

令和 3 年 6 月 27 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04339

研究課題名（和文）鉛直地震動による構造物等への影響の解明とその影響を低減させる鉛直免震機構の高度化

研究課題名（英文）Elucidation of the effects of vertical earthquake motion on structures, etc. and advancement of vertical seismic isolation mechanism to reduce the effects

研究代表者

佐藤 栄児（SATO, Eiji）

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主任研究員

研究者番号：60343761

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：過去の地震に関して、1Gを超える鉛直地震動の観測記録の調査とそれらの地震動による被害などの調査を行った。1Gを超える鉛直地震動の対策技術として、鉛直方向の免震について検討を行い、リンク機構を用いた新たな方式による鉛直免震台の設計製作を行った。さらに免震周期のより長周期化とセミアクティブ制御による免震性能の向上を目指し、回転慣性と電磁石により減衰力を可変させる機構を組み合わせた新たな可変減衰ダンパーを提案し、その性能を検証した。最後に提案ダンパーを用いた鉛直免震の性能検討を行い、免震性能が向上することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震国日本では、頻繁に地震被害が発生しており、地震動の観測記録も1Gを超えるものが複数回観測されている。特に鉛直動において1Gを超える場合、物体の浮き上がりが発生し損傷、転倒の危険性が高まる。さらにそれらの損傷や転倒が人に被害を及ぼすことが懸念される。本研究では、鉛直地震動による影響の調査とそれらの影響を低減させる鉛直免震機構の検討を行った。鉛直免震の普及化のための新たな方式の免震台と、免震性能の向上のためのセミアクティブ免震用の新たな可変ダンパーを提案、評価しており、学術的な意義は十分にある。また本成果が発展し実用化された場合は、地震被害の低減が可能であると考えられ、社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：For past earthquakes, the observation records of vertical seismic motions exceeding 1G and damages caused by these vertical seismic motions were investigated. As a countermeasure technology against these vertical seismic motions exceeding 1G, seismic isolation in the vertical direction was examined, and a vertical seismic isolated table using a new link mechanism was designed and manufactured. Furthermore, the aim to make the seismic isolation period longer and improve the seismic isolation performance by a semi-active control, a new variable damper that combines a rotary inertia and a mechanism that changes the damping force by an electromagnet was proposed and the performance of the variable damper was verified. Finally, the performance of the new vertical seismic isolation using the proposed variable damper was examined, it was confirmed that the seismic isolation performance was improved.

研究分野：耐震工学

キーワード：鉛直地震動 鉛直免震機構 セミアクティブ免震 回転慣性マスダンパー

### 1. 研究開始当初の背景

現状の耐震工学の分野において、鉛直地震動は構造物に大きな影響を与えることはないと考えられ建築物の設計において鉛直地震動はほとんど考慮されていない。また日本における地震観測網が整備される以前の地震観測記録においてはさほど大きな鉛直地震動が観測されていなかったという実情もあり、これまで鉛直地震動の影響は軽視されてきたが、近年 1G をはるかに超える鉛直動が観測され、その影響を無視できない状況である。それにも関わらず、学術的な研究はほとんどされていないのが現状である。1G を超える大きな鉛直動が、構造物に入力され、さらに構造物の応答により振動が増幅されるため、構造物内ではより大きな加速度となる。このような状況下において、構造物や構造物内の非構造部材、設備機器および人に与える影響を軽減することはできない。

これらの被害を解消するのに最も効果的な方策の一つとして、振動をできるだけ絶縁させる“免震効果”を利用する方法が挙げられる。この免震効果の利用は、水平方向においては各種の免震機構により実用化され広く普及しているが、鉛直方向に関しては免震の性質上解決が非常に困難な問題があり、実現化しにくく普及していないのが現状である。水平方向の免震の場合、構造物の自重は積層ゴム等の鉛直方向の堅い剛性で支持し、水平方向は積層ゴム等の柔らかいバネを介在させることで免震効果を得ている(図 1-1)。一方、鉛直方向の免震の場合、構造物の自重を支持するため堅い剛性(バネ)が必要だが、免震効果を得るためには同一方向で柔らかい剛性(バネ)が必要となり(図 1-2)、トレードオフが生じてしまうという問題がある。また、鉛直方向の免震においては、可動範囲を水平方向程大きく取れないという問題もある。通常水平方向の免震の可動範囲は、50cm 前後であり大きいものでは 1m 程度確保されているが、鉛直方向の免震でこれほどの可動範囲が必要とされなくとも、例えば水平方向の 1/2 程度の可動範囲とした場合で、免震の稼働時に固定部との間で 25cm 程度の段差が生じ、危険な状況となり新たな被害の発生が予測される。

これらの問題を解決する方法として、本研究では、回転慣性ダンパーとセミアクティブ制御を組み合わせた新たな鉛直免震機構を提案する。回転慣性ダンパーを用いることで、回転慣性が質量効果となり、免震の支持剛性を柔らかくしなくとも免震の周期を長周期化することが可能である。またセミアクティブ制御を用いることで、免震性能(応答加速度の低減効果)を低下させず、免震変位を大幅に低減させることが可能である。

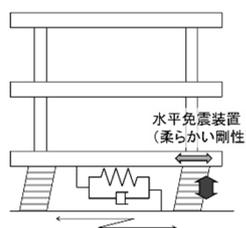


図 1-1 水平免震

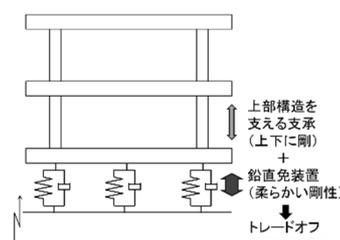


図 1-2 鉛直免震

### 2. 研究の目的

近年 1G を超える鉛直地震動が観測され、構造物への影響も問題視されつつある。そこで本研究では、その鉛直動の影響低減をめざし、新たな鉛直免震を検討する。鉛直免震では免震効果向上のため鉛直方向の剛性を柔らかくしたいが一方、建物の自重を支えるため剛性を堅くしなければならないというトレードオフが生じ、従来の水平免震技術を鉛直方向にそのまま適用させることができない。

本研究では、鉛直剛性を堅くしたまま、回転慣性ダンパーを用いることで見かけの質量を上げ免震周期の長周期化を実現させる。また、鉛直方向は水平方向ほど許容変位量を大きくできないため、変位低減性能として有効なセミアクティブ制御を用いた鉛直免震機構を提案、検討する。

### 3. 研究の方法

本研究では、鉛直方向に免震を用いることで、地震における鉛直動による被害を低減させることをめざしているが、鉛直方向の免震にはいくつかの技術的な問題点があり、その問題点を克服するため回転慣性ダンパーとセミアクティブ制御を適用した新たな鉛直免震機構を確立する。

そのためここでは以下の項目について検討を行うこととする。

#### (1) 鉛直地震動による影響評価

まず、鉛直加速度記録の大きい過去の地震に関して調査等を行う。これらの鉛直地震動による被害について調査し、鉛直動による被害を低減させる免震性能目標を設定する。

#### (2) 回転慣性ダンパーとセミアクティブ制御を用いた免震機構の検討

今回提案する鉛直免震機構の数値解析モデルを作成し、数値解析により免震周期、減衰力、免震許容変位などを明らかにする。また作成した数値解析モデルを用いてパラメトリックスタディを実施し、免震を長周期化させる効果がある回転慣性ダンパーおよび免震変位の低減化に効果があるセミアクティブ制御用ダンパーの仕様などを検討する。

#### (3) 鉛直免震機構の各要素の製作と性能検証

鉛直免震機構の検証のための免震台、回転慣性ダンパー、セミアクティブ制御用ダンパーの設

計製作を行う。製作した各機器の単体での性能を把握する。これらの結果から各機器の特性を数値解析モデルに反映させる。

(4)鉛直免震機構の検証実験実施と数値解析モデルの一般化検討

提案の鉛直免震機構に関して性能を検証するため、各種データおよび技術的知見を取得する要素実験などの結果から、提案の免震機構を組み込んだ免震構造に関する数値解析モデルについて一般化を行う。さらにセミアクティブ免震の検討を行い、鉛直地震動による被害の対策の一手法として提案している鉛直免震機構の性能について検討する。

4. 研究成果

(1) 鉛直地震動による影響評価

地震動の鉛直動による影響について記載された文献としては、前原らのものがある<sup>1)</sup>。これは阪神淡路大震災時などにおける鉛直動が構造物を破壊する現象について述べられており、鉛直道の危険性などが報告させている。一方、鉛直地震動として、これまでに防災科学技術研究所強震観測網で観測された地震動のうち1Gを超える観測記録を表4-1-1に示す<sup>2)</sup>。また、これらの鉛直地震動の加速度応答スペクトルを図4-1-2に示す。これらの鉛直道の主要帯域は、0.3~0.1秒(1~3Hz)に多くの成分を含んでいることがわかる。

もっとも鉛直加速度記録が大きかった平成20年岩手・宮城内陸地震での一関西(以下、「KiK-net 一関西波」という)での記録は、3Gを超える記録となっていた。この際、観測施設内の数百kgの軽量棚が飛び上がり、通信線を切断したとの被害記録がなされている<sup>3)</sup>。1Gを超える加速度が下向きに記録された場合は、拘束されていない物体は理論的には地面から離間し、飛び上がることになる。浮き上がったものの重さにもよるが、着地時の衝撃は、大きく浮き上が他ものおよび着地地点の物体等の破損などが考えられ、また物体の転倒も十分に考えられる。

水平方向の地震動と同様に、鉛直方向の地震動に関しても、構造物や周辺機器等への被害の発生が懸念されるため、鉛直方向に関しても免震化し、建物等への入力地震動(力)を軽減化させることは重要である。ここでは、上部構造の応答も考慮し、1Gを超える鉛直地震動に対して、1Gをはるかに下回る応答の低減を実現する免震性能をめざす。

表 4-1-1 1Gを超える鉛直加速度を観測した地震動

地震	地震発生日時		観測点 コード	観測点 名	加速度 (Gal)			計測 震度	県名
	マグニチュード				N-S	E-W	U-D		
宮城県沖の地震	2003/5/26	18:24:00	IWTH04	住田	730	723	<b>1280</b>	5.8	岩手県
	M7.0								
平成20年(2008年) 岩手・宮城内陸地震	2008/6/14	8:43:00	IWTH25	一関西	1143	1433	<b>3866</b>	6.3	岩手県
	M7.2		AKTH04	東成瀬	1318	2449	<b>1094</b>	6.4	秋田県
平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖地震	2011/3/11	14:46:00	MYG004	築館	2700	1268	<b>1880</b>	6.6	宮城県
	M9.0		IBR003	日立	1598	1186	<b>1166</b>	6.4	茨城県
			FKSH10	西郷	1062	768	<b>1016</b>	6	福島県
平成28年(2016年) 熊本地震	2016/4/14	21:26:00	KMMH16	益城	760	925	<b>1399</b>	6.4	熊本県
	M6.5								
平成30年 北海道胆振東部地震	2018/9/6	3:08:00	HKD127	追分	1004	904	<b>1591</b>	6.4	北海道
	M6.7		IBUH01	追分	1316	929	<b>1060</b>	6.7	北海道

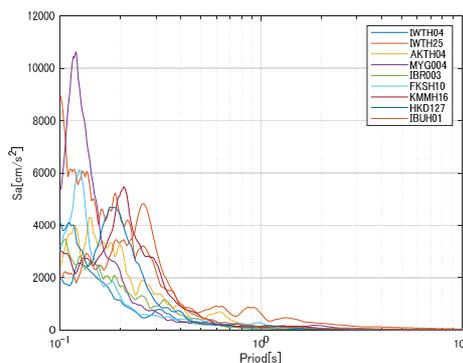


図 4-1-1 1Gを超える鉛直加速度の加速度応答スペクトル

(2)回転慣性磁気ダンパー

回転慣性と電磁石により減衰力を可変させる機構を組み合わせた可変減衰ダンパーとして回転慣性磁気ダンパーを考案した。この回転慣性磁気ダンパーは、主に回転慣性要素と磁気減衰要素から構成される。図4-2-1にダンパーの概略図と外観を示す。

回転慣性要素はボールねじとボールナット、フライホイール(導体板)からなり、ボールねじとボールナットにより直線運動が回転運動に変換され、ボールねじの先端に接続されたフライホイールが回転することにより慣性力が発生し、回転慣性力により増幅された質量効果が、ボールねじを介して直線運動として伝達され、軸方向加速度に比例した慣性力が発生する。磁気減衰要素は主に導体板と電磁石からなり、導体板が電磁石の作る磁場内を通過し、導体板内に渦電流が発生し、運動方向と逆向きに磁気による減衰力が発生する。この時、コイルに流す電流を調節

することにより減衰力を増減させることができる。

回転慣性磁気ダンパーの基本特性試験結果を図 4-2-2 に、減衰係数の算出結果を図 4-2-3 に示す。印加電流の違いによる荷重変位関係の比較になっている。印加電流が増加すると、履歴面積が増加することがみてとれる。これによりコイルに流す印加電流を制御することで減衰力を可変できることが確認できた。

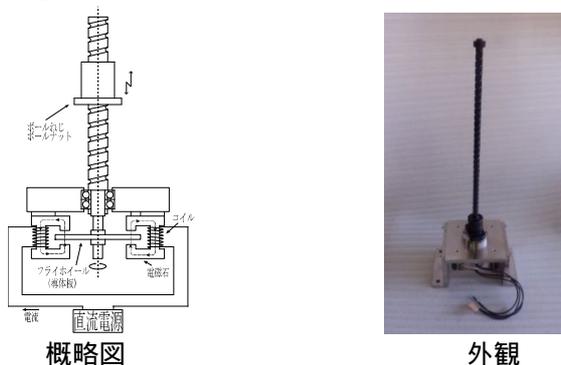


図 4-2-1 回転慣性磁気ダンパー

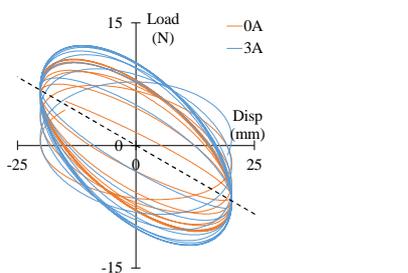


図 4-2-2 履歴面積の比較 (正弦波加振)

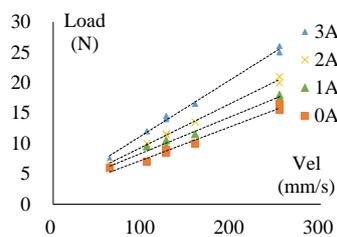


図 4-2-3 減衰係数の算出

### (3)鉛直免震機構

図 4-3-1 に、提案したリンク機構による同調型鉛直免震機構の免震装置を示す。リンク機構において、捩じりばねを正ばねとし、コイルばねの幾何学的配置で負ばねとし、それぞれを並列することで、質量を安定に支持しながら固有周期 2 秒程度の長周期化を実現している。水平拘束パスタグラフリンクは 3 節点で構成されており、外形寸法は 750 角、高さ 300 程度である。



図 4-3-1 リンク機構による同調型鉛直免震機構の試験装置

鉛直免震を 1 質点系振動モデルとし、上部構造の相対変位を  $x$ 、地動の変位を  $z$  とすると、運動方程式は式(4-3-1)で表される。入力 (加振) に対する出力 (応答) の伝達関数は、構造体に対する質量比  $m$  や減衰  $\zeta$ 、固有振動数比  $\lambda$  により無次元化して一般性を持たせている。

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx + m_d\ddot{x} + f_c = -M\ddot{z} \quad (4-3-1)$$

ここで  $M$  は上部構造質量、 $m_d$  は慣性質量、 $f_c$  は可変減衰力 (ここでは 0) とする。

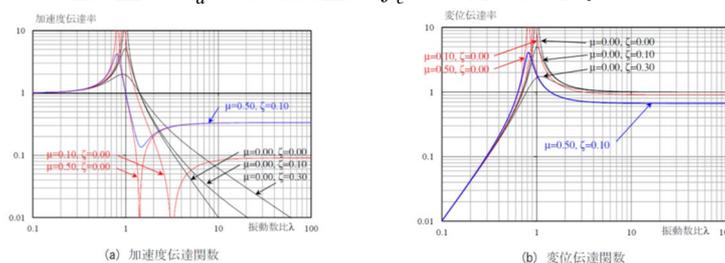


図 4-3-2 鉛直免震の伝達特性

本モデルにおける質量比および減衰定数を変化させた場合の加速度伝達率と変位伝達率は図 4-3-2 のように表される。図中の黒線は質量比  $\mu$  を 0 で一定として減衰定数を 0.00, 0.10, 0.30 と変化させた場合、図中の赤線は減衰定数 0 として質量比を 0.10, 0.50 と変化させた場合、図中の青線は質量比 0.50、減衰定数 0.10 の場合である。慣性質量による免震周期の長周期化が確認できる。また、高振動数領域の伝達率が大きくなってしまいうことも注目すべき点である。

#### (4) 数値解析モデルの一般化検討

1 質点系とした建物モデルのセミアクティブ免震の運動方程式は、式(4-3-1)となる。ここで、可変減衰力を最適制御理論を用いて以下のように算出することとする。評価関数を式(4-4-1)とおき最適制御力を算出する。

$$J = \int_0^{\infty} [\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)] dt \quad (4-4-1)$$

$M = 20\text{kg}$ 、 $m_d = 1\text{kg}$ 、免震周期 0.5 秒、減衰定数 10% の場合の時刻歴応答解析を行った。比較のため、セミアクティブ免震の場合と可変減衰を働かせないパッシブ免震との比較を行った。時刻歴波形を図 4-4-1 に示す。入力波形は KiK-net 一関西波を用いた。図は、上から入力加速度、応答加速度、相対速度、相対変位、可変減衰力となっている。黒線がセミアクティブ免震、青線がパッシブ免震の時刻歴波形を示している。各グラフの右端の上側にセミアクティブ免震時の最大最小値、下側にパッシブ免震の最大最小値を示している。

応答加速度は、最大値 3866Gal の入力に対して、パッシブ免震で 17% の 612Gal に、セミアクティブ免震で 12% の 466Gal に低減できている。これは、物体が飛び上がるであろう 1G を大きく下回っており、セミアクティブ免震、パッシブ免震ともに構造物や内部の物体の被害の低減につながるものと考えられる。相対変位に関して、セミアクティブ免震は、パッシブ免震の 64% に低減できている。セミアクティブ免震の効果が得られていることがわかる。一方、慣性負荷による最大値の低減効果はあまり見られなかった。これは、免震の固有値（振動特性のピーク値）の長周期化は実現できているが、高周波帯域での応答特性の悪化がみられるためと考えられる。

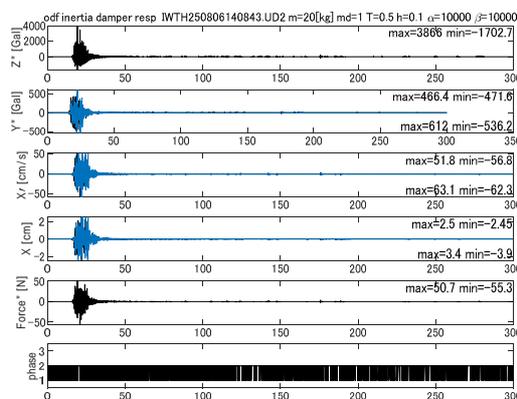


図 4-4-1 KiK-net 一関西による鉛直免震の地震応答解析結果

#### (5) まとめ

本研究では、まず、1G を超える鉛直地震動について調査し、その被害を改めて確認した。次に、鉛直免震の検討のため、回転慣性ダンパーを用いることで見かけの質量を上げ免震周期の長周期化を試みた。さらに、免震変位の低減化として有効なセミアクティブ制御用のダンパーとして減衰が可変可能な回転慣性磁気ダンパーを提案し、その特性を評価した。さらに、リンク機構を用いた鉛直免震装置を提案し、評価を行った。

最後に、鉛直免震に回転慣性磁気ダンパーを用いてセミアクティブ免震の性能検討を行った。提案の鉛直免震では、回転慣性により免震の固有値（振動特性のピーク値）の長周期化が可能であり、またセミアクティブ免震によりパッシブ免震と比較し変位を低減し免震性能の向上が可能であることを確認した。

- 1) 前原博、櫻井春輔：阪神淡路大震災での衝撃的鉛直地震動とその局在波的性質、国交省近畿地整局 平成 27 年度研究発表会、防災・保全部門 No.10、平成 27 年 6 月
- 2) 防災科学技術研究所 強震観測網  
(K-NET/KiK-net) , <https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 3) 富澤徹弥、高橋治、藤谷秀雄、柴田和彦、佐藤友祐：磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの性能試験とその解析的検証、日本建築学会構造系論文集、第 78 巻、第 693 号、1859-1867、2013 年 11 月

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 富澤 徹弥、佐藤 栄児、山田 学、貴志 拓哉
2. 発表標題 鉛直免震機構の高度化に関する基礎的研究 その1 周波数領域におけるパッシブ応答の検討
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	富澤 徹弥  (TOMIZAWA tetsuya)  (30774773)	明治大学・理工学部建築学科・専任講師    (32682)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------