

論文 鉄筋コンクリート造コア壁における壁板の圧縮性状

南 直行^{*1}・仲地 唯治^{*2}

要旨: コア部分を RC 造連層耐震壁とした超高層建物においては、高軸力下におけるコア壁の靱性確保が必要である。センターコアを4組のL形断面コア壁とした場合、高圧縮領域となるL形隅角部及びその近傍のコンクリートの拘束がコア壁の靱性に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、L形断面コア壁の隅角部及び壁板部分を模擬した部分試験体による偏心圧縮実験及び中心圧縮実験を行い、拘束コンクリートの圧縮性状を検討した。また、偏心圧縮実験結果を、コア壁の水平加力実験における試験体の圧縮性状と比較検討し、両者がほぼ同じ性状を示すことを明らかにした。

キーワード: 鉄筋コンクリート, コア壁, 靱性, 圧縮実験, 水平加力実験

1. はじめに

超高層建物において、コア部分を RC 造連層耐震壁とした場合、地震時にコア壁に大きな軸力が作用する。このため、高軸力下におけるコア壁の靱性確保が必要である。センターコアを4組のL形断面のコア壁とした場合、斜め45度方向入力時に特に高軸力となり、高圧縮領域となるL形隅角部及びその近傍のコンクリート拘束がコア壁の靱性に大きな影響を及ぼすと考えられる。本研究では、L形断面コア壁の隅角部及び壁板部分を模擬した部分試験体による偏心圧縮実験及び、中心圧縮実験を行い、圧縮靱性を検討した¹⁾。また、偏心圧縮実験結果を、コア壁の水平加力実験²⁾における試験体の圧縮領域の性状と比較検討した。

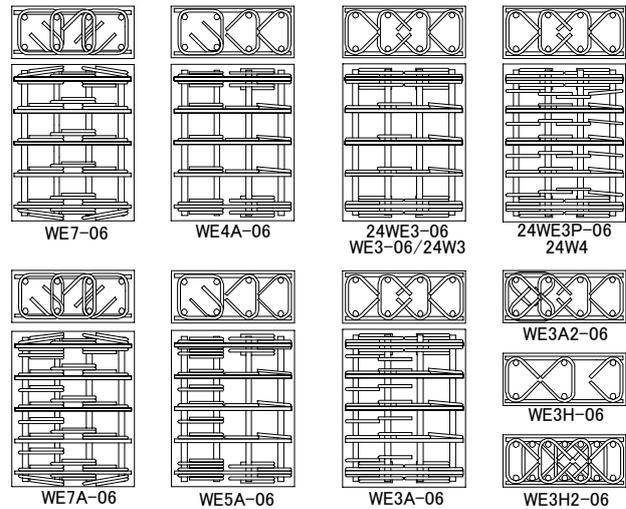


図-1 試験体配筋図

2. 壁板の圧縮実験

2.1 実験概要

試験体の配筋図を図-1に、試験体一覧を表-1に、また、コンクリート及び鉄筋の材料試験結果を表-2, 3にそれぞれ示す。試験体は、コア壁試験体の壁板を模擬した長方形断面(90mm×210mm)で高さ270mmの試験体16体である。縦筋(主筋)、横筋には、それぞれD10(SD345)、D6(SD345)を用い、拘束筋には高強度鉄筋U5.1(1300N/mm²級)を用いた。コンクリートは調合強度を60N/mm²、24N/mm²とした。配筋は、拘束筋の形状、拘束筋の水平方向ピッチ、拘束筋量をパラメータとした。60N/mm²シリーズはWE0-06~WE7A-06の8種類とした。WE3H-06、WE3H2-06を除くその他はいずれも縦筋及び横筋のピッチを55mmとし、WE3H-06は縦筋ピッチ82.5mm、WE3H2-06は縦筋ピッチ27.5mmである。拘束筋高さ方向ピッチはWE3A-06、WE5A-06、WE7A-06の端部において27.5mmとし、その他では55mmとした。24N/mm²シリーズは24WE0-06~24W4の8種類とした。

表-1 試験体一覧

試験体	F _c (N/mm ²)	加力方法	拘束筋の有無	拘束筋の高さ 方向ピッチ(mm)
WE0-06	60	偏心圧縮	無	—
WE3-06 *1			有	55.0
WE3A-06			有	55.0(27.5) *2
WE3A2-06			有	55.0
WE3H-06			有	55.0
WE3H2-06			有	55.0
WE4A-06			有	55.0
WE5A-06			有	55.0(27.5) *2
WE7-06 *1	24	中心圧縮	有	55.0
WE7A-06			有	55.0(27.5) *2
24WE0-06			無	—
24WE1-06			無	—
24WE3-06			有	55.0
24WE3P-06			有	27.5
24W0			無	—
24W1			無	—
24W3	有	55.0		
24W4	有	27.5		

*1は文献1)による

*2 ()内は端部拘束筋のピッチを示す

試験体記号 W: 壁板試験体, E: 偏心圧縮, A: 端部拘束筋付加
H: 拘束筋水平ピッチシリーズ, -06: 偏心距離/試験体幅=1/6
先頭数字: 調合強度(数字なしは60N/mm²), P: 拘束筋量増加

縦筋及び横筋のピッチは、いずれも55mmとした。拘束筋の高さ方向ピッチは24WE3P-06、24W4において

*1 技建工業株式会社 (正会員)

*2 福井工業大学 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
24N/mm ² シリーズ	23.8	1.83	1.43
60N/mm ² シリーズ	66.4	2.98	3.81

表-3 鉄筋の材料試験結果

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	伸び (%)
D10	402	578	2.07	25.7
D6	374	532	1.90	19.7
U5.1	1368	1491	2.11	9.3

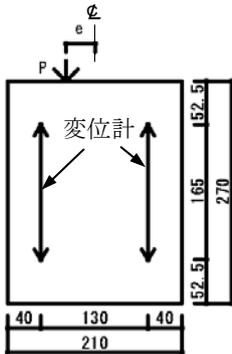


図-2 加力及び計測方法

27.5mmとし、その他では55mmとした。

加力及び計測方法を図-2に示す。加力は、2000kN 万能試験機による単調荷重とし、図-2に示す検長で変位計による軸ひずみを（変位計を固定したボルト間の距離 165mm）計測した。偏心圧縮実験では偏心距離を35mmとした。また、ワイヤーストレインゲージで、拘束筋、横筋、及び主筋のひずみを計測

した。ゲージ貼付位置は閉鎖型拘束筋では一辺の中央、幅止め型拘束筋では試験体厚さ方向中央とした。

2.2 実験結果

(1) 最大モーメント及び最大応力

実験結果一覧を表-4に示す。表中の最大モーメントは、最大荷重 P_{max} と偏心距離 e の積である。また、曲率は図-2に示す左右の変位計の値より求めた。但し、変位計の軸心の位置は変位計を固定したボルトよりも30mm 外側であるため、左右の変位計軸心間の距離は190mmとした。

表-4 実験結果一覧

偏心圧縮試験体	最大モーメント (kN・m)	最大モーメント時曲率 (×10 ⁻² /mm)
WE0-06	25.2	0.0020
WE3-06	27.4	0.0029
WE3A-06	29.6	0.0067
WE3A2-06	28.6	0.0081
WE3H-06	29.6	0.0013
WE3H2-06	36.3	0.0086
WE4A-06	31.1	0.0090
WE5A-06	33.9	0.0125
WE7-06	29.5	0.0267
WE7A-06	38.7	0.0243
24WE0-06	7.8	0.0044
24WE1-06	10.8	0.0039
24WE3-06	14.6	0.0048
24WE3P-06	16.7	0.0092
中心圧縮試験体	最大応力 (N/mm ²)	最大荷重時ひずみ (%)
24W0	18.3	0.59
24W1	25.5	0.85
24W3	26.4	1.11
24W4	30.3	2.44

最大モーメントは、60 N/mm²シリーズでは、閉鎖型拘束筋で端部の拘束筋量の多い WE7A-06 が最も大きく、24 N/mm²シリーズは拘束筋量の多い 24WE3P-06 が最も大きい。最大応力は拘束筋量が多い 24W4 が最も大きい。

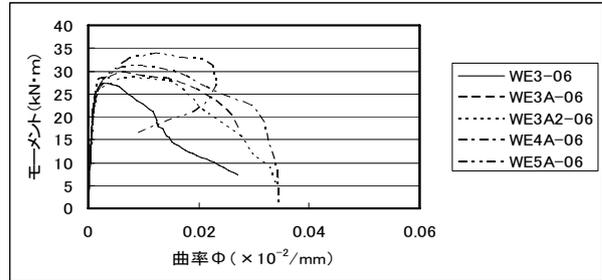


図-3 モーメント-曲率関係 (WE3-06, WE3A-06, WE3A2-06, WE4A-06, WE5A-06)

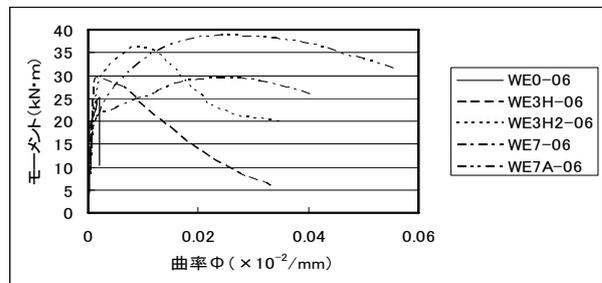


図-4 モーメント-曲率関係 (WE0-06, WE3H-06, WE3H2-06, WE7-06, WE7A-06)

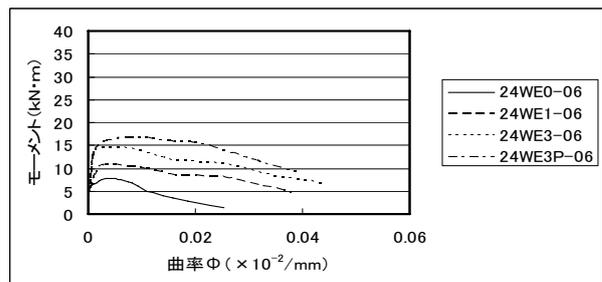


図-5 モーメント-曲率関係 (24WE0-06, 24WE1-06, 24WE3-06, 24WE3P-06)

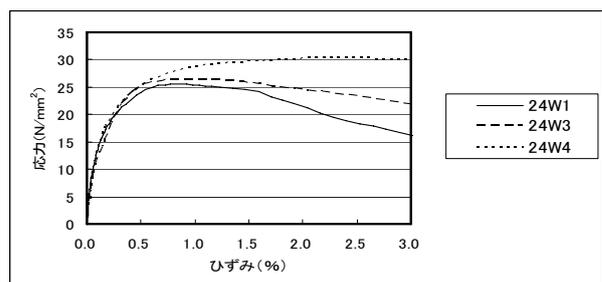


図-6 応力-ひずみ関係 (24W1, 24W3, 24W4)

(2) モーメントー曲率関係

図-3, 4に60 N/mm²で偏心圧縮の場合のモーメントー曲率関係を示す。幅止め型拘束筋を用いたWE3-06に対し、端部の拘束筋量を増したWE3A-06及びWE3A2-06は、いずれも最大モーメント及び最大モーメント時曲率が大きく圧縮靱性が大きい。また、幅止め型及び閉鎖型拘束筋を用いたWE4A-06に対し、端部拘束筋量を増したWE5A-06は圧縮靱性が大きい。閉鎖型拘束筋を用いたWE7-06に対し、端部拘束筋量を増したWE7A-06は圧縮靱性が大きい。拘束筋の水平方向ピッチが異なるWE3H-06とWE3H2-06では、ピッチの小さいWE3H2-06が圧縮靱性が大きい。図-5, 6に24 N/mm²におけるモーメントー曲率関係及び応力ーひずみ関係を示す。偏心、中心圧縮実験それぞれにおいて拘束筋量の多い24WE3P-06, 24W4が最も圧縮靱性が大きい。圧縮靱性に対する拘束筋量の影響が中心圧縮実験、偏心圧縮実験で同様に示された。

2.3 実験結果の検討

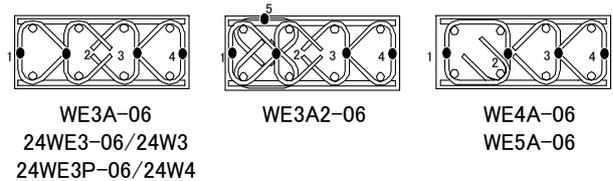
(1) コンクリート圧縮強度60N/mm²の場合

図-7に各試験体の配筋図及び拘束筋に貼付したゲージの位置を示す。但し、中心圧縮実験のゲージの貼付位置は、1, 2のみとする。

図-8にWE3A-06の拘束筋ひずみー曲率関係を示す。幅止め型拘束の場合、最初の段階で、最端部の拘束筋1のひずみが大きく、ある曲率になるとひずみはピークを迎え、その後減少していく。最端部から一段内側の拘束筋2は、拘束筋1がピークを迎えるあたりから最も大きな値となり、その後増加していく。これは、コンクリートの応力負担が端部から内側へ移動することを示すと考えられる。

図-9, 図-10にWE3A2-06, WE4A-06の拘束筋ひずみー曲率関係をそれぞれ示す。端部に長辺方向の幅止め型拘束筋を増した場合(WE3A2-06), あるいは閉鎖型拘束の場合(WE4A-06), 最端部の拘束筋1, 一段内側の拘束筋2のひずみが大きく、WE3A-06のように拘束筋1のひずみの減少に代わって拘束筋2の方が大きくなるのではなく、拘束筋2は拘束筋1と近い曲率でピークを迎え、その後減少していく。これは、端部に長辺方向の幅止め型拘束筋を増したこと、あるいは、閉鎖型拘束としたことにより、一体となって拘束力を発揮し、囲まれた拘束コア内コンクリートの破壊により拘束筋1と拘束筋2の両方の拘束力が弱まるためと考えられる。

WE3A2-06(図-9)とWE4A-06(図-10)の拘束筋1と拘束筋2において、曲率0.01でのひずみの値をそれぞれ比較すると、図-9の拘束筋1は3000 μ 程度、拘束筋2は3500 μ 程度である。一方、図-10の拘束筋1及び拘束筋2は4000 μ 程度である。よって、端部を閉鎖型拘束



● ゲージ位置(数字はゲージ番号を示す)

図-7 拘束筋のゲージ貼付位置

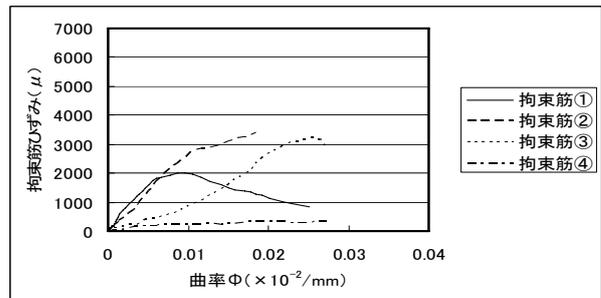


図-8 拘束筋ひずみー曲率関係(WE3A-06)

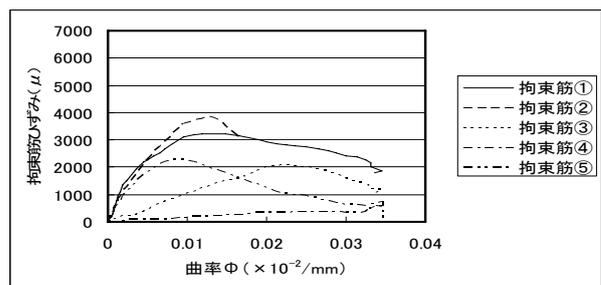


図-9 拘束筋ひずみー曲率関係(WE3A2-06)

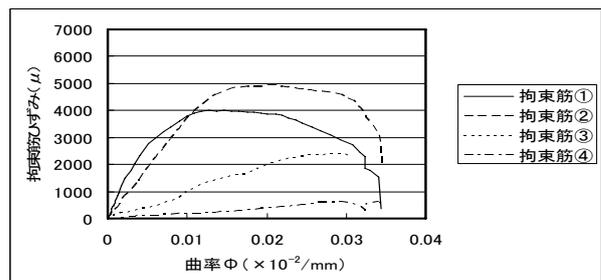


図-10 拘束筋ひずみー曲率関係(WE4A-06)

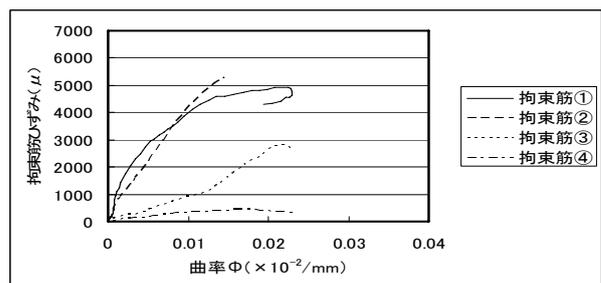


図-11 拘束筋ひずみー曲率関係(WE5A-06)

とした WE4A-06 の方が WE3A2-06 より拘束力が大きいと考えられる。

図-11 に WE5A-06 の拘束筋ひずみ-曲率関係を示す。WE4A-06 (図-10) と WE5A-06 (図-11) の拘束筋 1 と拘束筋 2 において、曲率 0.01 でのひずみの値をそれぞれ比較すると、図-10 の拘束筋 1 及び拘束筋 2 は 4000 μ 程度である。また、図-11 の拘束筋 1 及び拘束筋 2 は、WE4A-06 と同様 4000 μ 程度である。このことから、WE4A-06 と WE5A-06 の拘束筋 1, 2 の 1 本あたりの拘束力は同じ程度である。しかし、WE5A-06 は WE4A-06 に対し端部の拘束筋量が 2 倍であることから、端部における拘束力は 2 倍であると考えられる。

(2) コンクリート圧縮強度 24N/mm² の場合

図-12, 図-13 に 24WE3-06 と 24WE3P-06 の拘束筋ひずみ-曲率関係をそれぞれ示す。図-12 より、24WE3-06 では最初、最端部の拘束筋 1 及び最端部より一段内側の拘束筋 2 の値が大きく、その後、拘束筋 2 の値が最も大きくなり、ある曲率になると両者共ピークを迎え、その後減少していく。また、図-13 より、24WE3P-06 においても同様に、最初、拘束筋 1 及び拘束筋 2 の値が大きくなり、その後、最端部より一段内側の拘束筋 2 の値が最も大きくなり、ある曲率でピークを迎え、その後減少していく。

24WE3-06 (図-12) と 24WE3P-06 (図-13) の拘束筋ひずみをそれぞれ比較すると、拘束筋 4 以外において 24WE3P-06 の方が小さい値となっているが、24WE3P-06 の方は 24WE3-06 より拘束筋量が 2 倍であるため、全体の拘束力が大きくなると考えられる。

図-14 に 24W3 と 24W4 の拘束筋ひずみ-軸ひずみ関係を合わせて示す。24W3 と 24W4 の拘束筋ひずみをそれぞれ比較すると、拘束筋 1, 2 において 24W4 の方が小さい値となっているが、24W4 の方は 24W3 より拘束筋量が 2 倍であるため、24N/mm² の偏心圧縮実験同様、全体の拘束力が大きくなると考えられる。

3. コア壁の水平加力実験

3.1 実験概要

図-15 に試験体の形状、配筋を示す。表-5, 表-6 にコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を示す。試験体は、25 階程度の超高層建物の最下層を想定した実大の約 1/8 のモデルで、コア壁の壁板を模擬した長方形断面の壁柱試験体である。コンクリート調合強度を 60N/mm² とした。壁断面 $b \times D = 90\text{mm} \times 430\text{mm}$ 、せん断スパン比は 2.79 である。縦筋、横筋には、それぞれ D10(SD345), D6(SD345) を用い、いずれもピッチ 55mm で圧縮試験体と同じである。拘束筋には圧縮試験体と同じ高強度鉄筋 U5.1(1300 N/mm² 級)を用いた。拘束筋は幅止め型拘束筋とし、正加

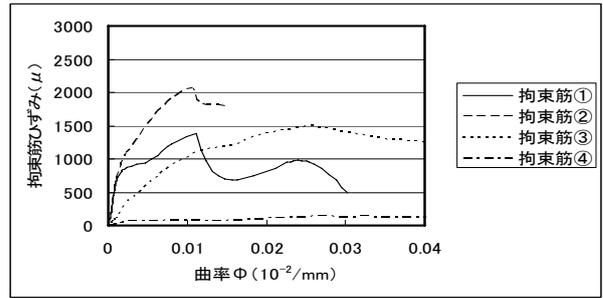


図-12 拘束筋ひずみ-曲率関係 (24WE3-06)

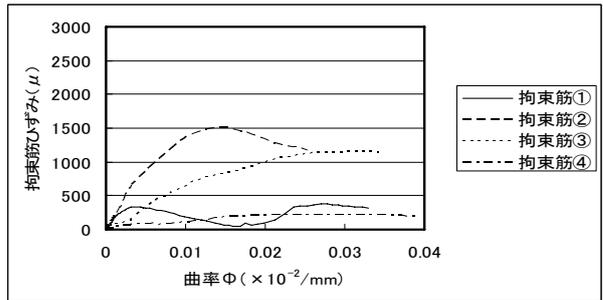


図-13 拘束筋ひずみ-曲率関係 (24WE3P-06)

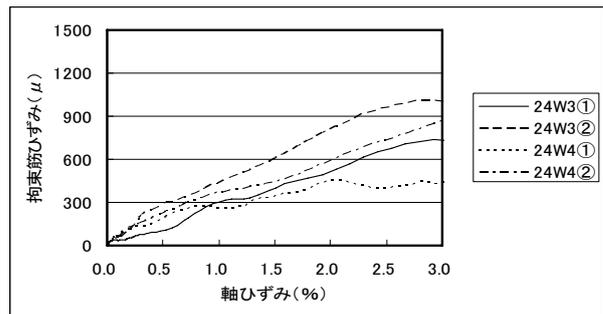


図-14 拘束筋ひずみ-軸ひずみ関係 (24W3, 24W4)

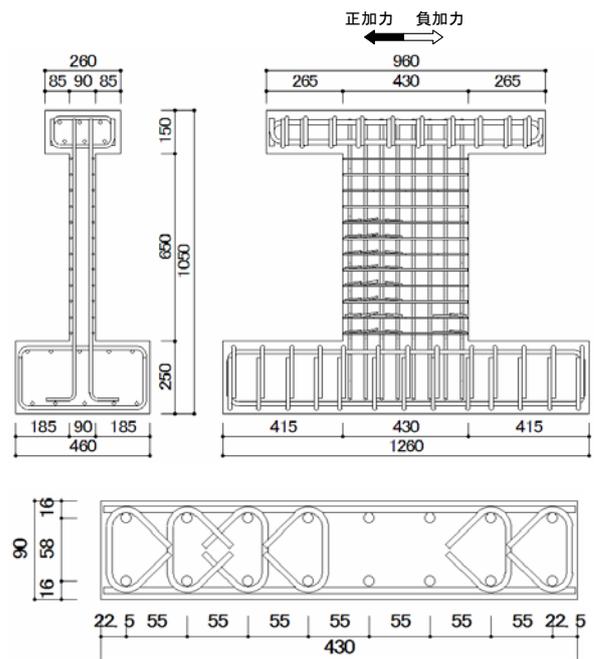


図-15 試験体配筋図

表-5 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
No.1	63.2	2.90	3.40

表-6 鉄筋の材料試験結果

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	伸び (%)
D10	393	568	2.04	25.8
D6	372	524	2.05	25.7
U5.1	1368	1491	2.11	9.3

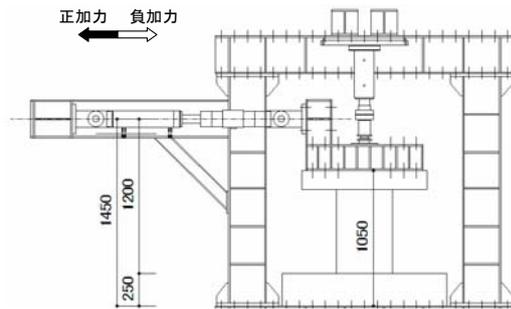


図-16 加力装置

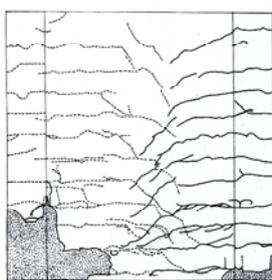


図-17 最終破壊状況

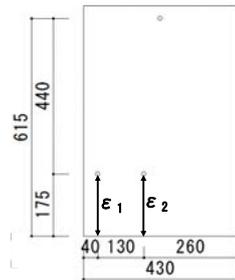


図-19 計測位置

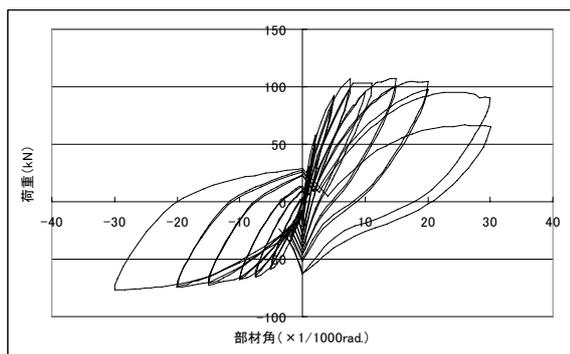


図-18 荷重-変形関係

力曲げ圧縮側の、壁柱せいに相当する高さ 430mm 以下の範囲に配筋した。拘束筋の水平方向及び鉛直方向のピッチは圧縮試験体 WE3-06 と同じ 55mm である。

図-16 に加力装置を示す。キャンチレバー型で水平力を作用させ、軸力は試験体上方の油圧ジャッキにより載荷し、正加力時に、軸力比 $\sigma_0/\sigma_B=0.2$ ($\sigma_0=N/A$, N : 軸力, A : 断面積) の定軸力、負加力時には定軸力 30kN とした。

加力は 2 階床レベル相当高さ(615mm)での変位制御とし、部材角 1/1000(rad)(1 回), 2/1000, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30 (各 2 回)における正負交番繰返し加力とした。

3.2 実験結果

図-17 に最終破壊状況を示す。曲げひび割れが脚部に発生した後、上方及び中央寄りに進展した。正加力時に部材角 5/1000 までに最外縁圧縮縦筋が圧縮降伏し、コンクリートの圧壊(縦ひび割れ)が正加力時において 7.5/1000 までに発生した。最終的に正加力時の圧壊により耐力が低下した。図-18 に荷重-変形関係を示す。最大荷重は 15/1000 の正加力時において 107.3kN であった。

4. 偏心圧縮実験結果と水平加力実験結果の比較

偏心圧縮実験結果と水平加力実験における壁板脚部の圧縮性状を比較する。比較対象とする偏心圧縮実験の試験体は、水平加力実験試験体(No.1)脚部と同配筋の WE3-06 である。No.1 脚部における変位計による計測位置を図-19 に示す。検長は 175mm で圧縮実験の検長 165mm と同程度である。変位計を固定したボルト間の距離は圧縮実験と同じ 135mm で、圧縮実験と同様、変位計の軸心位置が両ボルトの 30mm 外側であるため、左右の変位計軸心間の距離は圧縮実験と同じ 190mm である。

図-20 に No.1 の正加力ピーク時における鉛直ひずみ ϵ_1 , ϵ_2 の値を示す。また、 ϵ_1 , ϵ_2 から求めた曲率と部材角の関係を図-21 に示す。図-20 において、圧縮端部に近い ϵ_1 は部材角にほぼ比例しており、 ϵ_2 は 10/1000 程度まで圧縮で、その後、引張となり、直線的に部材角と共に増大している。図-21 より曲率と部材角はほぼ比例しているといえる。

ϵ_1 , ϵ_2 の水平方向分布を部材角ごと(30/1000 以外は繰返し 2 回目)に図-22 に示す。また、偏心圧縮実験(WE3-06)における鉛直ひずみの水平方向分布を図-23 に示す。No.1, WE3-06 は両者共、圧縮端部逆側の鉛直ひずみが 0 程度で、中立軸が圧縮端部より 160~200mm であることから同様のひずみ分布であると考えられる。

上記圧縮領域での拘束筋のひずみ-曲率関係を図-24(No.1), 図-25(WE3-06)に示す。No.1 におけるひずみゲージ貼付位置は WE3-06 と対応しており(図-7), 脚部

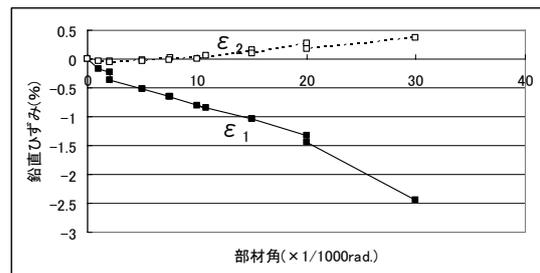


図-20 鉛直ひずみ-部材角関係(No.1)

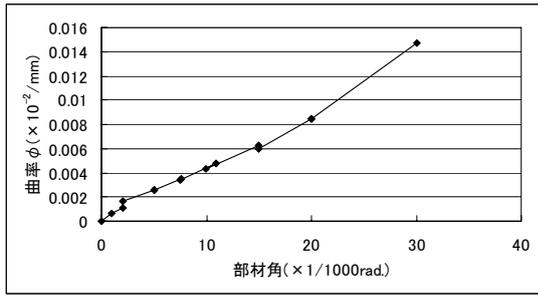


図-21 曲率一部材角関係 (No. 1)

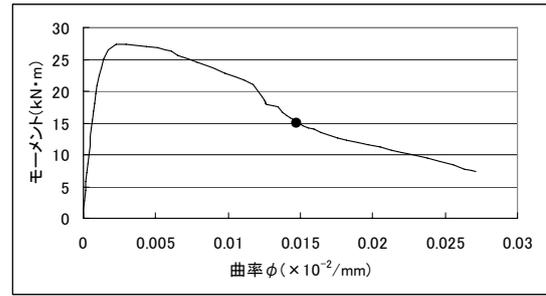


図-26 モーメントー曲率関係 (No. 1)

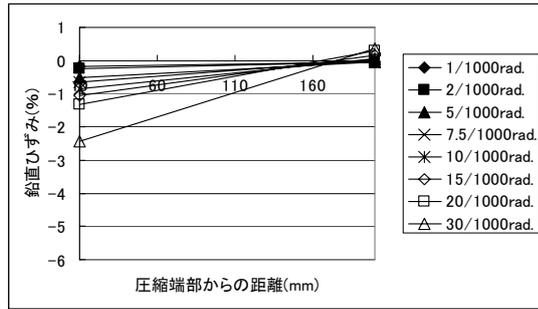


図-22 鉛直ひずみの水平方向分布 (No. 1)

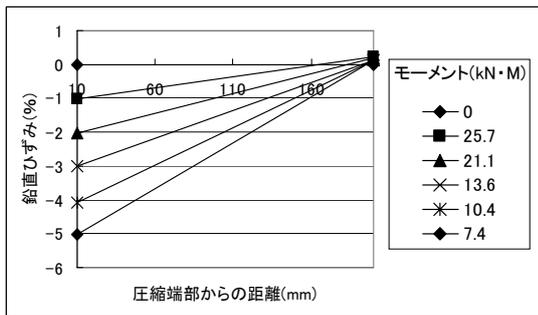


図-23 鉛直ひずみの水平方向分布 (WE3-06)

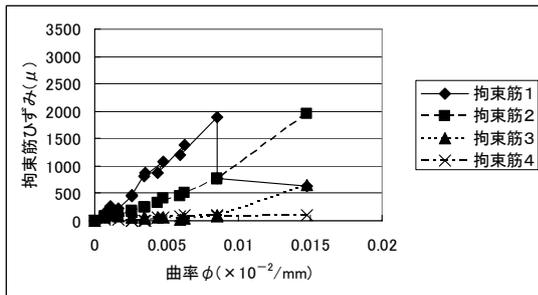


図-24 拘束筋ひずみー曲率関係 (No. 1)

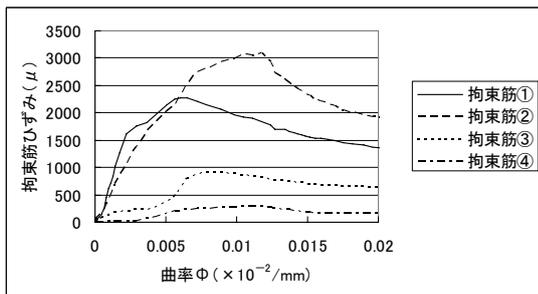


図-25 拘束筋ひずみー曲率関係 (WE3-06)

からの高さは 82.5mm である。No.1, WE3-06 共, 曲率の増大と共に, まず最も圧縮端部よりの拘束筋 1 のひずみが最も大きく増大し, 曲率 0.01 の手前でひずみが低下し, 代わって一段内側の拘束筋 2 の値の方が大きくなる。その後, 拘束筋 2 が最も大きくなる。但し, 各曲率におけるひずみは全体として WE3-06 の方が大きく, 特に拘束筋 2, 3 でその傾向が強い。

鉛直ひずみの水平方向分布, 拘束筋のひずみ分布より No.1 と WE3-06 は, ほぼ同じ圧縮性状であると考えられる。図-26 に WE3-06 のモーメントー曲率関係を示す。図-21 における No.1 の曲率一部材角関係より, 部材角 30/1000 の時, 曲率が 0.0148 であることから, WE3-06 における同じ曲率の点を図-26 中, 黒丸で示す。水平加力実験において耐力が大きく低下した 30/1000 は, 偏心圧縮実験において, モーメントが最大値から 55%程度低下した状況に対応すると考えられる。

5. まとめ

- 1) 偏心圧縮実験において, 端部拘束筋量増大, 拘束筋水平方向ピッチ減少による圧縮靱性増加が認められた。
- 2) 拘束筋による拘束力は, 幅止め型のように応力負担が圧縮端部から順次内側へ移動する場合と, 閉鎖型のように一定領域で一体となり拘束力を発揮する場合がある。
- 3) 壁板の偏心圧縮実験はコア壁の水平加力実験での圧縮領域の圧縮性状をほぼ再現していることが示された。

参考文献

- 1) 南直行ほか: 鉄筋コンクリート造コア壁における壁板の圧縮実験(その 1, その 2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.365-368, 2008.9
- 2) 南直行ほか: 鉄筋コンクリート造コア壁の拘束筋による端部拘束効果に関する実験的研究(その 1, その 2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.437-440, 2009.8
- 3) 畠中隆一ほか: 鉄筋コンクリート造コア壁における壁板の圧縮実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.3, pp.463-468, 2008.7