

大振幅地震動に対する免震用複合ダンパーの研究 — 縮小モデルによる基本特性試験 —

荻野伸行 * 北川麻記 ** 白鳥和希 ** 南 遼太 ***

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、2016年の熊本地震で観測された、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）では、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、技術研究報告78号では、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から、その有効性について報告している。本報では、本複合ダンパーが想定通りに機能するかの基本特性を確認することを目的として実施した、縮小モデル（プロトタイプの住宅用免震）を用いた動的加力試験による性能試験結果と実機開発における課題について報告する。

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，免震構造

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、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、様々な技術開発・提案が活発化している¹⁾²⁾。

そこで、筆者らは、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多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを提案した^{3)~8)}。

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。この長周期パルス地震に対応できるダンパーとして、技術研究報告78号⁹⁾では、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から、その有効性について報告している。本報告では、本複合ダンパーが想定通りに機能するかの基本特性を確認することを目的として実施した、縮小モデル（プロトタイプの住宅用免震）を用いた動的加力試験による性能試験結果と実機開発における課題について報告する。

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⁹⁾¹⁰⁾。ストッパーや擁壁に衝突させる設計もその対策の1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替わるシステムを提案する。複合ダンパーの概念図をFig.1に示す。

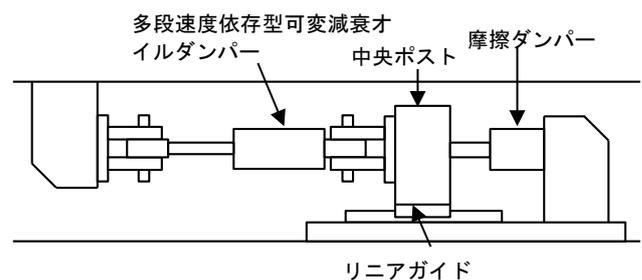


Fig.1 複合ダンパー概念図

複合ダンパーは、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中央ポストと摩擦力が小さいリニアガイドを介して接合しており、各ダンパーは両端のブラケットにピンを差し込む形式で、交換も容易である。

新たに開発する輪ばね式摩擦ダンパーの概念図をFig.2に示す。摩擦ダンパーは筒形タイプで、外筒、ピストン（シャフト）、輪ばね、圧着板（内輪）、摩擦材、ボルトと皿ばねで構成されている。作動原理は、ボルト

*	設計本部
**	設計本部 耐震設計部 耐震設計グループ
***	技術本部 技術研究所 防災技術研究室

の締付軸力を輪ばねのテーパ形状を介して、ラジアル方向に圧縮力を発生させることで、ピストンの軸方向変形時に一定の摩擦力を確保している。

皿ばねの使用によって、ボルトの締付トルクを管理し、任意の圧縮力を設定することが可能であることから、摩擦力の調整も容易である。また、複合ダンパーに残留変位が生じた場合には、ボルトを緩めることで、元の位置に戻ることができる。

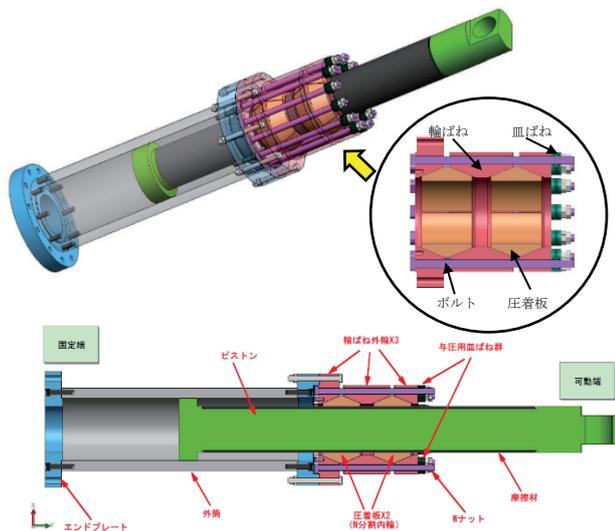


Fig. 2 輪ばね式摩擦ダンパー概念図

3. 基本特性試験

3. 1 試験計画

実機の複合ダンパーは、1,200kNのダンパーを目指す。基本特性試験では、プロトタイプ（小規模の免震住宅レベル）における複合ダンパーの試験を行い、計画通りの機能・性能が発揮されるかの基本特性を把握することを目的として実施した。

3. 1. 1 試験体および単体特性試験

複合ダンパー試験体の概略図を Fig. 3 に、オイルダンパー、摩擦ダンパー部の試験体を Fig. 4, Fig. 5 に示す。なお、各ダンパーを繋ぐ、中央ポスト部のリニアガイド（長さ 1,000mm）は、最大変位 $\delta_{max} = \pm 27.5\text{cm}$ とした。

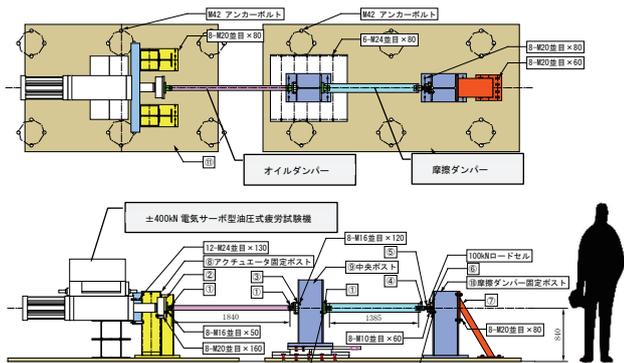


Fig. 3 複合ダンパー試験体概略図

オイルダンパーは、市販品の住宅免震用オイルダンパーとし、最大減衰力 50kN、最大速度 100cm/s のリニア特性である。また、新たに開発した摩擦ダンパーは、最大摩擦力 50kN であり、摺動面を構成するピストンと内輪の形状・材質や摩擦材は複数の予備試験から設定した。予備試験から、内輪はテーパ角度 8° とし、材質 SCM435 にガス軟窒化、ショットピーニングを施した。また、ピストン部（シャフト）は材質 SCM435 に高周波焼入れ、ショットピーニング処理の上、グリスを塗布している。

型式: JD30-720-L-50-C (カヤバシステムマシナリー製)
 減衰係数: $C=500\text{N} \cdot \text{s}/\text{cm}$
 最大減衰力: $F_{max}=50\text{kN}$
 最大速度: $V_{max}=100\text{cm}/\text{s}$
 最大変位: $\delta_{max} = \pm 36\text{cm}$

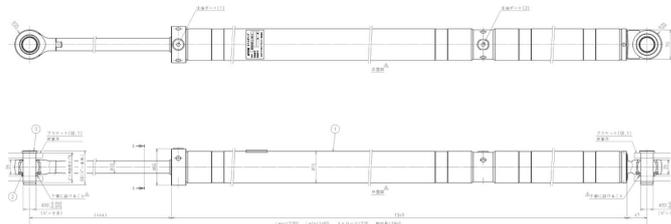


Fig. 4 オイルダンパー試験体概略図

最大摩擦力: $F_{max}=50\text{kN}$ ($F_{fd}: 40\text{ kN}, 30\text{ kN}, 20\text{ kN}$)
 摩擦係数: $\mu=0.1$
 最大変位: $\delta_{max} = \pm 27\text{ cm}$

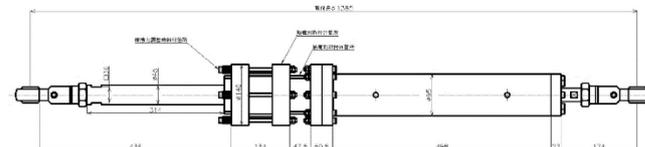


Fig. 5 摩擦ダンパー試験体概略図

オイルダンパーの単体特性試験結果を Fig. 6 に、摩擦ダンパーの単体特性試験結果を Fig. 7 に示す。

オイルダンパーの減衰力は、速度 25~100cm/s において規格値 $\pm 10\%$ 以内となっている。また、摩擦ダンパーの摩擦力も規格値 $\pm 10\%$ 以内（3 サイクル目の切片荷重の平均値: 28.64kN, 規格値-4.5%）となっている。

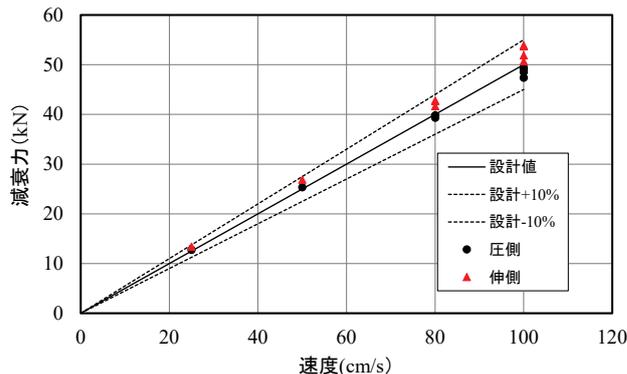


Fig. 6 オイルダンパーの単体特性試験結果 (F-V 特性)

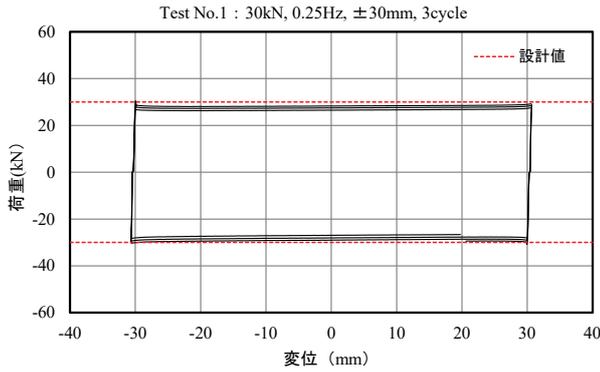


Fig.7 摩擦ダンパーの単体特性試験結果 (履歴特性)

3. 1. 2 試験装置

試験は、コベルコ科研保有の±400kN 電気油圧サーボ型油圧式疲労試験機 (島津製作所) を用いて実施した。

試験機仕様および実験状況を Fig.8 に示す。また、測定は、荷重、変位 (全体、各ダンパー)、温度について計測した。測定位置を Fig.9 に示す。なお、本試験においては、リニアガイドの摩擦および慣性力の影響を受けない固定側のロードセルの荷重を試験結果として用いている。

最高速度 : 100cm/sec

荷重容量 : 動的 ±400kN, 静的 ±600kN

ストローク : ±25cm

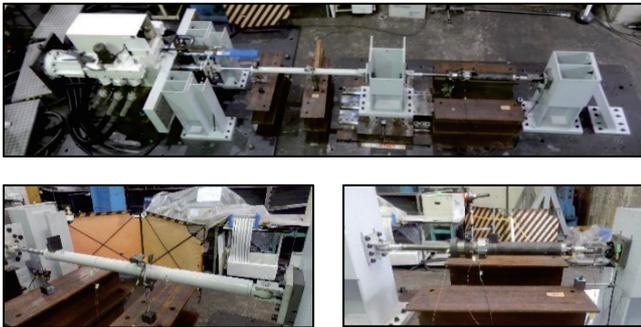


Fig. 8 試験機仕様および実験状況

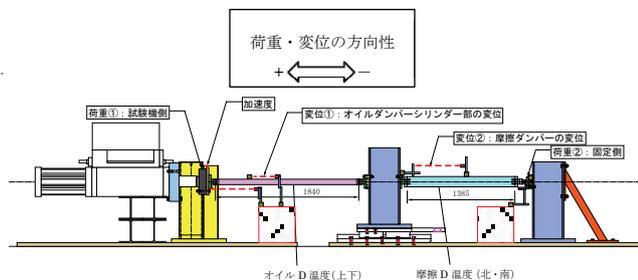


Fig.9 計測位置

3. 1. 3 試験条件

複合ダンパーの基本特性を把握するために正弦波加振試験、ランダム波加振試験、繰り返し加力試験の3種類の試験を実施した。

なお、摩擦ダンパーの摩擦力は、オイルダンパーを固定ジグに変更し、摩擦ダンパー単独の正弦波加力試験 (0.25 Hz, ±3 cm) を実施し、3 サイクル目の正負の切片荷重の平均値が条件荷重 (摩擦力) に設定されていることを確認した。

(1) 正弦波加振試験

正弦波加振試験は、複合ダンパーの切替特性、振幅依存性、振動数 (速度) 依存性について確認するために実施した。Table 1 に正弦波加振条件を示す。加振振動数は、0.25 Hz ~1.0 Hz, 速度: 10~100 cm/s とし、摩擦ダンパーの設定摩擦力 F_{fd} は、20 kN (CASE-1S), 30 kN (CASE-2S), 40 kN (CASE-3S) の3水準について実施した。なお、加力サイクル数は、5 サイクルとし、各特性値の評価は、3 サイクル目とした。

Table 1 正弦波加振条件

f (Hz)	T (s)	加振変位 (cm)						
		速度 (cm/s)						
		10	20	40	60	80	100	120
0.25	4.0	6.37	12.73	25.46	38.20	50.93	63.66	76.39
0.5	2.0	3.18	6.37	12.73	19.10	25.46	31.83	38.20
0.75	1.33	2.12	4.24	8.49	12.73	16.98	21.22	25.46
1.0	1.0	1.59	3.18	6.37	9.55	12.73	15.92	19.10
1.5	0.67	1.06	2.12	4.77	6.37	8.49	10.61	12.73

■ 実施試験条件

(2) ランダム波加振試験

不規則なランダム波に対して、設定荷重で摩擦ダンパーが稼働することを確認するために実施した。ランダム波は戸建免震住宅を想定した時刻歴応答解析の応答変位波形とし、告示波 (CASE-1R), 南海トラフ地震¹¹⁾ (AIC003: CASE-2R), 上町断層地震¹²⁾ (UMTA4C2EW1: CASE-3R) の3波を採用した。また、試験の入力波形は、試験機の性能範囲で振幅と時間軸を調整した。なお、摩擦ダンパーの摩擦力 F_{fd} は 30 kN とした。

(3) 繰り返し加力試験

長周期地震動等の繰り返し加力を受けた場合の性能変化を把握するために実施した。

繰り返し加力試験の累積変形量は 80mm 程度とし、摩擦ダンパーの摩擦力 F_{fd} は 30 kN, 加振条件は 1.0Hz, 100cm/s, 159mm, 130 サイクルとした。

試験は、5 サイクル/回として 26 回繰り返した。「5 サイクル/回」は摩擦ダンパーの残留変位とオイルダンパーのストロークおよびリニアガイドのストロークより決定した。また、オイルダンパーの温度が 50°C に達した時点でオイルダンパーをドライアイスで外気温相当まで冷却した。130 サイクルを終了後に初期の性能が復元していることを確認するために基本特性試験 (F_{fd} =30 kN, 1.0 Hz, 40 cm/s) を実施し、正弦波加振試験における同条件の結果と比較した。

3. 2 試験結果

3. 2. 1 正弦波加振試験

複合ダンパーの履歴特性 (CASE-3S, 1 Hz) を Fig. 10~13 に示す。また、各ケースの 3 サイクル目の荷重と速度の関係を図. 14~17 に示す。

速度 60cm/s 以下では、摩擦ダンパーの設定摩擦力 (40kN) をオイルダンパーの減衰力 (30kN) が超えない範囲であることから、オイルダンパーの履歴特性が複合ダンパーの履歴特性と同様となり、リニア特性の楕円状の履歴ループとなる。80cm/s では、オイルダンパーの減衰力が摩擦力を上回るため、摩擦ダンパーが作動し、設定荷重レベル付近で切り替わる。また、履歴ループは、切り替え荷重で頭打ちの形状となる。5 サイクルの繰り返し加振に対して、摩擦ダンパーは+側の変位に徐々にシフトし、それに応じてオイルダンパーの履歴ループも-側にシフトしている。100cm/s では、その傾向が顕著に現れており、摩擦ダンパーに繰り返し回数と振幅増加に伴い、摩擦力の増加傾向が現れている。各ケースの荷重と速度の関係から、切り替え前のオイルダンパーは速度依存の線形特性となっているが、摩擦ダンパーは速度による荷重の増加傾向が見られる。また、振動数依存性は、切り替え前の 60cm/s 以下ではオイルダンパーのみ作動しているため依存性は見られないが、切り替え後では僅かに変動する。摩擦ダンパーの単体特性試験の振幅±30mm 以下の範囲では、速度依存性や振幅依存性は、ほとんど見られていないことから、振幅や速度の増加に伴う性能変化は、摩擦ダンパーの機構上の剛性や摩擦面の面圧分布の影響が考えられる。したがって、実機では、これらを改善する必要がある。

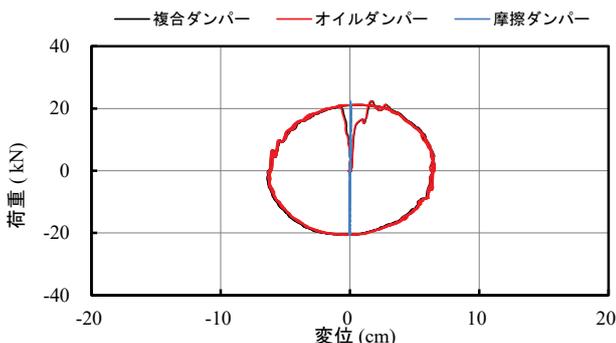


Fig. 10 履歴特性 (CASE-3S : 1Hz_40cm/s)

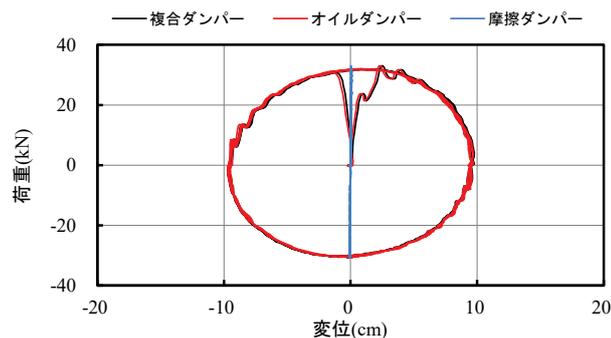


Fig. 11 履歴特性 (CASE-3S : 1Hz_60cm/s)

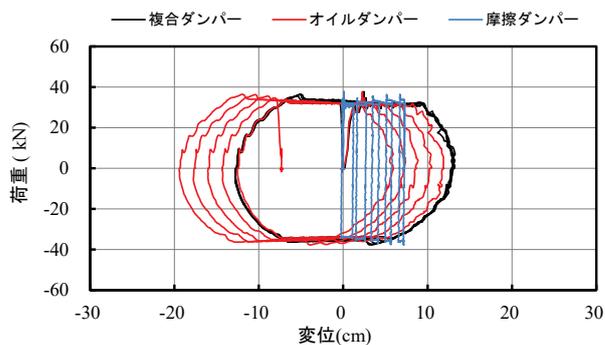


Fig. 12 履歴特性 (CASE-3S : 1Hz_80cm/s)

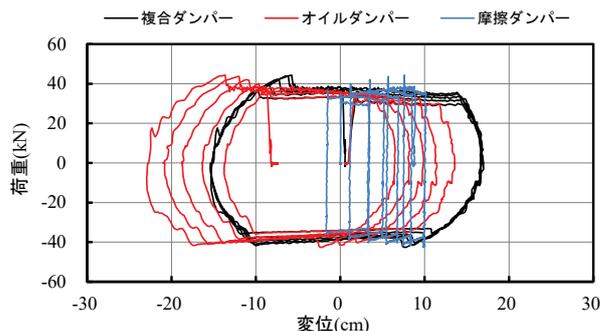


Fig. 13 履歴特性 (CASE-3S : 1Hz_100cm/s)

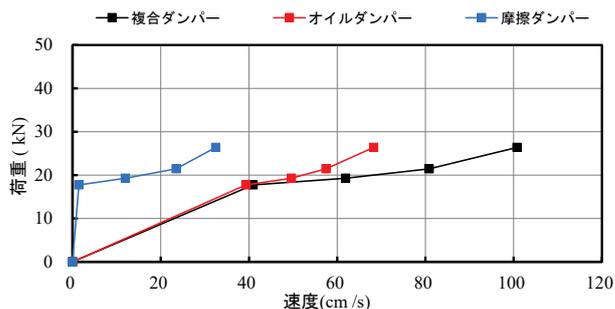


Fig. 14 荷重と速度の関係 (CASE-1S : 1Hz)

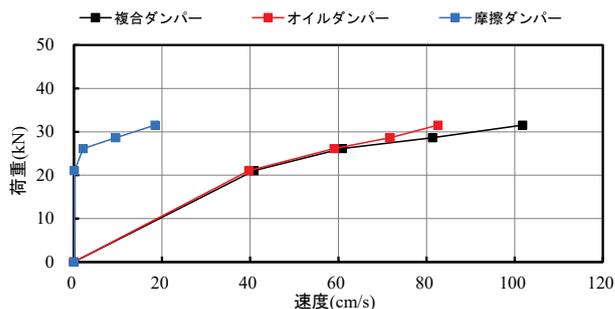


Fig. 15 荷重と速度の関係 (CASE-2S : 1Hz)

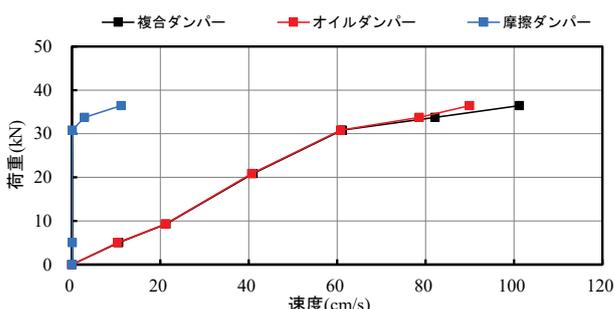


Fig. 16 荷重と速度の関係 (CASE-3S : 1Hz)

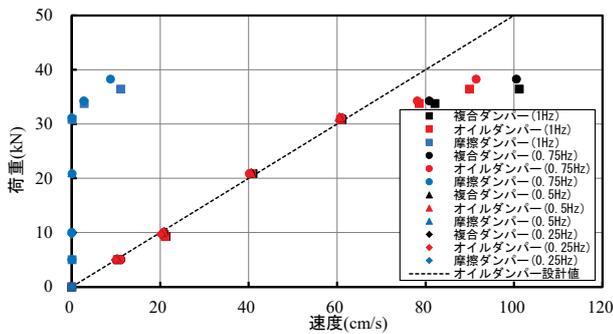


Fig. 17 荷重と速度の関係 (CASE-3S : 0.25~1Hz)

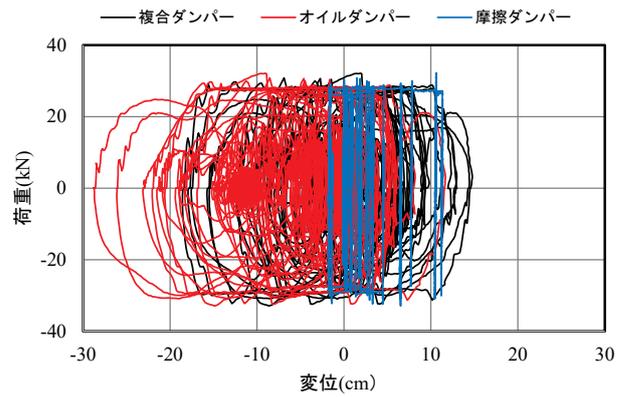


Fig. 20 履歴特性 (AIC003)

3. 2. 2 ランダム波加振試験

ランダム波加振試験結果の変位時刻歴波形とダンパーの温度時刻歴波形を Fig. 18, 19 に、履歴特性を Fig. 20 に示す。複合ダンパーは、ランダム波加振においても、正弦波加振と同様に、設定荷重 30kN でスムーズに切り替わっている。一方、南海トラフ地震と上町断層地震では、最大 10cm 程度の残留変位が生じている。また、ダンパーの温度上昇は、累積吸収エネルギー量が大きい AIC003 が最大であり、オイルダンパーで 57℃に上昇するが、耐熱限界温度 80℃以下である。また、摩擦ダンパーの温度上昇はほとんどない。

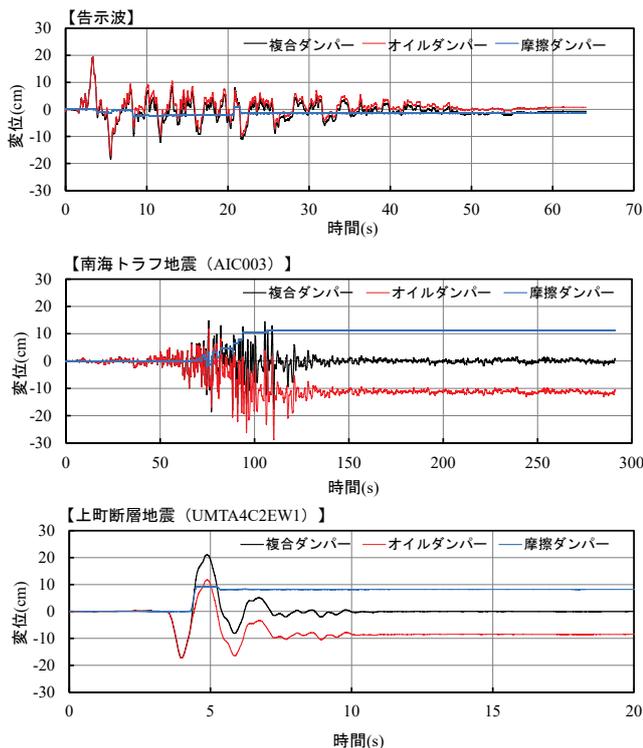


Fig. 18 変位時刻歴波形

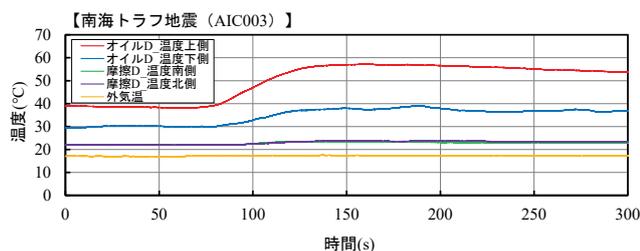


Fig. 19 温度時刻歴波形 (AIC003)

3. 2. 3 繰り返し加力試験

繰り返し加力試験結果の累積吸収エネルギーと累積変形量の関係を Fig. 21 に、温度と累積変形量の関係を Fig. 22 に示す。また、繰り返し加力試験前後に実施した基本特性試験の履歴特性を Fig. 23 に示す。

累積吸収エネルギーと累積変形量は、概ね比例関係であり、オイルダンパーが 76% を占めている。また、オイルダンパーは約 30m で約 35℃上昇する。

繰り返し試験前後の基本特性試験における履歴ループの差は、ほとんどなく、オイルダンパーの等価減衰係数においても、繰り返し前後で約 4.5% (繰り返し前: 265.1N・s/cm, 繰り返し後: 253.1N・s/cm) であり、非常に小さい。

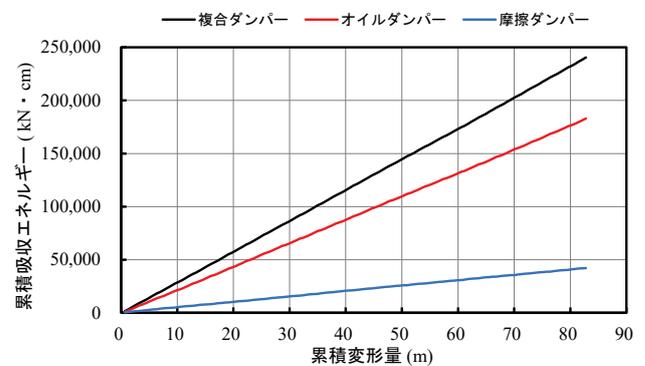


Fig. 21 累積吸収エネルギーと累積変形量の関係

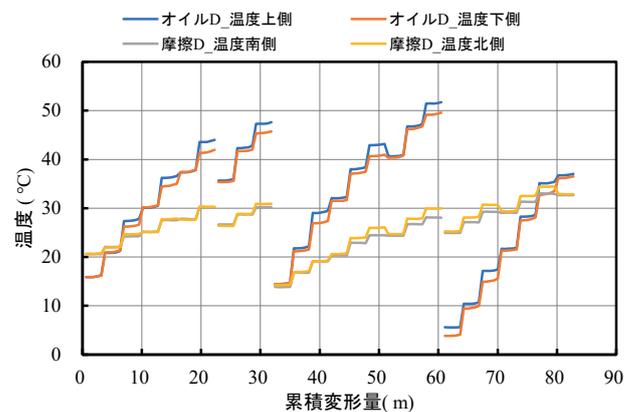


Fig. 22 温度と累積変形量の関係



Fig. 23 履歴特性（繰り返し前後）

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組み合わせた複合ダンパーを提案し、縮小モデル（プロトタイプ住宅用免震）を用いた動的加力試験による基本特性試験を実施した。

その結果、本複合ダンパーは、設定荷重に対して、オイルダンパーから摩擦ダンパーに切り替えが可能であることを確認した。一方、摩擦ダンパーは、振幅依存性と速度依存性があり、実用化に当たっては、これらを改善する必要がある。

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、平和発條株式会社、カヤバシステムマシナリー株式会社の方々に多大なご協力を頂きました。また、基本特性試験の実施に当たっては、株式会社コベ

ルコ科研の関係者の方々に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) 日本建築学会：大振幅地震動に対する免震構造の設計，2020.
- 3) 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，pp. 99-106，2017.
- 4) 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 年 8 月.
- 5) 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 年 8 月.
- 6) 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 年 8 月.
- 7) 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 年 7 月.
- 8) 荻野伸行，菊地優，岡本真成，中原学：大振幅地震動に対する免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーに関する研究，日本建築学会構造工学論文集 Vol. 67B，pp. 549-556，2021 年 3 月.
- 9) 荻野伸行，北川麻記，白鳥和希：大振幅地震動に対する免震用複合ダンパーの研究，熊谷組技術研究報告 NO. 78，2019.
- 10) 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 年 9 月.
- 11) 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.
- 12) 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.

Study of composite damper for seismically isolated structures to counter large-amplitude ground motion: Basic characteristic examination by reduced model

Nobuyuki OGINO, Maki KITAGAWA, Kazuki SHIRATORI, and Ryota MINAMI

Abstract

Various developments are underway to suppress the response displacement of seismic isolation structures against large-amplitude ground motion. The current seismic isolation components may not withstand the strong pulsed seismic motions with predominant long-period components (long-period pulses), such as those observed in the 2016 Kumamoto earthquake. As a solution to this problem, Technical Report No. 78 reports on the effectiveness of a composite damper combining a variable oil damper and a friction damper based on the results of a time history response analysis. In this report, we describe the results of the performance evaluation by dynamic loading tests on a reduced model (prototype seismic isolation system for houses), which were performed to confirm the basic characteristics of the composite damper and ensuring that it functions as expected. We also discuss various problems encountered in developing the damper product.

Key words: oil damper, friction damper, long-period ground motion, inland earthquake, long-period pulse, seismic isolation structure