

# 論文 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・石岡 拓\*1

**要旨:** 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、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。試験体は、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関わらず 1/67 rad.までは曲げ降伏型の安定した履歴性状を示し、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。

**キーワード:** L型耐震壁, 超高層鉄筋コンクリート建物, 曲げ耐力, 変形性能

## 1. はじめに

超高層鉄筋コンクリート造の集合住宅においては、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要求が高まっている。これらのニーズに応えられ、フレーム構造に代わる剛性・耐力に富んだ耐震要素として立体耐震壁がある。

本論文では、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報告する。

## 2. 試験体

本論文で想定する建物の平面形状を図-1 に示す。試験体は試設計建物を参考として、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 4 体とした。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 (CW00, CW+45, CW-45)、壁端部の圧縮力が

最も大きくなる CW-45 試験体について、壁端部および交差部 (壁拘束部) のコンクリート圧縮破壊を抑制する目的で拘束部の中央に鉄筋(D19, USD685 材, 長さ 2000mm)

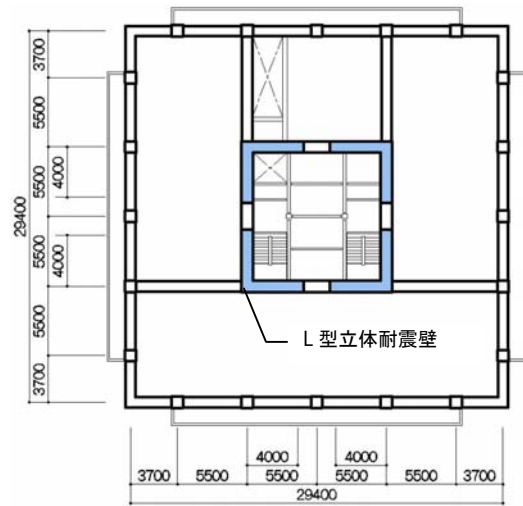


図-1 試設計建物平面形状

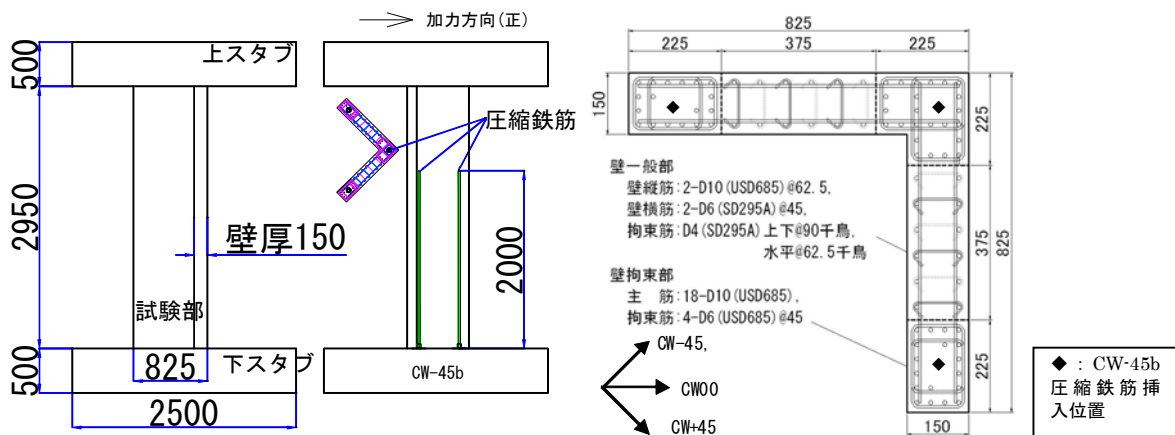


図-2 試試験体立面図・断面図(mm)

\*1 戸田建設 技術研究所 工修 (正会員)

\*2 戸田建設 構造設計部 工修 (正会員)

を挿入した（以下、圧縮鉄筋と呼ぶ。）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下側の加力スタブには定着させておらず、圧縮力にのみ作用するよに設置した。壁下端部で試験体1体(CW-45b)とした。試験体の概要を図-2に示す。加力方向は図中に示す通りであり、シアスパン比はCW00で4.55, CW+45で3.21, CW-45およびCW-45bで5.44とした。コンクリート強度は60N/mm<sup>2</sup>とし、壁厚さは150mm、壁長さは825mm、壁の高さは2950mmとした。壁一般部について、壁縦筋は2-D10@62.5、壁横筋は2-D6@45とし、拘束筋はD4として上下方向に90mmピッチ、水平方向に62.5mmピッチで千鳥配置とした。壁拘束部は、拘束域の範囲が耐震壁の靱性能に影響を及ぼすことが報告されており<sup>1)</sup>、本実験では靱性能を確保するため壁厚の1.5倍(225mm)を拘束範囲とした。拘束部の主筋は18-D10とし、拘束筋は4-D6@45とした。材料試験結果を表-1に示す。

表-1 材料試験結果

コンクリート		ヤング係数 (10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
CW00		3.47	64.3	3.63
CW+45		3.44	65.8	4.73
CW-45		3.40	68.0	3.91
鉄筋		ヤング係数 (10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D4	壁一般部拘束筋	1.83	366	532
D6	壁横筋	1.85	353	502
D6	壁拘束部拘束筋	1.89	612	840
D10	壁縦筋、 壁拘束部主筋	2.11	799	976
D19	圧縮鉄筋	1.89	717	902

### 3. 加力方法

加力装置概要を図-3に示す。軸力は鉛直に配置したアクチュエータ3本により試験体上スタブに設置した鉄骨梁を介して試験体上部に加力した。水平力は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ピン支承を介して鉄骨梁に取り付けた。試験体のねじれを防止するため、上スタブには加力方向と直交方向の変形を拘束するリニアスライダを2箇所設置した。

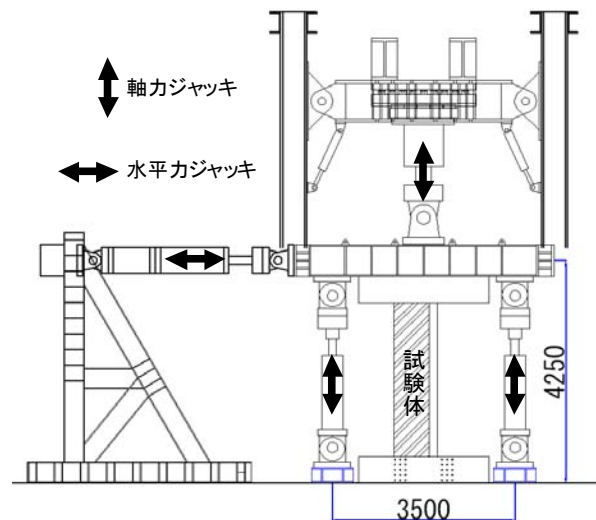


図-3 加力装置概要(mm)

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 $\eta$  ( $=N/(A \cdot F_c)$ , 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下スタブ上面から加力芯までの鉛直距離(3750mm)で除算した部材角Rで制御し、目標部材角Rを1/800rad.で正負各1回, 1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33rad.で正負各2回とした正負繰り返し加力とした。

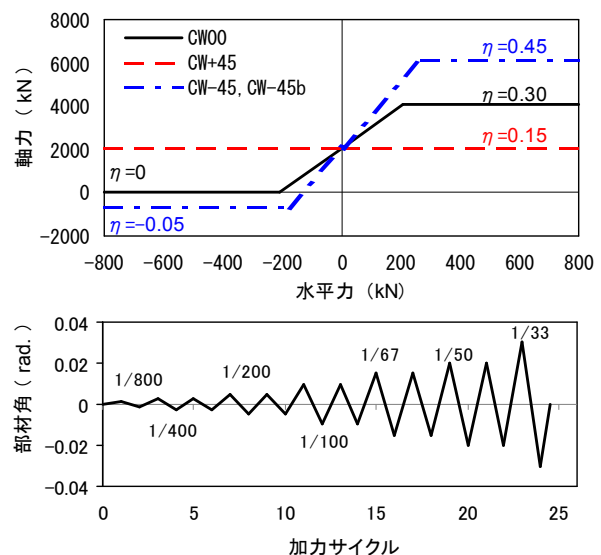


図-4 加力スケジュール

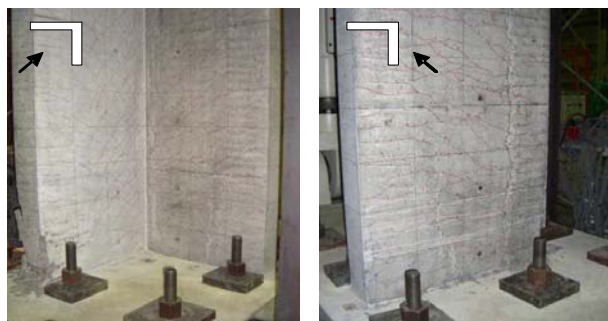
## 4. 実験結果とその考察

### 4.1 破壊状況

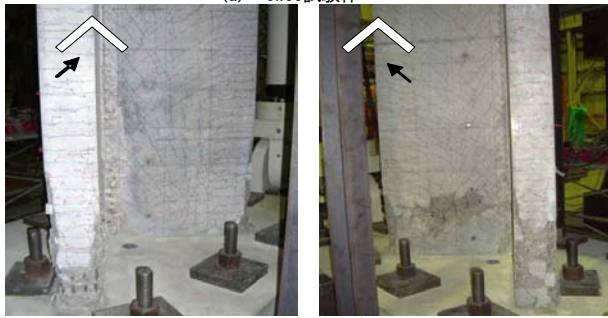
最終破壊状況を図-5に示す。CW00の正加力時ではR=+1/400rad.に壁一面に曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生し、+1/100rad.には壁拘束部脚部に縦方向のひび割れが発生して圧壊が生じた。+1/67rad.では壁上部に曲げせん断ひび割れが増加し、壁拘束部の主筋が引張降伏した。+1/50rad.に壁拘束部脚部で圧壊している範囲が拡大して、最大耐力に達した。CW00の負加力時では

R=-1/400rad.に壁脚部に曲げひび割れが発生し、-1/200rad.には壁拘束部の主筋が圧縮降伏した。-1/100rad.に壁拘束部脚部に圧壊が生じ、-1/50rad.にはその範囲が拡大した。

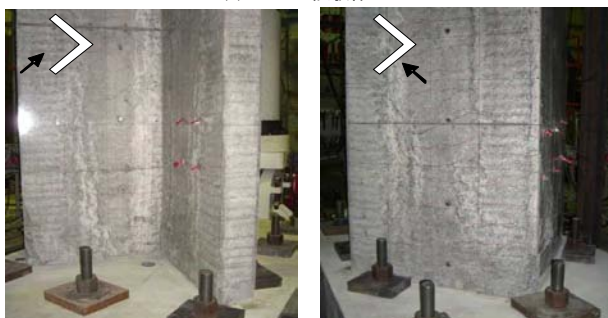
CW+45は正負加力とも同様の破壊性状であり、1/800



(a) CW00試験体



(b) CW+45試験体



(c) CW-45試験体



(d) CW-45b試験体

図-5 最終破壊状況

rad.に壁脚部に曲げひび割れが発生し、1/400 rad.には壁中段に曲げせん断ひび割れが発生した。1/200 rad.には壁拘束部脚部に圧壊の傾向がみられ、1/100rad.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 rad.に壁にせん断ひび割れが発生し、+1/50 rad.の繰返し載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 $R=+1/400\text{rad.}$ で壁脚部に曲げひび割れが発生し、+1/100rad.に壁拘束部脚部に圧壊が生じ、壁拘束部の主筋が圧縮降伏した。+1/33rad.には圧壊して

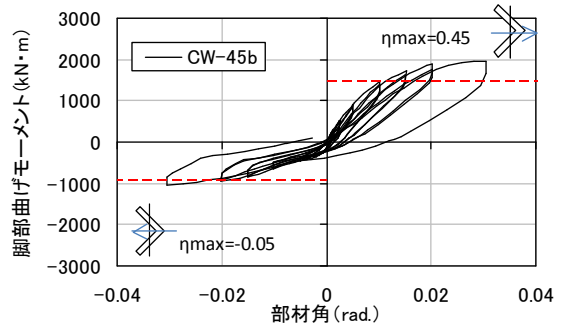
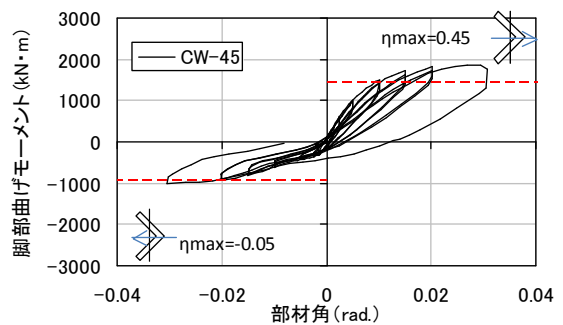
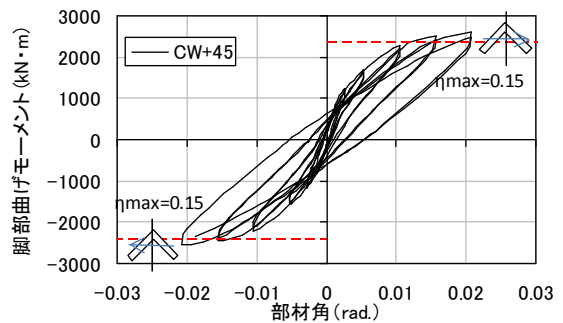
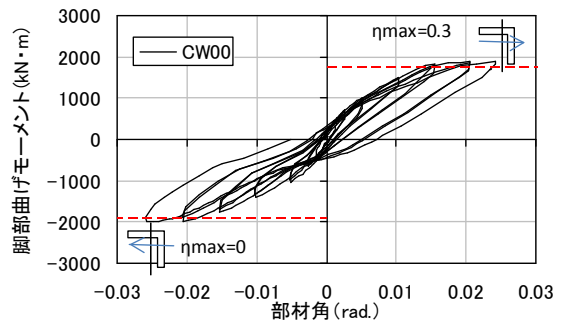


図-6 荷重変形関係

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、-1/100rad.に壁拘束部脚部に圧壊が生じ、-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.で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、 $-1/100\text{rad}$ .に壁脚部に圧壊が生じ、 $-1/33\text{rad}$ .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 荷重変形関係

各試験体の荷重変形関係を図-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耐力計算値を破線で併記した。いずれの試験体も軸力0あるいは圧縮軸力下では、鉄筋が降伏する $1/200\sim 1/100\text{rad}$ .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 $1/50\text{rad}$ .までは安定した履歴性状を示した。

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。なお、初期剛性は最初のひび割れが確認

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

できるまでの荷重変形関係の勾配とした。

圧縮鉄筋を挿入したCW-45b試験体では、 $1/67\text{rad}$ .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を表-2に示す。なお、計算値は平面保持を仮定した断面

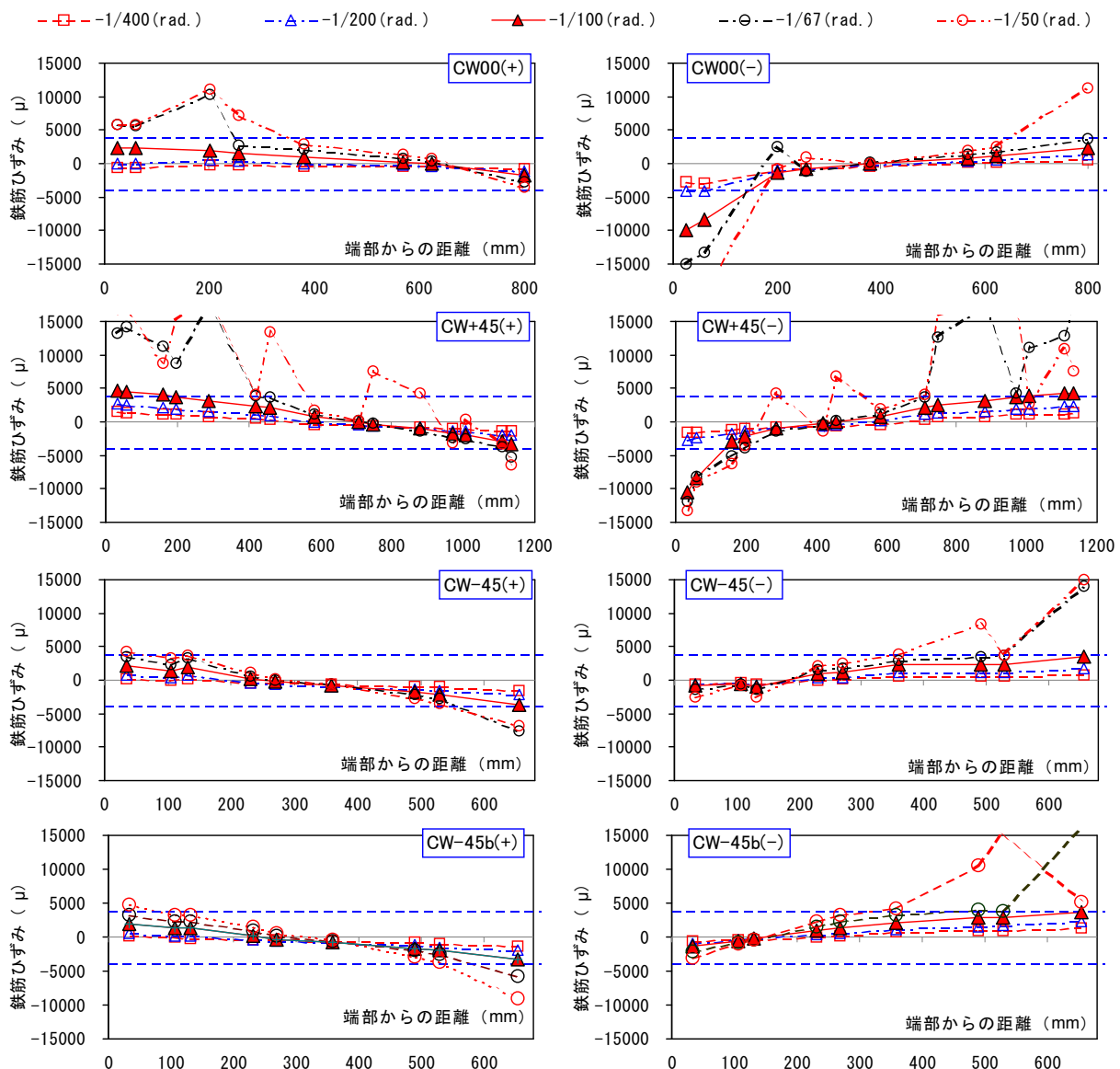


図-7 壁脚部における壁拘束部主筋および壁縦筋のひずみ分布 (青破線：降伏ひずみ)

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については正負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。これは、高圧縮軸力を受けるCW-45, CW45bの大変形時にはコンク

リートと鉄筋の付着が切れて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ったためと考えられる。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

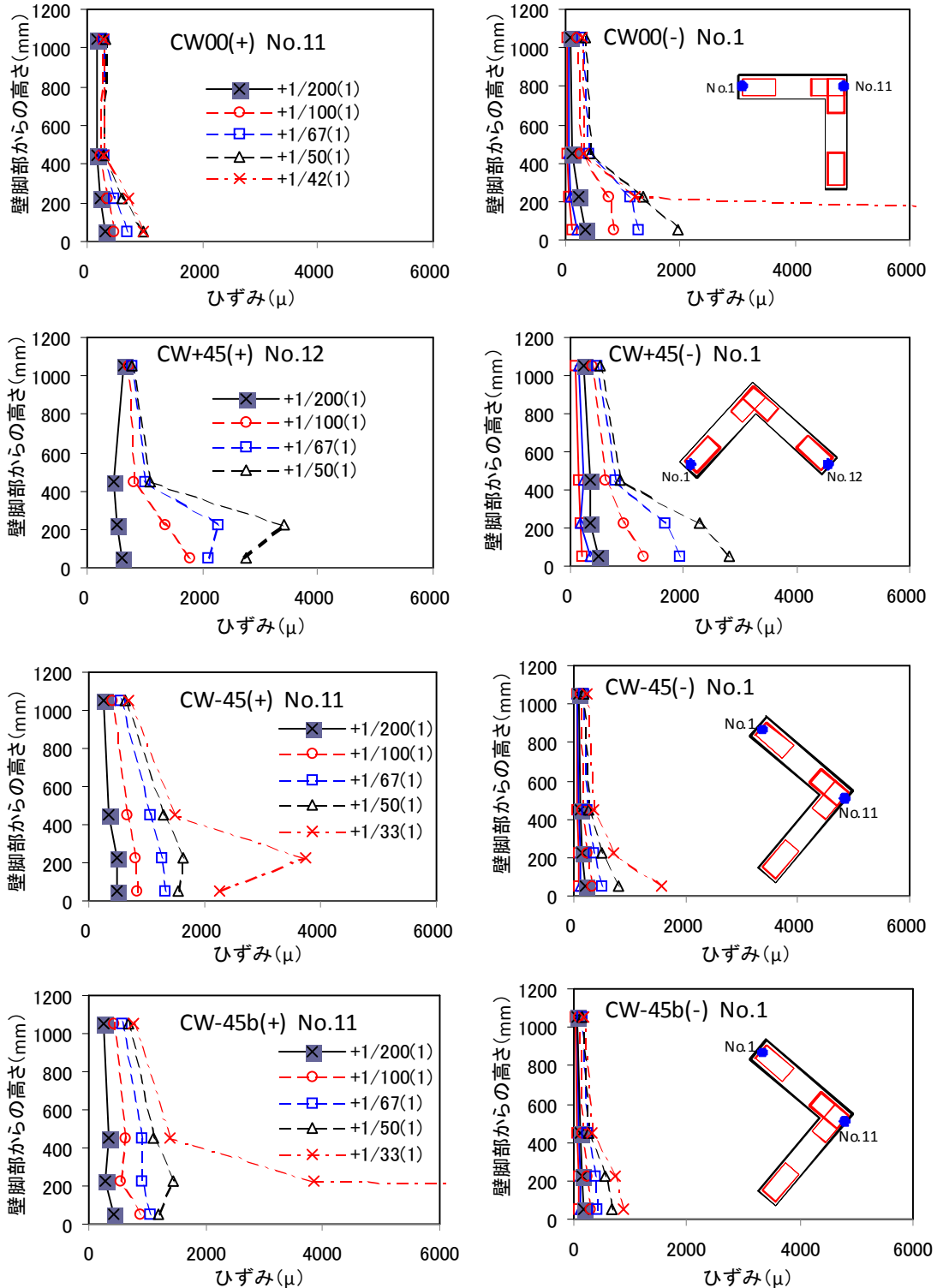


図-8 壁拘束部の拘束筋の高さ方向ひずみ分布

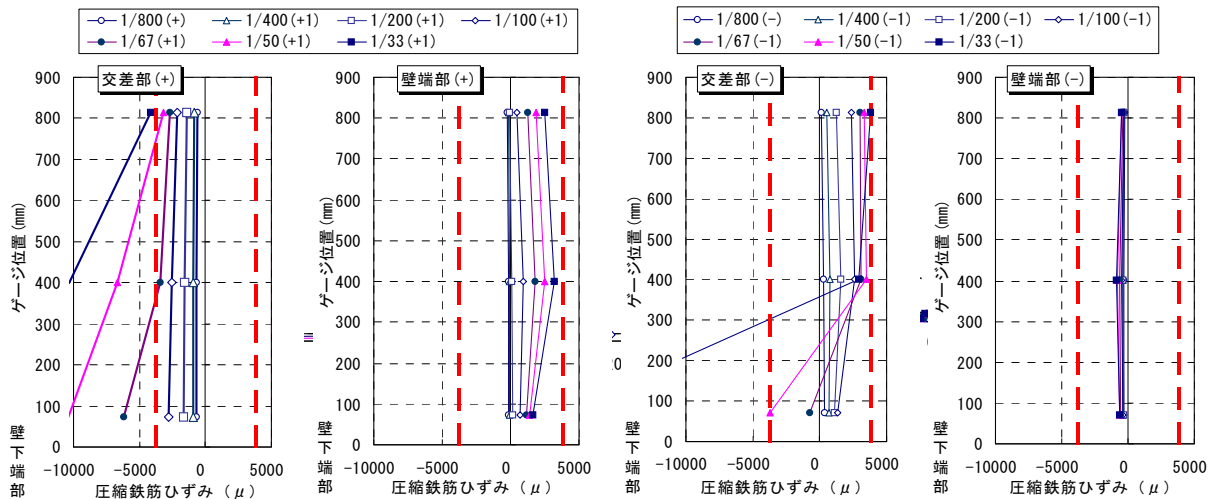


図-9 圧縮鉄筋のひずみ分布(CW-45b 試験体)

側以外の試験体では、鉄筋降伏前後の  $1/100\text{rad}$  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。いずれの試験体においても  $1/100\text{rad}$  以降は引張域に比べて圧縮域ひずみ分布の勾配が平面保持を仮定した場合に比べて大きくなる傾向にあった。

#### 4.5 拘束筋ひずみ分布

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拘束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。図中の破線は、圧縮鉄筋の降伏ひずみを示す。壁交差部の圧縮鉄筋は正加力時  $1/67\text{rad}$  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、CW-45 試験体に比べて最大耐力が 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、壁交差部のコンクリートの圧壊を遅らせて耐力を上昇させ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  $1/67\text{rad}$  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にも圧縮領域が生じたことが伺える。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。

### 5. まとめ

壁端部のコンクリート拘束域を  $1.5D$  とし、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) 各試験とも概ね部材角  $1/200 \sim 1/100\text{rad}$  で壁交差部および壁端部にコンクリートの圧壊が見られ、 $1/50\text{rad}$  で圧壊が進展したが  $1/50\text{rad}$  を超える大変形時にも安定した履歴を示した。
- (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概ね評価できると考えられるが、本実験のように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場合、計算結果は実験値を過小に評価する傾向がある。
- (3) 壁端部コンクリートの圧縮応力が比較的高い CW00 の負荷荷時を除き、 $1/100\text{rad}$  までは壁端部の平面保持の仮定が成立していると考えられる。
- (4) 壁脚部から 250mm の高さでの拘束筋のひずみは大きく、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拘束している効果が確認できた。
- (5) 壁交差部に挿入した圧縮鉄筋は壁交差部のコンクリートの圧壊を遅らせて耐力を上昇させ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