

論文 セン断筋埋込みハーフプレキャスト部材を用いた高橋脚の耐荷性能

林 秀彦*1・菊地 弘*2・崎山 郁夫*2・長澤 保紀*3

要旨：大断面高橋脚等に適用するセン断補強筋を埋め込んだPCa部材を用いた省力化工法について実験的検討を行なった。太径鉄筋の使用や主筋とセン断補強筋のはなれの影響等を評価するために、D51鉄筋を使用し、PCa部材の厚さ、かぶり等を実大構造物と同様な寸法にして、正負交替載荷実験を行った。この結果、本工法により製作した試験体は、従来工法の試験体と同等の耐荷性能を有することを確認した。また、主筋とセン断補強筋のはなれ等に起因する不具合は認められなかった。

キーワード：省力化、PCa、太径鉄筋、載荷実験、セン断補強筋

1. はじめに

近年、高速道路橋等において高さ 50m クラスの高橋脚の建設が計画され、現場での省力化、工期短縮が、検討されている。一方で、建築の柱等では、主に工場製作によるプレキャスト部材（以下、PCa部材と記す）を用いた工法が提案、実用化されている [1]。そこで、橋脚の規模、揚重機の仕様および地理的条件を考え、セン断補強筋を埋め込んだ箱形のPCa部材を積み重ね、その内側に柱主筋を配置した後、後打ちコンクリートを打設する工法（以下、ハーフPCa工法と記す）を考案した。しかし、橋脚等の大断面構造物にセン断筋埋込みPCa部材を適用した例は少なく、本工法の適用においては、PCa部材の多段積み重ねによるPCa部材接合面の応力伝達や、後打ちコンクリートとの一体性、セン断補強筋の補強効果について検討する必要がある。これらの検討項目を明らかにするために、実物大規模の実験を行

い、部材としての耐荷性能を検討した。

2. 実験概要

2. 1 試験体

試験体の一覧を表一1に、試験体配筋

を図一1に示す。今回の検討対象として、高さ 50m クラスの高橋脚で中実断面橋脚あるいは壁式橋脚を考えると、断面高さは 1m 以上、また、現地での揚重機規模を考えると、PCa部材の厚さは 100mm 程度となる。試験体はできるだけ実物大に近い断面とするため、1000mm×900mm の長方形断面の柱試験体とした。試験体の製作は、比較のため従来工法（一体打ち）と

ハーフPCa工法の 2 種類とし、全部で 4 体（OM, PM, OS, PS）とした。破壊形式が曲げ破壊型（M シリーズ試験体）、

表一1 試験体一覧

試験体名	工法	セン断スパン比 a/d	主筋	セン断補強筋
OM	従来工法	4.82	D51ねじふし ps = 1.68 %	D22 ctc 250 pw = 0.34 %
PM	ハーフPCa			
OS	従来工法	3.61	D51ねじふし ps = 2.59 %	D16 ctc 250 pw = 0.18 %
PS	ハーフPCa			

表二2 コンクリートの材料試験結果

試験体	部位	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
OM	柱部	292	25	2.64×10 ⁵
	柱部(中詰)	292	27	2.69×10 ⁵
	PCa部材	398	30	3.10×10 ⁵
PM	目地モルタル	612	—	—
	柱部	283	25	2.66×10 ⁵
	柱部(中詰)	287	25	2.66×10 ⁵
OS	PCa部材	390	28	3.20×10 ⁵
	目地モルタル	724	—	—

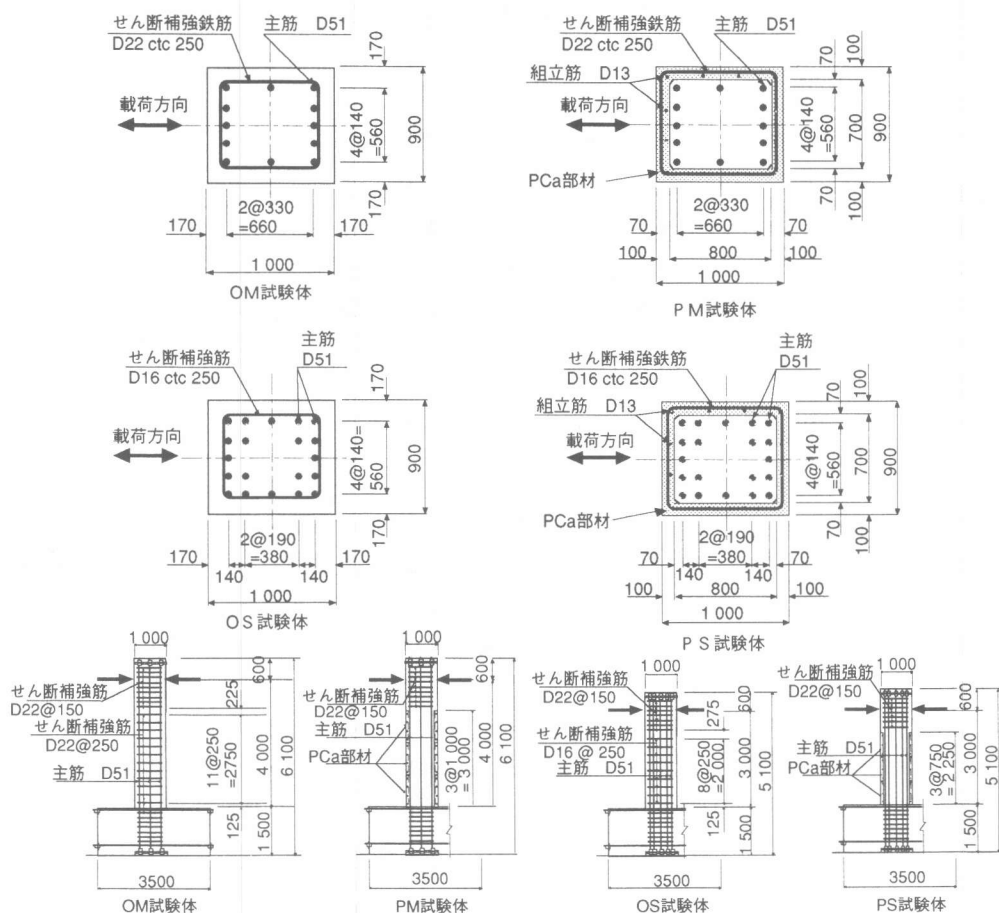
表三3 鉄筋の材料試験結果

規格	呼び名	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	伸び率 %	適用
SD345	D51	3960	5773	1.96×10 ⁶	27	柱主筋(全試験体)
SD345	D22	3970	5761	1.87×10 ⁶	16	セン断補強筋(OM,PM)
SD345	D16	3776	5416	1.86×10 ⁶	18	セン断補強筋(OS,PS)

*1 清水建設（株）技術研究所、工修（正会員）

*2 清水建設（株）土木本部、工修

*3 清水建設（株）技術研究所主任研究員、工修（正会員）



図—1 試験体の配筋

およびせん断破壊型（Sシリーズ試験体）となるように、せん断スパン比（ a/d ）、引張鉄筋比、せん断補強筋比をそれぞれ決めた。柱主筋にはD51ねじふし鉄筋を用い、主筋のかぶり、およびPCa部材の厚さを実大寸法と同一にした。表—2 に使用したコンクリートの材料試験結果を、表—3 に使用した鉄筋の材料試験結果を示す。

PCa部材はせん断補強筋を内蔵し、部材厚 100mm とし、PCa部材高さをPM試験体で 990mm、PS試験体で 740mm とした。コンクリートは圧縮強度を試験時材齢で 400kgf/cm^2 となるように配合を設定した。PCa部材のせん断補強筋に用いる鉄筋は一体打ちの試験体と同一のものをを用いたが、一体打ちの試験体では柱主筋とせん断補強筋が接触しているのに対し、せん断補強筋をPCa部材に内蔵するため、柱主筋との間に約85mmの純あきを設けている。

ハーフPCa工法による試験体（PM,PS）の製作では、高橋脚の実施工を考慮して以下のように行った。まず、せん断補強筋を内蔵したPCa部材を製作した。その際、PCa部材の内側と下側の型枠面、および仕上げ面に凝結遅延剤を塗布または散布して、材齢 2 日目の型枠脱型後に洗いだし処理を施した。次に、鉛直に配筋した主筋の外周にPCa部材を3個積み重ね、接合処理をした後、後打ち（中詰め）コンクリートを打設した。PCa部材間の接合は、無収縮系のモルタルをPCa部材の上面に盛り、モルタルを押しつぶす形でPCa部材を所定の位置に吊り下ろして設置し、PCa部材間の鉛直方向の間隔が平均で10mm になるよう調整した。後打ちコンクリートを打設する際、柱主筋が動かないように柱頭部で仮に固定し、所定のかぶりを確保した。

2. 2 実験方法

載荷装置を図-2 に示す。載荷は静的正負交番載荷とし、柱頭部に取り付けた200tonfアクチュエータにより載荷した。アクチュエータは押し側のみに使用し、引き側となるアクチュエータはフリーになる状態とし、柱頭部に曲げ戻しの力がかからないようにした。フーチングの固定用としてPC鋼棒（ $\phi 32 \times 30$ 本）および200tonfジャッキを使用した。

載荷サイクルを図-3 に示す。アクチュエータの制御は、初期ひび割れ発生までは荷重制御で行い、その後、変位制御で部材角を基本にした載荷を行った。従来工法とハーフPCa工法を比較する上で、載荷履歴をそろえるため、OMとPM、OSとPSの載荷サイクルは同一のものとした。計測は、各点に設置した変位計、および、鉄筋に貼付したひずみゲージにより測定した。

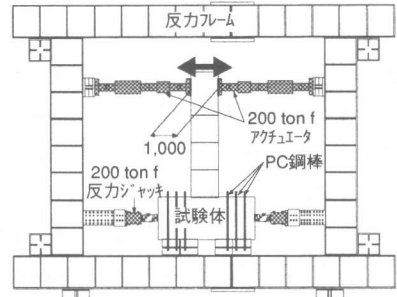
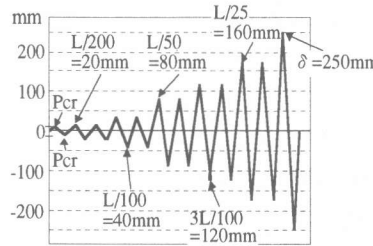
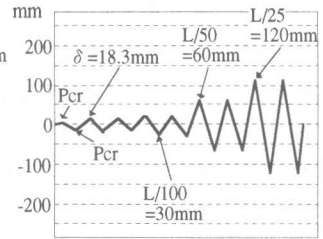


図-2 載荷装置



Mシリーズ試験体の載荷サイクル



Sシリーズ試験体の載荷サイクル

図-3 載荷サイクル

3. 実験結果および考察

表-4 に各試験体の諸荷重と土木学会コンクリート標準示方書に示された方法による計算値との比較を示す [2] [3]。また、柱部降伏は、最外縁鉄筋のうち3本に貼付されたひずみゲージ（3点 $\times$ 2枚=6枚）の計測値が鉄筋の材料試験結果から求めた降伏ひずみの2258 μ に達した時点と設定した。

3. 1 Mシリーズ（OM, PM試験体）

(1) 荷重—変位関係および破壊状況

図-4 にOM, PM試験体の荷重—変位関係を示す。OM試験体については、 $P=11.3\text{tonf}$ （ $\delta=1.77\text{mm}$ ）で初期ひび割れが発生、 $P=89.5\text{tonf}$ （ $\delta=37.3\text{mm}$ ）で最外縁鉄筋が降伏した。 $\delta=L/50$ の載荷サイクルで正側の最大耐力に達し、その後、基部の圧壊が始まった。負側は $\delta=3L/100$ の載荷サイクルで最大耐力に達した。しかしながら、負側の圧縮コンクリートの一部が圧壊したのは、そ

表-4 載荷試験結果一覧

試験体名	載荷方向	ひび割れ発生時			柱部降伏時			最大耐力時		
		荷重 P_{cr} (tonf)	実験値 計算値	変位 δ_{cr} (mm)	荷重 $P_{\delta y}$ (tonf)	実験値 計算値	変位 δ_y (mm)	荷重 P_{max} (mm)	実験値 計算値	変位 $\delta_{P_{max}}$ (mm)
OM	正	11.3	1.18	1.77	89.5	1.14	37.3	93.7	1.07	63.4
	負	-14.1	1.47	-1.73	-86.3	1.10	-35.0	-91.7	1.05	-116.3
PM	正	10.6	1.10	1.08	90.3	1.15	33.9	98.8	1.13	75.6
	負	-12.6	1.31	-1.62	-87.2	1.11	-32.8	-94.8	1.09	-114.3
OS	正	24.5	1.88	1.62	—	—	—	147.0	1.20 *1	28.2
	負	-27.4	2.11	-1.89	—	—	—	-138.7	1.13 *1	-26.7
PS	正	23.7	1.82	1.23	—	—	—	164.3	1.34 *1	29.7
	負	-22.8	1.75	-1.29	—	—	—	-165.7	1.35 *1	-29.7

*1：但し、せん断強度 τ_c は、次式による。 $\tau_c = 0.94\sqrt{f_c}\sqrt{p_w}/\sqrt{1/d}(0.75 + \frac{1.4}{a/d})$

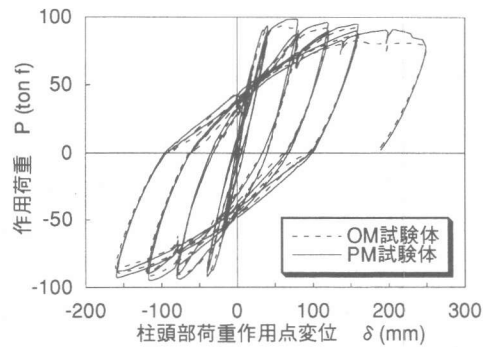
れ以前の $\delta=L/50$ の荷重サイクルで $\delta=-74\text{mm}$ の時点であった。その後、そのサイクルでは完全な圧壊には到らず、 $\delta=3L/100$ の荷重サイクルで最大耐力に達した。最大耐力発生後、圧縮側基部のひび割れ、およびはらみだしが目視により観察されるが、 $\delta=L/25$ まで際立った耐力の低下は見られなかった。 $\delta=250\text{mm}$ ($L/16$)のサイクルで圧縮側基部のはらみだしが顕著になり $\delta=210\text{mm}$ 付近でかぶりコンクリートの剥落、柱主筋の座屈が起きた。

PM試験体については、 $P=10.6\text{tonf}$ ($\delta=1.08\text{mm}$)で初期ひび割れが発生、 $P=90.3\text{tonf}$ ($\delta=33.9\text{mm}$)で最外縁主筋が降伏した。正側、負側とも $\delta=L/50$ の荷重サイクルで基部の一部圧壊がはじまり、正側では $\delta=L/50$ の荷重サイクルで最大耐力に達し、負側ではOM試験体同様、 $\delta=3L/100$ の荷重サイクルで最大耐力に達した。最大耐力発生以降、PM試験体はOM試験体同様、耐力低下の少ない履歴を繰返し、 $\delta=250\text{mm}$ ($L/16$)のサイクルでせん断補強筋より外側のコンクリートが剥落し、柱主筋が座屈、破壊に至った。また、PCa部材と後打ちコンクリートの打ち継ぎ面におけるはだわかれは荷重終了時まで観察されず、PCa部材と後打ちコンクリートの一体性は保たれていた。

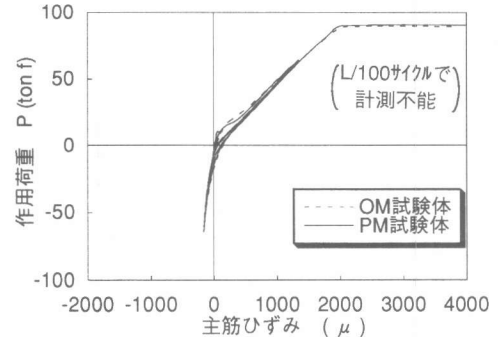
OM、PM試験体を比較すると柱降伏時の荷重は、ほぼ一致している。最大耐力は、PM試験体が5%ほど高くなっている。最大耐力後も、この傾向はつづく。荷重—変位関係をみると、各荷重サイクルでPM試験体が若干高い荷重となっているが、両者はほぼ同等の耐荷性能を有していると考えられる。PM試験体の荷重が若干高くなった理由として、柱の外周部に厚さ100mmあるPCa部材のコンクリートの圧縮強度が 398kgf/cm^2 と、OM試験体の柱部、およびPM試験体の後打ちコンクリート部 292kgf/cm^2 に比較して35%程度高い事が挙げられる。

(2) ひずみ性状

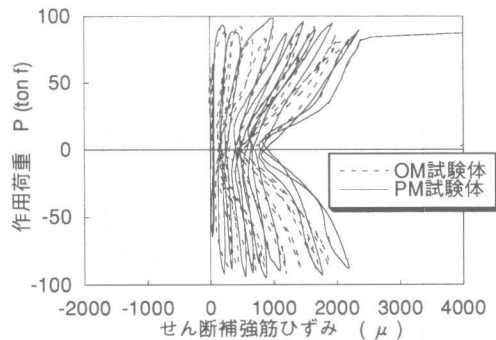
図—5に荷重—主筋ひずみ関係、図—6に荷重—せん断補強筋ひずみ関係を示す。主筋ひずみをみると、OM、PM試験体に差は見られない。このことは、中立軸位置が両者で同じであり、圧縮側コン



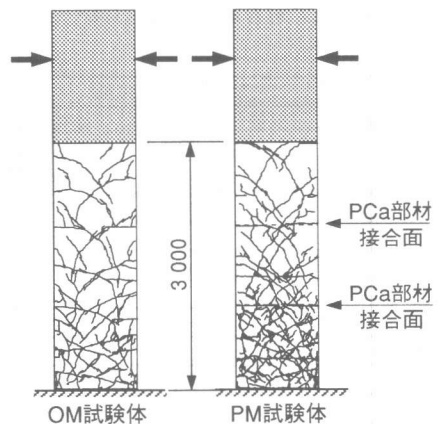
図—4 荷重—変位関係 (OM, PM試験体)



図—5 荷重—主筋ひずみ関係 (OM, PM試験体)



図—6 荷重—せん断補強筋ひずみ関係 (OM, PM試験体)



図—7 ひび割れ状況 ($\delta=L/25$, OM, PM試験体)

クリートの応力伝達がPCa部材間でも十分に機能していることを示す。また、せん断補強筋ひずみを見ても、際だった違いは見られず、同じ载荷サイクル($\delta=L/25$)でせん断補強筋が降伏した。

このことから、PM試験体でせん断補強筋と柱主筋が離れていても、コンクリートを介して応力が十分に伝達され、せん断補強効果、および主筋の拘束効果に大きな差は生じていないと考えらる。

(3) ひび割れ性状

図一七に $\delta=L/25$ 時のひび割れ状況を示す。PM試験体では、PCa部材間の接合部に $\delta=L/200$ でひび割れが発生したが、このひび割れがその後大きく進展することはない、通常の柱試験体に見られる曲げひび割れが進展した。PM試験体は、OM試験体に比較してひび割れ間隔が狭くなった。これは、せん断補強筋がOM試験体に比較して断面外周部に近く配置されているため、ひび割れの分散性が良くなることに起因すると考えられる。

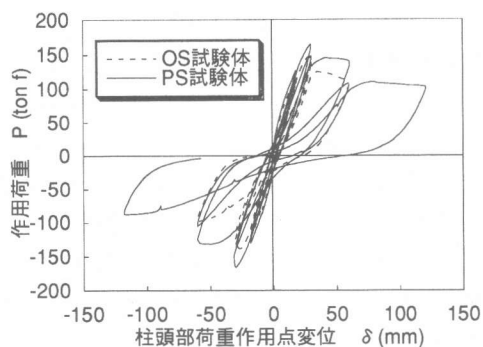
3. 2 S シリーズ (OS, PS試験体)

(1) 荷重—変位関係および破壊状況

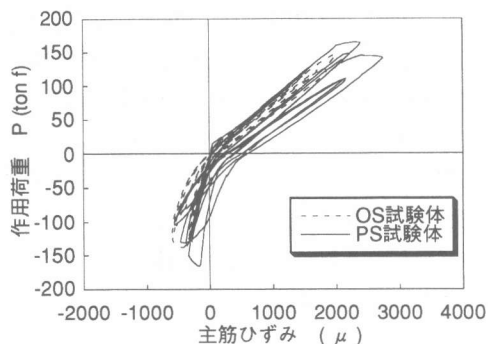
図一八にOS, PS試験体の荷重—変位関係を示す。OS試験体については、 $P=24.5\text{tonf}$ ($\delta=1.62\text{mm}$)で初期ひび割れが発生し、 $\delta=L/100$ の载荷サイクルの $P=116.0\text{tonf}$ ($\delta=19.42\text{mm}$)でせん断補強筋が降伏し、その後、圧縮側柱基部が圧壊した。 $\delta=L/50$ の载荷サイクルになると、ひび割れ幅が拡大し、急激な耐力の低下が見られた。 $\delta=60\text{mm}$ でかぶりコンクリートの広範囲な剥落が起こり、この载荷サイクルで载荷を終了した。

PS試験体については、 $P=23.7\text{tonf}$ ($\delta=1.23\text{mm}$)で初期ひび割れが発生し、OS試験体と同じ $\delta=L/100$ の载荷サイクルの、 $P=128.2\text{tonf}$ ($\delta=19.58\text{mm}$)でせん断補強筋が降伏し、その後、圧縮側柱基部が圧壊した。 $\delta=L/50$ の载荷サイクルでも急激な耐力の低下は見られず、 $\delta=60\text{mm}$ (2回目)でもOS試験体の $\delta=60\text{mm}$ (1回目)と同等の耐力を有していた。 $\delta=L/25$ でせん断補強筋より外側のかぶりコンクリートの剥落がおきた。

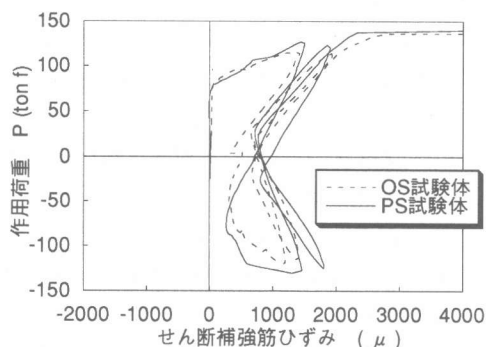
最大耐力で見ると、OS試験体に対しPS試験体は15%程度高い値となった。この理由として、Mシ



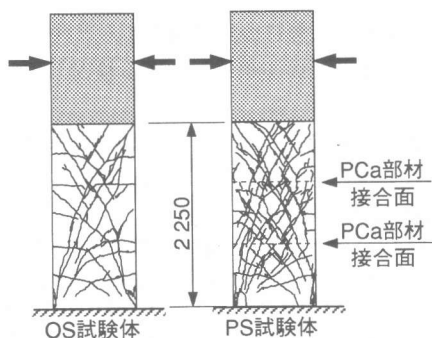
図一八 荷重—変位関係 (OS, PS試験体)



図一九 荷重—主筋ひずみ関係 (OS, PS試験体)



図一〇 荷重—せん断補強筋ひずみ関係 (OS, PS試験体)



図一一 ひび割れ状況 ($\delta=L/50$, OS, PS試験体)

リーズ同様、PCa部材のコンクリート圧縮強度が高いことが挙げられる。また、PS試験体のせん断補強筋がOS試験体に比較して断面外周部に近く配置されていることが、かぶりコンクリートの剥落を遅れさせ、急激な耐力低下を起こさなかったことも一因であると考えられる。

(2) ひずみ性状

図-9に荷重—主筋ひずみ関係、図-10に荷重—せん断補強筋ひずみ関係を示す。

OS試験体では、主筋の柱基部は降伏せず、それに対し、PS試験体では、 $\delta=L/50$ の載荷サイクルで主筋が降伏した。せん断補強筋のひずみをみると、両試験体とも、 $P=80\text{tonf}$ 付近からひずみが急激に増加し、 $\delta=L/100$ の載荷サイクルで降伏した。図-10からみても判るとおり、両者のせん断補強効果に大きな差は見られなかった。

(3) ひび割れ性状

図-11に $\delta=L/50$ 時のひび割れ状況を示す。両試験体とも、 $P=80\text{tonf}$ 付近でせん断ひび割れが入り、荷重の増加とともに進展していった。PS試験体の場合、せん断ひび割れはPCa部材間の接合面まで進展した後、ひび割れの伸びる方向を接合面に沿った方向（水平方向）に変化する。その後、荷重が増加すると、上部のPCa部材に入ったひび割れと下部のひび割れがつながり、1本のせん断ひび割れとなった。このように、せん断ひび割れが一气にはつながらないことは、PS試験体の最大耐力がOS試験体に比較して高くなった理由のひとつと考えられる。また、ひび割れ間隔をみると、OS試験体のそれに対しPS試験体ではかなり狭くなっておりひび割れの分散性が良かった。これは、両者のせん断補強筋の位置の違いによるかぶりの大きさに起因していると考えられる。

4. まとめ

建設現場での省力化、工期短縮を目指した、せん断補強筋埋込みPCa部材を用いたハーフPCa工法の高橋脚等への適用をふまえ、PCa部材の厚さ、使用鉄筋、かぶり等を実大規模に合わせた柱の載荷実験の結果、以下のような知見を得た。

- 1)ハーフPCa工法によって製作された試験体は、従来工法（一体打ち）とほぼ同等の耐荷性能、変形性能を有している。
- 2)せん断補強筋が主筋と接しているか、離れているかによるせん断補強効果の違いは見られなかった。しかし、せん断補強筋のかぶりの大小に起因して、ハーフPCa工法の方がひび割れの分散性が良く、かぶりコンクリートの剥落防止効果が優れていた。
- 3)PCa部材と後打ちコンクリートのはだわかれは、本実験の範囲では見られず、採用した洗いだし処理によって両者の一体性が確保されたものと考えられる。

今後の課題として、より効率的なPCa部材間の接合方法、PCa部材と後打ちコンクリートの打ち継ぎ面処理方法等について検討すると共に、より規模の大きい高橋脚での利用が考えられる箱型断面等への本工法の適用についても検討していく必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、東京大学 岡村甫教授から貴重なご助言をいただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)例えば、香田伸次・斎藤豊・山田信一・中澤春生：遠心成型外殻を用いたハーフPCa柱のせん断性状に関する実験、日本建築学会大会学術講演概要集（北陸）、pp.993～994、1992.8
- 2)土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書設計編、土木学会、1991.9
- 3)土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改訂資料、土木学会、pp.152～195、1986.10