

# 免震建物に適用する過大変位抑制用 性能可変オイルダンパーの開発

—500kN 級ダンパーの性能確認—

## Passive Variable Orifice Damper to Control Excessive Displacement of Seismically Isolated Buildings

- Performance of Damper with 500 kN Class Maximum Damping Force -

小山慶樹\* 山上 聡\* 舟木秀尊\*

### 要 旨

長周期地震時に、建物の一次固有周期が長い超高層建物や免震建物では過大な変位が生じる可能性があり、特に免震建物では上部構造の擁壁衝突が懸念されている。しかし、擁壁衝突を回避するために、免震層の水平剛性や減衰性能を増加させると、中・大地震時に上部構造の応答加速度が大きくなり、免震性能が損なわれてしまう。そこで、免震性能を損ねないように、減衰力を変化させることで免震層の変位をパッシブに制御する性能可変オイルダンパーを開発した。最大減衰力が 500kN 級のダンパーを試作して、その減衰性能を実験により確認した。また、性能可変オイルダンパーを免震建物に適用した場合の耐震性能を検討し、中・大地震時には免震性能が損なわれることなく、長周期地震時の変位抑制効果があることを確認した。

キーワード：免震構造、オイルダンパー、性能可変、変位制御、パッシブ制御、長周期地震動

### 1. まえがき

1995 年の兵庫県南部地震以降、地震観測網が充実し、様々な場所で多くの地震が観測されるようになった。2003 年 9 月の十勝沖地震では、震源から約 250 キロ離れた苫小牧で発生したスロッシングによる石油タンク火災<sup>1)</sup>を契機に長周期地震動が注目された。また、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震では、複数の震源領域における連動型地震となり、国内観測史上最大のマグニチュードを記録し、首都圏や大阪湾岸の超高層建築物でも大きな揺れを観測した。これらを受け、2016 年 6 月に国土交通省から、「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について」<sup>2)</sup>が通知され、それまでの設計基準を超えたエネルギーを有する地震動に対して構造物の安全性検討が必要になった。

巨大地震時において、既存の免震建物では図-1 に示すような水平クリアランス以上の過大な変位による上部構造の擁壁衝突が危惧され、近年、衝突時の建物挙動に関する研究が行われている<sup>例えは 3)</sup>。擁壁衝突を回避するためには、免震層に水平剛性や減衰性能を増加する対策があるが、上部構造が負担する地震力や応答加速度が

増加して、免震性能が低減される。そのため、中・大地震時には免震性能を維持しつつ、巨大地震時に免震層の過大变位を抑制する耐震性能が求められている。

これに対して、井上、五十子らは、免震層の変位に応じてパッシブにオイルダンパーの減衰力を変化させる性能可変オイルダンパー（以下、VOD）を用いた免震構造を提案し、戸建免震住宅を対象にその適用効果を示している<sup>例えは 4)、5)</sup>。本報では、ビル物の免震建物を対象とした、最大減衰力が 500kN 級の VOD を開発・製作して、減衰性能を確認する。さらに、VOD の適用効果を解析的検討から確認する。

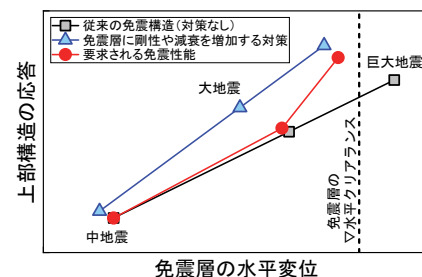


図-1 免震層の水平変位と上部構造の応答

\* 技術本部技術研究所建築研究グループ

## 2. VODの減衰性能

### 2.1 VODの作動原理

VODの外観を図-2に、機構模式図を図-3に示す。本ダンパーの特徴は、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点である。ガイドロッドの端部とその両側の小型シリンダとの間隔を設定クリアランス  $L_s$  と称し、設計者が任意に定めることができる。  $L_s$  以上の変位がダンパーに生じると、ピストンロッドの変位に追従したガイドロッドが小型シリンダを作動させて、ばね座を押し込み、自動的に減衰力が増加する。地震終了後は、圧縮された調圧ばねにより小型シリンダが自動で徐々に戻され、性能変化前の減衰性能に戻る。

圧縮時と引張時における VOD の作動原理を図-4に示す。圧縮時には、チェック弁1は閉じており、A室内の作動油が直接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室へ流出する。これに伴い、B室内の作動油が押し出され、減衰バルブとオリフィスを介してC室へ流出する。引張時には、チェック弁2が閉じているので、作動油がB室からA室へ流出することはない。B室内の作動油は減衰バルブとオリフィスを介してC室へ流出し、作動油は圧縮時と同じ方向に流れる。

### 2.2 減衰力のモデル化

ある時刻  $t$  までの免震層の最大水平変位  $\delta_{\max}(t)$  が設定クリアランス  $L_s$  未満の場合、オイルダンパーの減衰力  $F_d(t)$  は次式から求める。

$$\left. \begin{aligned} |V(t)| < V_r \text{ の場合} \\ F_d(t) &= C_1 \times V(t) \\ |V(t)| \geq V_r \text{ の場合} \\ F_d(t) &= \text{sign}(V(t)) \times \{ F_r + C_2 \times (|V(t)| - V_r) \} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $V(t)$ : ある時刻のピストンロッドの速度

$F_d(t)$ : 減衰力

$F_{dd}$ : 切片減衰力

$F_{d\max}$ : 最大減衰力

$C_1$ : 性能変化前の一次減衰係数

$C_2$ : 性能変化前の二次減衰係数

$(= (F_{d\max} - F_{dd}) / 150)$

$F_r$ : 性能変化前のリリーフ減衰力

$(= C_1 \{ F_{dd} / (C_1 - C_2) \})$

$V_r$ : 性能変化前のリリーフ速度

$(= F_{dd} / (C_1 - C_2))$

免震層の最大水平変位  $\delta_{\max}(t)$  が設定クリアランス  $L_s$  以上の場合、オイルダンパーの減衰力  $F_d(t)$  は、小型シリンダの作動距離  $X_c$  に応じて無段階で、かつ、パッシブに変化する。性能変化後でかつ、第一折れ点の減衰力  $F_{r1}$  が最大リリーフ減衰力  $F_{r\max}$  未満の場合の減衰力  $F_d(t)$  は、次式から求める。

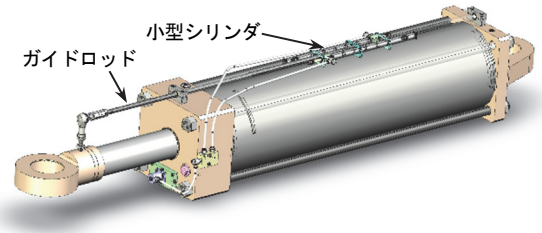


図-2 VODの外観

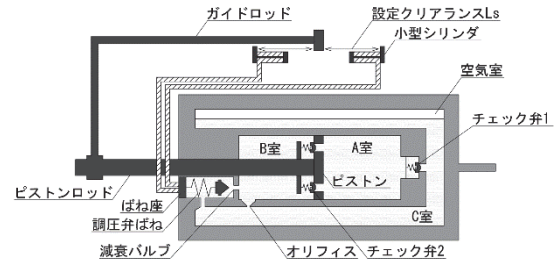
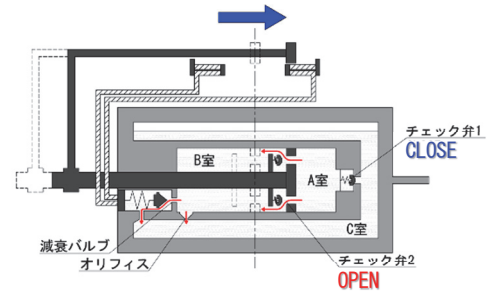
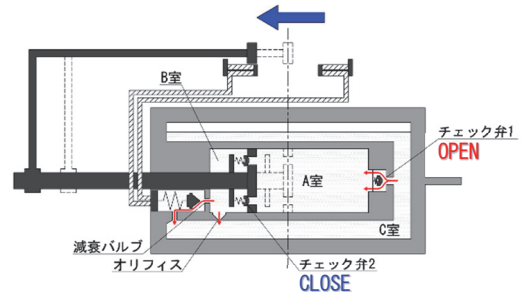


図-3 VODの機構模式図



(a) 圧縮時



(b) 引張時

図-4 VODの作動原理

$$\left. \begin{aligned} |V(t)| < V_{r1} \text{ の場合} \\ F_d(t) &= {}_v C_1 \times V(t) \\ V_{r1} \leq |V(t)| < V_{r2} \text{ の場合} \\ F_d(t) &= \text{sign}(V(t)) \times \{ F_{r1} + {}_v C_1 (|V(t)| - V_{r1}) \} \\ |V(t)| \geq V_{r2} \text{ の場合} \\ F_d(t) &= \text{sign}(V(t)) \times \\ &\quad \{ F_{r1} + {}_v C_2 (V_{r2} - V_{r1}) + {}_v C_3 (|V(t)| - V_{r2}) \} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 ${}_v C_1$ : 性能変化後の一次減衰係数

${}_v C_2$ : 性能変化後の二次減衰係数 ( $= C_1$ )

${}_v C_3$ : 性能変化後の三次減衰係数 ( $= C_2$ )

$F_{r1}$ : 第一折れ点荷重

$(= \alpha \times K_{sp} \times X_c \times \zeta, \text{ただし、} F_{r\max} \text{未満})$

$F_{r2}$ : 第二折れ点荷重 ( $=F_{r1} + vC_2(V_{r2} - V_{r1})$ )  
 $F_{rmax}$ : 最大リリーフ荷重  
 $(= \min\left(\alpha \times K_{sp} \times X_{cmax} \times \zeta, \frac{vC_1 \times F_{dd}}{vC_1 - vC_3}\right))$   
 $V_{r1}$ : 第一折れ点速度 ( $=F_{r1} / vC_1$ )  
 $V_{r2}$ : 第二折れ点速度  
 $(= \{F_{dd} - (1 - vC_2 / vC_1)F_{r1}\} / (vC_2 - vC_3))$   
 $\alpha = A_c / A_{sp} \times A_p / A_r$   
 $A_c$ : 小型シリンダ断面積、 $A_{sp}$ : ばね座面積  
 $A_p$ : ピストン面積、 $A_r$ : 減衰バルブ面積  
 $K_{sp}$ : 調圧弁ばね剛性  
 $X_c$ : 小型シリンダの作動距離 ( $=\delta_{max}(t) - L_s$ )  
 $X_{cmax}$ : 小型シリンダの最大作動距離  
 $\zeta$ : 低減倍率

次に、免震層の最大水平変位  $\delta_{max}(t)$  が設定クリアランス  $L_s$  以上で、かつ第一折れ点のリリーフ減衰力  $F_{r1}$  が最大リリーフ減衰力  $F_{rmax}$  の場合の減衰力  $F_d(t)$  は、次式から求める。

$$\left. \begin{aligned} &|V(t)| < V_{r1} \text{ の場合} \\ &F_d = vC_1 \times V(t) \\ &|V(t)| \geq V_{r1} \text{ の場合} \\ &F_d = \text{sign}(V(t)) \times \{F_{r1} + vC_3(|V(t)| - V_{r1})\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以上のことより、性能変化前の(1)式はバイリニア型、性能変化後の(2)式、(3)式は小型シリンダの作動距離  $X_c$  に応じて減衰力が増加し、トリリニア型からバイリニア型の減衰性能となる。なお、過度な減衰力を発揮しないようにリリーフ荷重を設け、最大減衰力は性能変化前と同じとしている。図-5に、VOD の速度と減衰力の関係を示す。

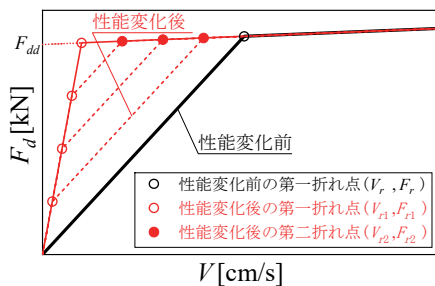


図-5 速度-減衰力関係

### 3. 試作機の性能確認

#### 3.1 実験概要

試作した 500kN 級の VOD の減衰性能を確認するため、加振機による正弦波加振実験を行った。実験状況を写真-1に、試験機概要を図-6に示す。ここで、加振機 1 台の最大速度が 50cm/s、最大ストロークが±300mm であることから、静圧継手を介して 2 台の加振機を直列に連結し、最大速度 100cm/s、最大ストローク±600mm まで行えるように計画した。加振波は、表-1に示した最大変位、最大速度をパラメータとし、定常 3 波に加え、前後に 1 波のテーパを設けた正弦波とした。加振波の一例を図-7に示す。VOD の設定クリアランス  $L_s$  は、次章で対象とした免震建物の巨大地震時免震層最大変位が水平クリアランス以下となるように予備検討し、15cm とした。計測項目は、ダンパーおよび小型シリンダの変位、減衰力とした。サンプリング周波数は 1024Hz とし、小型シリンダが作動してから減衰力が変化するまでの時間遅れを評価できるように配慮した。

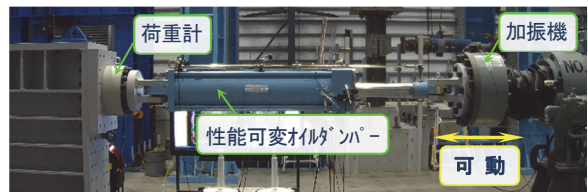
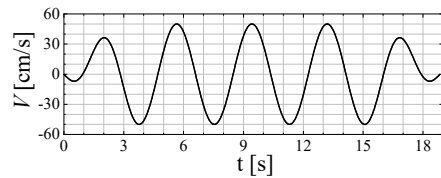


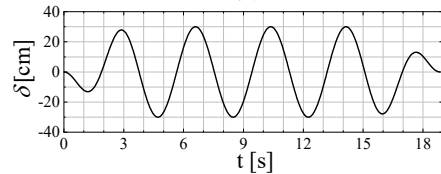
写真-1 実験状況

表-1 加振波のパラメータ一覧

最大変位 $\delta_{max}$ [cm]	10、20、25、30、35
最大速度 $V_{max}$ [cm/s]	1、3、5、10、20、30、50、75



(a) 速度波形



(b) 変位波形

図-7 加振波の一例 ( $\delta_{max} = 30\text{cm}$ ,  $V_{max} = 50\text{cm/s}$ )

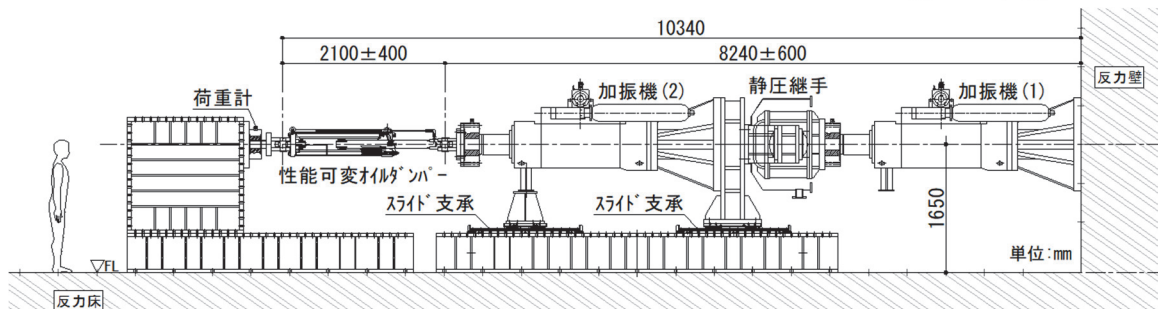


図-6 試験機概要

### 3.2 実験結果

減衰力と変位の関係を図-8に示す。ダンパー変位が  $L_s$  (=15cm) 以上になると減衰力が増加しており、いずれの場合も安定した挙動を示している。また、図-8 (b)、(c)より、最大変位が大きくなるにつれ、最大減衰力が増加しており、ダンパーの減衰性能が変化していることが確認できる。(d)~(f)より、最大速度が大きくなるに従い、リリース荷重時以上の速度となるため、最大減衰力が概ね同程度となっている。なお、小型シリンダが作動してから減衰力が増加するまでの時間は、ばらつきがあるものの概ね 0.05 秒であり、大きな時間遅れは生じていないことを確認した。定常3波目の引張・圧縮時の最大速度と最大減衰力の関係を図-9に示す。ここで、ダンパーが引張時の減衰力を+側、圧縮時を-側として表示している。切片減衰力  $F_{dd}$  を 430kN、最大減衰力  $F_{dmax}$  を 500kN、 $\alpha \cdot K_{sp} \cdot \zeta$  は 24.18kN/cm として、実験結果を非線形最小二乗法<sup>6)、7)</sup>により近似し、VODのパラメータを評価した。性能変化前の一次減衰係数  $C_1$

は概ね 11.9kN・s/cm、二次減衰係数  $C_2$  は 0.4kN・s/cm、性能変化後の一次減衰係数  $C_1$  は 59.5kN・s/cm と評価することができ、性能変化前の  $C_1$  に比べ概ね 5 倍の一次減衰係数となり、小型シリンダの作動距離  $X_c$  に応じて減衰力が増加していることが確認できた。

## 4. 解析によるVODの免震性能確認

### 4.1 解析モデル

免震層の水平クリアランスが 40cm の既存免震建物に、3.2 節で評価した  $L_s$  15cm の VOD を設けた場合を想定し、解析的検討から VOD の適用効果を確認する。対象建物は、一次固有周期が概ね 3.6 秒の 6 階建て基礎免震構造である。免震層には、天然ゴム系積層ゴム支承と一次粘性係数が 12.5kN・s/cm、リリース荷重 400kN、二次粘性係数 0.85kN・s/cm のパイリニア型のオイルダンパー（以下、OD）が建物の主軸方向に対して 2 基ずつ設けられている。OD を 2 基設けた場合（現状）を Case1、1

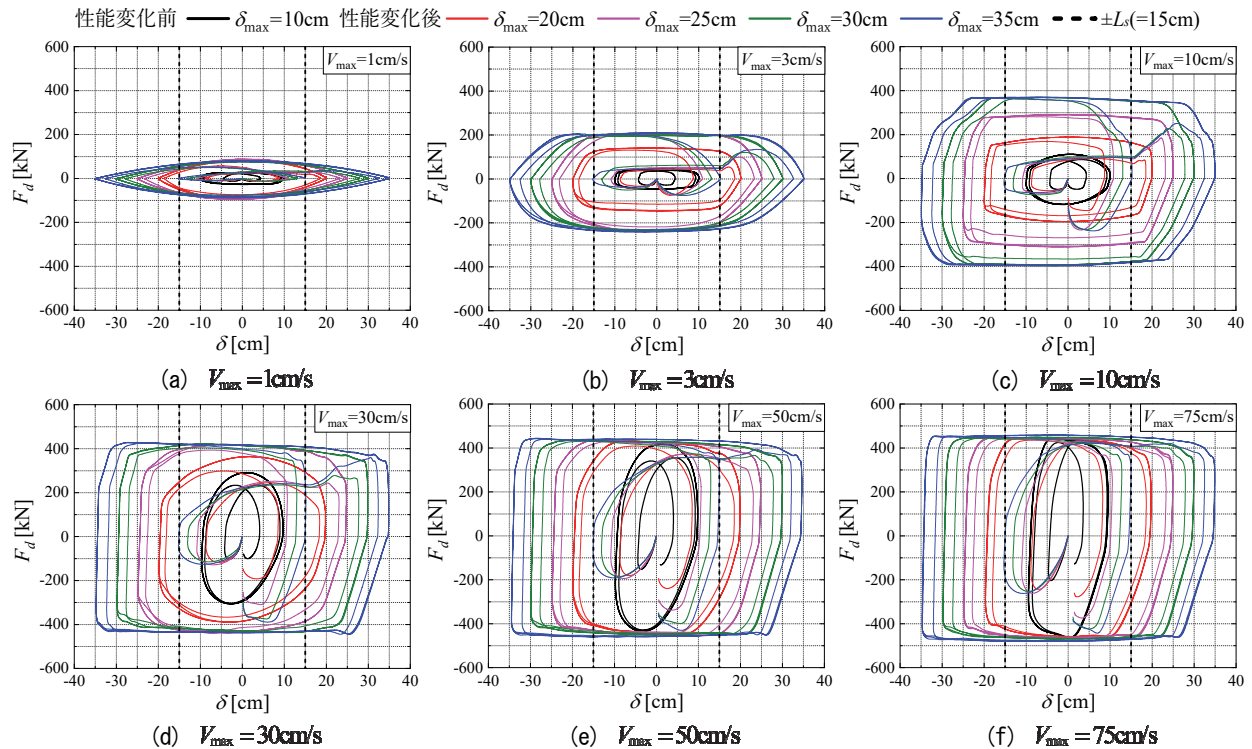


図-8 減衰力-変位関係

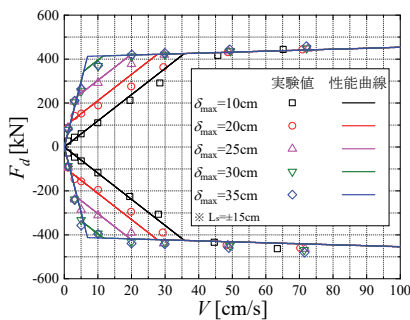


図-9 速度-減衰力関係

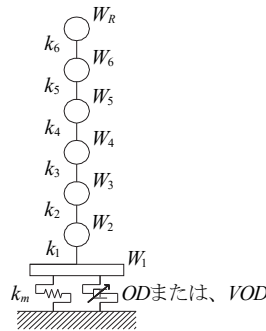


図-10 解析モデル

表-2 各層の重量と水平剛性

層	$W_i$ [kN]	$k_i$ [kN/cm]
R	4180	—
6	3946	1435
5	2615	1592
4	2691	1689
3	2649	1764
2	2380	1879
1	4330	2315
m	—	78

基増設して3基とした場合をCase2、図-9で評価した減衰性能を有するVODを2基設けた場合をCase3とし、最大応答値を比較した。解析モデルは、図-10に示す質点系せん断モデルとした。表-2に、各層の重量および水平剛性を示す。免震層より上層の減衰は初期剛性比例型とし、一次固有円振動数に対して等価減衰定数を2%とした。免震層の内部粘性減衰はないものとし、天然ゴム系積層ゴム支承の復元力とOD、または、VODの減衰力のみを考慮した。図-11に、1基あたりのOD、およびVODの速度と減衰力の関係を示す。

検討用入力地震動は、位相特性が異なる稀に発生する地震(以下、L1)を6波、極めて稀に発生する地震(以下、L2)を6波、および工学的基盤において中京地域の

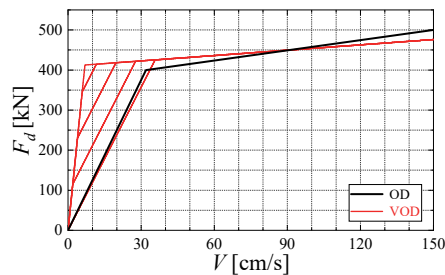


図-11 ダンパー1基あたりの速度-減衰力の関係

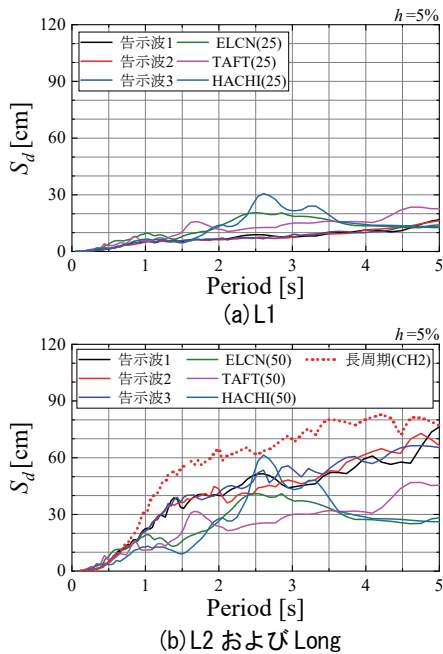


図-12 入力地震動の変位応答スペクトル(h=5%)

表-3 入力地震動の最大値

	最大加速度[cm/s <sup>2</sup> ]			最大速度[cm/s]		
	L1	L2	Long	L1	L2	Long
告示波1	91	293	—	12	52	—
告示波2	89	331	—	16	58	—
告示波3	97	270	—	12	57	—
ELCN	254	508	—	25	50	—
TAFT	248	497	—	25	50	—
HACHI	167	334	—	25	50	—
CH2	—	—	249	—	—	29

CH2 エリア<sup>2)</sup>を想定し、建設地の地盤増幅を考慮した長周期地震動(以下、Long)を1波の計13波とした。検討用入力地震動の変位応答スペクトルを図-12に、最大入力加速度、最大速度を表-3に示す。

#### 4.2 解析結果

免震層の最大水平変位  $\delta_{1max}$  を表-4に示す。また、L1およびL2時における6波全ての各層に生じた応答加速度、層せん断力係数、層間変形角の最大値を図-13~15に示す。なお、ここでは擁壁衝突を考慮した解析を行っていないので、擁壁がない場合の最大応答値であることに注意されたい。Long時における $\delta_{1max}$ は、ODを2基設けたCase1では43.5cmとなり、水平クリアランス以上の変位が生じ、上部構造が擁壁に衝突する。

これに対し、ODを3基設けたCase2では水平クリアランス以下の31.7cmとなり、擁壁衝突を回避した。しかし、図-13~15に示した最大応答値は、L1、L2時ともにCase1に対して最大で25%、平均で15%程度増加し、免震層の最大水平変位を小さくできるが、上部構造の最大応答値が大きくなり、免震性能が低下していることが分かる。

表-4 免震層の最大水平変位  $\delta_{1max}$

		Case1 (OD×2)	Case2 (OD×3)	Case3 (VOD×2)
$\delta_{1max}$ [cm]	L1	8.8	6.9	9.0
	L2	28.9	21.5	26.3
	Long	43.5	31.7	37.6

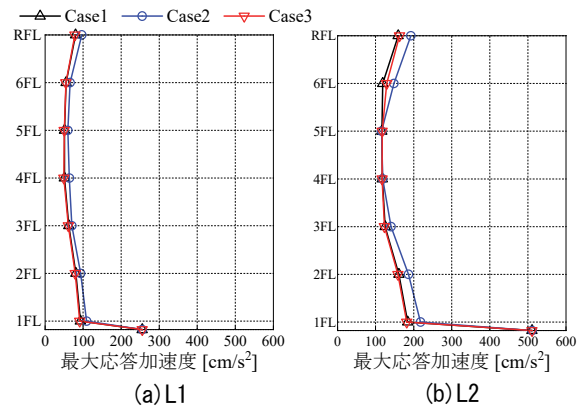


図-13 最大応答加速度

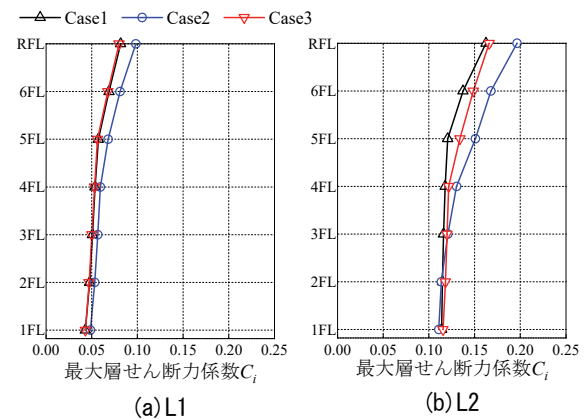


図-14 最大層せん断力係数

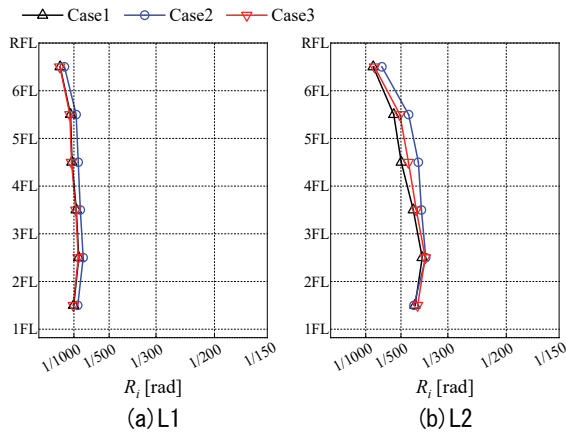


図-15 最大層間変形角

次に、VOD を 2 基設けた Case3 では Long 時の  $\delta_{1max}$  が 37.6cm となり、Case1 に比べて概ね 15%低減することで擁壁衝突を回避し、変位抑制効果があることが確認できた。また、図-13~15 に示した最大応答値は、L1 時に免震層の最大変位が  $L_s$  未満であったため、概ね Case1 と同程度となった。L2 時は  $L_s$  以上の変位が免震層に生じ、Case1 に対して最大で 10%程度大きくなる層があるものの、概ね 5%以下の増加に留まり、同程度の応答値とすることができた。

## 5. まとめ

免震建物に適用可能な最大減衰力 500kN 級の VOD を開発し、減衰力がダンパー変位に応じて変化することを実験により確認した。また、建物に VOD を用いた場合の免震効果を解析的に検討し、対象建物においてはダンパー基数を増加することなく、中地震（稀に発生する地震）や大地震（極めて稀に発生する地震）時の免震性能を損なわず、かつ、長周期地震時の変位抑制効果があることを確認した。

今後は、複数基のダンパーを製作して製造ばらつきなどを確認し、実建物への適用に向けた検討を進める予定である。

## 【謝辞】

(国) 東北大学、(有) シズメテックと (株) 奥村組の共同研究の成果の一部である。東北大学の井上範夫名誉教授、五十子幸樹教授、および、シズメテックの鎮目武治氏、鎮目真喜子氏に感謝を示す。

## 【参考文献】

- 1) 座間信作、「2003 年十勝沖地震にみる石油タンク被害の特徴と対策」、物理探査 第 59 巻第 4 号、pp.353-362、2006
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課、「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」、国住指第 1111 号他、2016.6
- 3) 犬伏徹志、荏本孝久、「免震建物の擁壁衝突時における擁壁部水平抵抗簡易評価法の 1 質点系への縮約」、日本建築学会構造系論文集、第 86 巻、第 783 号、pp.717-726、2021.5
- 4) 根本真孝、渡辺真司、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫、「最適設計手法を用いた性能可変オイルダンパー付き免震住宅の設計、その 1、その 2」、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.355-358、2010.9
- 5) 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、Vol.76、No.660、pp.291-299、2011.2
- 6) Levenberg、K.、「A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares」、Quart. Appl. Math. Vol.2、pp.164-168、1944
- 7) Marquardt、D.、「An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters」、SIAM J. Appl. Math. Vol.11、pp.431-441、1963