

論文

[2223] 鉄筋コンクリートせん断面降伏条件による鉄筋コンクリート造耐震壁の離散化極限解析

上原 修一*

1 はじめに

抵抗機構あるいは破壊機構の理解のための理論的な極限解析法とは別に、コンピュータの使用を前提とした極限解析法として、川井は、剛体ばねモデルを用いた離散化極限解析法を提案した[1][2]。さらに、上田らは、この剛体ばねモデルを使った、鉄筋コンクリート（以下RCと略する）部材の非線形解析についての研究を行い、強度のみならず変形性状もよくとらえることができると報告している[3][4]。この解析において、上田らは、実現象をできるだけ忠実に再現する目的から、コンクリートの破壊に伴う応力解放を導入するなど、複雑な解析アルゴリズムを提案している。また、コンクリートの引張強度を解放した解析では、極限解析の上界定理でいう最小値、つまり最良の上界の解が得られず、最良の上界解を得るためには、引張り強度を保持することが必要であることを明らかにしている[5]。つまり、本来上界の解を得ることができる[2]剛体ばねモデルによる解析法は、応力解放を導入した場合、もはや上界の解を得る極限解析法とは位置付けられないことになる。

さて、理論的な極限解析法がRC部材のせん断破壊解析に適用されている状況を考えた時、応力解放を考慮しない、本来の離散化極限解析法により、どの程度RC部材のせん断破壊挙動を追跡できるのかについて検討することは意義があると考えられる。例えば、このような簡潔な離散化極限解析法を確立すれば、RC構造物の設計において、有限要素法解析から得られる下界の解と対をなす上界の解、および破壊メカニズムを与える簡便な解析プログラムの開発への展開が考えられる。また、RC部材の破壊機構理解のための上界的マクロモデルの構築につながることも期待される。

このようなことを考慮し、本研究では、まずRC面部材におけるRC要素の接合面、つまりRCせん断面の降伏条件を、コンクリートと鉄筋を累加した形式でまとめ、さらにそれを近似曲線により簡略化する。次に、それを用いて、応力解放を考慮しない、本来の離散化極限解析法により耐震壁を解析し、簡略化した本手法の実験現象への追従性を検証する。

なお、文献[12]～[19]は本研究において全般的に参照した文献である。

2 RCせん断面降伏条件

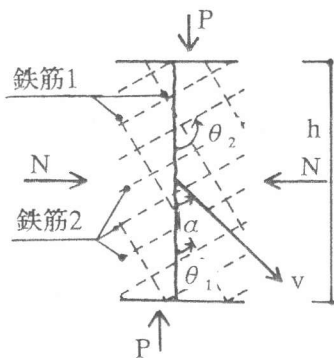


図-1 RCせん断面の破壊

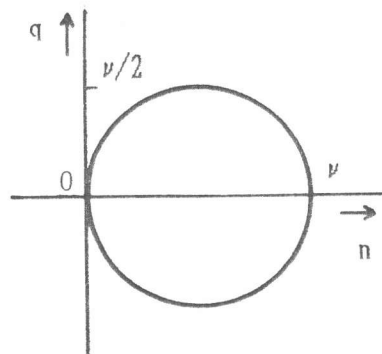


図-2 コンクリートの降伏条件

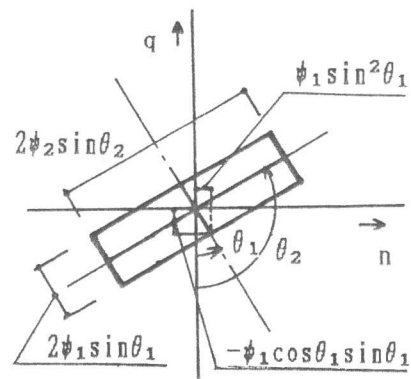


図-3 鉄筋の降伏条件

有明高専講師 建築学科、工修（正会員）

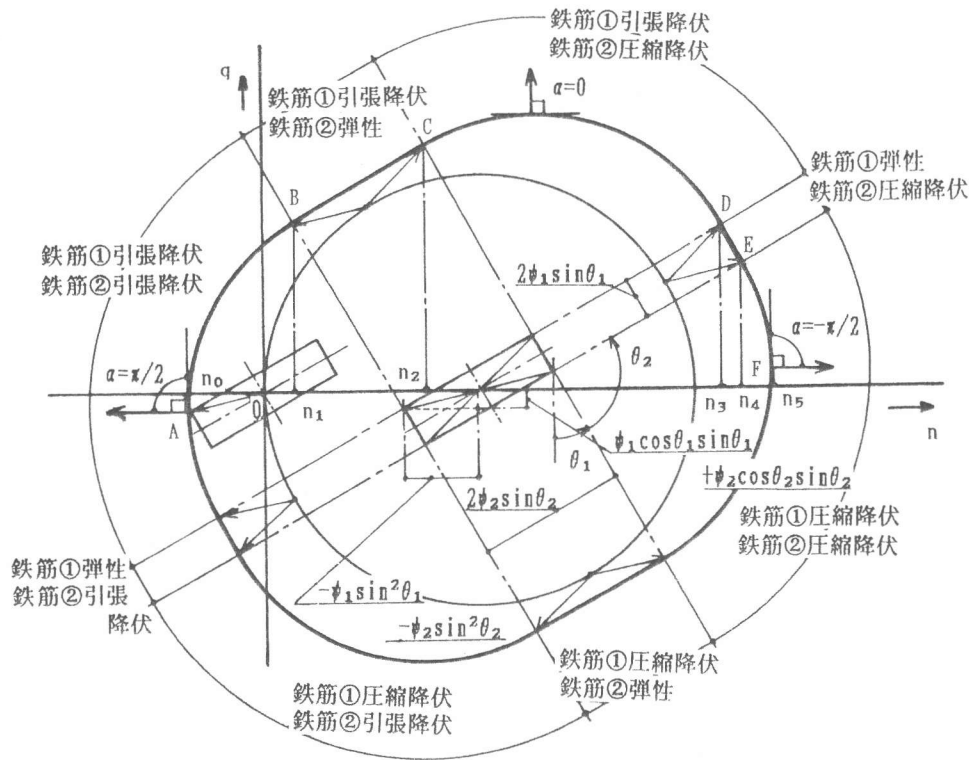


図-4 RCせん断面の降伏条件

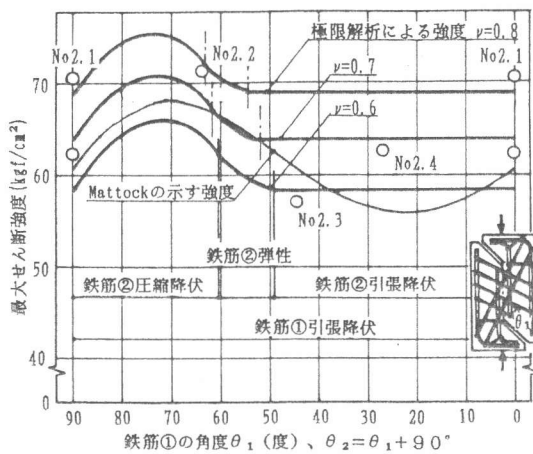


図-5 配筋方向と強度の関係 (等方配筋)

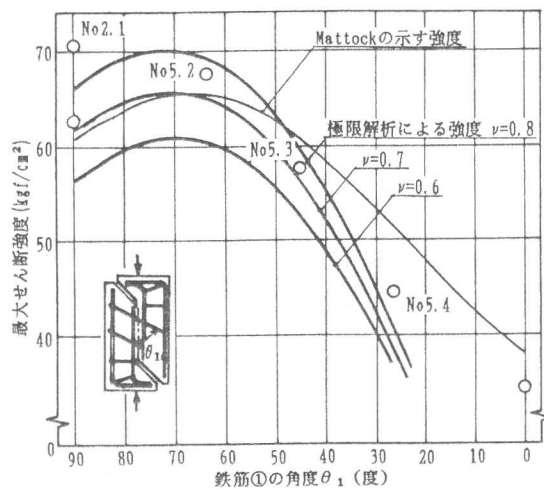


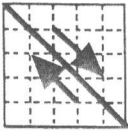

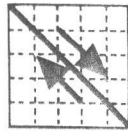
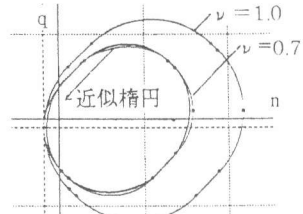
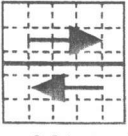
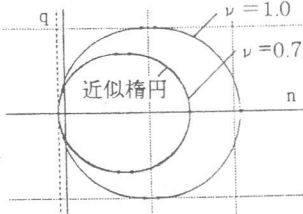
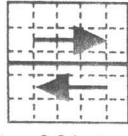
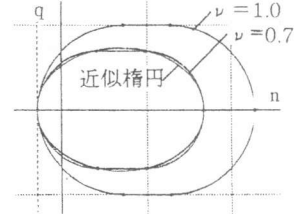
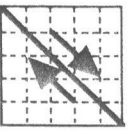
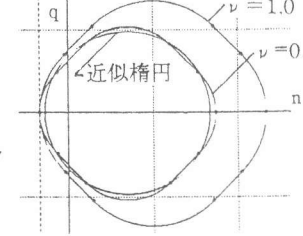
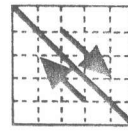
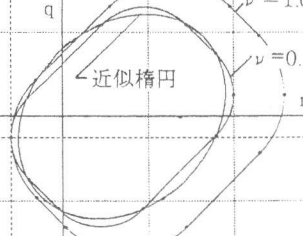
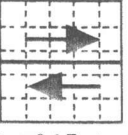
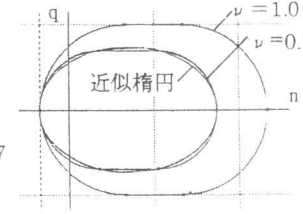
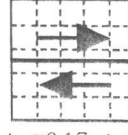
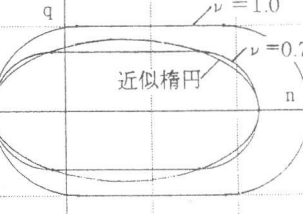
図-6 配筋方向と強度の関係 (一方向配筋)

2.1 RCせん断面降伏条件の誘導

コンクリートと鉄筋を累加して鉄筋コンクリート部材の降伏条件を導く方法は、すでにMarti[7]が提示している。ここでは、それをRCせん断面の降伏条件の誘導に適用する。まず、コンクリートの降伏条件を、引張強度を無視し、最も単純に図-2のように仮定する。鉄筋の降伏条件は、Dowel Actionを無視すると、直交配筋の場合、図-3のように示される。これらを累加すると、図-4のようなRCせん断面降伏条件を得る。この降伏条件は、上界定理による方法からも導かれ、正しい解であることが示される[8]。ここで、図中に示す記号は次のとおりである。

t:板の厚さ h:断面のせい ν:隣接要素の相対変位 α:せん断面に対するνの角度

表-1 せん断面降伏条件の楕円による近似度

	壁板	柱、はり		
一般的な配筋量の場合*	 $\psi_1=0.04 \quad \psi_2=0.04$ $\theta_1=45^\circ \quad \theta_2=135^\circ$	 $\nu=1.0$ $\nu=0.7$ n	 $\psi_1=0.04 \quad \psi_2=0.14$ $\theta_1=45^\circ \quad \theta_2=135^\circ$	 $\nu=1.0$ $\nu=0.7$ n
	 $\psi_1=0.04 \quad \psi_2=0.04$ $\theta_1=0^\circ \quad \theta_2=90^\circ$	 $\nu=1.0$ $\nu=0.7$ n	 $\psi_1=0.04 \quad \psi_2=0.14$ $\theta_1=0^\circ \quad \theta_2=90^\circ$	 $\nu=1.0$ $\nu=0.7$ n
** 高配筋の場合	 $\psi_1=0.17 \quad \psi_2=0.17$ $\theta_1=45^\circ \quad \theta_2=135^\circ$	 $\nu=1.0$ $\nu=0.7$ n	 $\psi_1=0.17 \quad \psi_2=0.43$ $\theta_1=45^\circ \quad \theta_2=135^\circ$	 $\nu=1.0$ $\nu=0.7$ n
	 $\psi_1=0.17 \quad \psi_2=0.17$ $\theta_1=0^\circ \quad \theta_2=90^\circ$	 $\nu=1.0$ $\nu=0.7$ n	 $\psi_1=0.17 \quad \psi_2=0.43$ $\theta_1=0^\circ \quad \theta_2=90^\circ$	 $\nu=1.0$ $\nu=0.7$ n

* 壁の場合、壁板の直交する各方向のせん断補強筋比 $p_s=0.3\%$ 、柱、はりの場合あばら筋比または帯筋比 $p_w=0.3\%$ 、主筋全断面積のコンクリート全断面積に対する比 $p_g=1.0\%$ を想定。ここで、 $\sigma_B=210\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $f_{y1}=f_{y2}=3000\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $\nu=0.7$ とした。次の高配筋の場合も同じ。

** 壁の場合、 $p_s=1.2\%$ 、柱、はりの場合 $p_w=1.2\%$ 、 $p_g=3.0\%$ を想定。

σ_B : コンクリートの圧縮強度 A_{s1} : 鉄筋1の断面積 f_{y1} : 鉄筋1の降伏点 θ_1 : せん断面に対する鉄筋1の角度 A_{s2} : 鉄筋2の断面積 f_{y2} : 鉄筋2の降伏点 θ_2 : せん断面に対する鉄筋2の角度 ν : コンクリート圧縮強度有効係数 $q = P/(h \cdot t \cdot \sigma_B)$ $n = N/(h \cdot t \cdot \sigma_B)$ $\psi_1 = A_{s1} \cdot f_{y1} / (h \cdot \sin \theta_1 \cdot t \cdot \sigma_B)$
 $\psi_2 = A_{s2} \cdot f_{y2} / (h \cdot \sin \theta_2 \cdot t \cdot \sigma_B)$

2.2 実験との適合性の検討

Mattockは図-5、6中に示すように、鉄筋の方向を実験変数とした直接せん断実験を行った[9]。図-5、6は配筋方向と強度の関係を示す。先の降伏条件と全く同様にして、極限解析により求められる強度[8]は、 $\nu=0.7$ 程度とすると、実験値およびMattockの示す強度式と同程度の強度を示すことがわかる。また、試験体No.2.2とNo.2.3の鉄筋2の定性的挙動も実験値と一致した。つまり、図-5に示すようにNo.2.2は圧縮応力状態であり、No.2.3は引張応力状態であるが、実験においても同様であったと報告されている。ただし、図-6で θ_1 が小さい範囲では、無筋コンクリートの状態に近くなり、コンクリー

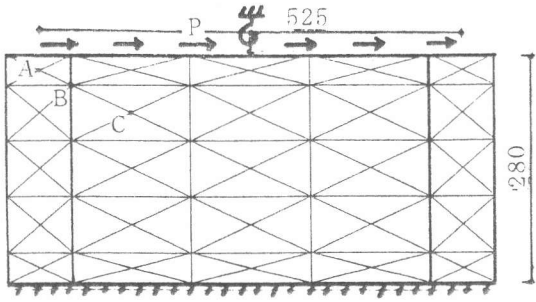
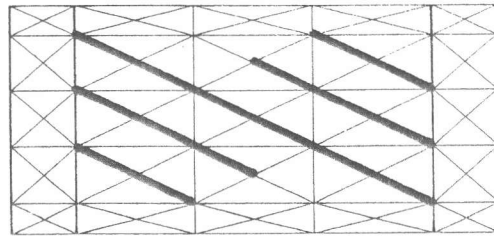


図-7 要素分割および加力図 (S1.5-8/2.5-0[10])



(a) $P = 3.44tf$

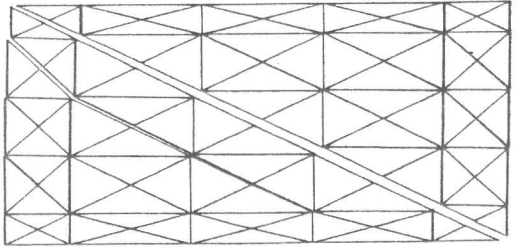
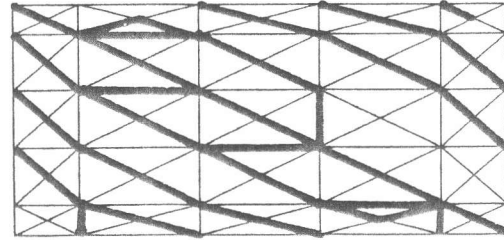


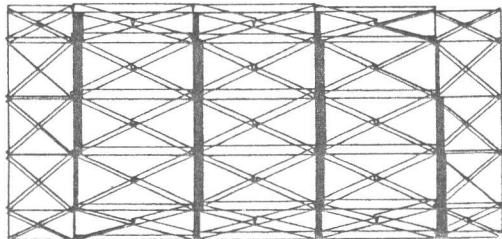
図-8 終局時の変形図

2mm



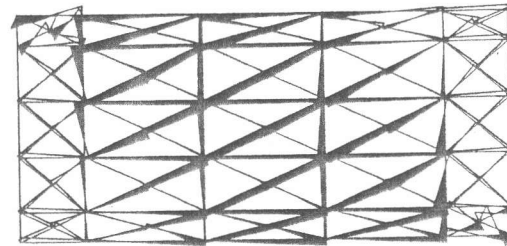
(b) $P = 10.83tf$ (終局時)

図-9 降伏したせん断面の分布



□ 正 $\uparrow\downarrow$, ■ 負 $\downarrow\uparrow$ 100kgf/cm²

図-10 せん断応力度 (終局時)



□ 引張, ■ 圧縮 200kgf/cm²

図-11 垂直応力度 (終局時)

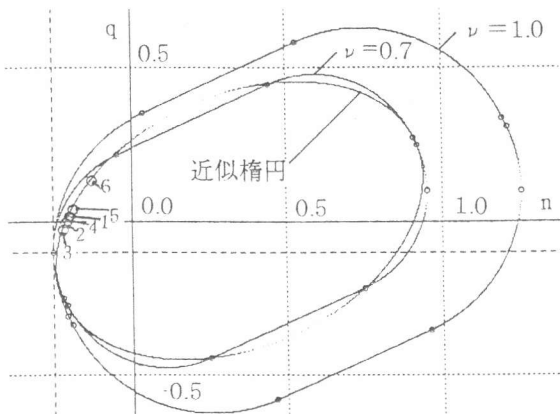


図-12 辺ABの降伏後の応力変化

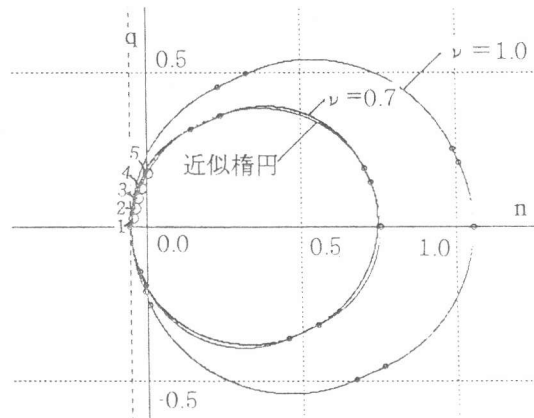


図-13 辺BCの降伏後の応力変化

トの引張強度が大きく影響することから、極限解析による値はMattockの強度式から離れている。

2.3 楕円による降伏条件の近似

降伏条件は直交2方向に配筋されている場合、図-4に示すように、1/4の円弧と直線からなる。したがって、本論文では降伏条件を、円弧と直線がつながる点を通る楕円により近似することを提案する。このように、連続な曲線を用いれば、解析プログラムがかなり簡略化される。表-1には、一般的な

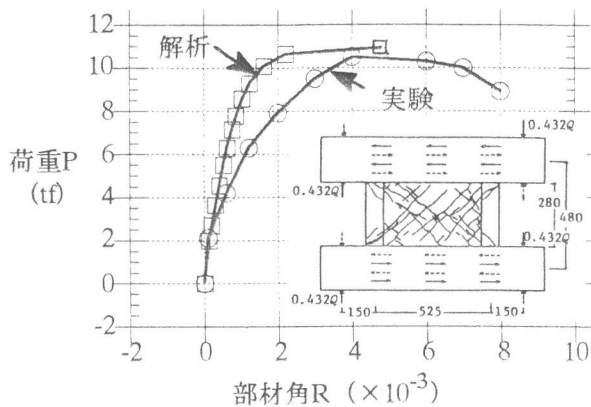


図-14 荷重-変形関係 (S1.5-8/2.5-0[10])

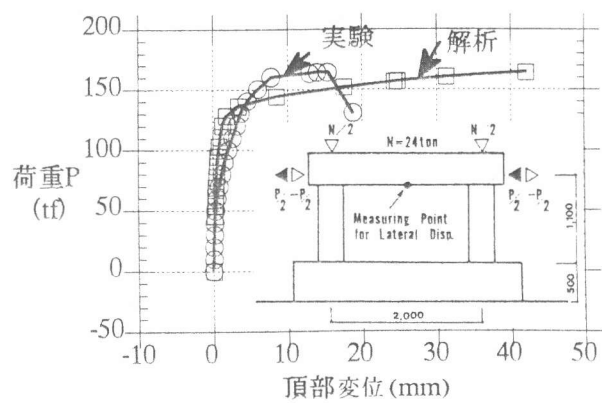


図-15 荷重-変形関係 (Wall#1[11])

配筋の場合と高配筋の場合についての降伏条件、およびそれを楕円で近似した状況を示している。さらに、せん断面と鉄筋の成す角度について、直交、45度の2種について検討した。この表から明らかのように、高配筋の場合近似度がやや悪くなるが、全体的には良く近似できていると考える。

3 解析方法

解析は、剛体ばねモデルによる離散化極限解析である。非線形計算法としては、文献2]にならい、荷重増分法とした。降伏開始以降の各荷重増分は十分に微小とし、もしその荷重増分中にあるせん断面が降伏した場合は、荷重増分をそのせん断面が降伏するまでとした。そして、その都度降伏したせん断面のばねの剛性を再評価した。降伏するせん断面の検索はRmin法、降伏後の剛性は、関連する流れ則に従って定めた。除荷に関するチェックも含めている。νについては、すべて0.7と仮定している。また、ここではひび割れによる剛性低下や、破壊によるソフトニングは一切考慮していない。

4 計算例

図-7から図-14に江崎らが報告している[10]耐震壁 (S1.5-8/2.5-0) の実験の解析結果を示す。この試験体には柱があり、また剛とみなせるような大きなはりが付帯している。図-7に示すように脚部を固定し頂部では回転のみを拘束して加力している (図-14参照)。図-8は終局時の変形図を示す。計算誤差のためか、幾分逆対称性がそこなわれているが、ほぼ実験と同様の破壊状態を示している。図-9に降伏したせん断面の進展状況を太線で示す。まず壁板が降伏し、その後柱に進展していく様子がわかる。図-10、図-11は終局時の各応力度の分布を示す。図-11において、付帯柱に引張力が生じているのがわかる。図-12、図-13は、図-7中に示すA-B辺、B-C辺の降伏後の応力変動を示す。降伏曲線上を動いていることが確認される。図中の番号は応力の発現の順番である。辺A-Bの応力は複雑に変動しているのに対し、辺B-Cは単調に変動している。また、辺B-Cの垂直応力において降伏開始時は引張力を受けているが、終局時にはほぼ0となっていることがわかる。図-14に荷重部材角関係を示す。初期の剛性低下を過小評価しているが、これは、降伏条件に至るまでひびわれによる剛性低下を無視し、コンクリートと鉄筋の弾性剛性を合わせて求めた弾性剛性のままとしているためと考えられる。実験での最大荷重近傍で解析においても降伏性状を示している。しかしながら、変位が無限大となるような明確な不安定点が現われなかったため、剛性が弾性剛性の1/1000となった時点で計算を終了した。

図-15に青山らの実験 (Wall #1) [11]についての解析結果を示す。この解析においても実験での最大荷重近傍で降伏性状を示したが、明確に不安定を示さなかったため、適当な所で計算を終了した。

このように、なぜ不安定とならなかったかについては、計算誤差、あるいは要素回転の自由度があるにもかかわらず、降伏条件として垂直応力度の勾配の影響を入れていないためとも考えられるが明確ではない。一方、文献[2]においては、明確な不安定現象が得られない場合、メカニズムチェックとして、最大変位等を設定し計算を終了させることを推奨している。したがって、最大荷重の決定にあたっては、せん断破壊面での終局ひずみを定め、その時点の強度を最大荷重とする方法も考えられる。

4 結論

RCせん断面の降伏条件を鉄筋とコンクリートを累加した形式で表わし、それを楕円で近似し簡略化することを提案した。さらに、通常の鉄筋量では、楕円でほぼ近似可能であることを確認し、その近似した降伏曲線を用いて、耐震壁の離散化極限解析を試みた。その結果、かなり簡略化した解析法にもかかわらず、ほぼ実験と同様の結果を得た。しかしながら、荷重-変形関係において、実験での最大荷重近傍で、解析においても降伏の性状を示したが、明確に不安定とはならなかった。

謝辞 ご指導頂いている、九州大学工学部教授崎野健治先生、琉球大学工学部助教授山川哲雄先生、九州共立大学教授江崎文也先生に謝意を表します。なお、計算は有明高専電算室FACOMM330FX/4による。

参考文献

- [1]川井忠彦：コンピュータによる極限解析法シリーズ1 離散化極限解析法概論、培風館、1991
- [2]川井忠彦、竹内則雄：同シリーズ2 離散化極限解析プログラミング、培風館、1990
- [3]上田真稔、毛井崇博、川井忠彦：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、RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp.179-186,1984
- [4]毛井崇博、上田真稔、川井忠彦：RBSM法による鉄筋コンクリート壁の非線形解析、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.413-416,1985
- [5]上田真稔、毛井崇博、谷口元：RBSM法による鉄筋コンクリート構造物の極限解析、コンクリート工学年次講演会論文集10-3、pp.335-338,1988
- [6]上原修一：面内せん断応力度と垂直応力度を受けるRC断面の降伏条件、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)構造Ⅱ、pp.1043-1044、1992年8月
- [7]P.Marti:Plastic Analysis of Reinforced Concrete Shear Walls.IABSE,PP.51-69,1979
- [8]上原修一：せん断力と垂直応力を受ける鉄筋コンクリートせん断面の降伏条件、有明工業高等専門学校紀要第30号、pp.51-57,1994.1
- [9]Mattock,A.H.:Shear Transfer in Concrete Having Reinforcement at an Angle to the Shear Plane, Shear in Reinforced Concrete, SP-42, American Concrete Institute, Detroit,PP.17-42., 1974
- [10]江崎文也、富井政英、藤田正則：スリップ破壊が先行する1スパン1層を単位耐震壁とする均等多連耐震壁の破壊機構に関する研究、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.713-716、1984
- [11]菅野俊介：「耐震壁選定試験体」選定理由および実験データの概要、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム、解析モデル検証用試験体の実験データ集、日本コンクリート工学協会、pp.43-54,1983
- [12]毛井崇博、上田真稔、菊地健児、吉村浩二、野田孝介：RC平板のせん断破壊に関する基礎的研究(その3)鉄筋コンクリート板、日本建築学会研究報告中国九州支部構造系、pp.325-328、1993
- [13]Jensen,B.C.:Lines of Discontinuity for Displacements in the Theory of Plasticity of Plain and Reinforced concrete, Mag. Concr. Res.,vol.27, no.92, pp.143-150., September,1975
- [14]Chen,W.F.:Plasticity in Reinforced Concrete, Mcgraw-Hill,1982.
- [15]Nielsen,M.P.:Limit Analysis and Concrete Plasticity, Prentice-Hall, 1984.
- [16]南宏一：せん断を受ける鉄筋コンクリート部材の極限解析について、RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp.1-16,1982.6.4
- [17]山田一字：鉄筋コンクリート製原子炉格納容器の設計における問題点、特にRCシェル要素のせん断設計方法の合理化に関する研究、前田建設技術研究所報、1982.3
- [18]吉川弘道：面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的挙動に関する解析モデル、武蔵工業大学工学部、1987.1
- [19]三島徹也、山田一字、前川宏一：正負交番載荷下における鉄筋コンクリートひびわれ面の局所的挙動、土木学会論文集No442/V-16,pp161-170,1992.2