

論文 異なる配筋詳細を有する RC 造柱のせん断破壊後の軸力負担能力の評価実験

加藤 大介^{*1}・李 柱振^{*2}・菅 勝博^{*2}・中村 友紀子^{*3}

要旨：帯筋のフックの配筋詳細が異なる 2 シリーズの RC 造柱試験体を各 5 体ずつ、計 10 体を作成し、中心圧縮、一定変位下、曲げせん断加力を行い、せん断破壊した後の軸力負担能力の評価実験を行った。さらに、帯筋の効果を直接的に評価する方法を検討した。帯筋フックの加工法は、90 度で余長 8d のものと 135 度で余長 6d のものを対象とした。

キーワード：鉄筋コンクリート、せん断破壊、軸力負担能力、配筋詳細、Mohr-Coulomb 基準

1. はじめに

本研究の最終的な目的は、RC 造柱部材のせん断破壊により軸力負担能力を失うメカニズムを実験的に解明し、軸力負担能力喪失変形の評価式を提案することである。本報告では帯筋の配筋詳細が異なる試験体を対象とし、ある変形で支持しうる軸力（あるいはある軸力を支持しうる変形）を評価する実験を行い、さらに、帯筋の効果を直接的に評価する方法を検討する。

柱の軸力負担能力を検討する上で基本となる考え方は中心軸圧縮を受ける場合の挙動であるが、実際の柱は曲げ、軸力およびせん断力を受ける部材の軸力負担能力とのその対応づけは簡単ではない。そこで、本研究では「曲げせん断加力実験」と「中心軸圧縮実験」の他に、「一定変位下での軸圧縮実験」を計画した。せん断破壊する部材を対象とし、実験パラメータは載荷履歴、一定変位下での軸圧縮実験で与える一定変位量、横補強筋詳細（90°、135°フック）とした。表-3(a)のように軸圧縮実験を行った各試験体の実験結果を述べる。なお、実験の詳細は文献[1]に報告してある。

2. 試験体

試験体の諸元を表-1 に、試験体の形状及び配筋を図-1 に、試験体に用いた鉄筋の強度試験、コンクリートの強度試験結果を表-2 (a), (b)

にそれぞれ示す。試験体は H シリーズ 5 体と P シリーズ 5 体の計 10 体からなる。このシリーズの違いは配筋詳細であり、H (Hoop の略) シリーズは通常の配筋例として 135°フック付（余長 6d）とし、P (Poor の略) シリーズは悪い配筋例として 90°フック付（余長 8d）とした。このフック部分は同じ隅角部に連続して配筋されないように 90°づつローテーションして配置した。同じシリーズの断面配筋は全く同一で、載荷履歴のみが異なる。

試験体は 180 × 180 × 1200mm の長方形で、基礎治具で挟み込まれている端部を基礎部分と考えるため、実際の試験範囲は 360mm である。また、軸変形は試験体中央部 310mm の区間を試験体の両面で 2 箇所ずつ、計 4 箇所測定した。

試験体は軸力 150kN 時に、せん断ひび割れがせん断破壊に先行し、またせん断破壊が曲げ降伏に先行するように設計した。

3. 加力装置と載荷履歴

図-2 に加力装置を示す。試験体は上下の端部を基礎治具で挟み込んだ。水平力を載荷する場合は、左右の鉛直ジャッキにより試験体の上下で逆対称変形になるようにした。

載荷履歴を表-3 に示す。載荷履歴は、大別して、主載荷が軸圧縮実験である軸圧縮実験(表-3(a))と主載荷が曲げせん断実験である曲げせ

*1 新潟大学工学部建設学科 教授 工博

*2 新潟大学大学院自然科学研究科 大学院生

*3 新潟大学工学部建設学科 講師 工博

Professor, Dept. of Archi., Niigata Univ.

Graduated student, Niigata Univ.

Lecturer, Dept. of Archi., Niigata Univ.

表-1 試験体諸元

試験体	柱寸法		主筋	帯筋			
	断面	高さ		帯筋	間隔	フック	余長
H-series	180x180mm	360mm	4-D10	2-D6	70mm	135 deg	6d
P-series	0mm					90 deg	8d

表-2 材料強度 (N/mm²)

(a) 鉄筋強度

鉄筋	降伏強度	最大強度
D10	383	521
D6	316	490

表-3 載荷履歴

(a) 軸圧縮実験

試験体	事前載荷 (繰返水平載荷)	主載荷 (単調軸載荷)
	最大部材角 (rad)	載荷時部材角 (rad)
H-0	-	0
H-1	1/50	1/50
H-2	1/50	0
P-0	-	0
P-1	1/50	1/50
P-2	1/100	1/100

(b) 曲げせん断実験

試験体	主載荷(繰返水平載荷)	事後載荷(単調軸載荷)
	軸力 (kN)	載荷時部材角 (rad)
H-3	400	拘束無
H-4	200	拘束無
P-3	400	拘束無
P-4	300	拘束無

(b) コンクリート強度

試験体	コンクリート強度
H-0,1,2 P-0,1,2	33.7
H-3,4 P-3,4	35.2

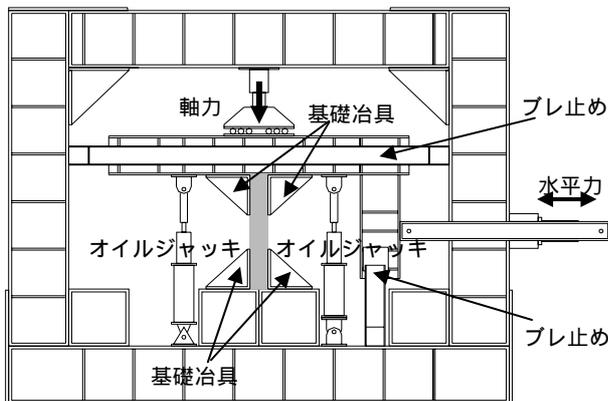


図-2 加力装置

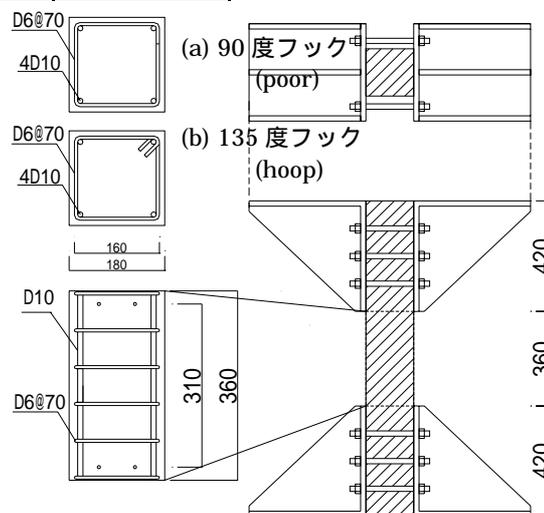


図-1 試験体形状及び配筋図

ん断実験(表-3(b))に分けられる。さらに軸圧縮実験は中心軸圧縮加力と一定変位下での軸圧縮加力実験に分類され、事前載荷のない試験体 H-0, P-0 は単調中心軸圧縮試験体となる。

試験体 H-1, 2 及び P-1, 2 は事前載荷として 150kN の定軸力下で横力を載荷し、せん断ひび割れを両方向に入れた上で、ある一定変位を保ったまま圧縮力を載荷した。具体的には試験体 H-1 及び P-1 は 1/100, 1/50rad の部材角をそれぞれ 2 回づつ繰り返した。その後水平変位を 7.2mm (部材角を 1/50rad) に保ちながら軸力を漸増載荷した。試験体 H-2 は 1/100, 1/50rad をそれぞれ 2 回づつ繰り返した後、水平変位を 0 に戻して軸力を漸増載荷した。試験体 P-2 は 1/100rad の部材角を 2 回繰り返した後、水平変位 3.6mm に保ちながら軸力を漸増載荷した。

試験体 H-3, H-4 及び P-3, P-4 は表-3(b)に示した一定軸力下で曲げせん断加力を行った。与える水平変形は、1/100, 1.5/100, 2/100, 2.5/100rad, …… をそれぞれ 2 回づつとした。所定の軸力を負担できなくなったら、その後、事後載荷として軸方向加力を行った。ただし、このときは、水平方向変位は拘束していない。

4. 実験結果

4.1 軸圧縮実験結果

図-3(a) ~ (f) に軸圧縮試験体の実験結果を示す。それぞれ、軸力-軸方向変形関係が上に、水平力-軸方向変形関係が下に示されている。ここで軸方向変形とは、試験区間の中心をはさんだ 310mm での軸方向の変形とした。また、軸力と水平力は部材の変形後の部材座標系での軸力と

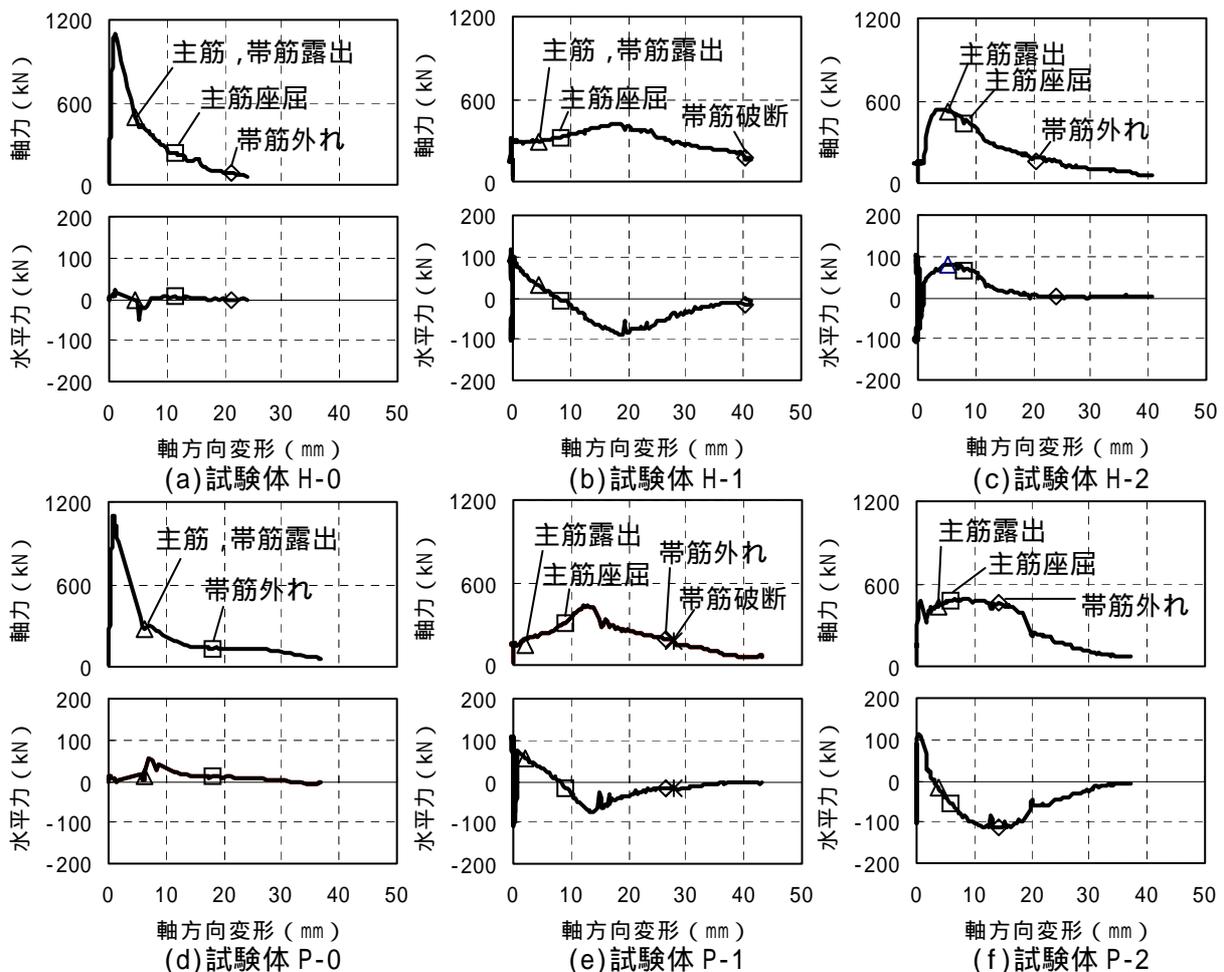


図-3 軸圧縮実験結果図 (H-0,1,2 P-0,1,2)

水平力とした。なお、実験中に観察されたできごととも図中に示されている。

一定変位下の軸圧縮実験の結果は、軸加力実験で与える一定変位が0か0でないによって挙動が大きく異なった。まず、一定変位を0とした試験体 H-2 であるが、その軸力 - 軸方向変形関係 (図-3(c)上) は中心軸圧縮試験体 H-0 (図-3(a)上) のピーク部分を削った形となった。すなわち、事前の水平力加力によりせん断ひび割れが入り、その損傷により最大軸耐力が低下したと解釈できる。

一方、一定変位を与えた試験体であるが、試験体 H-1 (図-3(b)) を例にとって示すと、その軸力 - 軸方向変形関係 (図-3(b)上) は事前の水平力加力で生じたせん断ひび割れが閉じるまでは軸力は増えずに、閉じた後に、軸耐力が上昇することがわかる。その最大軸耐力は同じ事前加力を行い、変位を0に戻して軸圧縮実験を行

った試験体 H-2 (図-3(c)上) より若干小さくなった。また、興味深いのは作用した水平力 (図-3(b)下) で、せん断ひび割れが閉じるまでは、単調に減少していき0になるが、その後、ひび割れ面で滑ろうとする力が働くと、それを阻止する方向に作用し始める。最終的には軸力の低下により必要とされる水平力も減少していく。

これらの試験体で配筋詳細の差による明瞭な違いは観察されなかった。

4.2 曲げせん断実験結果

図-4(a) ~ (d) に曲げせん断試験体の実験結果を示す。なお、図中の は最初に設定した一定軸力が負担できなくなった点であり、曲げせん断加力終了点、すなわち、軸加力実験開始点を示している。軸力-軸方向変形関係 (図-4(a-1) ~ (d-1)) では、比較のため、同じシリーズの一定変位を0とした軸圧縮実験の結果も示した。

高い軸力(400kN)を与えた試験体は、試験体

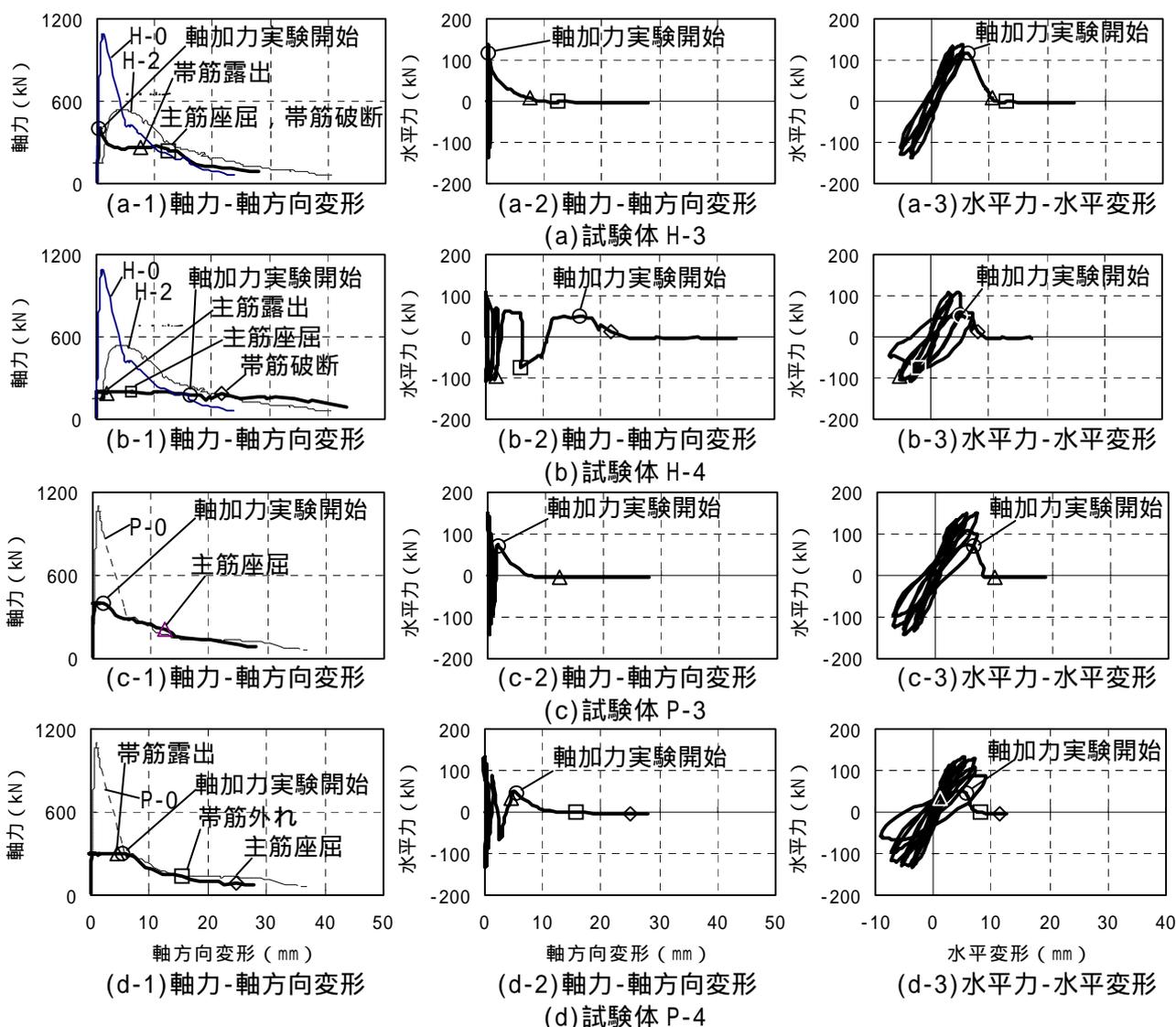


図-4 曲げせん断実験結果

H-3 が $1.5/100\text{rad}$ の繰り返しを終了し、 $2/100\text{rad}$ の変形に向かう途中で軸力を保持できなくなった。そのときの軸変形はわずかであった(図(a-1)の参照)。一方、同じ高い軸力を与えた試験体 P-3 は、 $2/100\text{rad}$ の荷の繰り返し中に軸力を保持できなくなった。また、試験体 H-3 と同様にそのときの軸変形はわずかであった(図(c-1)の参照)。同じ軸力を与えながら悪い配筋詳細と設定している試験体 P-3 の方が軸力負担能力喪失変形が大きかった点についてであるが、今回設定した配筋詳細の影響は軸圧縮実験においても大きな差はみられておらず、特に結果に大きな影響を及ぼすものではなかったと考えられる。これについてはさらに検討が必要である。

低い軸力(200kN と 300kN)を与えた試験体は、試験体 H-4 が $2/100\text{rad}$ の荷の繰り返し中に、試験体 P-4 が $2.5/100\text{rad}$ の荷の繰り返し中に、軸力を保持できなくなった。この2体を比べても、悪い配筋詳細と設定している P-4 の方が一定軸力が高いにもかかわらず、軸力負担能力喪失変形が大きく、試験体 H-3、P-3 の関係と同様今後の検討が必要である。一方、興味深い点は、軸力が低い場合には、曲げせん断実験の軸力-軸方向変形関係が軸圧縮実験結果と交差する軸変形に達すると、軸力負担能力を喪失している点である(図(b-1)(d-1)の参照)。

5. 帯筋の効果の評価法の検討例

本節では文献[2,3]を参考にして行った帯筋

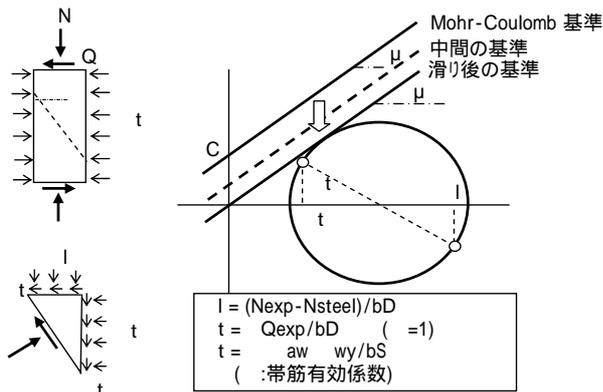


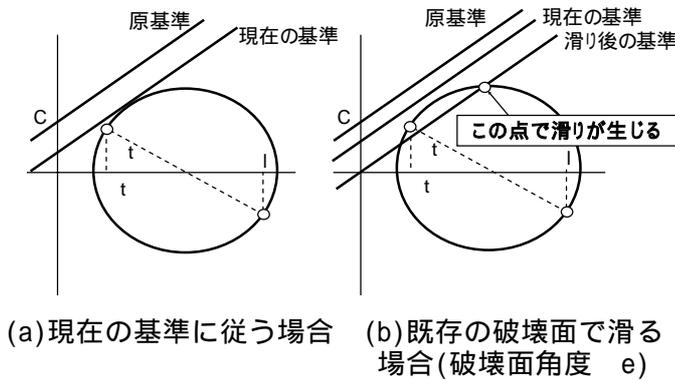
図-5 コンクリートの応力状態と破壊基準の概念

力状態を示したものである。この基準と応力円が接すると破壊が生じるが、文献[2]では破壊後に基準の粘着力 C が減少すると考え、限界変形時の応力円と接する粘着力 C を評価している。

本研究でも一旦応力円が本来の基準に接した後、コンクリートの損傷に従い粘着力 C が低下してゆき、応力円もそのときの基準に従い小さくなっていくと仮定した。応力円は実験で与えた軸力 (N_{exp}) と水平力 (Q_{exp}) を用いて図-5 内に示した式で求めた (N_{steel} は主筋の負担分(後述))。ただし、帯筋も損傷を受けるので、応力円を描く際には帯筋の有効係数 μ を導入した。最終的には粘着力 C は 0 となり、その後基準は変化せず、破壊面の摩擦のみにより応力が伝達される。なお、原基準は、 $C=0.24f_c$ 、 $\mu=0.77$ とした。

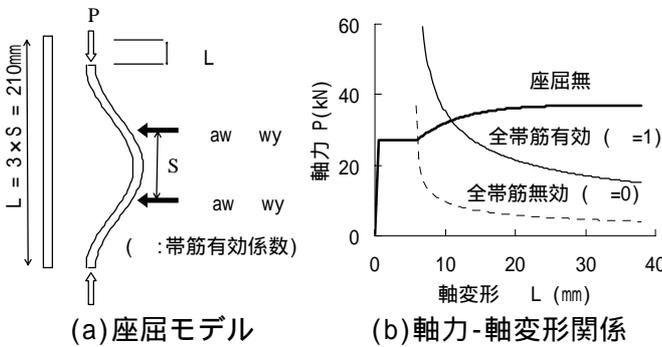
一方、図-6 は 2 ケースの破壊状態を表したものである。基本的には図(a)に示すように、損傷状態に依存するそのときの基準に接すると考えた。しかしながら、それまでの载荷履歴で生じていた既存の破壊面がある場合は、その破壊面で滑る可能性もある。その様子を図(b)に示したが、この場合、応力円がそのときの基準に接していなくとも、それ以上拡大しない。

以上の仮定の下に、試験体の破壊が進行している状態(軸圧縮実験では最大軸力以降、曲げせん断実験では事後加力時)での帯筋の有効係数を推定した。すなわち、基準が滑り後の基準に達する前は μ を 1 と固定し、まず図-6(a)より μ を 1 とした応力円に接する粘着力 C を求める。 C が 0 以上で求まらない場合は滑り後の基準に接する μ を逆算する。ただし、図-6(b)に示すような既存の破壊角度で滑る場合の応力円より大きくならないように制限した。なおその角度はすべての試験体の平均である(図-5 参照) $=60^\circ$ を共通に用いた。なお、コンクリートの応力円を描く際に主筋の負担軸力 (N_{steel}) を座屈を考慮した文献[4]に従い評価し、差し引いた。図-7 に主筋の軸力 - 軸変形関係の例を示すが、これも μ に依存するので、前述した μ の決定は



(a)現在の基準に従う場合 (b)既存の破壊面で滑る場合(破壊面角度 θ)

図-6 破壊状態の 2 つのケース



(a)座屈モデル (b)軸力-軸変形関係
図-7 帯筋有効係数 μ を用いた主筋負担軸力の推定法

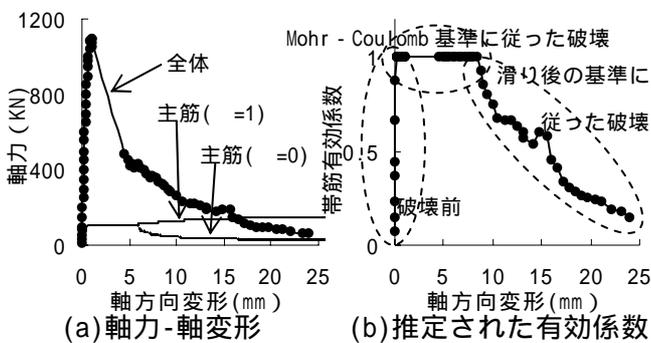


図-8 帯筋有効係数 μ の推定例(試験体 H-0)

の効果の評価の一例を示す。図-5 は Mohr-Coulomb の破壊基準とコンクリートの応

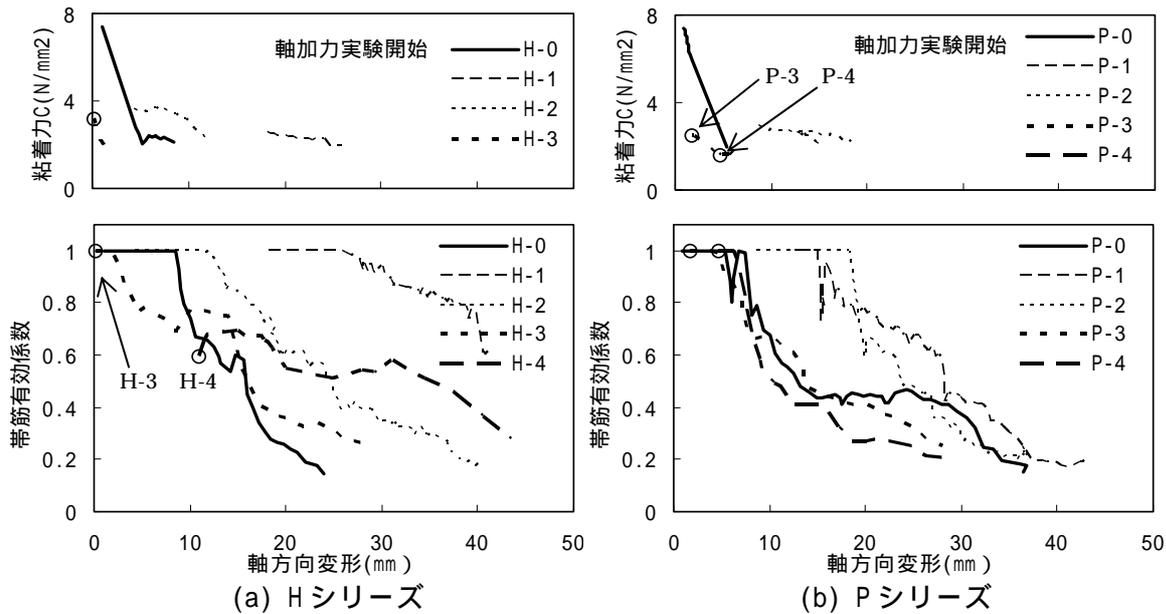


図-9 帯筋の有効係数 と粘着力 C の評価結果
(最大荷重後(H-0,1,2,P-0,1,2), 事後載荷後(H-3,4,P-3,4))

収束計算を要する。

図-8は試験体 H-0 の の推定例である。図(a)が実験で得られた軸力 軸変形関係であり、この関係より推定された帯筋有効係数 を図(b)に示した。図(b)をみると、軸変形が 8mm 程度までは帯筋が全て有効であるが(= 1),軸変形が進むに従って、帯筋の有効係数が低下していくことがわかる。

図-9は、これらの結果をまとめて示したものである。それぞれ下図に有効係数 を示したが、 が 1 のときには粘着力 C が求められており、それを上図に示した。前述したように今回の実験では配筋詳細の影響があまり見られなかったが、対応する試験体 (H-1 と P-1 等) をみるとその差が定量的に観察できる。また、軸力の高い試験体 H-3 の軸力抵抗には粘着力が必要だが、低い試験体 H-4 では粘着力がなくなっても軸力負担をしていることもわかる。P シリーズも、明瞭ではないが、その傾向はみてとれる。今回は、損傷に影響するものとして軸変形を横軸にしたが、その取り方を含め、今後の検討が必要である。

6. まとめ

(1)水平力の事前載荷により 軸圧縮試験体の最

大耐力は低下し、一定変位下で軸圧縮を受ける試験体の最大軸力時の軸変位は大きくなった。

(2)曲げせん断実験では、高軸力試験体の軸力負担喪失時の軸変形はわずかであった、低軸力の場合には、軸力 軸方向変形関係が軸圧縮実験結果と交差する軸変形に達した時点で軸力負担能力を喪失した。

(3)Mohr-Coulomb 基準に基づき帯筋の効果を直接的に評価する方法を検討した。

(4)本実験での配筋詳細の差は明瞭には観察されなかった。

本研究は平成 14 年度科学研究費補助金基盤研究(c)「せん断挙動が卓越する RC 造柱の配筋詳細を考慮した軸力保持性能の評価法」(代表加藤大介)および同補助金特定研究(B)「日米共同研究による都市地震災害の軽減」(代表東京大学地震研壁谷澤教授)によった。

参考文献

- [1]高田雅之, 李柱振, 菅勝博, 加藤大介, 中村友紀子: せん断破壊する RC 造柱の軸力負担能力の評価実験(その 1 ~ 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003 年, pp.223-228
- [2]Santiago Pujol, Mete Sozen, Julio Ramirez (2000)., *Transverse reinforcement for columns of RC frames to resist earthquakes, Journal of Structural Engineering, April 2000, pp.461-466*
- [3]J. P. Moehle, K. J. Elwood, H. Sezen (1999)., *Shear failure and axial load collapse of existing reinforced concrete columns, The first U.S.-Japan Workshop on performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, pp.233-247*
- [4] 加藤大介, 若月康二: 高強度材料を用いた RC 部材の主筋の座屈性状 (Buckling Behaviors of Steel Bars in R/C Columns with High Strength Materials), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 453 号, 1993 年, 11 月, pp.141-147