

論文 鉄筋コンクリート建物の構造解析における耐震壁のモデル

陳 少華^{*1}・壁谷澤 寿海^{*2}

要旨：本研究では、鉄筋コンクリート建物の構造解析のため、軸力とせん断力と曲げモーメントを受ける耐震壁を側柱及び上下梁の軸バネと平面応力状態下の4節点パネル要素の組み合わせとしてモデル化する手法を示した。4節点アイソパラメトリック要素(適合要素)では面内曲げ変形によるせん断変形が評価されるので、曲げ変形が生じる耐震壁の4節点パネル要素には、より正確に要素内の変形を表わすために、非適合四辺形要素法を提案した。上下梁では、曲げ剛性を剛とし、軸バネの剛性は側柱の拘束効果を考慮して評価した。側柱は軸方向剛性のみを考慮する。

キーワード：鉄筋コンクリート、耐震壁、パネル要素、適合要素、非適合要素

1. はじめに

地震力を受ける耐震壁には軸力、せん断力と曲げモーメントが作用し、壁部分が平面応力状態にある。従来、鉄筋コンクリート建物の構造解析における耐震壁の部材モデルは、地震応答解析や実務では柱、梁部材と同様に簡略な線材モデルが用いられることが多い。例えば、ビームモデル、トラスモデル、3本柱モデル¹⁾、多数鉛直バネモデル²⁾、ファイバーモデルなどがある。ただし、これらの耐震壁の部材モデルでは、平面応力状態にある耐震壁を一軸問題に簡略しているので、軸力とモーメントとせん断力の相互作用は考慮されない。一方、著者らの既往研究³⁾では、4節点アイソパラメトリック要素を用いて、耐震壁を一つの平面応力状態下のパネル要素としてモデル化した。本研究では、面内曲げ変形を考慮できる非適合四辺形要素を提案し、耐震壁をモデル化する。

本研究の目的は、鉄筋コンクリート建物の構造解析のため、平面応力状態下のパネル要素を用いて、十分な精度と一般性を持つ耐震壁の部材モデルを開発することである。また、提案した耐震壁パネル要素モデルについて、既往の静

的曲げせん断実験(15体)の解析により、パネル要素上下梁軸変形の有無の影響、適合要素と非適合要素の解析結果の違いを考察する。

2. 耐震壁及びパネル要素モデルの構築

2.1 解析モデルの構築

本研究では、側柱と上下梁で構成される連層構造を有する鉄筋コンクリート耐震壁を研究対象とする。このような構造の応力伝達特徴は、両側の側柱が大きな圧縮軸力及び引張り軸力を負担し、曲げモーメントに抵抗することと、壁部分がせん断力のほとんど及び曲げモーメントと軸力の一部を負担することと、上下梁が壁の圧縮ストラットによる引張り力を負担することにある。耐震壁の変形特徴は、連層壁の縦方向を部材軸として一つの曲げ部材と見なされ、断面の平面保持仮定が適用できるものとされる。また、耐震壁の構造形式より、側柱の剛性が壁より高く、壁剛性と別に考慮することが必要である。壁の横方向膨らみに対する側柱拘束効果は上下梁の軸バネの附加剛性として評価される。このようなことから、本研究では、側柱が軸剛性のみを考慮し、壁を一つの平面応力状態下の

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京大学教授 地震研究所 工博 (正会員)

パネル要素とし、上下梁が曲げ剛性無限大で軸剛性を考慮する方法で鉄筋コンクリート耐震壁を図-1のようにモデル化する。なお、パネル要素の節点変位と節点力は、図-2のように設定する。

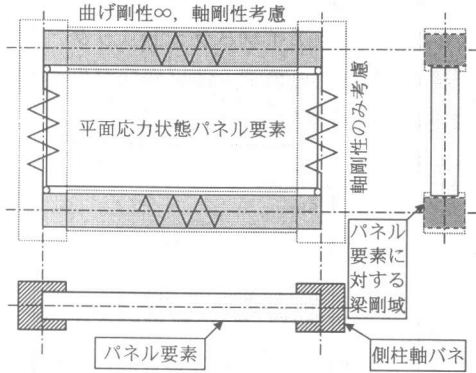


図-1 耐震壁解析モデルの構築

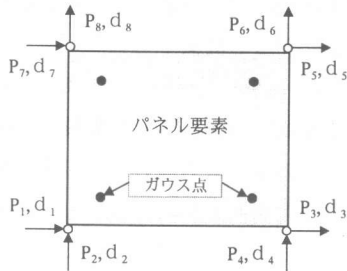


図-2 パネル要素の節点変位と節点力

2.2 パネル要素の構築

RC パネル要素は、分散ひび割れモデルに基づき、要素内の平均応力-平均ひずみ関係を用いて鉄筋要素とコンクリート要素の重ね合わせとして構築される(図-3)。

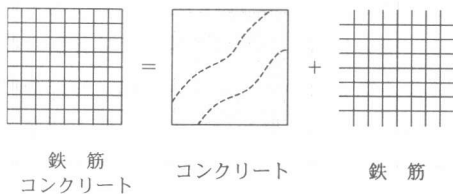


図-3 RC パネル要素の構築

コンクリート要素の構成則は、引張りモデル、圧縮モデル及びせん断モデルを組み合わせたものである³⁾。なお、コンクリートのせん断剛性は、ひび割れ回転モデルを用いて、式(1)で表わされる。

$$G = (\sigma_1 - \sigma_2) / (2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)) \quad (1)$$

σ_1, σ_2 : ひび割れたコンクリートの主応力

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: ひび割れたコンクリートの主ひずみ

3. 非適合四辺形要素

4 節点アイソパラメトリック要素の変位分布は、図-4(a)に示すような線形的分布であり、曲げ変形によりせん断ひずみが評価される。実際の耐震壁の変形分布では、曲げによる変形成分が大きく、図-4(b)のような曲線的分布となる。

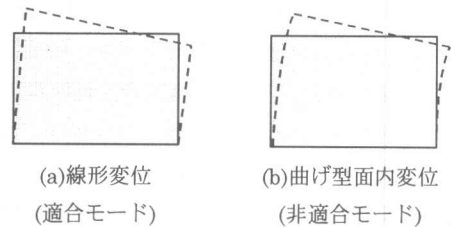


図-4 要素内の変位分布

本研究では、4 節点アイソパラメトリック要素の形状関数に2次項を追加することによって、平板の面内曲げ変形を考慮し、曲げ変形によるせん断ひずみが評価されない。

$$\begin{cases} u = \sum_I^4 N_i u_i + N_5 u_5 \\ v = \sum_I^4 N_i v_i + N_5 v_5 \end{cases} \quad (2)$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)$$

(ξ_i, η_i) は $i=1,2,3,4$ に対し、それぞれ(1,1), (-1,1), (-1,-1), (1,-1)の値で、局部座標 ξ, η の節点値である。形状関数 N_i は、4 節点アイソパラメトリック要素の形状関数である。 N_5 は、非適合モードと呼ばれる曲げ型面内変位を表わす形状関数で、次の式(3)で与えられる。 (u_5, v_5) は要素内の曲げ変形であり、隣接要素の変形と

適合しない。本研究では、この要素を非適合要素と呼ぶことに対して、アイソパラメトリック要素を適合要素と呼ぶこととする。

$$N_5 = 1 - \eta^2 \quad (3)$$

要素内のひずみは、次の式(4)で表わされる。

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\} &= \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial[N]/\partial x & 0 \\ 0 & \partial[N]/\partial y \\ \partial[N]/\partial y & \partial[N]/\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{v\} \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \partial N_5/\partial x & 0 \\ 0 & \partial N_5/\partial y \\ \partial N_5/\partial y & \partial N_5/\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_5 \\ v_5 \end{Bmatrix} \\ &= [B]\{\delta\} + [\bar{B}]\{\bar{\delta}\} = \begin{bmatrix} [B] & [\bar{B}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\delta\} \\ \{\bar{\delta}\} \end{Bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

ここに、 $[N] = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4]$

仮想仕事原理により、節点力と節点変位について次の釣り合う方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \{P\} \\ 0 \end{Bmatrix} &= \iint [B] \begin{bmatrix} [\bar{B}]^T \\ [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [B] \\ [\bar{B}] \end{bmatrix} \cdot t dx dy \begin{Bmatrix} \{\delta\} \\ \{\bar{\delta}\} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\bar{u}}] \\ [K_{\bar{u}u}] & [K_{\bar{u}\bar{u}}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\delta\} \\ \{\bar{\delta}\} \end{Bmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

ここに、 $[K_{uu}] = \iint [B]^T [D] [B] t dx dy$

$[K_{u\bar{u}}] = \iint [B]^T [D] [\bar{B}] t dx dy$

$[K_{\bar{u}u}] = \iint [\bar{B}]^T [D] [B] t dx dy$

$[K_{\bar{u}\bar{u}}] = \iint [\bar{B}]^T [D] [\bar{B}] t dx dy$

(式 2.4.11)の第二式から、要素の内部変位(u_5, v_5)を消すことができる。

$$\{\bar{\delta}\} = \begin{Bmatrix} u_5 \\ v_5 \end{Bmatrix} = -[K_{\bar{u}\bar{u}}]^{-1} [K_{\bar{u}u}] \{\delta\} \quad (6)$$

(式 2.4.13)を(式 2.4.11)の第一式に代入すると、最終的に次の剛性方程式が得られる。

$$\{P\} = [K]\{\delta\} \quad (7)$$

ここに、節点力と節点変位関係における要素剛性マトリックス $[K]$ は、次の式で与えられる。

$$[K] = [K_{uu}] - [K_{u\bar{u}}][K_{\bar{u}\bar{u}}]^{-1}[K_{\bar{u}u}] \quad (8)$$

4. 側柱拘束効果の評価

津田⁴⁾は、耐震壁水平方向平均ひずみ評価について、側柱の拘束効果を考慮することが必要であると指摘している。本研究では、耐震壁の横方向膨らみに対する側柱の拘束効果を梁の軸バネ附加剛性として評価する。図-5の側柱中

央に δ の変位が生ずると、柱に集中力 P が次の式で表わされる。

$$P = \frac{192EI}{H^3} \delta \quad (9)$$

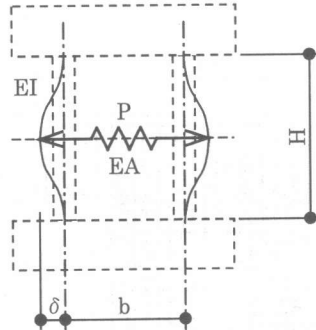


図-5 側柱による中間梁軸剛性の考慮

等価な軸バネの断面積 A は、次の式から求められる。

$$A = \frac{192Ib}{H^3} \quad (10)$$

側柱の断面を $b_c \times h_c$ の長方形とすると、

$$A = \frac{192Ib}{H^3} = 16b_c \cdot b \cdot \left(\frac{h_c}{H}\right)^3 \quad (11)$$

以上は、弾性理論から導いたものであり、柱端部損傷による剛性が低下するため、(式 4.3.5)の0.5倍を等価な中間梁の軸バネ断面積 A_e とすると、 A_e は次の式になる。

$$A_e = 8b_c \cdot b \cdot \left(\frac{h_c}{H}\right)^3 \quad (12)$$

5. 実験検証

5.1 実験概要及び解析モデルの設定

提案モデルの実験検証は、室蘭工業大学荒井らの鉄筋コンクリート耐震壁の曲げせん断実験⁹⁾を用いて行う。実験では、柱の主筋比 P_g 、軸力 N の有無、シアスパン比及び壁高を変動因子として、合計15体の試験体を実験した。

試験体の形状と配筋を図-6に示す。壁内法高さは60cm(Sシリーズ)、106.2cmと150cm(Tシリーズ)の三種類である。試験体のシアスパン比は、断面全高に対して1.48(Hシリーズ)、0.87(Mシリーズ)と0.69(Lシリーズ)の三種類

であり、周辺柱の軸スパンで直すと、1.69、0.99と0.79である。なお、全試験体の種類と試験体名は、表-1に示す。表-1の下段のものは、初期軸力($N_0=25.1\text{tf}$)を受ける試験体である。

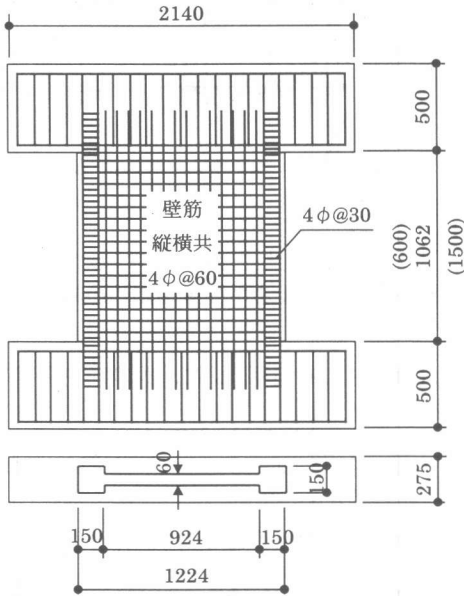


図-6 試験体の形状及び配筋

表-1 試験体名一覧表

壁高	60cm	106.2cm		150cm
P_g	1.27%	1.27%	2.25%	3.52%
M/QD	(4-D10)	(4-D10)	(4-D13)	(4-D13,D10)
1.48	—	H10	—	—
	SH10N	H10N	—	TH10N
0.87	—	M10	M13	M1310
	SM10N	M10N	—	TM10N
0.69	SL10	L10	—	—
	SL10N	L10N	—	TL10N

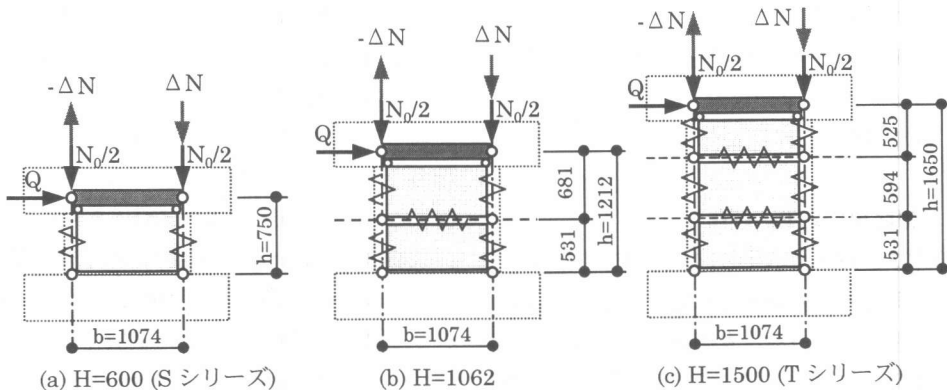


図-7 解析モデルの設定

解析モデルは、試験体の高さによって図-7のように設定する。中間梁軸パネの等価断面積が、壁高 $H=106\text{cm}$ の試験体については $A_e=36.3\text{cm}^2$ であり、 $6.0 \times 6.0\text{cm}$ とし、壁高 $H=150\text{cm}$ の試験体については $A_e=12.9\text{cm}^2$ であり、 $3.6 \times 3.6\text{cm}$ とする。

5. 2 解析結果と実験結果の比較

(1) 中間梁軸変形の有無による影響

まず、試験体 TH10N について繰返し載荷の正加力側の荷重-変形関係包絡線を図-8に示す。中間梁の軸方向変形を無視した場合(軸剛性を剛とする)は、ひび割れ点から降伏点までの剛性は実験より高く評価されることが分かる。一方、中間梁の軸方向変形を考慮した場合は、精度よく実験を再現していることが分かる。

曲げ変形とせん断変形の解析結果と実験結果の比較は、図-9に示す。中間梁の軸方向変形を考慮しない場合は、曲げ変形成分が過大評価され、せん断変形が過小評価されることが分かる。一方、中間梁の軸方向変形を考慮した場合は、精度よく実験と一致している。

試験体 TM10N については、試験体 TH10N と同様な結果が得られた(図-10, 11)に示す。

せん断破壊試験体(TL10N)に対しては、中間梁の軸方向変形を考慮しない場合に、ひび割れ後の剛性と最大耐力が過大評価される(図-12, 13)。壁高 106.2cm の試験体でも同様な結果が得られたが、ここで解析結果と実験結果の比較図を省略する。

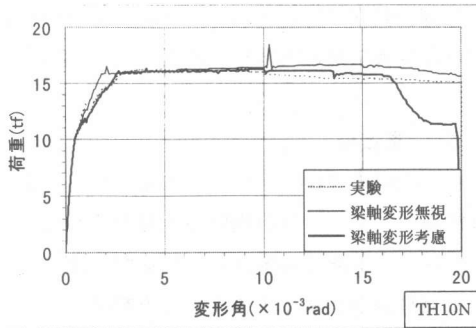


図-8 荷重変形関係の包絡線 (TH10N)

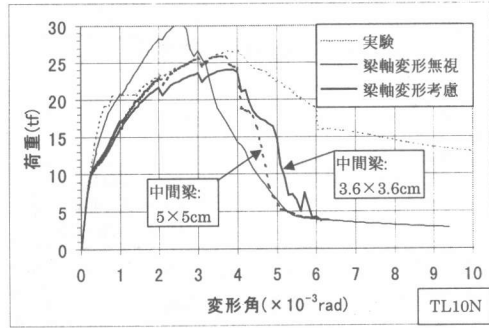


図-12 荷重変形関係の包絡線 (TL10N)

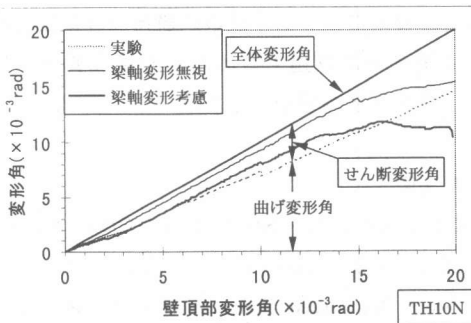


図-9 曲げ変形及びせん断変形成分 (TH10N)

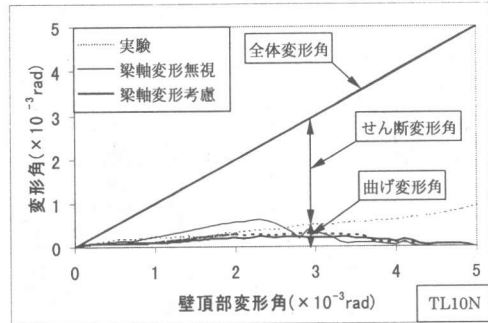


図-13 曲げ変形及びせん断変形成分 (TL10N)

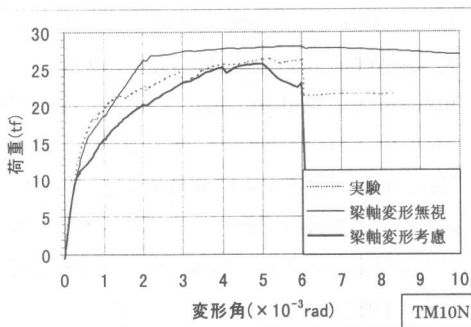


図-10 荷重変形関係の包絡線 (TM10N)

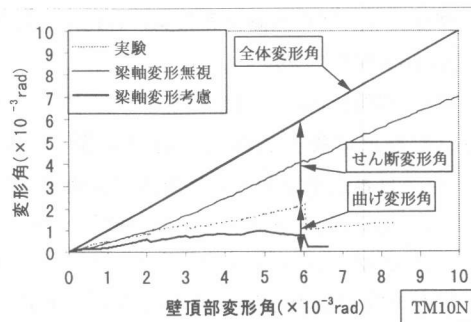


図-11 曲げ変形及びせん断変形成分 (TM10N)

(2) 適合要素と非適合要素

まず、曲げ破壊試験体 H10 の荷重-変形包絡線の解析結果と実験結果を図-14 に示す。適合要素による降伏耐力の解析結果が過大評価し、非適合要素による結果が実験結果と一致していることが分かる。

そして、せん断破壊試験体 L10N の荷重-変形包絡線の解析結果と実験結果を図-15 に示す。試験体の最大耐力について、適合要素と非適合要素による解析結果が実験結果と精度よく一致している。

降伏耐力(曲げ降伏試験体)、最大耐力(せん断破壊試験体)の解析値と実験値の比較は、図-16 にまとめて示す。適合要素を用いる場合は、降伏耐力解析値が実験値に対して 12% 程度過大評価され、非適合要素による場合は良い精度の解析結果が得られる。せん断破壊試験体の最大耐力については、適合要素と非適合要素で同じ精度の解析結果が得られる。なお、降伏耐力は側柱の主筋が降伏する時の耐力である。

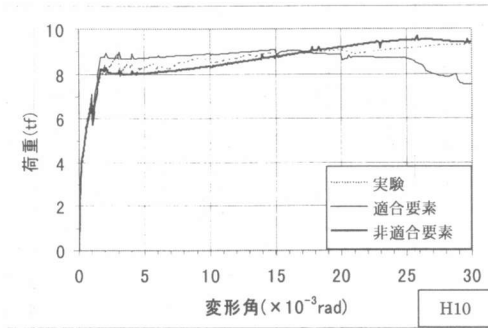


図-14 荷重変形関係の包絡線(H10)

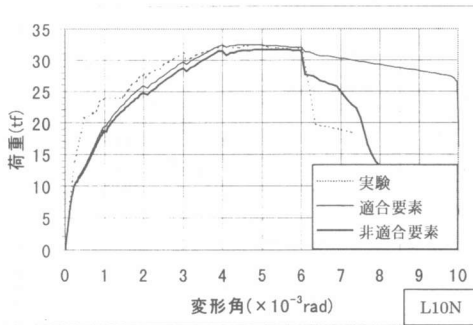


図-15 荷重変形関係の包絡線(L10N)

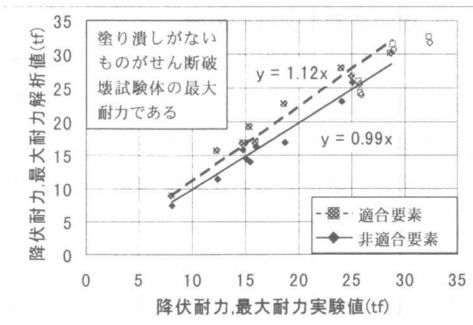


図-16 降伏耐力の解析値と実験値の比較

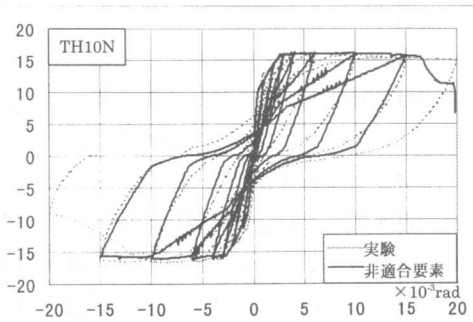


図-17 荷重-変形関係の解析結果と実験結果

非適合要素による試験体 TH10N の荷重-変形履歴解析結果と実験結果を図-17 に示す。

6. まとめ

本研究の成果は以下のようにまとめられる。

- 1) 鉄筋コンクリート耐震壁の部材モデルとして 2 軸応力状態での構成則にしたがう壁パネルと側柱及び側梁によるモデルを構築した。
- 2) 上下梁の軸変形の有無は、耐震壁の耐力及び変形成分の評価に影響を与える。
- 3) 適合要素による曲げ破壊試験体の降伏耐力が、実験結果より過大評価し、非適合要素は精度良い解析結果が得られた。

参考文献

- 1) Kabeyasawa, T., Shiohara, T., Otani, S., and Aoyama, H., "Analysis of the Full-Scale Seven Story Reinforced Concrete Test Structure: Test PSD3", Proceedings, 3rd Joint Technical Coordinating Committee, US.-Japan Cooperative Earthquake Research Program, Building Research Institute, Tsukuba, Japan, 1982
- 2) Vulcano, A., and Bertero, V. V., "Analytical Models for Predicting the Lateral Response of RC Shear Walls: Evaluation of Their Reliability", Report No. UCB/EERC-87/19, Berkeley, California, USA, 1987
- 3) 陳少華, 壁谷澤 寿海: "非線形解析における鉄筋コンクリート耐震壁のモデル", コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.763-768, 1999
- 4) 津田 和明, 高田 香織: "鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性の評価に関する研究", 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 構造IV, pp.369-370, 1999年9月
- 5) 荒井 康幸, 他 3 名: "鉄筋コンクリート連層耐震壁の耐力と変形状に関する実験的研究", コンクリート工学年次論文報告集, 10-3, pp.391-396, 1988