

[104] RBSM 法による鉄筋コンクリート壁の非線形解析

正会員 ○毛井崇博 (竹中工務店 技術研究所)  
 正会員 上田眞稔 (竹中工務店 技術研究所)  
 川井忠彦 (東京大学生産技術研究所)

1. まえがき

従来の連続体力学をベースとした有限要素解析とは異なり、川井によって提案された剛体・バネモデル (Rigid Body-Spring Model) は、要素自体を剛体であると仮定し、要素同志は各要素辺上に分布した法線と接線のバネで結ばれ、このバネに表面力によるエネルギーが集中して蓄えられているとして評価される離散化極限解析法である<sup>1)</sup>。このモデルは有限要素法が不得手とする要素間のすべりや分離を簡単に取扱うことができ、崩壊パターンや断面応力分布を容易にとらえることができる。

RBSM法がせん断スパン比 ( $M/QD$ ) 1.0の柱型のない鉄筋コンクリート壁の非線形解析にも、充分適用できることを確認している<sup>2)</sup>。

本報告では、引き続き  $M/QD = 0.62$  の壁を本手法により解析し、ひび割れ角度を考慮した要素分割法の違いによる断面応力、最大せん断強度、変形状等の違いについて検討すると共に、実験結果と比較した。

2. 解析方法および材料のモデル化

解析方法および材料のモデル化は、 $M/QD = 1$  の鉄筋コンクリート壁の非線形解析の報告<sup>2)</sup> とほぼ同じである。即ち、鉄筋コンクリート板厚方向にコンクリートおよび鉄筋の異方性板を層状にモデル化し、コンクリートの降伏破壊面として、引張・圧縮降伏面にモール・クーロンの破壊面を付け加えた本モデル独自の降伏条件より定義している。

2.1 コンクリートの応力とひずみ特性

コンクリートの応力とひずみ曲線を図-2に示す圧縮1次降伏  $F_{c1} = 0.5 F_c$ 、圧縮2次降伏  $F_{c2} = 0.95 F_c$ 、剛性低下率  $\beta = 0.5$ 、限界圧縮ひずみ  $\epsilon_{cu} = 0.3\%$  とした。また、テンション・ステフネス効果を考慮して、ひび割れ発生ひずみ  $\epsilon_{cr}$  の10倍まで、軸ひずみ単調減少関数としている。

2.2 コンクリートのひび割れ面のせん断特性

せん断剛性低下率は、Cedolin式に従うものとし、ひび割れ面と直交方向の平均ひずみの減少関数とする。図-3に、せん断剛性低下率を示す。

2.3 コンクリートのせん断すべり

コンクリートのせん断すべりに対する降伏条件として、モール・クーロン式を採用した。せん断すべり面では完全弾塑性の流れ則を用いた。

$$f^2 = \tau^2 - (C - \sigma_n \tan \phi)^2 \quad (1)$$

但し、  $C = 0.138 F_c$        $\phi = 37^\circ$

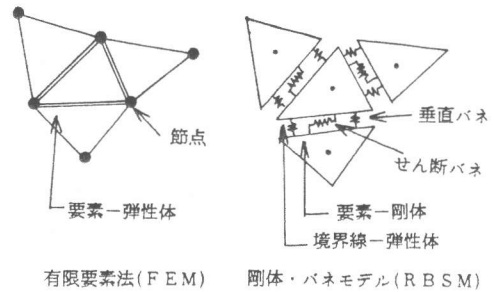


図-1 FEMモデルとRBSMモデル

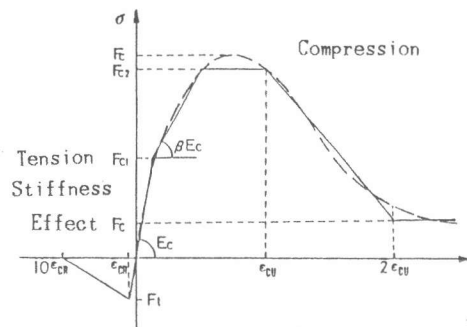


図-2 コンクリートの応力とひずみ関係

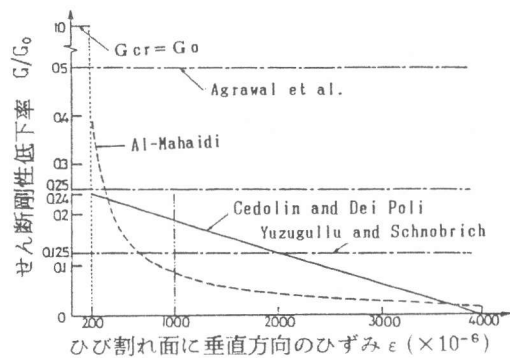
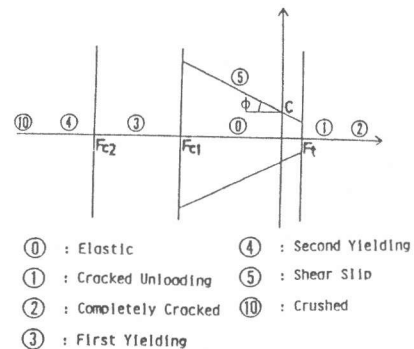


図-3 せん断剛性低下率



- ① : Elastic
- ② : Cracked Unloading
- ③ : First Yielding
- ④ : Second Yielding
- ⑤ : Shear Slip
- ⑩ : Crushed

図-4 降伏破壊曲面

## 2.4 コンクリートの破壊曲面

剛体・バネモデルにおける降伏破壊曲面を各応力状態の特性より、図-4に示す7つの領域に分け各状態コードを設定した。状態⑤のせん断すべりが生じた後、要素境界面のせん断ひずみが一定値  $\gamma_u$  に達した時、コンクリートがせん断破壊するとし、境界面のバネ剛性は、全て零とした。また、限界せん断ひずみ  $\gamma_u$  は、圧縮限界ひずみ  $\epsilon_{cu}$  の2倍とした。

## 2.5 鉄筋の応力とひずみ関係

鉄筋の応力とひずみ関係は、軸方向応力およびダボ効果のせん断応力いずれの場合も完全弾塑性としひずみ効果は無視した。軸方向応力は降伏値  $f_y$  に達すると降伏するものとした。

鉄筋のダボ作用によるせん断応力  $\tau$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係は次式で算定した<sup>2)</sup>。

$$\tau = \beta \cdot E \cdot \gamma \quad \text{----- (2)}$$

但し、  $\beta = 0.005$

$E$ : 鉄筋のヤング係数

せん断応力は鉄筋の軸方向応力が降伏またはひび割れ面のせん断ひずみが限界値  $\gamma_u$  に達すると降伏すると仮定し、軸応力とせん断応力のカップリングは無視した。

## 3. 解析対象とした試験体

解析の対象とした試験体は、多数の小開口を持つ耐震壁の強度と変形を調べる一連の実験の中で、比較のために行った無開口耐震壁、試験体名 M-4 である<sup>3)</sup>。

試験体の断面形状および配筋を図-6に示す。水平加力は、2台のジャッキにより、加力ばり両端の押し引きにより半分づつ載荷し、多数回繰り返し実験を行っている。最終破壊は、壁板脚部でのすべり破壊である。

## 4. 数値計算結果

### 4.1 解析モデル

極限解析法としてのRBSM法の特徴を利用するために、4種類の要素分割法によって鉄筋コンクリート壁を解析し、それぞれの崩壊パターン、耐力等を調べた。

ひび割れ角度を  $45^\circ$  とし、そのひび割れにそって最終崩壊メカニズムに達すると考えた時の分割法“M4-45”、ひび割れ状況に無関係に引張柱頭部から圧縮柱脚部にかけて対角に破壊ラインが形成されると考えた時の分割法“M4-D”(ひび割れ角度  $27.5^\circ$ )、実験で得られたひび割れ角度約  $38\sim 41^\circ$  に近似させた分割法“M4-40”(  $38.4^\circ$  )および、それらの中間の角度を持たせた“M4-30”(  $29.5^\circ$  )の4種類である。

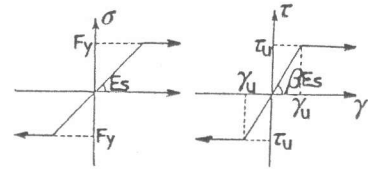
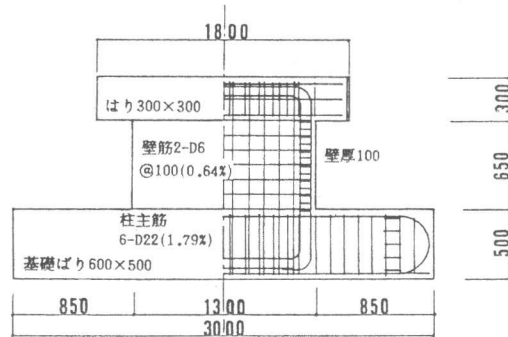


図-5 鉄筋の応力とひずみ関係



$F_c = 299 \text{ kg/cm}^2$       壁筋  $f_y = 3560 \text{ kg/cm}^2$   
柱主筋  $f_y = 3850 \text{ kg/cm}^2$

図-6 試験体断面性状

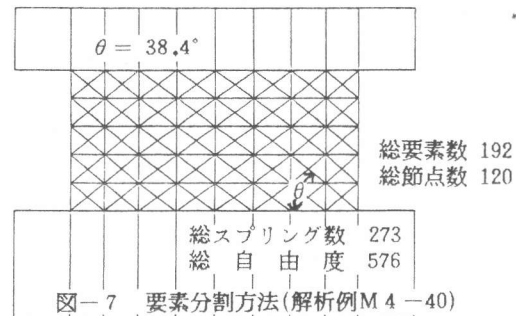


図-7 要素分割方法(解析例M4-40)

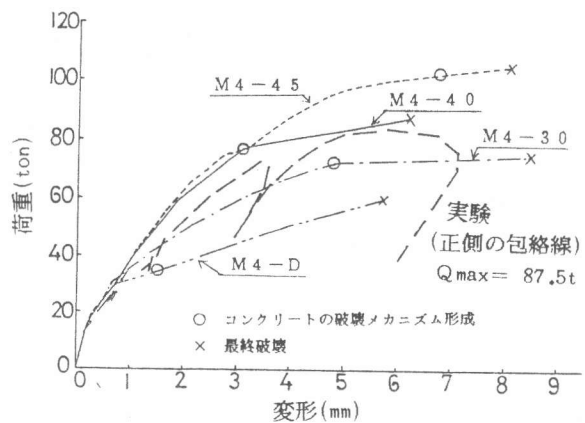


図-8 荷重-変形曲線

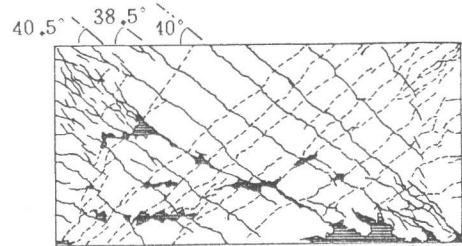


図-9 最終破壊状況(実験)

M4-40 の要素分割法を図-7に示す(M4-45、M4-30、M4-Dは図-15~図-17参照)。

#### 4.2 実験と解析の比較

図-8に実験および解析で得られた荷重-変形曲線を示す。実験で得られたひび割れ角度に最も近い要素分割法であるM4-40が、やはり、最大強度および荷重-変形曲線共に最も良い近似を示している。初めに解析例M4-40について実験結果と比較検討し、次節で4種類の分割法による結果の違いについて述べる。

実験で得られた最終破壊状況を図-9に示す。解析例M4-40の最大強度近傍の破壊モード、変形モードを図-10と図-11に示す。また、コンクリートのせん断応力分布と斜め対角方向の圧縮応力を図-12と図-13に示す。

図-10、11より、引張柱頭部および圧縮柱脚部より伸びたひび割れ間(区間S)のコンクリートが限界せん断ひずみ  $\gamma_u$  に達してせん断破壊し、実験と同様にすべり破壊していることが良く分かる。このように、区間S内のコンクリートがすべてせん断破壊した時をコンクリートの破壊メカニズム形成時と呼ぶ。

実験では壁の脚部ですべり破壊しているのに対し、解析では壁の上部ですべり破壊している。コンクリートの応力分布からわかるように、区間S内のせん断応力と圧縮応力は壁の高さ位置にかかわらずほぼ等しいので、どの位置ですべり破壊してもおかしくはない。実験では、正負繰り返し载荷しているために、負側のひび割れのために脚部ですべったものと思われる。

破壊ライン上のコンクリートと鉄筋の応力状態を示したのが図-14である。壁横筋は全て降伏しているのに対し、縦筋は区間S内で降伏し、他の縦筋や柱筋は弾性範囲に止まっている。

破壊ライン上での水平方向の力の釣り合いをたてると以下のようなになる。

$$Q_{max} = cQ_s + cQ_c + sQ_w + sQ_d \quad (3)$$

但し、 $cQ_s$  ; 区間S内でコンクリートが負担するせん断力

$cQ_c$  ; 圧縮柱のコンクリートが負担するせん断力

$sQ_w$  ; 壁横筋が負担するせん断力  
( $= p_s \cdot \sigma_y \cdot t \cdot h'$ )

$sQ_d$  ; 柱主筋、壁縦筋のダボ作用による負担せん断力

最大せん断強度時には、 $cQ_s$ は約54.5t(平均せん断応力約110 kg/cm<sup>2</sup> =  $6.5\sqrt{F_c}$ 、壁全断面積比で $2.53\sqrt{F_c}$ )  
 $cQ_c$ は約3t、 $sQ_w$ は16tであり、残りの大部分は圧縮柱主筋による $sQ_d$ であった。この時の $sQ_d$ は全荷重の約16%である。

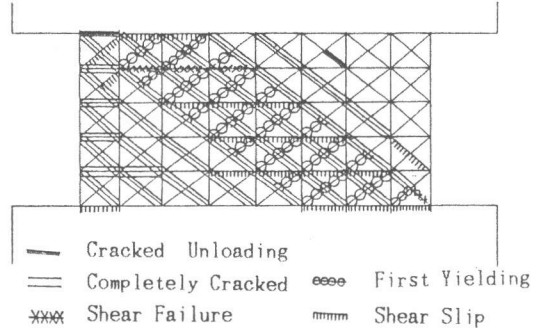


図-10 最終破壊状況(解析例M4-40)

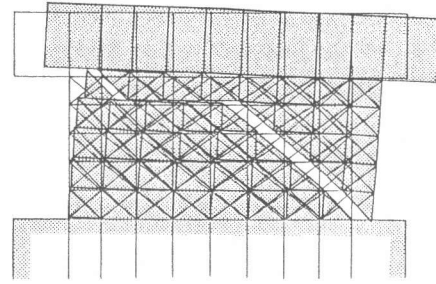


図-11 最終変形モード(解析例M4-40)

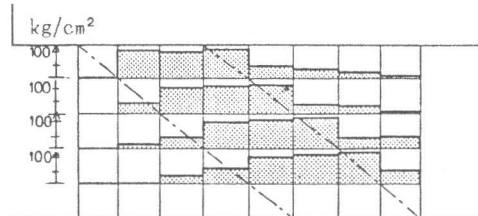


図-12 コンクリートのせん断応力分布(解析例M4-40)

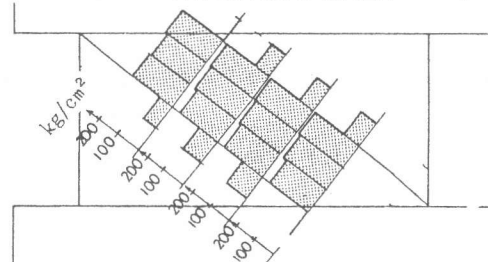


図-13 斜め対角方向のコンクリートの圧縮応力(解析例M4-40)

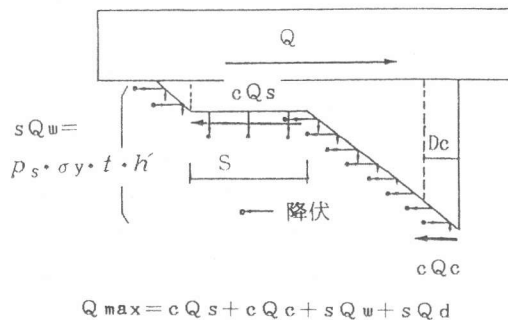


図-14 破壊ライン上の鉄筋の応力状態と水平方向の力の釣り合い

### 4.3 解析結果の検討

解析例M4-45、M4-30、M4-Dのコンクリートの破壊メカニズム形成時の破壊モードを図-15～図-17に示す。また、その時のコンクリートと鉄筋の負担せん断力を表-1に示す。コンクリートの破壊メカニズム形成後は、コンクリートの負担せん断力の増分は無く、鉄筋のダボ作用による負担せん断力の増分のみである。特に、解析例M4-Dのような対角線の破壊ラインでは、コンクリート破壊メカニズム形成時には $sQ_d$ は約7t(全荷重比20%)であるが、柱断面積比で15.5%と大きな鉄筋比のために、最大せん断強度時には約32t(53%)程にもなっている(図-8参照)。

区間Sが増加するにつれて、 $cQ_s$ は増加し $cQ_c$ は減少する。 $cQ_c$ は耐力に及ばず影響は比較的小さいので $cQ_c$ を $cQ_s$ に含めて、区間Sで平均したせん断応力 $c\tau = (cQ_s + cQ_c) / t \cdot s$ を求めると約 $7.0 \sqrt{F_c}$ (120 kg/cm<sup>2</sup>)である。

また、本解析例M4-40では50tの時、破壊ライン上の区間Sで、モール・クーロンの降伏条件に達し、青山・細川他の直接せん断抵抗実験<sup>4)</sup>で観察されているように、圧縮ひずみが減少に転じ、その後、引張ひずみとなるダイラタンシー効果が生じた。

### 5. まとめ

鉄筋コンクリート壁の最大せん断強度は、ひび割れ角度によって支配され、ひび割れ角度を無視した極限解析は最大強度を過小、又は過大評価する。

適切なひび割れ角度を設定することにより、せん断スパン比の短い壁も最大強度のみならず荷重-変形曲線や断面応力状態を本手法により推定できることがわかった。

### 謝辞

本解析対象とした試験体は、大成建設・技術研究所で行われたものである。貴重な実験データの提供に深く感謝します。

### 参考文献

- 1) Kawai T. "New Element Models In Discrete Structure Analysis" 日本造船学会論文集 第141号 1977年
- 2) 上田・毛井・川井 "離散化極限解析法による鉄筋コンクリート構造物の非線形解析" 1984年12月 RC構造の有限要素法に関するコロキウム
- 3) 吉崎・外村・江崎・是永 "多数の小開口を持つ鉄筋コンクリート耐震壁の強度と変形 その2 開口配置と寸法の影響" 日本建築学会大会、昭和56年9月
- 4) 塩原・中村・細川・青山 "鉄筋コンクリート骨組壁板境界面の直接せん断抵抗機構(その2 直接せん断抵抗機構の考察)" 日本建築学会 関東支部研究報告集 昭和59年度

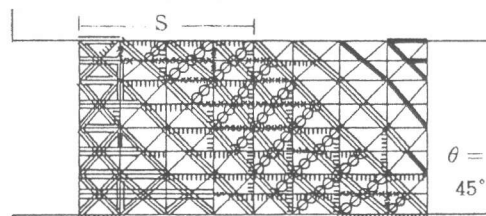


図-15 最終破壊状況(解析例M4-45)

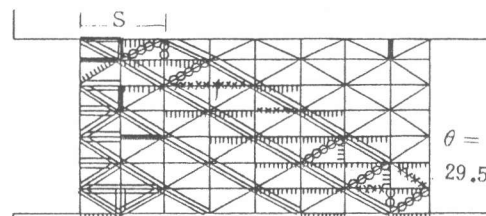


図-16 最終破壊状況(解析例M4-30)

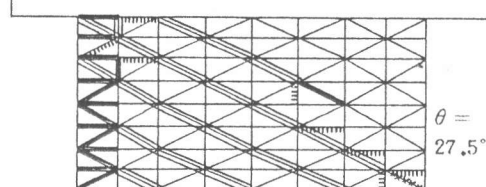


図-17 最終破壊状況(解析例M4-D)

表-1 コンクリート破壊メカニズム発生時の負担せん断力

解析例	M4-45	M4-40	M4-30	M4-D
$cQ_s(t)$	81.9	54.5	31.8	—
$[c\tau_s(kg/cm^2)]$	[128]	[109]	[94]	—
$[\sigma_n(kg/cm^2)]$	[112]	[90]	[71]	—
$cQ_c(t)$	0.0	3.2	7.6	11.8
$[c\tau_c(kg/cm^2)]$	[0]	[21]	[51]	[79]
$sQ_w(t)$	16.0	16.0	13.7	16.0
$sQ_d(t)$	4.6	3.8	19.4	7.2
$\Sigma Q$	102.5	77.5	72.5	35.0
$[c\tau]$	[126]	[115]	[118]	—
$Q_{max}$	105.0	87.5	75.0	60.0

- ※1  $c\tau_s = cQ_s / t \cdot s$     ※2  $c\tau_c = cQ_c / t \cdot D_c$
  - ※3  $\sigma_n$  ; 区間Sに作用する鉛直方向応力
  - ※4  $\Sigma Q = cQ_s + cQ_c + sQ_w + sQ_d$  ; コンクリート破壊メカニズム発生時のせん断力
  - ※5  $c\tau = (cQ_s + cQ_c) / t \cdot s$
  - ※6  $Q_{max}$  ; 最大せん断強度(解析)
- なお、実験での  $Q_{max} = 87.5t$