

[9] コンクリート構造物の終局耐力におよぼす初期応力の影響

正会員 ○ 遠藤 孝夫(電力中央研究所 耐震構造部)

正会員 田辺 忠顕(名古屋大学工学部)

1. はじめに

マッシュなコンクリートでは、硬化過程における発熱により、温度応力が生じるし、その他乾燥収縮にともなう応力も発生していることが多い。これらの初期応力が、構造物の終局性状にどのような影響を及ぼすかは重要な問題であり、早急な解明が望まれている。

本研究は、鉄筋コンクリート耐震壁の初期応力が終局耐力やひびわれ・破壊性状に及ぼす影響を解析的に明らかにすることを目的に、まず、JCI 選定の鉄筋コンクリート耐震壁を解析し、計算コードの精度を確認し、次にこの鉄筋コンクリート耐震壁に初期応力状態を仮定して解析し、初期応力の有無による終局性状の相違を比較した。

2. 有限要素モデル

本解析では、既往の文献を参考に、図-1に示すようなコンクリートと鉄筋を層状に重ねたモデルを用いた。このモデルを、平面応力状態とみなして、各要素の降伏条件を設定し、各荷重ごとに要素の非線形性による不平衡節点力が収束するまでイタレーションを繰り返す方法をとっている。コンクリートと鉄筋は、8 節点アイソパラメトリック要素でモデル化している。

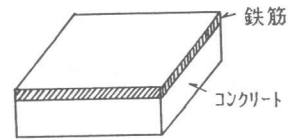


図-1 有限要素モデル

2.1 応力-ひずみ関係

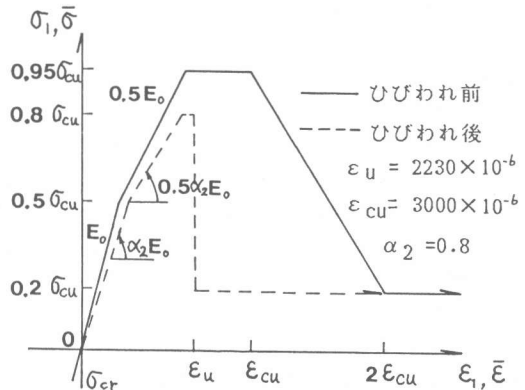
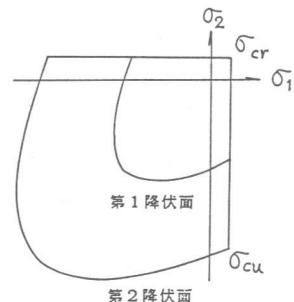
1) 圧縮およびひびわれ前のコンクリート

コンクリートは、図-2に示すように、一軸状態では、引張側で破壊まで弾性体とした。また、圧縮側ではTri-linearとし、第一降伏点までは弾性、第一降伏点から第二降伏点までは塑性とし、終局ひずみ ϵ_{cu} を超えて $2\epsilon_{cu}$ までは負勾配とし、それ以降は圧縮強度 σ_{cu} の0.2倍の応力を保持するものとした。ここで、一軸の最大応力は、実験により得られる一軸圧縮強度の95%とし、第一降伏点は、 σ_{cu} の50%とした。一軸状態で定めたコンクリートの応力-ひずみ関係を二軸状態に拡張するため、降伏関数をVon Mises 式とし、これを塑性ポテンシャルとする流動則にひずみ硬化を考慮して一軸状態に合うように定めた。この際、二つの降伏面は等方硬化を考慮相似形とした(図-3参照)。また、限界ひずみも限界相当ひずみにおきかえた。

2) ひびわれ後のコンクリート

コンクリートは、主応力の最大値が引張強度 σ_c に達したらひびわれが発生するものとし、直交異方性材料として扱う。すなわち、ひびわれと直交方向の剛性を初期剛性の1% ($\alpha_1 = 0.01$) とし、かつ、ひびわれ方向の剛性も次のように低減させるものとした。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 E_{11} & \alpha_1 E_{12} & 0 \\ \alpha_1 E_{12} & \alpha_2 E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{----- (1)}$$

図-2 解析に用いたコンクリートの
応力-ひずみ関係図-3 2軸応力下のコン
クリートのひびわれ発生面と降伏局面

ただし、 $\sigma_1, \sigma_2, \epsilon_1, \epsilon_2$ は、ひびわれ時の主応力方向の角度に関する応力とひずみを表している。ここで、ひびわれ後のコンクリートは、圧縮応力にたいしては図-2のように、剛性のほかに強度も低減させ圧縮ひずみが ϵ_u に達した時に破壊するものとした。ひびわれと直交方向の応力は、テンションスチフネス効果を考慮し、図-4のように考えた。さらに、ひびわれ面におけるせん断剛性は、青柳の実験式¹⁾

$$G = a / \epsilon_n \quad \text{----- (2)}$$

a : 定数(36)

ϵ_n : ひびわれ面に直交する方向のひずみ
を採用し、図-5のように定めた。

特別な場合として、ひびわれが閉じて、ひびわれ面に直交する応力が圧縮の場合は、剛性を復活させるものとした。

3) 鉄筋

鉄筋は、軸剛性のみを有する等価の断面積を持つ異方性板に置換した。鉄筋の応力-ひずみ関係は図-6に示すBi-linearとした。

2.2 非線形解析

解析は、各荷重ステップ毎に要素の接線剛性を定めて、要素の不平衡節点力を収束させるNewton-Raphson法を用いた。

3. 解析プログラムの検証²⁾

3.1 解析の対象とする実験⁴⁾

解析対象として、JCI 選定試験体の耐震壁#1"を選んだ。これは、青山、加藤らによって実験された1層I型のNo.P2012試験体である。この試験体は、壁の左上部分の圧壊とそこから伸びるせん断ひびわれが右下の壁脚部でスリップして破壊が生じている。

3.2 解析モデルと解析条件

図-7に、有限要素分割と、境界条件および加力条件を示す。また、解析で使用した鉄筋比、要素厚およびコンクリートと鉄筋の材料特性を表1~3に示す。

3.3 解析結果

解析により得られた試験体のひびわれパターンと試験結果とを比較して図-8に示す。また、実験と解析の荷重-変位曲線を図-9に示す。これらを見るとせん断ひびわれの発生状況は比較的よく対応しているが、壁の右上部分では一部相違が見られる。また、壁と柱の脚部の圧壊領域は、実験と比較的良好な対応を示しているが、荷重-変位関係では、剛性が高めとなり鉄筋の降伏以後急激に変形が進んでいる。計算耐力は139tonで、実験値(141ton)と近似している。剛性が異なるのは、計算では考慮していない試験体の柱脚部や壁部の鉛直方向鉄筋の下梁からの抜け出しが一因と考えられる。

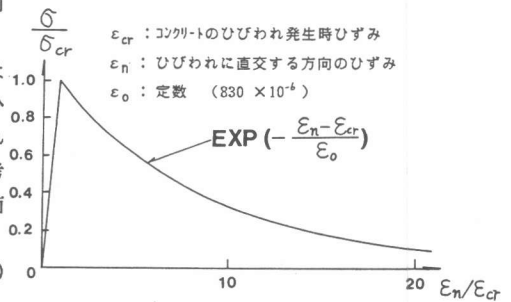


図-4 テンションスチフネス特性をあらわす応力-ひずみ関係

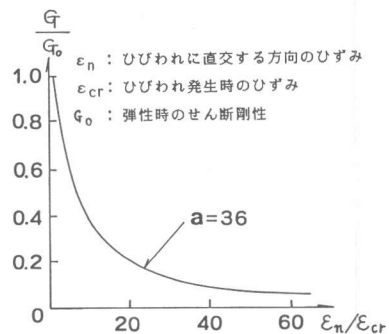


図-5 ひびわれ要素の残存せん断剛性率とひずみ関係

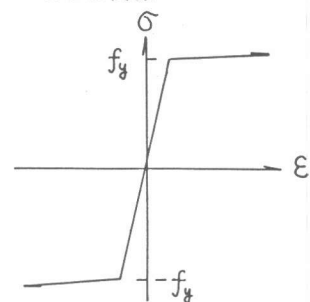


図-6 鉄筋の応力-ひずみ関係

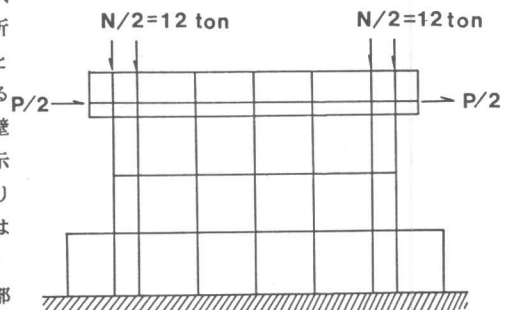


図-7 有限要素分割、境界条件および加力条件

4. 初期応力をもつ鉄筋コンクリート耐震壁の解析

4.1 初期応力

鉄筋コンクリート耐震壁の温度応力等を正確に把握して耐力を求めるためには、3次元解析が必要となるが、ここでは、前記3.で対象とした試験体の壁部分に図-10に示すような理想化したx方向の初期応力を与え、前記3.2と同じ条件(2次元)で解析した。この際、初期応力(σ_0)の最大値が約20kg/cm²の場合をcase 2とし、40kg/cm²の場合をcase 3とした。尚、温度応力計算を行わずに、温度応力としての整合性即ち系全体で釣り合っている平衡応力を与えるのは、かなり難しい問題であったが、ここでは、要素の温度を基準温度から低下させ、線膨張係数に異方性をもたせることにより初期応力を導入した。

表-1 鉄筋比および要素厚さ

	Px (%)	Py (%)	厚さ(cm)
壁	0.853 (D6)	0.853 (D6)	10.0
柱	0.64 (D6)	3.81 (D13)	20.0
上梁	4.18	0.473(D10)	30.0
下梁	4.18	0.473(D10)	30.0

表-2 コンクリートの材料定数

圧縮強度 σ_{cu} (kg/cm ²)	割裂強度 σ_{cr} (kg/cm ²)	ヤング係数 E_0 (kg/cm ²)	ヒックひずみ ϵ_0	ポアソン比 ν
297	23.6	234,000	0.00223	0.167

表-3 鉄筋の材料定数

	降伏応力 σ_y (kg/cm ²)	剛性 E_s (kg/cm ²)
D 6	3,620	2,100,000
D 10	3,530	2,100,000
D 13	3,680	2,100,000

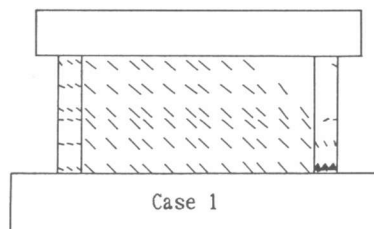
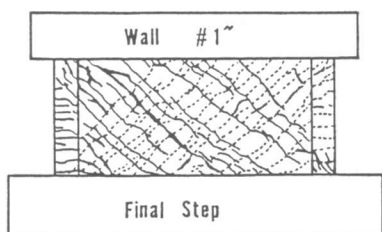


図-8 ひびわれパターン

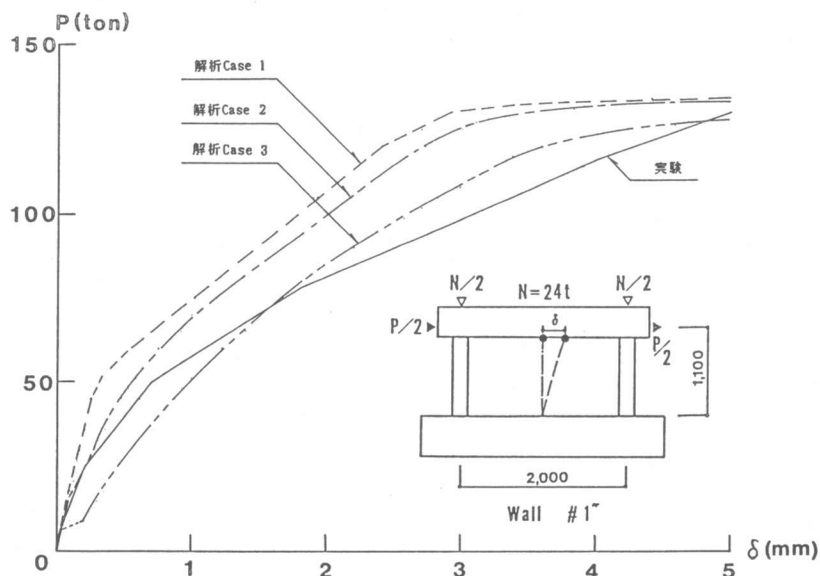


図-9 荷重-変位曲線

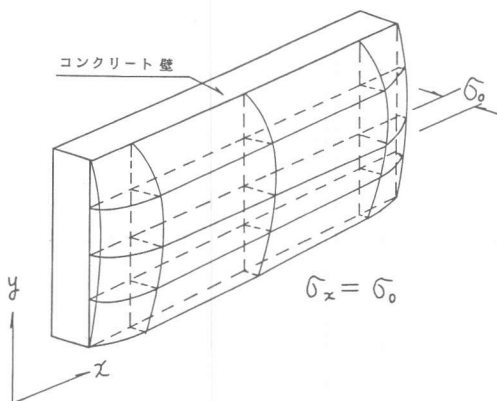


図-10 仮定した初期応力

4.2 解析結果

a. 初期応力が小さい場合 ($\sigma_0 = 20 \text{ kg/cm}^2$)

解析で得られたひびわれ・破壊性状を図-11に、荷重-変位曲線を図-9に示す。これらより、ひびわれの方向は、初期応力の影響により鉛直に近ずき、鉄筋の降伏が初期応力のない場合に比べて低い荷重で生じた。また、荷重-変形の関係は、初期応力の無い場合に比べて剛性が低く現れるが、耐力はほぼ等しくなった。

b. 初期応力が大きい場合 ($\sigma_0 = 40 \text{ kg/cm}^2$)

この場合は、初期応力により図-12に示すような鉛直ひびわれが発生し、鉄筋の水平方向応力は $300 \sim 600 \text{ kg/cm}^2$ にも達する。その後、水平荷重を増加させると上・下梁付近に斜めひびわれが発生し次に、鉛直ひびわれが閉じて、新たに 45° 方向の斜めひびわれが発生する (図-13参照)。最終的には、右の柱脚部コンクリートの圧壊や壁の中央付近の鉄筋が降伏して、破壊に至っている (図-14参照)。計算上の耐力は、約129tonで、初期応力の無い場合の139tonに比べて7%程低くなっている。

5. まとめ

鉄筋コンクリート耐震壁にある理想化した初期応力を仮定し、終局耐力、終局性状に及ぼす初期応力の影響を解析的に検討した結果、初期応力により、剛性が低下し、耐力も低下する計算結果が示された。これは一例に過ぎないが初期応力の影響を示唆しているものと考えられ、今後更に詳しい検討を必要とする。

参考文献

- 1) 上田真稔他：鉄筋コンクリートシェル構造物の弾塑性解析、竹中技術研究所報告第31号、1985。5
- 2) 井上範夫他：コリンズ理論に基づくRC弾塑性解析法、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、1985
- 3) 山田嘉昭著：塑性 粘弾性、培風館、昭和55年12月
- 4) 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

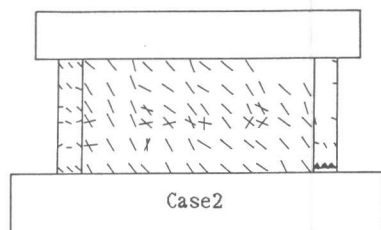


図-11 解析におけるひびわれ・破壊性状

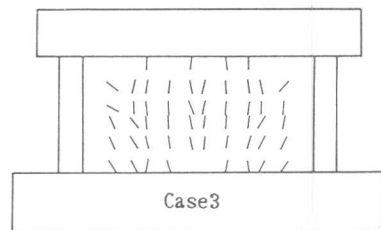


図-12 初期応力開放後のひびわれ性状

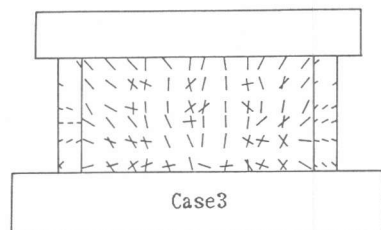
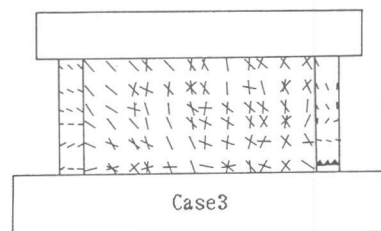


図-13 二次ひびわれの発生状況



▲ --- コンクリート圧壊

図-14 終局ひびわれ性状