
Admixiture in % (Pozzolith No. 10L)	0.5 per unit cement content	
Compressive strength in kgf/cm ²	373	381
Tensile strength in kgf/cm ²	32.6	31.9
Elastic modulus in kgf/cm ²	2.13×10^5	2.10×10^5

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 1 に示す。

3. 試験方法

試験は、表 2 に示す材令で行った。載荷は、図 1 に示すように、支点間距離 260cm, 曲げスパン 80cm, せん断スパン 90cm の 3 分点載荷とした。同一の配筋を持つ 3 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った。残りの 2 本の供試体は、履歴挙動を得るために漸増高応力繰返し試験を行った。試験は、タイプ 60 の供試体を除いて、引張側普通鉄筋が最初に降伏する中央たわみを基礎として、図 2 に示す載荷プログラムにより載荷した。タイプ 60 の供試体は、他のタイプの供試体の荷重 - 中央たわみ曲線を参考とし、載荷振幅を決定した。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ひびき（検長 50cm）について行った。単調載荷試験では、曲げスパンにおいて下縁より 4 cm の位置でのひびわれ幅も測定した。

4. 試験結果と考察

a) 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 4 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る。シリーズ B とシリーズ U の対応するタイプの供試体の間には、ひびわれモーメントの差は見られない。曲げ破壊耐力は、シリーズ B では曲げ破壊耐力が等しくなるように設計されたため、タイプの相違による差は見られない。シリーズ U では、シリーズ B のボンド P C 鋼材の替わりにアンボンド鋼材を使用しているため、シリーズ B の供試体より P C 鋼材の利用率が低下する。よって、P C 鋼材の断面積が大きいほど、すなわちプレストレスレベルが大きいタイプほどシリーズ B の対応するタイプの供試体と比較して、曲げ破壊耐力は小さくなっている。なお、ひびわれモーメントおよび曲げ破壊耐力の実験値と計算値を比較すると両者は良く一致している。

b) 破壊性状

破壊性状は、単調載荷試験を行った供試体においては、シリーズ B においても、シリーズ U においても例外なく曲げスパンにおける圧縮側コンクリートの圧壊により曲げ破壊した。漸増高応力繰返し試験を行ったタイプ 0 およびタイプ 60 の供試体においては、シリーズ B とシリーズ U の供試体の間に相違はなく、単調載荷試験と同様、曲げスパンにおける圧縮側コンクリートの圧壊により曲げ破壊した。しかし、漸増高応力繰返し試験を行った第 3 種 P C 鋼材であるタイプ 20 およびタイプ 35 の供試体においては、シリーズ B とシリーズ U の供試体の間に破壊性状に顕著な相違が見られた。すなわち、シリーズ B においては、B-20-1 の供試体が曲げスパンにおける圧縮側コンクリートの圧壊により曲げ破壊した。これに対して、シリーズ U のタイプ 20 およびタイプ 35 の供試体においては、アンボンド P C 鋼材の定着部における破壊により破壊した。このような望ましくない破壊モードは、

表 3 P C 鋼材および普通鉄筋の力学的性質

	Diameter in m m	Grade	Nominal sectional area in cm ²	Yield stress in kgf/cm ² **	Tensile strength in kgf/cm ²	Elastic modulus in kgf/cm ²
Prestressing Steel bar (bonded and unbonded)	#7.4	D1	0.40	14500	15100	2.16x10 ⁶
	#9.2	C1	0.6648	12800	13200	2.01x10 ⁶
	#13	C1	1.327	13600	14200	2.15x10 ⁶
Ordinary reinforce- ment	D13	SD40	1.267	4470	6280	2.08x10 ⁶
	D10*	SD40	0.7133	5000	6700	2.05x10 ⁶
	D10	SD40	0.7133	4660	6430	1.93x10 ⁶
	#6		0.2827	2310	3060	1.88x10 ⁶

* It was used only in Beam B-0 and Beam U-0.

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

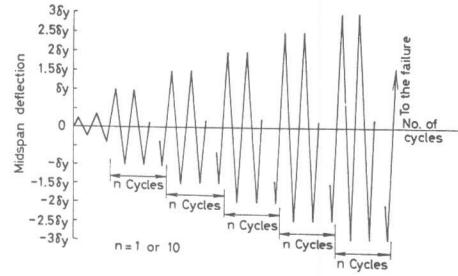


図 2 載荷プログラム

表 4 ひびわれモーメントおよび曲げ破壊耐力

Beam No	Initial cracking moment in t-m		Ultimate flexural moment in t-m		Mode of failure
	Measured	Calculated	Measured	Calculated	
B-0-1	0.45		2.79		C
	0.54	0.65	2.61	2.56	C
	0.45		2.58		C
B-20-1	0.77		2.88		S
	0.72	0.87	2.70	2.66	C
	0.61		2.75		C
B-35-1	0.81		2.70		C
	0.90	1.01	2.66	2.54	C
	0.72		2.59		C
B-60-1	1.17		2.61		C
	1.17	1.27	2.48	2.68	C
	1.17		2.60		C
U-0-1	0.54		2.84		C
	0.54	0.65	2.61	2.53	C
	0.54		2.56		C
U-20-1	0.81		2.84		SA
	0.72	0.86	2.70	2.58	SA
	0.72		2.66		C
U-35-1	1.04		2.63		SA
	0.95	0.99	2.57	2.46	SA
	0.90		2.48		C
U-60-1	1.35		2.52		C
	1.35	1.25	2.34	2.37	C
	1.35		2.34		C

* Beams for monotonic loading test.

** C : Failed by concrete crushing at the compression zone of midspan section.

S : Fracture of prestressing steel bar at midspan section.

SA: Fracture of prestressing steel bar at the end anchorage.

定着部での引張変形能力が荷重の繰返しの累積効果により低下したために起ったと思われる。ただしこの実験では、アンボンド P C 鋼材定着部破断により破壊した供試体の曲げスパンにおける破壊時平均曲率は、単調載荷で得られた破壊時曲率に近い値を示した。よって、終局耐力は、設計強度に近い値を示している。しかし、第 3 種 P C 部材では、普通鉄筋の存在により P C 鋼材の破断による急激な破壊は避けることができる。したがって、第 3 種 P C 部材にアンボンド P C 鋼材を使用する場合には、大きな低サイクル疲労耐力をもつて定着装置の使用とともに、普通鉄筋が長期設計モーメントより大きな終局モーメントを負担できるように設計することが必要であろう。

c) 最大ひびわれ幅

図 3 に単調載荷試験から得られたモーメント—最大ひびわれ幅曲線を示す。ひびわれ幅が問題となるのは、長期設計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。図中の 1.14t·m の線は、タイプ 0 の R C はりの長期設計モーメントである。このときの最大ひびわれ幅を表 5 に示す。この程度のモーメント作用時の最大ひびわれ幅は、図 3 および表 5 より明らかのように、プレストレスレベルが大きくなるにつれて減少する。また、プレストレスレベルが 20kgf/cm² 程度であっても十分有効にひびわれ幅を制御することが可能であることを示している。シリーズ B の供試体とシリーズ U の対応するタイプの供試体を比較すると、長期設計モーメント程度の大きさのモーメントに対しては、ほとんど最大ひびわれ幅の値には差はない。ひびわれ幅制御の観点に立てば、アンボンド P C 鋼材を使用しても十分に有効であると思われる。

d) 荷重—中央たわみ曲線（単調載荷試験）

図 4 に単調載荷試験から得られた荷重—中央たわみ曲線を示す。この図から明らかのように、タイプ 60 の供試体を除いて他のタイプの供試体では、普通鉄筋降伏以降かなり大きな塑性変形が見られる。また、シリーズ B の供試体とシリーズ U の対応するタイプの供試体の中央たわみ曲線を比較すると、両者の間にはほとんど差が見られない。本研究においては、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使用限界ひずみ（タイプ 60 における破壊時の圧縮縁ひずみ、シリーズ B では 3.80×10^{-3} 、シリーズ U では 3.27×10^{-3} ）に達したときを使用限界と定義し、その時のたわみおよび曲率を使用限界たわみ δ_u 、および使用限界曲率 μ_u と定義した。表 5 に δ_u および μ_u の値を示す。また、普通鉄筋の降伏時の降伏たわみ δ_y 、降伏曲率 μ_y 、 $\mu\delta = \delta_y/\mu_y$ で計算されるたわみじん性および

表 5 単調載荷試験結果

Beam No.	At design service load (1.143 t·m)			At the yield load			At the available limit of load carrying capability			Available ductility factor			
	$M_{0,max}$ in mm	δ_p in cm	$\phi_y \times 10^{-3}$	Moment in t·m	$M_{y,max}$ in t·m	δ_y in cm	$\phi_y \times 10^{-3}$	Moment in t·m	$M_{u,max}$ in t·m	δ_u in cm	$\phi_u \times 10^{-3}$	μ_u^*	μ_u
B-0-3	0.090	0.650	0.099	2.430	0.200	1.550	0.200	2.587	>1.197	7.350	1.500	4.742	7.500
B-20-3	0.065	0.475	0.070	2.403	0.255	1.575	0.230	2.711	>1.686	5.200	0.990	3.302	4.304
B-35-3	0.040	0.375	0.060	2.250	0.370	1.525	0.260	2.520	>1.687	4.475	0.860	2.934	3.307
B-60-3	—	0.250	0.030	2.304 ^a	0.410	1.550	0.290	2.599	>0.975	3.250	0.600	2.097	2.069
U-0-3	0.097	0.600	0.100	2.430	0.250	1.475	0.230	2.644	>1.588	5.750	1.170	3.898	5.087
U-20-3	0.066	0.475	0.085	2.250	0.255	1.425	0.240	2.621	>1.611	4.700	0.970	3.298	4.042
U-35-3	0.042	0.420	0.060	2.115	0.220	1.425	0.240	2.396	>1.258	4.000	0.820	2.807	3.417
U-60-3	—	0.275	0.035	2.061 ^a	0.640	1.417	0.280	2.340	>1.659	2.750	0.610	1.941	2.179

* The moment when the midspan deflection becomes to the average of measured yield deflections on other three beams in each series.

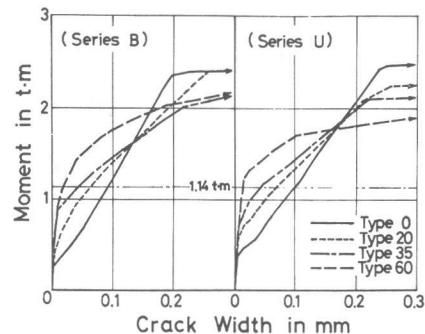


図 3 最大ひびわれ幅

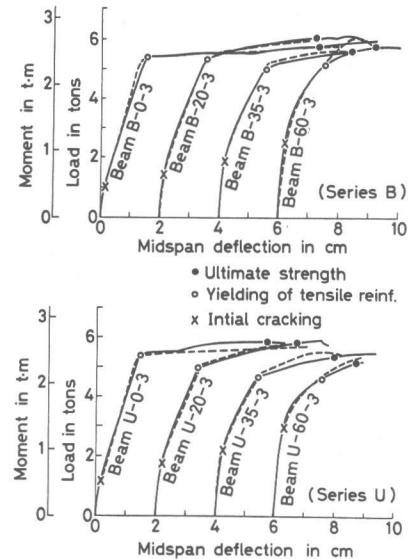


図 4 荷重—中央たわみ曲線（単調載荷試験）

$\mu\phi = \phi u / \phi y$ で計算される曲率じん性も、表 5 に示す。ただし、タイプ 60 における降伏点は、同じシリーズの他のタイプにおける降伏たわみの平均値（シリーズ B では 1.55 cm, シリーズ U では 1.45 cm）にタイプ 60 の供試体のたわみが達したときとした。図 4 および表 5 から明らかなように、プレストレスレベルが大きくなるにつれて δu および ϕu の値には小さくなる。しかし、 δy および ϕy の値には、プレストレスレベルの影響は認められない。よって、プレストレスレベルが大きくなるほど、たわみじん性および曲率じん性は低下する。第 3 種 PC はりのじん性は、RC のはりと第 1 種 PC はりの間にある。シリーズ B の供試体とシリーズ U の対応するタイプの供試体を比較すると、たわみじん性および曲率じん性にはほとんど差は見られない。

e) 荷重-中央たわみ履歴曲線

図 5 に、一定振幅で各 10 回の漸増高応力繰返し試験を行った供試体から得られた荷重-中央たわみ履歴曲線を示す。一定振幅で各 1 回の漸増高応力繰返し試験を行った供試体についても同様な荷重-中央たわみ履歴曲線が得られた。この図から明らかなように、プレストレスレベルが大きくなるにつれて、履歴曲線のループは細くなり、エネルギー吸収能力は小さくなる。また、各タイプの供試体のエネルギー吸収能力を比較するため等価粘性減衰定数を計算した。図 6 に、たわみ振幅に対して等価粘性減衰定数をプロットした図を示す。この図から明らかなように、プレストレスレベルが大きくなるにつれて、等価粘性減衰定数は小さくなり、この差はたわみ振幅が大きくなるにつれて顕著になる。また、第 3 種 PC はりは、タイプ 0 の RC のはりと比較すると履歴挙動は劣るが、タイプ 60 の第 1 種 PC はりと比較すると良い挙動を示す。シリーズ B の供試体とシリーズ U の対応するタイプの供試体のたわみ履歴曲線を比較すると、両者の間に顕著な差は見られない。

5. 結言

- 1) たわみじん性およびエネルギー吸収能力は、プレストレスレベルが大きくなるほど低下し、第 3 種 PC はりは、第 1 種 PC はりと RC はりの中間的な値を示す。
- 2) ボンド PC 鋼材を用いた供試体とアンボンド PC 鋼材を用いた供試体を比較すると、アンボンド鋼材を用いた第 3 種 PC はりが定着部の PC 鋼材の破断により破壊したのを除いて、たわみじん性およびエネルギー吸収能力にはほとんど差は見られない。

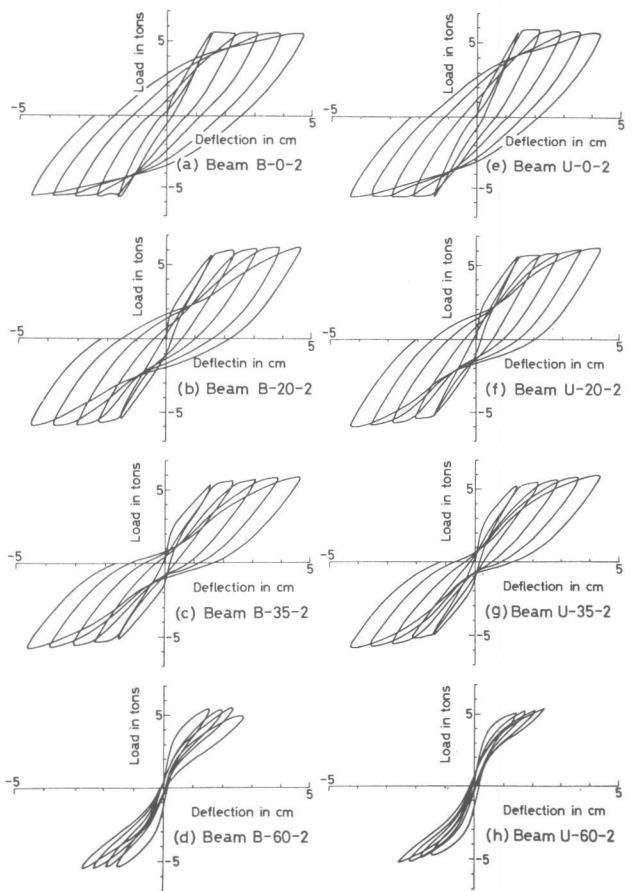


図 5 荷重-中央たわみ履歴曲線

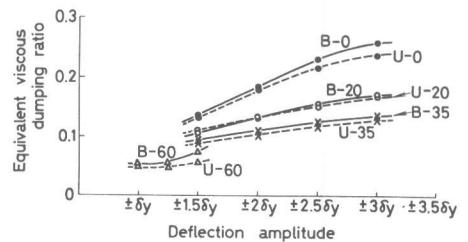


図 6 等価粘性減衰定数