

論文 せん断破壊型 RC 柱の崩壊に対する直交壁の影響

金 紅日*¹・芳村 学*²・中村 孝也*³

要旨：柱のみの試験体 2 体，柱に直交壁が付いた試験体 4 体の計 6 体に対して，柱の主筋量と直交壁の厚さをパラメータとした崩壊実験を行った。試験体は全てせん断破壊した。柱のみの試験体では，主筋量が多い場合の方が崩壊時の水平変形が大きかった。直交壁付きの試験体では，主筋量が少ない場合には直交壁の付加により柱の崩壊変形が増加したが，主筋量が多い場合には直交壁が付いても崩壊変形は増加しなかった。このことを，直交壁に縦方向ひび割れが発生した後直交壁から柱への軸力移動が起こったことで，説明した。

キーワード：せん断破壊，崩壊，主筋量，直交壁，縦方向ひび割れ，軸力移動

1. はじめに

旧基準による RC ラーメン構造集合住宅の柱には種々の二次壁が取り付くが，想定している加力方向に対して直交方向に取り付く壁（直交壁）については，耐震診断における第 2 種構造要素の判定を除いてその影響を無視することが多い。これは，直交壁が柱の構造性能に与える影響が十分明らかになっていないためである。過去の研究をみても，直交壁が曲げ破壊型柱に与える影響については検討されているが¹⁾，旧基準建物で一般的に見られるせん断破壊型柱に与える影響についてはほとんど検討されていない²⁾。

そこで，本研究では，旧基準によるせん断破壊型 RC 柱を対象として，直交壁が崩壊までの柱の構造性能に与える影響について検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体諸元一覧を表-1 に，試験体概要を図-1 に示す。試験体は両端固定形式の柱とし，実柱の 1/2 程度のサイズを想定した。柱のみのものが 2 体，直交壁付き柱が 4 体の計 6 体であり，すべてせん断破壊するように設計した。

共通因子は以下のとおりである。

柱断面寸法($b \times D$)：300×300mm，

内法高さ(h_0)：900mm， $h_0/D=3$ 。横補強筋比(P_w)：0.11%(2-D6@200)。片側壁長さ(l_w)：250 mm。使用材料：普通強度のもので，鉄筋の規格はすべて SD345。材料特性を表-2 に示す。軸力は全試験体共通とし，柱のみの断面積に対する軸力比(η)を 0.2 とした。実験パラメータは以下のとおりである。主筋比(P_g)：2.65% (D16 使用)，1.69% (D13 使用) の 2 種類。壁厚(t)：壁なし，60mm (壁筋比：0.67%)，90mm (壁筋比：0.44%) の 3 種類。

2.2 加力概要

加力装置を図-2 に示す。加力には，パンタグラフにより上下スタブの平行が保持される逆対称加力装置を用いた。試験体上部に設置した，一端（加力フレーム側）にローラー，他端（試験体側）にピンを有する鉛直アクチュエーターにより所定の鉛直力を加えた状態で，水平アクチュエーターに

表-1 試験体諸元一覧

試験体名	柱				直交壁
	主筋比 P_g (%)	せん断耐力 V_s (kN)	曲げ耐力 V_f (kN)	せん断余裕度 V_s/V_f	断面 $t \times l_w$ (mm)
C16	2.65 [12-D16]	178.0	305.7	0.58	なし
C16W60		—	—	—	60×250[×2]
C16W90		—	—	—	90×250[×2]
C13	1.69 [12-D13]	167.7	244.7	0.69	なし
C13W60		—	—	—	60×250[×2]
C13W90		—	—	—	90×250[×2]

V_s ：荒川 min 式， V_f ：建築学会曲げ耐力略算式

*¹ 東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士(工学) (正会員)

*² 東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

*³ 東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻助手 博士(工学) (正会員)

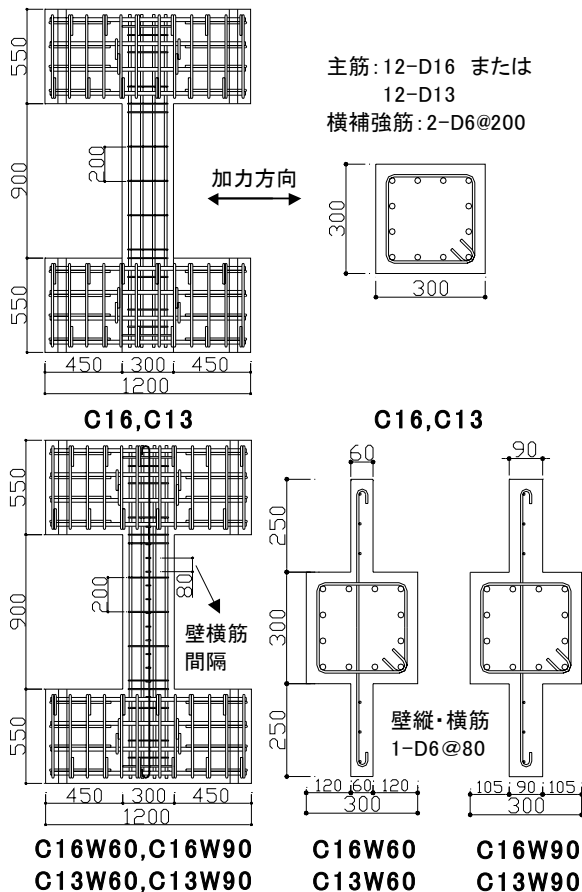


図-1 試験体概要

表-2 材料特性

(a) 鉄筋

呼び名	降伏強度 (MPa)	降伏歪 (%)	ヤング係数 (MPa)
D6	366	0.245	1.60×10^5
D13	392	0.228	1.79×10^5
D16	391	0.254	1.77×10^5

(b) コンクリート

圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時歪 (%)	ヤング係数 (MPa)
28.4	0.199	2.09×10^4

より水平力を加えた。水平アクチュエーターは変形制御とした。鉛直アクチュエーターは荷重制御の状態とし、代わりに崩壊時に備えて鉛直変形に50mmのリミットを設けた。軸力保持能力を喪失して崩壊する際に、この鉛直変形リミッターを作動させることにより実験を強制終了した。

加力は一定軸力下での水平方向正負交番荷と

した。载荷履歴は部材角±0.5%、±1.0%、±2.0%の加力を各一回行った後、軸力保持能力を喪失して鉛直方向に崩壊するまで押し切ることとした。

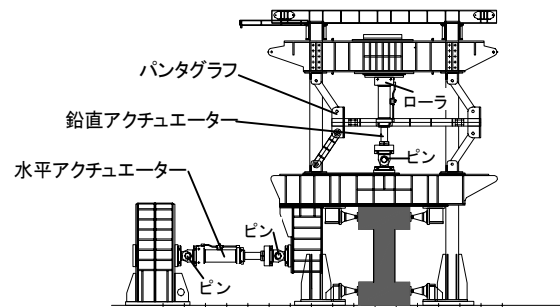


図-2 加力装置

3. 実験結果

3.1 破壊状況

せん断力-部材角関係と破壊状況写真を図-3に示す。ここで、「軸力保持限界」は軸力保持能力を失う直前の点を、「崩壊変形」は崩壊するまでに経験した最大変形を示す。なお、部材角が大きい場合には、水平力とせん断力（部材軸に直交方向に作用する力）との違いが無視できないため、せん断力 V を以下の式(1)により計算した。

$$V = H \cos R + N \sin R \quad (1)$$

ここで、 H : 水平力、 N : 軸力、 R : 部材角。

1) C16 (壁なし)

最初に柱端部に曲げひび割れが生じ、それが曲げせん断ひび割れに進展した。部材角 0.86%で柱中央部にせん断ひび割れが発生し、せん断力が急激に低下した。このときこのせん断ひび割れが貫通する部材中央部の横補強筋が降伏した。5.61%で軸力保持限界に達した。軸力保持限界を超えた瞬間に急激に鉛直方向に縮み、リミッターが作動して実験を終了した。

柱端部に発生した曲げひび割れが曲げせん断ひび割れに進展したことと、せん断力が低下した時に柱中央部の横補強筋が降伏したことは各試験体共通であったので、次の記述から省略する。

2) C16W60 (壁厚 $t=60\text{mm}$)

柱端部に生じた曲げせん断ひび割れが壁に進展して壁に曲げひび割れが発生した。部材角-0.48%で柱全長にわたるせん断ひび割れが発生し、せん

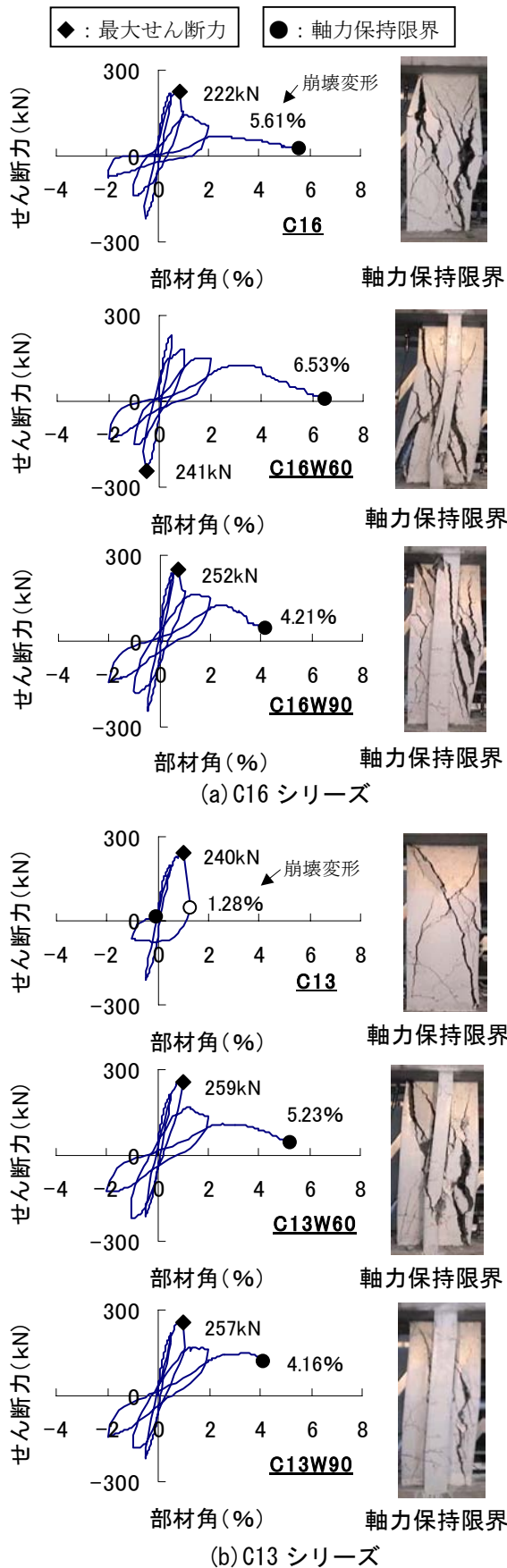


図-3 せん断力-部材角関係と破壊写真

断力の急激な低下が見られた。3.99%で直交壁頭部に縦ひび割れが発生し（図-4 参照），その後しばらくしてから壁下部にも縦ひび割れが入って，このひび割れ幅が部材角の増加とともに広がっていった（図-3 参照）。6.53%で軸力保持限界に達した。なお，直交壁は図-3の破壊写真で見られるように，軸力保持限界まで曲げの変形をしていた。同じく壁厚の小さい C13W60 でも壁の曲げ変形が顕著であったが，壁厚の大きい C16W90，C13W90 ではこのような挙動は見られなかった。

すべての壁付き試験体で，柱端部の曲げせん断ひび割れが壁に進展して壁に曲げひび割れが生じたことは同様であったので，以下の記述では省略する。

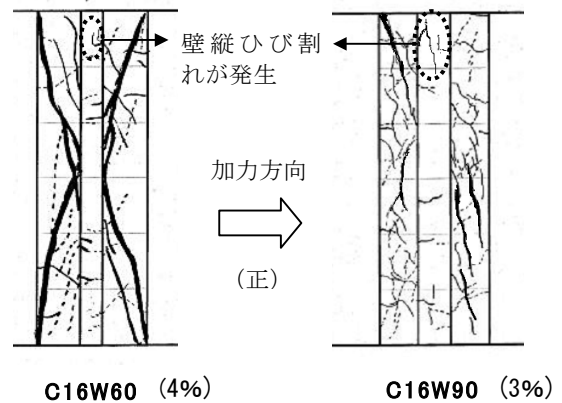


図-4 試験体ひび割れ図の例

3) C16W90（壁厚 $t=90\text{mm}$ ）

0.73%で柱頭にせん断ひび割れが発生し，せん断力が低下した。2.99%で壁頭部に縦ひび割れが発生し（図-4 参照），このひび割れ幅が部材角の増加とともに広がっていった（図-3 参照）。4.21%で軸力保持限界に達した。

4) C13（壁なし）

0.99%で柱中央部にせん断ひび割れが発生し，せん断力が急激に低下した。そして，-0.07%で軸力保持限界に達した。この試験体のみ繰り返し载荷中に崩壊した。そのため，前述の定義による崩壊変形は軸力保持限界時の水平変形と異なる 1.28%となった。

5) C13W60（壁厚 $t=60\text{mm}$ ）

0.99%でせん断ひび割れが柱頭部に発生した。その後，+2 サイクルの 1%で部材中央部にせん断ひ

び割れが発生したが、急激なせん断力の低下は起きなかった。3.32%で壁頭部に縦ひび割れが発生し、その後壁下部にも縦ひび割れが入って、変形の増大とともに壁下部の縦ひび割れ幅が広がっていった。5.23%で軸力保持限界に達した。

6) C13W90 (壁厚 t=90mm)

0.77%でせん断ひび割れが柱頭部に発生し、せん断力が低下した。その後、+2 サイクルの 1%で柱中央部にせん断ひび割れが発生した。4.02%で壁頭部に縦方向ひび割れが発生し、その直後の 4.16%で軸力保持限界に達した。

3.2 最大強度

実験結果一覧を表-3に示す。最大強度については、C16 シリーズ、C13 シリーズともに壁付き試験体の強度は柱のみの試験体の 1.1 倍程度であった。また、壁厚の増加による強度増加はほとんど見られなかった。

表-3 実験結果一覧

試験体名	最大せん断力 (kN)	壁縦ひび割れ発生時変形(%)	崩壊変形 (%)
C16	222	—	5.61
C16W60	241(1.09)	3.99	6.53(1.16)
C16W90	252(1.14)	2.99	4.21(0.75)
C13	240	—	1.28
C13W60	259(1.08)	3.32	5.23(4.09)
C13W90	257(1.07)	4.02	4.16(3.25)

():各シリーズでの柱のみの試験体に対する比率。

文献 2) では、15 階建壁式ラーメン構造の内柱と外柱を対象とした直交壁付き壁柱のせん断実験を行っている。壁厚がパラメータである。せん断破壊した外柱試験体 5 体の実験結果では、直交壁付き試験体の最大強度は壁柱のみの試験体の 1.25 ~1.38 倍であったと報告されている²⁾。本実験での直交壁の効果はそれより小さかった。

本実験での直交壁付き試験体の断面積は柱のみの場合の 1.33 倍と 1.5 倍であり、文献 2) での直交壁付き試験体の断面積は壁柱のみの場合の 1.43 倍 (そのときの強度増大率 1.25~1.27 倍) と 1.86 倍 (同じく 1.34~1.38 倍) であった。

総体的には、直交壁による柱断面積の増大が大きいほど、最大強度の増大も大きいといえる。しかし、壁厚に関しては、文献 2) では壁が厚くなることによる強度増加が見られたが、本実験では壁が厚くなることによる強度増加はほとんど見られなかった。これについては、今後の課題である。

なお、柱のみの場合、最大せん断力の計算値は表-1に示すように、主筋量の多い C16 のほうが C13 より大きい、実験ではそのようなならなかった。この理由の一つとしては、せん断ひび割れが発生すると同時にせん断力が急激に低下したことから、せん断ひび割れ強度がせん断強度を決定する主要因で、主筋量の影響は小さいと考えられる。

3.3 崩壊変形

崩壊変形を表-3に示す。C16 と C13 の比較では、前者のほうが崩壊変形が大きい、これは C16 のほうが主筋量が多かったためである³⁾。

文献 3) の結果に本実験の結果を加えて、崩壊変形と主筋比の関係を図-5に示す。横補強筋比(P_w)と軸力比(η)が同じである場合は、主筋比の大きいほうが崩壊変形が大きくなることが再確認された。

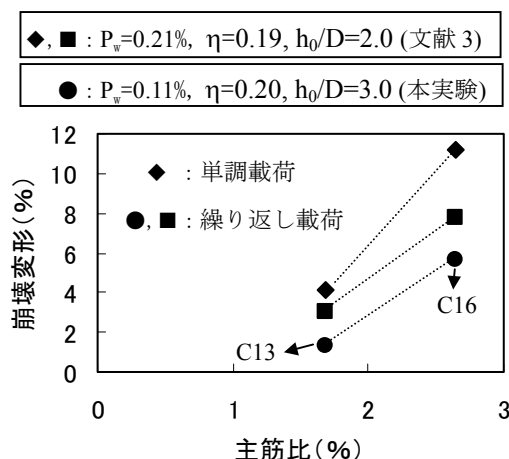


図-5 崩壊変形と主筋比の関係

直交壁付き柱の崩壊変形については、C16 シリーズでは直交壁による効果が見られなかったが、C13 シリーズでは顕著な効果が見られた。

なお、両シリーズともに壁厚の大きい試験体のほうが小さい試験体より崩壊変形が小さかった。壁が厚いほど壁が負担する軸力が大きく、直交壁の効果が大きいと予想されたが、これと反対の結果となった。これについては、今後の課題である。

4. 軸力移動に関する検討

直交壁付き柱の崩壊過程には以下の共通点があった。表-3に示すように、3~4%で壁に縦ひび割れが発生し、その後、0.1~2.5%程度変形が増加した時点で崩壊した点である。壁に縦ひび割れが発生すると、壁の軸力負担能力が低下しそれまで壁が分担していた軸力が柱に移動すると考えられる。以下、この壁から柱への軸力移動に着目して、直交壁が柱の崩壊に与える影響について検討する。

主筋歪と壁縦筋歪の計測位置を図-6に、C16シリーズの最終サイクルにおける歪計測結果を図-7に示す。柱主筋6本、壁縦筋2本で歪計測を行ったが、ここでは、主筋L3、L5と壁縦筋WA1のみについて示す。なお、図-7の計測位置名称は軸力保持限界時での圧縮歪の大きい順に並べてある。

本実験のようにせん断破壊型（厳密には前述のようにせん断ひび割れ破壊型）の柱では、せん断ひび割れ幅の拡大に伴い、せん断ひび割れ面周辺の主筋の圧縮歪は増加するが（軸力負担の増大のため）、せん断ひび割れ面から離れた位置での主筋の圧縮歪は変わらない、ことが知られている³⁾。

C16の場合、せん断ひび割れ面に近いL3-2、L3-3の主筋位置で崩壊に近いところにおいて圧縮歪の増加が見られるが、L3-1、L3-4、L3-5の主筋位置では圧縮歪の増加は見られない。また、せん断ひび割れが貫通しない主筋L5では、どの位置でも圧縮歪の増加は見られない。

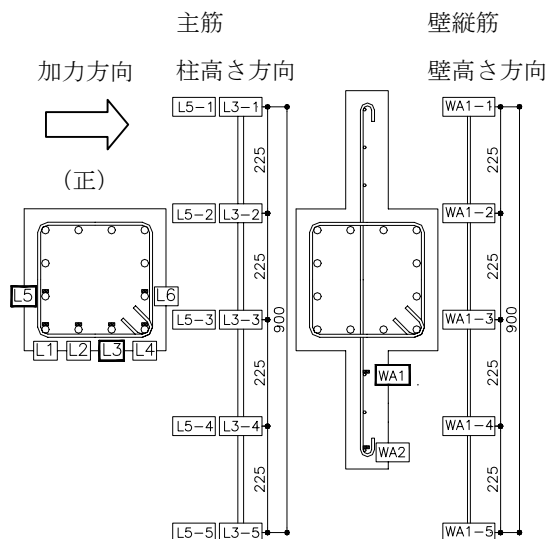


図-6 主筋歪と壁縦筋歪の計測位置

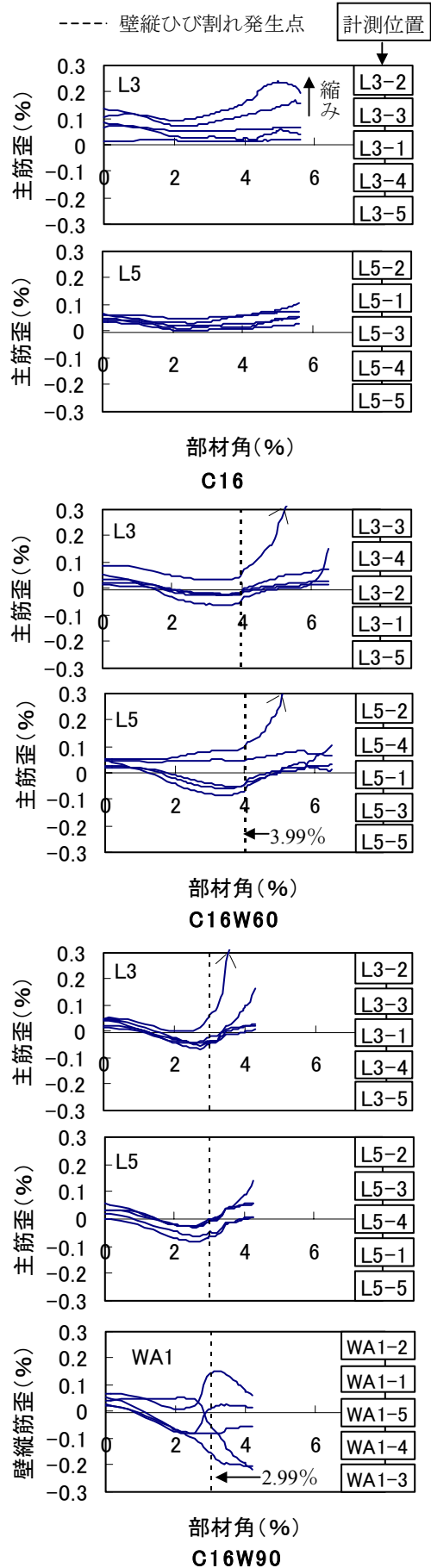


図-7 主筋・壁縦筋歪一部材角関係

一方、C16W60 の場合には、C16 と異なり、壁に縦ひび割れが発生した 4%程度から、L5-1 を除くすべての主筋位置で圧縮歪の増加が見られる。

C16W90 の場合にも、C16W60 と同様に、壁に縦ひび割れが発生した 3%程度から、すべての主筋位置で圧縮歪の増加が見られる。一方、壁縦筋については逆に、部材角 3%程度から多くの位置で圧縮歪の低下（引張歪の増加）が見られる。

以上のことから、C16W60 と C16W90 では、壁に縦ひび割れが発生してから壁が負担していた軸力が柱に移動したと推測される。なお、以上の鉄筋歪性状は、L3、L5、WA1 と同条件にある他の鉄筋でも同じであった。

また、C13W60 でも壁縦ひび割れが発生してからほとんどすべての主筋位置で圧縮歪の増加が見られたが、C13W90 では壁縦ひび割れが発生した直後に崩壊が起こったので、他の直交壁付き試験体のような軸力の移動に伴う歪変化は見られなかった。

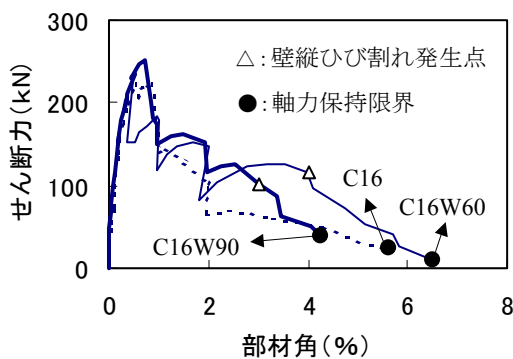


図-8 C16 シリーズの包絡線

前述した直交壁から柱への軸力移動が柱の挙動に与える影響を C16 シリーズの正加力時包絡線(図-8) で検討する。部材角 2%程度から軸力保持限界までの各試験体の耐力低下推移を比較すると、C16 の場合は軸力保持限界までの耐力低下が緩やかであるのに対し、C16W60 と C16W90 の場合は壁に縦ひび割れが発生した後の耐力低下が大きい。このことから、壁縦ひび割れ発生以降、直交壁から柱への軸力移動が起こり、柱の軸力負担が C16 と同程度になったことがわかる。C16 シリーズで崩壊変形に対する直交壁の効果が見られなかったのはこのためである。一方、C13 シリーズでは、C13

の崩壊変形が壁縦ひび割れが生じた部材角 3~4%より小さかったため、直交壁の効果が見られた。

5. まとめ

本実験より得られた結果を以下に示す。

1) 主筋量の多い柱のみ試験体 C16 の崩壊変形は 5.61%で、主筋量の少ない柱のみ試験体 C13 の崩壊変形は 1.28%であった。一方、直交壁付き試験体の崩壊変形は 4~6%程度であり、直交壁の効果は C16 シリーズではなかったが、C13 シリーズでは顕著であった。

2) 直交壁には部材角 3~4%程度で縦方向にひび割れが入り、その以降壁が負担していた軸力の柱への移動が起こった。その結果、C16 シリーズでは、C16 の崩壊変形が 3~4%より大きかったため、直交壁が付いても崩壊変形は増加しなかった。しかし、C13 シリーズでは、C13 の崩壊変形が 3~4%より小さかったため、直交壁が付いた場合の崩壊変形は増加した。

3) 直交壁が付くことによる強度増加は 10%程度であった。また、強度増大に対する壁厚さの影響はほとんどなかった。

謝辞

本研究は、東京都立大学 21 世紀 COE プログラム「巨大都市建築ストックの賦活・更新技術育成」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 加藤大介, 大塚祐二: RC 造柱にとりつく面外袖壁の軸力負担性能の評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第 567 号, pp.93-99, 2003.5
- 2) 岩城信次, 後藤哲朗, 山田敏夫, 寺崎浩, 大塚弘, 伊藤勝: 直交壁を有する壁柱のせん断強度に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, pp.567-572, 1987.10
- 3) 中村孝也, 芳村 学, 大和征良: せん断破壊型鉄筋コンクリート短柱の軸力保持限界に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp.193-200, 2002.11