

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14362

研究課題名（和文）Multi-hazard resilient structural system adopting strong structural spines and damped-pin joints

研究課題名（英文）Multi-hazard resilient structural system adopting strong structural spines and damped-pin joints

研究代表者

陳 星辰 (Chen, Xingchen)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・助教

研究者番号：00816564

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：2種類のエネルギー吸収性能を持つ革新的なヒンジ接合を開発した。従来の塑性ヒンジとは異なり、提案減衰ヒンジはダンパー部分を交換するだけで簡単に修復できるという利点があり、自然災害に見舞われた建物構造のレジリエンスを向上させる。提案ヒンジ接合の構造的特性に関する理論分析が行われ、様々なパラメータを持つ試験体に対して載荷実験が実施された。提案接合が望ましい特性を示すことを証明した。さらに、接合の履歴挙動をシミュレートするための数値解析モデルが構築され、試験結果との比較を通じてその精度が検証された。最後に、多層骨組に対して動的解析が行われ、提案接合が応答を効果的に低減することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではエネルギー吸収性能を持つ革新的なヒンジ接合を提案している。提案ヒンジ接合は一般性に優れており、従来のラーメン構造から心棒構造等まで適用可能である。載荷実験と有限要素解析、地震応答解析を通じて幅広いパラメトリックスタディを行い、提案接合の特性を十分検討したことなど学術的意義が高い。本研究で得られた知見は建物の主要構造部の損傷低減およびレジリエンス向上に有用になり、社会的に意義のある研究成果である。

研究成果の概要（英文）：This research developed two innovative types of damped pin joints designed for building structures where the formation of plastic hinges is permitted. Unlike traditional plastic hinges, these damped pin joints offer the advantage of easy repair by simply replacing the dampers, thereby enhancing the resilience of building structures suffering from natural disasters. The research includes theoretical analysis of the mechanical properties of the proposed joints, followed by cyclic loading tests conducted on specimens with various parameters. The test results demonstrated stable hysteresis performance and desired characteristics. Additionally, numerical analysis models were developed to simulate the hysteretic behavior of the joints, with comparison against the test results to verify accuracy. Finally, dynamic analyses were performed on steel frame structures with varying numbers of stories, revealing that the proposed joints effectively reduce the structural responses.

研究分野：建築構造学

キーワード：減衰ヒンジ接合 ダンパー エネルギー吸収 変形性能 静的載荷実験 有限要素解析 動的応答解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年では、外乱で建物における大きく変形する場所を集中的に設け、変形箇所を制振部材を設置し、建築機能の早期復旧を目的として、制振部材を交換可能とするための研究が多く行われている。また、軸変形やせん断変形より、回転変形を利用することは、建築の開口部に影響しないため、適用されやすくと考えられている。

### 2. 研究の目的

本研究では、エネルギー吸収性能を持つ2種類の革新的なヒンジ接合を開発した。提案された接合の一つは、レバーアームと丸鋼ダンパーを使用している。ダンパーは柱内に垂直に設置され、レバーアームを介して梁端に接続されているため、梁端の限られたスペースにもかかわらず柔軟なダンパー配置が可能である。もう一つの提案は、柱梁接合部に二段階降伏座屈拘束ダンパーを組み込んでおり、通常の座屈拘束丸鋼ダンパーとギャップを持つダンパーを並列に配置している。提案ヒンジ接合の構造的特性に関する理論分析が行われ、様々なパラメータを持つ試験体に対して载荷実験が実施され、提案接合が望ましい特性を示すことを証明した。さらに、接合の履歴挙動をシミュレートするための数値解析モデルが構築され、試験結果との比較を通じてその精度が検証された。最後に、多層骨組に対して動的解析が行われ、提案接合が応答を効果的に低減することが明らかになった。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 レバーアームおよび丸鋼ダンパーを用いた高力ボルト柱梁接合部

図1に提案接合部の概要を示す。梁からのせん断力は梁上フランジ側の不等辺山形鋼を用いた高力ボルト接合部で伝達する。梁下フランジには部材A、柱には部材Bを高力ボルトで設置し、部材A、Bとレバーアームをピンで接合する。レバーアームとダンパー上端の接合部材はネジで接合し、ダンパー下端の固定部材は柱ウェブと高力ボルトで接合する。ダンパーは丸鋼芯材と座屈拘束材により構成される。図2に示す力学モデルを想定し、梁端接合部の回転剛性と耐力評価式を導出した。

提案する接合部について、ダンパー部に座屈拘束材を設けた芯材の塑性化部長さ  $l$  が異なる試験体 T - S ( $l = 250\text{mm}$ )、T - M ( $l = 300\text{mm}$ )、T - L ( $l = 350\text{mm}$ ) と座屈拘束材がない試験体 T - N ( $l = 250\text{mm}$ ) の4体の試験体を用いる。図3に载荷方法および変位測定位置を示す。変位計 d1 の値  $\delta$  を梁の長さ  $L$  で除して求まる全体回転角  $R(\delta/L)$  によって制御し、弾性範囲、 $\pm 0.005$ 、 $\pm 0.01$ 、 $\pm 0.015$ 、 $\pm 0.02$ 、 $\pm 0.025$  rad の振幅でそれぞれ2サイクルずつ繰返し漸増载荷を行う。変位計 d2 によりダンパーの軸方向変形、変位計 d3 によりレバーアーム上部の梁下フランジに対する相対水平変位、変位計 d4, d5 により不等辺山形鋼の変形、変位計 d6, d7 により梁下フランジと柱フランジの相対水平変位、変位計 d8, d9 により柱のたわみによる接合部の回転をそれぞれ計測する。

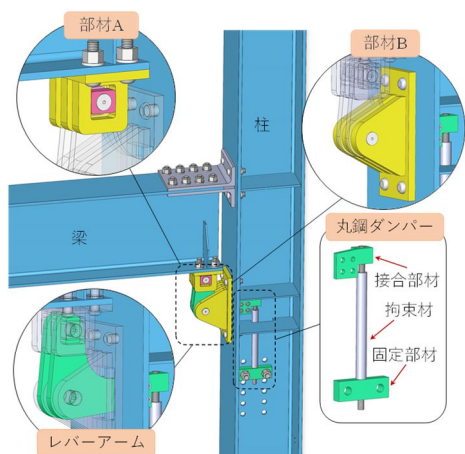


図1 接合部概要

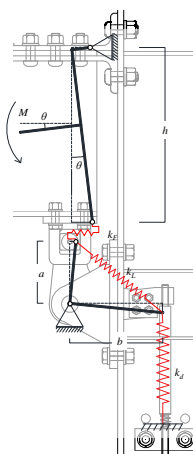


図2 力学モデル

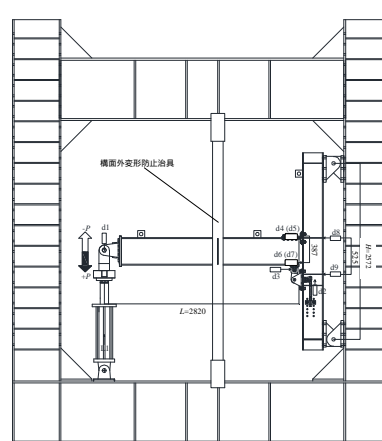


図3 载荷セットアップ

図4に荷重 - 梁端接合部回転角関係を示す。試験体 T - S、T - M、T - L の実験結果を比較すると、塑性化部長さが長い試験体ほど履歴ループが安定することが分かる。レバーアームの回転によりダンパーに曲げが発生し、塑性化部長さが短いほど、ダンパー上下端の曲げモーメントが大きくなり、接合部材および固定部材にスリップが生じる。加えてダンパーの軸剛性が高くなると部材Aとレバーアームの変形が無視できなくなる。T - Nでは、 $R = +0.01$  のサイクル中に丸鋼の座屈が生じた。他の3体の試験体と異なり座屈拘束材がないため、芯材の座屈を防ぐことができない。その結果、芯材の塑性変形が局部に集中し、圧縮耐力が低下することから、全体的に不安定な履歴特性を示した。

解析には ANSYS 2022 R1 を使用する。図2の力学モデルに基づき、図5に示すような解析モ

デルを構築する。丸鋼ダンパー部分のみソリッド要素 SOLID185 を使い、芯材と拘束管の間に摩擦係数 0.2 の接触要素を適用する。なお、丸鋼は材料の非線形移動硬化と等方硬化特性を考慮した弾塑性モデル（混合硬化則）を用いる。境界条件について、芯材の下端部を固定し、梁上フランジ端部とレバーアームをピン支持し、梁端部に Z 方向（下向き正）の強制変位を与え、単調及び繰返し載荷解析を行う。図 6 に試験体 T-M の荷重 - 変形関係の単調載荷の解析結果、実験結果の骨格曲線、理論評価値を示す。弾性剛性の解析結果は実験値、評価値とも概ね対応しており、降伏後は歪硬化や座屈拘束材との接触により耐力が上昇している。

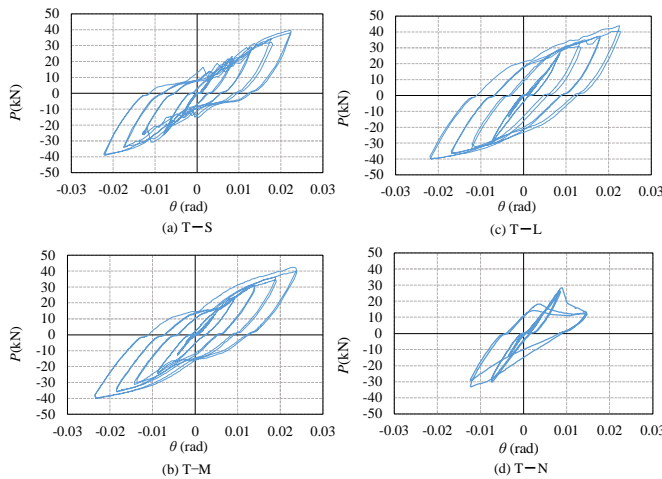


図 4 荷重—梁端接合部回転角関係

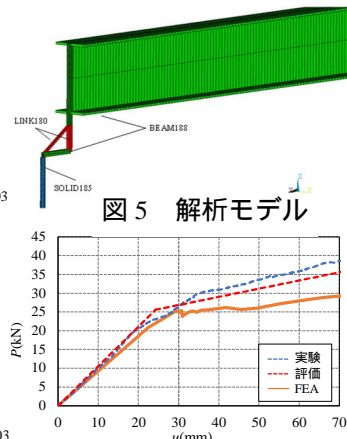


図 5 解析モデル

図 6 荷重—変形関係骨格曲線

### 3.2 二段階降伏座屈拘束ダンパーを用いた柱梁接合部

本研究では、梁柱接合部に二段階降伏座屈拘束丸鋼芯材ダンパー（DY-BRBD）を適用した。図 7 に示すように、ダンパーは梁下フランジと柱フランジの間に配置されている。BRBD は梁フランジの上側に、Gap-BRBD は下側にそれぞれ配置されている。丸鋼芯材の一端は、高力ボルトを介して梁フランジに接合された座屈拘束材にねじ込まれている。他端はナットを使用して柱のフランジに接合され、芯材の降伏を防ぐためにアダプターが使用されている。高力ナットが BRBD に使用され、Gap-BRBD のギャップサイズを制御するためにスペシャルナットが使用されている。対称的な二段階降伏履歴を実現するために、スペシャルナットと柱フランジの両側にギャップが設けられている。

まず、DY-BRBD の履歴特性（図 8）について理論的な分析を行った。次に、DY-BRBD を用いた梁柱接合部に対して繰り返し荷重試験を実施した。主要パラメータは、ダンパーの位置とギャップの大きさである。ギャップの大きさは 0、1、2、および 3mm に設定され、それに対応する接合部の回転角はそれぞれ 0、0.0024、0.0048、および 0.0072rad であった。試験結果は、DY-BRBD が安定した履歴性能と二段階の降伏特性を示すことを示した。また、梁の上フランジとウェブのひずみは降伏ひずみと比べて比較的小さく、これは梁が弾性状態を維持していることを示しており、梁柱接合部の主な塑性変形は鋼材ダンパーに集中していることを確認できた。

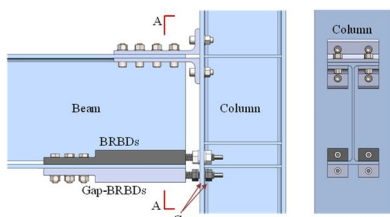


図 7 二段階降伏接合部概要

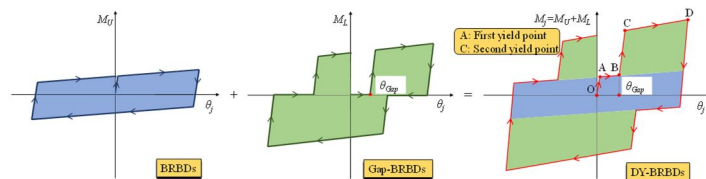


図 8 履歴特性

接合部挙動をシミュレートするために数値解析モデルが作成された。理論値と解析結果を試験結果と比較し、理論および数値モデルの精度を検証した。最後に、DY-BRBD を設置した 10 階鋼構造骨組（図 9）に対してプッシュオーバー解析および地震応答解析を実施した。モデルには、一段階降伏座屈拘束丸鋼芯材ダンパー（SY-BRBDs モデル）を持つ骨組と、二段階降伏座屈拘束丸鋼芯材（DY-BRBDs モデル）を持つフレームの 2 種類があった。SY-BRBDs モデルおよびさまざまなギャップサイズを持つ DY-BRBDs モデルの耐震性能が分析された。DY-BRBDs の二段階降伏挙動をより良く示すために、異なる長さの丸鋼芯材が選ばれた。ギャップサイズは 1、2、3mm に設定され、それに対応する接合部の回転角はそれぞれ 0.0021、0.0042、0.0063rad でした。

レベル 1 地震動に対しては、SY-BRBDs モデルと DY-BRBDs モデル（ギャップ 1-3mm）の最大層間変位は同程度であり、これはこの地震レベルでは骨組が弾性状態に留まり、変形が少ないため Gap-BRBDs が作動しないことが主な理由である。レベル 2 およびレベル 3 地震動に対しては、DY-BRBDs モデル（ギャップ 1-3mm）の最大層間変位が SY-BRBDs モデルと比べ減少した。elc-25、elc-50、および elc-75 の地震レベル下での構造の層間変位を分析することにより、SY-

BRBDs モデルと比較して、DY-BRBDs-1 モデルの最大層間変位はそれぞれ 1.5%、10%、16.9% 減少した(図 10)。層間変形集中係数 DCF は建物の変形均一性を評価するために使用されている。DCF 値が 1 に近いほど、建物の変形がより均一であることを示す。モデルの中で、DY-BRBDs-1 モデルはレベル 1 およびレベル 2 の地震に対してより小さな DCF 値を示し、DY-BRBDs-2 モデルはレベル 3 の地震に対してより小さな DCF 値を示した。これは、地震レベルの増加に伴い、より大きなギャップが DCF 値を低減し、建物の高さに沿った変形の均一性を向上させることを示している。3 つの地震レベル下では、DY-BRBDs-0 モデルは大きな DCF 値を持つ傾向があり、これはダンパーの強度を単に増加させるだけでは構造の変形均一性が改善されないことを示している。

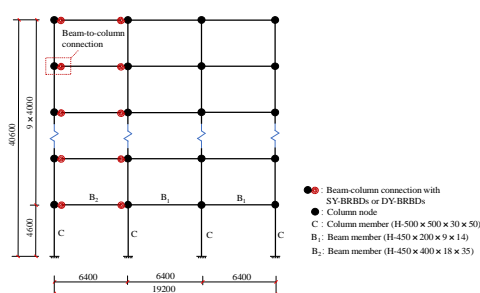


図 9 多層骨組解析モデル

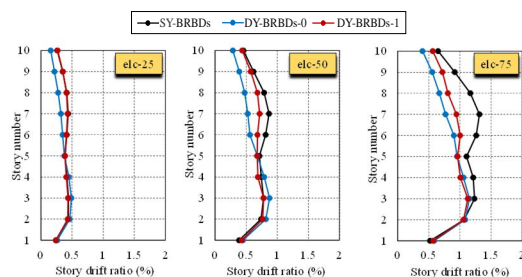


図 10 最大層間変形角分布

#### 4. 研究成果

レバーアームおよび丸鋼ダンパーを用いた柱梁接合部を提案した。剛性および耐力評価式を導出し、構造特性を確認するため繰返し載荷実験を行った。さらにダンパーを有する力学モデルの有限要素解析を行った。得られた結論を以下に示す。

- ・ダンパーの塑性化部が短い試験体では曲げの影響で接合部材に回転が生じたが、塑性化部が長い試験体では安定した履歴を描いた。

- ・実験結果と評価結果を比較し、導出した評価式の弾性剛性および耐力が概ね一致しており、評価式が妥当であることを確認した。

- ・力学モデルに対する有限要素解析を行い、ダンパーの材料特性を混合硬化則にすることで繰返し載荷実験の結果を良好にシミュレートできることを確認した。

梁柱接合部に二段階降伏座屈拘束ダンパー (DY-BRBDs) を提案した。履歴特性の評価式を導出し、異なるダンパー構成を持つ 6 つの試験体の繰返し載荷実験を行い、実験結果を理論予測およびシミュレーション結果と比較して、理論式および数値モデルの精確性を検証した。10 層鋼構造骨組モデルの地震応答解析を行い、DY-BRBDs が最大層間変形および残留層間変形を低減する効果を確認した。主な結論を以下に示す。

- ・提案された DY-BRBDs は、BRBD と Gap-BRBD を並列に配置し、ギャップを通じて二段階の降伏を達成することを特徴としている。変形が小さい場合は、主に上部の BRBD がエネルギーを吸収する。変形が設定されたギャップを超えると、下部の Gap-BRBD がエネルギー吸収に参加し始める。装置は組立が簡単で、地震後の修理や交換が容易である。

- ・DY-BRBDs の作動原理に基づいて履歴曲線の理論式を導出した。また、異なるダンパー構成を持つ 6 つの試験体に対して繰返し載荷実験を実施し、DY-BRBDs の構造性能を検討した。試験結果は、DY-BRBDs が安定した履歴曲線を持ち、明確な二段階降伏特性を示していることを明らかにした。試験結果は理論予測と比較され、理論式の正しさが検証された。

- ・DY-BRBDs を使用した梁柱接合部を OpenSees ソフトウェアでモデル化した。数値結果は試験履歴曲線とよく一致し、両者ともに明確な二段階降伏メカニズムを示した。履歴曲線の二つの降伏点と剛性は数値結果と実験結果で一致しており、数値モデルの信頼性がさらに確認された。

- ・10 層鋼構造骨組モデルのプッシュオーバー解析および地震応答解析の結果、DY-BRBDs を適用したモデルは良好な耐震性能を持ち、最大層間変形および残留変形を効果的に低減し、高さ方向の変形の均一性を向上させることが示された。残留変形を低減することは、地震後の制振装置の修理や交換を容易にする。梁柱接合部におけるダンパーの剛性と耐力を単に増加させることが、建物の変形を高さ方向により均一にするわけではないことに留意する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yong Liu, Xingchen Chen, Hiroshi Tagawa	4. 巻 212
2. 論文標題 Beam-to-column connection with double-stage yield buckling-restrained steel bar dampers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Constructional Steel Research	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcsr.2023.108278	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 竹内 翔紀、張 思晋、陳 星辰、田川 浩
2. 発表標題 レバーアーム及び丸鋼ダンパーを用いた柱梁接合部の載荷実験
3. 学会等名 2022年度日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yong LIU, Xingchen CHEN, Hiroshi TAGAWA
2. 発表標題 Experimental investigation on beam-to-column connection with double-stage yield buckling-restrained steel bar dampers
3. 学会等名 2022年度日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yong Liu, Xingchen Chen, Hiroshi Tagawa
2. 発表標題 Cyclic loading tests on beam-to-column connection with double-stage yield bukcling-restrained steel bar dampers
3. 学会等名 13th Pacific Structural Steel Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹内 翔紀、張 思晋、陳 星辰、田川 浩
2. 発表標題 レバーアームおよび丸鋼ダンパーを用いた高力ボルト柱梁接合部に関する研究
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shoki Takeuchi, Sijin Zhang, Xingchen Chen, Hiroshi Tagawa
2. 発表標題 Study on bolted steel beam-to-column connections with lever arms and round steel bar dampers
3. 学会等名 18th World Conference On Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 陳 星辰、張 思晋、竹内 翔紀、田川 浩
2. 発表標題 レバーアームおよび丸鋼ダンパーを用いた高力ボルト柱梁接合部の構造特性
3. 学会等名 2024年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------