

(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1: 荷重-変形特性およびひび割れ性状)

(株)ピー・エス 大阪支店 建築部 正会員 ○石井 孝幸
(株)日建設計 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
同 上 上田 真也

1. まえがき

大地震時においてPC部材の塑性変形によるエネルギー吸収能力を考慮した設計を行うためには、PC梁部材の終局域における変形能力を把握することが最も基本的かつ重要なことである。様々な実験や解析によりPC梁部材に対する塑性域における挙動に関する研究が行われているが、コンクリート、PC鋼材、普通鉄筋の複合体であるPC梁に対して、部材レベルの終局域変形能力を正確にとらえることは難しいのが現状であろう。

本研究は、PC梁部材の塑性域の変形能力を評価することを目的として、梁と柱を圧着接合した場合と一体型とした場合について、シアスパン比、横補強筋量およびPC鋼材種などを変化させた片持PC梁の単調載荷試験を行った。本報告は、同梁の荷重-変形関係、ひびわれ性状、およびせん断変形量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。

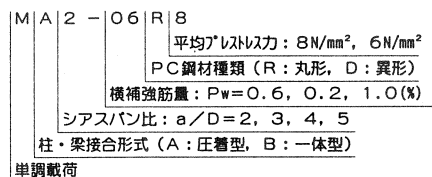
2. 実験概要

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)、シアスパン比($a/D=2, 3, 4, 5$)、横補強筋量($P_w=0.2, 0.6, 1.0\%$)およびPC鋼材種(丸鋼棒、異形鋼棒)である。なお平均プレストレスは圧着型で 8N/mm^2 (6N/mm^2)、一体型で 6N/mm^2 としている。図1に代表的な圧着型試験体の配筋および断面を例示する。全試験体とも圧縮・引張側に対称な配筋とし、また一体型の普通鉄筋は柱スタブ内に定着させている。載荷は図2に示す方法により単調載荷を行った。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。なお、横補強筋のひずみ(負担せん断力)測定するにあたっては、付着の影響を取り除くため写真1に示すように梁中央部の 30cm 区間を熱収縮チューブで覆った。ヒンジ領域の変形は、図3に示す位置で試験体中に埋め

表1. 試験体概要

試験体名	柱・梁接合形式	シアスパン比 a/D	横補強筋		PC鋼材			普通鉄筋 (上下共)
			配筋	$P_w(\%)$	種類	鋼材量	平均プレストレス	
MA2-06RB	圧着型	2	□-5.6φ#50	0.6	丸鋼棒	2-32φ(B-1)	8N/mm ²	2-D19
MA3-06RB		3						
MA5-06RB		5						
MA3-02RB		3	□-3.6φ#50	0.2	異形鋼棒	2-26φ(C-1)	6N/mm ²	
MA3-06DB MA3-06R6			□-5.6φ#50	0.6	丸鋼棒			
MB2-06R6	一体型	2	□-5.6φ#50	0.6	丸鋼棒	2-26φ(C-1)	6N/mm ²	2-D19
MB3-06R6		3						
MB4-06R6		4						
MB5-06R6		5						
MB3-02R6		3						
MB3-10R6			□-7.2φ#50	1.0				
MB5-02R6			□-3.6φ#50	0.2				
MB5-10R6		5	□-7.2φ#50	1.0	異形鋼棒	2-25φ(C-1)		
MB3-06D6 MB5-06D6			□-5.6φ#50	0.6				

*試験体名称解説例



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。なお梁載荷時(材齢84日~109日)におけるコンクリート強度は平均で、36.1N/mm²、グラウト強度は平均で21.0N/mm²、圧着目地モルタル強度は平均で75.2N/mm²であった。

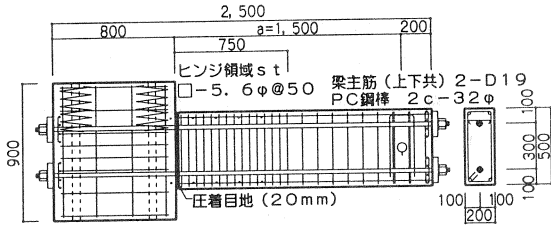


図1. 試験体配筋例 (MA3-06R6)

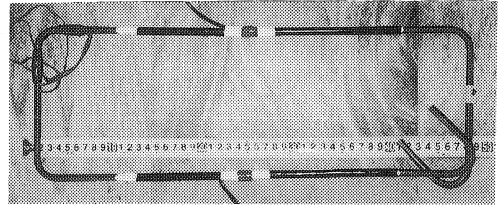


写真1. 横補強筋 (7.2φ)

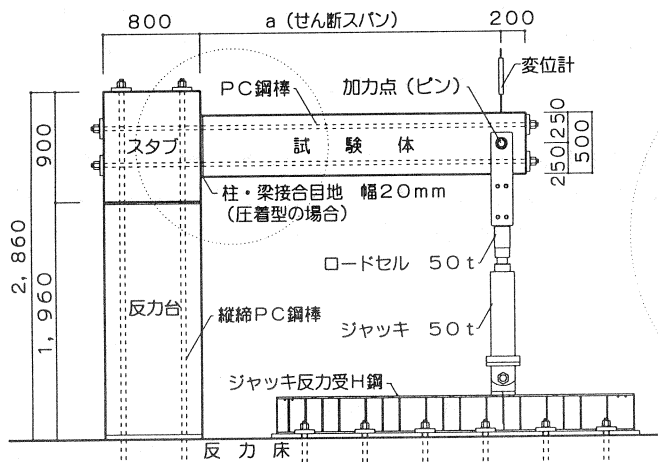


図2. 載荷方法

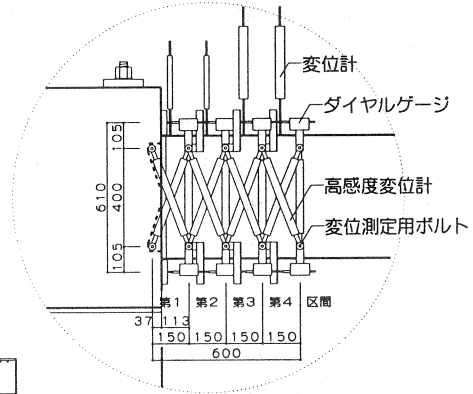


図3 ヒンジ領域変形測定方法

3. 実験結果および考察

3.1 荷重(P) - 部材角(R) 関係

(a) 各種試験体のP-R関係比較

図4および図5に圧着型試験体および一体型試験体の荷重(P) - 部材角(R) 関係を示す。同図中において、実線はPC丸鋼棒、破線はPC異形鋼棒を用いた場合を示す。図4におけるいずれのPC丸鋼棒圧着型のP-R関係(実線)も次の4つの部分で構成される傾向が見られる。① 載荷開始から曲げひび割れ(M_{cr})発生までの初期弾性域の直線部分。② M_{cr}発生後からの剛性低下による曲線部分。③ それに続く、PC鋼棒が降伏するまでの荷重上昇を伴うほぼ直線的な部分。④ PC鋼棒降伏後の荷重上昇が極めて小さい直線的な部分。ここで領域③に注目すると、その開始時(同図□印)の変形角Rには、部材軸方向のモーメント勾配が小さく鋼材の付着応力が小さくなると考えられる、a/Dが大なる場合の方が大きい傾向が見られる。(a/Dが2、3、5に対し、大略Rが0.005、0.007、0.01程度)。また、図4において、付着性能の良いPC異形鋼棒による圧着梁のP-R関係(破線)とPC丸鋼棒によるそれとを比べると、PC異形鋼棒を用いた場合、PC丸鋼棒圧着型より早期にPC鋼材は降伏し、領域③は極めて短くなる。これらのことから、領域③はPC鋼棒の付着劣化に関連するものと推測される。すなわち、(その2)に詳述するが、弾性域にあるPC鋼材の付着が劣化することによって梁材軸方向における鋼材ひずみ分布の一様化とそれに伴う梁耐荷機構のタイドアーチ化に関連するものと考えられる。

一体型試験体の結果を示す図5では、P C丸鋼棒を用いた場合のP-R関係(実線)では圧着型で見られた程、4つの領域は明確ではないが、P C鋼材降伏前のほぼ直線的に耐力が上昇する領域③に類似した傾向が見られる。P C異形鋼棒を用いる(破線)と、その領域は殆ど認められなくなる。なお、4つの領域に関する横補強筋量の影響は圧着型および一体型試験体ともにあまり見られなかった。

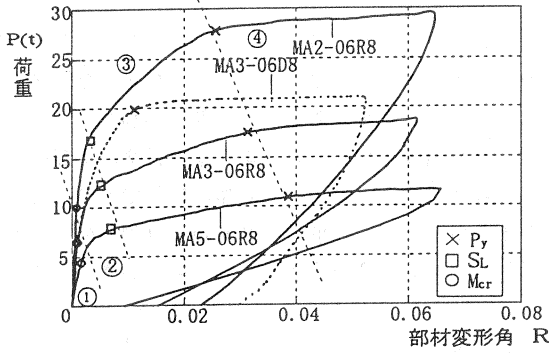


図4. 圧着型試験体の荷重-変形角関係

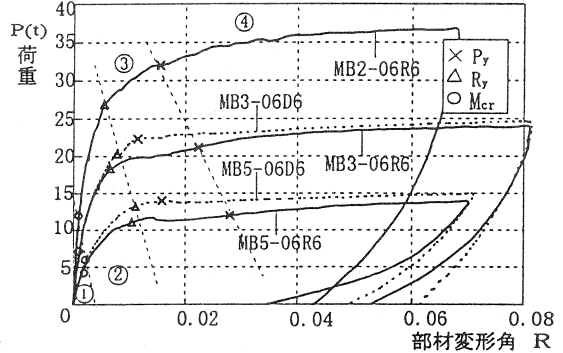


図5. 一体型試験体の荷重-変形角関係

(b) 設計用耐力と実耐力の比較

梁の部材角が1/100、1/50および1/30における荷重の実験値と、実際の材料強度を用いた曲げ耐力計算値から求めた荷重値とを比較したものを表2に示す。同表中、Pcal1およびPcal2はそれぞれP C規準⁽¹⁾の曲げ破壊耐力式およびP R C指針⁽²⁾の終局曲げモーメント式により求めた耐力を、Pexpは実験より得た荷重を示す。同表において、部材角が1/100の場合に着目すると、実験値は計算値Pcal1に対し、P C丸鋼棒圧着型で平均70%、P C丸鋼棒一体型で81%と小さいものとなった。また、この比率はシアスパン比が小となると増大する傾向が見られた。これらの理由は、P C丸鋼棒を用いた各部材のP-R関係では、R=1/100時点では前述の領域③内にあり、したがってP C鋼材は弾性で、その応力が付着劣化によって材長方向に平均化されたことに起因する現象と考えられる。一方、P C異形鋼棒を用いた部材でのこの比率は、圧着型、一体型のいずれの場合でも1前後の値となり、P C異形鋼棒の場合、R=1/100でほぼ計算耐力を満足することが分かる。この計算値に対する実験値の比率は、上述したようにP C鋼材の応力に直接的に関係するため、P C丸鋼棒の場合でも導入時応力が高くなれば、実験値に対する計算値の比は1に近づくと考えられる。因みに本実験では、規格の降伏応力に対する導入時応力の比は約51%であった。

表2. 設計用耐力と実耐力の比較

P C鋼棒 形状 形式	部材角(R)	1/100			1/50			1/30			
		Pcal1	Pexp	平均値	Pcal1	Pexp	平均値	Pcal1	Pexp	平均値	
		Pcal2	Pcal1	Pcal2	Pcal1	Pcal2	Pcal1	Pcal2	Pcal1	Pcal2	
圧着型	丸	MA2-06R8	21.8	26.3		28.5					
			30.4	0.72	0.87	1.00	0.91	1.04	1.04		
			29.0	0.78	0.94	1.02	1.02	1.13	1.13		
	丸	MA3-02R8	13.8	15.6		17.4					
			20.3	0.98	0.77	0.86					
			18.7	0.74	0.83	0.93					
	丸	MA3-06R8	13.6	15.7		17.7					
			20.3	0.67	0.77	0.87					
			18.7	0.73	0.84	0.95					
	鋼	MA3-06R6	12.7	14.8		16.1					
			16.1	0.70	0.92	0.82	1.00	0.91			
			14.6	0.87	1.01	1.10					
鋼	MA5-06R8	8.15	9.30		10.5						
		12.2	0.67	0.76	0.89	0.86	0.99				
		11.2	0.73	0.83	0.94						
一体型	丸	MA3-06D8	19.5	20.8		20.9					
			20.1	0.97	1.03	1.03	1.04	1.04			
			18.5	1.05	1.12	1.12	1.13	1.13			
	丸	MB2-06R6	30.0	33.2		35.4					
			35.7	0.84	0.93	0.99					
			30.7	0.98	1.08	1.15					
	丸	MB3-02R6	19.9	21.2		22.2					
			23.8	0.84	0.89	0.93					
			20.5	0.97	1.03	1.08					
	丸	MB3-06R6	19.9	20.7		22.4					
			23.8	0.82	0.87	0.94					
			20.5	0.96	1.01	1.09					
鋼	MB3-10R6	20.8	21.7		23.5						
		23.8	0.87	0.91	0.99						
		20.5	1.00	1.06	1.15						
鋼	MB4-06R6	13.2	14.0		15.6						
		17.9	0.74	0.78	0.87						
		15.4	0.88	0.91	1.01						
鋼	MB5-02R6	11.5	12.1		13.0						
		14.3	0.80	0.85	0.91						
		12.3	0.83	0.89	1.08						
鋼	MB5-06R6	10.9	11.4		12.5						
		14.3	0.76	0.81	0.86	0.92	0.92				
		12.3	0.89	0.93	1.01						
鋼	MB5-10R6	11.8	11.7		12.7						
		14.3	0.83	0.82	0.99	0.89	1.07				
		12.3	0.96	0.95	1.03						
鋼	MB3-06D6	21.6	22.8		23.2						
		23.1	0.94	0.99	1.00						
		19.8	1.09	1.15	1.17	1.17	1.01				
鋼	MB5-06D6	12.95	13.8		14.1						
		13.8	0.94	1.00	1.02	1.01	1.01				
		11.9	1.09	1.16	1.16	1.18	1.18				

3. 2 塑性ヒンジ領域のひび割れ性状

図6は、シアスパン比が2、3および5である、P C丸鋼棒を用いた圧着型および一体型の試験体、ならびにシアスパン比が3でP C異形鋼棒を用いた試験体の試験終了後のひび割れ状況を示したものである。なお、ひび割れ性状におよぼす横補強筋量による影響はあまり見られなかったため、いずれも $P_w=0.6\%$ の試験体について記述した。

図6より、P C丸鋼棒を用いた圧着型の試験体ではシアスパン比 (a/D) が2 (MA2-06R8)、3 (MA3-06R8)、5 (MA5-06R8) のいずれの試験体でもひび割れは圧着部以外にはほとんど見られなかった。また、 a/D が2の場合でも(曲げ)せん断ひび割れは発生しなかった。丸鋼圧着型の圧着部ひび割れは、部材変形の増大とともに進展し、(その2)で後述するように、P C鋼棒の付着劣化による梁部材側および柱スタブ側からこのひび割れ内へのP C鋼棒の顕著な抜け出しが観測された。一方、圧着型の部材でもP C異形鋼棒を用いた場合 (MA3-06D8) には、圧着部以外にもひび割れは分散し、(曲げ)せん断ひび割れの発生も見られた。部材変形の増大に伴う圧着部のひび割れ幅の進展は、P C丸鋼棒を用いた場合より小さかったが、圧着部以外のひび割れのそれよりは大きかった。

一体型 (MBシリーズ) 部材のひび割れ性状は圧着型とは異なり、全部材ともにひび割れは分散して発生し、曲げひび割れおよび(曲げ)せん断ひび割れが見られた。引張側におけるひび割れピッチは15cm前後で観察された。

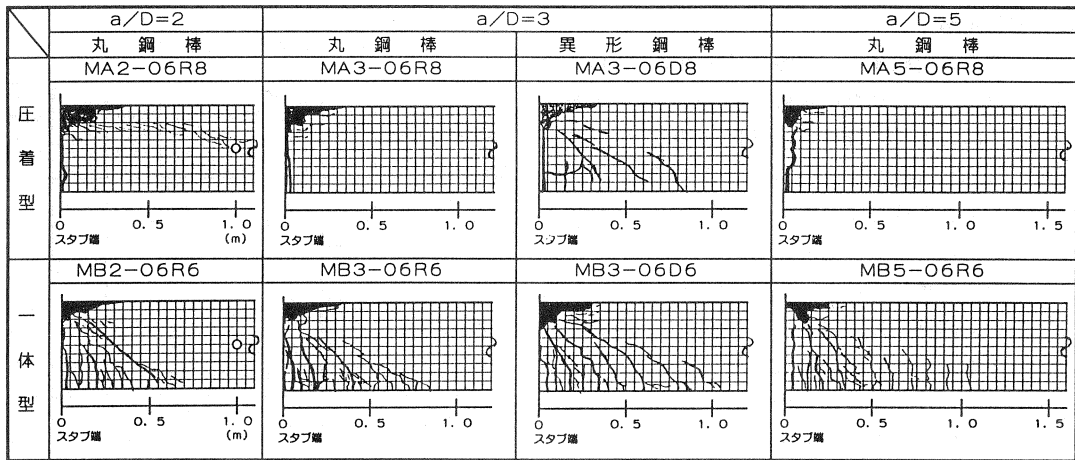


図6 ひび割れ性状

3. 3 塑性ヒンジ領域のせん断変形成分比

塑性ヒンジ領域では曲げ変形が大半を占めると考えられるが、同領域 (図3の第1~4区間) での全体変形 (δ) に対するせん断変形成分 (δ_s) の比率を図7~9に示す。なお、同図中において○、□、△、×印はそれぞれ曲げひび割れ発生、(曲げ)せん断ひび割れ発生、主筋降伏およびP C鋼棒降伏時を示す。また、測定器の精度等から曲げひび割れ発生後について示す。

図7は、シアスパン比 (a/D) が全体変形に対するせん断変形の比率 (δ_s/δ) におよぼす影響を調べるため、P C丸鋼棒を用いた a/D が2、3および5の一体型試験体 (MB2-06R6、MB3-06R6、MB5-06R6) の結果、ならびにP C鋼棒種の影響を比較するため異形鋼棒を用いたシアスパン比が3の一体型試験体 (MA3-06D6) の結果も併せて示す。同図によれば、いずれの試験体でも、せん断ひび割れ発生 (同図□印) 後、せん断剛性の低下によってせん断変形は増加し、 δ_s/δ も増加する。しかし、普通鉄筋が降伏 (同図△印) す

ると、曲げ剛性が低下して荷重（せん断力）の増加は小となり、また、曲げ変形が増大するため、 $\delta s/\delta$ は徐々に減少する傾向を示す。シアスパン比が異なる3試験体のせん断ひび割れ以降では、 a/D が小さくなるほど、すなわちせん断がより卓越するほど $\delta s/\delta$ は大きくなる傾向が見られ、 $a/D=2$ の $\delta s/\delta$ は最大で0.4にも達する。また、 $a/D=3$ でP C鋼材種が異なる2体を比較すると、普通鉄筋降伏以降において付着の良いP C異形鋼棒を持つMA3-06D6試験体の方がP C丸鋼棒のMA3-06R6試験体よりも若干大きい $\delta s/\delta$ 値を示している。

図8は、横補強筋量のみが異なる（ $P_w=0.2\%$ 、 0.6% 、 1.0% ）、P C丸鋼棒を用いたシアスパン比が3の一体型試験体（MB3-02R6、MB3-06R6、MB3-10R6）についての結果を示す。いずれの試験体の $\delta s/\delta - R$ 関係も図7と同様の傾向を示した。MB3-06R6試験体とMB3-10R6試験体は、作用せん断力に対して十分な横補強筋が配筋されていたため、 $\delta s/\delta$ にほとんど差が認められないが、MB3-02R6試験体では、作用せん断力に対して横補強筋量が不十分で、せん断ひび割れ幅が増大したため、前2体に比べ大きな $\delta s/\delta$ を示し、最終的にはせん断破壊した。

圧着型試験体についての結果を図9に示す。同図中には、シアスパン比が異なる（ $a/D=2$ 、 3 、 5 ）P C丸鋼棒を用いた試験体（MA2-06R8、MA3-06R6、MA5-06R8）とシアスパン比が3のP C異形鋼棒を用いた試験体（MA3-06D8）の結果を示している。せん断ひび割れが発生しなかったP C丸鋼棒を用いた圧着型試験体では、圧着部におけるずれ変形の発生が推測されるが、曲げひび割れ発生（同図○印）後の曲げ剛性の低下およびP C鋼材のスタブからの抜け出しなどによって曲げ変形が卓越するため、 $\delta s/\delta$ は単調減少し、部材角（ R ） $1/50$ 程度でほぼ一定値に収束する傾向が見られた。なお、同収束値はMA2-06R8試験体で約0.1、MA3-06R6試験体で約0.04、MA5-06R8ではほぼ0と、シアスパン比が小さいほど $\delta s/\delta$ は大きくなる傾向が見られる。一方、P C異形鋼棒を用いたMA3-06D8試験体では、一体型試験体に比べればその大きさは小さいがせん断ひび割れ後の $\delta s/\delta$ の増加が見られた。なお、横補強筋量についても同様な検討を行ったが、圧着型試験体では横補強筋量が $\delta s/\delta$ におよぼす影響は明確ではなかった。

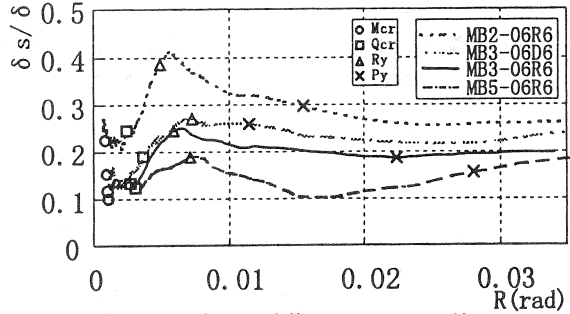


図7. 一体型試験体でシアスパン比、P C鋼材種が異なる場合の全体変形に対するせん断変形の比率

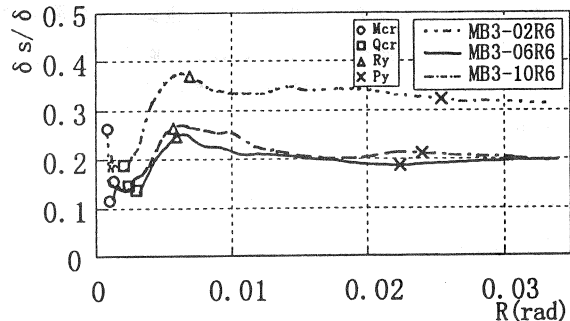


図8. 一体型試験体で横補強筋量が異なる場合の全体変形に対するせん断変形の比率

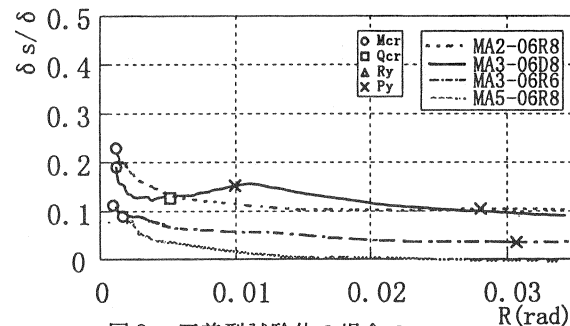


図9. 圧着型試験体の場合の全体変形に対するせん断変形の比率

4. まとめ

1) 丸形PC鋼棒により圧着したPC梁の荷重-部材角関係は次の4つの領域で構成される傾向が見られた。
① M_{cr} までの初期弾性域の直線部分、② M_{cr} 後から剛性低下までの曲線部分、③PC鋼棒降伏までの荷重上昇を伴うほぼ直線的な部分および④PC鋼棒降伏後の直線部分。

2) 梁の部材角が $1/100$ における耐力実験値の計算値に対する比率は、異形PC鋼棒を用いた場合、圧着・一体型いずれに対しても1前後の値となったのに対し、丸鋼棒圧着型および一体型では丸鋼棒の付着劣化のために1より小さいものとなった。

3) PC丸鋼棒により圧着接合したPC梁では、鋼棒の付着劣化のために曲げひび割れが圧着部のみに生じるが、PC異形鋼棒を用いた場合には、圧着部以外にもひび割れは分散し、(曲げ)せん断ひび割れの発生も見られた。一体型のPC梁は丸形、異形いずれのPC鋼棒の場合でも圧着型よりもひび割れは分散して発生し、曲げひび割れおよび(曲げ)せん断ひび割れが見られた。

4) 全体変形に対するせん断変形の比率には、次のような特徴が見られた。一体型試験体の場合、同比率はせん断ひび割れ発生によるせん断剛性の低下により増加するが、主筋降伏後は曲げ変形の増大によって減少する傾向が見られた。また、同比率はシアスパン比が小さいとき、およびせん断補強筋が少ないとき大となり、PC異形鋼棒を用いた場合の方が丸鋼棒の場合より若干大きな値を示した。一方、せん断ひび割れが発生しない、PC丸鋼棒を用いた圧着型試験体の場合、シアスパン比が小さいときほど大きな値に収束するように、全変形の増大とともに同比率は減少した。

[謝辞] 本研究の一部は、(社)建築研究振興協会に設けられた共同研究「PC構造設計・施工指針の作成」^[3]の研究調整委員会(委員長 岡本 伸)に所属する構造性能評価WG(主査 渡邊史夫)で行われたものである。また、横補強筋の製作には、高周波熱錬(株)の多大なる御助力を賜った。以上記して謝意を表する。

[参考文献]

[1] 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、1987年

[2] 日本建築学会：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、1986年

[3] 岡本伸、他：「PC構造設計・施工指針の開発(研究概要)」共同研究 PC構造設計・施工指針の作成 平成8年度研究報告書、平成9年3月

[4] 阿波野昌幸、他：「圧着型および一体型片持PC梁の荷重-変形特性(その1. 実験概要および荷重-変形特性)」日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、1997年9月

[5] 石井孝幸、他：「圧着型および一体型片持PC梁の荷重-変形特性(その2. ひび割れ状況、PC鋼材のひずみ分布および曲率分布)」日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、1997年9月