

慣性質量効果を有する液流ダンパーを付加した

1層フレーム試験体の振動台加振試験

横田陽大（仙台高等専門学校専攻科）

藤田智己（仙台高等専門学校）

畠中友（東北工業大学工学部）

船木尚己（東北工業大学工学部）

飯藤将之（仙台高等専門学校）

1.はじめに

日本では地震による建物の構造的被害を防ぐために様々な策を講じてきた。その結果として東北地方太平洋沖地震や熊本地震のような大地震でも、建物における構造的被害は減少傾向にある。その一方で、地震による設備の落下や家具の転倒など非構造部材や建物の内部の被害が使用者に危害を与え、地震後の建物の継続的使用ができない事象が発生するなどの問題が生じている^{1), 2)}。

著者らは、地震による建物の内部被害を軽減するための新たな制震装置として、従来のダンパーと比較して大きな応答低減効果を簡易に得られる可能性を有する流体の質量移動効果を用いた慣性質量ダンパー(以降、慣性質量液流ダンパーとする)の開発を進めている^{例えば3), 4)}。

本論では1層フレームに慣性質量液流ダンパーを付加した縮小試験体の振動台加振試験を実施し、試験結果から本ダンパーを付加した際の振動応答特性の変化を明らかにするとともに、地震に対する有効性を確認する。

2.ダンパーの概要

本ダンパーは、図1に示すように1対のピストンシリンダー相互を細い管で連結した形状となっている。ダンパー内部には液体が封入され、シリンダーとピストンの隙間には液漏れを防ぐためのシール材が充填されている。外力によるピストンの変位に応じて、ダンパー内部の液流が連結管内を移動することにより慣性質量効果とエネルギー吸収が発生し、これを建物の応答低減に利用する機構となっている。

本ダンパーを付加した1層建物における振動方程式は、

$$(M_F + \beta^2 m_a) \ddot{x} + C_F \dot{x} + K_F x + F_f + F_s = -M_F \ddot{x}_0 \quad (1)$$

となる。ここで、 M_F はフレームの質量、 C_F はフレームの減衰係数、 K_F はフレームの剛性、 m_a は連結管内の液体の質量、 β はシール材厚さを考慮したピストン部面積 A (以降、ダンパー有効断面積とする)と連結管の断面積 a の比 (A/a) を示す。本ダンパーは $\beta^2 m_a$ の慣性質量により、建物の

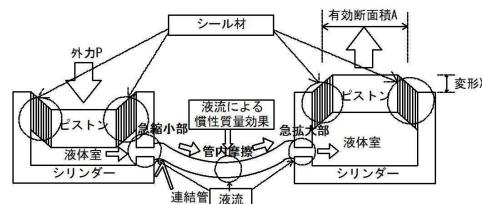


図1 慣性質量効果を有する液流ダンパーの概要

*Shaking Table Test of One Story Test Specimen Frame with Liquid Damper by Takahiro Yokota, Tomomi Fujita, Tomoyuki Hatanaka, Naoki Funaki, Masayuki Hando

長周期化を実現し、液流による抵抗力 F_f 、シール材の抵抗力 F_s によって減衰を与える。加えて、この慣性質量には入力地震動の低減を与える作用も有する。

図1に示すように、本ダンパーでは、ピストン部の変形 x に伴って、液体がシリンダーおよび連結管内を移動する際に急縮小部、急拡大部、連結管内部の3点で圧力損失を発生し、液流抵抗が発生する。

3. 振動台加振試験の概要

本試験で用いるダンパー試験体の平面図と断面図を図2に示す。フレームには、ダンパーを2台1組として使用し、内径10mmの鋼製の連結管により連結して試験体を構成する。連結管の長さは、0.5m、1.0m、2.0mの計3ケースとし、ダンパーに封入する液体には水道水を用いる。

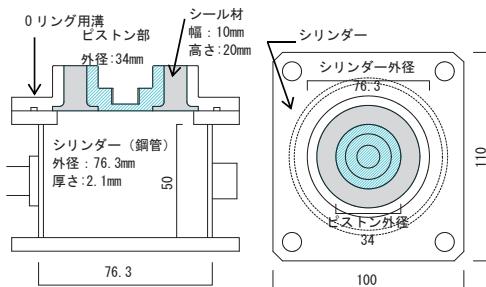


図2 ダンパー試験体 (左: 断面図 右: 平面図)

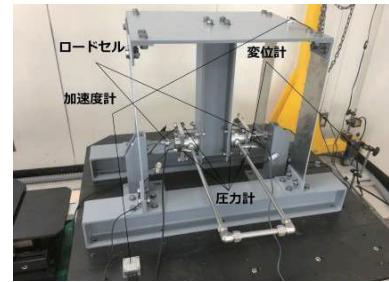


写真1 フレーム試験体全景

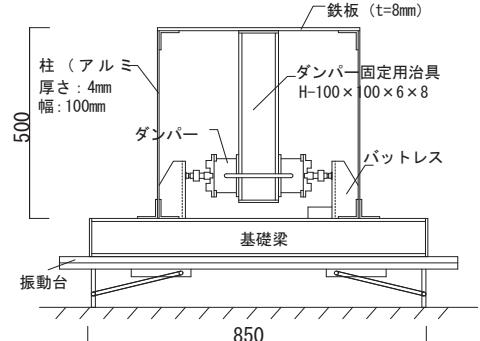


図3 1層フレーム試験体(単位:mm)

写真1、図3に示すように、1層フレーム試験体を、厚さ8mmの鉄板の梁と厚さ4mmのアルミ板の柱から構成し、基礎梁を介して振動台に固定する。ダンパーは梁中央に固定されたダンパー固定用治具を介して設置する。フレームの水平変位とともに生じる固定治具と基礎梁との相対変位によってダンパーが駆動し、応答低減効果をもたらす。

加振試験の入力地震動として正弦波および八戸EW波（1968年十勝沖地震）、タフトEW波（1952年Kern County 地震）、JMA神戸NS波（1995年兵庫県南部地震）、BCJ-L1波の4種類を用いる。振動台の性能を考慮して入力加速度が最大 2.0m/s^2 に収まるように入力レベルを調整した。なお、BCJ-L1波については、ダンパーが付加されることによるフレーム固有周期の変化域が応答加速度一定領域の周期帯に収まるように時間軸を1/2に縮めて用いた。減衰定数3%で、入力レベルを調整した入力地震波の加速度応答スペクトルを図4に示す。写真1に示すとおり、1層フレームと振動台に取り付けた加速度計で応答加速度を、1層フレームと振動台の横に取り付けたレーザー変位計でフレームの相対変位を、ダンパーに取り付けたロードセルでダンパー抵抗力を計測した。更に、各ダンパーのシリンダーおよび連結管両端部の計

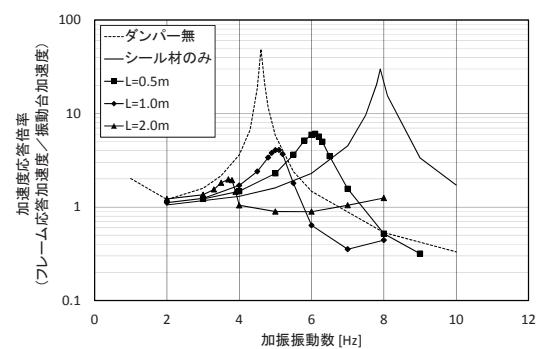
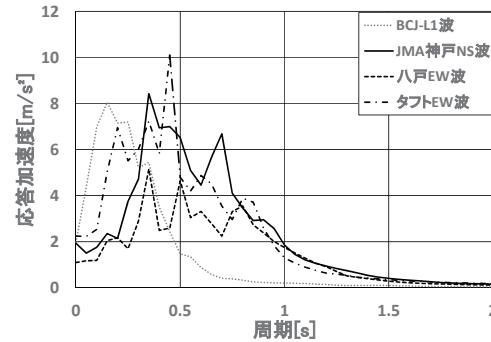
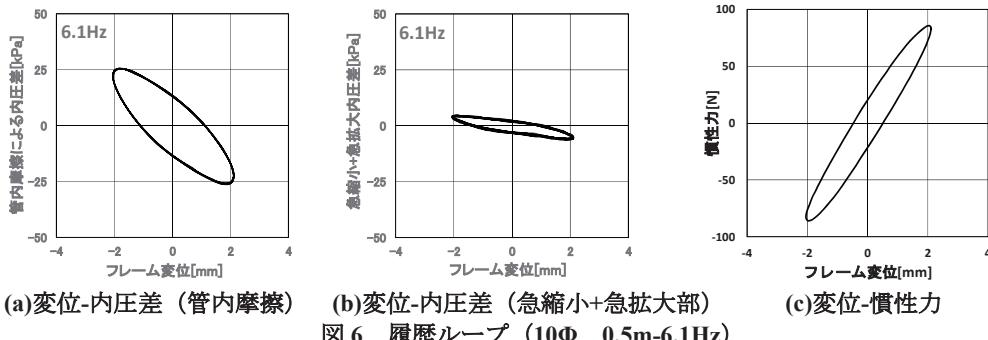
4か所に圧力計を取り付けダンパー内の内圧を計測した。シリンダーと連結管に取り付けた圧力計の差により、本ダンパーにおける急拡大部、急縮小部の圧力損失を、連結管両端部2か所の圧力計の差により、管内摩擦による圧力損失を計測した。

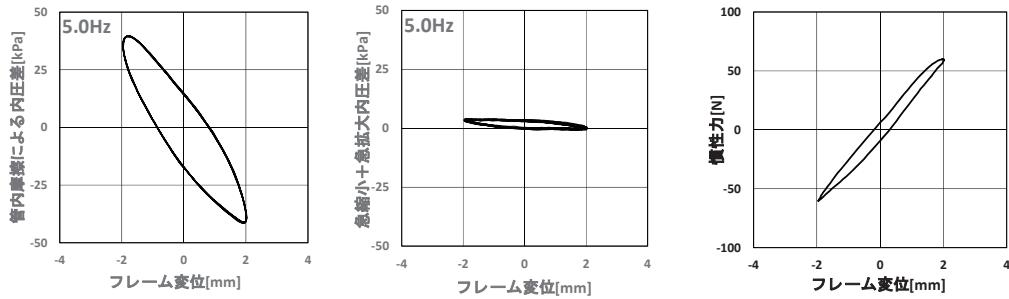
はじめに、正弦波加振試験により各ケースの固有周期と加速度応答倍率を確認し、次に、地震波加振試験より各ケースの等価減衰定数に対する加速度応答スペクトルから周期変動による応答低減効果を検討した。

4. 正弦波加振試験結果

正弦波加振試験より求めた共振曲線、およびそれぞれの変位・内圧差履歴ループ、変位・慣性力履歴ループの結果を図5～8に示す。ここで、慣性力は試験体質量とフレーム応答加速度の積である。図5に示すように、応答倍率は、管長が0.5mの時に約6倍、管長が1.0mの時に約4倍、管長が2.0mの時は約2倍となり、ダンパーを付加することで、どの試験体のケースにおいてもダンパー無の時に比べ加速度応答倍率の最大値を抑えることができ、その効果は連結管が長いほど大きい。固有周期はダンパー無の場合に比べ、管長0.5m、1.0mで短くなっているが、これはダンパーを構成するシール材の剛性が付加されたためである。

管長0.5mの時に0.16秒、1.0mの時0.20秒、2.0mの時0.26秒と、連結管が長くなり管内の液体量が増えことで慣性質量が増加し、長周期化される結果が得られた。本ダンパーの液流抵抗について、管内摩擦、急縮小部、急拡大部の変位・内圧差履歴ループを図6～図8に示す。

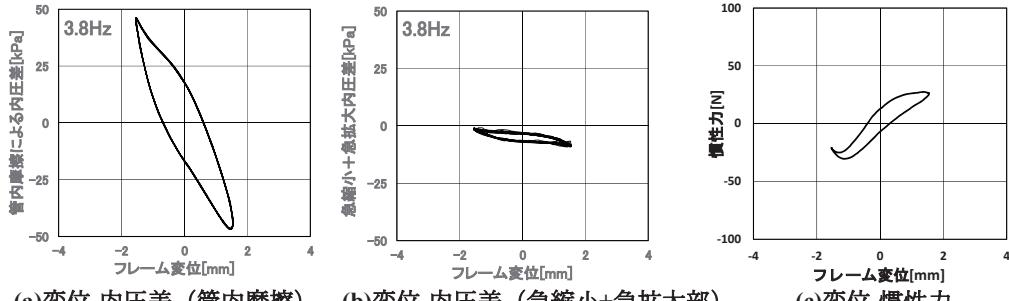




(b)変位-内圧差 (急縮小+急拡大部)

(c)変位-慣性力

図7 履歴ループ (10Φ 1.0m-5.0Hz)



(b)変位-内圧差 (急縮小+急拡大部)

(c)変位-慣性力

図8 履歴ループ (10Φ 2.0m-3.8Hz)

管内摩擦による内圧差に比べ、急縮小部と急拡大部の内圧差は小さく、エネルギー吸収もほとんどないことがわかる。また、管長を長くすると変位 - 内圧差履歴ループの負剛性の傾きが大きくなることが確認でき、結果として変位 - 慣性力履歴ループの傾きは小さくなり、建物が長周期化される。

5. 地震波加振試験結果

各地震波における加速度応答スペクトルを用いて地震波加振試験の結果を整理したものを、図9～12に示す。なお、各応答スペクトルは、地震波加振試験結果より得られたそれぞれの固有周期における応答加速度と一致するよう減衰定数を調整して作成している。

地震波加振試験の結果を一覧にまとめたものを表1に示す。表内の等価粘性減衰定数は、地震波加振試験と応答スペクトルとの対応より求めたものである。

表1および図9～図12に示すように、全ての地震波ケースでダンパー無しのケースに比べてダンパーを付加することにより応答加速度を1/2程度に低減することができている。また、連結管の長さを変化させた場合、地震波によって減衰定数にはばらつきがあるものの、連結管を長くするほど減衰定数は大きくなる傾向を示し、正弦波加振試験と同様の結果が得られた。

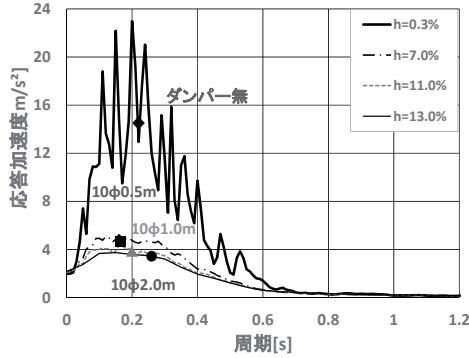


図9 加速度応答スペクトル (BCJ-L1波)

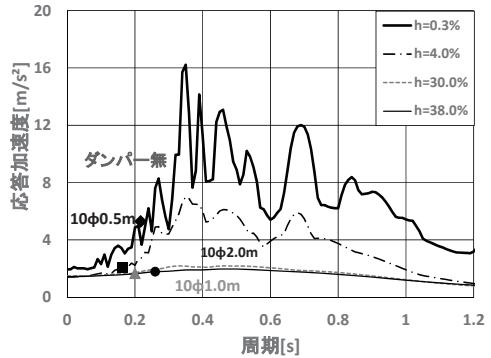


図10 加速度応答スペクトル

(JMA 神戸 NS 波)

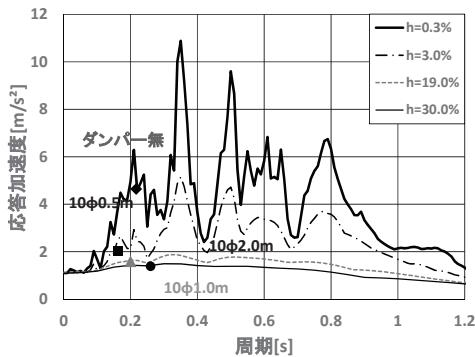


図11 加速度応答スペクトル (八戸 EW 波)

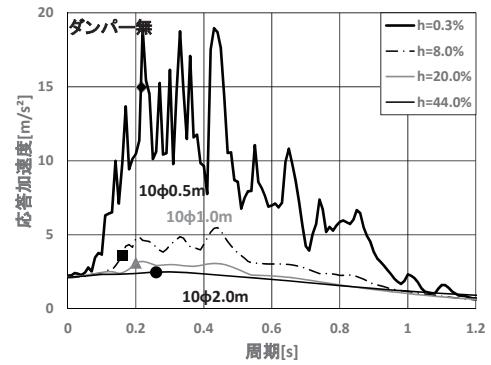


図12 加速度応答スペクトル (タフト EW 波)

表1 地震波加振試験結果と等価減衰定数の比較

| 地震波 | 試験体 ケース | 最大振動台 加速度[m/s ²] | 最大応答 加速度[m/s ²] | 最大応答 変位[mm] | ダンパー 抵抗力[N] | 加速度 応答倍率 | 等価減衰定数 heq [%] |
|----------------|------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|-------------|-------------------|
| BCJ-L1 波 | ダンバー無 | 1.98 | 14.52 | 16.5 | — | 7.32 | 0.3 |
| | 0.5m | 2.16 | 4.70 | 2.64 | 77.2 | 2.18 | 7.0 |
| | 1.0m | 2.15 | 3.89 | 2.4 | 76.8 | 1.81 | 11.0 |
| | 2.0m | 2.18 | 3.43 | 2.43 | 104 | 1.58 | 13.0 |
| JMA 神戸 NS 波 | ダンバー無 | 1.94 | 5.29 | 6.16 | — | 2.73 | 0.3 |
| | 0.5m | 1.39 | 2.03 | 1.18 | 32.6 | 1.46 | 4.0 |
| | 1.0m | 1.47 | 1.69 | 1.06 | 31.3 | 1.15 | 30.0 |
| | 2.0m | 1.44 | 1.77 | 1.39 | 32.1 | 1.23 | 38.0 |
| 八戸 EW 波 | ダンバー無 | 1.10 | 4.65 | 5.47 | — | 4.24 | 0.3 |
| | 0.5m | 1.11 | 2.02 | 1.21 | 30.8 | 1.82 | 3.0 |
| | 1.0m | 1.13 | 1.60 | 1.06 | 24.0 | 1.42 | 19.0 |
| | 2.0m | 1.09 | 1.38 | 0.86 | 22.9 | 1.27 | 30.0 |
| タフト EW 波 | ダンバー無 | 2.25 | 14.97 | 17.54 | — | 6.67 | 0.3 |
| | 0.5m | 2.11 | 3.58 | 2.31 | 52.4 | 1.69 | 8.0 |
| | 1.0m | 2.16 | 3.12 | 2.3 | 49 | 1.44 | 20.0 |
| | 2.0m | 2.15 | 2.47 | 1.55 | 55.7 | 1.15 | 44.0 |

入力地震波の違いについて検討してみると、BCJ-L1 波、八戸 EW 波およびタフト EW 波では連結管が長くなるほど加速度応答倍率は低減している一方で、JMA 神戸 NS 波では管長が 1.0m のケースよりも 2.0m のケースで加速度応答倍率は高くなり、管長と応答低減効果が比例関係を示さない場合もあることが確認された。

本ダンパーの慣性質量効果は、連結管内の液体質量 m_a やダンパーのピストンと連結管の断面積比 β の 2 乗に比例する。そのため、連結管の延長等の改良により慣性質量効果を増加させ、免震構造の周期帯まで建物の長周期が実現できれば、既存の建物へ本ダンパーを付加するだけで簡易免震化が可能となると考える。

6.まとめ

液流ダンパーを付加した 1 層フレームの振動台加振試験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 正弦波加振試験より、連結管が長いほど慣性質量効果が増大し、フレームの固有周期の長周期化と、高い応答低減効果が得られることを確認した。また、ダンパーによるエネルギー吸収が主に管内摩擦で発生していることを確認できた。
- 2) 地震波加振試験より、管長を長くするとそれに伴い等価減衰定数が大きくなる傾向があることを確認した。BCJ-L1 波のように応答が一定となる周期帯での応答の場合、連結管の管長を長くするほど応答低減効果が高くなる。しかし、JMA 神戸 NS 波をはじめとした地震波では、慣性質量効果による固有周期の変化の影響により、連結管を長くするだけでは応答低減に繋がらないケースもあり、最適な応答低減効果を得るために、入力地震動の周期特性を考慮してダンパーの形状を決める必要があることがわかった。これらの課題については継続的な検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費（基盤研究（C）No17K06652、建物の機能維持を目指した慣性質量効果を有する制振機構の実建物への適用に関する検証、研究代表：船木尚己）のもとで実施されました。ここに記して感謝を表します。

参考文献

- 1) 畑中友ほか：東北地方太平洋沖地震における学校建物の機能被害とその要因分析、コンクリート工学年次大会 2014, Vol.36, pp.961-966, 2014.7
- 2) 国土交通省、国土技術政策総合研究所：熊本地震における建物被害の原因分析を行う委員会報告書、2016
- 3) 鈴木敦詞ほか：慣性質量効果を有する液流ダンパーの抵抗特性、日本建築学会大会学術講演梗概、pp.1007-1008, 2013
- 4) 畑中友ほか：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた 1 層フレーム試験体の振動応答特性、構造工学論文集 Vol.63B, pp.205-211, 2017