

# 論文 曲げモーメントを考慮した RC せん断面降伏条件による耐震壁の 離散化極限解析

上原 修一

要旨：鉄筋コンクリートせん断面に関する、曲げモーメント・軸力・せん断力の相関降伏条件を提案した。この降伏条件は、コンクリートと鉄筋の降伏条件の累加により求められる。次に、提案した降伏条件と既往のせん断面試験体13体の実験結果との比較により、本降伏条件が概ね実験値を評価できることを示した。また、剛体ばねモデル法による鉄筋コンクリート壁板の解析により、少ない要素分割数で強度および曲げ破壊、せん断破壊などの破壊形式の予測が可能であることを示した。

キーワード：相関降伏曲面、せん断面、極限解析、剛体ばねモデル、降伏条件

## 1. はじめに

著者は、文献 [1] において、図-1に示すような、鉄筋コンクリート（以下RCとする）せん断面が垂直応力度（軸力N）とせん断力Qを受ける場合の降伏条件を、コンクリートと鉄筋の降伏条件を累加することによって求め、さらに、その降伏条件を使った剛体ばねモデル法により、RC耐震壁の離散化極限解析が可能であることを示した。しかし、複雑な壁配置を有するRC架構の破壊機構を予測する簡便な解析手法の開発のためには、剛体自由度として移動・回転があることから、壁板要素の降伏条件として、曲げモーメントM（垂直ひずみ勾配）を考慮し、M・N・Qの相関降伏条件を用いたほうがより合理的であることがわかってきた。例えば、そうすることにより、要素分割数の低減が可能となるほか、壁板の自由度および降伏条件の設定が、柱およびはり要素のそれと統一できる。

したがって、本論文では、新たに曲げモーメントを考慮した降伏条件を誘導する。次に、既往のせん断面の実験との比較により、その降伏条件の妥当性を検討する。さらに、剛体ばねモデル法によるRC壁板の数値計算例を示し、本手法の合理性・有効性を検討する。

なお、本論文で、用いる記号は次のとおりである。

t: 板の厚さ h: 断面のせい  $h_c$ : 長方形断面における圧縮コンクリート部分のせい v: 隣接要素が分離する時の相対変位ベクトル (図-1参照)  $\alpha$ : せん断面に対するvの角度  $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度  $\sigma_u$ : コンクリートの極限圧縮応力(断面が降伏する時のコンクリート圧縮部分の垂直応力) [2]  $A_{s1}$ : 鉄筋1の断面積  $f_{y1}$ : 鉄筋1の降伏点  $\theta_1$ : 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  $\theta_2$ : せん断面に対する鉄筋2の角度  $\nu$ : コンクリート圧縮強度有効係数 Q: せん断面に加わるせん断力 N: せん断面に加わる軸方向力 M: せん断面に加わる曲げモーメント  $q = Q / (h \cdot t \cdot \sigma_B)$   $n = N / (h \cdot t \cdot \sigma_B)$   $m = M / (h^2 \cdot t \cdot \sigma_B)$   $\psi_1 = A_{s1} \cdot f_{y1} / (h \cdot \sin \theta_1 \cdot t \cdot \sigma_B)$   $\psi_2 = A_{s2} \cdot f_{y2} / (h \cdot \sin \theta_2 \cdot t \cdot \sigma_B)$

## 2. M・N・Qを受けるRCせん断面降伏条件の誘導

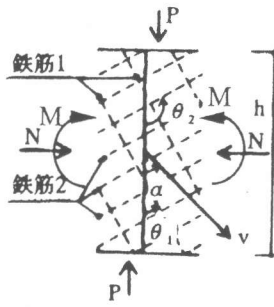


図-1 MNQを受ける鉄筋  
コンクリートせん断面

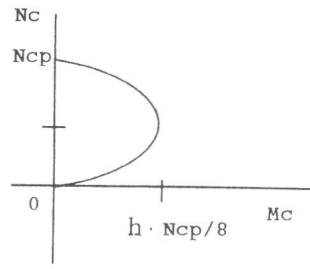


図-2 Mc、Ncを受けるコン  
クリート長方形断面の降伏条件

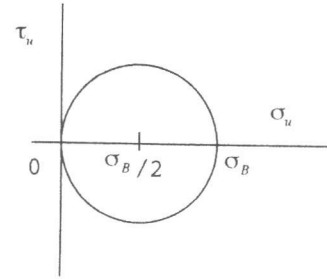


図-3 せん断力と垂直応力を受  
けるコンクリートの降伏条件

### 2.1 コンクリートの降伏条件

コンクリート長方形断面が、曲げモーメント  $M_c$  と軸力  $N_c$  を受ける時の降伏条件は、コンクリートの極限圧縮応力  $\sigma_u$  を長方形分布と仮定すると、式 (1) となる [2]。

$$\frac{N_c}{2} \left( \frac{N_c}{\sigma_u t} - h \right) + M_c = 0 \quad (1)$$

これは、図-2 に示すような、放物線である。

一方、せん断力と垂直応力を受ける場合のコンクリート長方形断面の降伏条件を、図-3 に示すように、Mohr の圧縮強度応力円で示す。この降伏条件は次式となる。

$$\left( \sigma_u - \frac{\sigma_B}{2} \right)^2 + \tau_u^2 = \left( \frac{\sigma_B}{2} \right)^2 \quad (2)$$

また、せん断力  $Q_c$  はコンクリート圧縮部分で均等に負担されると仮定すると、せん断応力度  $\tau_u$  は

$$\tau_u = \frac{Q_c}{t \cdot h_c} = \sigma_u \cdot \frac{Q_c}{N_c} \quad (3)$$

式 (3) を式 (2) に代入して、 $\sigma_u$  を求めると、

$$\sigma_u = \frac{N_c^2}{N_c^2 + Q_c^2} \sigma_B \quad (4)$$

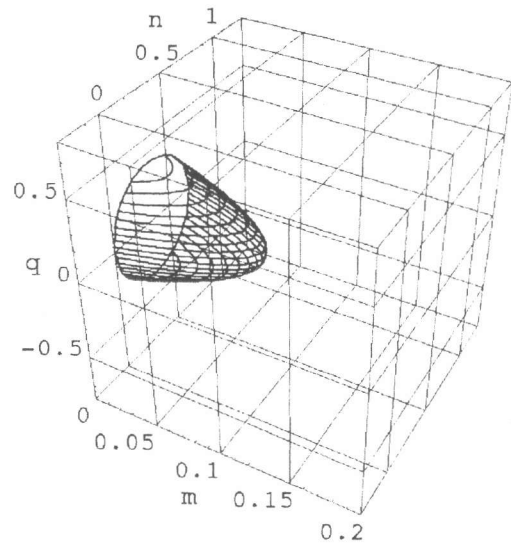


図-4 コンクリートの降伏条件  
( $\nu = 0.7$ )

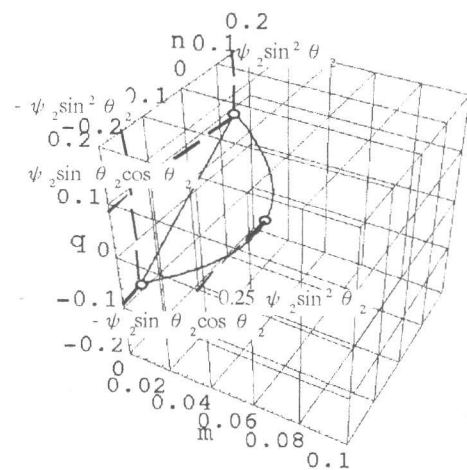


図-5 鉄筋2の降伏条件

式 (4) を式 (1) に代入して、

$$\frac{1}{2} \left( \frac{N_c^2 + Q_c^2}{t h \sigma_B} - h N_c \right) + M_c = 0 \quad (5)$$

となる。

次に、式 (5) を次のように置き換える。

$$n_c = \frac{v N_c}{t h \sigma_B}, \quad q_c = \frac{v Q_c}{t h \sigma_B}, \quad m_c = \frac{v M_c}{t h^2 \sigma_B} \quad (6)$$

すると、式 (5) は次のように示される。

$$\frac{1}{2} \left( \frac{n_c^2 + q_c^2}{v} - n_c \right) + m_c = 0 \quad (7)$$

$v = 0.7$  の時の例を図-4 に示す。

### 2.2 鉄筋の降伏条件

鉄筋は、図-1 に示すように直交2方向に一樣に配筋されているものとする。図-1 に示す鉄筋2の降伏条件は文献 [1] に示す  $n$ - $q$  座標での降伏条件に、曲げモーメントを考慮すると図-5 のように放物線で示される。さらに、鉄筋1の降伏条件を累加すると図-6 のようになる。

### 2.3 RCせん断面の降伏条件

図-7 に示すように、コンクリートと鉄筋の降伏条件を累加してRCの降伏条件を求める。ここでは、コンクリートの降伏条件を、 $n$ - $q$  座標では文献 [1] と同様に楕円に拡大し、 $m$  方向については累加した頂点を通るように拡大したものをRCせん断面の降伏条件とする。図-1 のRCせん断面の降伏条件の例を図-8 に示す。

## 3. RCせん断面の降伏条件と既往の実験との比較

### 3.1 無筋コンクリートせん断面

百武らはプレキャスト耐震壁接合面を想定し、軸ひずみ勾配を持つ接合部の実験を行った [3]。文献 [3] の試験体の内、コッター面試験体6体（無筋、支圧型コッター）の強度について降伏条件との対応を

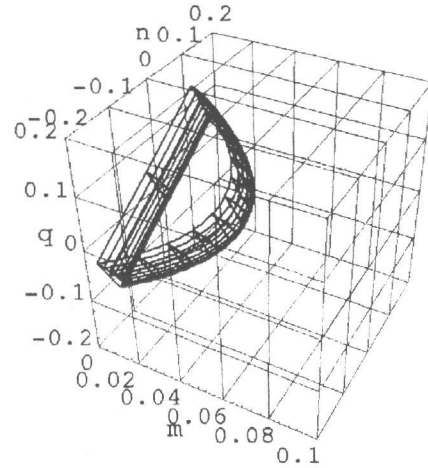


図-6 鉄筋1と鉄筋2の降伏条件の累加

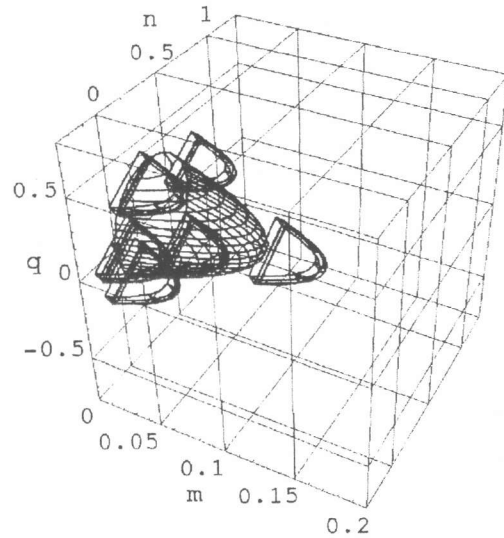


図-7 コンクリートと鉄筋の降伏条件の累加

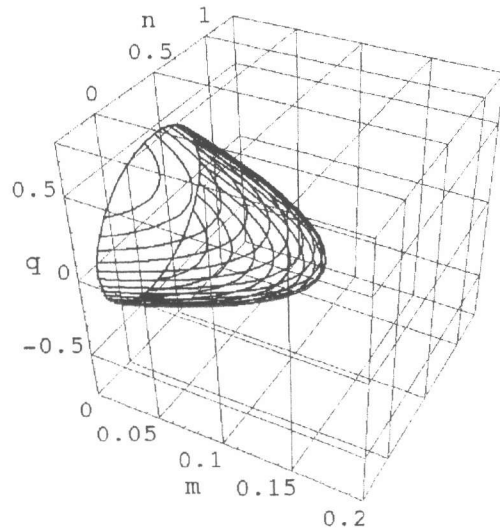


図-8 RCせん断面の降伏条件

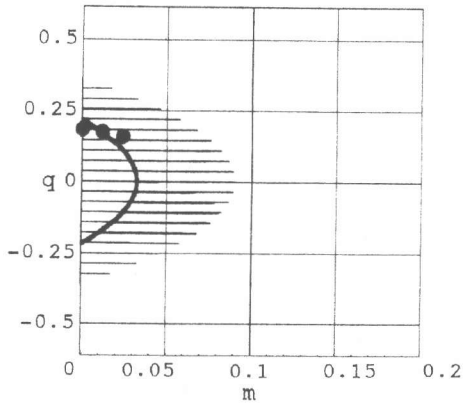


図-9 無筋試験体との比較 (コッター接合、 $n=0.072$  シリーズ、 $\nu=0.722$ ) [3]

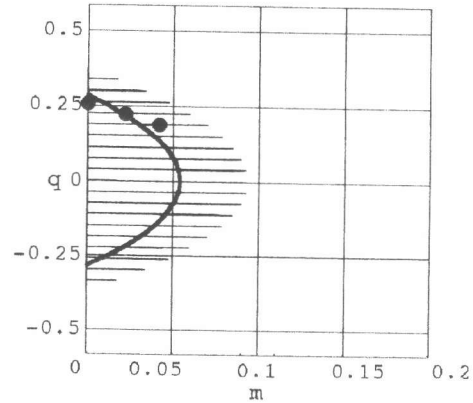


図-10 無筋試験体との比較 (コッター接合、 $n=0.131$  シリーズ、 $\nu=0.747$ ) [3]

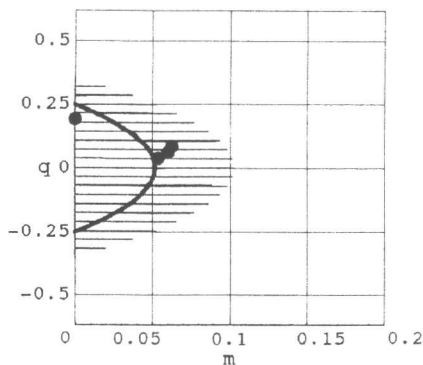


図-11 RC試験体との比較 (一体打ち、 $n=0.060$  シリーズ、 $\nu=0.697$ ) [5]

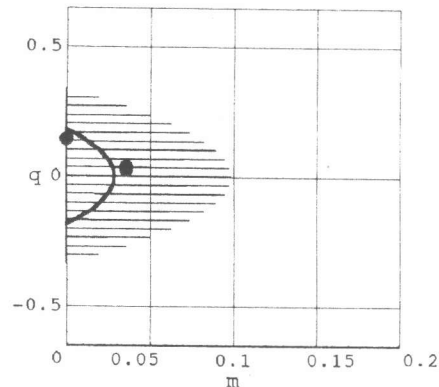


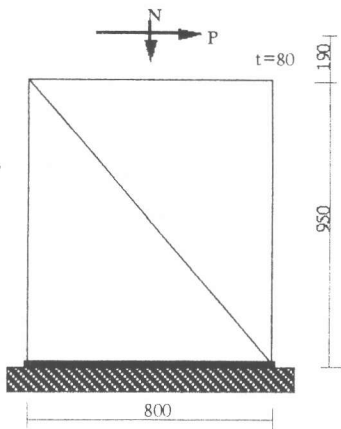
図-12 RC試験体との比較 (一体打ち、 $n=0$  シリーズ、 $\nu=0.661$ ) [5]

検討した。この試験体はコッター接合であるが、接合部分が圧壊しており、巨視的にみれば一体打設の試験体と大差ないと考え検討の対象とした。図-9、図-10に結果を示す。この図は降伏曲面を  $n = \text{一定値}$  で切断し、 $m$ - $q$  平面上へ投影したものである。図中の太線はその時の降伏曲面の切断線であり理論値を示す。黒丸は実験値である。また、背景の放物線状のハッチは降伏曲面の  $m$ - $q$  平面上への投影図である。なお、ここでの  $\nu$  は文献 [4] の提案式により算定した。理論値はほぼ実験値に近いが、 $m=0$  の時にやや過大評価で、 $m$  が大きい時にやや過小評価となっている。 $m=0$  の時の過大評価は、コッター面であること (せん断面としてはひび割れがある場合と評価すべきと思われるがここで用いた有効係数はひびわれがない場合のものである) の影響と考える。また、 $m$  が大きい場合の過小評価については、 $\nu$  の修正により対応可能と考えており、今後検討する予定である。

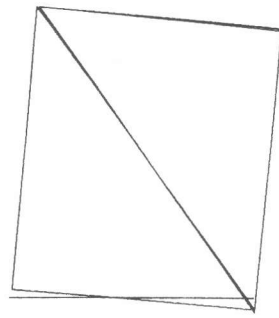
### 3.2 鉄筋コンクリートせん断面

壁谷澤らはプレキャスト耐震壁接合面を想定し、軸ひずみ勾配を持つ接合部の実験を行った。文献 [5] の試験体のうち、一体打ち試験体7体の強度について降伏条件との適合性を検討した。図-11、図-12に結果を示す。実験値は解析値の近傍にあるが、実験値が両端に偏っているため、降伏条件との適合性の良否は必ずしも明確ではない。

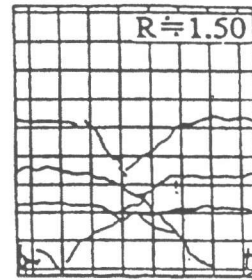
なお、せん断面に軸力とともに曲げモーメントを加えた実験は極めて少ないため、著者らはこの実験を計画中である。



(a) 要素分割及び降伏線図  
(降伏線を—で示す)

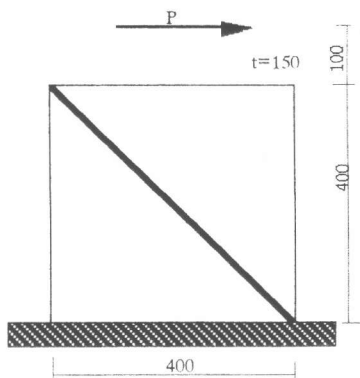


(b) 解析による変形図

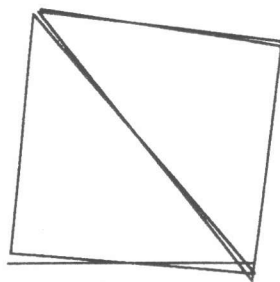


(c) 実験における破壊状況

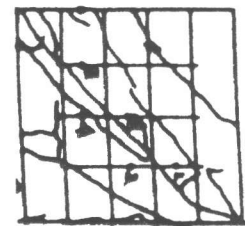
図-13 曲げ破壊するRC壁板 (RCW-NN1 [6]) の解析



(a) 要素分割及び降伏線図  
(降伏線を—で示す)



(b) 解析による変形図



(c) 実験における破壊状況

図-14 せん断破壊するRC壁板 (ディープビーム、SB100-100 (2) [7]) の解析

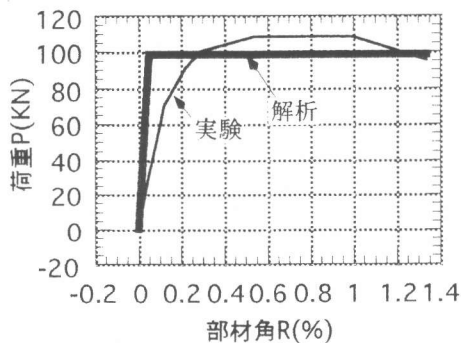


図-15 曲げ破壊するRC壁板 (RCW-NN1 [6]) の荷重変形関係

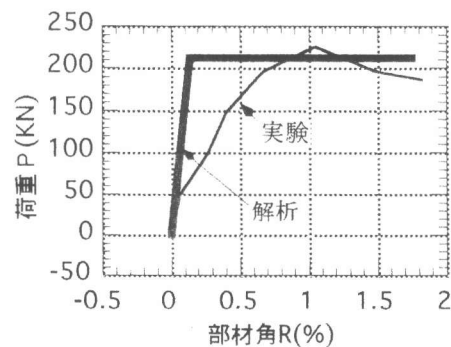


図-16 せん断破壊するRC壁板 (SB100-100 (2) [7]) の荷重変形関係

#### 4. 剛体ばねモデルによる解析の例

本解析により、強度と破壊形式の評価が可能であることを示すため、RC壁板について曲げ破壊した実験例 [6] とせん断破壊した実験例 [7] をそれぞれ1体選定した。これらはともに矩形断面のRC耐力壁とディープビームである。この解析では、本論文で提案したRCせん断面降伏条件

を使用している。ひび割れなどの剛性低下は無視し、降伏までは弾性状態、降伏後は直交する流れ則に従って剛性を定めた。降伏後の硬化はない。

図-13、図-14に要素分割・降伏線図、変形図等を示す。ここでは少ない要素分割で強度と破壊形式を予測できることを示すため、ともに2分割とした。また、壁板頂部および脚部に境界用要素 [8] を配している。剛体ばねモデルによる解析では、要素境界線が降伏可能なせん断面となることから、この解析では、壁脚および壁板斜め線上での降伏を予め想定していることになる。なお、コンクリートの有効係数については、壁脚のせん断面では $\nu=1.0$ 、壁斜めのせん断面では、コンクリート強度およびそこに生ずる垂直応力を考慮し、文献 [4] によって得られる値 (RCWNN1 においては $\nu=0.694$ 、SB100-100 (2) においては $\nu=0.655$ ) を使用した。

実験で曲げ破壊した試験体については、解析においても壁脚に降伏線が発生し、実験でせん断破壊した試験体については、解析においても壁板斜めのせん断面上に降伏線が発生していることから、破壊形式の予測は良好であるといえる。図-15、図-16に荷重変形関係を示すが、強度も概ね良好に評価できている。

## 5. 結論

RCせん断面に関する、モーメント、軸力、せん断力の相関降伏条件を提案した。この降伏条件は、コンクリートと鉄筋の降伏条件の累加により求められる。提案した降伏条件と既往の13体のせん断面実験結果の比較により、本降伏条件が概ね実験値を評価できていることを示した。次に、剛体ばねモデルによる鉄筋コンクリート壁板の解析により、少ない要素分割で強度及び破壊形式の予測が可能であることを示した。このことは、本解析法が、有壁架構の解析など、マクロな解析に有用であることを示唆していると考えられる。

### 謝辞

貴重な実験データを頂いた東京大学地震研究所教授壁谷澤寿海先生、有用な助言を頂いている九州共立大学教授江崎文也先生、九州大学教授崎野健治先生、琉球大学教授山川哲雄先生に謝意を表します。また、解析データの出力については平成7年度有明高専卒業研究生児玉憲助君の協力を得た。記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 上原修一：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、コンクリート工学年次論文報告集 Vol16, No.2, pp.1337-1342, 1994年
- 2) 中村恒善編著「建築構造力学図説・演習II」、丸善、pp.206-210、1982
- 3) 百武茂ほか：RCプレキャスト耐震壁の接合部耐力に及ぼす曲げ変形の影響（その1：実験概要および実験結果）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、C-2、構造IV、pp.179-180、1995.8
- 4) 上原修一：鉄筋コンクリートせん断面降伏条件に関する基礎的検討、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 17, No. 2, pp.845-850, 1995
- 5) Kabeyazawa, T., "Test on Interface Shear Transfer at Precast Joint Faces Subjected to Moment, Shear, and Axial Force," Second Meeting of U.S.-Japan Joint Technical Coordinating Committee on Precast Seismic Structural Systems, October 31-November 2, 1991
- 6) 松永尚凡、山川哲雄ほか：電食により鉄筋を強制的に腐食させたRC造耐力壁の耐震性能に関する実験的研究、日本建築学会研究報告九州支部、第34号の1構造系、pp.309-312、1994.3
- 7) 狩野芳一、大西紀正：溶接金網で補強した梁のせん断破壊性状、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、構造、pp.1357-1358、1973.8
- 8) 川井忠彦、竹内則雄：コンピュータによる極限解析法シリーズ2 離散化極限解析プログラミング、培風館、p.20、1990