



# 機能維持性能に優れた座屈拘束ブレース付中高層建築物の研究 — 中間報告 —

小谷野 一尚\* 岩田 衛\*\* 荏本 孝久\*\*  
緑川 光正\*\*\* 坂田 弘安\*\*\*\*

## Mid-to-high-rise buildings with the Buckling-Restrained Braces with excellent functional maintenance performance

### - Interim report -

Kazuhisa KOYANO\* Mamoru IWATA\*\* Takahisa ENOMOTO\*\*  
Mitsumasa MIDORIKAWA\*\*\* Hiroyasu SAKATA\*\*\*\*

#### 1. 序

現在、建築基準法の耐震設計で建設された座屈拘束ブレースを有する中高層建築物は、最終的な破壊状態や座屈拘束ブレース<sup>(1)</sup>の地震エネルギー吸収性能を確認することなく造られている。しかしながら、近年、東海・東南海・南海などの海溝型地震や都市直下地震も想定される多種多様な地震に対して、超高層建築物と同様に最終崩壊までの真の限界性能を把握し、人命を守るという安全性だけでなく、地震が起きた後の生活も確保するという、機能維持性能（耐久性・継続使用性・財産保持性）を考慮することが必要となってきた。近年のわが国の大都市圏において、建築物の損傷を最小限に抑え、できる限り継続使用可能な状況に留めることは災害時の主要都市の危機管理、レジリエンス確保の上で必須事項となっている。

機能維持性能を考慮するためには、建築物を健康診断

するかのように逐次モニタリングを行い、地震後の状態を把握しておく必要がある。しかしながら、十分なモニタリングを構築するには手間・コストがかかり、ほぼ普及していない。普及を促すためには、経済的であることが必須であり、簡易なモニタリング技術が必要となる。損傷を座屈拘束ブレースに集約する損傷制御構造とし、座屈拘束ブレースに簡易センサーを取り付けることで、簡易なモニタリングが可能となる。

また、普及するためには設計方法も手間のかからないものにする必要がある。さらには、鋼構造だけでなく中高層住宅に多く使用される鉄筋コンクリート構造にも適用し、座屈拘束ブレース自体もさまざまな要求に応えられるように、より高性能化や低コスト化を進める必要がある。

本報では、機能維持性能に優れた座屈拘束ブレース付中高層建築物を実現する上で重要な、センサー付座屈拘束ブレースの開発、RC 構造への適用、座屈拘束ブレース付中高層建築物の設計法確立、座屈拘束ブレースの要素技術の開発、の4項目について途中ではあるがこれまでの成果を報告する。

\* 助手 建築学科

Research associate, Dept. of Architecture

\*\* 教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

\*\*\* 客員教授 工学研究科, 名誉教授 北海道大学

Guest Professor, Research Institute for Engineering

Professor Emeritus, Hokkaido University

\*\*\*\* 教授 東京工業大学

Professor, Tokyo Institute of Technology

## 2. センサー付座屈拘束ブレースの開発

### 2.1 簡易センサーの調査

建築物の損傷具合を逐次モニタリングするためには、地震計や変位計を設置し収録装置で管理する必要がある。しかし、このモニタリング方法ではかなりのコストがかかる。座屈拘束ブレースに損傷を集中させる損傷制御構造とすることで、座屈拘束ブレースの損傷具合だけを把握しておけば、建築物の状態も把握することができるようになる。座屈拘束ブレースの状態を把握するのに必要なパラメーターとしては、最大変位と累積変位である。収録装置等を介さずに、これらを計測できる簡易センサーを提案する。その結果、従来の変位計のようなアナログ案とビデオカメラ等を用いて計測するデジタル案を提案した(図1)。

### 2.2 簡易センサーの試作実験・選定

提案したセンサーについて、木材やゴム材等で作成し、振動台を用いて、測定性能について検証をした(図2)。デジタル案についてはある程度の精度で計測ができていたが、振動後に目視で確認しなければならず、また外的な要因(照明や粉塵等)や耐久性を考えると現実的ではない。アナログ案については累積変位についてうまく計測できていなかったが、耐久性等を考えると現実的である。そこで累積変位および最大変位の両方が計測できる簡易型記憶センサー<sup>(2)</sup>を新たに選定した(図3)。

### 2.3 簡易センサーの性能確認実験

選定した簡易型累積変位計と最大変位計を組み合わせた簡易型記憶センサー(図3)について、実際に座屈拘束ブレース試験体に取付け、高精度のレーザー変位計と比較し、性能確認実験(図4)を行った。実験は高性能タイプであるH試験体と基本タイプであるB試験体の各1体、計2体を行った。

簡易型記憶センサーとレーザー変位計の最大値・最小値の比較では10%前後の誤差が生じている(表1)。また、累積値の比較ではB試験体の累積正値が滑って戻っておりうまく計測できていない、他についても25%前後の誤差が生じている(図5)。アナログ装置であるため、計測用の棒およびメモリや歯車とパネの接触が不十分であったことが考えられ、簡易とはいえ改良の余地がみられる。

表1 最大値・最小値比較

		レーザー (mm)	簡易センサー (mm)	誤差割合 (%)
H試験体	最大値	29.83	32.63	9.4%
	最小値	-29.80	-32.33	8.5%
B試験体	最大値	25.45	28.20	10.8%
	最小値	-25.45	-27.60	8.4%

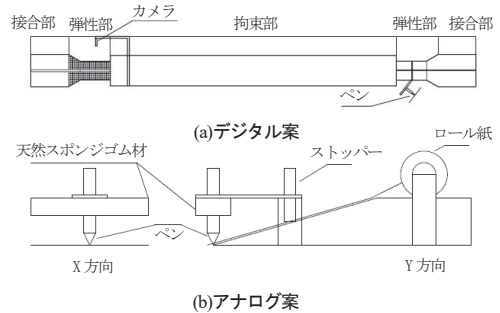


図1 簡易センサーの試作提案

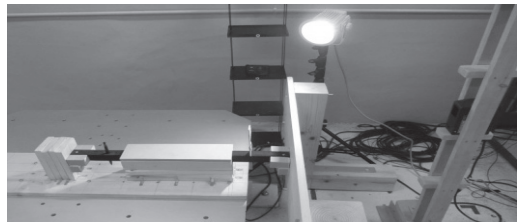


図2 試作実験(デジタル案)

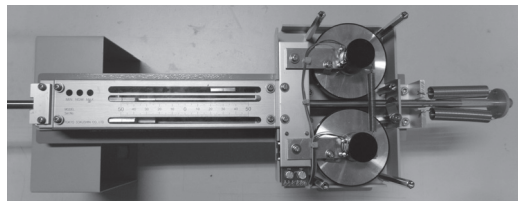


図3 簡易型記憶センサー

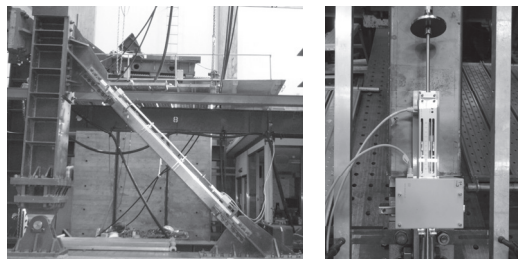


図4 実験時センサー設置状況

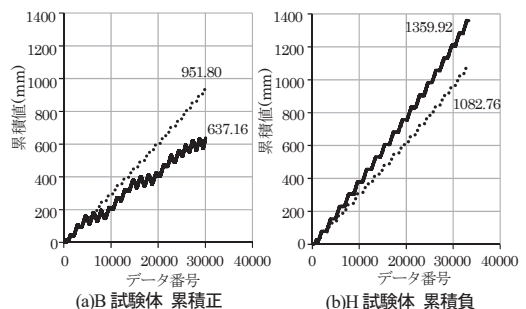


図5 累積値比較

## 2.4 簡易モニタリングデータを含めた品質管理

機能維持性能を確保するためには、座屈拘束ブレース自体の品質を確保することが前提条件となる。簡易センサーによる損傷具合情報だけでなく、設計計画から材料調達、製造過程、施工情報、運用履歴、廃棄にいたるまでのライフサイクル情報をトレーサビリティできることが望ましい。そこで、IC タグやデータベースによる管理を提案し、特に品質に関わる製造時の管理項目を抽出した。他の段階での管理項目や許容数値等を定め、IC タグに登録し、座屈拘束ブレースに取付けることにより、トレーサビリティできるようになる。

## 3. RC 構造への適用

### 3.1 座屈拘束ブレース付鉄骨柱の提案

中高層住宅への普及を考え、基本的には鋼構造に対応する技術である座屈拘束ブレースを RC 構造へと適用する構法を提案する。新築と耐震補強ともに対象とし、損傷時には交換が可能なものと考え、RC 主架構と鉄骨柱は接着しないこととする。また、鉄骨柱は、施工性を考慮し L 字型に 4 分割とし、力の伝達を行う 4 隅のベッドプレートとはメタルタッチ接合で、隙間にくさびを打ち込みプレストレスにより定着させる。

### 3.2 製作・施工実験

提案した座屈拘束ブレース付鉄骨柱について、実際に 1/3 モデルで施工が可能なかを確認した(図 6)。くさびの打ち込みに少々改良の余地があるが、問題なく施工す

ることが可能であった。

### 3.3 座屈拘束ブレース付鉄骨柱による構法の構造性能確認実験

RC 構造への適用を考え、提案、製作・施工実験を行った試験体について構造性能確認実験を行った(図 7)。試験体は RC フレームの強度  $18\text{N/mm}^2$ (低強度タイプ)、 $48\text{N/mm}^2$ (高強度タイプ)の 2 体とする。荷重と層間変位関係を図 8 に示す。

高強度タイプは、層間変形角  $R=1/50\text{rad}$  まで大きな耐力低下は見られず、安定した復元力特性を有している。 $R=1/25\text{rad}$  を 1 サイクル行っても耐力低下が見られなかったため引張単調載荷としたが、その後、耐力が 80%以下に低下したため  $R=1/20\text{rad}$  程度で載荷を終了した。座屈拘束ブレースは、 $R=1/100\text{rad}$  程度で降伏した。

低強度タイプは、引張側  $R=1/50\text{rad}$  の 2 回目から耐力低下が見られ、 $R=1/25\text{rad}$  では耐力が大きく低下した。圧縮側  $R=1/25\text{rad}$  で耐力が 80%以下に低下したため引張単調載荷は行わず、 $R=1/25\text{rad}$  で載荷を終了した。座屈拘束ブレースは、 $R=1/125\text{rad}$  程度で降伏した。実験結果から、楔の適用により RC フレームと鉄骨柱を密着させることでアンカーレス構法が成り立つがわかった。また、鉄骨柱が RC フレームと同様の挙動を示すためには、今回実験の鉄骨柱剛性を下げるとより効果的である。

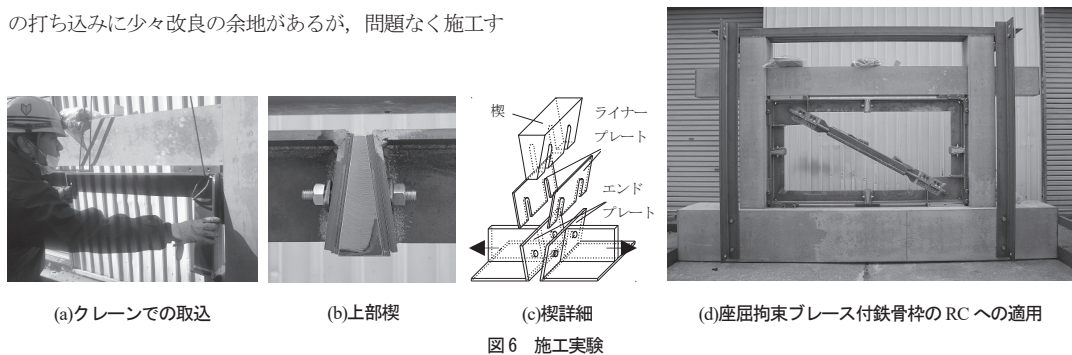


図 6 施工実験

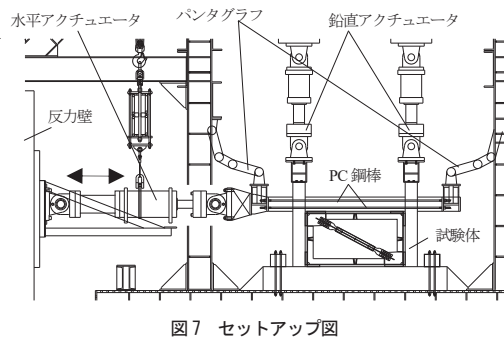


図 7 セットアップ図

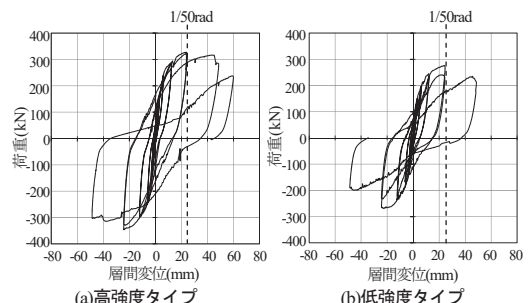


図 8 荷重-層間変位関係

#### 4. 座屈拘束ブレース付中高層建築物の設計法確立

##### 4.1 設計法確認

座屈拘束ブレース付中層建築物である神奈川大学3号館が建築基準法でどのように設計されているのか、構造計算書により確認をした。座屈拘束ブレースは、制振ブレースではなく耐震ブレースとして取り扱われ、「保有水平耐力」を計算するルート3によるものであった。本来、制振ブレースとして損傷制御構造であることを計算書上で示すことが可能であるが、制振ブレースとして扱う場合には、高度な検証法である「時刻歴応答解析」により国土交通省大臣認定を取るか、もしくは馴染みの少ない特別な検証法である「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法」をする必要がある。中層建築物においてはコストや時間を考え、耐震ブレースとすることが多い。

##### 4.2 静的増分・時刻歴応答解析

座屈拘束ブレース付中層建築物である神奈川大学3号館が実際はどれくらいの性能なのかを確認した。構造解析ソフトを用い、構造計算書を参考に立体解析モデルを作成し、静的増分解析および時刻歴応答解析を行った(図9)。

静的増分解析では、保有水平耐力(層間変形角 1/100)時および座屈拘束ブレース共用(層間変形角 1/50)時の XY 方向の主架構および座屈拘束ブレースの部材状況を求め、主架構よりも座屈拘束ブレースが先行降伏することが分かった(表2)。

時刻歴応答解析では、レベル 1(25cm/s)、レベル 2(50cm/s)に基準化した日本建築センター模擬波(BCJ-L2)で行い、XY 方向の主架構および座屈拘束ブレースの部材状況を求めた。それにより、主架構よりも座屈拘束ブレースが先行降伏すること、主架構には損傷がないことが分かった(表3)。

##### 4.3 エネルギー法に向けた時刻歴応答解析による分析

立体モデルを作成した座屈拘束ブレース付中層建築物である神奈川大学3号館を使用し、東北地方太平洋沖地震や南海トラフ巨大地震(予測)の神奈川大学周辺データを入力し、エネルギー法で使用する累積塑性変形倍率 $\eta$ や最大塑性率について分析を行った(表4)。また、座屈拘束ブレースの断面剛性および降伏耐力を変化させた場合の $\eta$ や最大塑性率についても分析を行った。

##### 4.4 座屈拘束ブレース付建築物の累積塑性歪エネルギー率 $\omega$ と疲労性能の性能評価

これまで座屈拘束ブレース単体での性能評価は多く行ってきたが、建築物に組み込まれた場合の性能評価は行われてきていない。座屈拘束ブレース付建築物の解析モデルを使用し、 $\eta$ と同概念である累積塑性歪エネルギー

率 $\omega$ と疲労性能について性能評価を行った。

#### 5. 座屈拘束ブレースの要素技術の開発

##### 5.1 高サイクル疲労実験<sup>③</sup>

座屈拘束ブレースの疲労性能の研究は、大中小地震を想定した低サイクル領域では行われてきているが、頻度の高い風や小地震を想定した高サイクル領域では行われていない。そこで、塑性化部に溶接部がない高性能タイプと溶接部がある基本タイプについて、塑性域内での高サイクル領域の疲労性能について確認をした。高性能タイプ(Hシリーズ)の試験体は軸歪1.5 $\epsilon_y$ に相当する歪振幅0.21%(H15E試験体)、軸歪1.1 $\epsilon_y$ に相当する歪振幅

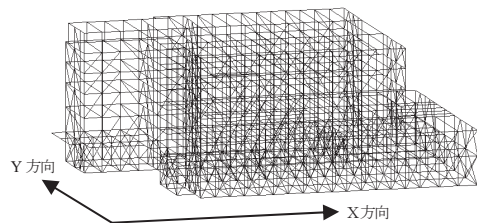


図9 立体解析モデル

表2 静的増分解析結果

		座屈拘束ブレース			梁		柱
		最大変形	最大塑性率	累積塑性歪エネルギー率	塑性率	累積塑性変形倍率	塑性率
保有水平耐力時	X	24.5	4.24	4.57	弾性域		
	Y	29.6	4.63	5.58	3.41	2.40	弾性域
座屈拘束ブレース共用時	X	48.6	8.39	9.64	5.93	4.93	1.28
	Y	57.4	8.98	11.4	10.9	9.94	2.00

表3 時刻歴応答解析結果(センター波)

		座屈拘束ブレース			梁		柱
		最大変形	最大塑性率	累積塑性歪エネルギー率	塑性率	累積塑性変形倍率	塑性率
レベル1	X	弾性域					
	Y						
レベル2	X	6.21	1.01	0.62	弾性域		
	Y						

表4 時刻歴応答解析結果(東北、南海)

		東北			南海		
		×1	×2	×3	×1	×2	×3
BRB	X	最大塑性率	-2.38	-3.81	弾性域		
		変形(mm)	-5.95	-9.76	弾性域		
		累積塑性変形倍率	50.2	191	弾性域		
	Y	最大塑性率	-1.47	-2.45	弾性域		
		変形(mm)	-3.90	-6.49	弾性域		
		累積塑性変形倍率	5.50	78.0	弾性域		
梁	X	最大塑性率	2.22		弾性域		
		変形(rad)	0.001		弾性域		
		累積塑性変形倍率	1.22		弾性域		
	Y	最大塑性率	弾性域		弾性域		
		変形(rad)	弾性域		弾性域		
		累積塑性変形倍率	弾性域		弾性域		



0.15%(H11E 試験体)で载荷する。基本タイプ (B シリーズ) では軸歪 1.1  $\epsilon$  y に相当する歪振幅 0.15%(B11E 試験体)で载荷する。

塑性域内での軸歪  $\epsilon$  と耐用回数の関係は既往の低サイクル領域から高サイクル領域まで直線関係になること、溶接部の有無によって軸歪  $\epsilon$  が小さくなるほど耐用回数の差が大きくなることが分かった(図 10)。

## 5.2 モルタル強度比較実験<sup>(4)</sup>

鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースは、モルタルを使用した拘束材によって座屈を防止している。モルタル強度の違いによって、性能に影響を及ぼすのかを確認した。モルタルは、既往の研究で用いられてきた標準モルタルおよび高強度モルタル、低強度モルタルの 3 種類について実験を行った。高強度モルタルでは強軸方向に変形し、比較的安定した性能を発揮するが、低強度モルタルでは早期に弱軸方向に変形をし、性能も極端に低くなる(表 5, 図 11)。

## 5.3 強軸方向変形実験<sup>(5)</sup>

強軸方向への変形が進んだ座屈拘束ブレースは、弱軸方向に局部変形するよりもエネルギー吸収性能が高いという結果が得られている。しかし、強軸方向への変形は架構全体に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、強軸方向のクリアランス(丸鋼の有無)や拘束材強度を変化させて性能を確認した。拘束材の強度を上げることでエネルギー吸収性能が高くなること、強軸方向への変形を防止する丸鋼有りよりも、防止しない丸鋼無しの方がエネルギー吸収性能は高くなるが、圧縮時に耐力低下を起こすことが分かった(図 12)。

## 5.4 高軸歪領域での疲労実験

座屈拘束ブレースの疲労性能について、既往の研究<sup>(6)</sup>において歪振幅 4.0%という高軸歪領域でも十分な疲労性能を有することがわかっている。さらに上回る高軸歪領域での疲労性能を確認した。試験体は高性能タイプ (H シリーズ) を 2 体 (歪振幅 4.5% : H45, 歪振幅 5.5% : H55), 基本タイプ (B シリーズ) を 2 体 (歪振幅 3.0% : B30, 歪振幅 4.0% : B40), の計 4 体とし、一定軸歪繰返し载荷としている。B30 試験体は軸歪 3.0%11 回目, B40 試験体は軸歪 4.0%6 回目, H45 試験体は軸歪 4.5%4 回目に引張破断した。H55 試験体は軸歪 5.5%3 回目圧縮時に局部変形した。繰返し回数の直前に耐用回数とし、軸歪  $\epsilon$  と耐用回数の関係を図 10 に示す。両対数軸上で両シリーズともに線形関係となっており、本座屈拘束ブレースの塑性域での疲労性能を推定できる。

## 5.4 塑性化部長さが大きい座屈拘束ブレースの実験

通常 50%の芯材塑性化部長さ比 (塑性化部長さ  $L_p$ /芯

材長さ  $L$ ) を 75%まで大きくし、細長比  $\lambda$  ( $L_p$ /断面二次半径  $i$ ) を 800 にした試験体において、既往の研究<sup>(7,8)</sup>よりもリブ貫入長さ比 (リブ貫入長さ  $L_i$ / $L_p$ ) を 6.5%, 拘

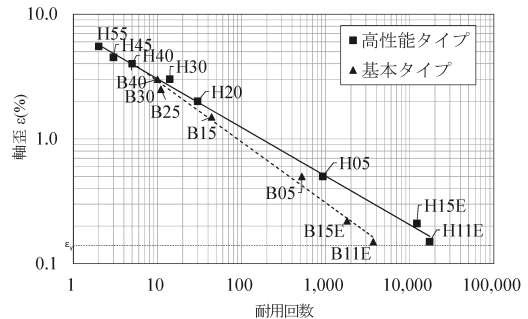


図 10 軸歪  $\epsilon$  - 耐用回数関係

表 5 実験結果および最終状態

試験体	実験経過	最終状態
高強度	3.0%至3回目-圧縮	強軸方向変形
標準	3.0%至4回目-圧縮	弱軸方向局部変形+強軸方向変形
低強度	2.0%至1回目-圧縮	弱軸方向局部変形

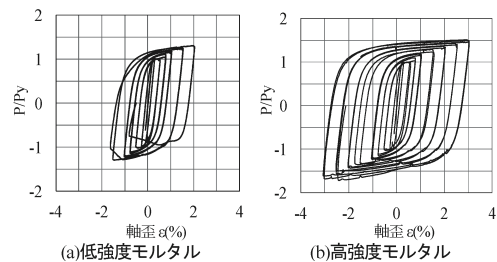


図 11 P/Py-軸歪  $\epsilon$  関係

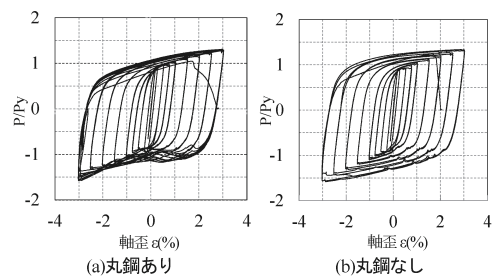


図 12 P/Py-軸歪  $\epsilon$  関係

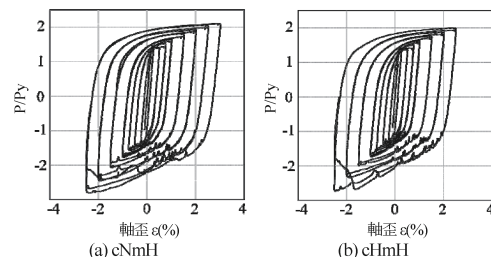


図 13 P/Py-軸歪  $\epsilon$  関係

束指標  $PE/Py$  を 6 に数値を上げ、溝形鋼の鋼種、モルタル強度を変化させた試験体を製作し、性能評価実験を行った。試験体は 4 体とし、試験体 cNmN は溝形鋼の鋼種を SS400、モルタル強度を普通強度。試験体 cHmN は溝形鋼の鋼種を WEL-TEN590RE、モルタル強度を普通強度。試験体 cNmH は溝形鋼の鋼種を SS400、モルタル強度を高強度。試験体 cHmH は溝形鋼の鋼種を WEL-TEN590RE、モルタル強度を高強度とする。

全ての試験体において下端部で局部変形をした。図 13 に復元力特性を示す。cHmN, cNmH, cHmH において、圧縮側載荷での耐力低下が確認された。塑性化部長さ比、細長比  $\lambda$  が大きいことにより、端部リブ付近に局部変形が集中した。よって、リブ貫入長さ比を大きくし、塑性化部長さ比、細長比の値を下げる必要がある。

## 6. 結び

機能維持性能に優れた座屈拘束ブレース付中高層建築物を実現する上で重要な 4 つの項目について、これまでの成果を報告した。さらに研究を進めていく。

## 参考文献

- (1) 飯塚亮太, 小谷野一尚, 緑川光正, 岩田衛, “累積塑性歪エネルギー率の大きな座屈拘束ブレースの研究”, 日本建築学会構造系論文集, 第 701 号, pp.1015-1023, 2014 年 7 月
- (2) 岡田敬一, 白石理人, 片岡俊一, “変位記憶型センサによる構造モニタリングシステムの開発と実建物への適用と検証”, 日本建築学会技術報告集, 第 44 号, pp.61-66, 2014 年 2 月
- (3) 小谷野一尚, 小出秀一, 中込忠男, 緑川光正, 岩田衛, “座屈拘束ブレースの小塑性歪振幅における疲労性能の研究”, 日本建築学会技術報告集, 第 22 巻, 第 50 号, pp.115-119, 2016 年 2 月
- (4) 山崎翔, 緑川光正, 岩田衛, 岡崎太一郎, 麻里哲広, “座屈拘束ブレースの力学性能に及ぼすモルタル強度の影響”, 鋼構造年次論文報告集, 第 23 巻, pp.671-675, 2015 年 11 月.
- (5) 菱田俊介, 緑川光正, 岩田衛, 岡崎太一郎, 麻里哲広, “芯材の曲げ座屈変形が座屈拘束ブレースの力学性能に及ぼす影響”, 鋼構造年次論文報告集, 第 23 巻, pp.705-712, 2015 年 11 月.
- (6) 小谷野一尚, 宮川和明, 小出秀一, 喜田村亘, 岩田衛, “疲労性能の高い座屈拘束ブレースの研究”, 日本建築学会技術報告集, 第 21 巻, 第 47 号, pp.137-140, 2015 年 2 月.
- (7) 緑川光正, 若山拓也, 麻里哲広, 岩田衛, “鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 - 摩擦力分布を考慮した圧縮引張耐力比の算定とその評価”, 構造工学論文集, Vol.60B, pp.307-315, 2014 年 3 月.
- (8) 菱田俊介, 大浦匠, 緑川光正, 岩田衛, 岡崎太一郎, 麻里哲広, “鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 - 鋼製ずれ止め位置が力学性能に及ぼす影響及び座屈変形の評価”, 構造工学論文集, Vol.61B, pp.141-149, 2015 年 3 月.