

高性能オイルダンパーの開発と適用事例による地震応答解析結果の比較

DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE OIL DAMPERS AND
COMPARISON OF SEISMIC RESPONSE ANALYSIS RESULTS BASED ON APPLICATION CASES吉江 一馬^{*1}, 稲井 慎介^{*2}
Kazuma YOSHIE, Shinsuke INAI

This paper presents an overview of two newly developed high-performance oil dampers. The first is a semi-active oil damper, which is designed to improve living conditions during small to medium earthquakes by efficiently absorbing energy through instant switching of the damping coefficient via electrical signals. The second is an oil damper equipped with a self-returning trigger mechanism. This device is designed to control excessive deformation of the base isolation layer during large earthquakes by having a non-damping region, thereby only exhibiting damping performance during such events.

Seismic response analysis was conducted using application cases of these two high-performance oil dampers. The results confirmed that their application reduced the maximum response acceleration by 8% for Level 1 seismic motion, the maximum response layer shear coefficient by 6% for Level 2 seismic motion, and the maximum response displacement of the base isolation layer by 4% for Level 3 seismic motion.

Keywords: seismic isolation structure, semi-active oil damper, oil damper equipped self-returning trigger mechanism, seismic response characteristic

免震構造, セミアクティブオイルダンパー, 自己復元型トリガー機構付きオイルダンパー, 地震応答性状

1. はじめに

免震構造は、地震時における構造体の損傷を抑え、地震後の建物機能の維持を可能とするため多くの建物に採用されているが、近年では、中小地震時の居住性能向上や想定外の大地震に対する安全性確保など、さらなる付加価値が必要となってきている。

地震時にオイルダンパーの減衰性能を応答量に応じて変化させるセミアクティブ制御は、建物に生じる加速度と変形を効果的に減少させるのに有用であり、高い安全性の実現、居住性能の向上につながる。そこで筆者らは、免震層の変形のみを制御パラメータとした簡便な制御則に着目し、電気信号により2値の減衰を切り替えることができるオイルダンパー（以下、セミアクティブオイルダンパー）を開発した（写真1）。

また、近年、従来の設計で想定される振幅レベルや継

続時間を大きく上回る大振幅地震動も懸念されており、免震層変位が過大となり、擁壁衝突を起こす可能性が考えられる。この対策として、ダンパーの増設が考えられるが、過度な増設は絶対加速度の増加を招くため、免震性能の低下につながる可能性がある。そこで、筆者らは絶対加速度と免震層変位のトレードオフ関係を同時に解決するために意図的にダンパーの効かない領域を持つオイルダンパー（以下、自己復元型トリガー機構付きオイルダンパー）を開発した（写真2）。

本報では、免震構造にさらなる付加価値を持たせるため開発した2種類の高性能オイルダンパーの概要と実建物に適用した事例を基に応答低減結果について報告する。



写真1 セミアクティブオイルダンパー



写真2 自己復元型トリガー機構付きオイルダンパー

*1 戸田建設(株)構造設計部 修士(工学)

*2 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

Structural Design Dept., TODA CORPORATION, M.Eng.

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

2. セミアクティブオイルダンパーの概要

2.1 概要¹⁾

一般のユニフロー型オイルダンパーの減衰力は、ダンパーの伸び縮みにより内部の作動油が調圧弁を通過する際に発生するが、開発したセミアクティブオイルダンパーは、電気信号により電磁弁を開閉して作動油の流量を調節し、瞬時に低減衰、高減衰の2種類の減衰性能を切替えることができる機構である(図1)。減衰係数は、低減衰(以下CL)と高減衰(以下CH)の2種類であり、それぞれ一般的なユニフロー型オイルダンパーの0.5倍、1.5倍である(図2)。CLは、力を逃がすことで免震層変形は大きくなるものの、建物の応答加速度を小さくすることができる。一方CHは、応答加速度は増加するものの、地震エネルギーを効果的に吸収することができる。

図3に、減衰係数の切替の利点を活かしたMINMAX制御の概念を、図4に、層間変位と制御信号の時刻歴波形を示す。オイルダンパーの制御則として、免震層の応答変形と建物の応答加速度を効果的に低減することを目的に、EF制御などで履歴形状を制御するMRダンパーによるセミアクティブ免震が提案されている¹⁾。この制御則をセミアクティブオイルダンパーに応用し、図3に示すように免震層のせん断力が減少する第2、4象限では減衰係数をCHに設定し効果的なエネルギー吸収を図り、せん断力が増加する第1、3象限では減衰係数を

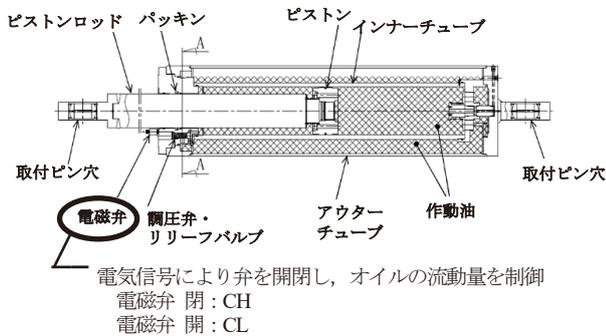


図1 装置図

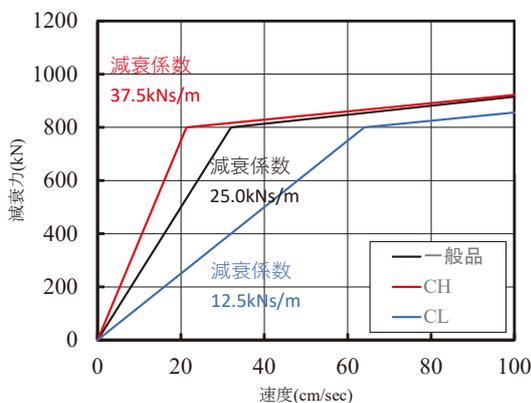


図2 減衰力-速度関係

CLに設定することで応答加速度の抑制を図っている。

実大試験機を用いて、セミアクティブオイルダンパーにレベル1およびレベル2地震動(告示波Hachinohe位相)を入力した際の、減衰力-変形関係を図5に示す。レベル1、レベル2ともに第2、4象限で減衰力が大きく、第1、3象限で減衰力が小さくなることを確認でき、減衰性能がCL、CHに切り替わるMINMAX制御が正常に行われている事が確認できる。

2.2 制御システム

セミアクティブオイルダンパーの制御を、簡便かつ正確に行うことは非常に重要である。減衰係数の切替は免震層に配置した変位計の計測値を参照し、各オイルダンパーに電気信号を送ることで行う。減衰係数切替のアルゴリズムを図6に示す。常時は、暴風時の免震層のすべり出し防止や風揺れに対する居住性能確保のため、ま

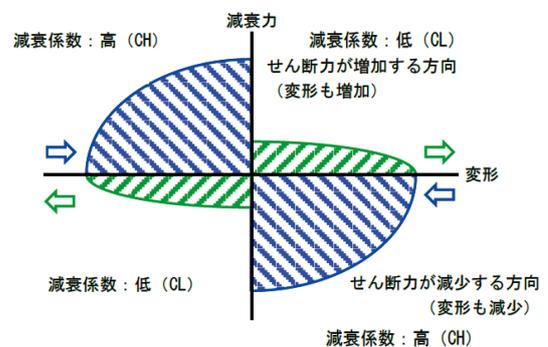


図3 MINMAX制御の概念

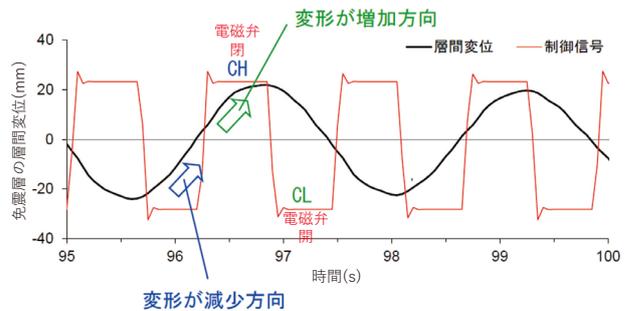
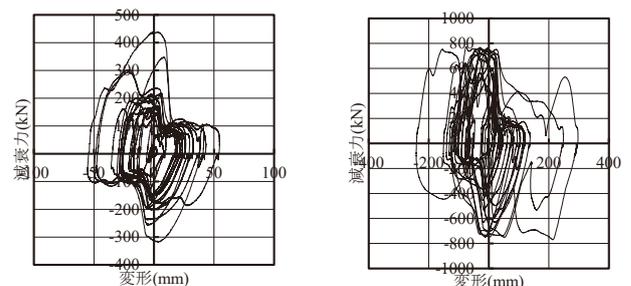


図4 層間変位と制御信号の時刻歴波形



(a) レベル1地震動

(b) レベル2地震動

図5 減衰力-変形関係

た、地震時の停電などにより作動しない場合の安全性確保のため、減衰係数はCHとしている。地震時は、免震層変位が1cmを超えた場合に制御を開始するシステムとしている。制御は上述したようにせん断力が減少（変位×速度<0）する際はCH、せん断力が増加（変位×速度>0）する際はCLとしている。

制御機器の構成を図7に示す。停電時などの電源供給トラブルが生じた際は、UPS（無停電電源装置）により非常用発電機が稼働するまでの時間も電源を供給できるよう、万全の体制を構築している。

3. 自己復元型トリガー機構付きオイルダンパーの概要

3.1 概要³⁾

自己復元型トリガー機構付きオイルダンパーは、一般的なオイルダンパー部に不感帯機構としてトリガー部を連結した機構である。免震層変位が不感帯幅である150mm以下（中小地震レベル）の場合は減衰力を発揮させず、過大な減衰係数による絶対加速度の増加を防ぎ、免震層変位が不感帯幅以上（大地震レベル以上）では通常通り減衰力を発生させ、大地震時の免震性能の確保およびそれを越える過大变位を抑制する仕組みである（図8）。

また、装置内には、地震終了時にロッドを原点位置まで自動復帰させる自己復元ばねを搭載しており、余震の際の不感帯部の残留変形の影響を少なくすることができ

き、維持管理の面からも有用性が高い機構である。

図9に、自己復元型トリガー機構付きオイルダンパーの作動メカニズムを示す。本機構が伸張工程にある場合、ロッドがスライドフレームを押し、スライドフレームは自己復元ばねを縮めながら伸び方向へ進む。スライドフレームが反対側へ到達すると、接続されたオイルダンパーが作動し減衰力を発揮する。圧縮工程においても同様の考え方である。スライドフレームの片側には、スライドフレーム同士の接触による衝撃を緩和するための緩衝ゴムを設けている。緩衝ゴムは、対候性に優れたクロロブレンゴムを加硫成形したものであり、スライドフレームは一般的なJIS規格鋼材を研磨したものである。

図10に、実大試験機を用いて、自己復元型トリガー機構付きオイルダンパーにレベル2地震動（告示波 Hachinohe 位相）を入力した際の減衰力—変形関係を示す。図10より、不感帯幅では、減衰力を発揮せず、トリガー部が衝突後に減衰力を発揮していることが確認できる。

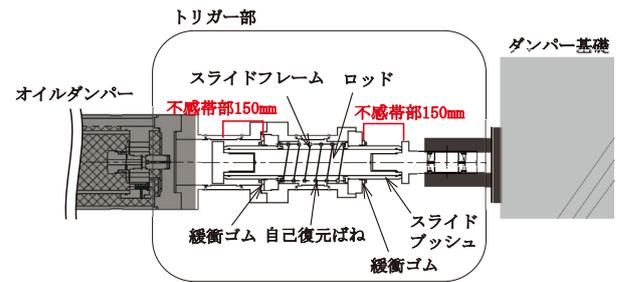


図8 装置図

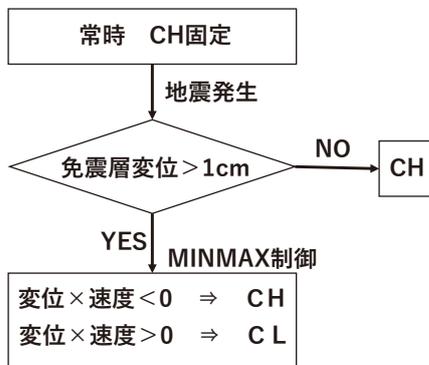


図6 制御アルゴリズム

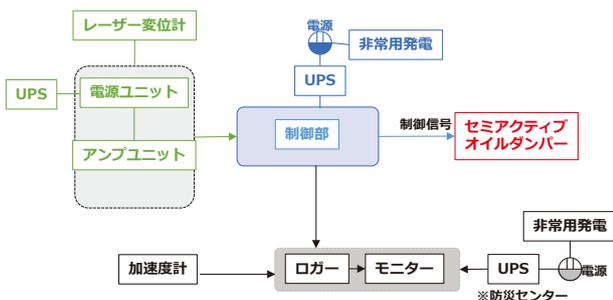


図7 制御機器の構成

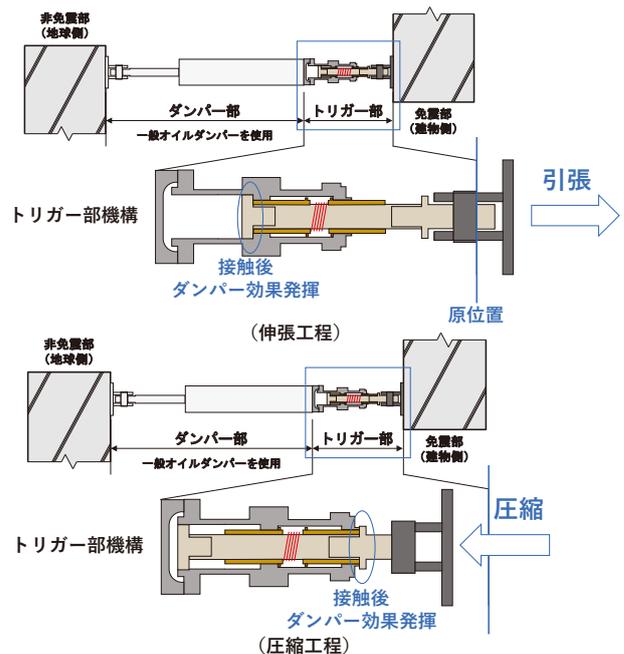


図9 作動メカニズム

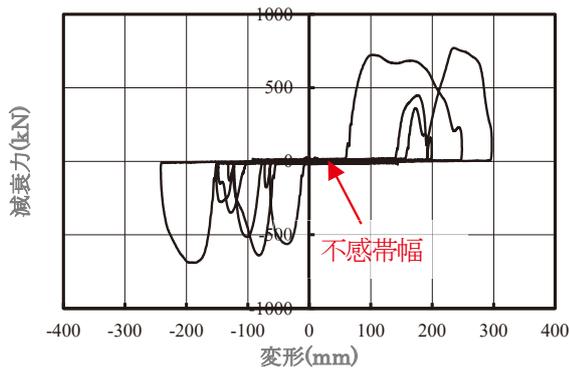


図 10 減衰力-変形関係

4. 応答解析結果

次に、新たに開発した2つの高性能オイルダンパーを実建物に適用し、その応答低減効果を確認した結果を示す。実建物には、川又ら⁴⁾の示す TODA BUILDING を用いる。

4.2 免震装置構成

本建物の免震層は、天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承、オイルダンパーで構成され、弾性すべり支承により、長周期化とエネルギー吸収を図るとともに、オイルダンパーを用いて、免震層の変位抑制と効果的なエネルギー吸収を図る設計としている。オイルダンパーには、中小地震時の居住性能改善及び、巨大地震時に建物の擁壁衝突防止を目的として、上述した2種類のオイルダンパーを設置した(図11)。中小地震に対しては「セミアクティブオイルダンパー」が、巨大地震に対しては「自己復元型トリガー機構付きオイルダンパー」が各々効果的に機能する計画としている。なお、比較対象として高性能オイルダンパーをなくしたモデルを用いる。その際、オイルダンパーの基数は変更せずに高性能オイルダンパーを一般的なオイルダンパーに置き換えたものとする。

4.3 地震応答解析結果

4.3.1 解析モデル概要

図12に解析モデルと免震層固定時の固有周期を示す。解析モデルは、柱梁等の構造部材を線材要素に置換した地下3層、免震層1層、地上28層の立体フレームモデルとする。地震動の入力位置は、地下3階床位置とし、減衰は内部粘性型とし、減衰定数2%として瞬間剛性比例型として与える。

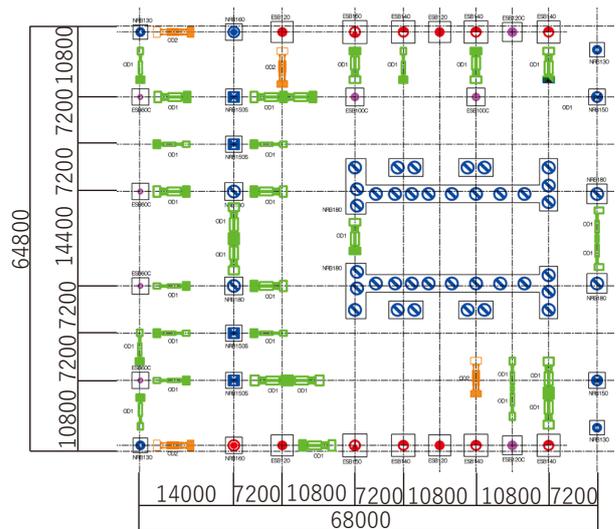
4.3.2 応答結果

(1) レベル1, レベル2地震動

各入力地震動の疑似速度応答スペクトルを図13に示す。レベル1の地震動は、Hachinohe NS波とし、最大速度を25cm/sに基準化する。レベル2地震動には、告示波(Hachinohe NS位相)を用いた。

図14に、レベル1地震動の最大応答加速度、レベル2地震動の最大応答せん断力係数、表1に最大応答値を示す。

図14より、新たに開発した2つのオイルダンパーの採



記号	径	基数	免震材料
	1300	4	天然ゴム系積層ゴム
	1500	2	
	1500□	4	
	1600	2	
	1800	40	高摩擦すべり支承
	1200	4	
	1400	6	
	1500	2	低摩擦すべり支承
	600	4	
	1000	2	
	1200	2	セミアクティブオイルダンパー
	-	48	
	-	8	自己復元型トリガー機構付きオイルダンパー

図 11 免震装置配置図

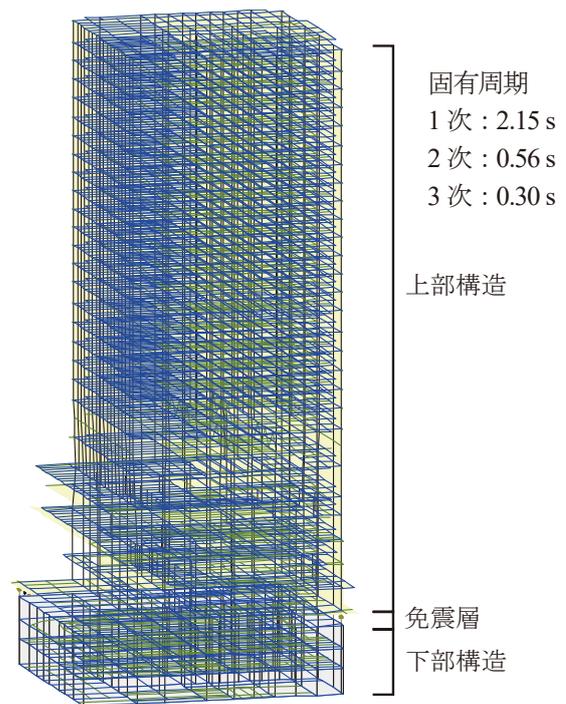


図 12 建物モデル図と固有周期 (免震層固定時)

用により、中地震（レベル1地震動）時では、一般的な免震システムに対し最大応答加速度が8%程度低減し、居住性能が向上されることを確認した。大地震（レベル2地震動）時では、最大応答層せん断力係数は6%程度低減され、耐震性能の向上に寄与できることを確認した。

(2) レベル3での比較

地震動にレベル2地震動（告示波）の1.5倍とし、ここでは、JMA Kobe NS位相で模擬地震動を作成した。入力地震動の擬似速度応答スペクトルを図15に示す。図16に

レベル3地震動の最大応答変位、表2に免震層の最大応答変位を示す。

図16より、新たに開発した2つのオイルダンパーの採用により、レベル3地震動での免震層の最大応答変位は一般的な免震システムに対し約4%減少し、免震クリアランス650mm以下に低減できている。高性能オイルダンパーの使用により、巨大地震においても免震層変位を抑制し免震擁壁との衝突を防ぐことが確認できた。

5. まとめ

本報では、免震構造にさらなる付加価値を持たせるため新たに開発した2種類の高性能オイルダンパー（セミ

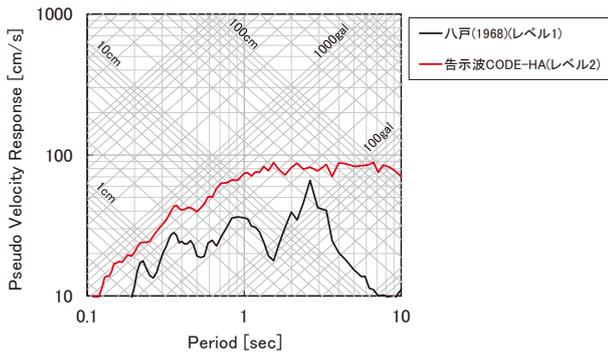


図13 入力地震動の擬似速度応答スペクトル (レベル1, レベル2地震動)

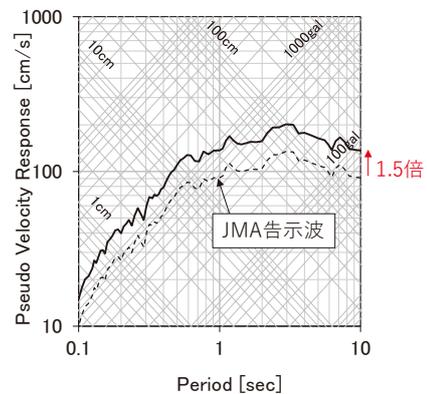
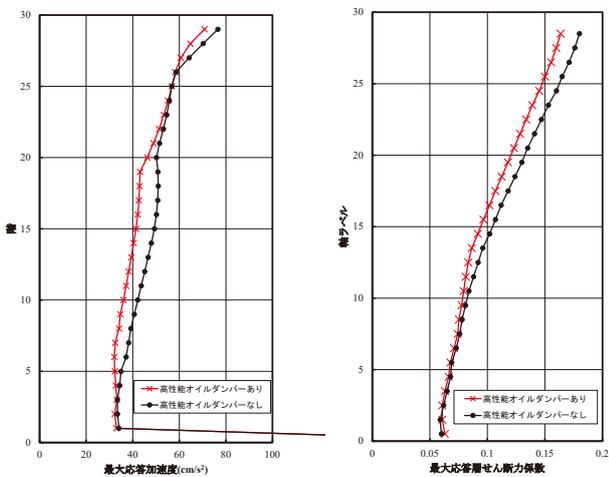


図15 入力地震動の擬似速度応答スペクトル(レベル3地震動)



(a) レベル1地震時 最大応答加速度
(b) レベル2地震時最大応答 層せん断力係数

図14 地震応答解析結果

表1 最大応答値 (レベル1, レベル2)

	高性能オイルダンパーなし	高性能オイルダンパーあり	比率
レベル1地震時 最大応答加速度 (cm/s ²)	76.5	70.8	0.92
レベル2地震時 最大応答 層せん断力係数	0.18	0.16	0.94

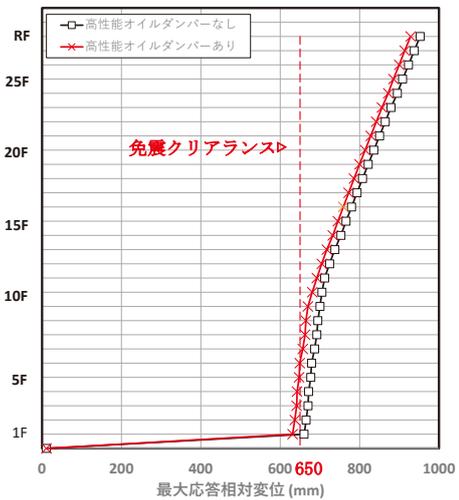


図16 レベル3地震動最大応答変位

表2 免震層の最大応答変位 (レベル3)

	高性能オイルダンパーなし	高性能オイルダンパーあり	比率
レベル3地震時 免震層最大応答 変位 (mm)	665	637	0.96

アクティブオイルダンパー、自己復元型トリガー機構付きオイルダンパー)の概要と、実建物に適用した事例を基にレベル1からレベル3地震動での応答低減効果について報告した。

その結果、2つの高性能オイルダンパーを実建物に適用することで、レベル1地震動の最大応答加速度を約8%、レベル2地震動の最大応答せん断力係数を約6%、レベル3地震動の免震層最大応答変位を約4%低減させることができることが確認できた。

参考文献

- 1) 鈴木太輝雄 他 「可変減衰セミアクティブ免震構造の開発その1 可変減衰オイルダンパーの基本性能と制御則」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.395-396, 2013.8
- 2) 塩崎洋一 他 「MRダンパーを用いた免震構造物の簡易なセミアクティブ制御に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, No570, pp.37-43, 2003.5
- 3) 谷地畝和夫 他 「不感帯機構付きオイルダンパーを用いた免震建物の地震応答性状」, 日本建築学会構造系論文集, No781, pp.381-391, 2021.3
- 4) 川又哲也 他 「TODA BUILDINGの構造計画と開発技術の適用」, 戸田建設技術研究報告, 第50号, 2024