

安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネットの  
耐震設計の考え方についての基本ロジック（耐震建物23）

飛来物防護ネットは、制振効果を持つ「座屈拘束ブレース」を用いて設計しており、同部材の弾塑性応答を考慮した耐震評価を行うためには、時刻歴応答解析を行う必要があり、3次元フレームモデルのみで耐震評価すると非常に長い解析時間が必要となる。耐震評価にあたっては、解析時間を合理化するために、質点系モデルの時刻歴解析で算出される地震荷重を静荷重として3次元フレームモデルに入力して応力解析を実施する手法を採用している。

本資料は、以下2点に示す耐震設計の検討内容について整理する。（添付参照）

①耐震構造の検討

飛来物防護ネットの特徴的な要素である座屈拘束ブレースの採用の理由、配置検討、信頼性を示す。また、座屈拘束ブレースを含めた全体構造検討の結果から、飛来物防護ネット架構が層としてバランスのよい、局所的に偏りのない構造であることを示す。

②耐震評価手法について

「①耐震構造の検討」の結果から、地震応答解析に質点系モデルを適用し、解析の「合理化」を図っているが、その妥当性について3次元フレームモデルを用いた弾塑性応答解析との比較により、部材レベルで「科学的」に同等な評価が可能であることを示す。

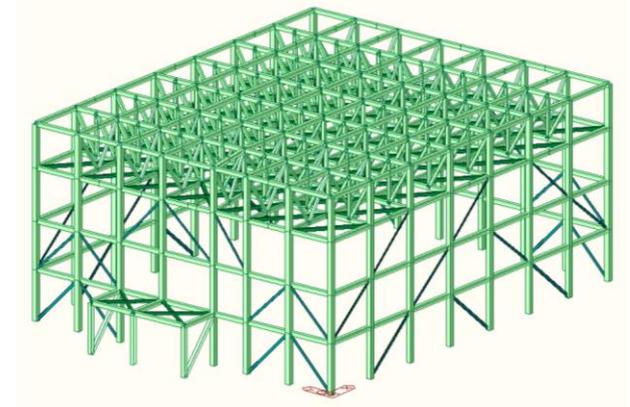
以上

# 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震設計の考え方（流れ）

## ①耐震構造の検討

以下のプロセスで架構構造を検討

- a. 暫定の架構構造で3次元フレームモデルを構築
- b. 3次元フレームモデルにて算出した地震荷重による概略評価
- c. 地震荷重低減のため 座屈拘束ブレースを採用
- d. 座屈拘束ブレースのサイズ、本数、配置の決定
- e. 静的地震力により、架構の変形状態確認



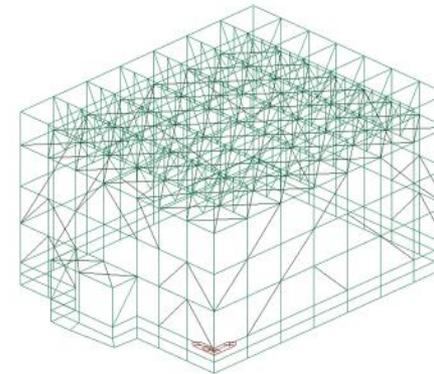
A4B飛来物防護ネット架構

## ②耐震評価手法について

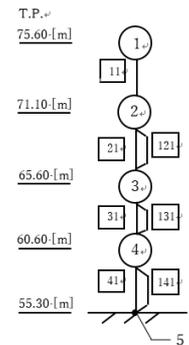
- f. 耐震評価手法の決定
  - ・合理的な部材断面算定が可能となる質点系モデルを適用
- g. 質点系モデル検証
  - ・3次元フレームモデルと質点系モデルの振動特性及び部材力を比較

## ③補足

- h. 質点系モデルを用いた耐震評価の適用例



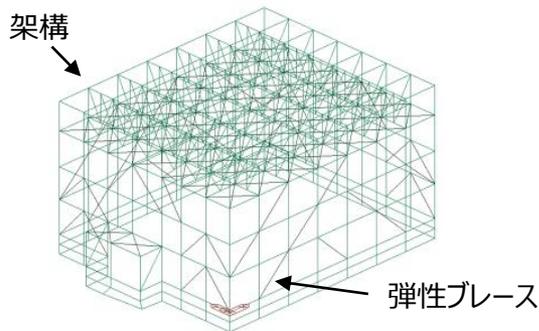
3次元フレームモデル



質点系モデル

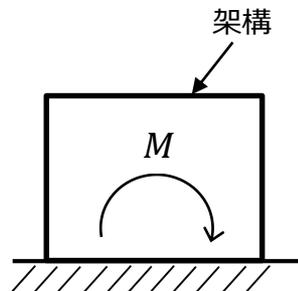
# ① 耐震構造の検討

- a. 暫定の架構構造で3次元フレームモデルを構築
- b. 3次元フレームモデルにて算出した地震荷重による概略評価



3次元フレームモデルの構築

地震応答  
荷重を算出



3次元フレームモデルの地震荷重による概略評価

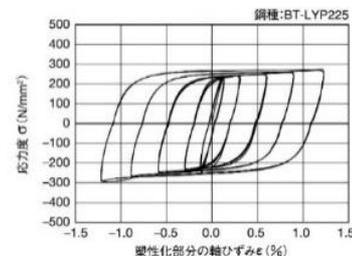
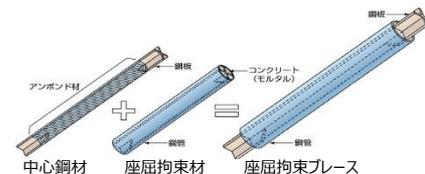
$M < M_a$  を確認する

$M$  : 3次元モデルで算出した地震転倒モーメント  
 $M_a$  : 架構の許容転倒モーメント

地震荷重による転倒モーメントが大きく、水平荷重の低減対策が必要

- c. 地震荷重低減のため座屈拘束ブレースを採用

- 低降伏点鋼（大臣認定材料）を用いた中心鋼材を鋼管とモルタルで拘束し、座屈せず安定的に塑性化する構造を採用（安定した弾塑性応答特性であることを実証試験等にて確認）
- ブレースが塑性変形することでエネルギーを吸収し、減衰効果が付加
- 座屈拘束ブレースは、第三者機関（日本建築センター）にて確認済みの設計法を適用
- 製作要領、品質管理要領は、第三者機関にて確認済の要領を適用

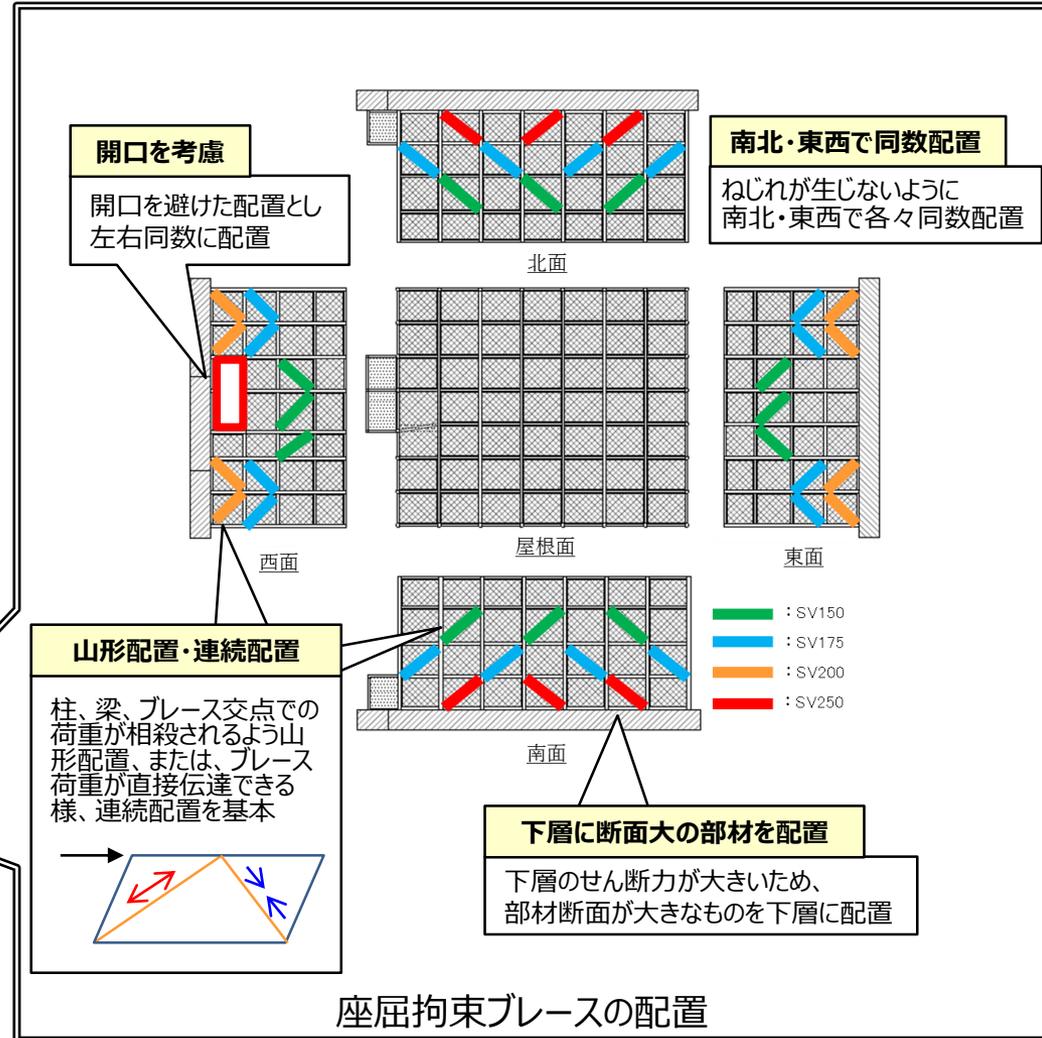
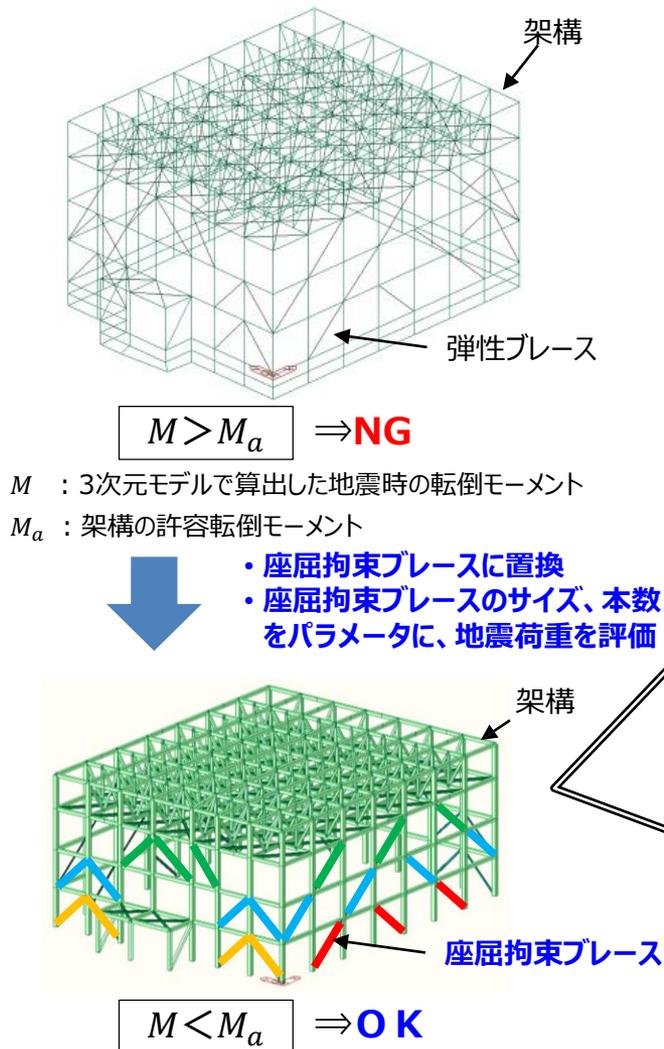


座屈拘束ブレースの弾塑性応答特性

# ① 耐震構造の検討

## d. 座屈拘束ブレースのサイズ、本数、配置の決定

- ・架構の許容転倒モーメントを満足するように、座屈拘束ブレースのサイズ、本数を検討。
- ・下層に向かってせん断力が大きくなる傾向を踏まえて、部材断面が大きい座屈拘束ブレースを下層に配置。

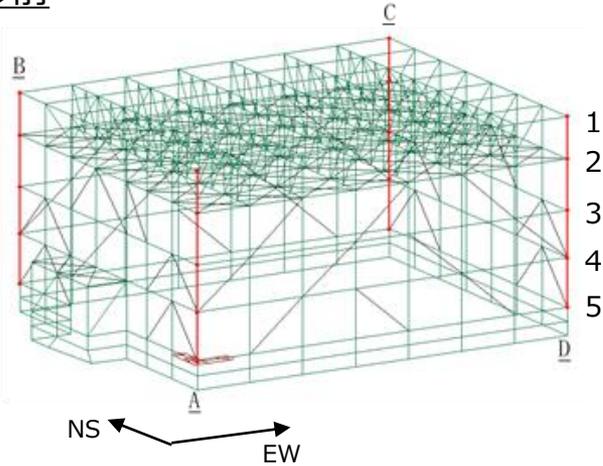


# ① 耐震構造の検討

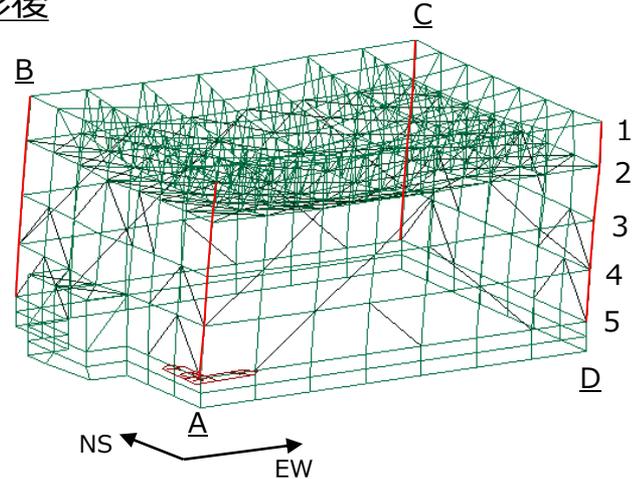
## e. 静的地震力による架構の変形状態確認

静的地震力を与え、架構の変形状態に特異な部分がないことを確認する

変形前



変形後

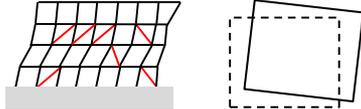


飛来物防護ネット架構の変形状態 (EW方向加振時)

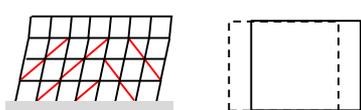
### 柱の変形状態

各階層間において、変形状態は  
一様であることを確認  
(悪い例)

(悪い例)

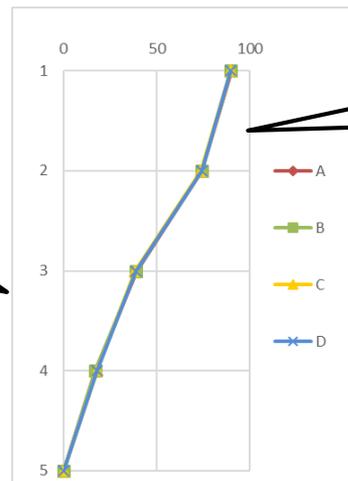


(良い例)



側面図

平面図



4隅の柱の各階層の変形量 (mm)

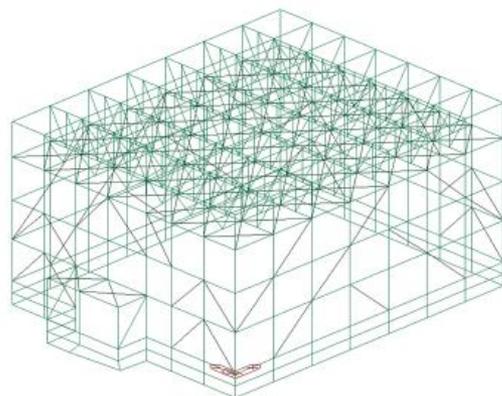
### 柱同士の変形状態の確認

4隅の柱の変形は同様であり全体が一体化していること (ずれがないこと) を確認

## ② 耐震評価手法について

### f. 耐震評価手法の決定①

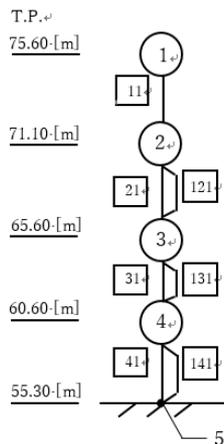
- 地震応答解析においては、「①耐震構造の検討」の結果、層としてバランスのよい、局所的に偏りのない構造であることから、各層の変形性能を剛性として組み込んだ質点系モデルを構築。
- 一方、部材応力解析においては、質点系モデルで個々の部材応力を算定できないことから、質点系モデルの地震応答解析結果を入力値とした3次元フレームモデルで実施。
- 仮に3次元フレームモデルのみを用いて地震波の全時間断面に対して部材断面算定まで行う場合、処理数が膨大な数となるため、質点系モデルの適用により解析時間の合理化が図れる。



要素数：1065

節点数：438

3次元フレームモデル



要素数：7

節点数：5

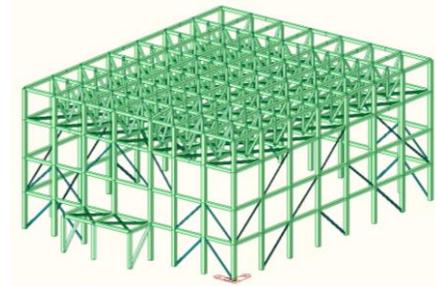
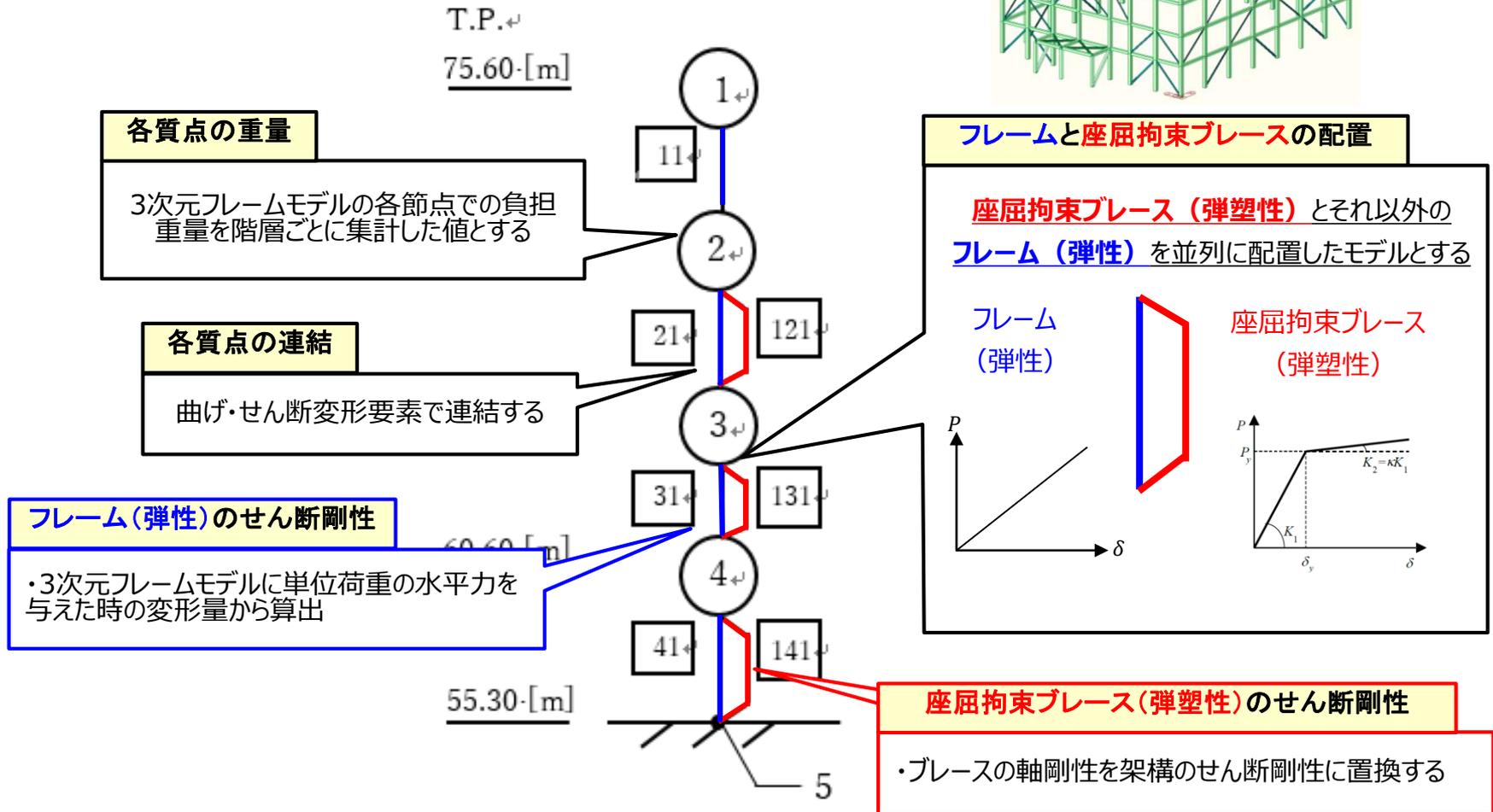
質点系モデル

|        | 3次元フレームモデル                   | 質点系モデル / 3次元フレームモデル                  |
|--------|------------------------------|--------------------------------------|
| 地震応答解析 | 全地震動に対して、地震応答解析～応力解析を動的に実施   | 全地震動に対して地震応答解析を動的に実施                 |
| 応力解析   |                              | 全地震動の応答を包絡した地震力(せん断力)を作成し、静的に応力解析を実施 |
| 断面算定   | 動的応力解析結果から得られる部材力に対し、断面算定を実施 | 静的応力解析の結果から得られる部材力に対し、断面算定を実施        |

## ② 耐震評価手法について

### f. 耐震評価手法の決定②

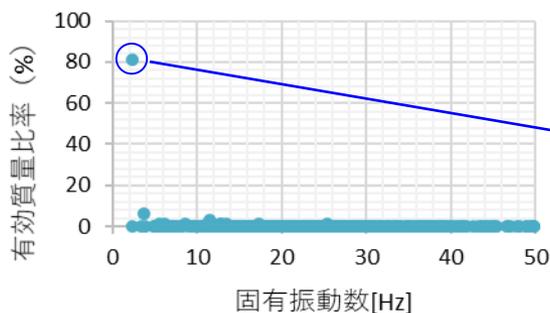
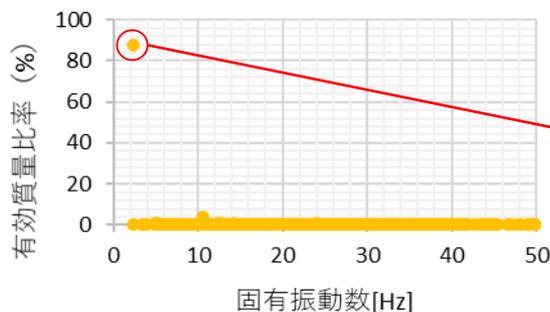
3次元フレームモデルの剛性を組み込んだ質点系モデルを構築



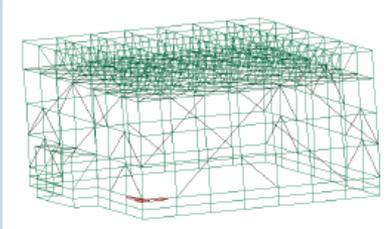
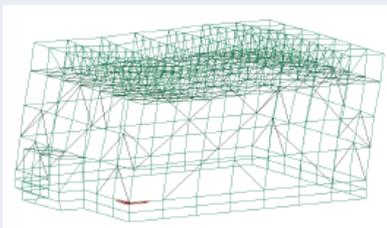
## ② 耐震評価手法について

### g. 質点系モデルの適用検討①

- 飛来物防護ネット架構は、屋根質量が相対的に大きく1次モードが卓越する
- 3次元フレームモデルの固有値解析の結果、NS方向1次、EW方向1次の有効質量比率が支配的であり、その他モードの寄与は非常に小さい
- NS方向1次、EW方向1次において、質点系モデルの固有振動数は、3次元フレームモデルと同等であることから、質点系モデルは3次元フレームモデルの振動特性を表現可能である



有効質量比率と固有振動数の関係

| 3次元フレームモデル              |   | 質点系モデル  |
|-------------------------|---|---|
| <b>NS<br/>方向<br/>1次</b> | 2.48Hz(0.404s)<br>   | 2.55Hz(0.393s)<br>   |
| <b>EW<br/>方向<br/>1次</b> | 2.50Hz(0.400s)<br> | 2.53Hz(0.395s)<br> |

## ② 耐震評価手法について

### g. 質点系モデルの適用検討②

- 飛来物防護ネットは、下層に向かって層せん断力が大きくなる傾向にあり、1～2階層に断面の大きな座屈拘束ブレースを配置（p3参照）している。この設計意図を補うために、耐震評価は上層部の評価が重要と考えている。
- 本架構は3階層柱の荷重分担が大きくなる（図1）ため、最大検定値が発生する3階層柱において、3次元フレームモデル及び質点系モデルによる評価結果を比較し、同等であることを確認する。



質点系モデルでの最大検定値発生部位において、モーメント、軸力、検定値を3次元フレームモデルと比較したところ、同等の結果であった。

| 柱            | 3次元フレームモデル | 質点系モデル | フレーム/質点系 |
|--------------|------------|--------|----------|
| モーメント (kN・m) | 1081       | 1103   | 0.980    |
| 軸力 (kN)      | 1099       | 1029   | 1.068    |
| 検定値 (組合せ)    | 0.554      | 0.556  | 0.996    |

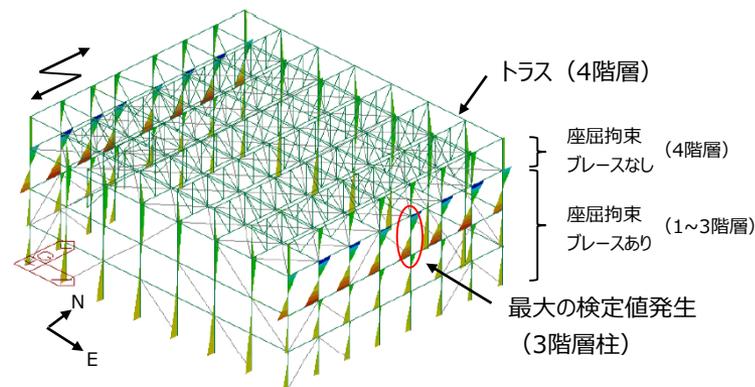
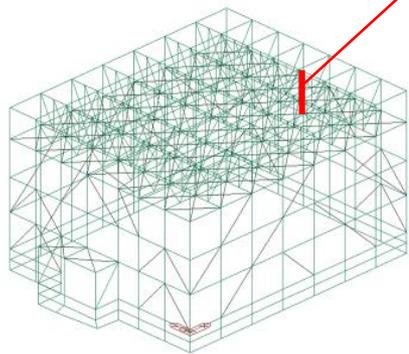
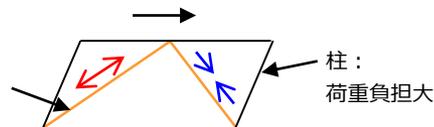


図1 柱モーメント分布図

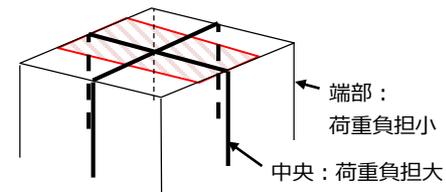
#### 【最大検定値発生部位について】

- ① 上層ほどブレースの断面積が小さく、柱の荷重負担が大きい
- ② 端部と比較し、中央の柱は上部トラス重量の負担が大きい

①  
ブレース：  
断面積小



②



### ③ 補足

#### h. 質点系モデル構築の実績①

- 川内の屋外タンク竜巻防護ネットにて、弾塑性部材を考慮した質点系モデルによる地震応答解析及び3次元フレームモデルによる静解析を実施

|       | 地震応答解析  | 静解析               |
|-------|---|-------------------|
| 解析モデル | <p>EL.35.03m</p> <p>EL.30.1m</p> <p>EL.21.0m</p> <p>EL.17.705m</p> <p>EL.15.44m</p> <p>EL.11.0m</p> <p>EL.3.70m</p> <p>基礎重心 EL.7.35m</p> <p>回転ばね</p> <p>水平ばね</p> <p>○ : 質点番号<br/>● : 質量のない節点<br/>□ : 部材番号</p> <p>         ①: 鉄骨屋根組み<br/>         ②: 竜巻防護ネット (鉄骨造部)<br/>         ③: 防護壁 (鉄筋コンクリート造部)<br/>         ⑤①: 復水タンク<br/>         ⑤②: 1次系純水タンク<br/>         ⑤③: 燃料取替用水タンク<br/>         ⑤④: 燃料取替用水補助タンク       </p> <p>EL.18.06m<br/>EL.17.155m</p> <p>質点系モデル</p> | <p>3次元フレームモデル</p> |
| 解析コード | TDAP III  | TDAP III          |

### ③ 補足

#### h. 質点系モデル構築の実績②

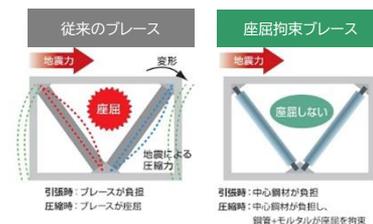
- 東海第二の主排気筒にて、弾塑性ダンパを考慮した質点系モデルによる地震応答解析及び3次元フレームモデルの応力解析を実施

|         | 地震応答解析   | 応力解析                                       |
|---------|--|--|
| 解析モデル   | <p>弾塑性ダンパ<br/>筒身と鉄塔の接続部に適用</p> <p>質点系モデル</p>   | <p>鉄塔のみ</p> <p>3次元フレームモデル</p>              |
| 非線形履歴特性 | <p>弾塑性ダンパの弾塑性特性</p> <p>Q (kN)</p> <p>変形 (mm)</p> <p>Q1: 第1折点荷重<br/>Q2: 第2折点荷重<br/>K1: 第1剛性<br/>K2: 第2剛性<br/>K3: 第3剛性</p> | <p>鉄塔、筒身それぞれの応力解析において、<br/>非線形要素の反力を入力</p> |
| 解析コード   | NUPP4  | MSC NASTRAN ver8.0.0                       |

# 【参考】 座屈拘束ブレース

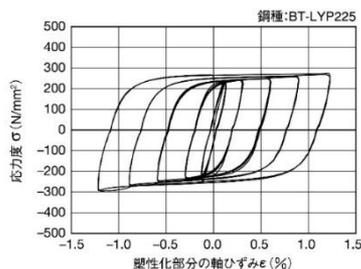
## 地震荷重低減のため座屈拘束ブレース

- 実証試験等にて、安定した弾塑性応答特性であることが確認されている。
- 座屈拘束ブレースは、第三者機関（日本建築センター）にて確認済みの設計法を適用する。
- 中心鋼材は大臣認定材料の低降伏点鋼を使用する。
- 製作要領、品質管理要領についても、第三者機関にて確認済の要領を適用する。



### ① モデル化方法

実験にて得られたブレース材の弾塑性応答曲線より、材料特性のモデル化方法が確認されている。また、上記モデル化で、座屈拘束ブレースの性能を評価できることが実機規模の試験にて確認されている



### ② 強度評価方法

実証試験にて、地震荷重による破断モード及び破断を防止するクライテリアが設定されている。

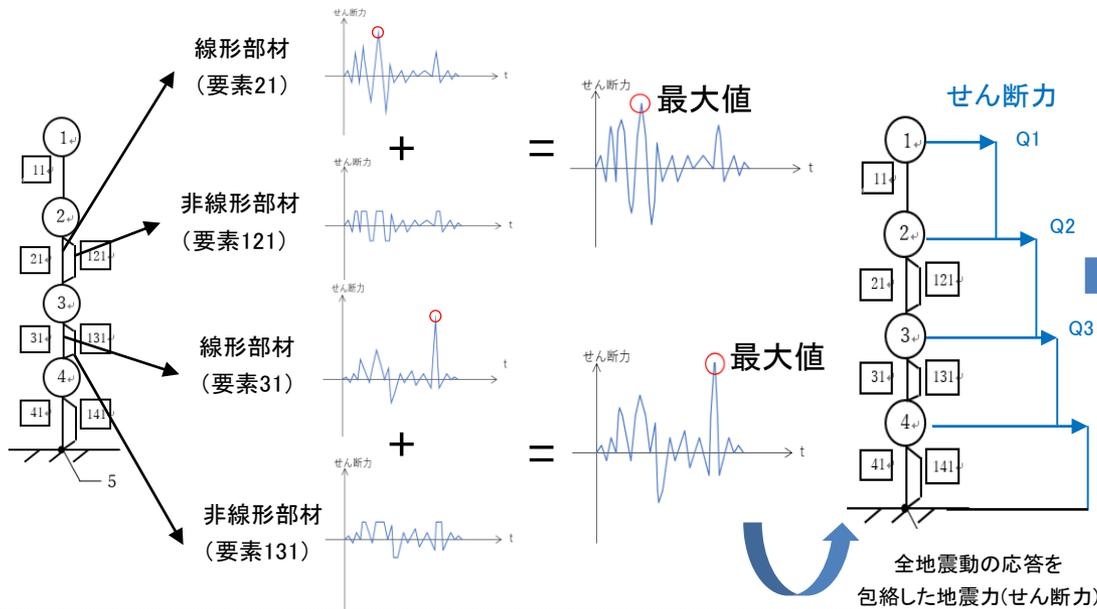
|               |                    | メーカー<br>確認項目                     | 第三者機関による<br>確認項目   | 今回の設計製作工事に<br>適用した項目 |
|---------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------|
| 性能データ         | 中心鋼材の強度データ         | ○<br>SSカーブ及びミルシートで確認             |                    | ○<br>ミルシート           |
|               | 中心鋼材の座屈を防止する構造の妥当性 | ○<br>実大試験体の試験結果で確認               | ○<br>実大試験体の試験結果で確認 | ○<br>評価の設計式          |
|               | 座屈拘束ブレースの弾塑性応答データ  | ○<br>部材の応答(履歴特性)は代表実大試験体の載荷結果で確認 |                    |                      |
| 強度評価方法、モデル化方法 | 座屈拘束ブレースのモデル化方法    | ○<br>試験と解析の比較で確認                 | ○<br>試験と解析の比較で確認   | ○<br>評価に準拠           |
|               | 座屈拘束ブレースの強度評価方法    | ○<br>試験と解析の比較で確認                 | ○<br>試験と解析の比較で確認   | ○<br>評価に準拠           |
| 要領            | 製作要領               | ○<br>評価に定めた要領に従って製作した試験体の結果で確認   | ○                  | ○<br>評価の製作要領         |
|               | 品質管理要領             | ○<br>評価に定めた要領に従って製作した試験体の結果で確認   | ○                  | ○<br>評価の品質管理要領       |

# 【参考】耐震評価手法の比較について

## 今回採用した手法

### 地震応答解析 (解析コード: TDAPⅢ)

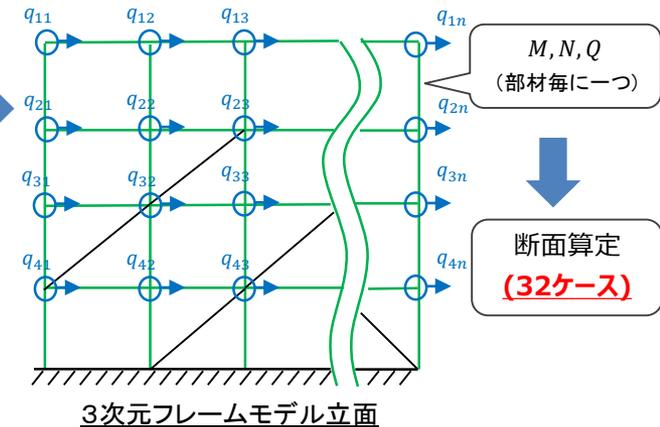
全地震動の地震応答解析を実施し、各階層に生じる地震力(せん断力)の最大値を抽出



### 応力解析 - 断面算定

(解析コード: midas iGen, ハウスコード)

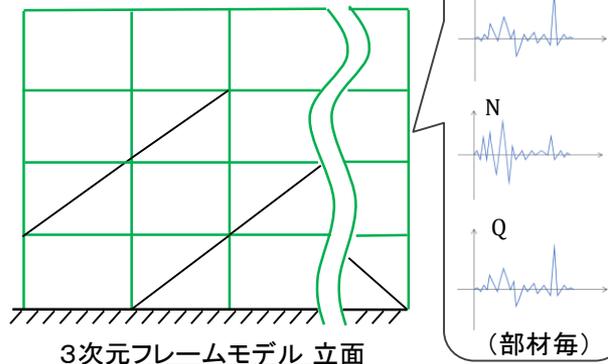
- 地震応答解析で算出した地震力(せん断力)を3次元フレームモデルの各節点の質量比で分配し、静的応力解析を実施
- 静的応力解析結果から得られる部材力に対し、断面算定を実施



## 3次元フレームモデルで動的解析を実施する場合

地震応答解析・応力解析 - 断面算定  
(解析コード: TDAPⅢ, ハウスコード)

- 全地震動に対して、地震応答解析～応力解析を一気通貫で動的に実施
- 動的応力解析結果から得られる部材力に対し、断面算定を実施



全時間断面に対して動的に  
断面算定を実施

**(約百数十万ケース)**