

# 乾燥収縮により初期変形を受けた免震建物(LRB)の耐震性能の評価

## EVALUATION OF EARTHQUAKE RESISTANCE ABILITY FOR BASE ISOLATED BUILDINGS WITH INITIAL DEFORMATION BY DRY SHRINKAGE

島崎 和司 \*

Kazushi SHIMAZAKI

Shortening of R/C members caused by dry shrinkage for a base isolated building, deforms a base-isolate-equipment. The deformation varies with its position. Usually, the largest value is at the edge of a building plan. The varied initial deformation leads to torsional vibration for the building.

This paper examines this torsional vibration parametrically by 3-D dynamic analysis using the vibration isolation materials modeled to the bi-linear systems. The results show that the initial deformation does not have an effect on the seismic ability of base isolated buildings for severe earthquakes. However, it leads to leave remaining deformation after not only severe earthquakes but also moderate ones.

**Keywords : Base isolated building, Dry shrinkage, Earthquake Resistant Design, Torsional vibration**

免震構造、乾燥収縮、耐震設計、振れ応答

### 1. 序

鉄筋コンクリート構造物は、コンクリート打設後、乾燥により部材の収縮が発生し、クラックの原因となる。乾燥収縮による部材の収縮量は、構造物の長さに伴い増加する。一般的な建物では変形量が小さいため、主要構造部材に与える影響は少なく、構造的には大きな問題にはなっていない。外壁等においては、防水、美観上から、クラック誘発目地をいれ、乾燥収縮に対処している。長大な建物では変形量が大きくなり、構造性能にも影響が考えられるため、長さを制限する場合が多い。鉄筋コンクリート構造計算規準<sup>1)</sup>では解説で外国の規定では、50~60m 毎に伸縮目地を入れるよう規定したものが紹介している。国内でも、80m<sup>2)</sup>、100m<sup>3)</sup>に制限した基準、指針が見られる。

免震構造物は、基礎の拘束度が小さいため、乾燥収縮による内部応力の発生が少なく、クラックが入り難い。そのため、一般の建物と比べて長大な構造物が建造されている。これらの建物では、基礎梁の乾燥収縮により、免震装置に初期変形が発生する。この変形量が無視できない量である事が現場で認められており、最近その報告がなされている<sup>4)5)</sup>。これらの初期変形により、方向によって免震装置の降伏変位が異なることになり、応答によっては、塑性偏心が増大し、振れ応答が生じて耐震性能に影響を与える可能性がある。本論はこの影響についてパラメトリックな検討を行なったものである。免震建物は、上部構造の重心位置と免震層の剛心位置を一致させることが原則であり、また、それが容易にできるため、上部構

造の偏心の影響を検討した例<sup>6)</sup>はあっても、このような検討はあまりなされていなかった。

検討の対象とした免震装置は、鉛を内部に内蔵した LRB である。これをバイリニアモデルと考えた。鉛は、乾燥収縮のようなゆっくりとした変形では、応力がほとんど生じないといわれている。そのため LRB としての降伏変位はほとんど変化しないと考えることも可能であるが、ここでは、想定したバイリニア特性に基づき、初期応力が生じると考えた。板状建物が長辺方向に収縮し、免震装置に初期変形が生じた後に、x 方向、y 方向、45° 方向に変形が進むときの両端の免震装置の降伏面との関係を模式的に示したのが図 1 である。両免震装置は、乾燥収縮により x 方向に絶対値がほぼ同じで、方向が逆の初期変形を受ける (①の状況)。この状態から、x 方向に加力すると、降伏の時期は異なるが、振れは生じない。y 方向に加力すると、同時に降伏し、塑性偏心は生じない。ところが、45°

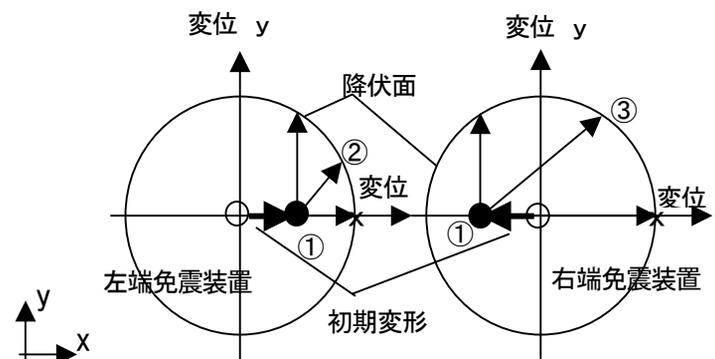


図 1 免震装置の初期変形と降伏面の模式図

\* 神奈川大学 工学部 建築学科 助教授・博士(工学)

Department of Architecture, Kanagawa University, Dr. Engineering

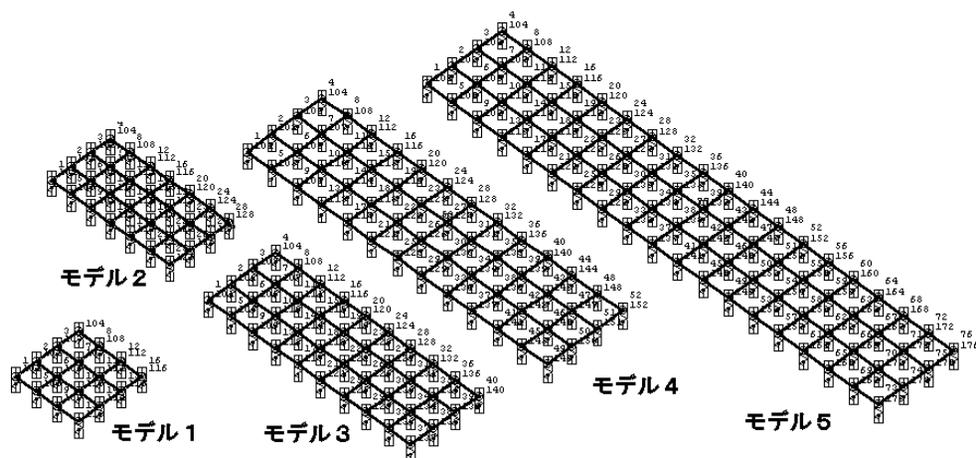


図2 解析モデル

方向に加力すると左端免震装置の方が先に降伏し (②)、その後右端免震装置が降伏して (③)、塑性偏心が生じると考えられる。この影響を検討するために、3次元立体構造物の静的・動的非線形解析プログラム(RESPT)<sup>7)</sup>による基礎面での平面振れ解析を行った。

## 2. 解析モデルとパラメータ

想定した建物は、スパン8mで、妻行き3スパン、8階建ての建物とし、図2に示すような、辺長比1,2,3,4,6の5つのモデルとした。各建物は24m×24～144mの平面となる。各モデルには、外周に1m幅のバルコニーを有し、単位床面積あたりの重量を13kN/m<sup>2</sup>と仮定して重量を求めた。本論では、平面的な振れ応答を検討するため、上部構造は無視し、全重量が基礎梁フレームの節点にあるものとして解析を行なった。解析フレームの梁の剛性は、AIJ有効幅分のスラブの効果を加味した値とした。スラブの面内剛性を考慮するため、スラブ厚200mmの4節点のシアパネル要素を全体に組み込んだ。

免震装置は、基礎梁フレームの各節点下に各1基づつ取り付け、積載重量により、外周部600φ、内部800φとした。各モデルで16基～76基の免震装置によって支えられる。免震装置の特性値は、代表的なメーカーのカタログ値を参考にして、表1のように仮定し、バイリニアモデルとした。初期剛性は、降伏後剛性 $k_d$ の13倍とした。この時の降伏変形は、600φで約8mm、800φで約10mmとなる。免震装置は、4本のばねに置換したMSSモデル<sup>8)</sup>とした。弾性剛性時の初期周期は、モデル1～5でx方向、y方向、振れに対し1.3～1.4秒である。

乾燥収縮量を算定するための乾燥収縮歪最終値 $S_n$ は、プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説の標準値<sup>9)</sup>、 $3.75 \times 10^{-4}$ を丸めて $4 \times 10^{-4}$ とした。これによる免震装置の初期変形は、モデル1で約5mm、モデル4では、約19mmとなる。モデル3より辺長比の大きな建物においては、乾燥収縮による初期変形によって、端部の免震装置は第2勾配に入っていることになる。そのため、初期周期もモデル1～5で1.3～2.1秒と変化する。乾燥収縮による初期変形は、全部材均一の収縮歪として算定した。

解析のパラメータは入力方向、入力レベル、辺長比、地震動の種類、重量偏心率とし、それぞれに対し乾燥収縮による初期変形有り、無しによる差を、静的的増

分解析と地震動を用いた応答解析により検討した。

## 3. 静的増分解析

設定したモデル建物は、x,y両方向に対称であり、初期変形の有無にかかわらず、両方向とも偏心率は0である。この建物の重心位置に図3に示すようにx方向から45°傾いた方向に加力を行なう。図4にモデル1、図5にモデル4の、(a)重心位置での荷重-変形関係、(b)免震装置の瞬間剛性を用いて弾力半径を求めて算定した偏心率の推移、(c)両端部の免震装置(モデル4では図3の免震装置2と50)のy方向変位より求めた振れ回転角の推移を示す。

モデル1の結果では、水平荷重0.2MNより、塑性偏心が増大し始め、水平荷重1.2MNで偏心率0.2に達する。水平荷重1.4MNになると荷重-水平変形関係は第2勾配に入り、全免震装置が第2勾配に入る。その点で、塑性偏心は0となる。振れ回転角は非常に小さい。この建物は辺長比が1であり、xy両方向の偏心率は、まった

表1 想定した免震装置(LRB)の基本特性

外径 (mm)	鉛プラグ径 (mm)	降伏後剛性 $k_d$ (kN/mm)	降伏耐力 $Q_d$ (kN)	$k_b$ ( $\gamma=1$ ) (kN/mm)
600φ (外周)	100φ	0.61	65.4	1.26
800φ (内部)	150φ	1.09	147.2	2.56

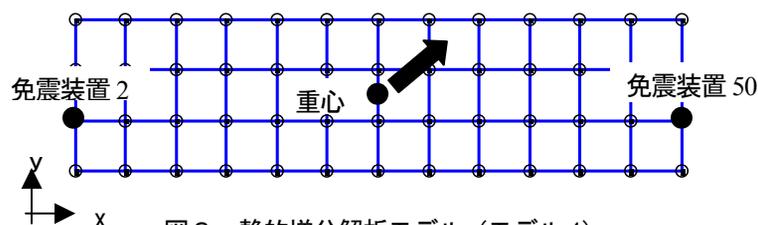


図3 静的増分解析モデル (モデル4)

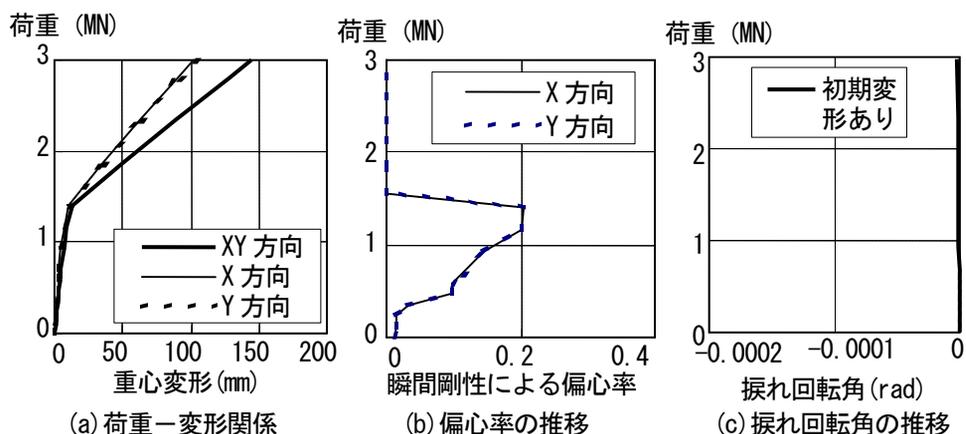


図4 静的解析結果 (モデル1)

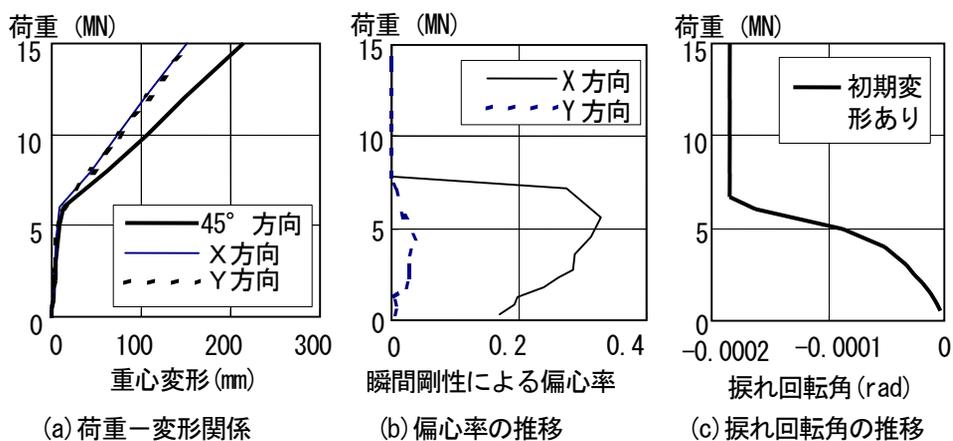


図5 静的解析結果 (モデル4)

く同一の値となっている。

モデル4の場合、両端の免震装置2と50は、加力前に乾燥収縮による初期変形により、すでに第2勾配に入っている。加力により免震装置2はそのまま第2勾配を進み、免震装置50は直ちに除荷に移り、弾性剛性に復帰する。このため左右で剛性が異なり、偏心が生じることになる。そのため戴荷直後から偏心率は増大し、振れ回転角も増えている。モデル1と同様に、水平荷重7MNに達すると荷重-水平変形関係は第2勾配に入り、全免震装置が第2勾配に入り、塑性偏心は0となる。この点で、振れ回転角の増大も止まり、以後ほとんど一定のまま推移する。瞬間剛性を用いた偏心率は、最大で0.3を超えている。

図6に、辺長比と両端の免震装置のy方向変位を建物長さで割って求めた振れ回転角の関係を示した。辺長比3のときの振れ回転角が最も大きく、それより辺長比が増すと減少傾向にあることがわかる。y方向変位差の絶対値は増大している。図7は、モデル4において、乾燥収縮の最終歪量を変え、免震装置の初期変形量が異なる場合の、振れ回転角の変化を示したものである。最終乾燥収縮歪が $2 \times 10^{-4}$ までは、直線的に増大しているが、それ以降はおおむね一定値に漸近するように増大している。これは、最終乾燥収縮歪が $2 \times 10^{-4}$ のとき、端部の免震装置が乾燥歪による初期変形で第2勾配に達するためである。モデル4の建物長さは94mであるので、振れ回転角0.0002 radでのy方向の変形の差は約20mmとなる。

#### 4. 地震応答解析

静的解析により、 $45^\circ$ 方向加力時には応力レベルや辺長比によって振れが異なることが認められた。ここでは、地震応答解析によりその影響を検討する。用いた地震動の加速度記録は、標準的な地震動としてEl Centro NS、海洋型地震動としてHachinohe EW、内陸型地震動として神戸海洋気象台Kobe NSの3種を用いた。用いた地震動記録の最大速度を500mm/sに基準化した加速度記録による減衰定数10%の速度応答スペクトルを図8に示す。

##### 1) 入力レベルによる相違

モデル4(図3参照)に、El Centro NSを $45^\circ$ 方向に最大速度50mm/s、150mm/s、500mm/s、750mm/sで入力したときの免震装置2と50のy方向変位の関係を、初期変形の有無を合わせて図9に示す。建物が振れないで、 $45^\circ$ 方向に応答が推移していれば、免震装置2,50のy方向変位が同じとなり、この図で $45^\circ$ 方向の線上になる。入力の小さいレベルでは、初期変形のある場合に $45^\circ$ の線からかなり外れて、振れが励起されている。しかし、ある程度応答が進むと一定の振れを保ったまま、それ以上の振れ振動はなくなり、 $45^\circ$ 方向に振動する。入力レベルが大きくなると、初期変形の有無による差は小さくなり、振れの相対量も小さい。図10は、El Centro NS入力時の、初期変形有りの場合の、初期変形無しの場合に対するy方向変位の増大率(変形増大率)を入力レベルとの関係で示したものである。入力レベルが大きくなるに従い、y方向変形増大率が減少している。入力レベルが最大速度50mm/sでは、増大率が1.6を超えているが、入力レベルが最大速度500mm/sになると1.1を切り、初期変形のあることの影響は少ない。

図11に、免震装置2のx,y方向変形-x,y方向荷重関係を、図12に、免震装置2と50の各方向の変位の時刻歴を示す。入力レベル

振れ回転角(rad)

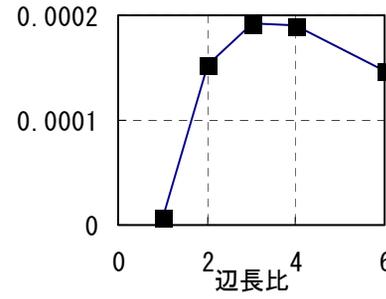


図6 辺長比と振れ回転角の関係

振れ回転角(rad)

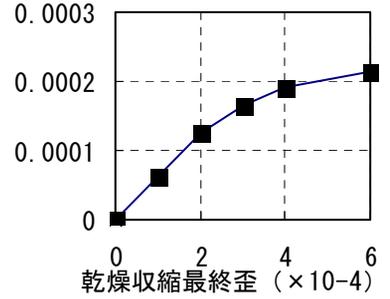


図7 乾燥収縮最終歪量と振れ回転角の関係 (モデル4)

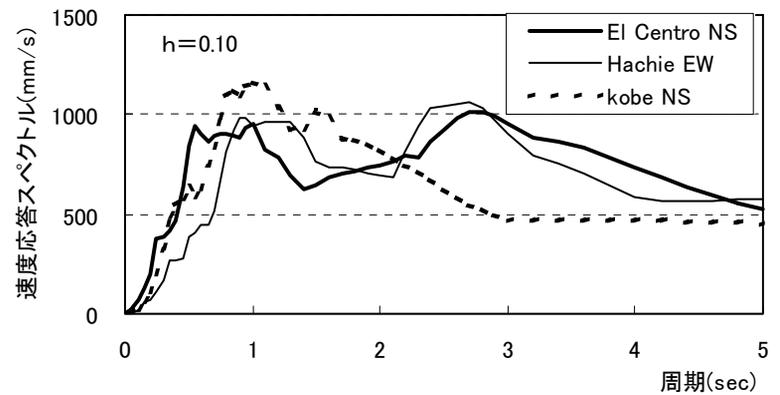


図8 用いた地震動の速度応答スペクトル (最大速度 500mm/s)

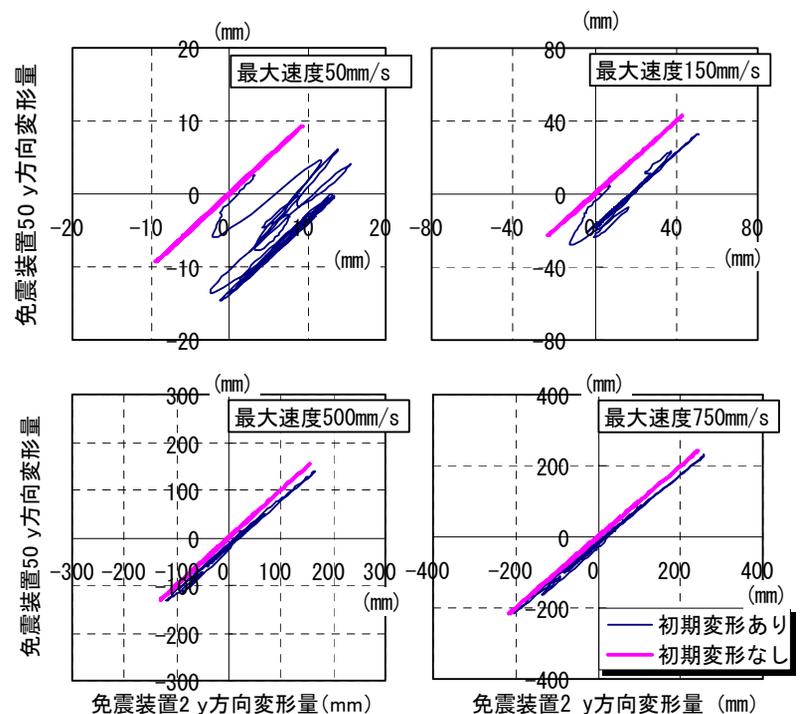


図9 免震装置2と50のy方向変形関係 (El Centro NS入力)

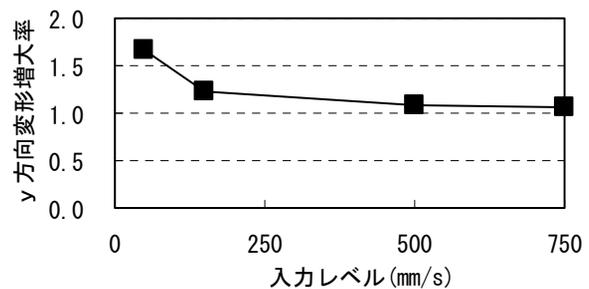


図10 入力レベルとy方向変形増大率の関係 (El Centro NS入力)

が小さい場合(最大速度50mm/s)には、x方向変位は初期変形位置を中心に振動しているが、y方向変位はx方向の初期変形に引きずられてドリフトし、最終的に残留変形が生じている。入力レベルが大きくなると(最大速度500mm/s)、その差は小さい。

入力する方向をx方向,y方向とした場合には、初期変形に伴い、

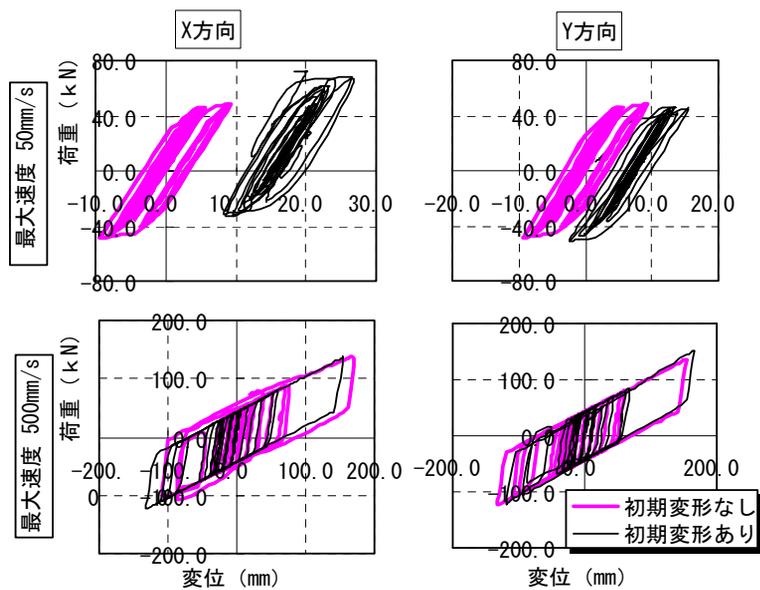


図11 免震装置2のx,y方向変形—荷重関係 (El Centro NS 入)

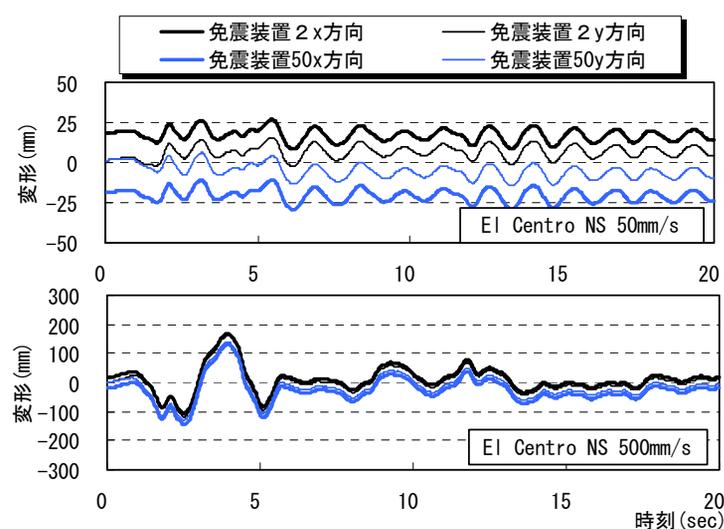


図12 免震装置2,50の各方向変形の時刻歴 (El Centro NS 入力)

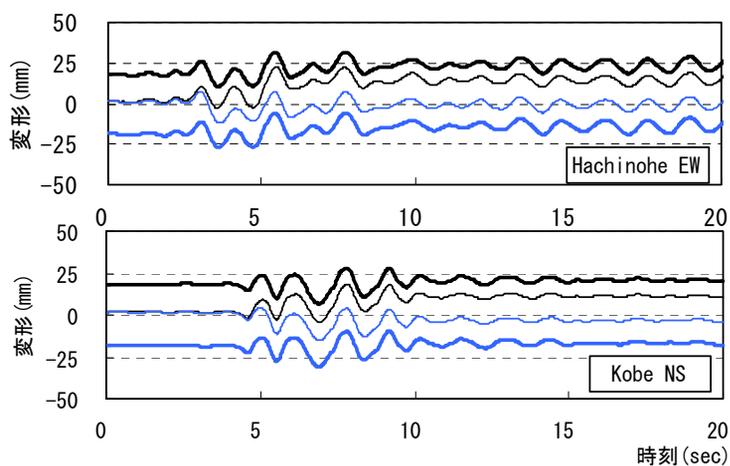


図13 免震装置2,50の各方向変形の時刻歴 (初期変形あり、最大速度50mm/s)

免震装置の荷重—変形関係は平行移動するが、それ以外の初期変形の有無による差はなく、捩れも生じない。

## 2) 地震動による相違

モデル4 (図3参照) に、El Centro NS、Hachinohe EW、Kobe NSの3種に地震動を45°方向に最大速度50mm/sで入力したときの免震装置2と50の各方向の変位の時刻歴を、図13に、最大速度50mm/s、500mm/sで入力したときの免震装置2と50のy方向変位の関係を、初期変形の有無を合わせて図14に示す。最大速度50mm/sのときに、El Centro NS 入力 (図12) では、両端のy方向変位がほぼ逆対称にシフトしているが、Hachinohe EW、Kobe NS 入力時には、免震装置2

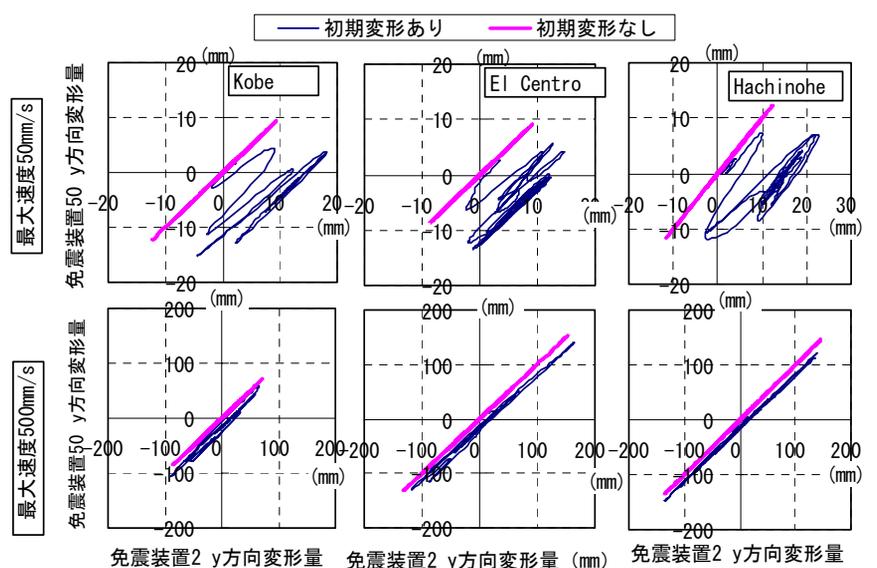
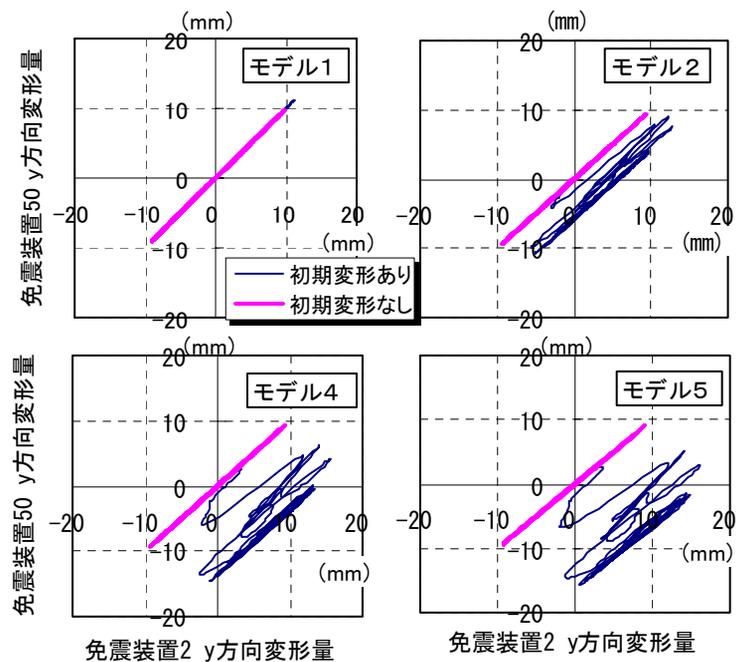
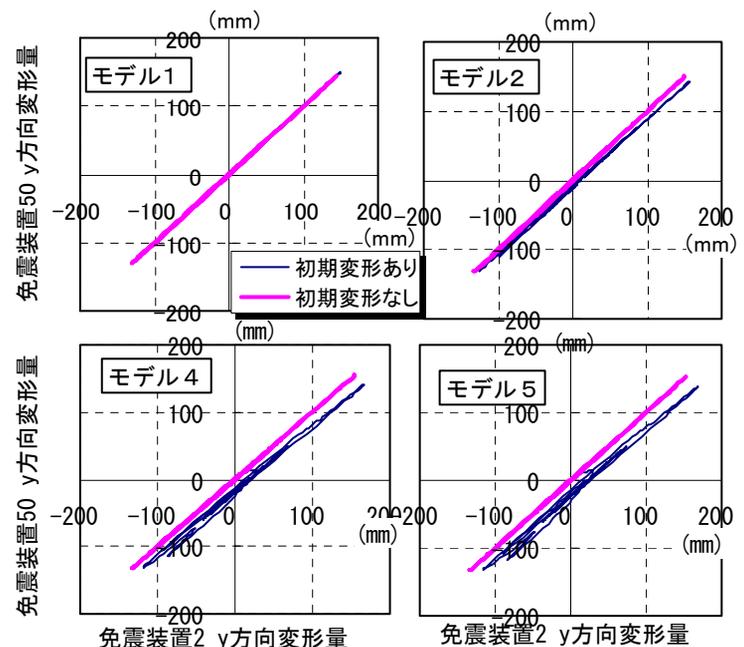


図14 入力地震動による捩れ応答の相違



(a) El Centro NS 最大速度50mm/s 入力



(b) El Centro NS 最大速度500mm/s 入力

図15 辺長比による捩れ応答の相違

の変位が大きくシフトしている。最大速度50mm/s 入力時の初期変形の有無によるy方向変形の増大は、El Centro NS で1.6倍、Hachinohe EW で1.8倍、Kobe NS で1.9倍であった。最大速度500mm/s では、地震動の種類による大きな違いは無い。

### 3) 辺長比による相違

各モデルに、El Centro NS を45° 方向に最大速度50mm/s、500mm/s で入力したときの免震装置2と50(モデル4の場合)の y 方向変位の関係を、初期変形の有無を合わせて図15に示す。最大速度50mm/s 入力時においては、辺長比の増大に伴い、免震装置2と50の y 方向変位の差が大きくなり、振れが大きくなっている。図16は、振れ回転角の時刻歴を示したものである。振れ回転角は最初に大きく変形する時

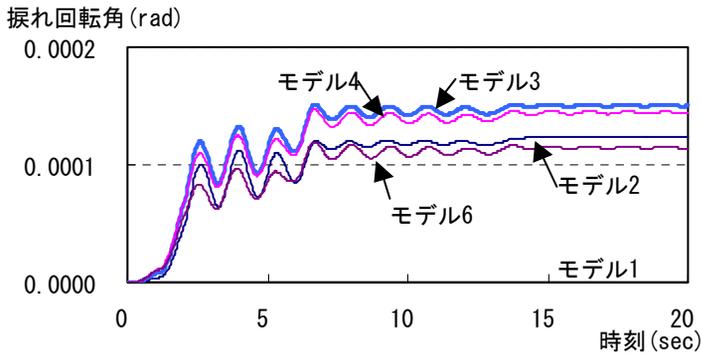


図 16 各辺長比の建物との振れ回転角の時刻歴 (El Centro NS 最大速度 50mm/s 入力)

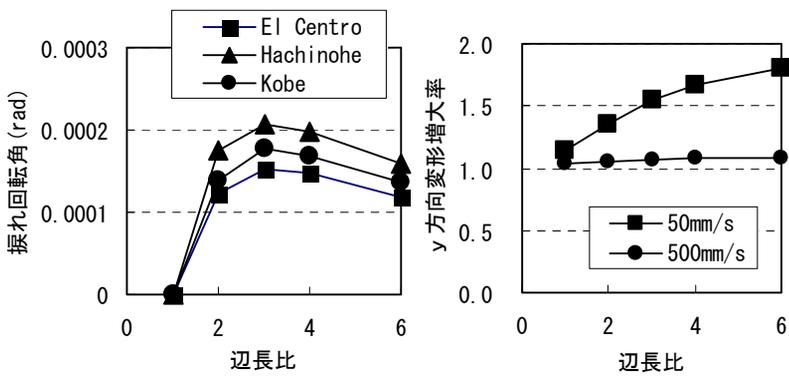


図 17 辺長比と振れ回転角の関係 (最大速度 50mm/s 入力)

図 18 辺長比と y 方向変形増大率の関係

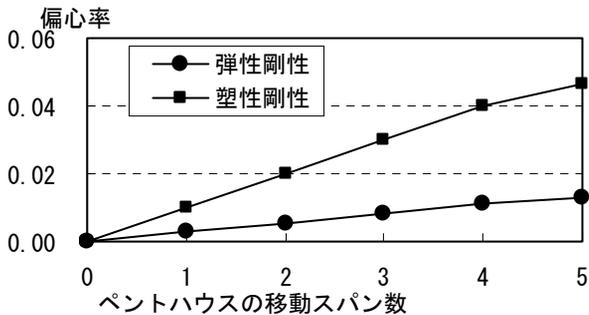


図 19 ペントハウスの位置と偏心率

に大部分が生じ、その後は、その振れた角度を中心として振れ回転振動をしている。これは、Hachinohe EW、Kobe NS 入力時でも同様であった。図17は、振れ回転角の最大値と辺長比の関係を示したものである。図6に示した静的増分解析の結果と同様に、辺長比3のモデル3がもっとも振れ回転角が大きく、それより辺長比が大きくなると、振れ回転角は減少している。最大の振れ回転角を示す、辺長比3のモデル3のときが、地震動による相違も大きい。最も振れ回転角の大きい Kobe NS で、静的増分解析と同程度となっている。

図18は、最大速度50mm/s、500mm/s 入力時の、y 方向変形増大率を辺長比との関係で示したものである。最大速度50mm/s 入力時には、辺長比の増大に伴い、変形増大率も増加し、辺長比6の建物では、初期変形があることにより、初期変形のない場合に比べ、端部免震装置の y 方向変形は1.8倍になっている。最大速度500mm/s 入力の場合には、辺長比が増大しても変形増大率はほとんど変わらず、1.1倍以下であった。

### 4) 重量偏心率の影響

免震建物は、上部構造の重心位置と免震層の剛心位置を一致させることが原則であるが、ペントハウス等が偏在する場合、製品系列の都合上、多少の重量偏心が生じる可能性がある。この重量偏心が生じている場合の影響を検討するため、モデル4 (図3参照) の中央部に、張間1スパン桁行き2スパンで、2層のペントハウスがあるものとして、それが左(免震装置2の方)へ1スパンずつ移動する場合を想定した。図19に、想定したモデルにおける、ペントハウスの移動スパン数と偏心率の関係を示す。免震装置の弾性剛性を用いた場合の偏心率は、最大0.013であり、免震装置の第2勾配を用いて算定した偏心率は、最大0.047である。

図20に、El Centro NS を45° 方向に最大速度50mm/s、500mm/s で入力したときの免震装置2と50の y 方向変位の関係を、初期変形の有無を合わせてペントハウスの移動スパン毎に示す。初期変形がなく、ペントハウスが中央にある場合には、偏心がないためまったく振れないで、免震装置2と50の y 方向変位は同一であり、図の45° 線上に履歴がある。最大速度50mm/s 入力時には、ペントハウスの移動スパンが増して偏心率が増えると、変形の小さいときに両者の変形差が生じて、中央が膨らむような履歴となり、偏心率の大きいほどその傾向は大である。y 方向変位と振れ振動とはちょうど1/4サイクルず

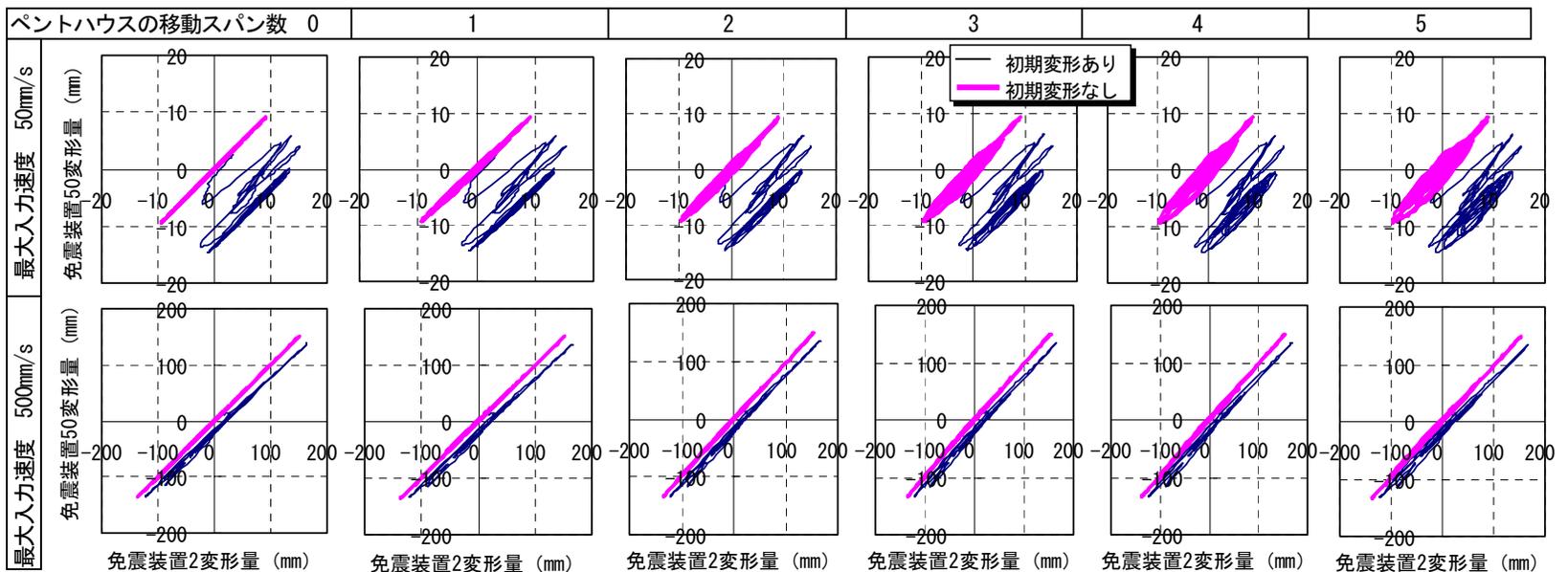


図 20 重量偏心による振れ応答の相違

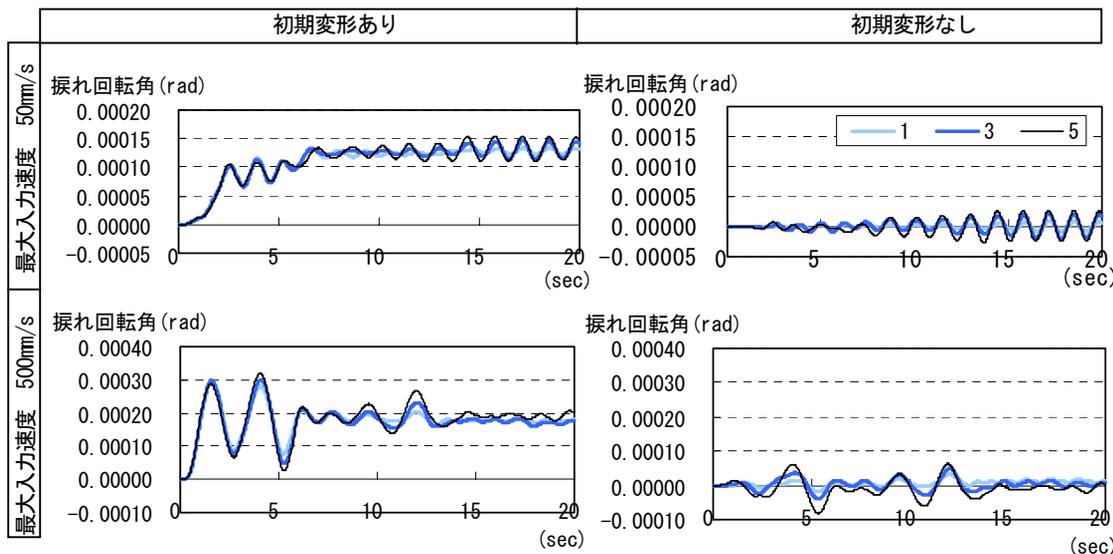


図21 重量偏心による振れ応答の時刻歴

れて生じていることになる。

初期変形のある場合も同じで、初期変形により最初の大きな振動時に振れが生じた後は、そこを中心とした振れ振動となり、その傾向は初期変形のないものと同様である。y 方向変形の最大値は、初期変形の有る無しそれぞれ、偏心率の増大によらず一定値となっている。図21は、振れ回転角の時刻歴を示す。初期変形のある場合に最初に大きく振動するときに振れ回転角が増大するが、これは重量偏心率の大きさに関係ない。その後の振れ振動においては、重量偏心率の大きいものほど、大きな振れ振動となっている。

初期変形の有無による y 方向の変形増大率は、ここで想定した範囲内の重量偏心の変動ではほとんど変化せず、振れ振動による変形の増大に関しては影響が無いといえる。

## 5. 結論

本論では、完全バイリニア型の変位依存型復元力を持つ免震装置 (LRB を想定) を設置した建物の、コンクリートの乾燥収縮による初期変形が、建物の振れ応答に与える影響に関して検討を行なった。本論で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 乾燥収縮により初期変形を受けた免震構造物に、45° 方向に静的加力を行なうと塑性偏心が生じ、振れの原因となる。偏心率は、荷重レベルによって異なり、免震装置の瞬間剛性による弾性半径を用いて算定した偏心率は0.3に達するが、すべての免震装置が第2勾配に入ると、偏心率は0となる。振れ回転量はモデルによって異なり、モデル3(辺長比3)がもっとも大きくなった。
- 2) 地震動記録を入力した検討では、入力レベルによる差が見られ、初期変形有りの場合の、初期変形無しの場合に対する端部免震装置 y 方向変位の増大率(変形増大率)は、最大速度 50mm/s では、増大率が 1.9 を超えているが、入力レベルが最大速度 500mm/s になると初期変形のあることの影響は少ない。また、地震動の種類による変形増大率の差も、入力レベルが最大速度 50mm/s では 1.6~1.9 倍とややばらつきが見られたが、入力レベルが最大速度 500mm/s になるとその差はほとんどない。
- 3) 辺長比を変化させて地震動記録を入力した検討では、最大振れ角は静的解析と同様にモデル3がもっとも大きくなった。また、そ

の大きさはおおむね静的解析で得られた結果と同程度であり、静解析により推定可能と考えられる。変形増大率は、入力レベルが最大速度 50mm/s の場合は、辺長比に比例して増大し、辺長比 6 のモデル 5 では 1.8 に達する。入力レベルが最大速度 500mm/s になると、辺長比にかかわらず一定で、1.1 以下である。

- 4) ペントハウスが偏心する程度の重量偏心率を持つ建物の場合、重量偏心により変形増大率はほとんど変化しなかった。

以上の検討より、乾燥収縮により初期変形を受け、免震装置の復元力がバイリ

ニアで表される免震建物は、耐震安全性という観点からはほとんど問題にならないといえる。しかし、45° 入力時に入力レベルの低い段階では大きな影響があり、居住性の評価等では考慮する必要があるだろう。また、x 方向に大きな初期変形を受けた建物に、45° 方向の入力があると、y 方向にかなり大きな残留変形が残る。これらは、維持管理上の評価が必要である。

本論において振れによる耐震性の検討を行なうにあたり、基本特性を検討することを主目的としたため、地震動の入力は一方向のみとし、その角度を変えた検討としている。実際の建物の評価においては、多方向入力、位相差入力等により異なる性状を示すことが考えられるが、地震動の主軸が建物の 45° 方向に有る場合には、本論の結論が適用できると考えられる。

本研究は、神奈川県における文部省学術フロンティア・横浜市産官学共同研究総合プロジェクト「地震・台風災害の制御・低減に関する研究 (TEDCOM)」(研究代表者：大熊武司)の一環として行い、卒論生の多川俊樹君(現西松建設)他の協力を得ました。ここに関係者ならびに卒論生の諸君に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説(1999)、pp.271、1999
- 2) 住宅・都市整備公団、九段建築研究所、プレハブ建築協会：高層壁式ラーメンプレキャスト鉄筋コンクリート造 設計・施工指針、1997
- 3) 建設大臣官房官庁営繕部：建築構造設計基準及び解説(平成9年版)、公共建築協会、1998
- 4) 能森雅己：長大な免震建物の自己歪を拘束する免震装置の変形性状に関するクープ解析、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、pp.757-758、2000.9
- 5) 松浦恒久、若本武三、島崎和司他：大型免震構造物における乾燥収縮の計測、「コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形」シンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、2001.7
- 6) 日本建築学会：免震構造設計指針、pp.466-469、1993
- 7) 構造計画研究所：RESP-T (3次元立体構造物の静的・動的非線形解析プログラム)
- 8) 和田章、広瀬景一：2方向地震動を受ける無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状、日本建築学会構造系論文報告集、No.399、pp.37-48、1989.5
- 9) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、p.110、1998