

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	負剛性接続された連棟制振構造の地震応答低減効果に関する研究
研究者名※	白井 和貴
所属組織※	北海道大学大学院 工学研究院建築都市部門 准教授
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（ ）は、報告書提出時所属先。

大林財団 2022 年度研究助成実施報告書

所属機関名 北海道大学大学院

申請者氏名 白井 和貴

研究課題	負剛性接続された連棟制振構造の地震応答低減効果に関する研究
(概要) 本研究では、連棟制振建物の接続ばね要素として、パッシブに負の剛性を発揮する装置 (Passive Negative Stiffness Device : PNSD) を適用することを着想した。PNSD によって 2 つの建物棟を接続した連棟制振構造を対象として、地震時の揺れの低減効果を解明することを目的とし、実際の多層建物を想定した PNSD 連棟構造の数値モデルを用いた地震応答解析を実施した。得られた解析結果から、負剛性接続要素と粘性減衰接続要素を連棟構造に設置することは地震応答の軽減に有効であることが示された。	

1. 研究の目的

1. 1 研究の背景

巨大地震に対する建物の耐震性の確保と向上は重要な社会課題である。建物の耐震性能を向上する有望な方法の一つに、図 1 に示すような、2 つの建物 (棟) をばねとダンパーで接続する「連棟制振構造」がある。各棟の剛性と質量を適切に調整 (チューニング) 出来た場合には、互いの建物の慣性質量が地震時の揺れを打ち消すように作用し、高い制振効果を得ることが可能である。しかし、従来の連棟制振構造、すなわち従来の正剛性ばねで 2 つの建物を接続する方法では、最適なチューニングを実現しようとしても、2 つの建物の剛性と質量の比率の条件が狭い範囲に限定されることがある点が課題であった。このため、連棟制振構造のポテンシャルを引き出すことが従来技術では困難な場合があった。

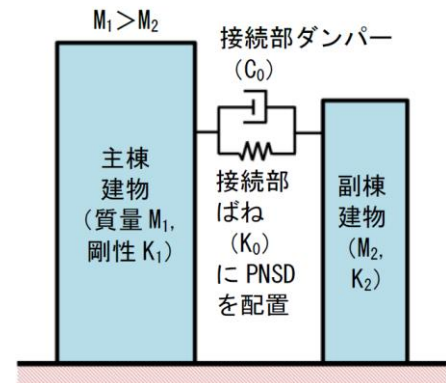


図 1 パッシブ負剛性装置 (PNSD) を有する連棟制振建物の概念図 (立面)

1. 2 研究の目的と内容

本研究では、連棟制振建物の接続ばね要素として、パッシブに負の剛性を発揮する装置 (Passive Negative Stiffness Device、以降 PNSD と記す) を適用することを着想した。本研究の目的は、PNSD によって 2 つの建物棟を接続した連棟制振構造を対象として、地震時の揺れの低減効果を解明することとした。この達成のための具体的な研究内容として、実際の多層建物を想定した PNSD 連棟構造の地震応答解析を実施項目として設定した。

2. 研究の経過

2. 1 概要

本研究では、パッシブ負剛性装置（PNSD）を連棟制振構造の接続部のばね要素として利用する場合の地震応答制御効果について、数値解析的アプローチから検討した。具体的な実施内容は、実際の多層建物を想定した PNSD 連棟構造の地震応答解析とした。研究期間は、2023 年度の 1 年間とした。

2. 2 解析方法

多層建物を想定した PNSD 連棟構造モデルを用いた地震時の数値シミュレーションを実施した。まず、図 2(c)に示す 6 階建て主棟モデル（UC-MF）、図 2(d)に示す 6 階建て副棟モデル（UC-SF）の多質点系振動モデルをそれぞれ作成した。さらに、主棟および副棟の上部（6 階）を、図 2(a)に示す PNSD を想定した負剛性要素と減衰要素で接続したモデル（CVC-NV）、および図 2(b)に示す減衰要素で接続したモデル（CVC-V）をそれぞれ作成した。主棟の各階の質量は 1000 t とした。副棟の各階の質量は、500 t の場合（Case I）と 100 t の場合（Case II）の 2 通りを設定した。入力地震動として、図 3 に示す告示スペクトル適合波形と観測地震動波形を用いた。これらの多層振動モデルに対して、時刻歴地震応答解析を実施し、PNSD 接続による制振効果を分析した。

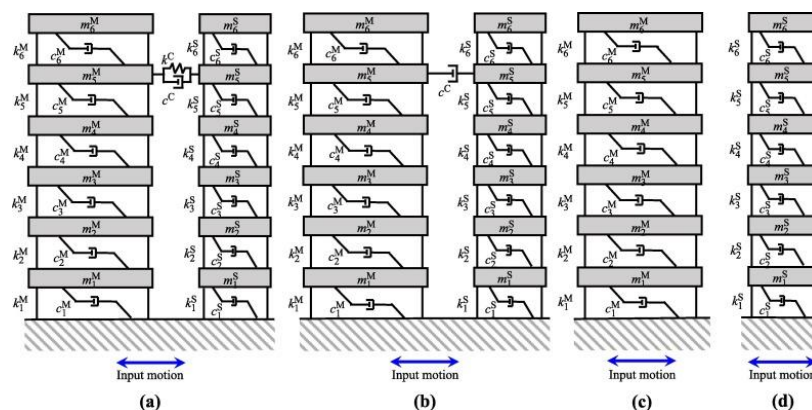


図 2 建物の数値モデル：(a) 負剛性ばね接続要素と減衰接続要素を有するモデル（CVC-NV）、(b) 減衰接続要素を有するモデル（CVC-V）、(c) 主棟のみモデル（UC-MF）、(d) 副棟のみモデル（UC-SF モデル）（文献[1]から引用）

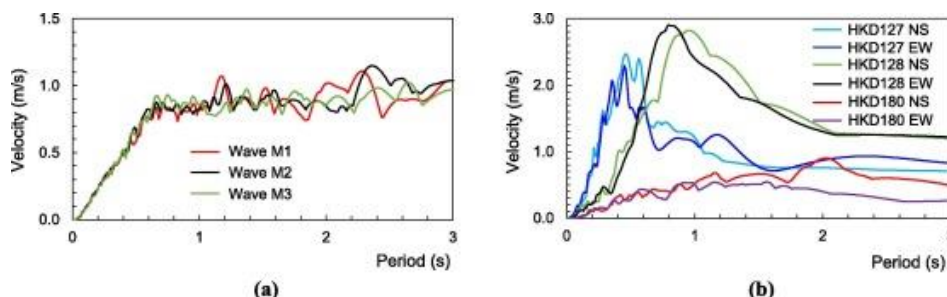


図 3 数値シミュレーションで入力波の速度応答スペクトル（減衰定数 0.05）：(a) 告示スペクトル適合波、(b) 観測地震動（文献[1]から引用）

2. 3 解析結果

図4と図5に、数値解析から得られた Case I と Case II の主棟の最大応答層間変形をそれぞれ示す。図6と図7に、数値解析から得られた Case I と Case II の主棟の最大応答加速度をそれぞれ示す。CVC-NV モデルと CVC-V モデルの両方において、主棟のみの非制御モデル(UC-MF)と比較して、主棟の最大応答層間変形と最大応答加速度が減少した。

図8と図9に、制御モデルの主棟と副棟の最上階における評価指標 (J_1 、 J_2) をそれぞれ示す。ここで、 J_1 は応答相対変位の評価指標、 J_2 は応答加速度の評価指標であり、いずれも値が小さいほど主棟のみ（または副棟のみ）モデルと比較して応答低減効果が優れることを表す。CVC-V モデルと比較して、CVC-NV モデルの主棟の最大応答変位と加速度は明らかに減少、あるいは CVC-V モデルとほぼ同等であるという結果が示された。さらに、CVC-NV モデルには負剛性接続要素が組み込まれているため、CVC-NV モデルは、CVC-V モデルよりも接続部の粘性減衰係数の値が小さくて済み、より合理的に制振効果が達成できることが示された。

以上の検討結果から、負剛性接続要素と粘性減衰接続要素を連棟制振構造システムに組み込むことは、地震応答を軽減するために有効であることが示された。

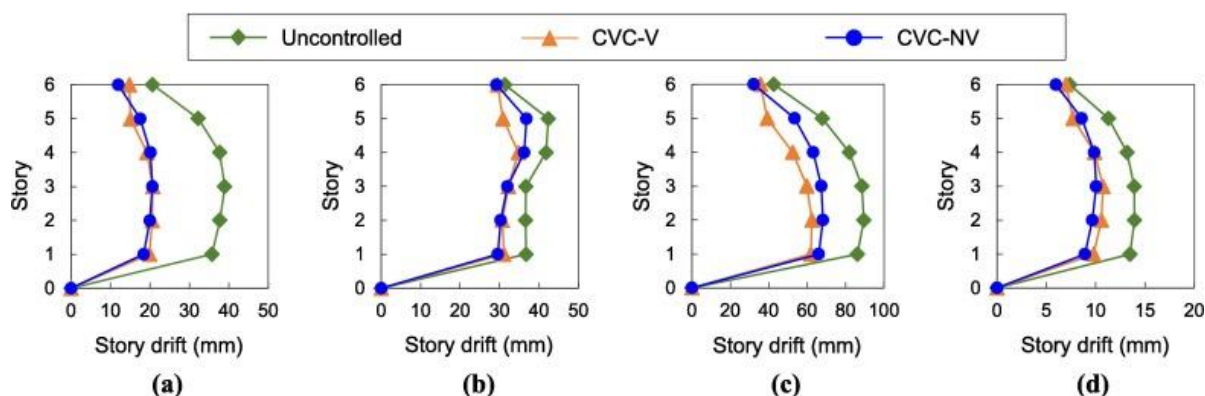


図4 数値解析から得られた Case I の主棟の最大応答層間変形（入力波グループごとに平均）：(a) 告示波、(b) K-NET 追分、(c) K-NET 早来、(d) K-NET 札幌（文献[1]から引用）

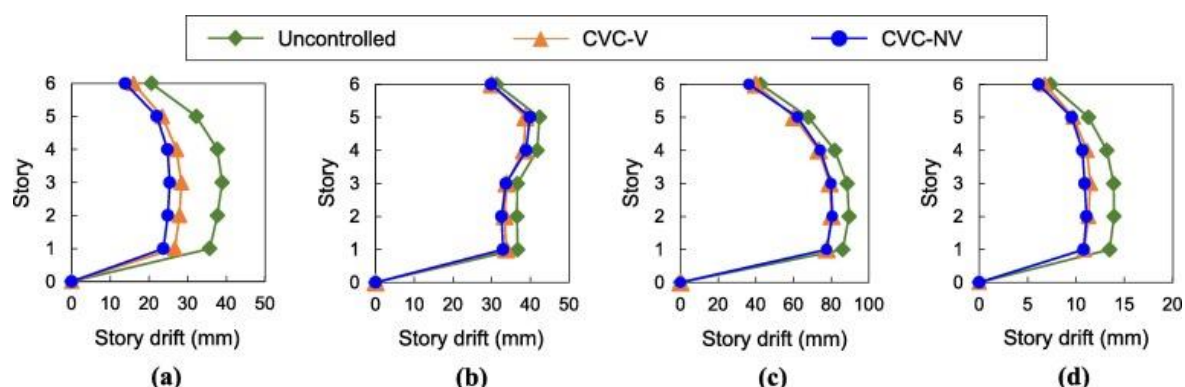


図5 数値解析から得られた Case II の主棟の最大応答層間変形（入力波グループごとに平均）：(a) 告示波、(b) K-NET 追分、(c) K-NET 早来、(d) K-NET 札幌（文献[1]から引用）

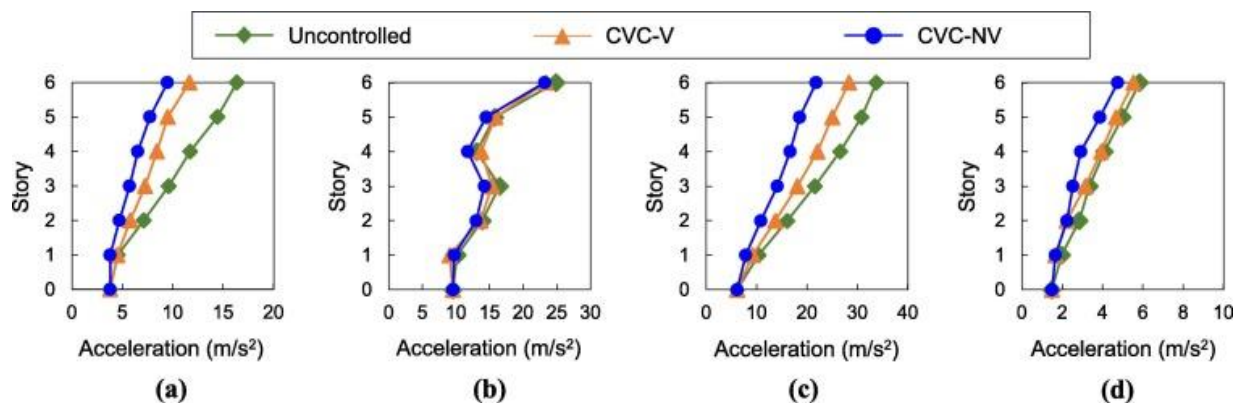


図6 数値解析から得られた Case I の主棟の最大応答加速度（入力波グループごとに平均）：(a) 告示波、(b) K-NET 追分、(c) K-NET 早来、(d) K-NET 札幌（文献[1]から引用）

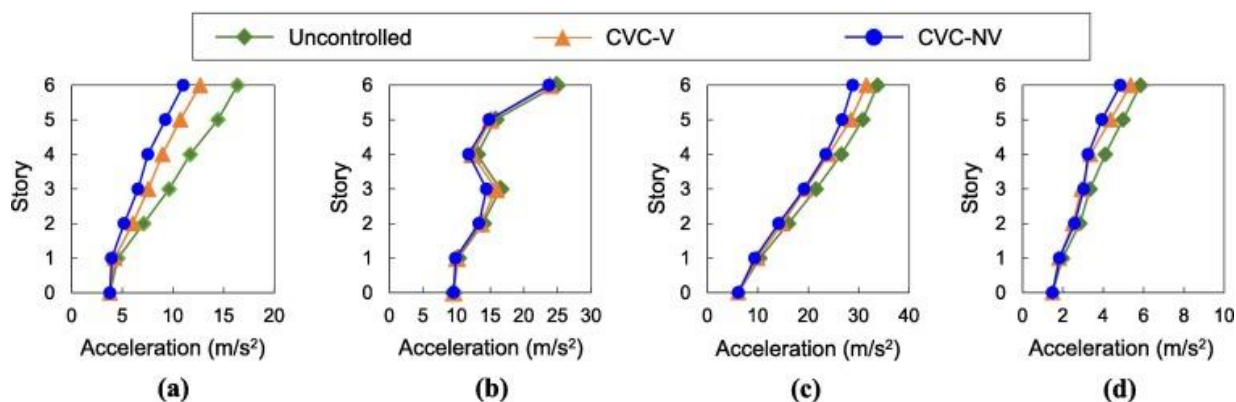


図7 数値解析から得られた Case II の主棟の最大応答加速度（入力波グループごとに平均）：(a) 告示波、(b) K-NET 追分、(c) K-NET 早来、(d) K-NET 札幌（文献[1]から引用）

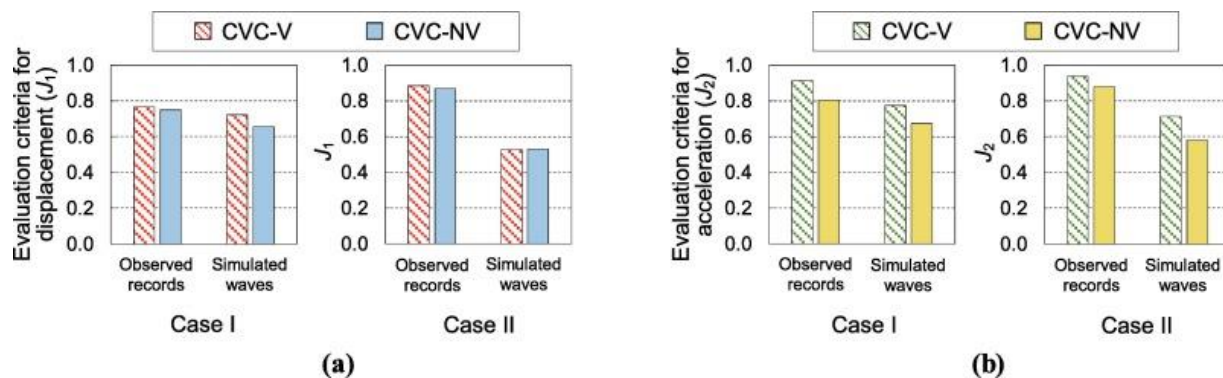


図8 制御モデルの主棟の最上階における評価指標（6観測波と3告示波の各入力平均）：(a) 最大相対応答変位の評価指標 (J_1)、(b) 最大応答加速度の評価指標 (J_2)（文献[1]から引用）

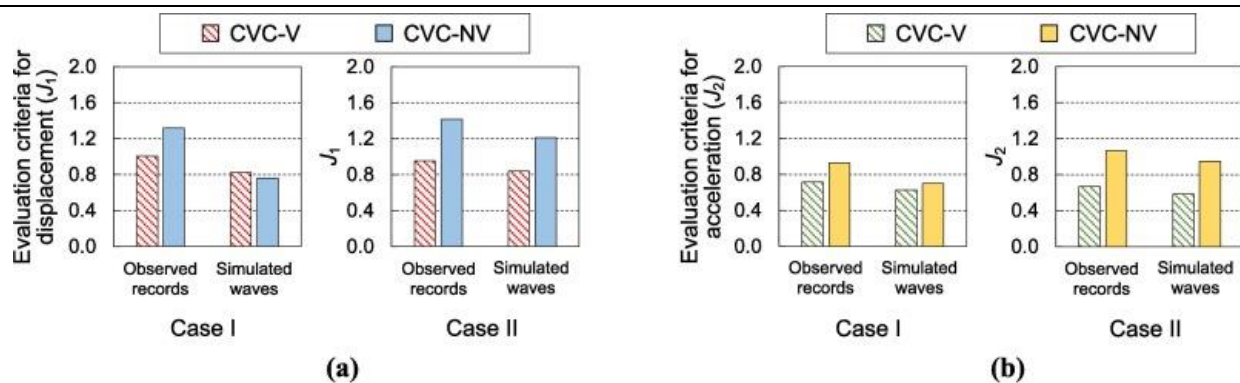


図9 制御モデルの副棟の最上階における評価指標（6観測波と3告示波の各入力平均）：(a)最大相対応答変位の評価指標(J_1)、(b)最大応答加速度の評価指標(J_2)（文献[1]から引用）

2. 4 引用文献

[1] Sonia LONGJAM, Kazutaka SHIRAI : Earthquake response control effects of coupled structural systems incorporating a negative stiffness connector: Experimental and numerical investigation, Engineering Structures, 295, 116793, 2023 年.

3. 研究の成果

3. 1 研究成果のまとめ

本研究で実施した検討を通して、パッシブ負剛性装置（PNSD）接続による連棟制振構造の地震応答の低減効果を明らかにすることができたと考えている。

3. 2 研究成果の外部発表

本研究で得られた成果の一部を、以下に再掲する論文[1]として査読付き国際ジャーナルへ投稿し、採択・刊行された。

[1] Sonia LONGJAM, Kazutaka SHIRAI : Earthquake response control effects of coupled structural systems incorporating a negative stiffness connector: Experimental and numerical investigation, Engineering Structures, 295, 116793, 2023 年.

4. 今後の課題

当初計画では、上述の実施済み研究内容（実際の多層建物を想定した PNSD 連棟構造の地震応答解析）に加え、振動台実験データを用いた PNSD 連棟制振システム試験体の数値シミュレーション検証も行う計画であった。しかし、振動台実験データの取得までは完了しているものの、PNSD 連棟制振システム試験体の非線形モデル化による数値シミュレーション検証については、期間内に十分な結果を得ることが困難であった。このため、振動台実験データを用いた PNSD 連棟制振システム試験体の数値シミュレーション検証は、今後の検討課題としたい。