

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2018～2021  
課題番号：18H01585  
研究課題名（和文）多次元・極大入力に対する制振ダンパーの性能確保と制振鋼構造の倒壊防止設計法の確立  
  
研究課題名（英文）Proposal of design methodology to prevent collapse of steel moment-resisting frames with seismic devices with ensuring seismic performance of the devices under bidirectional quite huge earthquakes  
  
研究代表者  
聲高 裕治（KOETAKA, Yuji）  
  
京都大学・工学研究科・教授  
  
研究者番号：80343234  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、制振ダンパーの一種である座屈拘束ブレースを対象として、近年発生が危惧されている超巨大地震が発生したときの終局挙動を、新たに考案した水平2方向載荷装置を用いた繰返し載荷実験によって明らかにした。また、座屈拘束ブレース付鋼構造骨組の時刻歴応答解析によって、座屈拘束ブレースの終局挙動を含む種々の耐力劣化要因が、骨組が倒壊に至るまでの性能に与える影響を確認した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに検討が不十分であった、水平2方向の大変形を受ける座屈拘束ブレースの終局挙動を明らかにしたこと、ならびにそれを適用した鋼構造骨組の倒壊挙動を確認したことは学術的に大きなブレイクスルーポイントであると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We focused on a buckling-restrained brace (BRB) that is a kind of seismic device and verified the ultimate behavior under quite huge ground motion worried about the occurrence in the recent decade by cyclic loading test using innovative bidirectional loading equipment. Further, effects of various triggers of strength deterioration of members, including the ultimate behavior of BRB, in steel moment-resisting frames with BRBs were clarified by time history analysis.

研究分野：工学・建築学

キーワード：制振構造 制振ダンパー 載荷実験 ストローク 入力方向

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

制振ダンパーは、地震によるエネルギーを吸収して建物の応答を低減することができるため、超高層だけでなく中層から低層の建物にも適用されている。制振ダンパーは構成上、ストロークの制限を有するものや設置面と直交する向きの変形に追従しにくいものが存在し、変形性能が十分に発揮できない場合があると考えられる。

一方で、近年発生が危惧されている首都直下や上町断層帯地震などの超巨大地震では、従来の設計の想定を大きく超える変形が建物に生じる可能性が指摘されている。制振ダンパー付建物はダンパーを用いない純ラーメンの建物と比べてスレンダーな柱や梁が用いられているため、このような過大な入力に対してダンパーが性能を喪失すると、建物が倒壊するなど、極めて甚大な被害が生じる可能性が高い。

上記の背景に基づいて、超巨大地震をうける制振ダンパー付建物の倒壊までの挙動を把握し、そのような被害を防止するための対策を提案することは、建築・土木の構造分野における耐震工学・防災工学といった学術的観点から、非常に重要な課題と考えられる。

2. 研究の目的

上記の背景を鑑みて、本研究では、ストロークの制限と構面外への変形追従の両方が問題となる制振ダンパーとして「座屈拘束ブレース」を対象として採りあげ、以下の2項目を明らかにすることを目的とする。

- (1) 水平2方向の大変形を受ける座屈拘束ブレースの終局挙動
- (2) 超巨大地震を受ける座屈拘束ブレース付鋼構造骨組の倒壊挙動

将来的には、これらの知見を活かして、超巨大地震時に制振ダンパーが十分に性能を発揮するための条件の解明と制振ダンパー付建物の倒壊を防止・抑制する設計法の確立を目指す。

3. 研究の方法

- (1) 水平2方向の大変形を受ける座屈拘束ブレースの終局挙動

既往の座屈拘束ブレースの実験的研究では、構面外の層間変形角を0または0.01radの一定値としており、構面外の層間変形角の大小が構面外座屈の発生に与える影響については検討されていない。本研究では、構面内1方向または構面内と構面外の2方向に層間変形が漸増する場合を対象とし、座屈拘束ブレースの終局挙動を繰返し载荷実験によって確認する。

図1に試験体形状を示す。芯材(塑性化部・十字形接合部)と座屈拘束材はすべての試験体で同一としており、それ以外の部位を変更する。実験パラメータは、図1中に破線で示しているのみこみ部の長さ・接合部の構面外剛性・添板の強度・载荷方向とする。

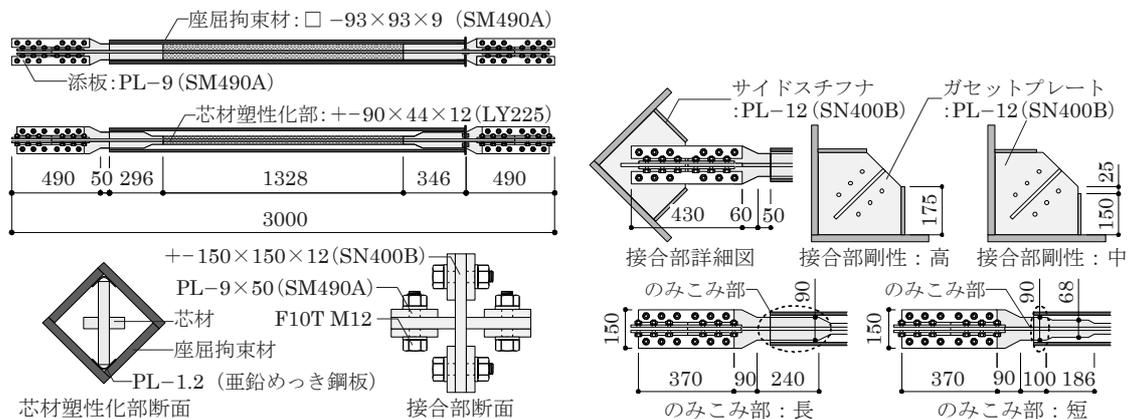


図1 試験体形状 (単位: mm)

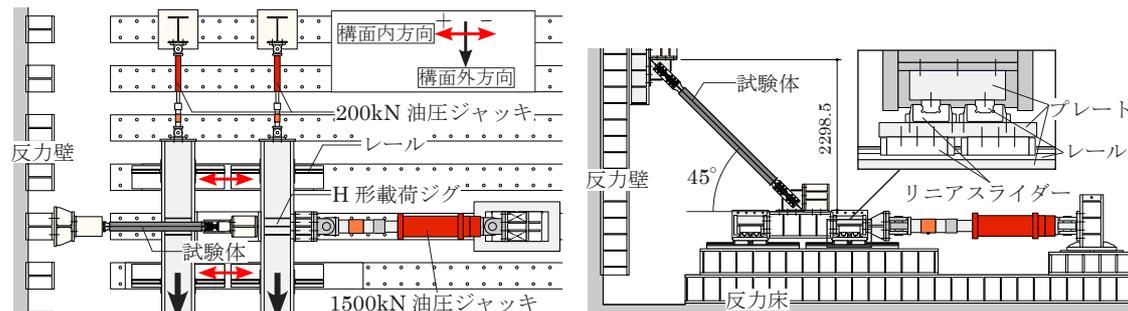


図2 载荷装置 (単位: mm)

載荷装置は図 2 に示すように、H 形載荷ジグの下に構面内方向リニアスライダーと構面外向リニアスライダーを各 4 組設置したものである。反力壁と載荷装置に試験体を水平面に対して  $45^\circ$  の角度で設置した上で、H 形載荷ジグに接続した油圧ジャッキにより構面内と構面外に載荷する。構面外の層間変形角を、構面内の目標層間変形角の  $1/2$  になるように一方向に漸増させた上で、ブレースが圧縮を受ける側を正として構面内の層間変形角を正負交替に漸増させる。

## (2) 超巨大地震を受ける座屈拘束ブレース付鋼構造骨組の倒壊挙動

座屈拘束ブレース付建物の倒壊挙動に、座屈拘束ブレースの大変形時の挙動がどのような影響を与えるかを確認するため、20 層魚骨形骨組を対象として倒壊解析を行う。各層の復元力特性は図 3 のように与える。本研究では座屈拘束ブレースの大変形時挙動として、構面外座屈に加えて座屈拘束ブレースが想定以上の圧縮変形を受けた際に起こる座屈拘束材と接合部の衝突（ストロークオーバー）を取扱う。解析パラメータは、ブレースの水平耐力分担率、構面外座屈が起こる層間変形角、ブレースの耐力劣化の程度、柱と梁の幅厚比、ストロークオーバーの発生の有無である。ストロークオーバーの有無による座屈拘束ブレースの圧縮側の復元力特性の差異は図 4 に示すように表される。

解析には  $PI$  効果を含む幾何学的非線形性を考慮している。解析モデルとして、座屈拘束ブレースを除く骨組部分（以下、フレーム）を簡易に再現した図 5(a)の左側の魚骨形骨組モデルと、実験で確認された座屈拘束ブレースの終局挙動を再現した図 5(a)の右側の座屈拘束ブレースモデルを並列したものを用いる。座屈拘束ブレース 1 本分のモデルは、図 5(b)に示すように、ブレースの引張・圧縮による塑性化後の挙動を考慮するための一般化硬化塑性ヒンジと、弾性剛性や構面外座屈を考慮する弾性棒を直列結合し、さらにストロークオーバーによる急激な圧縮軸力の増大を考慮するストローク棒を並列結合したものである。

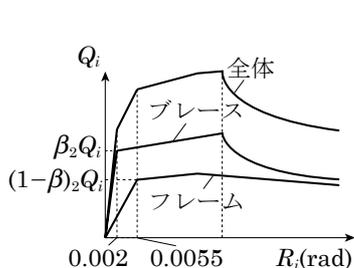


図 3 層の復元力特性

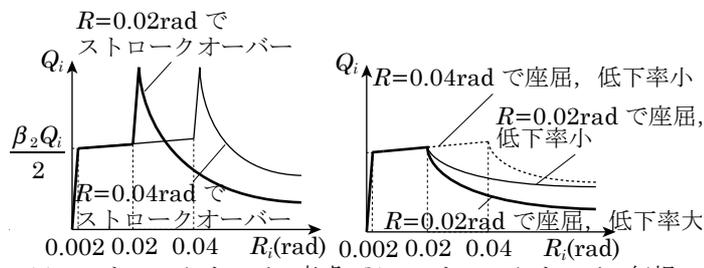


図 4 座屈拘束ブレースの圧縮側復元力特性

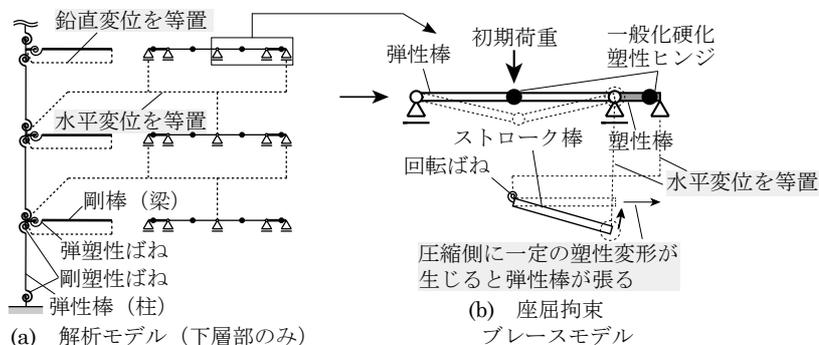


図 5 解析モデル

## 4. 研究成果

### (1) 水平 2 方向の大変形を受ける座屈拘束ブレースの終局挙動

実験の結果、図 6 に示すように、芯材の破断・拘束材の局部変形・構面外座屈のいずれかで終局状態を迎えた。図 7 に示す構面内の水平力-層間変形角関係より、芯材が破断した試験体では負荷荷時に急激に水平力が低下し、構面外座屈が生じた試験体では正載荷時に緩やかに水平力が低下した。終局状態や最大耐力を迎える時期に及ぼす実験パラメータの影響は、以下にまとめることとおりである。

接合部剛性が低い試験体では、層間変形角が  $0.02\text{rad}$  と最も早期に構面外座屈が生じた。添板の強度が中程度の試験体では、上下の添板とのみこみ部の折れ曲がりによる構面外座屈が、層間変形角  $0.04\text{rad}$  の振幅で生じた。接合部剛性と添板強度をいずれも高めた試験体では、芯材の破断や拘束材の局部変形により終局状態を迎え、いずれも  $0.04\sim 0.05\text{rad}$  まで性能を維持することができた。

これらのうち、添板の塑性化に伴う折れ曲がりについては、既往の研究で確認されていない挙動であり、これを防止するため、本研究では添板に生じる曲げモーメントの算定法を構築し、その妥当性を実験結果との比較によって確認した。

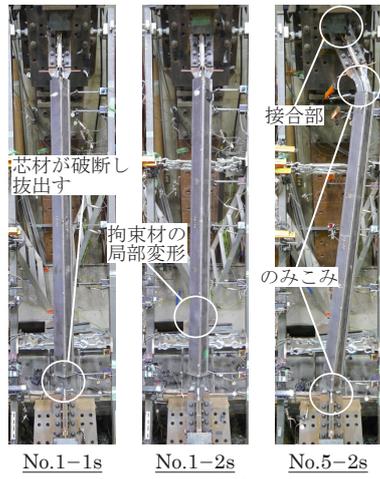


図6 終局状態

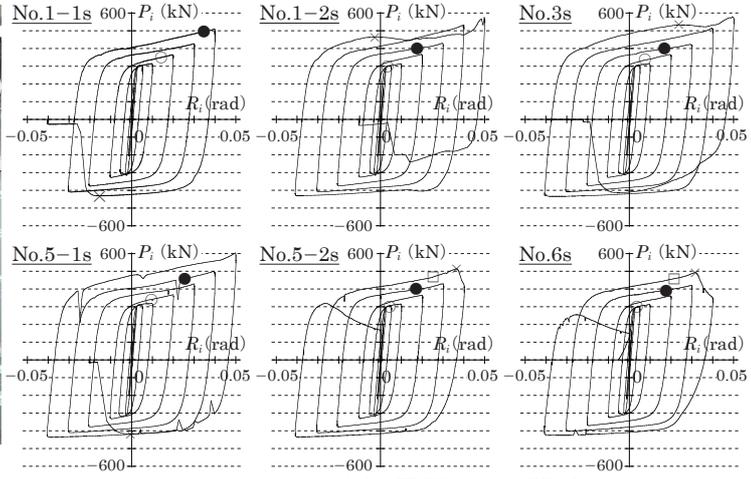


図7 構面内の水平力-層間変形角関係

(2) 超巨大地震を受ける座屈拘束ブレース付鋼構造骨組の倒壊挙動

図8に、倒壊に至るまでの部材の塑性化状態と柱・梁の曲げモーメント分布の推移を例示する。この骨組では、まず、第2層のブレースが座屈して耐力劣化が生じた直後に、梁の耐力劣化が発生し、その後、第2層を起点として梁の耐力劣化やブレースの座屈が下層に広がっている。低層部の柱の反曲点は第2層に近づき、最終的に第4層柱頭に塑性ヒンジが形成されて第1~4層で部分層崩壊機構が形成され、長柱化が生じている。

座屈拘束ブレースが過大な圧縮変形を受けてストロークが限界を迎えた場合の影響を確認するため、図9に倒壊までに要したエネルギーと部分層崩壊が生じた層数を示す。ストロークの限界を考慮する方が倒壊までのエネルギーは若干増加するが、部分層崩壊が生じた層数はほとんど変化しない。 $\beta=0$ の純鉄骨と比べて座屈拘束ブレースを用いた骨組では、倒壊までのエネルギーが若干低下し、部分層崩壊が生じた層数は $\beta$ の増加に応じて徐々に少なくなる。

その他の解析パラメータごとの比較より、骨組の倒壊挙動に最も大きな影響を与えるパラメータは柱と梁の幅厚比であり、次に影響を与えるのは構面外座屈が生じる層間変形角であることが明らかになった。したがって、座屈拘束ブレース付骨組であっても、設計時には局部座屈による耐力劣化が生じにくくなるように柱・梁の幅厚比を小さく設定し、ストロークオーバーによって構面外座屈が早くに生じないように座屈拘束ブレースの縮み代を適切に設定することが重要になると考えられる。

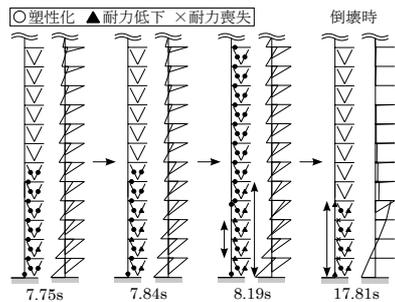


図8 塑性化状態と曲げモーメント分布

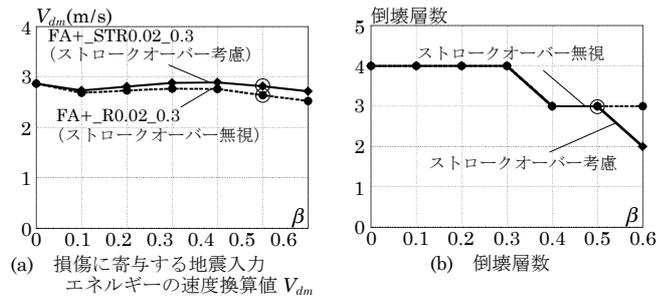


図9 ストロークオーバーによる影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 西山恒平, 髙裕治, 戸張涼太, 吉永光寿, 木下智裕	4. 巻 26
2. 論文標題 十字形断面を有する座屈拘束ブレース接合部の構面外曲げ剛性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 212-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 福原健人, 髙裕治	4. 巻 29
2. 論文標題 座屈拘束ブレースの構面外座屈を伴う鋼構造平面骨組の倒壊解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 271-279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西山恒平, 髙裕治, 戸張涼太, 吉永光寿, 木下智裕
2. 発表標題 座屈拘束ブレース柱梁接合部側接合部を対象とした構面外載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西山恒平, 髙裕治, 戸張涼太, 吉永光寿, 木下智裕
2. 発表標題 座屈拘束ブレース柱梁接合部側接合部を対象とした構面外載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西山恒平, 髙裕治, 戸張涼太, 吉永光寿, 木下智裕
2. 発表標題 柱・梁の変形を考慮した座屈拘束ブレース柱梁接合部側接合部の構面外剛性算定法
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西山恒平, 髙裕治, 戸張涼太, 吉永光寿, 木下智裕
2. 発表標題 柱・梁の変形を考慮した座屈拘束ブレース柱梁接合部側接合部の構面外剛性算定法, その1 構面外剛性算定法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉永光寿, 西山恒平, 髙裕治, 戸張涼太, 木下智裕
2. 発表標題 柱・梁の変形を考慮した座屈拘束ブレース柱梁接合部側接合部の構面外剛性算定法, その2 実験・FEM 解析に基づく構面外剛性算定精度の確認
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村祐毅, 髙裕治, 戸張涼太, 吉永光寿, 木下智裕
2. 発表標題 座屈拘束ブレースの水平2方向大変形繰返し載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉永光寿, 田村祐毅, 髙裕治, 戸張涼太, 木下智裕
2. 発表標題 座屈拘束ブレースの水平2方向大変形繰返し載荷実験, その1 実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村祐毅, 髙裕治, 戸張涼太, 吉永光寿, 木下智裕
2. 発表標題 座屈拘束ブレースの水平2方向大変形繰返し載荷実験, その2 実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村祐毅, 髙裕治, 戸張涼太, 吉永光寿, 木下智裕
2. 発表標題 水平2方向入力を受ける座屈拘束ブレースの添板に作用する構面外曲げモーメント算定法
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉永光寿, 田村祐毅, 髙裕治, 戸張涼太, 木下智裕
2. 発表標題 水平2方向入力を受ける座屈拘束ブレースの添板に作用する構面外曲げモーメント算定法, その1 座屈拘束ブレース水平2方向繰返し載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村祐毅, 髙裕治, 戸張涼太, 吉永光寿, 木下智裕
2. 発表標題 水平2方向入力を受ける座屈拘束ブレースの添板に作用する構面外曲げモーメント算定法, その2 添板に作用する構面外曲げモーメント算定法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2022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	吉敷 祥一  (Kishiki Shoichi)  (00447525)	東京工業大学・科学技術創成研究院・教授    (12608)	

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
---------	---------