

## 連結機構摩擦ダンパーを用いた3層フレーム免震試験体の地震時過大変形抑制実験\*

東北工業大学 工学部 堀 則男  
 東北大学 工学研究科 趙 自由

### 1. はじめに

免震構造は戸建住宅などにも多く適用されるようになってきたが、応答変形が大きくなるため、巨大地震時や長周期成分を含む地震動による擁壁やストッパーへの衝突も懸念されている。また、過大変形を抑えるのに十分なダンパーを設置した場合には、小地震時や、大地震時の主要動後の応答加速度を低減できないことも問題である。

筆者らは、弾塑性型の復元力特性を有する摩擦ダンパーによる応答加速度の低減<sup>[1]</sup>、さらに連結機構による過大変形の抑制<sup>[2]</sup>について検討してきた。本稿では多質点系の免震試験体を対象とした振動台実験により、連結時の振動性状、履歴型のダンパーを設置した場合の短周期振動励起の問題について検討を行った。

### 2. 連結機構摩擦ダンパーを用いた免震構造システム

**2.1 システム概要と機構** 図1にシステムのプロットを示す。連結機構摩擦ダンパーは、通常のダンパー付き免震構造に付加して用いられ、ある程度大きな応答変形が生じた場合に連結して摩擦力を発揮する。図2にダンパーの機構模式図を示す。摩擦力は、摩擦部で内部ロッドを締めつけることによって生じ、締めつけの程度によって大きさを調整することができる。

- (a) 連結前：応答変形が設定クリアランス以下であれば、摩擦ダンパーとして機能しない。
- (b) 連結後：連結部はソケット式となっており、設定クリアランスを超える応答変形が生じた場合に外部ロッドと内部ロッドが連結し、その後は外れることなく力を伝えることとなる。内部ロッドに力が作用するときには、まずコイルばねが伸縮して弾性復元力を発揮し、その力が摩擦力よりも大きくなると滑り始める。この機構により、ダンパー全体としては完全弾塑性型の復元力特性となるため、弾性剛性によって連結時の衝撃を緩和し、短周期振動の励起を抑制できると考えられる。

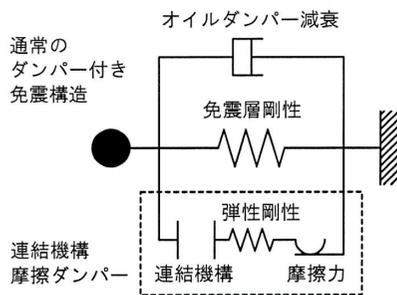


図1 システムのプロット

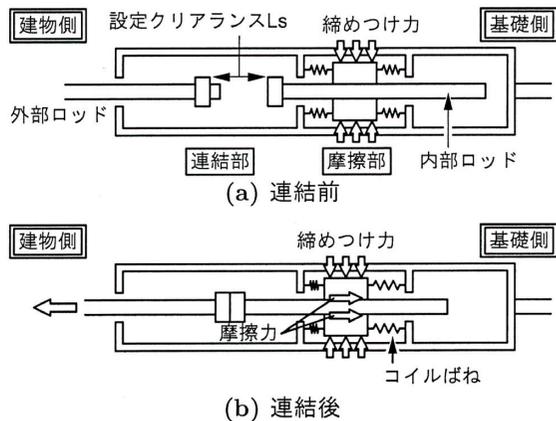


図2 ダンパー機構模式図

\* Control of Seismic Response Displacement of Three Story Base Isolated Structure Specimen by Friction Damper with Joint Mechanism by Norio Hori and Ziyou Zhao

**2.2 ダンパー単体の正弦波加力実験** 実験用のダンパー単体について、設定クリアランス  $L_s=70\text{mm}$  とした状態で、周期 3.0 秒、振幅 90mm の正弦波加力実験を行い、連結機構の作動を確認した。図 3 にダンパーカー変形関係を示す。連結前の、振幅が 70mm より小さい時点では、0.03kN 程度の摩擦力が確認された。

振幅 70mm を超えて連結した後は、74.5kN/m の弾性剛性でダンパー力が上昇し、安定した復元力特性を示した。

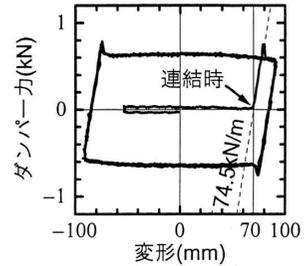


図 3 ダンパーカー変形関係

**3. 免震試験体の振動台実験**

**3.1 試験体概要**

免震試験体を図 4 に示す。H 型鋼製の免震架台はアイソレータである直動ローラー上に設置されており、免震層の水平剛性は幅 125mm、厚さ 9mm の鋼製板ばね 2 組によって模擬されている。上部 3 層フレームの柱も鋼製板ばねである。

静的加力実験、自由振動実験から得られた、免震試験体の質量と剛性は表 1 の通りであり、上部 3 層フレームの基礎固定時の減衰定数は 0.003 程度である。固有周期について、固有値計算による値とホワイトノイズ加振実験の伝達関数による結果を表 2 に示すが、両者の値には多少の差異が生じている。また、刺激関数及び正規化したモード形 ( $\sum m_i s_i u_i^2 = 1$ ) を図 5 に示す。免震層の変形が大きい場合、刺激関数でみた場合にはほとんど 1 次モードのみとなっている。

免震層の粘性減衰係数は 0.3kNs/m (全質量に対して減衰定数 0.028)、直動ローラーの摩擦力は 0.02kN (摩擦係数  $0.73 \times 10^{-3}$ )、設置したオイルダンパーの粘性減衰係数は 2.0kNs/m (全質量に対して減衰定数 0.183) であった。

表 1 免震試験体の質量と剛性

質量		剛性	
R 階	1.07t	3 層	262.0kN/m
3 階	0.47t	2 層	229.0kN/m
2 階	0.37t	1 層	209.3kN/m
1 階	0.87t	免震層	10.7kN/m

表 2 免震試験体の固有周期 (固有振動数)

	固有値計算	加振実験結果
1st	3.28 秒 (0.31Hz)	3.70 秒 (0.27Hz)
2nd	0.50 秒 (2.01Hz)	0.47 秒 (2.15Hz)
3rd	0.22 秒 (4.52Hz)	0.23 秒 (4.35Hz)
4th	0.15 秒 (6.67Hz)	0.16 秒 (6.10Hz)

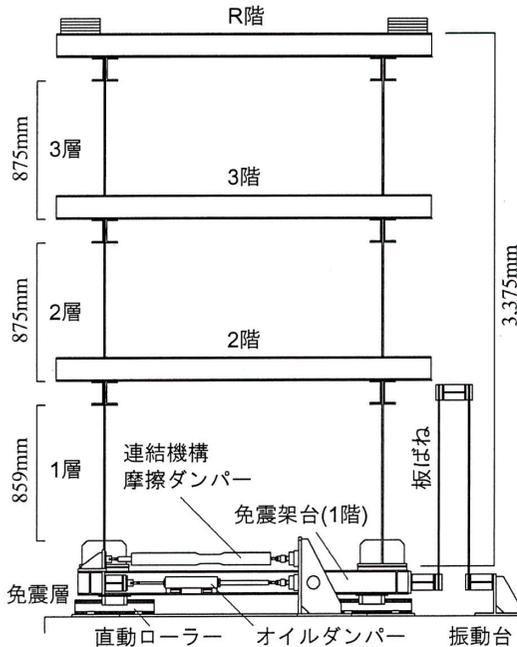


図 4 免震試験体立面図

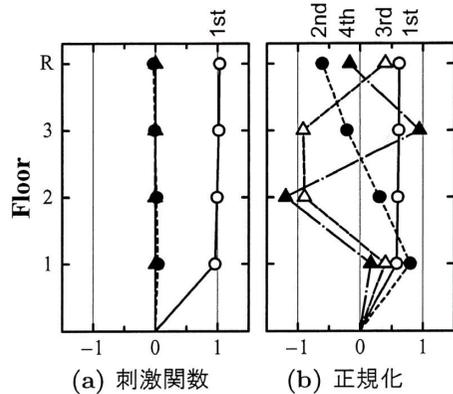


図 5 免震試験体のモード形 (固有値計算)

**3.2 実験ケースと入力地震動** 減衰装置としてオイルダンパーを、過大変形抑制装置として連結機構摩擦ダンパーを設置し、振動台による水平一方向加振実験を行った。連結機構摩擦ダンパーは変形の正側(図4における右向き)でのみ連結するように設置し、以下のように設定した。(a) 連結なし：連結機構摩擦ダンパーの設定クリアランスを十分大きくし、連結・作動しないようにする。即ち、転がり支承+オイルダンパーの、通常の免震構造である。(b) 連結あり：連結機構摩擦ダンパーの摩擦力を  $F_c=0.5\text{kN}$  及び  $0.9\text{kN}$ 、設定クリアランスを  $L_s=70\text{mm}$  とし、連結・作動させる。これにより過大応答時の変形を抑制し、その効果と試験体の振動性状を検討する。

免震試験体は、免震架台も含めて4質点系とした場合と、上部3層フレームの1~3層の層間変形を拘束して上部剛体の1質点系とした場合について実験を行った。

入力地震動のレベルは、4質点系で(a) 連結なしの場合に応答最大変形  $90\text{mm}$  程度となるように設定し、八戸港湾EW(1968十勝沖地震) 68%，JMA神戸NS(1995兵庫県南部地震) 43%とした。加速度応答スペクトルを図6に示す。二つの入力地震動について、1次固有周期での応答はほぼ同程度であるが、高次モードについては神戸NSが大きな値を示している。

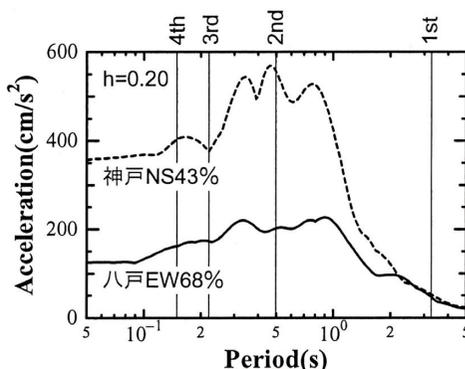


図6 入力地震動の加速度応答スペクトルと免震試験体の固有周期

#### 4. 実験結果

**4.1 時刻歴と履歴ループ** 実験結果の時刻歴を図7~図9に示す。また、免震層及び連結機構摩擦ダンパーの履歴ループを図10、図11に示す。ここで、各階の質量と計測加速度から各階慣性力を求め、これを累加することで免震層の層せん断力を算定している。

1質点系については、応答加速度の時刻歴に小振幅の短周期振動が見られるものの、総体的には3.2秒の固有周期で振動している。4質点系では短周期の振動が加わって応答加速度が大きくなっており、特に神戸NSではR階と1階で大きくなっている。しかし履歴ループは(a) 1質点系と(b) 4質点系は概ね対応しており、高次モードの影響は相殺されていると思われる。

連結機構が作動する場合には、瞬間的には応答加速度が大きくなっているがそれほど過大ではなく、また、連結後は短周期の振動が増加したものの応答変形は抑えられている。

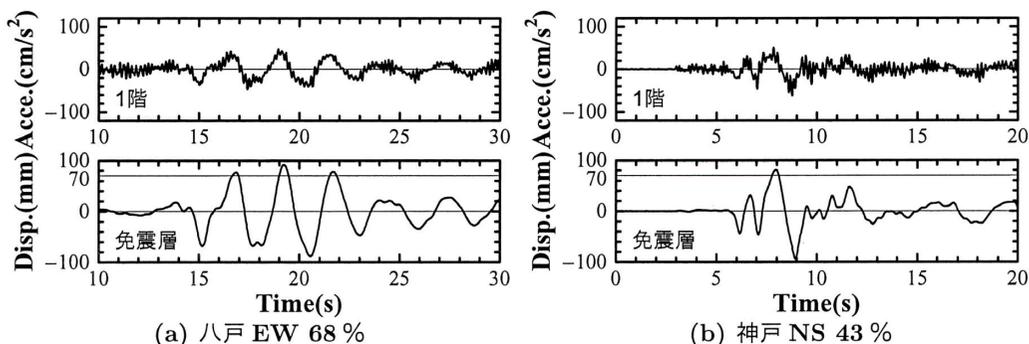


図7 1質点系、連結なしの場合の応答時刻歴

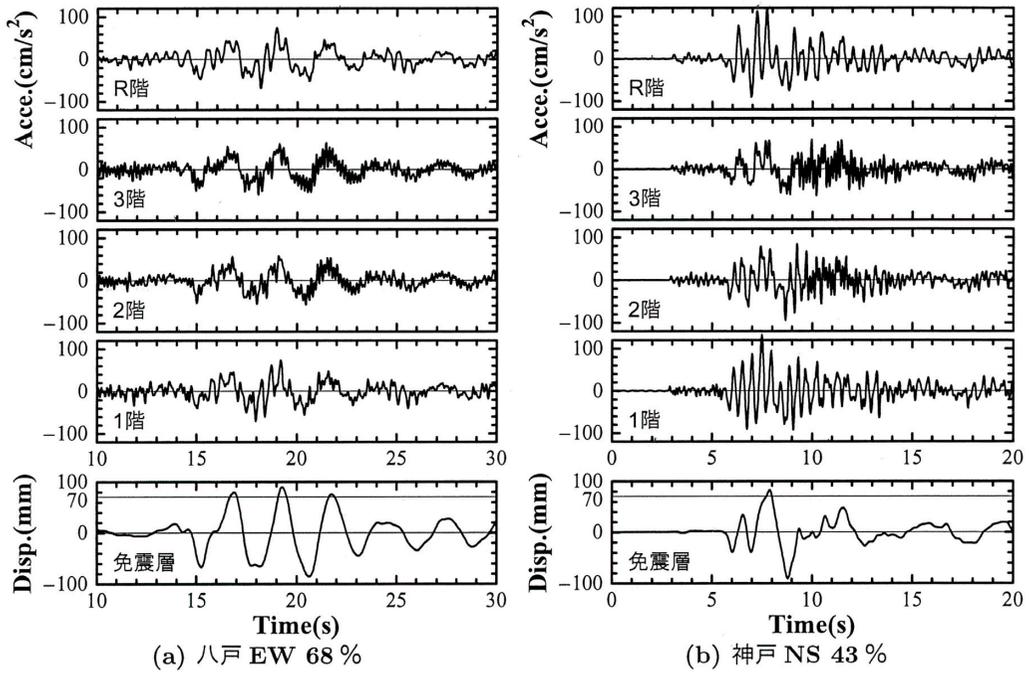


図8 4質点系, 連結なしの場合の応答時刻歴

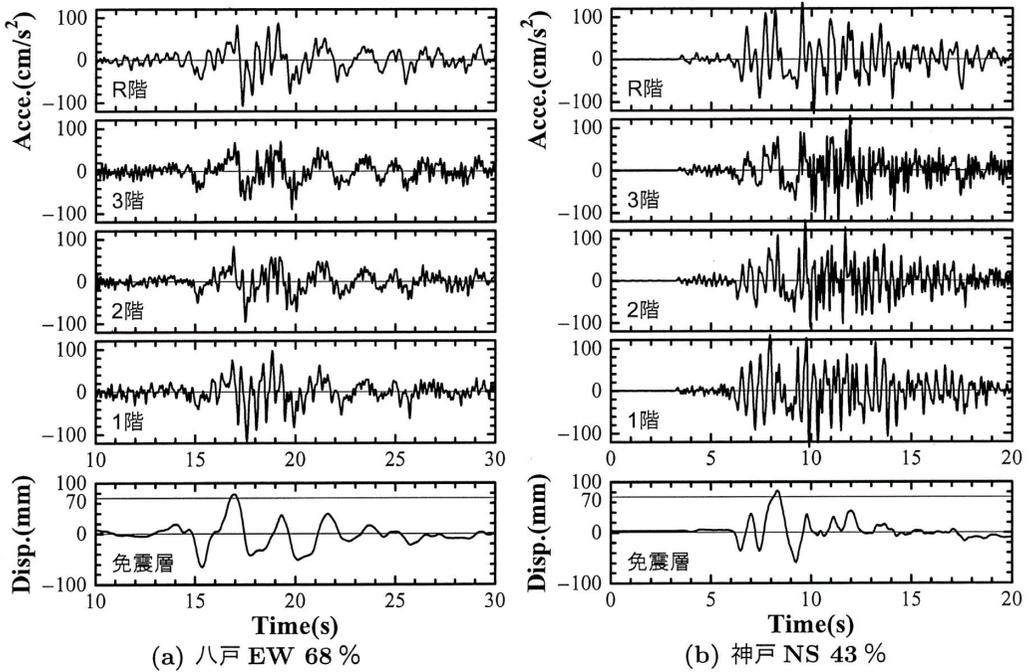


図9 4質点系, 連結あり ( $F_c=0.5\text{kN}$ ,  $L_s=70\text{mm}$ ) の場合の応答時刻歴

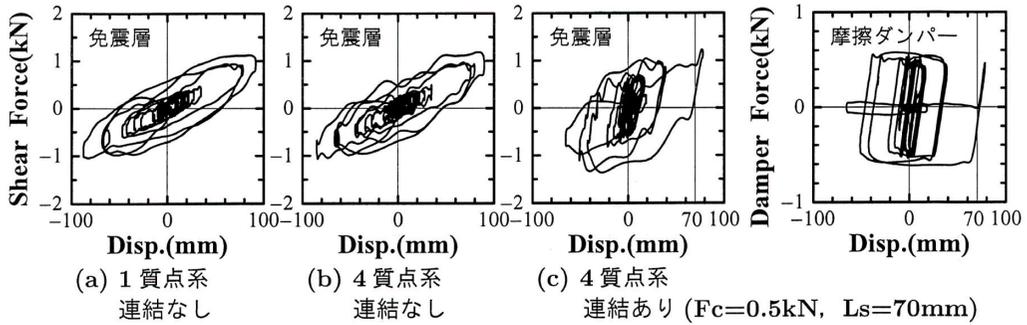


図 10 免震層及び連結機構摩擦ダンパーの履歴 (八戸 EW 68%)

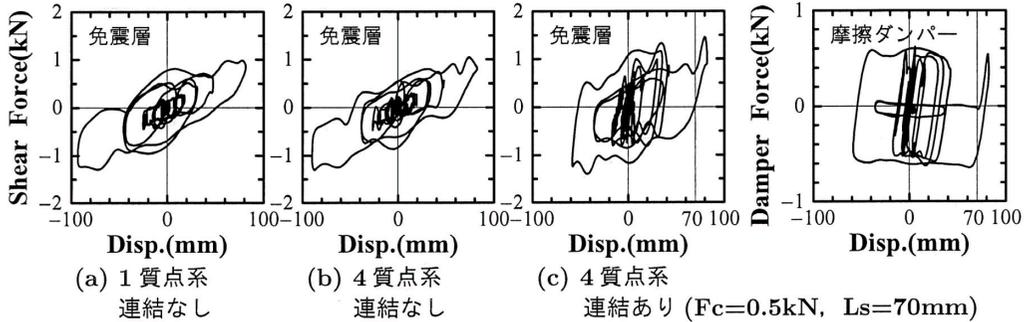


図 11 免震層及び連結機構摩擦ダンパーの履歴 (神戸 NS 43%)

4.2 応答最大値 図 12 に応答最大値を示す。

図 12(b) は免震層位置についての、応答加速度と応答変形である。連結なしの場合に 90mm 程度である免震層変形は、連結ありの場合には 70~80mm 程度に低減され、応答加速度も大幅に増加してはいないといえる。摩擦力  $F_c=0.9\text{kN}$  の場合には、免震層変形は  $F_c=0.5\text{kN}$  の場合と同程度ながら応答加速度は大きくなってしまった。

図 12(a) に示す応答加速度の高さ方向分布については、八戸 EW の場合は概ね均一であり、1 次モードの振動が卓越していると考えられる。一方神戸 NS の場合は、連結なしの場合は R 階と 1 階で大きく、3 階が節になる 2 次モードの振動と考えられる。連結ありの場合は均一に近づいている。

4.3 振動特性の検討

4 質点系の実験結果より、計測された応答加速度の Fourier 振幅スペクトルを図 13 に示す。また、試験体みのホワイトノイズ加振実験結果から得られた固有振動数と、免震層の剛性を板ばね  $10.7\text{kN/m}$  + 連結機構摩擦ダンパー弾性剛性  $74.5\text{kN/m} = 85.2\text{kN/m}$  として固有値計算か

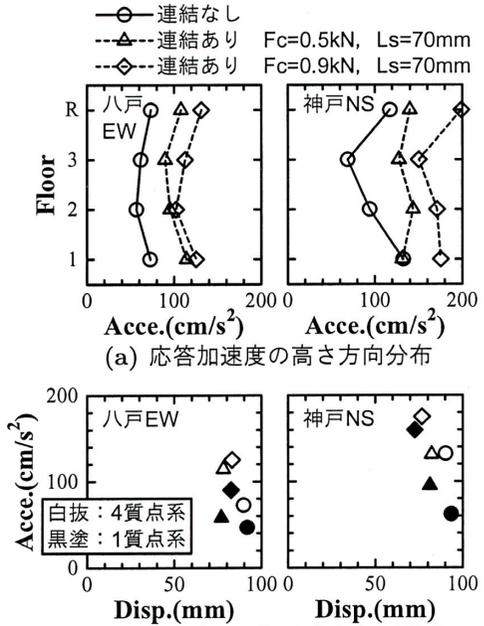


図 12 応答最大値

ら得られた1次, 2次の固有振動数を併せて示す。

八戸 EW は1次モード成分がピークとなっているのに対して, 神戸 NS は2次モード成分が大きく, 高次モードの影響が見られる。連結ありの場合には, 試験体+摩擦ダンパー-弾性剛性の1次固有振動数付近でもピークが見られ, また, 2次や3次の成分が増加している。

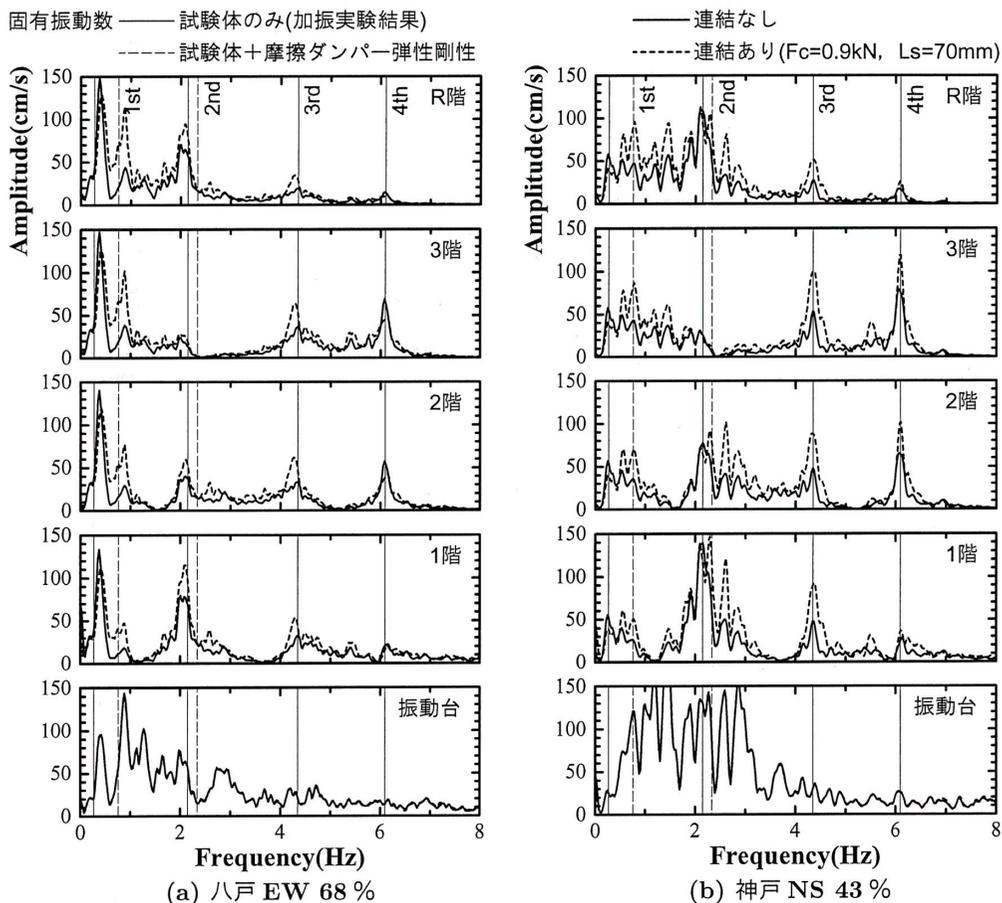


図13 4質点系の実験結果の Fourier 振幅スペクトル

## 5. まとめ

多質点系の免震構造に対しても連結機構摩擦ダンパーは応答変形低減効果のあることが実験的に確認できた。一方で, それほど過大とはいえないが高次モードの振動を励起してしまうため, 適切な弾性剛性, 摩擦力の設定が必要と考えられる。

## 参考文献

- [1] 趙 自由, 堀 則男: 弾塑性型摩擦ダンパーを用いた免震試験体の地震応答性状, 東北地域災害科学研究, 第45巻, pp.117-122, 2009.3
- [2] 趙 自由, 堀 則男, 井上 範夫: 連結機構摩擦ダンパーによる免震試験体の地震時過大変形抑制実験, 第28回 日本自然災害学会学術講演会 講演概要集, pp.1-2, 2009.9