

論文 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

壁谷澤 寿一^{*1}・村瀬 正樹^{*2}・壁谷澤 寿海^{*3}・松森 泰造^{*4}

要旨：本実験は「大都市大震災軽減化特別（大大特）プロジェクト」の一環として行われた震動実験である。試験体は加震方向と加震直交方向に連層耐震壁を偏在して配置した6層1×2スパンの鉄筋コンクリート（RC）造建物の1/3縮約モデル2体である。形状配筋が同じ2体の試験体にそれぞれ海洋型地震動，内陸直下型地震動を想定して異なる加震計画で加震した。本編では試験体の応答結果を示すとともに，偏心構造物の捩れ応答性状，2体の試験体の崩壊に至るまでの累積履歴消費エネルギーなどについて検討した結果を報告する。

キーワード： 偏心応答，柱の破壊，構造物の終局状態，履歴消費エネルギー

1. はじめに

大大特（RC）予備実験プロジェクトの一環として，6層に耐震壁が偏在して配置される1×2スパンの鉄筋コンクリート造偏心フレーム構造を想定して震動実験を行った。本実験の目的は，1）2つの同一試験体に対して地震動継続時間の異なる入力計画を実施し，構造物の応答性状・破壊経過・エネルギー吸収能力の違いを比較・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捩れ振動の応答性状を把握すること，3）実大RC造の三次元的震動実験に向けて各種計測器を開発試用して計測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。なお，実験計画，試験体，破壊経過の詳細に関しては別報¹⁾に示した。

2. 実験概要

図-1に試験体の平面図およびY1構面の立面図を示す。試験体は1×2スパンの6層RC構

造物の1/3縮約モデル2体（試験体A,B）である。連層耐震壁がY3構面とX2構面に配置され，偏心率がX方向で0.382と非常に高い試験体である。スケール則により必要となる付加錘は各階6.3 tonで，自重も含む各階質量は9.23 ton，最上階9.74 ton，全体で57.95 tonとなる。なお，加震方向はX（張間）方向である。

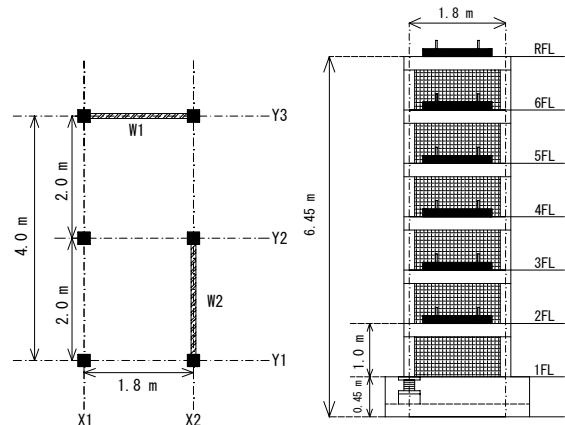


図-1 試験体の平面図およびY1構面立面図

加震計画を表-1に示す。入力地震動による繰返し履歴が崩壊現象に与える影響を検討するために試験体Aは継続時間の長い海洋型の地震動を低い入力レベルから漸増させていく加震計

*1 東京大学 工学系研究科 (正会員)

*2 東京大学 工学系研究科 (正会員)

*3 東京大学 地震研究所 教授 工博 (正会員)

*4 防災科学技術研究所 総合防災研究部門 研究員 工博 (正会員)

画，試験体Bは直下型の地震動を試験体が塑性化し始めてから非常に大きなレベル（TAK1.1）で入力する加震計画とした。

表－１ 入力地震波データ

(a) 試験体A

	入力速度 レベル	地震 波	倍率	原波形 最大加速度
	(kine)			(gal)
run1	6.3	TOH	0.15	258.2
run2	12.5	TOH	0.3	258.2
run3	25.0	TOH	0.6	258.2
run4	17.7	CHI	0.25	605.5
run5	28.2	CHI	0.35	605.5
run6	38.3	CHI	0.45	605.5
run7	42.5	CHI	0.6	605.5
run8	63.5	CHI	0.9	605.5
run9	77.7	CHI	1.1	605.5
run10	77.7	CHI	1.1	605.5
run11	84.7	CHI	1.2	605.5

(b) 試験体B

	入力速度 レベル	地震 波	倍率	原波形 最大加速度
run1	7.5	TAK	0.06	605.5
run2	8.54	JMA	0.1	884.4
run3	17.08	JMA	0.2	884.4
run4	17.08	JMA	0.2	884.4
run5	51.2	JMA	0.6	884.4
run6	111.78	TAK	1.1	605.5
run7	91.45	TAK	0.9	605.5

TOH：1978 宮城県沖地震 東北大学 (NS)

CHI：1985 チリ地震

JMA：1995 兵庫県南部地震 神戸海洋気象台 (NS)

TAK：1995 兵庫県南部地震 JR鷹取駅 (NS)

計測はサーボ型加速度計 3ch，歪型加速度計 62ch，変位計 91ch，柱主筋・帯筋の歪ゲージ 44ch，ロードセル 18ch の計 218ch で計測を行った。

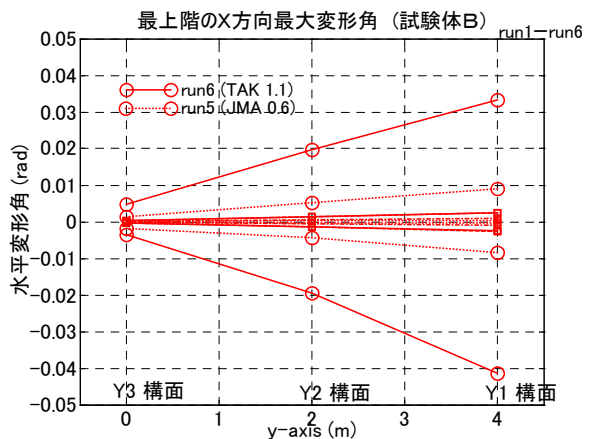
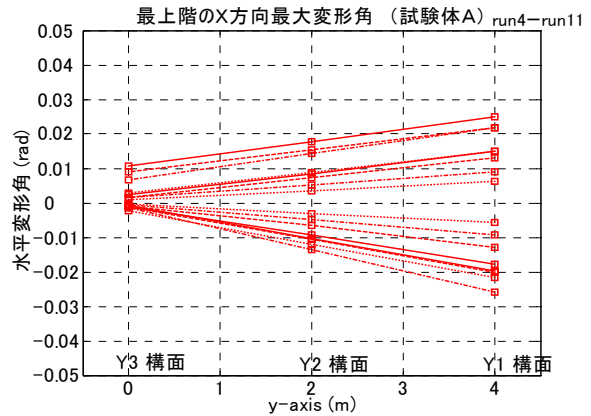
変形は各層の鉛直変形・治具計測用フレームからの相対変形・各構面の層間変形を測定した。加速度計は各階節点に配置し，X Y Z 方向の絶対加速度を計測した。これらにより，各層の床位置の相対変位および絶対加速度の並進 (X, Y)

成分，回転成分，2本の独立柱（1,3,5階）の軸力・せん断力を計測しうる計測計画とした。データのサンプリング周波数は 2000 Hz である。

3. 実験結果

3.1 振れ応答性状

図－2 に試験体A，Bの最上階X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，耐震壁構面での変形角は試験体Aに比べて小さく，試験体Bの応答は試験体Aより振れ応答性状が顕著である。



図－2 頂頭X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。

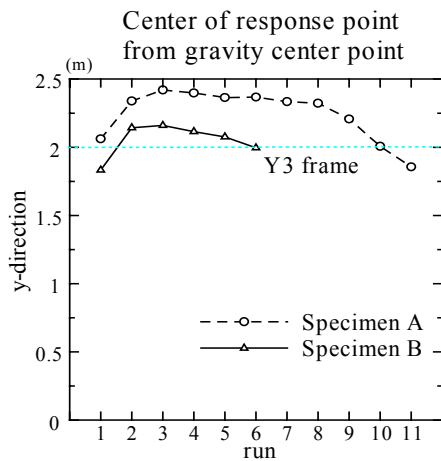


図-3 応答中心点の位置の推移

応答中心点の推移を図-3に示した。全体として、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。

3.2 1層の応答

1層の偏心モーメントと回転角の関係を図-4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: run7,11, 試験体B: run5,6)における関係を図示した。偏心モーメントは各層2点間のX方向加速度計の値から層の角加速度を求め、重量が等分布であると仮定し、重心回りの回転慣性モーメントをかけて各層の偏心モーメントを求めた。各層の偏心モーメントの総和

として1層の偏心モーメントを推定した。偏心モーメントと回転角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より線形性を持っている。これは試験体Aでは偏心モーメント-層回転角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が、より詳細な検討が必要である。

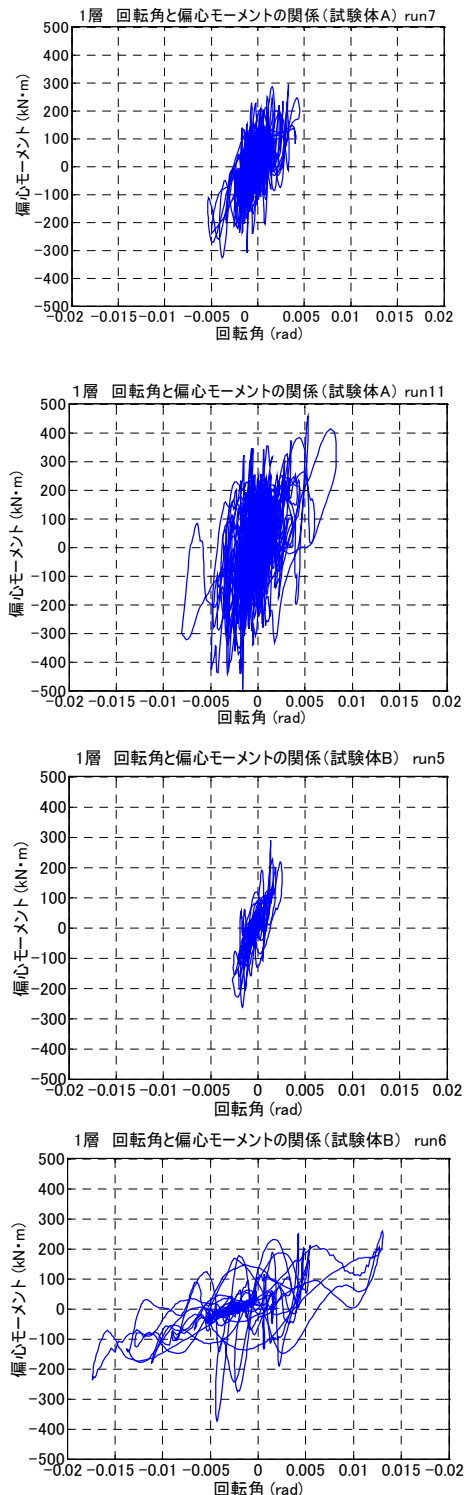
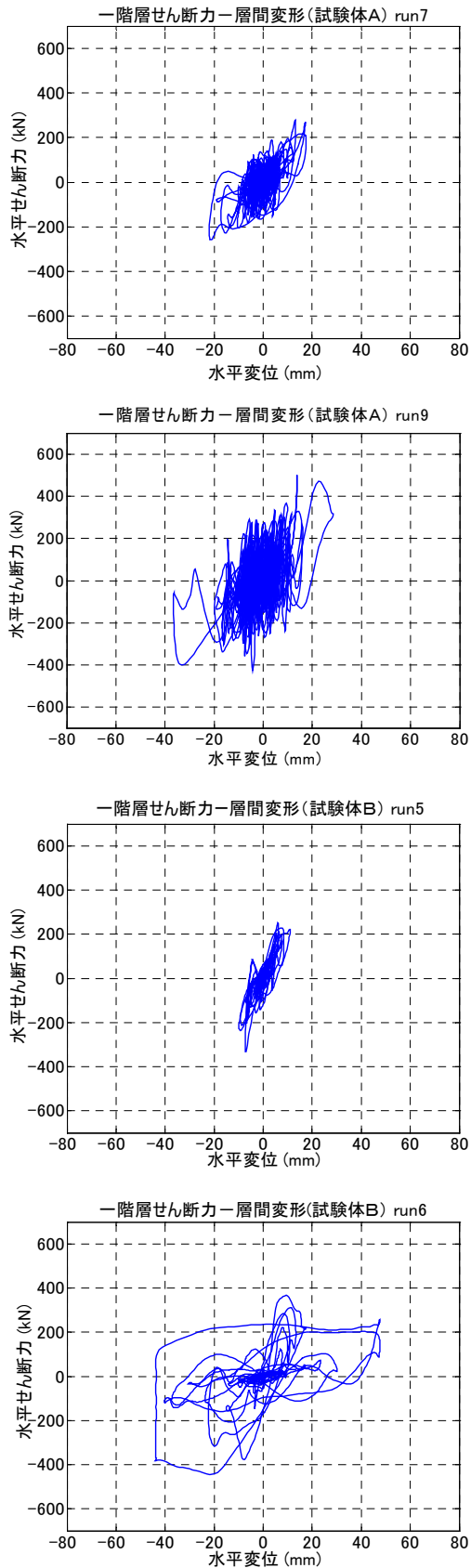


図-4 1層偏心モーメント-層回転角関係図

次に、1層の層せん断力－層間変形（重心位置）の関係を図－5に示す。

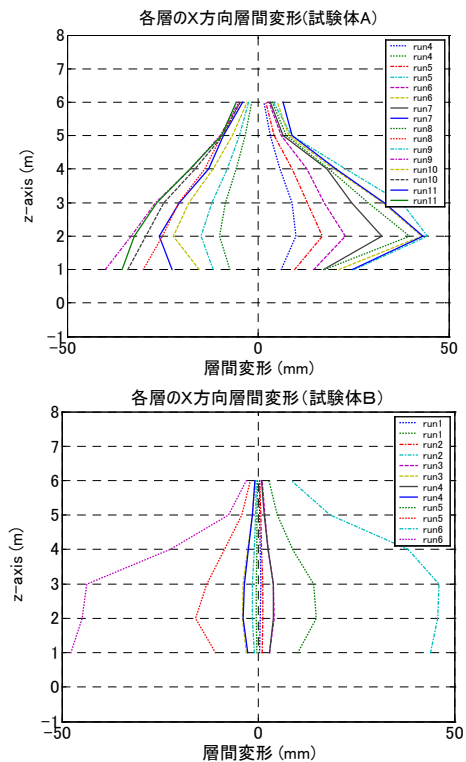


図－5 1層の層せん断力－層間変形関係図

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。層せん断力－層間変形の関係も偏心モーメント－層回転角関係と同様の形状を示している。しかし、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あらわれている。

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。

今回の試験では2体とも全体降伏機構を形成し、1層独立柱の主筋降伏後のせん断破壊を想定していた。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。



図－6 各層の層間変形の高さ分布

4. 履歴エネルギーに関する検討

4.1 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。

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8倍にまで達した。

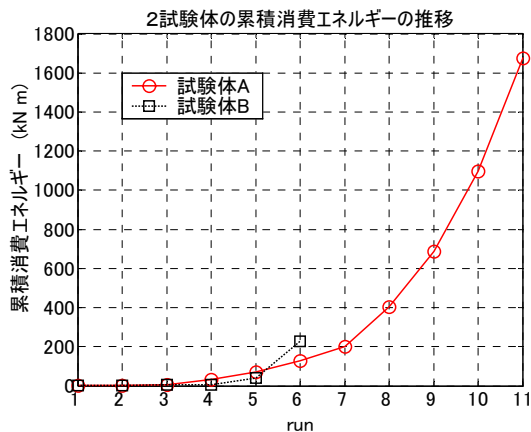


図-7 累積履歴消費エネルギーの推移

4.2 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の震動時間が短いため、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。

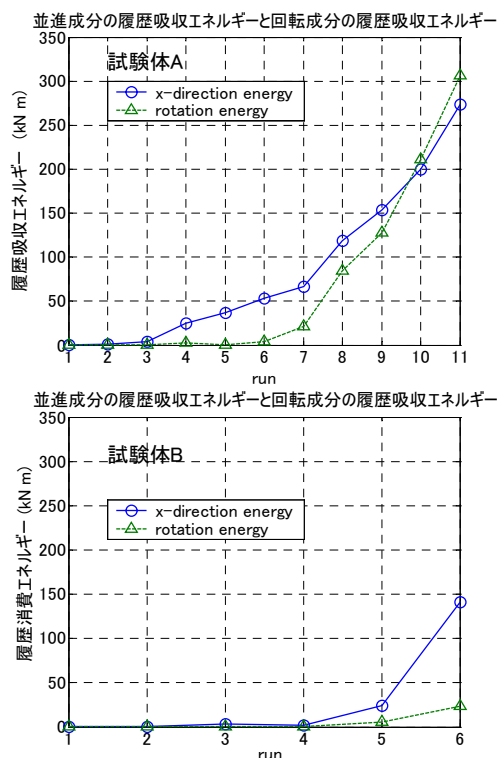


図-8 層回転成分の履歴消費エネルギーとX成分の履歴消費エネルギーの推移

4.3 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。

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。

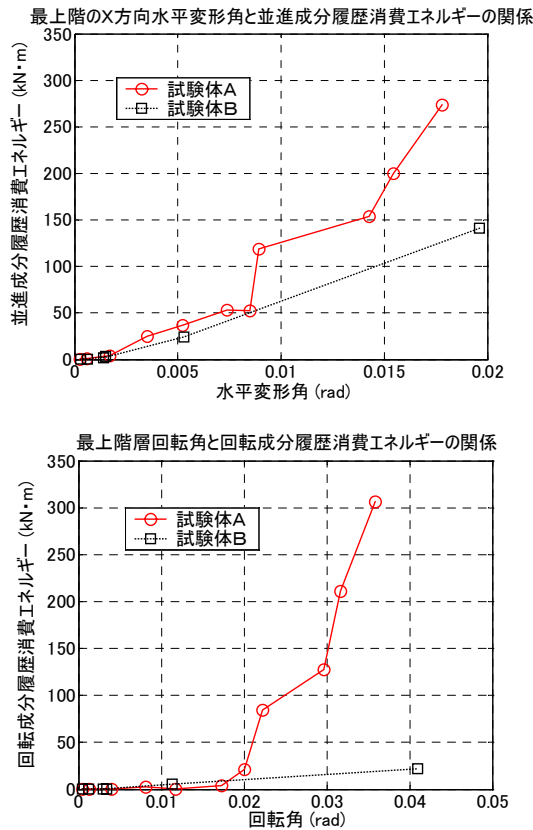


図-9 各成分の変形と履歴消費エネルギーの関係

今回の実験では試験体Aには変形が漸増する载荷履歴、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、震動時間と载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様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A B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。

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、弾性範囲において応答が増大するにつれて、並進方向の応答が支配的になる。その後、構造物の塑性化が進行すると、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り増加する。従って、非線形化後、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8倍の違いがあり、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。

参考文献

- 1) 村瀬正樹, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海他: 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1), 第5回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.221-226, 2004.3.