

異なる地震動を受ける偏心鉄筋コンクリート 壁フレーム構造の震動実験 (その2) 実験結果

壁谷澤 寿一¹・村瀬 正樹²・金 鎮坤³・壁谷澤 寿海⁴・松森 泰造⁵

- 1 東京大学大学院工学系研究科修士課程 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)
 2 東京大学大学院工学系研究科修士課程 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)
 3 東京大学大学院工学系研究科修士課程 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)
 4工博 東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)
 5工博 独立行政法人防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

This paper reports on the results of the shaking table test of two reinforced concrete eccentric frames, which are outlined in the preceding paper Part 1. The torsional responses of the two specimens were remarkable due to the eccentric location of the structural walls. The test results, especially the hysteretic behavior of the two specimens to collapse, were compared in the viewpoint of their hysteretic energy consumption in the translational and torsional responses. The cumulative hysteretic energy to collapse was apparently different between the two specimens, ten times larger in the Specimen A, while the ultimate displacements were not so much different. It may be concluded that the structural collapse is dominated much more by the inelastic response displacement than by the cumulative hysteretic energy.

Key Words: shaking table test, axial load collapse, torsional response, limit state, hysteretic energy

1. はじめに

耐震壁が平面的に不規則に配置されることなどによって生じる偏心構造物では、振れ応答により一部の構面に応答変形が集中し、一般に偏心のない場合よりも耐震性能は劣る。しかし、特に非線形地震応答の増幅は理論的に定量化されておらず、したがって、必要保有水平耐力の割増や耐震診断における形状係数の背景は必ずしも明快ではない。一方、構造物が大変形に至って脆性的な崩壊に至るまでに、それ以前の繰り返し加力や累積入力エネルギーが及ぼす影響も明らかにされていない。

本研究は加震方向と加震直交方向に連層耐震壁が偏在した6層1×2スパンのRC1/3縮約モデルの動的震動実験の実験結果を報告する。

本報告では前報(その1)に示した実験計画を示した震動実験の結果を報告する。実験は全く条件の等しい2体の試験体に異なる加震計画で加震した。構造物の応答結果からRC偏心構造物の応答性状、2体の応答性状の違いからRC構造物の崩壊には変形、履歴消費エネルギーのどちらが支配的に影響するか解析結果を報告する。

本報告では、試験体2体の応答性状の詳細な比較について主に報告し、柱のせん断破壊後の軸力支持機能の低下や柱の破壊経過については別稿で報告する。

なお、本実験は文部科学省「大都市大震災軽減化プロジェクト」の一環として行われた震動実験であり、大大特予備実験シリーズ3として行われた。本実験の主な目的は1) 2つの同一試験体に対して異なる入力計画を実施し、構造物の応答性状・破壊経過の違いを比較・検討すること、2) 柱のせん断破壊による軸力支持能力の喪失過程、および偏心によって生じる振れ振動の応答性状を把握すること、3) 入力地震動が崩壊現象に与える影響(崩壊には変形が支配的か、累積エネルギーが支配的か)、4) 実大RC造の三次元的震動実験に向け、各種計測器のモニタリング精度を検証することなどである。震動実験は、つくばの防災科学技術研究所の大型震動台で2003年12月から2004年1月にかけて実施された。

2. 実験結果

2.1 振れ応答性状

図2に試験体A、Bの最上階X方向(加震方向)各構面の基礎からの相対変位の最大変形角を示す。それぞれ加震中、各節点の加震正負方向の最大応答値をプロットしたので必ずしも同じ時刻の応答値ではない。構造物全体としての最大変形角はY1構面で試験体Aがrun11で1/40、試験体Bがrun6で1/25を記録し、試験体Bの方がやや大きく変形している。図のように試験体Aでは正負方向には

ほぼ同じ大きさで変形角が入力地震動ごとに漸増しているのに対して、試験体Bではrun5、run6で急激に変形が大きくなる。また、耐震壁構面（Y3構面）での変形角は試験体Aに比べて小さく、試験体Bは試験体Aより損れ応答性状が顕著である。

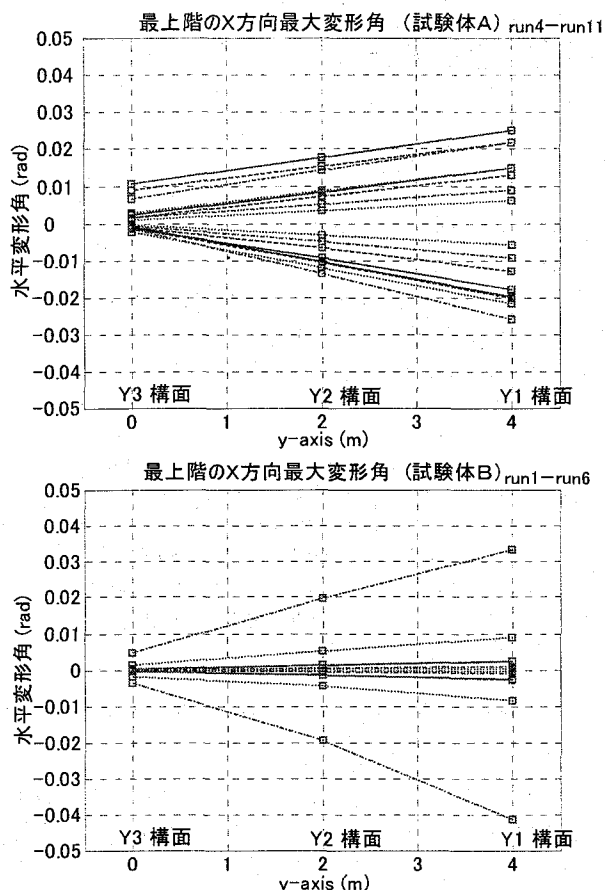


図2 最上階X（加震）方向の最大変形角

次に1層について応答中心点のY座標位置を算出した。ここで応答中心点を見かけ上X方向に変形しない（層の回転中心となる）点と定義し、以下の方法で算定した。

1層2点間のX方向水平変形から層の回転角を算出し、重心位置のX方向水平変形と回転角との線形関係から水平変形の回転角に対する比を直線回帰によって特定することにより、重心から応答中心点までの距離を算定した。

各地震波入力時の応答中心点の位置を図3に示した。試験体Bは試験体Aよりも応答中心点が重心に近く、偏心応答が顕著である。また、試験体A、Bともにrun3までの小さいレベルでは、重心から応答中心点までの距離が長くなり、X方向の並進応答が大きくなるが、その後、構造物が塑性化してからは徐々に短くなる。これは塑性化が進むに従って偏心応答が徐々に顕著になることを示している。

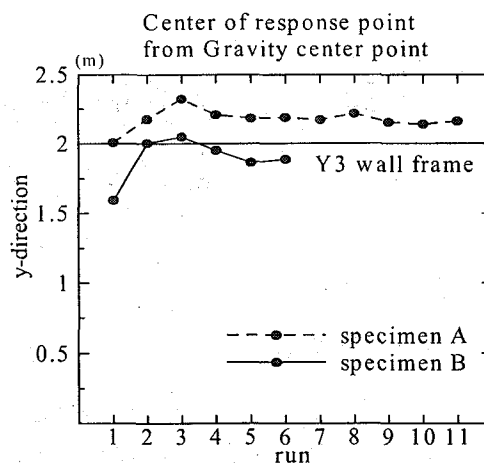


図3 応答中心点の位置の推移

2.2 1層の応答

次に、1層の層せん断力-層間変形（重心位置）の関係を図4、5に示す。試験体A、Bともに構造物は1層柱が主筋降伏に至る場合と終局に至る入力レベル時（試験体A：run7,9、試験体B：run5,6）における関係を図示した。

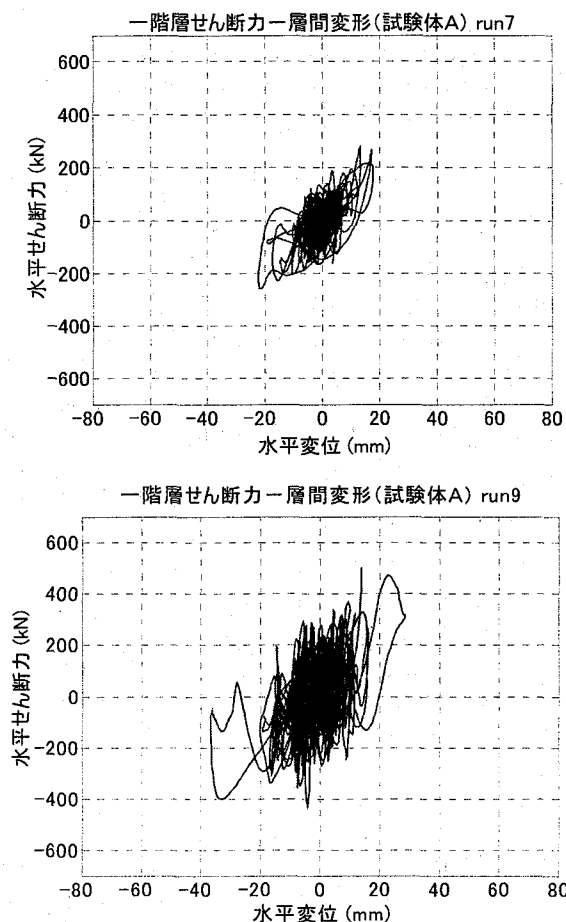


図4 1層の層せん断力-層間変形関係図（試験体A）

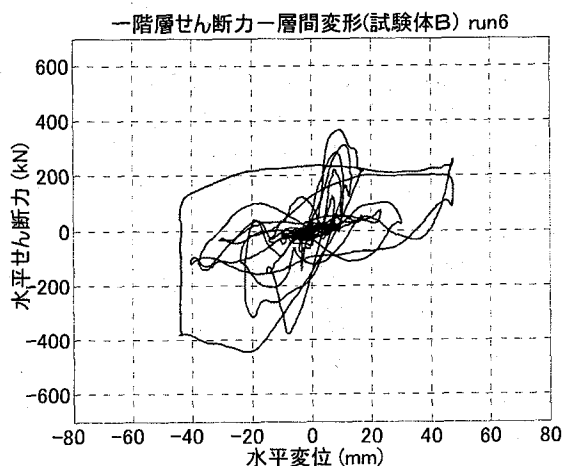
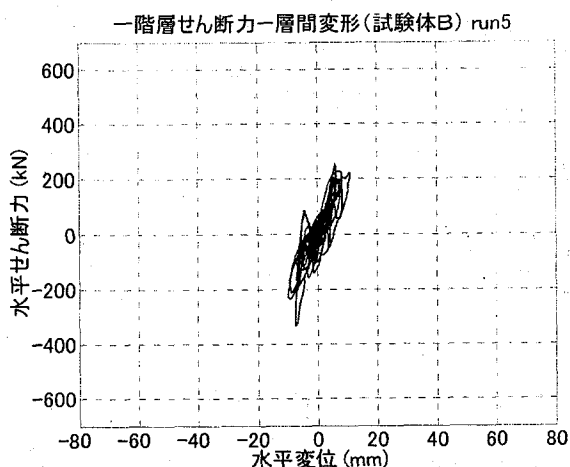


図5 1層の層せん断力-層間変形関係図
(試験体B)

層せん断力は重心位置の並進加速度に質量を乗じて算定したものである。一層せん断力と層間変形の関係は非常に非定常であるが、試験体Bの方が試験体Aより線形性を保っている。これは試験体Aでは層せん断力-層間変形関係がより大きく高次モードの影響を受けているためであると推定される。試験体B、run6入力時の層せん断力は、変形40mm程度で負方向のせん断耐力が急激に低下している。この時点で柱がせん断破壊し、構造物が終局状態に至った現象が復元力特性に明瞭に現れている。

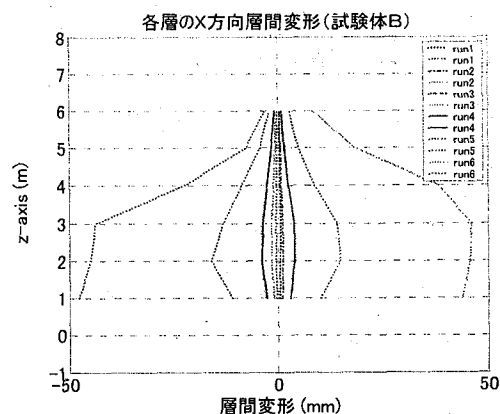
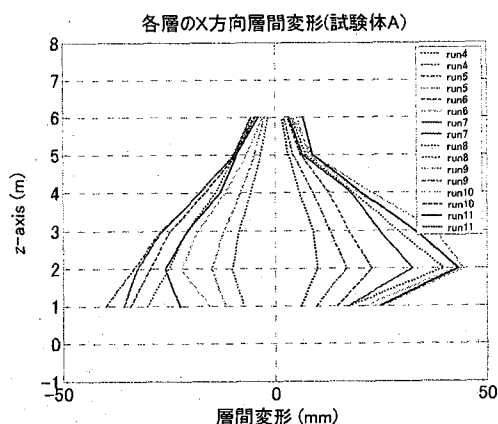


図6 各層の層間変形の高さ分布

また、図6に示したY1構面の各層最大層間変形の分布によれば、試験体Aの分布に比べて試験体Bでは1層の変形が相対的に大きい。試験体は2体とも1層柱の曲げ降伏後のせん断破壊により終局状態に至ったが、試験体Aは構造物がほぼ完全な全体降伏機構を形成して維持し、柱は柱脚曲げ圧壊に近い破壊モードであったのに対して、試験体Bでは1層または1, 2層の部分的な層崩壊も振動中に混在しており、柱はより脆性的なせん断破壊に近いモードで破壊した。以上の違いは入力地震動の性質、特に短周期域での加速度応答レベルの違いによるものと考えられる。

3. 履歴エネルギーに関する検討

3.1 累積履歴消費エネルギー

試験体2体の累積履歴消費エネルギーの推移を図7に示す。構造物の履歴消費エネルギーはX方向並進成分の履歴消費エネルギーと層回転成分の履歴消費エネルギーの和として求めた。各層重心位置のX方向絶対加速度に層重量をかけて水平外力を求めた。各ステップでその外力にX方向変形の増分を乗じて時刻歴で積分し、並進成分の累積履歴消費エネルギーを算出した。これと同様に、各層2点間の絶対加速度から絶対層回転加速度を求め、層の回転慣性質量をかけて各層に作用する外力モーメントを求めた。各ステップでその外力に回転角増分を乗じて時刻歴で積分し、層回転成分の履歴消費エネルギーを算出した。並進成分と回転成分の運動方程式と履歴消費エネルギーを計算式をそれぞれ式(1)、式(2)に示す。

並進成分と回転成分の運動方程式

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + k(x - e\theta) &= -m\ddot{x}_0 \\ I\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + ke^2\theta &= -I\ddot{\theta}_0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

m: 層質量
x: 層重心位置の並進方向変形
 θ : 層回転角
 x_0 : 振動台加速度
k: 重心位置のX方向剛性
c: 減衰係数
とする。

並進成分と回転成分の履歴消費エネルギー

$$E_x = \int (c\dot{x} + k(x - e\theta)) dx = \int m(\ddot{x}_0 + \ddot{x}) dx \quad (2)$$

$$E_\theta = \int (c\dot{\theta} + k_e\theta) d\theta = \int I(\ddot{\theta}_0 + \ddot{\theta}) d\theta$$

E_x : 並進成分の履歴消費エネルギー

E_θ : 回転成分の履歴消費エネルギー

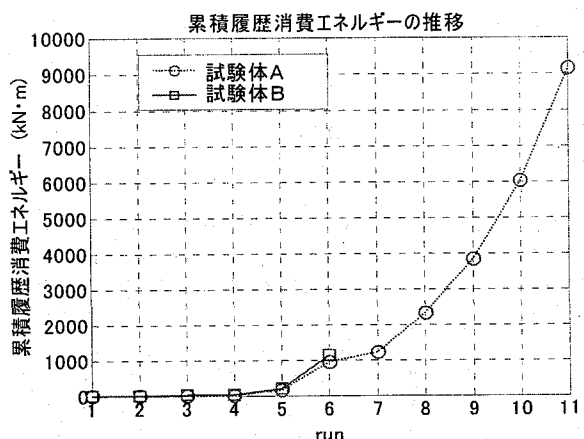


図7 累積履歴消費エネルギーの推移

run6までの累積履歴消費エネルギーは試験体A・Bともにあまり変わらないが、試験体Aでは大きく塑性化したrun6以降の累積履歴消費エネルギーは非常に大きくなっている。最終的に試験体Aの累積履歴消費エネルギーは試験体Bの約10倍にまで達した。

3.2 並進成分と回転成分の比較

各試験体の層回転成分の履歴消費エネルギーとX方向（並進方向）成分の履歴消費エネルギーの推移を図8に示す。

層回転成分の履歴消費エネルギーは並進成分の履歴消費エネルギーに遅れて増加している。これは並進運動では耐震壁などが早い段階で塑性化が始まるのに対して、回転運動は比較的大きな応答変形まで弾性範囲に留まる性質に対応している。試験体Aでは終局時の回転成分と並進成分の履歴消費エネルギーはほぼ等しくなった。また試験体Bの回転成分エネルギーは、構造物が並進方向に非線形化してから地震時間が短いため、並進成分の履歴消費エネルギーに比べて非常に小さくなっている。

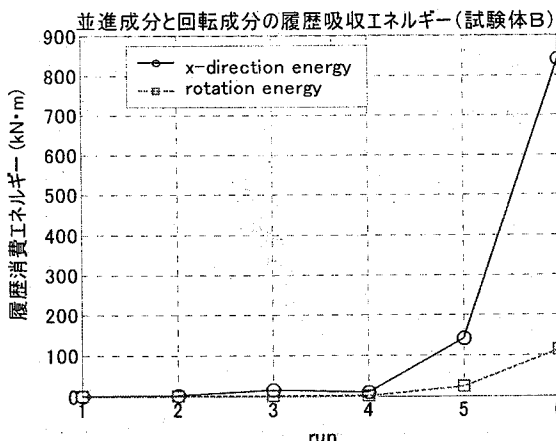
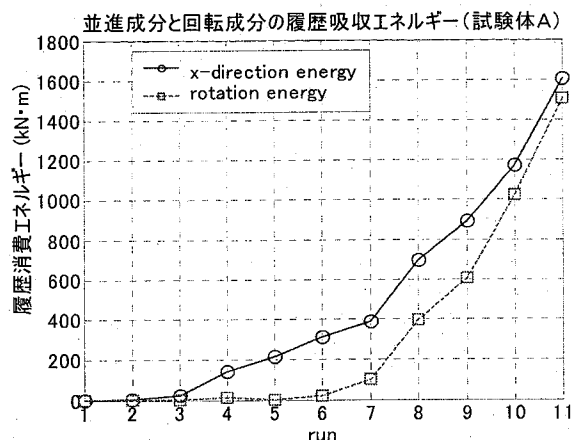


図8 層回転成分の履歴消費エネルギーとX成分の履歴消費エネルギーの推移

3.3 変形と履歴消費エネルギーの関係

変形と履歴消費エネルギーの関係を検討するために、図9に回転成分、並進成分の各地震波入力時の履歴消費エネルギーと並進、回転変形の最大応答値の関係をプロットした。

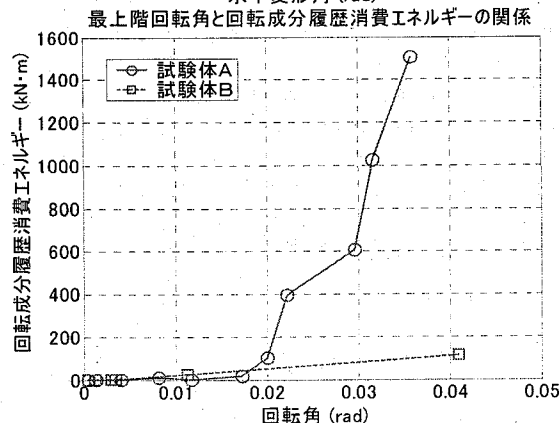
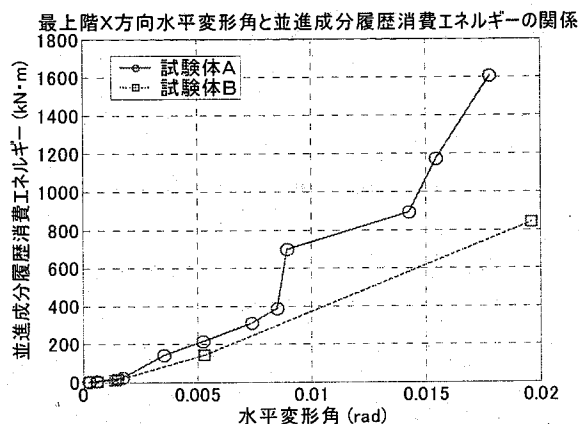


図9 各成分の変形と履歴消費エネルギーの関係

試験体Aの履歴消費エネルギーは並進成分・回転成分ともに構造物の塑性化が進むほど指数関数的に増大している。これに対して試験体Bでは、並進成分・回転成分ともにrun6まで最大変形に対してほぼ線形的に上昇している。試験体Bでは並進成分の履歴消費エネルギーが

run6で構造物が塑性化することである程度上昇するが、回転成分の履歴消費エネルギーは非常に小さいため、試験体Aに比べて変形量が大いにも関わらず、終局時の全体の履歴消費エネルギーは非常に小さい値に留まっている。

今回の実験では試験体Aには変形が漸増する荷履歴、試験体Bでは降伏時から急激に構造物が崩壊するレベルの地震波を入力した。また試験体Aに入力したTOH・CHI波は海洋型の地震波形であり継続時間の長い波である。これに対して試験体Bに入力したJMA・TAK波は兵庫県南部地震時に収録された直下型の地震波形で、継続時間の短い長周期成分大きな波形である。従って、震動時間と荷履歴が大きく異なることによって2体の変形量と履歴エネルギーの関係が図のように大きく異なっている。試験体Bでは、このような入力地震動の性質により、多数回の繰返しの応答を経ないで、急激に大きな応答変形に達したため、試験体Aに比べて累積消費エネルギーは格段に小さい段階で崩壊に至った。

1層独立柱のせん断耐力低下から、試験体ABはそれぞれrun11、run6で終局状態に至ったと判断できる。2体の変形が同程度で、累積履歴消費エネルギーに大きな違いがあることから、RC構造物の崩壊には累積履歴消費エネルギーよりも、最大応答変形がはるかに支配的であるといえる。

4. 実験結果と事前解析の比較

4.1 事前解析の解析手法

事前解析はCANNY99¹⁾を用いて解析した。独立柱はファイバーモデル、耐震壁側柱は材端バネモデルでそれぞれモデル化した。材端バネモデルの履歴モデルには武田モデルを用いた。軸バネにはaxial-stiffnessモデルを用いた。また、コンクリートモデルの圧縮強度は25 (N/mm²)、柱主筋の引張強度は343 (N/mm²)として解析した。

耐震壁は三本柱モデルでモデル化し、曲げバネには武田モデルを用いた。また、せん断バネは弾性とした。

梁は武田スリップモデルと武田モデルを用いた材端バネモデルでモデル化した。武田スリップモデルは試験体Aの大きく塑性化する範囲で梁の履歴モデルに用いた。これは試験体Aの梁が繰返し荷重を受けることで梁端から主筋が抜け出し、履歴がピンチングする現象を考慮するためである。武田モデルの除荷剛性の低減定数 $\gamma=0.4$ 、武田スリップモデルのスリップ定数を0.6とした。

梁および壁の曲げ耐力は靱性保証指針式に基づいて算定した。各部材の剛性低下率は菅野式を用いて算定した。また1層の柱の剛域は0.25 mとしロードセル上面で柱が固定されているものとして解析した。

4.2 一層Y1構面の独立柱のX方向柱頭変形角

図10に1層Y1構面に位置する独立柱のX方向柱頭変形角について解析と実験値の推移を比較した。

試験体Aは主筋が降伏する前後までは(run5, 6)解析値と実験値が非常に近い値になっている。しかし、run7以降、解析値はX負方向の最大変形角を過小評価している。これは、繰返し荷重による独立柱の耐力劣化を解析モデルが考慮していないためである。これに対し、試験体Bは解析値と実験値が非常に近似している。

これは試験体Bが多数回の繰返しの応答を経ないで、run6で急激に大きな応答変形に達したため、最大応答変形角が従来の履歴モデルで推定できたと考えられる。

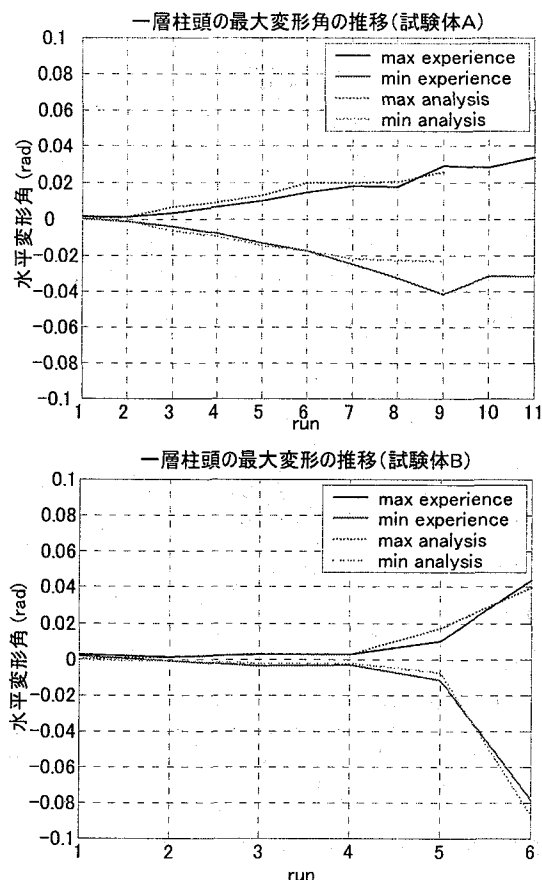
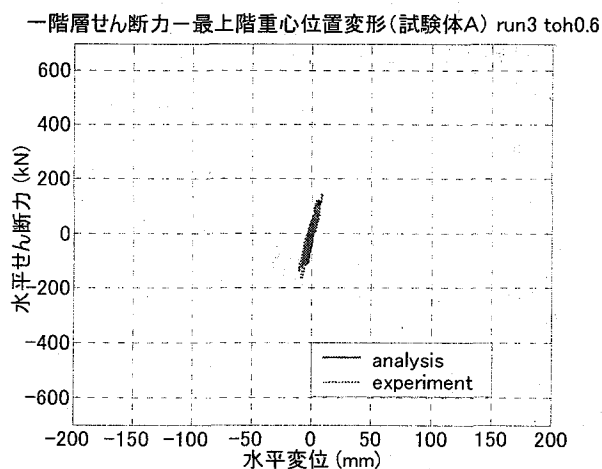


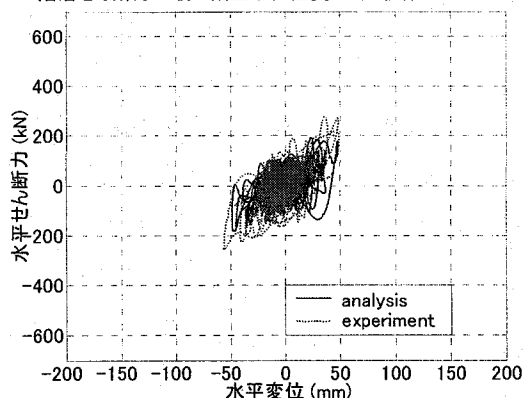
図10 一層独立柱のX方向柱頭変形角

4.3 一層せん断力と最上階の重心水平変形関係

図11、図12に1層せん断力と重心水平変形について解析と実験値の推移を比較した。試験体A、Bともに構造物は弾性レベル、1層柱が主筋降伏に至る場合と終局に至る入力レベル時(試験体A: run3,7,9, 試験体B: run3,5,6)における関係を図示した。破線に実験値の復元力特性、実線に解析値の復元力特性を示す。



一階層せん断力-最上階重心位置変形(試験体A) run7 chi0.45



一階層せん断力-最上階重心位置変形(試験体A) run9 chi1.1

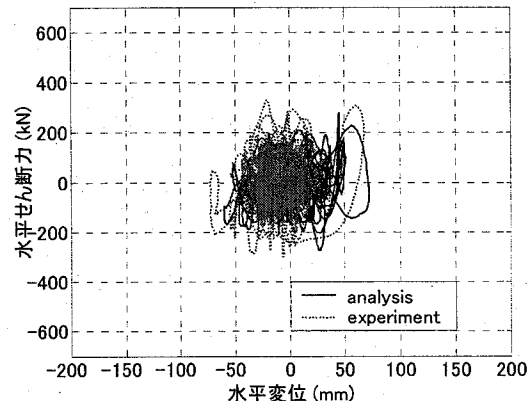
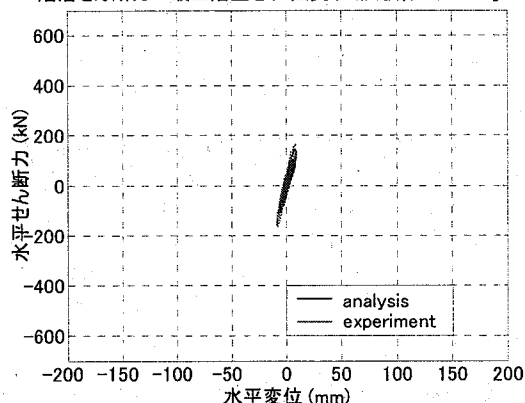
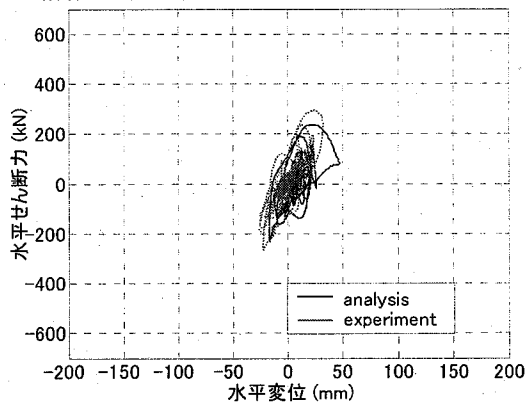


図11 1層の層せん断力-最上階重心位置変形関係図(試験体A)

一階層せん断力-最上階重心位置変形(試験体B) run3 jma 0.2



一階層せん断力-最上階重心位置変形(試験体B) run5 jma 0.6



一階層せん断力-最上階重心位置変形(試験体B) run6 tak1.1

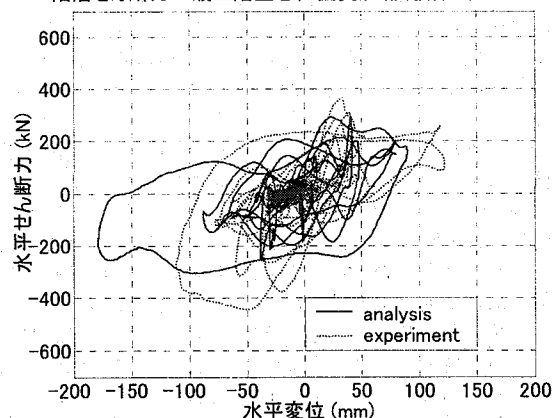


図12 1層の層せん断力-最上階重心位置変形関係図(試験体B)

弾性レベルでは、試験体A、Bともに実験値と解析値の剛性及び応答変形は非常に近似している。

塑性化が大きくなると、実験値の最大せん断耐力は解析値を上回っていて、特にその現象は試験体Aよりも試験体Bにおいて顕著である。これは歪速度の影響であり、少ない繰返し回数で急激に大きな変形する試験体Bでは、特にその影響を大きく受ける。試験体Bのrun6では歪速度の影響で実験値の剛性が高く、そのため最大変形が解析値に比べてかなり小さくなっている。

5. まとめ

今回の実験により以下の結論が導かれた。

- 1) 偏心するRC構造物は弾性範囲では回転成分の応答が支配的である。応答が増大するにつれて、並進方向の応答が非線形化し、支配的になるが、さらに塑性化が進行すると、層回転成分が非線形化して回転応答が顕著になる。
- 2) 試験体A、Bともに1層独立柱の曲げ降伏後のせん断破壊によって終局状態に至ったが、試験体Aは柱脚の曲げ圧壊に近く、試験体Bは脆性的なせん断破壊に近い破壊モードであることがわかった。また、試験体Aの純ラーメンでは梁降伏型の機構が維持されていたのに対して、試験体Bでは層降伏機構も混在していた。
- 3) 回転成分の履歴消費エネルギーは変形と同様に、並進方向の応答が非線形化した後に純フレームが大きな変形に至ることによって増加する。従って、非線形化してから繰返し载荷をあまり受けずに終局に至った試験体Bは、回転成分の消費エネルギーが小さい。
- 4) 試験体A、Bの終局時の最大応答変形と累積履歴消費エネルギーを比較すると、変形は同程度であるが、累積履歴消費エネルギーは約10倍の違いがあることから崩壊には累積エネルギーよりも最大変形が支配的であった。
- 5) 事前解析と実験結果は非常に近似していた。解析の精度を高めるには柱部材の耐力劣化、歪速度を考慮した構造物のモデル化が必要とされる。