

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02292

研究課題名(和文) 外乱作用中にダンパーが損傷した場合の応答逆転現象の解明と極限応答増幅率の簡易評価

研究課題名(英文) Response magnification phenomenon caused by damper damage during disturbance and a simplified evaluation of the ultimate response amplification factor

研究代表者

辻 聖晃 (Tsuji, Masaaki)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：00243121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,000,000円

研究成果の概要(和文)：(1)1質点に縮約したオイルダンパー付き弾性建物モデルに対して、パルス性地震動が作用したときの変位応答の最大値の閉形解を求めて、地震動作用中にダンパーが脱落すると、ダンパーが最初からなかった場合よりも地震時最大変位が増幅する可能性があることを理論的に明らかにした。(2)振動台実験により、地震動作用中にダンパーが脱落した場合や最大ストロークに達した場合に、変位や加速度の増幅現象が生じることを実証し、ダンパー取付部材剛性が増幅率に大きな影響を与えることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでは、地震動作用中にダンパーやその取付部材が損傷したり、ダンパーがストロークの最大値に到達したりすることは想定されていなかったが、2011年の東北地方太平洋沖地震や2016年の熊本地震において、実際にそのような損傷が観察されている。このような損傷が生じた場合に、建物の応答が顕著に増幅し、ダンパーがない場合よりも大きくなる可能性があることを本研究は初めて明らかにしたもので、ダンパーの限界性能の設定や、極大地震に対する建物の安全性評価に、今後はいっそう慎重を期す必要があることを示している。

研究成果の概要(英文)：(1)A closed-form solution for the maximum displacement response of an elastic building model with oil dampers subjected to pulsating seismic motion is obtained, and it is shown theoretically that if the damper drops out during seismic motion, the maximum seismic displacement may be amplified more than that of a building without dampers.

(2)Shaking table experiments demonstrated that the displacement and acceleration are amplified when the damper drops out or reaches its maximum stroke during seismic motion, and that the stiffness of damper attachment member has a significant effect on the amplification rate.

研究分野：建築構造力学

キーワード：オイルダンパー ダンパー取付部材 地震時応答逆転現象 ダンパーの損傷 振動台実験

### 1. 研究開始当初の背景

(1)2011年に発生した東北地方太平洋沖地震ならびに2016年に発生した熊本地震においては、複数の免震構造建物および制震構造建物(以下、免制震建物と略称)において、免震装置やダンパー(以下、免制震装置と略称)、あるいはそれらと建物の主構造体を接続するための取付部材(以下、取付部材と略称)に亀裂や脱落などの損傷が生じた[1,2]。免制震建物の構造設計や性能評価に際しては、極めて稀に発生する地震や台風に対しても、免制震装置やその取付部材には、損傷による性能低下や、免制震装置の可動範囲を越える変形は生じないことを前提にしており、免制震装置やその取付部材に損傷が生じた場合には、設計時に想定した耐震性能・台風性能が十分には発揮されないこととなる。

ところが、本申請者が、日本建築学会「建物の振動制御性能評価小委員会」の委員会活動の一環として、建築、土木、機械分野における国内外の文献調査を実施したところ、免制震装置やその取付部材に損傷が生じた場合に、地震や台風に対する応答にどのような影響があるのかを、定性的あるいは定量的に明らかにする研究は、これまでにほとんど行われていないことが明らかとなった[3]。

(2)研究代表者は近年、「オイルダンパーを組み込んだ制震構造建物において、地震作用中にオイルダンパー取付部材が破断する場合、破断が発生するタイミング(破断時刻)によっては応答増幅現象が生じることがあり、さらに地震特性と建物特性の組み合わせによっては、応答逆転現象が生じることがある」ことを数値解析的に明らかにした[4,5]。しかしながら、以下の点についてはまだ解明が行われていなかった。

《問い1》応答逆転現象はなぜ生じるのか?(発生理由)

《問い2》外乱特性、建物特性、損傷発生時刻の三者間で、どのような条件が成り立つときに、応答逆転現象が発生するのか?(発生条件)

《問い3》応答逆転現象が発生する場合に、予想される最大の応答増幅率(極限応答増幅率)を簡易に評価する方法はあるか?(定量的評価)

### 2. 研究の目的

本研究の目的は以下のとおりである。

(I)ダンパーが組み込まれた免制震構造建物に対して、地震あるいは風外乱の作用中にダンパーや取付部材に破断などの損傷が生じた場合に発生する可能性がある応答逆転現象について、その発生理由と発生条件を理論的に明らかにする。

(II)上記の現象が発生した場合の極限応答増幅率を、多数の時刻歴応答解析によらずに簡易に予測する方法を構築する。

(III)小型建物模型を用いた振動台実験により、応答逆転現象の発生条件と、極限応答増幅率の簡易予測法の妥当性を検証する。

### 3. 研究の方法

本研究は、本課題の申請前から継続的に行ってきたものであり、課題採択前後の研究は一貫性を有している。そこで研究の方法ならびに研究成果においては、課題申請後に実施した研究方法および研究成果もあわせて記載する。

(1)1質点に縮約したオイルダンパー付き弾性建物モデルに対して、ダブルインパルス[6]に置換したパルス性地震動が作用したとき、任意の時間にオイルダンパーが破断(脱落)したときの応答はインパルス応答を用いて閉形的に表現することができる。このことを用いて、ダブルインパルスの間隔 $t_0$ と構造減衰 $h$ をパラメータとし、ダンパーが脱落するときの時間 $t_f$ の関数としての変位応答の最大値の閉形解を求める。このことにより、ある特定の条件下で地震時応答逆転現象が発生することを理論的に示す。また、このことの妥当性を検証するため、電磁石により任意の時間にオイルダンパーの脱落が可能な1層弾性建物模型に対する振動台実験を実施する。

(2)ダンパーや取付部材に想定外の損傷が生じたとしても地震時応答逆転現象が生じないロバスト性の高い構造システムとして、一つの建物内に複数の免震層を有する「多段免震構造」を取り上げて、一般的な基礎免震構造建物に比べて、免震層の最大層間変位と上部構造の最大加速度を効果的に低減できるような、両免震層に設置するダンパーの減衰係数の特徴を、様々な特性をもつ地震動に対する時刻歴応答解析を通じた検討により明らかにする。

(3)オイルダンパーがストロークの限界に到達(ストロークオーバー)した場合について、ストロークの制限が可能なオイルダンパーを組み込んだ建物模型を用いて、本課題で導入した小型振動台による実験を実施し、取付部材の剛性、地震動の特性、ダンパーの許容ストロークなどが、加速度応答の増幅に与える影響を明らかにする。

(4)本課題で導入した持ち運び可能な超小型2軸振動台を用いて、ねじれ変形を考慮できる2層建物骨組模型に対する振動実験を実施する。第1層の偏心が大きい2層建物と第2層の偏心が大きい2層建物の場合について、建物崩壊までの挙動を定性的に追跡し、市販の耐震診断用ソ

フトウェアによるシミュレーション結果との比較を行う。この建物骨組模型に、実験方法(1)で使用する、ダンパーの脱落装置あるいは実験方法(3)で使用する、ストロークの制限が可能なオイルダンパーを組み込むことによって、ダンパーの損傷によって引き起こされる多層建物のねじれ応答を実験的に検証することが可能となる。

#### 4. 研究成果

(1) 課題申請後から課題開始時期までの成果であるため、簡便に記載する。

(a) 1 質点に縮約したオイルダンパー付き弾性建物モデルに対して、ダブルインパルス[6]に置換したパルス性地震動が作用したときの変位応答の最大値の閉形解を求めて、ある特定の条件下で地震時応答逆転現象が発生しうること(図1)を理論的に明らかにした[7]。

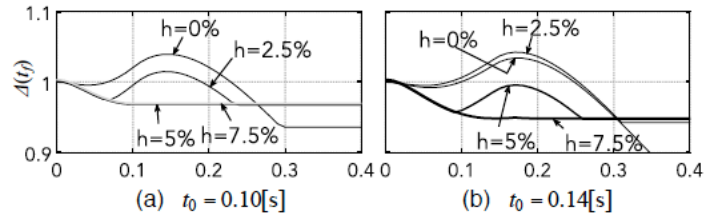


図1 ダブルインパルス(インパルス間隔 $t_0$ )が作用したときの、ダンパー破断時刻 $t_f$ に関する応答増幅率 $\Delta(t_f)$ の閉形解( $h$ は構造減衰を示す)[7]

(b) 電磁石により任意の時間にオイルダンパーの脱落が可能な1層弾性建物模型に対して、記録地震波を作用させる振動台実験を実施し、数値解析で予測された地震時応答の増幅率が、良好な精度で再現できることを示した(図2)[8]。

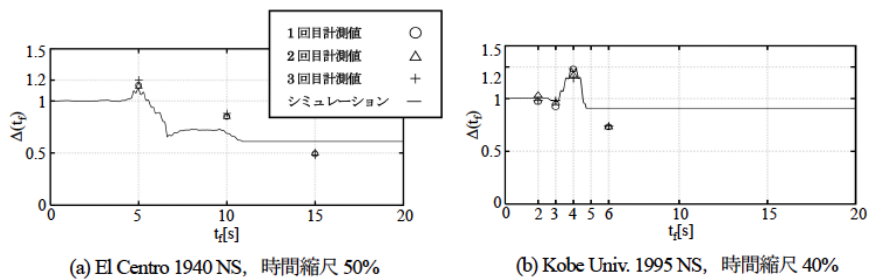


図2 記録地震波が作用したときの、ダンパー破断時刻 $t_f$ に関する応答増幅率 $\Delta(t_f)$ [8]

(2) 多段免震構造建物では、免震層の層間変位は、一般的な基礎免震構造建物に比べて低減が可能であり、建物の「安全」性能は確実に向上できる一方で、建物の「安心」性能に関わる上部構造の加速度応答が増幅するケースがあり、それをいかに抑えるかが一つの課題となっていた。

図3に解析モデルの一例を示す。これらのモデルに、様々な特性をもつ地震動を作用させて、基礎免震層と中間免震層に設置するダンパーの減衰係数の比を変えたときに、基礎免震層の最大層間変位および上部構造の最大加速度がどのように変化するかを時刻歴応答解析により調べて、以下のことを明らかにした。

(a) 基礎免震層よりも中間免震層の方に減衰係数をより多く付加すると、基礎免震層の最大層間変位と上部構造の最大加速度の両者をバランスよく低減することができる。ただし、両免震層に過剰な減衰係数を付加するとかえって上部構造部分の最大絶対加速度が増幅する。

(b) 36階建て相当モデルでは、中間免震層の位置が異なる場合でも、基礎免震層と中間免震層の減衰係数比が1:4、24階建て相当モデルでは1:2の状態が最もバランスよく両最大応答を低減できるという結果になった(図4)。このことから、建物の規模(1次固有周期)が同じであれば、多段免震構造の性能が総合的に高くなる減衰係数比は中間免震層が設置される位置には大きく影響されないのに対して、建物の規模が異なればそのような減衰係数比は有意に異なる。

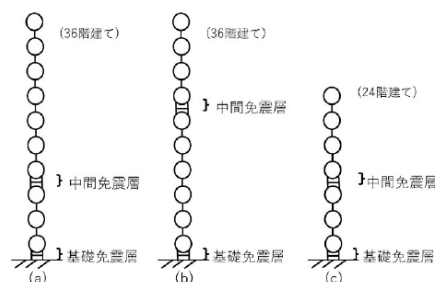


図3 多段免震構造モデル

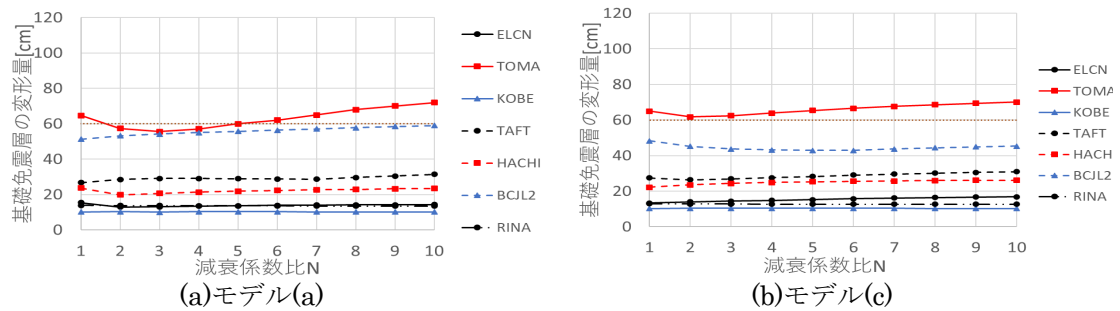


図4 免震層に設置するダンパーの減衰係数比を変化させたときの免震層最大層間変位の変化

(3)本課題で導入した小型振動台による実験を通じて、ストロークオーバーによる加速度応答の増幅について検討した。図5左に小型振動台と、振動台テーブル上に設置した建物模型を示す。建物模型には模型用の小型オイルダンパーを、剛性を調整可能な取付部材を介して組み込んでいる。オイルダンパーは、ダンパーピストン棒にスペーサーを組み込むことによりストロークの制限を可能としている(図5右)。

図6に、ストロークオーバーが生じない場合と生じた場合の応答加速度波形の比較を示す。ストロークオーバーによって応答加速度が顕著に増幅していることがわかる。これらの結果から、以下のことを明らかにした。

(a)オイルダンパーにストロークオーバーが生じると、加速度応答が増大する。ダンパーの許容ストロークが小さくなるほど、加速度応答の増幅率は大きくなる。

(b)ダンパー取付部材の剛性が主体構造の剛性に比べて相対的に大きい方が、ストロークオーバーが生じないときの(ダンパーを設置しない場合に比べての)加速度の低減効果大きい。しかしながら、ストロークオーバーが生じたときの(ストロークオーバーが生じない場合に比べての)加速度の増幅率は大きくなる。

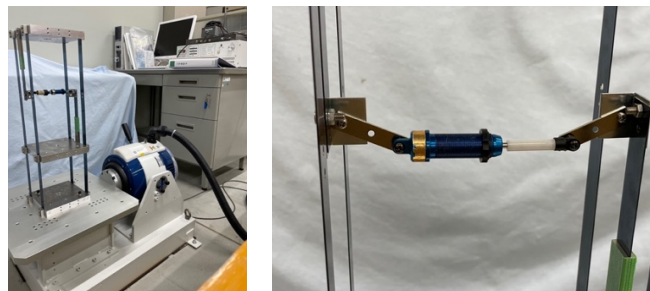


図5 小型振動台と、振動台テーブル上に設置した建物模型(左)、ストローク制限のためのスペーサーを組み込んだオイルダンパー(右)



図6 ストロークオーバーが生じない場合(左)と生じた場合(中:許容ストロークは両振幅で12mm,右:許容ストロークは両振幅で5mm)の応答加速度波形

(4)在来軸組工法の2階建て木造住宅を対象に、市販の耐震診断ソフトウェアによる耐震診断・地震被害の想定をおこなった。図9には地震被害の想定3次元CGを示す。対象建物は1階、2階ともに建物南側に広い開口部と大きめ居室があり、建物北側には小さく仕切られた空間と耐力壁が比較的多くある。耐震診断結果から1階X方向の耐震診断の評点が一番低く、その評点は0.7以下であることから「倒壊する可能性が高い」との評価である。そのような特徴の建物であり、地震被害想定としては2階を支えている1階の南側がX方向に崩壊するような予測となった。対象建物の耐力壁分布を概ね再現した図8のような骨組模型を用いて振動台実験を実施した。地震入力方向は骨組模型の東西方向(対象建物のX方向)とした。振動台実験の結果の一例を図9(a)~(c)に示す。入力地震動により変形の大きさや倒壊の有無は異なるが、概ね図7の地震被害想定と同様の変形であった。



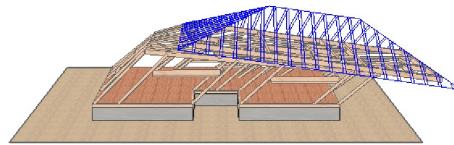
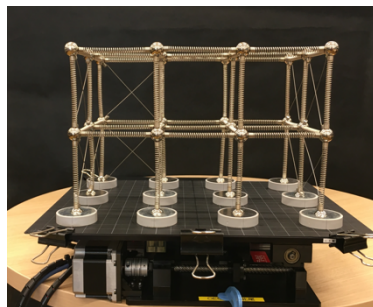
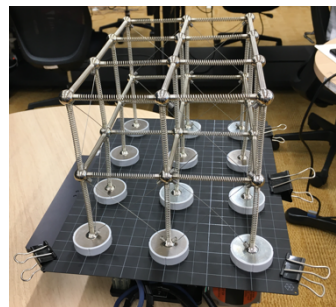


図7 建物の地震被害想定での3次元CG

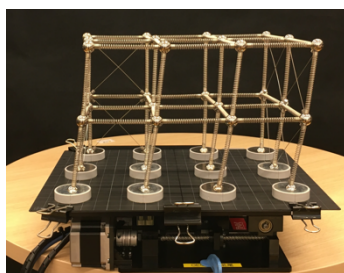


(a)建物南側より

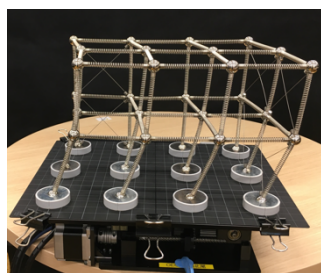


(b)建物西側より

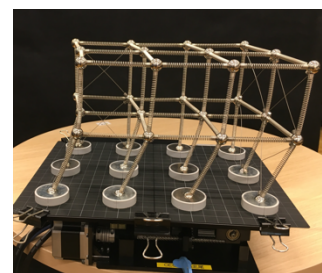
図8 建物骨組模型



(a)兵庫県南部地震 EW



(b)十勝沖地震 EW



(c)タフト EW

図9 崩壊形状（崩壊が生じたもののみ示す）

最後に今後の展望について述べる。本研究課題開始から約1年後に、新型コロナウイルス感染拡大による大学閉鎖ならびに遠隔授業への移行があり、当初予定していた研究計画を十分に研究期間内に実施することができなかった。そこで今後も当初の研究目的であった、外乱作用中にダンパーや取付部材に破断などの損傷が生じた場合に発生する可能性がある応答逆転現象の発生理由と発生条件の理論的解明については継続的に取り組む。また、図10に示した、建物のねじれ応答を再現できる骨組模型にダンパーを組み込み、ダンパーの損傷によって引き起こされる多層建物のねじれ応答の増幅現象を検証する。さらに、ダンパーや取付部材に想定外の損傷が生じた場合にも変位や加速度の増幅が生じにくい、よりロバストなダンパー・取付部材システムの開発にも取り組む。

#### <引用文献>

- [1] 薛松濤：311 地震時にオイルダンパーが損傷した鉄骨構造の同定，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.1023-1024，2012 年
- [2] 熊本地震橋梁被害調査報告書（南阿蘇橋の被害事例），日本橋梁建設協会，2016 年 10 月
- [3] 辻聖晃：ダンパーの損傷に関する文献調査と課題，シンポジウム「制振構造の性能評価と大振幅地震動に対する挙動」，pp.65-73，2017 年 3 月 8 日
- [4] 大平航右，辻聖晃：オイルダンパー付き建物におけるダンパー本体と取付部材の損傷が地震時応答に与える影響，日本建築学会構造系論文集，No.743，pp.47-57，2018 年
- [5] 大平航右，辻聖晃：オイルダンパー付き多層建築物におけるダンパー本体や取り付け部材の損傷が地震時応答に与える影響，構造工学論文集，Vol.64B，pp.225-236，2018 年
- [6] K. Kojima and I. Takewaki：Critical earthquake response of elastic-plastic structures under near-fault ground motions, *Frontiers in Built Environment*, Vol. 1, Article 12., 2015
- [7] 小川勇大，辻聖晃：ダンパー取付部材の破断によって生じる地震時最大応答逆転現象の発生条件の分析，構造工学論文集，Vol.65B，pp.265-271，2019 年 4 月
- [8] 辻聖晃，小川勇大，藤田皓平：ダンパー取付部材の破断によって生じる地震時最大応答逆転現象の小型模型振動台実験による検証，鋼構造論文集，第 104 号，pp.17-24，2019 年 12 月

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 辻 聖晃, 藤田 皓平, 小川 勇大
2. 発表標題 ダンパー取付部材の破断によって生じる地震時最大応答逆転現象の小型模型振動台実験による検証
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森本 健太郎, 辻 聖晃
2. 発表標題 免震層の減衰係数比の調整による2段免震構造の安全安心性能の向上
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022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
研究分担者	北尾 聡子  (Kitao Satoko)  (40273552)	大阪電気通信大学・工学部・准教授    (34412)	

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
---------	---------