

フラッグ型ダンパーを用いた超長周期免震システムの研究

穴 水 亮 輔 平 田 寛
青 山 優 也

Study of Super-Long Period Seismic Isolation System with Flag Type Damper

Ryosuke Anamizu Hiroshi Hirata
Yuya Aoyama

Abstract

Advanced seismic isolation technologies are expected to reduce the costs of seismic shaking. To achieve this, it is necessary to extend the period of seismic isolation of buildings. In this study, we propose a seismic isolation system that can achieve both a super-long period and suppress residual displacement. The proposed system consists of a flag-type damper and an elastic sliding bearing. The seismic response analysis shows that the proposed system can reduce the acceleration and layer shear force compared to conventional seismic isolation systems. Subsequently, the mechanism of the flag-type damper was devised, and static force tests verified its feasibility on a scaled-down specimen. The experimental results showed that the specimen operated stably, and the restoring force characteristics were as expected.

概 要

地震による揺れのさらなる低減や低コスト化など、免震技術の高度化が期待されている。これらの実現には免震周期の超長周期化が有効である。そこで本研究では、超長周期化と残留変位の抑制を両立可能な免震システムを提案する。提案システムはフラッグ型ダンパーと弾性滑り支承で構成される。地震応答解析を行い、従来の免震と比較して加速度や上部構造層せん断力の低減が可能であることを示した。次にフラッグ型ダンパーの機構を考案したのち、縮小試験体の静的加力実験でその実現可能性を検証した。考案したダンパーは変位方向により復元力が異なる「非対称ブレーキダンパー¹⁾」を用いて原点指向型となる機構を実現したものである。実験の結果、試験体が安定的に動作して想定通りの復元力特性を得られたことから、機構の実現可能性を確認できた。

1. はじめに

免震建物とは支承材および減衰装置で構成される免震層を建物基礎部あるいは中間部に有する建物である。支承材としては主に積層ゴム支承や滑り支承、転がり支承が挙げられる。支承材は建物自重を支える役割とともに、建物を長周期化する役割を持ち、地震時は大きくゆったりと変形する特徴がある。減衰装置としては主に鋼材ダンパーやオイルダンパーが挙げられ、地震エネルギーの大半を免震層の減衰装置が吸収する。これらの装置により、免震建物では免震層より上部の建物（上部構造と呼ぶ）に伝わる地震エネルギーを大幅に低減することができる。免震建物は特に 1995 年の兵庫県南部地震の際にその有用性が世間に広く認知され、現在に至るまで国内外で広く普及している。

一方、長周期パルス地震動²⁾や告示で定められた極めて稀に発生する地震を上回るレベルの地震動の発生が近年危惧されており、これらの地震動に対応可能な免震技術が求められている。また免震建物の居住者を対象に行ったアンケート調査³⁾では震度 5 弱以上の地震が発生

した際に約 8 割の居住者が不安感・恐怖感を感じており、より高い居住性を実現する意味でも免震技術の高度化が期待されている。

免震建物は免震層の水平剛性が小さいほど、すなわち免震周期が長いほど、地盤面に対する上部構造の絶縁効果が高くなり上部構造の応答加速度が小さくなる。本論文では免震層の初期剛性あるいは 2 次剛性がゼロ（周期無限大）な免震を「超長周期免震」と呼ぶ。超長周期免震の既往研究としては、滑り支承を用いた検討⁴⁾や空気圧で建物を浮上させる研究⁵⁾が挙げられる。しかしこれらの方法を採用した場合、大地震時に過大な残留変位が生じ、復旧作業に多大なコストを要する恐れがある。また建物浮上免震を建物に適用する場合、膨大な空気圧が必要であり、コスト・技術面で課題が多いと考えられる。

そこで本研究では、フラッグ型ダンパーを用いた免震システムを提案する。フラッグ型ダンパーとは、復元力がフラッグ型の履歴⁶⁾を描く履歴ダンパーである。フラッグ型ダンパーが有する原点に戻り易い性質に加えて、2 次剛性をゼロにすることで残留変位の抑制と超長期化を両立した免震システムを目指す。2 章では提案免震シ

システムの概要を述べ、3章では実建物への適用を想定した地震応答解析を行い、既往の免震システムに対する優位性を示す。既往のフラッグ型ダンパーとしては海外のメーカーによって制震建物用のものが開発されている⁷⁾が、免震として用いる上ではストロークが小さく本免震システムに適用できない。そこで4章では新たなフラッグ型ダンパーを考案し、その実現可能性および履歴特性を静的加力実験にて確認した結果を報告する。

2. 提案免震システムの概要

提案する免震システムの構成をFig. 1に示す。本システムでは弾性滑り支承とフラッグ型ダンパーを並列に設置する。フラッグ型ダンパーの復元力特性をFig. 2のa)に示す。本ダンパーは変位および速度の正負に応じて減衰力を切替え可能な機構を有している。変位および速度がどちらも正または負の場合の減衰力 dQ_{y1} が、変位および速度の正負が異なる場合の減衰力 dQ_{y2} よりも大きくなるように復元力特性を設定する。すなわち原点から離れる方向に変位する場合は抵抗力が強くなり、近づく方向に変位する場合は抵抗力が小さくなる。そのため地震動による慣性力が正負両方向に繰り返して作用した場合、上部構造は原点に戻りやすく、残留変形が生じにくくなる。

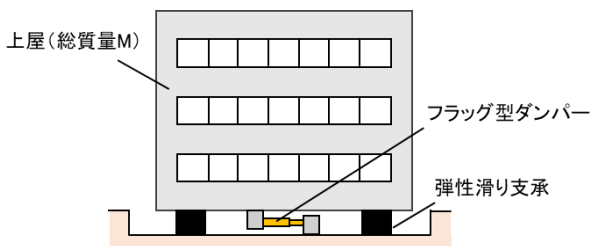


Fig. 1 超長周期免震システムの構成
Super-Long Period Seismic Isolation System

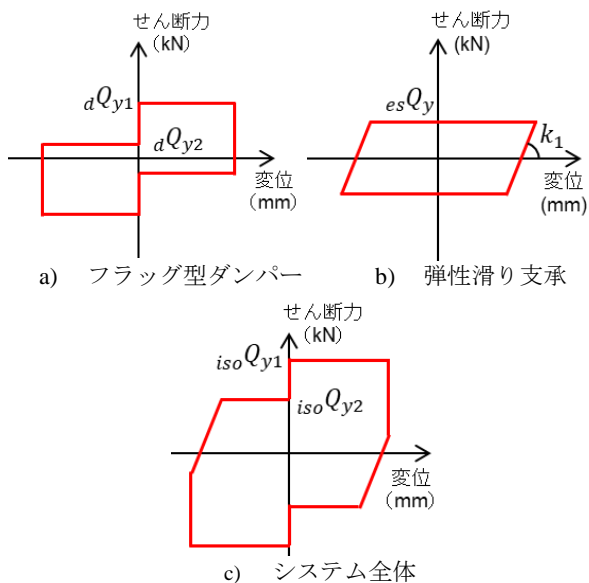


Fig. 2 復元力特性
Force-Displacement Relation

また、降伏後の2次剛性はゼロとすることで長周期化を図る。弾性滑り支承は上部構造の重量を支持するとともに、2次剛性ゼロによる長周期化効果と履歴減衰を補う役割を持つ。滑り荷重を esQ_y 、1次剛性を k_1 とする弾性滑り支承の復元力特性をFig. 2のb)に、フラッグ型ダンパーと弾性滑り支承を並列に組み合わせた免震層全体の復元力特性をFig. 2のc)に示す。

3. 地震応答解析による効果検証

3.1 パラメトリックスタディ

本免震システムを建物に適用した場合の、復元力特性値と各応答との関係性を探索するためにシミュレーションでパラメトリックスタディを行う。対象建物は過去実際に設計・施工された鉄骨造5階建ての免震建物とする。本論では、各層の質量および水平剛性を質点とばねに置換した6層質点モデル(Fig. 3)で振動解析を実施する。なお、2階床は吹抜けが2箇所あることを考慮して3質点でモデル化する。Table 1に建物総質量 M 、免震層の水平剛性を剛とした場合の1次固有周期および減衰定数を示す。提案免震システムが適用されること想定し、免震層はFig. 2のc)に示した復元力特性を有する。パラメトリックスタディでのパラメータはフラッグ型ダンパーの降伏せん断力係数(高減衰側) $d\alpha_{y1}(=dQ_{y1}/Mg)$ 、フラッグ型ダンパーの降伏せん断力係数(低減衰側) $d\alpha_{y2}(=dQ_{y2}/Mg)$ 、弾性滑り支承の摩擦係数 $es\alpha_y(=esQ_y/Mg)$ 、弾性滑り支承の1次周期 $T_1(=2\pi\sqrt{M/k_1})$ とする。ただし、 g は重力加速度である。Table 2にパラメータ値の範囲を示す。フラッグ型ダンパーの減衰力の切替えは非対称ブレーキダンパーの機構により実現することを想定している。そのため $d\alpha_{y2}/d\alpha_{y1}$ 比は非対称ブレーキダンパーの実験結果⁷⁾で得られた値を用いるものとして1/6に設定した。入力地震動は、告示で規定された工学的基盤における極めて稀に発生する地震動(乱数位相)を地盤増幅の影響を考慮して振幅1.2倍とした波(Fig. 4)とする。

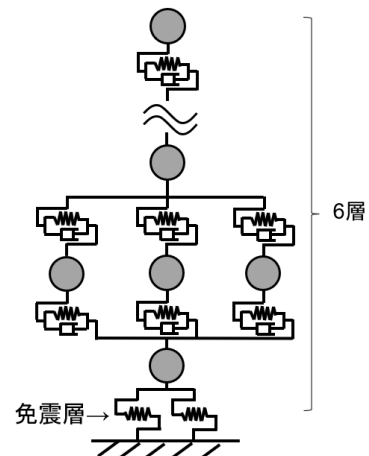


Fig. 3 免震建物モデル
Seismic Isolation Structure Model

Table 1 建物モデルの諸元
Specifications of Structure Model

建物総質量M (t)	70261
免震層固定時の1次固有周期 (s)	1.54
免震層固定時の減衰定数 (%)	1.0

Table 2 パラメータの範囲
Range of Parameters

ダンパーの 降伏せん断力係数	$0.001 \leq d\alpha_{y1} \leq 0.03$ (0.0005刻み)
支承の摩擦係数	$0.0 \leq es\alpha_y \leq 0.04$ (0.002刻み)
支承の1次周期 (s)	$1.0 \leq T_1 \leq 5.0$ (1.0刻み)

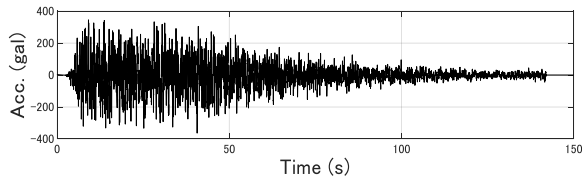


Fig. 4 告示波 (乱数位相) の時刻歴波形
Time History Wave of Simulated Earthquake Motion

Fig. 5 の a)~c)は横軸をフラッグ型ダンパーの降伏せん断力係数 $d\alpha_{y1}$ 、縦軸を弾性滑り支承の摩擦係数 $es\alpha_y$ とし、等値線で 1)5 階フロアの最大加速度応答、2)免震層最大変位、3)免震層残留変位を T_1 ごとに示した図である。

Fig. 5 の a)~c)より、5 階フロアの最大加速度は $d\alpha_{y1}$ 、 $es\alpha_y$ が小さいほど減少し、 T_1 が長いほど減少する傾向にある。また免震層変位は T_1 が長いほど増加する傾向にある。これは $d\alpha_{y1}$ 、 $es\alpha_y$ が小さく、 T_1 が長いほど免震層の等価剛性 (最大変形時の割線剛性) が低減し、長周期化するからだと考えられる。同図より残留変位は、 $T_1 = 1$ 、 $T_1 = 3$ の場合 $d\alpha_{y1}$ が大きいほど減少する傾向にあり、 $d\alpha_{y1}$ が一定値を超えると残留変位は殆ど生じないことがわかる。 $T_1 = 5$ の場合は $d\alpha_{y1}/es\alpha_y$ 比が大きいほど減少する傾向で、 $d\alpha_{y1}/es\alpha_y$ 比が一定値を超えると残留変位は殆ど生じないことがわかる。また、 T_1 が長いほど残留変位は増加する傾向にある。図中の破線は残留変位 5cm 以下となる範囲を概ね包絡する線を示している。本スタディの条件に限るが、 $T_1 = 1$ の場合は $d\alpha_{y1} \geq 0.009$ 、 $T_1 = 3$ の場合は $d\alpha_{y1} \geq 0.004$ 、 $T_1 = 5$ の場合は $d\alpha_{y1}/es\alpha_y \geq 0.75$ とすれば残留変位を 5cm 以下に抑制可能である。一方、風圧力に対して問題となるような滑りが生じないように免震層の降伏荷重を設定する必要があるため、

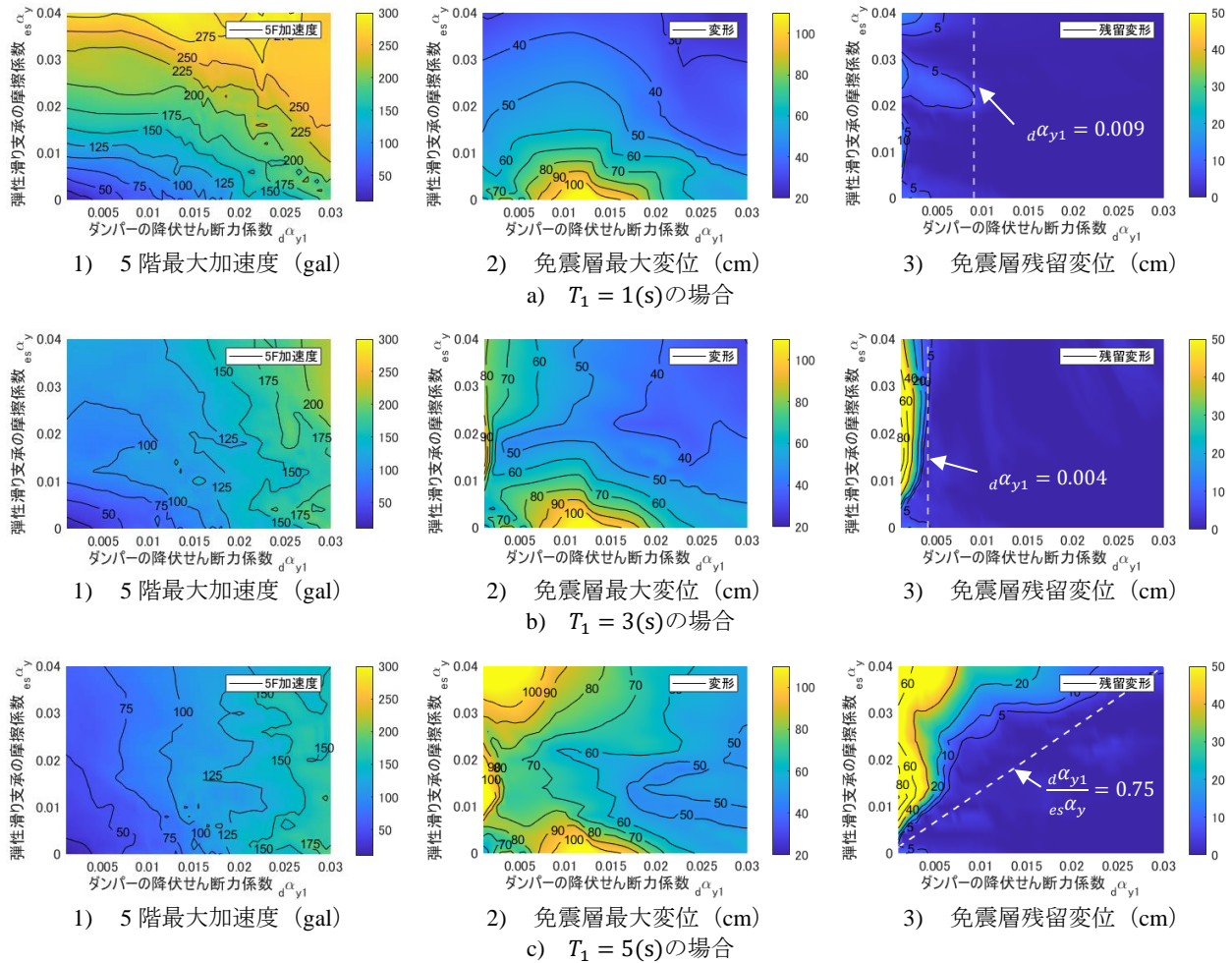


Fig. 5 $d\alpha_{y1}$ 、 $es\alpha_y$ と各応答の関係
Relationship Between $d\alpha_{y1}$, $es\alpha_y$ and Responses

$d\alpha_{y1}$, $es\alpha_y$ を過少には出来ない。従って、設計条件や設計目標に応じて $d\alpha_{y1}$, $es\alpha_y$, T_1 をバランス良く調整する必要がある。

3.2 既往免震システムとの比較

本節では復元力特性値の設計例を示すと同時に、一般的な免震システムとの応答比較を行う。一般的に採用される免震システムは様々であるが、本研究では天然ゴム系積層ゴム支承(NRB)、弾性滑り支承(ES)およびオイルダンパーで構成される免震システムを対象とする(以後、既往免震と呼ぶ)。Fig. 6に既往免震の復元力特性を示す。図中の T'_1 および T'_2 は、上部構造が剛な場合の1次(初期)周期および2次(降伏後)周期である。対象モデルは前節と同様にFig. 3の6層質点モデルとする。

提案免震および既往免震の復元力特性は建物の設計目標に応じて決定するとし、Table 3に示す2通りの設計目標を想定する。設計目標①は大地震時の居住性と安全性を重視した場合であり、上部構造最大加速度の最小化を目標にした。ここでは建物から擁壁までのクリアランスを一般的な免震建物に比べて長くできると仮定する。この場合免震層の許容変位は、既往免震ではNRBの許容変形量で決まる一方、提案免震ではNRBを使用しないため許容変位をより大きくできる。従って提案免震では80cm, 既往免震では50cmとした。設計目標②は建設コストの低減を重視した場合である。上部構造層せん断力の最小化を目標としており、柱梁の断面削減によるコスト低減が期待できる。また、敷地条件等を考慮して免震層変位の上限は両者とも40cmとした。設計目標①, ②ともに免震層の一般的な許容残留変位である5cmを残留変位の上限とした。また、告示で規定された再現期間50年相当の風圧力に対して弾性すべり支承がすべらないよう、降伏せん断力係数は0.018を下限とした。

提案免震と既往免震それぞれでパラメトリックスタディを行い、Table 3に示す条件のもとで最小化対象が最小となる復元力特性を探索した。パラメータ範囲は、提案免震についてはTable 2, 既往免震はTable 4に示す値とした。入力地震動は工学的基盤における極めて稀に発生する地震動3波(乱数位相, 神戸NS位相, 八戸EW位相)を振幅1.2倍とした波に加えて、南海トラフ地震を想定した長周期地震動⁸⁾3波(OS2, CH2, SZ2)の計6波とし、最大値で評価する。Fig. 7に各入力地震動の疑似速度応答スペクトルを示す。以上の方法で決定した復元力特性値をTable 5, 6に示す。

解析の結果得られた各層の最大相対変位, 最大層間変形角, 最大層せん断力, 最大絶対加速度について、設計目標①でパラメータ設定した場合をFig. 8(a)に、設計目標②でパラメータ設定した場合をFig. 8(b)に示す。Fig. 8(a)よりすべての層で既往免震の場合より最大絶対加速度, 最大層せん断力, 最大層間変形角を低減できていることがわかる。1FL~5FLにおける最大加速度は1FLで最も大きく96.5galであった。また、最大加速度は4FLで最

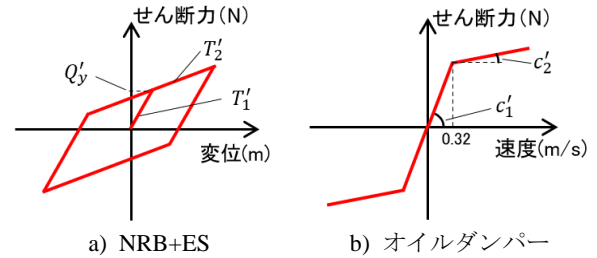


Fig. 6 既往免震の復元力特性
Restoration of Conventional Seismic Isolation System

Table 3 設計目標
Design Objectives

設計目標のタイプ	条件	最小化対象
目標① 居住性重視タイプ	<ul style="list-style-type: none"> 免震層変位80cm以下(既往免震は50cm以下) 残留変位5cm以下 $d\alpha_{y1} + es\alpha_y \geq 0.018$(既往免震は$es\alpha_y \geq 0.018$) 	1FL~5FLの最大加速度
目標② コスト重視タイプ	<ul style="list-style-type: none"> 免震層変位40cm以下 残留変位5cm以下 $d\alpha_{y1} + es\alpha_y \geq 0.018$(既往免震は$es\alpha_y \geq 0.018$) 	上部構造1層目~最上層の最大層せん断力

Table 4 既往免震のパラメータ範囲
Range of Parameters
(Conventional Seismic Isolation System)

1次周期 T'_1 (s)	$1.0 \leq T'_1 \leq 4.0$ (1.0刻み)
2次周期 T'_2 (s)	$3.0 \leq T'_2 \leq 6.0$ (1.0刻み)
降伏せん断力 Q'_y (N)	$0.018Mg \leq Q'_y \leq 0.04Mg$ (0.002Mg刻み)
1次減衰係数 c'_1 (Ns/m)	$0.0 \leq c'_1 \leq 0.125Mg$ (0.0156Mg刻み)
2次減衰係数 c'_2 (Ns/m)	$0.068c'_1$

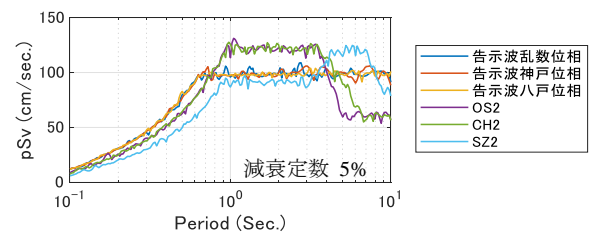


Fig. 7 入力地震動の疑似速度応答スペクトル
Pseudo-Vel. Response Spectrum of
Simulated Earthquake Motion

Table 5 既往免震の復元力特性値
Parameters of Conventional Seismic Isolation System

設計目標	目標①	目標②
1次周期 T'_1 (s)	4.0	2.0
2次周期 T'_2 (s)	6.0	6.0
降伏せん断力 Q'_y (N)	0.020Mg	0.018Mg
1次減衰係数 c'_1 (Ns/m)	0.0625Mg	0.0625Mg
2次減衰係数 c'_2 (Ns/m)	$0.068c'_1$	$0.068c'_1$

も低減率が高く、およそ50%低減していることがわかる。地震時に不安を感じる人の割合は最大加速度の大きさに応じて変化すると考えられる⁹⁾ため、提案免震は比較的地震時の不安度を低減可能だと示唆された。一方、最大相対変位は既往の免震システムより増大するため、上部構造から擁壁までのクリアランスを十分確保できることが条件となる。また、残留変位は4cmであった。

Fig. 8(b)より設計目標②でパラメータ設定した場合、提案免震の免震層最大変位および最大絶対加速度は既往免震と同程度である一方、最大層せん断力はすべての層で低減していることがわかる。上部構造の最大層せん断力では2層目（上部構造1層目）で最も低減率が高く、約23%低減できていることがわかる。

ここで、設計目標②でパラメータ設定した場合、最大層せん断力が低減した要因を考察する。入力波6波の中で比較的応答が大きかった告示波乱数位相入力時の2層目層せん断力を Fig. 9 に示す。

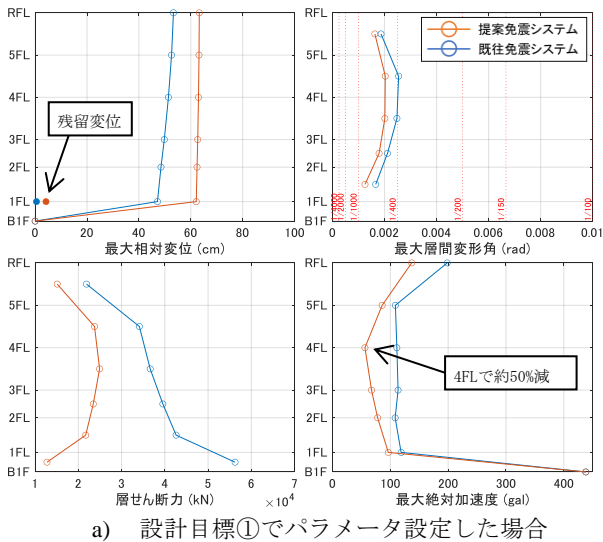


Fig. 8 各層の最大応答
Maximum Responses of Each Story

同図より既往免震で2層目層せん断力が最大となる17.4秒付近では、提案免震の応答は約40%低減していることがわかる。同時刻での上部構造の相対変位（1FLで基準化）をFig. 10に示す。Fig. 10から、既往免震は1次モードの相対変位分布が現れているのに対し、提案免震は高次モードの分布が現れていることがわかる。さらに、17.4秒を含む時間帯（15秒～25秒）の1FL加速度のパワースペクトル密度をFig. 11に示す。Fig. 11から提案免震は0.3秒以下の帯域が増大していることがわかる。以上より、提案免震では高次モードが比較的励起されたと考えられる。

Table 6 提案免震の復元力特性値 Parameters of Proposal Seismic Isolation System		
設計目標	目標①	目標②
T_1 (s)	4.0	3.0
$d\alpha_{y1}$	0.0045	0.0155
$es\alpha_y$	0.0140	0.0220

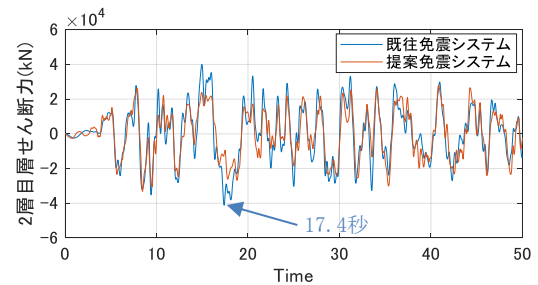


Fig. 9 告示波乱数位相入力時の2層目層せん断力
2nd Story Shear Force
during Simulated Earthquake Motion Input

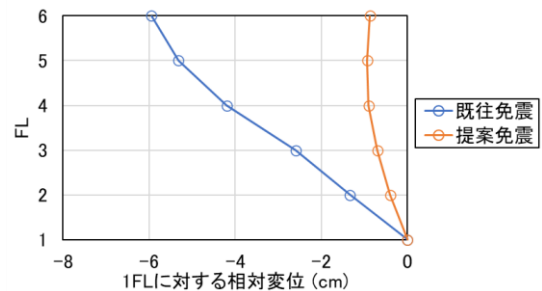


Fig. 10 既往免震の2層目層せん断力最大時刻(17.4s)
での上部構造の相対変位分布
Relative Displacement Distribution at 17.4s

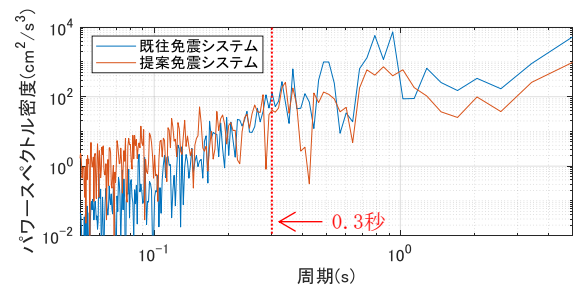


Fig. 11 1FL絶対加速度応答のパワースペクトル密度
PSD of Acceleration Responses at 1st Story

高次モードの振動が多く含まれる場合は、1次モードの振動が支配的な場合と比較して2FL～RFLに作用する水平力の和が小さくなるため、2層目層せん断力が低減したと考えられる。高次モードが励起された要因は、フラッグ型ダンパーの初期剛性により、小変位時の等価周期が短いことが要因だと考えられる。

4. フラッグ型ダンパーの要素試験

4.1 フラッグ型ダンパーの概要

本章では新たに考案したフラッグ型ダンパーの機構を記すとともに、履歴特性を静的加力実験にて確認した結果を報告する。

考案したフラッグ型ダンパーは正側と負側で異なる減衰力を付与可能な「非対称ブレーキダンパー」¹⁾とシアキーを組合せた機構を直列に接続したものである。Fig. 12に非対称ブレーキダンパーの基本構成を示す。非対称ブレーキダンパーは通常のブレーキダンパー¹⁰⁾に楔材A、Bを挟み込んだもので、引張側と圧縮側で摩擦面垂直抗力が変動する仕組みである。Fig. 12のa)の低減衰力状態からb)に示す矢印の方向に変形を与えると、制震用摺動面は摺動せずに傾斜摺動面のみが摺動してb)の状態となる。このとき、楔材の傾斜によって厚みが増えて皿ばねの変形が大きくなるため、摩擦面垂直抗力が増加する。さらに変形を与えると傾斜摺動面は摺動せずに制震用摺動面のみが摺動し、減衰力が発生する。なお、減衰力は

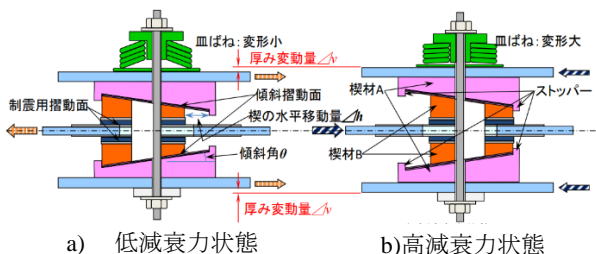


Fig. 12 非対称ブレーキダンパーの基本構成¹⁾
Basic Configuration of Asymmetric Brake-Damper

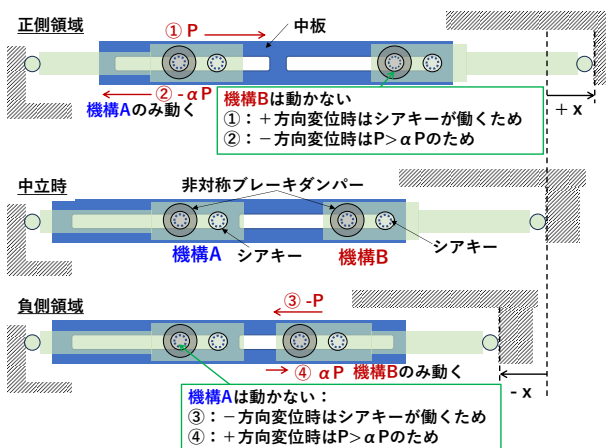


Fig. 13 フラッグ型ダンパーの概要図
Configuration of the Flag Type Damper

摩擦面垂直抗力に比例するため、結果として引張側と圧縮側で減衰力が変動する。

Fig. 13に今回考案したフラッグ型ダンパーの概要を示す。非対称ブレーキダンパーとシアキーを組合せた機構をそれぞれ機構A、機構Bと呼ぶ。Fig. 13中立時から正側に変形する（ダンパーが伸びる）際は、機構Bはシアキーと中板が接触するため摺動せず、機構Aの非対称ブレーキダンパーのみ摺動する。このとき機構Aの非対称ブレーキダンパーは高減衰状態（摩擦力： P ）である。

次に正側領域時から中立時に戻る際は、機構Bの非対称ブレーキダンパーは高減衰状態（摩擦力： P ）、機構Aは低減衰状態（摩擦力： αP ）に切替わる。その結果、摩擦力が大きい機構Bは摺動せず、機構Aのみ摺動する。負側に変形する（ダンパーが縮む）際は、機構Aはシアキーが中板に接触するため摺動せず、機構Bの非対称ブレーキダンパーのみ高減衰状態（摩擦力： P ）で摺動する。次に負側領域時から中立時に戻る際は、機構Aの非対称ブレーキダンパーは高減衰状態（摩擦力： P ）、機構Bは低減衰状態（摩擦力： αP ）に切替わるため機構Bのみ摺動する。以上の仕組みによって原点（ダンパーの中立位置）付近で減衰力が切り替わり、フラッグ型の履歴特性を得ることができる。

4.2 実験計画

4.2.1 試験体 試験ケース一覧をTable 7、試験体概要をFig. 14に示す。試験体はI試験体、Y試験体の計2体とし、実機の1/3縮小試験体を想定した。I試験体は前述Fig. 13で示した構成図とほぼ同じ形体であり、上部摺動部分が機構A、下部摺動部分が機構Bに相当する。Y試験体は形体を少し工夫したもので、中央の摺動部分が機構A、両端の摺動部分が機構Bに相当する。Y試験体の形式とすることで、ダンパー全体の長さを抑えつつ、ストロークを大きくできるメリットがある。なお、試験体長さとしてストロークの上限については、後述する載荷試験装置に収まる寸法とし、I試験体は試験体長さを880mm、ストローク上限を ± 60 mm、Y試験体は試験体長さを845mm、ストローク上限を ± 150 mmとした。試験体に使用する鋼材の種類はSN490Bとし、ボルトにはM12（強度区分10.9）を使用した。皿ばねボルトセット数は、I試験体は1セット \times 2（※各機構A、Bに1セットずつ）、Y試験体は2セット \times 2（※各機構A、Bに2セットずつ）とした。なお、載荷振幅は各試験体の許容ストローク範囲内で設定し、I試験体は目標振幅 $\delta = \pm 50$ mmと ± 60 mm、Y試験体は ± 150 mmとし、それぞれの試験ケースをI-d50、I-d60、Y-d150と称することとする。Fig. 15に非対称ブレーキダンパー部の詳細図を示す。皿ばねボルト1セットあたりの高減衰側の目標すべり荷重は20kNとし、高減衰側に対する低減衰側のすべり荷重比が1/10程度となるように楔材の傾斜角 θ は 10° 、楔材の水平移動量 Δh は3mmとした。なお、減衰力の差 ΔP は下式で求まる¹⁾。

$$\Delta P = 2\mu_1 \cdot \Delta h \cdot k \cdot n_f \cdot \tan\theta \quad (1)$$

ここに、
 μ_1 ：制震用摩擦材の摩擦係数
 k ：皿ばねユニットのばね定数
 n_f ：ダンパー1つあたりの摺動面数

4.2.2 荷重方法 荷重は、(株)大林組技術研究所が保有のオートグラフ(250kN)を使用し、荷重速度については、周期360secのほぼ静的な荷重とし、速度は一定に保ちつつ、一定変位振幅の7サイクル繰返し荷重とした。

Table 7 試験ケース一覧
List of Test Cases

試験体 名称	試験 ケース	皿ばね ボルトセット	目標荷重 P (kN)	目標振幅 δ (mm)
I	I-d50	1セット×2	20	±50
	I-d60	1セット×2	20	±60
Y	Y-d150	2セット×2	40	±150

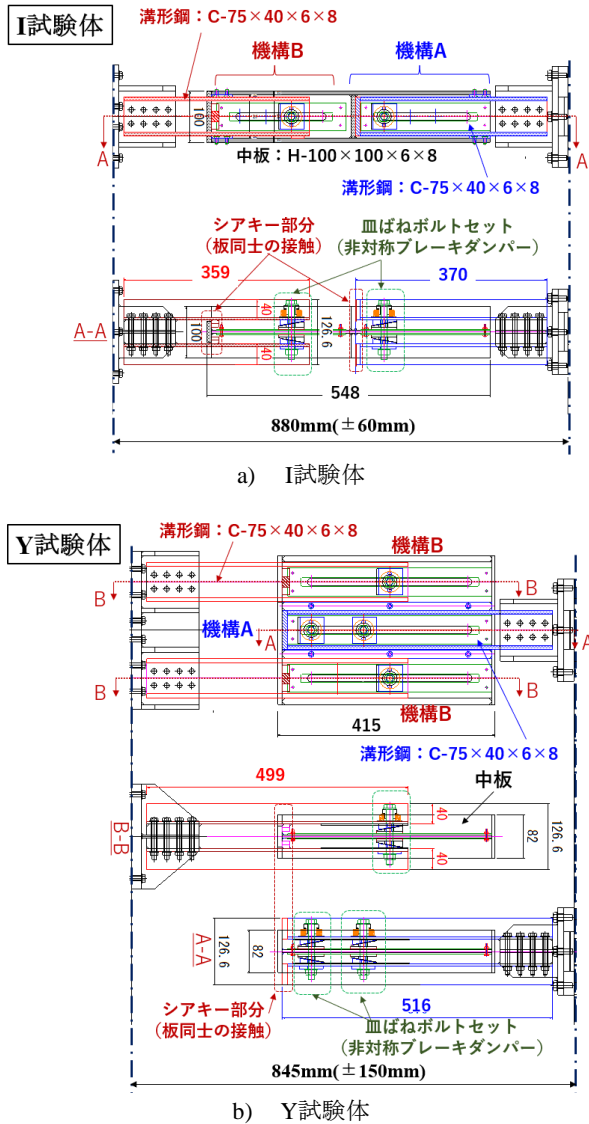


Fig. 14 試験体概要

Configurations of Specimens

4.3 実験結果

4.3.1 実験状況 Y試験体の荷重状況(例)をPhoto 1に示す。Y試験体は、正側領域で作動する機構Aが中央、負側領域で作動する機構Bが両端に配置したものであるが、意図通り、作動する機構(機構A, B)が切り替わり、終止安定した挙動を示すことを確認した。ここには示していないが、I試験体についても同様に意図通りの挙動を示した。

4.3.2 荷重-変形関係 I試験体(I-d50: $\delta = \pm 50$ mm, 7サイクル, I-d60: $\delta = \pm 60$ mm, 7サイクル), Y試験体(Y-d150: $\delta = \pm 150$ mm, 7サイクル)について、荷重P-変位 δ 関係をFig. 16に示す。いずれの荷重ケースにおいても、意図通りのフラッグ型の履歴特性を示しており、繰返しによる滑り荷重の変動は小さく、安定した履歴特性を示した。高荷重側については、目標滑り荷重(I-d50, I-d60: 20kN, Y-d150: 40kN)と概ね対応している。低荷重側について、高荷重側の滑り荷重の1/10程度の荷重となっており、意図通り、非対称ブレーキダンパーが機能することが確認できた。

以上より、考案したフラッグ型ダンパーの実現可能性を確認し、安定した履歴特性を発揮できるデバイスであることをできた。

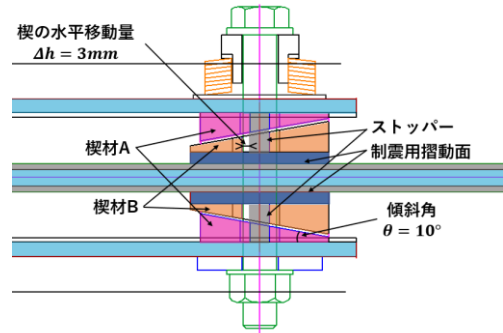


Fig. 15 非対称ブレーキダンパー部の詳細図
Detail of Asymmetric Brake-Damper

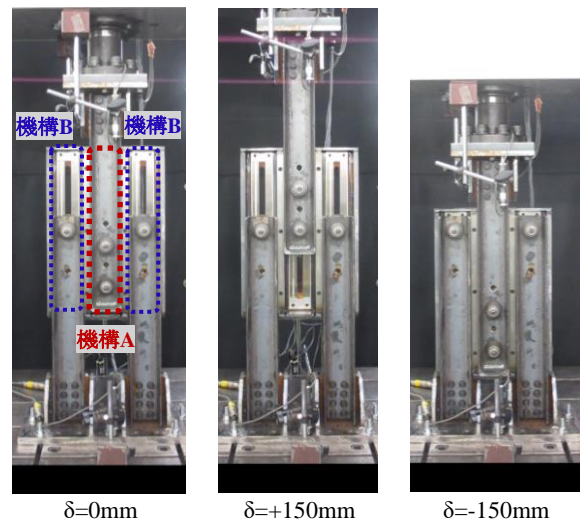


Photo 1 荷重状況 (例: Y試験体)

View of Loading Test

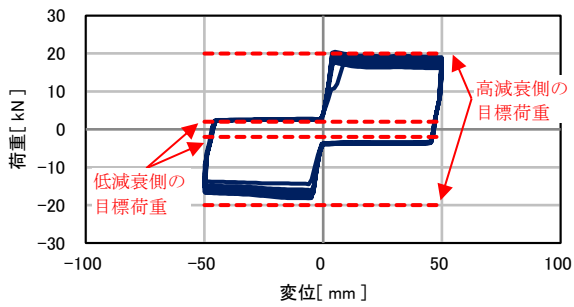
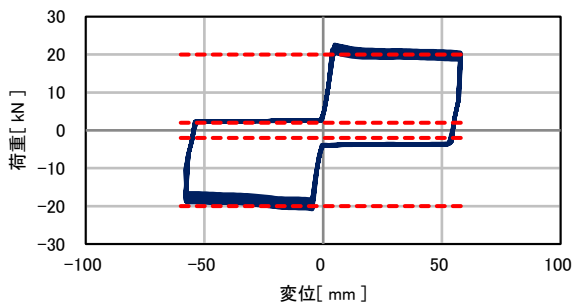
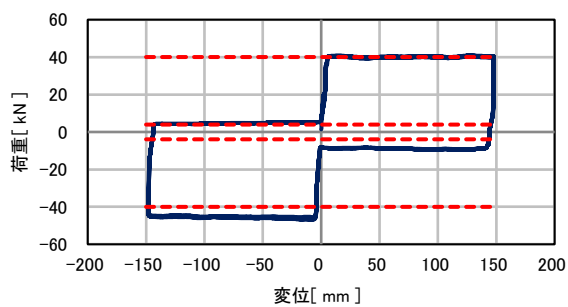

 a) I-d50 : $\delta = \pm 50\text{mm}$, 7サイクル

 b) I-d60 : $\delta = \pm 60\text{mm}$, 7サイクル

 c) Y-d150 : $\delta = \pm 150\text{mm}$, 7サイクル

 Fig. 16 載荷試験結果
Result of Loading Test

5. まとめ

免震周期の超長周期化と残留変位抑制の両立を実現するため、フラッグ型ダンパーと弾性滑り支承を組み合わせた新たな免震システムを提案した。フラッグ型ダンパーは変位と速度の正負に応じて減衰力を切替え可能であり、原点に戻り易い性質を有する履歴ダンパーである。本論文では、本提案システムの実建物への適用を想定した地震応答解析を行い、復元力特性と応答の関係性を考察したほか、一般的な免震システムと応答を比較した。さらに、非対称プレーキダンパーとシアキーを組み合わせた新たなフラッグ型ダンパーの機構を考案し、その実現可能性および履歴特性を静的加力実験にて確認した。本論文の結論を以下にまとめる。

- 1) 告示波（乱數位相，神戸位相，八戸位相）および南海トラフ地震を想定した長周期地震動(OS2, CH2, SZ2)を入力とする地震応答解析の結果，上部構造最大加速度および最大層せん断力を，既往の一般的な免震システムより低減できることが示唆された。

- 2) 考案したフラッグ型ダンパーの静的載荷に対する荷重－変位関係の履歴は，目標荷重と概ね一致し，意図通りフラッグ型の履歴形状を示した。

- 3) 今後は，本フラッグ型ダンパーの動的加力試験や弾性滑り支承を併せた免震システム全体の振動台実験等を行う予定である。

参考文献

- 1) 武田篤史，野村敏雄：橋梁用非対称プレーキダンパーの開発，大林組技術研究所報，No.81，2017
- 2) 井本大貴，森智治，内山泰生，徳光亮一：2016年熊本地震の観測記録におけるパルス性地震動の指向性と周期特性の分析，日本建築学会九州支部研究報告，No.57，2018.3
- 3) 前林和彦，他：2011年東北地方太平洋沖地震における免震建物居住者へのアンケート調査，日本免震構造協会誌，pp.27-32，2013.2
- 4) 池内邦江，村司真生，橘英三郎：すべり支承型免震構造の応答に関する一考察，日本建築学会学術講演梗概集，pp.653-654，2000.9
- 5) 梁婧怡，他：空気浮上システムを活用した3次元免震装置の開発に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.87-88，2019.9
- 6) 菅田昌宏，中塚佑：アンボンドPC圧着エネルギー吸収型高復元性部材のフラッグ型履歴モデルに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.598，pp.133-140，2005.12
- 7) S. Assadi, A. Hashemi, C.Clifton, P. Quenneville, G. MacCrae, H. Bagheri, J. Liang-Jiu, Z. Yan, P. Zarnani. : Shake-table testing of the resilient slip friction joints, New Zealand Society for Earthquake Engineering, NASEE 2024 Annual Conference, 2024
- 8) 国立研究開発法人建築研究所，“長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ”，国立研究開発法人建築研究所，2021-11-19。
<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html>，（参照 2025-07-09）
- 9) 岡沢理映，神原浩：被験者実験による地震の揺れの特性と人の感覚の関係を表す性能評価曲線の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol.86，No.781，pp.393-403，2021.3
- 10) 佐野剛志，鈴井康正，勘坂幸弘：制震・免震用プレーキダンパーの紹介と実建物への適用事例，大林組技術研究所報，No.67，2003