

## [105] 鉄筋コンクリート造耐震壁の非線形解析

町田 亘寛（熊谷組 原子力開発室）  
 正会員○白石 一郎（熊谷組 原子力開発室）  
 中村 善郎（熊谷組 原子力開発室）  
 正会員 狩野 芳一（明治大学 工学部）

### 1. はじめに

筆者等は、鉄筋コンクリート（以下 R C と呼ぶ）造円筒壁や円錐台壁のシェル構造物に対して、FEM による解析的研究を行なってきた。本研究は、解析プログラムの追加、修正を行ない、R C 造耐震壁に対して解析を試みたもので、ここでは解析プログラムの検証および最大せん断耐力への壁せん断補強筋効果に関する数値実験結果について報告する。

### 2. 解析法

本解析法は、FEM による材料非線形解析法であるが、詳細は文献 1)、2) に述べてあるので、ここでは、追加、修正した点について述べる。

**2.1 非線形計算法** 本解析では、変位増分法を導入することにより、最大耐力付近およびそれ以降の解析が可能になっている。ただし、一般に解析対象の剛性が高い範囲では、荷重増分法による方が変位増分法に比べて精度良く計算できるため、今回の解析では、荷重増分法も併用している。

**2.2 材料特性** 付帯ラーメン付耐震壁に対して、二次元解析を行なう場合には、柱のコアコンクリートの帶筋による面外方向の拘束が考慮できない。そこで、本解析では、帶筋により面外方向にも拘束された柱のコアコンクリートは、面外方向の拘束の小さい壁板コンクリートよりも剛性が改善されるものとして、図 1 のように仮定した。図 1 中の  $\varepsilon_{50h}$  は、Park 等の提案による式(1)により評価した。

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4} P'' \sqrt{b''/S} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $P''$ ：帶筋の容積鉄筋比、 $b''$ ：帶筋で囲まれた長方形の短辺の長さ、 $S$ ：帶筋のピッチ

本解析では、帶筋の拘束による強度の増加は考慮していない。また、二次元解析では、柱のコアコンクリートとかぶりコンクリートが、明確に区別できないため、ここでは、柱をすべてコアコンクリートとしている。

### 3. 解析プログラムの検証

解析プログラムの検証のために、JCI 耐震壁選定試験体のうち、Wall #1、#1" の 2 体に対して解析を行なった。#1 および #1" は、共にせん断破壊した試験体であり、両者の形状、配筋は同一であるが、柱断面積が #1 は #1" の 2 倍となっている。試験体の諸元は、文献 5) 参照としてここでは省略する。

**3.1 解析モデル** Wall #1" の解析モデルを図 2 に示す。コンクリートは四辺形要素を用い、柱梁の主筋は線要素を用いている。壁および柱梁のせん断補強筋は、鉄筋層として、四辺形要素としている。

**3.2 解析結果** 解析結果の荷重 - 変位関係を図 3 に示す。図より、最大耐力までの挙動は、実験結果とよく一致している。Wall #1 と #1" を比較すると、実験結果で、柱断面積の大きい #1 が #1" に比べて、剛性、最大耐力および最大耐力時の変形が大きくなっているが、解析結果も同様の傾向を示している。最大耐力以降の挙動は、実験結果と解析結果がやや異なっている。最大耐力以降の挙動は、コンクリートのひずみ軟化域の仮定に大きく影響されるが、これを、さらに検討していく必要があると思われる。

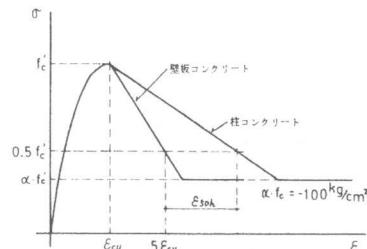


図 1 コンクリート応力-ひずみ関係

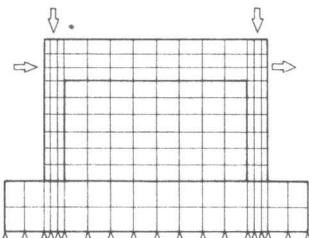


図 2 解析モデル (wall #1")

次に、Wall#1の最大耐力付近の主応力図を図4に示し、破壊状況を実験結果と解析結果を比較して図5に示す。両図より、解析においても、実験結果の破壊状況を追跡できているといえる。

**3.3 変位増分量による荷重一変位関係の違いと計算精度** Wall#1について、変位増分量 $\Delta\delta$ を0.25、0.5、1.0mmとした3ケースの計算を行ない、解析結果に与える影響について検討した。なお、各増分ステップでの収れん計算は、5回まで行なっている。解析結果の荷重一水平変位関係と誤差 $e$ を図6に示す。各荷重ステップでの誤差 $e$ は、式(2)より評価した。

$$e = \sqrt{\sum(\Delta F_i)^2} / \sqrt{\sum(out F_i)^2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\Delta F_i = out F_i - in F_i$ ：不釣合力、out  $F_i$ ：外力、in  $F_i$ ：要素応力より計算した等価節点力、 $i$ ：節点自由度

図6より、荷重一水平変位関係では、3ケースの計算結果にほとんど差がみられない。また、計算精度については、変位増分により計算している範囲では $\Delta\delta=1.0\text{mm}$ の場合に、やや誤差の大きいところもみられるが、それ以外は、ほぼ1.0%以下に収まっている。水平変位の小さい範囲で、やや誤差が大きくなっているが、この範囲では、解析対象の剛性が高く、収れん計算回数を増して誤差を減少させても計算結果には、ほとんど影響しないと思われる。

以上の検討結果から、本解析プログラムにより実験結果をほぼ追跡でき、数値計算精度も十分であると思われる。なお、Wall#1および4章での数値実験では、変位増分量を0.5mmとして解析した。

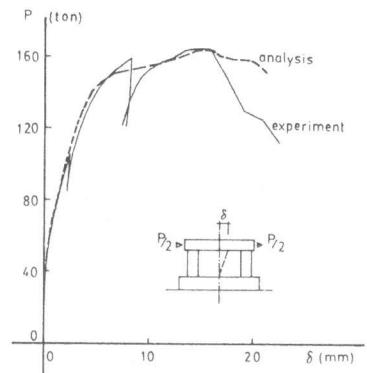
#### 4. 壁せん断補強筋効果に関する数値実験

せん断破壊する耐震壁の最大耐力に関する壁せん断補強筋の効果を把握するための数値実験を行なった。数値実験の対象としては、千葉等の行なった高配筋耐震壁の実験を取り上げた。この実験は、壁補強筋比 $P_w$ を0.6、0.8、1.2、1.6、2.0%と変化させて行なったもので、各試験体ともにせん断破壊したと報告されている。各試験体の形状、配筋および材料特性は、文献6)、7)を参照することとして、ここでは省略する。解析モデルを図7に示す。解析に用いた有限要素は、JCI耐震壁選定試験体の場合と同様である。

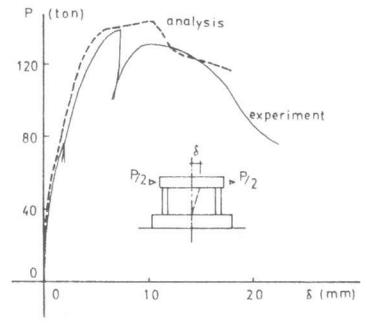
##### 4.1 数値実験

数値実験として、次の3通りの計算を行なった。

- (1) Analysis 1 ..... 壁せん断補強筋比 $P_w$ の効果を調



(a) wall #1



(b) wall #1''

図3 荷重-変位関係

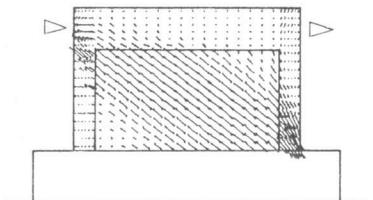


図4 主応力図(wall #1')

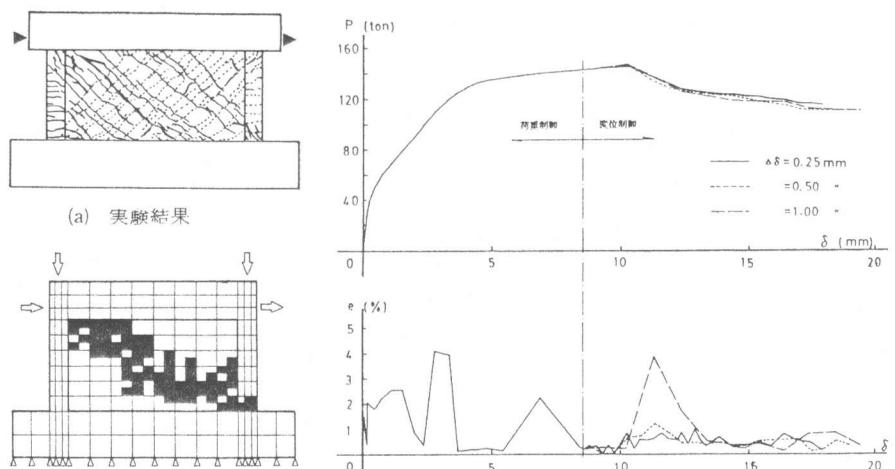


図5 破壊状況(wall #1'')

べるための解析で、 $P_w=0.6, 0.8, 1.2, 1.6, 20\%$ と変化させ、その他の配筋および材料特性は $P_w=1.2\%$ の試験体と同一とした解析。

(2) Analysis 2……実験結果との対応を調べるためにも、 $P_w=0.6, 1.2, 20\%$ の3体に対して、試験体諸元を合わせて行なった解析。

(3) Analysis 3……柱主筋が降伏しない場合の壁せん断補強筋の効果を調べるためにの解析。 $P_w=0.6, 1.2, 20\%$ の3体について、柱主筋降伏応力度を実験結果の10倍とし、その他は、Analysis 1と同様にして行なった解析。

**4.2 解析結果** 解析結果の一例として、 $P_w=1.2\%$ の試験体の荷重-水平変位関係を図8に示すが、解析結果と実験結果は、ほぼ対応している。次に、実験結果および解析結果の最大耐力と壁補強筋量の関係を図9に示す。図より、試験体の諸元に合わせて解析したAnalysis 2では、実験結果と解析結果がよく対応していることがわかる。また、壁せん断補強筋比 $P_w$ のみを変化させたAnalysis 1では、 $P_w$ の増加に対して、耐震壁の耐力は実験結果ほど増加していない。

**4.3 最大せん断耐力への壁せん断補強筋の効果** 図9にAnalysis 1に対する<sup>注1)</sup>、Analysis 2に対する<sup>注2)</sup>曲げ降伏荷重および曲げ終局荷重を示すが、 $P_w=0.6, 0.8\%$ の最大荷重が曲げ終局荷重に近いが、それ以外は曲げ終局荷重を下まわっている。また、図10に $P_w=0.8\%$ の試験体の壁縦筋のひずみ分布を示すが、引張側柱主筋降伏時にも、縦筋は壁板ほぼ全域で引張ひずみとなっており、曲げの影響はあまりないといえる。したがって、Analysis 1の最大耐力は、曲げの影響はあまりなく、せん断破壊により決まっていると思われる。

壁板にひびわれが発生した後の付帯ラーメン付耐震壁のせん断抵抗機構は、図11に示すように、柱梁による抵抗機構と壁板によるそれに分けられ、さらに、壁板の抵抗機構は、せん断補強筋によるものと、付帯ラーメンの拘束によるものに分割できると仮定する。せん断補強筋による抵抗機構は一般に横筋によるものと考えられるが、本数値実験の対象としたような形状の耐震壁では、コンクリートの斜め圧縮力は、壁板内で一様な分布ではなく、壁対角線近くで大きくなる(図4参照)。このように、斜め圧縮力が、梁部分に多く流れると、壁板は水平方向より鉛直方向に大きく広がる。したがって、コンクリートの斜め圧縮力に対しては、横筋よりはむしろ縦筋が有效地に抵抗していると考えられ、本解析では、壁せん断補強筋の抵抗機構としては、縦筋の抵抗機構と考える。ひびわれの角度は、実験および解析で、ほぼ $45^\circ$ であるので、縦筋の抵抗機構による負担せん断力 $wQ$ は、式(3)で求められる。

$$wQ = P_w \sigma_v t \epsilon \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $P_w$ : 壁補強筋比、

$\sigma_v$ : 縦筋の応力度、 $t$ : 壁厚、

$\epsilon$ : 壁板の内なり長さ

ここで、縦筋の応力度は、壁板内でほぼ均等であるので、最大耐

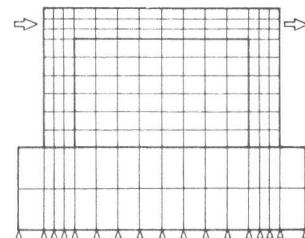


図7 解析モデル図

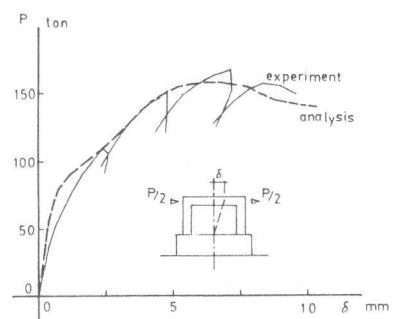


図8 荷重-変位関係( $P_w=1.2\%$ )

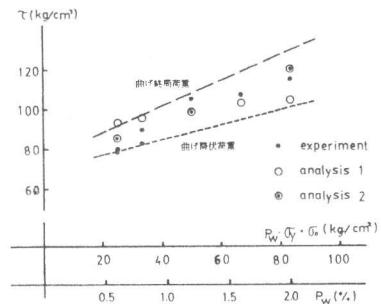


図9 最大耐力と壁補強筋量の関係

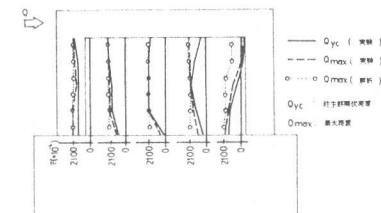


図10 縦筋ひずみ分布( $P_w=0.8\%$ )

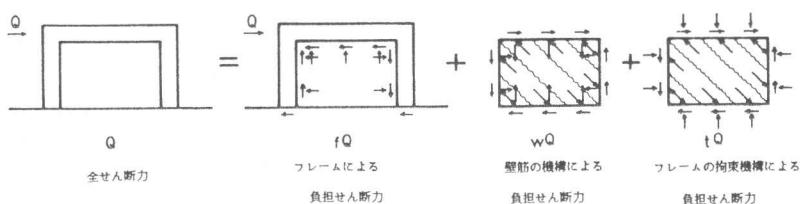


図11 耐震壁の抵抗機構

力時までに吸収したエネルギーより、式(4)で計算した等価な応力を用いた。

$$\sigma_{ve} = \sqrt{\frac{2Eg}{Pw\epsilon_h}} \leq \sigma_y \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここに、E : 壁筋の弾性係数、 $\epsilon$  : 壁板全域の縦筋の最大耐力時の吸収エネルギー、h : 壁の内高さ、 $\sigma_y$  : 降伏応力度

また、柱の負担せん断力  $fQ$  は、計算結果の柱脚のせん断応力度から計算し、付帯ラーメンの拘束による負担せん断力  $tQ$  は、全せん断力から、 $fQ$  と  $wQ$  を差し引いて求めた。上記の方法により計算した結果を図12に示す。図より、 $fQ$  はほぼ一定であり、 $wQ$  は、 $P_w\sigma_y$  の増加とともに増大するが、それに反して、 $tQ$  は減少しているので、耐力は  $wQ$  の増加ほどには上昇していないことがわかる。柱主筋を降伏させないようにして解析した Analysis 3 でも、同様な傾向となっている。

壁板のせん断破壊で耐力が決まる耐震壁において、 $P_w\sigma_y$  の増加に対して斜めコンクリートプレースの強度や圧縮力を有効に伝達する断面積が変化しなければ、耐力は増加しないことになる。Analysis 1, 3 の数値実験結果で、 $P_w\sigma_y$  の増加に伴い、耐力が増加する理由としては、壁せん断補強筋による拘束効果のために、斜め圧縮力を有効に伝達する領域が広がること、および、ひびわれ直交方向ひずみの減少による、ひびわれ平行方向の圧縮強度の上昇などが考えられる（図13参照）。図12には、広沢式による計算結果も示してあるが、FEMの解析結果と同様の傾向を示している。

ただし、広沢式では、 $P_w\sigma_y$  の増加に対して、耐力は  $2.7\sqrt{P_w\sigma_y}$  だけ増加することになるが、これは、せん断補強筋による直接の耐力上昇と考えるよりは、拘束効果による間接的な耐力上昇と考えるべきであろう。

## 5.まとめ

- (1) 本解析プログラムにより、RC造耐震壁の最大耐力に至るまでの非線形挙動をかなり良く追跡できる。しかし、最大耐力以降の挙動は、実験結果とやや差がみられ、さらに検討が必要と思われる。
- (2) 最大耐力への壁せん断補強筋効果に関する数値実験によれば、壁板のせん断破壊で耐力が決定する場合には、 $P_w\sigma_y$  の増加に対して、耐力はあまり上昇しない。また、その耐力上昇は、せん断補強筋による直接的な耐力上昇というよりは、拘束効果による斜めコンクリートプレースの強度やその有効断面積の増加などによる間接的な耐力上昇と考えられる。ただし、本数値実験結果は、今回対象としたような形状で、梁が剛強な耐震壁に対してであり、一般的な壁せん断補強筋の効果については、さらに研究ていきたい。

謝辞 本数値実験にあたり、貴重な実験資料を提供して頂いた、戸田建設㈱ 千葉 脩氏に深く感謝致します。

また、本研究に対して、有益な助言を頂いた明治大学工学部 高木仁之氏に深謝致します。

## 参考文献

- 1) 町田、白石他：「プレストレストコンクリート造円筒壁の水平加力実験と解析その3」 日本建築学会大会梗概集 S 5 8.9
- 2) 町田、白石他：「プレストレストコンクリート造円筒壁の水平加力実験と解析その5」 日本建築学会大会梗概集 S 5 9.1.0
- 3) MACHIDA, T. AMAMURA et al.: Experimental study on the Strength and Deformation Characteristics of Shield Wall for BWR Type Reactor Building: 8th International Conference on SMIRT Brussels, Belgium 19-23 August, 1985
- 4) Kent D.C. and Park R.: Flexural Members with Confined Concrete : Proc. of ASCE, Vol. 97, AST7, July 1971
- 5) 菅野俊介：「耐震壁選定試験体の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 1983.1.0
- 6) 千葉 脩他：「建屋の復元力特性に関する研究 その2.1, 2.2, 2.5, 3.0」 日本建築学会大会梗概集 S 5 9.1.0
- 7) 鳥谷利夫他：「高配筋耐震壁の最大耐力に関する検討」RC構造の有限要素解析に関するコロキウム 1984.1.2
- 8) M. P. Collins et al.: The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses: Univ. of Toronto Department of Civil Engineering March 1982
- 注1)  $M_y = 0.8 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.2 \cdot a_w \cdot \sigma_w \cdot D + 0.5ND(1 - N/BDFc)$
- 注2)  $M_u = 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.4 \cdot a_w \cdot \sigma_w \cdot D + 0.5ND(1 - N/BDFc)$

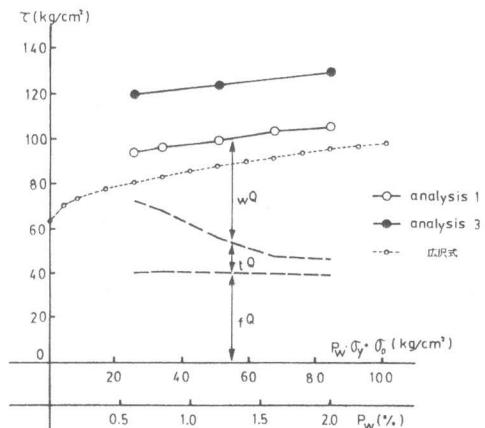


図12 最大耐力と壁補強筋量の関係

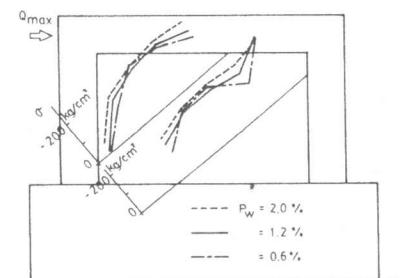


図13 コンクリート斜め圧縮応力度の分布