

制振ブレースの損傷を考慮した 超高層鋼構造骨組の長時間時挙動解析

Dynamic Analysis of Super High-Rise Steel Building Frame Model
Considering Fatigue Fractures of Damping Braces under Long-Duration Earthquake Motion

武田拓¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Takumi Takeda and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: tkm0515hrkz@gmail.com)

2) 博 (工) 筑波大学教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this paper, behaviors of super high-rise steel building frame with damping braces under long-duration earthquake motion were simulated. The adaptively shifted integration (ASI)-Gauss code, which can stably simulate those phenomena with strong nonlinearities such as member fracture, was used in this analysis. The numerical result had shown the reduction of displacement and acceleration of the building owing to damping braces. However, it had also shown a transition of dynamic characteristics during long-duration earthquake motion, due to low-cycle fatigue fractures of damping braces located in lower floors.

Key Words : *Finite element method, Dynamic analysis, High-rise building, Buckling restrained brace, Low-cycle fatigue fracture, ASI-Gauss code*

1. 緒言

科学技術の発展に伴い我が国の都市近郊では高層建造物が増加の一途をたどっており、地震時の被害を軽減するために制振技術の適用・開発が盛んに行われている。制振技術を大きく分類すると、外部からのエネルギー入力なしで、それ自体が変形することで揺れを抑制するパッシブ制振、少量の電力を入力して制振するセミアクティブ制振、外部から主に電力を得て振動を制御するアクティブ制振があるが、その中でも設計・施工性が高く安価であることから、パッシブ制振が広く普及している。

パッシブ制振の減衰機構にはいくつか種類がある。その中で、中心鋼材に低降伏点鋼を用い、その周囲をモルタルと鋼管で覆い座屈を拘束し、安定的に塑性化させることにより制振する座屈拘束ブレースは、メンテナンス性が高いためよく用いられる。しかし、既往の研究[1]により低降伏点鋼は繰り返し荷重を受けることで低サイクル疲労破断を起こすことが示されており、長時間地震動のような外乱下では座屈拘束ブレースの制振機能が消失する恐れがある。さらに、近年発生が危惧されている南海トラフ沖地震が生じると都市部の建築物は長時間・長周期の地震力を受けることが予測されているため、低サイクル疲労破断を考慮した上で座屈拘束ブレースの制振性能を評価し、適切な制振設計に生かすことは都市防災上極めて重要な課題であるといえる。

そこで本研究では、座屈拘束ブレースの疲労破断を考慮した上で、南海トラフ沖地震を受けた際の超高層鋼構造骨組の挙動を有限要素法を用いて解析する。そして、得られた解析結果を基に、長時間地震動を受けた際の超高

層鋼構造骨組に設置されたブレースの制振機能を評価する。解析手法には大規模な骨組構造の挙動を低コストで解析することができるASI-Gauss法[2]に基づく有限要素解析コードを用いる。

2. 超高層鋼構造骨組の地震時挙動解析

(1) 中心鋼材の疲労破断アルゴリズム

本研究では、制振ブレースとして一般的に広く普及している座屈拘束ブレースを解析対象とする。座屈拘束ブレースでは、中心鋼材とモルタルの間にアンボンド材と呼ばれる緩衝材を用い、鋼管とモルタルには軸力が伝達しないようにしている。使用する座屈拘束ブレースは中心鋼材の断面形状が+型で、使用されている鋼材はBT-LYP225である。

座屈拘束ブレースの破断アルゴリズムは、新日鉄住金エンジニアリングにより行われたアンボンドブレースの疲労試験[3]の結果を基に構築した。この試験ではブレースを鉛直に設置し、±10.9mmの変位制御で軸方向交番载荷を行い、中心鋼材が破断するまで続ける。試験の結果、18回の繰り返し载荷で疲労破断することが確認された。

座屈拘束ブレースの破断条件には、以下の式で定義する累積塑性変形倍率を用いる。

$$\eta_f = \frac{\sum \varepsilon_p}{\varepsilon_y} \quad (1)$$

ここで ε_p は塑性ひずみ、 ε_y は降伏ひずみ(=降伏応力/ヤング率)である。 $\sum \varepsilon_p$ は座屈拘束ブレースの履歴曲線における

塑性ひずみの総和である。今回解析対象とする座屈拘束ブレースに用いられている塑性化部の鋼材の降伏応力は225N/mm²、ヤング率は2.06×10⁵N/mm²であるため、降伏ひずみは1.09×10⁻³となる。また、疲労試験結果から破断時の累積塑性変形倍率は1,261とした。

以上の破断判定アルゴリズムの妥当性を検証するため、疲労試験の再現解析を行った。解析モデルの寸法と詳細図を図1に示す。全体の要素数は6、節点数は7である。ここでヒンジ要素とは、設置した面と垂直になる軸回りの曲げ剛性のみを10⁻¹²倍している微小要素である。疲労試験と同様に、所定の軸方向変位が生じるように変位制御しながら荷重を作用させた。解析によって得られた累積塑性変形倍率-繰返し数関係を図2、応力-軸ひずみ関係を図3に示す。解析の結果、破断するまでの繰返し回数は17回となり、疲労試験結果の18ループと概ね一致した

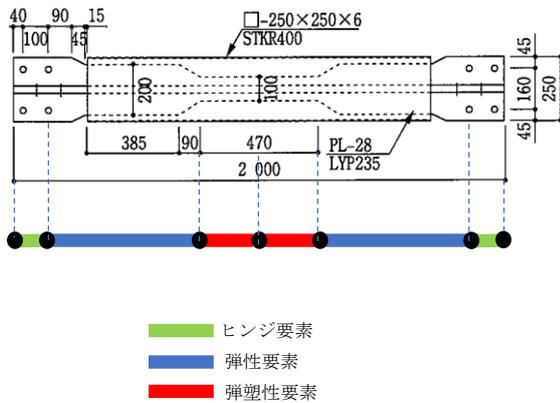


図1 疲労試験再現解析モデルの寸法と詳細図

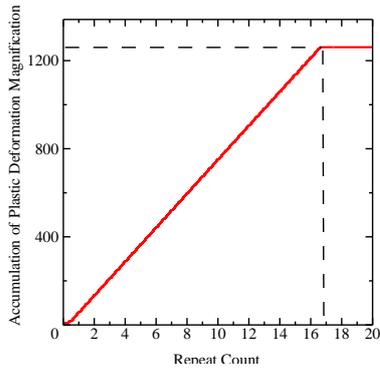


図2 累積塑性変形倍率 - 繰返し数関係

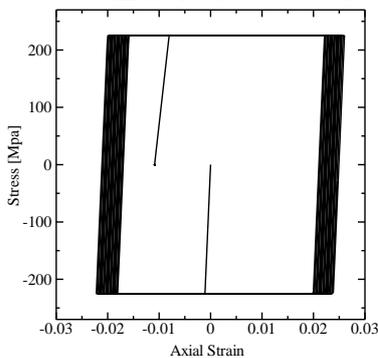


図3 応力-軸ひずみ関係

ため、この疲労破断アルゴリズムは妥当であるといえる。

(2) 解析モデルの概要

解析対象は、地上31層、高さは129.7m、平面形状は50.4m×36mの事務所ビルとし、ブレース無しモデル[4]及びブレースを設置したモデルの2種類を作成した。架構形式はセンターコア形式のS造である。ブレース無しモデルは総要素数23,115、総節点数は14,674、固有周期はX(NS)方向が2.94秒、Y(EW)方向が3.36秒である。ブレースを設置しているモデルは要素数25,719、節点数16,844である。固有周期はX(NS)方向が2.61秒、Y(EW)方向が2.96秒である。なお、ブレース有りモデルに関しては、疲労破断を考慮しない場合とする場合の2通りで解析を行った。ブレース有りモデルの概観を図4に示す。また、設置したブレースの取り付け位置と材料特性を図4、図5と表1に示す。

以降、行った3種類の解析について、座屈拘束ブレースが設置されていないモデルの解析をcase A、座屈拘束ブレースが設置されており、疲労破断が考慮されていないモ

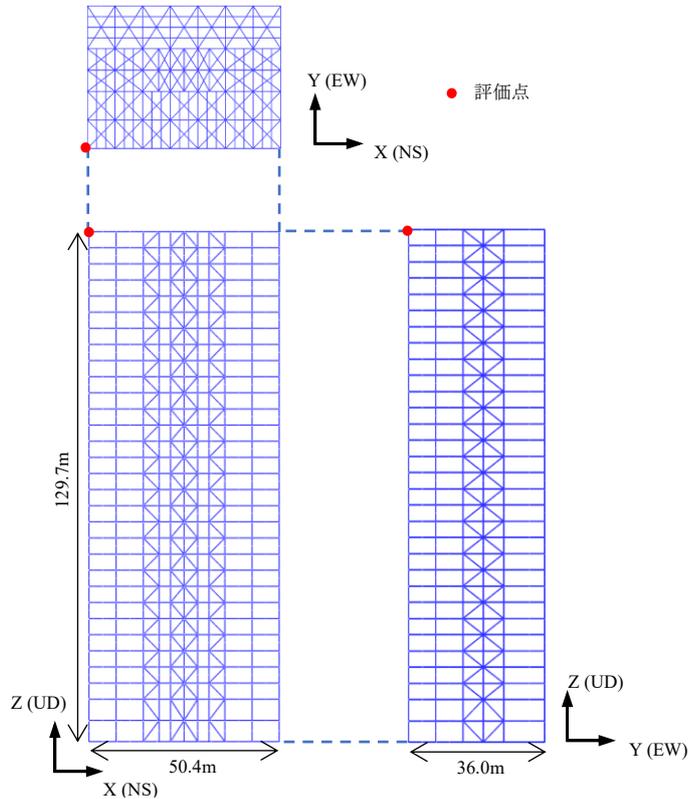


図4 座屈拘束ブレース有りモデルの平面図と立面図

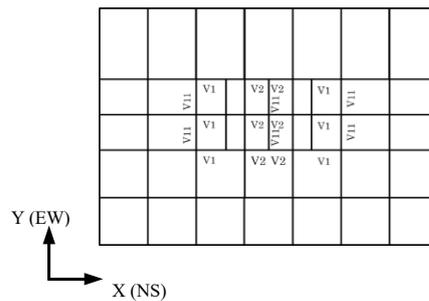


図5 超高層鋼構造骨組の伏図

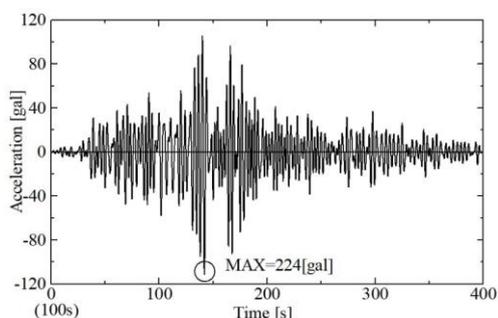
表 1 座屈拘束ブレースの材料特性

符号	階層	ヤング率[Mpa]	ポアソン比	密度[kg/mm ³]	中心鋼材の断面積[cm ²]
V1	1, 2	206	0.3	7.86×10 ⁻⁶	67
	3~31	206	0.3	7.86×10 ⁻⁶	89
V2	1, 2	206	0.3	7.86×10 ⁻⁶	78
	3~31	206	0.3	7.86×10 ⁻⁶	100
V11	1, 2	206	0.3	7.86×10 ⁻⁶	89
	3~31	206	0.3	7.86×10 ⁻⁶	67

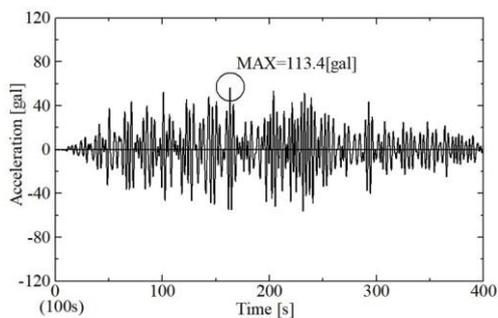
デルの解析をcase B, 座屈拘束ブレースが設置されており、疲労破断が考慮されているモデルの解析をcase Cとする。

(3) 解析条件

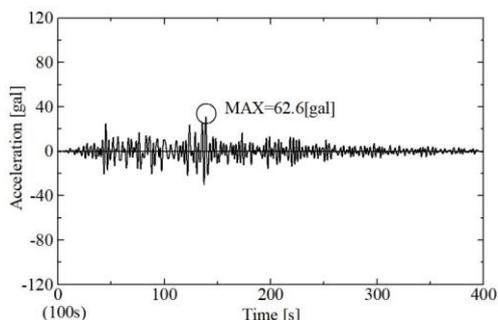
本解析の加振波には、図6, 図7に示す、防災科学技術研究所地震研究グループによって作成された南海トラフ地震模擬地震波(大阪波) [5]の200%を用いる。推定震源域は、南海、東南海、想定東海、四国沖の4連動となっており、500秒と長い揺れであるが、ここでは大きな揺れとなる100秒時から500秒時までを使用し、以降、原波100秒時を解析時刻0秒時とする。なお、時間増分および入力デー



(a) X(NS)方向



(b) Y(EW)方向



(c) Z(UD)方向

図 6 南海トラフ模擬地震動 200%の加速度波形

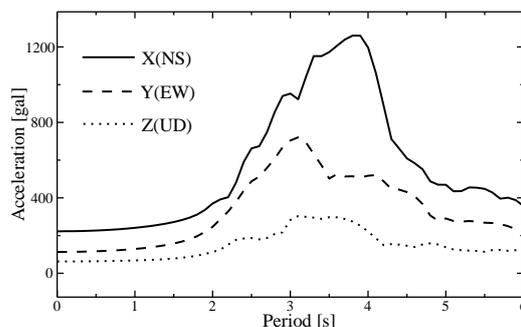


図 7 南海トラフ地震模擬地震波の応答加速度スペクトル

タの時間刻みは0.001秒である。

3. 解析結果

まず、case A と case B モデルを比較する。評価点を図4の赤点の位置とした際の応答変位の比較を図8に示す。case A は全体的に応答変位が大きく、加振から165秒付近より1階部分がNS方向に倒壊し、続いて220秒付近で2階部分が斜め方向に倒壊した。これは長時間地震により柱に想定を超えた負荷がかかったためだと考えられる。一方、case B では初期の段階から応答変位が抑制されており、全ての加振を終えても倒壊は見られなかった。以上より、座屈拘束ブレースによる制振性能が確認された。

次に case B と case C それぞれの結果を比較する。図9, 図10にそれぞれの応答変位と応答加速度の時刻歴を示す。これらの図より、最初の破断が発生した160秒後以降から応答変位、応答加速度ともに疲労破断を考慮した case C の方が大きくなっていることが分かる。

最後に、case C における座屈拘束ブレースの破断状況を図11, 図12に示す。NS方向の第2ピークの地震加速度が作用する160秒付近から、1階、2階の低層階で座屈拘束ブレースが破断し始めた。その後、加振されるにしたがって下層から破断していった。加振を終えた400秒時点では9階までにおいて114本のブレースが破断しており、10階以上ではブレースの破断が見られなかった。解析初期のcase A, case B のモデルの固有周期、解析終了時のcase C のモデルの固有周期を表2に示す。これより、座屈拘束ブレースが疲労破断した状態での固有周期はNS方向が2.70秒、EW方向が3.29秒となり、躯体の固有周期が座屈拘束ブレースを設置していないモデルのものに近づくことが確認された。

4. 結言

本研究では、座屈拘束ブレースが設置された超高層鋼構造骨組と設置されていない超高層鋼構造骨組をモデル化し、中心鋼材の疲労破断アルゴリズムを導入したASI-Gaussコードを用いて南海トラフ地震の想定波を入力した際の挙動を解析した。解析結果から、長時間地震時の制振ブレースの性能に関して以下の知見が得られた。

- 南海トラフ地震のような長周期かつ長時間地震の際は、制振ブレースが疲労破断することにより固有周

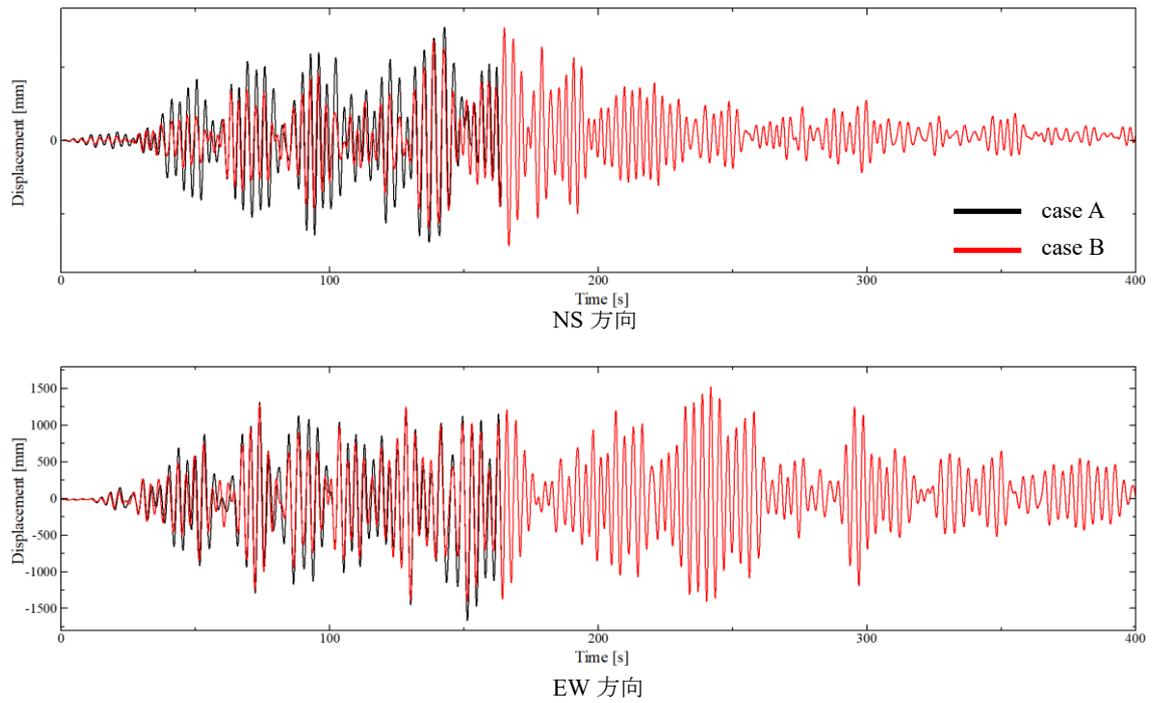


図 8 応答変位の比較 (case A と case B)

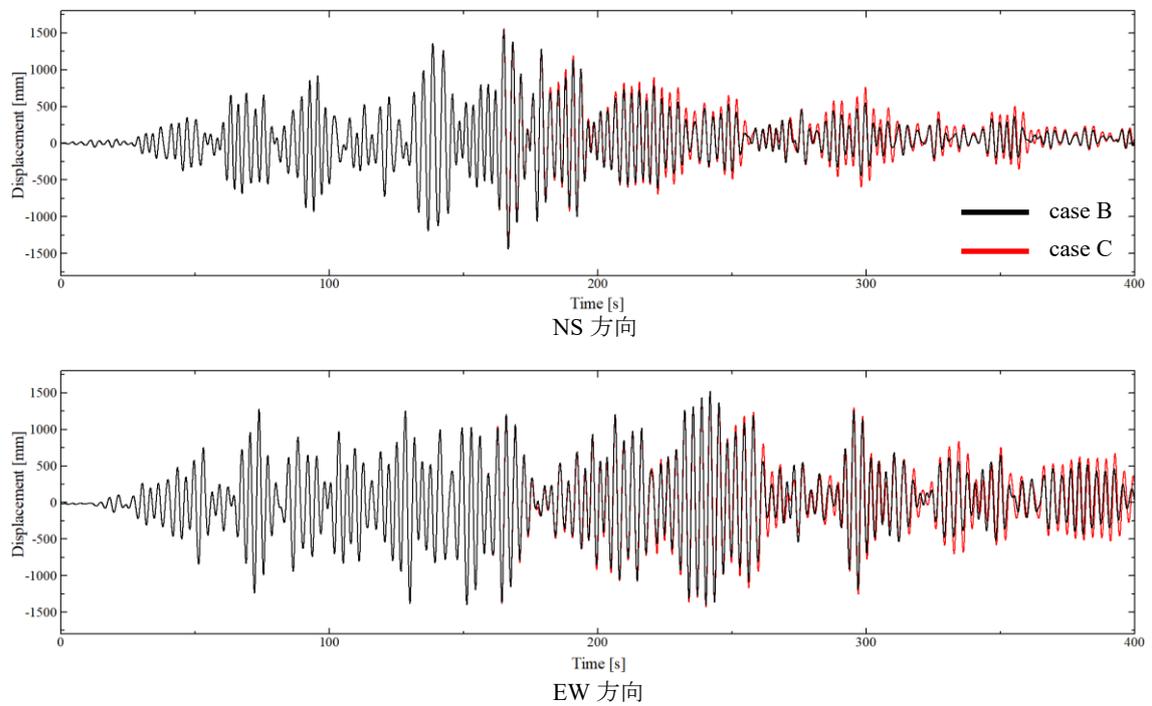


図 9 応答変位の比較 (case B と case C)

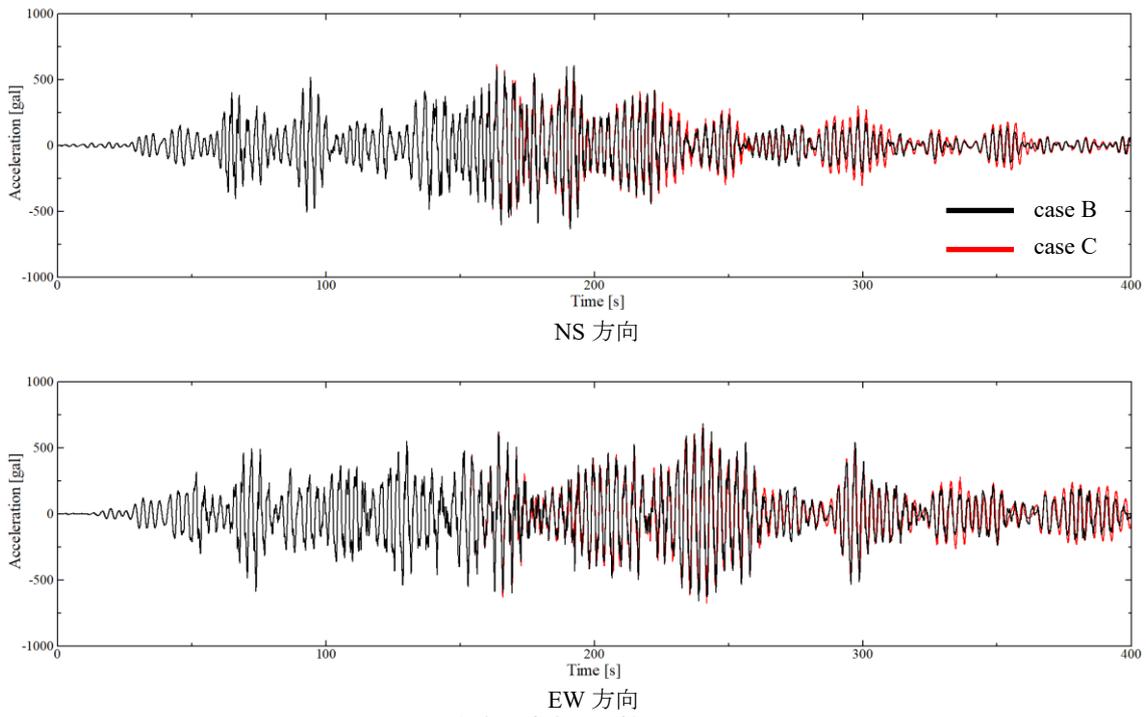


図 10 応答加速度の比較 (case B と case C)

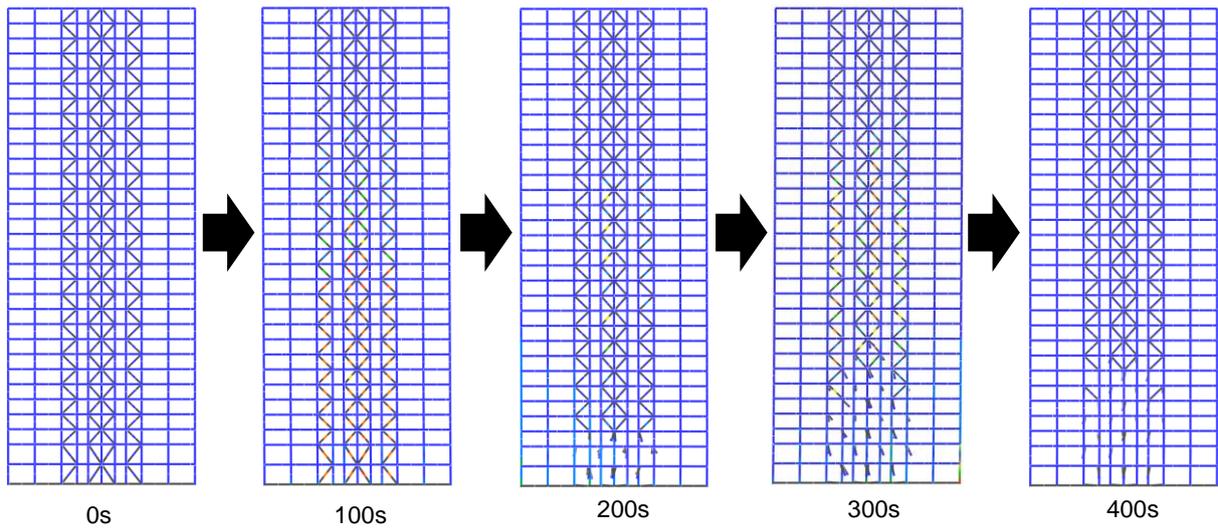


図 11 case C の解析結果 (正面図)

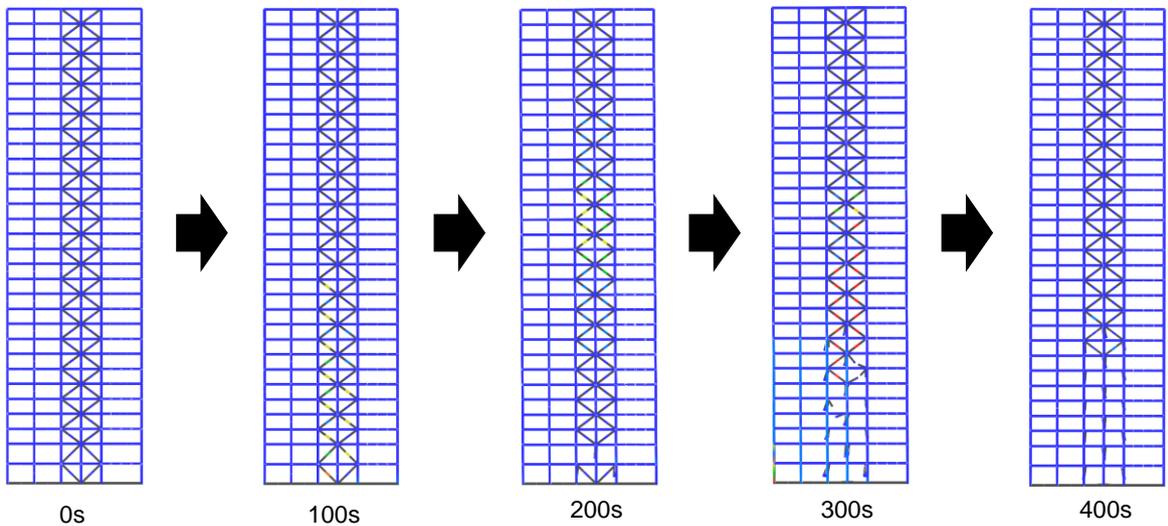


図 12 case C の解析結果 (側面図)

表2 固有周期の比較

	case A (解析初期)	case B (解析初期)	case C (解析終了時)
NS 方向	2.94	2.61	2.70
EW 方向	3.36	2.94	3.29

単位：[s]

期が座屈拘束ブレースを設置していないモデルのものに近づく可能性がある。

- 制振ブレースの破断は主に低層階で発生し、高層階では制振ブレースの破断が見られない。

今回用いた破断アルゴリズムは疲労試験の結果を基に作成したものである。今後は、制振ブレースが設置された構造物全体のねじりと制振ブレースの破断関係を調査する予定である。

参考文献

- [1] 佐伯英一郎, 杉沢充, 山口種美, 望月晴雄, 杉田章: 低降伏点鋼の低サイクル疲労促成に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 号, pp.139-147, 1995.
- [2] Daigoro Isobe: Progressive Collapse Analysis of Structures Numerical Codes and Applications, Butterworth-Heinemann, 2017.
- [3] 中村 博志, 竹内 徹, 前田 泰史, 中田 安洋, 佐々木 考雄, 岩田 衛, 和田 章: 実大アンボンドブレースの疲労試験に関する研究, 新日鉄技報第 372 号, 1999.
- [4] 宮村 倫司, 大崎 純, 梶原 浩一: ソリッド要素でモデル化した超高層鋼構造骨組の地震時応答解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 755 号, pp.39-49, 2019.
- [5] 長周期地震予測地図作成等事業平成 23 年度成果報告書, 文部科学省研究開発局, 独立行政法人防災科学技術研究所, 2012.