

制振構造用パッシブ負剛性デバイスの創出

Creation of a Passive Negative Stiffness Device for Vibration Control Structures

北海道大学 准教授 白井 和貴

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. はじめに

本研究の目的は、制振構造用のパッシブ負剛性デバイスを新たに考案・創出することである。本研究では、負剛性デバイスを提案・試作し、その地震応答性状を振動台実験により把握した。本研究の負剛性デバイスは、鋼材で構成するシンプルな機構ながら、変位増加に伴って制御された荷重低下特性を受動的に発揮することを狙っている。

負剛性デバイスを制振構造に適用することで、図1に示すような負剛性効果の発揮により、次のようなメリットが期待できる。

- (a) 建物の地震時の応答変位を著しく増加させることなく、応答加速度・層せん断力・転倒モーメントを低減できる。
- (b) ダンパー付加に伴う柱の変動軸力と全体曲げ変形の増加を抑制できる。
- (c) 同じエネルギー吸収量でもより大きな減衰定数を獲得できる。
- (d) 建物の固有周期の伸長が可能となり、質量制振や連結制振などの同調が必要な振動制御構造への適用が期待できる。
- (e) 基礎への負担増加を最小限に抑えた既存建物の制振補強が可能となる。

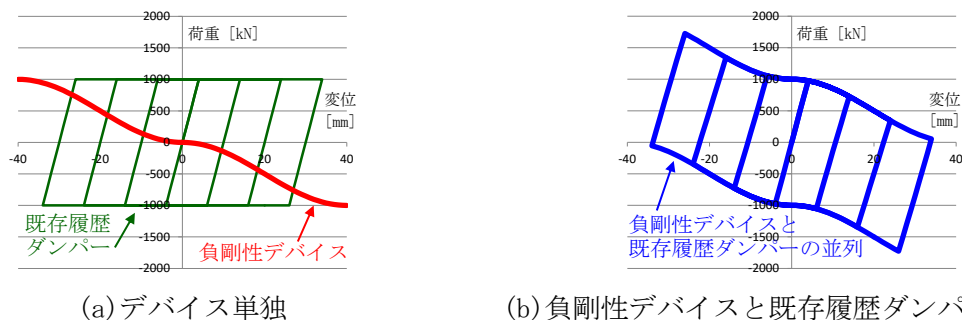


図1 本デバイスの適用効果イメージ (履歴ループ)

2. 研究計画

本研究では、理論的・実験的アプローチにより、パッシブ負剛性デバイスの提案と基本原理の実証を行った。具体的には、既往理論に基づく検討、および要素試験体の振動台実験を実施した。既往理論に基づく検討では、弾性部材の幾何学的非線形に関する既往理論に基づき、負の荷重能力、変形性能、耐久性能に関する既往知見を整理し、デバイスの基本構成の試案を作成した。要素試験体の振動台実験では、デバイスの基本原理の妥当性を要素試験体に対する振動台を用いた動的加振実験を行い検証した。実験には北海道大学が所有する1軸振動台を使用した。

パッシブ負剛性デバイス自体には、必ずしもエネルギー吸収性能を持たせる必要はなく負剛性の

みを発揮できればよいと考えている。従って、実施適用時には、既存ダンパー（オイル、鋼材、摩擦、粘弾性等）との並列設置による利用を想定している。実用化の際には、高荷重化と変形性能・耐久性能・正負対称性の確保を考慮して装置構成を検討する。

3. 実験方法

試験体として、振動部分および負剛性デバイスを製作し、この試験体を振動台上に設置して加振実験を行った（図2）。振動部分は、1方向（加振方向）に動き、質量体、支承（主リニアガイド）、正剛性復元材（対向させた引張コイルばね）から構成した。負剛性デバイスは、幾何学非線形（弾性飛び移り座屈）による負剛性の発揮を意図し、板ばねを湾曲させた形状を採用した。負剛性デバイスは、板厚や寸法を変えた計3体を製作した（図3、図4、表1）。

実験ケースとして、正剛性復元材のみ（負剛性デバイス無し）、負剛性デバイスのみ（正剛性復元材無し）、正剛性復元材+負剛性デバイス、の3ケースを実施した。加振には1軸振動台を用いた。負剛性デバイスは、片端を質量体へ固定し、もう片端は加振方向と直交する方向の副リニアガイドを介して振動台上に設置した。副リニアガイドを用いたことで、負剛性デバイスの設置時（中立位置）の内法寸法の調整が可能となった。ただし、加振実験時には副リニアガイドは固定状態とした。本報で用いた負剛性デバイスには、設置時（中立位置）の内法寸法に応じて、加振方向の変形限界が存在する。写真1、2には示していないが、変形限界に達した際の衝撃と応答加速度の著しい増加を緩和するため変形限界の手前に緩衝材を設置した。

入力波として、正弦波（振動数1.3 Hz、5周期分、入力振幅±5～30 mm）および模擬地震波（告示波、ランダム位相、S1とL1の2種類、入力倍率0.1～0.5倍）を用いた。

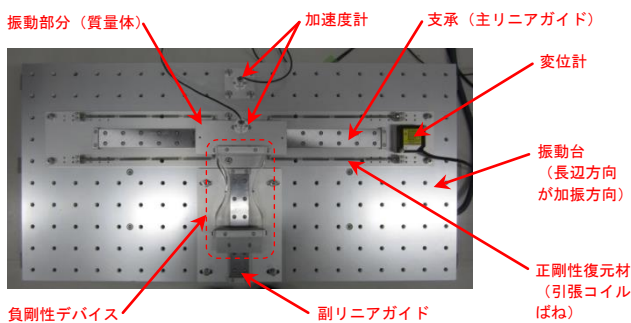


図2 試験体と振動台（平面）

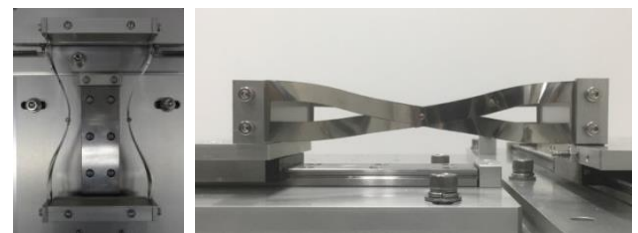


図3 負剛性デバイス（左：平面、右：立面）

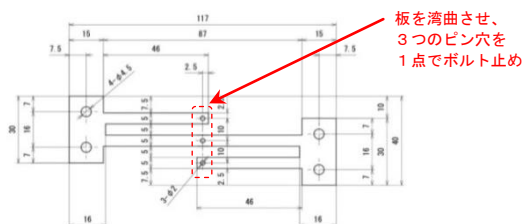


図4 負剛性デバイスの製作図（D-1）（湾曲加工前）

表1 負剛性デバイス

名称	板厚 [mm]	内法 [mm]	板幅 [mm]
D-1	0.1	87	5
D-2	0.2	87	5
D-3	0.1	87	7

(実験調査によって得られた新しい知見)

4. 実験結果

予備実験として、自由振動計測を行った。正剛性復元材のみ（負剛性デバイス無し）の状態における固有周期は、1.3 Hz (= 0.77 s) であった。

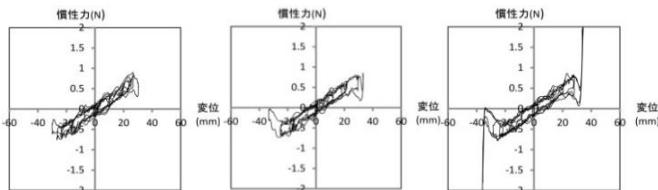
図5は、負剛性デバイスの有無による正弦波加振時の履歴ループの比較である。(a)正剛性復元材のみ（負剛性デバイス無し）と比べて、(b)正剛性復元材+負剛性デバイスD-3は、水平剛性が徐々に低下していきある変位を超えたところで急激に慣性力が低下した。

図6は、正剛性復元材+負剛性デバイスD-3の、3段階の入力振幅における正弦波加振時の履歴ループである。図7は、図3の履歴ループから正剛性復元材の水平剛性を減算した履歴ループである。同様に、図8、図9は正剛性復元材+負剛性デバイスD-1の正弦波加振時の履歴ループである。図6～図9によれば、概ね狙い通りに負剛性が発揮されたが、一方で負剛性デバイスが変形限界に達した際に衝撃の発生が認められた。



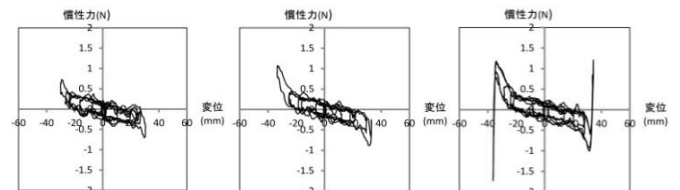
(a) 正剛性復元材のみ（負剛性デバイス無し） (b) 正剛性復元材+負剛性デバイスD-3

図5 履歴ループの比較（正弦波、入力振幅10 mm）



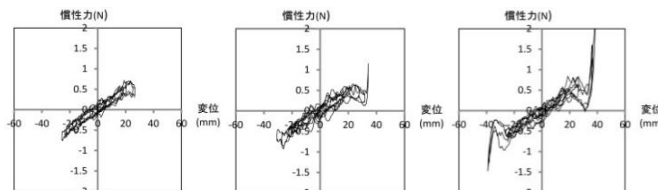
(a) 入力振幅10 mm (b) 11 mm (c) 12 mm

図6 正剛性復元材+負剛性デバイスD-3の履歴ループ（正弦波加振）



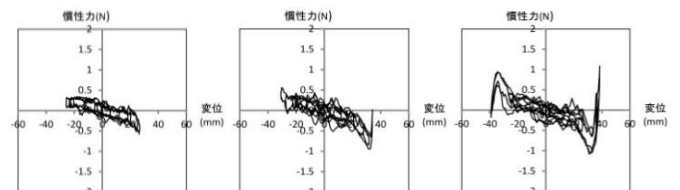
(a) 入力振幅10 mm (b) 11 mm (c) 12 mm

図7 正剛性復元材+負剛性デバイスD-3の履歴ループ（正弦波加振）
（正剛性による慣性力を減算）



(a) 入力振幅8 mm (b) 11 mm (c) 12 mm

図8 正剛性復元材+負剛性デバイスD-1の履歴ループ（正弦波加振）



(a) 入力振幅8 mm (b) 11 mm (c) 12 mm

図9 正剛性復元材+負剛性デバイスD-1の履歴ループ（正弦波加振）
（正剛性による慣性力を減算）

図10は、地震波S1加振時の履歴ループである。負剛性デバイスD-3により、負剛性が発揮された。図11は地震波S1加振時の応答変位および応答加速度の時刻歴である。図11(a)によれば、負剛性デバイスD-3の設置により、振動周期が伸長化したものの、最大応答変位は顕著には増加しなかった。また、図11(b)によれば、負剛性デバイスD-3の設置により、最大応答加速度が低減した。

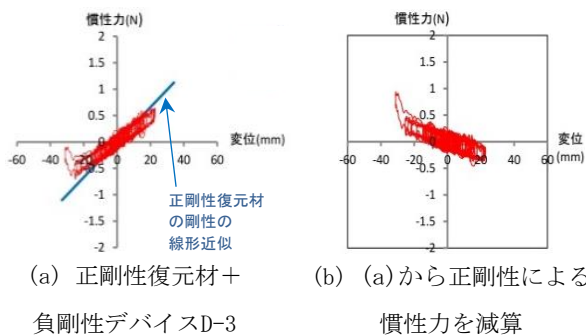


図10 履歴ループの比較（地震波S1、
入力倍率0.48、負剛性デバイスD-3）

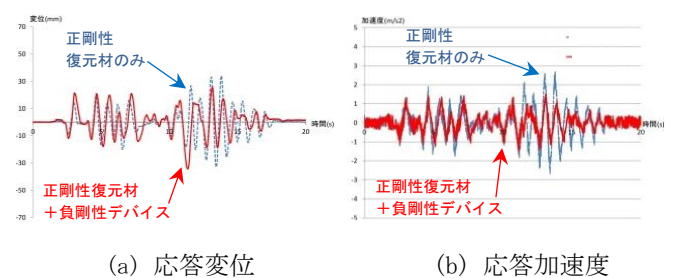


図11 応答変位と加速度の時刻歴（地震波
S1、入力倍率0.48、負剛性デバイスD-3の有無
による比較）

5. おわりに

パッシブ負剛性デバイスを提案・試作し、振動台実験を行った。負剛性の発揮により、応答変位を著しく増加させることなく応答加速度が低減され、振動周期を伸長化する効果があることを確認した。

今後の課題として、負剛性デバイスの高荷重化、荷重－変形関係の改善、変形限界の制御、などが挙げられる。

（発表論文）

白井和貴：パッシブ負剛性デバイスの提案と振動台実験に基づく検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，2018（投稿済み）