

## 論文 高強度コンクリート耐震壁の破壊性状とマクロモデル

竹原雅夫<sup>\*1</sup>、竹内光理<sup>\*2</sup>、望月洵<sup>\*3</sup>

**要旨:**本研究は、設計基準強度  $F_c=500\sim 800\text{kgf/cm}^2$ を用いた高強度コンクリート耐震壁の実験から、その破壊性状を捉えるとともに、高強度コンクリート耐震壁へのマクロモデルの適用性について検討したものである。高強度コンクリート耐震壁は、多くの場合、曲げ破壊で終わるため、最大強度はコンクリートの有効圧縮強度係数の数値に影響をうけないこと、他の破壊モードで終わる場合を含めて、有効圧縮強度係数を0.63としたマクロモデル、およびこれを基礎にした弾塑性解析モデルによって、強度と変形をよく評価できることが確かめられた。

**キーワード:**高強度コンクリート耐震壁、マクロモデル、有効圧縮強度係数、最大強度

## 1.はじめに

RC構造の高層化にともない、圧縮強度が $\sigma_B=400\sim 1000\text{kgf/cm}^2$ であるコンクリートが使われている。このような構造の耐震性の確保に有効な耐震壁については実験例が少なく、その破壊性状が的確に捉えられていない。また、高強度コンクリートの有効圧縮強度係数は低強度コンクリートの場合に比べて小さくなるというのが一般的であり、既存のマクロモデルでは高強度コンクリート耐震壁の最大強度をよく評価できないと報告されている[1]。筆者らは、既往の研究[2]、[3]において、 $\sigma_B=400\text{kgf/cm}^2$ グレードと $\sigma_B=500\text{kgf/cm}^2$ グレードの耐震壁の場合、有効圧縮強度係数として $\nu=0.63$ の定値を用いた筆者らの元モデルによって、十分な解析精度で最大強度を捉えられることを示した。しかし、これは高強度コンクリートになるほど耐震壁の破壊モードが曲げ破壊または曲げ・せん断破壊モードに限定され、最大強度におよぼすコンクリート強度の影響が小さいことに起因している。このため、高強度コンクリートの有効圧縮強度係数が0.63であるとは主張できない。高強度コンクリート耐震壁の解析精度は有効圧縮強度係数よりも、マクロモデルそのものに依存するといえる。耐震壁の最大強度の評価には、マクロモデルに設定される仮定が複雑に関わる。マクロモデルの適用性の検討には、いろいろなパラメータをもつ多数の耐震壁についての解析的検討が必須である。本研究は、このような考えにたつて、 $F_c=500\sim 800\text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリート耐震壁の実験を行い、その破壊性状を捉えるとともに、さらに他の実験結果も含めてマクロモデルの高強度コンクリート耐震壁への適用性について、解析的に検討することを目的としている。

## 2.実験計画

## 2.1 試験体

試験体は既往の実験で未発表のもの3体93SWH-6, 95SWH-1, 2、および新規のもの2体96SWH-4, 6の合計5体である。図1に試験体96SWH-4の形状、配筋、および加力方向を示す。他の試験体も壁板の内法高さを除いて、その形状は変わらない。試験体は連層耐震壁の基層を想定して、剛強な上下

\*1 東京建築専門学校、工修（正会員）

\*2 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻

\*3 工学院大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

梁、せん断破壊が生じないように補強された柱、および壁板で構成されている。主なパラメータは壁板の形状比とコンクリートの圧縮強度である。表1に試験体の諸性質を示す。表の $\xi$ の値は、試験体の形状と材料強度のもとで予測される破壊モードの指標で、筆者らの簡略化モデル[4]における圧縮ストラットの水平有効幅 $\xi \cdot l'$ の係数である。筆者らは $\xi \leq 0.4$ 、 $0.4 < \xi < 0.8$ 、および $0.8 \leq \xi$ のとき、それぞれ曲げ破壊、曲げ・せん断破壊、およびせん断破壊のモードで試験体は破壊するとしている[5]。この係数 $\xi$ は式(1)で求められる。

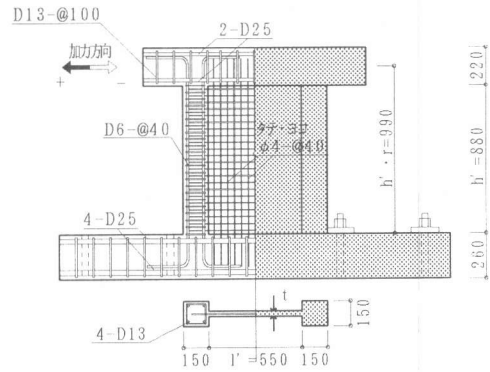


図1 試験体：96SWH-4(単位:mm)

表1 試験体の諸性質

試験体	柱				壁板					コンクリート	
	b×D	Pg	gσ <sub>y</sub>	N <sub>0</sub>	l'×h'	t	Ps	sσ <sub>y</sub>	h'・r	σ <sub>B</sub>	ξ
96SWH-4	15×15	2.26	8294	0	55×88	2.8	0.9	4317	99	875	0.39
96SWH-6	15×15	2.26	8294	0	55×88	2.8	0.9	4317	99	878	0.42
95SWH-1	15×15	2.26	8294	0	60×40	3.4	1.0	5306	51	515	0.95
95SWH-2	15×15	2.26	8294	0	60×40	2.8	1.2	5306	51	510	1.00
93SWH-6	12×12	3.53	3956	7.5	65×40	2.6	1.2	5042	51	624	0.73

【記号】 b×D: 柱の断面寸法(cm) Pg: 柱の全主筋比(%) gσ<sub>y</sub>: 柱主筋の降伏点強度(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 N<sub>0</sub>: 柱一本あたりの軸力(t) l'×h': 壁板の内法寸法(cm) t: 壁厚(cm)  
 Ps: 壁板の補強筋比(%) sσ<sub>y</sub>: 壁板の補強筋の降伏点強度(kgf/cm<sup>2</sup>) ξ: 圧縮ストラットの水平有効幅係数  
 h'・r: 反曲点高さ(cm) σ<sub>B</sub>: コンクリートの1軸圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

【共通】 柱: 主筋 4-D13 : 帯筋 □D6@40 壁: 補強筋 タテコΦ4@40

## 2.2 加力と計測の方法

加力は、アクチュエータによる上梁中心に作用する正負繰返し水平力である。サイクルは最大荷重または層間変形角 R=10.0×10<sup>-3</sup>rad. までは R=0.5~1.0×10<sup>-3</sup>rad. ごと2回とし、それ以降 R=25.0×10<sup>-3</sup>rad. まで R=2.0~5.0×10<sup>-3</sup>rad. ごと1回とした。変形の計測は、上下梁の相対水平変位を変位計で、また柱脚部の主筋ひずみをストレインゲージで測定した。

$$\xi = \eta + \sqrt{\eta^2 + \frac{S_v}{S_c} + 2 \frac{\eta \sqrt{N_y \cdot D \cdot S_t + N_0 + N_y (D/2l + 1)}}{S_c \cdot l}} \quad \dots (1)$$

ここで、 $\eta = h' \cdot r / l$ 、 $S_v = P_s \cdot s \sigma_y \cdot t$ 、 $S_c = 0.63 \sigma_B \cdot \sin \theta \cdot \sin \theta \cdot t$ 、 $S_t = S_c - S_h$ ここで、 $S_h = \text{Min}(S_c, S_v)$ 、 $N_y$ は側柱の軸引張降伏強度

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊経過

(1) 試験体96SWH-4, 6: 両試験体とも、破壊経過は大要同じである。層間変形角 R=1×10<sup>-3</sup>rad. までに壁板に斜めひびわれ、柱に引張ひびわれが生じた。壁板の斜めひびわれは層間変形角の増加にともなって数が増し、伸展した。R=9×10<sup>-3</sup>rad. で柱脚部の浮きあがり1~2mmと壁板に部分的な圧壊が生じ、柱の引張ひびわれが全長に沿って生じた。R=11×10<sup>-3</sup>rad. で最大強度に達し、壁板に大きな圧壊が生じた。最大強度以降、スケルトンカーブは緩やかに低下し、平滑域に移行した。

平滑域の強度は最大強度の45%程度であった。両試験体の $\xi$ の値は0.4前後で、曲げ破壊または曲げ・せん断破壊モードと予測されたが、破壊経過は最大強度を維持する変形域がせまい曲げ・せん断破壊モードであった。図2に試験体96SWH-4の最大強度時のひびわれ状況と力-変形関係を示す。

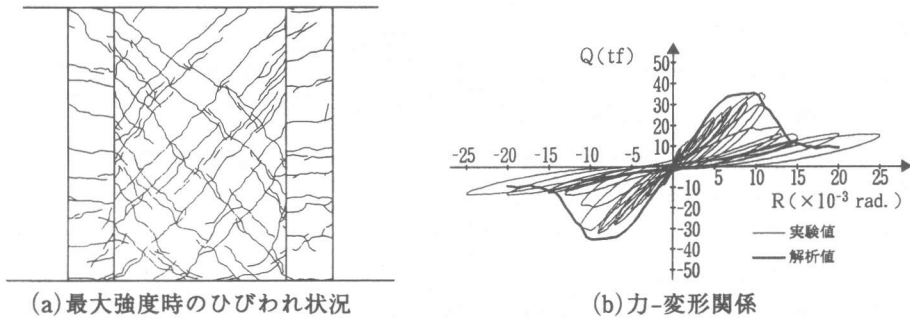


図2 試験体96SWH-4

(2) 試験体95SWH-1, 2: 両試験体とも破壊経過は大要同じである。 $R=1 \times 10^{-3}$  rad. までに、壁板に斜めひびわれ、柱の中央と柱脚に曲げひびわれが生じ、その後の層間変形角の増加とともに、それぞれのひびわれの数と長さが増した。 $R=7 \times 10^{-3}$  rad. で引張柱脚部に浮きを生じたが、大きな拡幅は見られず、壁板の圧壊とともに $R=8 \sim 10 \times 10^{-3}$  rad. で最大強度に達した。この後、急激な強度低下を示し、安定した平滑域に移行した。これらの試験体の $\xi$ の値は0.95, 1.0でせん断破壊モードと予測され、破壊経過も典型的なせん断破壊モードであった。図2に95SWH-2の最大強度時のひびわれ状況と力-変形関係を示す。

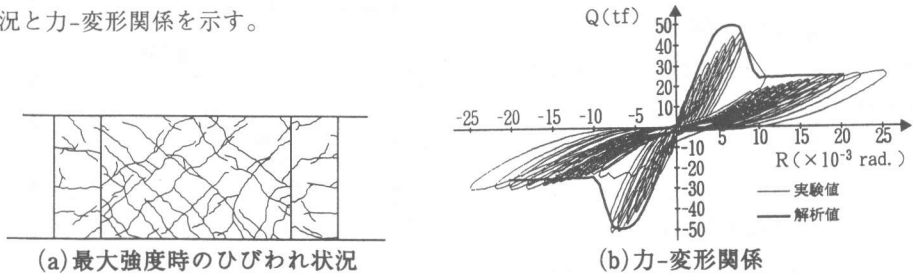


図3 試験体95SWH-2

(3) 試験体93SWH-6:  $R=1 \times 10^{-3}$  rad. で柱中央に曲げひびわれが生じ、その後、壁板に斜めひびわれ網が形成された。 $R=5 \times 10^{-3}$  rad. で最大強度に達し、壁板下部に圧壊が生じ、さらに  $R=6 \times 10^{-3}$  rad. で急激な強度低下を生じた。その後の経過は他の試験体と同じであった。この試験体の $\xi$ の値は0.73で、せん断破壊に近い曲げ・せん断破壊モードと予測されたが、破壊性状はせん断破壊モードであった。図3に最大強度時のひびわれ状況と力-変形関係を示す。

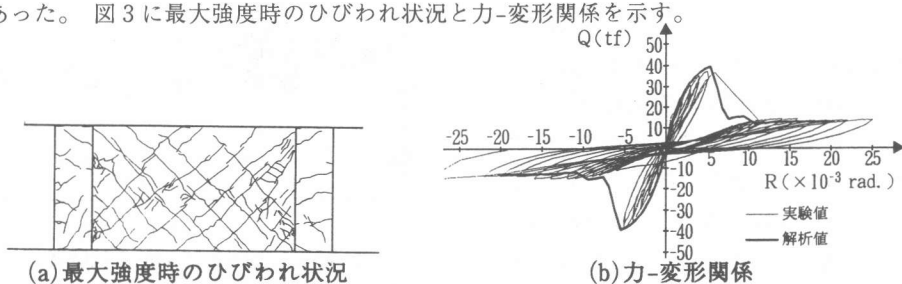


図4 試験体93SWH-6

### 3.2 柱主筋のひずみ

図5(a)と(b)は、それぞれ試験体96SWH-4と93SWH-6の右柱脚部主筋ひずみと層間変形角の関係である。図5(a)では引張をうける柱脚部主筋のすべてが降伏ひずみの前後にあるため引張降伏に近い状態にあり、また図5(b)では外側主筋だけが降伏ひずみを超えており曲げ降伏の状態にあるといえる。筆者らは、破壊モードの定義において、引張をうける柱脚部が引張降伏の状態にあるとき曲げ破壊または曲げ・せん断破壊モード、また曲げ降伏の状態にあるときせん断破壊モードとしている。図5は $\xi$ による予測が破壊モードをよく表している。ことを示している。

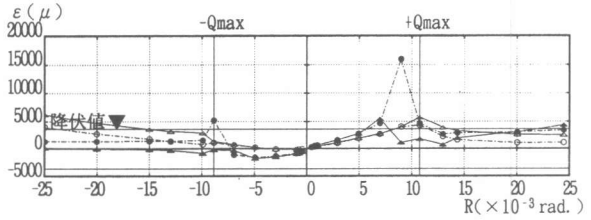
以上の破壊経過は、低強度コンクリート耐震壁で観察されるそれと大きく変わらないといえる。

### 4. マクロモデルによる解析

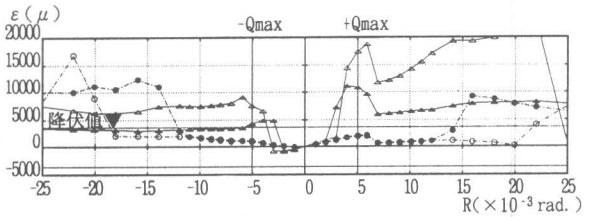
高強度コンクリート耐震壁へのマクロモデルの適用性を検討するために、筆者らの元モデル[6]、簡略化モデル[4]、および弾塑性解析モデル[7]による解析を試みる。

#### 4.1 元モデルによる解析

元モデルは剛強な上下梁、せん断抵抗をもつ柱、傾斜角 $\theta$ をもつ圧縮ストラット、および縦横引張補強筋で構成される。各部材に降伏条件が設定されるが、特に圧縮ストラットは $0.63\sigma_B$ の定値で降伏するとしている。表2に解析結果を示す。解析精度 $Q_{exp}/Q_{cal}$ の値は、元モデルが高強度コンクリート耐震壁によく対応できることを示している。図7は、わが国で1970年以降に行われた $\sigma_B \geq 500\text{kgf/cm}^2$ の耐震壁34体について、その正負の最大強度を2つの標本と数えた標本数50のデータに関する解析値と実験値の関係である。図7は、この結果を横軸に $\xi$ をとり示したものである。高強度コンクリート耐震壁ほど曲げ破



(a) 試験体96SWH-4



(b) 試験体93SWH-6

▲ △ 外側主筋 ● ○ 内側主筋

図5 柱脚部主筋ひずみ

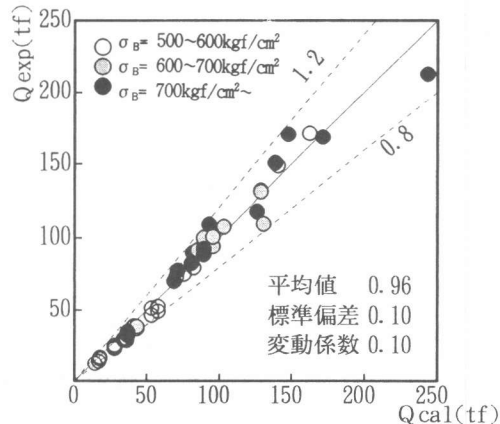


図6  $\sigma_B \geq 500\text{kgf/cm}^2$ の試験体の $Q_{exp}$ と $Q_{cal}$ の関係

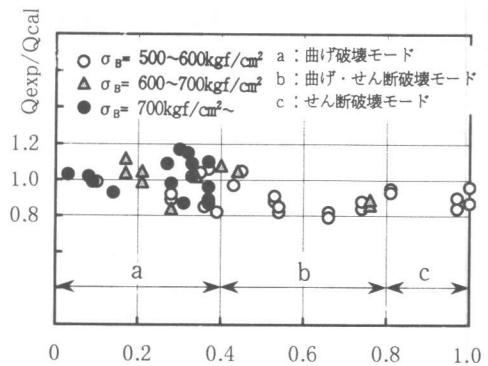


図7  $\sigma_B \geq 500\text{kgf/cm}^2$ の試験体の $Q_{exp}/Q_{cal}$ と $\xi$ の関係



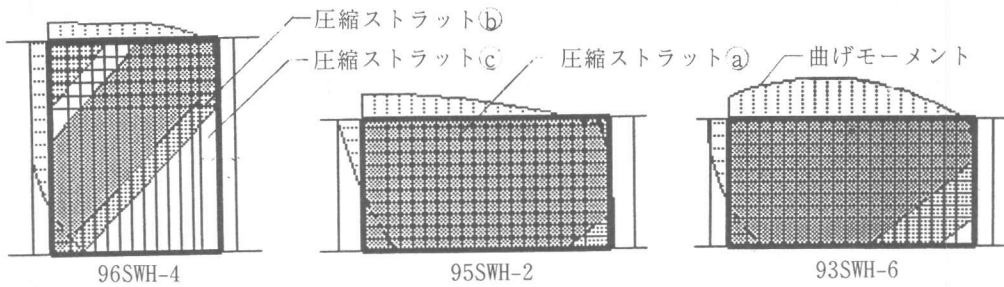


図9 元モデルによる応力状態

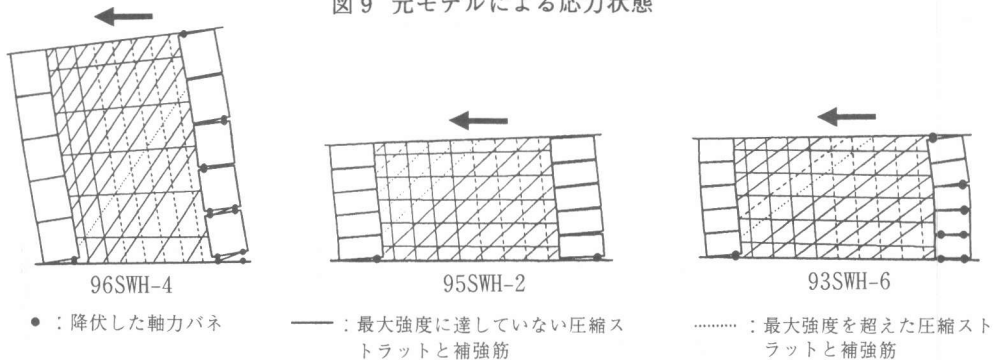


図10 弾塑性解析モデルによる応力状態

## 5. 結び

- $\sigma_B=600\sim 800\text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリート耐震壁について実験と解析を行い、次のまとめを得た。
- 1) 高強度コンクリート耐震壁の破壊経過は  $\sigma_B=200\sim 500\text{kgf/cm}^2$ の耐震壁の破壊経過と大要同じものである。
  - 2) 高強度コンクリート耐震壁の強度と変形は、有効圧縮強度係数を0.63の定値としたマクロモデルでよく評価できる。

## 参考文献

- [1] 斎藤文孝、倉本洋、南宏一：高強度コンクリートを用いた耐震壁のせん断破壊性状に関する実験的研究、日本建築学会学術講演梗概集 C-2 構造、pp.605-606, 1990, 10
- [2] 小野里憲一、望月洵、竹内克己、谷本和彦： $\sigma_B=400\text{kgf/cm}^2$ レベルの連層耐震壁の強度と変形、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 2, pp. 1185-1190, 1993
- [3] 望月洵、小野里憲一、藤原達仁、渡辺大介： $\sigma_B=500\text{kgf/cm}^2$ レベルの連層耐震壁の強度と変形、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 2, pp. 1349-1354, 1994
- [4] 望月洵、小野里憲一：連層耐震壁の簡略化最大せん断強度式、第8回日本地震工学シンポジウム、pp. 1425-1430, 1990, 12
- [5] 望月洵、小野里憲一：連層耐震壁の破壊モードの判別式、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13-2, pp. 559-564, 1991, 6
- [6] 望月洵、小野里憲一：連層耐震壁のマクロモデルとその解析法、コンクリート工学論文集、Vol. 1, No. 1, pp. 121-132, 1990, 1
- [7] 小野里憲一、望月洵：マクロモデルによる単独耐震壁の弾塑性解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12-2, pp. 575-580, 1990, 6