

巨大地震に対する中層免震建物の応答特性

藤井大地¹⁾, 眞田瑞穂¹⁾, 岡部 諒²⁾, 松本慎也¹⁾, 西 伸介³⁾

Response characteristic of base isolated mid-rise building for megathrust earthquake

Daiji FUJII¹⁾, Mizuho SANADA¹⁾, Ryo OKABE²⁾, Shinya MATSUMOTO¹⁾ and Shinsuke NISHI³⁾

Abstract

Many high-rise buildings in Tokyo have been vibrated greatly for a long time by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. These vibration can be considered as the effect of long-period ground motion. On the other hand, base isolate building is also a structure with long-period similar to the high-rise building. Therefore, in this paper, the safety of a base isolate building for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake is investigated by the response analysis. A 6-story building with base isolate system is selected as an example of base isolate buildings. This building is modeled by seven mass system with sway spring. The characteristics of the seismic waves obtained big displacement response are analyzed by the spectrum. The safety of the base isolate mid-rise building for megathrust earthquake is considered by these analysis.

Keywords: Base isolate building, Megathrust earthquake, Long-period ground motion, Seismic response analysis

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(以後, 3.11)では, 震源から遠く離れた東京の超高層ビルが長時間に渡って大きく揺れ続けた事例が数多く報道された。これは, 2003年十勝沖地震における苫小牧の石油タンク被害や, 2004年新潟県中越地震の際の東京における高層ビル内のエレベータ設備被害などで注目された長周期地震動の影響と考えられる。

一方, 高層建物と同様に長周期建築構造物として分類される免震建物は, 上部構造と基礎・地盤の間にアイソレータや減衰装置を挟み込むことで固有周期を伸ばし, 通常地震動の卓越周期から隔離して共振を避けるよう

に設計される。3.11における(社)日本免震構造協会の調査¹⁾によると, 免震建築物の躯体の被害は少なく, 免震効果はよく発揮されたとされているが, 今後起こりえる巨大地震に対する免震建築物の安全性を確保するためには, 戸建, 低層, 中層, 高層ビル等の多様な免震建築物について, 3.11で観測された加速度記録からその安全性を確かめる必要がある。

そこで, 本研究では, 地上6階の中層免震建築物の設計例から免震層をスウェイモデルとした7質点系モデルを作成し, これを用いて3.11の地震に対する中層免震建築物の応答特性を分析し, 今後起こりえる巨大地震に対する中層免震建築物の安全性について検討する。

1) 近畿大学工学部建築学科

Department of Architecture, Faculty of Engineering
Kinki University

2) 近畿大学大学院システム工学専攻

Graduate School of System Engineering,
Kinki University

3) (有) 西建築設計事務所

Nishi Architectural Design Office Co., Ltd.

2. 既往の研究

本研究に関連する既往の研究としては、高橋、福和²⁾が3.11の長周期地震動に対する戸建免震住宅の応答特性に関して詳細な研究を行っている。一方、ビル構造に関しては、藤井ら³⁾が、つくば市の3階建て研究棟 (RC造) について観測記録の分析を行い、免震層の最大相対変位が7.0cmであったことを報告している。小室ら⁴⁾は、仙台市の地上18階建て事務所ビルの観測記録より、免震層の最大相対変位が約23cmであったことを報告している。また、神永ら⁵⁾は、宮城県仙台市の地上14階建て事務所ビル (S造) の観測地震波を用いて免震効果の分析を行い、免震層の最大相対変位が13cm 前後との結果を示している。猿田ら⁶⁾は、東京都江東区に建つ36階建て超高層ビル (RC造) の観測記録を分析し、免震層 (3~4階に設置) の最大相対変位が10cmであったことを報告している。また、酒井ら⁷⁾は、日本全域89棟 (関東一都三県80棟・愛知県5棟・大阪府3棟・京都府1棟) の免震建物のけがき記録を分析し、けがき板の最大変位量は、一都三県で平均3.84cm, 最大9.0cm (東京都足立区・14階建て集合住宅) であったことを報告している。また、中層ビルについては、黒澤ら⁸⁾が、仙台市内にある5階建て免震データセンター (RC造) について、免震層の最大相対変位が10.54cmであったことを報告している。

3. 解析モデル

本研究で用いた解析モデルは、地上6階、塔屋1階、梁間方向2スパン (1スパン約9m)、桁行き方向6スパン (1スパン約6m)、階高約4m の設計例である。構造種別は、上部構造が鉄骨造、免震層が鉄筋コンクリート造で、架構種別は、柱が角形鋼管、大梁が H 形鋼を用いた純ラーメン構造である。また、免震装置は、鋼製ダンパー一体型天然ゴム系積層ゴム支承、弾性すべり支承、鉛ダンパーで構成される。

本研究では、以上の設計例から図1に示す振動解析モデルを作成した。図中の○の付いた数値は要素番号、○の付かない数値は質点番号を表す。なお、免震層のスウェイバネは6種の免震バネが同じ節점에接続されているものとする。また、上部構造の要素 (せん断バネ) の復元力特性は Tri-linear 型とし、免震部材の復元力特性は、積層ゴム支承は線形、その他は Bi-Linear 型とする。また、上部構造全体の減衰を瞬間剛性比例型減衰として与え、減衰定数を0.01とする。なお、免震層の減衰は履歴減衰のみとする。

表1は、上部構造の質量 (質点2~7) と1~6層の要素の初期剛性、第1折点の変位、2次剛性の初期剛性からの剛性低下率、第2折点の変位、3次剛性の初期剛性からの剛性低下率を示している。また、表2は、免震部材の初期剛

性、第1折点の変位、初期剛性からの剛性低下率を示している。

表3は、解析に用いた強震観測網 K-NET による3.11の地震波の観測点記録と位置を示す。なお、実際には、これ以外にも多くの地震波について解析を行ったが、最大加速度が100gal 以下の地震については、大きな変位応答は得られなかったため、ここでは最大加速度が100gal 以上のものを抽出している。また、表では、後の解析で最大変位応答が大きくなった順に並べている。

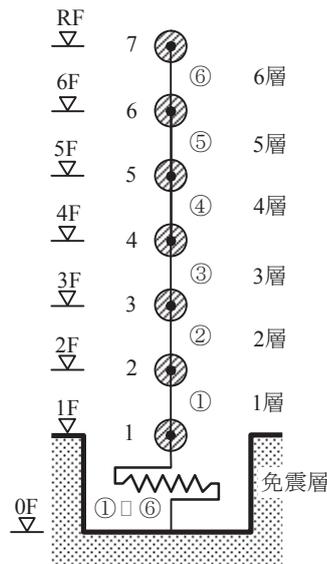


図1 7質点等価せん断型スウェイモデル

表1 上部構造の層質量と各層の復元力特性

層	質量 (ton)	初期剛性 (kN/cm)	折点1 (cm)	剛性低下率1	折点2 (cm)	剛性低下率2
1	499	5706	1.82	0.708	3.09	0.113
2	501	5342	1.88	0.749	2.84	0.220
3	494	5101	1.83	0.735	2.86	0.161
4	491	4955	1.86	0.709	2.73	0.131
5	484	4649	1.82	0.651	2.57	0.066
6	720	4097	1.44	0.643	2.18	0.034

表2 免震層の復元力特性

免震部材	初期剛性 (kN/cm)	折点変位 (cm)	剛性低下率
積層ゴム	32.8	—	—
鋼製ダンパー	304.0	2.42	0.0168
鉛ダンパー	1200.0	0.73	0.0
滑り支承1	168.0	0.75	0.0
滑り支承2	112.0	0.70	0.0
滑り支承3	150.0	0.87	0.0

1F (基礎) 質量 1465 ton

表3 観測点記録と位置

Station code (県名)	Max.acc. (gal)	Direction	Duration time (sec)
MYG006 (宮城)	571.498	EW	300
KNG206 (神奈川)	367.516	EW	300
TKY017 (東京)	218.956	NS	300
FKS020 (福島)	241.48	NS	300
MYG013 (宮城)	982.266	EW	300
IWT011 (岩手)	341.967	EW	300
IBR009 (茨城)	157.979	EW	300
SIT010 (埼玉)	170.169	NS	300
TCG012 (栃木)	419.606	EW	300
CHB004 (千葉)	277.476	EW	300
GNM010 (群馬)	177.788	NS	300

4. 時刻歴応答解析結果

図2は、第3章に示した解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行い、質点1~7のいずれかで最大変位が生じた時点の質点1~7 (1F~RF) の変位応答を示したものである。解析は、数値積分法の平均加速度法⁹⁾を用いている。ただし、時間積分は0.001秒刻みで行っている。

図に示すように、MYG006 (宮城)、KNG206 (神奈川)、TKY017 (東京)、FKS020 (福島) で、免震層の最大相対変位が20cmを超えている。この内、神奈川と東京については、長周期地震動の可能性はある。したがって、以下では、この4地震波についての特性を分析する。

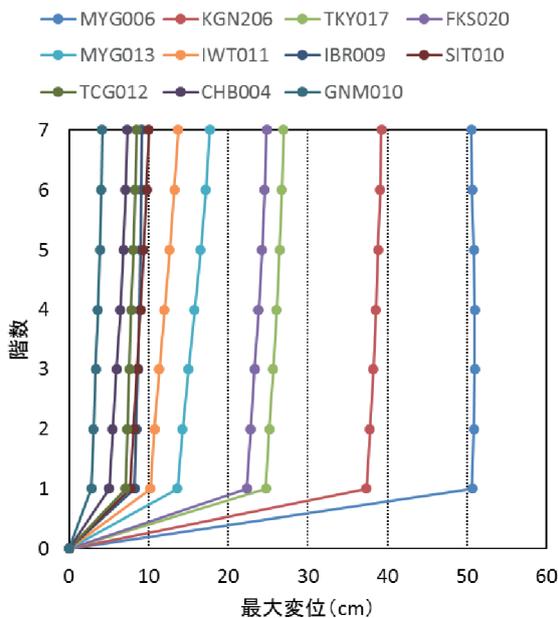


図2 各階の最大変位応答

5. 地震応答スペクトルによる分析

図3は、MYG006 (宮城)、KNG206 (神奈川)、TKY017 (東京)、FKS020 (福島) の地震波の変位応答スペクトルを示している。ただし、ここでは1質点系の減衰定数は5%として計算している。また、図中の点線で示しているものは、長周期地震動として有名な2003年9月26日の平成15年十勝沖地震の苫小牧で観測された地震波 (HKD129 : Max.acc.=72.918gal, Direction=EW, Duration time=290sec) の変位応答スペクトルを示している。ちなみに、この地震波によって4章の解析を行った結果、免震層の最大相対変位は9.4cmであった。

図に示されるように、MYG006、KNG206、FKS020については、HKD129に見られるような右肩上がり傾向は示していない。また、TKY017に関しては、やや右肩上がりとはなっているが、短周期側にもかなり大きな応答があり、典型的な長周期地震動とは傾向が異なる。

表4は、MYG006、KNG206、TKY017、FKS020、HKD129の1F (質点1) の最大変位時から計算した免震層の等価剛性に対する固有周期を示したものである。表4と図3の関係から、長周期地震動では等価剛性による固有周期が短いためにあまり大きな変位が生じないと考えられる。また、変位応答スペクトルから、他の地震についても、変位応答はこれ以上大きくならないと予想される。

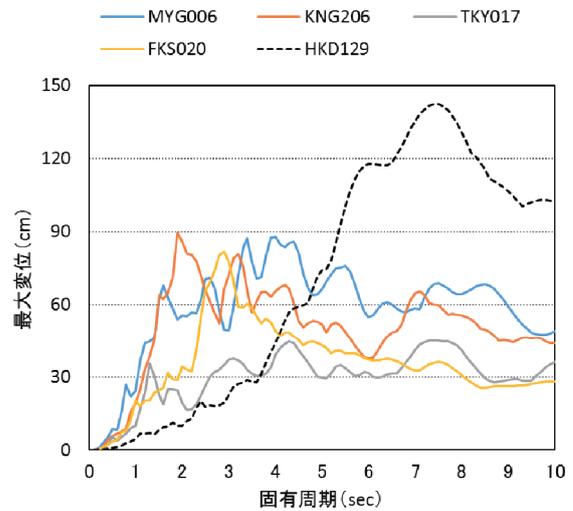


図3 変位応答スペクトル

表4 免震層の等価剛性による1次固有周期

Station code	1F 最大変位 (cm)	1次固有周期 (sec)
MYG006 (宮城)	50.7	4.96
KNG206 (神奈川)	37.4	4.58
TKY017 (東京)	24.8	4.04
FKS020 (福島)	22.4	3.90
HKD129 (苫小牧)	9.4	2.83

初期剛性による固有周期：1.21sec

図 4, 5 は, MYG006, KNG206, TKY017, FKS020, HKD129 の速度応答スペクトルと加速度応答スペクトルを示したものである. これらの図を見ても, 免震建築物の免震層に大きな変位を生じさせた地震波の特性は, 長周期地震動とは異なっていることがわかる. また, MYG006, KNG206, TKY017, FKS020 の 4 波は, いずれも短周期側に速度および加速度のピークがあり, 免震層の変位は, 短周期よりの大きな地震エネルギーによって引き起こされたと考えられる.

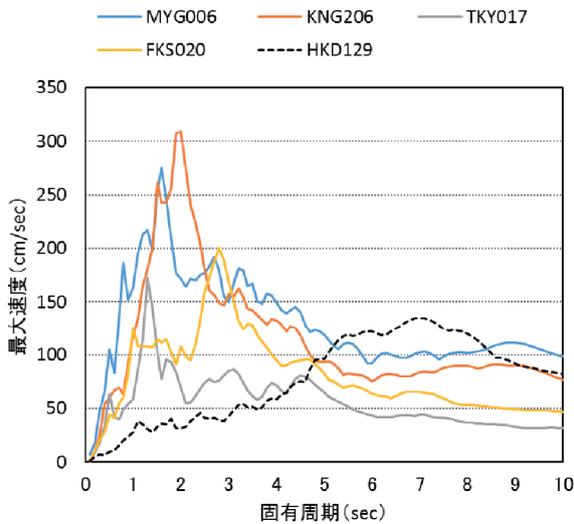


図 4 速度応答スペクトル

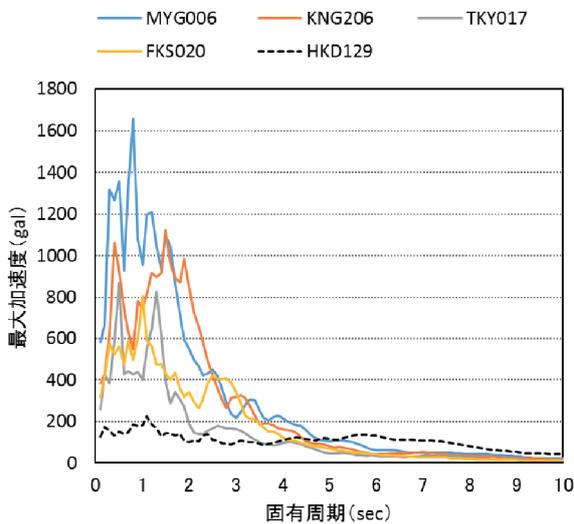


図 5 加速度応答スペクトル

6. 時刻歴応答による分析

図 6 は, MYG006, KNG206, TKY017, FKS020, HKD129 に対する 1F (質点 1) の変位時刻歴応答を示している. ただし, 図では, 変位が大きくなる 100 秒間を切り取って表示している. 図より, MYG006, KNG206, FKS020 の 3 波の応答性状は良く似ているが, TKY017 について

は, 少し異なる傾向を示していること, また, MYG006 の 40cm を超える変位は単発的なもので, 概ね 40cm 以内に収まっていることがわかる.

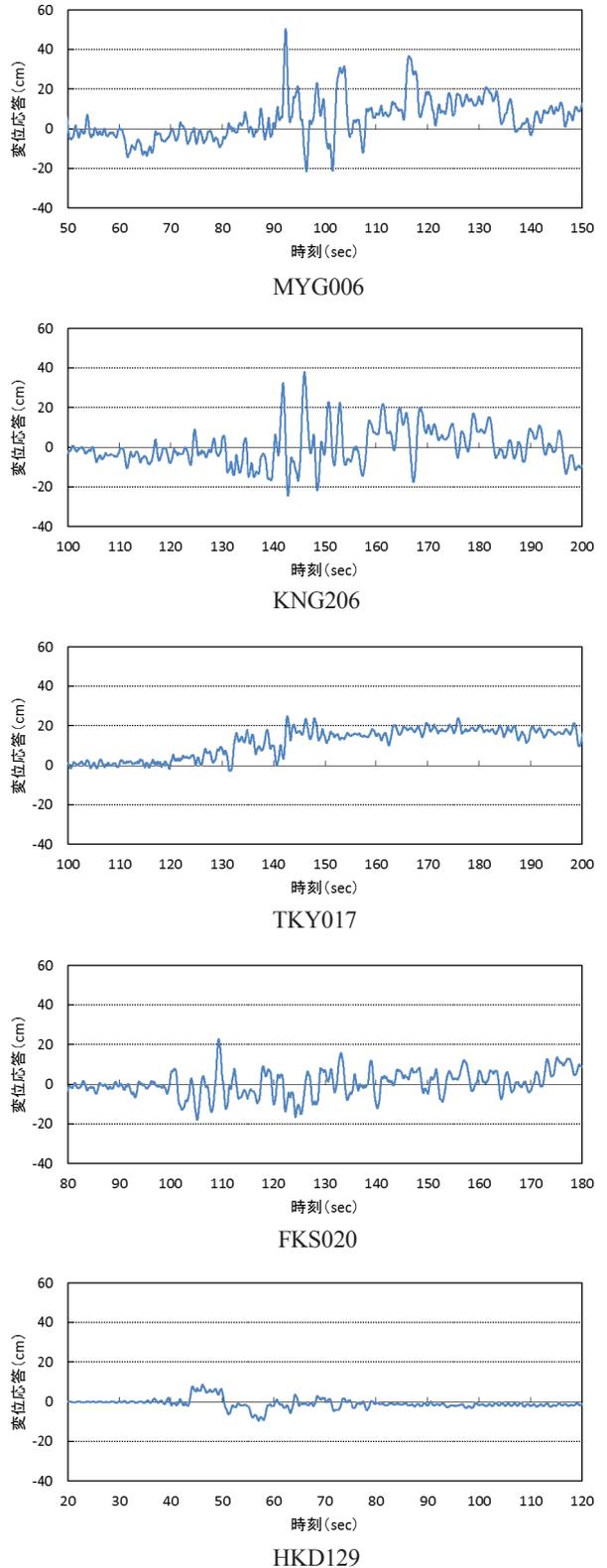


図 6 各地震波に対する変位時刻歴応答

巨大地震に対する中層免震建物の応答特性

7. 上部構造の免震効果

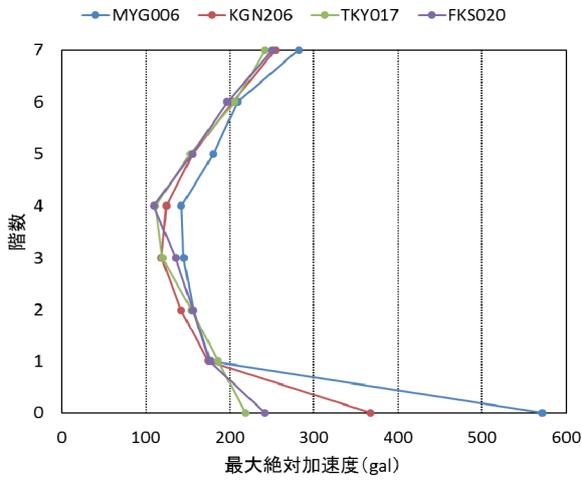


図7 最大絶対加速度

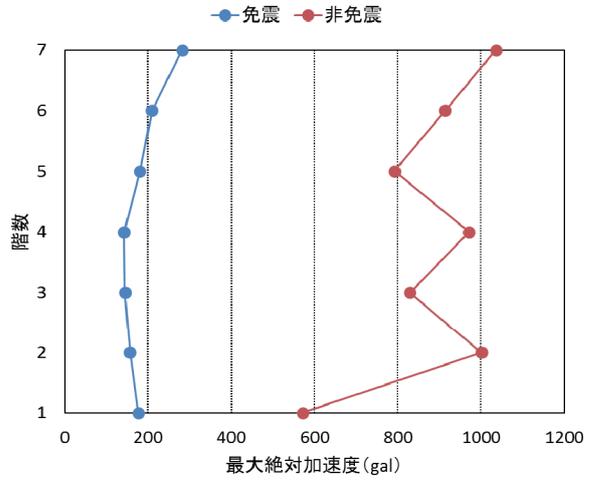


図10 最大層せん断力の比較 (MYG006)

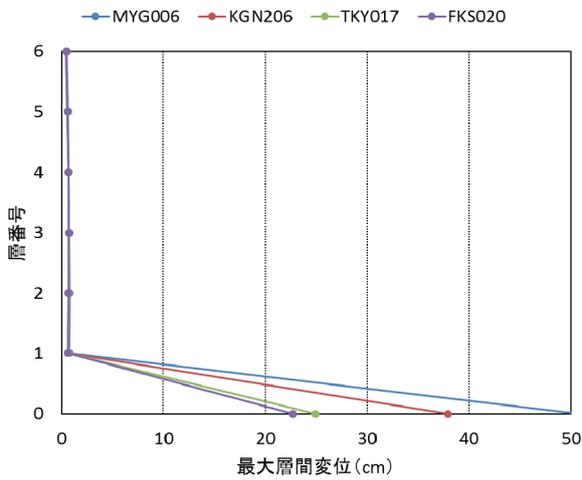


図8 最大層間変位

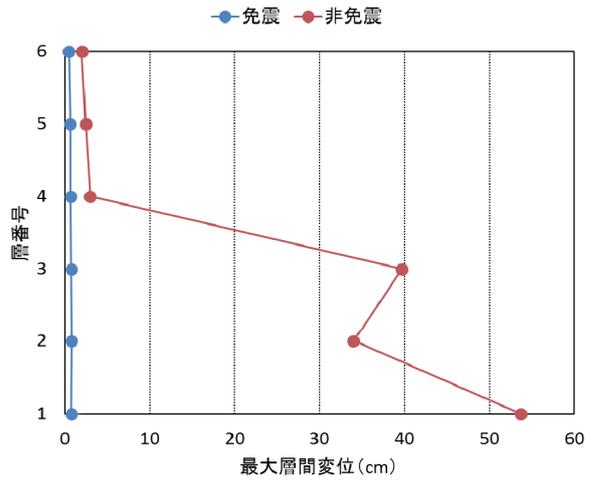


図11 最大層間変位の比較 (MYG006)

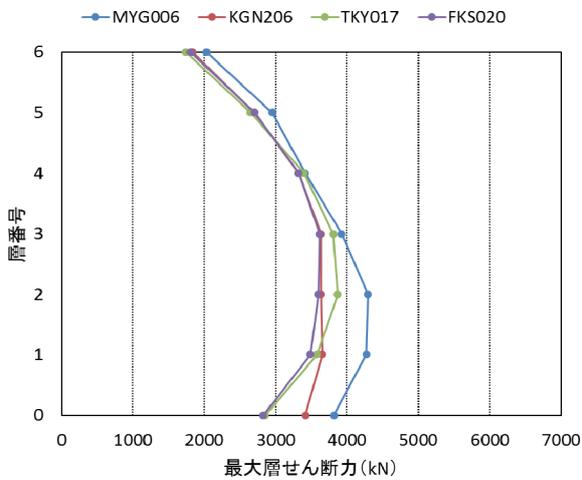


図9 最大層せん断力

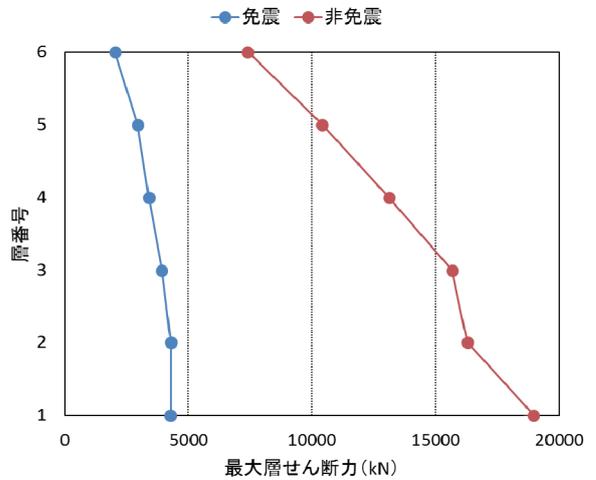


図12 最大層せん断力の比較 (MYG006)

図7～9は、MYG006, KNG206, TKY017, FKS020の4地震波に対する各階（各質点）の最大絶対加速度、各層の最大層間変位および最大層せん断力を示している。ただし、層番号0は免震層を表し、また、各階、各層の最大値が生じる時間は異なっている。

図7より、上部構造の絶対加速度は300gal以下に収まっており免震効果が認められる。図8より、上部構造の層間変位はすべて1cm未満であり、免震効果がよく現れていると言える。図9より、最大層せん断力についても、設計条件をクリアできる大きさに収まっている。

図10～12は、応答が最も大きいMYG006地震波について、免震建築物と非免震建築物（質点1を固定した場合）の上部構造の最大絶対加速度と各層の最大層間変位および最大層せん断力を比較したものである。これらの図からも、免震層を設けることで、上部構造の層間変位および地震力を大きく低減できていることがわかる。

8. まとめ

本研究では、3.11地震に対する中層免震建築物の地震応答解析を行い、次のような知見を得た。

- (1) 3.11地震に対して免震層で大きな最大相対変位を示した地震波を調査したところ、いずれも長周期地震動とは異なる性質であることがわかった。
- (2) 3.11地震に対して免震層で大きな最大相対変位を示した地震波は、建物固有周期5秒以下で大きな最大速度を示し、非常に大きな地震入力エネルギーが作用することがわかった。
- (3) 宮城県で観測された地震波（MYG006）については50cmを超える免震層の最大相対変位となったが、時刻歴を見ると単発的なもので、概ね40cm以内に収まっていることがわかった。
- (4) 3.11の非常に大きな入力エネルギーを有する地震に対しても、上部構造は免震効果により、安全性が保たれることが確かめられた。

以上の結果より、中層免震建築物に関しては、将来予想される巨大地震に対しても、長周期地震動に関しては、大きな応答を示すことは無いと考えられる。これは、超高層ビルに比較して中層免震建築物では、免震層の減衰

効果が大きいと考えられる。しかしながら、巨大地震における入力エネルギー（最大速度応答）が非常に大きな地震に対しては、免震層の許容相対変位を超える可能性もあるため、今後起こりえる巨大地震に対して備えるが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 応答制御建築物調査委員会報告書，日本免震構造境界，2012.1
- 2) 高橋武宏，福和伸夫：2011年東北地方太平洋沖地震における戸建免震住宅の免震層変形と足柄平野の地盤振動特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第694号，pp.2123-2132，2013.12
- 3) 藤井 睦，井川 望，古城豊光：免震構法の開発研究 その8 東北地方太平洋沖地震による基礎免震建物の応答検証，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），p.21205，2012.9
- 4) 小室 努，欄木龍大，河本慎一郎，征矢克彦：東北地方太平洋沖地震における超高層免震建物の挙動，その1 観測記録，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），p.21208，2012.9
- 5) 神永敏幸，野中康友，佐竹知希，大谷昌史：東北地方太平洋沖地震における免震建物の地震観測結果（その1 観測結果と免震効果の概要について），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），p.21210，2012.9
- 6) 猿田正明，森川和彦，中西啓二，山本祥江，飯場正紀，小豆畑達哉，井上波彦：免震建築物の地震観測記録の解析とシミュレーション解析，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），p.21213，2012.9
- 7) 酒井和成，古澤 健，中西 力，関戸博高，千田 卓，清水輝文：2011年東北地方太平洋沖地震の免震建物の地震応答特性（その1）免震建物概要・地震計測概要及び地震観測記録，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），p.21214，2012.9
- 8) 黒澤 到，倉科雅一，難波治之，高濱亮太：東北地方太平洋沖地震における免震データセンターのシミュレーション解析（その1）建物概要と設計モデルによる解析，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），p.21252，2013.8
- 9) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，1981