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

A DESIGN METHOD OF A BASE ISOLATED SYSTEM FOR DETACHED HOUSES USING VARIABLE OIL DAMPERS

根本 真孝*, 五十子 幸樹**, 池 永昌容***, 井上 範夫****

*Masataka NEMOTO, Kohju IKAGO, Masahiro IKENAGA
and Norio INOUE*

In this paper, we propose a design method to control the displacement of base-isolation layer using an oil damper that can change its damping coefficient relative to the displacement. The present 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.

A numerical optimization method, sequential quadratic programming, is employed to obtain an optimum set of parameters for the present damper. Design examples show that the base-isolation system with the optimally designed variable oil damper can satisfy the design criteria that cannot be satisfied with a system incorporating a conventional oil damper.

Keywords : *Seismic isolation, Passive control, Variable oil damper, Displacement control,
Base-isolated house, Optimum design method*

免震構造, パッシブ制御, 性能可変オイルダンパー, 変位制御, 戸建免震住宅, 最適設計手法

1.はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、免震建物が普及し、高層建物に限らず戸建住宅にも多く適用されるようになってきた。しかし、敷地面積などの制約から戸建免震住宅では十分な免震層クリアランスが確保できない場合がある。また、現在、免震建物は主に大地震時において設計クライテリアを満足するように設計されている。しかし、近年、想定外の巨大地震や長周期地震動の発生の可能性が指摘されており、これらの地震動により、免震装置の性能限界や免震層クリアランスを越える過大な免震層変位が生じ、擁壁やストッパーへの衝突の危険性が懸念されている^{1)~3)}。

免震住宅には摩擦力による減衰を期待しない転がり支承系とそれを積極的に期待するすべり支承系が存在する。すべり支承は、重量の小さい構造物を長周期化することに向いていることと、支承材としての機能に加えて減衰材としての機能を兼ねることによって低コスト化が図れることから、戸建免震住宅に多く用いられている。しかし、すべり支承による摩擦力は変位に依らず一定であり、履歴ダンパーと同様に免震層変位が小さいときは等価粘性減衰定数が大きく、逆に免震層変位が大きいときは等価粘性減衰定数が低下してしまう⁴⁾。そのため、中小地震時は応答加速度が大きくなり、巨大地震時は過大な免震層変位が生じるなどの問題がある。

こうした問題を解決するための免震デバイスとして、性能可変オイルダンパー(Variable Oil Damper、以下VOD)の開発・研究が行われてきた^{5),6)}。このダンパーは電源やコンピュータ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ものである。これにより、地震動のレベル毎に設定した設計クライテリアを個別に対象としてきめ細かく設計することが可能となる。具体的には、中小地震時の応答加速度を低減しつつ、巨大地震時の過大な免震層変位を抑制するといったように性能が変化しない従来のダンパーではできなかった設計ができる。

しかし、従来の VOD は両ロッド式で材長が長く戸建免震住宅への適用が困難であった。本研究では、戸建免震住宅への適用を目的として、新たに開発した両ロッド式と同じストロークを有しつつ材長の短いユニフロー式 VOD の概要について示す。

また、既往の研究ではVODのパラメータをパラメトリックスタディにより決定してきたが、VODはパラメータが多いために数多くのケースに対する解析が必要で、設計に困難を伴った。そこで、設計者の負担を肩代わりするための手段としてVODの設計に数値計画法に基づいた最適設計手法^{例えば 8)~10)}を適用することを提案する。これにより、地震動のすべての入力レベルにおいて設計条件を同時に満足するVODパラメータを比較的容易に決定可能となる。

* 東北大学大学院 大学院生
** 東北大学大学院 准教授・博士(工学)
*** 東北大学大学院 助教・博士(工学)
**** 東北大学大学院 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tohoku University
Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University
Assistant Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University
Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University

本研究では、VOD 付転がり支承免震住宅および VOD 付すべり支承免震住宅の設計に最適設計手法を適用し VOD のパラメータを決定する。具体的には VOD 付転がり支承免震住宅の場合では、中小地震時の応答加速度と巨大地震時の免震層変位を抑制することを目的とする。VOD 付すべり支承免震住宅の場合では、中小地震時の応答加速度を犠牲にする代わりにコストを抑えつつ、巨大地震時の免震層変位を抑制することを目的とする。さらに、それらの結果と他の減衰材との比較を通じて VOD の有効性について検討を行う。

2. ユニフロー式 VOD 概要

2-1. ユニフロー式 VOD の開発

図 1 に両ロッド式とユニフロー式の材長の比較を示す。従来の VOD は、両ロッド式であり、ロッドがダンパー本体の両側を移動する必要があった。そのため材長が長く、戸建免震住宅の基礎部への設置が困難であった。そこで新たに、戸建免震住宅への適用を目的とし、ユニフロー式 VOD の開発を行った。ユニフロー式 VOD は圧縮時と引張時とで作動原理を変化させることで、ロッドがダンパーの片側のみとなり、両ロッド式と同じストロークを有しながら、短い材長を可能とするものである。これにより、材長を 1.8[m](約 1 間)以下とすることができ、戸建免震住宅への適用が容易になる。

図 1 材長比較

2-2. ユニフロー式 VOD 機構

図 2 にユニフロー式 VOD の機構模式図を示す。このダンパーの特徴はユニフロー式のオイルダンパーの外部にオイルが充填された小型シリンダが設置されていることである。免震層に大変位が生じた際は、これが作動することで、ダンパー力が自動的に上昇する。なお、ロッド端部とその両側の小型シリンダとの間隔は調節可能となっており、これを設定クリアランス(以下、 L_s)と称する。

図 2 ユニフロー式 VOD 機構模式図

2-3. ユニフロー式 VOD の作動原理

ユニフロー式 VOD は圧縮時と引張時でダンパーの作動原理を機械的に切り替えることにより、短い材長を実現している。図 3 にユニフロー式 VOD の圧縮時と引張時における作動原理の比較を示す。

(i) 圧縮時

チェック弁 1 は閉じており、A 室内のオイルが直接 C 室に流出することはなく、チェック弁 2 を介して A 室から B 室へ移動する。それにより、B 室内のオイルが押し出され、減衰バルブとオリフィスを介して C 室へ流出する。

(ii) 引張時

チェック弁 2 は閉じており、オイルが B 室から A 室へ移動することではなく、B 室内のオイルは減衰バルブとオリフィスを介して C 室に流出する。それにより、C 室内のオイルがチェック弁 1 を介して A 室内に流入する。

以上のように、ユニフロー式 VOD は圧縮時と引張時とで、異なる作動原理を有する。しかし、減衰バルブおよびオリフィスに対するオイルの流路は常に一定である。これにより、大変位時に小型シリンダが作動し、減衰バルブを開閉することで、ダンパー力を変化させることが可能となる。

図 3 ユニフロー式 VOD 作動原理

2-4. VOD 特性⁵⁾

VOD の性能変化過程におけるダンパー力・変位・速度関係の模式図を図 4 に示す。

(a) 性能変化前

Lv.1 地震動入力時など、免震層変位が L_s 以下の場合、通常のオイルダンパーと同様、速度に比例したダンパー力を発揮する。

(b)性能変化後

Lv.2、3 地震動などの入力により、変位が L_s を越えると、小型シリンダが作動し、オイルが押し出される。その油圧により減衰バルブが閉まり、減衰係数が上昇する。その後、ダンパー力が可変リリーフ力 F_r 以下でダンパー内の油圧が小さいときは減衰バルブが閉じ、ダンパー力が F_r を超えダンパー内の油圧が大きいたときは減衰バルブが開く。それにより、ダンパー力—速度関係が2折線型となる。なお、 F_r はばね剛性 K_{sp} と小型シリンダの作動距離 X_c により決定され、(1)式で表すように、最大変位を更新するたびに大きくなる。また、小型シリンダ最大作動時の F_r を最大リリーフ力 F_{rmax} と称する。

$$F_r = \alpha \times K_{sp} \times X_c = \alpha \times K_{sp} \times (D_{max} - L_s) \quad (1)$$

ここに、

F_r : 可変リリーフ力

α : ダンパーの各寸法から決定される比例定数

K_{sp} : ばね剛性 X_c : 小型シリンダ作動距離

D_{max} : 最大変位 L_s : 設定クリアランス

である。

なお、VODの設計に際して、 C_2 は C_1 に対して5倍程度まで設定可能である。また、 $K_{sp}(F_{rmax})$ は他のパラメータに依らず独立に設定でき、最大ダンパー力が過大となり応答加速度が設計条件を越えない限り、特に制限はない。

図4 VOD 力学的特性模式図

3.解析概要

3-1.解析モデル

解析モデルは、図5に示すように免震層のみ違う4種類の木造2階建て基礎免震住宅を想定する。モデル1-aは通常のオイルダンパー付転がり支承免震住宅を、モデル2-aは性能が下がるものの低コストで最も普及しているすべり支承免震住宅を想定している。免震用オイルダンパーとしては、ダンパー軸力が一定値を越えると減衰定数を低下させるリリーフ機構を有するものが一般的に用いられているが、本論文では簡単のためオイルダンパーは線形粘性減衰要素として扱う。

モデル1-bはVODの性能を最も発揮することのできるVOD付転がり支承免震住宅であり、免震層変位と応答加速度の両方を抑制することを目的とする。モデル2-bは普及しているすべり支承免震住宅の免震層変位を抑制することを目的としたVOD付すべり支承免震住宅である。

表1に解析モデルの質量および剛性を、表2に免震装置の構成を示す。なお、基礎固定時の固有周期は0.50[s]、上部構造の減衰定数は3[%]、階高は2.5[m]とし、免震建物時の固有周期は3.49[s]であ

る。また、免震層クリアランスは0.30[m]とする。VODの小型シリンダの最大作動距離は0.10[m]、 α は9.2とする。

すべり支承免震住宅のすべり支承および線形復元材の履歴特性を図6に示す。すべり支承は剛塑性型の履歴特性を有し、摩擦係数は0.046、免震層変位0.30[m]時の等価粘性減衰定数は20[%]相当とし、そのときの等価周期は2.90[s]である。なお、等価粘性減衰定数および等価周期はそれぞれ(2)式、(3)式から求めた。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \times \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{4\pi} \times \frac{4\mu m_{total} g a}{\frac{1}{2} k_{eq} a^2} = \frac{2\mu m_{total} g}{\pi k_{eq} a} \quad (2)$$

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{m_{total}}{k_{eq}}} \quad (3)$$

ここに、

h_{eq} : 等価粘性減衰定数

μ : すべり支承摩擦係数

a : 定常変位振幅

m_{total} : 建物の全重量 k_{eq} : 等価剛性

T_{eq} : 等価周期 g : 重力加速度

である。

図5 解析モデル

図6 すべり支承免震住宅履歴特性

表1 解析モデル諸元

m_0 [kN]	m_1 [kN]	m_2 [kN]	k_0 [kN/m]	k_1, k_2 [kN/m]
98.0	127.4	78.4	101.7	3900

表2 免震装置

モデル	免震装置		
	支承材	減衰材	復元材
1-a	転がり支承	オイルダンパー	線形復元材
1-b		VOD($L_s=0.20[m]$)	
2-a	すべり支承($h_{eq}=20[\%]$)		
2-b	すべり支承($h_{eq}=20[\%]$)	VOD($L_s=0.20[m]$)	

3-2.入力地震動

解析には表3に示す地震動のPGVをレベル1(以下、Lv.1)は0.25[m/s]、レベル2(以下、Lv.2)は0.50[m/s]、レベル3(以下、Lv.3)は0.75[m/s]に基準化して用いる。なお、Lv.3 検討用地震動の鷹取波および三の丸波に関しては原波を用いることとする。基準化した入力地震動の諸元を表4に示す。

ある一組のパラメータで、全地震動に対して1度ずつ時刻歴応答解析を行うことを1ステップとし、各入力レベルの最大応答値はそのレベルにおける全地震動の応答の最大値とする。また、応答値の算出にはNewmark- β 法を用い、 $\beta=1/4$ とする。

表3 入力地震動

入力地震動	呼称
1968年 十勝沖地震 八戸港湾事務所 EW記録	八戸波
1940年 Imperial Valley地震 El Centro NS記録	El Centro波
1952年 Kern County地震 Taft EW記録	Taft波
1995年 兵庫県南部地震 JR鷹取駅 EW記録	鷹取波
新東海地震模擬地震動 EW成分	三の丸波

表4 入力地震動諸元

入力地震動	Lv.1		Lv.2		Lv.3	
	PGV [m/s]	PGA [m/s ²]	PGV [m/s]	PGA [m/s ²]	PGV [m/s]	PGA [m/s ²]
八戸波		1.19		2.38		3.58
El Centro波	0.25	2.54	0.50	5.07	0.75	7.61
Taft波		2.50		5.00		7.50
鷹取波					1.27	6.57
三の丸波					0.51	1.86

3-3.最適設計手法

既往の研究では、設計条件を満たすVODパラメータをパラメトリックスタディにより決定していた。しかし、図4に示したようにVODにはパラメータが多く、設計条件を満足するように決定するためには数多くの解析を行う必要があり困難を伴う。

そこで本研究では、最適設計手法を用いてVODの最適パラメータを決定する。これにより比較的容易かつ論理的に解を求めることが可能となる。最適設計手法として様々なアルゴリズムが提案されているが、本論文では制約条件付き非線形最適化問題に対する最も有効な数値解析法の一つである逐次2次計画法(Sequential

Quadratic Programming Method, 以下、SQP法)^{例え8)~10)}を用いる。

図7にSQP法の解析フローチャート、図8に実行可能領域内に目的関数の極値が存在しない場合を例にとってSQP法の解法の模式図を示す。

以下にSQP法の解法手順の概要を示す。

- 初期値として、設計変数に x_0 を代入し時刻歴応答解析により目的関数 $F(x_0)$ を求める。
- 制約条件の満足状況および最適性の判定を行う。
- 最適性の条件を満足していない場合、 $(x_0, F(x_0))$ で $F(x)$ に接する近似2次曲面の極値の x 座標 x_1 を求める。
- 設計変数に x_1 を代入し、時刻歴応答解析により $F(x_1)$ を求める。
- 目的関数の極値が実行可能領域内に存在するときは、近似誤差が許容値以下になるまで(ii)~(iv)を繰り返すことで、最適解を求めることができる。
- 目的関数の極値が実行可能領域内に存在しないときは、制約条件の等号が成り立つ点 x_2 が最適解となる。

図7 SQP法解析フローチャート

図8 SQP法解法模式図

数値最適化の手法は主にオペレーションズ・リサーチの分野で発展し、構造工学分野では1960年にSchmit¹¹⁾が構造最適化に応用して以降数多くの研究がなされてきているが、本研究のような現実的な設計問題に数値最適化を応用した例は殆どない。

SQP法は解の大域的収束性と収束の速さの両面で優れている。また、目的関数や制約条件式の導関数が得られない場合に繰り返し計

算の過程でそれらを近似的に得るので、必ずしも導関数を与える必要はない。このことから、本論文で扱う問題のように関数が明示的でない場合に適した解法であると考えられる。

本論文では、SQP法のソフトウェアとしてDOT¹²⁾を用いた。また、本研究で用いるPCの性能はCPUがIntel Core 2 Duo E4400(2.00[GHz])、メモリーが0.99[GB]である。

4. 転がり支承免震住宅に関する検討

VOD付転がり支承免震住宅に最適設計手法を適用し、Lv.1、Lv.2地震動入力時の応答加速度を抑えつつ、Lv.3地震動入力時における免震層の過大変位を抑制することを目的として検討を行う。表5に転がり支承免震住宅の設計条件(以下、設計条件1)を示す。なお、表中の数値はそれぞれの応答値が満足すべき上限値を示している。

表5 設計条件1(転がり支承免震住宅)

入力レベル	最大免震層変位 [m]	最大加速度 [m/s ²]	最大層間変形角 [rad]
Lv.1	0.20	1.00	1/200
Lv.2	0.30	2.00	
Lv.3		3.00	

4-1.モデル 1-a の最適化

通常のオイルダンパーで設計条件1をすべて満たすことが可能であるかを検討するため、モデル1-aに最適設計手法を適用する。

4-1-1.最適化条件

設計において、応答変位や応答加速度については設計条件を満たしていることが重要であり、コストなどの観点から最大ダンパー力は可能な限り小さいことが望ましい。よって、オイルダンパーの減衰係数 C_d を設計変数に、最小化したい応答値であるLv.3地震動入力時の最大ダンパー力を目的関数に、設計条件1(表5)を制約条件としたとき、本設計問題の標準的な定式化は下記ようになる。また、多くの数値最適化プログラムは、このような標準形の問題を解くように作られている。これに対する数値解法としてSQP法を用いる。なお、添え字の i は、Lv. i 地震動入力時の最大応答値および制約条件を示すものとする。

最適設計問題		
find	$x = C_d$	
to minimize	$F_{\max,3}$	
subject to	$\begin{cases} D_{\max,j} \leq \overline{D_j} \\ A_{\max,j} \leq \overline{A_i} \\ R_{\max,j} \leq \overline{R_i} \end{cases} \quad (i=1,2,3)$	

4-1-2.解析結果

最適設計手法を適用し検討を行った結果、設計条件1を満たす解は存在しなかった。その原因を考察するため、 C_d を変数としてパラメトリックスタディを行った。結果を図9に示す。

図9から通常の免震住宅の減衰20[%](図中の灰色の点)では加速度は設計条件1を満たしているが、Lv.3地震動入力時の最大免震層

変位が設計条件1を満たしていない。

一方、Lv.3地震動入力時の免震層変位が設計条件1を満足するためには減衰が75[%](図中の黒塗りの点)必要である。しかし、それではLv.1、Lv.2地震動入力時の加速度が設計条件1を満たさなくなってしまう。

また、免震層剛性を変化させることで設計条件を満足する可能性もある。免震建物時の1次固有周期 T_1 を4.5[s]とした場合の結果を図10に示す。この結果から、固有周期を4.5[s]としても設計条件を満足できないことがわかる。なお、固有周期を6.5[s]まで大きくすることにより設計条件を満足できたが、5.0[s]以上の長周期とすることはあまり現実的とはいえない。つまり、免震層剛性を変化させても設計条件を満足することは現実には難しいと考えられる。

以上のことから線形のオイルダンパーでは設計条件1を満たす現実的な解は見つからないことを確認した。

図9 最大応答値の推移(モデル 1-a・ $T_1=3.49$ [s])

図10 最大応答値の推移(モデル 1-a・ $T_1=4.5$ [s])

4-2.モデル 1-b の最適化

VOD付転がり支承免震住宅において、加速度の上昇を抑えつつ、免震層変位も抑制することを目的とし、地震動の各入力レベルで設計条件1を満足するVODパラメータを決定するため、モデル1-bに最適設計手法を適用する。

4-2-1.最適化条件

設計変数をVODの減衰 C_1 、 C_2 、および最大リリーフ力 $F_{\max}$ を決

定づけるばね剛性 K_{sp} とし、それ以外の条件はモデル 1-aの場合と同じとして、下記のような最適化問題を定式化し、SQP法を用いて設計条件を満たすVODパラメータを数値的に求める。制約条件は設計条件 1(表 5)と同じとする。なお、 L_s に関してはLv.1 地震動入力時に性能変化しないようにするため、Lv.1 地震動入力時の免震層変位のクライテリアと同じ0.20[m]で一定とする。

最適設計問題		
find	$\mathbf{x} = \{C_1, C_2, K_{sp}\}$	
to minimize	$F_{\max,3}$	
subject to	$\begin{cases} D_{\max,j} \leq \overline{D_i} \\ A_{\max,j} \leq \overline{A_i} \\ R_{\max,j} \leq \overline{R_i} \end{cases} \quad (i=1,2,3)$	

4-2-2.解析結果

制約条件付き最適設計問題において、制約条件は等号で満足される場合と不等号で満足される場合があるが、前者の場合の制約条件は特に有効制約条件(active constraint(s))と呼ばれている。一般に、設計問題には多くの制約条件が課されるが、有効制約となる制約条件の数は高々設計変数の数となる。制約条件は厳しいものが等号条件で満足され、制約条件に対して応答値が余裕を持っている場合は不等号で満足されることとなる。従って、どの制約条件が有効制約になっているかを調べることで、設計解を決定している条件を知ることができる。

表 6 には目的関数値を決定づけた入力地震動と有効制約条件およびそれを与えた入力地震動を、図 11 に表 6 に示した最大応答値の収束過程を示す。また、得られた最適解を表 7 に示す。なお、解析には 41 ステップ、59 分を要した。

表 6 から鷹取波がパラメータの決定に大きな影響を与えていること、制約条件としてはLv.3 の応答値が設計解を決定づけていることが確認できる。また、図 11 を見ると、1 ステップ目では、Lv.3 地震動入力時の最大加速度、最大免震層変位ともに設計条件を満足していない。しかし、設計変数を更新し時刻歴応答解析を繰り返していくことにより設計条件に収束し、41 ステップ目でそれらに対する制約条件は有効制約となっている。

なお、得られた最適パラメータは C_2 が C_1 の約 2 倍となっている。この比率は、 C_2 の C_1 に対する比の製作上の制約である5以下であり、製作可能範囲内となっている。

以上のように、性能が変化しないオイルダンパーでは条件を満足する現実的な解が得られないような問題について、最適設計手法を用いて適切な VOD パラメータを決定することにより、地震動のすべてのレベルにおいて設計条件を満足することができた。

表6 最大応答値の満足状況(モデル1-b)

	応答値	入力地震動	場所
目的関数	Lv.3最大ダンパー力	鷹取波	免震層
有効制約条件	Lv.3最大加速度	鷹取波	頂部
	Lv.3最大免震層変位	鷹取波	免震層

図 11 最大応答値の収束過程

表7 最適パラメータ(モデル1-b)

C_1 [kNs/m] (h_1 [%])	C_2 [kNs/m] (h_2 [%])	K_{sp} [kN/m] (F_{rmax} [kN])
28.5 (25.4)	63.3 (56.4)	198.0 (182.2)

4-2-3.最大応答値の判定

図 12 に最大応答値を示す。なお、比較のためにモデル 1-a(減衰定数 20[%]一定)の解析結果も示す。また、モデル 1-b の VOD パラメータは最適設計手法により求めた表 7 の値を用いる。

図 12 最大応答値(転がり支承免震住宅)

モデル 1-a の結果を見ると、図 9 でも示したように Lv.3 の最大免震層変位が過大となっており、設計条件を満たしていない。

モデル 1-b の結果を見ると、Lv.3 の最大ダンパー力がモデル 1-a に比べ大きくなっているものの、その他の応答値は過大にはなっておらず、すべてのレベルにおいて設計条件を満たしている。

以上より、転がり支承免震住宅に適切なパラメータを設定した VOD を設置することで、Lv.1、Lv.2 地震動入力時の最大加速度を抑えつつ、Lv.3 地震動入力時の最大免震層変位を抑制可能であることを確認した。

4-2-4.時刻歴応答波形

通常のオイルダンパーでは設計条件 1 を満足できず、VOD を用いることで設計条件 1 を満足できた理由について時刻歴応答波形から検討を行う。解析ケースは以下の 3 ケースとする。なお、VOD の等価減衰定数 h_{deq} は図 13((4)式、(5)式)に示す方法で算出する。

- ・減衰 20[%]一定のオイルダンパー
- ・減衰 75[%]一定のオイルダンパー
- ・最適設計によりパラメータを決定した VOD

図 14 にダンパーパラメータの決定において影響の大きかった入力地震動である鷹取波原波入力時の時刻歴応答波形を、図 15 に VOD の履歴ループを示す。

図 14 から減衰 20[%]のオイルダンパーでは、加速度は設計条件以内に抑えられているものの、6[s]以降に過大な免震層変位が生じていることが確認できる。

また、減衰 75[%]のオイルダンパーでは 6[s]以降の免震層の過大变位は抑制できているが、2~3[s]および 6[s]付近で応答加速度が過大となってしまう。

一方、VOD を設置した場合を見ると、2~3[s]では免震層変位が L_s 以下であり、性能変化していないため減衰は小さくなっており、加速度は小さく抑えられている。その後、5[s]付近で免震層変位が L_s を越え性能変化しダンパー力が上昇している。6[s]付近では、小型シリンダの作動距離が小さく F_r も小さい。そのため、ダンパー力が F_r より大きくなりリリーフ機構が作動してダンパー力-速度関係が第 2 勾配にのることにより、等価減衰は小さくなっており、応答加速度が過大となることを防いでいる。さらに、6[s]以降は最大変位が更新され、小型シリンダがストローク限界近くまで作動し、 F_r が大きくなっている。それにより、減衰が C_2 一定でダンパー力を発揮可能となり、免震層の過大变位も抑制することができている。

以上より、VOD は地震動の各レベルにおいて設計条件を満たすために有効な免震デバイスであるといえる。

図 14 時刻歴応答波形(鷹取波原波)

図 15 VOD 履歴ループ(鷹取波原波)

図 13 VOD の等価減衰定数の算出方法

5.すべり支承免震住宅に関する検討

現在、免震住宅の多くはすべり支承が用いられている。ここでは、VOD 付すべり支承免震住宅において、地震動の各入力レベルで設計条件を満たす VOD パラメータを決定するため、モデル 2-b に最適設計手法を適用する。なお、すべり支承免震住宅では、低コストである代わりに応答加速度の増大を防ぐことは難しいと考えられる。よって、応答加速度のクライテリアを大きく設定し、免震層変位を

免震層クリアランス以内にすることを目的とする。表 8 にすべり支承免震住宅の設計条件(以下、設計条件 2)を示す。

表8 設計条件2(すべり支承免震住宅)

入力レベル	最大免震層変位 [m]	最大加速度 [m/s ²]	最大層間変形角 [rad]
Lv.1	0.20	3.00	1/200
Lv.2	0.30	3.50	
Lv.3		4.50	1/100

5-1.最適化条件

モデルは異なるが最適設計問題の定式化はモデル 1-b の場合と同様とする。また、制約条件は設計条件 2(表 8)と同じとする。

5-2.解析結果

制約条件の満足状況を表 9 に、得られた解を表 10 に示す。なお、解析には 29 ステップ、41 分を要した。

表 9 から、モデル 1-b の場合と同様、鷹取波がパラメータの決定に大きな影響を与えていることが確認できる。また、設計変数の数が 3 つであるのに対し、有効制約条件の数が 1 つとなっており、最適解の与える応答量は設計クリアランスに対して余裕がある状態であるといえる。

表9 最大応答値の満足状況(モデル2-b)

	応答値	入力地震動	場所
目的関数	Lv.3最大ダンパー力	鷹取波	免震層
有効制約条件	Lv.3最大免震層変位	鷹取波	免震層

表10 最適パラメータ(モデル2-b)

C_1 [kNs/m] (h_1 [%])	C_2 [kNs/m] (h_2 [%])	K_{sp} [kN/m] (F_{rmax} [kN])
42.5 (37.8)	66.6 (59.3)	242.8 (223.4)

5-3.最大応答値の判定

図 16 にモデル 2-a とモデル 2-b の最大応答値比較を示す。なお、VOD パラメータは表 10 の値を用いる。また、図 16 中の最大減衰力は VOD のダンパー力とすべり支承による摩擦力の和とする。

モデル 2-a の結果を見ると、Lv.1、Lv.2 地震動入力時の最大免震層変位は小さいものの、Lv.3 地震動入力時の最大免震層変位が設計条件を満たしていない。これは、巨大地震の入力により免震層変位が大きくなり、等価粘性減衰定数が低下したことが原因であると考えられる。

モデル 2-b の結果を見ると、VOD を設置することにより、免震層変位を抑制し、設計条件を満たすことができています。また、応答加速度に関してはモデル 2-a と比べ、あまり差は見られない。

以上より、すべり支承免震住宅に VOD を設置した場合についても、転がり支承免震住宅の場合に比べ、応答加速度の上限値を大きくして制約条件を緩和する必要はあるものの、Lv.3 地震動入力時の最大免震層変位を免震層クリアランス以内に抑制可能であることを確認した。

図 16 最大応答値(すべり支承免震住宅)

5-4.制約条件に関する検討

VOD付すべり支承免震住宅において、設計条件の変化が最適パラメータに与える影響について検討を行う。設計条件(以下、設計条件 3)については表 11 に示すように、免震層クリアランスを 0.05[m] 大きくする代わりに、Lv.3 地震動入力時の最大加速度制約を 0.50[m/s²]小さく設定した。

制約条件の満足状況を表 12 に、得られた解を表 13 に示す。なお、解析には 120 ステップ、170 分を要した。

表11 設計条件3(すべり支承免震住宅)

入力レベル	最大免震層変位 [m]	最大加速度 [m/s ²]	最大層間変形角 [rad]
Lv.1	0.20	3.00	1/200
Lv.2	0.35	3.50	
Lv.3		4.00	1/100

表12 最大応答値の満足状況(設計条件3)

	応答値	入力地震動	場所
目的関数	Lv.3最大ダンパー力	鷹取波	免震層
有効制約条件	Lv.2最大加速度	Taft波	免震層
	Lv.3最大免震層変位	鷹取波	免震層

表13 最適パラメータ(設計条件3)

C_1 [kNs/m] (h_1 [%])	C_2 [kNs/m] (h_2 [%])	K_{sp} [kN/m] (F_{rmax} [kN])
33.3 (29.6)	91.9 (81.8)	34.3 (31.6)

表 12 を見ると、鷹取波がパラメータの決定において影響が大きな地震動であることには変わらないが、Lv.2 地震動入力時の最大加

速度を決定する上で Taft 波も重要な地震動であるといえる。また、設計条件 2 の場合と比べ、有効制約条件が増え、より無駄の少ない設計といえる。

次に、得られた VOD パラメータを用いた場合の最大応答値について検討を行う。図 17 にモデル 2-b における設計条件 2 と設計条件 3 の場合での最大応答値の比較を示す。

図 17 を見ると、免震層クリアランスを大きくすることで、Lv.3 地震動入力時の最大加速度および最大ダンパー力を低減していることがわかる。つまり、免震層クリアランスと最大加速度や最大ダンパー力はトレードオフの関係になっている。この関係に着目すると、免震層変位と応答加速度のそれぞれの制約条件のバランスを考えながら設計者がそれぞれの制約条件を厳しくしたり、緩和したりすることにより、得られる最適解を操作できることがわかる。設計者は、制約条件の厳しさと得られる最適解のバランスを見ながら望ましいと思う解を選択すれば良い。著者らはこのように、最適化手法を意思決定の補助ツールとして位置付ける使い方が一つの理想的な方法であると考えている。

図 17 最大応答値(VOD 付すべり支承免震住宅)

6.まとめ

本研究では、戸建免震住宅への適用を目的としたユニフロー式 VOD を新たに提案するとともに、VOD 付き免震住宅の設計に最適設計手法を適用した例を示し、その効果について検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 最適設計手法を VOD 付転がり支承免震住宅の設計例に適用し、線形のオイルダンパーでは現実的な解が得られないような設計条件に対して、地震動の全入力レベルにおいて設計条件を満足する設計解が得られることを示した。
- 2) 適切なパラメータを設定した VOD 付転がり支承免震住宅ならば、応答加速度の上昇を抑えつつ、巨大地震に対しても免震層

変位をクリアランス以内にできることを示した。

- 3) VOD 付すべり支承免震住宅に関しても、最適設計手法を適用することで、各地震入力レベルに対する設計条件を同時に満足できることを示した。
- 4) VOD パラメータを適切に設定することにより、設計者が要求性能に応じた設計をすることが可能となることを示した。

以上より、転がり支承免震住宅およびすべり支承免震住宅に最適設計手法に基づいて設計した VOD を設置することで、Lv.1 から Lv.3 までのすべての地震入力レベルにおいて設計条件を満足する設計が可能であることを例示した。

謝辞

本研究は、平成 20～22 年度 科学研究費補助金 研究基盤(B)「性能可変オイルダンパーにより長周期巨大地震時の免震建物過大变位を抑制する技術開発」(課題番号 20360246、研究代表者 井上範夫)の一部として実施しました。また、ダンパーの開発には、(有)シズメテックに多大なご協力をいただきました。解析において愛知県設計用入力地震動研究協議会の作成波(三の丸波)を使用させていただきました。

ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性，2007.12
- 2) 中安誠明，中島正愛：過大地震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
- 3) 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 1,2，日本建築学会大会学術講演梗概集 B2，pp.425-428，2004.8
- 4) 五十子幸樹，中井川敦，堀則男，井上範夫：ダンパーの作動原理の差異と免震装置のばらつきが免震建物の応答性状に与える影響に関する検討，日本建築学会東北支部研究報告集，第 72 号構造系，pp.152-156，2009.6
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成，想定地震による強震動予測，概要版(改訂版)，2006.2
- 8) 福島雅夫：数理計画入門 システム制御情報ライブラリー，朝倉書店，1996.
- 9) G. L. Nemhauser, A. H. G. Rinnooy Kan and M. J. Todd (eds.): Optimization: Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol.1, Elsevier, 1989. [邦訳(伊理ほか監訳)，最適化ハンドブック，朝倉書店，1995.]
- 10) G.N. Vanderplaats: Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill, 1984.
- 11) Schmit, L.A.: Structural Design by Systematic Synthesis, Proceedings, 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE, New York, pp.105-122, 1960
- 12) Vanderplaats Research & Development, Inc., Design Optimization Tools Users Manual, 5.7, 2001.

(2010年8月5日原稿受理，2010年10月25日採用決定)