

論文 3次元マクロモデルを用いた偏心ボックス壁の動的弾塑性解析

高橋 孝二*1・酒井 章*1・山内 泰之*1

要旨:本研究は,ねじれを伴うようなボックス壁の3次元挙動を弾塑性域まで正確に模擬できる解析モデルを提案する。既往の研究から,鉄筋コンクリート造耐震壁の2次元動的弾塑性解析にマクロモデルが容易に適用できることに着目し,偏心によるねじれ挙動を精度よく捉えることができるようマクロモデルを3次元に拡張した。提案したモデルの妥当性を確認するために,偏心ボックス壁の振動台実験を対象に解析し,実験結果と解析結果は概ね良い対応を示した。提案モデルは偏心を有するボックス壁の3次元動的挙動を弾塑性域まで十分に再現できることを確認した。

キーワード:3次元マクロモデル,ボックス壁,ねじれ振動,弾塑性挙動,偏心

1.はじめに

これまでの原子炉建屋(以降,建屋)の平面形状は耐震安全性の要求から整形な形状になっている。しかし,機器や配管の配置計画といった,建屋の機能面からは合理的ではなく建設費用の面からもコスト高となっている。このような観点から,建屋の耐震設計には不整形な建屋の耐震性の把握も考慮の対象となり,機能面の合理的な設計と耐震安全性を両立させた設計法の確立が要求されている。不整形を考慮した建屋の耐震設計には,精密な3次元動的弾塑性解析プログラムが必要である。現状のソフト(質点系モデルやFEMなど)である程度の対応は可能であるが,解析結果の検証が不十分ではその信頼性に乏しい。そこで,本研究では,建屋の主な耐震要素であるボックス壁を想定して,ねじれを伴うような3次元挙動を弾塑性域まで正確に模擬できる解析手法の開発を行う。

2.解析モデル

2.1 ボックス壁のモデル化

耐震壁の最大耐力を理論的に推定する方法として,せん断抵抗機構をトラスやアーチに置換

し塑性理論に基づいて求める,いわゆるマクロモデルがある。近年では,仮定した抵抗機構をそのまま線材で表現することによって,変形まで求められるようになっている¹⁾。この方法は,部材の抵抗機構を比較的単純に仮定しているため,応答解析への適用が容易である。酒井等は耐震壁の動的解析に直接適用可能な2次元のマクロモデルを提案している²⁾(以降,酒井提案モデルという)。そこで本研究では,酒井等により提案されたモデルを基に,偏心を有するRC造ボックス壁の3次元挙動が解析可能な,3次元のマクロモデルを提案する。偏心ボックス壁の解析モデルは,ねじれ挙動を表現するため立体的にモデル化する必要がある。2次元モデルである酒井提案モデルを直接適用することはできない。そこで,ボックス壁の個々の壁を全て独立したマクロモデルで構成することにより,立体のモデルを構築する。3次元マクロモデルの構成例を図-1に示す。各壁は,傾斜角のコンクリートストラットと集約した縦横補強筋を棒要素で構成して周辺の置換フレームとピン結合する。壁内には節点は設けない。上部スラブは,剛な梁要素として扱い,水平重心位置ま

*1 西松建設(株)技術研究所(正会員)

*2 (株)熊谷組 エンジニアリング設計本部 博士(工学)

*3 独立行政法人 建築研究所 理事長 工博

で設ける。また、基礎スラブ上面は部材の支持点とする。マクロモデルの立体化に際しては、以下の2点について留意する必要がある。

- a) 各壁が面内応力と面外応力を同時に受けるので、この影響をどう取り扱うか。
- b) 壁と壁の接合部のモデル化。

留意点 a)については、面外変形による面内抵抗機構への影響は無いものと仮定し、本研究では、各壁部材の面外方向の剛性は無視する。これは、ボックス壁形状では、荷重方向に平行な面内の抵抗機構が支配的であり、荷重方向に直交する壁の面外剛性は面内剛性に比べ無視できるほど小さい。留意点 b)については、個々の壁の面内の抵抗機構が交差する部分であるため、個々の機構が損なわれないように適切にモデル化する必要がある。図-1に示すように、ボックス壁のコーナー部（壁と壁の接合部）に縦補強筋を集約した部材を配置する（以降、コーナー部材という）。コーナー部材の具体的な特性およびモデル化については次節で述べる。

2.2 各壁の構成方法

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本当りりの分割幅は、試験体の弾性時のせん断剛性と等価となるように式(1)より決定している。

$$\left. \begin{aligned} b_{wai} &= \frac{c \cdot G \cdot A_w / H}{\sum_i (k_{Ri} + k_{Li})} \cdot b_{wi} \\ b_{wi} &= \frac{1}{2} (x_{i-1} + x_i) \cdot \cos \theta \\ k_{Ri} = k_{Li} &= \frac{c \cdot E \cdot b_{wi} \cdot t}{H} \cos \theta \cdot \sin^2 \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 b_{wai} :有効分割幅、 b_{wi} :分割幅、 k_{Ri} 、 k_{Li} :分割幅で定義したストラットの軸剛性水平成分、 H :壁部の高さ、 A_w 、 t :壁の断面積および厚さ、 cE 、 cG :コンクリート弾性係数およびせん断弾性係数

ストラットの傾斜角 θ は、耐震壁の最大耐力を塑性理論の下界定理に基づいて求めている白石らの方法³⁾による。コンクリートストラットの応力-歪み関係を図-3に示す。

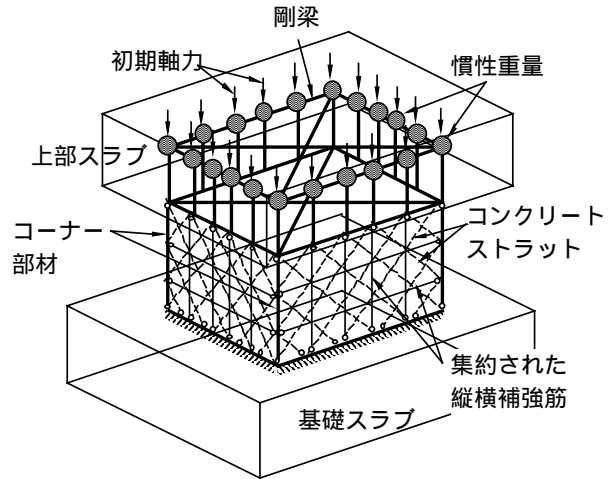


図-1 3次元マクロモデルの構成例

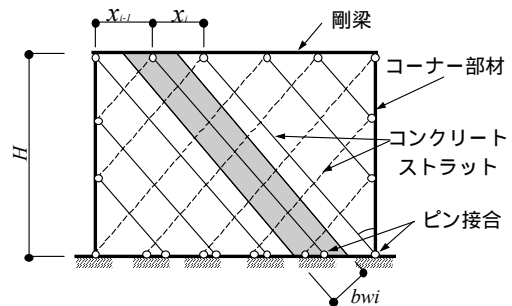


図-2 ストラットの構成例

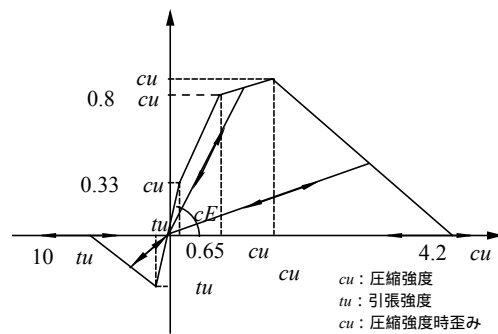


図-3 応力-歪み関係

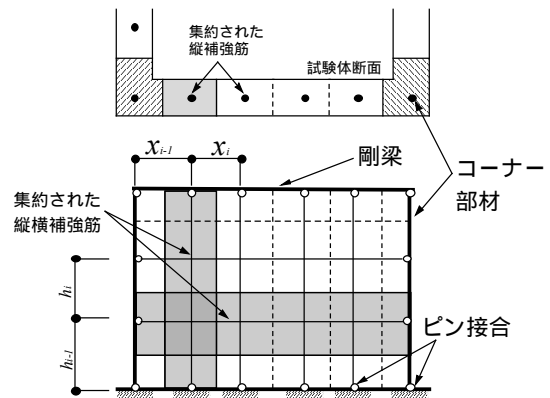


図-4 補強筋の構成例

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する。縦筋および横補強筋の鉄筋量は式(2)による。

$$\begin{cases} a_{sv} = p_{sv} \cdot t \cdot (x_{i-1} + x_i) / 2 \\ a_{sh} = p_{sh} \cdot t \cdot (h_{i-1} + h_i) / 2 \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 a_{sv}, a_{sh} : 集約された縦および横補強筋量,
 p_{sv}, p_{sh} : 各壁の縦および横補強筋比

壁補強筋の応力-歪み関係は、バイリニア型とし鉄筋の降伏後、弾性剛性の 1/1000 の勾配とした。コーナー部材は、軸変形のみ考慮した部材とし、剛梁と基礎部への接合はピン接合とする。鉄筋量は、壁部の縦補強筋と同様に図 - 4 に示す試験体断面の斜線部の面積で求める。

3. 動的解析法

壁部の質量は、上部スラブに比較して充分軽いので壁部の質量はゼロと見なし、上部スラブの各節点のみに質量を集中させる。慣性用重量を剛梁上の各節点へ分配する方法を図 - 5 に示す。図に示すように個々の節点に割り当てる体積を求め、スラブ全体の体積との比で慣性用重量を分配させる。また、初期軸力は、上部スラブの重量を初期軸力として、慣性用重量と同様に分配する。回転慣性を剛梁上の各節点へ分配する方法を図 - 6 に示す。ボックス壁試験体は、慣性力作用位置が、高い所に位置するため図に示す Y 軸回りの回転慣性の影響が大きい。そこで、解析モデルでは、図に示すように Y 軸回りの回転慣性について上部スラブの離散化による回転慣性の不足分を試験体の回転慣性と一致するように式(3)のように定義し、質量を設けた各節点に式(4)で求まる個々の慣性モーメントの補正值 m_i を考慮する。

$$I = \frac{W}{12} (a^2 + b^2) = \sum_i (\Delta W_i \cdot l_i^2 + m_i) \quad (3)$$

$$m_i = \frac{\Delta W_i \cdot l_i^2}{\sum_i (\Delta W_i \cdot l_i^2)} \cdot \left\{ I - \sum_i (\Delta W_i \cdot l_i^2) \right\} \quad (4)$$

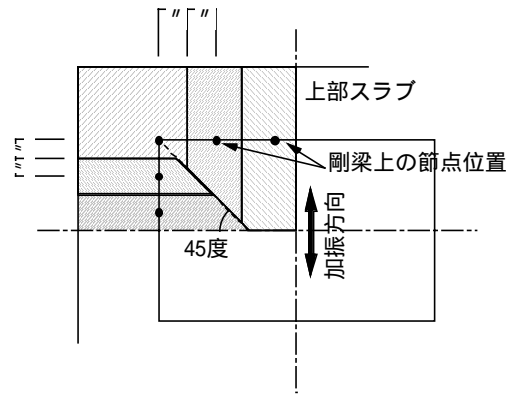


図 - 5 慣性用重量の分配法

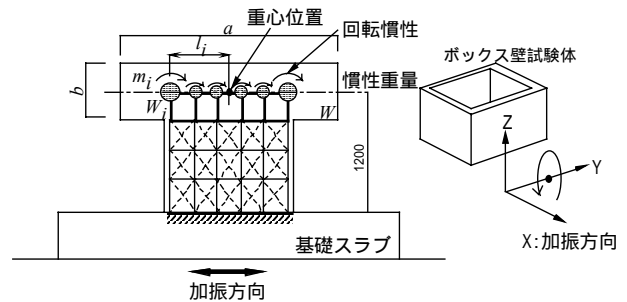


図 - 6 回転慣性の分配法

ここに、 I : Y 軸回りの回転慣性、 W : 上部スラブの慣性用質量、 a, b : 上部スラブの高さおよび長さ、 W_i : 節点 i の質量、 l_i : 重心から節点 i までの距離、 m_i : 節点 i の慣性モーメントの補正值

質量マトリックスは、質量を設けた節点には 3 方向の成分を考慮し、Y 軸回りの回転慣性を考慮する。それ以外の節点成分にはゼロを置いた対角マトリックスとしている。減衰マトリックスは、弾性時の剛性マトリックスに比例すると仮定した初期剛性比例型を用いる。振動方程式の解法は Newmark の法 ($\gamma = 0.25$) を用いる。

4. 解析対象実験概要

対象とする実験は、筆者等の研究グループによる「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」で実施された、ボックス壁の振動台実験とする⁴⁾。試験体は、原子炉建屋を想定したボックス壁の模型試験体(実機の 1/25 に相当)に対し、偏心のない整形な平面形状の無偏心タイプ(試験体名: D10)とウェブ壁の厚さの違いにより偏心させている

剛性偏心タイプ（試験体名：D12）の 2 体を用いる。試験体形状を図 - 7 に示す。D10 の壁厚さは、フランジ、ウェブとも 50mm とし、D12 は偏心率が 0.2 になるようにウェブの壁厚さを 30mm と 70mm にした。各試験体のウェブ壁のせん断スパン比は 1.2 で、各壁の鉄筋比は壁厚に関係なく縦横とも 1.2% である。慣性用重量は、壁部の軸応力度が 0.8N/mm^2 となるように上部スラブと鉛製の付加重量をあわせて 196kN としている。試験体を 1 質点 2 自由度の解析モデルに置換し、各壁剛性を等価せん断ばねモデルで評価した場合の固有値解析結果を表 - 1 に示す。

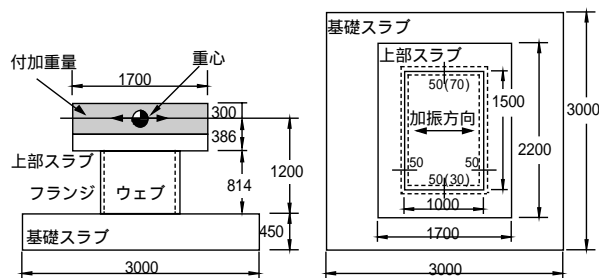


図 - 7 試験体形状

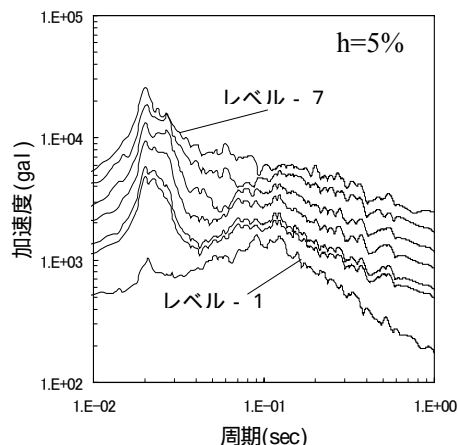


図 - 8 入力波の応答スペクトル

入力地震波は、原子力施設の設計用基準地震動 S2 を想定した模擬地震動⁴⁾とした。加振入力レベルは、想定される試験体の破壊状況に応じて、加速度波形の振幅レベルを 1～7 まで設定している。各入力加振レベルを表 - 2 に示す。D10 の加振で記録された基礎スラブ上面における加速度応答スペクトルを図 - 8 に示す。

表 - 1 固有値解析結果

試験体の材料試験結果を表 - 3 に示す。弾性加振であるレベル 1 の伝達関数より求めた固有振動数および等価粘性減衰定数は、D10 が 24.0Hz , $h=3.6\%$ 、D12 が 22.6Hz , $h=3.4\%$ であった。D10、D12 とともに設計時の固有値の 1 次周期にほぼ対応している（表 - 1 参照）。

試験体		1 次	2 次
D10	T(sec),f(Hz)	0.039, 25.5 (X 方向並進)	0.037, 27.3 (回転)
	T(sec),f(Hz)	0.044, 23.0	0.035, 28.9
D12	u	0.668	0.332
	w	0.51	-0.51

表 - 2 入力レベル

5. 解析結果

5.1 解析条件

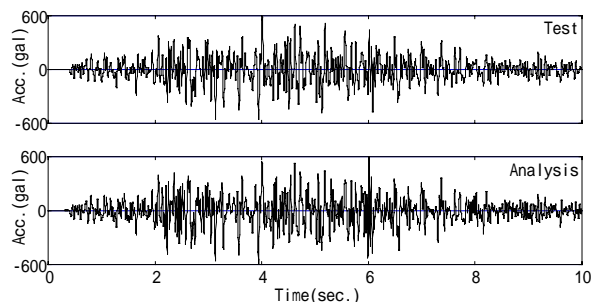
解析に用いた入力波は、試験体の基礎スラブ上面で記録された水平加速度波形とし、実験と同様にレベル 1 から最大レベルまで連続して入力した。解析では、この波形のサンプル時間 0.002 秒に対して直線補間によりさらに 4 分割して時間積分を行った。減衰定数はレベル 1 の加振結果から得られた値を用い、最大レベルの解析まで一定とした。

図 - 8 は D10 の入力波における応答スペクトルを示しているが、入力レベルの増大とともに 50Hz 付近が卓越しているのがわかる。一方、

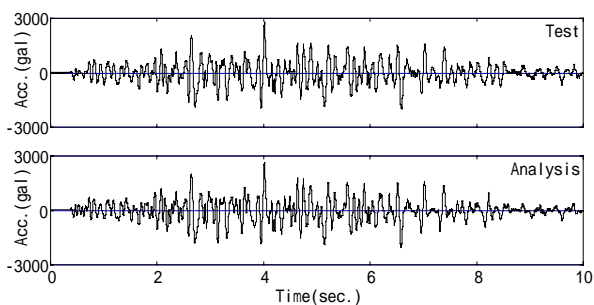
レベル	原波形に対する入力倍率	入力加速度	試験体の想定される破壊状況
1	0.60	508.1	弾性領域
2	0.85	719.9	せん断ひび割れ
3	1.00	846.9	原波形レベル
4	1.35	1143.0	鉄筋降伏
5	1.80	1524.0	塑性化進展
6	2.60	2202.0	最大体力
7	3.30	2795.0	破壊進展

表 - 3 材料試験の結果

	コンクリート			鉄筋		
	圧縮強度 (Mpa)	引張強度 (Mpa)	圧縮強度時 歪み (μ)	ヤング係数 (Mpa)	降伏強度 (Mpa)	ヤング係数 (Mpa)
D10	29.6	2.2	1750	2.78×10^4	392	1.87×10^5
D12	31.7	2.6	1750	2.76×10^4		



レベル-1の比較



レベル-7の比較

図 - 9 応答加速度時刻歴 (D10)

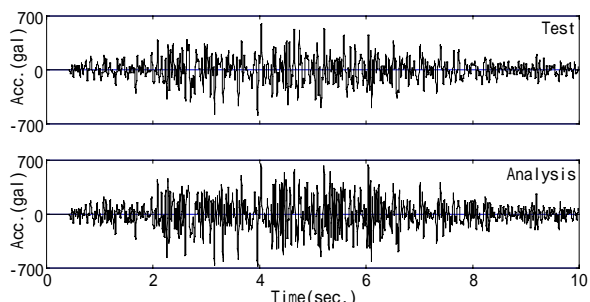
試験体の固有振動数は、例えば D10 では、1 次周期で 25.5Hz, 2 次で 27.3Hz であり、応答に含まれる 50Hz 付近の周波数は、振動台の特性により生じた見かけの卓越周期と考える。そこで、有意な慣性力-変形関係を抽出するため実験結果、解析結果とも得られた加速度応答波形の高周波成分をローパスフィルター (30Hz) により除去して以下の比較検討を行った。

5.2 時刻歴応答波形の比較

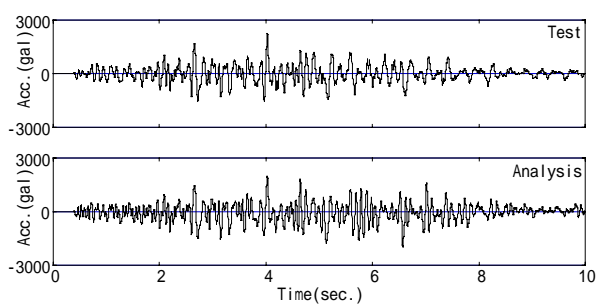
D10, D12 における入力加振レベル 1 および最大レベルの加速度応答波形の実験結果と解析結果の比較をそれぞれ図 - 9 および図 - 10 に示す。弾性挙動であるレベル 1 は、D10, D12 とも解析結果と実験結果は良く一致している。最大レベルにおける比較は、実験結果、解析結果とも塑性化の進展により周期が延びている。D10 は良く対応しているが D12 については、4 秒付近までの対応は良いがそれ以降は差異が生じている。これは、D12 の実験結果は 4 秒付近で 30mm 壁のスリップ破壊により耐力低下したためである。

5.3 ねじれ変形モードの比較

D12 における変形モードの比較を図 - 11 に



レベル-1の比較



レベル-6の比較

図 - 10 応答加速度時刻歴 (D12)

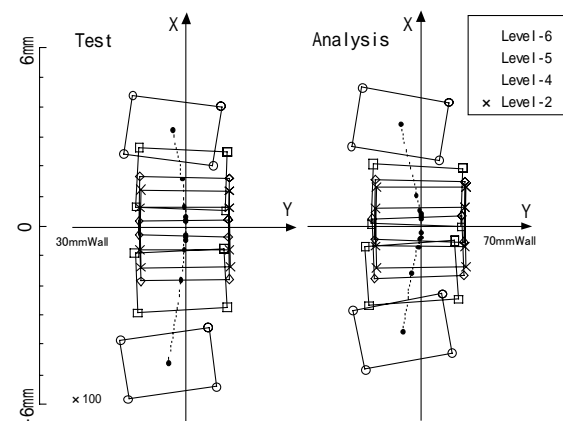


図 - 11 変形モードの比較

示す。図は各レベルにおいて加振方向の最大変形を記録したときの直角方向およびねじれ角を表している。ねじれ角は、各ウエブ壁 (30mm 厚, 70mm 厚壁) の壁変位の差をスパン長さで除した値とした。ここで、実験結果の最大レベルにおいては、スリップ破壊直前の変位としている。実験結果を見ると、加振方向の水平変形にともない、ねじれ角が大きくなりながら直角方向においても、僅かに 30mm 壁側に変位する挙動が見られる。解析結果はこれら実験結果に見られる挙動を模擬できていることがわかる。

5.4 慣性力-水平変形関係の比較

D10, D12 それぞれの慣性力-水平変形関係を

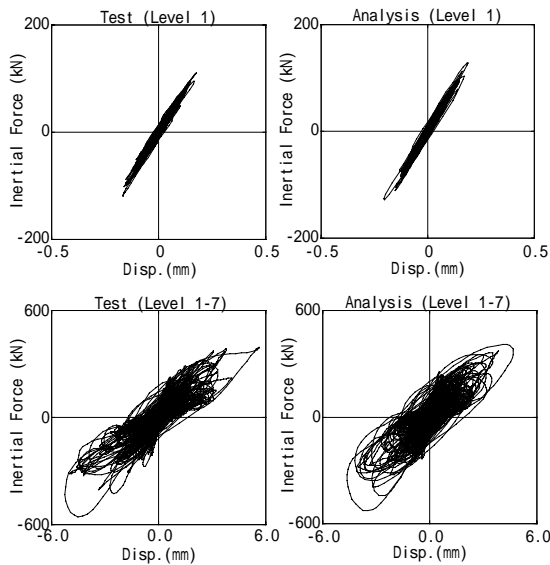


図 - 1 2 慣性力 - 水平変形関係 (D10)

レベル 1 およびレベル 1～最大レベルまでの比較をそれぞれ図 - 1 2 および図 - 1 3 に示す。慣性力は、重心位置における加速度応答値に慣性質量を乗じた値としている。弾性挙動であるレベル 1 は、D10、D12 とともに解析結果と実験結果で良く一致している。最大レベルまでの結果は、D10 は良く一致している。D12 については、実験結果は最大耐力以降に大きく耐力低下して変位が増大し、解析結果とは差異が生じている。これは、前述したように 30mm 壁のスリップ破壊により急激に耐力低下したためである。提案モデルの最大耐力以降の耐力低下は、コンクリートストラットが歪み軟化域に入ることによりのみ表すことができるので、このように急激な耐力低下を引き起こす、スリップ破壊現象は考慮していないので再現できない。

6.おわりに

本研究では、偏心ボックス壁が地震力を受けたときの 3 次元挙動を弾塑性域まで追跡することが可能な解析モデルを提案した。提案した解析モデルをボックス壁試験体の振動台実験に適用し、実験結果と解析結果を比較することにより、モデルの妥当性を検証した。その結果は以下のようにまとめられる。

1) 重心位置の加速度時刻歴や慣性力 - 水平変

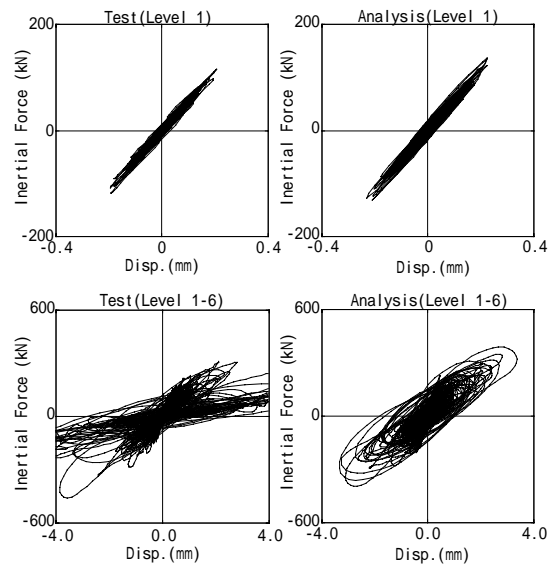


図 - 1 3 慣性力 - 水平変形関係 (D12)

形関係の解析結果は、無偏心、偏心試験体とも弾性域から最大耐力時まで実験結果と良く対応している。

2) 提案モデルは、モデルを立体に構成することにより、ねじれ挙動の追跡が可能となり、実験結果に見られた偏心の影響による重心位置の水平移動も解析結果は良く模擬できている。

参考文献

- 1) 井上範夫, 鈴木紀雄: RC 耐震壁の荷重-変形関係を求める線材モデル, 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.179-186, 1989.10
- 2) 酒井 章, 前川和雄, 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
- 3) 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, 1989.10
- 4) 山内泰之, 佐藤和英, 前田克馬, 伊藤嘉朗: 偏心を有する RC 造ボックス壁の耐震性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 520 号, pp.77-84, 1999.6