

(25) 圧着型および一体型片持PC梁の塑性ヒンジ機構に関する実験研究
(その3:正負繰り返し載荷における荷重-変形特性および終局変形能力)

(株)日建設 大阪本社 構造設計室 ○阿波野昌幸
大阪大学 工学部 建築工学科 正会員 中塚 信
(株)ピー・エス 大阪支店 建築部 正会員 石井 孝幸
中部電力(株) 上田 真也

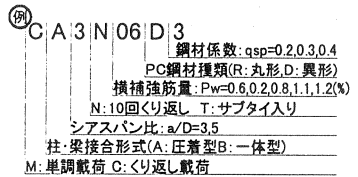
1. まえがき

PC構造において部材の塑性変形によるエネルギー吸収能力を考慮する耐震設計を行うためには、PC梁の終局域における変形能力の把握が不可欠である。PC梁の終局域挙動に関する実験的・解析的研究は種々行われているが、コンクリート、PC鋼材、普通鉄筋の複合体であるPC梁の耐荷・変形機構が終局域まで十分に明らかにされているとは言い難いのが現状であろう。

本研究は、PC梁の終局変形能力の把握を目標とする同梁の塑性ヒンジ領域のマクロモデルに必要な各種特性のデータを得ることを目的としたものである。すなわち柱と圧着接合したおよび一体型の片持PC梁の正負繰り返し載荷試験を行い、シアスパン比、横補強筋量、鋼材係数およびPC鋼材種などを変化させたとき、同梁の荷重-変形特性、および終局変形能力などがそれら要因によってどのように異なるかを調べたものである。

2. 実験概要

試験体概要および材料特性を表1に示す。取りあげた実験要因は、接合形式(圧着型、一体型)、横補強筋量(Pw=0.2~1.2%)、横補強筋形状(中子筋の有無)、シアスパン比(a/D=3, 5)、PC鋼材の付着特性(丸鋼棒、異形鋼棒)、繰り返し回数(単調、N=3, 10回)および鋼材係数(qsp=0.2, 0.3, 0.4)である。図1に代表的な圧着型試験体と一体型試験体の配筋を例示する。



-試験体名称解説-

表1 試験体概要および材料特性

試験体名称	MA3-06D3	CA3-02D2	CA3-06D3	CA3-11D4	CA3-08D2	CA3-12D3	CA5-06D3	CA3N06D3	CA3T06D3	CA3-06R3	CB3-12D3	CB5-06D3		
繰り返し回数	単調	N=3						N=10		N=3		N=3		
柱・梁接合形式	圧着型											一体型		
シアスパン比 a/D	3						5		3		3		5	
コンクリート	Fo (kgf/cm2)	340.8	377.5	402.2	421.5	381.7	410.0	430.1	411.2	390.3	430.1	412.6	415.3	
	Ec (kgf/cm2)	3.39E+05	3.03E+05	3.21E+05	3.63E+05	3.59E+05	3.06E+05	2.66E+05	3.18E+05	3.15E+05	3.27E+05	3.18E+05	3.17E+05	
目地モルタル	F28 (kgf/cm2)	650.6	609.8	650.6	609.8						650.6	609.8		
グラウト	F28 (kgf/cm2)	247.8	389.5	247.8	389.5						247.8	389.5		
横補強筋	Pw (%)	6.2φ	3.6φ	6.2φ	8.4φ	7.2φ	8.8φ	6.2φ	5.0φ	6.2φ	8.8φ	6.2φ		
	σwy (kgf/cm2)	0.6	0.2	0.6	1.1	0.8	1.2	0.6	0.6	0.6	1.2	0.6		
	サブタイ本数	4180.9	3791.7	4180.9	3401.4	4330.4	3592.1	4180.9	4347.1	4180.9	3592.1	4180.9		
	ピッチ(mm)	0									1		0	
PC鋼材	50													
	異形鋼棒						丸鋼棒			異形鋼棒				
	C種1号	B種1号	C種1号	B種1号		C種1号			C種1号	C種1号				
	2c-35φ	2c-32φ	2c-35φ	4c-32φ	2c-32φ	2c-35φ			2c-36φ	2c-35φ				
	9.566	7.942	9.566	7.942		9.566			10.18	9.566				
0.2%σ _{yk} 以降降伏耐力	Tpy (tf/本)	112.2	82.9	112.2	82.9		112.2			119.3	112.2			
qsp=(Tpy+Trγ+Crγ)/(bDFc) (実強度)		0.329	0.220	0.279	0.393	0.217	0.274	0.281	0.273	0.287	0.277	0.272	0.270	
有効プレストレス力	Po (tf/本)	58.5	42.3	58.5	35.0	42.3	58.5			57.4	58.5			
dp (cm)	40													
普通鉄筋(上下等配筋)	2-D16													
As (cm2)	1.99													
Es (kgf/cm2)	1.90E+06													
σry (kgf/cm2)	3775													
d (cm)	曲げ耐力には参入しない													
	47													

全試験体とも圧縮・引張側に対称な配筋を有し、曲げ圧縮部コンクリートは口の字形にコンファインド補強されている。また一体型の普通鉄筋は柱スタブ内に定着させている。

荷重は図2に示す方法により正負繰り返し荷重を行った。荷重プログラムは荷重点たわみによる部材角(R)、1/200、1/100、1/50、1/30、1/20、1/14での各3回(MA3-06D3は単調、CA3N06D3は各10回)の繰り返し荷重とした。PC鋼棒、普通鉄筋および横補強筋のひずみは、所定位置に貼付した検長2mmの箔ゲージにより測定した。ヒンジ領域の変形は、図3に示す位置で試験体中に埋め込んだ変位測定用ボルトに取り付けたダイヤルゲージ型変位変換器および高感度変位変換器によって水平変形、鉛直変形および斜変形をそれぞれ測定した。

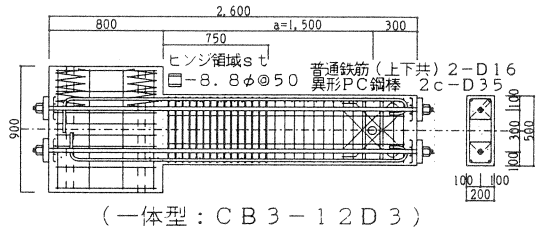
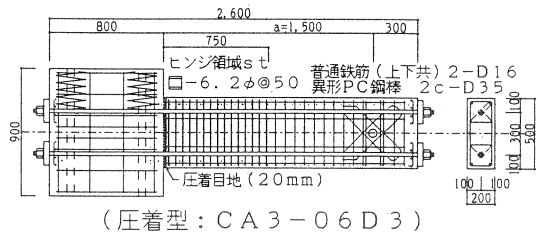


図1 試験体配筋例

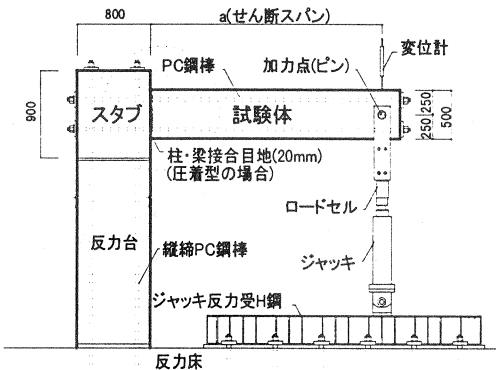


図2 荷重方法

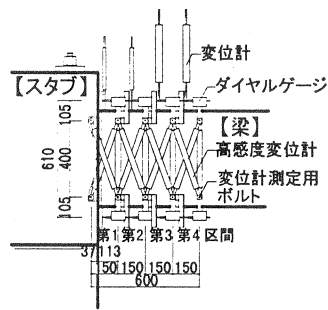


図3 塑性ヒンジ領域の変形測定法

3. 実験結果および考察

3.1 荷重(P)－変形(δ)関係

図4は、シアスパン比(a/D)が3である、図5は、a/Dが5である代表的な試験体についての荷重(P)－変形(δ)関係を示したものである。図4-1はPC鋼材が丸鋼棒で横補強筋比(Pw)が0.6%である、図4-2と図5-1は異形鋼棒でPw=0.6%である、図4-3は異形鋼棒でPw=1.2%である圧着型試験体のP-δ関係を示している。また、図4-4はPw=1.2%、図5-2はPw=0.6%で異形鋼棒を用いた一体型試験体のP-δ関係である。図中には各繰り返し荷重ステップにおける1サイクル目と3サイクル目の包絡線を破線により示している。図6および7は各試験体のP-δ関係における特徴をまとめて比較したもので、図6は各ループの包絡線の比較である。同図では、図4-1、4-2、4-4の3試験体の1サイクル目の包絡線を実線で、3サイクル目の包絡線を破線で表している。いずれの試験体も3サイクル目の耐力が1サイクル目より低下しており、この傾向は部材角が大なるほど顕著となる。PC鋼材種が異形鋼棒の場合の圧着型(図中A・D)と一体型(図中B・D)を比較すると、1および3サイクル目のいずれの包絡線も、圧着型では普通鉄筋およびそのひずみ効果による耐力増加がないため、一体型のそれよりも早期に耐力低下を起こすものになっている。また、圧着型であっても、PC鋼棒に異形鋼棒を用いた場合(図中A・D)は、その良好な付着効果により部材角がR=1/50にいたる前に鋼材が降伏(その4、図1のPC鋼材ひずみ分布参照)するのに対し、丸鋼棒を用いた場合(図中A・R)はR=1/20

程度にならないと降伏しないため、いずれの荷重ステップでも前者の荷重が後者のそれより大きくなっている。この結果は既報^{文献1), 2)}での単調載荷実験による結果と符号している。

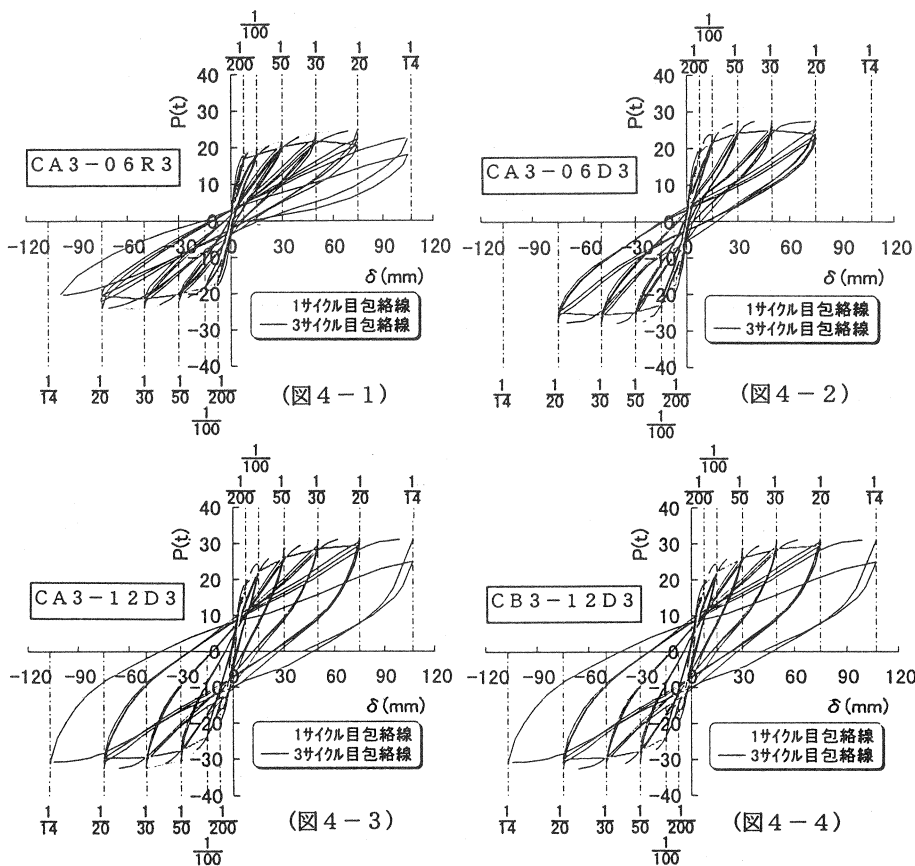


図4 代表的な a/D=3 の試験体の荷重(P) - 変形(δ)関係

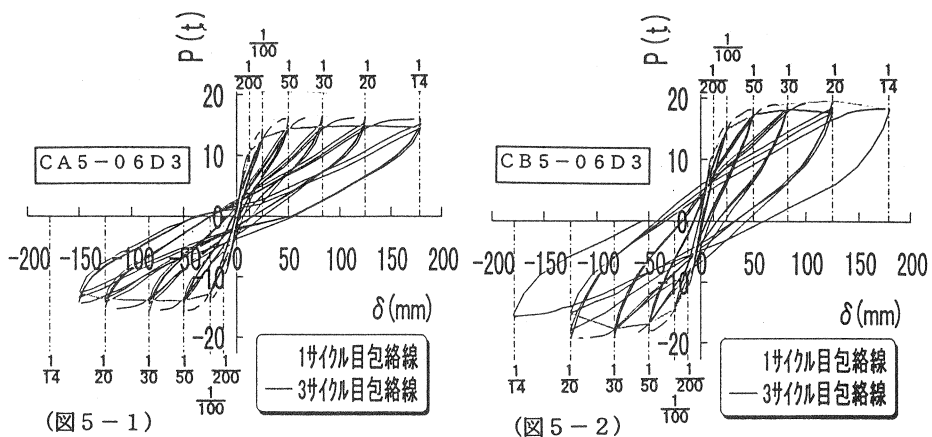


図5 a/D=5 の試験体の荷重(P) - 変形(δ)関係

図7は、図6と同一の3試験体について、部材角 $R=1/30$ 時の3サイクル目ループを重ねて示したものであるが、そのループ形状の差異が明確に現れている。圧着型のループ(図中A・DおよびA・R)は圧着接合面に普通鉄筋がないため、一体型のそれ(図中B・D)に比べ痩せたループとなっている。また、同じ圧着型タイプするとき、PC鋼材種が異なる場合を比べると、異形鋼棒を用いた試験体は荷重-変形が大となったとき、剛性が若干高くなる点が認められる。これは、PC鋼棒の塑性化によるプレストレスの減退(その4、図7、8参照)に伴って生じるピンチ効果的な現象、あるいは、異形鋼棒が付着劣化したときの τ - S 特性に起因するものではないかと考えられる。なお、図4、図5に示すように、横補強筋比(P_w)の違いが P - δ 関係に及ぼす影響およびシアスパン比(a/D)が端部曲げモーメント(M)-塑性ヒンジ回転角(θ)に及ぼす影響はほとんど見られなかった。

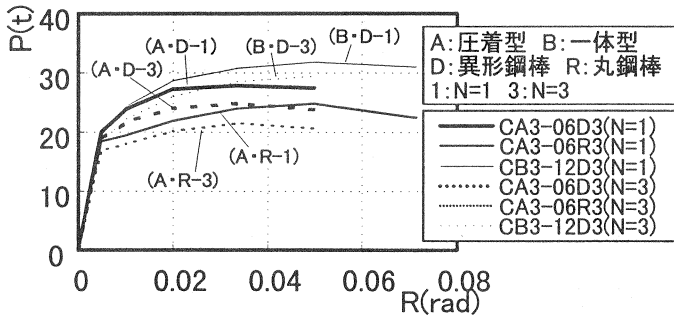


図6 P-R関係包絡線比較

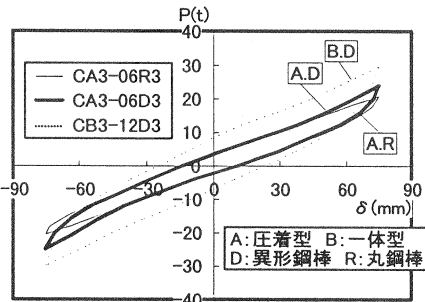


図7 ループ形状比較
($R=1/30$, 3サイクル目)

3.2 等価粘性減衰定数(h_{eq})

図8は、図4に示した中の代表的な3試験体の荷重-変形関係から得られる等価粘性減衰定数(h_{eq})が部材角(R)の増大に対しどのように変化するかを調べたものである。図中、実線が1サイクル目のループで得られる h_{eq} を、破線が3サイクル目のループで得られるそれを示している。いずれの試験体も、1サイクル目の h_{eq} は3サイクル目のそれより大きく、また R が大きくなるほど h_{eq} が増大する傾向がある。異形鋼棒を用いた一体型の試験体(図中B・D)では、1サイクル目・3サイクル目のいずれの h_{eq} も R の増大に対して増加率は漸減するが増大し、 $R=1/20$ 程度では1サイクル目で13%、3サイクル目で10%にも達する。これに対し圧着型の試験体では、1サイクル目の h_{eq} は、異形鋼棒の場合には $R=1/50$ までの小さい部材角での増大幅が大きい、その後の増大量は小さく、前者で $h_{eq}=10\%$ 、後者で $h_{eq}=8\%$ 程度に収束している。また、3サイクル目の h_{eq} は、異形鋼棒、丸鋼棒のどちらの場合でも部材角 $R=1/30 \sim 1/20$ 間で顕著に増大するが、部材角 $1/20$ に到っても6%程度と小さな値を示す。

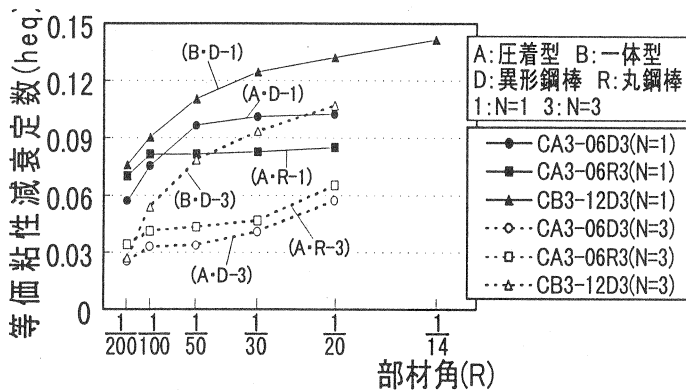


図8 等価粘性減衰定数(h_{eq})-変形角(R)関係

図9に各載荷ステップでの繰り返し回数が等価粘性減衰定数 h_{eq} におよぼす影響を示す。10回繰り返し載荷

を行った場合、3回繰り返し載荷の場合に比べると、R=1/50以降、1サイクル目のheqの低下がRの増大にともない著しくなる。また、3サイクル目のheqに着目すると、部材角の増大にともなうheqの上昇が顕著となる。なお、繰り返し回数が10回の試験体によれば、3サイクル目のheqと10サイクル目のそれとは、ほとんど大差がなかった。

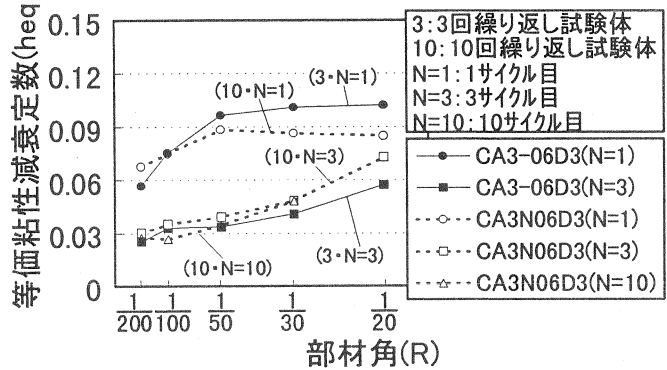


図9 等価粘性減衰定数(heq) - 変形角(R)

3.3 残留変形率

図10は、荷重が零の時の残留変形量を当該載荷ステップの最大変形量で除した残留変形率と部材角(R)の関係を調べたものである。同図によれば、一体型の試験体の残留変形率は圧着型のそれに比べ大きく、またRの増加に伴う増大量も大きい。また、一体型の3サイクル目の残留変形率は1サイクル目のそれより若干小さくなるが、他のいずれの圧着型の残留変形率よりも大きい値を示し部材角1/20でも30%以上の値となる。丸鋼棒を用いた圧着型の試験体は、1サイクル目も3サイクル目もR=1/50以降では10~16%と小さな残留変形率を示すが、異形鋼棒による圧着を行った試験体では、1サイクル目の残留変形率は11~23%程度となるが、3サイクル目のそれは4~15%と丸鋼棒の場合と同程度の小さいものになる。

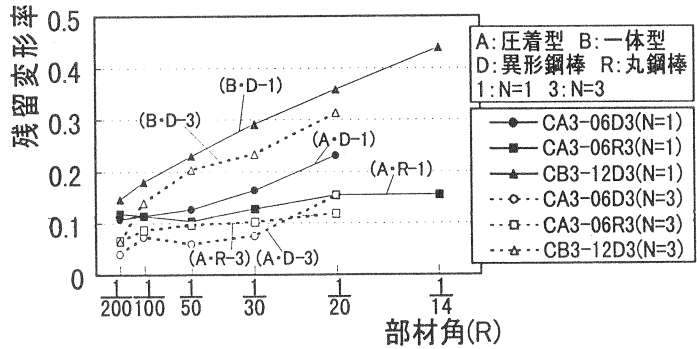


図10 残留変形率 - 変形角(R)関係

3.4 終局変形能力

3.4.1 終局限界点の定義

既往の研究では、終局域を示す指標点として、様々な終局限界点が表示されているが、本実験においても、普通鉄筋の座屈や破断、圧縮部における横補強筋破断およびPC鋼材の塑性化によるプレストレス力減退と付着劣化に起因するスタブ側定着部のアンカープレート浮きあがりなどが観察された。

しかし、ここでは、いずれの試験体にも適用できるように繰り返し載荷による荷重低下が生じる点を終局限界点とした。すなわち、図11に示すように、R1からR2への部材角の増大に対し、R2での1サイクル目と3サイクル目における荷重の低下量bが、R1の1サイクル目と3サイクル目での低下量aよりも大となる時に、R1とR2の間に終局限界点が存在し、その点の終局限界部材角(Ru)は $Ru = R1 + \frac{a}{b}(R2 - R1)$ により与えられると定義した。

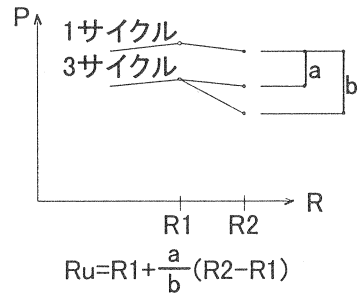


図11 Ru算定法

3. 4. 2 終局回転角の実験値(exp θ_u)と計算値(cal θ_u)

PC梁は、初期プレストレスを軸力とみなせばRC柱と類似すると考えられる。それ故、本研究では、RC柱についての横補強筋量算定式^{文献3), 4)}が、PC梁の本実験結果に対してどのような適合性を示すかを調べた結果を図12に示す。なお、同算定式は、曲げ破壊機構に立脚した解析的・実験的な検討から導かれたもので、各載荷ステップでの繰り返し回数が3回以上の荷重を受けるRC柱部材の終局変形能力(荷重-変形関係の最大耐力の85%点における変形)の実験結果のほぼ下限値を与えるものである。図12によれば、同算定式による終局変形能力は本PC梁部材の終局回転角 θ_u を約1/2程度に評価する。言い換えれば、同算定式で必要とされる横補強筋量を配筋すれば、本実験で用いたシアスパン比が大きい、また、圧着型も含むPC梁に対して、想定 θ_u を十分に超える変形能力が確保できることを示している。また図13は、RC造塑性保証型耐震設計指針(案)^{文献5)}に示されている算定式の、本実験結果に対する適用性を示したものである。同算定式は、せん断補強を主たる対象としているため、シアスパン比の大きな場合には危険側の評価となることが指摘されている^{文献6)}ので、本実験結果に対する適合性については、より詳細な検討が必要と思われる。

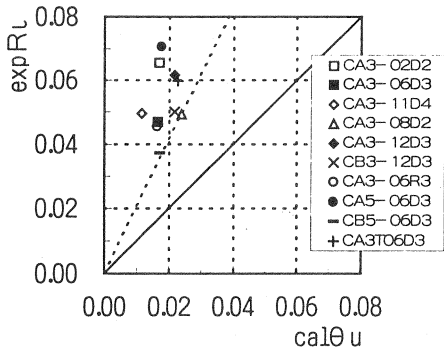


図12 文献3), 4)式

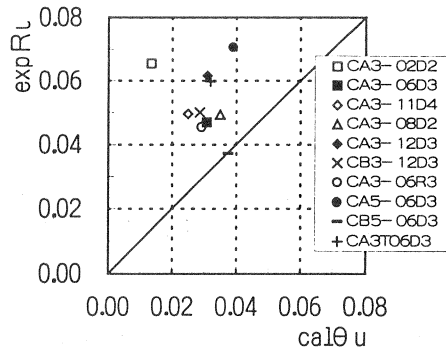


図13 RC塑性保証型式

4. まとめ

柱に圧着接合されたおよび一体型の片持PC梁の、正負繰り返し載荷実験をおこない、その荷重-変形特性および変形能力についての以下のような知見を得た。

- 1) 繰り返し載荷の履歴ループの1サイクル目と3サイクル目の包絡線は、圧着型の場合、普通鉄筋およびそのひずみ効果による耐力増加がないため、一体型の包絡線よりも早期に耐力低下をまねく。また、圧着型であっても丸鋼棒により圧着した場合は付着劣化によりPC鋼材が降伏に達しないため、異形鋼棒で圧着した場合に比べ包絡線の示す耐力は低くなる。
- 2) 荷重(P)-変形(δ)関係のループ形状は、一体型に比べ圧着型の場合は瘦せたループ形状を示す。
- 3) 等価粘性減衰 heq は、同部材角、同ループ回数では、一体型の方が圧着型の場合より大きく、部材角の増大にともなう増大量は小さくなり、部材角1/20で10%以上となる。
- 4) 圧着型の場合、1サイクル目の heq は部材角 $R=1/50$ 以降では異形鋼棒の場合10%程度、丸鋼棒の場合8%程度となり、3サイクル目のそれは部材角1/20で両者ともに6%程度となる。
- 5) 残留変形率は一体型の方が圧着型よりも大きい値を示し部材角1/20でも30%以上となり、丸鋼棒を用いた圧着型の場合は1/50以降では10~16%と小さな残留変形率を示すが、異形鋼棒を用いた圧着型の場合は、1サイクル目の残留変形率は11~23%程度、3サイクル目のそれは4~15%と小さくなる。
- 6) 曲げ破壊機構に立脚したRC柱の横補強筋量算定式^{文献3), 4)}は、本実験で用いたシアスパン比が大きい、また、圧着型も含むPC梁に対して十分な変形能力を与えることがわかった。

◎参考文献、(謝辞)はまとめて(その4)に示す。