

T-M ダンパー®用ロングストロークオイルダンパーの 圧縮力に対する健全性検証

石川 義幸*¹・青野 翔*¹・谷 翼*¹・野口 裕介*²・
隈部 敦史*²・渡辺 征晃*²・長谷川 達也*³・木村 雄一*⁴

Keywords : TMD for earthquake, oil damper, compression test, buckling safety, long period ground motion
地震用 TMD, オイルダンパー, 圧縮試験, 座屈安全性, 長周期地震動

1. はじめに

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源から離れた関東・関西地方において長周期地震動による超高層建物の大振幅な揺れが観測され、建物の在館者に不安を与えた。また 2016 年に南海トラフ沿いの巨大地震で発生が予想される長周期地震動に対する新築の超高層建物の検討が課され、長周期地震動対策の重要性が増している¹⁾。当社では超高層建物の長周期地震動の対策技術として T-M ダンパーを開発した²⁾。T-M ダンパーは建物頂部に設置される多段振り子型の制振装置であり、従来の装置と比較して軽量の錘が大振幅で振動することにより建物に高い減衰性能を付与する。T-M ダンパーは図-1 のようにワイヤーで懸架されたフレームや錘と、フレームや錘の間に直列に接続された専用のロングストロークのオイルダンパーで構成される。

T-M ダンパーは建物頂部に設置されるため、地震時には建物内で増幅された水平・上下振動が入力される。近年、従来よりも高い超高層建築物が計画されるようになり、T-M ダンパーの使用環境が厳しくなっている。

T-M ダンパーのオイルダンパーは、大きな上下動を受けながら水平方向に減衰力を発揮する重要な構成要素である。上下動、および減衰力に対するオイルダンパーの管体の健全性を検証するため、上下動に相当する錘を付加したオイルダンパー試験体の静的な圧縮試験を実施した。T-M ダンパーの上下方向の予備応答解

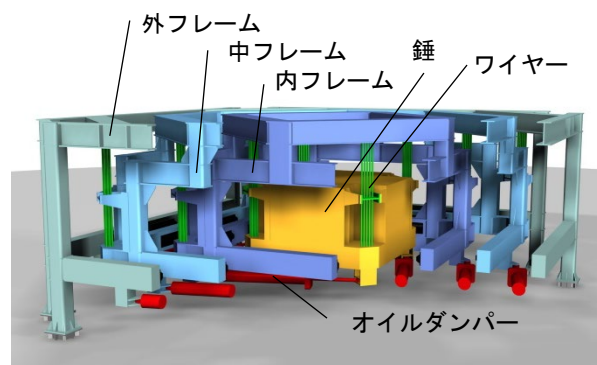


図-1 T-M ダンパー®概要

Fig. 1 T-M damper configuration

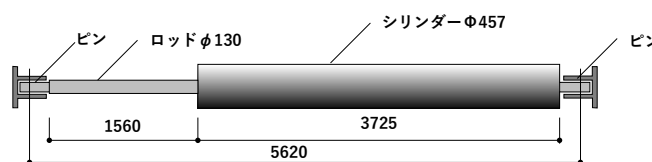


図-2 ロングストロークオイルダンパー

Fig. 2 Long-stroke oil damper

表-1 オイルダンパー諸元

Table 1 Oil damper specification

| 項目 | 数値 | 単位 |
|-------|-------|---------|
| 減衰係数 | 2.5 | kN/kine |
| 最大変位 | ±1500 | mm |
| 最大速度 | 180 | kine |
| 最大減衰力 | 450 | kN |

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室
* 2 設計本部 構造設計第三部
* 3 設計本部 構造計画部
* 4 設計本部

析結果から、上下に±3G 程度の加速度が生じることを想定した。本稿では試験の結果を示す。

2. ロングストロークオイルダンパー概要

ロングストロークオイルダンパーの概要を図- 2、表- 1に示す。オイルダンパーは川金コアテック製であり、ロッド・シリンダー・ピストンで構成され、シリンダー内は鉱物油で充填されている。このダンパーには①片ロッドであること、②ダンパー圧縮時・引張時に作動油の流れる向きが切り替わるバイフロー型であること、③減衰特性が線形であること、④ストロークが±1500mm と従来の免震用オイルダンパーと比べて長いという特徴がある。大きなストロークを実現するため、中立位置でのダンパー全長を 5620mm，最伸長時に 7120mm としている。ダンパーの軸力により筐体を座屈・降伏させないために、断面が小さいロッドには降伏応力度 785N/mm² 級の高強度鋼材を採用している。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

オイルダンパー自身の地震時上下慣性力と水平減衰力に対し、筐体が座屈・降伏しないことを確認するため、最伸長に伸ばしたオイルダンパーの静的な圧縮試験を行う。オイルダンパーは速度に比例した力を発揮するため、最大減衰力はダンパーの中立位置付近で生じるが、本試験では安全側の評価を与える、最伸長に伸ばした試験体を用いる。なお、作動油を移動させないために、オリフィスの開口を閉鎖した試験体を用いる。

試験体は図- 3 に示すように一端を反力壁，もう一端を反力床に固定されたアクチュエータに接続する。アクチュエータ側のオイルダンパーのロッド側の端部は、上下をリニアガイドでローラー支持された反力板を介してロードセルやアクチュエータと直列に接続する。

3.2 試験ケース

本実験の試験ケースを表-2 に示す。オイルダンパーに定格減衰力 450kN の約 1.3 倍の 600kN の圧縮力を水平に加える。なお、余力を確認するための Case5 では 700kN まで加力する。地震時にオイルダンパーに生じる上下の慣性力に相当する、自重の最大 3 倍の錘をオイルダンパーのシリンダー部分にチェーンを介して付加する。自重に相当する錘の位置を図- 4(a)に、自重の 2 倍，3 倍に相当する錘を付加する試験ケースの錘位置

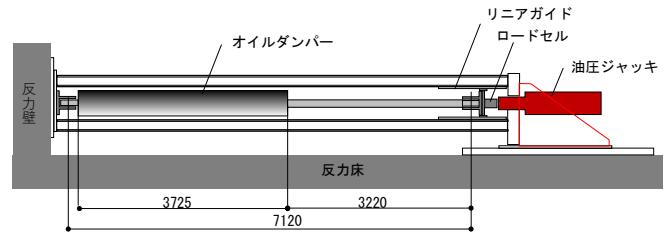
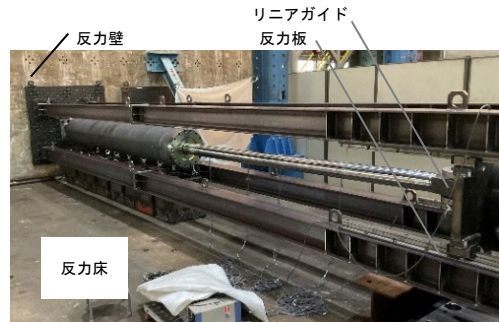


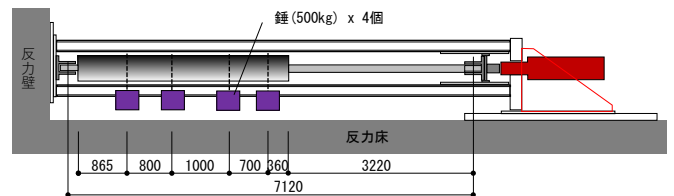
図-3 オイルダンパー試験体

Fig. 3 Oil damper test specimen

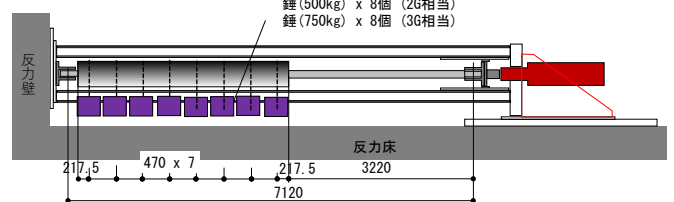
表-2 試験ケース

Table 2 Test case

| | 最大軸力 | 鉛直荷重 |
|-------|-------|---------|
| Case1 | 600kN | 自重(錘なし) |
| Case2 | 600kN | 自重+1G相当 |
| Case3 | 600kN | 自重+2G相当 |
| Case4 | 600kN | 自重+3G相当 |
| Case5 | 700kN | 自重+3G相当 |



(a) 錘 自重+1G 相当



(b) 錘 自重+2G, +3G 相当

図- 4 錘設置位置

Fig. 4 Weight position

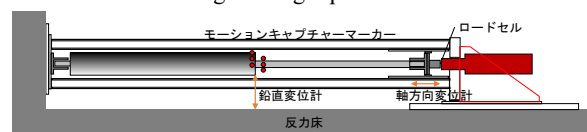


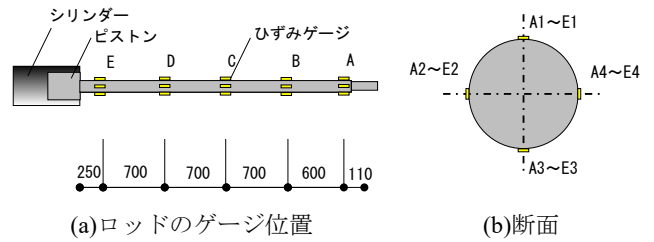
図- 5 変位計測位置

Fig. 5 Positions of displacements measurement

を図-4(b)に示す。試験体と反力床の高さが限られていたため、自重の2, 3倍に相当する錘を付加するケースではシリンダーに等間隔に錘を設置する。

3.3 計測概要

変位計測およびひずみ計測の概要を図-5, 図-6に示す。アクチュエータと直列に接続されたロードセルによりオイルダンパーの軸力を計測する。ワイヤー式変位計によりダンパーの軸方向変位と中央位置の鉛直方向を計測する。3次元モーションキャプチャーシステムによりピストンの変位を計測する。ロッドが降伏しないことを確認するため、図-6に示すロッドの5断面に1断面4枚のひずみゲージを設置する。



(a) ロッドのゲージ位置 (b) 断面

図-6 ひずみゲージ位置

Fig. 6 Position of strain gauge

4. 実験結果

4.1 軸力-変位関係

4.1.1 軸力-鉛直変位関係

オイルダンパー中央に鉛直に設置したワイヤー式変位計の計測変位とオイルダンパー軸力の関係を図-7に示す。軸力の増加に伴い変位が大きくなっているが、除荷後は加力前の変位に戻っている。また、すべてのケースで履歴ループが小さい。最も鉛直変位が大きくなった+3G相当の錘を載せて700kNの加力をした時の試験体の状況を写真-1に示す。

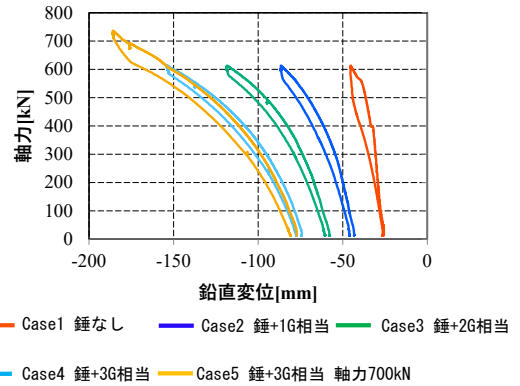


図-7 軸力-たわみ関係

Fig. 7 Axial force-vertical displacement relationship

4.1.2 軸力-軸方向変位関係

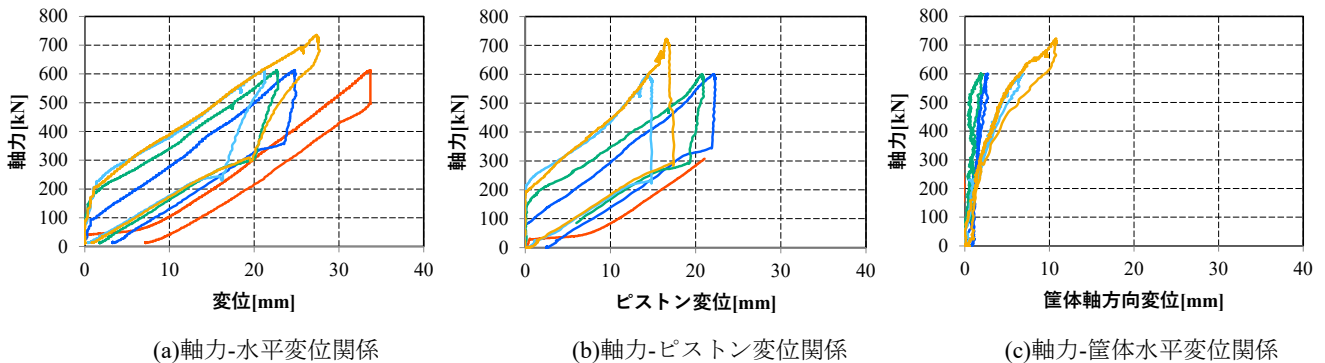
ロッド端部の反力板に設けたワイヤー式変位計で計測した水平変位に対する軸力の関係を図-8(a)に示す。すべてのケースで軸力-変位関係がバイリニア型になっている。

モーションキャプチャーで得られたピストンの変位と軸力の関係を図-8(b)に示す。Case1ではモーションキャプチャーの計測不具合があったため、途中で計測を終了している。軸力-ピストン変位関係は剛塑性に近い。



写真-1 錘+3G相当 700kN加力時変形

Photo. 1 Deformation of oil damper in the case of the application of weight equivalent to the 3G acceleration and 700kN axial force.



(a) 軸力-水平変位関係

(b) 軸力-ピストン変位関係

(c) 軸力-管体水平変位関係

図-8 軸力-軸方向変位関係

Fig. 8 Axial force-axial displacement relationship

Case1 錘なし Case2 錘+1G相当 Case3 錘+2G相当 Case4 錘+3G相当 Case5 錘+3G相当 軸力700kN

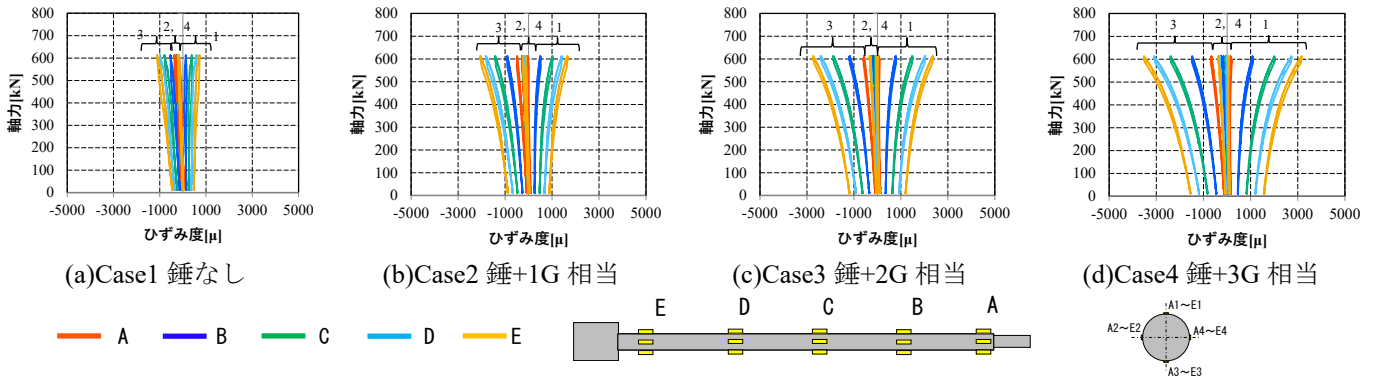


図-9 軸力-ひずみ関係

Fig.9 Strain-axial force relationship

いバイリニア型の履歴となった。この履歴はピストンとシリンダー間の摩擦によるものと考えられ、錘の重量にほぼ比例して静止摩擦力が増大している。軸力が静止摩擦力を超えた後は、作動油の弾性変形によりピストン変位が生じるが、最大で 22mm 程度とロッドの長さ 1560mm に対して十分に小さく、評価上問題にならないことを確認した。水平変位からピストン変位を引いた筐体の水平変位と軸力の関係を図- 8 (c)に示す。筐体の軸力-変位関係では履歴面積、残留変位共に小さい。

4.2 軸力-ひずみ関係

ロッドのひずみ計測値を図- 9 に示す。錘が大きくなるに従って、断面の 1, 3 位置のひずみが大きくなる。一方で 2, 4 位置のひずみは小さい。またシリンダーに近い断面ほどひずみが大きくなっている。軸力-ひずみ関係の履歴面積は小さい。+3G 相当の錘を付加して、700kN まで軸力を作用させたときの荷重-ひずみ履歴を図- 10 に示す。600kN まで軸力を作用させたときと比較して履歴ループが大きくなるが、除荷後の残留ひずみはほとんどみられない。

4.3 軸力-曲げモーメント関係

計測したひずみ値から曲げモーメントを推測する。ロッドを梁要素と仮定すると、ある断面のひずみ値は式(1)のようになる。

$$\epsilon_i = \frac{N}{EA} + \frac{M_x}{EI_x} y_i \quad (1)$$

ここで、 N :軸力、 M_x :曲げモーメント(x軸回り)、 ϵ_i :ひずみ度($i=1\sim 4$)、 y_i :ひずみゲージ y 座標、 E :ヤング係数、 A :断面積、 I_x :断面二次モーメント(x軸回り)である。1 断面に貼った 4 枚のひずみゲージの計測値と、ロードセルによる軸力 N の計測値を用いる。ロッドは $\phi 130$

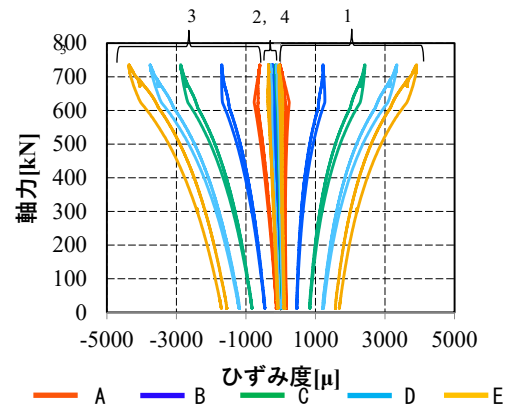


図- 10 Case5 錘+3G 相当 軸力-ひずみ関係

Fig.10 Case5 axial force-strain relationship

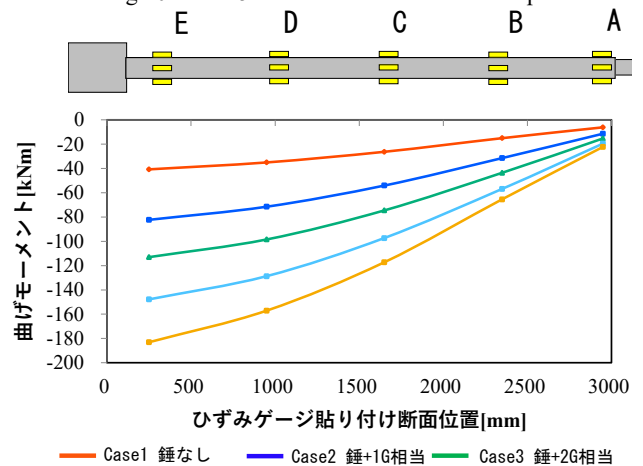


図- 11 最大軸力時のロッド曲げモーメント分布

Fig.11 Bending moment distribution of rod in the case of maximum force application

表-3 ロッド E 断面に作用する最大応力度

Table 3 Maximum compressive stress at E section on the rod

| 項目 | 単位 | Case1 錘なし | Case2 錘+1G相当 | Case3 錘+2G相当 | Case4 錘+3G相当 | Case5 錘+3G相当 |
|-------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 軸力 | kN | 600 | 600 | 600 | 600 | 700 |
| 最大応力度 | N/mm ² | 230 | 422 | 563 | 723 | 896 |

の円形断面なので断面積 A は $1.3 \times 10^4 \text{mm}^2$ 、断面二次モーメントは I_x, I_y ともに $1.4 \times 10^7 \text{mm}^4$ となる。ヤング係数 E は $2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ とする。

最大軸力時の曲げモーメント分布を図-11に示す。最大の曲げモーメントは、Case5の最大軸力時に183kNm程度生じた。

最大軸力時のひずみ計測値から最大の応力度を計算した結果を表-3に示す。最大応力度は錘+3G相当で700kNの軸力を作用させたときに 896N/mm^2 となった。ミルシートに記載された降伏応力度が 940N/mm^2 なので、計測した最大応力度は弾性範囲にとどまっている。

5. まとめ

T-Mダンパー用のオイルダンパーの筐体の、上下動・減衰力に対する健全性を検証するために、最伸長にしてオリフィスを閉じたオイルダンパーに錘を付加して、静的圧縮試験を実施し、以下の結論を得た。

- 1) 減衰力の定格荷重450kNの約1.3倍の軸力に対して筐体に座屈や塑性変形が生じなかった。
- 2) ピストン-シリンダー間に摩擦が生じるが筐体を与える影響は小さかった。

謝辞

本実験を進めるにあたりご協力いただいた、株式会社川金コアテック、光陽精機株式会社および株式会社コベルコ科研の関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省: 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, 2016.
- 2) 欄木龍大, 木村雄一, 久保充司, 平井潤, 大和伸行, 青野翔, 長島一郎: 超高層建物用長周期地震対応マスダンパーの開発 その1 概要とオイルダンパー要素の性能検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp659-660, 2017.