

# [185] 鉄筋コンクリート壁体構造物の材料非線形解析

正会員 ○瀬谷 均 (竹中工務店技術研究所)  
 正会員 上田 真稔 (竹中工務店技術研究所)  
 正会員 菅野 俊介 (竹中工務店技術研究所)

## 1 まえがき

鉄筋コンクリート構造物のひびわれから破壊までの現象をシミュレートする独自のコンクリートの構成則による数値解析プログラムを用いて耐震壁の解析を行った。有限要素法による本解析方法はシェル要素を厚さ方向に層状に重ね合わせたモデルを用いており、これまで原子炉建屋を模した円筒シェル、ボックス壁の実験に適用して良好な結果を得ている<sup>1,2)</sup>。提案する構成則は、せん断応力が卓越する耐震壁の場合、ひびわれの存在により圧縮方向のコンクリートの応力-ひずみ関係が一軸圧縮とは異なるとして、剛性と耐力の低減を考慮した。更にコンクリートの破壊条件として圧縮ひずみによる判定のみでなく、せん断変形の限界値を新たに設定した。これらのコンクリートの性状はコリンズ等<sup>3)</sup>による実験でも確認している。

## 2 材料の構成法則

### 2.1 コンクリート

#### 2.1.1 圧縮応力時 一軸の圧縮力-ひずみ関係はトリリニアとする。

図1に示すようにコンクリートの最大圧縮応力はシリンダーテストによる強度  $F_c$  の95%とした(文献1参照)。第1降伏する点の応力は  $F_c$  の1/2とし、その後の剛性は初期剛性の1/2とした。終局圧縮ひずみ  $\epsilon_{11}$  を超えたとき  $2\epsilon_{11}$  までを負勾配とし、それ以降は圧縮強度  $F_c$  の0.2倍を保持するとした。圧縮-圧縮応力下での降伏曲面は Von Mises の条件に従い、第1, 2次の降伏曲面は相似とし、降伏後は塑性流れ則に従うものとする(図2)。最大応力後に応力開放を開始する条件は主ひずみ  $\epsilon_1, \epsilon_2$  によって判断し、次式で与える。

$$\sqrt{\epsilon_1^2 - \epsilon_1\epsilon_2 + \epsilon_2^2} - \epsilon_{11} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

2.1.2 引張応力時 主応力の最大値が引張強度  $F_t$  以上のときひびわれが生ずるとした。ひびわれが生じた要素はひびわれと直交方向の剛性を0とした直交異方性材料として扱う。また一度ひびわれが生じたとき、それと直交方向のみひびわれを許しており、ひびわれによって失なわれた剛性は回復しないとしている。

ひびわれと直交方向の応力は、ひびわれ間で鉄筋との付着作用によって引張応力を負担するテンションチフネス効果がある。この応力はひびわれと直交方向のひずみで表現され、ここでは図3に示す関係としている。すなわち鉄筋が降伏するときのひずみ  $\epsilon_y$  に達したとき応力が全て解放されるとして、ひびわれ発生点から直線で結んだ。図中  $\epsilon_{cr}$  はコンクリートのひびわれひずみである。

2.1.3 引張-圧縮応力時 応力が引張-圧縮状態のとき、ひびわれが生じたコンクリートの構成方程式を次式であらわす。ただし  $\sigma_1, \sigma_2, \epsilon_1, \epsilon_2$  はひびわれ発生時の主応力および主ひずみである。

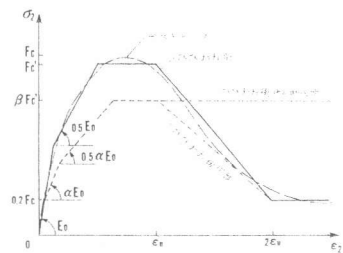


図1 コンクリートの圧縮方向応力-ひずみ

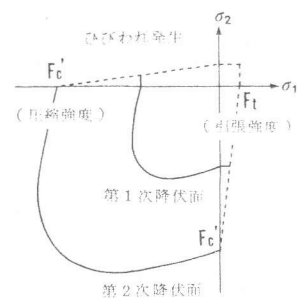


図2 コンクリートのひびわれ発生面と降伏曲面

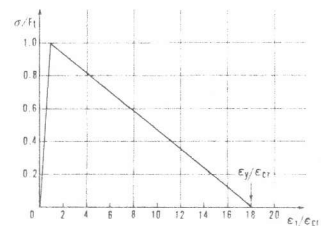


図3 テンションチフネス特性をあらわす応力-ひずみ関係

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E(\epsilon_2) & 0 \\ 0 & 0 & G(\epsilon_i) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \epsilon \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

ここで  $E(\epsilon_2)$  は圧縮の応力-ひずみ関係で、ひびわれによるコンクリートの損傷を圧縮側においても表現できるようにした。これはひびわれ間のコンクリートが付着により引張を負担し、引張-圧縮の破壊条件から  $F_c$  が低減する可能性、および要素が粗い場合は要素内でのひびわれ方向の変化が生ずる可能性が大きくなり、圧縮方向の耐力、剛性が減少する影響をあらわしている。またコリズ等<sup>3)</sup>によるRC板のせん断実験によると、ひびわれ後の  $\sigma_2 - \epsilon_2$  に関する圧縮応力での剛性と耐力が低下することが報告されている。そこで本報では図2の破線で示すように、ひびわれたコンクリートの剛性と耐力を健全な場合に較べてそれぞれ  $\alpha$ 、 $\beta$  倍に低下するとした。本解析では  $\alpha = 0.6$ 、 $\beta = 0.6$  とした。

コンクリートの圧縮ひずみの限界値は2.1.1.に示したが、せん断ひずみの限界値は従来あまり設けられなかった。本報ではせん断ひずみによる破壊条件を新たに追加している。すなわち(1)式の圧縮ひずみの終局値  $\epsilon_{11}$  を用いて最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  が

$$\gamma_{max} = \epsilon_1 - \epsilon_2 > c \epsilon_{11}$$

のときせん断破壊するとした。cの値としてコリズ等の実験では  $\gamma_{max}/\epsilon_2 = 2 \sim 10$  で  $0.5 \sim 2$  となり、本稿では  $c = 1.5$  で一定とした。

せん断破壊したコンクリートはその時の存在応力をそのまま保持するとした。耐震壁の解析では、ひびわれたコンクリートはほとんどせん断破壊している。

2.1.4 ひびわれ面でのせん断伝達 ひびわれたコンクリート面でのせん断力は、コンクリート面間の摩擦力や骨材の凹凸および鉄筋のダボ作用により伝達される。伝達されるせん断力は、ひびわれ巾が増大すると減少する傾向がある<sup>4)</sup>。ここではせん断剛性はひびわれ面に直交する方向のひずみ  $\epsilon_n$  の双曲線関数を用いた図4に示す曲線で与えた<sup>2)</sup>。

## 2.2 鉄筋

鉄筋は軸剛性のみを有する等価の断面積をもつ異方性板に置換している。鉄筋の応力-ひずみ関係は圧縮、引張ともバイリニア型とした(図5)。

## 3 耐震壁の解析

### 3.1 解析試験体

解析の対象とした耐震壁は菅野が選定を担当したJCI選定試験体<sup>5)</sup>の中の#1、#1'(青山等の実験<sup>6)</sup>による)である。要素は3角形の一定ひずみ要素を用い、平面応力問題として解いた。試験体の形状を図6に材料定数等を表1に示す。試験体#1'は#1の柱の断面積を1/2としたもので柱の拘束の影響をみたものである。青山等の実験の加力方法は一定軸力下で交番の水平力を押引によって作用させている。解析に用いた要素分割図を図7に示す。

### 3.2 解析結果

#### 3.2.1 実験と解析との比較

実験と解析の荷重-変形曲線を比較して示したのが図9、10である。コンクリートが破壊するひずみはデータ

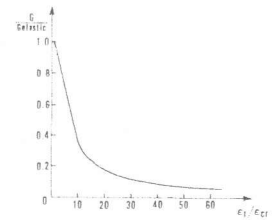


図4 ひびわれ要素のせん断剛性とひずみの関係

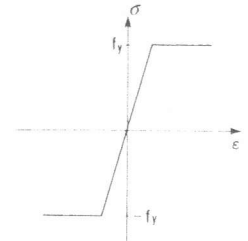


図5 鉄筋の応力-ひずみ関係

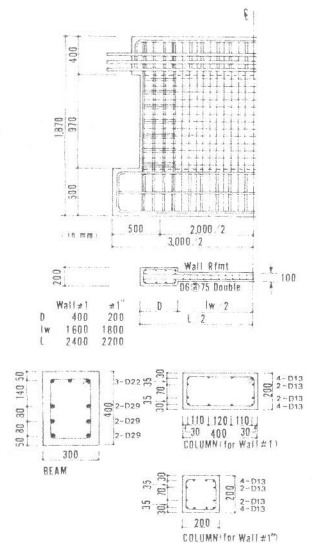


図6 耐震壁試験体の形状

表1 耐震壁選定試験体の材料定数

項目	#1	#1'
コンクリート強度 (MPa)	0.35	1
引張強度 (MPa)	1.10	1.10
引張弾性係数 (MPa)	0.85	0.85
鉄筋	D6	D6
鉄筋間隔 (mm)	7.5	7.5
鉄筋強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	7.5	9.2
鉄筋弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	1.0	1.0
断面積 (cm <sup>2</sup> )	3200	2600
コンクリート弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	2.97	2.97
引張弾性係数 (10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	2.34	2.34
引張弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	2.34	2.34
鉄筋弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	3.620	3.620
引張弾性係数 (10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	2.1	2.1

として与えられることは稀でここでは圧壊ひずみ  $\epsilon_{11}$  を  $4 \times 10^{-3}$ , せん断破壊ひずみ  $\gamma_{max}$  を  $6 \times 10^{-3}$  で一定とした。変形はウェブ中央の梁との交点の水平変位である。荷重が 100 t までは比較的良く一致しその後 # 1 試験体は解析の方が変形が小さく # 1" 試験体は変形が若干大きかった。図中 X 印はコンクリートのせん断破壊要素がウェブで端から端へ横につなげた点をあらわし、最大荷重の判定点としている。

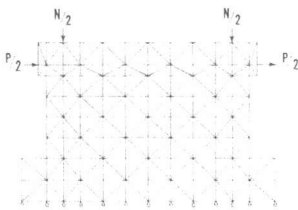


図 7 耐震壁 # 1 試験体の要素分割図

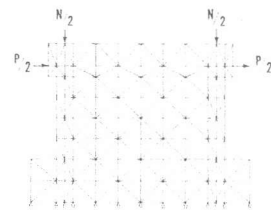


図 8 耐震壁 # 1" 試験体の要素分割図

最大荷重の判定点としている。最大荷重値は # 1 は実験とほぼ等しいが # 1" では実験値より約 9% 下回った(表 2 参照)。解析では X 印以降も鉄筋が効いて計算が進行され、若干の荷重増加となった。柱の細い # 1" の方が最大荷重および最大荷重時の変位が小さい傾向は実験と一致した。

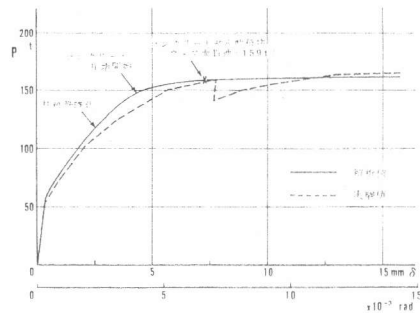


図 9 耐震壁 # 1 の荷重-変形曲線

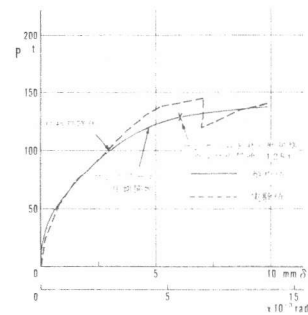


図 10 耐震壁 # 1" の荷重-変形曲線

二つの試験体のひびわれ状態などの破壊状況図を図 11, 12 に、図中で用いた記号の説明を表 2 にそれぞれ示す。部材角が  $1 \times 10^{-3}$  ではウェブ全面に渡り  $45^\circ$  の方向にひびわれが生ずる。図中のひびわれ記号で 2 重線になっているのはコンクリートの引張応力が開放されていることを示し、実際にはひびわれが目視される程度に広がった状態である。図 13 は実際のひびわれ状態で、部材角

表 2 破壊状態をあらわす記号

記号	非破壊状態	記号	非破壊状態
	ひびわれ, コンクリート圧力残留		圧縮一次降伏
	ひびわれ, コンクリート圧力開放		圧縮完全降伏
	ひびわれ方向の引張降伏		引張
	ひびわれ方向の圧縮完全降伏		せん断破壊

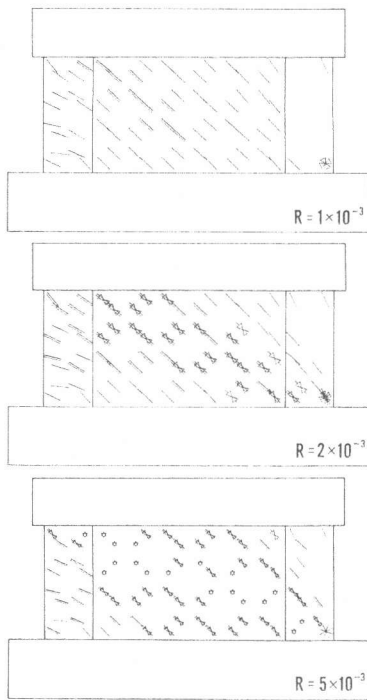


図 11 外表面の破壊状態図, # 1

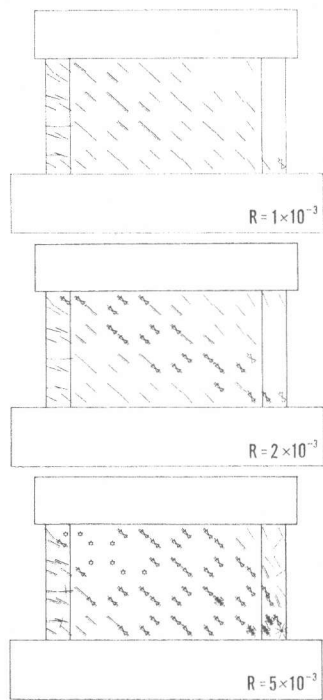


図 12 外表面の破壊状態図, # 1"

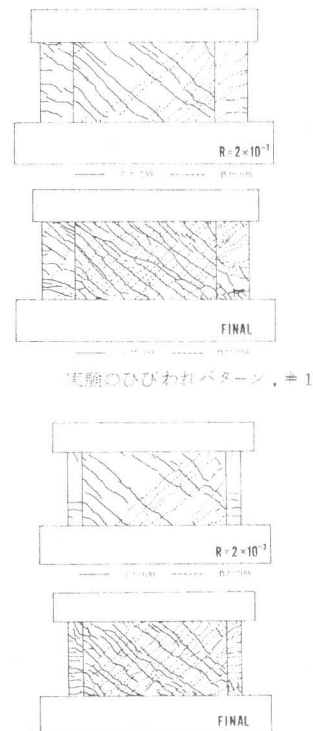


図 13 実験のひびわれパターン, # 1"

が  $2 \times 10^{-3}$  では解析、実験とも似たひびわれを示す。終局時近傍ではせん断破壊要素が押し加力点から圧縮側柱脚端を結ぶ対角線上に発生している。この傾向は実験の終局時の破壊を良く再現している。実験、解析とも圧縮側の柱脚に圧壊が生じているが、それが全体の耐力に与える影響は小さい。

### 3.2.2 破壊ひずみの影響

#1 試験体についてコンクリートの破壊を判定する圧壊時のひずみ  $\epsilon_u$  を  $3 \times 10^{-3}$ 、せん断破壊時のひずみ  $\tau_{max}$  を  $4.5 \times 10^{-3}$  としたときの荷重-変形関係と較べたのが図 14 である。ひずみの限界値を小さくすると破壊が速まり耐力も 6% 減少した。

### 3.2.3 軸力に関する考察

軸力が荷重-変形関係に与える影響を調べたのが図 15 である。既往のせん断耐力評価式を見ると軸力の効果についての考え方は 2 通りある。一つは柱の式に準じたもので、軸力によるせん断耐力の増加分の応力  $\Delta\tau_u$  を

$$\Delta\tau_u = 0.1 \sigma_0 \quad (2)$$

で与える<sup>7)</sup>。ただし  $\Delta\tau_u$  は有効壁断面積に対するせん断応力であり、 $\sigma_0$  は壁全断面積に対する平均軸応力である。 $\sigma_0 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$  とすると解析ではせん断耐力の増加は  $\Delta Q = 2.0 \text{ t}$  であるが、(2) 式を用いると  $\Delta Q = 3.8 \text{ t}$  とかなり小さな評価となる。

もう一つの考え方は全補強式にも見られるように軸力が全断面に一樣に作用しているとして軸力による増加分を

$$\Delta\tau_u = 0.5 \sigma_0$$

で表わす考え方である。上式によると  $\Delta Q$  は  $1.9 \text{ t}$  となり、解析値とほぼ等しくなる。

## 4 結 論

架構付耐震壁の解析を行い実験結果と比較した。ここに提案したコンクリートの構成則を用いることにより荷重-変形関係、ひびわれパターン、最大荷重など全般に実験値と良好な対応を得ることができた。コンクリートの圧壊時ひずみ、せん断圧壊時ひずみを変化させると最大耐力は 6% 程変化し、ひずみの限界値が終局近傍の挙動に与える影響は大きいことが判った。また軸力による最大耐力の増加は全補強式による評価結果に近かった。今後破壊時のひずみやひびわれ要素の剛性、耐力の低下率の評価などを含めて実験と照合しながら解析法の適用性を検討していく必要がある。

### 参考文献

- 1) 上田真稔、瀬谷均、毛井崇博「鉄筋コンクリートシェル構造物の有限要素解析」日本建築学会大会要覧集、昭和 58 年 9 月
- 2) 上田真稔、瀬谷均、毛井崇博「RC円筒およびボックス壁がせん断力を受けるときの非線形解析」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、昭和 58 年 10 月
- 3) M.P. Collins, F. Vecchio: "Stress-Strain Characteristics of Reinforced Concrete in Pure Shear", IABSE, Delft, 1981
- 4) 香柳征夫「鉄筋コンクリートシェル要素の面内せん断」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、昭和 57 年 6 月
- 5) 菅野俊介「耐震模範選定試験体」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、昭和 58 年 10 月
- 6) 青山博之、加藤大介、勝俣英雄「増設 RC 耐震壁の耐力と変形能の評価に関する実験的研究」日本建築学会関東支部研究報告集、昭和 57 年 7 月
- 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」、昭和 56 年

表 3 耐震壁の解析と実験結果の比較

試験体 破壊状態	耐震壁 #1			耐震壁 #1'		
	実験 t	解析 t	解析/実験	実験 t	解析 t	解析/実験
柱主筋降伏	125	118	0.94	130	100	0.77
コンクリート圧壊	161	148	0.92	128	120	0.94
最大荷重	161	159	0.99	141	128	0.91

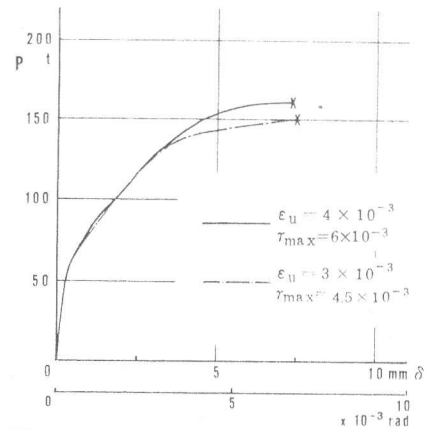


図 14 破壊時ひずみによる荷重-変形関係の違い (#1 試験体)

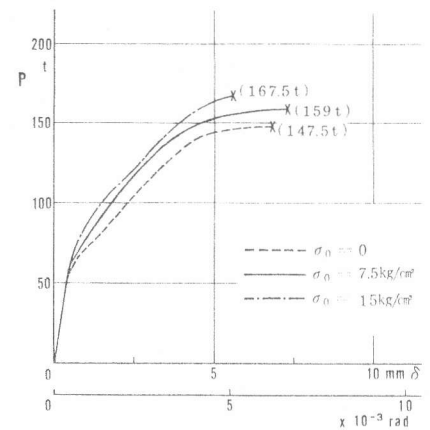


図 15 軸力の影響による荷重-変形曲線の違い (#1 試験体)