

振動台実験に基づく速度感応型性能可変ダンパを用いた小規模免震構造物の変位制御に関する研究
(その1 振動台実験の目的と概要)

正会員

○高橋武宏*¹

同

天竺貴仁*²

同

福和伸夫*³

同

護 雅史*⁴

同

平野 茂*⁵

同

及川孝則*⁶

免震戸建住宅

変位制御

振動台実験

速度感応型

変位依存型

振幅増幅装置

1. はじめに

通常設計レベルの地震動に対して装置の許容変形量やクリアランスの余裕が少ない免震建物では、万が一それを上回る地震動に遭遇した場合において応答変位を許容変形以内に抑える技術的対策(以下、変位制御とする)が必要である。一般的には擁壁等に衝突させることを容認するケースが多いが、応答加速度の増大に伴い免震性能を著しく損なうことは元より、上部構造に深刻な損傷を与えるという報告が多数なされている。これを防ぐために、許容変形の少し手前から緩衝性を持たせたストッパー材を作動させる試みも多いが、限られた可動範囲で変位制御するためには最終的に剛体に近い部材特性が必要となり、このような変位に依存した制御法(変位依存型)では通常設計レベルを超える地震動に対して高い免震性能を維持することは非常に困難である。

一方、変位依存型とは異なる変位制御手法の1つとして、免震層の応答速度に応じて減衰力を変化させる速度感応型がある。設計レベルの地震動による応答速度に対しては低い減衰力で免震性能に影響を殆ど与えず、それを上回る応答速度を生じる大地震に対しては高い減衰力を発揮して変位制御する。変位依存型を、既に速いスピードで走行している車に急ブレーキを踏む動作に例えると、速度感応型はスピードが著しく増加する手前で穏やかにブレーキをかけ、スピードが減少するとブレーキを解除する繰り返しの動作に似ており、変位制御時の応答加速度を大幅に低減できる可能性がある。

本論では免震戸建住宅を想定した小規模な免震構造試験体に速度感応型性能可変ダンパを設置して振動台実験を行い、変位制御時の免震層最大応答変位と最大応答加速度の主に2つの観点から、応答性状を検証する。

2. 速度感応型性能可変ダンパの概要と特性

本論で検証するオイルダンパは、低速での伸縮では非常に低い減衰力で、一定の速度を超えると高い減衰力を発揮する。これは図1に示すように速度が大きくなると内部圧力が高まり、一定の圧力を超えるとオイルの回路が機械的に切り替わる内部構造を有するためである^{1,2)}。そのため、低速伸縮時の減衰力(通常回路)、切り替えを行う速度、高速伸縮時の減衰力(緊急回路)、緊急回路から通常回路に戻るまでの減衰力保持時間という主として4つのパラメータの設定によって、変位制御時の応答性状が大きく変化することが予想される³⁾。そこで振動台実験では、表1に示す各々特徴的な応答速度-減衰力特性を持った3種類の速度感応型性能可変ダンパABCに対して順次加振を行い、応答性状を比較することで理想的な設定値を模索する。

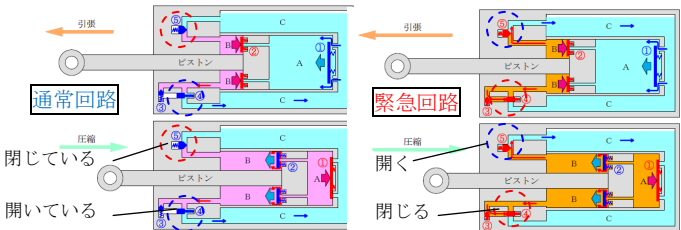


図1. 速度感応型性能可変ダンパの内部構造概要

表1.3 種類の速度感応型性能可変ダンパ

タイプ	写 真	力学的特性(初期設定)	応答速度-減衰力(概念図)	応答速度-減衰力(説明)
A		ストローク: ±400mm 通常回路: 0-15kN 切替速度: 60kine 緊急回路: 75kN- 保持時間: 短い		免震層の応答速度(相対速度)が一定の速度を超えると通常回路から緊急回路に切り替わって、高い減衰力を発揮するが、一定速度以下に落ちると速やかに通常回路に戻り、減衰力が低下するタイプ。
B		ストローク: ±400mm 通常回路: 0-5kN 切替速度: 50kine 緊急回路: 55kN- 保持時間: 非常に長い		通常回路での減衰力は最も低い。緊急回路に切り替わってからの減衰力は他より低い、一定速度以下に落ちても緊急回路のまま減衰力を保持する。 さらに、ダンパ作動方向(引張りと圧縮)が反転しても緊急回路のままのタイプ。
C		ストローク: ±350mm 通常回路: 0-20kN 切替速度: 55kine 緊急回路: 75kN- 保持時間: 長い		通常回路での減衰力は最も高い。緊急回路に切り替わって高い減衰力を発揮し、一定速度以下に落ちても高い減衰力を保持する。基本的にダンパ作動方向が反転しても緊急回路のままだが、引張りから圧縮へ反転する際に一瞬通常回路に戻る傾向がある。

3. 振動台概要

2011 年 10 月につくば市にある(株)奥村組技術研究所の三次元振動台にて振動台実験を行った。振動台の X, Y 方向共に加振可能な振幅が水平方向最大±125mm で表 2)、その振幅レベルではダンパを設置しない状態(フリー免震と呼ぶ)で目標としている±60cm 程度の免震層応答変位を実現できないと判断し、X 方向に振幅増幅装置を設置した^{図 2)}。

表 2. 振動台のスペック

振動台寸法	4m×4m	
積載重量	最大 60tf、定格 20tf	
加振方向	3 軸方向及び 3 軸周回回転 但し、本振動台実験では水平 1 方向のみとする	
最大振幅(加振方向)	±125mm	±250mm
最大速度(加振方向)	±100kine	±200kine
定格時最大加速度	±3G	±1.5G
※右欄が振幅増幅装置設置後のスペック。 最大加速度に関しては振動台が通常使用の 2 倍の慣性力を受けるため制限した		
加振振動数範囲	DC～70Hz	

振幅増幅装置は振動台に緊結した台座鉄骨の端からアームを伸ばし、外周スラブ上に設置した反力部にて逆テコの原理を利用して振幅を 2 倍に増幅して台座鉄骨上の人工地盤をリニアレールでスライドさせた。台座鉄骨、アーム、反力部、人工地盤の接合部は機械加工レベルで作成したが、各入力波に対して入力データと人工地盤上で計測した加速度の時刻歴波形を比較すると^{図 3)}加振時にヒンジ部分から発生する短周期の振動が励起されることが見て取れたため、加速度フーリエスペクトルを比較したところ^{図 3)}、2Hz 以下ではほぼ調和的であるが 2Hz より高振動数、特に 2.5Hz 以上で入力データには含まれない振動が発生していることを確認した。この周波数帯に関しては免震構造の応答変位への直接的な影響は少なく問題はないが、最大応答加速度の評価に関しては計測波形にフィルタリングを行う等、考慮する必要がある。

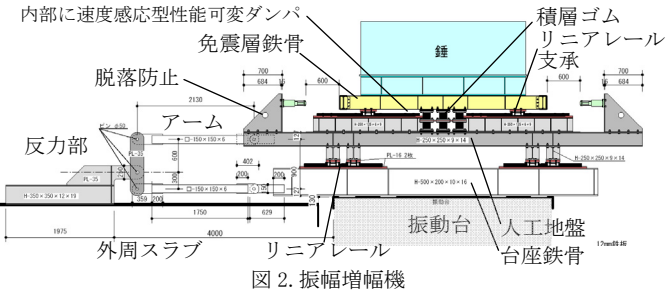


図 2. 振幅増幅機

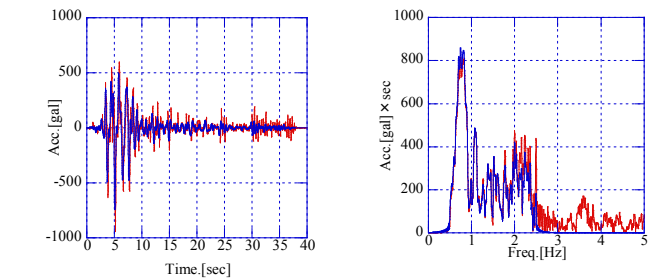


図 3. 加速度波形と加速度フーリエスペクトルの比較
青線がコンピュータ入力波形、赤線が計測波形

4. 試験体と計測器概要

振幅増幅装置の設置に加え、フリー免震での免震層応答変位と応答速度を大きくするために、摩擦抵抗の小さい転がり支承(リニアレール)と減衰の少ない天然ゴム系の積層ゴムを組み合わせたシステムとし、大変形に追従させるため積層ゴムを 2 段組にして剛性を調整した。

振幅増幅装置を設置した後の振動台積載重量と最大加速度の能力制限より、延べ面積 40 坪(約 132 m²)程度の戸建の木造免震住宅(重量約 400kN)の約半分に相当する 200kN のコンクリート製錘を載せ、人工地盤と免震層鉄骨の中央部長手方向に鉄製治具を介し、ダンパ 1 本を強固に取り付けた。加振は 1 方向とし、免震層の応答をダンパの軸方向にのみに単純化することでダンパの力学的特性を正確に把握するようにした。また、四隅のリニアレール支承によって、免震層の回転は抑えられている^{図 4)}。



図 4. 免震構造試験体

また、各種計測計画に関しては表 3 の通りである。

表 3. 計測器一覧

種類	詳細	計測場所	個数
加速度計	共和電業ひずみ式 5G 計	人工地盤上	2
	免震層鉄骨上		2
	K-NET95 強震計サーボ式 2G 計	人工地盤上	1
		免震層鉄骨上	1
変位計	東京測器巻取式 0-2000mm	免震層相対変位	2
		人工地盤変位	2
	サンテックレーザ一式、0-6000mm	免震層相対変位	2
ロードセル	共和電業平型、100kN 計	ダンパ負担軸力	1

5. 実験内容

表 4 に実験日、ダンパ種類と実験内容を示す。その 2 ではダンパ A B C 加振における解析結果の一部を報告する。

表 4. 実験日、ダンパ種類及び実験内容

実験日	ダンパ	実験内容
11 日(火)	無	フリー免震でのスライプ試験、sin 波で固有周期及び減衰の検討、準備した地震波を用いて免震層の応答変位が 30cm、60cm 程度になる入力倍率を確認
12 日(水)		
13 日(木)	A	免震層応答変位 30cm 程度の入力にて応答性確認 免震層応答変位 60cm 程度の入力にて応答性確認 予備試験体に付け替え、機差の確認
14 日(金)		
19 日(水)	C	免震層応答変位 30cm 程度の入力にて応答性確認 免震層応答変位 60cm 程度の入力にて応答性確認 低速減衰力、高速減衰力を変化させて 免震層重量を 25%増やしてダンパの限界能力確認
20 日(木)		
21 日(金)		
24 日(月)	B	免震層応答変位 30cm 程度の入力にて応答性確認 免震層応答変位 60cm 程度の入力にて応答性確認 低速減衰力、高速減衰力を変化させて 免震層重量を 25%増やしてダンパの限界能力確認
25 日(火)		
26 日(水)		

※通常設計レベル、それを上回るレベルでの免震層応答変位を 30cm、60cm と想定

【参考文献】

- 1) 飯場正紀、飯田秀年 他：次世代型ダンパーを用いた長周期地震動対応戸建免震システム、その 1・その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、2010. 9、21161-21162
- 2) 皆川隆之、花井勉 他：次世代型ダンパーを用いた長周期地震動対応戸建免震システム、その 3 日本建築学会大会学術講演梗概集、2011. 8、21234

*1 名古屋大学減災連携研究センター 研究員
*2 名古屋大学大学院 修士課程
*3 名古屋大学減災連携研究センター 教授・工博
*4 名古屋大学減災連携研究センター 准教授・博士(工学)
*5 (株)一条工務店 特建設計部・博士(農学)
*6 (株)一条工務店 工務部免震工事課

*1 Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ.
*2 Graduate Student, Nagoya Univ.
*3 Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng
*4 Assoc.Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng
*5 Ichijo Housing Company Co., Ltd, Special Design Department, Dr. Agr
*6 Ichijo Housing Company Co., Ltd, Construction Department, Menshin Division