

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03346

研究課題名（和文）変形分布制御機構を備えた摩擦/粘性ダンパと滑り基礎の併用による低層軽量構造の制振

研究課題名（英文）Seismic response control of low-rise light-weight structure by friction/viscous dampers with deformation distribution control mechanism and sliding base

研究代表者

曾田 五月也（Soda, Satsuya）

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：70134351

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,560,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、想定を大幅に超えるような地震動が発生した場合にも、建物内部や構造体に大きな損傷を与えることなく機能を維持し続けることが可能な構造システムを、摩擦力と粘性力を高度に組み合わせたパッシブかつ安定した機構によりローコストで実現する技術を開発した。また、各種の実大実験と解析検討により、提案した構造システムが上部構造の高減衰化、損傷集中の抑制、過大応答の防止を可能とすることを明らかとした。本研究の成果は、既往の技術にとらわれない極めて独創的な発想により、建築物の耐震性能を劇的に向上させる具体策を高い学術的信頼性を備えて提示したことであり、将来の都市地震防災体制の強化に貢献するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した構造システムは、制振構造と免震構造の特徴を熟知したうえで、それらをシンプルかつ合理的に統合することで、ローコストでありながら安定性・ロバスト性を備えた高い耐震性能を実現している。入念かつ膨大な実験検討により策定されたディテールそのものに学術的に貴重な知見が含まれており、また実用性を意識して構成された構造システムは高い普及力も備えており、地震安全性の向上に対する学術的・社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this research, we've developed the novel structural system that reduces seismic response and maintains the function of buildings even when subjected to severe earthquake ground motions. In the proposed system, passive friction and viscous devices are highly integrated in a building to realize a stable and low cost seismic technology. Through a series of experimental and analytical studies, we've confirmed that the proposed system really works to supply high damping to the building, prevent damage concentration to a specific story, and reduce seismic response substantially. The achievement of this research is that we've successfully provided the concrete measure to upgrade the seismic performance of buildings with high reliability, which contributes to enhance urban disaster prevention system in the future.

研究分野：建築構造

キーワード：制振構造 摩擦機構 損傷分散 滑り基礎構造 低層建築物 変形分布制御 高減衰 ロバスト

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国における戸建て住宅を含む低層建物の建設は、そのほとんどが、木造軸組み工法およびツーバイフォー、軽鋼構造(薄板を含む)のいずれかを用いて行われる。これらの建物の構造的な特徴は、進行性スリップ型の復元力特性を有していることであり、バイリニア型の復元力特性を発揮する鉄骨ラーメン構造等と比べると、エネルギー吸収能力が低く、繰り返しによる耐力低下が顕著な点にある。一方で、現行の耐震設計法においては建物の耐震安全限界性能を確認する場合の地震動強さは地表面速度 50cm/s が目安とされているが、近年日本各地で記録されている震度 7 クラスの地震動ではその最大速度が 100cm/s を超えるものが少なくない。このような過酷な地震動に対しても、人命や財産に被害を及ぼすことなく、建物の機能を維持し続けることが極めて重要であり、そのためには在来の構造法にとらわれることなく新しい技術を積極的に取り込むことが必須である。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究では 4 階建て程度までの中低層建物を対象に、単純な機構を構造システムに組み込むことで飛躍的に耐震性能を向上させるローコストな手法を提案、開発することを目的とした。本研究で提案する構造システムはまず、摩擦機構を内蔵した耐力壁を上部構造の耐震要素として組み込むことで靱性とエネルギー吸収能力を大幅に向上(上部構造の高減衰化)させる。次に、層間変形制御装置を設置することで各層の層間変形を一様化し、特定の層への損傷集中を抑制すると共に、地震エネルギーを建物全体で効率よく消費(損傷集中の抑制と消費エネルギーの分散)する。さらに、上部構造と基礎の間に摩擦材を挿入する滑り基礎を適用することで、過酷な地震動が作用した場合にも、上部構造の応答層間変形及び加速度を頭打ちにする(過大応答の防止)といった 3 種類の異なる機能を組み合わせることで構築されるものである。なお、上部構造には粘性系ダンパを併用することで、剛性と減衰性能を高め、使用性とリリーフ性能を向上させる。これら 3 種類の異なる要素技術を適切に組み合わせることで、例えば想定を大幅に超えるような地震動が発生した場合にも、建物内部や構造体に大きな損傷を与えることなく、機能を維持し続ける構造システムが可能となる。

### 3. 研究の方法

提案する構造システムは 3 種類の構造要素の組み合わせにより構成される。初めに、実大試験体への適用を想定した仕様の各構造要素を用いて単体性能試験を行いその静的・動的性能を詳細に検討した。次に、単体試験の実験結果を基に実大振動台実験に供する試験体の設計、解析を行った上で、提案する構造システムを組み込んだ実大建物の振動台実験を実施した。振動台実験は 2017 年度と 2018 年度にそれぞれ実施し、2017 年度には実大 2 層構造物を、2018 年度には縮小 3 層構造物を試験体として用いた。最終年度には、多方向地震動入力に対する滑り基礎構造の応答性状を検討するため、小型鋼製フレームの振動台実験を実施した。また、提案する構造システムを備えた建築物の地震応答低減効果を検証するため、国内で観測された膨大な強震動データをを用いた時刻歴地震応答解析を実施した。

### 4. 研究成果

(1) 2017 年度は、初めに、提案する構造システムを構成する主要要素である摩擦機構内蔵耐力壁の静的・動的性能を単体性能実験により検証した。摩擦機構内蔵耐力壁は、薄板軽量形鋼造フレームのたて枠材と内挿パネルの間に摩擦機構を内蔵することで、変形能力とエネルギー吸収能力を飛躍的に向上させた耐力壁である(図 1)。摩擦機構内蔵耐力壁の実大静的加力実験により、提案する機構が想定通りの高い靱性と減衰性能を有することを確認した。次いで、摩擦機構内蔵耐力壁を主構造要素とした実寸 2 層薄板軽量形鋼造フレーム(写真 1)の振動台加振実験を実施した。実験では、層間変形を一様化する 2 種類のリンク機構(リンク式流体慣性ダンパとメカニカルリンク機構)を組み込んだ各試験体についても加振を行い、リンク機構による損傷分散効果についても検証した。実験結果より、摩擦機構内蔵耐力壁は、繰り返しの地震動入力に対し

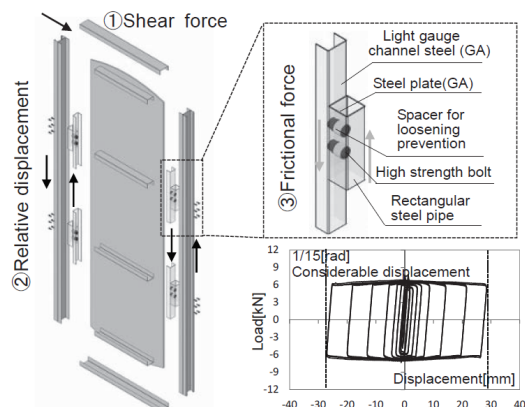


図 1 摩擦機構内蔵耐力壁の構成



写真 1 実寸 2 層試験体の振動台加振実験

でも安定したエネルギー吸収性能を有することが確認された。リンク式流体慣性ダンパを設置した場合には、油圧リンク機構による層間変形の一様化、粘性系ダンパによる減衰付加、流体慣性による負剛性が認められ、応答を大幅に低減できることを示した。同様に、メカニカルリンク機構を導入した場合にも、リンク部材による損傷分散と粘弾性ダンパによる減衰と剛性の付加により、応答を低減できることを示した。また、実験結果を高精度に模擬できる解析モデルを構築し、時刻歴応答解析により各部の応力状態や各要素の応答低減機構について詳細に分析した。

(2) 2018年度には、リンク式流体慣性ダンパ(図2)とメカニカルリンク機構の多層構造物への適用性を検証するため、高さ方向に縮小した3層薄板軽量形鋼造フレーム(写真2左)の振動台加振実験を実施した。また、本研究で提案する構造システムを構成する3種類の構造要素、すなわち摩擦機構内蔵耐力壁・リンク機構・滑り基礎構造の全てを適用した場合の地震応答低減に対する有効性を検証するため、縮小2層フレーム(写真2右)の加振実験も実施した。実験結果から、3層構造物に対しても2種類のリンク機構が想定通りに性能を発揮することを明らかにした。また、滑り基礎構造を適用することで、震度7クラスの過酷な地震動の作用に対しても入力ヘッド打ちになり、応答を劇的に低減できることを示した。さらに、実験結果との整合により妥当性を検証した解析モデルを用いた時刻歴応答解析を実施し、過去に観測された様々な特性の地震動に対しても、提案する構造システムが地震応答低減に有効であることを示した(図3)。

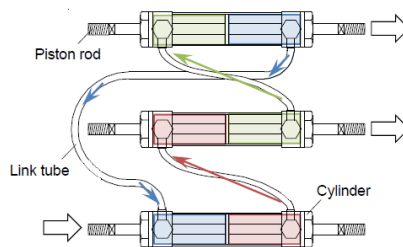
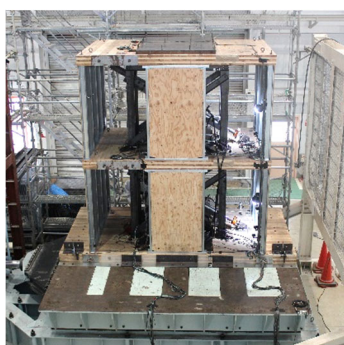
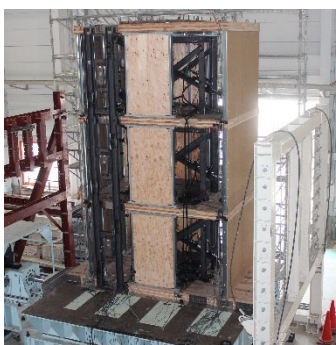


図2 3層用リンク式流体慣性ダンパの仕様概要

写真2 縮小3層試験体(左)と2層試験体(右)の振動台加振実験

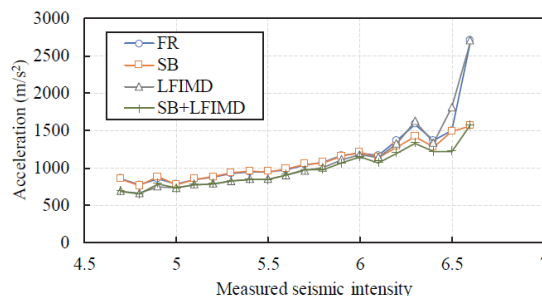
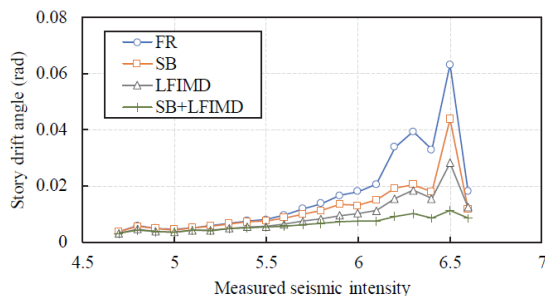


図3 国内の観測地震動518波を用いた時刻歴応答解析による応答比較 (FR:摩擦機構内蔵耐力壁のみ、SB:FR+滑り基礎、LFIMD:FR+リンク式流体慣性ダンパ)

(3) 2019年度には、提案する構造システムのさらなる高度化と地震応答性状の解明を目的として、滑り基礎構造を適用した構造物を対象に振動台による水平上下同時加振実験を実施した。滑り材には、耐久性と施工性の向上を目的として超高強度繊維補強コンクリートとステンレスを使用した。実験結果より、地震動によっては上下動入力が滑り変位に大きな影響を与えることを示した。また、上下動の影響を考慮できる解析モデルによる時刻歴応答解析を実施し、上下動入力は滑り変位には一定の影響を与えるものの、上部構造の応答にはほとんど影響しないことを明らかにした。

以上の一連の研究成果により、近年度々観測されているような過酷な地震動に対しても、人命の保護と建物の機能維持を可能とする新たな構造システムを提案することができた。提案した構造システムは性能の安定性が高く、コスト性にも優れており、将来の都市地震防災に多大に貢献できる極めて実用性の高いものである。

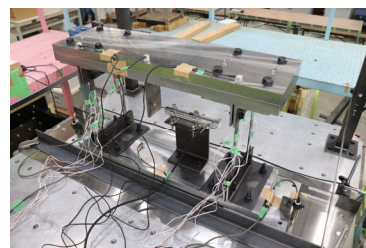


写真3 水平上下加振実験

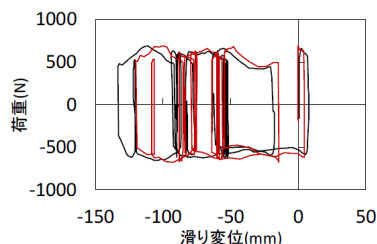


図4 滑り面の荷重変形履歴の実験(黒)と解析(赤)の比較



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 曾田五月也、渡井一樹、脇田健裕、宮津裕次	4. 巻 Vol. 84
2. 論文標題 リンク式流体慣性ダンパによる構造物の地震応答制御 実寸2層薄板軽量形鋼造試験体による振動台実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 351-360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: <a href="https://doi.org/10.3130/aijs.84.351">https://doi.org/10.3130/aijs.84.351</a>	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 -
1. 著者名 渡井一樹、曾田五月也	4. 巻 Vol. 83
2. 論文標題 リンク式流体慣性ダンパによる層間変形制御機構の動力学特性に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 547-554
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: <a href="https://doi.org/10.3130/aijs.83.547">https://doi.org/10.3130/aijs.83.547</a>	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 -
1. 著者名 脇田健裕、曾田五月也、渡辺力	4. 巻 Vol. 83
2. 論文標題 摩擦機構を内蔵した薄板軽量形鋼造耐力壁の構造性能と数値解析モデル	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1183-1191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3130/aijs.83.1183">https://doi.org/10.3130/aijs.83.1183</a>	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 -
1. 著者名 宮津裕次、曾田五月也	4. 巻 Vol. 83
2. 論文標題 部分空間法による2層木造軸組工法住宅の振動特性同定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 409-419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3130/aijs.83.409">https://doi.org/10.3130/aijs.83.409</a>	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 -

1. 著者名 曾田五月也、脇田健裕	4. 巻 Vol.83
2. 論文標題 高減衰薄板軽量形鋼造耐力壁の開発とその基本力学的性能	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 201-210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3130/aijs.83.201">https://doi.org/10.3130/aijs.83.201</a>	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 -

1. 著者名 脇田健裕、曾田五月也	4. 巻 第25巻
2. 論文標題 摩擦機構内蔵耐力壁を適用した薄板軽量形鋼造建築物の構造特性係数に関する検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本鋼構造協会鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 39-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.11273/jssc.25.97_39">https://doi.org/10.11273/jssc.25.97_39</a>	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12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 宮津裕次
2. 発表標題 変形分布制御機構を備えた実寸2層薄板軽量形鋼造試験体の振動台実験 その3. 機械式リンク機構を設置した場合
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 曾田五月也
2. 発表標題 変形分布制御機構を備えた実寸2層薄板軽量形鋼造試験体の振動台実験 その1. 実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡井一樹
2. 発表標題 変形分布制御機構を備えた実寸2層薄板軽量形鋼造試験体の振動台実験 その2. 油圧式リンク機構を設置した場合
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡井一樹
2. 発表標題 複数層の変形制御を目的としたリンク式流体慣性ダンパの動力学特性
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takehiro Wakita
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL SYSTEM FOR BUILDINGS WITH HIGH ENERGY ABSORPTION UTILIZING BOTH WOOD-BASED MATERIALS AND COLD-FORMED STEEL FRAMING
3. 学会等名 World Conference on Timber Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 脇田健裕
2. 発表標題 高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その11. 摩擦機構に使用する高力ボルトの締付力に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 曾田五月也
2. 発表標題 変形分布制御機構を備えた実寸2層薄板軽量形鋼造振動台実験 その1 実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡井一樹
2. 発表標題 変形分布制御機構を備えた実寸2層薄板軽量形鋼造振動台実験 その2 油圧式リンク機構を設置した場合
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮津裕次
2. 発表標題 変形分布制御機構を備えた実寸2層薄板軽量形鋼造振動台実験 その3 機械式リンク機構を設置した場合
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡井一樹
2. 発表標題 複数層の変形制御を目的としたリンク式流体慣性ダンパの動力学特性
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡井一樹
2. 発表標題 リンク式流体慣性ダンパによる構造物の層間変形制御システムの動力学特性に関する研究
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 脇田健裕
2. 発表標題 高靱性・高減衰・高耐力型薄板軽量形鋼造建築物の開発 その8. ボルト締付軸力を変化させた実大耐力壁の静的加力試験と2次元フレームモデルによる解析的検証
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017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
研究分担者	脇田 健裕  (Wakita Takehiro)  (10469025)	早稲田大学・理工学術院・客員主任研究員(研究院客員准教授)   (32689)	
研究分担者	渡井 一樹  (Watai Kazuki)  (30778189)	東京工業大学・科学技術創成研究院・特任助教   (12608)	
研究分担者	宮津 裕次  (Miyazu Yuji)  (70547091)	東京理科大学・理工学部建築学科・講師   (32660)	