

# 偏心を有するRC造ボックス壁の3次元マクロモデルによる耐震性評価 A Seismic Evaluation of RC Box Walls with Torsional Eccentricity by 3-D Macro-model

高橋 孝二\*  
Koji Takahashi

## 要 約

原子炉建屋の不整形性に着目した実験的・解析的研究は極めて少なく、ねじれ振動が建屋の耐震性に及ぼす影響は未だ明らかになっていない。本報では、偏心を有するRC造ボックス壁の耐震性を評価するために、酒井らにより提案された2次元の動的弾塑性解析用マクロモデルを、3次元立体モデルに拡張し、ねじれ振動を含めた弾塑性挙動を精度よく追跡できる解析モデルを提案する。また、提案モデルを用いて、静的加力実験および振動台実験の解析を行い、実験結果と比較検討することにより、提案モデルの有効性を確認する。検討結果から、本マクロモデルは、偏心を有するボックス壁の3次元の弾塑性挙動を十分に再現できることが確認できた。また、概略的に応力状態の把握が可能であり、建屋の耐震性を検討する上で有効な方法を提案できたと考える。

## 目 次

- § 1. 序論
- § 2. 解析概要
- § 3. 解析結果
- § 4. 結論

## § 1. 序論

原子炉建屋（以降、建屋という）の不整形性に着目した実験的・解析的研究は極めて少なく、ねじれ振動が建屋の耐震性に及ぼす影響は未だ明らかになっていない。これまで、実験的研究として、筆者らの研究グループによる既発表の「不整形な原子炉建屋の耐震化に関する研究（その1～その5）」<sup>1)～5)</sup>で、剛性や重量の平面的な偏在が建屋の地震時挙動に及ぼす影響を調べるため、建屋を想定したボックス型耐震壁の模型試験体（実機の1/25）に対し、静的加力実験、振動台実験および仮動的実験を実施している。これら実験的研究の考察により、偏心の有無および偏心率の大小は、最大耐力に与える影響は小

さいが、偏心率が大きくなると累積歪みエネルギーは小さくなる傾向が明らかにされた。

一方、解析的研究として、谷本ら<sup>2)</sup>は建屋偏心の影響を検討するため、実機相当のボックス型耐震壁に対し、重量偏心の偏心率を0～21%まで変化させた1軸偏心モデルについて検討している。解析方法は、4節点の積層シェル要素を用いて3次元FEMによる非線形地震応答解析を行っている。その解析結果は、フランジ部分がねじれに対して有効に働き、水平耐力に及ぼす影響はほとんど無いと報告されている。

さらに、酒井ら<sup>3),4)</sup>により直接、耐震壁の地震時応答挙動を再現できる2次元のマクロモデルの提案がなされている。しかしながら、これらの提案は、偏心を有する立体耐震壁に関しては、直接的な対応が困難である。

本報では、偏心を有するRC造ボックス壁の耐震性を評価するために、酒井らにより提案された2次元の動的弾塑性解析用マクロモデルを、3次元立体モデルに拡張し、ねじれ振動を含めた弾塑性挙動を精度よく追跡できる解析モデルを提案する。また、提案モデルを用いて、参考文献5),6)で行われた静的加力実験および振動台実験の解析を行い、実験結果と比較検討することにより、

\*技術研究所構造研究課

提案モデルの有効性を確認する。

## § 2. 解析概要

### 2-1 3次元マクロモデルと構成則

RC造ボックス壁を対象にした3次元マクロモデル(以降、本マクロモデルという)の概念図を図-1に示す。各構面の壁は、傾斜角 $\theta$ のコンクリートストラットと集約した縦、横補強筋から成っている。各壁のストラットと補強筋の構成方法は、酒井らにより提案された2次元マクロモデル(以降、酒井モデルという)と同様の方法とする。本マクロモデルでは、ボックス壁の各コーナー部に個々の壁の面外曲げを考慮した部材を配置する(以降、コーナー部材という)。また、コーナー部材とストラットがぶつかる位置には節点を設ける。上部スラブは剛な梁要素として扱い、加力芯高さ(静的解析時)または、水平重心位置(動的解析時)まで設ける。基礎スラブ上面は、部材の支持点とする。

以下に、個々の置換部材のモデル化と構成則を示す。また、各部材の剛性や降伏荷重値は、コンクリートと鉄筋の材料試験から評価できる。

#### (1) コンクリートストラット

・コンクリートストラットの構成例を図-2に示す。ストラット1本当たりの分割幅は、試験体の弾性時のせん断剛性と等価となるように(1)式より決定している。

$$b_{wi} = \phi \cdot b_w = \phi \cdot (X_{i-1} + X_i) \cdot (\cos \theta) / 2$$

$$\phi = \frac{cG \cdot A_w / H}{\sum_i (k_{Ri} + k_{Li})} \dots \dots \dots (1)$$

$$k_{Ri} = k_{Li} = cE \cdot b_{wi} \cdot t \cdot \cos \theta \cdot \sin^2 \theta / H$$

ここに、

- $b_{wi}$  : ストラット1本当たりの分割幅
- $b_{wai}$  : ストラット1本当たりの有効分割幅
- $k_{Ri}, k_{Li}$  : 分割幅で定義した右上がりおよび左上がりのストラット1本当たりの軸剛性水平成分
- $H$  : 壁部の高さ
- $A_w, t$  : 壁の断面積および厚さ
- $E, G$  : コンクリートの弾性係数およびせん断弾性係数
- ・ストラットの傾斜角 $\theta$ は白石式<sup>7)</sup>による最大耐力時の値を用いる。

・コンクリートストラットの軸力-歪み関係を図-3に示す。軸力-歪み関係は、圧縮側を3折れ線、最大耐力以降を直線的に減少させる。引張側は割裂強度まで軸力を負担させ、それ以降を直線的に減少させる。履歴則は図に示すように引張側、圧縮側とも原点指向型とする。

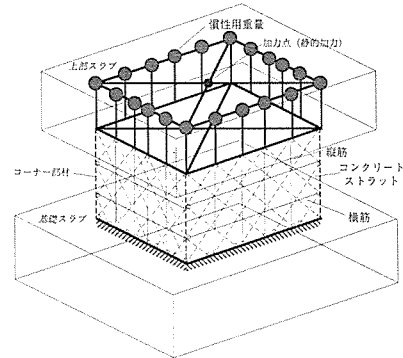


図-1 マクロモデル概念図

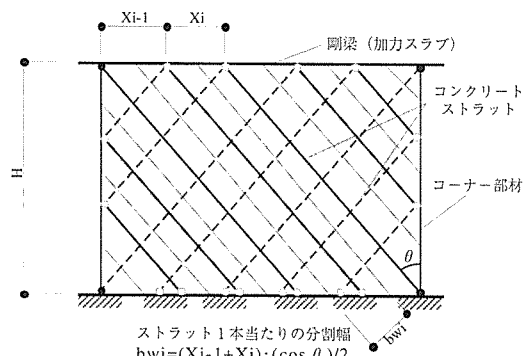


図-2 コンクリートストラットの構成例

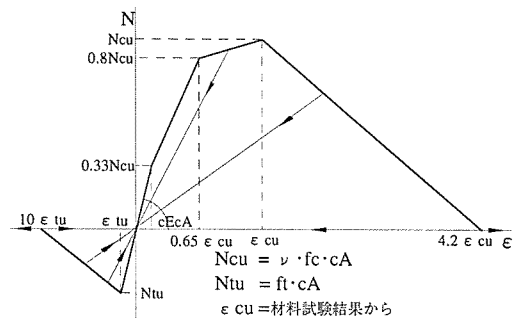


図-3 コンクリートストラットの軸力-歪み関係

・ひび割れ発生後のひび割れ平行方向のコンクリート圧縮強度は、一軸圧縮強度( $f_c$ )より低下するとされている。この強度低下を表す有効係数 $\nu$ を酒井モデル同様 $\nu=0.75$ とした。(図-3参照)

#### (2) 補強筋

・補強筋の構成例を図-4に示す。縦および横補強筋は図に示すように数本に集約して扱う。図-4 (a) および (b) の斜線部に示す、コーナー部の縦補強筋の鉄筋量はコーナー部材で考慮する。

・補強筋の軸力-歪み関係は、図-5に示すようにBi-

linear型とし、降伏後1/1000の勾配とした。

(3) コーナー部材

・コーナー部材は、各壁の面外曲げ変形を考慮した梁要素とした。

・面外曲げの算定断面を図-6に示す。図の斜線部に示されるように、各方向とも長方形断面として取り扱う。

・曲げモーメント-曲率関係は、初期軸力を考慮したファイバーモデルで求め、得られた曲線を3折れ線に置換する。履歴則は図-7に示すDegrading Tri-linear型(深田モデル<sup>8)</sup>)を用いる。

・曲げモーメント-曲率関係には、軸力変動の影響を考慮しない。本マクロモデルは閉鎖型のボックス壁を対象にしている、それを形成する壁のせん断力と変形の関係は、大部分がコンクリートストラットと補強筋の機構に支配される。また、個々の壁の面外曲げによる水平耐力への寄与分は極めて少ないので、曲げ耐力が軸力の変動を受けないとしてモデル化を行った。

2-2 解析方法

静的解析において、強制変位を与える節点は、重心点でなければ、ねじれ挙動を正確に模擬できないため、加力線上にある剛梁部材で囲まれる四角形の各対角線の交点(図-1参照)を、実験と同様の加力スケジュールで制御する。初期軸力は、加力線上の各節点に支配面積比で分散させる。

動的解析の慣性用重量は、水平重心位置に設けた剛な梁に、水平方向および鉛直方向の質量を支配面積比で分散する。また、初期軸力も慣性用重量と同様に分散させる。加振方向の回転慣性については、試験体と一致するように(2)式のように定義し、質量を設けた各節点の回転慣性項に慣性モーメントの差分 $m_i$ を追加した。

$$I = \frac{W}{12}(a^2 + b^2) = \sum_i (\Delta W_i \cdot \ell_i^2 + m_i) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

$I$ : 加振方向の回転慣性

$W$ : 試験体の慣性用重量

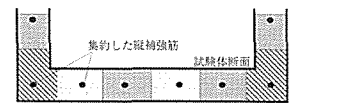
$a, b$ : 試験体の慣性用重量の高さおよび長さ

$\Delta W_i$ :  $i$ 番目の質点の重量

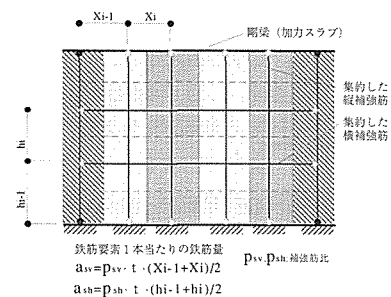
$\ell_i$ : 試験体重心から $i$ 番目の質点までの距離

$m_i$ : 慣性モーメントの差分

振動方程式の解法には、Newmarkの $\beta$ 法( $\beta=0.25$ )を用いる。また、部材剛性マトリックスにおいて、コーナー部材の曲げモーメントと回転角関係には分割梁モデルを適用する。



(a) 断面



(b) 立面

図-4 補強筋の構成例

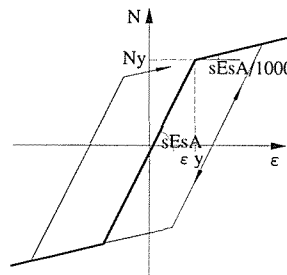


図-5 補強筋の軸力-歪み関係

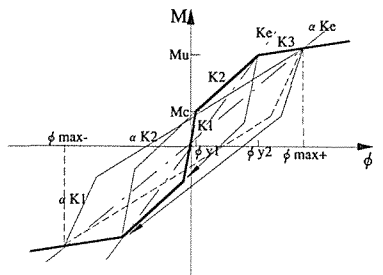


図-7 コーナー部材の曲げ-曲率関係

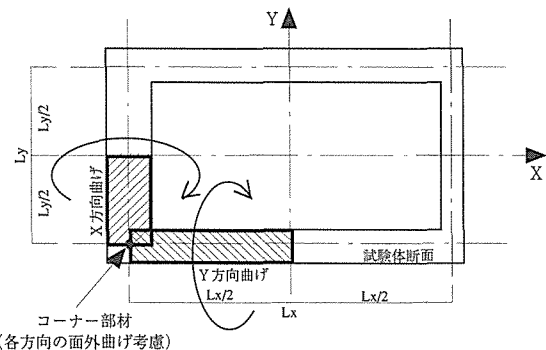


図-6 面外曲げの算定断面

§ 3. 解析結果

3-1 実験シリーズと解析対象試験体

静的加力実験および振動台実験ともウェブ壁の厚さの違いによる偏心試験体と無偏心試験体の2ケースの実験を実施した。各実験のシリーズ名称一覧を表-1に示す。

試験体概要を図-8に示す。試験体のサイズはウェブ壁幅1m、フランジ壁幅1.5mで実機の1/25のサイズとした。せん断スパン比(M/QD)は1.2に設定した。無偏心試験

体のフランジ壁，ウェブ壁の壁厚さは，全て50mmとし，偏心試験体は偏心率が0.2になるようにウェブ壁の厚さを30mmと70mmに設定した．ボックス壁のコンクリートは， $F_c=27\text{N/mm}^2$ として骨材粒径10mm以下の豆砂利コンクリートとした．鉄筋は，D6・SD345を使用し，補強筋比は壁厚に関係なく縦横とも1.2%とした．各壁ともシングル配筋とし，横筋の内外に縦筋をチドリに配置した．

解析に使用した材料試験結果を表-2に示す．コンクリート圧縮強度時の歪み ( $\epsilon_{cu}$ ) は，材料試験結果から静的実験および振動台実験ともに $1670\mu$ とした．

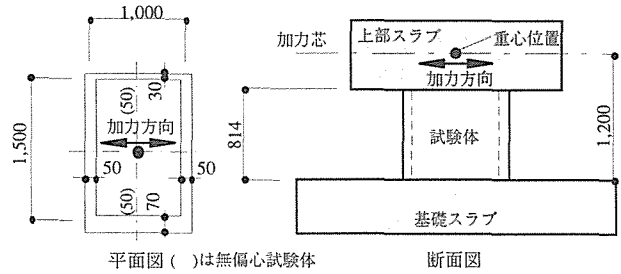


図-8 試験体概要

### 3-2 静的加力実験との比較

#### (1) 実験の加力方法

加力スケジュールは正負交番に変形角を漸増させて行った．水平力は490kN油圧ジャッキ4台（正側2台，負側2台）をウェブ壁の壁芯位置に合わせて設置し，加力する2台のジャッキコントロールは同一荷重になるよう制御した．軸力は，490kN油圧ジャッキにより鋼製ブロックを介して所定の軸応力度になるよう加力した．

#### (2) 重心位置における挙動の比較

・S10，S12それぞれの実験に対する解析結果として，荷重-変形関係の包絡線の比較を図-9に示す．S10の比較において，初期剛性は良い一致を示したが，塑性化の進展とともに解析結果は実験結果より低い結果となった．一方，S12の解析結果は最大耐力近傍まで比較的良い一致を示した．解析結果の最大耐力時の変位は，S10で部材角約1/100，S12で約1/150であったのに対し，実験結果は両試験体とも約1/180前後で解析結果と実験結果の変形性能に差があった．また，実験結果は最大耐力に達した後，スリップ破壊による急激な耐力低下を起こしたが，解析ではその挙動を模擬できていない．これは，実験における加力方法や繰り返しの影響などいろいろな要因が考えられるが，本マクロモデルが解析ステップごとに応力再配分を確実に実行している，最大耐力以降の耐力低下も圧縮側コンクリートストラットの歪み軟化域に入ることによってのみ表されているため，急激な耐力低下が生じるスリップ破壊現象をとらえることは難しいと考えられる．

・S12の荷重-変形関係の比較を図-10に示す．解析結果は実験結果に見られるスリップ挙動をとらえ，大局的には良く模擬できている．実験結果は，正側の最大耐力後のスリップ破壊により耐力低下を起こしたため，負側の耐力がかなり低くなっているが，解析結果は正側での耐力低下は起きていないので負側の耐力に差がある．

・S12のねじれ角-変形関係の比較を図-11に示す．ねじれ角は，実験と同様に3cm壁および7cm壁それぞれの壁変位をスパン長で除した値とした．解析結果は，実験

表-1 実験シリーズ名称一覧

実験の種類	偏心率		入力レベル (加速度gal)	動的実験の想定される試験体の状態
	0.0	0.2		
静的実験	S10	S12	静的加力	-
動的実験	D10-1	D12-1	0.60(508.1)	弾性
	D10-2	D12-2	0.85(719.9)	せん断ひびわれ
	D10-3	D12-3	1.00(846.9)	原波形
	D10-4	D12-4	1.35(1143)	壁筋降伏
	D10-5	D12-5	1.80(1524)	塑性化進展
	D10-6	D12-6	2.60(2202)	最大耐力
	D10-7	-	3.30(2795)	破壊進展

(記号；S：静的，D：動的，入力方向，偏心率，-：入力レベル)

表-2 材料試験結果

試験体	コンクリート (壁部)				鉄筋 (SD345,D6)		
	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	割裂強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 (GPa)	最大強度 ( $\text{N/mm}^2$ )
S10	29.2	2.08	29.5	0.19	402.3	205	544
S12	33.4	2.45	30.5	0.22			
D10	29.6	2.22	27.8	0.21	392.4	187	546.4
D12	31.7	2.61	27.6	0.18			

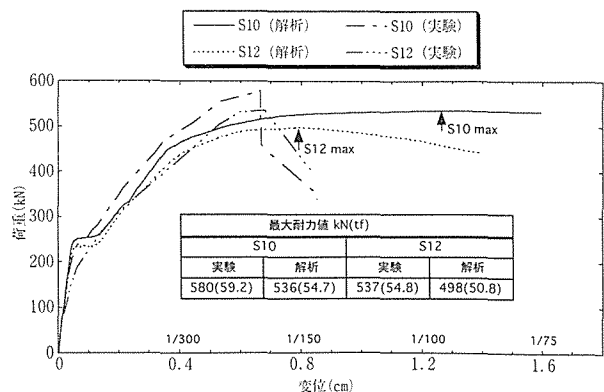


図-9 荷重-変形関係の包絡線の比較

結果を良く模擬していることから、重心位置の変位増分に対して各壁の変位増分量の割合が一致していることを示している。

・S12のオービットの比較を図-12に示す。解析結果は、加振方向の変位の増加に伴い3cm壁側に変位する動きを良く模擬していることがわかる。しかし、最大耐力以降の挙動には、差異が見られる。

### 3-3 振動台実験との比較

#### (1) 実験の加振方法

入力波は模擬地震動<sup>1)</sup>で $M=8.75$ 、震央距離が50kmの場合の大崎スペクトルを基本として、長周期領域で200cm/sとなるように設定している。また、時間軸を相似則より $1/\sqrt{25}$ に短縮した。加振は、表-1に示すように想定される試験体の状態により入力倍率を徐々に上げて行った。慣性用重量は、上部スラブを含め196kNとなるよう試験体上部に鉛製の重錘を載せた。また、重心位置の高さは基礎スラブ上面から1200mmである。

#### (2) 重心位置における挙動の比較

解析に用いた入力波は、基礎スラブ上面で各レベルごとに記録された水平加速度波形とした。解析は、実験と同様にレベル1から最終レベルまでを連続して入力した。また、粘性減衰については、入力レベル1加振時の加速度に対する伝達関数から求めた減衰定数 ( $h=4\%$ ) を適用し、初期剛性に比例させた。D10およびD12のレベル1における伝達関数の比較を図-13に示す。

・D10, D12それぞれの入力レベル1, 3および6の実験に対する解析結果として、慣性力-変形関係の比較を図-14および図-15に示す。ここで、D12の実験結果はスリップ破壊後を点線で示している。入力倍率0.6 (目標最大加速度508.1gal入力) であるレベル1はD10, D12の両解析とも良く一致している。次に、原波レベル(846.9gal) であるレベル3では、D10, D12とも解析結果は実験結果より履歴ループの膨らみが若干大きくなっている。入力倍率2.6 (2202gal) であるレベル6では、D10, D12とも実験結果に複雑な履歴挙動が見られるが、解析結果も同様な挙動が良く再現されている。これは、加振レベルの増加に伴い、軸剛性の低下が慣性用重量を含めた上部スラブの回転動(加振直交方向を軸とする)を含む振動モードを励起したために生じている。

・D10, D12それぞれの入力レベル1および6の実験に対する解析結果として、各時刻歴波形の比較を図-16および図-17に示す。D12のねじれ角は、実験と同様に3cm壁および7cm壁それぞれの壁変位をスパン長で除した値とした。D10の加速度時刻歴の比較において、レベル1の解析結果は実験結果と良く一致している。レベル6において、実験結果には、上述した回転動の影響による

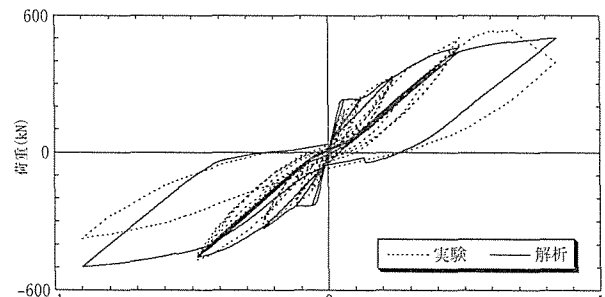


図-10 荷重-変形関係の比較 (S12)

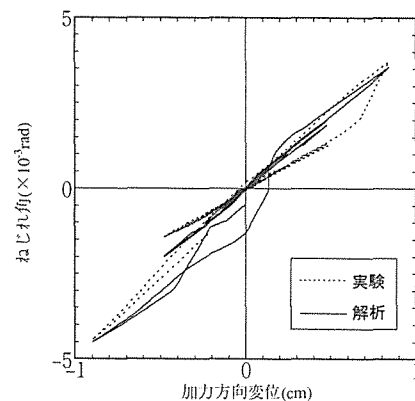


図-11 ねじれ角-変形関係の比較

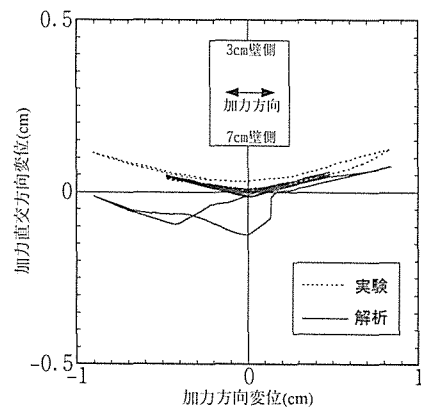


図-12 オービットの比較

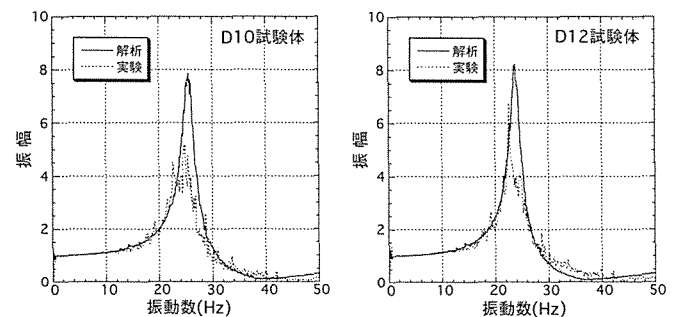


図-13 レベル1の伝達関係の比較

高周波が多く見られるが、解析結果はその挙動を良くとらえていて大局的に模擬できている。変位時刻歴の比較は、応答初期の振幅の小さいところでは若干の差異が見られるが、以降の挙動は良く一致している。D12の応答ねじれ角の比較において、レベル1の結果は非常に小さい回転角ながら、大局的な挙動は一致している。レベル6において、実験結果は4秒付近で3cm壁のスリップ破壊のため周期が伸び、振幅も増大している。そのため4秒以降、解析結果は模擬できていないが、破壊以前までの挙動は一致している。加速度時刻歴の比較において、実験結果の時刻歴波形には、D10同様に高周波が多く見られるが、解析結果はその挙動を良くとらえ、破壊以前までは模擬できている。

・D10の入力レベル6の実験に対する解析結果として、鉛直加速度—鉛直変位関係と鉛直変位—水平変位関係の比較をそれぞれ図-18と図-19に示す。鉛直加速度—鉛直変位関係において解析結果は、実験結果と比較すると鉛直変位のゼロ近傍での加速度値が大きくでているが、全体的挙動は模擬している。鉛直変位—水平変位関係において解析結果と実験結果の挙動は良く一致している。

#### §4. 結論

偏心を有するRC造ボックス壁の耐震性を評価するために、3次元マクロモデルを提案し、静的加力実験および振動台実験を対象に検討を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

(1) 静的加力実験の解析結果に関して

・解析結果は、実験で生じたスリップ破壊による急激な耐力低下を模擬できないが、最大耐力に至るまでの弾塑性挙動は良く一致している。

・偏心試験体の解析結果は、実験結果に見られたねじれ挙動および重心位置の動きを良く模擬している。

(2) 振動台実験の解析結果に関して

・解析結果の時刻歴波形および慣性力—変形関係は各入力レベルに対して実験結果を良く模擬している。また、偏心試験体の応答ねじれ角の時刻歴波形も大局的な挙動は一致している。

・レベル6の実験結果において、慣性力—変形関係および加速度時刻歴に見られた、上部スラブの回転動による高周波成分を解析結果は良く再現している。

以上の検討結果から、本マクロモデルは、偏心を有するボックス壁の3次元的な弾塑性挙動を十分に再現できることが確認できた。また、概略的な応力状態の把握が可能であり、建屋の耐震性を検討する上で有効な方法を提案できたと考える。

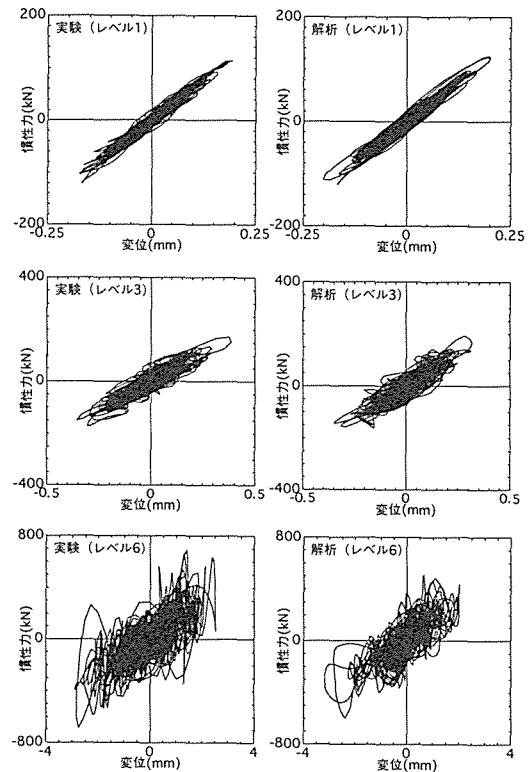


図-14 慣性力—変形関係の比較 (D10)

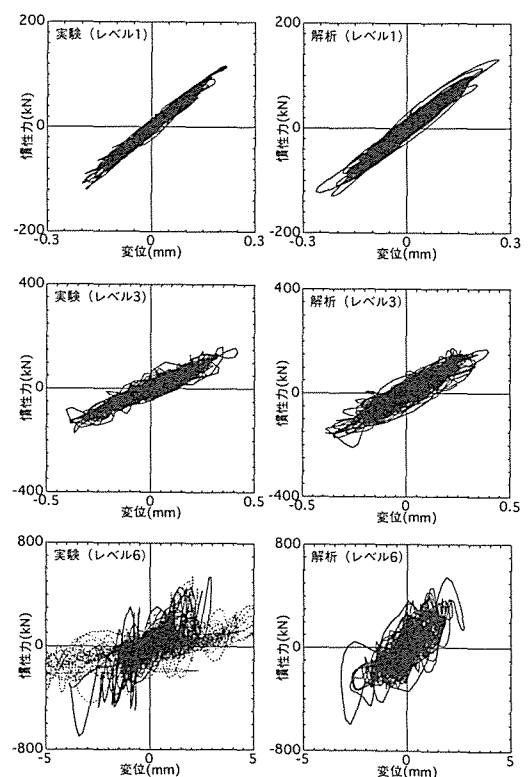


図-15 慣性力—変形関係の比較 (D12)

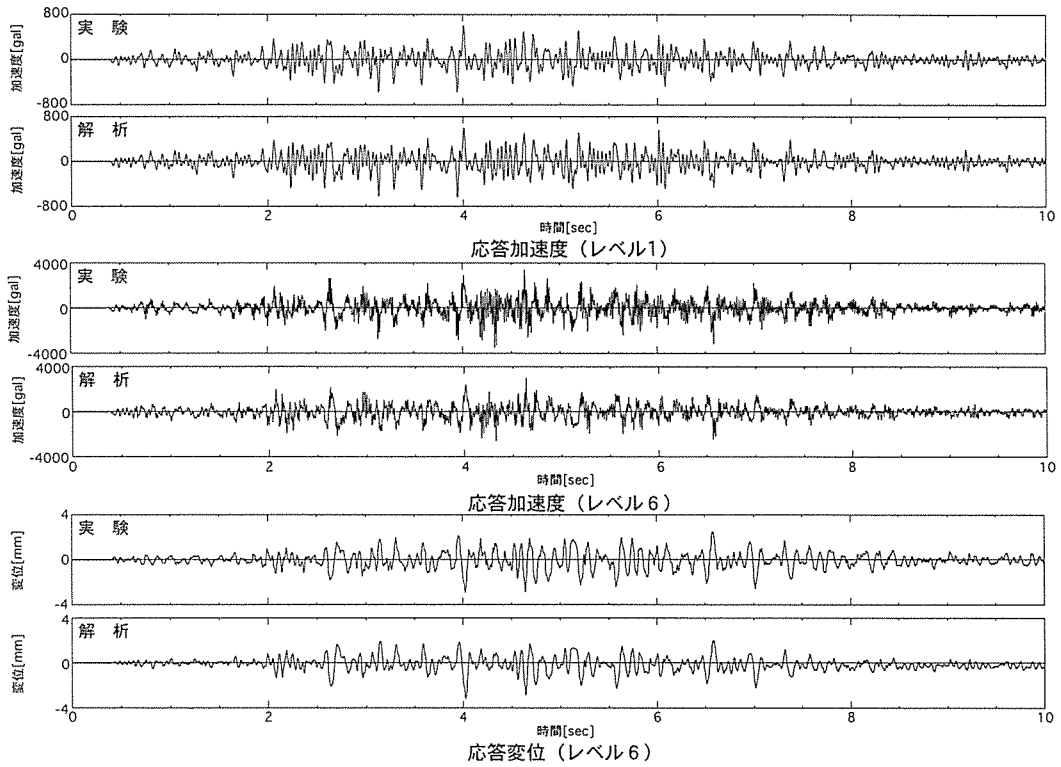


図-16 時刻歴波形の比較 (D10)

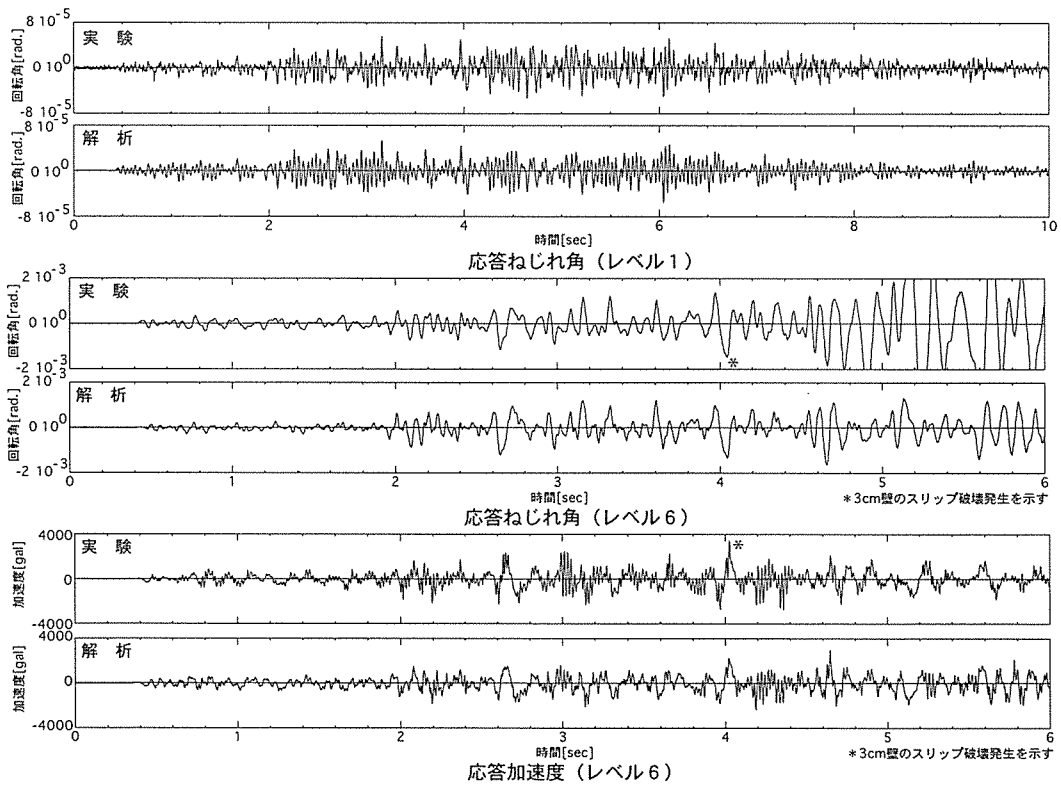


図-17 時刻歴波形の比較 (D12)

今後の課題として、偏心を有するRC造ボックス壁の耐震性に関する評価を、本マクロモデルを用いて更に検討を進めたいと考える。

### 謝 辞

本研究は、(社)建築研究振興協会内に設置された「平面的・立面的に不整形な原子炉建屋の耐震化に関する研究委員会」のもとで計画され、建設省建築研究所および戸田建設(株)、西松建設(株)、(株)熊谷組、佐藤工業(株)、(株)間組、前田建設工業(株)の共同研究として実施された。本研究を進めるにあたり、酒井章氏(熊谷)、山内泰之(建研)の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 山内泰之, 滝沢春男, 久保哲夫, 大川出, 他: 不整形な原子炉建屋の耐震化に関する研究(その1~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造)北海道, pp.1067-1076, 1995.8
- 2) 谷本英輔, 菅原良次, 杉山達也, 真下 貢: ボックス型耐震壁の終局耐力に関する検討(その2) 建屋偏心の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造)北海道, pp.1081-1082, 1995.8
- 3) 酒井 章, 前川利雄, 和田 章: 地震動を受ける原子炉建屋耐震壁の挙動に関する研究(その2) RC造立体耐震壁のマクロモデルによる耐震性評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第447号, pp.97-105, 1993.5
- 4) 酒井 章, 前川利雄, 金森誠治, 和田 章: 地震動を受ける原子炉建屋耐震壁の挙動に関する研究(その3) RC造立体耐震壁の振動台実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, pp.159-169, 1993.11
- 5) 前田克馬, 榛沢亮: 不整形な原子炉建屋の耐震化に関する研究(その2) 静的繰返し加力実験結果, 日本建築

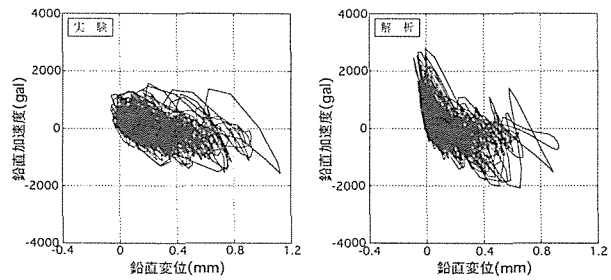


図-18 鉛直加速度-鉛直変位関係の比較

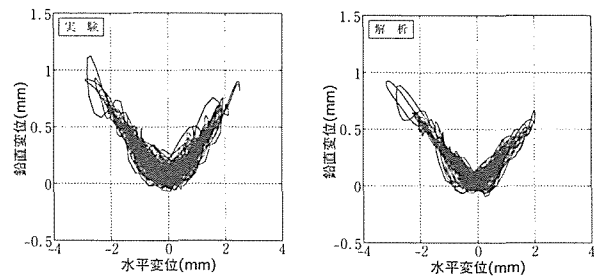


図-19 鉛直変位-水平変位関係の比較

学会大会学術講演梗概集(構造)北海道, pp.1069-1070, 1995.8

- 6) 伊藤嘉朗, 牧田敏郎, 伊藤倫顕, 山内泰之: 不整形な原子炉建屋の耐震化に関する研究(その3) ボックス壁の振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造)北海道, pp.1071-1072, 1995.8
- 7) 白石一郎, 狩野芳一: 鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性に関する考察, JCIコロキウム「RC構造のせん断設計法に関する解析的研究」論文集, pp.171-178, 1989.7
- 8) 深田泰夫: 鉄筋コンクリート建物の復元力特性に関する研究(その1), 日本建築学会大会関東支部学術研究発表会, 第40号, pp.121-124, 1969.11