

[103] 鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性パラメータ解析

菅野 忠 (鹿島建設武藤記念研究室)

正会員 井上 範夫 (鹿島建設武藤記念研究室)

正会員 小 鹿 紀 英 (鹿島建設武藤記念研究室)

正会員 ○ 鈴木 紀 雄 (鹿島建設武藤記念研究室)

1. はじめに

荷重-変形関係のような、RC構造物の全体的な挙動を大きく捉えるには、従来のFEMのような精密な解析法よりも、RCの構成則を取り入れたやや大まかな解析法の方が便利である。Collinsが、RC平板の実験より導いたRCの構成則¹⁾は、簡単で明解なものであり、FEM解析に利用しやすいと考えられる。しかしCollinsの実験は、試験体の鉄筋として溶接金網を使用しており、更に大半の実験が純せん断加力であるため、異形鉄筋を使い、しかも曲げせん断力を受けるような一般の耐震壁の解析に、Collinsの構成則をそのまま使用することの妥当性には疑問が残る。そこで本論文では、Collinsの構成則を取り入れたFEMプログラムにより、鉄筋比とシアスパン比をパラメータとした解析を行い、実験結果と比較することで、解析法の適用性と問題点を明らかにすることにした。

2. 解析方法

解析方法の概要を述べる。

- (1) 鉄筋は断面積が等価な面材としてモデル化し、バイリニアタイプの復元力特性を与える。
- (2) コンクリートは、4節点のアイソパラメトリック要素で表す。
- (3) コンクリートの圧縮-圧縮応力下、ひびわれ前の圧縮-引張および引張-引張応力下の構成則は、Darwinらの等価一軸歪に基く直交異方性モデルとする。
- (4) ひびわれた後の圧縮-引張応力下のコンクリートの構成則はCollinsのモデルとする。すなわち、

- i) 主応力と主歪の方向は一致する。
- ii) 主圧縮応力-歪関係は次式とする。

$$\sigma_d = F_c \times \left[2 \times \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_o} \right) - \beta \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(1)$$

$$\beta = 0.85 - 0.27 \epsilon_{dt} / \epsilon_d \dots\dots\dots(2)$$

- iii) 主引張応力-歪関係はTension Stiffening 効果を考え、次式で表現する。

$$\sigma_{dt} = f_{cr} \frac{1}{1 + \left(\frac{-\epsilon_{dt}}{0.005} \right)^{0.5}} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、(1)~(3)式で、 σ_d, ϵ_d : 圧縮応力度と歪度、 $\sigma_{dt}, \epsilon_{dt}$: 引張応力度と歪度、 F_c : 圧縮強度、 f_{cr} : 引張強度、 ϵ_o : 圧縮強度時歪度である。

3. 解析対象

解析対象として、千葉らが原子炉建屋の耐震要素を想定して行った耐震壁の実験試験体²⁾を選んだ。この実験では、軸力、壁補強筋比、シアスパン比の3種類のパラメータが選ばれているが、本解析では軸力は20 kg/cm²と一定にし、表-1のような壁補強筋比とシアスパン比をパラメータとした。

試験体の基本形状と加力方法を図-2、図-3に示す。水平力は、上部はりに緊結された鉄骨部材の両端を押し引きすることで加えられている。また、軸力は、はり上部に敷いたゴムマットを介して加えることにより、柱と壁

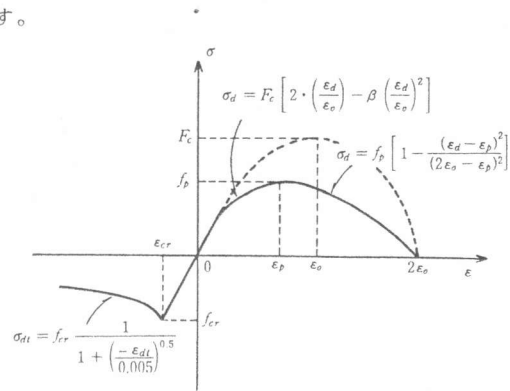


図-1 ひびわれ後のコンクリートの1軸特性

に一樣な鉛直応力度が生じるように工夫されている。

4. 解析モデル

シアスパン比が0.6の試験体の要素分割を図-4に示す。柱とはりの主筋およびせん断補強筋は、壁筋と同じく断面積が等価な面材として表した。

実験で使用された加力用の鉄骨は、はりに並列した部材としてモデル化し、はりの要素との間を剛なばねで連結することで表現した。また、軸力を加えるのに使用されたゴムマットは弾性要素でモデル化し、鉛直方向の剛なリンクばねではりと連結した。

Tension StiffeningはCollins式で表す。以後、この解析を「解析1」と称する。

5. 解析結果

実験では、いずれの試験体も、①せん断ひびわれの発生、②曲げひびわれの発生、③引張側柱主筋の引張降状、圧縮側柱脚と壁脚の圧壊、④壁補強筋の引張降状、と続き、最後は壁の圧壊部分を結ぶすべりが生じて破壊に至った。

解析でも、①せん断ひびわれの発生、②曲げひびわれの発生、③引張側柱主筋、壁補強筋の引張降状と続き、最終的には壁脚の圧壊によって耐力に至った。

実験終了時のひびわれと、解析における最大耐力時のひびわれを、図-5に示す。ひびわれの方向は、実験結果に対応している。

図-6に、各試験体の水平力と層間変形角の関係を実線で示す。破線で表した実験結果と比較すると、解析結果は、かなり変形が小さくなっている。

この原因としては、次のようなことが考えられる。

表-1 試験体一覧

シアスパン比	補強筋比	0.6%	1.2%	2.0%	軸方向応力度
0.4			No. 8		20kg/cm ²
0.6		No. 2	No. 1	No. 5	同上
0.8			No. 9		同上

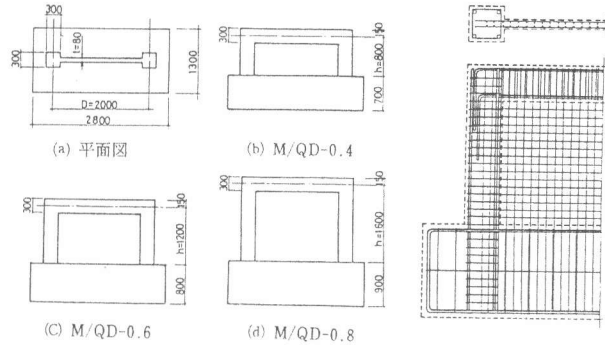


図-2 試験体(文献2)

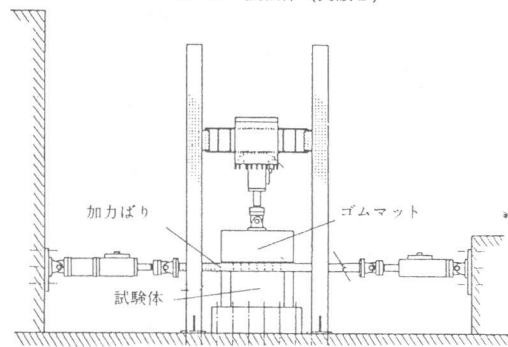


図-3 加力装置(文献2)

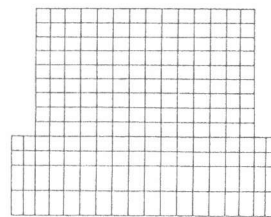


図-4 要素分割図 (M/QD-0.6)

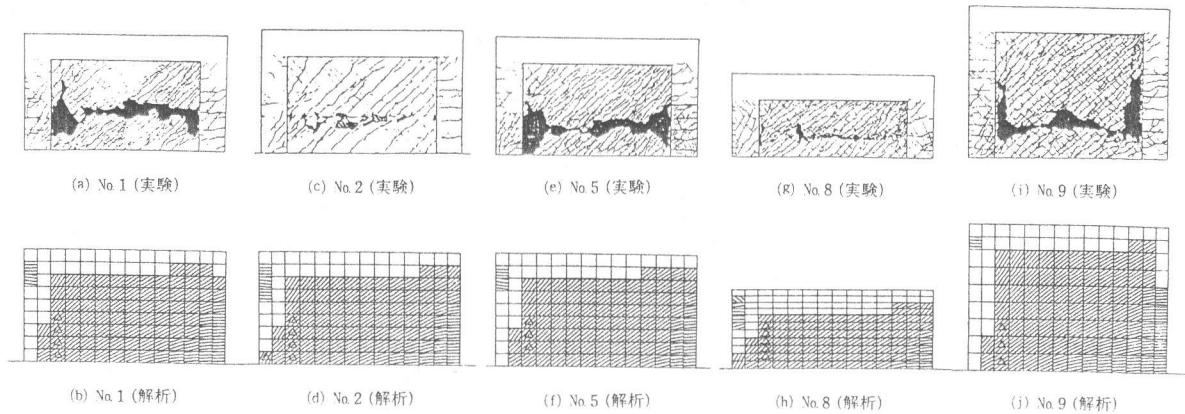


図-5 ひびわれ図

(1) 実験では、柱脚や壁脚において主筋が基礎から抜け出すことにより、回転変形が生じている。この抜け出しを表すためには、鳥谷らが行った FEM 解析のように、柱脚および壁脚と基礎との間にばねを入れるなどの工夫が必要である。本解析では、このような処理を行っていないため、抜け出しによる回転変形は表現されていない。

(2) Tension Stiffening の効果が適切に評価されていない可能性がある。Collins の提案した式は、溶接金網を使用した実験より得られたものであり、異形鉄筋を使った耐震壁にそのままあてはめることには疑問がある。

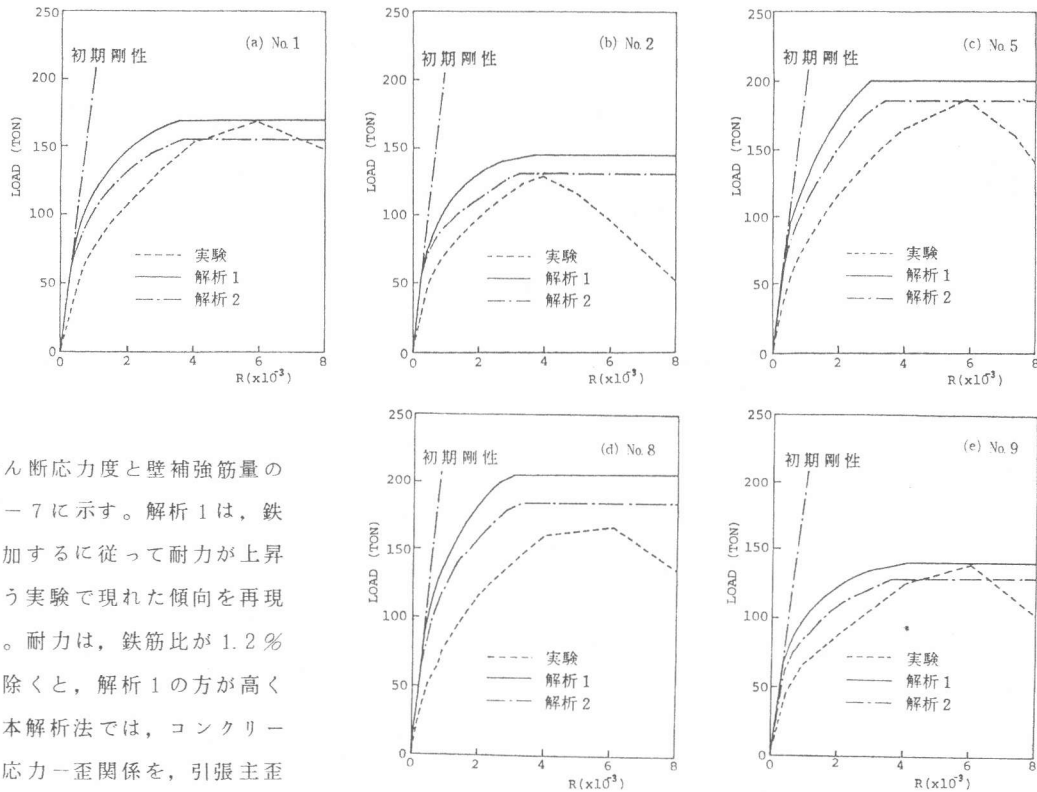


図-6 荷重-変形関係

最大せん断応力度と壁補強筋量の関係を図-7に示す。解析1は、鉄筋比が増加するに従って耐力が上昇するという実験で現れた傾向を再現している。耐力は、鉄筋比が1.2%の場合を除くと、解析1の方が高くなった。本解析法では、コンクリートの圧縮応力-歪関係を、引張主歪と圧縮主歪の比で変化させている。Tension Stiffening の仮定を変えると、引張歪の値が変化するため、コンクリートの圧縮応力-歪関係が異なったものとなる。このため、Tension Stiffening の評価方法次第で壁の耐力の解析値が異なることが考えられる。この点については後ほど検討する。

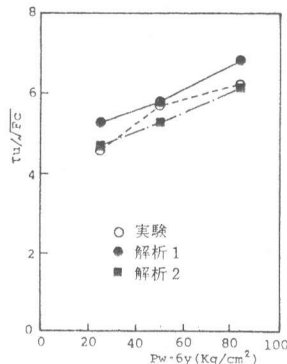


図-7 最大せん断応力度-壁補強筋関係

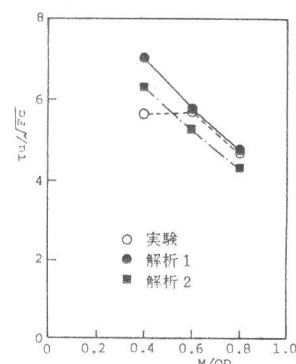


図-8 最大せん断応力度-シアスパン比関係

最大せん断応力度とシアスパン比の関係は、図-8のようになっている。シアスパン比が0.6の試験体と0.8の試験体では、実験値と解析1はほぼ等しくなった。しかしシアスパン比0.4の試験体の耐力は、実験では0.6の試験体とほぼ同じであるが、解析1ではかなり高めの値となった。シアスパン比が小さくなることによる破壊メカニズムの変化を、本解析モデルでは表現できていないことが考えられる。今後の検討課題の一つである。

6. Tension Stiffeningの影響

鉄筋比が0.6%の平板と2%の平板を1軸で引張ったとき、Tension Stiffening にCollins の提案式を使った場合の平均応力-平均歪関係は、図-9の実線のようになる。ただし、ひびわれ発生後の引張応力は、鉄筋の引張降

伏で決まる強度よりは大きくなると仮定した。Collins の式は、歪の増加に伴う引張応力の低下の割合が小さいため、Tension Stiffening が大きく評価されている。

一方、現実の耐震壁では、壁補強筋の間のコンクリートの応力分布は一樣とはならず、鉄筋から離れたコンクリートの引張応力-歪関係は、むしろプレーンコンクリートに近くなると考えられる。同様な考えは Gilbert の提案 (図-10)

にも現れている。

従って、Tension Stiffening を表わすコンクリートの応力-歪関係は、コンクリートに固有なものではなく、鉄筋の径や間隔によって異ってくるものであろう。しかし、このような要因を含めた形で Tension Stiffening を評価することは容易でないのが現状なのでここでは、Gilbert の式など

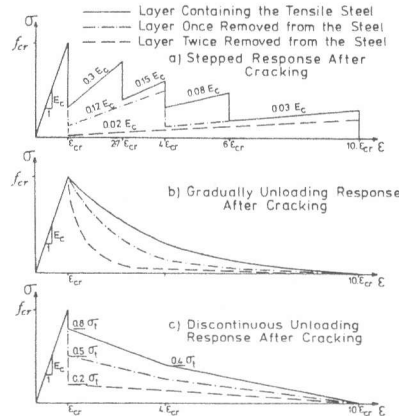


図-10 Tension Stiffening モデルの例 (文献 4)

を参考にして、図-11 のような形を仮定し、各試験体の解析を行うことで、Tension Stiffening の影響を調べてみるに留める。この解析を「解析 2」と呼ぶ。解析結果のうち、荷重-層間変形角関係を図-6 に一点鎖線で示す。また、最大せん断力と壁補強筋量、シアスパン比の関係を図-7、図-8 に ■ で示す。解析 1 に比べて、変形が増加し、耐力が低下する結果となった。

7. 結論

Collins が提案した RC の構成則を利用した FEM 解析プログラムにより、RC 耐震壁のパラメトリック解析を行った。変形が小さめに評価される、シアスパン比が小さい壁の耐力を高め計算する、といった問題点は残っているが、これらの点に検討、改良を加えることにより、実用的な解析法となり得ると考えられる。

謝辞 本研究に対し御助言頂いた鹿島建設情報システム部の宮下丘氏、森川博司氏、速水由紀夫氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) Collins, M.P. and Vecchio, F. "The Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses," ISBN Pub. No. 82-03 Univ. of Toronto, 1982.
- (2) 千葉修, 他「建屋の復元力特性に関する研究 その 8, その 2」58 年日本建築学会大会学術講演梗概集 PP. 1509-1510, 59 年日本建築学会大会学術講演梗概集 PP. 2375-2376
- (3) 鳥谷利夫, 他「高配筋耐震壁の最大せん断耐力に関する検討」RC 構造の有限要素解析に関するコロキウム梗概集 PP. 173-178, 昭和 59 年
- (4) Gilbert, R.I. and Warner, R.F. "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Slab," ASCE, ST12, 1987.12

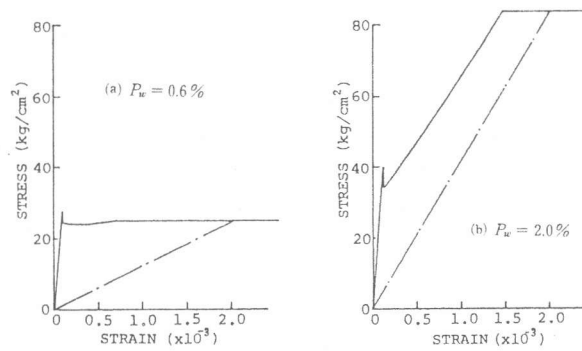


図-9 引張時の応力-歪関係

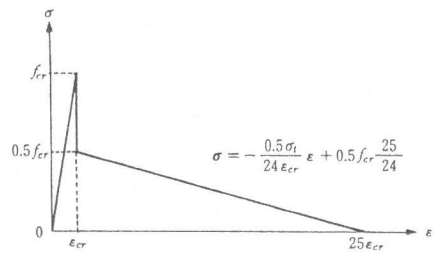


図-11 仮定した Tension Stiffening モデル(解析 2)