

# 論文 PRC 造ト型骨組みの復元力特性に及ぼすスラブおよびせん断スパンの影響

伊藤 央<sup>\*1</sup>・渡邊 哲巳<sup>\*2</sup>・塩原 等<sup>\*3</sup>・小谷 俊介<sup>\*4</sup>

**要旨：**スラブの有無とせん断スパンの長さをパラメータとしたプレストレスト鉄筋コンクリート造ト型骨組 3 体の静的漸増振幅繰返し載荷実験を行い、荷重変形関係のスケルトンカーブに及ぼすスラブの影響と、エネルギー吸収能に及ぼすスラブ、せん断スパンの影響を検討した。部材角が 1/50 以下では、履歴消費エネルギーに及ぼすこれらの影響は、スラブの有るものは無いものの 1.2~1.7 倍、せん断スパンの短いものは長い物の 1.3~1.7 倍となった。また、スラブ筋の歪から求めたスラブの等価協力幅が全幅となったのは、部材角で 1/100 程度の時であった。

**キーワード：**プレストレスト鉄筋コンクリート、スラブの協力幅、せん断スパン比

## 1 はじめに

プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 造梁の復元力特性については数多くの研究がある。しかしスラブをどのように設計に考慮すればよいかについては鉄筋コンクリート (RC) 造の協力幅を参考にしているのが現状である。しかし、PRC 造梁は RC 造梁に比べて梁せいが大きく、スラブ厚さと梁せいの比が異なることや、PRC 造梁のせん断スパン比が RC 造梁に比べて大きいこと、スラブにも緊張によって圧縮応力が導入されること等が、履歴復元力特性に影響するものと考えられる。

そこで、スラブの有無とせん断スパンを実験変数として実験を行い、部材のスケルトンカーブや履歴のエネルギー吸収能に及ぼす影響を実験的に検討した。

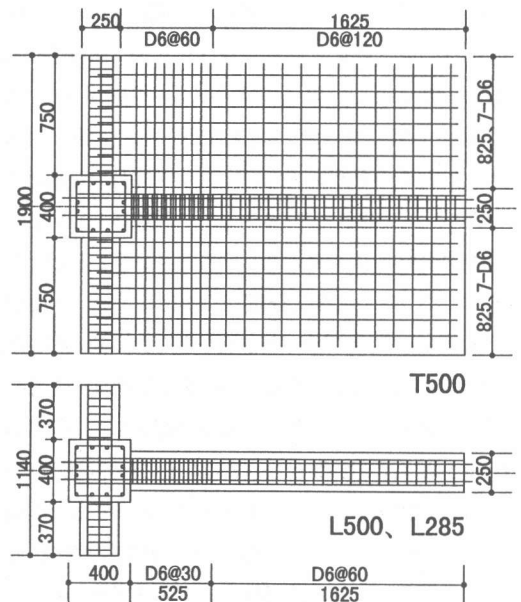


図-1 試験体形状および配筋図

## 2 実験概要

### 2.1 試験体の概要

試験体は 1/2.7 スケールで、PRC 造建物の外柱梁接合部を取り出したもので、階高が 4m、桁行方向スパンが 10.5m、梁間方向スパンが 5m の建物をもとにして定めた。試験体の形状、配筋を 図-1 と 図-2 に示す。試験体は 3 体で、T500、L500 でスラ

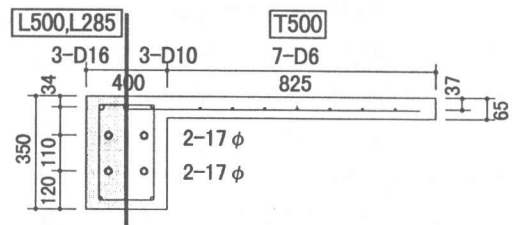


図-2 試験体梁部分断面図

- \*1 東京大学大学院工学系研究科 修士課程 (現在 (株) 久米設計) 修士 (工学) (正会員)
- \*2 東京大学大学院工学系研究科 修士課程
- \*3 東京大学大学院工学系研究科 助教授 工博 (正会員)
- \*4 東京大学大学院工学系研究科 教授 Ph. D. ・工博 (正会員)

表-1 試験体梁部材の諸元

試験体	$\sigma_B$ [MPa]	$E_c$ [MPa]	主筋 種別	スラブ筋 種別	$\rho_t$ [%]	P C鋼棒 種別	$p$ [%]	$L$ [mm]	$a/D$
T500	53.5	$2.9 \times 10^4$	3-D10	14-D6	0.83	4-17 $\phi$	2.08	1750	5
L500	54.8	$2.9 \times 10^4$	3-D16	—	0.76				
L285	55.6	$2.9 \times 10^4$		—	0.76			997.5	2.85

$\sigma_B$ :コンクリート圧縮強度,  $E_c$ :コンクリートのヤング率,  $\rho_t$ :普通鉄筋引張鉄筋比,  $p$ :PC鋼棒鉄筋比  
 $L$ :梁部材長さ,  $a/D$ :せん断スパン比

ブの有無を比較し、せん断スパンを比較するためにスラブ無し L285 を加えている。試験体の梁は、幅 ( $b$ )  $\times$  せい ( $D$ ) が  $250 \times 350$ mm の矩形断面であり、同断面の直交梁と、 $400 \times 400$ mm の正方形断面の柱からなる。スラブ付き試験体 T500 のスラブ厚は 65mm で、スラブ幅は梁間方向スパンの半分の 825mm、全幅に直交梁があり、スラブのない試験体にも 370mm の長さの直交梁を設けた。コンクリート設計基準強度は 45MPa とし、緊張材はすべて PC 鋼棒 (JIS 規格番号 B 種 1 号) の 17  $\phi$  を使用した。試験体 T500 は、梁上端の配筋を 3-D10、スラブ部分の配筋はシングルとし、片側で 7-D6 とした。試験体 L500, L285 は上端引張時に T500 と曲げモーメントがほぼ等しくなるように、上端の配筋を 3-D16 とした。いずれの試験体も下端の配筋は 2-D10 とした。せん断補強筋間隔は同一とし、文献[1]のせん断強度式を用いてせん断破壊が起こらないように配筋した (梁危険断面から  $1.5D$  区間で 2-D6@30, その他の区間で 2-D6@60)。梁部分のコンクリートのかぶり厚さは 20mm とした。柱の配筋は 12-D19 とし、直交梁部材は 6-D19 とした。また、柱梁接合部で破壊が生じないように、文献[2]を準用して接合部の必要補強筋量を決定した。梁端部の梁主筋は 20mm の鉄板に溶接定着し、柱梁接合部内では上端筋は曲げ下げ定着、下端筋は接合部内には通さず梁部材内定着とした。プレストレスは梁断面の上下端から 120 mm の位置に 2本ずつ、計 4本をコンクリート材令 8日で導入し、導入力は規格降伏点強度の 85% とした。PC 鋼棒は梁の両端部でアンカプレートとナットにより緊張定着したあと、グラウトを注入した。グラウトの圧縮強度は 37.3MPa であった。各試験体の諸元および実験開始時のコンクリート強度を表-1 に示す。

2.2 実験方法

柱の一端をピン支持、他端をローラー支持とし、梁端にせん断力を载荷した。加力装置を図-3 に示す。加力は部材角制御、正負交番静的漸増繰返し载荷とした。部材角が 1/50 以下までの载荷履歴を図-4 に示す。梁の変形は、直交梁を基準として加力点の相対変位を測定し、それをせん断スパン長さ ( $a$ ) で除して部材角とした。また、各試験体は梁の危険断面から 70mm の区間で曲率を測定し (図-3)、梁の危険断面のひび割れが開くことによる梁端部の変形をこの区間の曲率変化から計算し、これを梁危険断面の目開き変形とした。梁主筋および PC 鋼棒の歪度は、接合部内に 1 点、梁危険断面、危険断面より  $0.75D$ ,  $1.5D$ ,  $2.85D$  の位置に 4 点の計 5 点の歪ゲージで測定した。スラブの協力幅を検討するためスラブ筋の危険断面にも歪ゲージを貼付した。

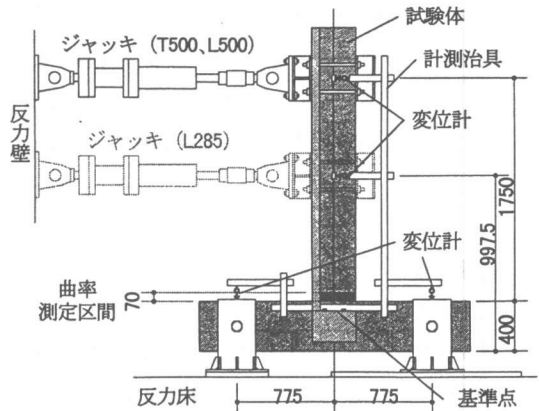


図-3 加力装置、計測図

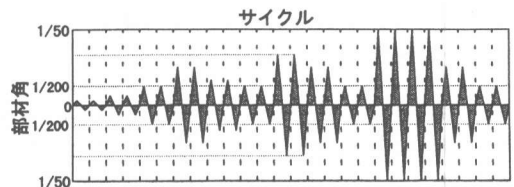


図-4 载荷履歴 (1/50 以下まで)

### 3 実験結果と結果の検討

#### 3.1 破壊性状

各試験体の梁部材端モーメントと材端部材角関係を図-5 に示す。破壊モードは全て梁曲げ降伏先行型で、梁の普通鉄筋の降伏後に梁の曲げ圧縮ゾーンで圧壊し、その後PC鋼棒が降伏した。

スラブ付き試験体 T500 の終了後のひび割れ状況を図-6 に示す。いずれの試験体も、まず梁に曲げひび割れが生じ剛性が低下し、その後、普通鉄筋降伏と前後して剛性が急激に低下した。梁部材のひび割れは、梁上端の方が多く、斜めに曲げせん断ひび割れが進展した。梁下端では危険断面のひび割れが大きく開き、他のひび割れはほとんど進展しなかった。試験体 T500 のスラブのひび割れは、下面に多く、上面にはあまり多くなかった。

いずれの試験体も、コンクリートの曲げ圧壊開始後も耐力は上昇し、最大耐力は梁材端部材角が 1/50 のサイクルで、PC鋼棒の降伏とほぼ同時期であった。試験体 T500 は部材角が 1/15 の上端引張時にスラブ筋が 3 本破断して急激に耐力が低下したが、L500, L285 は部材角が 1/15 でも急激な耐力低下はなかった。

#### 3.2 等価粘性減衰定数

各試験体の処女載荷のサイクルにおける等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  を、梁材端部材角が 1/400~1/25 の範

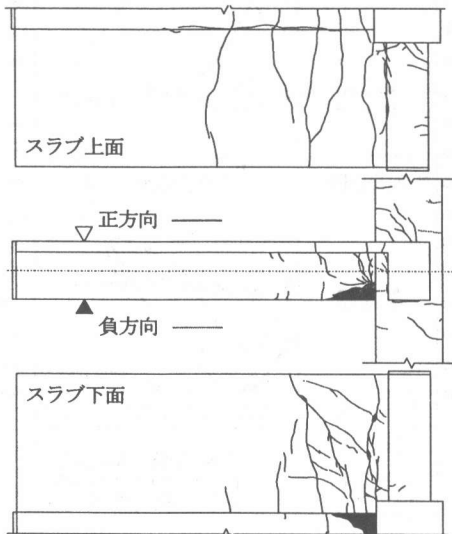


図-6 ひび割れ図 (T500)

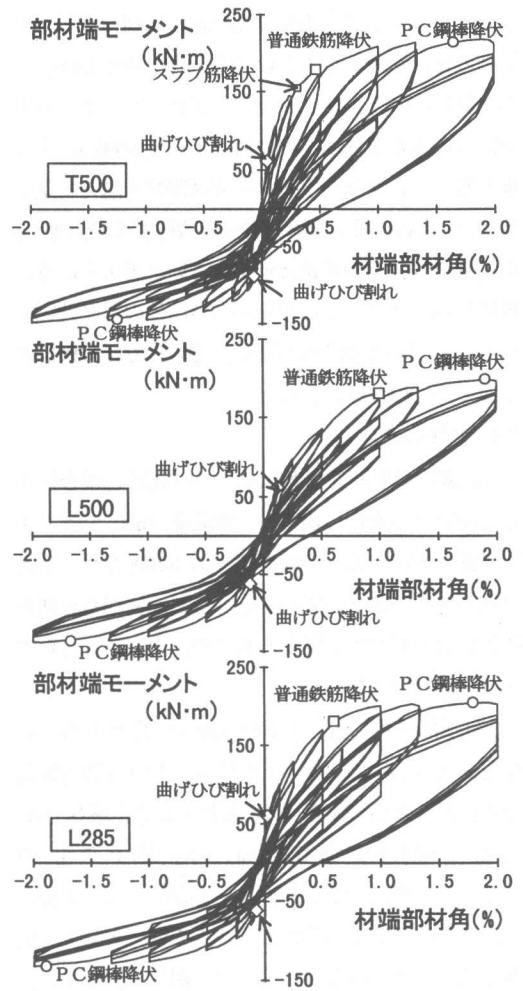


図-5 梁部材端モーメントと梁材端部材角

囲で計算し図-7 に示す。等価粘性減衰は、部材角により多少のばらつきはあるが部材角が大きいほど、試験体 T500 と L500 の差と試験体 L500 と L285 の差はどちらも小さくなった。試験体 T500 は L500 に比べ、部材角が 1/100 で 1.7 倍、1/50 で 1.2 倍となった。また、試験体 L285 は L500 に比べ、部材角が 1/100 で 1.7 倍、1/50 で 1.3 倍となった。いずれの試験体も部材角が 1/25 では同程度となった。

#### 3.3 残留変形角

各試験体の処女載荷のサイクルにおける残留変形角を図-8 に示す。試験体 T500 では、下端引張のサイクルで部材角が 1/50 まで残留変形がマイナス方向に増えつづけた。

試験体 T500 にはスラブがあり、梁断面の図心と

プレストレス力の合力の作用位置の距離（プレストレスの偏心距離）が大きいため（弾性時で40mm）、常に部材内モーメントが働く。また、コンクリート断面の大きなスラブ側に対して、断面の小さな梁下端はコンクリートが早く弾性限界を越え劣化する。そのため、梁上端引張の後の残留変形が大きく、梁下端引張の後の残留変形が小さいと考えられる。梁部材端モーメントと材端部材角関係の履歴曲線からも履歴中心が梁下端圧縮側（図-5では右側）によっていくのが観察された。

### 3.4 変形の割合

各試験体の層間変形角に占める柱変形と接合部変形を除いた梁変形の割合は、試験体 T500 では、上端引張側で約 80%，下端引張で約 90% となり、L500 では約 85%，L285 は約 75% となった。変形角の増大に伴い若干割合が上昇するものの、変形角によらずほぼ一定の値になった。

梁材端部材角に占める危険断面の目開き変形の割合を図-9 に示す。梁材端部材角に占める梁危険断面の目開き変形の割合は、試験体 T500 と試験体 L500 では、上端引張側ではほぼ同じ割合（0.4~0.5）であるが、下端引張では部材角が 1/200 では 1.4 倍、1/100 では 1.3 倍 T500 の方が大きい。スラブ引張側では、スラブの効果によりひび割れが分散するため、回転変形が危険断面に集中しなくなる。試験体 L500 と試験体 L285 では、上端引張、下端引張とも L285 の方が平均で 1.5 倍程度大きい。3 体とも普通鉄筋のある上端引張では目開き変形の占める割合は部材角によらずほぼ一定であるのに対し、普通鉄筋を配していない下端引張では部材角の増大に伴いその割合も増加した。

### 3.5 鋼材の応力度

プレストレス導入後のコンクリートのクリープ等の影響によるプレストレスロスを、PC 鋼棒の歪データから求めたプレストレス導入直後と実験開始時の鋼材の応力度から検討する。表-2 に各試験体の導入直後、および実験開始時の PC 鋼棒の平均応力度と残存率、および普通鉄筋の平均応力度を示す。いずれの試験体も実験開始時にプレストレスロスが生じ、PC 鋼棒の引張応力が減少し、普通鉄筋の圧

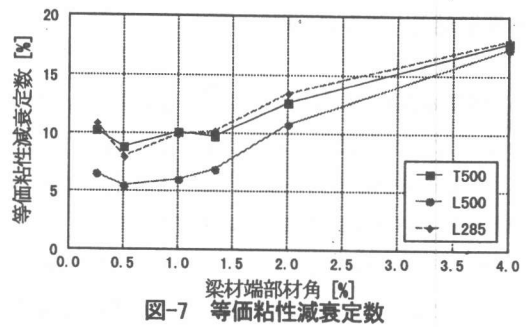


図-7 等価粘性減衰定数

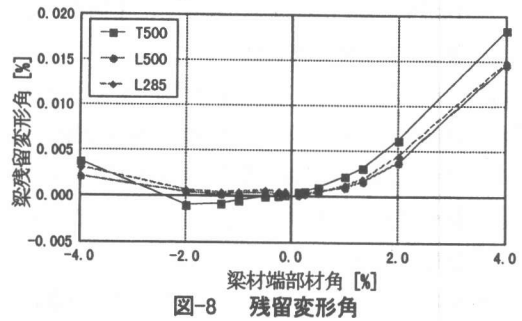


図-8 残留変形角

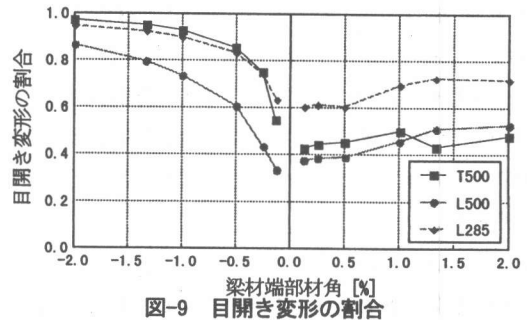


図-9 目開き変形の割合

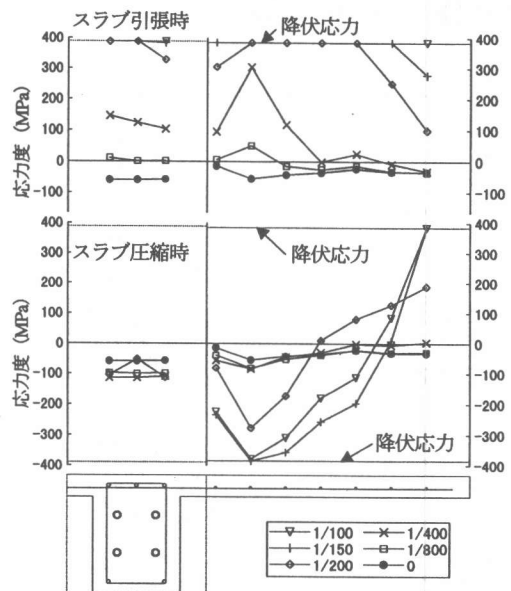


図-10 スラブ筋の応力度分布

表-2 鋼材の応力の平均値

試験体	$P_n$ [MPa]	$P_o$ [MPa]	$e$ [%]	$L_n$ [MPa]	$R_{L_n}$ [%]	$L_o$ [MPa]	$R_{L_o}$ [%]	$S_n$ [MPa]	$R_{S_n}$	$S_o$ [MPa]	$R_{S_o}$ [%]
T500	790	739	94	-19.7	0.6	-51.7	10.0	-8.9	0.5	-43.6	2.3
L500	784	780	99	-41.3	3.3	-70.7	6.2				
L285	804	739	92	-49.0	4.0	-71.3	7.1				

$P_n$ : 導入時PC鋼棒応力度,  $P_o$ : 実験開始時PC鋼棒応力度,  $e$ : プレストレスの残存率  
 $L_n$ : 導入時普通鉄筋応力度,  $L_o$ : 実験開始時普通鉄筋応力度,  $S_n$ : 導入時スラブ筋応力度  
 $S_o$ : 実験開始時スラブ筋応力度,  $R$ : 断面の軸力のうち普通鉄筋, スラブ筋がそれぞれ負担する割合

縮応力度が増加した。これは、コンクリートのクリープが原因と考えられる。またスラブ筋の圧縮応力度は、導入直後は梁に近い鉄筋ほど大きかったが、実験開始時にはスラブ全断面において圧縮応力度がほぼ均一に分布していた。

### 3.6 スラブの協力幅

試験体 T500 のスラブと梁の危険断面における鉄筋の応力度をゲージから得た歪度から変換して求めた。変換には、歪度-応力度関係をバイリニア型とし、繰返し部分に Ramberg-Osgood モデルを用いたモデルを用いた。図-10 にスラブ筋の応力度分布を示す。

スラブ引張時は、梁部材角が 1/800 以下では全ての鉄筋が圧縮応力の状態であり、全幅が引張降伏するのは部材角で 1/100 程度のときであった。またスラブ圧縮時でも、部材角が 1/200 以上では、梁から遠い鉄筋から引張鉄筋となり、引張応力が増加した。また、スラブ圧縮時に圧縮応力となる鉄筋は履歴によって異なった。よって、スラブ筋が強度に及ぼす影響は圧縮時と引張時では異なる。

得られた応力度をもとにスラブ引張時のスラブの等価協力幅を計算した。ここでいうスラブの等価協力幅とは、危険断面の歪度を梁主筋の歪度で代表させたとき、実験で得られた全断面の応力を得るために必要なスラブの幅（片側）のことである。スラブ

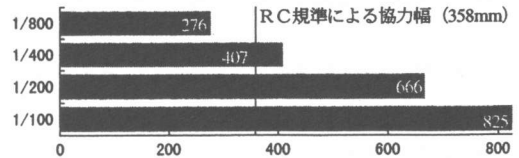


図-11 スラブの等価協力幅

幅は、鉄筋の位置を考慮せずにスラブ筋比だけを用いて求めた。スラブの等価協力幅を図-11 に示す。試験体 T500 の文献[3]による弾性時のスラブの協力幅は 358mm であるが、上記の方法では弾性時には 207mm となり、部材角が 1/800 でも 276mm となった。全幅が協力幅となるのは 1/100 程度であった。スラブ圧縮時は、鉄筋がスラブ引張時に先に降伏するため、履歴によって圧縮応力の量が変わり、明確な値を特定することはできなかった。

### 3.7 剛性および強度

現在のところ、コンクリートのクリープ等によるプレストレスロスや、鉄筋の圧縮歪を考慮した強度、剛性の算定式は提案されていないが、今回は既往の算定式で各試験体の初期剛性、曲げひび割れモーメント、終局モーメント、曲げ降伏モーメント、降伏点剛性を計算した。試験体 T500 のスラブの協力幅は、3.6 の方法により、弾性時、ひび割れモーメントの計算には 207mm、終局モーメントの計算には全幅の 825mm を用いた。

(1) 初期剛性  $K_0$

$$M_y = 0.9 \cdot \sigma_s \cdot a \cdot d + \sigma_n \cdot a_n (1 - 0.5q) \cdot d_p \quad (1)$$

$$\alpha_y = \left\{ 0.043 + 1.64 \left( r_n \cdot p_r + s_n \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_y} \cdot p_r \cdot d_{s1} \right) + 0.043 \frac{a}{D} + 0.33\eta_0 \right\} \cdot r \cdot d_1^2 \quad (2)$$

$p$ : PC鋼棒鉄筋比  $\sigma_{sy}$ : PC鋼材降伏点応力度  $\sigma_y$ : 普通鉄筋の降伏点応力度  $a$ : 引張普通鉄筋の断面積  
 $a_n$ : PC鋼棒の断面積  $d_p$ : 断面圧縮縁からのPC鋼棒の重心位置  $q$ : 鋼材係数  
 $n$ : 普通鉄筋とコンクリートのヤング係数比  $p_r$ : 普通鉄筋引張鉄筋比  $s_n$ : PC鋼棒とコンクリートのヤング係数比  
 $d_{s1}$ :  $d_s/D$   $\eta_0$ : 軸力比  $r_{d1}$ :  $r_d/D$   $r_d$ : 圧縮縁から引張普通鉄筋までの距離

表-3 強度と剛性（各試験体上段が上端引張，下段が下端引張）

試験体	$K_0$ [ $10^4$ kN·m]		比	$M_{cr}$ [kN·m]		比	$K_y$ [ $10^4$ kN·m]		比	$M_u$ [kN·m]		比
	結果	推定		結果	推定		結果	推定		結果	推定	
T500	6.8	6.7	1.00	61	65	1.00	2.4	2.5	0.96	217	205	1.06
				-88	-96	0.92	2.7	2.7	1.00	—	—	—
L500	4.6	4.8	0.97	62	62	1.00	1.9	1.9	0.98	198	197	1.00
				-61	-65	0.95	1.7	1.4	0.83	-138	-134	1.03
L285	8.4	8.4	1.00	60	63	0.95	2.8	2.7	0.95	205	197	1.04
				-61	-66	0.93	2.5	1.5	0.60	-132	-134	0.99

$K_0$ : 初期剛性,  $M_{cr}$ : 曲げひび割れモーメント,  $K_y$ : 降伏点剛性,  $M_u$ : 曲げ終局モーメント

初期剛性は鋼材を考慮した等価断面 2 次モーメントを用いて弾性理論から計算した。

(2) 曲げひび割れモーメント  $M_{cr}$

曲げひび割れは，部材の引張縁のコンクリート応力度が引張強度に達した時に生じると考えた。コンクリートの曲げ引張強度は文献[3]によった。

(3) 曲げ終局モーメント  $M_u$

普通鉄筋の配してある上端引張（スラブ引張）時の  $M_u$  は文献[4]の式 (1) によった。下端引張（スラブ圧縮）時は普通鉄筋を配していないので文献[1]の略算法によった。スラブ圧縮時のスラブの協力幅については 3.6 の方法では明確な値が出ることができなかったが，式 (1) と実験結果の比較から考えられるスラブ圧縮時の協力幅は 220mm 程度となった。

(4) 曲げ降伏モーメント  $M_y$

文献[5]に従い曲げ最大耐力時の 90%の荷重に相当する点を降伏点とした。

(5) 降伏点剛性  $K_y$

文献[5]の式 (2) により降伏点剛性の初期剛性に対する比（剛性低下率）を計算し上記の  $M_y$  に相当する点に対する降伏点剛性を求めた。計算に用いたスラブの協力幅は，弾性時，終局時共に 3.6 で求めた値とした。

表-3 に実験結果と上記の算定式による値を示す。

T500 のスラブ圧縮時は，スラブの協力幅が明確にわからなかったため，ここでは値を示さなかった。

初期剛性，曲げひび割れモーメント，曲げ終局強度については推定値と実験値の誤差が 1 割以内となった。また降伏点剛性については，スラブ無しを試験体では下端引張時の推定値が実験値よりも小さめに評価したが，上端引張時および T500 の下端引張

時においては，推定値と実験値の誤差は 1 割以内となった。

4 まとめ

1. スラブ付き試験体の普通鉄筋の歪データからスラブ引張時のスラブの等価協力幅を算出したところ弾性時には RC 規準より小さく，協力幅が全幅となるのは部材角で 1/100 程度だった。

2. エネルギー吸収能におけるスラブの効果は部材角が 1/100 で 1.7 倍，1/50 で 1.2 倍，せん断スパンの効果は部材角が 1/100 で 1.7 倍，1/50 で 1.3 倍であった。

3. プレストレス偏心距離が大きい場合，プレストレスの影響により，部材の荷重変形関係の履歴中心は原点ではなくなる。

謝辞 本研究は，文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)「プレキャスト・プレストレストコンクリート部材の弾塑性復元力特性」(研究課題番号:08455247)及び，株式会社ピー・エスの研究助成を受けて行った。また，株式会社ピー・エスの林三雄氏，石田雅宏氏には試験体の設計，試験体製作，プレストレス導入およびグラウト注入作業でお世話になった。

参考文献

- [1] プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，日本建築学会，1987
- [2] 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，日本建築学会，1990
- [3] 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，日本建築学会，1991
- [4] プレストレスト鉄筋コンクリート(III種PC)構造設計・施工指針・同解説，日本建築学会，1986
- [5] 岡田満ほか: プレストレストコンクリート曲げ部材の復元力特性に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 410 号，pp.63~69，1990.4