

免震建物に適用する過大变位抑制用 性能可変オイルダンパーの開発

— 500kN 級ダンパーの製造ばらつき —

Passive Variable Orifice Damper to Control Excessive Displacement of Seismically Isolated Building

- Manufacturing Variations in 500kN Class Dampers -

小山慶樹* 山上 聡* 洲鎌 星* 舟木秀尊*

要 旨

長周期地震動時に、建物の一次固有周期が長い免震建物では過大な水平変位が免震層に生じる可能性がある。既報¹⁾では、ダンパーの変位に応じて減衰力をパッシブに変化させることで免震層の変位を抑制する、最大減衰力が 500kN 級の性能可変オイルダンパーのプロトタイプを製作し、その性能確認を行った。本報では、複数基の 500kN 級性能可変オイルダンパーの性能確認を行い、製造ばらつきなどを評価した。また、免震建物に性能可変オイルダンパーを適用した解析的検討から、性能可変オイルダンパーの過大变位抑制効果や上部構造の応答性状を示し、その優位性を確認した。

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

1. まえがき

2003 年 9 月の十勝沖地震²⁾などや 2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震³⁾などでは、巨大地震による甚大な被害が生じ、特にその中でも長周期地震動が観測され注目を浴びた。これを受け、2016 年 6 月に「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」⁴⁾が通知され、それまでの設計基準を上回る地震動による構造物の安全性検討が必要となった。

一般に、免震建物は一次固有周期が長く、長周期地震動時に免震層に過大な水平変位が生じる恐れがある。この対策として、免震層に剛性や減衰を付加する方法があるが、上部構造が負担する地震力が増加し、免震性能が損なわれる。これに対して、井上、五十子らは、大きな水平変位が免震層に生じたときにパッシブに減衰力を増加させる性能可変オイルダンパー（以下、VOD）を提案し、戸建免震住宅を対象にその変位抑制効果などを示した⁵⁾など。既報¹⁾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 を開発し、その性能を確認した。本報では、複数基の VOD を製作して減衰性能を確認し、その製造ばらつきを評価した。さらに、VOD の適用効果を解析的検討から確認した。

2. VOD の減衰性能

2.1 VOD の概要

VOD の外観を図-1に、機構模式図を図-2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形シリンダを設置している点である。小形シリンダとガイドロッドの間には、設計者が任意に設定可能なクリアランス L_s があり、 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形シリンダを作動させ、ばね座を押し込み、自動的に減衰力が増加する。なお、地震終了後は、圧縮された調圧弁ばねの復元力により小形シリンダが自動で徐々に押し戻され、性能変化前の減衰特性に戻る。

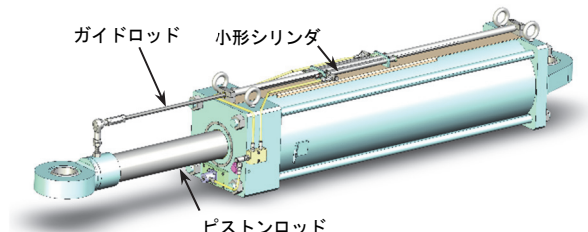


図-1 VOD 外観

* 技術本部技術研究所建築研究グループ

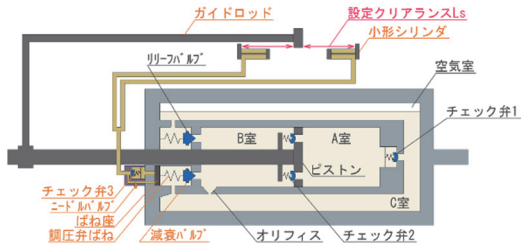


図-2 機構模式図

2.2 作動原理

圧縮時を例として、性能変化前後の作動原理を図-3に示す。本ダンパーは、チェック弁1とチェック弁2の開閉状態を圧縮時、引張時で反転させることで、同一方向に作動油が流れるユニフロー型のオイルダンパーである。図-3(a)、(b)に示すように、性能変化前はチェック弁3が常に閉じた状態で、速度が速くなるとリリーフバルブが開き、減衰力と速度の関係がバイリニア型となる。また、ダンパーの変位が設定クリアランス L_s 以上になると、ガイドロッドと小形シリンダが干渉して、小形シリンダ内に充填された作動油がチェック弁3を開き、小形シリンダの作動距離 X_c に比例して、ばね座が押し込まれ調圧弁ばねを圧縮し、減衰バルブが閉じて、減衰力が増加する。性能変化後は図-3(c)に示すように、チェック弁2とオリフィス部から作動油が流れ、速度が速くなると、図-3(d)に示すように、減衰バルブが開くことで、性能変化前の図-3(a)と同じように作動油が流れる。さらに、速度が速くなると、図-3(e)に示すように、リリーフバルブが開き、性能変化前の図-3(b)と同じように作動油が流れ、減衰力と速度の関係がトリリニアとなる。図-4に、VODの減衰力と速度の関係を示す。ここで、ばね座を押し込んだ作動油はニードルバルブによりその戻り具合が制御され、地震中は変化した性能を保持して、徐々に変化前の性能へ自動で戻る回帰特性がある。なお、本ダンパーは解体することなく、外部からダンパーの減衰性能を調整することが可能である。

3. 性能実験

3.1 基本性能

No.1 から No.4 の計 4 基の 500kN 級 VOD を対象に、性能確認を行った。実験装置の概要を図-5に示す。加振機にダンパーを取り付け、ダンパー変位と小型シリンダの作動距離、ダンパーの減衰力、および、ダンパー表面温度を測定した。入力波は、定常3波の前後に1波のテーパを設けた正弦波とした。ここで、小形シリンダに強制変位を与えるため、ピストンロッドとガイドロッドを切り離した。加振パラメータを表-1に示す。加振周期は 3.0 秒とし、小形シリンダの作動距離 X_c とダンパーロッドの最大速度 V_{max} をパラメータとした。ここで、

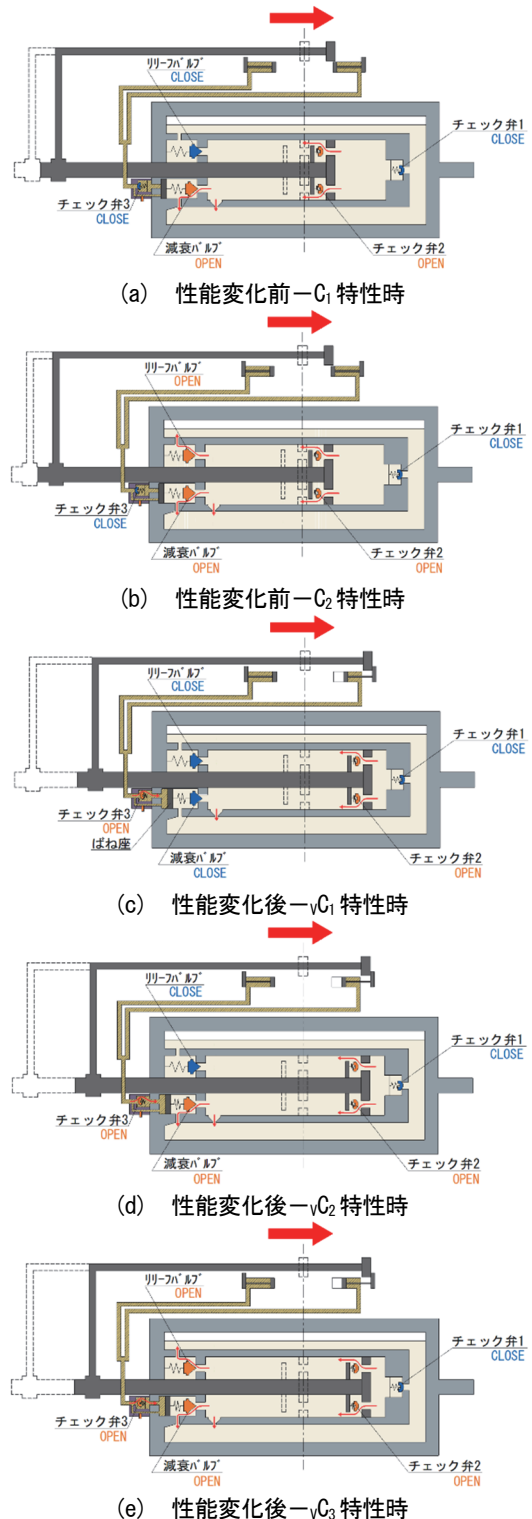


図-3 作動原理(圧縮時)

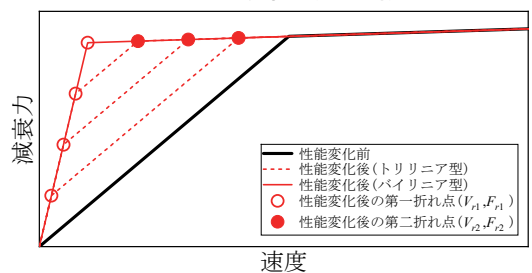


図-4 減衰力と速度の関係

計測のサンプリング周波数は 100Hz とし、0.002Hz から 30Hz のバンドパスフィルタ処理を施し、 $T/20$ の移動平均処理をして平滑化した。この条件下において、定常 3 サイクル目に着目し、ダンパーの減衰性能を評価した。

表-1 加振パラメータ

小形シリンダの作動距離 X_c [cm]	0、5、10、15、20、25	
入力波	最大速度 V_{max} [cm/s]	10、25、50、75
	加振周期 T [s]	3.0

減衰力とダンパー変位の関係を図-6に示す。図より、 V_{max} が 25cm/s 以下の場合には、小形シリンダの作動距離 X_c に応じて減衰力が大きくなっていることが分かる。また、50、75cm/s の場合には、リリースバルブが開き、最大減衰力は小形シリンダの作動距離によらず、概ね一定であることが分かる。次に、図-7に定常 3 サイクル目の正負の最大減衰力と最大速度の関係を示す。なお、図中の実線が設計基準値、破線がばらつきを考慮した設計値である。VOD の基準値諸元を表-2に示す。低速

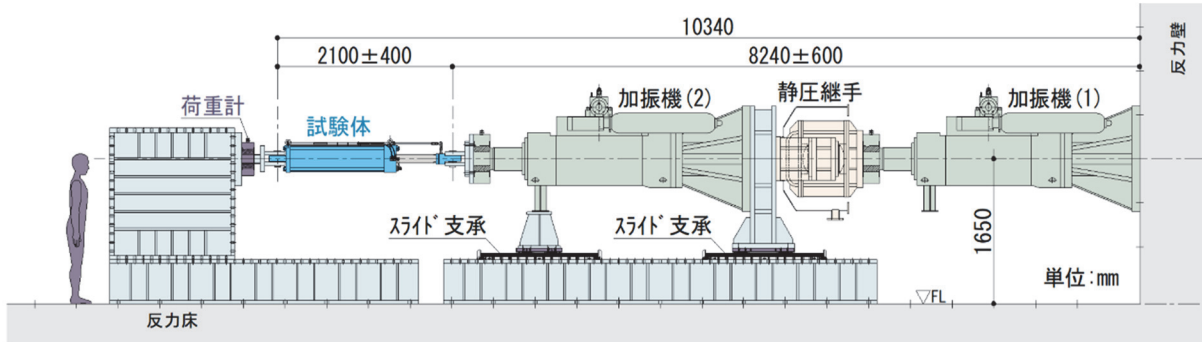


図-5 実験装置の概要

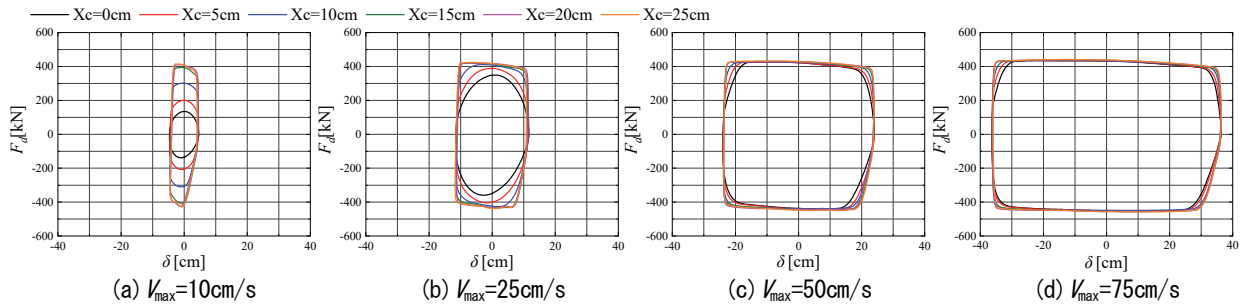


図-6 減衰力とダンパー変位の関係 (No.1、定常 3 ループ目)

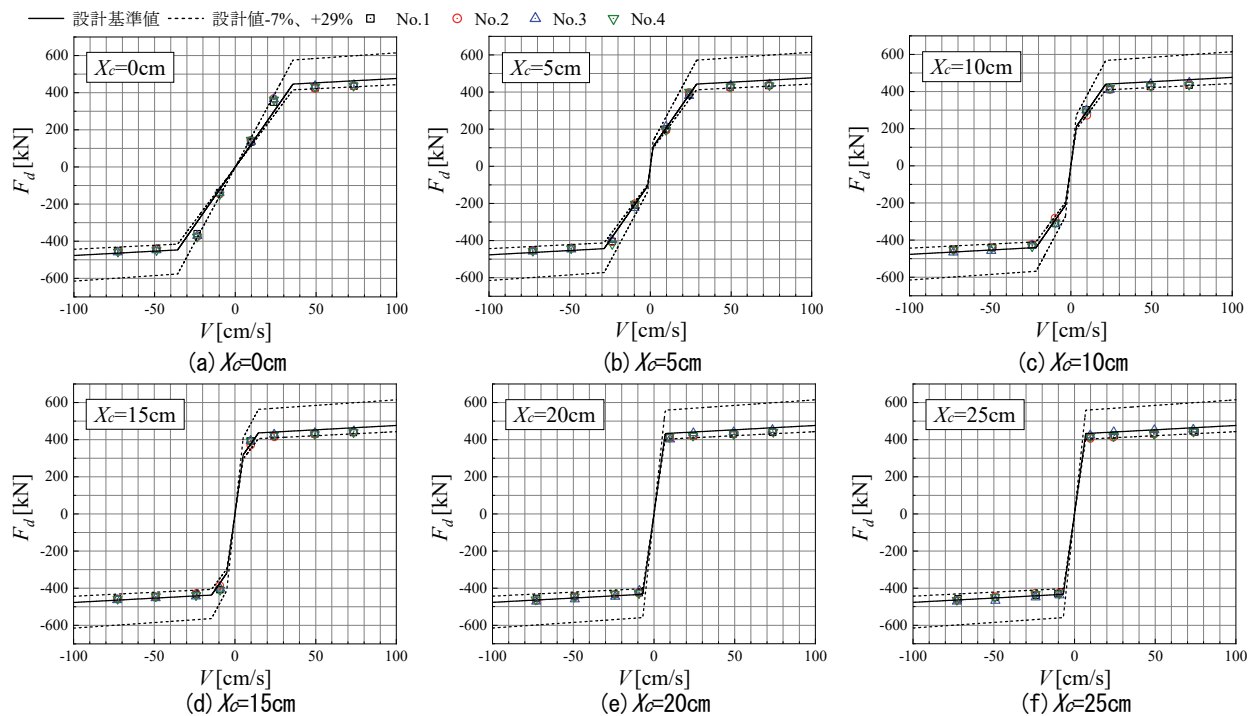


図-7 減衰力と速度の関係

表－2 VODの基準値諸元

設定クリアランス	L_s	15 [cm]
性能変化前の一次減衰係数	C_1	12.5 [kN・s/cm]
性能変化後の一次減衰係数	vC_1	62.5 [kN/cm]
切片減衰力	F_{dd}	430 [kN]
最大減衰力	F_{dmax}	500 [kN]
面積比	α	24.82
調圧弁ばね剛性	K_{sp}	1.475 [kN/cm]
低減倍率	ζ	0.58

域の減衰力は基準値よりも大きくなるように、リリース速度以上の高速域では、建物に過度な力を負担させないために基準値よりも小さくなるように調整した。図より、最大速度が 10、25cm/s の低速域においては、小形シリンダの作動距離 X_c の増加に伴い、減衰力が増加しており、減衰性能が変化していることが分かる。減衰力は 25cm/s 以下の低速域で基準値よりも最大で 29%ほど大きく、50、75cm/s の高速域で基準値よりも最小で 7%ほど小さく調整することができた。

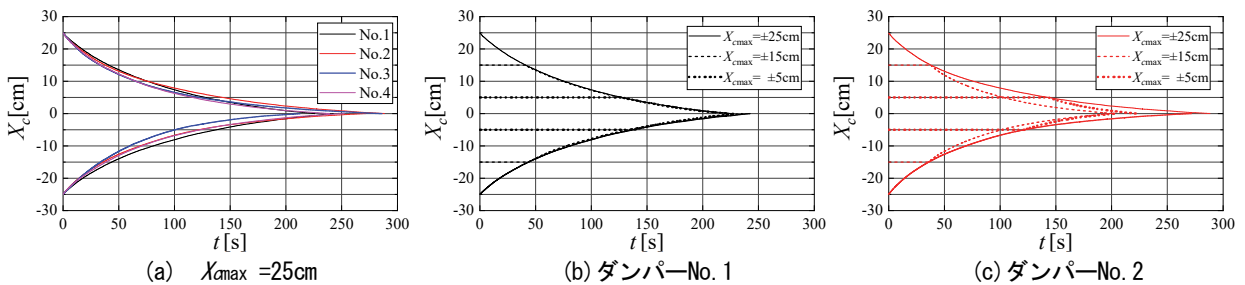
3.2 小形シリンダの回帰特性

小形シリンダが作動すると、その作動距離に応じて減衰性能が変化し、その後、時間をかけて自動で元の位置に戻り、性能変化前の減衰性能に戻る回帰特性がある。ここでは、ダンパー本体のピストンロッドと小形シリンダのガイドロッドを切り離れた状態で、ニードルバルブの開閉状態を調整し、小形シリンダに強制変位 X_{cmax} を与え自由解放し、その回帰特性を確認した。ダンパー全数を対象とし、強制変位 X_{cmax} は 25、15、5cm、引張側(+)、圧縮側(-)で実施した。強制変位 X_{cmax} が ± 25cm

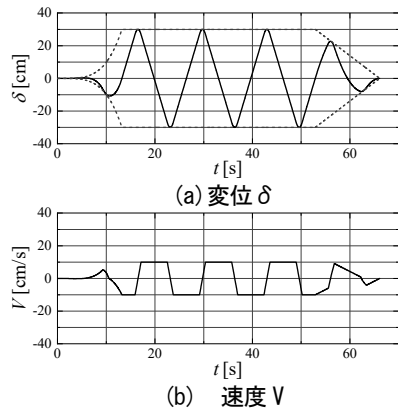
の場合の小形シリンダの回帰特性を図－8 (a) に示す。最短で 226 秒で原点復帰しているが、平均で概ね 270 秒であり、圧縮側・引張側ともに同程度で原点復帰した。また、図－8 (b)、(c) に示すように、強制変位 X_{cmax} によらず、実用上問題のない範囲で回帰性・再現性を有していることが分かった。

3.3 性能変化の時間依存性

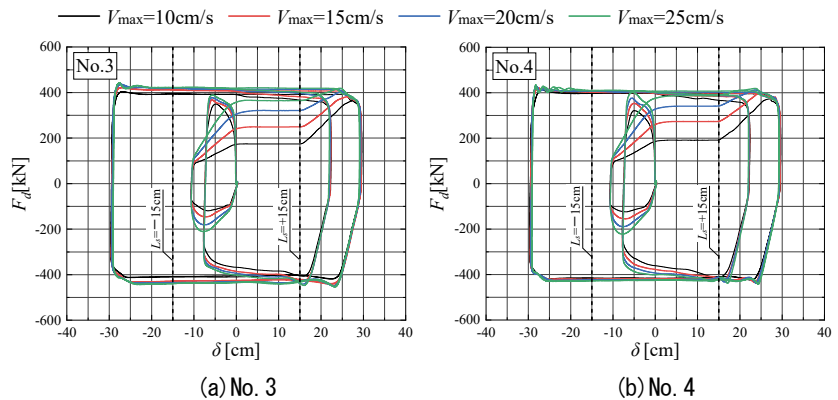
小形シリンダが作動してから、減衰性能が変化するまでの時間遅れ T_L を確認した。No.3 と No.4 のダンパーを対象に、基本性能と同じ実験装置にダンパーを設けた。ここで、ダンパーのシリンダとガイドロッドを連結して、ダンパー変位に応じて小形シリンダが作動するようにした。サンプリング周波数は 2,000Hz とし、減衰力が増加するまでの時間を測定できるように配慮した。加振波は最大変位を 30cm、最大速度を 10、15、20、25cm/s とした三角波とした。なお、入力波の速度符号が切り替わる付近で平滑化処理を行い、試験機に過度な加速度が生じないように配慮した。また、加振波は定常 3 サイクルの前後に 1 サイクル分のテーパを設け、定常になる前のテーパ部の変位が L_s (=15cm) 以下になるように設定し、テーパ部で小形シリンダが作動しないようにした。図－9 に入力した加振波の一例を、図－10 にダンパー変位と減衰力の関係を示す。図より、最大速度の違いによらず、ダンパー変位が 15cm を超えた時点で減衰力が増加し、減衰性能が変化していることが分かる。次に、減衰力 F_d と小形シリンダの作動距離 X_c の時刻歴を図－11 に示す。最大速度が速いほど、 T_L が短くなる傾向を示すが、最大でも 0.05 秒以下であることを確認した。



図－8 小形シリンダの回帰特性



図－9 三角波 ($V_{max}=10\text{cm/s}$)



図－10 ダンパー変位と減衰力の関係

次に、ダンパーNo.4 に図-12(a)に示した長周期地震動を想定した変位波形 δ を入力し、減衰性能が変化するまでの時間遅れ T_L がダンパーの履歴吸収エネルギーに与える影響について検討した。小形シリンダの作動距離 X_c の時刻歴波形の測定結果を、図-12(b)に示す。ここで、 X_c は圧縮側と引張側の絶対値の和として図示している。測定した δ と X_c を用いて、測定した減衰力と算定した減衰力の差が最も小さくなるようにフィッティングさせ、製造ばらつきを+1.7%として減衰力を算定した。図-12(c)、(d)に、減衰力および履歴吸収エネルギーの時刻歴を示す。図中の黒線が測定結果、青線が T_L を考慮しない場合、赤線が 0.05 秒の T_L を考慮した場合を示す。図より、 T_L を考慮しない場合の履歴吸収エネルギーは測定結果の -2.91%、 T_L を考慮した場合は -2.96%となり、 T_L の有無による影響は極めて僅かであることが確認できた。

4. VOD の変位抑制効果と上部構造の最大応答値

4.1 解析モデルと検討用入力地震動

解析モデルは図-13に示した7質点系せん断モデルとし、免震層の水平クリアランスを 40cm とした。免震層には免震装置以外の内部粘性減衰はないものとし、上部

構造の減衰には、免震層固定時の一次固有円振動数に対して 2%の剛性比例型の内部粘性減衰を考慮した。免震層の水平剛性は弾性とし、支承材の製造ばらつき、温度依存性、経年変化などの特性変動を考慮した。一次固有周期は標準特性時で概ね 3.6 秒、最小特性時で 3.9 秒、最大特性時で 3.3 秒である。また、オイルダンパー（以下、OD）を 2 基設けた場合を Case1、1 基増設して 3 基とした場合を Case2、VOD を 2 基設けた場合を Case3 とし、最大応答値を比較した。図-14に OD と VOD の基準性能を示す。ここで、OD は $\pm 15\%$ の製造ばらつきを考慮し、VOD は 3章で示した基準値に対するばらつきを用いて、最大特性時は +29%、最小特性時は -7%の製造ばらつきを考慮した。さらに、免震層の最大水平変位を安全側に評価するため、測定した小形シリンダの回帰特性よりも早く戻る図-15 の回帰特性を用いて、時刻歴応答解析を行った。数値積分法には、Newmark- β 法 ($\beta=1/6$) を用いた。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 CH2 エリア⁴⁾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最大加速度、最大速度を表-3に、加速度応答スペクトルを図-16に示す。

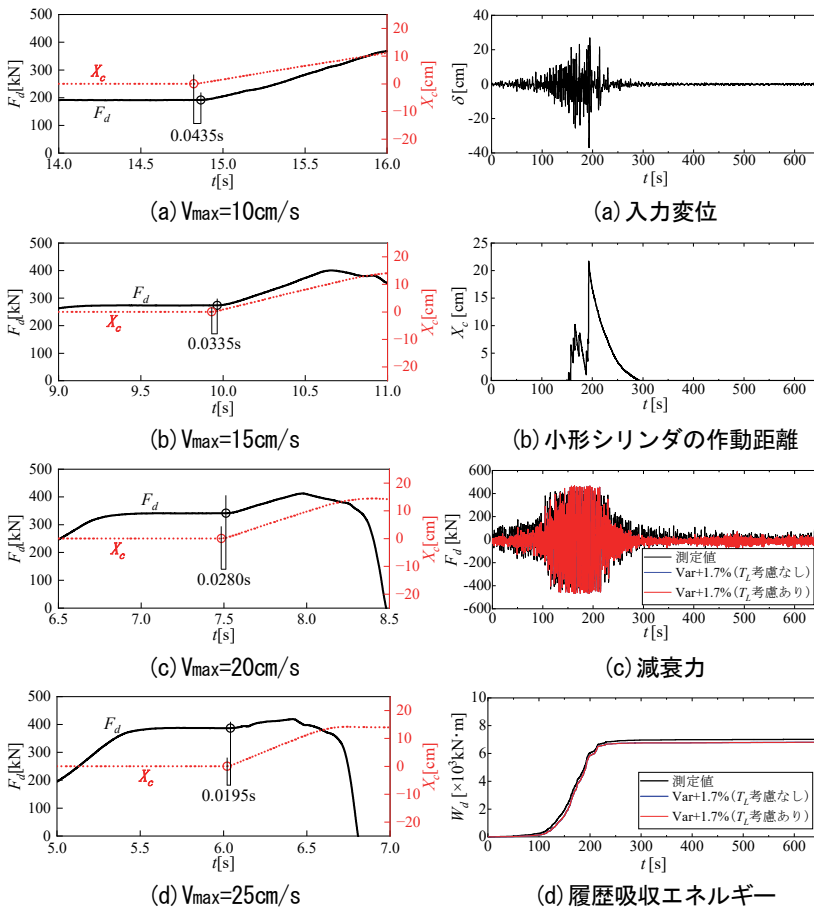


図-11 減衰力と小形シリンダの作動距離の時刻歴 (No. 4)

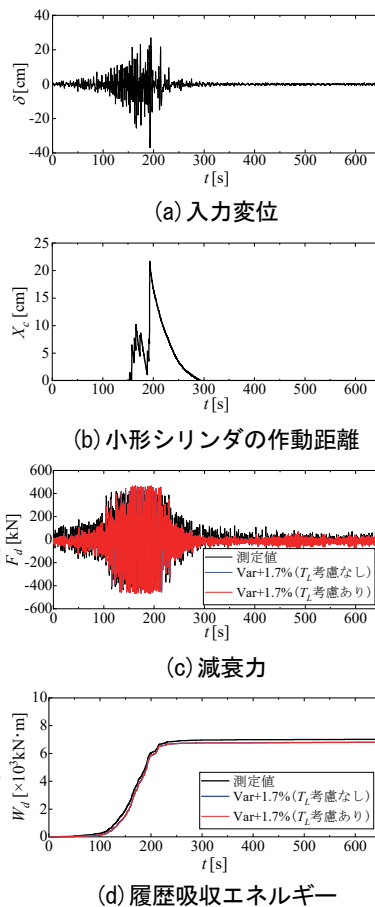


図-12 減衰性能が変化するまでの時間遅れの影響

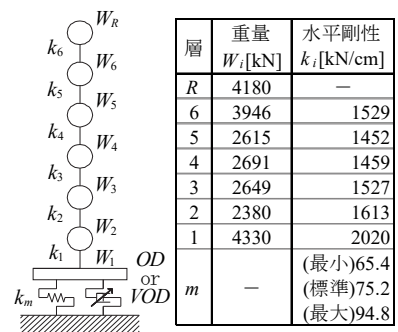


図-13 解析モデル

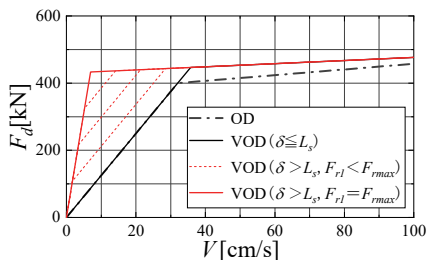


図-14 OD と VOD の基準性能

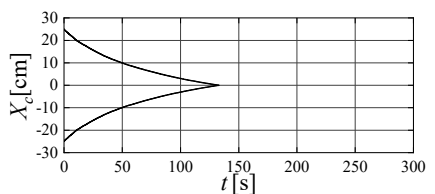


図-15 小形シリンダの回帰特性

4.2 解析結果

Long時に生じた免震層の最大水平変位 δ_{1max} を表-4に示す。標準特性の場合、免震層の最大水平変位はCase1に比べCase2では概ね26%減、Case3では概ね12%減となり、ダンパーの変位抑制効果が確認できた。次に、Case1の場合のL1(6波)、L2(6波)時における各層の最大応答値を基準とし、Case2、Case3の上部構造の最大応答倍率 η を求めた。図-17に、最大加速度、最大層せん断力係数、最大層間変形角の応答倍率 η を示す。Case2はLong時の免震層変位を小さくするためにODを1基追加していることから、L1やL2時にも免震層が負担する減衰力が大きくなり、上部構造の最大応答値がCase1に比べ、平均で17%ほど大きくなった。これに対して、Case3のVODの場合は、L1時では免震層の最大水平変位が L_s (=15cm)未満であることから、標準特性時はCase1と同じ最大応答値となった。また、L2時では免震層の最大水平変位が L_s 以上となり減衰力が増加しているが、最大応答値は3%程度の増加に留まり、概ねCase1と同程度であることが分かった。

5. まとめ

4基のVODの性能確認を行い、個体間のばらつきが少ないことを確認し、設計基準値に対する減衰力の製造ばらつきを評価した。また、小形シリンダの回帰特性および減衰性能が変化するまでの時間遅れを確認した。次に、算定した減衰力のばらつき、および小形シリンダの

回帰特性を考慮した時刻歴応答解析を行い、対象建物において、VODを用いた場合、稀に発生する地震や極めて稀に発生する地震動時には上部構造の最大応答値が抑えられ、長周期地震動時には、免震層の最大水平変位が抑制されることを確認した。

6. あとがき

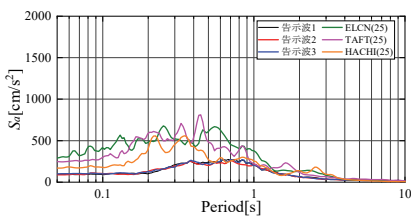
(国) 東北大学、(有) シズメテックと(株) 奥村組の共同研究の成果の一部である。東北大学の井上範夫名誉教授、五十子幸樹教授、および、シズメテックの鎮目武治氏、鎮目真喜子氏に感謝を示す。

【参考文献】

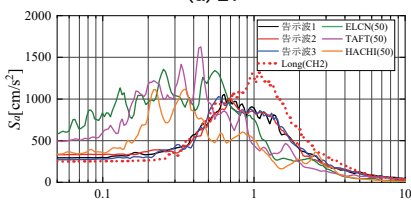
- 1) 小山慶樹、山上 聡、舟木秀尊、「免震建物に適用する過大変位抑制用性能可変オイルダンパーの開発(500kN級ダンパーの性能確認)」、奥村組技術研究年報、No.48、2022.9
- 2) 平田編、「平成15年(2003年)十勝沖地震に関する緊急調査研究報告書」、東京大学地震研究所、2004
- 3) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告、国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所、2012.3
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課、「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」、国住指第1111号他、2016.6
- 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

表-3 入力地震動の最大値一覧

	最大加速度[cm/s ²]			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	—
TAFI	248	497	—	25	50	—
HACHI	167	334	—	25	50	—
Long(CH2)	—	—	249	—	—	57



(a) L1

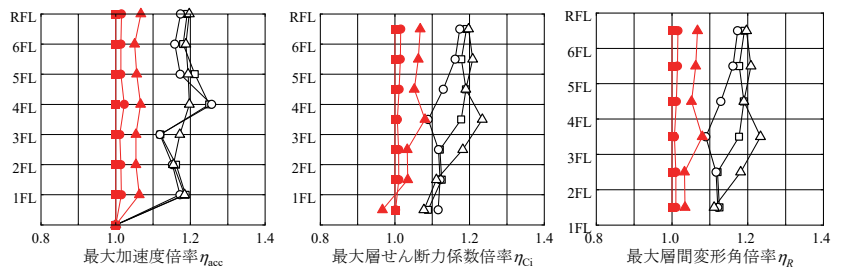


(b) L2+Long

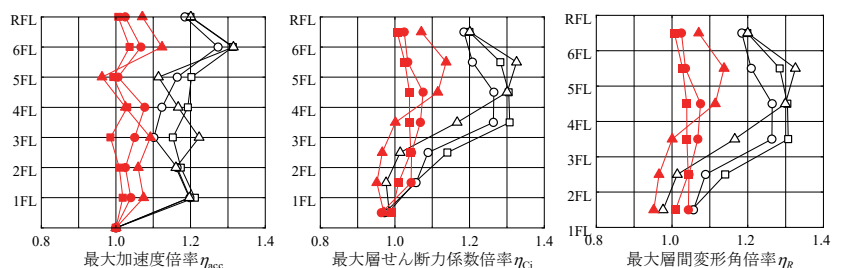
図-16 入力地震動の加速度応答スペクトル(h=0.05)

表-4 免震層の最大水平変位 (Long(CH2))

Long (CH2)	免震層の最大水平変位 δ_{1max} [cm]		
	最小特性	標準特性	最大特性
Case1(OD2)	44.2	43.6	40.7
Case2(OD3)	35.4	32.1	28.8
Case3(VOD2)	38.8	38.5	31.6



(a) L1



(b) L2

図-17 最大値の応答倍率 η