

超高層鉄筋コンクリート造建物に用いる L 型立体耐震壁の実験的研究

竹中 啓之^{*1}

濱田 聡^{*2} 菊田 繁美^{*1}
 渡部 幸宏^{*2} 石岡 拓^{*1}
 太田 行孝^{*2} 傳野 悟史^{*1}

概 要

超高層鉄筋コンクリート造建物のセンターコア部に L 型断面の立体耐震壁を向い合わせに 4 枚配置した建物を想定して、地震時に発生する応力が厳しくなる下層階を模擬した 1/6 縮小模型の L 型立体耐震壁の曲げせん断実験を実施した。耐震壁は、方向別の剛性、強度および壁脚降伏後の変形性能を把握するために、水平力作用方向を変えた 3 体およびコンクリートの圧壊防止のための鉄筋を挿入した 1 体の計 4 体とした。実験結果より、水平力の作用方向にかかわらず 1/67 rad. までは曲げ降伏型の安定した履歴性状を示した。また、1/100rad. までは壁脚部の平面保持の仮定が成立していること、壁拘束部の拘束筋の効果があることが確認できた。

Experimental Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete L-Shaped Core Structural Wall Using Super High-rise Buildings

Hiroyuki TAKENAKA^{*1} Satoshi HAMADA^{*2}
 Shigemi KIKUTA^{*1} Takahiro WATABE^{*2}
 Taku ISHIOKA^{*1} Yukitaka OOTA^{*2}
 Satoshi DENNO^{*1}

In this paper, experimental study on the seismic performance of Reinforced Concrete L-shaped core structural wall using super high-rise buildings was described. The L-shaped core structural wall test specimens simulated at lower story of high-rise RC building and these were miniature models of 1/6. Flexural-shear loading test of four test specimens of these walls were conducted to investigate the stiffness, the strength and the deformation performance of these walls. The test results indicated that 1) Regardless of the loading direction, these core structural walls have stability hysteresis loop of Load-deformation curve until 1/67 rad., 2) Linear distribution of strains at the base of walls was established until 1/100 rad. 3) The hoops of the edge of the walls restricted core concrete of the edge of the walls.

^{*1} 技術研究所 ^{*2} 構造設計部

^{*1} Technical Research Institute ^{*2} Structural Engineering Dept.

超高層鉄筋コンクリート造建物に用いる L 型立体耐震壁の実験的研究

竹中 啓之*¹ 濱田 聡*²
 菊田 繁美*¹ 渡部 幸宏*²
 石岡 拓*¹ 太田 行孝*²
 傅野 悟史*¹

1. はじめに

超高層鉄筋コンクリート造の集合住宅では、柱・梁断面の縮小化や無柱・無梁空間の構築等、居住性や空間自由度の向上に関するニーズがある。このようなニーズに応えられる構造として、建物センターコア部に立体耐震壁を耐震要素として使用する構法があり、研究が行われている^{例えば1)など}。

本報告では、36階建ての超高層鉄筋コンクリート造建物の中央にL型断面の立体耐震壁を向い合わせに4枚配置した建物を想定して実施したL型立体耐震壁の曲げせん断実験結果について述べる。

2. 試験体

本報告で述べる想定した超高層鉄筋コンクリート建物の平面形状を図-1に示す。X方向、Y方向ともに約30mの正方形の平面を持つ鉄筋コンクリート造建物のセンターコアを囲むように4枚のL型耐震壁が配置されている。試設計での壁厚は900mmとした。この壁を1枚取り出してX方向、45度方向および-45度方向の変形性能や耐震性能を実験により確認する。

試験体の概要を図-2および写真-1に示す。試験体は、試設計建物を参考にして、地震時に発生する応力が厳しくなる下層階を模擬した1/6縮小模型のL型立体耐震壁とし、加力方向別の剛性・強度および壁脚部降伏後の変形性能を把握するために、水平力作用方

向を変えた3体(CW00、CW+45、CW-45)とした。また、壁脚部に作用する圧縮力が最も大きくなるCW-45試験体については、壁端部および交差部のコンクリートの圧縮破壊を抑制する目的で、拘束域の中央部に圧縮力のみ作用する形で鉄筋(D19、USD685材、長さは壁脚部から2000mm)を挿入した(以下、この鉄筋を圧縮鉄筋と呼ぶ。)試験体も製作し、計4体の試験体とした。

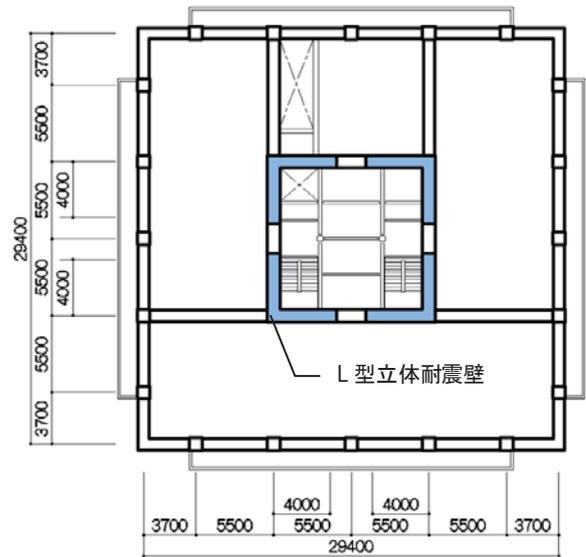


図-1 試設計建物平面形状

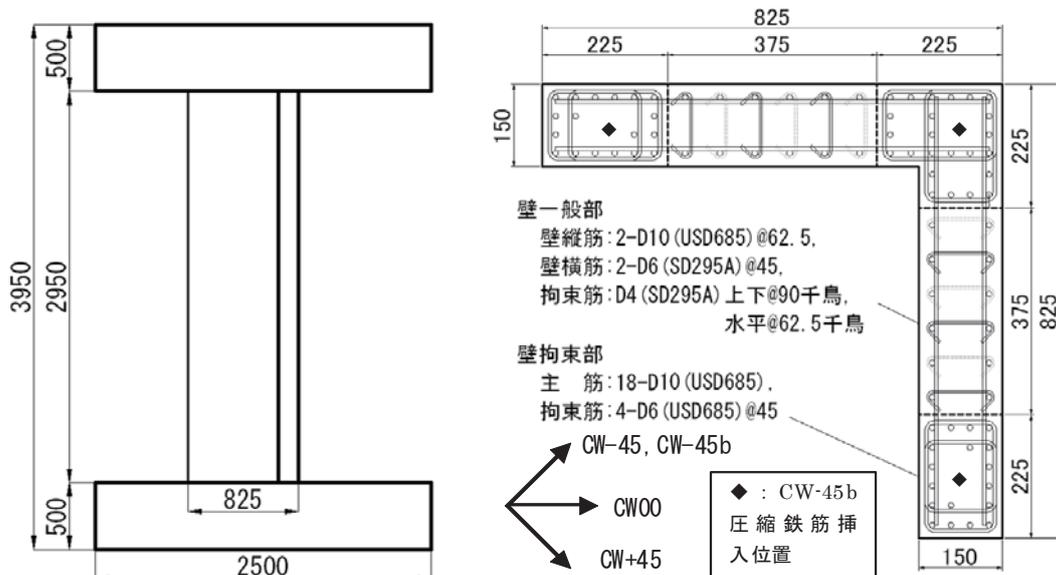


図-2 試験体概要

*¹ 技術研究所 *² 構造設計部

加力方向は、図-2に示すようにL型壁に平行方向のCW00、壁端部と壁端部を結ぶCW00に対して45度方向のCW+45、CW+45に対して直角方向のCW-45の3通りであり、シアスパン比は、それぞれ、CW00が4.55、CW+45が3.21、CW-45が5.44である。

コンクリート設計基準強度は60N/mm²とし、壁厚は150mm、壁長さは825mm、壁の高さは2950mmとした。

壁縦筋は2-D10@62.5 (USD685)、壁横筋は2-D6@45 (SD295A)とし、幅止め筋は上下方向に90mmピッチ、水平方向に62.5mmピッチで千鳥配置とした。交差部および端部の拘束部の主筋は18-D10 (USD685)とし、拘束筋は4-D6@45 (p_w1.9%)とした。試験体の上下には加力スタブを設けて反力床および加力梁と試験体をPC鋼棒により緊結した。試験体に使用した材料の素材試験結果を表-1に示す。

3. 加力方法

加力状況を図-3および写真-2に示す。軸力は試験体上部に設置した鉄骨梁を介して、鉛直に配置した3本のアクチュエータにより载荷した。水平力は上記鉄骨梁端部に取り付けたアクチュエータにより载荷し

た。いずれのアクチュエータも両端部のピン支承を介して鉄骨梁に取り付けた。水平力と軸力の関係および加力スケジュールを図-4に示す。各試験体の軸力比 η ($\eta = N/A \cdot F_c$; N: 軸力、A: 壁全断面積、F_c: コンクリート設計基準強度)は、CW00で0~0.3、CW+45で0.15一定、CW-45、CW-45bで-0.05~0.45とした。水

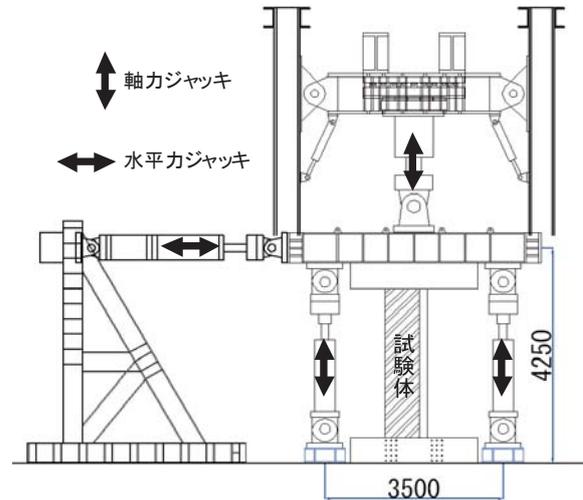


図-3 加力装置概要

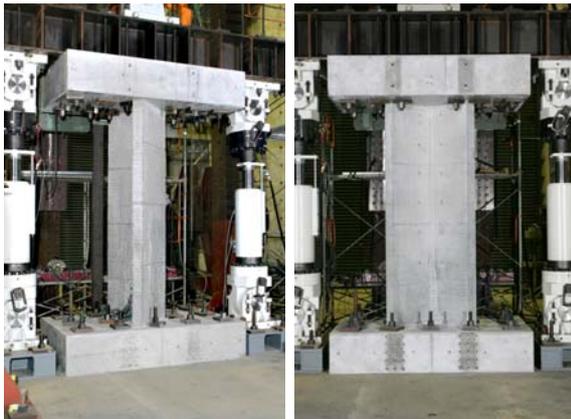


写真-1 試験体

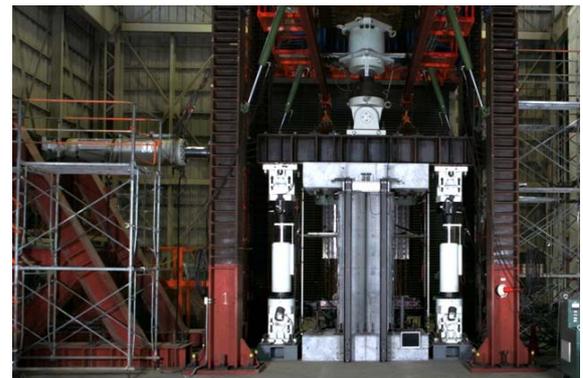


写真-2 加力装置

表-1 材料試験結果

コンクリート		ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
CW00		3.47	64.3	3.63
CW+45		3.44	65.8	4.73
CW-45		3.40	68.0	3.91
CW-45b				
鉄筋		ヤング係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
D4	壁一般部 幅止め筋	1.83	366	532
D6	壁横筋	1.85	353	502
D6	壁端部・ 交差部 拘束筋	1.89	612	840
D10	壁縦筋、 壁拘束部 主筋	2.11	799	976

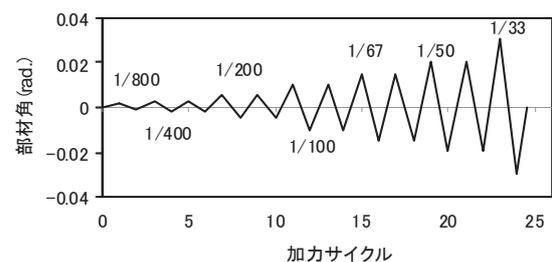
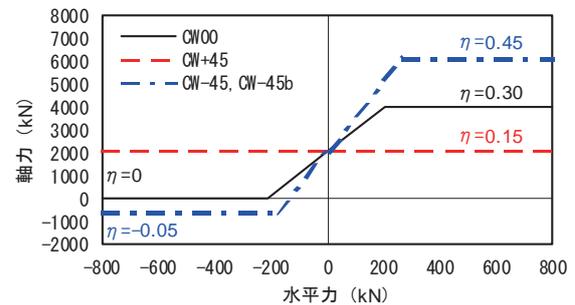


図-4 加力スケジュール

平方向の加力スケジュールは加力芯で計測した水平変位をスタブ上面から加力芯までの鉛直距離で除算した部材角 R で制御し、目標部材角 R を $1/800\text{rad.}$ で正負各 1 回、 $1/400$ 、 $1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/67$ 、 $1/50$ 、 $1/33\text{rad.}$ で正負各 2 回の繰り返し加力とした。

4. 実験結果

4.1 破壊状況

最終破壊状況を図-5 に示す。CW00 の正加力時では $R=+1/400\text{rad.}$ に壁一面に曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生し、 $+1/100\text{rad.}$ には壁脚部に縦方向のひび割れが発生して圧壊が生じた。 $+1/67\text{rad.}$ では壁上部に曲げせん断ひび割れが増加し、壁拘束部の主筋が引張降伏した。 $+1/50\text{rad.}$ に壁脚部で圧壊している範囲が拡大して、最大耐力に達した。CW00 の負加力時では $R=-1/400\text{rad.}$ に壁脚部に曲げひび割れが発生し、 $-1/200\text{rad.}$ には壁拘束部の主筋が圧縮降伏した。

$-1/100\text{rad.}$ に壁脚部に圧壊が生じ、 $-1/50\text{rad.}$ にはその範囲が拡大した。

CW+45 は正負加力とも同様の破壊性状であり、 $1/800\text{rad.}$ に壁脚部に曲げひび割れが発生し、 $1/400\text{rad.}$ には壁中段に曲げせん断ひび割れが発生した。 $1/200\text{rad.}$ には壁脚部に圧壊の傾向がみられ、 $1/100\text{rad.}$ には圧壊部分で一部剥落し、端部の壁拘束部の主筋が引張および圧縮降伏した。 $1/67\text{rad.}$ に壁にせん断ひび割れが発生し、 $+1/50\text{rad.}$ の繰り返し载荷時に圧壊の範囲がさらに拡大して、拘束筋が引張降伏して最大耐力に達した。

CW-45 の正加力時では $R=+1/400\text{rad.}$ に壁脚部に曲げひび割れが発生し、 $+1/100\text{rad.}$ に壁脚部に圧壊が生じ、壁拘束部の主筋が圧縮降伏した。 $+1/33\text{rad.}$ には圧壊している範囲が壁脚部から 800mm 程度にまで拡大し、最大耐力に達した。CW-45 の負加力時では $R=-1/400\text{rad.}$ に壁脚部に曲げひび割れが発生し、



図-5 最終破壊状況

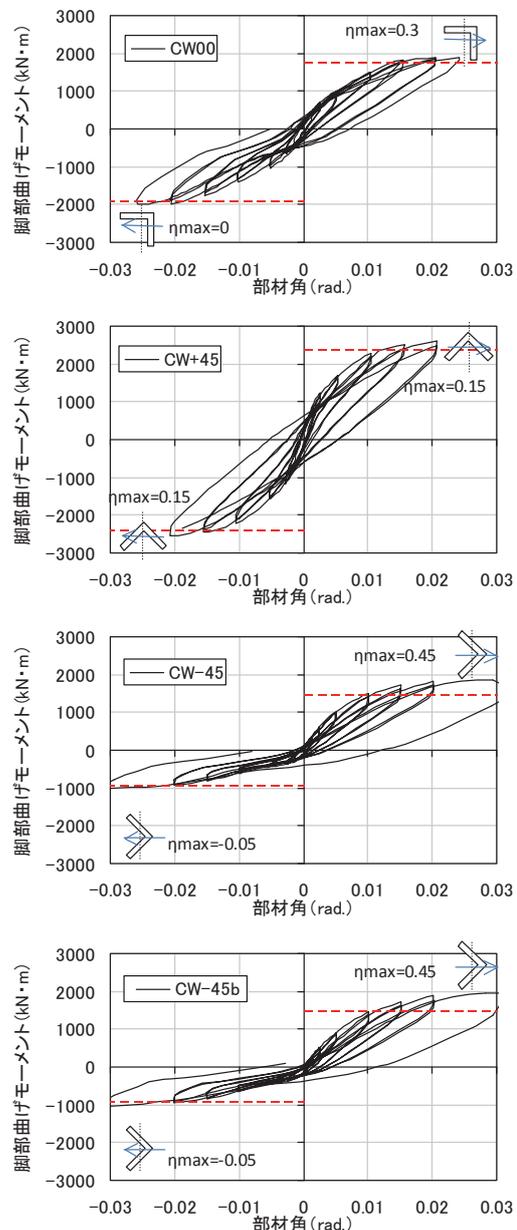


図-6 曲げモーメント変形関係

-1/100rad. に壁脚部に圧壊が生じ、-1/33rad. には正加力時と同様に圧壊が生じ、最大耐力に達した。

CW-45b の正加力時では、CW-45 と同様に $R=+1/400\text{rad}$. に壁脚部に曲げひび割れが発生し、+1/100rad. に壁脚部に圧壊が生じた。壁拘束部の主筋は+1/67rad. で圧縮降伏した。+1/33rad. で壁入隅部が圧壊して最大耐力に達した。CW-45b の負加力時は $R=-1/400\text{rad}$. に壁脚部に曲げひび割れが発生し、-1/100rad. に壁脚部に圧壊が生じ、-1/33rad. には正加力時と同様に圧壊が生じ、最大耐力に達した。

4.2 曲げモーメント変形関係

各試験体の曲げモーメント変形関係を図-6に示す。縦軸は軸力による影響を考慮した脚部の曲げモーメントとした。図中には後述する曲げ強度計算値を破線で併記している。いずれの試験体も鉄筋が降伏する1/200~1/100rad. からエネルギー吸収の大きい紡錘形のループを示した。また、壁脚部の圧壊の範囲が大きく拡大した $R=1/50\text{rad}$. までは安定した履歴性状を示した。

表-2 曲げ耐力比較

	正加力時		負加力時			
	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験 / 計算	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験 / 計算
CW00	1907	1759	1.08	-1995	-1904	1.05
CW+45	2606	2390	1.09	-2539	-2390	1.06
CW-45	1861	1455	1.28	-1020	-920	1.11
CW-45b	1944	1507	1.29	-1032	-920	1.12

初期剛性については、シアスパン比の小さいCW+45の正負加力時が最も大きく、引張軸力の作用するCW-45の負加力時が最も小さい結果となった。CW00の正負加力時とCW-45およびCW-45bの正加力時は同程度の初期剛性であった。

圧縮鉄筋を挿入したCW-45b試験体では、1/67rad. 以降CW-45よりわずかではあるが耐力が上昇し、最大値で約1.05倍の耐力となった。

4.3 曲げ耐力

実験より得られた最大耐力と曲げ耐力計算値の比較

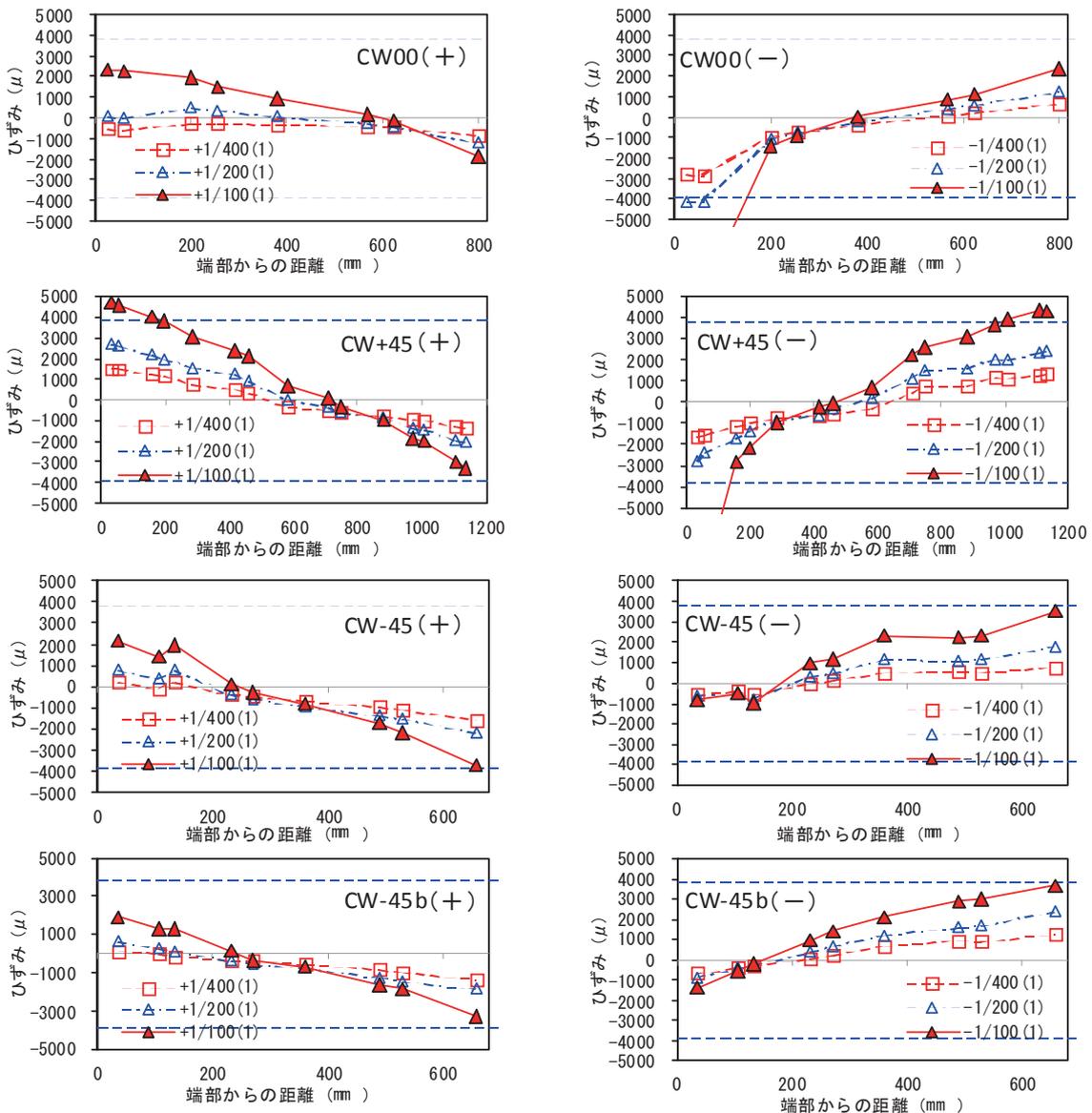


図-7 壁拘束部主筋および壁縦筋ひずみ分布

を表-2に示す。なお、計算値は平面保持を仮定した断面分割法により算出した。壁拘束部コンクリートには文献2)で提案された応力-ひずみ関係を用いてコンファインド効果を考慮した。CW00、CW+45については正加力時の場合とも実験値と計算値はよく対応したが、高圧縮軸力であるCW-45およびCW-45bの正加力時の場合には実験値を過小に評価する計算結果となった。高圧縮軸力を受けるCW-45、CW45bの大変形時には壁断面内圧縮域のひずみ分布が平面保持を仮定したひずみより大きくなるのが実験より明らかとなり、よって平面保持を仮定して計算した結果が小さくなったものと考えられる。

4.4 壁拘束部の主筋および壁縦筋のひずみ分布

各試験体の-1/100rad. 終了時までの壁拘束部主筋および壁縦筋のひずみ分布を図-7に示す。CW00の負加力側以外の試験体では、鉄筋降伏前後の1/100rad.まで断面内のひずみ分布の勾配は圧縮域から引張域までほぼ一定であり、耐力計算で用いた平面保持の仮定を満足していた。CW00の負加力側では、圧縮域となる領域が小さいために、1/400rad.で引張域よりも圧縮域のひずみ分布の勾配が大きくなり、1/200rad.で圧縮側の鉄筋が圧縮降伏した。いずれの試験体においても1/100rad.以降は引張域に比べて圧縮域のひずみ分布の勾配が大きく、平面保持の仮定は成立していない状況

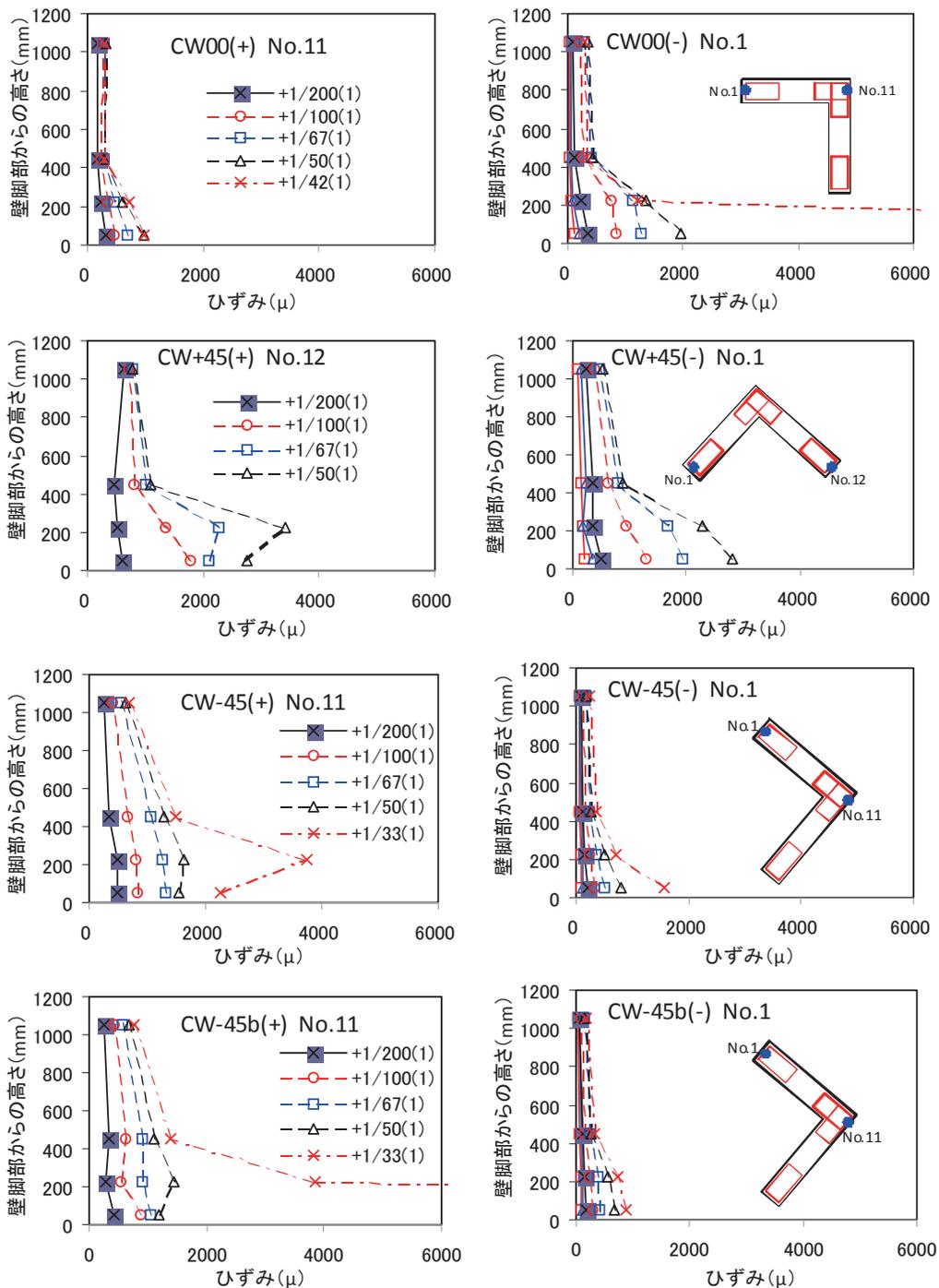


図-8 壁拘束部の拘束筋の高さ方向ひずみ分布

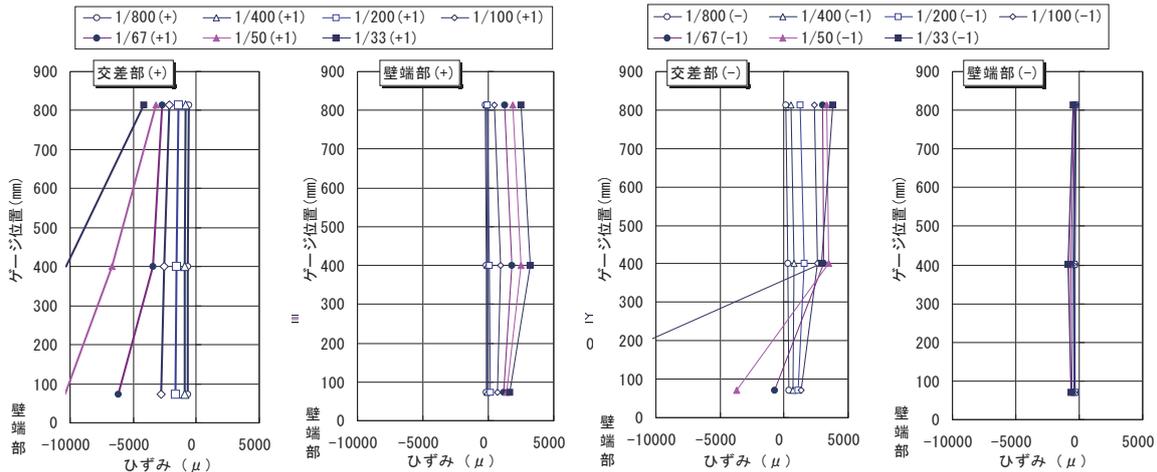


図-9 圧縮鉄筋のひずみ分布 (CW-45b 試験体)

だった。

4.5 拘束筋のひずみ分布

各試験体の壁拘束部拘束筋のひずみ分布を図-8に示す。縦軸は壁脚部からの高さである。いずれの試験体においても壁脚部から50mm、250mmの高さでの拘束筋のひずみは大きく、それよりも高い位置でのひずみは小さかった。また、CW+45やCW00の負加力時のように、圧縮域となるコンクリート断面が小さくなるような加力ほど、拘束筋のひずみが大きくなり、拘束筋がコンクリートをコンファインドしている効果が確認できた。

4.6 圧縮鉄筋のひずみ分布

CW-45b試験体の壁交差部および壁端部の圧縮鉄筋のひずみ分布を図-9に示す。圧縮鉄筋は端部に機械式定着板を取り付け、定着板の下端部が壁の下端部に位置するように拘束コンクリートの中央に挿入した。圧縮鉄筋はその端部を加力スタブ側には定着させていない。

壁交差部の圧縮鉄筋は正加力時1/67rad.で圧縮降伏に達した。大変形時の圧縮領域で圧縮鉄筋が降伏し、最大耐力が5%程度上昇していることから、壁交差部に挿入した圧縮鉄筋は、コンクリートの圧壊による耐力低下を抑制する効果があったと考えられる。負加力時において、交差部の圧縮鉄筋は1/67rad.以降で圧縮側に転じていることから、負加力時において大変形時には交差部も圧縮状態にあったことが伺える。壁端拘束部の圧縮鉄筋は正加力時および負加力時ともに降伏には至らなかった。

4.7 1階層間変形角について

壁脚部から750mm(実大で4.5m)の高さを1階層高として水平変位を計測し、1階相当の変形を検討した。試験体全体の部材角に対する1階相当の層間変形角を図-10に示す。シアスパン比の大きい試験体ほど試験体全体の曲げ変形が大きくなるため、壁脚部にあたる1階相当の層間変形角が小さくなることが確認できた。CW-45においては試験体の部材角に対して、1階層間変形角は60%程度であった。また、部材角が大きくなるにつれて、壁脚部の圧壊が進行し、1階層間変形角の占める割合が大きくなることも確認できた。

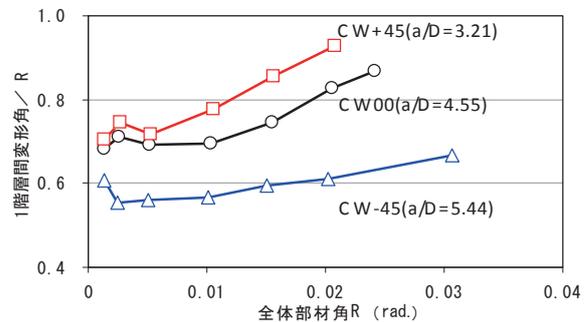


図-10 全体部材角に対する1階層間変形角の割合

5. まとめ

水平力の作用方向を変えたL型立体耐震壁4体の曲げせん断実験の結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 耐震壁端部の拘束領域を壁厚の1.5倍とした試験体では、水平力の作用方向にかかわらず、1/67rad.まで曲げ降伏型の安定した履歴性状を示し、1/50rad.で圧壊が生じる破壊形式となった。
- (2) 平面保持を仮定した断面分割法により試験体の最大耐力はおおむね評価できると考えられるが、大変形時に圧縮域のひずみ分布が平面保持を仮定したひずみより大きくなるような高圧縮軸力を受ける場合、計算結果は実験値を過小に評価する傾向がある。
- (3) 1/100rad.までは壁脚部の平面保持の仮定が成立していると考えられる。
- (4) 壁拘束部の拘束筋の効果が確認できた。
- (5) 壁交差部に挿入した圧縮鉄筋は有効に作用し、コンクリートの圧壊による耐力低下を抑制する効果があったと考えられる。

参考文献

- 1) 岩淵一徳、前川利雄、福島寛二：RC造L型断面耐震壁の靱性能に関する実験研究、コンクリート工学、Vol.23、No.3、pp.481-486、2001
- 2) 建設省総合技術開発プロジェクト：鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発、高強度鉄筋分科会コンファインドコンクリートWG研究成果報告書、1993.3

