

# 論文 高密度配筋 RC 柱の交番载荷実験結果に関する一考察

小林 薫<sup>\*1</sup>・小林 寿子<sup>\*2</sup>

**要旨：**著者らは、柱断面の縮小化、狭隘箇所での施工性向上を目的に、軸方向鉄筋比を20%程度まで高めた鋼管巻き補強を有する RC 柱構造の検討を行っている。本報告は、鋼管厚さを変えた3体の既往の交番载荷実験結果をもとに、本柱構造の変形挙動において、柱基部断面の鉄筋ひずみ発生状況、軸方向鉄筋のフーチングの伸び出しに伴う剛体変位量が全体変位量に占める影響度の把握を目的に検討を行った。検討は、ひずみ測定が行えた降伏点と最大荷重付近で行った。その結果、軸方向鉄筋伸び出しによる剛体変位は、载荷位置での全体変位量に対して、降伏点付近で30%程度、最大荷重付近では70%程度となっていた。

**キーワード：**鋼管巻き, RC 柱, 伸び出し, 剛体変位

## 1. はじめに

鉄道の駅構内等において、線路と線路の間やホームの上空に構造物を構築する場合、施工時の制約が非常に厳しく、列車が運行していない夜間短時間で施工する必要がある。このような箇所では、極厚の鋼管柱構造や極厚 CFT 柱構造が採用される場合がある。極厚の CFT 柱は、鋼管厚さが 70mm を超える場合もあり、鋼管は特注品となるケースがほとんどである。鋼材が特注品となることで、鋼材価格も割高となり、材料調達にも時間を要することになる。

著者らは、狭隘箇所等でも施工が可能となる柱構造として、型枠兼用の一般構造用鋼管を用い、鋼管内に軸方向鉄筋を柱断面の20%程度とした「高密度配筋 RC 柱構造」について検討を行っている。既往の報告<sup>1)</sup>では、模型試験体による交番载荷実験を行い、破壊性状等の基本性状の確認を行った。本柱構造は、軸方向鉄筋を柱断面の20%程度に配置することが特色で、通常の RC 柱と構造的に相違する。このため、変形挙動においても、軸方向鉄筋の伸び出しに伴う剛体変位が、载荷点の全体変位に占める割合が、通常の RC 柱と相違するものと考えられる。

本報告は、既往の交番载荷実験結果をもとに、本柱構造の変形挙動において、柱基部断面の鉄筋のひずみ性状、最大荷重付近までの軸方向鉄筋のフーチングの伸び出しに伴う剛体変位量について検討を行った。

## 2. 高密度配筋 RC 柱構造の概要

図-1に、高密度配筋 RC 柱構造の断面の略図を示す。本柱構造は、軸方向鉄筋量を柱断面積の20%程度配置している。なお、一般的な RC 構造における柱部材の軸方向鉄筋量は、設計基準<sup>2)</sup>で柱断面積の6%未満に制限されている。

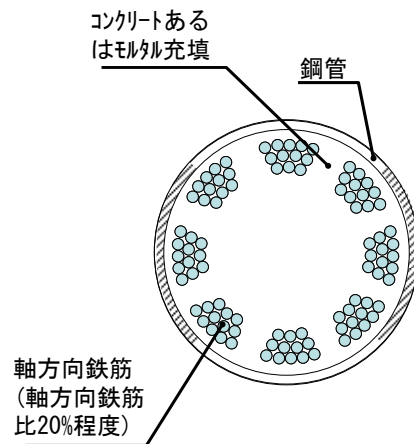


図-1 高密度配筋 RC 柱の断面略図

柱軸方向鉄筋の外周には、鋼管を配置し、内部をモルタル等で充填する。軸方向鉄筋外周に配置する鋼管は、柱のせん断補強とともに離散配置している軸方向鉄筋の形状保持機能、モルタル打設時の型枠も兼用する。鋼管内にモルタルを打設することによって、全軸方向鉄筋への応力伝達を確実にし、外力作用時に本柱構造が有する曲げ性能や変形性能が十分発揮されるようにした。

## 3. 既往の実験概要<sup>1)</sup>

本柱構造については、軸方向鉄筋を柱断面の20%程度配置し、鋼管厚さを変化させた3体の交番载荷実験が行われ、破壊性状等についての報告<sup>1)</sup>が行われている。

以下に、既往の報告における試験体形状、損傷状況の概要を記述する。

### (1) 試験体の形状および諸元

表-1に、試験体諸元を示す。試験体形状の例を図-2に、写真-1に試験体の配筋状況の例をそれぞれ示す。

\*1 東日本旅客鉄道 (株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 課長 博(工) (正会員)

\*2 東日本旅客鉄道 (株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主席 (正会員)

表一 試験体諸元<sup>1)</sup>

試験体番号	柱径 (mm)	鋼管厚 t (mm)	せん断スパン a (mm)	主鉄筋径	主鉄筋本数	a/d	D/t	My (kN・m)	Mu (kN・m)	Py (kN)	Pu (kN)	Vmu	Vs (kN)	Vs/Vmu
K-5	355.6	9.5	1700	16	96	5.43	37.4	492	548	289	322	322	906	2.81
K-6	355.6	6.4	1700	16	96	5.37	55.6	505	563	298	331	331	617	1.86
K-7	355.6	12.7	1700	16	96	5.48	28	483	543	284	319	319	1365	4.28

表二 荷重関係の実験結果と RC 断面計算値との比較<sup>1)</sup>

試験体番号	柱fc (MPa)	フfc (MPa)	fsy (MPa)	fsky (MPa)	Py (kN)	Pu (kN)	Py' (kN)	Pu' (kN)	Py'/Py	Pu'/Pu	δy (mm)	δy' (mm)	δy'/δy
K-5	39.8	32.7	349.2	350.3	289	322	298	460	1.03	1.43	20.3	25.5	1.25
K-6	39.6	23.2	349.2	350.6	298	331	299	443	1.00	1.34	21.4	27.3	1.28
K-7	49.1	28.7	349.2	397.9	284	319	295	473	1.04	1.48	21.1	23.0	1.09

柱fc:柱モルタル圧縮強度, フfc:フーチングコンクリート圧縮強度, fsy:鉄筋の引張降伏強度, fsky:鋼管の引張降伏強度, Py':降伏荷重(実験値), Pu':最大荷重(実験値), δy':降伏変位(実験値)

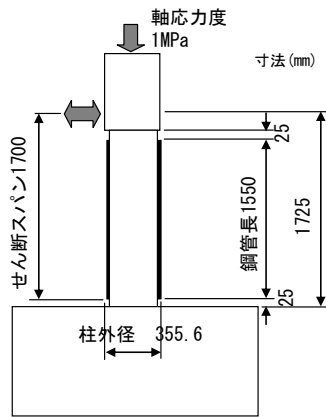
試験体に設定したパラメータは、鋼管の径厚比 D/t (D:柱外径, t:鋼管厚), 鋼管せん断余裕度 Vs/Vmu (Vs:鋼管から算定したせん断耐力, Vmu:柱基部が曲げ耐力に達するときのせん断力(Mu/a))とした。D/tは鋼管の拘束の指標, Vs/Vmuは鋼管のせん断耐力の余裕度の影響を確認する目的で設定した。なお、本柱構造の曲げ耐力 Mu の算定は参考文献<sup>2)</sup>、せん断耐力

Vsは、参考文献<sup>3)</sup>を参考に計算を行った。実験結果を表二に示す。なお、各軸筋の定着は、基本定着長以上を確保するようにした。

(2)試験体損傷状況

交番荷重実験結果として、K6試験体とK7試験体の破壊性状を述べる。写真二にK6試験体の最大荷重付近の状況、写真三に、K7試験体の最大荷重付近の状況をそれぞれ示す。

それぞれの試験体において、最大荷重付近(降伏変位の7倍前後の変位)の損傷状況としては、フーチング表面にひび割れの発生が見られた。その後の交番荷重によって、柱基部のフーチング上面付近のコンクリートが剥離



図二 試験体形状寸法



写真一 試験体の配筋状態の例



写真二 K6 試験体最大荷重付近の状況



写真三 K7 試験体最大荷重付近の状況



鋼管下端変形

写真四 K6 試験体実験終了後の状況

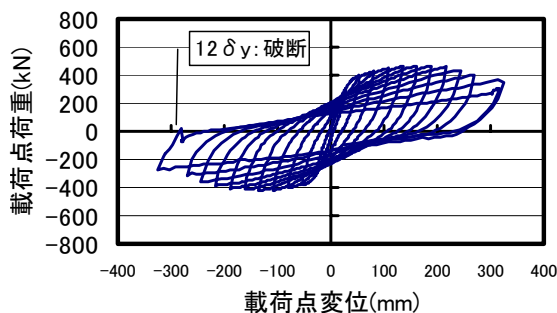


図-3 荷重・変位曲線の例 (K6 試験体)

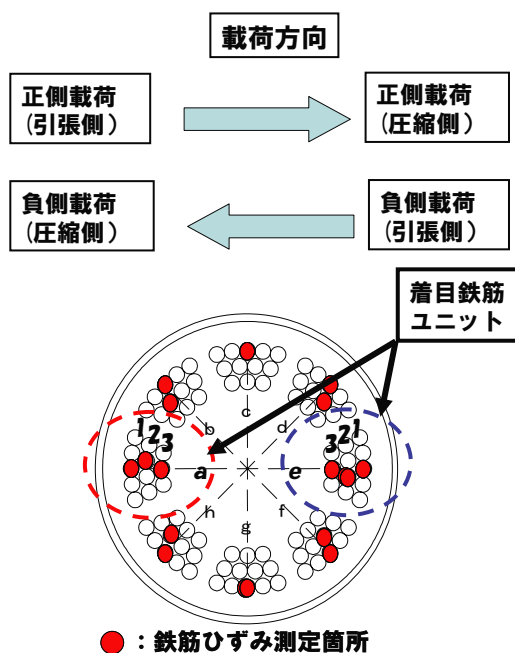
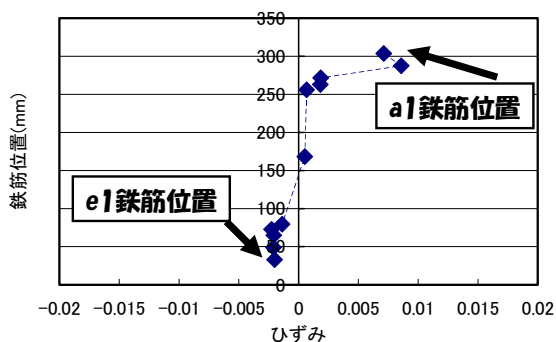


図-4 柱基部断面位置での鉄筋ひずみ測定箇所

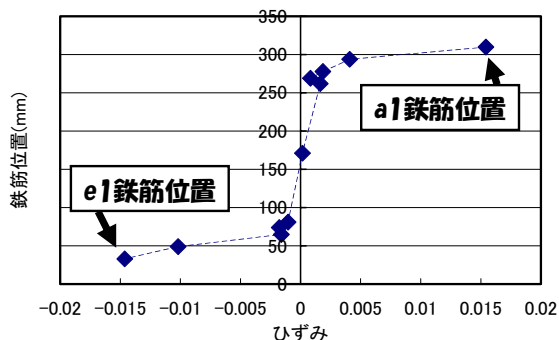
し浮き上がるような状況となった。また、実験終了付近の荷重において、一部軸方向鉄筋の破断も確認された。鋼管厚さを一番薄くしたK6試験体では、鋼管下端部付近において、鋼管周方向が広がるような変形を示した。なお、鋼管厚さをK6試験体よりも厚くした試験体では、実験終了まで鋼管の変形は確認されなかった。写真-4に、実験試験終了時のK6試験体の状況を示す。

### (3) 荷重-変位関係

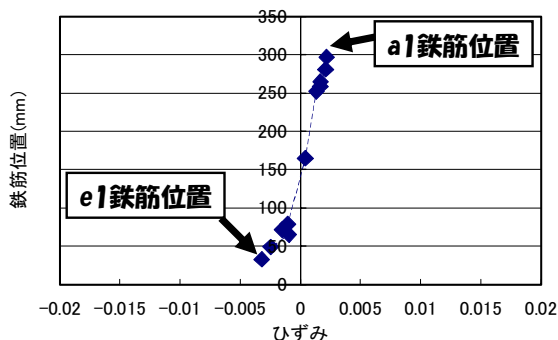
図-3に、荷重・変位曲線の例として、K6試験体の実験結果を示す。試験体のせん断スパンは1700mmとしているので、荷重点の水平変位が170mm超えると部材角は1/10を越える。軸方向鉄筋の破断は、荷重回数が概ね10回を超えるようになると発生し始めた。軸方向鉄筋の破断は、低サイクル疲労によるものと考えられるが、軸方向鉄筋に破断が発生しても急激な荷重低下とはならず、荷重低下の割合は比較的小さかった。



(a) K5 試験体



(b) K6 試験体



(c) K7 試験体

図-5 柱基部断面の鉄筋ひずみ分布 (降伏点)

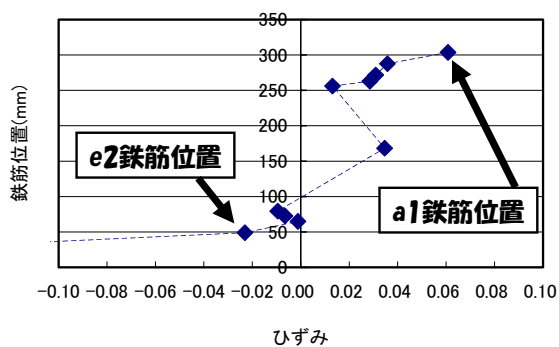
## 4. 交番荷重実験結果の考察

### 4.1 柱基部断面位置での鉄筋ひずみ性状

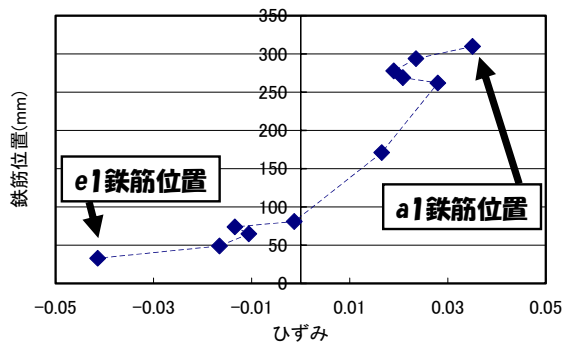
ここでは、柱基部断面の鉄筋ひずみの発生状況について検討を行う。柱基部断面での鉄筋ひずみ測定位置を図-4に示す。

各試験体の降伏時の柱基部断面のひずみ分布を図-5(a)~(c)に示す。交番荷重実験では、試験体の部材降伏を荷重方向の中心線から45度開いた位置の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した時点としている。このため、最外縁位置の軸方向鉄筋ひずみは、降伏ひずみよりも大きくなる。

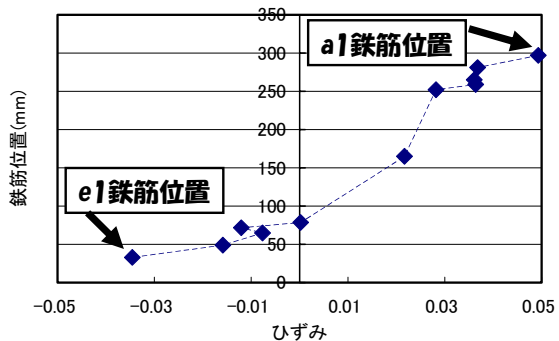
最大荷重付近の柱基部での断面ひずみ分布を図-6(a)~(c)に示す。最外縁鉄筋位置では、 $30000\mu$ を超えるひずみが発生している。鉄筋ユニットは、3段配置で12本の鉄筋で構成されている。2段目の鉄筋は充填モル



(a) K5 試験体



(b) K6 試験体

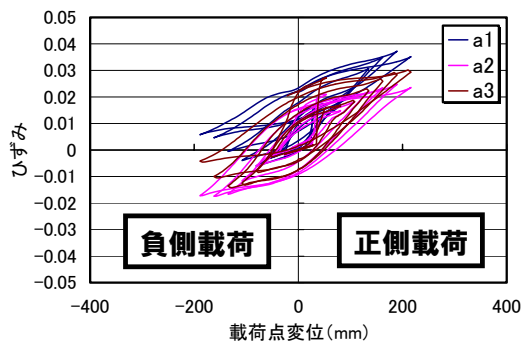


(c) K7 試験体

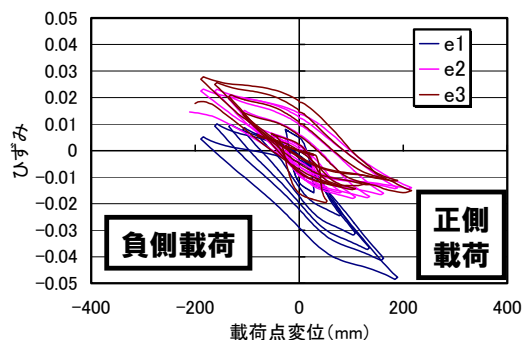
図-6 柱基部断面の鉄筋ひずみ分布  
(最大荷重付近)

タルとほとんど接触しないような状態で配置されているが、鉄筋に発生するひずみは接触する鉄筋と同程度の値となっていた。これは、接触配置されている鉄筋のふし同士がかみあうように配置されていることが、充填モルタルにほとんど接触していない鉄筋にも応力伝達したものであると思われる。鋼管の拘束効果も寄与しているものと思われる。

鉄筋ユニット内での鉄筋ひずみの履歴性状については、図-4中の最外縁部の鉄筋ユニットに着目して、載荷点変位との関係で整理した。図-7に、K6試験体での載荷点変位と鉄筋ひずみ値の関係を示す。なお、鉄筋ひずみは、測定が可能であった最大荷重付近までの値である。図-7からも、鉄筋ユニット内の鉄筋での応力伝達が認



(a) a側鉄筋ユニット



(b) e側鉄筋ユニット

図-7 K6試験体基部での載荷点変位と鉄筋ひずみの関係

められる。

軸方向鉄筋を柱断面の20%程度配置し、鋼管巻き補強した本柱構造において、最大荷重付近の柱基部断面のひずみ分布性状から、全軸方向鉄筋は有効に曲げ性能に機能していることを確認した。

#### 4.2軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しに伴う剛体変位

一般的なRC柱の変形挙動は、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しに伴う剛体変位と躯体部分の変形に伴う変位の和として表現される。本柱構造は、通常のRC柱よりも軸方向鉄筋量を多く配置している。また、本柱構造を実構造物に適用していくことを視野に入れると、躯体部分の変形と剛体変位を分離して評価する必要がある。

変形挙動に関する考察として、剛体変位について検討を行う。なお、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しに伴う剛体変位は、式(1)で算定した。

$$\delta p1 = \Delta p1 / (d-x) \times la \quad (1)$$

ここで、 $\delta p1$  : 軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しに伴う剛体変位

$\Delta p1$  : フーチングからの軸方向鉄筋の伸びし量

d : 有効高さ  
 x : 中立軸位置  
 la : せん断スパン

表-3 鉄筋伸び出し量の検討結果

試験体名		軸方向鉄筋伸び出し量 $\Delta pl$ (mm)	鉄筋伸び出し量と使用鉄筋径との比率( $\Delta pl/\phi$ )	鉄筋ユニットの無次元伸び出し量(s)
K5	降伏時	0.74	0.05	0.019
	最大荷重付近	10.28	0.64	0.261
K6	降伏時	0.71	0.04	0.014
	最大荷重付近	10.26	0.64	0.205
K7	降伏時	0.64	0.04	0.015
	最大荷重付近	12.17	0.76	0.283

(1) フーチングからの鉄筋の伸び出し量

軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出し量  $\Delta pl$ は、軸方向鉄筋のフーチング内のひずみの積分として計算することができる。図-8に、K6試験体でのフーチング内での軸方向鉄筋のひずみ計測結果を示す。図-8は、図-4に示したa側鉄筋ユニットの最外縁位置の鉄筋での計測結果を示している。フーチング内での軸方向鉄筋のひずみ計測は、ひずみゲージが離散的に配置されて測定される。フーチング上面位置での軸方向鉄筋伸び出し量を鉄筋ひずみの積分値として算定するには軸方向鉄筋のひずみ分布を定める必要がある。離散配置しているひずみゲージのひずみ計測値から、鉄筋ひずみ分布を同定する方法として、島らの研究<sup>4)</sup>を参考とした。ひずみゲージでの鉄筋ひずみ測定は、荷重中に計測不能となる場合がある。本実験では、最大荷重付近の荷重までひずみゲージによる測定は可能であった。よって、ここでは、降伏点と最大荷重付近の検討を行った。なお、伸び出し量はフーチング内でひずみ計測を行っている軸方向鉄筋4本の平均値とし、鉄筋ユニットの平均的な伸び出し量として結果を整理することにした。

また、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出し量は、軸方向鉄筋の付着性状と密接に関係する。付着性状はコンクリート強度とも関係する。軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出し量の実験値を整理するためには、コンクリート強度の相違を含めて、無次元化して示すことが適切と考えられる。軸方向鉄筋の伸び出し量の無次元化については、参考文献<sup>4) 5)</sup>を参考に、式(2)で計算した。

$$s = \Delta pl / \Phi \cdot K_{fc} \quad (2)$$

ここに、

s : 無次元化された鉄筋伸び出し量  
 $\Delta pl$  : フーチング上面位置での鉄筋伸び出し量  
 $\Phi$  : 鉄筋径,  $K_{fc} = (f'_{ck}/20)^{2/3}$   
 $f'_{ck}$  : フーチングのコンクリート強度 (N/mm<sup>2</sup>)

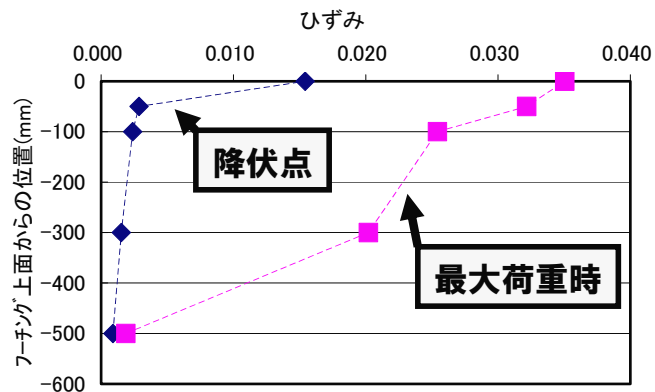


図-8 K6試験体フーチング内のひずみ分布 (鉄筋aの最外縁鉄筋)

式(2)において、 $\Phi$ は鉄筋径となっている。本柱構造では、軸方向鉄筋比が約20%程度で、12本程度をひとつの束としてユニット化して配置している。フーチングからの鉄筋伸び出し量を鉄筋ユニットの平均値としていることから、 $\Phi$ は鉄筋ユニットを等価な1本の鉄筋としたときの等価鉄筋径とした。検討結果を表-3に示す。

フーチング上面位置での鉄筋伸び出し量は、軸方向鉄筋(D16)の公称径に対して、降伏点で0.04~0.05、最大荷重付近で0.64~0.76となっていた。無次元化した軸方向鉄筋の伸び出し量については、降伏付近で0.014~0.019、最大荷重付近で0.21~0.28となっていた。

(2) フーチングからの鉄筋の伸び出し量による剛体変位

式(1)から、軸方向鉄筋の伸び出しに伴う、柱躯体部分の剛体変位量の検討を行う。式(1)を適用するにあたり、有効高さdは、圧縮最外縁から鉄筋ユニットの重心までの距離とした。中立軸xは、降伏荷重、最大荷重時の計算結果の中立軸を用いた。断面計算は、通常のRCの断面計算法を用いている。算定精度については、表-2に示している。軸方向鉄筋の伸び出しに伴う剛体変位量の検討結果を図-9(a)(b)に示す。

軸方向鉄筋の伸び出しに伴う剛体変位が、荷重点変位に占める割合は、降伏点で30%程度、最大荷重付近の変位時で70%程度となっていた。この結果から、最大荷重付近での変形挙動としては、軸方向鉄筋の伸び出しに伴う剛体変位が大きく寄与しているものと考えられる。

なお、通常のRC柱（引張鉄筋比で1.07%まで）における既往の研究<sup>6)</sup>によると、最大荷重を維持する変位での軸方向鉄筋の伸び出しに伴う剛体変位量が全体変位量の15~30%程度となっている。また、軸方向鉄筋を4本まで束ねた鉄筋を使用したRC柱（引張鉄筋比で1.95%まで）の鉄筋伸び出しに伴う剛体変位に関する既往の研究<sup>7)</sup>では、終局変位（参考文献<sup>7)</sup>では、終局変位を降伏荷重を維持する最大変位と定義）時において、軸方向鉄筋の伸び出しに伴う剛体変位量は30~50%であるとしている。既往の研究と比較しても、本柱構造の最大荷重付近での全体変位に占める軸方向鉄筋の伸び出しに伴う剛体変位の割合が大きいことが伺える。

## 6. まとめ

高密度配筋RC柱構造について、鋼管厚さを変化させた3体の試験体における既往の交番荷重実験結果から、柱基部断面位置での鉄筋のひずみ性状、最大荷重付近までの軸方向鉄筋の伸び出しに伴う剛体変位に関する検討を行った。以下に、本検討結果をまとめる。

- (1) 柱基部断面の鉄筋ひずみの発生状況については、鉄筋ユニット内の2段目鉄筋は充填モルタルとほとんど接触しないような状態で配置されているが、発生するひずみは接触する前後の鉄筋と同程度の値となっていた。これは、接触配置されている鉄筋のふし同士がかみあうに配置されていることが、充填モルタルにほとんど接触していない鉄筋にも応力伝達したものと思われる。
- (2) 鉄筋ユニットとしての無次元化した伸び出し量は、降伏点で0.014~0.019、最大荷重時付近で0.21~0.28であった。
- (3) 軸方向鉄筋の伸び出しに伴う剛体変位が、荷重点変位量に占める割合は降伏点で約30%程度、最大荷重付近で70%程度となっていた。

## 参考文献

- 1) 小林寿子, 小林薫: 高密度配筋RC柱の変形挙動に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, 2009
- 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, コンクリート構造物, 丸善, 2004.4

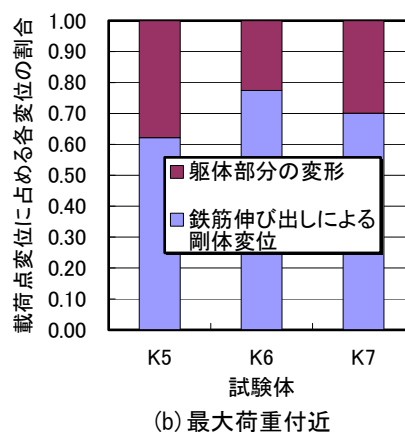
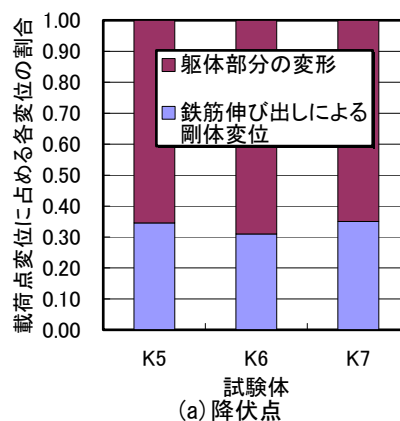


図-9 荷重点変位に占める各変位の割合

- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 鋼とコンクリートの複合構造物, 丸善, 1998.7
- 4) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号, pp.165-174, 1987.2.
- 5) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, pp63-64, 1991.5
- 6) 田中寿夫, 岡本大, 瀧口将志, 佐藤勉: RC柱の変形性能と損傷レベルに関する実験的研究, コンクリート工学論文報告集, Vol.20, No.3, pp1045-1050, 1998
- 7) 菅野貴浩, 石橋忠良, 古谷時春, 堀江雅直: 束ね鉄筋を用いたRC柱の鉄筋拔出し量と変形性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.1259-1264, 1994