性能可変オイルダンパーを有する4質点系免震構造物の振動台実験

SHAKING TABLE TEST OF 4-DOF BASE-ISOLATED STRUCTURE WITH VARIABLE OIL DAMPER

三木広志 ——— *1 池永昌容 ——— *2
五十子幸樹 ——— *3 井上範夫 ——— *4

Hiroshi MIKI ——— *1 Masahiro IKENAGA — *2
Kohju IKAGO ——— *3 Norio INOUE ——— *4

キーワード：
免震構造, 性能可変オイルダンパー, パッシブ制御, 変位制御,
振動台実験

Keywords:
Base isolation, Variable oil damper, Passive control, Displacement
control, Shaking table test

A new device is proposed for controlling seismic displacement of a base-isolated building structure by means of a variable oil damper (VOD). This damper provides large damping to reduce the response displacement of the base-isolation layer in severe or extreme seismic events, whereas it provides small damping to reduce the response acceleration of the superstructure in moderate seismic events. Through shaking table tests, it is shown that the VOD can effectively reduce the maximum displacement of the base-isolation layer without increasing the damper force. Comparisons on analytical and experimental results verified the validity of the proposed analysis method.

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、免震構造を適用した建築物は急激に増加した。免震構造物においては、免震層クリアランスが設定されるが、敷地面積などの制約からこれを十分に確保できない場合がある。このため、今までの設計で想定されていなかった規模の巨大地震や長周期地震動により、免震層クリアランスや免震装置の性能限界を越える過大な免震層変位が生じ、免震層が擁壁やストッパーに衝突すること可能性が懸念されている^{1)~7)}。

このような危険を防止する方策として、免震層に更なる減衰機構を付加して免震層変位を抑制するといったことも考えられる。しかしこの場合、上部構造の床応答加速度が増大し免震構造の有効性が損なわれる場合があり、中小地震時における居住性を犠牲にする設計になってしまう恐れもある。

このような問題に対して、井上らには応答変位に応じて減衰装置の減衰性能を変化させる「変位制御設計」⁸⁾を提唱し、その設計法を実現させるための減衰装置の一つとして、性能可変オイルダンパー (Variable Oil Damper、以下 VOD) を提案した。VOD については、一連の基礎的研究が行われている^{9)~11)}。このダンパーは、電源やコンピュータによる制御を必要としないパッシブ型でありながら、変位に応じて減衰性能を変化させることのできるスマートパッシブ型ダンパーであり、地震動のレベル毎に設定した複数の設計クライテリアを対象にきめ細かい設計が可能となる。

既往の研究では、田部井らにより縮小型 VOD が製作され、その単体加振実験および1質点系免震試験体に適用した場合の加振実験が行われた。この実験では、VOD メカニズムの実現性及び振動系に導入した場合の挙動が示されている⁹⁾。また根本らにより解析的

検討から VOD の有効性が明らかにされており、中小地震時の床応答加速度増大を抑制しつつ、今までの設計で想定されていなかった規模の巨大地震時にも床応答加速度を大きく増大はさせずに過大な免震層変位を抑制できることが示されている¹¹⁾。

しかしながら、既往研究で用いられた縮小型 VOD はストロークやダンパー力が小さく、油圧回路の機構も改良の余地が残されているものであった。また、VOD を多質点系免震試験体に適用した場合の加振実験の検討は未だなく、VOD の減衰性能が非線形的に変化することによる、特に上部構造の床応答加速度への影響については明らかにされていないのが現状である。

そこで本研究では、まず VOD の機構に一般的なオイルダンパーでも用いられているユニフロー式を採用した、改良型 VOD を製作した (写真1)。既往研究では、試験体の制約から最大変位が 0.05m 程度の縮小実験であったが、本報では、最大免震層変位 0.15m 程度の範囲での実験を行い、より実大に近い条件での挙動を検討する。

更に本報では、VOD を4質点系免震試験体に適用した場合の加振実験を行い、VOD の変位抑制効果及び性能変化時の床応答加速度について明らかにする。

写真1 改良型の性能可変オイルダンパー外観

¹⁾ 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 大学院生
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11-1222)

²⁾ 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 助教・博士 (工学)

³⁾ 東北大学災害科学国際研究所 教授・博士 (工学)

⁴⁾ 東北大学 名誉教授・工博

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku Univ.

²⁾ Assistant Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.

³⁾ Prof., International Research Institute of Disaster Science, Tohoku Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Prof. Emeritus, Tohoku Univ., Dr. Eng.

2. 性能可変オイルダンパー概要

2. 1 機構

図1に改良型 VOD の機構模式図を示す。ダンパー本体外部のロッド端部の両側に、小型シリンダが設置されている。大変位時には、これが作動することで自動的に減衰性能が上昇する。なお、ロッド端部と小型シリンダとの間隔は調整可能であり、これを設定クリアランス L_s と称する。このダンパーは、ストロークが $\pm 0.35\text{m}$ と、より実大に近いスケールとなっており、最大減衰力は 50kN である。

図1 VODの機構模式図

2. 2 特性

図2に小型シリンダが作動した場合の、性能変化過程におけるダンパー力-変位・速度関係を示す。

図2 VOD 特性模式図

(1) 性能変化前

変位が L_s 以下のとき小型シリンダは作動せず、一般的なオイルダンパーと同様に速度に比例したダンパー力を発揮する。この時の減衰性能は、オリフィスと減衰バルブの2つで決定される。

(2) 性能変化時

変位が L_s を超えると、ロッド端部が小型シリンダを押す。この押された距離を小型シリンダの作動距離 X_c と称する。 X_c は最大変位が更新されない限り保存される。 X_c に応じて小型シリンダからオイルが押し出され、その油圧で減衰バルブに抵抗力が付加される。それにより、減衰バルブを通過するオイルの流路が狭くなり、減衰係数が増加する。

(3) 性能変化後

ダンパー力がある値を超えると性能変化前と同じ減衰係数になる。このときのダンパー力を可変リリーフ力 F_r と称する。 F_r と X_c とは(1)式に示す比例関係にある。なお、 α は面積比 (ダンパー各部の寸法により定まる定数)、 K_{sp} は減衰バルブのバネ剛性、 β は低減倍率

(実験により求められる、機構内の圧力損失を表す定数) である。

$$F_r = \alpha \times K_{sp} \times \beta \times X_c \quad (1)$$

以上のことから、ダンパー力は速度に対して2折線型となる。また、ロッド端部が L_s の範囲内にある状態で十分な時間が経過すると、ばね座を押していたオイルは自動的に小型シリンダに戻り、性能変化前の状態に戻る。

3. 性能可変オイルダンパー単体加振実験

3. 1 実験概要

今回試作したユニフロー式 VOD の力学的特性を把握するため、単体加振実験を行った。実験はダンパーの両端を治具に設置し、振幅 120mm の定常的な正弦波で振動台を動かし、ダンパー軸方向に強制加振する。実験パラメータは、入力正弦波の周期と、小型シリンダ作動距離 X_c の2つを検討した。なお、性能変化するケースでは、予め小型シリンダを所定の距離作動させた状態にして加振を行う。

図3 単体試験体の加振状況 (単位:mm)

3. 2 実験結果

実験結果の一例として、図4に入力正弦波の周期を2秒とした場合の結果と減衰係数の算定例を示す。 X_c が 0mm 、 50mm 、 100mm の各場合のダンパー力-速度関係およびダンパー力-変位関係を X_c ごとに示す。表1に実験結果から求めたダンパー特性値を示す。減衰係数 C_1 、 C_2 は、加振周期と X_c を変数として行った各ケースのダンパー力-速度関係の近似直線の傾きから求め、それらの平均値とした。なお、性能変化する場合のダンパー力-速度関係は、オリフィスの特性上、2次曲線型となるが、近似して線形として扱っている。低減倍率 β は、 $X_c=50\text{mm}$ の結果の可変リリーフ力 F_r を用いて、(1)式の関係から算定し、 0.8 とした。実験結果から、性能変化して減衰係数が大きな値になり、履歴ループの面積は増大することが確認できる。 $X_c=50\text{mm}$ のケースでは、ダンパー力が F_r を超え、ダンパー力-速度関係が2折線型になっている。 X_c が大きくなると F_r が大きくなり、履歴ループの面積も増大する傾向が確認できる。

図4 単体加振実験結果と減衰係数の算定例

表1 ダンパー特性値

性能変化前 C_1 [kNs/m]	3.75
性能変化後 C_2 [kNs/m]	6.20
低減倍率 β	0.8

4. 免震試験体の振動台実験

4. 1 試験体概要

免震試験体を図5に、解析モデルを図6に示す。H型鋼製の免震架台はアイソレータである直動ローラー上に設置されており、免震層の復元力は2組のコイルばねによって与えられている。免震層の減衰装置として、VODを設置している。上部3層フレームの柱は鋼製板バネである。試験体の質量配置については、一次固有周期を一般的な免震構造で採用される4秒に可能な限り近づけつつ、上部構造が後述の载荷条件に対して弾性に留まるように設定し、静的加力実験と自由振動実験で剛性と質量を確認した。実験結果から得られたそれぞれの値を表2に示し、この値を用いて求めた固有周期と $\max u_i = 1$ (u_i は*i*階*s*次モード形)で規準化したモード形を図7、表3に示す。

図5 免震試験体立面図

表2 試験体質量、剛性

質量[t]	層剛性[kN/m]
m_3	k_3
m_2	k_2
m_1	k_1
m_0	k_0

表3 固有周期

固有周期[s]
1st
2nd
3rd
4th

図6 免震試験体モデル図

図7 モード形

VODの減衰係数については先述の表1に示した通りであり、試験体全質量に対する減衰定数は、性能変化前が24%、性能変化後が41%となっている。免震層の直動ローラーの摩擦力は、上部構造を剛にして1質点とした自由振動実験の結果より、0.094kN、対数減衰率では2%であった。

4. 2 振動実験概要

前節で示した試験体に対して、振動台による水平方向加振実験を行った。入力波は八戸港湾EW(1968年十勝沖地震)130%とした。また、VODは、以下のように性能変化の有無による2ケースを想定した。

(a)性能変化なし：VODの設定クリアランス L_s を十分に大きくし、小型シリンダが作動せず、VODが性能変化しないようにする。すなわち、転がり支承+オイルダンパー(減衰定数24%)の、通常の免震構造である。

(b)性能変化あり：VODの設定クリアランス L_s を0.08mに設定し、これを超える免震層変位発生時にVODが性能変化し、減衰性能が上昇する。これにより、性能変化時以降の応答変位を抑制する。

4. 3 実験結果

実験結果の時刻歴のうち、最大免震層変位周辺を図8に示す。性

能変化ありの場合、時刻23秒付近において応答変位が L_s に達し、以降のダンパー力が性能変化していない場合に比べて増大している。これにより、床応答加速度はやや上昇するものの、応答変位が抑制されている。また、性能変化時に瞬間的に減衰係数が切り替わるが、それによる床応答加速度の上昇など衝撃的な応答は生じていない。

実験結果の履歴ループを図9に示す。性能変化によってダンパー吸収エネルギーが増大し、ダンパー力-速度関係は2折線型になっている。

図8 応答時刻歴(性能変化なしと性能変化ありの比較)

図9 履歴ループ(性能変化なしと性能変化ありの比較)

図10に最大応答値を示す。性能変化することで免震層変位は19%抑制されている。床応答加速度は、最も増加したR階で35%増加しており、上部構造の層間変形角も増加している。R階や3階の床応答加速度が他の階と比べてやや大きく上昇しており、ダンパー力増大によって2次モード成分の伝達率が上昇したと考えられる。

図 10 最大応答値（性能変化なしと性能変化ありの比較）

4. 4 振動応答解析結果と実験結果との比較

図 11 実験結果と解析結果の比較（性能変化ありのケース）

図 12 実験結果と解析結果の比較（性能変化ありのケース）

性能変化ありのケースについて、地震波加振実験を模擬した振動応答解析を行い、実験結果との比較により、解析手法の妥当性を検討する。図 11 と図 12 に実験結果と解析結果の比較を示す。

実験結果と解析結果は概ね一致している。性能変化時の瞬間的な減衰係数の切り替わり時においても、本解析は正しく評価できているといえる。

5. まとめ

本論では、まずユニフロー式 VOD を製作し、その特性を単体加振実験から明らかにした。その結果、VOD は想定した性能変化挙動を呈することを明らかにした。

また、VOD を有する 4 質点系免震試験体の加振実験を行い、応答変位だけでなく高次モードの影響も含む床応答加速度についても検討した。その結果、VOD の性能変化による応答変位抑制効果を実験的に明らかにした。その際、過大ではないが高次モード成分が励起されるが、衝撃的な床応答加速度は生じないことが確認できた。

地震波加振実験を模擬した振動応答解析結果と実験結果とを比較し、応答変位、応答ダンパー力および床応答加速度を解析により精度よく評価できることを示した。

謝辞

ダンパーの開発・製作および実験に際しての技術指導など、(有)シズメテックに多大なご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 飯塚真巨、和泉信之、柿本和茂、関崇夫、山本正幸、吉川和秀：免震建築物の終局耐震性、コンクリート構造物の応答制御技術研究委員会、2002. 6.
- 2) 二村有則、飯塚真巨、竹中康夫、吉川和秀、高岡栄治：搭状免震建物の終局挙動に関する振動台実験（その 6）ストッパーが終局挙動に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.649-650、2000. 9
- 3) 梶井丈史、迫谷政則、久田嘉章：震源近傍における衝突を考慮した免震構造物の弾塑性応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.527-528、2000. 9
- 4) 柏尚稔、中安誠明、中島正愛：過大地震動下における免震建物の応答と損傷特性、構造工学論文集、Vol. 51B、pp.237-246、2005. 3
- 5) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、2007. 12
- 6) 中安誠明、中島正愛：過大地震動下における免震建物の応答と損傷、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2、pp.441-442、2003. 9
- 7) 飯場正紀、緑川光正、花井勉、皆川隆之：変位抑制部材を用いた免震層衝突時における免震住宅の地震時応答、その 12、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2、pp.425-428、2004. 8
- 8) 井上範夫：地震に対する「建築物の変位制御設計」に有効な制御システム、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2、pp.343-344、2010. 7
- 9) 田部井直哉、堀則男、井上範夫：性能可変オイルダンパーの開発および免震構造物への適用性、日本建築学会構造系論文集、第 636 号、pp.259-266、2009.2
- 10) S. Mehdi Dehghan B., Norio Hori, Norio Inoue: Study on Base Isolated Structure with Variable Oil Damper, Proceedings, 14th WCEE, Beijing, CD-ROM Paper-ID 05-06-0034. 2008.10
- 11) 根本真孝、五十子幸樹、池永昌容、井上範夫：戸建住宅における性能可変オイルダンパーを用いた免震システムの設計法、日本建築学会構造系論文集第 76 巻、第 660 号、pp. 291-299、2011.2

[2012 年 10 月 16 日原稿受理 2012 年 11 月 30 日採用決定]