

論文 二軸曲げを受ける RC 柱の耐震特性に関する軸力および帯筋量の影響

佐藤 知明^{*1}・北田 俊行^{*2}・島田 功^{*3}・角掛 久雄^{*4}

要旨：正方形断面の RC 柱をモデルに、鉛直荷重と二方向の水平荷重を与え、損傷や曲げの履歴特性などにおよぼす軸力および帯筋量の影響を、実験および三次元非線形 FEM 解析により検討した。二軸曲げ状態においても、耐力はかぶりコンクリートが剥離に至る状態で決まり、曲げ耐力におよぼす軸力および帯鉄筋量の影響は小さいことが確認できた。しかし、軸力が増加すると、最大耐力時の水平変位は小さくなり、帯鉄筋の拘束も大きくなる傾向がみられた。さらに、帯鉄筋の拘束効果は最大耐力に近い状態になってから発揮されることがわかった。これらの特性は、三次元非線形 FEM 解析によっても確認できた。

キーワード：RC 柱、耐震特性、軸力、帯筋量、拘束効果、二軸曲げ実験、非線形 FEM 解析

1. はじめに

土木構造物である RC 橋脚に対しては、地震時のじん性確保のため、道路橋示方書¹⁾（以下、道示と呼ぶ）において、帯鉄筋量が規定され、またコンクリートに余裕を持った設計が行われる。そこでは、一般に平均軸圧縮応力が 1.0 MPa より小さな断面で設定する場合が多い。

著者らも、これまでに、平均軸圧縮応力を 1.0 MPa として二軸曲げを受ける RC 橋脚に関する研究²⁾を行ってきたが、早川らによる研究³⁾においても同値を採用している。近年、他にも RC 橋脚に対象とした二軸曲げに関する研究が見受けられるようになってきたが、二軸曲げ状態での平均軸圧縮応力とじん性の関係を定量的に示された研究は少ない。そこで、本研究では軸力と二方向曲げを受ける正方形断面の鉄筋コンクリート柱(RC 柱)モデルを対象として、損傷特性や曲げの履歴特性におよぼす軸力および帯鉄筋量の影響について実験し、三次元非線形 FEM 解析により検討することとした。ここで、二軸曲げは、Y 方向に一定荷重を載荷し、X 方向に繰り返し漸増荷重を崩壊するまで与えた。軸力は鉛直荷重により与え、平均圧縮応力が 1.5, 1.0, 0.5 MPa

の 3 ケースとした。また、帯鉄筋量の影響については、著者らがこれまで用いてきた実験供試体の帯鉄筋量の 2 倍程度の体積比を想定した 2 種類の供試体で行った。本論文は、これらの実験結果をまとめ、二方向載荷時の変形特性や最大荷重値より得られる耐力の相関関係、損傷の状態および帯鉄筋の拘束効果について述べている。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験に用いた基準供試体は、これまで用いてきた実験供試体であり、軸圧縮応力度 1.0MPa、帯

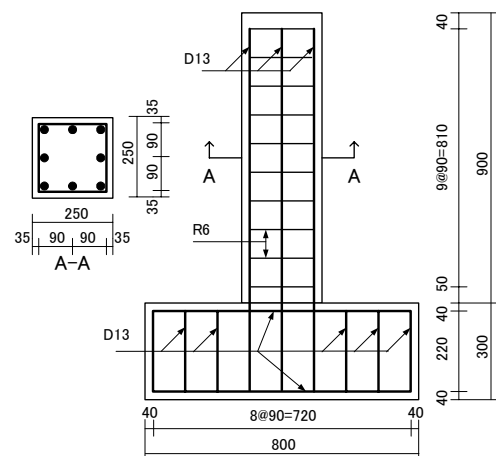


図-1 基準供試体 (単位: mm)

*1 大阪市立大学大学院 後期博士課程 都市系専攻 工修 (正会員)

*2 大阪市立大学大学院 工学研究科教授 都市系専攻 工博

*3 オガノ (株) 技術企画室 室長 工博 (正会員)

*4 大阪市立大学大学院 工学研究科助手 都市系専攻 工修 (正会員)

表－1 実験供試体名称・諸元および材料強度

名称	平均圧縮 応力 (σ_c)	帯鉄筋			コンクリート		鉄筋		Y方向荷重	
		径(R) (mm)	間隔(S) (mm)	体積比 (ρ_s)	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	降伏強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	強度 F_y (kN)	倍率 α
(1) N05R6S90	0.5	6	90	0.70	21.3	24.2	368.3	188.7	22.3	0.58
(2) N10R6S90	1.0	6	90	0.70	28.8	28.6			29.1	0.66
(3) N15R6S90	1.5	6	90	0.70	21.3	24.2			27.0	0.60
(4) N10R6S50	1.0	6	50	1.26	24.2	23.8	357.6	186.9	30.5	0.63
(5) N10R8S90	1.0	8	90	1.24	25.7	24.2			30.6	0.63

筋径 6 mm, 配置間隔 90 mm (以下:帯筋径 R, 配置間隔 S とする) で配置し, 設計基準強度 (コンクリート: 24 MPa, 鉄筋: 345 MPa) を用いると曲げ破壊型となるものである。基準供試体の概要は, 図－1 に示すように, RC 柱は 25×25 cm の正方形断面とし, 柱の主筋には D13 を 8 本有し, 軸方向鉄筋比は 0.943 %, 帯鉄筋体積比は 0.70 % であり, 道示に基づく曲げせん断耐力比は 1.31 となっている。なお, フーチングから載荷点までの高さは 800 mm である。さらに, 帯筋量を変化させた実験を行うため, 基準供試体に対して, 帯筋量を 2 倍程度とした 2 つの供試体を作成した。1 つは, 鉄筋径を変化させずに配置間隔を半分程度(50 mm)としたもの, もう 1 つは, 同配置間隔で鉄筋径を上げた(R8 mm)供試体とした。

2.2 載荷方法及び供試体

本実験では, 図－2 に示すような一定軸力を与える載荷装置を用いて次のような荷重を順次載荷させている。載荷手順は, 次のとおりである。

載荷 1. 軸力 N を RC 柱に導入する。

載荷 2. 一定強度の Y 方向荷重 F_y を載荷する。

載荷 3. X 方向への正負交番載荷 F_x を実施する。
なお, Y 方向一定荷重強度 F_y は, 道示の規定にしたがって算定した一軸曲げを受ける場合の鉄筋初降伏荷重強度 P_{y0} に対する倍率 α により決定する。

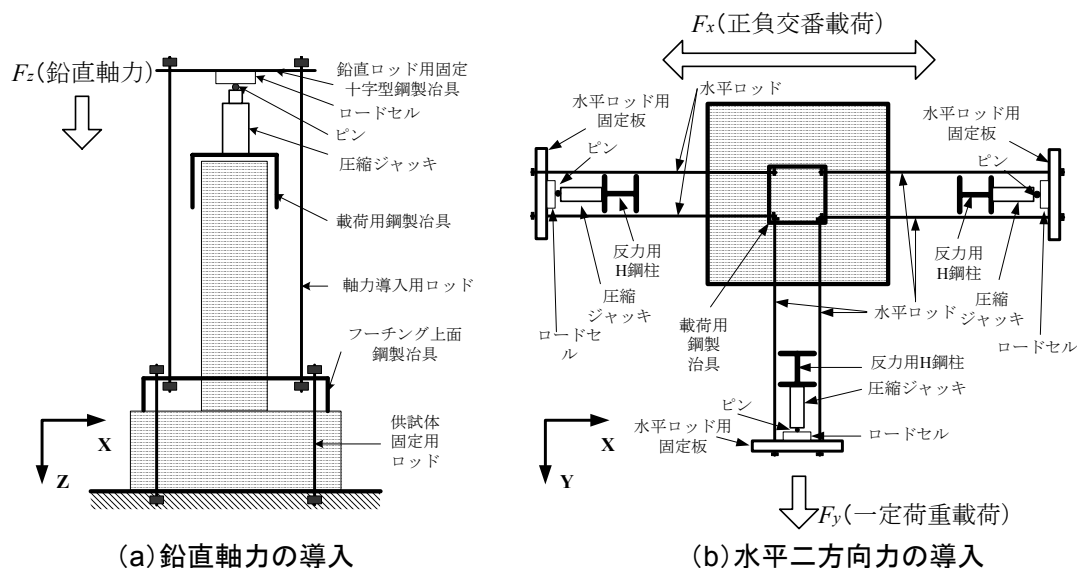
$$F_y = \alpha P_{y0} \quad (1)$$

供試体名称, 荷重倍率 α , および材料強度などについて整理すると表－1 のとおりである。

3. 実験結果

3.1 荷重－変位履歴の関係 (X 方向)

図－3 に実験結果から得られた X 方向の荷重－変位の履歴関係を示す。また, 図中の ●印は鉄筋降伏が, ○印は最大水平荷重が発生した時点である。図－3 (1)～(3) より, 正負の鉄筋降伏位置をつなぐ傾きは, 作用軸力が低い(1) N05R6S90 に比べ, (2) N10R6S90 および(3) N15R6S90 のものが立っており, 軸力が大きいほど初期の剛性が高くなることを示している。また, 最大耐力が発生するときの変位量については, 軸力が高いものほど減少する傾向を示した。これら 2 点より, 軸力の高いものほど, 地震時応答に重要な



図－2 載荷装置

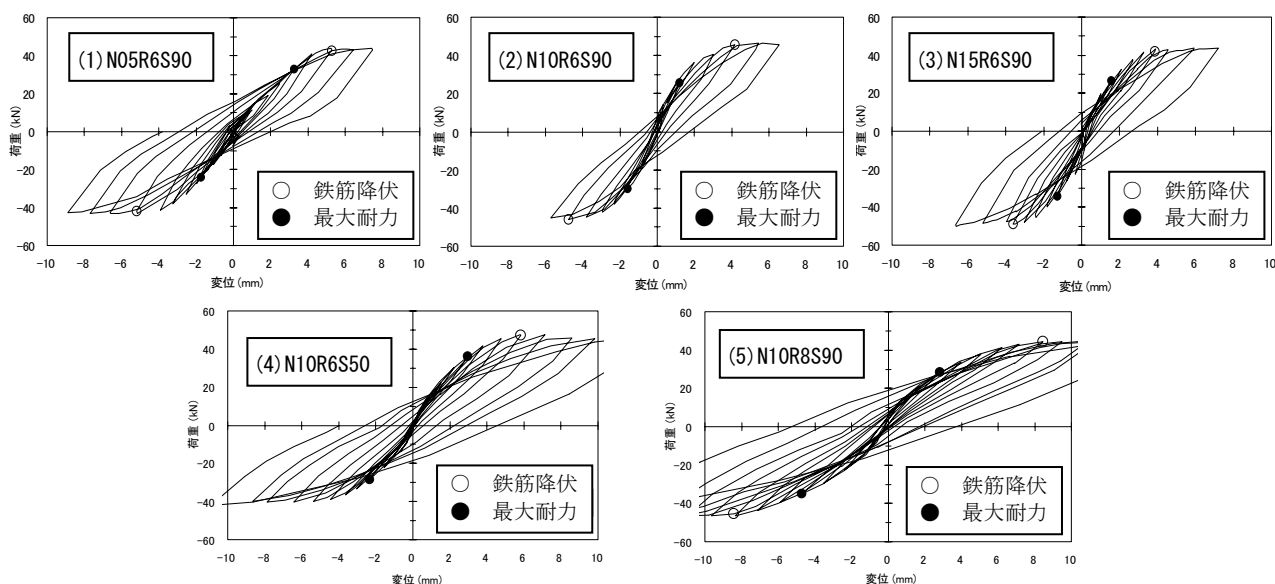


図-3 (X方向)荷重-変位関係

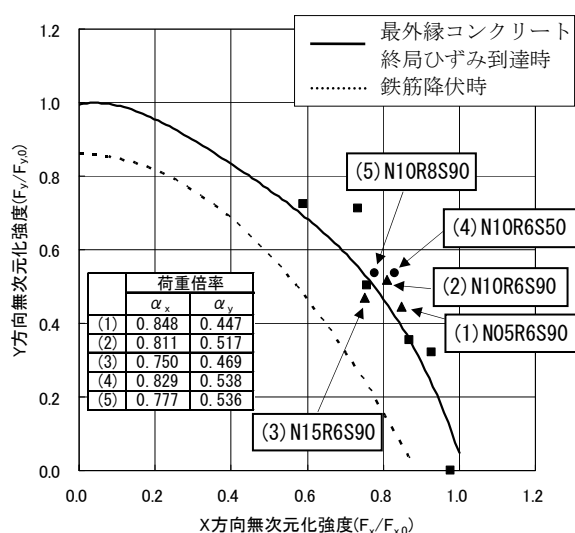


図-4 二方向载荷の耐荷力相関関係

要素となる変形性能（じん性）が低下することがわかる。一方，帯鉄筋量を増加させた(4)N10R6S50 および(5)N10R8S90 は，二軸曲げにおいても変形性能（じん性）が向上することがわかる。

3.2 二方向荷重 (F_x - F_y) 相関関係

ここでは，本研究の主題の一つでもある二軸曲げ時の RC 柱の有する最大耐力についての検討を行う。Y 方向への一定荷重強度 F_y および X 方向への正負交番载荷により得られた最大値から，二方向荷重 (F_x - F_y) に関する相関関係が得られる。実験結果より得られた最大耐力値を X 軸に，Y 方向荷重値 F_y を Y 軸に無次元化表示し

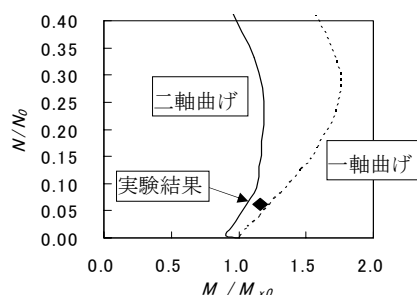


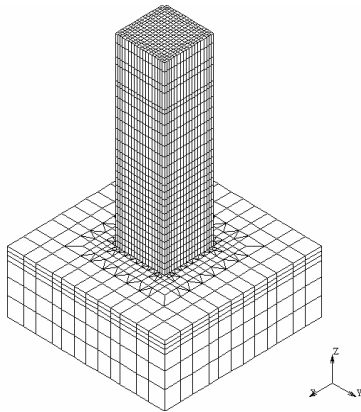
図-5 軸力-曲げモーメント相関関係

たものを図-4 に示す。基準強度 $F_{x,0}$ は，一軸曲げ実験の材料実験値を用いて，FEM により得られた圧縮側最外縁コンクリートが終局ひずみとなる荷重値である。また，図中の曲線は，材料実験値を用い，Y 方向荷重および X 方向へ単調漸増载荷として，FEM を用いて算出した解析値である。実線は，圧縮側最外縁コンクリートが終局ひずみに達するときの作用荷重値を結んだもの，点線は，同計算における引張側鉄筋降伏時の相関図値であり，また，■印は軸圧縮応力 1.0 MPa として実施した Y 方向荷重強度を変化させたこれまでの実施結果²⁾である。

図より，軸力や帯鉄筋量を変化させても，実験結果は概ね最外縁コンクリートが終局ひずみとなる実線に沿って分布することがわかる。

3.3 軸力と曲げの関係 (N-M相関関係)

図-5 に，3.2 節に準じて，軸力と曲げ耐力の関係に着目した結果を示す。縦軸の軸力は圧縮強度で無次元化している。横軸には，各軸力に



図－6 有限要素解析モデル

表－2 非線形解析用の諸定数

供試体N10R6S90				
		コンクリート	鉄筋	
ヤング係数	E_c, E_s	28.6	188.7	GPa
ポアソン比	ν	0.167	0.3	
Mohr Coulomb式 係数	α	0.272477		
	σ	5.70696		
von mises	σ_s		368.3	MPa
	第2勾配		1.887	GPa
圧縮強度	E_{ck}	28.8		MPa
引張強度	E_t	1.0		MPa
軟化係数	E_{sof}	90.4		MPa
圧壊ひずみ	ϵ_u	0.0035		
ひびわれ域の せん断伝達率		0.2		

二軸曲げ（倍率 $\alpha=0.60$ ）として求めた曲げ耐力を一軸曲げ耐力値で除し、無次元化表示している（実線）。また、同図には、一軸曲げの場合も点線で併記した。この図は(3)N15R6S90の結果（◆印）であるが、圧縮降伏軸力 N_0 で換算すると軸力比は0.07であり、実験結果は相関曲線のやや外側にプロットされた。また、解析結果が示す軸力と曲げの相関関係より、本検討で使用した断面が最大曲げモーメントを発生させる軸力比は、二軸曲げの場合には0.2付近、一軸曲げの場合0.3付近にあり、橋脚を対象とした本実験の軸力比レベルは低い状態であることがわかる。

4. 非線形 FEM 解析

4.1 解析モデルおよび解析条件

柱の断面方向の要素分割は 18×18 分割、高さ方向については、柱基部から載荷点高さの1/2までは、帯鉄筋配置間隔の1/3（= 30 mm）とし、残り1/2区間は同間隔の1/2（= 45 mm）とした。鉄筋とコンクリートは完全付着とし、それぞれトラス要素、ソリッド要素でモデル化しており、

フーチングを含む全節点数は13456、全要素数は13084であった（図－6）。また、非線形の定義として、コンクリートおよび鉄筋の材料強度は実験当日に実施した材料試験結果を用い、コンクリートにはMohr Coulombの破壊基準を用い、引張側については、材料試験値から破壊エネルギーを算定し、引張軟化曲線を定義した。また、鉄筋についてはバイリニア型とし、第2勾配については、ひずみ硬化を考慮してヤング率の1%と仮定した。解析時の諸定数は、表－2に示すとおりである。

解析時の支持条件として、フーチング下面を全自由度固定とし、荷重を載荷する柱上部については、実験時に載荷板で囲まれる領域（頭部より200 mmの間）を弾性部材とし、その中央点に対して荷重条件を設定し、鉛直軸力およびY方向一定荷重については荷重制御、X方向の載荷については変位制御で解析を行った。

4.2 解析結果

実験損傷結果とFEM解析結果を比較して図化したものを図－7に示す。まず、図－7(b)は実験終了時にスケッチした損傷状況図であり、図中、実線はひびわれを、ハッチング部は圧縮破壊領域を示している。また、図中の破壊は0.5D（D：柱の断面高さ）ごとに引いている。次に、図－7(a)は圧縮側から見た応力コンター、図－7(c)は引張側から見たひずみ分布、図－7(d)は柱基部における横断面内のひずみ分布である。

例えば、(1)N05R6S90のFEM結果では、圧縮側コーナー部の圧縮破壊に関連し、応力の分配が見られ、引張側では、ひずみ分布の縞模様とひびわれ高さがほぼ一致していることがわかる。

なお、帯鉄筋断面を大きくした(5)N10R8S90の実験結果において、柱基部から0.5D（= 125 mm）付近に大きなひびわれが確認できるが、実験時の観察において、柱内部に帯鉄筋が並行して確認されている。本供試体においては、かぶりは35 mmであるが、実橋脚におけるかぶりは100 mm以上取られるため、このような特殊な損傷が生じる事は少ないものと考えられる。また、

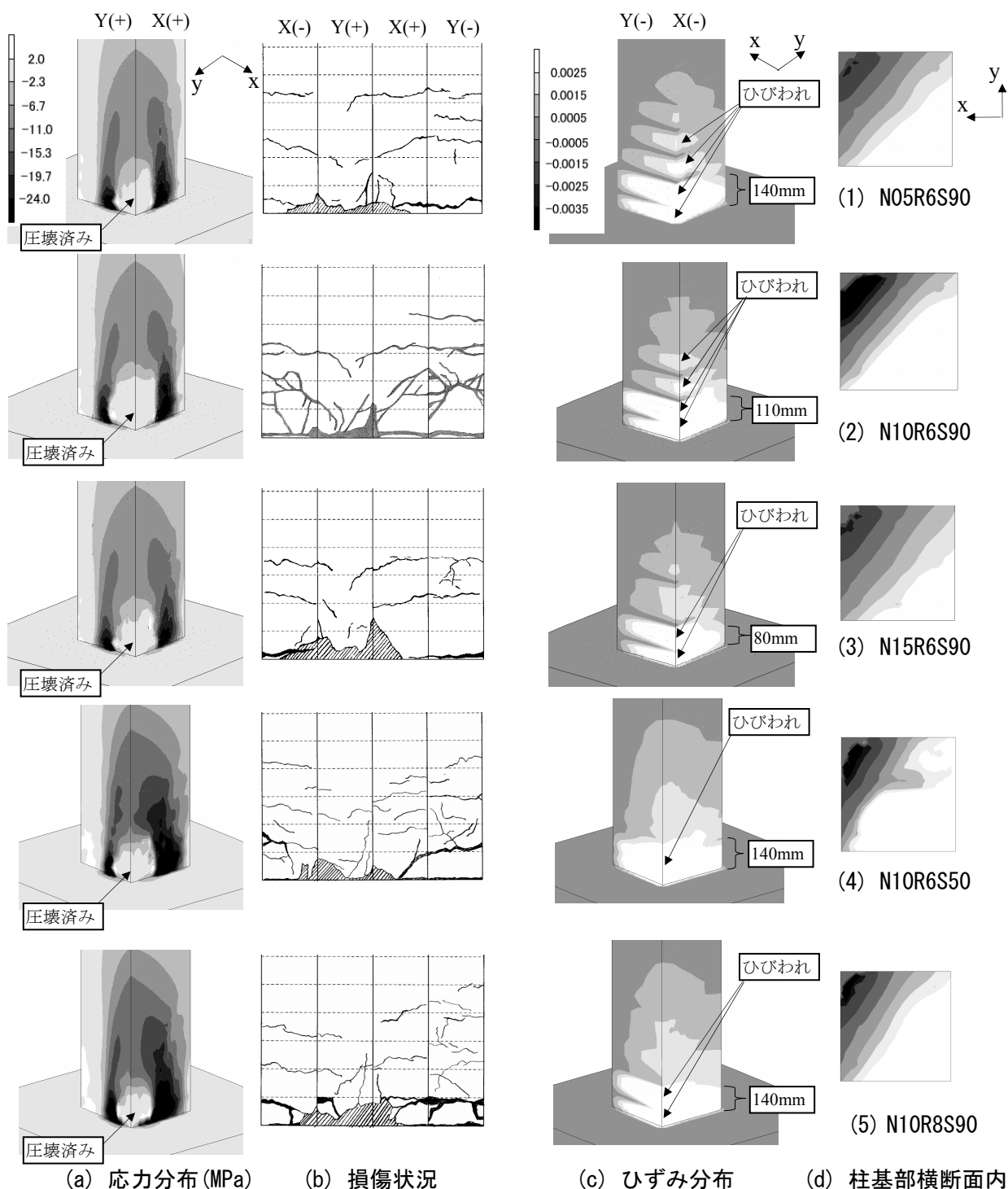


図-7 柱基部の鉛直方向ひずみ分布

圧縮側では、軸力の高い(3)N15R6S50は、他の結果に比べてやや高い位置まで圧縮破壊していた。また、解析結果では、全ケースともに圧縮側のコーナーは圧壊しており、さらに高さ方向に2.5D付近まで高い圧縮応力状態となっていた図-7(a)。さらに、引張側のひずみ分布図-7(c)を見ると、帯鉄筋間隔の狭い(4)N10R6S50では、柱基部のひびわれ発生を示す白色の領域が1つ

であるのに対して、他の結果は2段以上になっていることがわかる。また、図-7(d)より全ケースとも左上を頂点とする三角形の分布を示し、平面保持が成り立つものと判断できる。

4.3 帯鉄筋ひずみに関する検討

本実験では、道路橋示方書¹⁾にも規定されている帯鉄筋による横拘束効果が二軸曲げ作用下において有効に機能するか確認するため、塑性ヒ

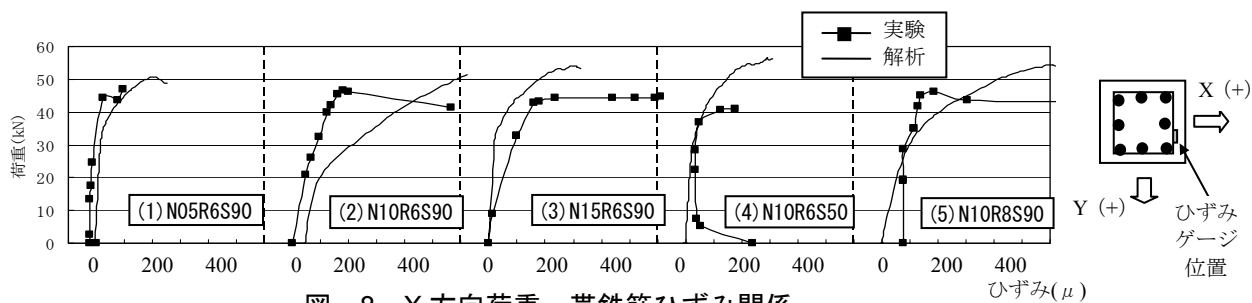


図-8 X方向荷重-帯鉄筋ひずみ関係

ンジ高さのほぼ中心に配置された帯鉄筋に対し、主鉄筋間の中央にひずみゲージを取り付け（図-8）、計測を行っている。図-8 に X(+)方向への荷重強度と X(+)側ゲージのひずみの包絡線を FEM 解析値と比較して示す。X(+)方向への荷重が増加して行くと、圧縮側のコンクリートは鉛直方向ひずみが増大し、ポアソン効果により X および Y 方向のひずみが増加することとなる。それに伴い、帯鉄筋に対しては、引張の状態となる。図より、全ケースともに最大荷重に近くなると、帯鉄筋のひずみの増加が見受けられ、コンクリートに対する拘束効果が発揮されていることが確認できる。

4.4 帯鉄筋による拘束効果の分布

(2)N10R6S90 に対する FEM 解析結果より得られた鉛直 (Z) 方向に対するコンクリートの応力-ひずみ関係を図-9 に示す。太線は帯鉄筋が配置されている高さ（着目断面 1）、また、細線は帯筋が配置されていない高さ（同 2）での着目位置 A, B, C の結果である。帯鉄筋が配置されていない断面では 700 μ 付近から、配置されている断面の結果に比べ勾配が低下しており、帯鉄筋の有無により立体的に見れば、拘束効果が変化することがわかった。

5. まとめ

本論文では、これまでに実施した 7 体の二軸曲げ載荷実験に加えて軸力および帯筋量を変化させた実験および解析的検討を行ない、次のような結果が得られた。

1) 軸力や帯鉄筋量を変化させても、最外縁コンクリートが終局ひずみ (0.0035) となる状態で決定されることがわかった。

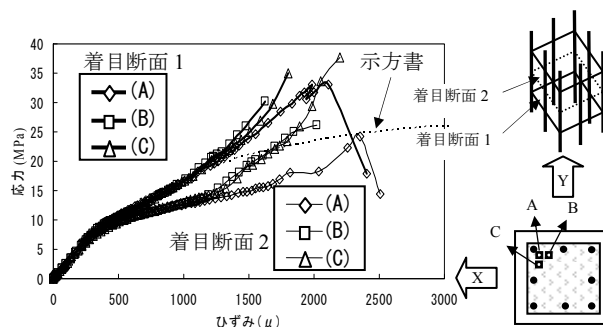


図-9 Z方向に対するコンクリートの応力-ひずみ関係

2) 軸力が増加すると、最大耐力となる水平変位は小さくなるが、帯鉄筋の拘束効果は安定して発揮される傾向がみられた。

3) 帯鉄筋の拘束効果は、最大耐力に近い状態から発揮されることがわかった。三次元 FEM 解析の結果、拘束による効果の局所的不均一性が確認できた。

謝辞 FEM 解析において、大阪市立大学大学院北田裕久氏に多大の協力をいただいたことに感謝いたします。

6. 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3
- 2) 佐藤知明, 小林治俊, 園田恵一郎, 島田功：一定軸力を受ける RC 柱の繰返し二軸曲げ実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 283-288, 2003.7
- 3) 早川涼二, 川島一彦, 渡邊学歩：2 方向地震力を受ける RC 橋脚の耐震性に関する研究, 第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 65-70, 2003