

1. はじめに

内閣府では、従来の入力時震動を上回る強震動予測が進められており¹⁾、このような地震動に対する構造物の耐震安全性を検証する機会も少なくない。想定を上回る地震入力を受けた免震建物では、クリアランスを超えた応答による擁壁への衝突が懸念される。近年、擁壁衝突を対象とした実験的・解析的検討が進められ²⁾、擁壁衝突によって上部構造の応答が増大する点の他、それに伴う転倒モーメントの影響で、積層ゴムが引き抜ける可能性などが指摘されている³⁾。積層ゴムに関しては、小巻らが擁壁剛性や建物規模に応じたロッキング応答の差異を言及しているが³⁾、上部構造や下部構造、さらには積層ゴムのモデル化が、積層ゴムの上下応答に如何なる影響を与えるかは明らかではない。

本研究では、免震建物の擁壁衝突時における積層ゴムの応答性状の把握を目的に、上記 3 つのモデル化の違いに着目した数値実験による検討を行う。

2. 解析モデルの構築

2.1 検討対象建物の概要

本論文では、東京理科大学野田キャンパスに所在する地上 7 階建ての免震建物を検討対象とする。対象建物では 2003 年に竣工後、2004 年から強震観測を継続している。図 1 に免震層伏図を示す。対象建物は、平面 70.4 m × 36.5 m、高さ約 30 m の RC 造ラーメン架構を上部構造とする基礎免震構造である。以降ではアスペクト比が高い短辺方向 (Y 方向) を対象に議論を進める。免震層は図 1 に示す通り、天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、弾性すべり支承および鋼材ダンパーから構成される。下部構造は杭基礎で、埋め込み深さ 3.45 m の基礎と、GL-38.2 m

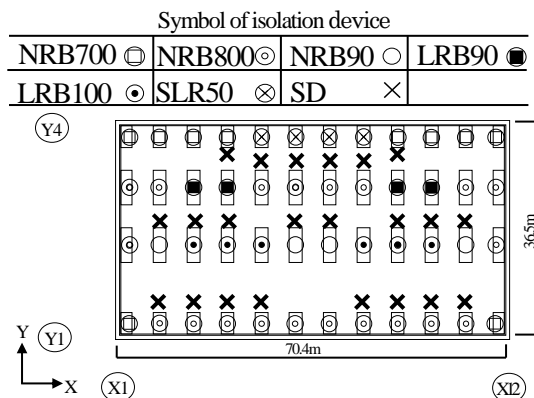


図 1 免震層伏図

表 1 地盤物性

地層	層厚 (m)	ρ (t/m ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
① ローム層	7.80	1.63	120	1554
② 砂層	12.75	1.74	194	1547
③ 粘性土層	15.30	1.74	230	1568
④ 粘土質砂層	4.00	1.80	250	1379

にある N 値 50 以上の第 2 種地盤を支持層とする鋼管杭 48 本で構成される。PS 検層結果に基づく地盤物性を表 1 に示す。

2.2 解析モデルの構成

解析モデルの概要を図 2 に示す。同図は、マットスラブ下に地盤ばねを挿入したモデルを示しており、本研究では、マットスラブ下を固定としたモデル (以後、Base-fixed model) での検討も行う。地盤との相互作用の評価方法については、2.2.3 項で詳しく説明する。

2.2.1 上部構造のモデル化

上部構造の各層のせん断剛性は、既報で述べた 3 次元フレームモデル⁴⁾ に対して剛床を仮定した A_i 分布による静的解析の結果を基に定めた。各層の骨格曲線は図 2 に示す通りである。本研究では、上部構造のモデル化の違いとして、上部構造のせん断剛性を骨格曲線の初期剛性とした、弾性のものと、塑性化を考慮した弾塑性のもの 2 通りで検討を行う。なお、減衰などの詳細な設定は文献 5 を参照されたい。

2.2.2 積層ゴムのモデル化

積層ゴムは、大変形領域で水平・上下方向の連成効果により、剛性が低下することが知られており、山本らはこれを再現する並列多軸ばねモデル (以後、MS model) を提案した⁶⁾。一般に、積層ゴムは、水平・上下方向の連成は考慮されず、それぞれ独立なばねでモデル化される (以後、Basic model) が、擁壁衝突のような大変形時の検討では、このようなモデル化の違いが積層ゴムの応答性状に与える影響は大きいと予想される。よって本論文では、Basic model の比較対象として MS model を採用し、その影響を評価する。

MS model の概要を図 3 に示す。中間層のせん断ばねは、後述する Basic model のせん断ばねと同一であり、上下端の軸ばねは、オフセットせん断ひずみを与えた引張試験結果⁷⁾ と整合するように設定した。その履歴特性は図 2 に示す通りで、せん断歪み 0% 時に、引張剛性を圧縮剛性の 1/38.5 とし、さらに引張面圧が 1.75 MPa 以上となった場合には、1/385 となる。

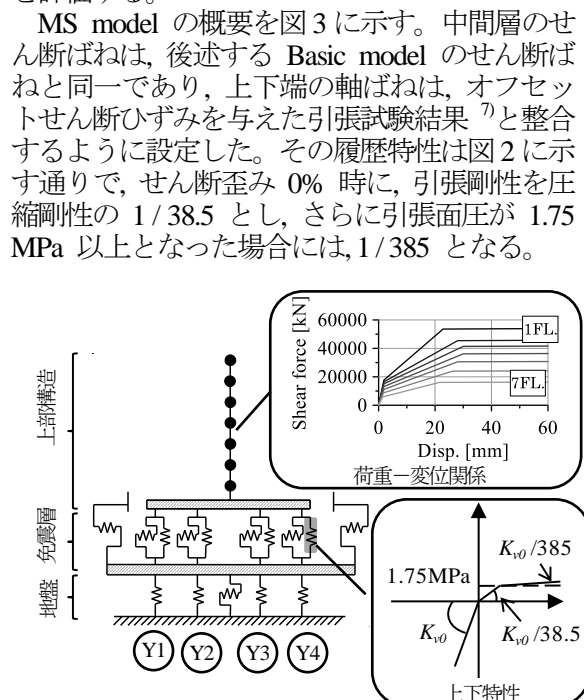


図 2 解析モデル概要

Basic model のせん断ばねは、ハードニングの影響を考慮するため、せん断歪み 250 % と 350 % の 2 箇所折れ点を設け、2 次剛性と 3 次剛性が、それぞれ 1 次剛性の 2 倍、7 倍となるように設定した。軸ばねは、せん断歪み 0% 時の MS model と同一である。

2.2.3 地盤ばねの評価と擁壁衝突のモデル化

本研究では、2 種類の地盤を想定して地盤との相互作用の影響を分析する。1 つは、直接基礎で工学的基礎 ($V_s = 400 \text{ (m/s)}$) に支持された埋込みのない均質半無限地盤 (以降、SSI case1 と呼ぶ) とする。これを正方形基礎に置換し、剛体仮定により地盤剛性と減衰定数を評価した。もう 1 種は、対象建物の下部構造を基に設定したもので (以降、SSI case2 と呼ぶ)、杭基礎の水平地盤バネは Francis の式を用いて算出し、上下地盤バネは Randolph による杭周上下地盤バネと杭先端上下地盤バネを基に評価した。本研究では、擁壁に衝突するような大振幅地震を想定するものであり、地盤が非線形となる可能性が高い。これを鑑みて、表層地盤の非線形を簡便に評価し、SSI case1 では $V_s = 300 \text{ (m/s)}$ 、SSI case2 では全層の V_s を 1/2 とし地盤バネを算出した。表 2 に SSI case1、表 3 に SSI case2 の地盤バネの剛性と減衰を示す。

擁壁は、図 4 に示すように、クリアランスを超えると剛性を発揮するスリップ型のばねで表現する。本研究では、クリアランス長さと擁壁剛性を変動因子とした検討を行ったが、クリアランスが短く、擁壁剛性が高いほど応答値が増大するという既往の知見⁵⁾と同様な結果が得られたため、これを割愛し、以降では最も応答の大きかったクリアランス長さ 50cm、擁壁剛性 10^4 kN/mm での計算結果を示す。

3. 衝突時における免震建物の応答性状の分析

3.1 入力波と最大応答時の解析ケース

入力波にはパルス性地震動を単純化した Ricker 波を速度波形として採用した。振幅は、 1000 cm/s^2 である。参考として、入力波の加速度時刻歴を図 5 に示す。

本研究では、積層ゴムモデル 2 種、基礎固定時

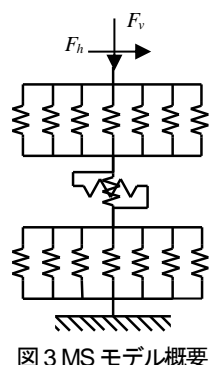


図 3 MS モデル概要

表 2 地盤ばね (SSI case1)

方向	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
水平	2.45×10^7	1.39×10^6
	3.50×10^7	2.78×10^6
上下	2.47×10^6	6.71×10^4
	1.33×10^7	1.31×10^6

表 3 地盤ばね (SSI case2)

方向	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
水平	2.45×10^7	1.39×10^6
	3.50×10^7	2.78×10^6
上下	2.47×10^6	6.71×10^4
	1.33×10^7	1.31×10^6

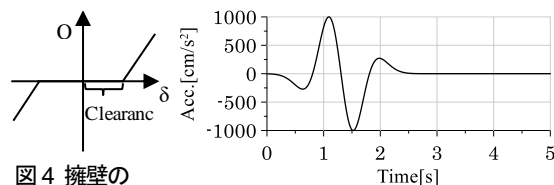


図 4 擁壁の荷重-変位関係

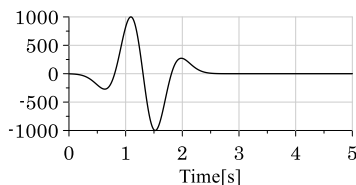


図 5 入力波の加速度時刻歴

も含めた地盤種別 3 種、上部構造が線形、非線形の 2 種の計 12 通りの解析を行った。以降の節では、各部のモデル化の違いによる影響を把握することを目的に、積層ゴムの上下応答が最大となった MS model、基礎固定時、上部構造線形のケースを基準として分析を行う。

3.2 衝突時の刺激関数

擁壁衝突時の上部構造の応答性状を把握することを目的に、固有値解析を実施した。図 6 (a)、(b) に水平変形 50cm 時の地動に対する刺激関数と、1 階のみに強制外力を作用させた場合の刺激関数をまとめて示す。同図より、地動に対する刺激関数では、1 次モードが支配的であるのに対し、衝突時のように 1 階のみに強制外力が作用した場合には 2 次モード以降の応答が増大することがわかる。

3.3 積層ゴムのモデル化の違いによる影響

本節では、積層ゴムモデルの違いが建物応答に与える影響について分析するために、地盤、上部構造の条件を基礎固定、線形として Basic model と MS model の比較を行う。

まず、水平応答の解析結果として、図 7 に最大加速度の高さ方向分布を示す。同図より、衝突によって上部構造の応答加速度が大幅に増大していることが確認でき、その影響は 1 階に大きく現れることがわかる。一方で、Basic model と MS model の間に大きな差異は見られない。

積層ゴムの上下応答として図 8 に鉛直変位波形を示す。同図 (a) の Y4 通りの鉛直変位の比較では、Basic model と MS model の違いが明瞭に現れており、MS model は Basic model と比べて、擁壁非衝突時を基準に約 1.71 倍の応答となっている。同図 (b) の Y1 通りの鉛直変位では、MS

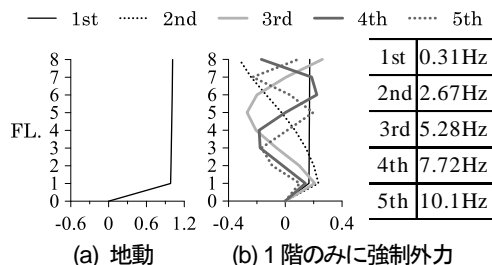


図 6 刺激関数

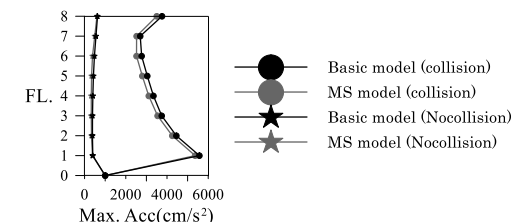


図 7 加速度の高さ方向分布 (Basic と MS の比較)

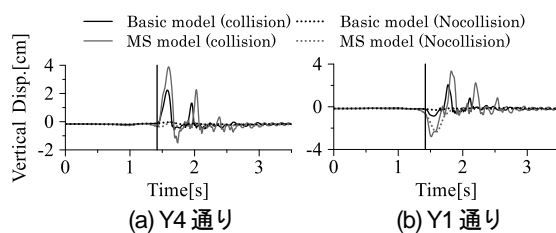


図 8 鉛直変位波形 (Basic と MS の比較)

model の応答値は Basic model よりも大幅に小さくなっており、これは MS model の水平変形に伴う沈み込みが要因となっていると考えられる。

このような Basic model と MS model の違いを詳しく分析するために、免震層の水平方向の履歴曲線を図 9 に、鉛直方向の履歴曲線を図 10 に示す。同図 (a) は擁壁衝突時、(b) は擁壁非衝突時のものである。図 9 より、MS model の水平剛性の低下によるせん断力の低下は、擁壁衝突によるせん断力の増大と比較するとごく僅かで、先に述べたように擁壁衝突時において、積層ゴムモデルの違いが水平応答に与える影響は小さいことが分かる。一方、図 10 に示すように鉛直方向の応答では顕著な差異が認められ、Basic model に対して圧縮側の線形性が損なわれている点の他、引張側の鉛直剛性の低下が確認できる。

3.4 地盤との相互作用による影響

本節では、地盤との相互作用による影響を把握するために、積層ゴムと上部構造の条件をそれぞれ MS model、線形として検討を行う。

3.4.1 上部構造の応答

地盤との相互作用が上部構造の応答に与える影響について分析するために、最大加速度の高さ方向分布を図 11 に示す。同図より、地盤の影響により応答が低減していることが窺え、SSI case1 と SSI case2 との比較より、軟弱な地盤ほどその影響は大きいことが分かる。

3.4.2 積層ゴムの上下応答

本節では、積層ゴムの上下応答に着目して地盤との相互作用の影響を分析する。図 12 に Y4 通

りと Y1 通りの鉛直変位波形を示す。同図 (a) より、地盤との相互作用の影響によって応答が低減していることがわかり、上部構造の応答と同様に SSI case1 と比べて SSI case2 の影響が大きい。その低減率は、SSI case1 で約 23 %、SSI case2 で約 66% である。同図(b) より、Y1 通りの最小鉛直変位も Y4 通りの最大鉛直変位と同様に、地盤の影響によって応答が低減していることが窺える。

本研究では、水平動に対する応答を調べているため、上記の積層ゴムの鉛直方向の応答は、上部構造のロッキング応答、それによって励起される上下応答と対応するものと考えられる。まず Y1 ~ Y4 通りの鉛直変位の時刻歴を図 13 にまとめて示す。さらに図 13 に示す結果を、ロッキング応答と上下応答に分離した結果を、図 14 および図 15 に示す。ここで、上下応答とは 1 階中央部の鉛直変位を意味するもので、ロッキング応答は Y1 ~ Y4 通りの鉛直変位から上下応答を差し引いて評価した結果である。

図 14 より、ロッキング応答は、地盤との相互作用によって応答が低減することがわかる。この要因を調べるため、図 14 (a), (b) に示した Y1 通りのロッキング応答のフーリエスペクトルを図 16 (a), (b) にまとめて示す。同図 (a) の基礎固定より、2.6 Hz 付近の卓越と、5 Hz 以降での励起が確認でき、図 6 (b) と対応する。一方、図 16 (b) の SSI case2 では、この応答が認められない。これは、地盤への逸散減衰効果と推察される。

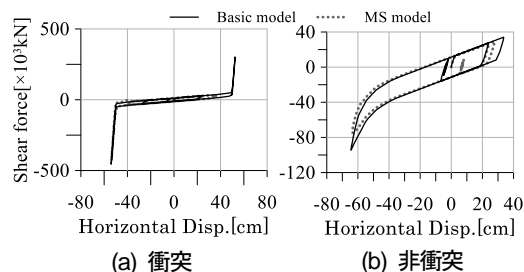


図 9 水平方向の免震層の履歴曲線

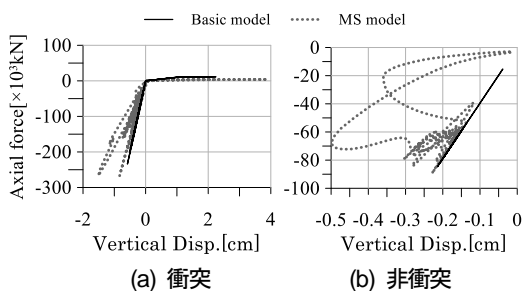


図 10 鉛直方向の免震層の履歴曲線

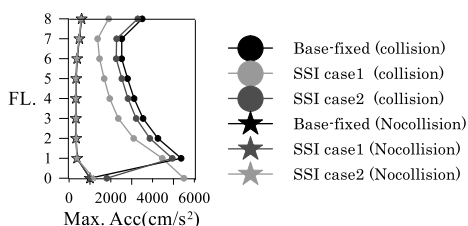


図 11 加速度の高さ方向分布 (地盤の影響)

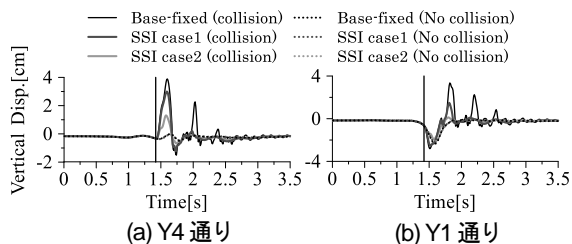


図 12 鉛直変位波形 (地盤の影響)

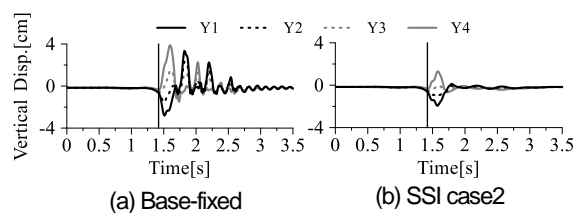


図 13 各通りの鉛直変位波形

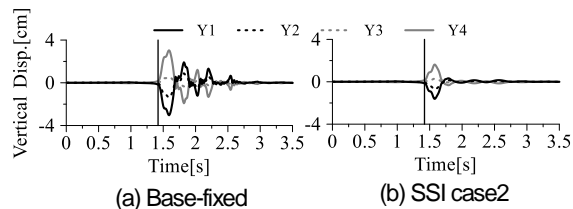


図 14 ロッキング応答

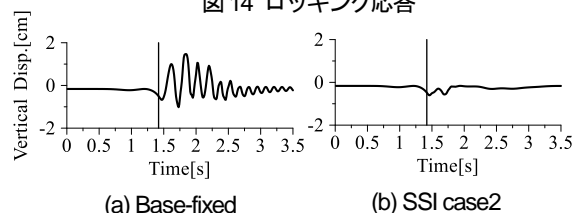


図 15 上下応答

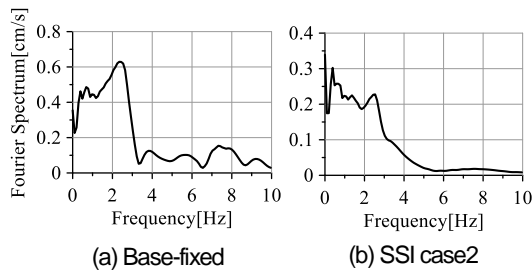


図 16 ロッキング応答のフーリエスペクトル

また、図 15 (a) より、擁壁衝突後には上下方向の 1 次固有周期と対応する自由振動が認められ、同図 (a), (b) の比較を通して、上下方向の自由振動が、地盤の影響によって大幅に低減されることがわかる。

3.5 上部構造のモデル化による影響

本節では、上部構造の線形、非線形の違いが建物応答に与える影響について分析する。以降は、積層ゴムモデルを MS model として検討を行う。

図 17 に Y4 通りと Y1 通りの鉛直変位波形をまとめて示す。同図 (a), (b) より、上部構造を線形でモデル化した場合と比較して、非線形とした場合には鉛直変位が大幅に低減している様子が窺え、上部構造の復元力特性の設定が積層ゴムの鉛直方向の応答評価をする上で重要であるといえる。図 18 に最大加速度、最大転倒モーメント、最大層間変形角の高さ方向分布をまとめて示す。同図 (a), (b) より、上部構造の非線形を考慮することで応答値が低減していることがわかり、これは先に述べた積層ゴムの上下応答の低減の要因となっている。また上部構造が非線形の場合には、地盤との相互作用の影響が転倒モーメントの大小には大きく寄与しないことも確認される。一方で、同図 (c) の層間変形角より、上部構造が非線形となることで応答が増大し、最大で 1 / 52 (rad) となっていることがわかる。擁壁衝突時に上部構造が塑性化し、層間変形角が大きい場合、地盤との相互作用を考慮しても、転倒モーメントに与える影響が小さく、ここで着目する積層ゴムの上下応答には大きな影響を与えない。しかし、上部構造の耐力が高く、免震層が終局状態の基準となるような場合には、地盤との相互作用が強く影響し、その影響を適切にモデル化した上で応答を評価する必要があると言える。

4. まとめ

本研究では、実大免震建物を対象に、各部のモデル化の違いが水平動入力に対する積層ゴムの上下応答に与える影響について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 水平方向に関して、積層ゴムのモデル化の違いによる影響はほとんど見られないが、鉛直方向では、MS model の鉛直剛性の低下が顕著となり、MS model は Basic model と比べて最大 1.7 倍程度の鉛直変位となった。
- (2) 水平方向では、地盤の影響により、上部構造の最大加速度が低減する。その低減効果は、硬質地盤よりも軟弱地盤の方が大きい。上下方向において、積層ゴムの最大鉛直変位は、基礎固定時と軟弱地盤で大きく差異があり、軟弱地盤のとき最大で約 66% 低減した。

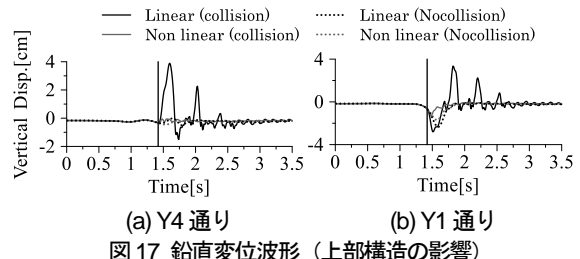


図 17 鉛直変位波形 (上部構造の影響)

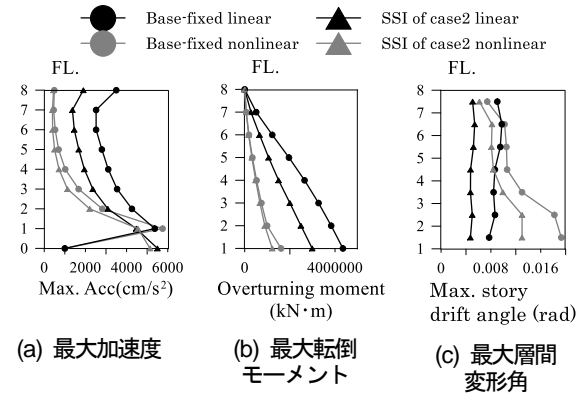


図 18 高さ方向分布

- (3) 基礎固定時のロッキング応答は衝突により、高次モードの応答が顕著となるが、地盤の影響を考慮することでこの応答は低減する。上下応答では、基礎固定時に、衝突による励起と自由振動が生じたが、地盤を考慮することでこれらの応答は大幅に低減する。
- (4) 上部構造の非線形性を考慮することで上部構造の応答加速度、転倒モーメントが減少し、積層ゴムの上下応答が小さくなった。擁壁衝突時に上部構造が塑性化し、層間変形角が大きい場合、地盤との相互作用を考慮しても、積層ゴムの上下応答には大きな影響を与えない。しかし、上部構造の耐力が高く、積層ゴムの引抜などの免震層が終局状態の基準となるような場合には、地盤との相互作用が強く影響し、その影響を適切にモデル化した上で応答を評価する必要があると言える。

参考文献

- 1) 内閣府：南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告，南海トラフの巨大地震モデル検討会，首都直下地震モデル検討会，2015.12
- 2) 三輪田吾郎，小巻潤平，佐藤浩太郎，佐野剛志，勝俣英雄，多幾山法子，林康裕：実大免震建物の擁壁衝突実験とそのシミュレーション解析，日本建築学会構造系論文集，pp.889-908，2011.5
- 3) 小巻潤平，佐藤浩太郎，三輪田吾郎，佐野剛志，勝俣英雄，多幾山法子，林康裕：免震建物の擁壁衝突によるロッキング応答，日本建築学会大会学術梗概集，pp.485-486，2011.8
- 4) 佐藤大樹，福田優輝，北村春幸：多点同時地震動観測記録に基づく免震建物の上下応答解析手法，日本建築学会構造系論文集，pp.1853-1862，2012.12
- 5) 山形有紀，佐藤利昭，木下貴博，本郷貴之，永野正行，北村春幸：地盤との相互作用を考慮した免震建物の擁壁衝突時の応答挙動に関する研究，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.353-356，2014.2
- 6) 山本祥江，菊地優，越川武晃，上田正生：並列多軸ばねを用いた積層ゴムの大变形挙動解析，日本建築学会構造系論文集，pp.81-88，2007.8
- 7) 谷佐馬，森隆浩，中村昌弘，室田伸夫，北村春幸，佐藤利昭：引張限界ひずみによる免震構造物設計のための積層ゴムの引張特性の評価 (その 2 実験結果および FEM 解析結果について)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.443-444，2015.9