

# 巨大地震を想定した 免震フェイルセーフ制動装置の動的加力試験

仲村 崇仁<sup>\*1</sup>・加藤 貴司<sup>\*1</sup>・清井 宗孝<sup>\*1</sup>・金子 修平<sup>\*2</sup>・中村 美咲<sup>\*2</sup>・那 超<sup>\*3</sup>・菊地 優<sup>\*4</sup>・石井 建<sup>\*4</sup>

設計想定を超える巨大地震を受ける免震建物では上部構造の擁壁衝突や免震部材の損傷が懸念されている。免震部材の減衰を増す対応が考えられるが、この対応には設計想定内の地震動に対し上部構造の加速度増加を招き免震性能が低下するという問題がある。このような問題に対応するため、巨大地震時のみに作用し上部構造の過大变位を制動するフェイルセーフ制動装置を開発した。本論文は実大免震試験機 E-Isolation を用いて実施した開発装置の動的加力試験の概要を示す。試験によって本装置は実際に稼働する実速度域で確実に動作することを確認するとともに、復元力特性の詳細に関する知見を得た。

**キーワード：** 免震構造、巨大地震、フェイルセーフ、制動装置、低降伏点鋼、実大試験

## 1. はじめに

減衰性を有する免震部材は、長周期地震動により繰返し変形を強いられると、減衰性能が低下する。これにより免震建物では、上部構造の応答変位が増大する。2017 年以降は長周期地震動を考慮した免震設計が行われているが、設計想定を超える巨大地震に対して、免震層では上部構造の擁壁衝突や、免震部材の損傷が懸念される。巨大地震に対応するため、免震部材の減衰を増すことは有効な方法であるが、過度な減衰は上部構造の加速度増加を招き、免震性能が低下する。このような問題に対応するため、巨大地震時のみに作用し、上部構造の過大变位を制動するフェイルセーフ（以下、FS）制動装置を開発した。

これまでに、地震応答解析による効果確認<sup>1),2)</sup>、静的な加力試験による FS 制動装置の復元力特性確認<sup>1)</sup>、および材料試験による速度依存性を考慮した設計特性式の設定を行っている<sup>2)</sup>。しかし、本装置は巨大地震時に確実な作動が求められるため、実速度域での動的加力試験の実施が開発課題であった。

そこで、2023 年 3 月に竣工した実大免震試験機 (E-Isolation) を使用して、FS 制動装置の実大、実速度域における動的加力試験を行った。本論文は試験の概要を取りまとめたものである。

## 2. フェイルセーフ制動装置

FS 制動装置は巨大地震時に免震建物の免震層に生じる過大变位を「制動」により抑制するものである(図-1)。

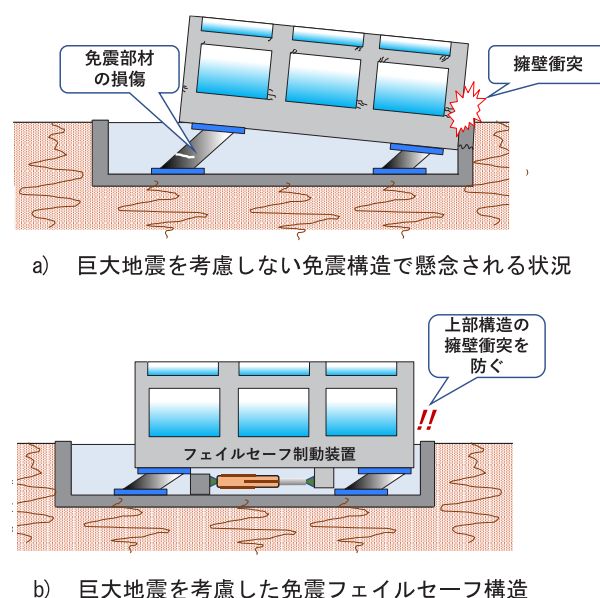


図-1 免震フェイルセーフ構造の概念

本装置の復元力特性はレベル 2 以下の地震では免震応答に影響しない無感区間と、巨大地震により過大となった応答変位を制動する制動区間を有する(図-2)。装置の制動材は低降伏点鋼（公称降伏応力度 225MPa）を用いている。

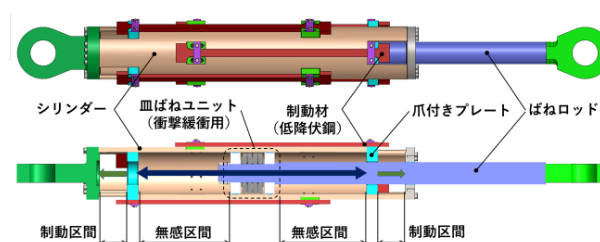


図-2 フェイルセーフ制動装置

\*1 地盤・基礎研究部 \*2 株式会社川金コアテック \*3 平和発條株式会社 \*4 北海道大学

試験に用いた FS 制動装置は、無感区間長さ 500mm、制動区間長さ 150mm（設計制動変位 100mm）である。

3. 試験方法

3.1 試験装置

FS 制動装置の動的加力試験は、免震研究推進機構 (jsil) の実大免震試験機：E-Isolation<sup>3)</sup> を使用した (図-3)。E-Isolation は実大の積層ゴムやオイルダンパ等の免震・制振デバイスの復元力特性を、実際に使用する荷重および速度で高精度に評価可能である。E-Isolation の試験機能力を表-1 に示す。

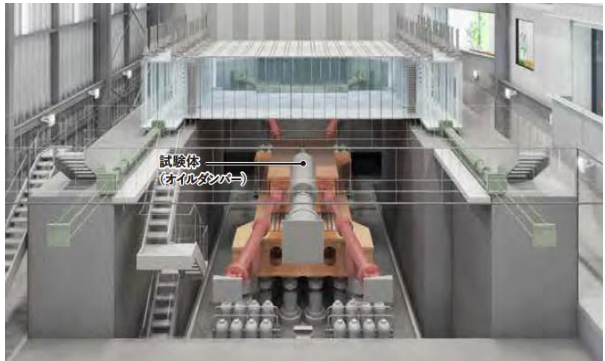


図-3 E-Isolation (jsil パンフレットより引用<sup>4)</sup>)

表-1 試験機能力

| 項目    |    | 鉛直载荷能力    | 水平载荷能力              |
|-------|----|-----------|---------------------|
| 荷重    | 静的 | 36,000 kN | 6,500 kN            |
|       | 動的 | 30,000 kN | 5,100 kN            |
| 最大速度  |    | 7 cm/s    | 80 cm/s             |
| 最大加速度 |    | —         | 0.2 G<br>(瞬間 0.6 G) |

3.2 試験条件

試験項目と試験条件を表-2 に示す。

表-2 試験項目と試験条件

| 試験項目     | 加力波形       | 最大速度 [cm/s] | 最大振幅 [mm]    |
|----------|------------|-------------|--------------|
| ①速度依存性   | 三角波        | 1, 10, 40   | ±630         |
| ②実速度動作確認 | 特設波        | 80          | ±600         |
| ③地震応答波加力 | 免震層<br>応答波 | 80          | +600<br>-538 |

①の速度依存性試験はランプ波による既往の材料試験<sup>2)</sup>との比較を目的としている。そのため、加力波形

は三角波を採用した。速度水準は材料試験と整合させているが、最大の速度条件はE-Isolation の試験能力内とするため、40cm/s とした (材料試験は 50cm/s)。最大振幅は、装置の設計変位 ± 600mm の制動力を讀取るため、± 630mm とした。

②の実速度動作確認試験は、装置の使用最大速度域における動作確認を目的として設定した。

③の地震応答波加力試験は、解析による復元力特性との対応を確認するため、文献2) のせん断型質点系モデルの免震クリアランスを 600mm と想定し、基盤促波<sup>4)</sup> CH2 の加速度を 1.5 倍とした際の、FS 制動装置付き免震層の変位応答波である。

各試験項目の入力波形は次節で示す。

3.3 入力波形

前節表-2 における試験項目①の三角波は、装置設計変位の 600mm を超えた後、正弦波に接続し、そこから 630mm にかけて減速して、変位位相が反転する。これにより、変位位相が反転する際の急激な加速度変化を抑制している。この時の瞬間最大加速度を試験機能力の 0.6G 以下とするため、①の速度依存性試験の最大速度は 40cm/s とした (図-4)。

試験項目②の実速度動作確認は、FS 制動装置の設計ストローク ± 600mm 内で、E-Isolation 最大速度 80cm/s で加力するため、試験体縮み側に - 320mm のオフセット変形を与え、そこから余弦波で最大速度の 80cm/s まで加速し、伸び側 + 280mm に達した後、正弦波で減速し設計変位の + 600mm に到達する特設波とした (図-5)。

試験項目③の地震応答波は、前節の応答波から装置が制動区間で作動する時間を切出し、最大速度を 80cm/s に調整した。また、同波形はE-Isolation の蓄圧容量に適合するように3分割とした (図-6)。

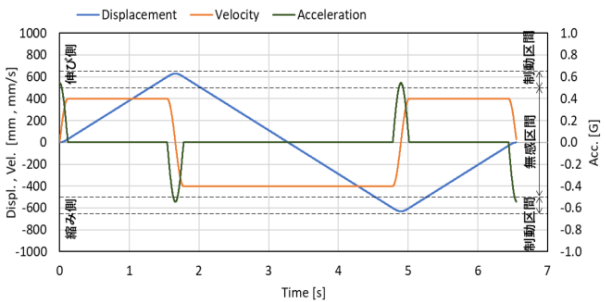
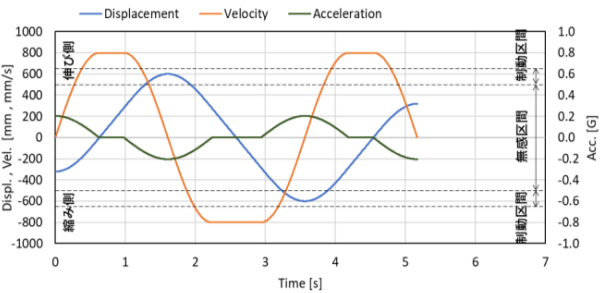
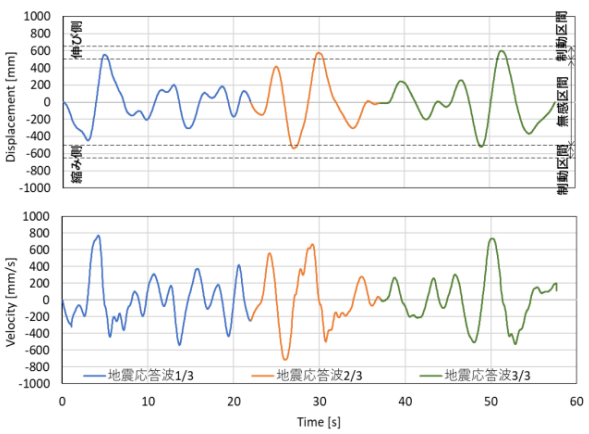


図-4 三角波 40cm/s



図－5 特設波 80cm/s

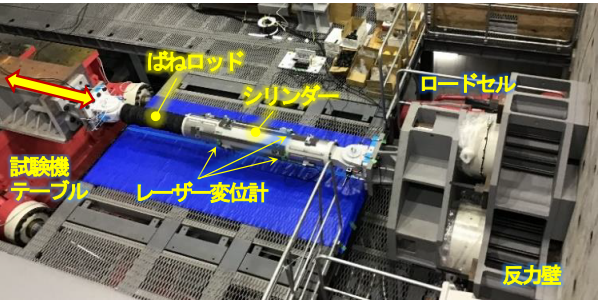


図－6 地震応答波

3. 4 計測項目と試験状況

試験体の取付けは写真－1に示すように、ばねロッドを試験機テーブル、シリンダーを試験機反力壁に取り付けた。

計測は水平荷重を、試験機ドック（反力壁）に設置されたロードセルで行い、水平変位を試験機テーブル変位、制動材の変形をシリンダーに取り付けたレーザー変位計で行った。



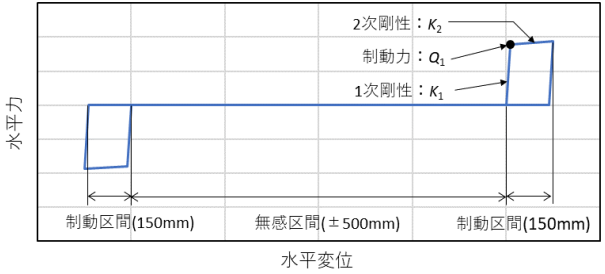
写真－1 試験状況

4. 試験結果

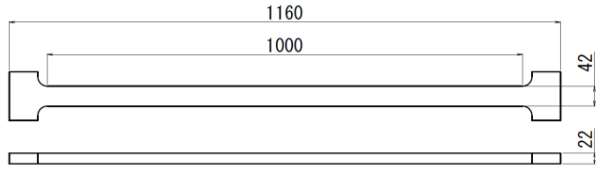
4. 1 フェイルセーフ制動装置の設計特性値

FS 制動装置の復元力特性（図－7）は材料試験<sup>1)</sup>より、制動力： $Q_1$ と、2次剛性： $K_2$ に速度依存性を考慮した設

計特性式を定めている。試験片（図－8）は装置の速度依存性を正確に把握するため、試験体に用いられる制動材と同サイズとした。試験片のサイズは平行部長さ：100mm，幅：42mm，厚さ22mm，降伏耐力の公称値は225MPaである。



図－7 フェイルセーフ制動装置の復元力特性



図－8 材料試験片

装置の設計特性式を以下に示す。

制動力： $Q_1 = nA_{Ly}\sigma\beta(v)$  . . . (1)

ここに、 $n$ ：制動材数（3枚）

$A_{Ly}$ ：制動材の断面積

$\sigma$ ：制動材の降伏応力度（225 MPa）

2次剛性： $K_2 = 1/(1/K_1 + 1/K_p)$  . . . (2)

$K_p = Q_1(\alpha(v) - 1)/\delta_d$  . . . (3)

ここに、 $K_1$ ：1次剛性

$\delta_d$ ：設計制動変位（100 mm）

$\alpha, \beta$ はそれぞれ $K_2, Q_1$ の速度 $v$ に関する依存性を示す係数で次式による。

$\alpha(v) = \begin{cases} 1.13v^{-0.03} & ; 0.03 \leq v < 10 \text{ [cm/s]} \\ 1.05 & ; 10 \leq v \text{ [cm/s]} \end{cases}$  . . . (4)

$\beta(v) = 1.23v^{0.04}$  . . . (5)

速度依存性を考慮した、本試験の各速度条件における設計特性値を表－3に示す。

表－3 FS 制動装置の設計特性

| 速度<br>[cm/s] | $K_1$<br>[kN/mm] | $K_2$<br>[kN/mm] | $Q_1$<br>[kN] |
|--------------|------------------|------------------|---------------|
| 1            | 100              | 0.99             | 767           |
| 10           |                  | 0.42             | 841           |
| 40           |                  | 0.44             | 889           |

4.2 動的加力試験における復元力特性

三角波加力におけるFS制動装置の復元力特性を図-9に示す。準静的な1cm/sの復元力特性は、既往の静的加力試験<sup>2)</sup>による結果と同様な性状を示した。試験速度10cm/sでは制動初期のスパイク状のピークがやや大きくなった。試験速度40cm/sでは、制動初期のピークが約1200kNを示した。また、ピーク発生後に下降伏点に

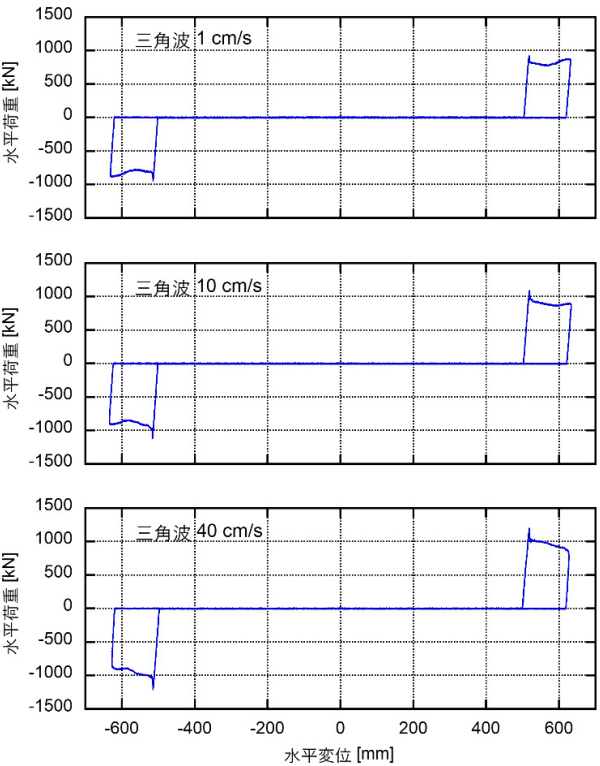


図-9 三角波加力における復元力特性

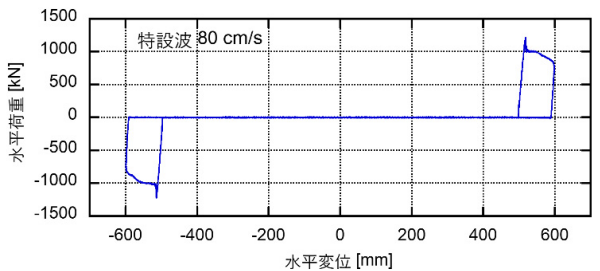


図-10 特設波加力における復元力特性

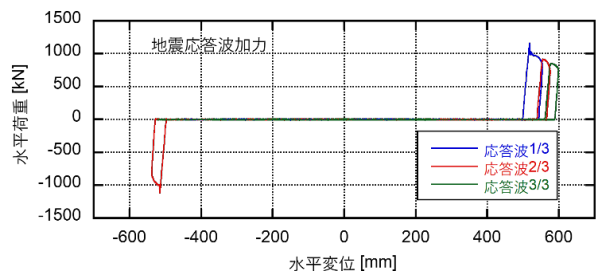


図-11 地震応答波加力における復元力特性

相当するような荷重の極小値が見られず、2次剛性が負勾配となった。

図-10に示す特設波加力では、減速過程での制動であるため、材料の速度依存特性により負勾配が顕著となった。

図-11に3波に分割した地震応答波加力による復元力特性を重ねて示す。地震応答波加力の正側復元力のスケルトンは、特設波加力と同様に2次剛性が負勾配となった。これは、地震応答波も特設波同様に最大振幅付近で速度が減速するためと考えられる。また、応答波2/3、応答波3/3における、2回目以降の制動では、制動初期に現れるスパイク状のピークは発生しなかった。この現象については、引き続き、2024年9月に竣工した当社大型振動台での動的加力試験等を通して、再現性および、その発生原因の究明に取り組んで行く予定である。

4.3 材料試験と装置復元力特性の比較

本試験で用いたFS制動装置の制動材は、先に実施した材料試験<sup>1)</sup>の試験片と同形状である。そのため、動的加力試験の復元力を1/3スケールにした、荷重-変位関係および設計特性値と材料試験を比較した。比較にあたり、FS制動装置は皿ばねによる1次剛性を有するため、

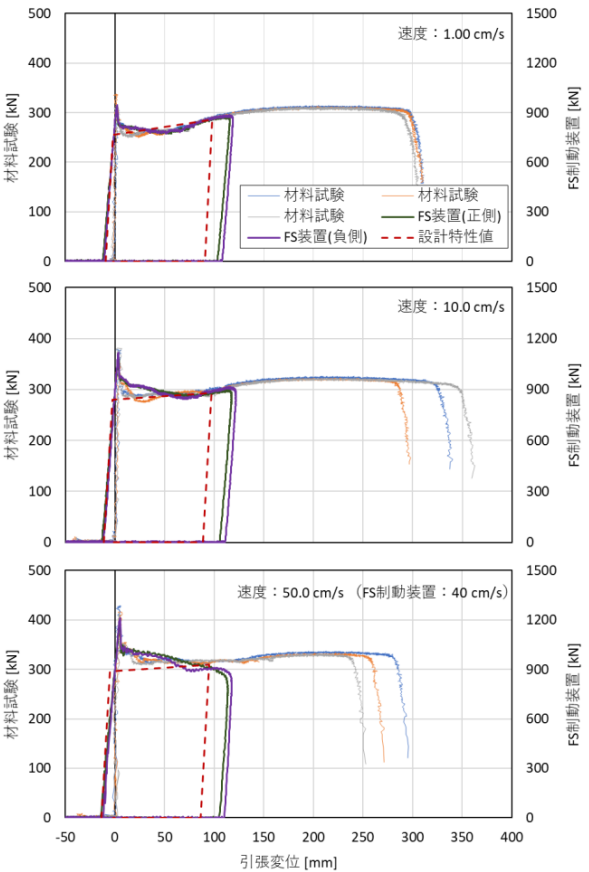


図-12 FS制動装置の復元力特性と材料試験の比較

加力初期のスパイクを記録した変位を材料試験の上降伏点を記録した変位に一致させて示す（図－12）。

1次剛性は設計特性値と良く対応している。FS制動装置のスパイクは、材料試験の上降伏点と概ね一致するため、材料特性が主体的な要因を成していると考えられる。

上降伏点を越えた後の荷重－変位関係は、準静的な速度1cm/sにおいて、FS制動装置の水平荷重は30mm付近まで材料試験より大きい。動的な速度域では10cm/sで変位50mm付近まで、50cm/sで設計制動変位の100mm付近まで、FS制動装置の荷重が大きい。しかし、設計制動変位の100mmにおける水平荷重は材料試験、FS制動装置ともに設計特性値と良く対応しており、材料試験に基づいて設定した設計特性式の妥当性が確認できた。

FS制動装置の降伏直後の荷重が材料試験より大きいのは、FS制動装置に使用した低降伏点鋼の降伏応力度（ミルシート値）が、材料試験の211MPaに対し、236MPaと大きいことに起因している可能性が考えられる。しかし、動的速度域における低降伏点鋼の力－変位関係の知見は少なく、今後のデータの蓄積が望まれる。一方、動的加力試験で得られた復元力は材料試験で構築した復元力を上回ることで、FS時の制動変位は設計安全側に作用すると考えられる。しかし、加速度応答の増減や、それによる上部構造への影響は、試験結果を反映した復元力特性による応答解析で検証する必要がある。

## 5. まとめ

実大免震試験機E-Isolationを使用することで、FS制動装置の動的加力試験の実施が可能となった。本試験を通じてFS制動装置は実際に装置が稼働する実速度域で確実に動作することが確認できた。

また、試験によるFS制動装置の復元力特性から以下の知見を得た。

- ① FS制動装置の復元力特性は40cm/s以上の速度域において、2次剛性が負勾配となった。
- ② 設計変位の100mmにおけるFS制動装置の水平荷重は設計特性値と対応する。
- ③ FS制動装置の1次剛性は設計特性値と良く対応する。

## 謝辞

試験の計画・実施にあたり免震研究推進機構の二井内英見様、小島裕一様、宮原貴昭様、林崎正伸様、および同機構関係者皆様のご助言、ご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 仲村崇仁 他：巨大地震に対する免震フェイルセーフ制動装置の開発，日本建築学会技術報告集，第28巻，第70号，pp. 1154-1159 2022. 1
- 2) 仲村崇仁 他：巨大地震に対する免震フェイルセーフ構造の開発，第16回 日本地震工学シンポジウム，Day3-G403-06，2023. 11
- 3) Yoshikazu Takahashi et al: E-Isolation: High-performance Dynamic Testing Installation for Seismic Isolation Bearings and Damping Devices, International Journal of High-Rise Buildings March 2023, Vol 12, No 1, 93-105
- 4) 財団法人免震研究推進機構：免震技術・制振技術の更なる発展のために，2022. 04
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課：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（技術的助言），2016. 6. 24，  
<https://www.mlit.go.jp/common/001136168.pdf>（2024. 3参照）

---

## Dynamic loading test of seismic isolation fail-safe braking device for massive earthquakes

Takahito NAKAMURA, Takashi KATO, Munetaka KIYOI, Shuhei KANEKO, Misaki NAKAMURA,  
Cho KEI, Masaru KIKUCHI and Ken ISHII

In seismically isolated buildings subjected to large earthquakes beyond design assumptions, there are concerns about the collision of the superstructure with retaining walls and damage to isolators. Increasing the damping of the isolation layer is one possible response, but this approach can lead to increased acceleration of the superstructure during earthquakes within design assumptions. To address this issue, a fail-safe braking device has been developed that only activates during significant earthquakes to control excessive displacement of the superstructure. This paper outlines the dynamic loading tests of the fail-safe braking device conducted using a full-scale seismic isolation testing machine (E-Isolation). The test results confirmed that the device operates reliably within its intended velocity range and provided insights into the detailed restoring force characteristics.

---