

7. 長さが異なる杭を有する免震建物の地震時の挙動について

－その6 免震建物の地震応答解析－

Behavior of Seismic Isolated Building Supported by Various Length Piles

－Part6 Seismic Response Analysis using Strong Motion Records－

飛田 喜則*1 山内 豊英*2 橋本 拓*1

要 旨

基礎が傾斜しているため直接基礎と長さが異なる杭からなる異種基礎によって支持され、かつ比較的細長い平面形を有する免震建物において観測された地震記録を基に、基礎部の振れ挙動、さらに免震層を介した上部構造の応答について検討してきた。本報告では、常時微動測定結果による免震層の剛性評価、それをモデル化することによって応答を適切に評価できることを示した。また、本手法を用いて観測記録から得られない、杭の変位なども算定し推定することが可能となった。

キーワード：免震建物／異種基礎／地震応答解析／杭

1. はじめに

一般に、支持基盤の深さが一様でない傾斜基盤上に計画された建物の基礎構造は、直接基礎と杭基礎を併用した基礎形式となる。このような場合、傾斜基盤の深さの違いが表層地盤の地震動特性に影響を及ぼし、その結果、基礎部に振れ振動が加わることが懸念される。しかし、これらの検討には、実際の地震記録によってその影響を検討した例は少なく、かつ免震建物を対象として検討した例は少ない。著者らはこれまで、基礎が傾斜しているため直接基礎と長さが異なる杭からなる異種基礎によって支持され、かつ比較的細長い平面形を有する免震建物において観測された地震記録を基に、基礎部および上部

構造の応答について検討してきた^{1)～9)}。これにより、観測された地震動の振幅は、傾斜基盤の傾斜の浅い層では小さく、傾斜の下端部の深い層では大きくなる挙動を示し、また常時微動測定などによって基礎底板、上部構造には並進とねじれ振動が複合した振動性状を示し、さらに観測記録に基づく1階床の周期は、観測地震動の加速度が大きくなると免震層の非線形性により長周期化していること、逆に設計式の対象外となる小振幅時では常時微動測定時の周期に収束し、設計式に比べてせん断剛性が4倍程度になることなどを示した。

本報告は、これらの成果を基に、地盤 FEM モデルおよび3次元立体フレームモデルを用い、かつ免震層の小振

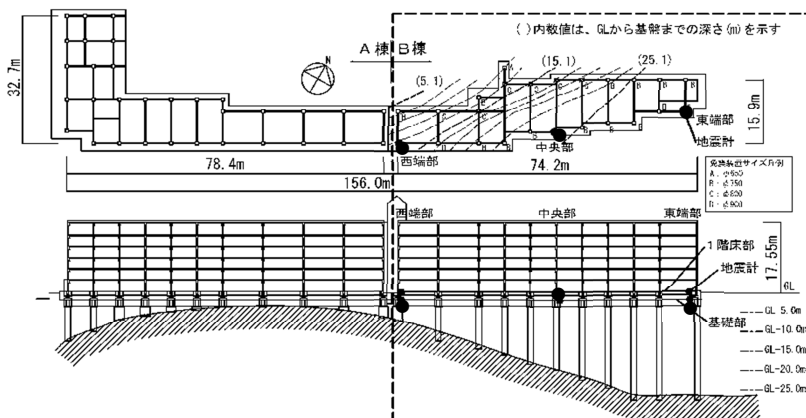


図-1 建物概要および観測点位置図

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	地上6階 塔屋1階	軒 高	17.55m
上部構造	鉄筋コンクリート造（基礎免震構造）		
基礎構造	直接基礎、場所打ちコンクリート杭の併用		

表-2 東端部の地盤概要（PS 検層）

深さ (GL-m)	地 層	湿潤密度 (kN/m ³)	N値	弾性波速度(m/s)	
				Vs	Vp
0 ~ 3.50	土丹塊 土丹塊混じり粘土	16.67	2~15	140	1400
3.50 ~ 8.40	シルト	17.65	2~3		
8.40 ~ 19.45	シルト	16.67	2~3		
19.45 ~ 23.70	粘土質シルト	17.65	3~4		
23.70 ~ 25.10	砂混じり土丹塊	18.63	14	270	1560
25.10 ~ (31.18)	土丹(基盤)		50以上	730	1910

*1 東京本店設計部 構造第2グループ *2 技術研究所 構造研究グループ

幅時に適用できるように修正した剛性モデルを用いて地震応答解析を行い、1 階床部の観測波の再現性について述べ、また地震観測記録では得られない杭の変形などについても述べる。

2. 対象建物

2.1 建物概要と地震観測

対象建物の概要を表-1に示し、1 階平面、地盤・杭を含む断面の概略図を図-1に示す。本建物は、6 階建ての鉄筋コンクリート造の集合住宅である。構造形式は、長辺（EW）方向がラーメン構造、短辺（NS）方向が耐震壁付きラーメン構造であり、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る。上部構造では長辺方向の中央にエキスパンションジョイントを設けて A 棟、B 棟に分割している。以下の検討では B 棟を対象とする。B 棟の長辺方向および短辺方向の長さは、約 74.2m および約 15.9m である。

建物の東端部の地盤概要および PS 検層による弾性波速度を表-2に示す。本建物の地盤は、基盤と表層地盤から成る 2 層地盤である。基盤は弾性波速度が 730m/s の土丹層であり、表層地盤は弾性波速度が 140m/s のシルト主体の沖積層である。ボーリングデータから推定した基盤深度分布図を図-1の平面図に重ねて示す。基盤は敷地内で東西に傾斜しており、約 23.5m の高低差を有し、その最大傾斜角度は最大 30° 程度である。基礎形式は、西端部では直接基礎、それ以外は基盤までの深さに応じて長さが異なる場所打ちコンクリート杭である。

2.3 免震装置概要

免震装置は、高減衰積層ゴムを 24 基設置している。免震装置の配置を図-1に示す。積層ゴムのゴム部の総厚が 160mm または 162mm、ゴム直径が 650mm～900mm である。免震層の剛心と上部構造の重心が一致するように計画している。なお、設計時の固有値解析による周期は、免震装置のせん断歪が 10%において 1.66 秒である。

2.4 地震観測概要

地震観測点を図-1に●で示す。地震観測点は、B 棟の基礎部および免震層直上の 1 階床部のそれぞれ西端部、中央部および東端部の計 6 点である。中央部では水平 2 方向（EW、NS）および上下（UD）

方向、両端部では短辺（NS）方向を観測している。サンプリング周波数は 100Hz である。本報告では NS 方向を対象とする。

2.5 検討対象地震

本検討では、主に 2005 年 7 月 23 日に千葉県北西部で発生した地震（Mj6.0）を対象とする（以後、観測波と称す）。

3. 解析モデル概要

3.1 振動解析モデル

振動解析に利用するモデルは、上部構造、免震層（装置）、基礎部、杭、杭周地盤ばねから構成される 3 次元立体フレームモデルである。図-2にモデル図を示す。本モデルは、前報²⁾で示したモデルとほぼ同様である。なお、本解析モデルでは、建物の長辺方向である EW 方向を X 軸、短辺方向である NS 方向を Y 軸とする。応答計算には逐次積分法である Newmark β 法 ($\beta=0.25$) を用いる。減衰は、初期剛性比例型とし、解析結果と観測記録の比較検討によりモデル全体の 1 次固有周期に対して $h=0.01$ （免震層を除く）とする。

(a) 上部構造のモデル化

上部構造の柱および耐震壁は、コンクリートおよび鉄筋をモデル化したファイバーモデル、梁は線材モデルに置換する。各部材は弾性とする。各仕口部に節点を設け、重量を集約した多質点モデルとする。各層の床は、スラブ厚に応じた平面要素にてモデル化した非剛床とする。

(b) 免震装置のモデル化

免震装置は 1 基につき 8 本のバネからなるマルチスプリングモデルとし、免震装置がある基礎部と上部構造の 1

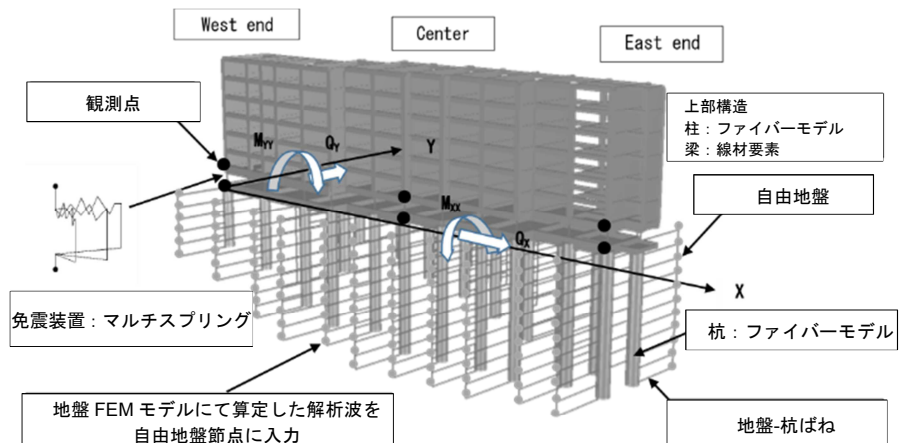


図-2 解析モデルの概要

階の各節点を接続してせん断力のみ伝達する。水平ばねの復元力特性は、標準型のマルチリニアとする。ここで、

本地震時の免震層の卓越周期は、1 階で観測された全時間の応答スペクトルによると約 1.25 秒であり、その時の免震層の最大せん断歪は約 5% である。これは設計式で評価されている最小せん断歪以下である。一般に、免震装置の剛性の設計式は、大地震時の最大応答変形を算定する目的としてせん断歪 10% 以上に対して定められているため、せん断歪がそれ以下となる小地震に対しては、設計式の等価剛性が実際の剛性よりも低くなる。森井ら¹⁰⁾によると、加振実験の結果から高減衰積層ゴムの微小振幅時の剛性は、HD モデルで評価し(1)式で表せるとしている。

図-3 には、本建物の中央部における観測記録に基づき算定した免震装置の荷重変形関係によるせん断歪と割線剛性との関係をプロットしている。その結果に適合するように式(1)の各係数を算定すると、本建物では $\alpha = 14$ 、 $\gamma_r = 3.0\%$ となる。これに適合するように至 10% 未満となる小振幅の範囲のせん断剛性に対し本修正式を用いる。なお、免震装置の減衰定数は 0 とする。

(c) 杭のモデル化

杭のモデルは、鉄筋とコンクリート部分を分離したファイバーモデルとし弾性とする。杭頭と基礎梁は剛接とし、杭先端はピンローラー支持とする。杭は 2m ごとに節点を設け、各節点に杭重量を集約する。なお、本検討では、基礎のロッキング挙動の影響は小さいものと仮定し、杭を含む基礎底版より下部の各節点では上下自由度を固定とし、水平 2 方向のみを考慮する。

(e) 自由地盤と杭周地盤ばね

自由地盤は、杭の各節点の鉛直位置に合わせて節点を設ける。後述する FEM 解析によって算定した基盤波を全体系への慣性力として作用させ、それに対する相対速度および相対変位を自由地盤の各節点に入力する。自由地

盤と杭の各節点は杭周地盤ばねおよび減衰要素にて連結する。杭周地盤ばねは、文献 11) による評価法-2 を参考にして剛性を Francis 式により算定し、それに杭間距離の平均値によって算定した群杭係数を考慮する。減衰係数は Gazetas 式により算定する。

(f) 傾斜基盤を有する地盤のモデル

地盤モデルは表層地盤と基盤の 2 層とする。対象建物の支持基盤の等深度図を反時計回りに約 60 度回転させた断面は、支持基盤と表層地盤から成る 2 次元の傾斜基盤構造とみなすことができ、傾斜基盤と堆積層から構成される地盤構造を 2 次元 FEM でモデル化する。

4. 強震記録のシミュレーション解析結果

4.1 基礎部の加速度波形

基礎部の中央で観測された地震動を基にして、2 次元 FEM の深さ 25m における基盤波を推定する。逆に、この基盤波と 2 次元 FEM による基盤と杭節点位置の伝達関数を用いて自由地盤応答を算定する（詳細は文献 2)等を参照）。これを振動解析モデルの杭位置への入力動とし、基礎部の各観測点位置で得られた基礎部 (NS, EW 方向) における地震観測点の解析波と観測波の比較を図-4 に示す。図-4 (a) は NS 方向、図-4 (b) は EW 方向（観測波は中央部のみ）である。これより、基盤波推定に用いた基礎中央部では両者はほぼ重なっていることが確認できる。また、基礎部 3 地点の NS 方向では地盤深さに応じて西端部から東端部へと振幅が増幅する様子も含め、観測波の傾向が再現されている。同様に EW 方向は、建物の両端部では地震動の観測は行っていなかったが、本手法を用いることによって推定することができた。EW 方向の各点の加速度波形より、NS 方向と同様に地盤深さに応じて振幅が増加する傾向が見られた。

4.2 1 階床部の加速度波形

図-5 に 1 階床部(NS 方向)の地震観測点における観測波と解析波の加速度波形を示す。図-5 (a) は、積層ゴムの設計式を用いた場合の解析波と観測波（中央部）の比較であり、図-5 (b) は、修正式を用いた比較図である。図-5 (a) に示すように設計式を用いた場合、小振幅時の剛性が小さく評価されるため初期の小振幅時の周期や振幅において観測波と大きな差異が生じている。それに比べて、図-5 (b) は、短周期成分の振動が表現できていないものの、初期の小振幅時から主要動による最大振幅時での免震層の周期や波形の形状などが観測波とは良い対応を示している。ここで西端部および東端部に見られる短周期成分は、入力動の振幅差および時間差に伴い現れ

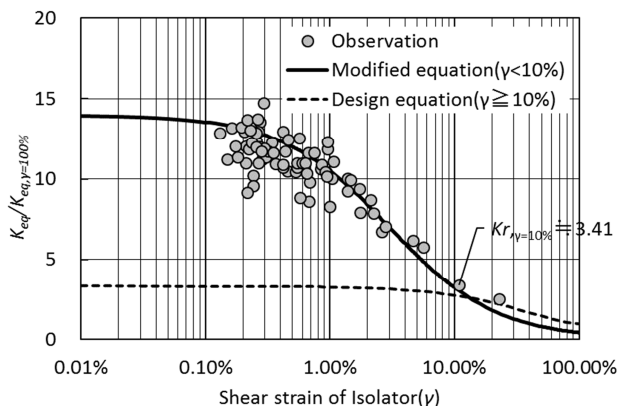


図-3 小振幅時を考慮したせん断剛性

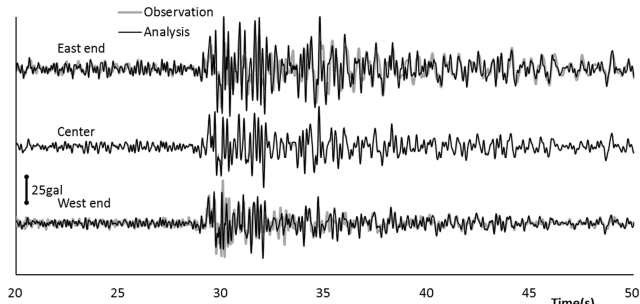
$$K_{eq} = \alpha \cdot K_{eq, \gamma=100\%} / (1 + \gamma / \gamma_r) \quad (1)$$

ここで、 γ はせん断歪、 γ_r は基準歪

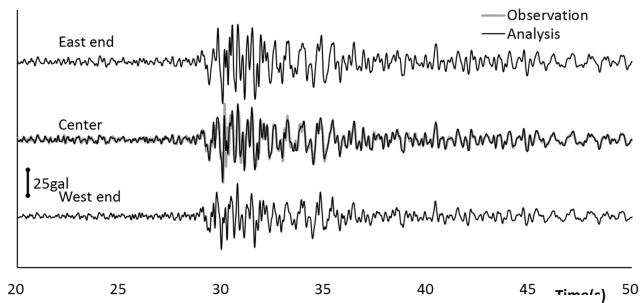
るねじれ振動成分である。これは、短周期成分が比較的小さい基礎中央部の記録を基にして解析波を算定しているため短周期成分が過小評価となったと考えられる。

4.3 上部構造・杭の最大変位分布

解析により得られた上部構造・杭の最大変位分布を図-7に示す。出力点は観測点に対応する西端部、中央部および東端部の南側杭列およびそれに対応する上部建物の各柱位置である。図より、いずれの方向でも西端部から東端部の堆積層厚に応じて、上部構造・杭ともに最大変位が大きくなる傾向が見られる。図-7(a)のNS方向では、免震層の相対変位が西端部に比べて東端部で大き

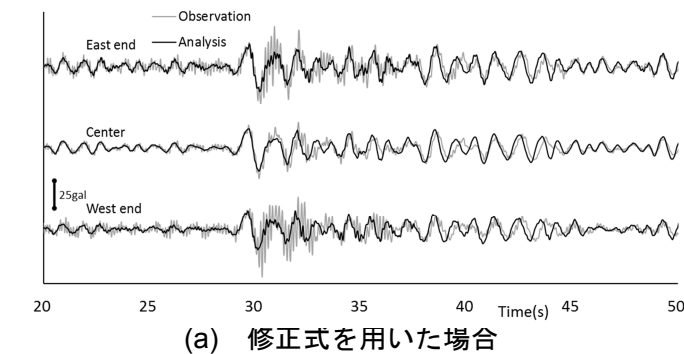


(a) NS 方向

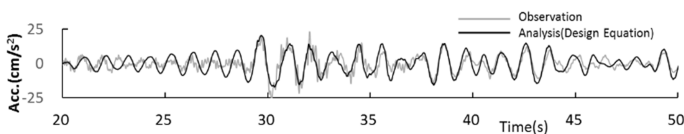


(b) EW 方向

図-4 観測波と解析波の比較（基礎部）

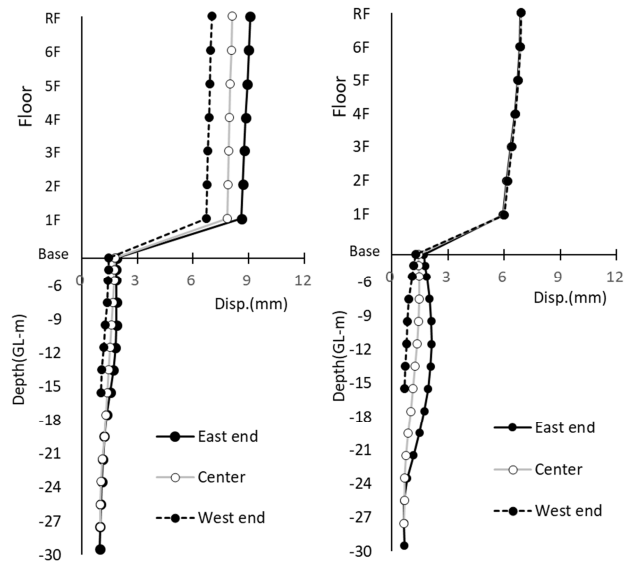


(a) 修正式を用いた場合



(b) 設計式を用いた場合（中央部）

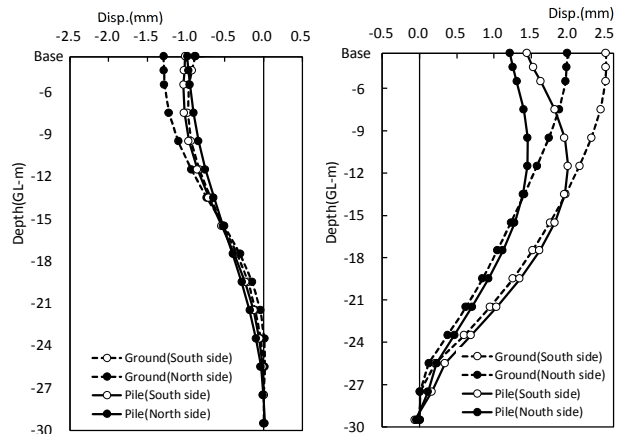
図-5 観測波と解析波の比較（1階床部）



(a) NS 方向

(b) EW 方向

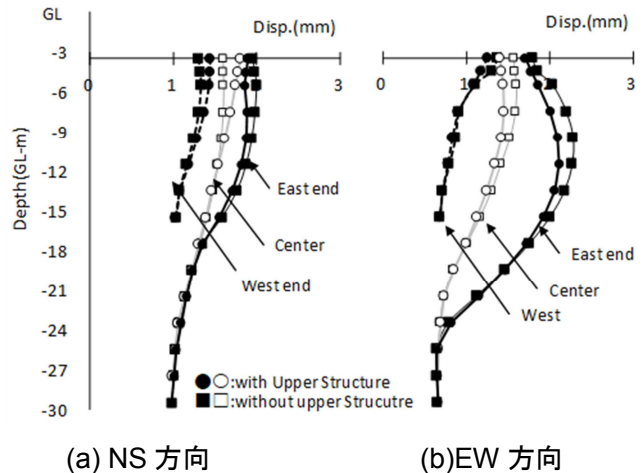
図-7 杭から上部構造の変位分布



(a) NS 方向

(b)EW 方向

図-8 最外縁の杭のせん断力が最大となった時の杭と地盤の変位分布



(a) NS 方向

(b)EW 方向

図-9 杭および地盤の変位分布に対する上部構造の慣性力の影響

くなり、建物全体でねじれ振動の影響が現れる。図-7(b)のEW方向では、免震層で大きな変形を示すが、上部構造の各位置で同じ変位となっていることから上部構造がほぼ一体として挙動している。また、地中内の変位では西端部、中央部、東端部の変位が大きくなり、東端部では杭頭よりも地中内で最大となる分布となっている。

4.4 地盤と杭の変位

東端部の杭が最大せん断力を生じた時間における、東端部の杭と地盤の変位分布図を図-8に示す。全般的に、杭頭の変位は地盤の変位に比べて小さい。両者の差はNS方向に比べてEW方向の方が大きい。NS方向の杭の変位は、全域で地盤の変位とほぼ同じである。しかし、EW方向の杭の変位は、杭先端から地中中央までは地盤とほぼ同じであるが、杭頭付近では地盤に比べて小さい。この原因として、短辺方向であるNS方向では、基礎底版が面内変形しやすく地盤と追従しやすいこと、建物の長辺方向となるEW方向では、直接基礎および基礎底版によって変形が拘束され杭頭変位が地盤に比べ小さくなることが挙げられる。また、それらの変位は建物の南側の杭列と北側の杭列でも異なっており、これは傾斜基盤の影響によって南北地盤の地震動の増幅特性に違いがあるためと考えられる。なお、上部構造の慣性力の影響を確認するため、解析モデルから上部構造を除いたモデルについて杭の最大変位分布の比較図を図-9に示す。これより、上部構造を除いたことによって、杭頭付近の変形に影響を与えているが、上記のような現象が同様に見られ、本検討において杭の変形等に対して上部構造による慣性力の影響は小さいものと判断できる。

このように、建物軸から回転した方向で基盤が傾斜し、東西方向だけではなく南北杭列でも杭長が異なること、地盤震動特性や地盤の長辺方向の変形に対して直接基礎で拘束され基礎底版により長辺方向での拘束効果があること、から杭位置による変形や応力分布の差異が複雑なものとなっている。

5. まとめ

傾斜基盤上に直接基礎と長さが異なる杭からなる異種基礎によって建設された免震建物を対象に、常時微動測定結果および1階床部、基礎部で観測された強震記録から本建物の観測波の再現を行った。

その結果、免震層に適切な剛性を考慮することによって、設計式の範囲を下回るせん断歪においても再現できる。また、地盤と建物の連成系モデルによって、杭の変形を推定することが可能となり、地震応答解析の結果、

杭の変形は地盤の層厚に応じて大きくなっていること、地盤の深さに応じて異なる変形となるため変位差が生じていることなどが確認できた。

[謝 辞]

本研究に際し、御指導いただいた東京理科大学の北村春幸教授、永野正行教授に謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 飛田喜則、山内豊英、橋本拓：株式会社浅沼組技術研究所報 No. 27：長さが異なる杭を有する免震建物の地震時の挙動について その3 東北太平洋沖地震時の地震観測データ、杭に生じる応力の検討、2016.09
- 2) 飛田喜則、山内豊英、橋本拓：株式会社浅沼組技術研究所報 No. 28：長さが異なる杭を有する免震建物の地震時の挙動について その4 入力地震動の時間差と振幅比に関する常時微動測定に基づく考察、2017.03
- 3) 飛田喜則、山内豊英、橋本拓長さが異なる杭を有する免震建物の地震時の挙動について その5 常時微動測定に基づく考察、株式会社浅沼組技術研究所報 No. 29 2018.03
- 4) 飛田喜則、永野正行、北村春幸、佐藤利昭、鈴木賢人、山内豊英：強震記録に基づく傾斜基板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 第23巻 第54号、pp. 409-414、2017.6.
- 5) 宮原直樹、永野正行、北村春幸、佐藤利昭、鈴木賢人、飛田喜則：2011年東北地方太平洋沖地震時の観測記録に基づく傾斜基盤構造に建つ免震建物の地震応答特性 その1 観測記録に基づく建物の挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 587-588、2016.8
- 6) 飛田喜則、永野正行、北村春幸、佐藤利昭、鈴木賢人、山内豊英：2011年東北地方太平洋沖地震時の観測記録に基づく傾斜基盤構造に建つ免震建物の地震応答特性 その2 FEM解析による地震動シミュレーションと建物の地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.589-590、2016.8
- 7) Yoshinori TOBITA, Masayuki NAGANO, Haruyuki KITAMURA, Toshiaki SATO, Kento SUZUKI, Yoriyuki MATSUDA, Toyohide YAMAUCHI, and Hiroto UEBAYASHI : DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A SEISMICALLY ISOLATED

BUILDING ON SOIL WITH INCLINED BEDROCK USING
AMBIENT VIBRATION AND STRONG MOTION RECORDS,
16th EUROPEAN CONFERENCE ON EARTHQUAKE
ENGINEERING、2018.6

- 8) 飛田喜則, 西浦遼、上林宏敏, 鈴木賢人, 永野正行：
常時微動計測に基づく傾斜基盤を有する地盤上に建
つ免震建物の動特性ーその1ー測定概要とスペクト
ル、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、
pp.181-182、2018.7
- 9) 西浦 遼, 飛田喜則, 上林宏敏, 鈴木賢人, 永野正
行：常時微動計測に基づく傾斜基盤を有する地盤上
に建つ免震建物の動特性ーその2ー卓越振動数にお
ける振動モード、日本建築学会大会学術講演梗概集、
構造Ⅱ、pp.183-184、2018.7
- 10) 森井雄史・他：免震部材の微小変形時の等価剛性が
環境振動評価に及ぼす影響と簡略的な応答評価の提
案、日本建築学会技術報告集、第21巻第49号、
pp.1102-1106、2015.10
- 11) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮し
た応答解析と耐震設計、pp.152-161、2006