

論文

[2093] 連層耐震壁の破壊モードの判別式

正会員○望月 洵 (工学院大学建築学科)

正会員 小野里憲一 (O. R. S 事務所)

1. はじめに

連層耐震壁の強度と靱性は、その破壊モードにいちじるしく影響をうける。このため、連層耐震壁をもつ構造の耐震設計においては、連層耐震壁の破壊モードを簡単な計算によつて的確に予測できることが必須である。しかし、現時点で、破壊モードについて統一的な定義はなく、また破壊モードの判別は最大せん断強度を求め、これを全塑性曲げ強度に相応するせん断力と比較することによつて行っている。本研究では、連層耐震壁を模した強剛な上・下梁とせん断破壊しないよう補強された単独耐震壁について、破壊モードを定義し、その判別式を簡略化マクロモデルの解析および耐震壁の実験結果にもとづき提案する。そしてこれらの破壊モードの定義と判別式の妥当性を実験によつて確認している。

2. 破壊モードの定義

側柱の圧縮破壊とせん断破壊が生じないという条件のもとで、一般に、連層耐震壁の最大変形は、壁板のスリップ破壊(剝離を伴う圧縮破壊)で限界づけられている。このような連層耐震壁の破壊モードを次のように分類して定義する。

a) せん断破壊モード

$$N_{rb}/N_y < 1.0 \quad , \quad R_b \geq 5 \quad (1. a), (1. b)$$

b) 曲げ・せん断破壊モード

$$N_{rb}/N_y = 1.0 \quad , \quad R_b > 5 \quad (2. a), (2. b)$$

c) 曲げ破壊モード

$$N_{rb}/N_y = 1.0 \quad , \quad R_b > 10 \quad (3. a), (3. b)$$

これは、破壊モードを側柱の引張降伏の有無および実験で得られた R_b の下限値を規定する立場で定義したものである。ここで、 N_{rb} は引張側柱下端の軸力、 $N_y = a_g \cdot \sigma_y$ はその引張降伏強度、 a_g は側柱の全主筋断面積、 σ_y は主筋の降伏強度である。 R_b は、式(1. b)の場合は最大強度時の層間変形角 ($\times 10^{-3} \text{rad.}$)、式(2. b)および式(3. b)の場合は $0.8 Q_{\max}$ (Q_{\max} は最大せん断強度) の水平線とスケルトンカーブとの交点のうち、大きいほうの層間変形角である。

式(1. a)～(3. a)の基準は、側柱の引張降伏によつて最大強度以降のスケルトンカーブに、平滑域が大なり小なり生じるといふ実験結果にもとづいている。式(1. b)は圧縮ストラットの傾斜角を 45° 、そのスリップ破壊時における終局歪を $\epsilon_u = 0.0025$ とした場合の層間変形角であり、せん断破壊モードで終わった試験体の平均的な層間変形角に相応している。式(2. b)、(3. b)は R. C 構造の動的弾塑性解析の際、一般的に期待されている値である。

3. 圧縮ストラットの有効幅

判別式は、ここで誘導する圧縮ストラットの有効幅と関係づけられている。図-1は筆者らが提案している連層耐震壁の最大強度を求めるための簡略化マクロモデル（以下、簡略モデルと略す）[1]である。モデルは次の状態にあると仮定される。

- 1) 上・下梁は剛体で破壊しない。
- 2) 圧縮ストラット①は降伏しており、その降伏強度は $0.63\sigma_B$ である。
- 3) 圧縮ストラット②は、これと交差する側柱の交差領域が引張降伏しているため、除去される。
- 4) 縦横の壁補強筋はすべて降伏している。
- 5) 引張側柱下端の曲げモーメントとせん断力は省略できるほど小さい。
- 6) 圧縮側柱下端は曲げ降伏の状態にある。

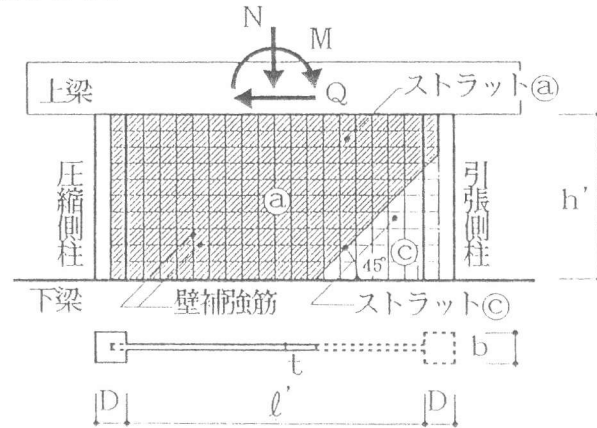


図-1 簡略モデル

このモデルのもとで、せん断破壊モードと曲げ・せん断モードおよび曲げ破壊モードを区分するものは圧縮ストラット②が生じないか生じるかであるから、破壊モードと圧縮ストラットの有効幅 $\xi \cdot l$ の関係は次のように表せる。

●せん断破壊モード

圧縮ストラットの有効幅が壁板の全幅と等しい。すなわち $\xi = 1.0$

●曲げ・せん断破壊モードおよび曲げ破壊モード

圧縮ストラットの有効幅が壁板の全幅より小さい。すなわち $\xi < 1.0$

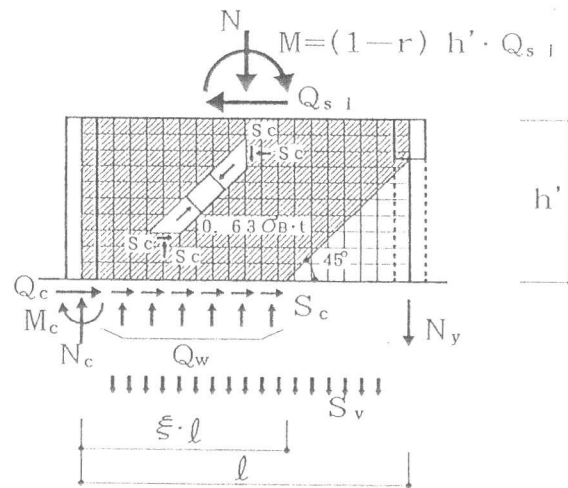


図-2 外力と応力分布

図-2のモデルに作用する外力と仮定応力分布との間に次の式が成り立つ。

$$Q_{si} = Q_w + Q_c, \quad Q_w = S_c \cdot \xi \cdot l \quad (4), (5)$$

ここで、 Q_{si} は簡略モデルの最大せん断強度、 Q_w は圧縮ストラットのせん断力、 Q_c は圧縮側柱下端のせん断力、および S_c は圧縮ストラットの単位水平長さあたりのせん断強度である。

圧縮側柱下端におけるモーメントのつりあいは、 ξ を含んで次のようになる。

$$M_c + M + N \cdot l / 2 - Q_{si} \cdot h' + N_y \cdot l - S_c (\xi \cdot l)^2 + S_v \cdot l^2 / 2 = 0 \quad (6)$$

ここで、 M_c は圧縮側柱下端の曲げ降伏強度、 S_v は縦補強筋の単位水平長さあたりの降伏強度

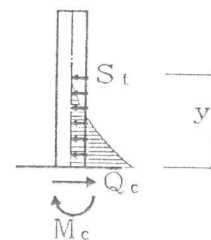


図-3 圧縮側柱下端の応力

である。圧縮側柱下端の Q_c は、下端近傍を一様荷重をうける片持柱とした応力状態から次のようになる(図-3)。

$$Q_c = \sqrt{2Mc \cdot St} \quad (7)$$

ここで、 $St = Sc - Sh$ は圧縮ストラットと横補強筋の合力の側柱に沿う単位長さあたり水平成分である。ただし、 Sh は横補強筋の側柱に沿う単位長さあたりの降伏強度である。 Mc と Q_c に次の近似値を用いる。

$$Mc \approx Ny \cdot D/2, \quad Q_c \approx \sqrt{2Mc \cdot St} \approx \sqrt{Ny \cdot D \cdot St} \quad (8), (9)$$

式(6)に式(4)、(5)および(8)、(9)を代入し、 ξ について整理すると次のようになる。

$$\frac{\xi^2}{2} + \eta \cdot \xi - \left\{ \frac{Sv}{2Sc} + \frac{-\eta \sqrt{Ny \cdot D \cdot St} + N/2 + Ny(D/2l + 1)}{Sc \cdot l} \right\} = 0$$

ここで、 $\eta = h' \cdot r / l$ 。これから、 ξ は次のようになる。

$$\xi = -\eta + \sqrt{\eta^2 + \frac{Sv}{2Sc} + \frac{-\eta \sqrt{Ny \cdot D \cdot St} + N/2 + Ny(D/2l + 1)}{Sc \cdot l}} \quad (10)$$

ただし、 $\xi > 1$ の場合は $\xi = 1$ とする。これは、 $Nrb = Ny$ と設定したため、 Ny につらう圧縮ストラットの応力は、 $\xi > 1$ の大きな幅に分布しなければならないことを意味し、 $Nrb < Ny$ であれば、当然、 ξ は1を超えることはないからである。これから、簡略モデルのもとで $\xi = 1.0$ であれば、 $Nrb < Ny$ で側柱は引張降伏を生じていないため、せん断破壊モードを意味し、 $\xi < 1.0$ であれば、 $Nrb = Ny$ で曲げ・せん断破壊モードまたは曲げ破壊モードを意味しているといえる。

4. 判別式の提案

図-4は、横軸に ξ を、縦軸に筆者らの厳密なマクロモデル(以下、元モデルと略す)[2]による Nrb/Ny をとったものである。対象とした試験体は筆者らおよび他の研究者による試験体の合計200体[3]である。図は、 ξ による側柱の引張降伏の判別が、大要、元モデルの解析精度のレベルで妥当であることを示しているが、 $\xi < 1.0$ の領域で $Nrb/Ny < 1$ の試験体がある。これらの試験体は側柱の曲げ強度が小

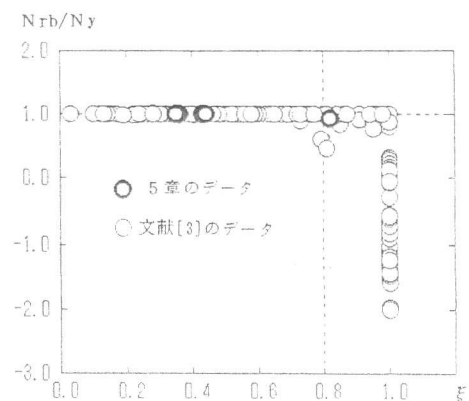


図-4 $\xi - Nrb/Ny$ の関係

- 5章のデータ
- 文献[3]のデータ
- F_c (Kgf/cm^2)
- 500~600
- 400~500
- 300~400
- 200~300
- 100~200
- 0~100

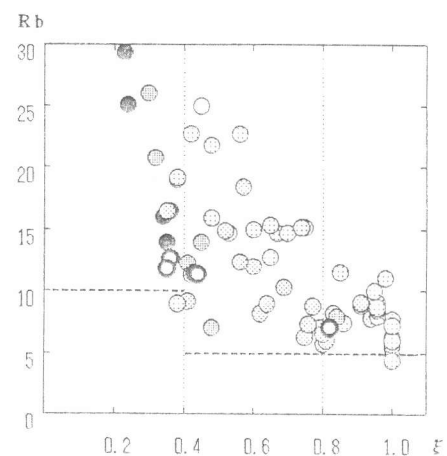


図-5 $\xi - Rb$ の関係

さいものである。 $\xi = 1.0$ 近傍のずれは、側柱の曲げ降伏の進展に伴い、元モデルでは考慮され、簡略モデルでは省略された圧縮ストラット⑤が生じていることに起因している。これを考慮すると、せん断破壊モードと曲げ・せん断破壊モードを区分する ξ として $\xi = 0.8$ が妥当といえる。図-5は、先の試験体200体のうち、せん断力-層間変形角の関係が明記されている66体についての ξ とRbの関係である。図-4および図-5から、2.で定義した破壊モードの判別式として次の式を提案できる。

$$\begin{aligned}
 \text{せん断破壊モード} & : 0.8 \leq \xi \leq 1.0 \\
 \text{曲げ・せん断破壊モード} & : 0.4 < \xi < 0.8 \\
 \text{曲げ破壊モード} & : \xi \leq 0.4
 \end{aligned} \tag{11}$$

式(11)の ξ を表す式(10)の諸量は、すべて既知量であり、反復計算をすることをなく ξ を求めることができる。

5. 実験による検証

ここでは、破壊モードの定義と判別式の妥当性を検証するために行った実験について示す。

a) 実験の概略

図-6に試験体の寸法、配筋、および加力方法を示す。試験体は強剛な上・下梁と、せん断破壊しないように補強された側柱をもつものである。加力はアクチュエータによる繰返し水平加力である。表-1に試験体の諸性質、最大強度、および ξ の値を示す。この ξ から表中に示す破壊モードが予測される。

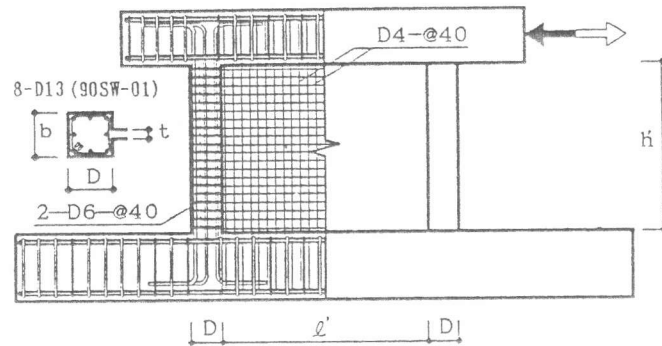


図-6 試験体

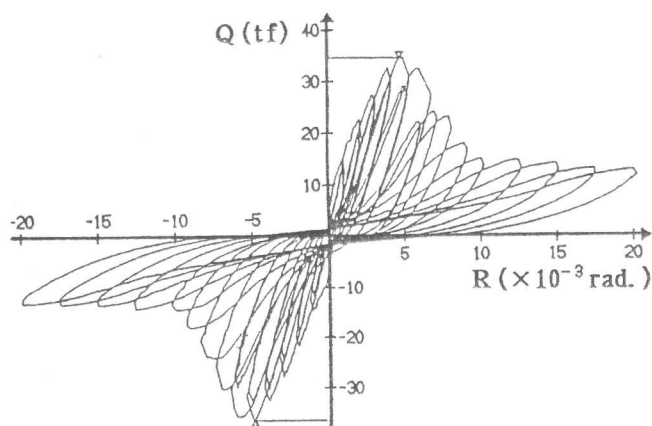
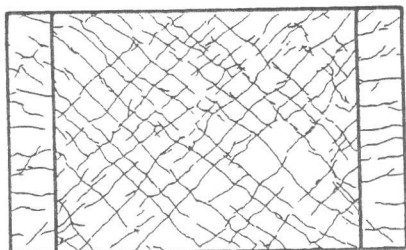
表-1 試験体の諸性質と実験結果

| 試験体名 | t | Pg | g σ_y | Ps | σ_B | Q _{exp} | Q _{si} | Q _{exp} /Q _{si} | Nrb/Ny | Rb | ξ (破壊モード) |
|---------|------|------|--------------|------|------------|------------------|-----------------|-----------------------------------|--------|------|---------------|
| 90SW-01 | 3.13 | 4.62 | 3614 | 1.00 | 320.9 | 36.23 | 41.35 | 0.88 | 1.00 | 7.1 | 0.82 (せん断) |
| 90SW-03 | 3.17 | 2.31 | 3606 | 0.99 | 293.2 | 20.33 | 19.07 | 1.07 | | 11.4 | 0.36 (曲げ) |
| 90SW-04 | 3.32 | | | 0.95 | | 19.46 | 19.24 | 0.99 | | 13.1 | 0.35 (曲げ) |
| 90SW-05 | 3.43 | 1.37 | 3614 | 0.92 | 335.9 | 26.88 | 27.67 | 0.97 | | 12.0 | 0.43 (曲げ・せん断) |
| 90SW-06 | 3.36 | | | 0.93 | | 26.24 | 27.55 | 0.95 | | 11.4 | 0.44 (曲げ・せん断) |

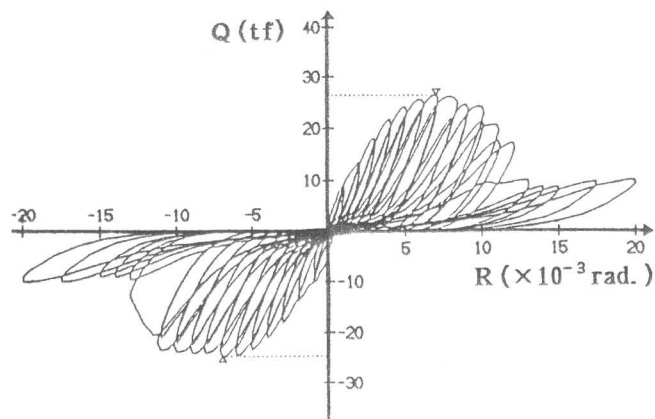
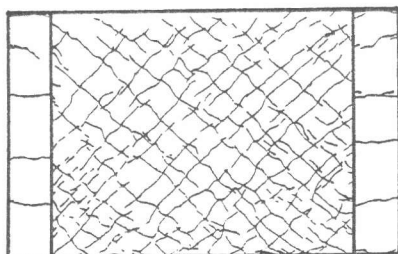
t : 壁厚 (測定値) (cm) Q_{si} : 計算の最大せん断強度 (tf) 共通 : 柱 (b × D) = 15 × 15 (cm)
 Pg : 側柱主筋比 (%) Nrb : 引張側柱下端の軸力 (tf) 壁寸法 (h' × l') = 80 × 100 (cm)
 g σ_y : 側柱主筋降伏強度 (kgf/cm²) Ny : 側柱の引張強度 (tf) 壁筋降伏強度 w σ_y = 3587 (kgf/cm²)
 Ps : 壁補強筋比 (%) Rb : 最大層間変形角 (× 10⁻³ rad.) 側柱帯筋比 Ps = 0.93 (%)
 σ_B : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm²) (正負域の平均値を示す.) 帯筋降伏強度 s σ_y = 3050 (kgf/cm²)
 Q_{exp} : 実験の最大せん断強度 (tf) ξ : 圧縮ストラットの有効幅係数

b) 実験結果

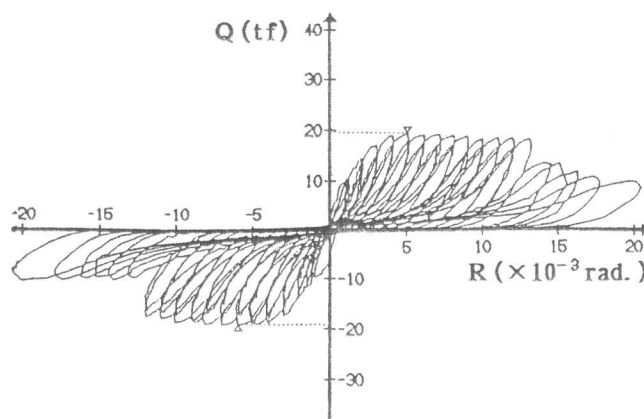
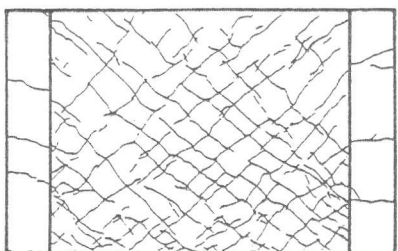
図-7は90SW-01、90SW-06、90SW-04の最大強度時の亀裂状況およびせん断力-層間変形角の関係である。試験体に予測された破壊モードとせん断力-層間変形角の関係はよく相応しており、式(11)の判別式が極めて妥当であることを示している。図-8は、元モデルによる解析で得られた



(a) 90SW-01



(b) 90SW-06



(c) 90SW-04

図-7 試験体の亀裂状況と Q-R 関係

応力状態、および引張側柱の曲げ降伏と引張降伏の状態を示す測定結果である。側柱の降伏は4隅主筋の歪測定から、全主筋が引張降伏の場合は引張降伏と、片側主筋のみ引張降伏の場合は曲げ降伏と判定された。図は、元モデルで設定された圧縮ストラットと側柱の関係、および破壊モードの定義で設定された破壊モードと側柱の関係が妥当であることをよく示している。

6. 結び

本研究では、連層耐震壁の破壊モードを定義し、その判別式を提案し、さらに実験による検証を試みた。その結果は次のようにまとめられる。

1) 破壊モードの定義とその判別式は実験結果によく適合している。

2) 元モデルにおいて設定された圧縮ストラットと側柱の関係は実験結果によく適合している。

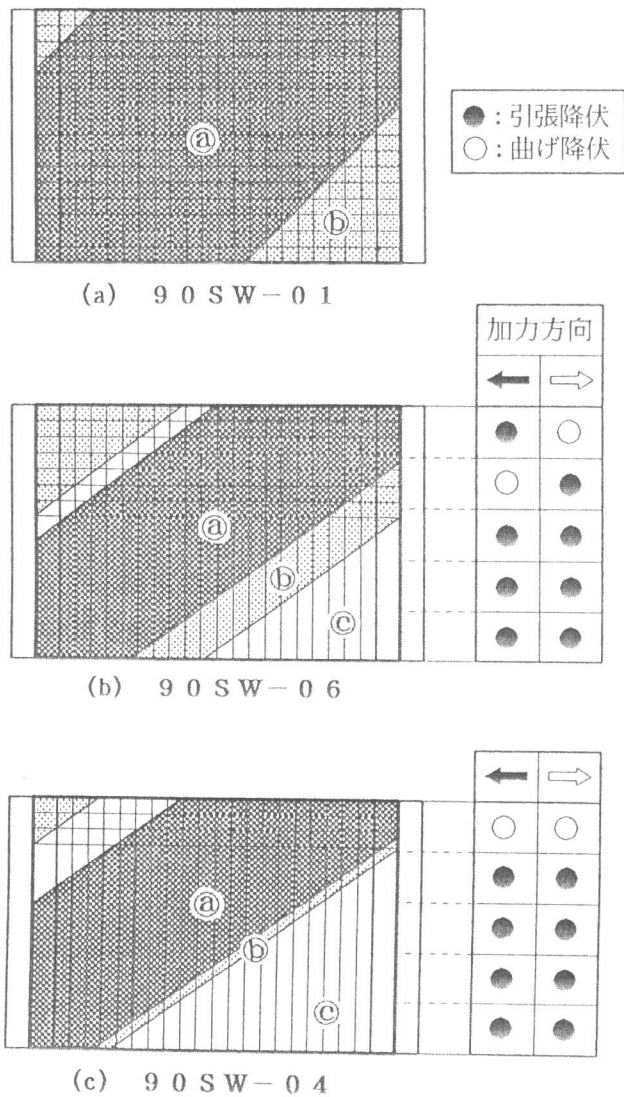


図-8 モデルの応力状態(解析)と側柱の降伏状態(実験)

参考文献

- 1) 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論文集、Vol.2、pp.1425-1430、1990.12
- 2) 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
- 3) 望月 洵：連層耐震壁の強度に関する研究、早稲田大学学位論文、1991.3