

論文 段落しによって曲げ耐力分布を作用モーメントに一致させた柱部材の変形性能に関する研究

米田 大樹^{*1}・原 夏生^{*2}・三島 徹也^{*3}・島 弘^{*4}

要旨：これまでに、著者らは塑性ヒンジ領域内で段落しを行うことで断面耐力をコントロールした柱部材が、段落しを行っていない柱部材と同等の変形性能を有することを示した。そこで、載荷面の軸方向鉄筋のうち、隅角部以外の全ての軸方向鉄筋を段落しした試験体で、さらに正負交番載荷実験を行った。実験の結果、載荷面の軸方向鉄筋全てを段落しした柱部材においても、段落しを行っていない柱部材と同等の変形性能を有することを確認した。

キーワード：段落し、柱部材、変形性能、塑性ヒンジ

1. はじめに

軸方向鉄筋の段落しは、段落し部において曲げ破壊が橋脚基部よりも先行して生じることや軸方向鉄筋の曲げ降伏後にせん断破壊への移行が見られることが報告されている。また、コンクリート標準示方書（構造性能照査編）¹⁾（以下、構造性能照査編と呼ぶ）や鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）²⁾（以下、鉄道標準と呼ぶ）、道路橋示方書（V耐震設計編）³⁾においても、これらの影響を考慮し、柱部材の軸方向鉄筋の段落しは、原則として塑性化領域を避けて行うこととなっている。

しかし、RC 橋脚で鋼材量の大部分を占める軸方向鉄筋の段落しは、経済性の観点からは可能な限り低い位置で行い、必要最小限の鋼材量とすることが望ましい。さらに、段落しによる塑性化領域の拡大は、変形性能の点からも有利であると考え、これまでに著者らは塑性ヒンジ領域内で段落しを行うことで断面耐力をコントロールした柱部材が、段落しを行っていない柱部材と同等の変形性能を有することを示した⁴⁾。

そこで本研究は、さらなる鋼材量の削減と、塑性化領域拡大による変形性能向上のため、載

荷面の軸方向鉄筋のうち、隅角部以外の全ての軸方向鉄筋を段落しした試験体で、正負交番載荷実験を行ったものである。

2. 段落しした柱部材の変形性能

2.1 荷重変位関係

一般的に、せん断耐力に十分余裕があり、曲げ破壊が先行する梁や柱のような細長い鉄筋コンクリート部材では、軸線に直交する方向の応力を無視できることが認められており、平面保持の仮定から計算した各断面の曲率分布を2階積分して変位を求める手法が用いられている。したがって、軸方向鉄筋の段落しによって、柱部材の曲げ耐力分布を作用モーメントに一致させ、塑性ヒンジの範囲を拡大させることが出来れば、計算上、変形能力を向上させることになる。一方、実務上は、柱基部の曲率分布を平均化し、等価塑性ヒンジ長の概念を用いることが多い。コンクリート標準示方書（耐震性能照査編）⁵⁾（以下、耐震性能照査編と呼ぶ）や鉄道標準²⁾の荷重変位関係も、この簡略化した計算方法が採用されている。したがって、本研究の荷重変位関係の計算においても、実務上の簡略化し

*1 前田建設工業（株） 技術研究所 技術開発土木グループ研究員 工修（正会員）

*2 前田建設工業（株） 技術研究所 技術開発土木グループ副部長 工博（正会員）

*3 前田建設工業（株） 技術研究所 技術開発土木グループ部長 工博（正会員）

*4 高知工科大学 社会システム工学科教授 工博（正会員）

た計算方法を用いることとした（図-1）。

$$\delta = \delta_1 + \delta_p + \delta_b \quad (1)$$

$$\delta_1 = \theta_1 \cdot L_a \quad (2)$$

$$\delta_p = \theta_p \cdot (L_a - L_p/2) \quad (3)$$

（ただし， $\theta_p = \phi_p \cdot L_p$ ）

$$\delta_b = \iint_{L_a-L_p} \phi(h) dh dh \quad (4)$$

ここに， δ ：柱頭部の全変位， δ_1 ：基部の鉄筋抜け出しによる変形， θ_1 ：基部の鉄筋抜け出しによる回転角， δ_p ：塑性ヒンジ部の変形， θ_p ：塑性ヒンジ部の回転角， δ_b ：塑性ヒンジ部以外のく体の曲げ変形， L_a ：基部から載荷点までの距離， L_p ：等価塑性ヒンジ長 $=1.0D$ （ D ：断面高さ）， $\phi(h)$ ：曲率分布， ϕ_p ：塑性ヒンジ部の平均曲率である。

塑性ヒンジ部の回転角 θ_p は，実験式が用いられるが，曲率 ϕ_p と等価塑性ヒンジ長 L_p の積と考えることもできる。したがって，上記計算方法の式(3)においても， ϕ_p が一定であるとの条件の下で L_p を拡大させれば， θ_p も合わせて拡大するため，計算上の終局変位は向上することになる。

「4. 実験結果」の図-12，図-13に示すように， L_p を拡大すれば，計算上の変形性能は向上する結果となるのである。本研究は，断面の終局曲率の向上ではなく，等価塑性ヒンジ長の範囲 L_p を拡大させることで，鋼材量の削減と同時に，変形性能の向上を試みたものである。

2.2 断面の $M-\phi$ 関係と段落し位置

本研究の目的の一つは，可能な限り段落し位置を下げて，軸方向鉄筋を削減することである。したがって，計算上軸方向鉄筋が不要となる位置で段落しを行った。すなわち，作用するモーメントの分布に合わせて断面耐力が減少するように段落しを行ったのである。著者らが過去に実施した段落しによって断面耐力と作用モーメントの分布を合わせた例⁴⁾を図-2に示す。この例の場合においては，降伏耐力が降伏時作用モーメントと最大時作用モーメントの間に位置する範囲（基部から0.6mの範囲）を計算上の等価

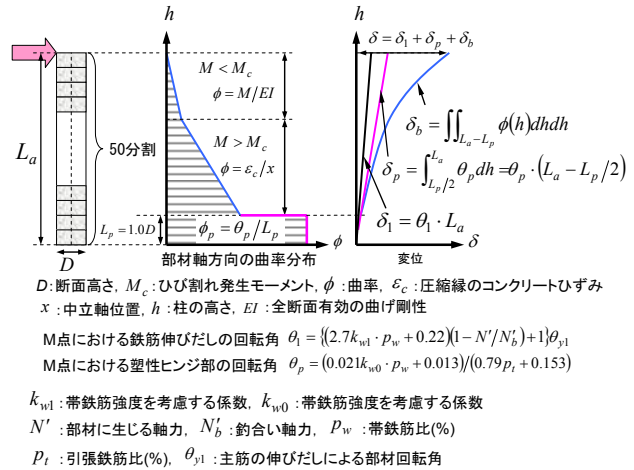


図-1 棒部材の応答値の算定²⁾

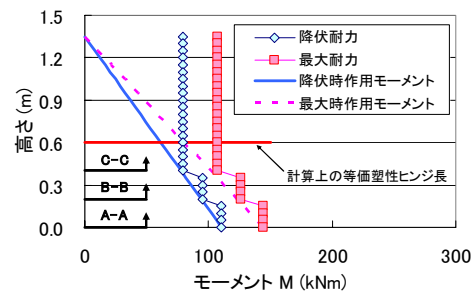


図-2 作用モーメントと耐力分布の例⁴⁾

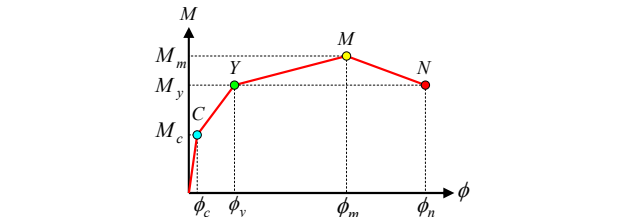


図-3 鉄道標準のテトラリニアモデル²⁾

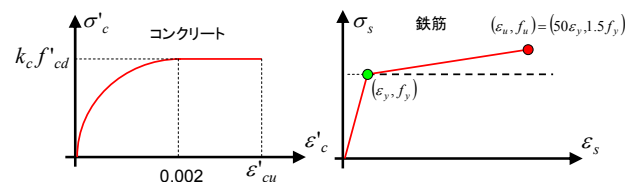


図-4 計算に使用した材料構成則^{1), 2), 5)}

塑性ヒンジ長と考えることができる。

各断面の $M-\phi$ 関係は，計算量を削減するため，耐震性能照査編⁵⁾や鉄道標準²⁾に示されている各イベント点のみを計算し，中間部は直線で補間した $M-\phi$ 関係を用いている。イベント点は，鉄道標準²⁾に基づき，ひび割れ発生時（C 点），鉄筋降伏時（Y 点），最大荷重時（M 点），終局時（N 点）とした。図-3 に，鉄道標準²⁾における $M-\phi$ 関係のテトラリニアモデルを示す。材料構成則については，図-4 に示すように，コンクリートは構造性能照査編¹⁾および鉄道標準²⁾を，鉄筋は耐震性能照査編⁵⁾を用いた。

3. 実験概要

3.1 試験体

本実験で用いた試験体は、表-1 に示す No.4, No.5 の 2 体である。比較のため、これまでに著者らが行った試験体 No.1~No.3 についても合わせて示す。No.1~No.3 の詳細については、参考文献 4)を参照されたい。外形寸法は No.1~No.5 は全て同一で、柱断面は 400mm×400mm とした。No.4 と No.5 は共に載荷面側に軸方向鉄筋を 9 本、側方鉄筋を 7 本配置している。軸方向鉄筋は全て D10 (SD295) を用いた。せん断補強筋は、D6 (SD345) を 7.5cm 間隔で配置した。代表して No.3 と No.5 の断面形状を図-5 と図-6 に、試験体の側面図を図-7 と図-8 に示す。図-5 と図-6

は、試験体の断面を代表して示したものである。

No.1 および No.4 は、一般的な橋脚を想定した基準試験体であり、段落しは行っていない。No.1 の断面は、柱基部から上部まで図-5 の A-A 断面、No.4 の断面は図-6 の D-D 断面と同一である。一方、No.2, No.3, No.5 の 3 体は、段落しを行った試験体である。No.5 は、載荷面の軸方向鉄筋を 7 本段落ししたものであり、「2.2」で述べた各段落し位置で 1 本ずつ段落しを行った。ここで段落し位置とは、鉄筋を折り曲げた位置を指しており、鉄筋が斜めに配置されている部分は定着として定義している。定着は、図-7 と図-8 の側面図に示すように、段落し位置から軸方向鉄筋を 45° に折り曲げ、正負交番載荷において、

表-1 実験条件と使用材料

試験体名	実験条件				使用材料					
	段落し	定着	側方鉄筋 (本)	帯筋間隔 (mm)	コンクリート		軸方向鉄筋 D10		帯筋 D6	
					強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	材種	強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	材種
No.1	無し	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No.2	あり	無し	5	50	33.0	30.1	SD295	338	189	SD295
No.3	あり	あり	-	-	-	-	-	-	-	-
No.4	無し	-	7	75	32.6	30.2	SD295	341	175	SD345
No.5	あり	あり	-	-	-	-	-	-	-	-

表-2 断面耐力の計算値

断面	曲げ耐力 M_u (kNm)	せん断耐力 V (kN)	曲げせん断耐力比 $V \cdot a / M_u$
A-A	145	192	1.79
B-B	126	186	1.70
C-C	107	180	1.59
D-D	159	151	1.28
E-E	132	143	1.20
F-F	95	125	1.05

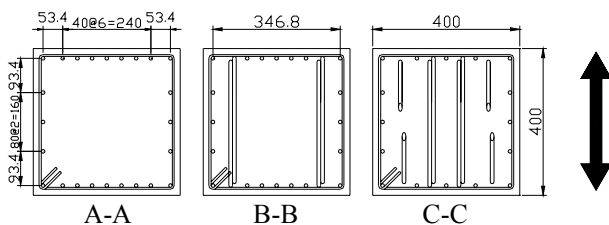


図-5 試験体断面 (No. 3) ⁴⁾

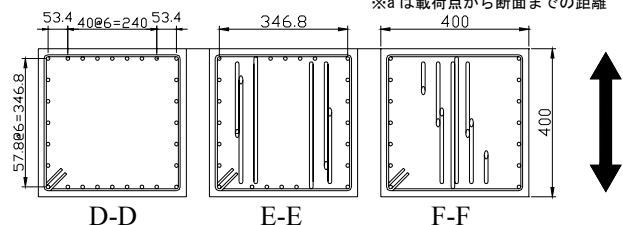


図-6 試験体断面 (No. 5)

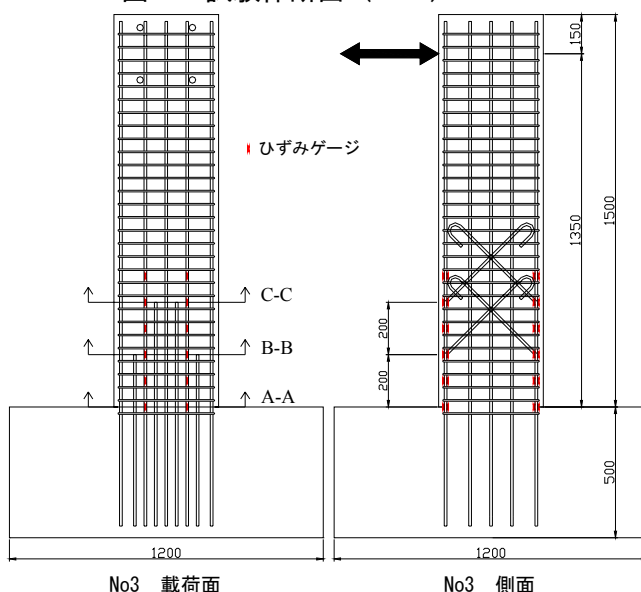


図-7 No. 3 試験体 ⁴⁾

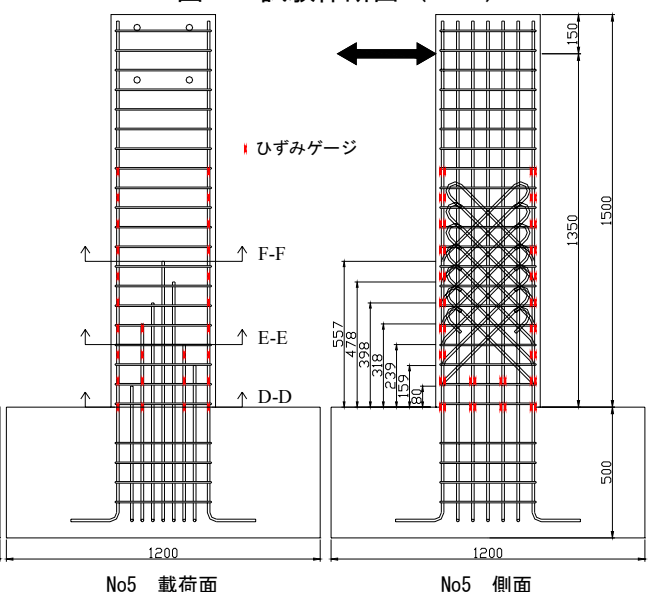


図-8 No. 5 試験体

引張側の軸方向鉄筋が常に圧縮側で定着されるようにした。表-2 に各断面耐力の計算値を示す。曲げ耐力は「2.2」に示す方法に基づいて計算したものであり、せん断耐力は構造性能照査編¹⁾に基づいて計算したものである。

今回実験を実施した No.5 試験体は、載荷面の軸方向鉄筋のうち、隅角部以外の全ての軸方向鉄筋を段落ししている。No.5 の作用モーメントと断面耐力の分布を図-9 に示す。これまでに著者らが実施した実験の断面耐力の分布形状(図-2)が階段状⁴⁾であったのに対し、今回実験を実施した No.5 の断面耐力分布は、細かく段落しを行っているため、ほぼ作用断面力と一致した断面耐力分布となり、計算上の等価塑性ヒンジ長の範囲も 0.8m まで拡大している。また、No.1 基準試験体と比較して、No.2 は約 20%，No.3 は約 13%の軸方向鉄筋量の削減となっていたのに対し、No.5 は No.4 基準試験体と比較して約 30%の軸方向鉄筋量の削減となっている。

3.2 載荷方法および計測項目

実験は、鉛直荷重による応力が 1MPa となるように一定軸力を作用させた状態で図-10 に示す装置にて水平荷重の載荷を行った。水平荷重の加力サイクルは、鉄筋降伏時の変位を $1\delta y$ とし、その整数倍の変位振幅でそれぞれ 3 回ずつ正負に水平荷重を作用させ、荷重の低下が明確となった時点で載荷を終了した(図-11)。No.4 基準試験体の $1\delta y$ は、軸方向鉄筋の降伏が確認できた時点の変位 7.4mm を $1\delta y$ とした。No.5 の $1\delta y$ は、比較のために No.4 と同じ 7.4mm を $1\delta y$ とした。

4. 実験結果

4.1 荷重変位関係について

比較のための No.1～No.3 の結果⁴⁾を図-12 に、No.4 と No.5 の荷重変位関係の実験結果を図-13 と図-14 に示す。図-14 は、No.4 と No.5 の正側 $1\delta y$ 1 回目までの荷重変位関係である。 $1\delta y$ 時の荷重は No.4 の基準試験体が 112kN であったのに対し、細かく段落しを行った No.5 は、102kN

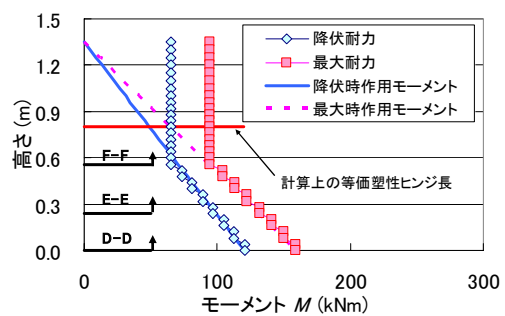


図-9 No.5 の作用モーメントと耐力分布

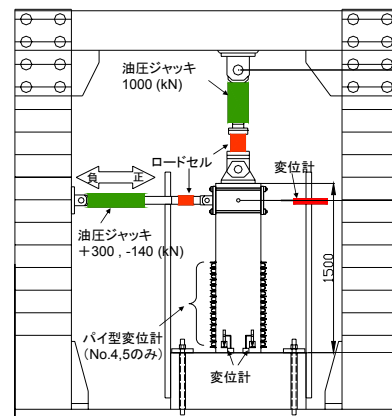


図-10 加力装置と計測機器設置状況

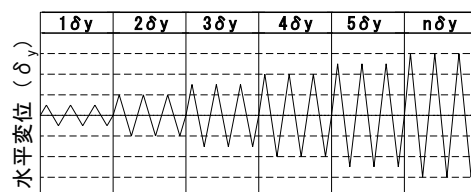


図-11 加力サイクル

と若干低い値であった(図-13, 図-14)。しかし、変位が進むに連れて荷重変位関係は No.4 と No.5 でほぼ同じになった(図-13)。No.5 が No.4 と比較して、 $1\delta y$ 時の荷重が若干低かった原因は、「4.3」で詳細を述べるが、段落しによる軸方向鉄筋の塑性化領域の拡大によって曲率分布も拡大し、その結果として同一変位時における荷重が減少したためと考えられる。一方、No.3 が No.1 と比較して $1\delta y$ 時点の荷重の低下が少なかったのは、段落しの回数が少なかったため、その効果が明確に現れなかったためと考えられる。

4.2 破壊状況

写真-1 にかぶり剥落時の状況を示す。No.4, No.5 共に $5\delta y$ 時に軸方向鉄筋が座屈し、かぶりの剥落が確認された。写真-1 に示すように、No.4 は基部において載荷面全ての軸方向鉄筋が座屈したのに対し、No.5 は異なる高さ(それぞれの

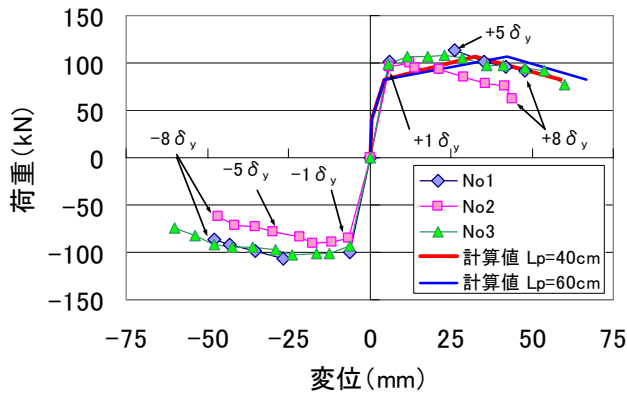


図-12 No. 1, 2, 3 の荷重変位関係の包絡線⁴⁾

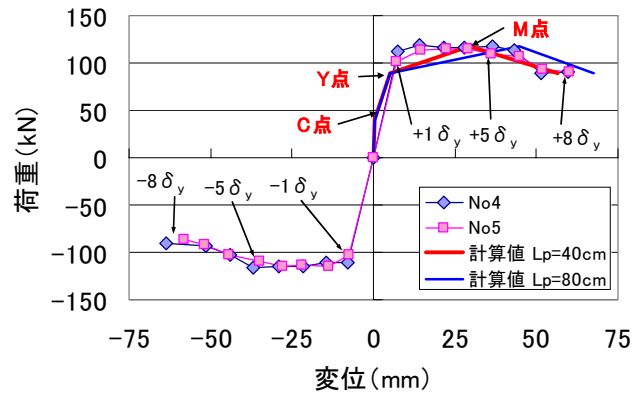


図-13 No. 4, 5 の荷重変位関係の包絡線

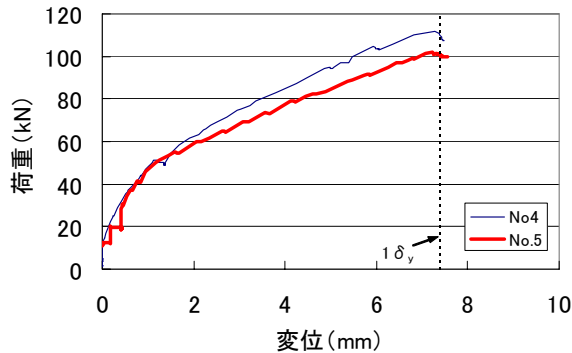


図-14 No. 4, 5 の載荷初期の荷重変位関係

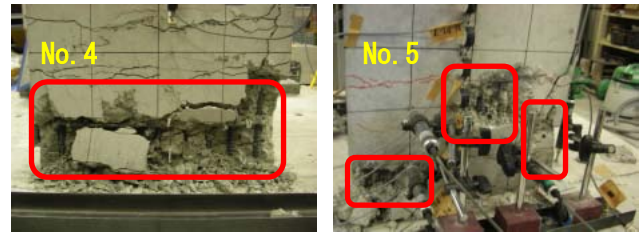


写真-1 軸方向鉄筋座屈時の状況 (5δy)
(囲みは座屈位置)

軸方向鉄筋の段落し位置の下) で座屈が生じた。しかし、最終的な破壊状況は、写真-2 に示すようにどちらも基部から 30cm 程度の範囲でかぶり全体が剥落し、荷重の低下も図-13 に示すように No.4 と No.5 ではほぼ同じ結果であった。これらの破壊状況を目視によって定性的に評価すれば、段落しによって当初予想した塑性ヒンジ長の増加が軸方向鉄筋の座屈直前までは生じたものの、最終的には段落しの有無に関わらず、基部の一定範囲内に破壊が集中した結果と考えられる。

4.3 部材軸方向の曲率分布

図-15 と図-16 に部材軸方向の曲率分布を示す。各イベント時の柱頭変位は、図-13 の計算値 $L_p=40\text{cm}$ に示す C 点, Y 点, M 点であり、(実験値) はその変位時の曲率分布である。載荷初期の段階では、段落しの有無に関わらず部材軸方向の曲率分布が実験値と計算値で比較的一致している。また、段落しを有する No.5 は、載荷初期の段階において、曲率分布が No.4 のような三角形分布ではなく、高さ方向へ均等に増加しているのが分かる。すなわち、載荷初期の段階で

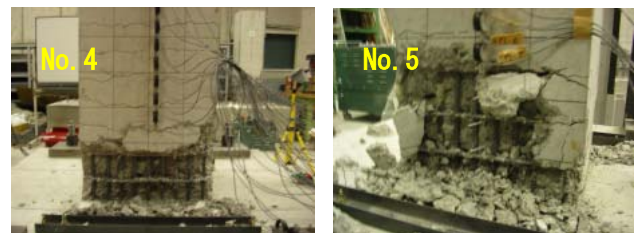


写真-2 最終破壊状況 (8δy)

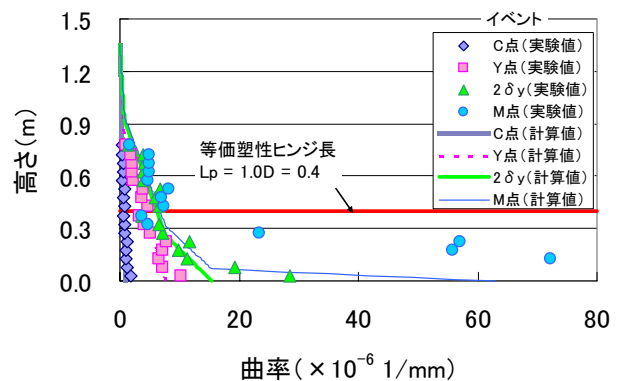


図-15 No. 4 の曲率分布

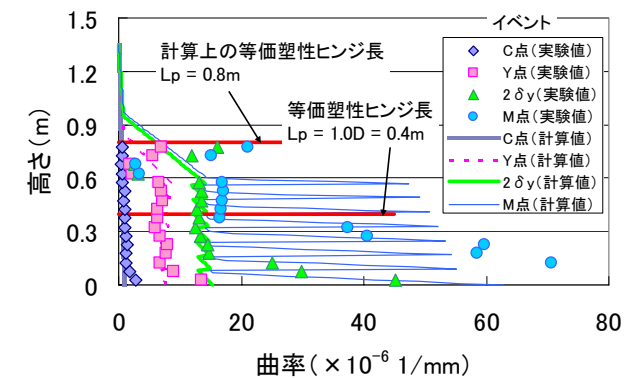


図-16 No. 5 の曲率分布

は、「2.1」や「2.2」で述べたような塑性化領域の拡大に伴う曲率分布の拡大が生じていることが計測結果からも確認できる。そして、曲率分布の拡大による同一変位時の荷重低下は、「4.1」でも述べたように、図-14 に示す結果から確認できる。

No.4 の荷重が $2\delta y$ 以降、ほぼ一定であるのに対し、No.5 の荷重は、 $3\delta y$ まで上昇を続け、荷重変位関係は、No.4 とほぼ同じになっている（図-13）。また、曲率分布も変位の増加に伴い、M 点では No.4 と No.5 は同じように基部へ変形が集中している（図-15、図-16）。

以上より、载荷初期の段階では、段落しによって曲率分布の拡大が生じていても、破壊の局所化によって等価塑性ヒンジ長領域の平均曲率という概念が使えないため、計算のような変形性能の向上が見られなかったと考えられる。

4.4 等価粘性減衰定数と累積吸収エネルギー

図-17 に等価粘性減衰定数、図-18 に累積履歴吸収エネルギーを示す。No.4 の基準試験体では、 $5\delta y$ 時点の等価粘性減衰定数がもっとも大きく、その後は段落しを行った No.5 へ徐々に近づいている。また、履歴吸収エネルギーについては、No.5 は No.4 と比較して若干低下する結果となっている。以上より、段落しを行っても変形性能に大きな変化は生じないが、履歴吸収エネルギーについては、若干低下することが確認された。

5. まとめ

柱部材の経済的合理性の追求と、柱部材の変形性能向上のため、段落しを可能な限り細かく行い、作用断面力と断面耐力の分布を合わせた柱部材において正負交番载荷実験を行った。本研究の範囲で得られた結論をまとめる。

(1)塑性ヒンジ領域内から载荷面全ての軸方向鉄筋を段落ししても、部材の耐力は段落しの無い柱部材と同等である。

(2)塑性ヒンジ領域内から载荷面全ての軸方向鉄筋を段落ししても、変形性能は段落しの無い柱部材と同等であるが、履歴吸収エネルギーが若

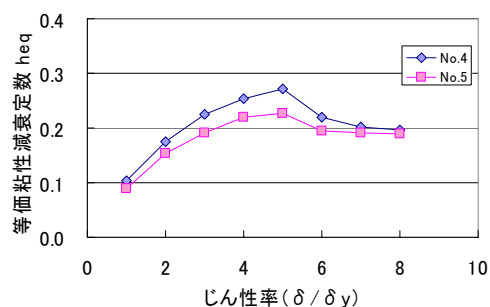


図-17 No. 4, 5 等価粘性減衰定数

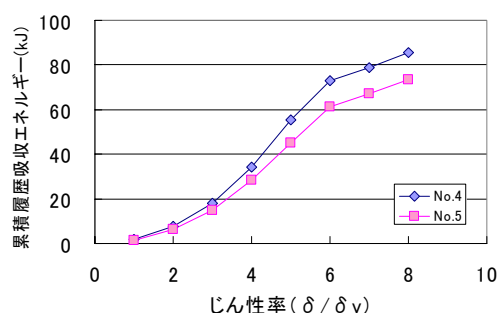


図-18 No. 4, 5 履歴吸収エネルギー

干低下する。

(3)段落しによって载荷初期においては、曲率分布が部材軸方向へ拡大する。しかし、最終的には、破壊の局所化により計算のような変形性能の向上は見られない。

以上のことから、塑性ヒンジ領域内から軸方向鉄筋の段落しを行うことで、鉄筋量の削減が可能であるとの見通しを得た。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造的能照査編），pp.133-134，2002
- 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）pp.98-106，pp.242-247，2004
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），pp.177-179，2002
- 4) 米田大樹，原夏生，三島徹也，島弘：塑性ヒンジ領域内で軸方向鉄筋を段落した柱部材の変形性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.973-978，2006.6
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書（耐震性能照査編），pp.28-30，2002