

拘束筋により補強されたR C造耐震壁の有限要素解析

仲地 唯治*

FEM Analysis on RC Shear Walls Reinforced with Confining Steel

Tadaharu Nakachi

In reinforced concrete shear walls of high-rise buildings, reinforcing the boundary columns and panels, which are subjected to high compressive stress, effectively improves the deformation capacity of shear walls. Previously, lateral loading tests of shear walls were conducted on areas of concrete confinement of high compressive stress. This paper analyzes those lateral loading tests using the three-dimensional nonlinear finite element method (FEM), and examines the ductility of shear walls. The results show that reinforcing the area of high compressive stress improves the deformation capacity of shear walls.

1. はじめに

超高層R C造建物において連層耐震壁を用いた場合、耐震壁が水平荷重を受けた時、下層部圧縮側の側柱および壁板には、大きな圧縮力とせん断力が生じる。したがって、連層耐震壁の変形性能は、側柱および壁板の圧縮靱性、あるいは、耐震壁のせん断余裕度に左右されると考えられる。このなかで、特に、壁板については、一般に柱フープのようにコンクリートを取り囲み、コンクリート拘束効果を発揮する配筋がなされていないことから、圧縮靱性に乏しいものになっていると考えられる。したがって、壁板に拘束筋を配し、コンクリート拘束効果が発揮できるようにすれば、連層耐震壁の水平変形能力は向上すると考えられる。

著者らは既に、壁板のコンクリート拘束に着目した連層耐震壁の水平加力実験を行い、当該領域コンクリートの圧縮靱性が耐震壁の靱性に及ぼす影響を示した¹⁾。その他、連層耐震壁の壁板コンクリートの拘束については平石らが高層壁式ラーメン構造の張間方向の曲げ降伏型独立連層耐震壁に関する水平加力実験²⁾及び高層・超高層建物の耐震壁を対象として二方向変形下での耐震性を検討した連層耐震壁の二方向載荷実験³⁾の中で、壁板コンクリートの拘束による限界変形の増大について検討している。また、江崎ら⁴⁾は、側柱を鋼管で補強するとともに、壁板をトラス型の拘束筋を用いて補強する方法を提案している。

本研究では、著者らの実施した水平加力実験に対し、3次元有限要素解析を実施し、壁板コンクリートを拘束筋により拘束した場合の靱性について検討した。

* 建設工学科建築学専攻

2. 実験概要

2.1 試験体

図－１に試験体形状および配筋を示す。試験体はN0.1～N0.5の５体で実大の約1/5のモデルである。梁については、梁型は設けず、梁主筋のみとした。試験体５体に共通する諸元は次の通りである。すなわち、全せいが1380mm、壁厚60mm、壁縦筋比0.7%で、側柱は断面が180mm×180mm、主筋比3.14%、帯筋は正方形スパイラルで帯筋比は0.7%である。

コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を、それぞれ表－１、表－２に示す。コンクリートは粗骨材に 13mm の 6 号砕石を用い、調合強度を 42N/mm^2 とした。柱主筋には D13(SD345)を、梁主筋および壁筋には D6(SD295)を、帯筋には高強度鉄筋 U5.1 を用いた。

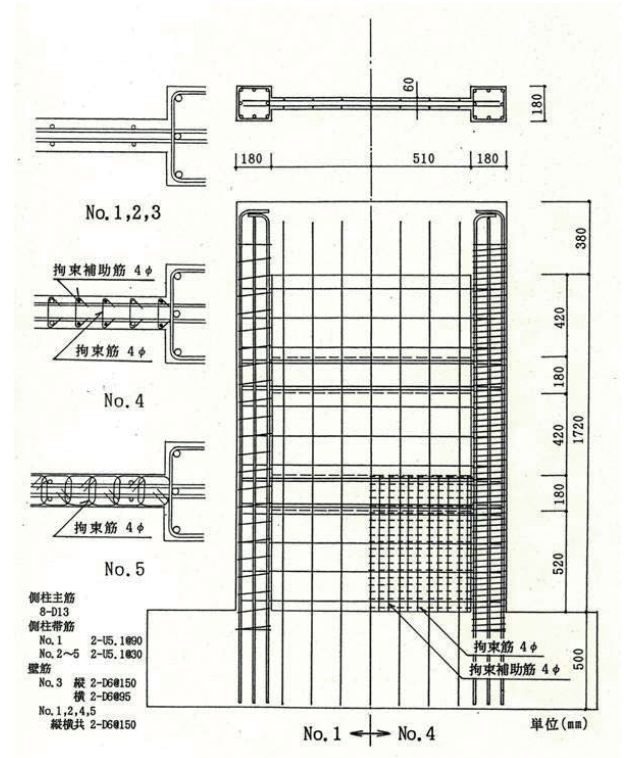


図-1 試験体形状および配筋

表-1 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 ($\times 10^4$ N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
NO. 1	37.4	2.89	－
NO. 2	38.1	2.50	－
NO. 3	39.2	2.89	2.3
NO. 4	40.5	2.93	2.4
NO. 5	41.0	2.89	2.9
部分試験開始時	42.4	3.00	2.8
部分試験終了時	46.7	2.83	2.8

表-2 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 (%)
4 φ	988	1450	1.91	5.5
U5.1 (NO. 1, 2)	1388	1484	2.09	11.4
U5.1 (NO. 3, 4, 5)	1335	1414	1.97	8.7
D6 (NO. 1, 2)	368	508	1.75	14.1
D6 (NO. 3, 4, 5)	402	521	1.79	25.2
D13 (NO. 1, 2)	378	550	1.85	18.8
D13 (NO. 3, 4, 5)	363	526	1.98	19.2

2.2 実験方法

水平力は、反力壁に取り付けた 980kN アクチュエーターにより載荷した。また、反力フレームに鉛直に取り付けられた 2 台の 980kN アクチュエーターによって、所定の軸力（柱 1 本あたり 10N/mm²）を与えると同時に、連層耐震壁脚部でのシアスパン比（M/QD）が常時 2 となるように、水平力に比例した付加モーメントを与えた。

水平力の制御は1層（高さ700mm）の部材角制御とし、1/1000（rad.）（1回）、2/1000、5/1000、

7.5/1000, 10/1000, 15/1000, (各2回), 20/1000

(1回)における正負交番繰り返し加力とした。

2.3 実験結果

表-3に実験結果の一覧を示す。各試験体とも実験経過は①引張側柱脚に曲げひび割れ発生, ②引張側壁脚部にせん断ひび割れ発生, ③壁縦筋, 柱主筋降伏, ④圧縮側柱脚の圧壊, ⑤壁横筋, 梁主筋降伏, となった。曲げ強度に関しては, 実験値と計算値がよく一致していた。

図-2に各試験体の荷重と1層部材角の関係を示す。NO.1は15/1000の繰り返し時に, 側柱脚部の圧壊により急激に荷重が低下した。NO.2は15/1000の繰り返しで, 壁板の圧壊により荷重が低下した。NO.3, NO.4, NO.5は各試験体とも30/1000付近までは, ほぼ同様な紡錘状のループを描き, 試験体による差は少ない。最終的にはNO.3は壁板脚部の圧縮領域が圧壊し, 耐力が最大耐力の80%以下となった。NO.4は最終に至るまで, ほとんど耐力低下はなかった。NO.5は壁板にスリップが生じたが, 大きな耐力低下は生じなかった。

図-3に最終ひび割れ状況を示す。ひび割れの進展状況は各試験体ともほぼ同様で, 2/1000付近までは一定の傾きを持つせん断ひび割れが目立つが, 5/1000以降は圧縮側柱脚部を中心とする扇状を示した。ただし, NO.5は壁板第1層部分のひび割れが他の試験体に比べて細かく発生, 進展した。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

図-4に試験体の解析モデルを示す。解析は3次元非線形解析で, 壁脚部の各節点をピンにより拘束し, 上部スタブ部分は壁板部に対して十分剛性の高い要素とした。

図-5にコンクリートモデルの特性を示す。コンクリート要素としては, 8節点アイソパラメトリックソリッド要素を用いた。圧縮及び引張強度は材料試験結果を用いた。2軸圧縮の破壊曲

表-3 実験結果一覧

試験体		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
初期剛性		230	352	469	390	390
曲げひび割れ荷重		91	207	187	127	147
せん断ひび割れ荷重		165	177	226	177	225
主筋降伏荷重		352	391	381	349	359
梁主筋降伏荷重		398	333	411	401	386
壁縦筋降伏荷重		324	365	381	378	384
壁横筋降伏荷重		324	403	408	403	392
最大荷重	実験値	402	414	416	404	397
	計算値	407	407	403	403	404
	実/計	0.99	1.02	1.03	1.00	0.98
限界部材角＊		15.8	16.5	38.3	>40.0	>40.0

単位: 初期剛性 kN/mm、荷重 kN、部材角 $\times 1/1000\text{rad}$ 。

* 最大荷重の80%以上の荷重を保持する最大部材角

計算値: 文献[5]による

$M_u = 0.9a_1 \sigma_y D + 0.4a_2 \sigma_{xy} D + 0.5ND \{1 - N/(B_c DF_c)\}$

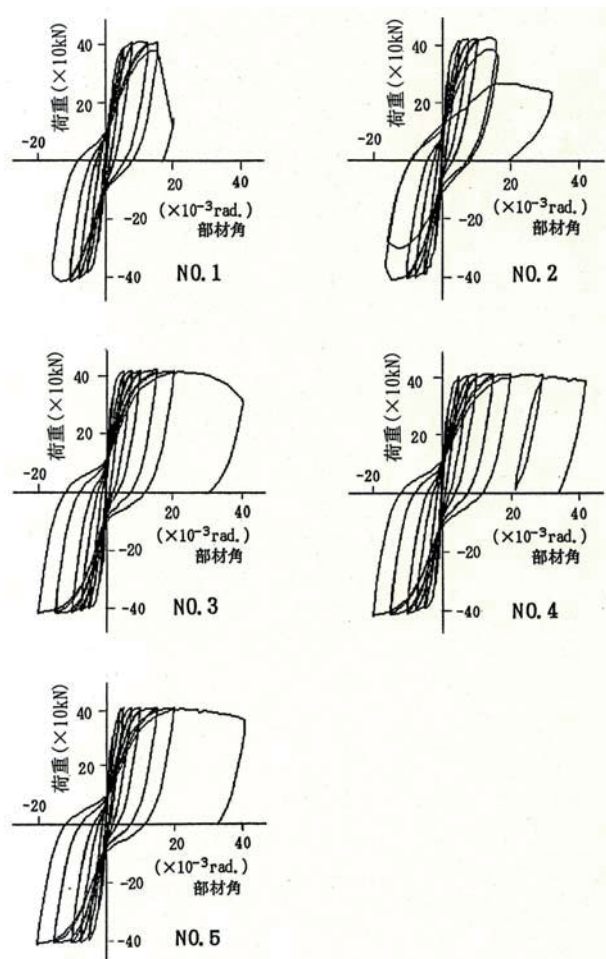


図-2 荷重-変形関係

線は大沼式⁶⁾によった。圧縮破壊後の軟化域は負勾配を直線とした。圧縮強度、負勾配は、水平加力実験と合わせて行った側柱及び壁板部の中心圧縮実験結果¹⁾の応力-歪関係を参考に、コンクリート拘束効果を考慮した。

ひび割れは分布ひび割れモデルを用い、最大主応力が引張強度を超えたときにひび割れが発生するものとした。ひび割れ発生後の残留応力特性は、ひび割れ直交方向では応力を同時解放とし、ひび割れ面でのせん断伝達についてはバイリニア型のせん断応力特性とした。

鉄筋は線材要素で、応力-歪関係はバイリニア型とした。鉄筋とコンクリートは完全付着とした。

3.2 解析方法

加力は単調載荷とし、変位増分法を用いた。最初に上部から側柱部に軸力を加え定軸力とした後、水平加力を行った。

3.3 解析結果

図-6に荷重-変形関係を実験結果の包絡線と合わせて示す。荷重は載荷点における荷重を、部材角は実験の場合と同様に、高さ700mm(2階床レベル相当高さ)での変位より求めている。

標準試験体のNO.2(側柱帯筋比0.7%)に対し、側柱帯筋比を減らし0.2%としたNO.1は、実験、解析とも、NO.2よりも限界変形角が小さい。実験において、NO.1は15/1000の繰り返し時に、側柱脚部の圧壊により急激に荷重が低下した。NO.2は15/1000の繰り返しで、壁板の圧壊により荷重が低下した。解析においても、NO.1は側柱コンクリートが圧壊を示し、NO.2は壁板が圧壊を示した。解析のモデル化にあたっては、NO.1及びNO.2の側柱に対応した中心圧縮実験の結果より、両者の拘束効果が異なるものとして、側柱コンクリートの圧縮特性をモデル化した。したがって、実験、解析とも側柱の帯筋比が小さく、コンクリートの圧縮靱性も小さいと思われるNO.1がより小さい部材角で圧壊したと考えられる。柱の帯筋は、せん断補強筋として配筋されているが、連層耐震壁の側柱を兼ねている場合、

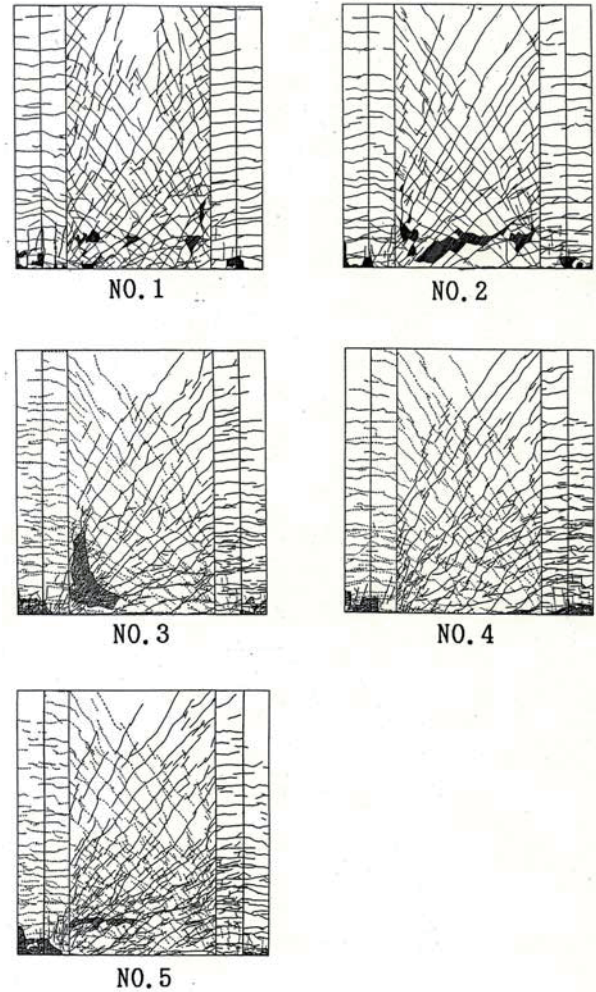


図-3 最終ひび割れ状況

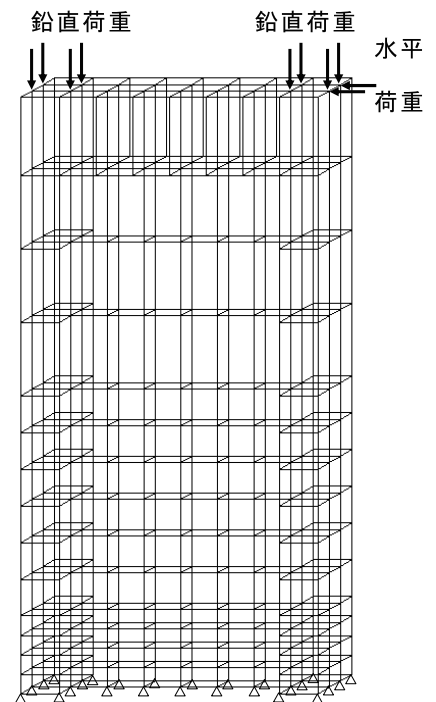


図-4 要素分割図

耐震壁の最も圧縮応力の大きい部分のコンクリートの圧縮靱性を高める拘束筋としての役割も果たしているといえる。

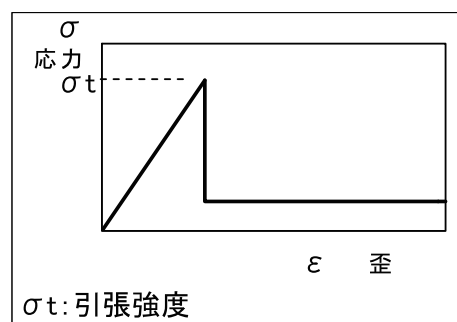
N0.1 と N0.2 において、実験と解析を比較すると、N0.1 は実験において荷重が急激に低下したが、解析においては、15/1000 より小さい部材角で荷重が低下し始めた。N0.2 は 15/1000 の繰り返しで、荷重が大きく低下したが、解析においては、壁板に圧壊が生じたものの、急激な耐力低下には至らなかった。

標準試験体の N0.2 (壁横筋比 0.7%) に対し、壁横筋比を 1.2% に増加させた N0.3 は、実験では、最終的には壁板脚部の圧縮領域が圧壊し、耐力が最大耐力の 80% 以下となったが、40/1000 近くまでほとんど耐力低下を生じなかった。解析においても、N0.2 とは異なり、40/1000 近くまでほとんど耐力低下を生じなかった。

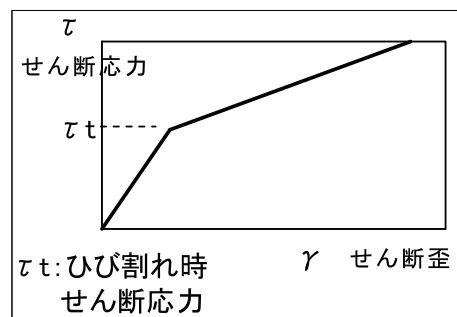
実験において、壁横筋のひずみは、N0.2 が 15/1000 付近で降伏しているのに対し、N0.3 は 30/1000 まで降伏していなかった。これは、それぞれの試験体の限界部材角 15/1000, 38.3/1000 に対応しており、壁横筋量の増大に伴い、壁横筋の応力負担が減少し、また、せん断余裕度が上昇して、靱性増大につながったものと考えられる。解析においても、壁横筋の降伏は N0.3 の方が大きい部材角で生じた。ただし、降伏に対応した大きな耐力低下は 40/1000 に至るまで見られなかった。なお、解析において鉄筋は線材要素を用いており、解析モデルの要素分割を試験体 5 体ですべて同じとしたため、壁横筋を配筋する位置は N0.2 と N0.3 で同じとし、鉄筋の断面積を変化させて鉄筋量を変えた。実験の方は、壁横筋のピッチを変化させて鉄筋量を変えた。

標準試験体の N0.2 に対し、壁板の第 1 層部分 (2 階梁上端、高さ 700mm まで) に、コンクリート横拘束のための幅止め型拘束筋 (高強度鉄筋 4 ϕ) を配筋した N0.4 は、実験において、最終に至るまでほとんど耐力低下がなかったが、解析においても同様であった。

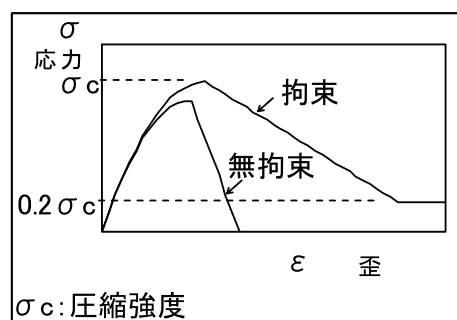
水平加力実験と合わせて行った壁板の中心圧縮実験において、幅止め型拘束筋を用いた試験体は、拘束筋のない試験体に比べ優れた圧縮靱性を示したが、その応力-ひずみ関係を用いたコンクリートモデルとしたために、解析においても耐力低下を生じなかったと考えられる。実験においては、拘束筋のひずみをワイヤーストレインゲージにより測定したが、その結果によると、拘束筋のひずみは圧縮柱近傍において特に大きく、部材角が進むにつれて増大していた。解析にお



(a) コンクリートの引張特性



(b) コンクリートのせん断特性



(c) コンクリートの圧縮特性

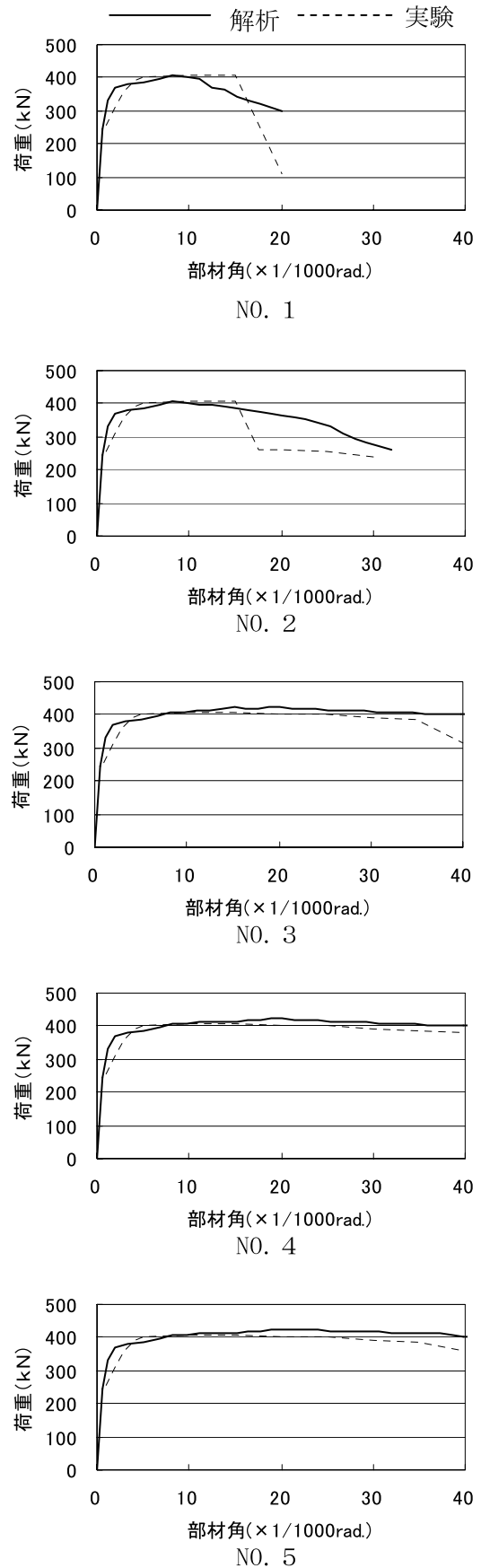
図-5 コンクリートモデルの特性

いても、圧縮柱近傍の壁板部分は圧縮応力が大きく、壁板を拘束筋によって拘束していない NO. 2, NO. 3 は圧壊が生じていたが、拘束筋を有する NO. 4 は、圧縮応力が増大するものの、急激に応力低下することなく、コンクリート拘束効果が有効にはたらいたとはいえる。

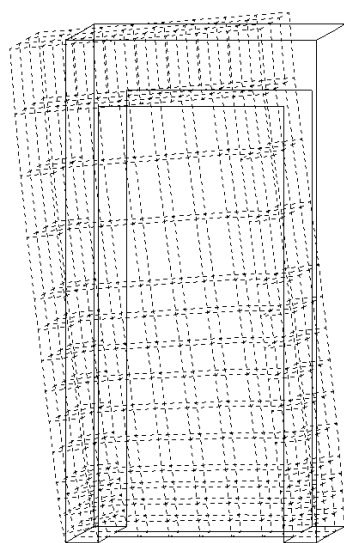
ただし、壁横筋量を増した NO. 3 と幅止め型横拘束筋を用いた NO. 4 は、荷重－変形曲線のうえでは、大きな差は見られなかった。これは、NO. 4 がコンクリート拘束効果により連層耐震壁の靱性が増大したのに対し、NO. 3 はせん断余裕度が上昇して靱性が増大した、すなわち、別の作用によって靱性が増大したと考えられる。しかし、NO. 3 における壁横筋のひずみの計測結果からすると、NO. 2 よりも降伏が遅く、より大きな応力を負担していたことになり、別の見方をすれば、幅止め型拘束筋が面外方向にコンクリートを拘束するのに対し、壁横筋は面内方向にコンクリートを拘束していると捉えることもできると考えられる。それにより、コンクリートストラット方向の、いわゆるコンクリート強度の有効係数が上昇するものと考えられる。

なお、幅止め型拘束筋は、次に述べる正方形の閉鎖型拘束筋に比べると、先に述べた中心圧縮実験の結果では圧縮靱性に劣るといえるが、施工性を考慮すると、配筋しやすいという利点があると考えられる。

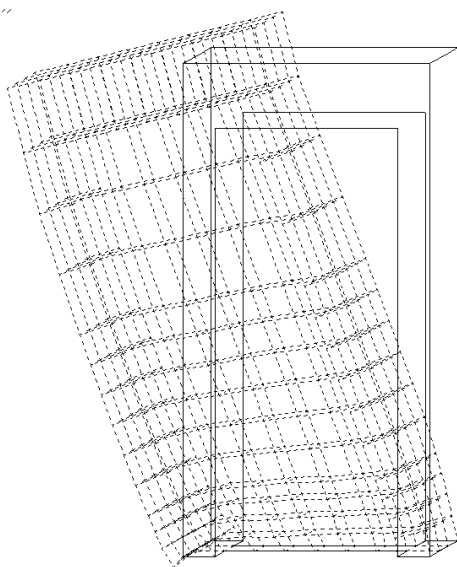
標準試験体の NO. 2 に対し、壁板の第 1 層部分にコンクリート横拘束のための閉鎖型の正方形拘束筋（高強度鉄筋 4 ϕ ）を配筋した NO. 5 は、NO. 4 と同様、実験において最終に至るまで大きな耐力低下は生じなかった。解析においても同じく耐力低下は生じなかった。閉鎖型拘束筋は、中心圧縮実験の結果によると、幅止め型拘束筋よりも優れた圧縮靱性を示していた。本研究における条件下



図－6 荷重－変形関係



(a) 5/1000rad.



(b) 20/1000rad.

図－7 変形図 (NO.5)

においては、実験、解析とも、荷重－変形関係において、幅止め型と閉鎖型の大きな差は見られなかったが、今後、超高層鉄筋コンクリート造において、コンクリートはより高強度化が図られると考えられ、また、コア壁のように一般の耐震壁に比較して壁厚の大きいものも増えつつある。そのような条件下においては、拘束方法の差が部材の靱性に影響を及ぼすとも考えられる。

解析結果の荷重－変形関係を全体として実験結果と比較すると、途中、剛性がやや高い傾向にあるが、靱性に関して概ね実験と傾向が一致したと考えられる。特にコンクリート拘束効果が靱性に及ぼす影響について、壁板の圧縮特性を考慮したモデル化により表すことができたと思われる。

図－7に NO.5 試験体の部材角 5/1000rad. および 20/1000rad. における変形図を示す。いずれもせん断より曲げが卓越した変形のように思われるが、圧縮側と引張側を比較すると、引張側の側面が 5/1000rad.、20/1000rad. とともにゆるやかなカーブであるのに対し、圧縮側では、5/1000rad. では割合ゆるやかなカーブであるが 20/1000rad. では壁脚部に変形が集中しているように思われる。これは、ある程度変形が進むと、脚部において圧縮縁の圧縮ひずみが増大し、コンクリートの圧壊が生じるからであると考えられる。そのため、逆に脚部以外の上方部分では圧縮ひずみは増大せず、直線に近い形状を保つと考えられる。曲げ降伏先行型の柱や壁柱においてはこのような性状は見受けられるが連層耐震壁においても同様であるといえる。

4. まとめ

壁板コンクリートを拘束し、靱性を向上させた曲げ降伏型連層耐震壁の水平加力実験に対し、3次元有限要素解析を実施し、その靱性について検討した。

解析の結果、以下の結論が得られた。

(1) 柱の帯筋は、せん断補強筋として配筋されているが、連層耐震壁の側柱を兼ねている場合、耐震壁の最も圧縮応力の大きい部分のコンクリートの圧縮靱性を高める拘束筋としての役割も果たしているといえる。

(2) 壁横筋量の増大に伴い、壁横筋の応力負担が減少し、また、せん断余裕度が上昇して、靱

性増大につながると考えられる。

(3) 壁板の第1層部分(2階梁上端、高さ700mmまで)に、コンクリート横拘束のための幅止め型拘束筋(高強度鉄筋4φ)を配筋したN0.4は、実験において、最終に至るまでほとんど耐力低下がなかったが、解析においても同様であった。水平加力実験と合わせて行った中心圧縮実験において、幅止め型拘束筋を用いた試験体は、拘束筋のない試験体に比べ優れた圧縮靱性を示したが、その応力-ひずみ関係を用いたコンクリートモデルとしたために、解析においても耐力低下を生じなかったと考えられる。

(4) コンクリート横拘束のための閉鎖型の正方形拘束筋(高強度鉄筋4φ)を配筋したN0.5は、N0.4と同様、実験において最終に至るまで大きな耐力低下は生じなかったが、解析においても耐力低下は生じなかった。

(5) 連層耐震壁の変形性状において、圧縮側柱の脚部にひずみが集中する現象が、解析においても示された。

参考文献

- 1) 仲地唯治・戸田哲雄・牧田敏郎：曲げ降伏型連層耐震壁の靱性確保に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 849-854、1992
- 2) 平石久廣・都祭弘幸・川島俊一・井上芳生：偏平な付帯柱を有する連層耐震壁の曲げ降伏後の靱性に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第395号、pp. 48-59、1989
- 3) 平石久廣・今西達也・福山洋・田中義成：二方向変形を受ける鉄筋コンクリート造耐震壁の曲げ降伏後の構造型状、日本建築学会構造系論文報告集、第450号、pp. 89-98、1993
- 4) 江崎文也・上原修一：RC造耐震壁の靱性を高めるための補強法に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第502号、pp. 113-118、1997
- 5) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能、1990
- 6) 土木学会編：新体系土木工学29、1981

(平成21年3月31日受理)