

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06300

研究課題名(和文) 震度7大地震に対する高機能制振ブレースの開発・実験・解析的検証

研究課題名(英文) Development, experiments and analyses of high performance seismic control braces for great earthquakes

研究代表者

澤田 樹一郎 (SAWADA, KIICHIRO)

島根大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号：90284166

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：大地震のような大きな強制変形のもとでも降伏しない、大変形弾性部材と称する特殊な形態を有する部材を人間の発想による試行錯誤とコンピュータの数値計算による最適化手法を利用しながら開発した。さらに、この大変形弾性部材を制振ブレース部材に内蔵した高機能制振ブレースを開発した。本高機能制振ブレースは、建物の大地震時の最大変形を低減させる効果だけでなく、振動終了時の残留変形量も低減させる効果がある。このことをブレース部分架構の載荷実験とコンピュータによる地震応答解析の両面から検証し、有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Large deformable elastic members have been developed, which never yield under even great earthquakes. A lot of large deformable members have been obtained by a try and error process and a computational optimization method. Moreover high performance seismic control braces which contains large deformable elastic members have been developed. It has been confirmed from both experimental tests and seismic response analyses that these braces reduce not only maximum seismic response but also residual response.

研究分野：建築構造

キーワード：制振ブレース 大変形弾性部材 地震応答解析 実験 大地震

### 1. 研究開始当初の背景

近年、大地震においても建築物を軽微な損傷にとどめ、その財産価値を維持したいという要求が高まっている。このような要求に対する答えの一つが制振構造である。制振構造は、大地震において生じるであろう柱梁の損傷の一部あるいは全部を人為的に設置した制振ダンパーによって肩代わりしようとするものであり、粘弾性ダンパー<sup>[1]</sup>、粘性マスダンパー<sup>[2]</sup>、鋼の降伏によるエネルギー吸収を利用した履歴ダンパー<sup>[3]-[8]</sup>、摩擦ダンパー<sup>[9]</sup>などこれまでに多数のダンパーが国内外で実験検証され、多くが実用化に至っている。このような制振構造の応答低減効果や最適な配置については、すでに数多くの数値的検証がなされている<sup>例えば[11][12]</sup>。摩擦ダンパーや履歴ダンパー系制振構造の応答低減は、ダンパー部分でのエネルギー吸収による履歴減衰効果とほぼ弾性挙動するであろう柱梁で構成される主架構の弾性復元力による原点復帰の効果で説明することができる<sup>[10]</sup>。しかし、震度7級の巨大地震時において、主架構(柱梁)が塑性化すれば、建物全体の塑性化後剛性はほぼ0(図1(B)の の範囲)となり、弾性復元力による原点復帰の効果が発揮されず、建物に多大な残留変形が生じる可能性もある。応募者は、大地震時において大変形が強制されても常に弾性挙動する**大変形弾性部材**が容易に設計・製作され、建築物の制振ブレースに組み込むことができれば(図1(C)の追加により)、巨大地震時にも図1(D)の の範囲のように建物全体での塑性化後剛性が発揮され、従来の制振構造以上に最大変形や残留変形が低減するのではないかと考えた。なお、残留変形応答低減については、鉄骨柱脚<sup>[13]</sup>や RC 構造<sup>[14]</sup>に関する先駆的研究がある。

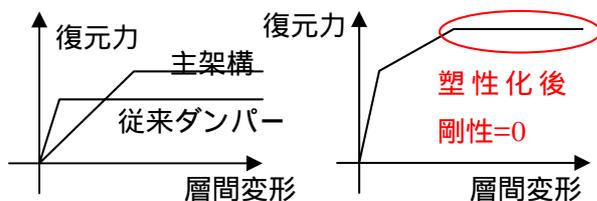


図 1(A) 主架構、従来ダンパー  
図 1(B) 建物全体 (従来ダンパー + 主架構)

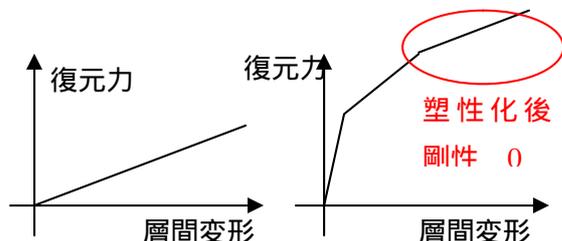


図 1(C) 大変形弾性部材の追加  
図 1(D) 建物全体 (大変形弾性部材付き)

### [ 引用文献 ]

[1] R.H.Zhang,T.T.Soong, P.Mahmoodi: Seismic response of steel frame structures with added viscoelastic dampers. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Volume 18, Issue 3, pp. 389-396, 1989

[2] 荒井達朗、油川健樹、五十子幸樹、堀則男、井上範夫：同調粘性マスダンパーの有効性の検証と弾塑性構造物への適用性、日本建築学会構造系論文集 (74), pp.1993-2002,2009

[3] 玉井宏章、近藤一夫、花井正実：オンライン・コンピュータ制御によるブレース制振装置付中高層架構建築の実地震応答実験、日本建築学会構造系論文報告集 (423), pp.113-125, 1991

[4] G. F. Dargush and T. T. Soong: Behavior of Metallic Plate Dampers in Seismic Passive Energy Dissipation Systems. Earthquake Spectra, Vol. 11, No. 4, pp. 545-568, 1995

[5] 加藤貴志、岩田衛、和田章：損傷制御構造における座屈拘束ブレースの性能評価、日本建築学会構造系論文集 (552), pp.101-108, 2002

[6] 笠井和彦、伊藤浩資：弾塑性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調節による制振構造の応答制御手法、日本建築学会構造系論文集 (595), pp.45-55, 2005

[7] 田原健一、山崎真司、見波進：履歴ダンパーを用いた連結制振構造の地震応答低減効果、日本建築学会構造系論文集 (621), pp.49-56, 2007

[8] 竹内徹、調浩朗、山田哲、吉敷祥一、鈴木一弁、佐伯英一郎、和田章：梁端弾塑性ダンパーの累積変形性能および損傷度評価、日本建築学会構造系論文集 (600), pp.115-122, 2006

[9] 寺井雅和、佐藤孝典、吉岡智和、南宏一：ゴムワッシャーを用いた高力ボルト摩擦すべりダンパーに関する研究：アルミニウム合金板を摺動材に利用した動的加振実験、日本建築学会構造系論文集 (614), pp.107-114, 2007

[10] Y Harada, H Akiyama : Seismic design of flexible-stiff mixed frame with energy concentration Engineering Structures, Vol. 20, No. 12, pp.1039-1044, 1998

[11] 小川厚司、井上一郎、中島正愛：損傷に寄与する地震入力エネルギーに関する考察、日本建築学会構造系論文集(530), pp.177-184, 2000

[12] 辻 聖晃; 国分 宏樹; 吉富 信太; 竹脇 出 非線形復元力特性を有する制振ダンパーの構造縮約モデルを用いた最適配置法、日本建築学会構造系論文集(658), pp. 2143-2152, 2010

[13] 池永昌容、長江 拓也、中島正愛、吹田啓一郎：残留変形低減をめざしたセルフセンタリング柱脚の開発と載荷実験、日本建築学会構造系論文集(612), pp.223-230, 2007

[14] 武矢直子、塩屋晋一：梁降伏型 RC 造ラーメンの損傷と残留変形を抑制する設計法に関する実験的研究、日本建築学会研究報告・九州支部. 1, 構造系 (50), pp.481-484, 2011

## 2. 研究の目的

(1) 所定の降伏変位を実現する大変形弾性部材の種々の形態を人の手による試行錯誤的過程や骨組構造やシェル構造の形態創生手法<sup>[15]-[17]</sup>として実績のある数値最適化手法を利用しながら生成し、引張試験体の製作と性能実験・FEM 解析により大変形弾性性能を確認する。

(2) (1)の手法で得られた形態を組み合わせて、種々の大変形弾性部材を組み込んだ摩擦制振ブレースを設計・製作する。また、その復元力特性を実験により確認する。

(3) 大変形弾性部材を組み込んだ摩擦制振ブレース付き建築骨組の地震応答解析を実行し、最大変形応答及び残留変形応答の改善効果を明らかにする。

### [ 引用文献 ]

[15] Ohsaki, M.: Simultaneous optimization of topology and geometry of a regular plane truss, Computers & Structures, Volume 66, Issue 1, pp. 69-77, 1998

[16] D. Fujii, N. Kikuchi: Improvement of numerical instabilities in topology optimization using the SLP method, Structural and Multidisciplinary Optimization, Volume 19, Issue 2, pp 113-121, 2000

[17] 本間俊雄、野端憲太：解の多様性を考慮した遺伝的アルゴリズムによる構造形態の創生、日本建築学会構造系論文集 (614), pp.35-43, 2007

## 3. 研究の方法

### (1) 大変形弾性部材の設計・製作・FEM 解析・引張実験 (平成 27 年度)

大変形弾性部材を人の手による試行錯誤や最適化手法を利用しながら、設計・製作し、FEM 解析と引張実験を行った。

### (2) 大変形弾性部材を内蔵した摩擦制振ブレースの設計・製作・性能実験 (平成 28 年度)

(1)の大変形弾性部材を組み込んだ摩擦制振ブレース試験体を設計製作し、性能実験 (繰り返し加力実験) により、復元力特性を確認した。

### (3) 大変形弾性部材を内蔵した摩擦制振ブ

### レースを取り付けた建築骨組の地震応答解析 (平成 29 年度)

大変形弾性部材を内蔵した摩擦制振ブレースを建築鉄骨骨組や RC 骨組に取り付けた時の大地震時最大変形や残留変形の改善効果を地震応答解析により検証した。

## 4. 研究成果

### (1) 大変形弾性部材の設計・製作・FEM 解析・引張実験 (平成 27 年度)

所定の耐力を有し、できるだけ、弾性限変形が大きくなるような形態を遺伝的アルゴリズムにより数値生成した。この研究成果の一例を図 2 に示す。具体的な最適化手法の詳細は、後述の文献[A5]に記述されている。この形状は、材長の 2.5% 程度の弾性限変形と 29000N 程度の降伏耐力を実現することを FEM 解析から確認した。しかし、複雑な形状であり、高い製作コストを要すると思われる。一方、著者らの発想と FEM 解析とによる試行錯誤的過程を経て、大変形弾性部材の形態を多数試作した。この研究成果の一例を図 3 に示す。この形状は、材長の 3% 程度の弾性限変形と 7000N 程度の降伏耐力を実現することを FEM 解析と引張実験から確認した。



図 2 最適化手法による大変形弾性部材の数値生成例

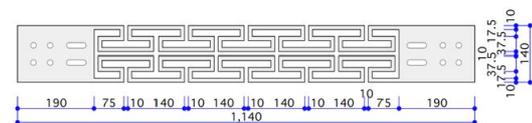


図 3 著者らの発想と試行錯誤による大変形弾性部材の試作例

### (2) 大変形弾性部材を内蔵した摩擦制振ブレースの設計・製作・性能実験 (平成 28 年度)

大変形弾性部材を内蔵した摩擦制振ブレースの構成は、図 4 のように、長孔部を有する大変形弾性部材と座屈拘束溝型鋼からなる。これらは、ボルト張力の安定化を意図して、溶融亜鉛メッキ処理としている。両端の長孔部の高力ボルト締め付け力やクリアランス量を調整することにより、図 5 に示す 3 種類の復元力特性を有する高性能摩擦制震

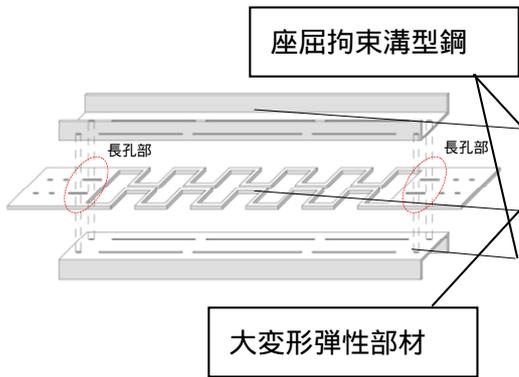


図 4 大変形弾性部材を内蔵した摩擦制震ブレースの構成

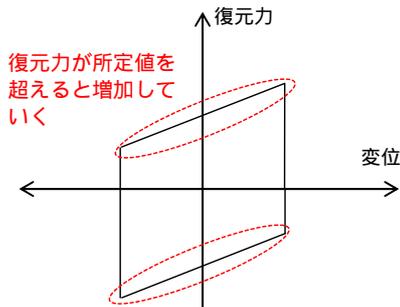


図 5(A) 制震ブレース復元力特性 (タイプ I: 二次剛性を有する摩擦ダンパー)

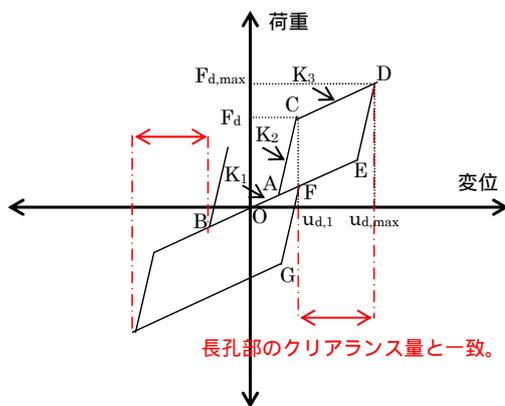


図 5(B) 制震ブレース復元力特性 (タイプ II: リバイバルスリップ特性<sup>注1)</sup>を有する摩擦ダンパー)

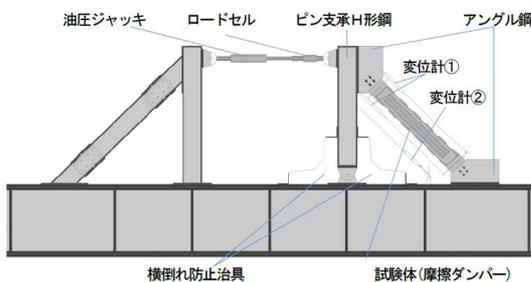


図 6 実験フレームと制震ブレース試験体

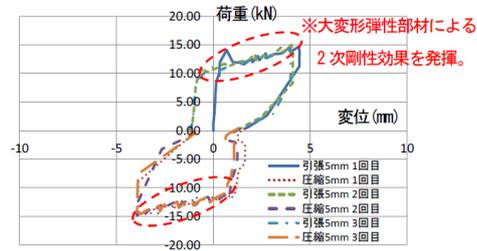


図 15 荷重-変位関係(試験体 C)

図 7 実験で得られた復元力特性の一例 (タイプ II)

ダンパーが実現できることを実験 (図 6、図 7) により確認した。

### (3) 大変形弾性部材を内蔵した摩擦制震ブレースを取り付けた建築骨組の地震応答解析 (平成 29 年度)

大変形弾性部材を内蔵した摩擦制震ブレースを取り付けた種々の建築骨組の地震応答解析を行った。図 8(A)は、後述の比較のため、制震ブレースを有しない門形鉄骨骨組の地震応答解析による層せん断力 - 層間変位関係を示している。図 8(B)は、大変形弾性部材単体を方杖ブレースとして門形鉄骨骨組に取り付けた場合の結果である。図 8(C)従来摩擦ダンパーをお方杖ブレースとして門形鉄骨骨組に取り付けた場合の結果である。図 8(D)は、タイプ I: 二次剛性を有する摩擦ダンパーを方杖ブレースとして門形鉄骨骨組に取り付けた場合の結果である。図 8(E)は、タイプ II: リバイバルスリップ特性<sup>注1)</sup>を有する摩擦ダンパーを方杖ブレースとして門形鉄骨骨組に取り付けた場合の結果である。いずれも、地震動は、熊本地震における益城町の記録である。これらの結果より、大変形弾性部材単体を方杖ブレースとして取り付けた場合には、最大変形の低減効果が、若干ある一方で、残留変形(振動終了時変形)は、大幅に低減されている。また、従来摩擦ダンパーの骨組は、最大変形の大幅な低減効果がある一方で、残留変形(振動終了時変形)は、ブレースなしの骨組みに比べて、悪化している。また、タイプ I: 二次剛性を有する摩擦ダンパーやタイプ II: リバイバルスリップ特性<sup>注1)</sup>を有する摩擦ダンパーの骨組は、最大変形の大幅な低減だけでなく、残留変形(振動終了時変形)の低減効果も見られる。

#### 注 1) リバイバルスリップ特性

大変形弾性部材の弾性剛性とボルトの滑動により、スリップ現象と剛性の復帰の特性を併せ持つことから、リバイバルスリップ特性と著者らが名付けた。

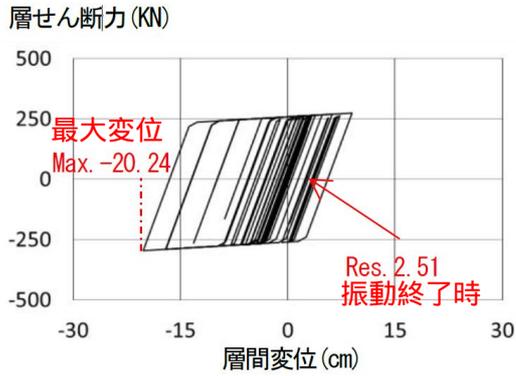


図 8(A) ブレースなし門形鉄骨骨組の層せん断力 層間変位関係

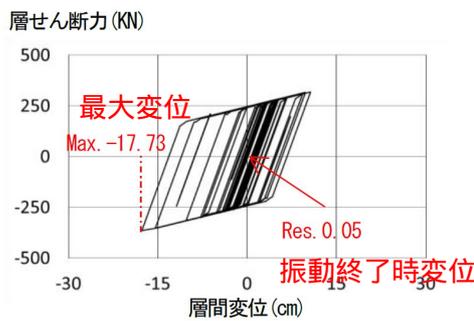


図 8(B) 大変形弾性部材単体を方杖ブレースとして取り付けた場合

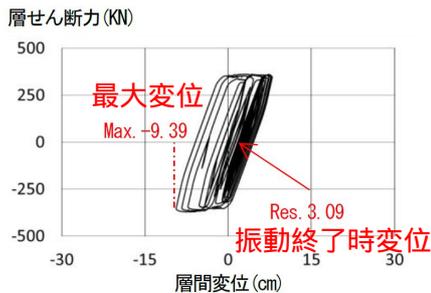


図 8(C) 従来摩擦ダンパーを方杖ブレースとして取り付けた場合

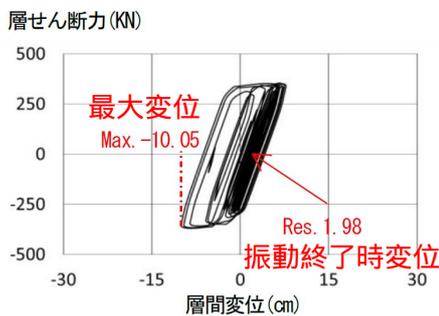


図 8(D) タイプ I: 二次剛性を有する摩擦ダンパーを方杖ブレースとして取り付けた場合

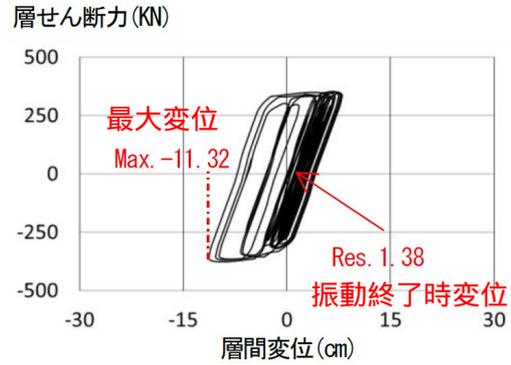


図 8(E) タイプ II: リバイバルスリップ特性<sup>注</sup> 1) を有する摩擦ダンパーを方杖ブレースとして取り付けた場合

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

[A1] Kiichiro Sawada : Seismic response analyses of RC portal frames with large deformable elastic braces, Int. J. of Comp. Meth. and Exp. Measurements, Volume 6, Issue 5, pp.880 - 886, 2017.11

[A2] 中村建人 西田銀次 澤田樹一郎 黒川善幸 平井敬二: 大変形弾性部材を組み込んだ高力ボルト摩擦接合ダンパーの基礎的研究、鋼構造年次論文報告集 第 25 巻、pp.925-931、2017.11

[A3] 西田銀次 中村建人 黒川善幸 澤田樹一郎: 大変形弾性部材の引張型方杖ブレースに関する研究、鋼構造年次論文報告集 第 25 巻、pp.857-862、2017.11

[A4] 西田銀次、中村建人、澤田樹一郎: 大変形弾性部材の性能実験及び解析的研究、鋼構造年次論文報告集、第 24 巻、pp.470-475、2016

[A5] 中村建人、西田銀次、澤田樹一郎: 大変形弾性部材を有する門型鋼構造骨組の地震応答性状、鋼構造年次論文報告集、第 24 巻、pp.476-482、2016

〔学会発表〕(計 4 件)

[B1] 中村建人、西田銀次、澤田樹一郎、黒川善幸、平井敬二、中野翔平: 大変形弾性部材を組み込んだ高力ボルト摩擦接合ダンパーの基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 1305-1306、2017年8月

[B2] 西田銀次、中村健人、中野翔平、澤田樹一郎、黒川善幸: 大変形弾性部材の引張型方杖ブレースにおける漸増載荷実験に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 1217-1218、2017年8月

[B3] 中村建人、西田銀次、澤田樹一郎: 大変形弾性部材に関する基礎的研究 その 2 大変形弾性部材を有する門型鋼構造骨組の応答性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、823-824、2016.8

[B4] 西田銀次、中村健人、澤田樹一郎: 大変形弾性部材の実験及び解析的研究 その 1 大変形弾性部材の性能実験と有限要素解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、821-822、2016.8

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：耐震性向上用弾性部材、耐震性向上用構造体、及び耐震性向上用弾性部材の製造方法

発明者：澤田 樹一郎、鶴田 将悟、江藤 弘樹、中村 建人、西田 銀次、山下 翼、後藤 拓史

権利者：国立大学法人 鹿児島大学

種類：

番号：特願 2015-218453 (出願番号)

出願年月日：平成 27 年 11 月 6 日(2015.11.6)

国内外の別：国内

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

澤田 樹一郎(Sawada, Kiichiro)

島根大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号：90284166