

論 文

[2094] 連層耐震壁のマクロモデルによるスケルトンカーブの解析

正会員○小野里憲一（O.R.S事務所）

正会員 望月 淳（工学院大学建築学科）

1. はじめに

近年、連層耐震壁の変形を捉えるのに、強度解析のためのマクロモデルをさらに簡略化した変形解析のためのマクロモデルを用いる試みが積極的に行われているが[1], [2], [3], [4]、現時点では、研究の途上であるといえる。特に、最大強度近傍または以降の解析は成功していない。本研究は、筆者らが先に提案している強度解析のためのマクロモデル[5]と変形解析のためのマクロモデルを用いて、いろいろな破壊モードで終る連層耐震壁のスケルトンカーブの大要を捉えることを目的としている。

2. スケルトンカーブの屈折点

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側柱をもつ単独耐震壁の破壊性状は、側柱の引張降伏の生じないせん断破壊モードと、引張降伏の生じる曲げ破壊モードに大別できる。その破壊経過は次に示すようないくつかの点で特徴づけることができる。本研究で解析しようとするスケルトンカーブは、これらの点を屈折点とし、これを折線または曲線で結ぶスケルトンカーブである。曲げ破壊モードの場合、次の屈折点が存在する（図-1(a)）。

- ①荷重と変形が零の点、すなわち力-変形曲線の原点である。
- ②弾性状態から、壁板に斜め亀裂が生じ、その後、引張側柱が引張降伏する点。
- ③壁板の縦・横補強筋が降伏し、有効な壁板の全域がスリップ破壊強度に達することによって、最大強度に達する点。
- ④壁板の一部が終局歪に達し破壊が進行するが、ある程度、抵抗できる点。
- ⑤壁板が全く破壊し、付帯フレームだけの抵抗に移行する点。

せん断破壊モードの場合、上記の屈折点のうち、②が欠け、③、④、⑤がほとんど同時に生じる（図-1(b)）。両モードの場合とも、屈折点③の状態が強度解析のためのマクロモデルに相応している。

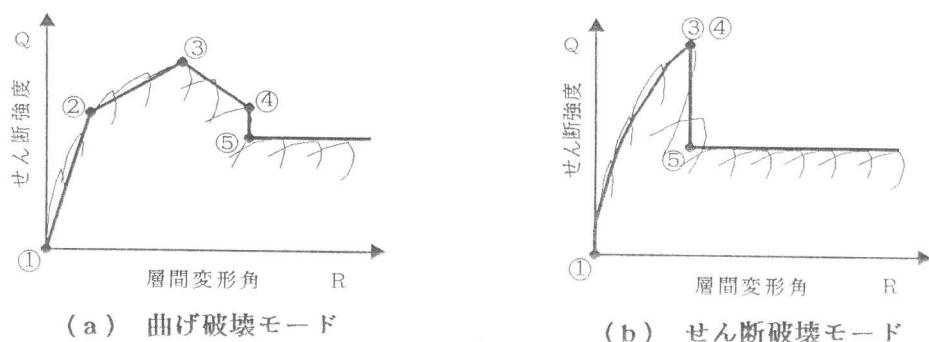


図-1 スケルトンカーブの屈折点

3. マクロモデル

図-2に、最大強度をすなわち屈折点③を解析するためのマクロモデル[5]を示す。他の屈折点はこれを変更して用いる。上・下梁、圧縮ストラット②および④、縦横補強筋、および両側柱で構成される。これらの構成部材は次の状態にある。

- 1) 上・下梁は剛体である。
- 2) 圧縮ストラット②は降伏しており、その強度は $0.63\sigma_B$ である。ストラット④は除去される。
- 3) 縦横補強筋は降伏している。
- 4) 圧縮側柱下端は曲げ降伏し、引張側柱下端は引張降伏している。

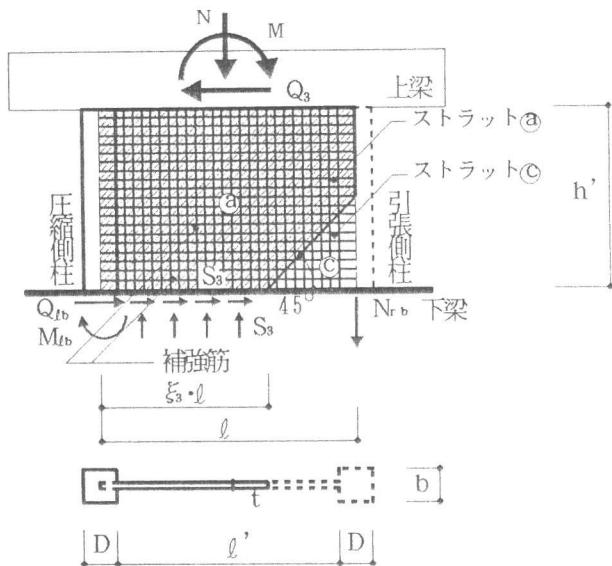


図-2 強度解析のマクロモデル—屈折点③

図にはこの仮定にもとづく応力状態を示してある。図中の端応力は以下の式で表される[5]。

$$Q_{tb} = \sqrt{2M_{tb} \cdot S_t} \quad (Q_{tb} \geq 2M_{tb}/h') \quad (1)$$

$$M_{tb} = Mu(N_{tb}) \quad (2)$$

$$N_{tb} = \eta \sqrt{Ny \cdot D \cdot S_t} + (\eta + \xi_3/2 - 1) \cdot \xi_3 \cdot l + S_v \cdot l / 2 + N/2 - Ny \cdot D / 2l \quad (3)$$

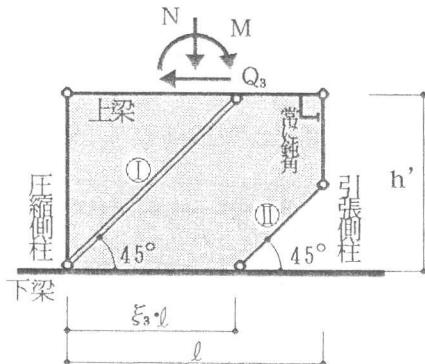
ここで、

$$\xi_3 = -\eta + \sqrt{\eta^2 + 2\chi_3} \quad (0 \leq \xi_3 \leq 1) \quad (4)$$

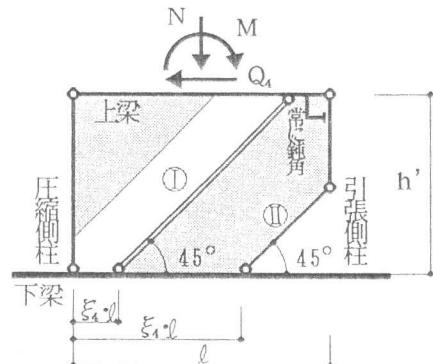
$$\chi_3 = \frac{S_v}{2S_c} + \frac{-\eta \sqrt{Ny \cdot D \cdot S_t} + N/2 + Ny \cdot (D/2l + 1)}{S_c \cdot l} \quad (5)$$

$$\eta = h' \cdot r / l \quad (6)$$

図-3に、屈折点③、④の変形を解析するためのマクロモデルを示す。他の屈折点の変形は、これを変更して用いる。モデルは上・下梁、圧縮ストラット、および両側柱で構成され、縦横補強筋は考慮されない。各材とも塑性関節で結合される。構成部材は次の状態にある。



(a) 屈折点③



(b) 屈折点④

図-3 変形解析のマクロモデル

- 1) 上・下梁は剛体である。
- 2) 圧縮側柱は剛体である。
- 3) 引張側柱は下端のみ引張降伏しており、他の部分は剛体である。
- 4) 圧縮ストラット①は有効な圧縮ストラット（陰影部）のうちで最大歪の状態にあり、45°の傾斜角をもつ。その歪は、スリップ破壊時の終局歪の状態にある。圧縮ストラット②は、強度解析のためのモデルで設定された圧縮ストラット③と④の境界を表す部材で45°の傾斜角をもち剛体である。屈折点③の場合、圧縮ストラット①は図-3(a)の位置にあり、屈折点④の場合、図-3(b)の位置にある。この場合、圧縮ストラット①の左上空白部のストラットは破壊している。両図ともストラット①と②の中間のストラット、および左上隅角部のストラットはある歪状態であるが、屈折点③、④の算定には関係しない。これは、上・下梁と圧縮側柱を剛体としたため、圧縮ストラット①の変形を規定することで、モデルの変形は一意的に決定されるからである。

4. 屈折点の算定

屈折点①を表すため、座標 (R_i, Q_i) を用いる。ここで、 R_i は①点の層間変形角、 Q_i は①点のせん断力である。頁数の関係で、算定の基本的考え方と結果だけを記す。

(1) 屈折点① 屈折点①は原点であるから、

$$Q_1 = 0 \quad (7)$$

$$R_1 = 0 \quad (8)$$

(2) 屈折点② Q_2 は、圧縮ストラットの全域が有効でその応力が一様分布であるとして、引張側柱が引張降伏するときの圧縮ストラットの応力の水平成分 S_2 を用いて求める。 S_2 は圧縮側柱下端のモーメントのつりあいから次のようになる(図-4)。

$$S_2 = \frac{-\eta \cdot Q_{lb} + N/2 + M_{lb}/l + N_y}{(1/2 + \eta) \cdot l} \quad (S_2 \leq S_c) \quad (9)$$

$$Q_2 = Q_{lb} + S_2 \cdot l \quad (10)$$

R_2 は次の考え方で算定する。側柱の曲げ強度を変えないまま、引張強度を増大させると、耐震壁の $Q - R$ 曲線は図-5 のように②の延長上②' でせん断破壊モードで終る。 Q_2' 、 R_2' は後述の

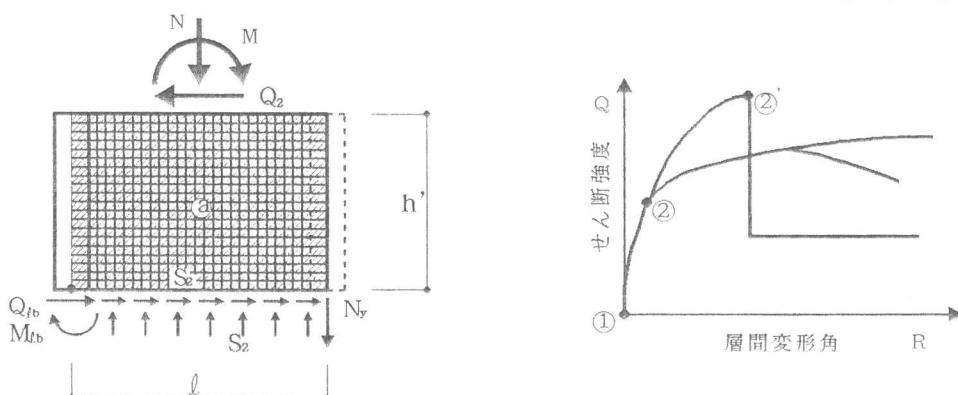


図-4 強度解析のマクロモデル—屈折点②

図-5 せん断破壊モードと
曲げ破壊モードの分岐点

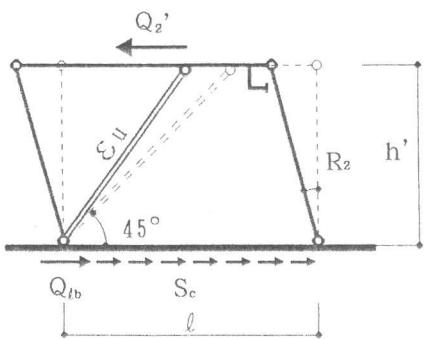


図-6 変形解析マクロモデルー屈折点②'

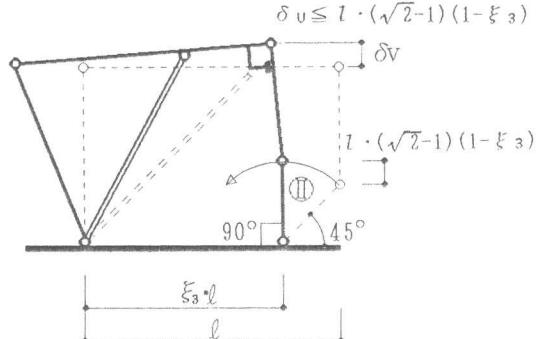


図-7 圧縮ストラット⑪の拘束

式(12)、(13)で求められる。 R_2 は、①と②'を結ぶ曲線を2次曲線 ($Q = Q_{2'} \cdot (2\alpha - \alpha^2)$: ここで、 $\alpha = R / R_{2'}$) で表し、 $Q = Q_2$ との交点として、次のように算定される。

$$R_2 = (1 - \sqrt{1 - Q_2 / Q_{2'}}) \cdot R_{2'} \quad (11)$$

屈折点②'の $Q_{2'}$ は式(10)で $S_2 = S_c$ として算定できる。 $R_{2'}$ は 45° に傾斜した圧縮ストラットの場合、終局歪 ε_u の2倍となる(図-6)。

$$Q_{2'} = Q_{tb} + S_c \cdot l \quad (12)$$

$$R_{2'} = 2\varepsilon_u \quad (13)$$

(3) 屈折点③ Q_3 はすでに簡略化最大強度式[5]として与えられている。ここでは式(9)と同様に、式(1)の Q_{tb} を式(17)に代入して解の精度をたかめている。 R_3 は、図-3(a)で微小変位の仮定、および引張側柱上端の角度が鋭角にならないとする条件から算定される。

$$Q_3 = Q_{tb} + S_c \cdot \xi_3 \cdot l \quad (14)$$

$$R_3 = \frac{2\varepsilon_u \cdot (1 + \xi_3 \cdot \kappa)}{\xi_3 \cdot \kappa} \quad (15)$$

式(15)は上記角度が 90° の場合で、このとき R_3 は最大値になる。ここで、

$$\xi_3 = -\eta + \sqrt{\eta^2 + 2\chi} \quad (0 \leq \xi_3 \leq 1) \quad (16)$$

$$\chi = \frac{S_v}{2S_c} + \frac{-\eta \cdot Q_{tb} + N/2 + M_{tb} \cdot l + N_y}{S_c \cdot l} \quad (17)$$

ただし、図-7に示すように、圧縮ストラット⑪の拘束により次の制限をうける。

$$R_3 \leq 2\varepsilon_u + (\sqrt{2}-1)(1-\xi_3) \quad (18)$$

(4) 屈折点④ 屈折点④は、力のつりあいを満す ξ_4 と ξ_4' の組合せをいろいろ変化させ、図-7の圧縮ストラット⑪の拘束を考慮したとき、層間変形角の増分が負に転じる点として与えられる。

$$Q_4 = Q_{4b} + S_c \cdot (\xi_4 - \xi_4') \cdot l \quad (19)$$

$$R_4 = \frac{2\mathcal{E}u}{1 - \frac{1 + \xi_4' \cdot \kappa}{1 + \xi_4 \cdot \kappa}} \quad (R_4 \geq R_3) \quad (20)$$

ここで、

$$\xi_4' = \xi_4 - \chi' / (1 - \xi_4) \quad (0 \leq \xi_4' \leq 1) \quad (21)$$

$$\xi_4 = \frac{\chi'' + \sqrt{\chi'^2 - (\chi + \chi')(\chi'^2/2 + \chi - \chi' \cdot \eta)}}{\chi' + \chi} \quad (0 \leq \xi_4 \leq 1) \quad (22)$$

$$\chi'' = \chi + \chi' \cdot (1 - \eta) / 2 \quad (23)$$

$$\chi' = 2\mathcal{E}u \cdot (\sqrt{2} + 1) / \kappa \quad (24)$$

(5) 屈折点⑤ 屈折点⑤から以降は、 Q_5 を一定とした水平線とする。 Q_5 は側柱の曲げ強度から式(25)で与えられる。ただし、簡単のため両側柱上下端の曲げ強度は等しいとし、その軸力は $N/2$ とする。

$$Q_5 = 2Mu(N/2)/h' \quad (25)$$

5. 解析例

図-8は、4. の屈折点の算定方法を用いたスケルトンカーブの解析例である。解析の用いた試験体[6]は、強剛な上・下梁とせん断破壊しないよう補強された側柱をもち、水平加力をうけ、すべて、壁板のスリップ破壊で終ったものである。これらのうち、特に最大強度を精度よく捉えているもの6体を選んだ。解析にあたって、材料強度には実験結果の値を用いているが圧縮ストラットの終局歪は $\mathcal{E}u = 0.002$ とした。試験体はすべて曲げ破壊モードのものであり、解析結果は修正の余地は多々あるが、大要、実験結果と適合している。

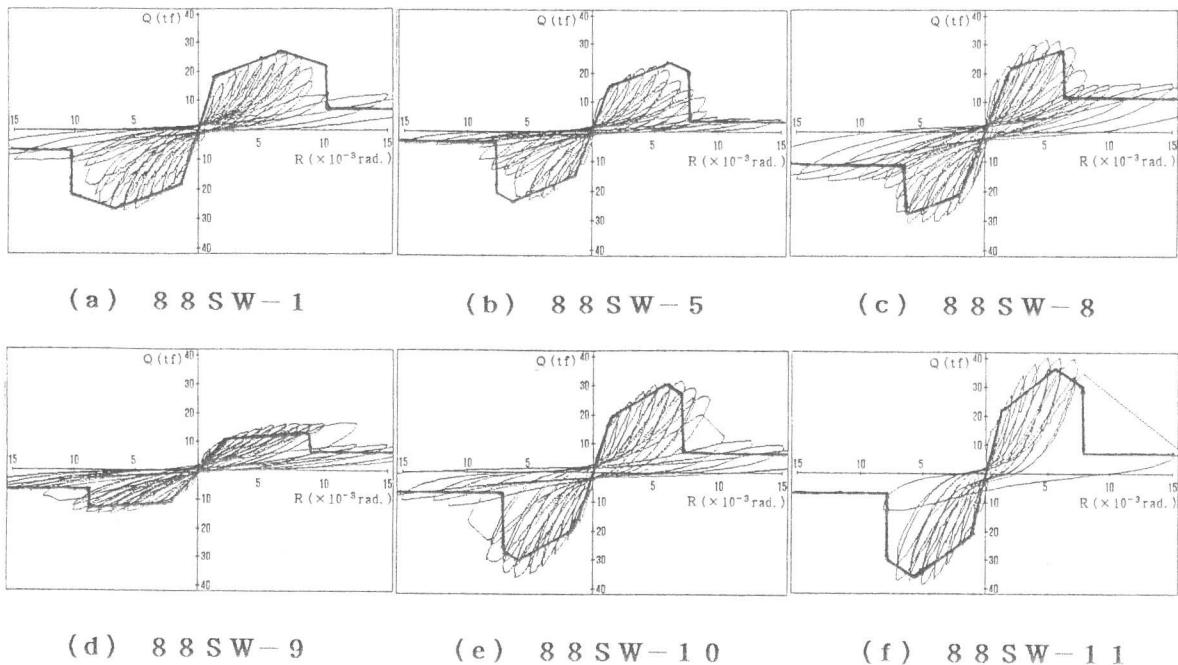


図-8 スケルトンカーブの解析例

6. 結び

本研究は、強度解析および変形解析のための2つの簡略化したマクロモデルを用いて、連層耐震壁を模した単独耐震壁のスケルトンカーブの解析方法を提案し、その解析例を示した。その解析結果は、大要、実験結果と適合したものであったが、圧縮ストラットの終局歪の選択、側柱の変形考慮などに検討の余地がある。特に、側柱断面の小さい場合、壁補強筋量の少ない場合は修正される必要がある。

記号

a_g : 側柱全主筋断面積	b : 側柱の幅
D : 側柱のせい	σ_B : コンクリートの圧縮強度
h' : 壁板の内法高さ	l : 側柱の中心間距離
N : 耐震壁に作用する鉛直力	N_{tb} : 圧縮側柱下端の軸力
N_y : 側柱の引張降伏強度 = $a_g \cdot g \cdot \sigma_y$	M : 壁板上端に作用するモーメント
M_{tb} : 圧縮側柱下端の曲げモーメント	M_u : 柱の曲げ強度[7]
p_s : 壁補強筋比	Q : 耐震壁に作用するせん断力
Q_{tb} : 圧縮側柱下端のせん断力	R : 層間変形角
r : 反曲点高さ比 = $M / (Q \cdot h')$	S_t : = $S_c - S_h$
S_c : 壁板下端の降伏時の水平応力	S_h : = $\min(S_c, p_s \cdot s \cdot \sigma_y \cdot t)$
= $0.63 \sigma_B \cdot t / 2$	S_v : = $p_s \cdot s \cdot \sigma_y \cdot t$
t : 壁厚	ε_u : 圧縮ストラットの終局歪
κ : 辺長比 = l / h'	ξ : 圧縮ストラットの有効幅係数
ξ : 有効な圧縮ストラットのうち終局歪に達した幅を表す係数	$s \sigma_y$: 壁補強筋の降伏強度
	$g \sigma_y$: 側柱主筋の降伏強度

参考文献

- 1) 白石一郎・狩野芳一：鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性に関する考察、J C I コロキウム「R C 構造のせん断設計法に関する解析的研究」論文集、pp. 171-178、1989. 10
- 2) 白石一郎・狩野芳一：せん断破壊するR C 造耐震壁の終局時の耐力と変形、日本建築学会学術講演梗概集、C、構造Ⅱ、pp. 593-594、1990. 10
- 3) 井上範夫・鈴木紀雄：線材モデルによるR C 耐震壁の荷重-変形関係解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11、No. 2、pp. 555-560、1989
- 4) 鈴木紀雄：マクロモデルを利用した鉄筋コンクリート造耐震壁の韌性評価、日本建築学会学術講演梗概集、C、構造Ⅱ、pp. 597-598、1990. 10
- 5) 望月 淳・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
- 6) 小野里憲一・望月 淳：連層耐震壁の最大強度におよぼす側柱の強度と壁板の辺長比の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、C、構造Ⅱ、pp. 625-626、1989. 10
- 7) 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)、pp. 396-397、1990. 10