

## アンボンド PC 梁の基礎的諸特性に関する研究

岡	田	清*
小	林	和夫**
児	島	孝之***
畑	村	博行****

## 1. ま え が き

従来一般に、ポストテンション方式のプレストレストコンクリート（以下 PC と略記）構造では PC 鋼材の防錆ならびに力学的特性の点から、PC 鋼材とシース間の空隙にセメントペーストまたはモルタルが注入されてきた。しかし、グラウト作業は繁雑で手間がかかるうえ、しばしばグラウト不良や注入忘れなどによる事故もみられ、PC 構造の問題点の一つであると指摘されてきた。

このため、最近 PC システムの省力化や工期の短縮などの面からグラウト作業を省略するアンボンド工法が注目され始め、建築構造のフラットスラブをはじめとして PC まくら木、矢板などのプレキャスト製品、PC 橋の横締めやせん断耐力の増大を目的とした斜めプレストレスの導入などに応用されており、耐食性の優れたアンボンド PC 鋼材の開発に伴い今後の発展が期待されている。

アンボンド PC 工法はこのように施工上きわめて大きなメリットを有する反面、過大荷重が作用した時の部材のひびわれや変形性状、破壊耐力などの力学的性能がボンド工法に比べて低下することも事実であって、一方においてそのせん断耐力や繰返し作用荷重下での疲労性状などに関しては不明の点が多い。

本研究は、アンボンド PC 梁に対して静的曲げおよびせん断試験、さらに低・高サイクル繰返し疲労試験を実施し、それらの基本的力学特性をボンド PC 梁と対比考察するとともに、アンボンド PC 部材の諸性状改善に対する付加鉄筋配置の効果を検討したものである。

## 2. 試 験 概 要

## 2.1 諸試験と供試体種類

アンボンド PC 梁の曲げ、せん断ならびに繰返し作用荷重下の基本的諸性状をボンド PC 梁と比較し、あわせ

て前者における断面引張縁近傍領域への付加鉄筋配置の効果を検討するため、ここでは以下の諸試験を行った。

## (1) 静的曲げ試験

アンボンド PC 梁では、断面引張縁近傍領域へ適量（土木学会 PC 標準示方書に従い、ボンド PC 梁の曲げ破壊耐力の 30% 程度を補償する鉄筋量）の異形鉄筋を配置することは、曲げ諸性能の改善の点からきわめて有効である。反面、このような付加鉄筋の配置はコンクリートの乾燥収縮やクリープの進行に伴いコンクリート断面の有効プレストレスの著しい減少を招き、ひびわれ耐力の低下をきたすことはさげがたい<sup>1)</sup>。

アンボンド PC 梁における付加鉄筋として高張力鉄筋の利用は、普通強度の異形鉄筋の場合と比較して同一の曲げ終局耐力のもとで鉄筋断面積を減ずることができ、プレストレスの損失を小さく抑えるという観点からは有効と考えられる。このため、本試験ではアンボンド PC 梁の曲げ性能改善の点から、普通強度の異形鉄筋 (SD 30:  $\phi 10$ ) および高張力鉄筋 (公称  $\sigma_{sy} \geq 60 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $\sigma_{su} \geq 70 \text{ kgf/mm}^2$ :  $\phi 7.4$ ) を付加鉄筋として利用し、その部材性状を比較することにより後者の適用性を検討した。

供試体の種類と断面は、表-1 と 図-1(1) に示すとおりである。なお、上記両鉄筋の 1 本当りの引張耐力はほぼ等しく、表-1 において、1) 梁 I-3 と I-4, I-8 と I-9 は両種類の付加鉄筋引張耐力がほぼ等しく、2) I-3 と I-5, I-8 と I-10 はそれらの断面積がほぼ等しくなるよう配慮されている。使用した高張力鉄筋はリブはなく、ラセン状の浅い凹みを有するタイプのものである。

また、単純梁のスパン方向曲げモーメント分布が終局時におけるアンボンド PC 鋼材の応力利用率に及ぼす影響を検討するため、同一条件の梁について中央集中 1 点荷重と対称 2 点荷重の 2 種類の曲げ荷重を実施した。

梁供試体の載荷試験時におけるコンクリート断面の有効プレストレスを計算するため、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$  角柱供試体を用いて乾燥収縮ひずみとクリープ係数を測定した。

\* 京都大学工学部教授

\*\* 京都大学工学部助教授

\*\*\* 立命館大学理工学部助教授

\*\*\*\* 京都府庁

表-1 PC 梁の試験と供試体の種類

試験の種類 (シリーズ)	梁の 記号	鋼材		PC 鋼材 付着の有無	鋼材 指数 $q$	導入時の下 縁プレスト レス <sup>*5</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )
		PC鋼材 $A_p$	付加鉄筋 <sup>*1</sup> $A_s$			
静的曲げ <sup>*2</sup> (シリーズI)	I-1	1- $\phi$ 13	—	ボンド	0.19	117
	I-2		—	アンボンド	0.19	117
	I-3		2-D10		0.22	109
	I-4		2- $\phi$ 7.4		0.22	112
	I-5		3- $\phi$ 7.4		0.24	110
	I-6	1- $\phi$ 17	—	ボンド	0.30	167
	I-7		—	アンボンド	0.30	167
	I-8		3-D10		0.35	151
	I-9		3- $\phi$ 7.4		0.36	157
	I-10		4- $\phi$ 7.4		0.38	154
静的せん断 (シリーズII)	II-1	1- $\phi$ 11	—	ボンド	0.22	80
	II-2		—	アンボンド	0.22	80
	II-3	2-D10	0.25		72	
	II-4	1- $\phi$ 17	—	ボンド	0.46	160
	II-5		—	アンボンド	0.46	160
	II-6		2-D10		0.48	144
交番繰返し <sup>*3</sup> (シリーズIII)	III-1		1- $\phi$ 7.4	—	ボンド	0.10
	III-2	—		アンボンド	0.10	58
	III-3	2-D10			0.16	53
	III-4	1- $\phi$ 11	—	ボンド	0.22	107
	III-5		—	アンボンド	0.22	107
	III-6		2-D10		0.27	96
片繰返し <sup>*4</sup> (シリーズIV)	IV-1	1- $\phi$ 11	—	ボンド	0.22	128
	IV-2		—	アンボンド	0.22	128
	IV-3		2-D10		0.25	113

\*1 D10：普通強度異形鉄筋， $\phi$ 7.4：高張力鉄筋  
 \*2 各梁について1点載荷と2点載荷試験を実施（図-1（1）参照）  
 \*3 いずれの梁も対称複筋断面  
 \*4 上限荷重を  $P_{max-1,2,3}$  の3レベルに設定  
 \*5 各シリーズについて与えられたPC鋼材の緊張力は同一で，付加鉄筋の影響も考慮して計算したもの

なお，いずれの梁もせん断スパン内に 10 cm ピッチで  $\phi$ 6 矩形スターラップを配置した。この点については，3.2 において考察することにする。

(2) 静的せん断試験

せん断補強筋（スターラップ）が配置されていないボンド PC，アンボンド PC，および付加鉄筋として断面引張縁の近くに異形鉄筋（SD 30）を配置したアンボンド PC 単純梁の3種類について，せん断スパン比  $a/d=2.0$  のもとの静的せん断試験を実施し，せん断ひびわれの発生と終局せん断耐力に及ぼす PC 鋼材の付着の有無，付加鉄筋配置さらにプレストレス量の影響を検討した。これと同時に，ボンド PC 梁のせん断ひびわれ耐力に対する現行設計式のアンボンド部材への適用性を検討

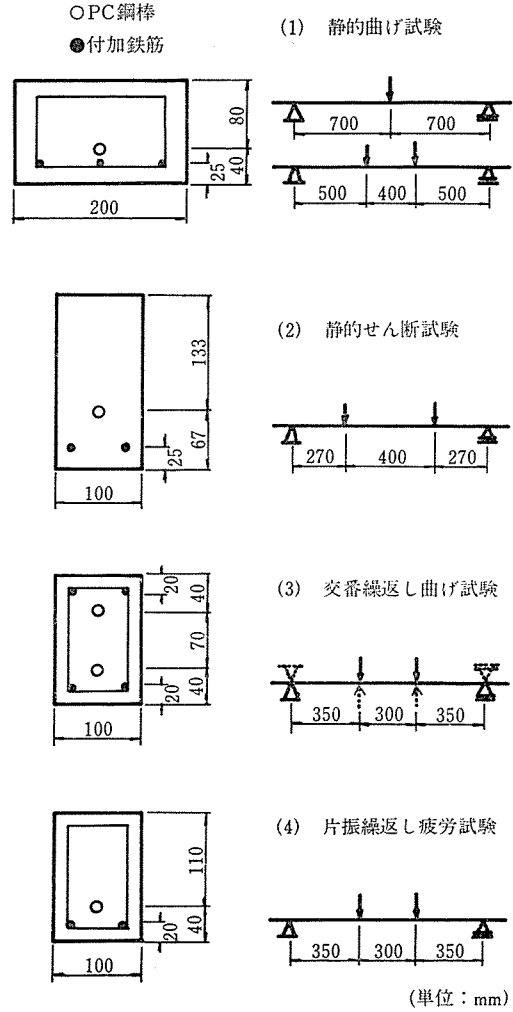


図-1 供試梁の断面および載荷方法

し，あわせて前記のスターラップ補強を施した曲げ試験結果を考慮してせん断補強設計について考察した。

せん断試験に供した梁の種類とその断面を，それぞれ表-1，図-1(2)に示す。

(3) 交番繰返し曲げ試験

強震下では，構造物の各部材は静的終局曲げ耐力に近い高応力の正負両方向の繰返し曲げ応力をうける。本試験では，終局曲げ耐力の 90% 以上の正負交番繰返し荷重を作用させた時のアンボンド PC 梁の変形履歴特性，エネルギー消散能，減衰性など基本的耐震特性をボンド PC 梁と比較するとともに，アンボンド PC 梁における付加鉄筋（SD 30：異形鉄筋）配置の効果を検討した。

供試体は，図-1(3)に示すようにスパン 100 cm の単純梁とし，対称 2 点載荷により交番繰返し曲げ試験を行った。1 回目の載荷方向を正，2 回目を負とし，この正負の交番載荷を 6 回繰返し，7 回目に破壊にいたらしめた。

供試体の種類は表-1に示すように，この種荷重下の

曲げ挙動に密接に関連する要因として、次式で与えられる鋼材指数  $q$  を取り上げ、この値を例えば現行のニュージランド耐震規定<sup>2)</sup>に与えられている限界値 ( $q=0.2$ ) にほぼ等しいものと、その 1/2 程度に相当する 2 レベルに設定した。

$$q = (p_p f_{pu} + p_s f_{sy}) / f_c' \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$p_p, p_s$ : PC 鋼材および付加鉄筋比

$f_{pu}$ : PC 鋼材の引張強度

$f_{sy}$ : 付加鉄筋の降伏点

$f_c'$ : コンクリートの圧縮強度

(4) 片振繰返し疲労試験

アンボンド PC 部材は、活荷重の繰返し作用により PC 鋼材定着端部で引張応力の繰返しをうける。このような繰返し荷重作用下における定着端の疲労耐力および各荷重振幅レベル下での繰返し回数に伴う鋼材応力、剛性、ひびわれ幅の変化などをボンド PC 梁と比較し、アンボンド PC 梁断面における付加鉄筋 (SD 30: 異形鉄筋) の影響を検討した。

本試験に供した梁の種類および断面は、それぞれ表 1、図 1(4) に示すとおりである。

疲労試験にあたっては、道路橋示方書<sup>3)</sup>に基づき次式より死荷重モーメント  $M_D$ 、活荷重モーメント  $M_L$ 、および設計荷重モーメント  $M_T = M_D + M_L$  を求めた。

いずれの梁についても下限荷重を  $M_D$  (付加鉄筋を配置しない PC 梁に対するもの) に対応する荷重とし、上限荷重を下に示す  $P_{\max-1,2,3}$  の 3 レベルに設定した。

$$\left. \begin{aligned} -(M_D + M_L) / Z + f_{cp} &\geq f_{ta} \\ 1.3 M_D + 2.5 M_L &\leq M_u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$f_{cp}$ : 断面下縁の有効プレストレス

$f_{ta}$ : コンクリートの許容曲げ引張応力度 ( $f_c' = 500 \text{ kgf/cm}^2$ :  $f_{ta} = -18 \text{ kgf/cm}^2$ )

$Z$ : 引張縁に対する断面係数

$M_u$ : 終局曲げモーメントの計算値

- 1) 上限荷重  $P_{\max-1}$ :  $M_T$  に対応する荷重で、II 種 PC 部材が設計活荷重の繰返し作用を受けた時のひびわれ発生の危険性、定着端部の健全度および  $2 \times 10^6$  回繰返し後の残留耐力を検討する。
- 2) 上限荷重  $P_{\max-2}$ : 静的載荷による最大ひびわれ幅が 0.1 mm に対応する荷重で、II 種 PC 部材に過大荷重が作用し予期せぬひびわれが発生した場合を想定し、荷重の繰返しによるひびわれの伸展性、たわみの増大などを検討する。
- 3) 上限荷重  $P_{\max-3}$ : 予備試験から求められた同一条件の梁の静的終局曲げ耐力の 75% の荷重を

$15 \times 10^4$  回繰返し作用させた後、その 80% の荷重を  $15 \times 10^4$  回与え、最終的に 85% の荷重を繰返し作用させる。

$P_{\max-3}$  は地震時などの超過荷重を想定したもので、主として PC 鋼材定着端部の疲労耐力を検討する。

2.2 使用材料および供試体の作製

(1) 使用材料

- 1) セメント: コンクリート、グラウト用セメントペーストともに早強ポルトランドセメント (大阪セメント社製) を用いた。
- 2) 骨材: 細骨材として愛知川産川砂 (比重 2.60, F. M 2.8), 粗骨材として鞍馬産砕石 (比重 2.64, 最大寸法 15 mm) を使用した。
- 3) PC 鋼棒: PC 鋼棒として高周波熱錬社製の  $\phi 13$ ,  $\phi 17$  丸棒鋼および  $\phi 7.4$ ,  $\phi 11$  異形棒鋼を用いた (表 2)。

表 2 PC 鋼棒の機械的性質

公称径 (mm)	種 別	降伏点 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)
$\phi 7.4$	異形	141	150	9
$\phi 11$	異形	143	153	10
$\phi 13$	丸鋼	142	148	9
$\phi 17$	丸鋼	115	126	12

- 4) 付加鉄筋: アンボンド PC 梁に対する付加鉄筋として、D 10 (SD 30) 異形鉄筋、あるいは試験 1 では  $\phi 7.4$  高張力鉄筋を用いた (表 3)。

表 3 付加鉄筋の機械的性質

公称形 (mm)	種 別	降伏点 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )
D10	普通強度	36.5	54.7
$\phi 7.4$	高強度	$\geq 60.0$	82.2

(2) 示方配合

コンクリートの目標強度は  $500 \text{ kgf/cm}^2$  とし、その示方配合を表 4 に示す。一方、ボンド PC 梁のグラウトの配合を表 5 に示す。

表 4 コンクリートの示方配合

$\sigma_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材比率 S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
						W	C	S	G
500	15	7.5 $\pm$ 1	1.5	42	39	190	450	650	1060

表 5 グラウトの配合

水 (kg)	セメント (kg)	ポゾリス 5L (g)	粉末アルミニウム (g)
4.7	10.4	26	1.04

表一6 使用コンクリートの性質

試験シリーズ	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
I	609	58.8	3.5×10 <sup>5</sup>
II	472	53.4	3.1×10 <sup>5</sup>
III	443	51.5	3.4×10 <sup>5</sup>
IV	556	54.8	3.5×10 <sup>5</sup>

(3) 供試験の作製

コンクリートの混練には強制練りミキサ (容量 100 l) を使用し、梁供試体およびコンクリートの諸強度、クリープ・乾燥収縮試験用供試体を作製した。

PC 梁は、材令約 3 週で所定のプレストレスを導入し、試験 1 では材令約 20 週で、その他の試験では材令約 5 週で荷重試験を実施した。なお、いずれの梁もプレストレス導入時までには湿布養生し、それ以後は実験室内に静置し荷重試験に供した。

2.3 荷重試験

荷重試験にあたっては、図一1 のように集中荷重を与え、スパン中央のたわみ、コンクリート、鉄筋および PC 鋼棒のひずみ、付加鉄筋配置位置に対するレベルでのコンクリート表面のひびわれ幅を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 静的曲げ試験

静的曲げ試験結果を表一7 に、荷重～ひびわれ幅関係の一例を図一2 に示す。表一7 の試験時有効プレストレスはコンクリートの乾燥収縮ひずみとクリープ係数の測定値をもとに既報の提案式<sup>1)</sup>を適用して求めたもので、曲げひびわれ荷重の計算値はこれを考慮して算定した。

表一7 から、アンボンド PC 梁において適量 (本試験体のようにボンド PC 梁の終局曲げ耐力の 15% 程度を補償する鉄筋量) の付加鉄筋を断面引張縁近傍に配置することにより曲げひびわれの分散性をボンド PC 梁と同程度以上に改善することが可能であり、またその効果に関しては終局耐力が同一の場合には高張力鉄筋と普通異形鉄筋ではほとんど差が認められない。一方、図一2 によると、アンボンド PC 梁の付加鉄筋として鉄筋 1 本当りの強度が同程度の高張力鉄筋 (φ7.4) と普通異形鉄筋 (D10) を同一本数配置した場合、ひびわれ進展拘束効果は後者の方が著しい。また、両者を同一断面積となるように配置したときには細径の前者の方が拘束効果が大きい。

本試験体に対して測定した最大ひびわれ幅  $w_{max}$  と付加鉄筋のディコンプレッション (Decompression) 状態からの応力増加量  $\Delta\sigma$  の関係は次式のように整理された。

表一7 静的曲げ試験結果

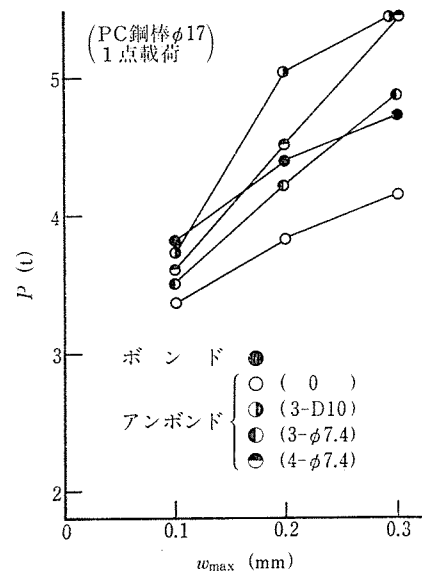
(上段：1点荷重，下段：2点荷重)

供試体	断面下縁 プレストレス	曲げひび われ荷重	ひびわれ		破壊荷重			じん性 率 <sup>**</sup>	
			実測値 (t)	計算値 <sup>**1</sup> (t)	実測値 (t)	計算値 <sup>**1</sup> (1) (t)	計算値 <sup>**1</sup> (2) (t)		
									本数
I-1	117	100	3.02 3.27	2.18 2.99	6 9	5.10 7.50	4.34 6.16	4.12 5.84	2.63 2.48
I-2	117	100	2.51 2.71	2.18 2.99	4 4	4.40 7.10	4.34 6.16	4.12 5.84	2.48 2.08
I-3	109	80	2.25 3.37	2.01 2.74	7 8	4.75 7.60	4.95 7.04	4.75 6.77	2.48 2.00
I-4	112	89	2.36 3.26	2.08 2.84	3 7	4.75 7.00	5.13 7.30	4.71 6.70	2.80 1.47
I-5	110	82	2.22 3.24	2.02 2.76	5 9	5.70 8.60	5.72 8.16	5.20 7.40	1.58 2.24
I-6	167	134	3.26 4.76	2.77 3.58	3 6	6.30 8.90	5.76 7.99	5.46 7.62	2.82 1.89
I-7	167	134	3.05 4.03	2.77 3.58	2 5	5.60 7.40	5.76 7.99	5.46 7.62	2.60 2.18
I-8	151	107	3.03 3.50	2.58 3.29	6 11	5.80 8.30	6.80 9.43	6.51 9.00	2.00 1.85
I-9	157	114	3.01 3.93	2.61 3.34	6 11	5.75 9.10	7.03 9.73	6.49 8.93	1.50 1.78
I-10	154	108	3.06 4.15	2.56 3.27	5 9	6.80 9.90	7.52 10.41	6.93 9.58	1.59 1.88

\*1 計算値 (1) : ACI 規準式による

計算値 (2) : F.N. Pannel 式<sup>1)</sup>による

\*2 梁の破壊時たわみと降伏時たわみの比



図一2 荷重～最大ひびわれ幅関係 (静的曲げ試験)

普通異形鉄筋 :

$$w_{max} \text{ (mm)} = 6.57 \times 10^{-5} \Delta\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots (3)$$

高張力鉄筋 :

$$w_{max} \text{ (mm)} = 7.07 \times 10^{-5} \Delta\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots (4)$$

上式のように、アンボンド PC 梁の付加鉄筋として高張力鉄筋を使用した場合には、普通異形鉄筋に比べて同

一の  $d\sigma$  に対する最大ひびわれ幅は若干増加する。これは両鉄筋の表面形状の差異によるものと考えられるが、CEB-FIP<sup>4)</sup> の  $w_{max}(mm) = (d\sigma - 400) \times 10^{-4}$  ( $d\sigma$ : kgf/cm<sup>2</sup>) と比較すると  $w_{max} \approx 0.1$  mm すなわち  $d\sigma > 1400$  (kgf/cm<sup>2</sup>) の範囲ではかなり安全側となる。

本実験範囲内の付加鉄筋量では、表-7 のように両種類の鉄筋間で断面下縁の有効プレストレスの差は小さく、曲げひびわれ耐力に関しては理論的にも実験的にも明瞭な差異は認められない。

いずれの PC 梁も最終的にはコンクリートの圧潰に伴い曲げ型破壊を呈した。

ボンド PC 梁に対するアンボンド PC 梁の終局耐力の比は、PC 鋼棒  $\phi 13$  の場合は 1 点載荷: 0.86, 2 点載荷: 0.95,  $\phi 17$  の場合は 1 点載荷: 0.89, 2 点載荷: 0.83 であって、いずれの場合もアンボンド PC 梁では耐力が低下している。アンボンド PC 梁の終局耐力に及ぼす載荷方法、すなわち曲げモーメント分布の影響を調べるため、2 点載荷と 1 点載荷時の終局モーメントの比をとると PC 鋼棒  $\phi 13$  の場合 1.19,  $\phi 17$  の場合 0.94 となり、PC 鋼材断面積 (鋼材指数) の小さいほど載荷方法の影響が著しい。一方、ボンド PC 梁の終局曲げモーメントに及ぼす載荷方法の影響は、実用上無視しうる。

本試験によると、高張力鉄筋と普通強度の異形鉄筋を同一本数付加配置したアンボンド PC はほぼ同等の終局曲げ耐力を有し、同程度の断面積で配置した場合には前者は約 20% 大きな耐力を示す。また、高張力鉄筋を付加配置したアンボンド PC 梁の終局曲げ耐力は普通強度の異形鉄筋の場合と同様の方法で推定することが可能である。

一方、荷重～たわみ曲線から求めた梁のじん性率  $\mu$  (終局時と降伏時のたわみの比) に関しては、表-7 のように鋼材指数が同一の場合にはアンボンド PC 梁はボンド PC 梁に比べていくぶん低下すること、また前者に付加鉄筋として高張力鉄筋を使用した場合は普通異形鉄筋と同程度もしくは若干低下する傾向が認められる。

以上のことから、アンボンド PC 梁の断面引張縁の近くに配置する付加鉄筋として高張力鉄筋の利用は、その表面形状や応力～ひずみ特性の点から普通異形鉄筋に比べてひびわれ幅の制御や部材じん性の面でやや劣るが、終局曲げ耐力の増大には優れた効果を有している。

### 3.2 静的せん断試験

静的せん断試験の結果を表-8 に示す。6 種類の試験体のうち、付加鉄筋を有する 2 種類のアンボンド PC 梁および  $\phi 17$  PC 鋼棒を用いたボンド PC 梁は、せん断スパン内に発生した曲げひびわれが急激に斜めひびわれ

表-8 静的せん断試験結果

供 試 体	せん断ひびわれ荷重		破 壊 荷 重	
	実 測 値 (t)	計 算 値 (t)	実 測 値 (t)	破壊形式
II-1	—	—	14.60	曲 げ
II-2	—	—	14.00	曲 げ
II-3	14.00	8.73	15.30	せん断
II-4	14.00	15.15	16.70	せん断
II-5	—	—	19.40	曲 げ
II-6	14.00	13.91	15.70	せん断

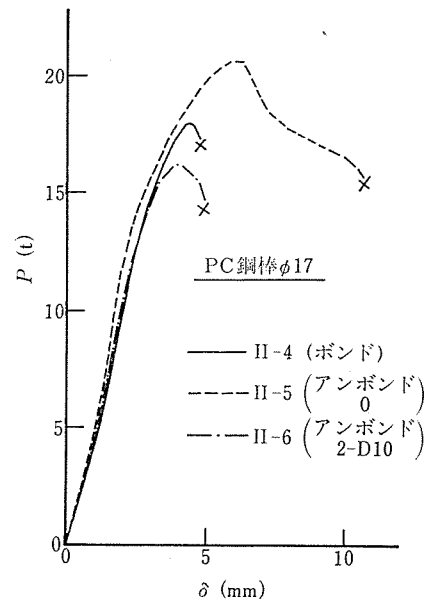


図-3 荷重～たわみ関係 (静的せん断試験)

に発展し、脆性的なせん断破壊を呈した (図-3 参照)。一方、付加鉄筋のない 2 種類のアンボンド PC 梁ならびに  $\phi 11$  PC 鋼材を使用したボンド PC 梁では、このようなせん断ひびわれは発生せず、最終的に曲げ破壊を起こした。

このように、アンボンド PC 梁で付加鉄筋を配置しない場合には曲げひびわれの分散性が悪く、曲げモーメント最大領域に集中する傾向があって曲げひびわれ性状の点からは望ましくないが、結果的には曲げせん断ひびわれを誘起しにくい特性を有している。

表-8 のせん断ひびわれ荷重の計算値は、ACI 規準<sup>5)</sup> による次式から求めた曲げせん断ひびわれ耐力を示す。なお、本試験体ではいずれもこの耐力は同規準によるウェブせん断ひびわれ耐力より小さく、60% 程度である。

$$V_{ci} = 0.6 bd \sqrt{f_c'} + M_{cr}(S/M) \dots \dots \dots (5)$$

ここに、

$S, M, M_{cr}$ : 限界断面 (載荷点から支点方向に  $d/2$  の位置) の終局時せん断力, 曲げモーメントならびに曲げひびわれ発生モー

メント

$b, d$ : 断面の幅および有効高

表-8 のように、せん断ひびわれが発生した梁では、PC 鋼材の付着の有無に関係なく、その耐力は式(5) からかなりよく推定できる。

一方、前記の静的曲げ試験に供した梁はせん断スパン内に  $\phi 6$  mm 矩形スターラップが 10 cm ピッチに配置されているが、いずれの場合も最終的には曲げ破壊を呈した。

いま、ACI 規準に基づく次式から終局荷重作用時のせん断力 ( $V$ ) に抵抗すべきせん断補強筋 (鉛直スターラップ筋) の所要量を計算してみた。

$$s = \frac{A_{ws} \sigma_{sy} \times 0.85 d}{(V - V_{ci})} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$s$ : スターラップのピッチ

$A_{ws}$ : 1組のスターラップ筋の断面積

$\sigma_{sy}$ : スターラップ筋の降伏点

その他の記号は式(5)において示したとおりである。

その結果、せん断破壊が曲げ破壊に先行しない所要スターラップ筋 ( $\phi 6$  mm 矩形) のピッチが 10 cm 以下となる PC 梁は、アンボンドで2点荷重の I-5: 8.4 cm, I-8: 7.3 cm, I-9: 7.1 cm, I-10: 6.0 cm であって、1点荷重の場合はいずれも 10 cm ピッチで十分であるとみなされた。

ところで、10 cm ピッチでスターラップが配置されたこれらの梁は、いずれも最終的には曲げ破壊が先行したことを考慮すると、アンボンド PC 梁でも付加鉄筋配置に関係なく現行の ACI 規準に準じてせん断補強を行うことが可能と判断される。

なお、現行のわが国土木学会 PC 標準示方書<sup>9)</sup>を適用して本試験体についてせん断破壊を防止するのに必要なスターラップ筋の量を求めたところ、いずれも上記の ACI 規準式に比べてかなり安全側となった。

### 3.3 交番繰返し曲げ試験

交番繰返し曲げ試験の結果を表-9に示す。また、残留ひびわれ幅および荷重～たわみの履歴ループの一例をそれぞれ 図-4, 5 に示す。

表-9 交番繰返し曲げ試験結果

供試体	曲げひびわれ荷重			破 壊 荷 重			復元性 指数 <sup>*2</sup>	等価粘性 減衰常数
	$P_{c1}^{*1}$ (t)	$P_{c2}^{*1}$ (t)	$\frac{P_{c2}}{P_{c1}}$	実測値 $P_u(t)$	計算値 $P_u'(t)$	$\frac{P_u}{P_u'}$		
III-1	3.02	2.00	0.66	4.70	4.14	1.14	0.76	0.10
III-2	2.51	1.56	0.62	4.10	3.54	1.16	0.88	0.07
III-3	3.33	2.65	0.80	8.40	6.70	1.25	0.71	0.11
III-4	4.12	3.62	0.88	8.20	8.34	0.98	0.69	0.10
III-5	4.22	2.25	0.53	7.10	6.84	1.03	0.90	0.06
III-6	4.25	4.10	0.96	10.15	9.19	1.10	0.72	0.10

<sup>\*1</sup>  $P_{c1}, P_{c2}$ : 初回正方向, 負方向荷重時の曲げひびわれ発生荷重  
<sup>\*2</sup> 全たわみに対する回復たわみの比

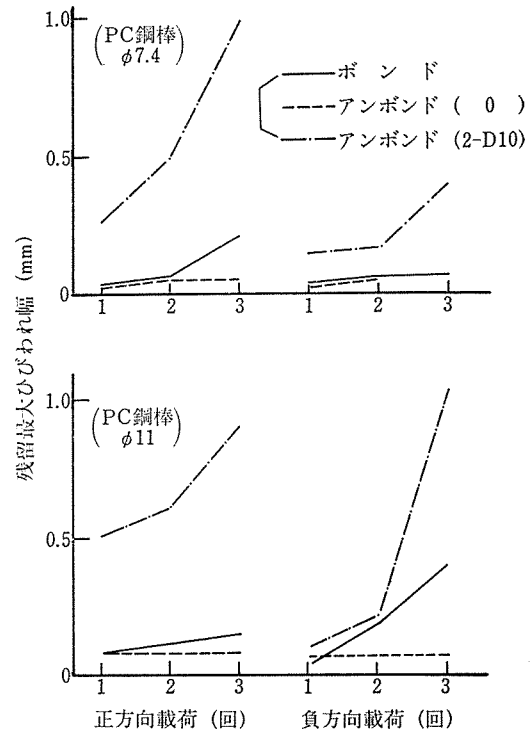


図-4 交番繰返しに伴う残留最大ひびわれ幅の変化

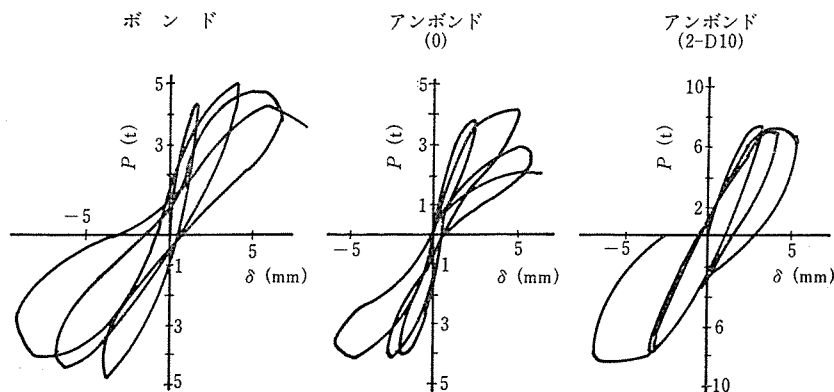


図-5 荷重～たわみの履歴ループ

表-9 に示すように、初回正方向載荷時の曲げひびわれ発生荷重に対する負方向載荷時のその比は、PC 鋼材断面積が同一の場合アンボンド PC 梁が最も小さく、次いで ボンド PC 梁、付加鉄筋を配置したアンボンド PC 梁の順になっている。とくに、PC 鋼材指数 0.22 ( $\phi 11$  PC 鋼材) のアンボンド PC 梁では、この比が 50% 程度に低下すること、しかしこの場合でも付加鉄筋を配置すると低下が著しく緩和されることは注目に値する。これは終局曲げ耐力の 90% 程度以上の超過荷重が作用すると、付加鉄筋を有さないアンボンド PC 梁では曲げひびわれが断面の圧縮縁近くまで急速に進展し、負方向載荷時における断面剛度が著しく低下するためである。

一方、除荷時の残留ひびわれ幅について考えてみよう。図-4 のように、付加鉄筋を配置しないアンボンド PC 梁ではボンド PC 梁に比べて繰返し回数に伴う残留ひびわれ幅の増大はきわめて小さく、良好なひびわれ回復性を有している。しかし、前者の場合でも付加鉄筋を配置すると、その拘束作用により残留ひびわれ幅が著しく増大することに注意を要する。

次に、3 タイプの PC 梁について変形履歴ループの特性を比較したのが 図-5 である。アンボンド PC 梁は典型的な逆 S 字形の履歴ループを示し、変形の復元性はきわめて良好である反面、ループの囲む面積で表わされるエネルギーの消散能は小さいことが大きな特徴である。これに対して、アンボンド PC 梁でも付加鉄筋を配置すると軟化型に近いループ特性に移行すること、またボンド PC 梁は前 2 者の中間的な特性を有していることが認められる。

表-9 に示す各 PC 梁の等価粘性減衰定数および上記の変形特性を総合するとアンボンド PC 梁では地震時の動的応答の増大を招くこと、さらにこのような超過荷重の繰返し作用下ではボンド PC 梁でも著しい付着の劣化現象を避けたいことから、アンボンド PC 梁に対して適量の付加鉄筋の配置は耐震上有効と言えよう。

なお、本試験のように静的終局曲げ耐力の 90% 程度の荷重が正負方向に交番繰返し作用しても、3 回程度ではいずれのタイプの PC 梁も最大耐力は低下しないことが示された。

### 3.4 片振繰返し疲労試験

本試験で設定した 3 レベルの上限荷重のうち、II 種 PC に対する設計荷重  $P_{max-1}$  の場合、いずれのタイプの PC 梁も  $2 \times 10^6$  回の繰返しに耐えるとともにひびわれの発生も認められず、PC 鋼材応力の増加もきわめて小さかった (図-6)。アンボンド PC 梁の疲労特性に関しては他にもこれと同様の報告<sup>9)</sup>がなされている。

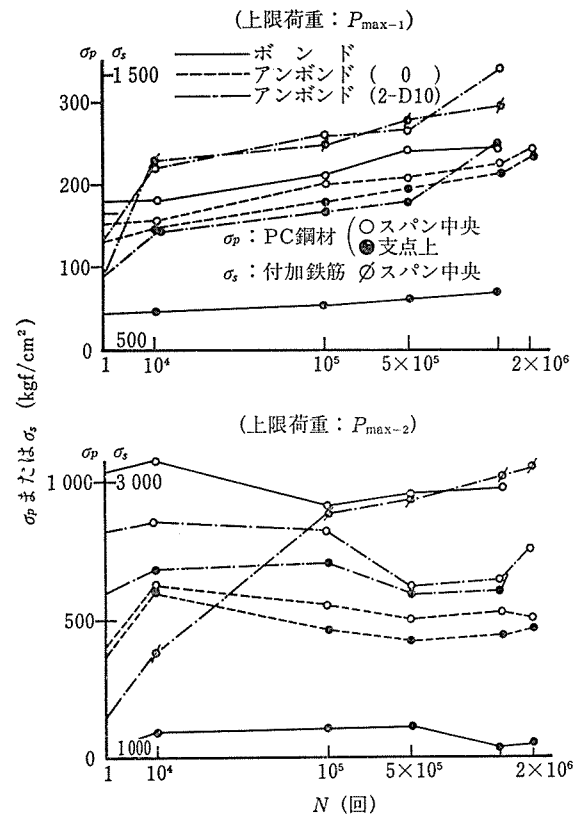


図-6 片振繰返しに伴う鋼材応力の変化

現在 PC 曲げ材の耐疲労設計は確立されていないが、ACI 215<sup>9)</sup> では試案として PC 鋼材とコンクリートの応力振幅がおのの疲労強度から定まる許容値を超えないことを検証することとし、PC 鋼材に関しては最小応力を引張強度  $\sigma_{pu}$  の 60% と考えて、許容応力度振幅を鋼棒では  $0.1 \times \sigma_{pu}$ 、さらにアンボンド定着部ではその 1/2 としている。本試験体では最小応力は  $0.58 \sigma_{pu}$  ( $\cong 0.6 \sigma_{pu}$ ) となることから、許容応力度振幅は母材部で  $0.1 \sigma_{pu} = 1530 \text{ kgf/cm}^2$ 、アンボンド定着部で  $765 \text{ kgf/cm}^2$  とみなされる。上限荷重を  $P_{max-1}$  とした場合には、いずれの PC 梁もこの許容値をかなり下回っており、実験結果からも全く健全であることが確認されたのである。

次に、上限荷重を静的載荷による最大ひびわれ幅 0.1 mm に対応する値  $P_{max-2}$  に設定した場合、図-7 のようにボンド PC 梁では繰返しに伴うひびわれ幅の増大はほとんど認められないのに対し、付加鉄筋を配置しないアンボンド PC 梁では約  $1 \times 10^4$  回で 0.2 mm 程度まで達した。なお、後者でもその後新たなひびわれの発生に伴ってひびわれ幅は減少する傾向を示した。一方、付加鉄筋を配置したアンボンド PC 梁では、 $1 \times 10^6$  回程度まではひびわれ幅は一定もしくは減少する傾向さえみられ、 $2 \times 10^6$  回付近に達すると付加鉄筋応力の増大に伴ってひびわれ幅の増大が観察された。この点については

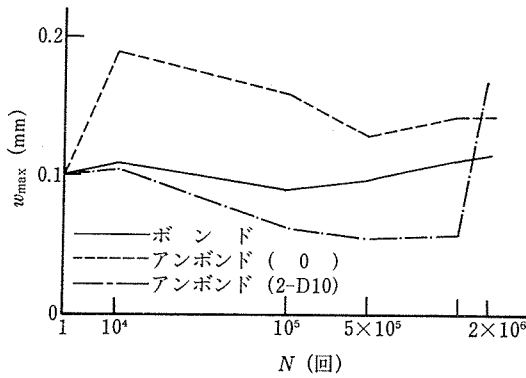


図-7 片振繰返しに伴う最大ひびわれ幅の変化  
(上限荷重:  $P_{max-2}$ )

今後検討の余地が残される。上限荷重  $P_{max-2}$  の繰返し作用下においても、図-6 のように PC 鋼材応力の増加は顕著でなく、いずれも上記の許容値以内であって  $2 \times 10^6$  回までは母材部の破断あるいは定着部の疲労破壊は生じなかった。

一方、上限荷重を  $P_{max-3}$  とした場合、すなわち静的終局曲げ耐力の 75%、80% の荷重をそれぞれ  $15 \times 10^4$  回与えた後、さらに 85% の荷重を約  $11 \times 10^4$  回作用させた時にボンド PC 梁でも定着部が破壊した。ボンド PC 梁でもこのような高応力レベルの繰返しに対しては、鋼材応力の測定結果によると  $1 \times 10^3$  回程度でスパン中央位置と支点上の PC 鋼材応力が接近すること、言いかえると付着が著しく喪失しアンボンド PC 梁と同様に直接定着部に大きな繰返し応力が作用したと考えられる。なお、この場合には初載荷時にすでにスパン中央、支点上ともに鋼材応力は上記の許容値を超過していた。2 種類のアンボンド PC 梁に関しては載荷の途中で試験装置の故障によりデータが得られなかった。

なお、表-10 のように、 $2 \times 10^6$  回の繰返しに耐えた PC 梁については、疲労試験終了後の終局曲げ耐力の低下は実質上無視してさしつかえない。

表-10 片振繰返し疲労試験結果

供試体	試験条件			疲労試験後の破壊荷重		
	上限荷重 $P_{max}$	$\frac{P_{max}}{P_u}$ <sup>*1</sup>	$f_p$ <sup>*2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	実測値 $P_u$ (t)	$\frac{P_u}{P_u}$ <sup>*1</sup>	破壊形式
IV-1	$P_{max-1}$	0.36	140	8.75	1.02	曲げ
IV-2		0.44	133	6.96	0.98	曲げ
IV-3		0.28	137	9.50	0.85	曲げ
IV-1	$P_{max-2}$	0.55	980	8.40	0.98	曲げ
IV-2		0.68	530	7.90	1.13	曲げ
IV-3		0.46	747	10.25	0.92	曲げ
IV-1	$P_{max-3}$	0.85	1800	—	<sup>*3</sup>	—

\*1  $P_u$ : 静的曲げ破壊耐力の計算値

\*2  $f_p$ : PC 鋼材の最大応力振幅

\*3 PC 鋼材定着端部における疲労破壊

#### 4. 結 論

本研究において実施した一連の試験から得られた主な結果を要約すると以下のとおりである。

1) アンボンド PC 梁の曲げ特性を改善する目的で断面引張縁の近くに付加配置する鉄筋として使用した高張力鉄筋 (公称  $\sigma_{sy} \geq 60 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $\sigma_{su} \geq 70 \text{ kgf/mm}^2$ ) は、表面形状や応力~ひずみ特性の点から普通強度の異形鉄筋 (SD 30) に比べてひびわれ幅の制御や部材じん性の面でいくぶん劣るが、終局曲げ耐力の増大に優れた効果を有する。

2) アンボンド PC 梁がせん断に対して過酷な条件とみなされる  $a/d=2.0$  の状態で集中荷重を受けた場合、曲げひびわれがモーメント一定の最大領域内のみに発生し、ひびわれ分散性の点からは好ましくないが、結果として曲げせん断ひびわれを誘発しない利点を有する。一方、付加鉄筋の有無に関係なくアンボンド PC 梁のせん断破壊を防止するために必要なスターラップ筋量の決定にあたっては、現行の ACI 規準の適用が可能と考えられる。土木学会 PC 標準示方書の規定は、この点ではやや安全に過ぎるようである。

3) 静的終局曲げ耐力の約 90% 以上の超過荷重の交番繰返し下において、アンボンド PC 梁は変形の復元性やひびわれ幅の回復性はきわめて良好である反面、エネルギー消散能や振動減衰性が劣るため強震時の動的応答を増幅させる欠点を有する。本実験結果によると、断面上下縁の近くへの適量の異形鉄筋配置はその耐震特性の改善からも著しい効果を発揮すると判断された。

4) 上限荷重を II 種 PC 部材の設計荷重とした片振繰返し載荷に対して、アンボンド PC 梁は  $2 \times 10^6$  回の繰返しに耐え、ひびわれの発生も認められなかった。さらに、上限荷重を静的載荷による最大ひびわれ幅 0.1 mm に相当する荷重とした場合、約  $1 \times 10^4$  回で 0.2 mm 程度の幅にまで推展したが、異形鉄筋の付加配置はひびわれ進展の制御から有効であると考えられた。しかし、 $2 \times 10^6$  回の疲労試験終了後の終局曲げ耐力の低下は認められなかった。

一方、ボンド PC 梁でも静的終局曲げ耐力の 75%、80% の荷重を  $15 \times 10^4$  回ずつ与えた後、85% の荷重を約  $11 \times 10^4$  回作用させた時に定着部で疲労破壊を起こした。これは、高応力レベルの繰返し作用下では PC 鋼材の付着が急速に劣化することによるものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 岡田, 小林, 畑村: Effect of Supplementary Reinforcement on Flexural and Long-Term Behaviors in Unbonded Prestressed Concrete Beams, FIP Sym-



- posium on Partial Prestressing and Practical Construction in Prestressed and Reinforced Concrete, Romania, Sep. 1980
- 2) General Structural Design and Design Loadings, Newzealand Standard, 1976
  - 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説—I 共通編，Ⅲ コンクリート橋編，昭和 53-1
  - 4) CEB-FIP：Recommendations Internationales pour le Calcul et l'exécution des Ouvrages en Béton, 1970
  - 5) ACI：Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI 318-77, 1977
  - 6) 土木学会：プレストレストコンクリート標準示方書，1979-1
  - 7) 六車，富永：繰返し超過荷重をうける PC 単純ばりの曲げ性質に関する基礎的研究，プレストレストコンクリート，Vol. 11, No. 3, 1969.1
  - 8) 宮本，岩崎，西郷，田母神：アンボンド PC げたの疲労試験，鉄道技術研究報告，No. 844, 1973.3
  - 9) ACI Committee 215：Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading, Jour. of ACI, 1974
  - 10) A. Tam & F.N. Pannell：The Ultimate Moment of Resistance of Unbonded Partially Prestressed Reinforced Concrete Beams, Magazine of Concrete Research, Vol. 28, No. 29, Dec. 1976

## ◀刊行物案内▶

## 第 21 回研究発表会講演概要

- 体 裁：B 5 判 52 頁  
 定 価：1500 円 送 料：250 円（巻末の 200 円は誤記につきお詫びして訂正いたします）
- 内 容：(1) PC 鋼棒の遅れ破壊特性について，(2) 鋳物定着具のコンクリート耐荷性能について，(3) アンボンド工法用定着具の低サイクル疲労試験法について，(4) アンボンド工法用 CCL 定着具の性能試験，(5) 海洋コンクリート構造物の基礎的研究（その 2 接合部の動的挙動），(6) コンクリートの自己ひずみによる PC 架構応力の略算法，(7) PC 中空床版曲線橋の解析と実験，(8) プレストレスト鉄筋コンクリートはりの長期曲げひび割れ幅について，(9) 補強筋をもつ PC 鋼材定着部の破壊機構および強度について，(10) PRC 梁断面の履歴性質に関する解析的研究，(11) II, III 種 PC 桁の実用化に関する研究，(12) III 種 PC はりの力学的性質に関する基礎研究，(13) 横補強コンクリートによるアンボンド梁の靱性改善，(14) 超高強度コンクリートの力学的性質に関する研究，(15) PC 板埋設型枠工法に関する研究，(16) 「特別講演」プレストレストコンクリートと建築（特別講演に限り概要はありません），(17) 出雲大社新神楽殿の設計・施工，(18) 一宮地方総合卸売市場の構造設計と施工概要，(19) 大阪国際空港誘導路の PC プレキャスト版舗装工事報告，(20) 下路 PC 桁の押出し工法による架設および試験（仙山線・上杉山架道橋），(21) 鳥飼連絡線真砂 PC 工事，PC 単純箱桁ブロック工法の施工について，(22) PC 鉄道橋の支承部の補修について，(23) 鹿島線涸沼川橋りょうの施工について，(24) 押出し工法による九戸坂橋の設計と施工について，(25) 一本杉公園 PC 斜張橋の設計施工について