

# [170] アンボンド PC 不静定梁の力学的性質に関する研究

正会員 六 車 熙 (京都大学工学部)  
 正会員 渡 辺 史 夫 (京都大学工学部)  
 正会員 ○西 山 峰 広 (京都大学大学院)

## 1. はじめに

アンボンドPC梁は、荷重履歴ループが弾性的で履歴エネルギー吸収能力に劣り、また、高応力繰り返し荷重の下では、PC鋼材着着部での張力変動が大きく、PC鋼材破断の可能性が大きいなどの欠点が指摘されているが、その地震荷重下での挙動は未だ明らかにされていないのが実状である。特に、不静定架構中でのアンボンドPC梁の地震荷重下での挙動を扱った研究はほとんどない<sup>1)~3)</sup>。本研究は、アンボンドPC梁及びボンドPC梁に対して正負繰り返し逆対称曲げ加力試験を行い、その曲げ破壊耐力、PC鋼材応力増分及び履歴復元力特性等について検討し、アンボンドPC梁を耐震一次部材として使用する際の基礎的知見を得ようとするものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 載荷装置

図-1に載荷装置を示す。載荷装置は固定端と載荷端よりなり、ともに供試体スタブ中央にPC鋼棒を通し、供試体を支持している。載荷端では平行度保持用のパンタグラフをとりつけたH型鋼にピン、ローラーを介して油圧ジャッキがとりつけられており、供試体の材軸方向の変形を拘束しないようになっている。また、供試体両端のスタブ上下に各々2個ずつロードセルをとりつけることにより、スタブの載荷装置に対する回転を拘束するとともに、供試体に対して作用する外力モーメントの大きさを直接測定することが可能となっている。さらに、供試体中央に積載荷重として加えられる一定の大きさの集中荷重は、門型フレームより吊り下げられたサーボ・アクチュエータを荷重制御とすることにより加えた。

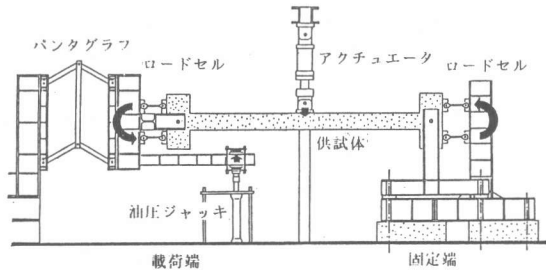


図-1 載荷装置

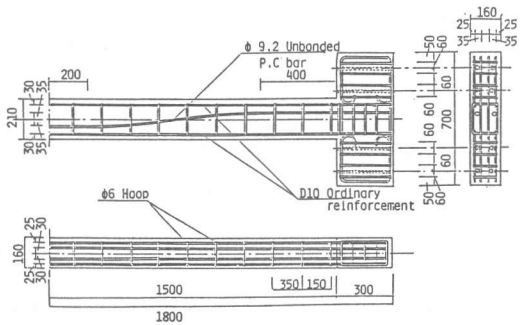


図-2 供試体

### 2.2 供試体

図-2に供試体の一例を、表-1には供試体仕様の詳細を示す。本実験で採用した実験パラメータは次の3種類である。

表-1 供試体仕様の詳細

(1) 付着の有無 (2) PC鋼材の配置型 (直線配置と曲線配置)  
 (3) PC鋼材偏心距離 また、使用したコンクリート、普通鉄筋及びPC鋼材の力学的性質を表-2及び3に示す。表-4中PC鋼材係数に引張側、圧縮側とあるのはPC鋼材が断面の重心位置からみて引張側に偏心しているとした場合と、圧縮側に偏心しているとした場合それぞれにおける値である。また、有効プレストレ

供試体	無				有			
	UB5CR	UB5SR	UB6CR	UB6SR	B5CR	B5SR	B6CR	B6SR
ボンドの有無	無							
PC鋼材	2-φ9.2 SBPR 110/125				2-φ9.2 SBPR 110/125			
PC鋼材の配置形	曲		直		曲		直	
PC鋼材の配置型 (直線配置と曲線配置)	35 (1/8)		60 (1/3.5)		35 (1/8)		60 (1/3.5)	
普通鉄筋	2-D10 (0.49%) (引張、圧縮とも)				2-D10 (0.49%) (引張、圧縮とも)			
PC鋼材係数 (引張側)	0.17	0.17	0.14	0.14	0.21	0.21	0.18	0.18
PC鋼材係数 (圧縮側)	0.34	0.33	0.53	0.51	0.41	0.41	0.64	0.64
コンクリート種別	C1	C2	C1	C2	C3	C3	C3	C3
有効プレストレス力 (ton)	10.44	12.34	10.57	11.94	11.56	11.68	11.81	11.38
$\sigma_p / \sigma_{py}$	0.59	0.72	0.60	0.69	0.67	0.67	0.67	0.67
$F_e / bD F_c$	0.07	0.08	0.07	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10
フープ筋	φ8 #150 (0.23%)				φ8 #150 (0.23%)			
中央集中荷重 (ton)	1.0	0.51	1.7	0.90	0.98	0.50	1.7	0.84

e : 偏心距離  
 D : 梁全高  
 $\sigma_p$  : PC鋼材応力  
 $\sigma_{py}$  : PC鋼材降伏応力  
 $F_e$  : 有効プレストレス力  
 $F_c$  : コンクリート最大圧縮強度

ス力の大きさは、積載荷重が作用せず、自重のみ考慮した場合、梁断面に生じる引張応力が許容引張応力度以下となるように決定した。さらに中央集中荷重の大きさは、梁を両端固定梁と見做した場合、梁中央と両端で有効プレストレス力による曲げモーメントが、中央集中荷重による曲げモーメントにより相殺されるように決定した。

### 2.3 載荷履歴

載荷は原則として梁両端上下4ヶ所でひびわれを発生させた後、普通鉄筋降伏変位 $\delta y$ 、1.5 $\delta y$ 、2.0 $\delta y$ 及びアクチュエータのストロークの限界の変位それぞれで5回の定変位繰り返しを行った。但し、U35CR・U60CRについては4回の定変位繰り返しを行った。

### 3. 実験結果及び考察

本実験の場合、メカニズムに達した時、梁両端で断面の曲げ耐力が異なるため、部材全体としての曲げ破壊耐力を論じる場合には、両材端モーメントより得られた梁せん断力を用いる。図-3には、U60CRの荷重-変位関係を示す。部材回転角は供試体載荷端が上方へ移動する場合を正、逆を負とする。さらに両材端での曲げモーメントについては図-1の載荷装置に示した矢印の向きを正とする。

#### 3.1 曲げ破壊耐力

図-4に各供試体の最大梁せん断力をコンクリート強度に対してプロットした。本実験では、ボンドPC梁とアンボンドPC梁とではコンクリート強度が異なるため、ボンドPC梁の曲げ耐力に対するアンボンドPC梁の曲げ耐力の比を、一概に論ずることはできない。しかしながら、終局状態は全ての梁において曲げ破壊によって生じており、この程度のコンクリート強度の差は無視できるものとするアンボンドPC梁のボンドPC梁に対する梁せん断力の比は93%となる。ここで、曲げ破壊耐力決定の大きな要因のひとつであるコンクリートとPC鋼材の変形適合係数F値4)を使って断面の曲げ破壊耐力の算定を行い、実験値と比較した。これを図-5に示す。F値は、アンボンドPC梁に対して0.1~0.2、ボンドPC梁に対しては0.65~1.0となる。アンボンドPC梁に対するF値は先に著者らが単純梁に対して示した値と一致する4)。したがって、本実験のような載荷状態すなわち繰り返し逆対称曲げを受けるアンボンドPC梁に対しても0.1~0.2のF値が妥当であると言える。また、ボンドPC梁に対してはF値は各供試体で大きく異なる。これはボンドPC梁においても繰り返し載荷により容易に付着劣化が生じるが、その度合は、

表-2 コンクリートの力学的性質

コンクリート種別	C1	C2	C3
圧縮強度 $f_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	403	467	372
引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	33.3	42.9	30.3
初期弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$3.99 \cdot 10^5$	$3.03 \cdot 10^5$	$2.32 \cdot 10^5$
割線弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$3.75 \cdot 10^5$	$2.81 \cdot 10^5$	$2.24 \cdot 10^5$
最大応力時歪 ( % )	0.182	0.230	0.225

1/3 $f_c$ 時

表-3 鋼材の力学的性質

鋼材	D10	Φ6	Φ9.2PC鋼線
降伏応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	3830	3570 <sup>※</sup>	13,300 <sup>※</sup>
降伏歪 ( % )	0.204	-	-
弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$1.88 \cdot 10^6$	$1.93 \cdot 10^6$	$2.02 \cdot 10^6$

\*0.2% オフセット降伏応力

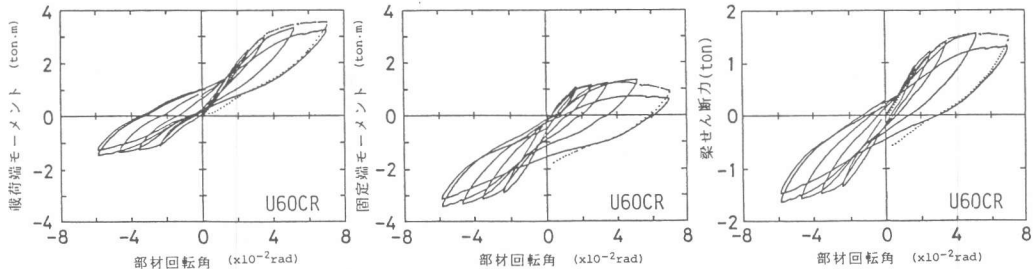


図-3 荷重-変位関係

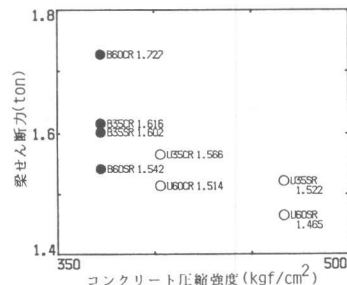


図-4 最大梁せん断力

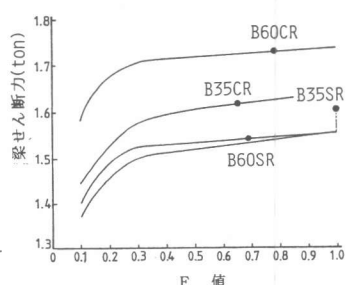
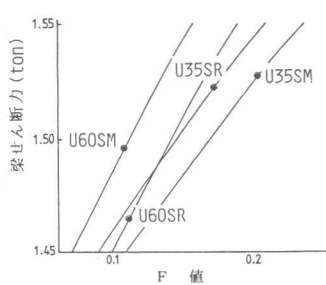


図-5 F値

荷重履歴及び荷重レベルに大きく左右され、また、F値が0.3~1.0の範囲ではほとんど耐力の差は見られないこと等によると考えられる。PC鋼材配置型の違いによる曲げ破壊耐力の差は見られなかった。これは、曲げ破壊耐力が両材端 critical 断面でのPC鋼材配置位置によって決まるためである。アンボンドPC梁の場合にはPC鋼材直線配置の場合、部材全長にわたってPC鋼材応力は平均化されるが、曲線配置の場合には、後述するように、角度変化による摩擦力のため両材端でかなりの応力差が生じる。すなわち、PC鋼材が断面の圧縮側にくるように荷重される場合には、この材端におけるPC鋼材応力増分は小さくなるが、直線配置の場合には他の材端での応力増分の影響が伝達されPC鋼材張力は均一化される。曲線配置の場合はこの均一化の度合いが小さくなる。偏心距離の大小による梁せん断力の差は見られなかった。しかし、各材端を見てみると、偏心距離の大きな供試体では、PC鋼材が断面の圧縮側にくるように荷重される材端と、引張側にくるように荷重される材端の曲げモーメント耐力の差はかなり大きくなり、圧縮側にくる材端では、荷重の早い時期に普通鉄筋が降伏し、最大曲げモーメントに達するものも早い。また、最大曲げモーメント到達以後の耐力低下、変形残留率も偏心距離の大きな供試体では大きくなる。

3.2 PC鋼材応力変動

梁材端PC鋼材定着部において測定されたPC鋼材応力増分を図-6に示す。また、図-7にはアンボンドPC梁において荷重端と固定端での応力増分差を示す。一般にアンボンドPC梁はボンドPC梁に比べて定着部における張力変動が大きく、定着部での疲労破壊が生じ易いと言われている。しかしながら、高応力繰返し荷重下においては、ボンドPC梁においても、柱・梁接合部内での付着は容易に失われ、critical断面でのPC鋼材張力変動が定着部に伝達され、本実験で見られたように、アンボンドPC梁の場合よりも大きな張力増分とその変動を生じる。したがって、ボンドPC梁の方がアンボンドPC梁よりも定着部での低サイクル疲労という点では危険度が高いとも言える。ボンドPC梁においては、PC鋼材直線配置の供試体と曲線配置供試体とではPC鋼材応力増分に差は認められなかった。これは、定着部での応力変動が柱・梁接合部での付着状態によって大きく影響され、したがって、荷重履歴等の荷重状態によって左右されるためである。一方、アンボンドPC梁においてはかなり差が見られる。直線配置の供試体では荷重端と固定端ではほぼ同じ応力変動となり、応力増分差を見てもほとんど差はない。しかし、曲線配置の供試体では、PC鋼材が圧縮側になるように荷重される場合には、大きな履歴ループを描き、逆に、引張側にくるように荷重される場合には、直線配置の場合と同様に、変位に比例して直線的に変化する。したがって、応力増分差をとると図-7のようになり、変位に拘らず、固定端と荷重端の間にはほぼ一定の摩擦抵抗力が生じている。この大きさは応力増分最大値の約1/3程度にまでなる。

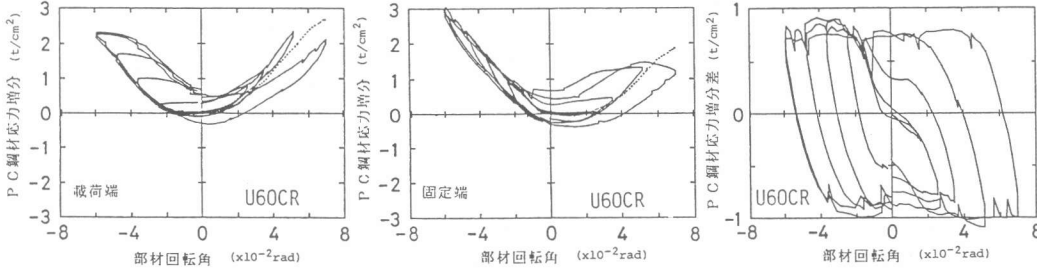


図-6 PC鋼材応力増分

図-7 PC鋼材応力増分差

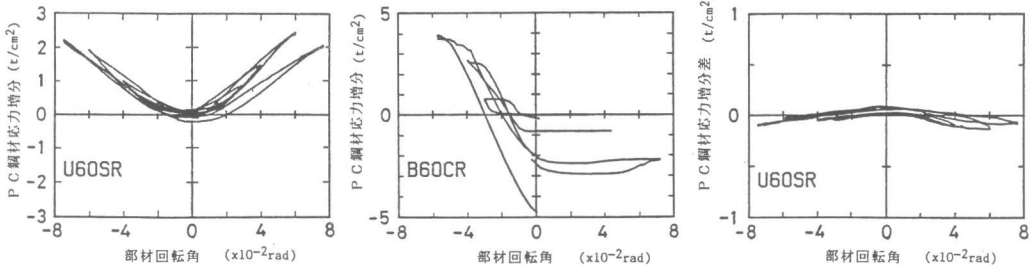


図-6 PC鋼材応力増分

図-7 PC鋼材応力増分差

### 3.3 履歴復元力特性

ポンドPC梁とアンポンドPC梁の履歴ループ形状を比較するため、普通鉄筋降伏変位  $\delta y$  時と  $2.0\delta y$  時での、第一回目の繰返しループの無次元化履歴ループを図-8に示す。この図よりわかるように、ポンドPC梁とアンポンドPC梁とはほとんど履歴ループに差はないと言える。そこで次に、各供試体の等価減衰定数  $h_{eq}$  と変位との関係を示したのが図-9である。図よりポンドPC梁とアンポンドPC梁とにおいて履歴ループによるエネルギー吸収能力には差がないことがわかる。しかしながら、偏心距離の大小による差が見られる。すなわち、偏心距離の小さな供試体の  $h_{eq}$  は大きな供試体のそれを上回っている。これは、偏心距離を大きくすると、PC鋼材が圧縮側になるように載荷される材端では、圧縮側コンクリートがダメージを受けやすく、繰返し載荷による耐力の低下が著しいためである。したがって、偏心距離を大きくすることは長期荷重下では有利であるが、地震荷重下においては不利になる場合がある。

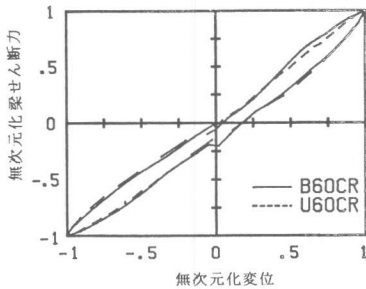


図-8 無次元化履歴ループ ( $\delta y$ 時)

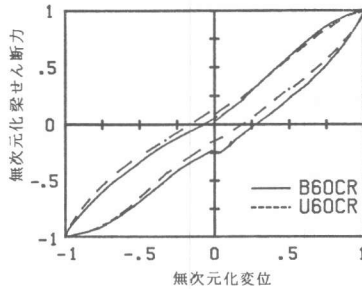


図-8 無次元化履歴ループ ( $2\delta y$ 時)

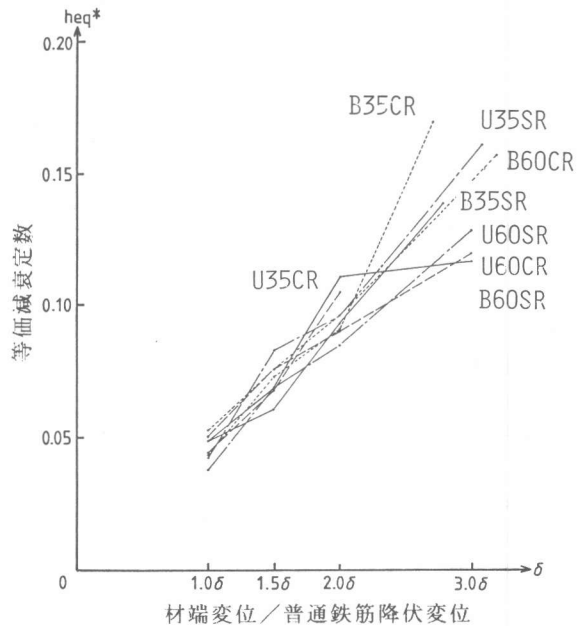


図-9 等価減衰定数

### 4. むすび

アンポンドPC梁とポンドPC梁に対する逆対称曲げ載荷試験より次のような結論が得られた。

- (1) 繰返し逆対称曲げを受けるアンポンドPC梁の最大梁せん断力はポンドPC梁のそれと比較して約7%低下する。また、このような載荷状態のアンポンドPC梁の耐力略算においても単純支持梁に対してと同様、F値を利用することができる。この時F値は0.1~0.2程度の値とすればよい。
- (2) PC鋼材定着部での張力変動はアンポンドPC梁よりもむしろポンドPC梁について大きくなる。これは、柱・梁接合部の付着劣化によるものであり、したがってアンポンドPC梁よりもポンドPC梁の方が定着部における低サイクル疲労破壊の危険性は高いと言える。
- (3) PC鋼材を曲線配置としたアンポンドPC梁においては両定着端間に変位に関係なくほぼ一定の摩擦力が働く。
- (4) ポンドPC梁とアンポンドPC梁とにおいて履歴ループ形状、等価減衰定数にはほとんど差はない。

(参考文献) 1)竹本靖「アンポンドPC部材の曲げ終局時応力について」大林組技研報No.,28,1984  
 2)深井悟「3種プレストレストコンクリートの耐震力学特性に関する基礎研究」京都大学修士論文、1981,2 3)六車他「アンポンドPC梁の履歴復元力特性に関する研究」近畿支部研究報告集、昭60年5月 4)六車他「アンポンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究」プレストレストコンクリートVol.,26,No.,1,Jan,1984