

論文 ハーフプレキャスト柱の復元力特性に関する実験的検討

黒岩 俊之^{*1}・大滝 健^{*2}・谷村 幸裕^{*3}・服部 尚道^{*4}

要旨：鉄道高架橋柱を対象としたハーフプレキャスト柱部材は、予め内蔵した軸方向鉄筋と基礎に定着された柱軸方向鉄筋を、柱基部において機械式継手により接合する。そのため、通常の場合打ち柱と塑性ヒンジ領域における構造が異なることから、場所打ち柱に対するハーフプレキャスト柱の復元力特性を確認するため耐震性能比較実験を実施した。その結果、ハーフプレキャスト柱部材は、通常の場合打ち柱と同等の復元力特性を有しており、従来の設計手法で曲げ耐力および変形性能を評価できることが確認できた。

キーワード：鉄道高架橋, ハーフプレキャスト柱, 継手, 復元力特性

1. はじめに

ハーフプレキャスト工法は、工場製作したプレキャスト部材を現場で組み立て、順次、場所打ちコンクリートと一体化を図りながらラーメン高架橋を構築する工法である¹⁾。ハーフプレキャスト部材は、型枠支保工の機能を有することから、従来の場所打ち工法に比較して支保工を簡略化できるため、時間的・空間的制約の多い鉄道高架橋工事において既設路線の安全確保を優先しながら施工の合理化を図ることが出来る。

本工法を用いたラーメン高架橋の構築では、杭柱接合部、柱梁接合部の配筋構造が、部材の組立て順序や作業内容に最も影響する要素である。また、耐震設計による配筋の過密化により、接合部の配筋構造はさらに複雑なものとなっていることから、柱と梁の軸方向鉄筋に機械式継手や定着板を多用する必要がある。

機械式継手や定着板については、「ハーフプレキャスト工法を適用した鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針」²⁾において規定されている。しかし、近年の施工に配慮した工法の改良や部材に対する力学的な要求性能の向上に伴い、ハーフプレキャスト部材の形状や接合部の形状、配

筋量等の諸条件が規定の基となる既往研究成果³⁾と異なるケースが現れてきたことから、その耐震性能を把握するための実験を行った。

本実験の目的は、柱下端の軸方向鉄筋に機械式継手を用いるとともに、杭柱接合部の軸方向鉄筋の定着方式を定着板とした場合のハーフプレキャスト柱が、従来の場所打ち・一体打ちRC柱と同等の耐震性能を有することを確認することである。

2. 実験の概要

2.1 実験方法および試験体

表-1に試験体一覧を、図-1に試験体形状・配筋図を示す。実験は場所打ち工法による試験体（以後、場所打ち試験体）およびハーフプレキャスト工法による試験体（以後、HPCa試験体）の2ケースについて行い、それぞれの耐震性能を比較した。実験には、ラーメン高架橋の柱部材の曲げモーメント分布においてモーメントが0になる柱高さをシアスパンと考え、柱下端をモデル化したカンチレバー型の試験体を用いた。

試験体寸法は実構造物の75%スケールを想定

*1 東急建設（株） 技術研究所土木研究室 研究員 修士（工学）（正会員）

*2 東急建設（株） 土木エンジニアリング部 課長 博士（工学）

*3 （財）鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*4 （財）鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 副主任研究員 修士（工学）（正会員）

し、柱断面を 750 × 750mm, シアスパンを 2300mm とした。

軸方向鉄筋は D29 (SD390) のネジ節鉄筋とし、場所打ち試験体で

は半円形フック (曲げ内半径 2.5 d : d は軸方向鉄筋の径), HPCa 試験体では定着板を用いてフーチングへ定着した。フーチングへの軸方向鉄筋の定着長は、実構造物の定着長を参考に 23 d (667mm) とした。なお、フック筋の定着長は直線部分とし、定着板の定着長は板面までとした。図-2 に定着板の形状を示す。

帯鉄筋は D16 (SD390) を 90mm ピッチとし、中間帯鉄筋を配置した。中間帯鉄筋の形状は八角形を標準とし、HPCa 試験体の軸方向鉄筋継手を設ける区間 (フーチングからの高さ 740mm) に対してのみ、配筋の取合いから長方形の貫通タイプを用いた。なお、帯鉄筋はすべて溶接閉合型 (フレア溶接) とした。

プレキャスト部材は、軸方向鉄筋および帯鉄筋を内蔵した八角形の中空断面を有し、最小部材厚は 112.5mm, 部材を横倒しにした状態で製作した。コンクリート打設面とした載荷方向側面はコテ仕上げとし、打継ぎ目となる中空および部材端部は、遅延剤を用いてハイウォッシャーによる目荒しを行った。部材製作後、プレキャスト部材の軸方向鉄筋と予めフーチングに定着された軸方向鉄筋を機械式継手で接合し、継手区間に型枠を建て、継手区間および中詰コンクリートを一度

に打設して柱部分を完成させた。なお、機械式継手には、土木学会の「鉄筋継手評価指針 (案)」⁴⁾の A 級継手を満足する、ネジカプラー式でエポキシ樹脂を注入するタイプのものを、部材軸方

表-1 試験体一覧

試験体	断面寸法 B×D	シアスパン H (比)	軸方向鉄筋			帯鉄筋 種類 (鉄筋比)
			種類 (鉄筋比)	継手	定着	
場所打ち	750mm × 750mm	2300mm (3.1)	SD390 28-D29 (3.2%)	—	半円形フック	SD390 4-D16@90 (1.18%)
HPCa				機械式	定着板	

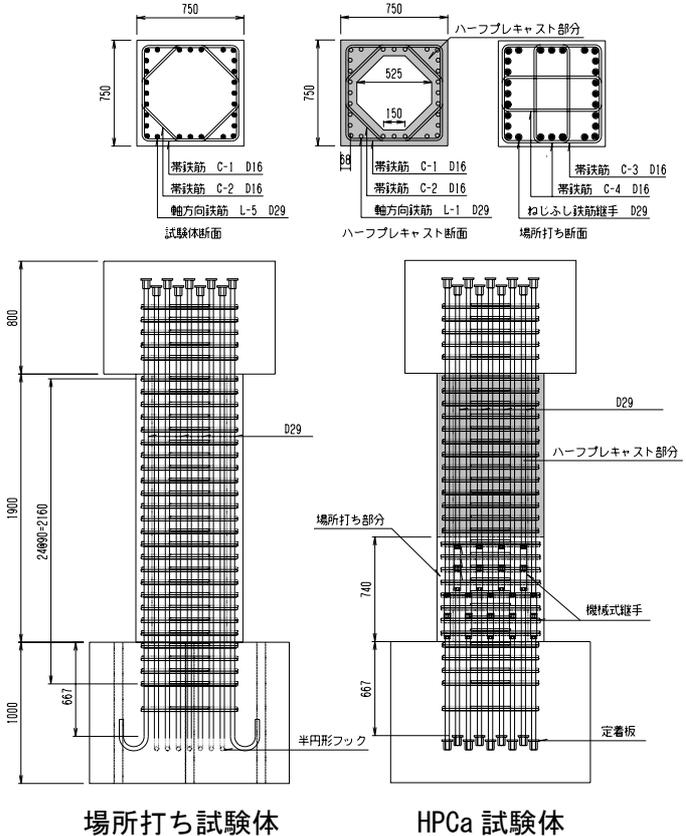


図-1 試験体形状・配筋図

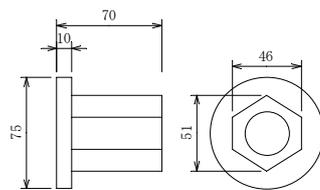


図-2 定着板

表-2 コンクリート材料試験結果

試験体	部位	圧縮強度 N/mm ²	
場所打ち	柱	31.9	
	フーチング	32.8	
HPCa	柱	HPCa	27.6
		継手・中詰	33.3
	フーチング	29.1	

表-3 鉄筋材料試験結果

鉄筋の種類	規格	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ×10 ⁵ (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)
軸方向鉄筋	D25-SD390	418	1.90	2200
帯鉄筋	D16-SD390	442	1.93	2290

向に継手長 (280mm) 以上相互にずらして配置した。²⁾

コンクリートには、実験時の強度が 27N/mm² になるものを使用した。

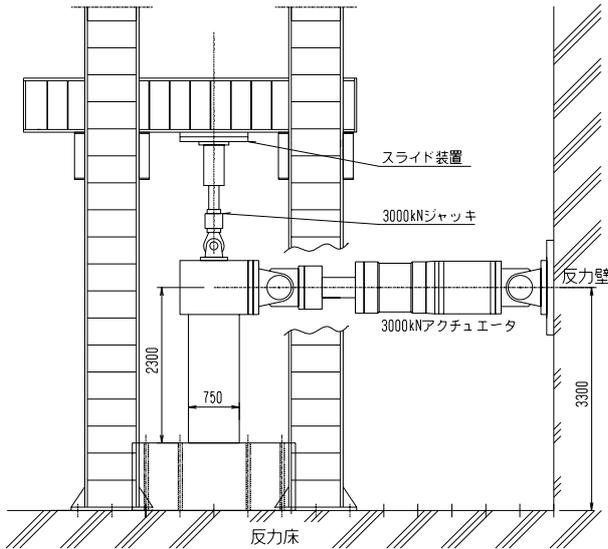


図-3 荷重装置

コンクリートおよび鉄筋の材料試験値をそれぞれ表-2, 表-3に示す。

2.2 荷重方法

荷重装置を図-3に示す。試験体のフーチング部をPC鋼棒によって反力床に固定して、反力壁に架装したアクチュエータで水平力を荷重した。軸力は実構造物を参考にして、荷重フレームに取り付けた鉛直ジャッキを用いて $3.9\text{N}/\text{mm}^2$ の一定軸圧縮応力度となるように制御して導入した。また、鉛直ジャッキと荷重フレーム間はスライド支承とし、常時鉛直軸力を導入する構造とした。

荷重サイクルは定変位正負交番荷重とした。まず、ひび割れ発生荷重、軸方向鉄筋ひずみが 1000μ に達するまでをそれぞれ正負1サイクルとして、次に軸方向鉄筋のひずみをモニターしながら荷重を続け、軸方向引張鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した時点の荷重を降伏荷重 P_y 、降伏変位 δ_y (正側負側の平均値) として変位靱性率 $\delta / \delta_y = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 \dots$ の各変位において3回繰り返す荷重方法とした。なお、HPCa試験体は、先に荷重した場所打ち試験体の降伏変位で軸方向鉄筋

表-4 破壊経過

荷重状態	場所打ち試験体	ハーフプレキャスト試験体
曲げひび割れ荷重	基部に曲げひび割れ発生	プレキャスト打継ぎ目に曲げひび割れ発生
1 δ_y	曲げせん断ひび割れの発生	同左
2 δ_y	基部コンクリートの圧壊	同左
3 δ_y	圧壊の進行、基部かぶりコンクリート剥落 (基部~450mm)	圧壊の進行
4 δ_y	基部コンクリートのはらみ出し (基部~450mm)	圧壊の進行、基部かぶりコンクリート剥落 (基部~280mm)
5 δ_y	軸方向鉄筋座屈、かぶりが大きく剥落	圧壊の進行、基部コンクリートのはらみ出し
6 δ_y	軸方向鉄筋座屈の進行かぶりが大きく剥落	軸方向鉄筋座屈、かぶりが大きく剥落
7 δ_y	軸方向鉄筋の破断耐力が大幅に低下	軸方向鉄筋座屈の進行かぶりが大きく剥落
8 δ_y	軸方向鉄筋の破断耐力が大幅に低下	軸方向鉄筋の破断耐力が大幅に低下

が降伏したことを確認した上で、同じ降伏変位 (21.0mm) で荷重した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

試験体の破壊経過を表-4に、破壊状況の写真を図-4に示す。1 δ_y までは、HPCa試験体

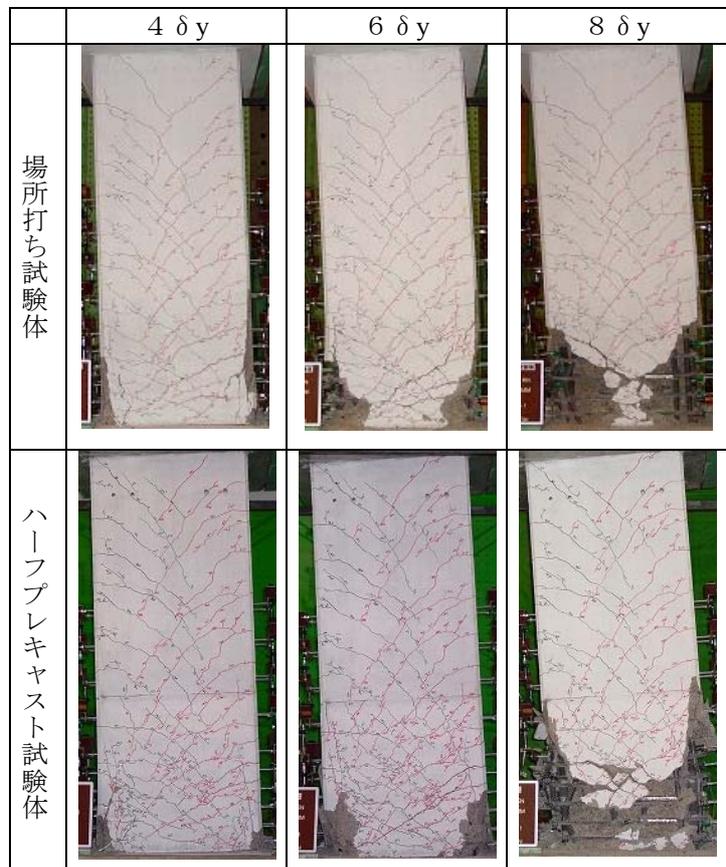


図-4 試験体破壊状況

において打継ぎ目に曲げひび割れが発生したこと、HPCa 試験体の柱とフーチングの界面のひび割れが比較的大きいこと以外、試験体間のひび割れ進展状況に明確

な差は観察されなかった。2 δy 以降では、基部コンクリートの圧壊および座屈の進行、かぶりコンクリートの剥落および鉄筋の破断等で、HPCa 試験体の破壊の進展が場所打ち試験体に比較して抑制される傾向が見られた。最終的には、軸方向鉄筋が座屈してかぶりコンクリートが大きく剥落している範囲は、場所打ち試験体が基部～500mm、HPCa 試験体が基部～700mmに及び、軸方向鉄筋の破断は、場所打ち試験体で 12 本、HPCa 試験体で 7 本であった。HPCa 試験体の接合部に相互にずらして配置した機械式継手によって、座屈長が伸びた影響と考えられる。

3.2 耐力および変形性能

表 5 に試験体耐力の一覧を、図 5、図 6 に荷重－変形関係およびその包絡線を示す。また、荷重－変位関係から求めた等価粘性減衰定数を図 7 に示す。

試験体の降伏荷重はほぼ一致したが、最大荷重は、場所打ち試験体が 1353kN、HPCa 試験体が 1429kN であり、HPCa 試験体が 5.6% 上回った。柱基部に配置した機械式継手が、塑性ヒンジ領域の剛性の増加に寄与したものと考えられる。

各試験体の履歴曲線は、終局に至るまでエネルギー吸収能の高い安定したループを描き、場所打ち試験体は 6 δy の繰返しにおいて、HPCa 試験体は 7 δy の繰返しでそれぞれ大きく耐力低下している。また、これらの包絡線は場所打ち試験体がやや劣るものの、ほぼ等しい結果であり、図 6 に併せて示した「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物」⁵⁾(以後、鉄道標準) に従い求めた骨格曲線をやや上回るものの、鉄道標準に示されている塑性化後の変形挙動(荷重－変形と部材の損傷状態)と同様

表 5 試験体耐力一覧 (単位: kN)

試験体	実験値		計算値		実験値/計算値	
	降伏荷重	最大荷重	降伏耐力	曲げ耐力	降伏耐力	曲げ耐力
場所打ち	1144	1353	1015	1201	1.13	1.13
	-1114	-1308	-1015	-1201	1.10	1.09
HPCa	1132	1429	1003	1169	1.13	1.22
	-1119	-1373	-1003	-1169	1.12	1.17

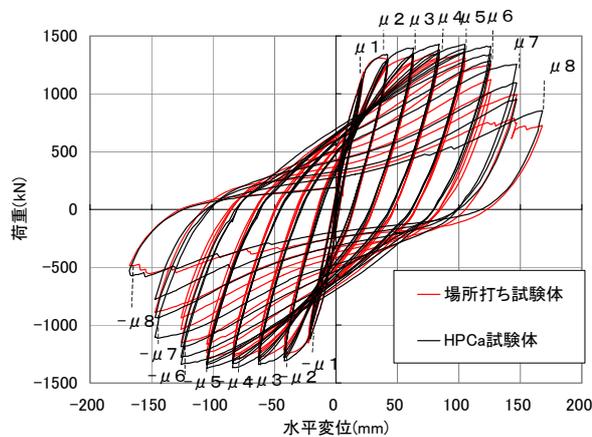


図 5 荷重－変位関係

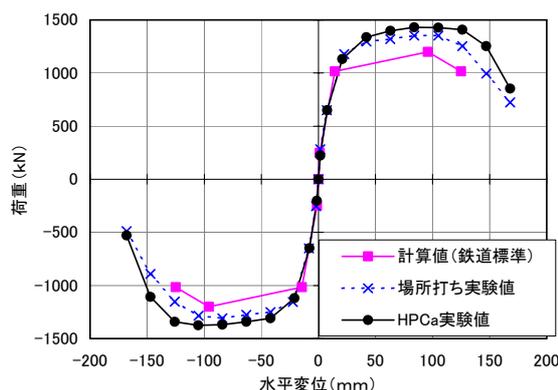


図 6 荷重－変位関係包絡線

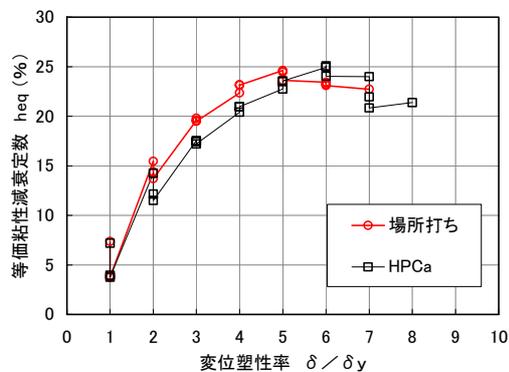


図 7 等価粘性減衰定数

であった。

等価粘性減衰定数は、場所打ち試験体が耐力

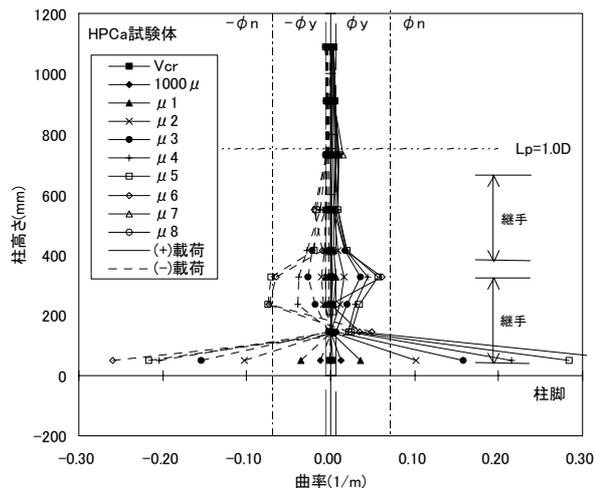
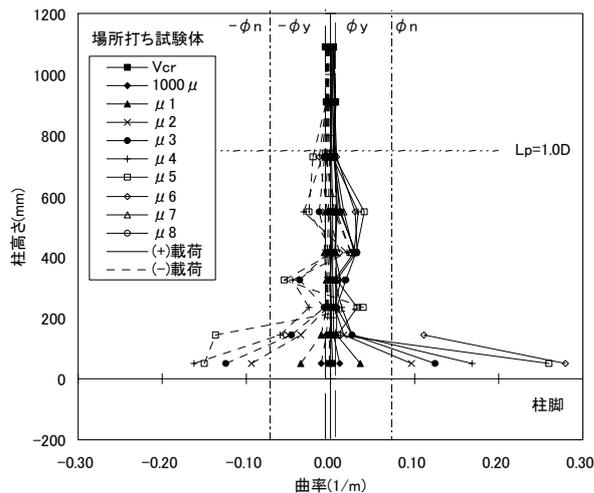


図-8 曲率分布

低下した $6 \delta_y$ まで、場所打ち試験体に対して HPCa 試験体が 2% 程度小さい値を示した。また、場所打ち試験体は $5 \delta_y$ 、HPCa 試験体は $6 \delta_y$ をピークとして、かぶり剥落および鉄筋の破断を伴い等価粘性減衰定数が低下した。

3.3 曲率分布

図-8 に試験体高さ方向の曲率分布を示した。曲率は試験体加力軸線上に設置した変位計を用いて計測した (図-9 参照)。図中には、鉄道標準に基づいて算定した降伏曲率および終局曲率を破線で示した。各試験体ともに高さ方向の曲率分布は、塑性変形が増加するにしたがって徐々に増大している。降伏曲率を上回るのは 1.0D (D:断面高さ) の範囲内であり、柱脚部 0.5D

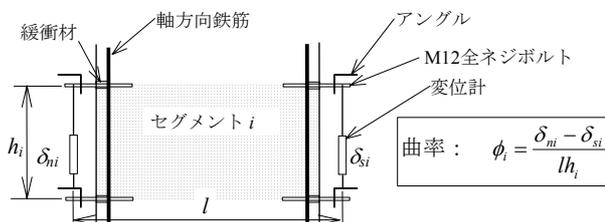


図-9 曲率の計測

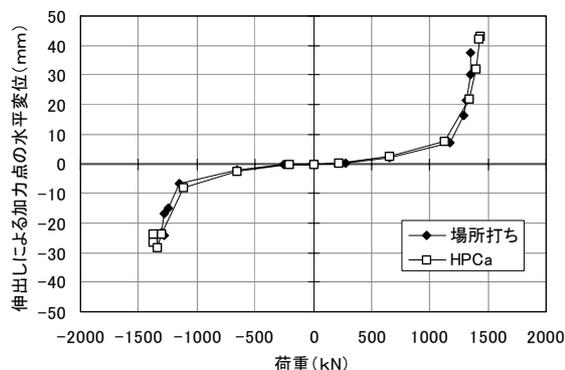


図-10 軸方向鉄筋の伸出による加力点変位

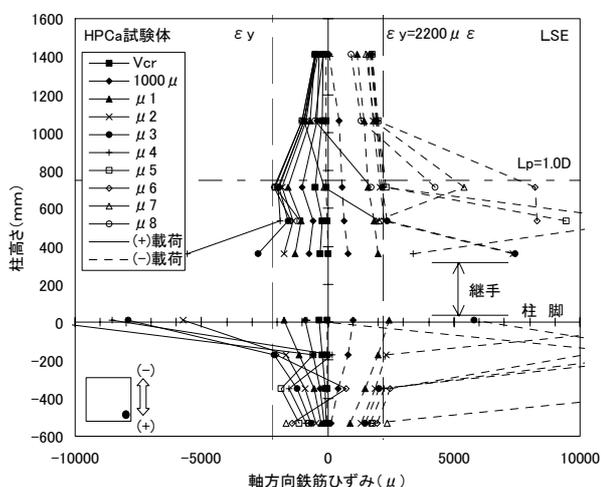
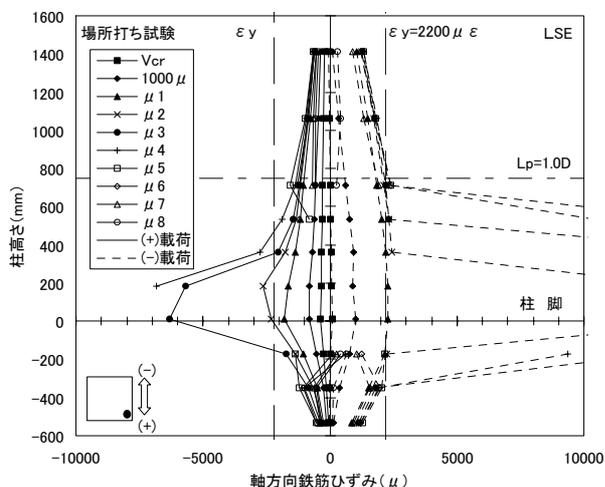


図-11 軸方向鉄筋ひずみの分布

における曲率の増大は著しい。また、HPCa 試験体の曲率は、柱下端と相互に配置した継手間で増大する傾向が見られ、特に柱下端は場所打ち試験体に比較して大きい。図-10 に伸出しによる加力点位置の水平変位と、水平荷重の関係を示す。ここでは、フーチング上面から 30mm の範囲で測定した曲率から算定した加力点高さの回転変位を軸方向鉄筋の伸出しによる変位と仮定している。同一荷重レベルで比較した場合、伸出しによる水平変位について各試験体間で大差はないが、降伏荷重以降、場所打ち試験体の最大耐力に達するまでは、場所打ち試験体に比べて HPCa 試験体が若干大きい傾向を示した。

3.4 ひずみ分布

軸方向鉄筋のひずみ分布を図-11 に示す。図中、材料試験より得られた鉄筋の降伏ひずみ (2200μ) を併せて示す。柱部分に関しては軸方向鉄筋ひずみの増大は柱基部から 1D(750mm) 以下に集中し、試験体間で分布形状に大差はなかった。HPCa 試験体は、場所打ち試験体に比較してフーチング内部の軸方向鉄筋ひずみがやや大きく、軸方向鉄筋の伸出し傾向を裏付けている。これは、HPCa 試験体の耐力がやや大きいことに加え、継手部の引張剛性が鉄筋に比較して大きいことから、ひずみがフーチング内部に移行したためと考えられる。HPCa 試験体では、フーチング内部の軸方向鉄筋が伸長することで、塑性ヒンジ領域の軸方向鉄筋の塑性変形が軽減され、座屈の開始が遅れたと推測される。

HPCa 試験体の軸方向鉄筋のひずみは、フーチング内部の深さ 530mm の範囲ではほぼ降伏ひずみに達していたが、試験体の復元力特性に影響は見られなかったことから、軸方向鉄筋は定着板によって十分に定着されていたと考えられる。

4. まとめ

- (1) HPCa 試験体は、場所打ち試験体と同程度の復元力特性を有していた。
- (2) HPCa 試験体は、塑性ヒンジ領域の破壊の進展が、場所打ち試験体に比較して遅れる傾向

が見られた。塑性ヒンジ領域に機械式継手を相互にずらして配置することによって、座屈長が伸びた影響と考えられる。

- (3) 柱基部に機械式継手を配することにより、HPCa 試験体の曲げ耐力は場所打ち試験体に比較して若干向上し、軸方向鉄筋の伸出し量はやや大きくなった。
- (4) 場所打ちおよび HPCa 試験体において、軸方向鉄筋ひずみおよび曲率の増大する範囲は柱基部から約 1.0D であった。また、HPCa 試験体の曲率は、柱下端と相互に配置した継手間で増大する傾向が見られた。
- (5) 本実験の範囲では、軸方向鉄筋を定着板によりフーチングへ定着することが、柱の復元力特性に影響を及ぼすことはなかった。

以上、HPCa 試験体と場所打ち試験体を比較すると、塑性ヒンジ領域の曲率分布および軸方向鉄筋の拔出し量に若干の違いが現れたが、復元力特性に影響を与える程ではなかった。実験に用いた仕様の HPCa 柱部材の曲げ耐力および変形性能は、従来の設計手法²⁾⁵⁾によって評価することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 服部尚道，宮城敏明，玉井真一，小西哲司：ハーフプレキャスト梁・スラブの施工実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.3，pp.745-750，2001
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：ハーフプレキャスト工法を適用した鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針，プレキャストラーメン高架橋研究会，1999.3
- 3) 岡本大，玉井真一，渡邊弘子，服部尚道：プレキャスト RC 柱の耐震実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1359-1364，1997
- 4) (社)土木学会：鉄筋継手指針，コンクリートライブラリー，49号，pp.13-20，1982
- 5) 国土交通省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，2004.4