

傾斜基盤上に建つ免震建物の観測と解析に基づく上部構造の振れ振動特性

東京理科大学大学院 高平友博

1. はじめに

支持基盤の深さが一様でない地盤上に建つ建物では、地震時に基礎部で並進振動とともに振れ振動が励起されることが明らかにされており、杭位置により地盤震動や上部構造の慣性力による負担せん断力の違いが発生することから、耐震設計時にはその影響を考慮することが重要であると指摘されている¹⁾。このような建物では、実測に基づく検討、特に建物応答に関する検討がほとんど見られない。これまでに、傾斜基盤上に建つ実在免震建物を対象に観測記録の分析が行われ、上部構造の振れ挙動に関する基本的な振動性状が検討されてきた²⁾。しかし、基礎位置に作用する入力動の振幅差、位相差と上部構造の振れ振動の関係までは検討されていない。さらに、当該免震建物为非免震建物である場合、地震時の振れ挙動を含む上部構造全体の応答特性が大きく変化すると予想される。

以上を踏まえ、本研究では前述した傾斜基盤上に建つ免震建物を対象に、強震記録の分析と常時微動計測に基づいて、入力となる基礎底版及び上部構造における振れ振動性状を分析した。さらに2次元FEM地盤モデルと3次元フレームモデルを用いた地震応答解析により、傾斜基盤によって生じる振幅差・位相差が上部構造における振れ応答の発生に与える影響を解明し、さらに免震建物と非免震建物の振れ挙動に着目した応答比較を行った。

2. 検討対象建物と地盤の概要

2.1 上部構造と強震観測の概要

対象建物は神奈川県逗子市に位置する6階建て鉄筋コンクリート造の集合住宅である。表1に対象建物の概要、図1に建物平面・断面概略図を示す。構造形式は1階と基礎の間に免震装置を配置した基礎免震構造であり、長辺方向はラーメン構造、短辺方向は耐震壁付きラーメン構造である。上部構造は長辺方向中央でエキスパンションジョイント

表1 建物概要

建築場所	神奈川県逗子市	
用途	集合住宅	
建築面積	958.6m ²	
基準階面積	692.6m ²	
階数	6 floors	
軒高	17.55m	
上部構造	鉄筋コンクリート構造（基礎免震構造）	
	長辺方向： ラーメン構造	短辺方向： 耐震壁付きラーメン構造
基礎構造	直接基礎、場所打ちコンクリート杭の併用	

によって分割されており、本検討では強震観測を実施しているB棟を検討対象とする。図1に強震観測点を併記する。観測点は、免震層下部の基礎底版上面（基礎部）、及び免震層直上の1階床スラブ下面（1階床部）にそれぞれ西端部、中央部、東端部の計6点である。

2.2 地盤構造の概要

対象建物直下の地盤構造は、主にVs=730 m/sの土丹層である支持基盤と、Vs=140 m/sのシルト主体の沖積層である表層地盤の2層地盤である。ボーリングデータから推定した基盤深度分布を図1に示す。支持基盤は敷地内で東西に傾斜しており、約23.5 mの高低差を有する。また、基盤傾斜方向は建物に対して約60度回転している。基礎構造は、支持基盤深さが最も浅い西端部のみ直接基礎、それ以外は支持基盤深さに応じた長さの異なる場所打ちコンクリート杭である。東端部付近での基盤深度はGL-26 mであり、常時微動計測によるH/Vスペクトルから求められた地盤東端部の卓越周期は約0.74 s²⁾である。

3. 常時微動計測に基づく振れ振動性状

3.1 常時微動計測の概要

表2に計測概要、図2に微動計設置位置、写真1に設置状況の例を示す。微動計はアカシ社製ポータブル加速度計データ収録装置GPL-6A3Pを12台（3成分/台）と東京測振製速度計SPC-52を9台（1成分/台）用いた。サンプリング周波数は200 HzとしGPLでは20 Hzのハイカットフィルターを設定した。

3.2 上部構造の振動性状と基礎部の位相差

図3に上部構造におけるNS方向とUD方向のフーリエ振幅スペクトルを示す。フーリエ振幅スペクトルは、交通振動や生活振動等のノイズの少ない時間帯から40.96秒（8192 step）の常時微動部分を20区間抜き出し、その平均値とした。図3(a)より、NS方向では1.3 Hz、2.2 Hz、4.0 Hz、6.0 Hzおよび6.7 Hz、図3(b)より、UD方向では6.7 Hzで卓越し

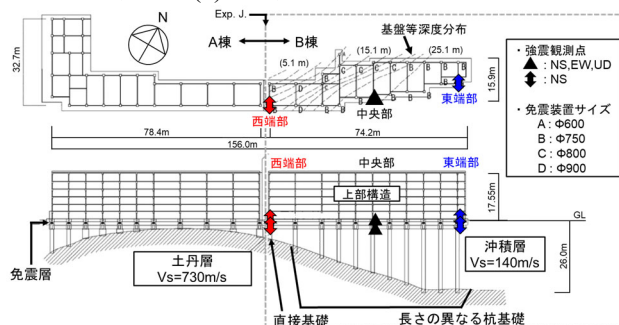


図1 建物平面、断面概略図

ている。また、小振幅地震時の1階床NS方向においても、1.3 Hz 付近及び6.7 Hz 付近に同様の卓越を確認している。ここでは、より特徴的な振れ振動性状を呈する6.7 Hz 付近の挙動について示す。1階床部と基礎部のNS方向について6.7 Hz を中心とし、バンド幅を0.2 Hz としたバンドパス加速度波形と、1周期ごとに評価した西端部に対する東端部の位相差を図4に示す。1階床部では前半約2秒に中央部を節として両端部が概ね逆位相となる振動が生じており、それ以降は中央部の振幅が増大しながら両端部の位相差が約90°まで変化する。これに対し基礎部でも前半は両端部が逆位相で振動しているが、後半にかけて約90°まで変化する。ここで前半約2秒間の挙動に着目し、NS、UD方向の記録から作図した6.7 Hzにおける立体定常振動を図5に示す。それぞれの左図にアイソメ、右図に立面を示す。中央部が振動しておらず、両端部構面がほぼ逆位相にロッキング振動をしている。これは、図6に示すような、建物長辺両端部で床構面の水平動が逆位相となる鉛直軸廻りの回転と、床構面の鉛直動を伴う反りが逆位相となる曲げ変形が連成したワーピング振動³⁾である。また、後半の時間帯では上記と類似した振れ挙動を呈するものの、1階床中央部の振幅が増大するなど、その振動性状が変化することを確認している。以上から対象建物の6.7 Hz 付近では、入力となる基礎部の位相差が両端逆位相に近づくほど上部構造の振れ振動が顕著に現れる傾向が見られ、本論に示すように、強震時及び地震応答解析においても同様の傾向を確認した。さらに地震応答解析によって、ワーピング振動は入力動の位相差がその発生に大きな影響を与え、振幅差は成因にならないと考えられた。

4. 免震モデルと非免震モデルの応答比較

4.1 検討対象地震の概要

本章では、2011年3月11日に発生し、基礎部西端の観測記録の中で最大となる加速度を記録した東北地方太平洋沖地震(以降、3.11本震)と、2005年7月23日に発生し、2番目に大きい加速度を記録した千葉県北西部地震(以降、千葉県北西部地震)を対象に地震応答解析を行う。表2に両地震の概要を、図7に千葉県北西部地震、図8に3.11本震の基礎部における時刻歴加速度波形及び擬似速度応答スペクトルを示す。両地震とも入力となる基礎部の挙動に振れが生じている。

4.2 地盤モデルの概要

対象建物直下の地盤は、反時計回りに60度回転させると2次元の2層傾斜地盤とみなすことができる。この地盤を2次元FEMでモデル化し、面外(SH)波と面内(SV)波の鉛直入射時の2次元地盤応

表2 常時微動計測の概要

	計測位置 (○: GPL-6A3P △: SPC-52)			日時/ 開始時間	JMA(辻堂)	
	西端部	中央部	東端部		風向	平均風速
6階床	○	○	○	2019/12/21 12:35	南南東	4 m/s
1階床	○	○	○			
1階床梁	△	△	△			
基礎部	○	○	○			

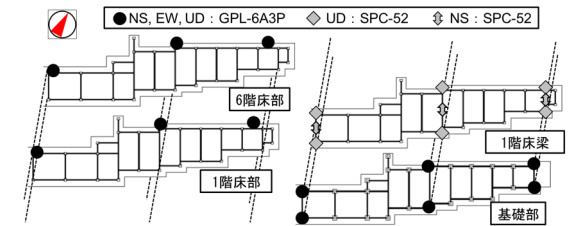
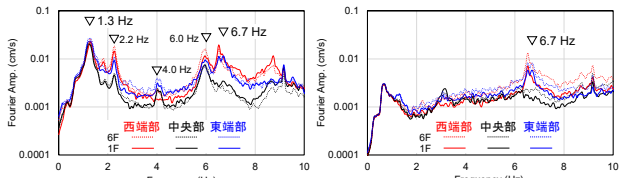


図2 微動計設置位置



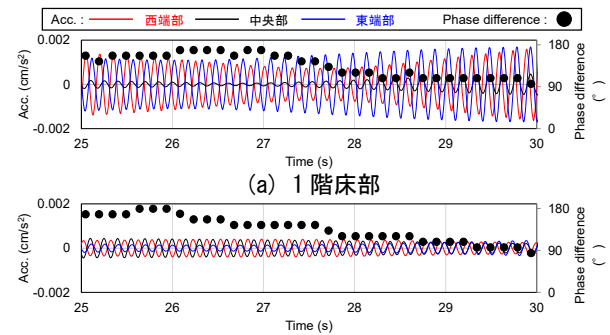
(a) 1階床 GPL-6A3P (b) 1階床梁 SPC-52

写真1 微動計設置状況の例



(a) NS方向 (b) UD方向

図3 上部構造のフーリエ振幅スペクトル



(a) 1階床部 (b) 基礎部

図4 NS方向バンドパス加速度波形と位相差(6.7 Hz)

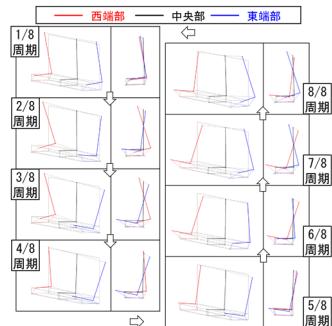


図5 6.7 HzにおけるNS, UD方向立体定常振動

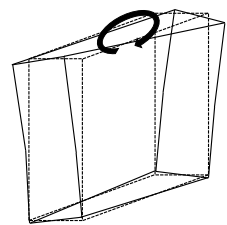


図6 ワーピング振れ振動の概要³⁾

答を周波数応答解析で評価する。このモデルにより基礎部の強震記録が良好に再現されており、建物モデルの各基礎位置の地震動を算出することが可能となった。解析モデルと検討の詳細は本論を参照のこと。

4. 3 建物モデルの概要

建物の地震応答解析には免震装置-上部構造からなる3次元フレームモデルを用いる。上部構造、免震層から成るモデル(以降、「免震モデル」と呼ぶ)と、1階床を固定とし免震装置を考慮しないモデル(以降、「非免震モデル」)を構築する。図9に免震モデルの俯瞰図を示す。上部構造は、柱・梁を線材、床部材を平板要素、耐震壁を壁エレメント置換モデルで表現する。各要素は弾性とし、各層を剛床とする。上部構造の応答特性について検討するため、杭はモデル化の対象としない。

免震装置の水平方向の復元力特性はMSSモデルで評価する。一般に、免震装置の水平剛性の設計式はせん断歪10%以上に対して定められていることから、免震層のせん断歪が10%に満たない千葉県北西部地震に対しては、既往の研究⁴⁾をもとに高減衰積層ゴムの微小変形時の剛性を考慮した標準トリリニアを復元力特性として用いる。せん断歪が10%を超える3.11本震については設計式で定められているひずみ依存型バイリニアとする。鉛直剛性は設計値を用いる。表3に固有値解析結果を示す。上部構造の減衰は初期剛性比例型とし、1階床固定時の1次固有周期に対し $h=0.02$ とする。免震装置の内部粘性減衰は、免震層10%変形時の

表2 対象地震概要

名称	観測日時	Mj	震源位置	震央距離(km)	中央部NS方向最大加速度(cm/s^2)	
					基礎部	1階床部
千葉県北西部地震	2005/07/23/ 16:35:06	6.0	千葉県北西部	66	42.5	29.2
3.11本震	2011/03/11/ 14:47:47	9.0	宮城県東方沖	438	66.6	54.3

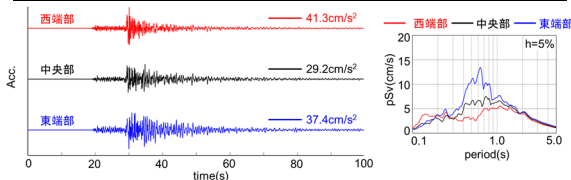


図7 千葉県北西部地震 NS方向観測記録

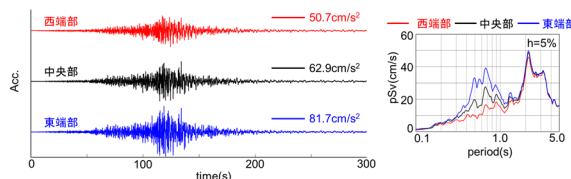


図8 3.11本震 NS方向観測記録

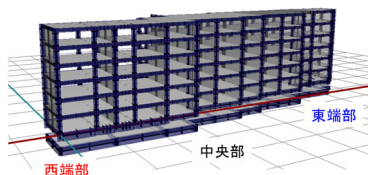


図9 免震モデル俯瞰図

表3 固有値解析結果

	せん断歪	EW 1次	NS 1次	揺れ 1次
免震モデル (設計式)	10%	1.691s	1.640s	1.520s
免震モデル (微小変形考慮)	5%	1.342s	1.274s	1.187s
非免震モデル		0.514s	0.181s	0.224s

1次固有周期に対し $h=0.01$ とする。

4. 4 地震応答解析の概要

本章では、図10に示す手順で地震応答解析を行う。まず、建物基礎中央部で観測された水平2成分(NS, EW方向)の観測波を2次元地盤面外、面内方向(SH,SV方向)に変換し、これをもとに2次元FEMによる地盤の伝達関数を用いて面外、面内方向の入射基盤波を算出する。次に、算出した基盤波と地盤の伝達関数を用いて建物杭頭位置の地盤応答を面外、面内方向について求め、建物方向(NS, EW方向)に変換する。以上のように求めた杭頭位置の地盤応答を3次元フレームモデルの杭頭位置に多点入力する。

4. 5 免震モデルの応答シミュレーション

図11に免震モデル1階床中央部の再現波形と擬似速度応答スペクトルを観測記録と併せて示す。両地震とも観測記録が良好に再現されている。

4. 6 最大応答分布における揺れ応答の評価

図12に西端部、中央部、東端部の3点におけるNS方向の最大絶対加速度を示す。免震モデルと非免震モデルを比較すると、両地震とも免震層により上部構造の最大加速度が低減している。両地震のNS方向について3点を比較すると、わずかではあるが免震モデルでは表層地盤の厚い東側ほど最大加速度が増加しており、1階床部と同じ傾向²⁾が上部構造全体で一様に見られる。これに対し、非免震モデルでは中央部の振幅が小さく両端部の振幅が大きくなっており、R階においては西端部の振幅が中央部の2倍程度となっている。これらより、免震モデルに比べて非免震モデルの方が建物応答の揺れが大きく、揺れの様子も異なることがわかる。

図13に6階からR階におけるNS方向最大層間変形の平面分布を示す。ここでは前述のように2次元FEMを用いて算出した地盤応答を多点入力した結果と、西端部の入力地震波を地動として入力し、基盤傾斜に起因する入力動の揺れを無視した場合の結果を併せて示す。まず地震波を多点入力した結果について見ると、両地震ともに免震モデルでは表層地盤の厚い建物東側にかけてわずかに

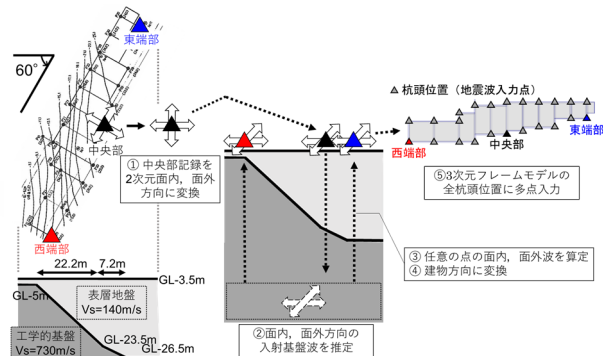


図10 地震応答解析の概要

層間変形が大きくなっており、その分布は直線的である。これに対して非免震モデルは両端部の層間変形が中央部の約2~3倍となる弓なりの分布を示しており、免震モデルに比べて振れが大きいことがわかる。西端部の地震波を全点に入力した場合は、入力地震動に振れ成分がないため、両モデルとも最大層間変形が直線的な分布となる。千葉県北西部地震における免震モデルの最大層間変形では、多点入力した場合と西端部の地震波を全点に入力した場合でその分布にほとんど差が見られない。また、3.11本震における免震モデルの応答では、多点入力した場合の方が全体的に大きい値を示すが、長周期成分が大きく卓越する東端部の入力地震動が考慮されているためと考えられ、振れの小さい直線的な分布であることが千葉県北西部地震の傾向と共通している。非免震モデルにおける最大層間変形の分布が入力動の振れ成分の有無で大きく異なっていることを踏まえると、免震装置の振れ低減効果が大きいことがわかる。

図14に両地震のシミュレーション結果から求めた東西両端部NS方向の振れ応答率を示す。ここで振れ応答率とは、建物中央部の変位に対する各点の振れに伴う変位の比²⁾である。両地震において、免震モデルの方が非免震モデルに比べて大幅に振れ応答率が低減しており、免震装置が上部構造全体の振れ応答低減に大きな効果を発揮していることがわかる。免震モデルにおける両地震の振れ応答率を両端部ごとに比較すると、入力地震動の最大振幅が大きい3.11本震の方が1階からR階にかけて小さいことが確認できる。これは、1階床部の強震記録で見られる傾向²⁾と同様である。

5. まとめ

本研究では、強震記録の分析と常時微動計測に基づいて、入力となる基礎底板及び上部構造における振れ振動性状を分析した。さらに2次元FEM地盤モデルと3次元フレームモデルを用いた地震応答解析により、傾斜基盤によって生じる振幅差・位相差が上部構造における振れ応答の発生に与える影響を解明し、さらに免震建物と非免震建物の振れ挙動に着目した応答比較を行った。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 対象建物の6.7 Hz付近では、強震時、常時微動時において、入力となる基礎部の位相差が両端逆位相に近づくほど上部構造の振れ振動が顕著に現れる傾向が見られた。さらに地震応答解析においても同様の傾向が確認された。
- 2) 基礎部の観測記録をもとに2次元FEM地盤モデルを用いて地盤応答を算出し、免震層と上部構造からなる3次元フレームモデルの全杭頭位置に多点入力した結果、1階床部の観測記録が良

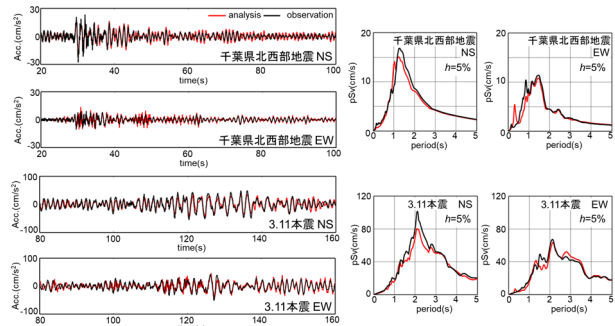


図11 1階床中央部観測記録の再現結果

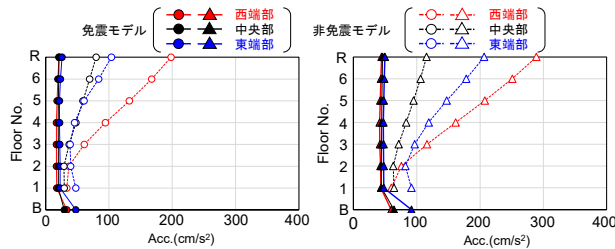


図12 NS方向最大絶対加速度分布

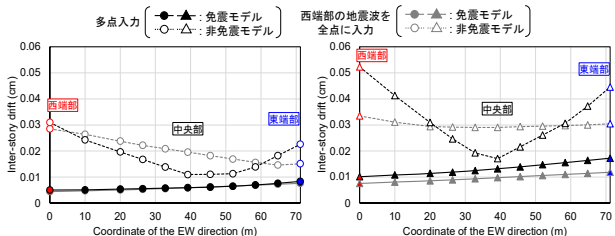


図13 6~R階NS方向最大層間変形の平面分布

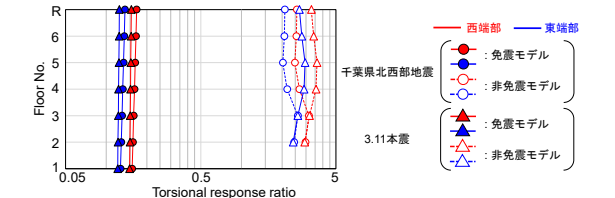


図14 NS方向振れ応答率

好に再現された。

- 3) 免震モデルでは非免震モデルより上部構造全体で振れ応答が抑制された。さらに、入力地震動における振れ成分の有無によらず、上部構造における最大応答の平面分布にほとんど変化が見られなかった。

謝辞

本研究は、浅沼組の飛田喜則氏、京都大学の上林宏敏氏、東京理科大学永野研究室の学生諸氏のご協力、ならびに住民の方々のご理解のもとで実施することができました。ここに感謝の意を記します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：基礎構造設計指針 2001, pp.329-348, 2001
- 2) 飛田喜則, 永野正行, 北村春幸, ほか：強震記録に基づく傾斜基盤上に建つ免震建物の振れ応答の分析, 日本建築学会技術報告集, Vol.23, No.54, pp.409-414, 2017
- 3) 小室達也, 井口道雄：常時微動測定に基づく埋土・切土地盤上に建つ建築物の振動性状に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第13巻, 第26号, pp.475-480, 2007.12
- 4) 飛田喜則, 永野正行, 北村春幸, 山内豊英：強震記録に基づく傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の地震応答解析と杭応力評価, 日本建築学会構造系論文集 第84巻 第756号, pp.149-159, 2019.2