

# 論文 柱脚ヒンジ領域に機械式鉄筋継手を設けた RC 柱の曲げ降伏後の強度変形性状

大久保全陸\*1 江島大輔\*2 松岡忠生\*2

**要旨** フレーム式鉄筋コンクリート構造の耐震設計で曲げ降伏ヒンジが計画される 1 階柱脚に機械式鉄筋継手を設けた場合のせん断設計において考慮すべき曲げ降伏後の強度上昇に着目して実験と解析を行った。その結果、機械式鉄筋継手を柱脚曲げ降伏ヒンジ領域に設けると、継手部の鉄筋に引張歪の集中が起こり、鉄筋の歪硬化による曲げ強度の上昇が起こるが、柱軸力の増加に伴って強度上昇の割合は減少することを示した。また、断面の 4 辺に主筋が配筋される柱部材の場合には、引張最外縁の主筋以外の中段筋の存在をせん断設計用の曲げ強度の評価において考慮することの必要性を指摘した。

キーワード：鉄筋継手、荷重上昇率、柱脚

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートフレーム構造の耐震設計では、通常、地震時の曲げモーメントに対して梁端に曲げ降伏ヒンジが形成される全体降伏形の抵抗機構を計画するが、その場合、骨組の最下層では基礎梁ではなく、1 階柱脚に曲げ降伏ヒンジが形成されることを前提としている。わが国では、フレーム式プレキャスト鉄筋コンクリート構造においても上記と同じ設計思想に基づいて耐震設計することが一般的であり、プレキャスト柱の 1 階柱脚では主筋の継手が降伏ヒンジ領域に設けられることが多い。

主筋の継手を降伏ヒンジ領域に設けた場合の塑性変形性能に関しては、これまで比較的多くの実験研究が行われ、継手の形式が機械式鉄筋継手の場合には、継手が曲げ耐力を劣化させる悪影響はほとんどないが、曲げ降伏後、部材変形の増加に伴って継手部近傍の鉄筋が早期に歪硬化域に入ることによる曲げ強度の上昇が比較的顕著に現れることが知られており、曲げ降伏後の塑性変形を許容する前記の耐震設計を採る場合には、部材のせん断設計にこの強度上昇の影響を反映させる必要があることが指摘されている[1,2]。しかしながら、この問題を定量的に捉えた研究は少なく、機械式鉄筋継手の影響による曲げ降伏後の荷重上昇を部材のせん断設計に反映させるに至っていない。

筆者らは、昨年、梁部材を対象に、曲げ降伏する梁端に機械式鉄筋継手を設けた場合の荷重上昇について実験と解析を行い、その結果を文献 2 で報告した。柱部材の場合には軸力が存在し、その軸力の大きさが柱部材の曲げ強度に関係するため、曲げ降伏後の荷重上昇の割合は軸力がない梁の場合と異なったものとなる。そこで、本報告では軸力が存在する柱の荷重変形関係を実験と解析によって検討し、曲げ降伏後の荷重上昇について考察する。

## 2. 実験計画

実験では軸力の大きさを直接的な実験パラメータとし、継手がある場合と無い場合について計画する。また、曲げ降伏後の荷重変形特性は荷重履歴の影響を受けることがあるので一方向単調

\*1九州芸術工科大学教授 環境設計学科 工博（正会員）

\*2九州芸術工科大学大学院生 生活環境専攻

載荷と正負繰返し加力を計画し、実験によってその影響を検討する。なお、柱部材では断面の外周4辺に主筋が配筋され、曲げに対する最外縁の鉄筋の他にいわゆる中段筋が存在するので中段筋がある場合について実験を行い、中段筋がない場合については文献2で報告した梁の実験結果との間接比較によって検討する。

上記の実験計画を基に表1に示す7体の試験体を作製した。試験体の形状、寸法、及び配筋状況を図1に示す。試験体は逆T型の片持ち梁形式であり、柱脚部で主筋に鉄筋継手の有無の違いがある他は、形状、寸法、配筋、及び材料強度等は各試験体共通である。鉄筋継手には無収縮グラウト材を注入するスリーブ式鉄筋継手を用いた。

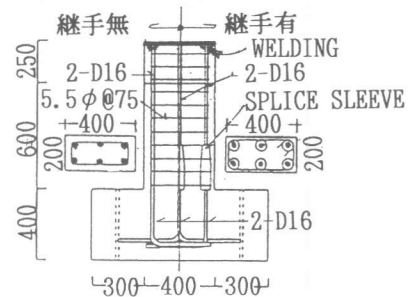


図1 試験体

### 3. 使用材料

表2に鉄筋とコンクリートの材料強度試験結果を示す。柱主筋には、SD345のD16を用い、帯筋には5.5φの番線を用いた。コンクリートは骨材寸法13mm以下の普通コンクリートでレディーミクストコンクリートを使用した。継手を持つ鉄筋の引張試験結果については、後に示す。

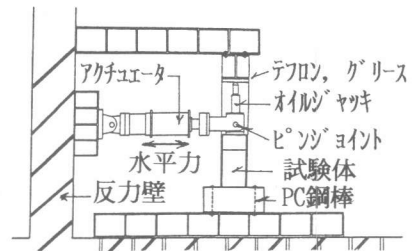


図2 実験装置

### 4. 加力及び測定方法

実験装置を図2に示す。図示のように試験体の基礎部分を固定し、柱脚から100cmの高さの位置で水平力と一定軸力を加えた。実験中の軸力の変動は約1%以下である。軸力加力用のジャッキとその反力装置の間にはテフロンシートとグリスを用い、水平変形を拘束しないように考慮した。軸力装置による水平拘束力は、実測の結果、軸力の約1%である。後に示す諸荷重等の実験値ではその拘束力を補正している。測定関係では、水平荷重と同位置における水平変形の他、図3に示す位置で軸方向筋の歪とコンクリート表面の各区間の伸縮変形を測定した。

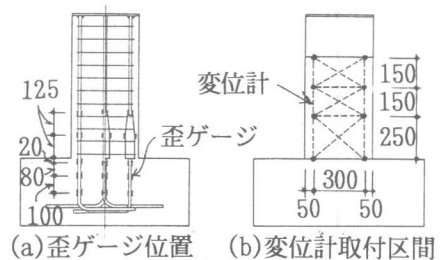


図3 測定方法

表1 試験体の種類

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
継手	なし	なし	なし	あり	あり	あり	あり
軸力(Kg/cm <sup>2</sup> )	0	0	40	0	0	20	40
荷重履歴	1方向		繰返し		1方向		繰返し

表2 鉄筋及びコンクリートの力学特性

鉄筋	$\sigma_y$	$E_s$	$\sigma_t$	$\epsilon_{sh}$	$E_{sh}$	コンクリート	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$E_c$	$\sigma_{SP}$
D16	3820	1.76x10 <sup>6</sup>	5497	2.27	4.93x10 <sup>4</sup>	レミコン	223	0.23	2.23	21.1
5.5φ	2957	1.97x10 <sup>6</sup>	3855	2.38	3.39x10 <sup>4</sup>	グラウトモルタル	677	0.28	2.48	----

$\sigma_y$ : 降伏点強度,  $E_s$ : ヤング係数,  $\sigma_t$ : 引張強度,  $\epsilon_{sh}$ : 歪硬化開始時歪,  $E_{sh}$ : 歪硬化後の2次剛性,  $\sigma_B$ : 圧縮強度,  $\epsilon_B$ : 圧縮強度時歪,  $E_c$ : ヤング係数,  $\sigma_{SP}$ : 割裂強度,  $\epsilon_{sh}$ と $\epsilon_B$ は%, その他の単位は(kg/cm<sup>2</sup>).

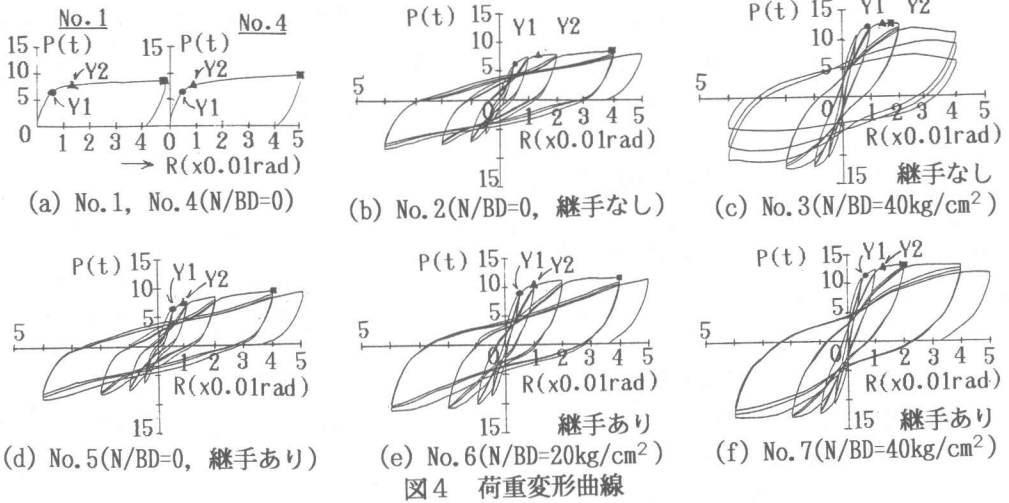


図4 荷重変形曲線

### 5. 実験結果の概要

図4の(a)から(f)に各試験体の水平力 $P$ と部材角 $R$ の関係( $P-R$ 曲線という)を示す。図にみられるように試験体間に多少の違いがあるが、ほぼ

$R=1/200$ 前後の変形で引張側最外縁の主筋(1段筋という)が曲げ降伏し、また、ほぼ $R=1/100$ 前後の変形で中段筋が曲げ降伏する破壊経過を示した。せん断破壊は生じていない。中段筋降伏後も変形の増加に伴って、水平荷重が上昇しているが、その上昇率は鉄筋継手がある試験体の方が継手がない試験体より大きい。また、荷重上昇率は軸力の大きさによって異なり、軸力が大きくなると荷重上昇率は小さくなっている。荷重上昇率については、後に詳述する。

一方単調載荷による $P-R$ 曲線は正負繰り返し荷重による場合の $P-R$ 曲線をほぼ包絡しており、本実験では荷重履歴による影響はほとんど観られない。

軸力 $40\text{kg}/\text{cm}^2$ で鉄筋継手がないNo.3試験体では、 $R>1/50$ の変形で圧縮側コンクリートの圧壊が進展し、 $R=1/25$ の変形レベルの繰り返し加力中に大きな荷重低下を生じたが、同じ軸力で継手があるNo.7試験体ではコンクリートの圧壊が少なく、荷重低下はほとんど生じなかった。スリーブ継手は曲げによる圧縮力に対して優れた性能を示した。

### 6. 鉄筋継手部の解析用応力歪モデル

後の柱部材の荷重変形関係の解析で使用する継手部の応力歪関係を決定するために2本の鉄筋をスリーブ継手で結合した試験体(継手単体という)の引張試験を行った。図5に継手単体の各部の伸び測定区間を示す。区間L2とL4は鉄筋のスリーブからの抜け出し量 $\delta_s$ を測定する区間である。しかし、その測定値 $\delta$ には区間内の鉄筋自身の伸び $\delta_r$ が含まれているので、その値を区間L1とL5の伸び変形測定値を使って推定し、 $\delta$ から $\delta_r$ を控除して $\delta_s$ を求めた。区間L2側とL4側の $\delta_s$ に区間L3で測定したスリーブ自身の伸びを加えた値を区間長L3で除した値を継手部の平均歪 $\epsilon_{ss}$ とした。継手単体に加えた引張力 $P$ を鉄筋断面積で除した応力度 $\sigma$ と継手部の歪 $\epsilon_{ss}$ との関係を図6

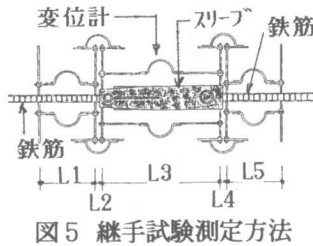


図5 継手試験測定方法

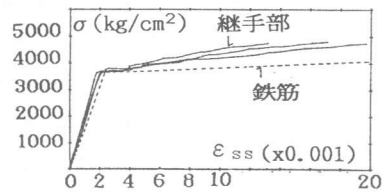


図6 継手部応力歪関係

に示す。図中には、鉄筋の引張試験で得られた応力歪関係をモデル化して破線で併記した。図6に示した継手単体の $\sigma - \varepsilon_{ss}$ 曲線の第1勾配と第2勾配(試験体3体の平均値)を表3に示す。第2勾配は第1勾配の約4%であった。

表中の $\sigma_1$ は $\sigma - \varepsilon_{ss}$ 曲線の折れ点の応力度であり、鉄筋の降伏点強度 $\sigma_y$ と同じ値である。表中の鉄筋の第1勾配はヤング係数であり、第2勾配は後の解析で使用する値(第1勾配の1%と仮定)である。

## 7. 柱部材の荷重変形関係の解析

### 7.1 解析モデルと仮定

試験体の荷重変形関係の解析に用いたモデルを図7の(a)から(d)に示す。(a)図に示すように本論文では、試験体を主筋の定着部A、柱脚の曲げ降伏ヒンジ領域H(スリーブ長さと同じ区間、約0.6Dと仮定、D:柱の断面せい)、及び継手部以外の柱部分C(非ヒンジ部という)の3領域に分け、それぞれの領域の変形を考慮する。

領域Aでは、(b)に示すように主筋の抜け出しによる柱の剛体回転変形 $\delta_{SP}$ を計算する。主筋定着部の歪分布は(b)図に示すようにバイリニアと仮定し、IIの点(柱脚から10cm、鉄筋径の約6倍)の位置では、歪は実測値に基づき降伏歪の1.5倍を超えないものとした。抜け出し量は歪分布の面積に相当する値と仮定する。

ヒンジ領域Hでは、鉄筋継手の応力歪関係に表3に示した各特性値を用い、コンクリートの応力歪関係にe関数、または2次関数(圧縮強度以降の応力は一定)を用いて塑性曲げ理論によって抵抗モーメントと曲率の関係を計算し、ヒンジ領域ではその曲率が等分布するものとして(c)図に示す部材の変形 $\delta_{BH}$ を計算する。

非ヒンジ領域Cでは、曲げモーメントによる曲率分布を(d)図の断面Vで折れ曲がるバイリニア一分布を仮定し、部材の変形 $\delta_{BC}$ を計算する。その際、断面IVではヒンジ部と同じ曲率を仮定し、断面Vより上部では弾性計算による曲率を仮定する。

以上の $\delta_{SP}$ 、 $\delta_{BH}$ 、 $\delta_{BC}$ の和を加力点位置の水平変形 $\delta$ とする。せん断変形は前3者の変形に比べて小さいので本論文では考慮しない。

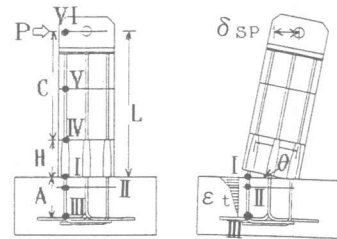
### 7.2 解析結果と実験結果の比較検討

解析による柱部材のP-R曲線を実験結果と比較して図8(a)から(d)に示す。正負繰り返し加力を行った実験のP-R曲線は正側加力時の包絡線である。また、表4に1段筋と中段筋の各降伏時の荷重と変形の解析値を実験値と比較して示す。表4にみられるように軸力40kg/cm<sup>2</sup>の場合に1段筋降伏荷重の解析値が実験値に比べてやや小さく20%程度の違いが生じているが、荷重、変形とも全体的に解析と実験はよくあっており、本解析法により主筋の曲げ降伏までの間の荷重と変形の関係がほぼ推定できると思われる。

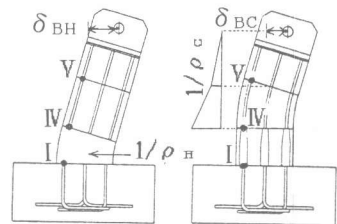
また、図8(a)から(d)の解析と実験の比較から、スリーブ継手を設けた柱部材の中段筋降伏以

表3 鉄筋継手の力学特性(kg/cm<sup>2</sup>)

	$\sigma_1, \sigma_y$	第1勾配	第2勾配
継手部	3820	1820000	73000
柱主筋	3820	1760000	17600



(a)変形分離区間 (b)鉄筋抜け出し変形



(c)ヒンジ部変形 (d)非ヒンジ部変形  
図7 解析モデル

降の荷重変形関係については、圧縮コンクリートの応力歪関係に e関数を用いるより、圧縮強度時以降の応力度を一定とした2次関数を用いる方が、スリーブ継手の存在による圧縮ゾーンの強化効果を考慮し得ていることがわかる。

なお、スリーブ継手がある場合に、コンクリートの応力歪関係を e関数とし、圧縮鉄筋の応力歪関係を降伏点のない弾性関係とし、かつ圧縮鉄筋断面積をスリーブ外径に相当する断面積とした解析を行ってみたが、その結果は図8(a)から8(d)に示す一点鎖線の結果と大差なかった。

### 8. 曲げ降伏後の荷重上昇率

図9(a)と(b)に曲げ降伏後の荷重上昇率と塑性率との関係を示す。図はいずれもスリーブ継手を有する試験体の場合であり、(a)図は1段筋の降伏を基準とした場合の荷重上昇率と塑性率の関係を示し、(b)図は中段筋の降伏を基準とした場合の同様な関係を示している。中段筋が存在する柱の場合には、荷重上昇率は、1段筋と中段筋の鉄筋比の組み合わせによって変化するので、荷重上昇率を一義的に示すことはできないが、図から1段筋降伏後の荷重上昇率が大きく、柱では多段配筋の実状を考慮して曲げ降伏後の荷重上昇を評価することが重要であることがわかる。(b)図中の破線は、文献2の中段筋がない梁の実験結果を示しており、本実験による中段筋降伏以降の荷重上昇の傾向は中段筋がない破線の場合と同様となっている。

軸力の影響についてみると、軸力が增加するにつれて曲げ降伏後の荷重上昇率は小さくなっていく。曲げと軸力が作用する断面解析で、軸力作用線が断面の引張歪領域側にある場合には、圧

表4: 計算値と実験値の比較

	1 段筋降伏時							中段筋降伏時							
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	
計 $P_{1Y}$ (ton)	5.74	5.74	9.59	5.74	5.74	7.82	9.59	計 $P_{2Y}$ (ton)	7.31	7.31	11.3	7.31	7.31	9.54	11.3
実 $P_{1Y}$ (ton)	6.44	6.29	11.6	6.48	6.43	8.72	11.2	実 $P_{2Y}$ (ton)	7.71	7.63	12.4	7.73	7.56	10.1	12.5
(実/計)	1.12	1.10	1.21	1.13	1.12	1.12	1.17	(実/計)	1.05	1.04	1.10	1.06	1.03	1.06	1.11
計 $\delta_{1Y}$ (mm)	4.28	4.28	5.58	4.23	4.23	4.93	5.50	計 $\delta_{2Y}$ (mm)	9.42	9.42	14.8	8.00	8.00	9.65	12.5
実 $\delta_{1Y}$ (mm)	5.31	5.59	7.37	4.72	4.75	4.73	6.39	実 $\delta_{2Y}$ (mm)	11.1	11.9	14.8	9.02	8.63	9.82	12.0
(実/計)	1.24	1.31	1.32	1.12	1.12	0.96	1.16	(実/計)	1.18	1.26	1.00	1.13	1.08	1.02	0.96

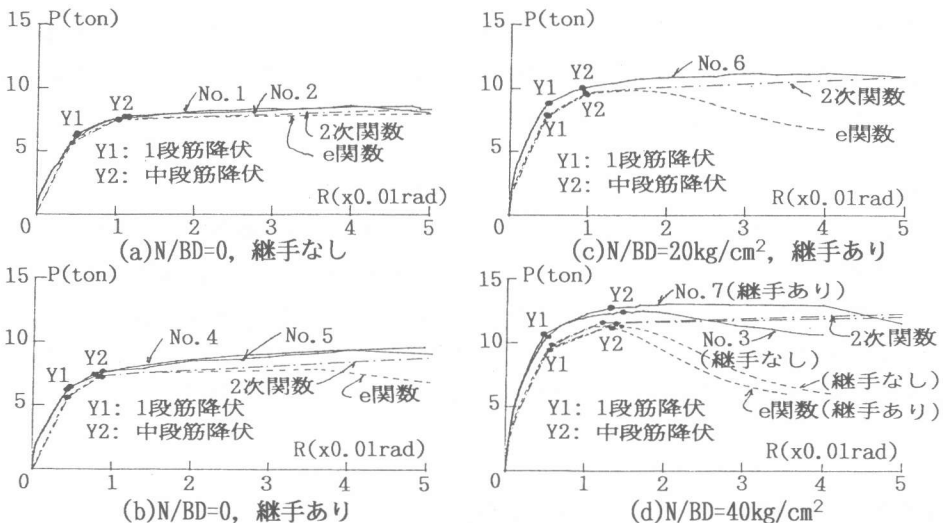


図8 荷重変形関係

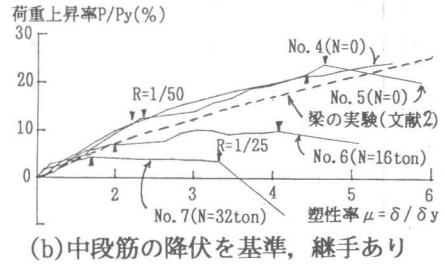
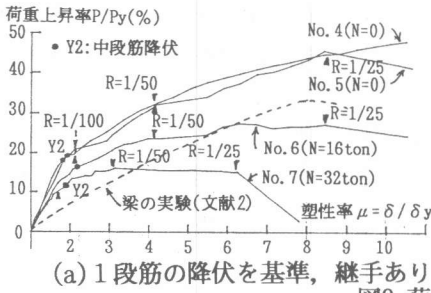


図9 荷重上昇率と塑性率の関係

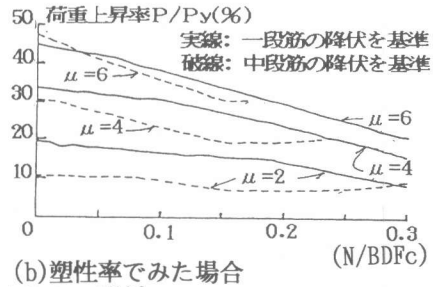
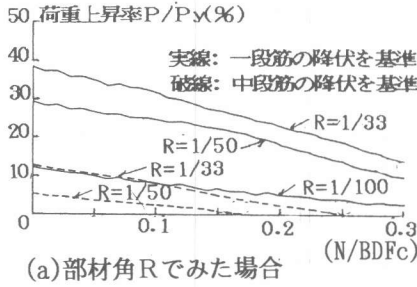


図10 荷重上昇率と軸力比との関係

縮軸力は水平力による曲げモーメントと逆向きのモーメントとして断面に作用する。従って、圧縮軸力が大きくなり、その値が一定で変動しない場合には、断面の全抵抗モーメント中の軸力によるモーメント分の占める割合が大きくなり、その値は一定であるので、曲げ降伏後に引張鉄筋の応力度上昇があっても、その上昇が断面の全抵抗モーメントの増加に及ぼす影響は相対的に小さくなる。以上により、圧縮軸力が存在する柱の場合には、継手の存在による曲げ降伏後の荷重上昇の影響は、軸力がない梁に比べて小さくなる。しかしながら、地震時に軸力変動が起こり軸力が減少する柱の場合には、逆に荷重上昇率は増加することになるので、この点は設計での留意点となる。

本実験では、ヒンジ部の変形は柱の全体変形の概ね40%であった。そこで、柱の変形は7.1で述べた  $\delta_{BH}$  の2.5倍であると仮定して、7章の解析法により  $p_t=1\%$ 、中段筋の鉄筋量が1段筋の1/2の柱の曲げ降伏後の荷重上昇率を一例として計算した。計算では、表3の特性値を仮定した。計算結果を図10の(a)と(b)に示す。図の横軸は柱の軸力比  $N/BDF_c$  であり、図中の各曲線は図示の変形(a図は部材角  $R$ 、b図は塑性率  $\mu$ ) に達したときの荷重上昇率で示している。

## 9. 結び

鉄筋継手の特性を考慮した柱の曲げ降伏後の荷重と変形の間を解析する方法を示し、本解析法が概ね実験結果と対応することを示した。次に、その解析法により曲げ降伏後の荷重上昇率を試算した。軸力が増加すると荷重上昇率は減少するが、設計では地震時の軸力変動によって軸力が減少すると荷重上昇率が大きくなるのでその点の注意が必要である。また、柱の設計用せん断力の評価には継手の有無に係わらず多段配筋の実状を考慮することが重要である。

## 文献

- 1) 松森泰造, 他: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, 1993, pp.671-676.
- 2) 大久保全陸: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, 1994, pp.289-294.