

論文

[2061] RBMSM 法による鉄筋コンクリート構造物の極限解析

正会員 ○上田 真稔 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 毛井 崇博 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 谷口 元 (竹中工務店技術研究所)

1. まえがき

川井により提案された剛体ばねモデル (RBMSM) 法は構造物の極限状態を想定し、その本質はすべりおよび引張破壊であるとして開発された物理モデルである。このモデルは要素を分布した法線と接線のばねで結び、そのばねに集中化されたエネルギーを評価することによって、ひび割れやすべり等の不連続性の概念を取り入れている。(図-1) このRBMSM法は、上界定理に立脚した離散化極限解析法であり、既に地盤の破壊・耐力評価について有効な解析方法であることが報告されている¹⁾。一方、著者らは鉄筋コンクリートの分野においても適切な要素分割を行うことによって鉄筋コンクリート壁やディープビーム等について、耐力のみならず変形状についても良好な結果を得ることができることを示している^{2),3)}。

本稿では、最初に上下界定理に基づく理論解が得られているコンクリート割裂試験について解析し、RBMSM法の解析手法の妥当性を述べる。次に、鉄筋コンクリート壁について、簡単な要素分割法(極限モデル)を用い鉄筋比の大小、軸力の有無およびコンクリートのテンションスティフニングの有無によって、上界定理に基づくRBMSM法による極限解析法としての最適な破壊メカニズムの形成と実用的な耐力の推定法について述べる。

2. 鉄筋コンクリートの破壊条件

RBMSMによる鉄筋コンクリート要素はコンクリート層とある方向に配筋された鉄筋を一層と考えた多層の直交異方性板としてモデル化し、コンクリートの降伏破壊面として、引張・圧縮破壊面にモール・クーロンの降伏面を付け加えた独自の降伏条件より定義している(図-2)。コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を図-3および図-4に示す。ただし、本稿では極限解析と

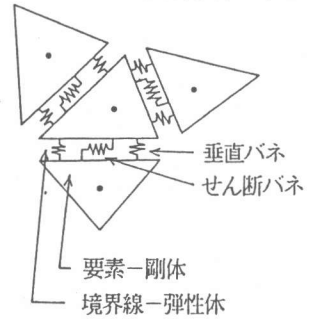


図-1 RBMSMの平面要素

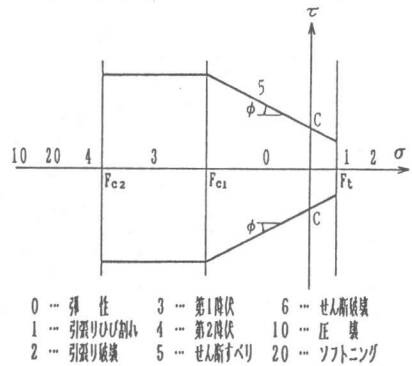


図-2 RBMSMでの降伏破壊曲面

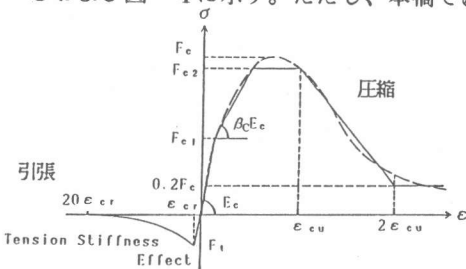


図-3 コンクリートの応力とひずみ関係

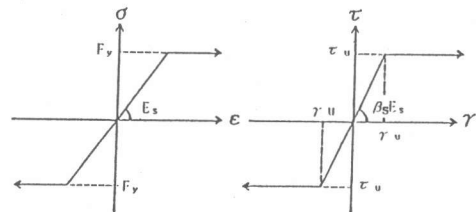


図-4 鉄筋の応力とひずみ関係

の比較のため圧縮一次降伏面 $Fc1$ を無限大としたモール・クーロンの条件に引張破壊面を考慮した降伏条件とする。また鉄筋のダボ作用は無視している。

3. 円柱割裂試験の解析

図-5に示すように円柱供試体を2枚の載荷板により上下方向に圧縮した時の極限解析の上界定理では、2つの剛なくさびとそれを結ぶ引張ひび割れとからなる破壊メカニズムを形成する。

$$Q = \frac{2l}{\cos(\beta + \phi)} \left[ca \frac{\cos \phi}{\sin \beta} + ft \sin(\beta + \phi) \left(\frac{d}{2} - \frac{a}{\cot \beta} \right) \right] \quad (1)$$

上界の解は $Fc/Ft=10$, $\phi=30^\circ$ に対して $\beta=16.1^\circ$ の時、最小値 $Q=1.83 l d Ft$ が得られている。図-6に示すRBSM法の基本分割で β の値を変化させ、変位制御による増分解析を行った。上界定理より引張強度 Ft を保持し、 $C=(1-\sin \phi)/2\cos \phi \cdot (10Ft)=2.887Ft$ とした解析結果を図-8に示す。また、破壊メカニズムの進展状況を図-7に示す。上界定理での最小値は理論解と一致し、また、くさびの先端よりひび割れが発生し、それと共にくさび部ですべりが生じて耐力に達する状況が実験事実と対応している⁴⁾。次に、載荷板の中を $1/48d \sim 1/12d$ に変化した場合の解析結果を図-9に示す。また、その時の β の値を耐力値と共に表-1に示す。当然の事ながら載荷板巾が大きくなる程、耐力は増加していることが伺える。

$\beta=16^\circ$ のモデルで、引張破壊後、応力を $8 \varepsilon_{cr}$ まで3次曲線で解放した解析を行った⁵⁾。結果はくさびの先端よりひび割れ発生後、応力解放により引張破壊面が先に形成され、それ以後に、くさび部ですべりが生じ、最大耐力に達した。耐力は $1.0882 l d Ft$ となり、(1)式の $Ft=0$ とした第一項のみの値となった。この値は、通常割裂試験で用いられている $\pi l d Ft/2$ の値の約7割の値を示した。

表-1 載荷板巾の変化による角度 β と耐力

解析ケース	載荷板巾 a	計算値 β	解析値 $Q/l d$ kg/cm ²	計算値 $Q/l d$ kg/cm ²
CASE-1	d/48	12.6°	1.3968	1.3969
CASE-2	d/32	14.6°	1.6204	1.6201
CASE-3	d/24	16.1°	1.8226	1.8226
CASE-4	d/16	18.3°	2.1935	2.1943
CASE-5	d/12	19.9°	2.5400	2.5412

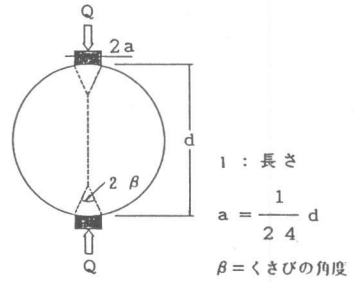


図-5 円柱供試体と破壊メカニズム

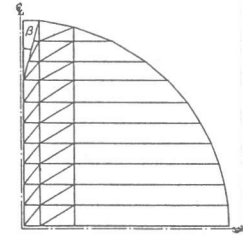


図-6 RBSMの基本分割

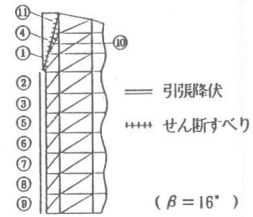


図-7 メカニズムの発生順序

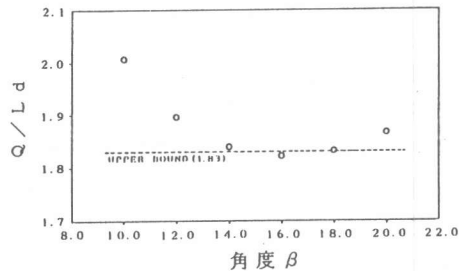


図-8 上界値の耐力と解析結果の比較

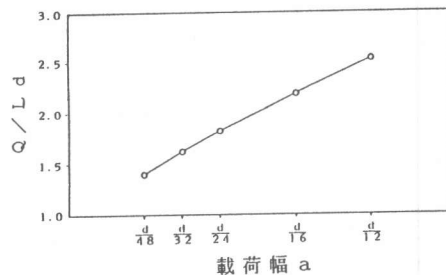


図-9 載荷板巾の変化による耐力の影響

4. 耐震壁の解析

鉄筋コンクリート構造物のように引張破壊が生じて応力解放を起す構造物では、耐力は破壊メカニズムすなわち、ひび割れ角度により支配され、ひび割れ角度を無視した極限解析は最大耐力を過少または過大評価することを著者らは報告した。³⁾ また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耐力のみならず、RBSM法で荷重-変形曲線や断面応力状態を評価しうることを示した。ここでは、いかに適切なひび割れ角度を設定するかについて考察する。

解析の対象とした試験体は文献³⁾と同様の吉崎、外村等が行った無開口耐震壁、試験体名M-4である⁶⁾(図-10)。

4-1. コンクリートのみの極限解析

極限解析の上界定理として、引張強度を保持したモール・クーロンの降伏条件を用いて、図-10に示す形状で、まずコンクリートのみでの耐力および破壊パターンを調べた。要素分割は図-11に示すように出来るだけ簡単なモデルを用いて、支配的ひび割れの角度を $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ まで 5° ピッチで解析した。ただし、支配的な破壊面でのひび割れおよびせん断すべりの判定を各モデルで等価にするため、図中・印で示すように等間隔で節点を設けた。ひび割れ角度の違いによる耐力の変化を図-12に示す。また、各モデルでの最終破壊パターンを図-13に示す。コンクリートのみでは、上界定理での最小値が上限値となり、 $\theta = 35^{\circ}$ で最善の解を示した。但し、その差は $\theta = 35^{\circ} \sim 50^{\circ}$ の範囲では8.6%程度で大きな差は生じなかった。図-14に $\theta = 35^{\circ}$ での変形図を示す。

せん断破壊のパターンが明確に現れている。

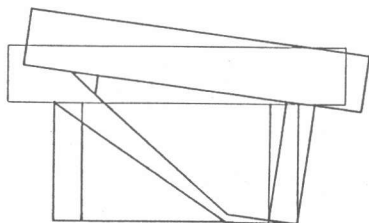


図-14 コンクリートのみの変形図 ($\theta = 35^{\circ}$)

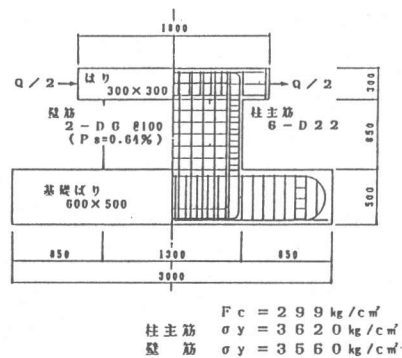


図-10 試験体断面性状

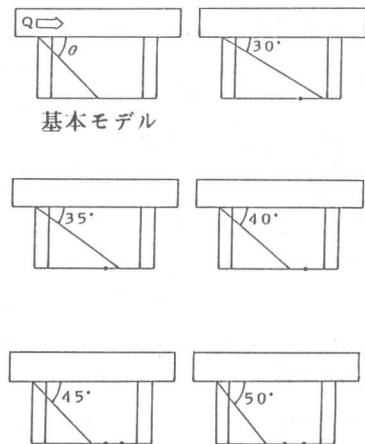


図-11 RBSMの要素分割(極限モデル)

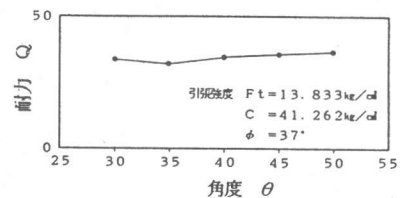


図-12 コンクリートのみ耐力

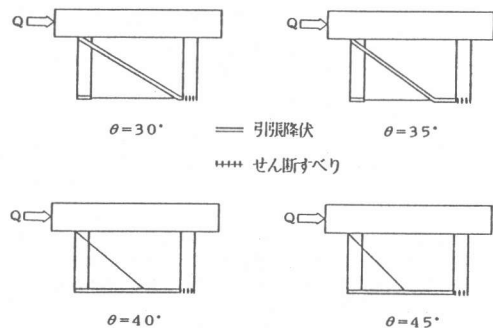


図-13 最終破壊パターン

4-2 鉄筋コンクリートの極限解析

図-10に示す鉄筋コンクリート試験体を、コンクリートのみの場合と同様に引張強度を保持して、図-11に示す要素分割で解析した。解析では、ひび割れ面の骨材のかみ合いによるせん断剛性および鉄筋のダボ効果は無視した。結果を図-15に実線で示す。最小値は無筋の場合と異なり、 $35^\circ \sim 40^\circ$ となり、変化も顕著である。図中、点線は同様の要素分割で、引張破壊後テンションスティフニング効果を考慮して応力解放を行った結果である。また、 Δ 印は参考文献3)で解析に比較的小さいメッシュ(標準モデル)の結果である。参考の為に実験値を一点鎖線で示した。図-16に $\theta = 40^\circ$ での引張強度の解放の有無による変形図を同一スケールで示す。本検討結果より、通常の鉄筋コンクリート解析で見られる引張強度を解放した解析では、極限解析の上界定理で言う最小値は存在しないことが伺える。また、引張強度を保持した極限解析では最小値が存在し、最善の上解値を得ることが判明した。次に、鉄筋比および軸力による最適なひび割れ角度の影響を調べるため、鉄筋比を2倍、また軸力を $\sigma_0 = 20,40 \text{ kg/cm}^2$ にした場合について同様な条件で解析した。結果を図-17に示す。鉄筋比および軸力の増加により、当然耐力は増加している。本解析は、角度が 5° ピッチのため、最小値を示す破壊メカニズムの明確な角度は得られないが、軸力の増加に従い、角度が増加する傾向が伺える。鉄筋比による影響は顕著ではなかった。

5. まとめ

極限解析の上界定理に基づくRBSM手法を鉄筋コンクリート耐震壁に応用し、コンクリートの降伏条件を、引張降伏を考慮したモール・クーロンの降伏面とし、引張破壊後もその強度を保持するとすれば、簡単な要素分割で、実験で得られるひび割れ角度に応じた破壊メカニズムラインと概略の耐力を据えうることを明らかにした。

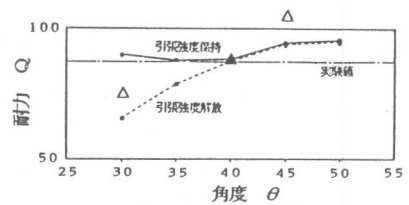
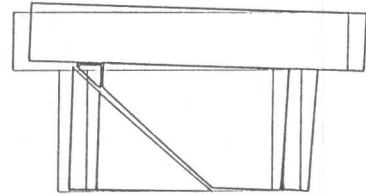
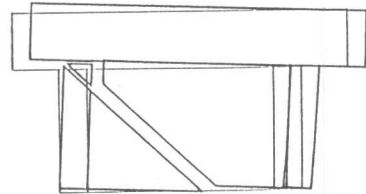


図-15 鉄筋コンクリート壁の耐力



引張強度保持



引張強度解放

図-16 $\theta = 40^\circ$ での変形図

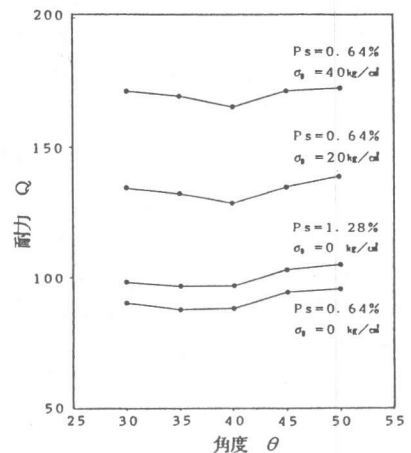


図-17 鉄筋比及び軸力の影響による耐力

謝辞

本研究にあたり、東京大学川井忠彦名誉教授、明星大学竹内則雄助教授に有効な御助言を戴きました、安部工業所の樋口晴紀氏にはプログラム開発に御協力戴いた。ここに深く感謝します。

参考文献

- 1)川井忠彦：離散化極限解析法に関する最近の話題、東大生研セミナーテキスト 1986.1.
- 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、JCI、RC構造の有限要素法に関するコロキウム、1984.
- 3)毛井、上田、川井：RBSMによる鉄筋コンクリート壁の非線形解析、JCI年次講演会 1985
- 4)町田：コンクリートの圧裂試験に関する基礎研究、土木学会論文報告集、1978.11.
- 5)D.A.Hordijk,J.G.Rots,H.W.Reinhardt:Finite Element Supported Fracture Testing of Concrete.IABSE Colloquium,1987.
- 6)吉崎、外村、江崎、是水：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、建築学会 大会、1981.9.