

大振幅地震動に対する免震用複合ダンパーの研究

荻野伸行* 北川麻記** 白鳥和希**

大振幅地震動に対する免震構造の応答変位抑制として、様々な開発が進められているが、その対策の一つとして、熊谷組技術研究報告 76 号では、速度切り替えを多段にする改良型オイルダンパーの開発について報告している。一方、2016 年の熊本地震では、震源近傍で長周期成分が卓越するパルス状の強い地震動が観測されている。これらは、免震構造にとっても、非常に厳しい地震動となっており、現在の免震部材の限界性能を超えるものとなる。その解決策として、オイルダンパーと摩擦ダンパーを組み合わせた複合ダンパーを適用した場合の時刻歴応答解析による検討結果について報告する。

キーワード：オイルダンパー、摩擦ダンパー、長周期地震動、直下型地震、長周期パルス、復元材

1. はじめに

設計領域を超えるような大振幅地震動に対する免震構造の極限事象は、免震層の応答変位の増大により、最終的には上部建物が擁壁に衝突するか、免震部材が損傷（限界変形・限界速度・引張破断・座屈等）すると考えられる。これらの対策技術としては、Fig.1 に示すように、擁壁の衝突を許容する技術（高精度解析技術・衝撃緩衝材）と許容しない技術（フェイルセーフ・応答変位抑制・大変形免震部材）に大別できる。

そこで、筆者らは、熊谷組技術研究報告 76 号²⁾において、擁壁の衝突を回避し、かつ、設計領域では、従来の免震効果を確保し、大振幅地震動の領域で変位を抑制する応答変位抑制技術として、速度切り替えを多段にする改良型オイルダンパー（以下、多段速度依存型可変減衰オイルダンパー）について、試作機による実験的検証や時刻歴応答解析による免震効果を確認した。

可変減衰オイルダンパーは、変位依存型と本開発の速度依存型に分けられるが、本オイルダンパーは、本来のオイルダンパーの機構（バルブ設計のみ）を活かすことで、大幅に改造することなく、目標性能を実現できることに特徴をもっている。

一方、2016 年の熊本地震では、震源近傍で長周期成分が卓越するパルス状の強い地震動（以下、長周期パルス）が観測されている。これらは、免震構造にとっても、非常に厳しい地震動となっており、応答変位や応答速度は、現在の免震部材の限界性能を超えるものとなる。

本報告では、その解決策として、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを組み合わせた複合ダンパーを適用した場合の時刻歴応答解析による検討結果について報告する。

* 建築事業本部 設計本部
** 建築事業本部 設計本部 耐震設計部 耐震設計グループ

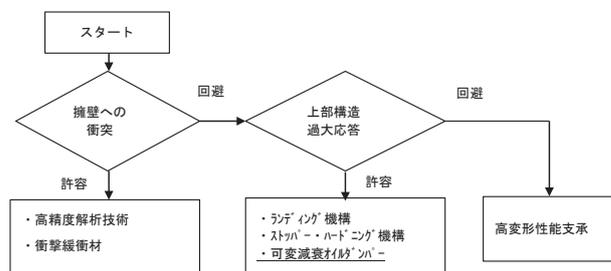


Fig.1 大振幅地震動に対する対策技術の分類

2. 複合ダンパーの概要

免震用オイルダンパーの限界速度は、100~150cm/s であり、バルブの設計・製作の制約で、200cm/s を超えるものは現在、製品化されていない。一方、長周期パルスを想定した場合の免震構造の応答速度は 200cm/s を超える場合がある。ストッパーや擁壁に衝突させる設計もその対策の一つであるが、ここでは、免震効果を大速度・大振幅領域でも確保できるダンパーとして、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを直列に設置し、設定速度を超えると摩擦ダンパーにパッシブで切り換わるシステムを考案する。解析モデルを Fig.2 に、複合ダンパーの概念図を Fig.3 に示す。

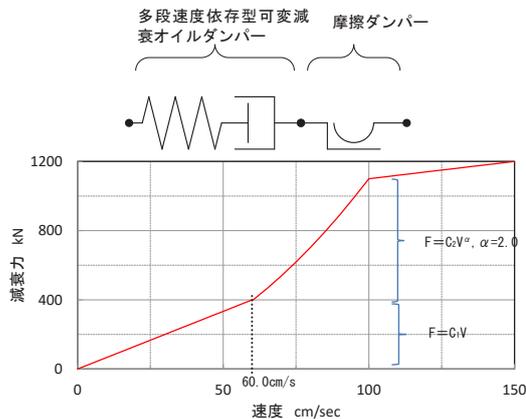


Fig.2 複合ダンパーの解析モデル

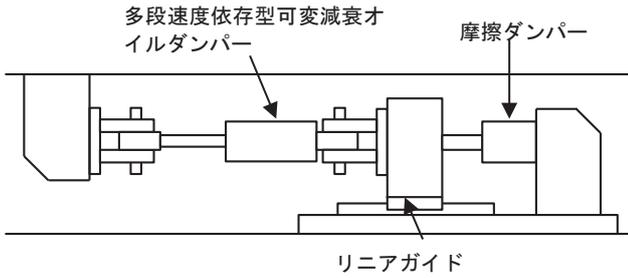


Fig. 3 複合ダンパー概念図

3. 時刻歴応答解析

3. 1 検討建物

検討対象建物は、文献³⁾の第3期免震建物モデル15階建てRC造の基礎免震構造とする。

建物総重量、等価固有周期、免震層の降伏せん断力係数は、各々123,186KN, 4.09s (40cm 変形時), $\alpha_s=0.03$ である。なお、基本モデルの免震部材は、高減衰ゴム系積層ゴム (X0.6R タイプ) を用いる。

Fig.4 に検討建物概要を示す。

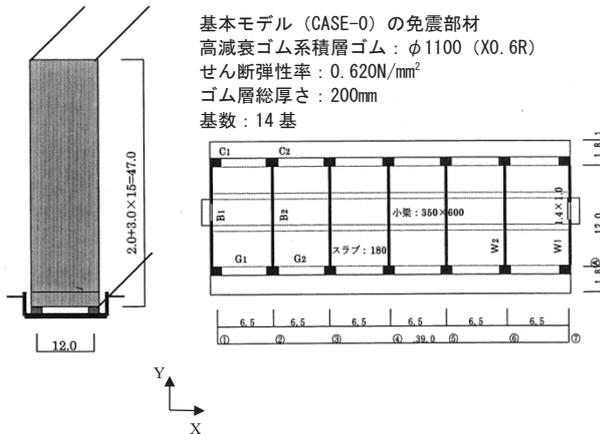


Fig. 4 検討建物 (RC15/O)

3. 2 入力地震動

検討用地震波としては、長周期地震動として、文献⁴⁾⁵⁾による大阪地区と中部地区の4波を、内陸直下型地震は、文献⁶⁾による、上町断層 A4 ゾーン(レベル3C)と2016/4/16の熊本地震における K-net 一宮 EW, 長周期パルスを含む西原村小森 EW の3波を、さらに告示波 (乱数) 1波の合計8波とする。地震波一覧を Table1 に、擬似速度応答スペクトルを Fig.5 に、エネルギースペクトルを Fig.6 に示す。また、西原村小森 EW の加速度および速度時刻歴波形を Fig.7 に示す。

西原村小森 EW は、断層近傍での観測記録であることから、20~30 秒付近に非常に強い長周期パルスが発生しており、最大速度で約 240cm/s, 擬似速度応答スペクトルで約 360cm/s, エネルギースペクトルで 500cm/s 程度の強さ

を持っており、一般的な設計用入力地震動を遥かに上回ったものとなっている。

Table 1 地震波一覧

地震波	略称	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	継続時間 (s)
南海トラフ(基盤促波)	OS1	263.0	45.9	655.3
南海トラフ(基盤促波)	CH1	265.0	59.4	655.3
南海トラフ	OSKH02(4連動)	133.0	58.0	640.0
南海トラフ	A1C003 (4連動)	545.4	68.6	640.0
上町断層(大震研)	UMTA4C2EW1	625.0	129.0	41.0
熊本地震(2016)	KMM004EW	346.7	80.5	300.0
熊本地震(2016) <熊本県>	西原村小森EW	770.5	239.6	120.0
告示波(工学的基盤)	告示波AWL2	347.8	52.7	120.0

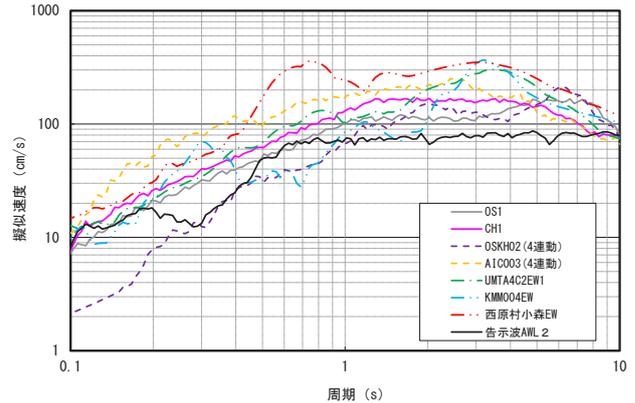


Fig. 5 擬似速度応答スペクトル

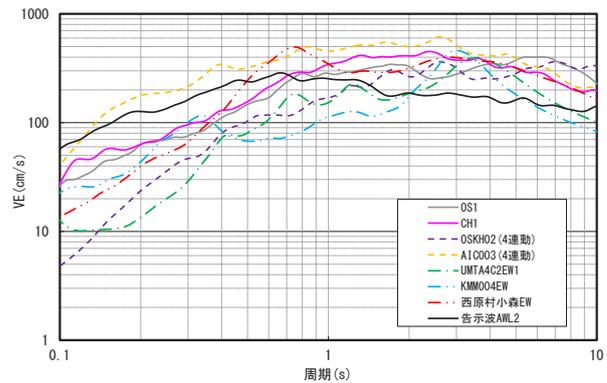


Fig. 6 エネルギースペクトル

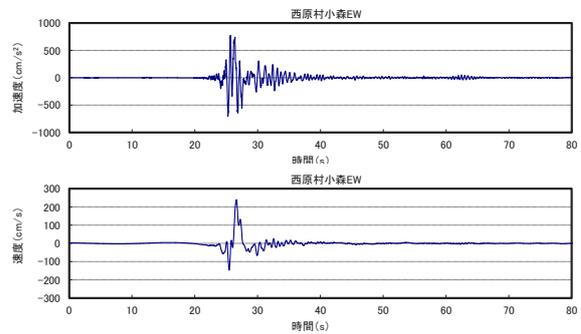


Fig. 7 西原村小森 EW の加速度・速度時刻歴波形

3. 3 解析モデルおよび検討ケース

解析モデルは、1 柱列多質点系モデルの等価せん断型モデルとし、支承材および復元材は、高減衰ゴム系積層ゴムを採用するため、ハードニングと低面圧下の復元力モデル (復元材: 1Mpa) を考慮できる Kikuchi-Aiken モデル

を用いた⁷⁾、Table2 に低面圧下の高減衰ゴム系積層ゴム支承のせん断復元力パラメータの評価式一覧を示す。

Table 2 せん断復元力パラメータの評価式一覧

$$Geq \text{ (Mpa)} = \begin{cases} 0.671\gamma^{-0.413} & (0.05 \leq \gamma < 1.1) \\ 0.992 - 0.458\gamma + 0.142\gamma^2 - 0.0112\gamma^3 & (1.1 \leq \gamma \leq 4.0) \end{cases}$$

$$heq = 0.219 - 0.0213\gamma - 0.00133\gamma^2 \quad (0.05 \leq \gamma \leq 4.0)$$

$$u = 0.442 - 0.0912\gamma + 0.00300\gamma^2 \quad (0.05 \leq \gamma \leq 4.0)$$

$$n = \begin{cases} 1 & (0.05 \leq \gamma \leq 1.5) \\ 2.11 - 1.62\gamma + 0.585\gamma^2 & (1.5 < \gamma < 4.0) \end{cases}$$

ただし $\gamma > 1.3$ では $a = 10.4$ (const.)
 $\gamma \leq 1.3$ では $b = 0.0$ (const.)
 $c = 6.0$ (const.) $(0.05 \leq \gamma \leq 4.0)$

ここで、 Geq : 等価せん断弾性率、 γ : せん断ひずみ、
 heq : 等価粘性減衰定数、 u : 降伏荷重特性比、 a, b, c, n : 履歴ループ形状パラメータ

検討ケース一覧を Table3 に示す。CASE-0 は、一般的な免震構造(基本モデル)として高減衰積層ゴム(X0.6R, h=200mm)を14基設置している。また、CASE-1は、免震効果と積層ゴム支承の限界性能の向上を図ったケースとして、天然ゴム系積層ゴム(G4, h=250mm)と高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R, h=250mm)に、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを適用した場合を、CASE-2, 3は、長周期パルス対策として、支承材を低摩擦型の弾性すべり支承、復元材に1300φのX0.6R(ゴム総厚:60cm, $\gamma=250\% : 1.5m$)を6基想定し、CASE-2は、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを、CASE-3は複合ダンパーをそれぞれ組み合わせた。

また、CASE-3については、摩擦ダンパーの1基当りの摩擦力を800kN~1200kNに変化させた場合、上部構造の応答を改善するために制振装置を設置した場合、既存オイルダンパーとの比較の検討を行った。さらにCASE-3Aについては、複合ダンパーの温度上昇と残留変位を把握するために、本震後に観測されている余震(震度5強)の影響を確認した。

Table 3 検討ケース一覧

免震部材	減衰力特性
CASE-0 HDR (14基) H=200mm	
CASE-1 NRB (6基)+HDR (8基)+ODI(10基) H=250mm	仕様1 (タイプB)
CASE-2 ESL (14基)+復元材 (6基)+ODI(10基)	仕様1 (タイプB)
CASE-3A ESL (14基)+復元材 (6基)+複合ダンパー(10基) <ODI+FD>	仕様1 (タイプB) + 摩擦ダンパー(1200kN)
CASE-3B ESL (14基)+復元材 (6基)+複合ダンパー(10基) <ODI+FD>	仕様1 (タイプB) + 摩擦ダンパー(1000kN)
CASE-3C ESL (14基)+復元材 (6基)+複合ダンパー(10基) <ODI+FD>	仕様1 (タイプB) + 摩擦ダンパー(800kN)
CASE-3D ESL (14基)+復元材 (6基)+複合ダンパー(10基)+制振 <ODI+FD>	仕様1 (タイプB) + 摩擦ダンパー(1200kN)
CASE-3E ESL (14基)+復元材 (6基)+複合ダンパー(10基) <ODI+FD>	既存オイルダンパー+摩擦ダンパー(1000kN)

NRB : 天然ゴム系積層ゴム支承、HDR : 高減衰ゴム系積層ゴム支承、ESL : 弾性すべり支承 ($\mu=0.03$) H : ゴム総厚
 ODI : 改良型オイルダンパー仕様1、OD2 : オイルダンパー (n 4型2層) FD : 摩擦ダンパー (摩擦力800~1200kN)
 制振 : オイルダンパー2000kN 1~8層に1~2基設置

3. 4 解析結果

(1)複合ダンパーの性能

各入力地震動に対する免震層の最大応答速度をFig.8に、最大応答分布をFig.9, 10に、各検討ケースの免震部材の復元力特性をFig.11~16に示す。一般的な免震構造(CASE-0)だけでなく、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを適用した場合(CASE-1)においても、ハードニング領域となる地震波では、層間変形角は1/16と大きく、最大速度も201cm/sで限界速度を上回る。一方、復元材と複合ダンパーを採用した場合(CASE-3A)の最大応答変位は129cm ($\gamma=215\%$)となるが、ハードニングを生じない範囲であり、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーの最大速度は、各々148cm/s, 74cm/sで限界速度以下となっており、免震効果も確保できている。摩擦ダンパーの摩擦力を変化させたケースでは、800kNでの変位は、1200kNに比較して15cm増加するが、上部構造の層間変形角は1/127となる。

複合ダンパーは、設定した摩擦力でオイルダンパーの減衰力が頭打ちになるため、履歴ループは矩形に近くなる。一方、摩擦力を小さくすると、摩擦ダンパーの寄与率が高くなるため、変位の分担も大きくなる。

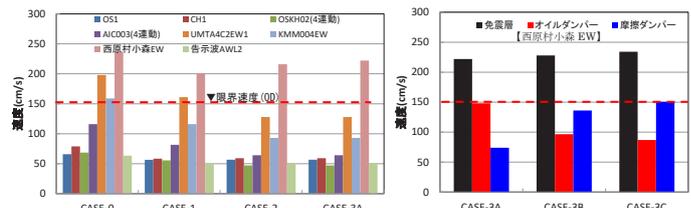


Fig. 8 免震層の最大応答速度

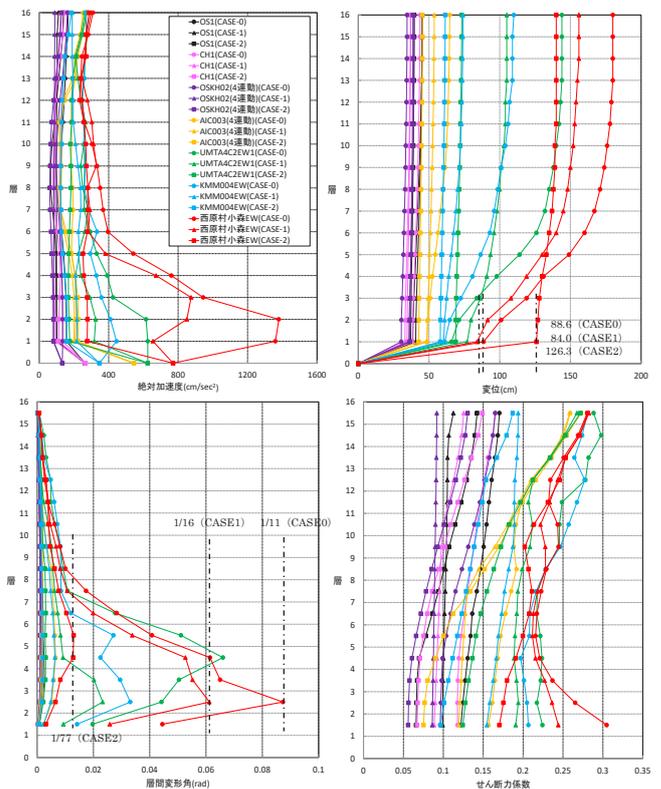


Fig. 9 最大応答分布図 (CASE-0, CASE-1, CASE-2)

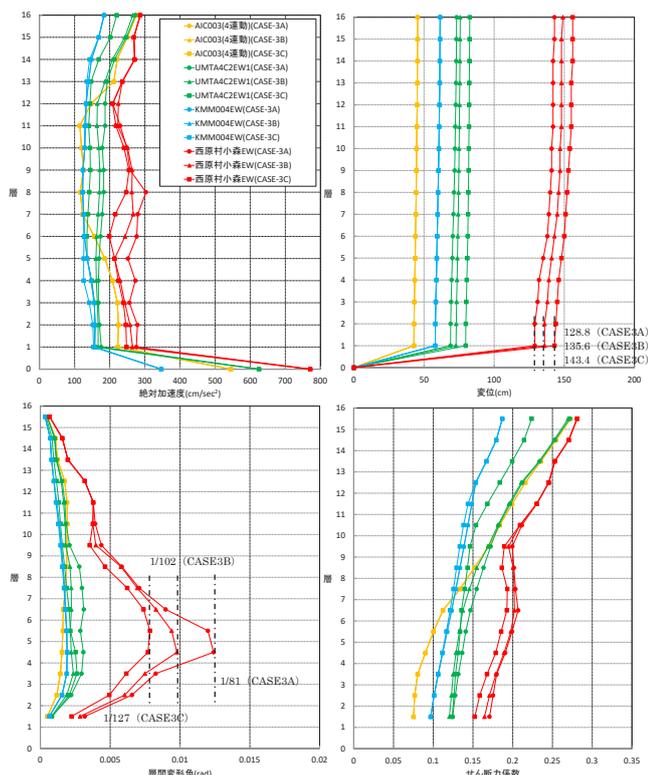


Fig. 10 最大応答分布図 (CASE-3A, CASE-3B, CASE-3C)

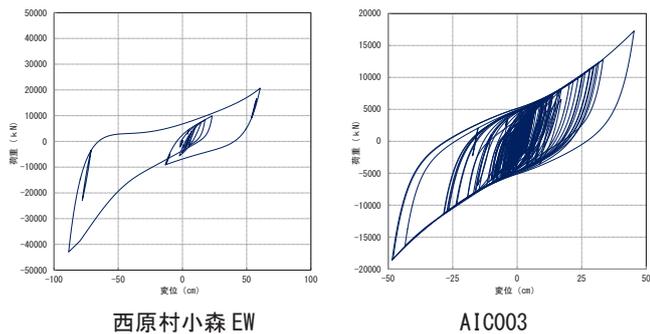


Fig. 11 HDR の復元力特性 (CASE-0)

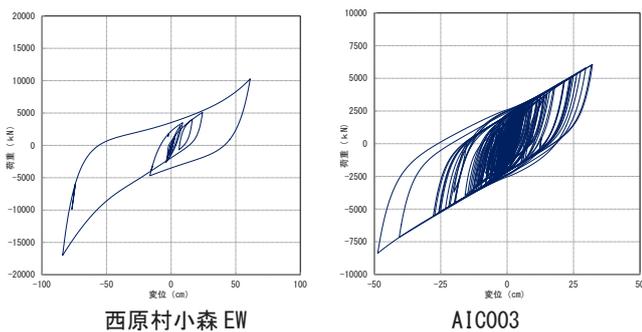


Fig. 12 HDR の復元力特性 (CASE-1)

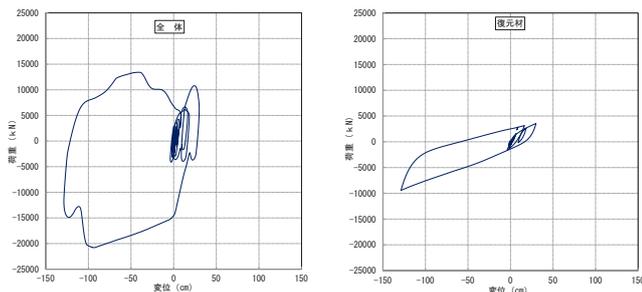


Fig. 13 全体・復元材の復元力特性 (CASE-3A : 西原村小森 EW)

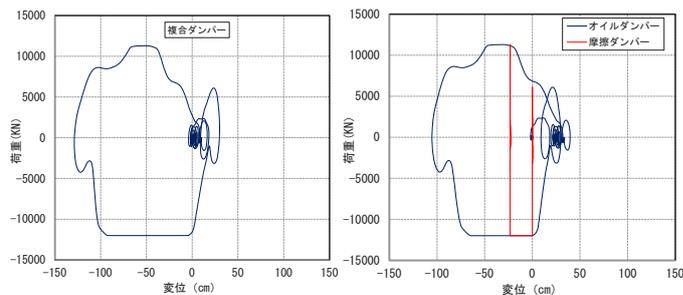


Fig. 14 複合ダンパーの履歴特性 (CASE-3A : 西原村小森 EW)

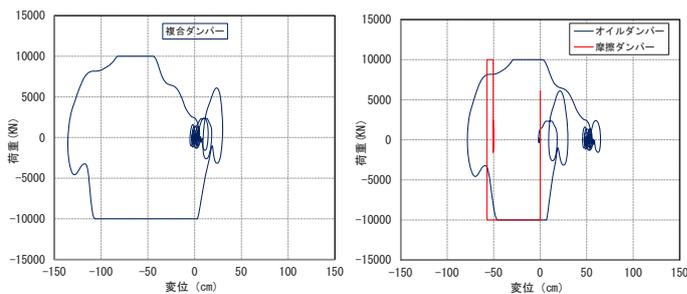


Fig. 15 複合ダンパーの履歴特性 (CASE-3B : 西原村小森 EW)

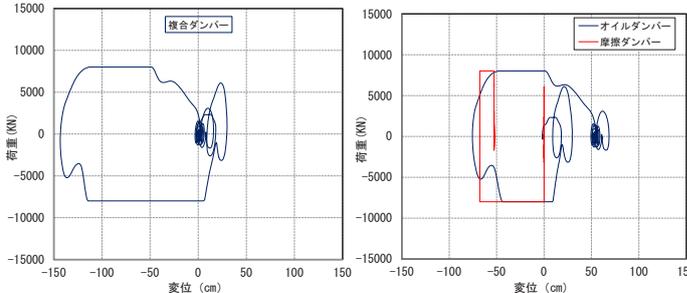


Fig. 16 複合ダンパーの履歴特性 (CASE-3C : 西原村小森 EW)

(2) 制振装置の効果と既存オイルダンパーとの比較

制振装置を付加した場合と既存のオイルダンパーを採用した場合の最大応答分布図を Fig.17 に示す. CASE-3A においても僅かな制振装置を付加することで上部構造の応答は改善できる. したがって, 大振幅地震動では, 免震構造と制振構造の併用も有効な対策と考えられる.

複合ダンパーに用いるオイルダンパーは, 長周期パルス of 西原村小森 EW と設計領域での地震波 (告示波) の双方において, 既存オイルダンパーよりも多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの方が免震効果が高い.

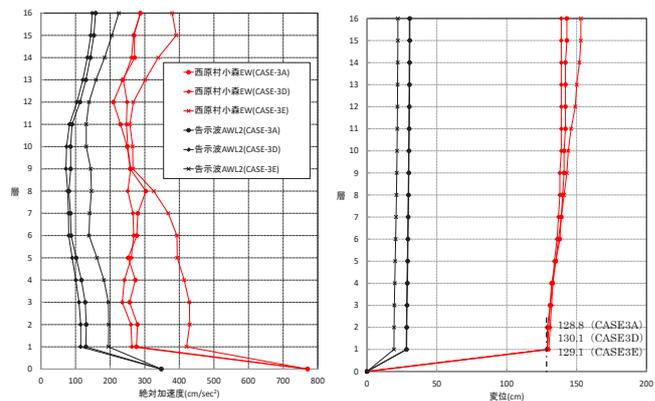


Fig. 17(1) 最大応答分布図 (CASE-3A, CASE-3D, CASE-3E)

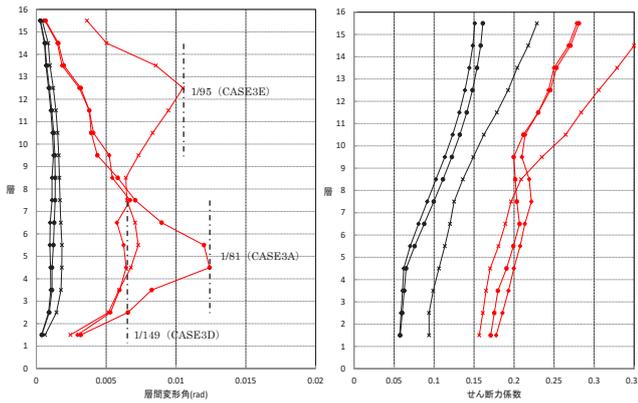


Fig. 17(2) 最大応答分布図 (CASE-3A, CASE-3D, CASE-3E)

(3) 残留変位と温度上昇

CASE-3, 西原村小森 EW の複合ダンパーの免震層の変位時刻歴波形を Fig.18 に, CASE-3A の本震と余震を考慮した免震層の変位時刻歴波形を Fig.19 に示す.

CASE-3A の免震層の残留変位は, 西原村小森 EW では, 0.7cm 程度となるが, オイルダンパーと摩擦ダンパーの残留変位は 24cm 程度生じている. 摩擦力を小さくすると免震層の残留変位の差はないが, 個々のダンパーの残留変位は大きくなる傾向がある. したがって, 複合ダンパーは, 地震後に残留変位を容易に元の位置に戻す機構が必要となる. なお, 本震後の余震では, 残留変位の増加はみられない.

最大累積吸収エネルギー量を示した AIC003 における, オイルダンパーの温度上昇シミュレーション解析結果を Fig.20 に, 累積吸収エネルギー量を Fig.21 に示す.

複合ダンパーのオイルダンパーの温度上昇 (精算法) は 7.7°C (表面温度 27.7°C : AIC003) であり, 限界温度 80°C 以下となっている. 一方, 放熱を考慮しない場合の温度上昇は, 簡易法として $t = Ed/C$ で求まることから, 7.8°C となり, 双方の差は殆ど見られない. したがって, 地震時のオイルダンパーの温度上昇推定については, 簡易法でも概略推定可能と考えられる.

精算法による温度上昇シミュレーションは, 文献⁸⁾により, 以下の考え方に基づいて算定している.

微小時間 $d\tau$ に対象物の温度が dt だけ上がったとすると, この時間内の発熱量 $Q \cdot d\tau$ から放熱量 $U(t - t_a) \cdot F \cdot d\tau$ を差引いた残りが, dt なる温度上昇に預かった発熱量と考える. すなわちオイルダンパーの温度 t は, 式(2), (3)を用いて式(1)の微分方程式を逐次数値積分することで得られる.

$$Cdt = Qd\tau - U(t - t_a)Fd\tau \quad (1)$$

$$E_d = F_d \dot{x} \cdot d\tau \quad (2)$$

$$E_d = Q \cdot d\tau \quad (3)$$

また, 熱容量 C は式(4)として与えられる.

$$C = V_S \rho_S C_S + V_O \rho_O C_O \quad (4)$$

ここで,

t : 温度 [°C], t_a : 周囲温度 [°C], V : 体積 [m³]

F : 表面積 [m²], ρ : 密度 [kg/m³], C_p : 比熱 [kJ/(kg·°C)],

C : 熱容量 = $V\rho C_p$ [kJ/°C]

U : 熱伝達係数 [kJ/(m²·h·°C)]

Q : 発熱量 [kJ/h], τ : 経過時間 [h], E_d : 総減衰エネルギー [kJ (KN·m)]

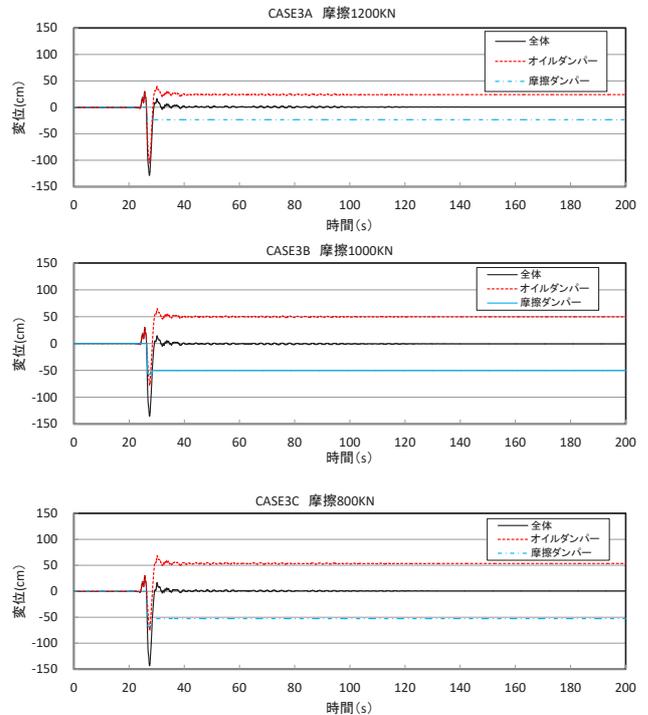


Fig. 18 複合ダンパーの変位時刻歴波形 (西原村小森 EW)

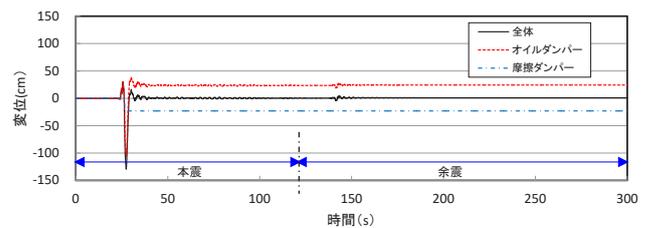


Fig. 19 変位時刻歴波形 (CASE-3A : 西原村小森 EW 本震+余震)

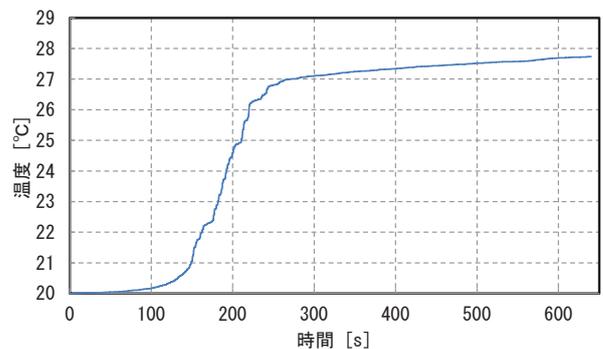


Fig. 20 温度上昇シミュレーション解析結果 (CASE-3A : AIC003)

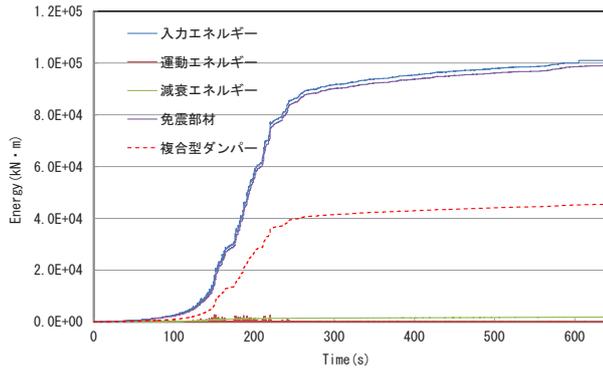


Fig. 21 累積吸収エネルギー量 (CASE-3A : AIC003)

4. まとめ

長周期パルスを含む大振幅地震動対策として、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを複合したダンパーにおける解析検討を行った。

本ダンパーは、大速度・大振幅領域においても限界性能以下で一定の免震効果が発揮できる。一方、良好な免震効果を得るための変位量は 1.5m 程度必要であり、それに伴い大型の復元材の開発・実用化や、複合ダンパーのデバイスの構築が必要である。

謝辞

大振幅地震動に対する免震用複合オイルダンパーの研究に当たっては、カヤバシステムマシナリー株式会社、平和発條株式会社の関係者の方々に多大なご協力を頂きました。ここに深く謝意を表す次第であります。

参考文献

1) 日本建築学会：シンポジウム 巨大地震への備えを目指す免震構

造の取り組み, 2017

- 2) 荻野伸行, 北川麻記：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発, 熊谷組技術研究報告 NO.76, pp99-106, 2017
- 3) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性, pp234-237
- 4) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿い巨大地震による長周期地震動への対策について, 2016, http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000620.html
- 5) 建築研究所：超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討-南海トラフ 4 連動地震による超高層・免震建物の応答解析-, 建築研究資料 No.147, 2013
- 6) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針, 2015
- 7) 菊地優, 石井健, 加藤秀章：大変形・高軸力下における高減衰積層ゴムの力学挙動予測に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.56B, pp.179-188, 2010.3
- 8) カヤバシステムマシナリー：カヤバ BDS 型オイルダンパー (BDS シリーズ) の長周期地震動に対する免震材料の性能変化について, pp.21-28, 2017.7
- 9) 荻野伸行, 露木保男, 猪口敏一, 中原学, 山崎久雄：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 1) 基本特性および効果の検証, 日本建築学会学術講演梗概集 (構造 II), pp.409-410, 2016.8
- 10) 中原学, 荻野伸行, 北川麻記：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 2) 原理試作および性能確認実験, 日本建築学会学術講演梗概集 (構造 II), pp.995-996, 2017.8
- 11) 荻野伸行, 北川麻記, 山口洋平, 中原学：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 3) 時刻歴応答解析, 日本建築学会学術講演梗概集 (構造 II), pp.997-998, 2017.8
- 12) 荻野伸行, 北川麻記, 白鳥和希, 露木保男, 岡本真成, 山崎久雄：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 4) オイルダンパーと摩擦ダンパーを複合したダンパーの検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (構造 II), pp.1029-1030, 2018.9
- 13) Nobuyuki OGINO, Masaru KIKUCHI, Masanari OKAMOTO: STUDY OF HIGH-PERFORMANCE OIL DAMPERS FOR SEISMICALLY ISOLATED STRUCTURES TO COUNTER EXTREMELY STRONG EARTHQUAKE GROUND MOTION, 16WCSI, 2019.7

Study of composite damper for seismically isolated structures to counter extremely strong earthquake ground motion

Nobuyuki OGINO, Maki KITAGAWA and Kazuki SHIRATORI

Abstract

Various developments are underway to suppress the response displacement of seismic isolation structures against large-amplitude ground motion. As one of the countermeasures, Technical Report No. 76 describes the development of an improved oil damper with multiple stages of speed switching. On the other hand, in the 2016 Kumamoto earthquake, Strong pulse-like ground motion with long period component near the epicenter (hereinafter referred to as long Periodic pulses) were observed. These are extremely severe ground motions for the seismic isolation structure, which exceeds the limit performance of current seismic isolation members. One of the solution is to combine oil damper and friction damper. In this report, the results of the time history response analysis when the combined damper is applied are reported.

Key words: Oil damper, Friction damper, Long-period earthquake ground motion, Inland earthquake, Long period pulse, Re-centering device