

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |  |
|-------------------|--|
| 論題(和文)            | 中低層免震建物における実効変形比に基づくブレース配置の検討 その2 実効変形比に基づくブレース配置設計例   |
| Title(English)    | A study on brace placements for low to mid-rise base-isolated buildings based on brace effective deformation ratio Part 2 Example of brace placements design method based on brace effective deformation ratio |
| 著者(和文)            | 新井雄大, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介  |
| Authors(English)  | Yudai Arai, Daiki Sato, Alex Shegay, Ryota Tobaru, Jumpei Yasunaga, Takuya Ueki, Yosuke Kaneshiro  |
| 出典 / Citation     | 日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 521-524   |
| Citation(English) | , , , pp. 521-524  |
| 発行日 / Pub. date   | 2023, 2  |
| 権利情報              | 一般社団法人 日本建築学会  |

# 中低層免震建物における実効変形比に基づくブレース配置の検討

## その2 実効変形比に基づくブレース配置設計例

### 2.構造-2.振動

|          |       |        |
|----------|-------|--------|
| 免震構造     | 中低層建物 | ブレース配置 |
| 免震支承の引抜き | 降伏耐力  | 座屈耐力   |

|                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| 正会員 ○ 新井雄大 <sup>*1</sup>    | 正会員 佐藤大樹 <sup>*2</sup> |
| 〃 Alex Shegay <sup>*3</sup> | 〃 戸張涼太 <sup>*4</sup>   |
| 〃 安永隼平 <sup>*5</sup>        | 〃 植木卓也 <sup>*5</sup>   |
| 〃 金城陽介 <sup>*5</sup>        |                        |

### 1.はじめに

本報その1では、剛床仮定が成立する免震建物を対象に、ブレースの降伏・全体座屈、および免震支承の引抜きを、実効変形比に基づいて評価する手法を示した。本報その2では、その1の手法を用いたブレース配置の設計フローを示し、例題建物へと適用した例を提示する。

### 2. 設計フローの提案

その1で提示した実効変形比に基づく判定手法を踏まえて、以下の必要条件[1]~[3]を満足するブレースの配置と剛性の組み合わせを図1に示す設計フローにより決定できる。

**【本報の設計手法で対象とする必要条件】**

- [1] 設計クライテリア内でブレースが降伏しないこと
- [2] 設計クライテリア内でブレースが座屈しないこと
- [3] 設計クライテリア内で免震支承が引抜けしないこと

図1内のS2, S3は、地震応答が目標クライテリア以内となるように免震層の部材選定と配置を行い、上部構造の目標層剛性を文献7),8)などの手法や、事前解析によって決定する。S4では、剛性0の弾性バネを挿入した主架構で状態N解析を行い、目標層剛性の $K_{fs}$ からの差分が $K_{as}$ の目標値となる(S5)。S6でブレース配置を仮定すると、状態R解析により $K_{bs}$ と $L_{eq}$ が算出できる。 $K_{as}$ の目標値を満たす $K_{ds}$ と $\alpha_{es}$ を、その1式(7),(8)よりそれぞれ求めて、得られた $\alpha_{es}$ に基づいて、ブレースの降伏と免震支承の引抜きを判定する(S9)。ここでNGとなる場合は、目標層剛性を実現しながら必要条件[1],[3]を満足できないブレース配置であるため、ブレース配置を仮定し直す必要がある(S6)。S9でOKの場合は、必要条件[2]を満足するために、その1式(14)で算出する $i_{dcr}$ を上回る $i_d$ のブレース断面を選択する(S11)ことで、必要条件[1]~[3]を満たすブレースの剛性と配置の組み合わせが決定できる。S11において、 $i_{dcr}$ が過大である場合など、 $i_d > i_{dcr}$ を満たせないときは、S6でブレース配置の仮定を再度行う必要がある。

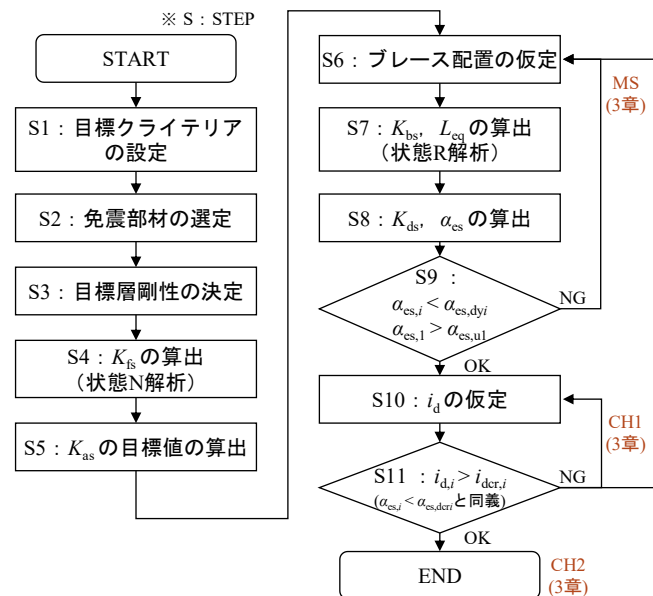


図1 ブレース配置の設計フローチャート

第3章では、例題建物モデルを用いた設計例を示す。その際、S9でNGとなる「MS」、S11でNGとなる「CH1」、設計可能と判定できる「CH2」を設計例として提示する。

### 3. 設計例

#### 3.1 建物モデル概要および解析諸条件

例題とする建物モデルは実在する鉄骨造物流倉庫を基に作成したものであり(表1, 図2~図4)、第3章ではこの建物モデルの主架構のY1,7構面にハの字型のブレースを設置することを考える。本建物モデルは、各層で剛床仮定が成立し、免震層は高減衰ゴム系積層ゴム支承(HDR)のみから構成されている。長期軸力が比較的小さい外縁部にはφ800、それ以外にはφ900が用いられており、長期荷重時の面圧は外縁部では-8~-4 N/mm<sup>2</sup>、それ以外では-14~-12 N/mm<sup>2</sup>である。それぞれのHDRの断面積 $A_H$ 、圧縮剛性 $K_{vc}$ は表2(a)に示すとおりである。

上部構造の構造減衰は、基礎固定時の上部構造の1次固有周期に対して、 $h = 1\%$ となる剛性比例型とする。免震

A study on brace placements for low to mid-rise base-isolated buildings based on brace effective deformation ratio  
Part 2 Example of brace placements design method based on brace effective deformation ratio

ARAI Yudai, SATO Daiki, Alex SHEGAY, TOBARI Ryota, YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya, KANESHIRO Yosuke

表 1 主架構の建物諸元

|      |             |                                     |
|------|-------------|-------------------------------------|
| 柱    | 4F          | H-300×300×10×15                     |
|      | 1-3F        | □-500×500×16×16<br>~□-500×500×22×22 |
| 大梁   | RF          | H-369×199×7×11<br>~H-400×200×9×16   |
|      | 2-4F        | H-700×300×12×19<br>~H-900×350×16×32 |
|      |             |                                     |
| 建物重量 | 469,099 kN  |                                     |
| 固有周期 | 2.01 s (1次) |                                     |

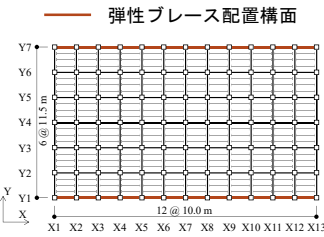


図 2 基準階伏図

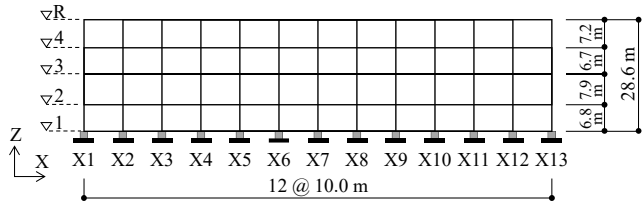


図 3 主架構の軸組図

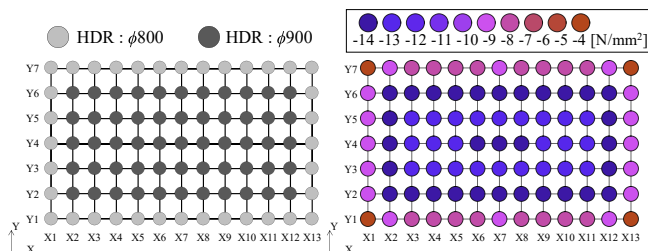


図 4 免震部材配置図

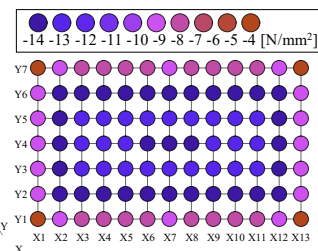


図 5 長期荷重時の面圧

表 2 免震層の性能  
(a) HDR 1基あたり

|                          | φ 800 | φ 900 |
|--------------------------|-------|-------|
| $A_H$ [cm <sup>2</sup> ] | 5023  | 6359  |
| $K_{vc}$ [kN/cm]         | 35100 | 44900 |

(b) 免震層全体の性能

| $\gamma$    | 50%   | 100%  | 150%  |
|-------------|-------|-------|-------|
| $T_f$ [sec] | 3.56  | 4.41  | 4.77  |
| $\alpha_s$  | 0.022 | 0.029 | 0.034 |

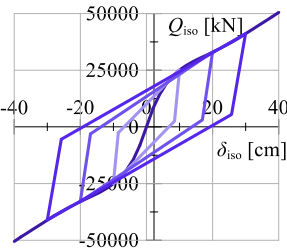


図 6 免震層全体の復元力特性

層の水平方向の復元力特性は修正バイリニアモデルでモデル化され(図 6: 荷重  $Q_{iso}$ -変形  $\delta_{iso}$  関係), 表 2(b)には, 上部構造を剛体と仮定したときの免震層の 2 次剛性の周期  $T_f$  および切片荷重の層せん断力係数  $\alpha_s$  を, せん断ひずみ  $\gamma=50, 100, 150\%$  の 3 ケース示している。また, HDR の鉛直方向は, 引張剛性が圧縮剛性から低下しない線形バネでモデル化する。

主架構は弾性と仮定し, ブレースは両端ピン接合とし, 降伏耐力もしくは座屈耐力の小さい方に折れ点を有するバイリニアモデルの非線形バネでモデル化する。状態 N 解析により得られる  $\alpha_N$  は, 図 7 に示すとおり, いずれのブレース設置箇所においても概ね 1.0 とみなせる。これにより, 既報<sup>3)</sup>で提案した面圧の予測手法(その 12.4

|    | ▽R   | ▽4   | ▽3   | ▽2   | ▽1   |
|----|------|------|------|------|------|
| X1 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| X2 | 0.97 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| X3 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| X4 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| X5 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| X6 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| X7 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

図 7 各ブレース設置箇所の  $\alpha_N$  (Y1 構面)

節) を適用することができる。

### 3.2 入力地震動と目標剛性

本設計例で採用する入力地震動は, 図 8 に示す周期 0.64 s 以降で擬似速度応答スペクトル  $p_{Sv}$  が 80 cm/s で一定となるレベル 2 相当の告示波 ART HACHI (位相特性: Hachinohe 1968 EW 成分) とする。ART HACHI 入力時に上部構造の最大層間変形角 1/400 rad. を設計クライテリアとし, 本報では質点系モデルによる事前解析により,  $K_{as}$  の目標値を図 9(a) のように決定した。このときの最大層間変形角  $R$  は図 9(b) のように 1/400 rad. 以内に収まることを確認している。

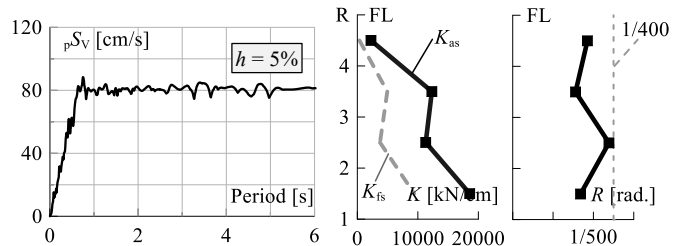
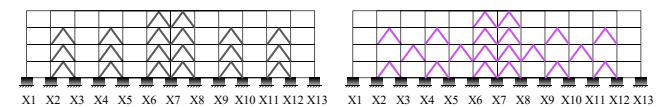


図 8 入力地震動の (a)  $K_{as}$  の目標値 (b) 層間変形角 擬似速度応答スペクトル  $p_{Sv}$  図 9 目標剛性と地震応答

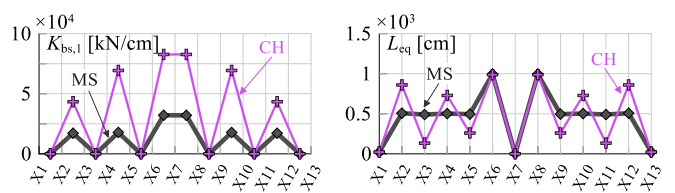
### 3.3 検討対象とするブレース配置とブレース断面の設計

図 1 の S6 で仮定するブレース配置は, 図 10(a),(b) にそれぞれ示す MS 配置, CH 配置とする。ブレース配置を決定すると, 状態 R 解析を行うことで  $K_{bs}$  と  $L_{eq}$  が得られる。第 1 層の各スパンにおける  $K_{bs}$  と  $L_{eq}$  の絶対値 (Y1 構面) をそれぞれ図 11(a),(b) に示す。同図より CH は各ブレース設置箇所において MS よりも 2 倍以上の  $K_{bs}$  が得られることがわかる。また, いずれの配置も内側スパン (例えば X6-8) では外側スパン (例えば X2-3) に対して  $K_{bs}$  が若干大きくなる。また,  $L_{eq}$  は MS, CH 配置ともに X6,8 の免震支承で  $L_{eq} = 1000$  cm 程度 (1 スパン分) と, 層内で最も大きくなる。また, X2-5, X9-12 の免震支承においては, MS では  $L_{eq}$  が 500 cm 程度 (1/2 スパン分) で概ね等しいが, CH では MS よりも支承ごとの差が大きい。

図 12(a) に示す  $K_{bs}$  の高さ方向分布より, 全層において,  $K_{bs}$  は CH > MS となっている。これは, CH のような千鳥



(a) MS 配置 (b) CH 配置  
図 10 検討対象とするブレース配置



(a) 第 1 層の  $K_{bs}$  (b)  $L_{eq}$  の絶対値  
図 11 Y1 構面の  $K_{bs}$ ,  $L_{eq}$  の比較

配置では、ブレースが高さ方向に互い違いに設置されていることから、柱に伝わるブレース軸力が打ち消されやすく、柱の軸伸縮の影響が小さくなるためである。

図1のS8で、ブレース配置ごとに $K_{as}$ の目標値を満足する $K_{ds}$ と、そのときの $\alpha_{es}$ を算出すると、図12(b)(c)のようになる。CHの方が、 $K_{bs}$ が大きかったことから、MSよりも小さい $K_{ds}$ で $K_{as}$ の目標値を満足でき、 $\alpha_{es}$ はMSより大きくなっていることが確認できる。表3には、目標クライテリア内で座屈が生じないための $i_d$ の下限值 $i_{dcr}$ を、配置ごとに示す。CH配置の方がMS配置よりも $\alpha_{es}$ が大きかったことに起因して、その1式(14)より得られる $i_{dcr}$ が大きくなる。ブレース配置ごとのブレース断面は、図12(b)の $K_{ds}$ より表4のように決定した。CH配置は、 $i_d$ が比較的小さい200角シリーズの角型鋼管から選択したCH1と、 $i_d$ が比較的大きい250~300角シリーズの角型鋼管から選択したCH2の2ケースを比較する。

その1図11に示した、設計可能な $\alpha_{es}$ の範囲をMS, CH1, CH2に適用すると図13のようになる。なお、上下地震動は静的震度 $C_v=0.3G$ として考慮しており、灰色線はブレース降伏、黒破線は表4の $i_d$ を設定したときのブレース座屈、青実線は免震支承の引抜きをそれぞれ考慮した $\alpha_{es}$ の設計可能範囲を示している。また、プロットは図12(c)の $\alpha_{es}$ と目標クライテリアとの関係をそれぞれ意味している。図13に示すMSの1層目では、プロットが $\alpha_{es,dy}$ と $\alpha_{es,dcr}$ を下回っており、ブレースに降伏や座屈が發

生しないが、 $\alpha_{es,u}$ も下回っており引抜きが発生するため、図1のS9においてNGと判定される。配置を変更したCH1では、第1層目では $\alpha_{es} > \alpha_{es,u}$ を満たし、MSから引抜きが改善されており、さらに全層で $\alpha_{es} < \alpha_{es,dy}$ となり降伏も発生しない。しかしながら、表4の $i_d$ が表3の $i_{dcr}$ を下回っていることから、座屈が発生すると判定される。したがって、図1のS11でNGという判定になる。これと同じことが、図13ですべての層で $\alpha_{es} > \alpha_{es,dcr}$ となっていることから読み取れる。つまり、CH1は $i_d$ が比較的小さいことに起因して、設計可能な $\alpha_{es}$ の上限値は $\alpha_{es,dy}$ ではなく $\alpha_{es,dcr}$ により決まり、CH1のブレース断面では座屈が

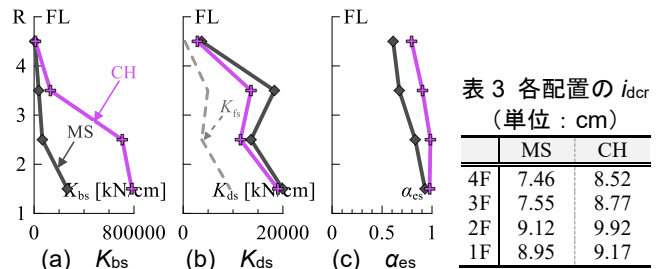


図12  $K_{bs}$ ,  $K_{ds}$ ,  $\alpha_{es}$  の高さ分布

表4 各モデルのブレース断面 (鋼材: BCR295)

|    | MS           |            | CH1          |            | CH2         |            |
|----|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------------|
|    | 部材断面         | $i_d$ [cm] | 部材断面         | $i_d$ [cm] | 部材断面        | $i_d$ [cm] |
| 4F | □-250×250×6  | 9.90       | □-200×200×6  | 7.86       | □-250×250×6 | 9.90       |
| 3F | □-250×250×9  | 9.75       | □-200×200×9  | 7.71       | □-300×300×6 | 11.90      |
| 2F | □-250×250×12 | 9.59       | □-200×200×12 | 7.55       | □-300×300×6 | 11.90      |
| 1F | □-250×250×12 | 9.59       | □-200×200×12 | 7.55       | □-300×300×8 | 11.80      |

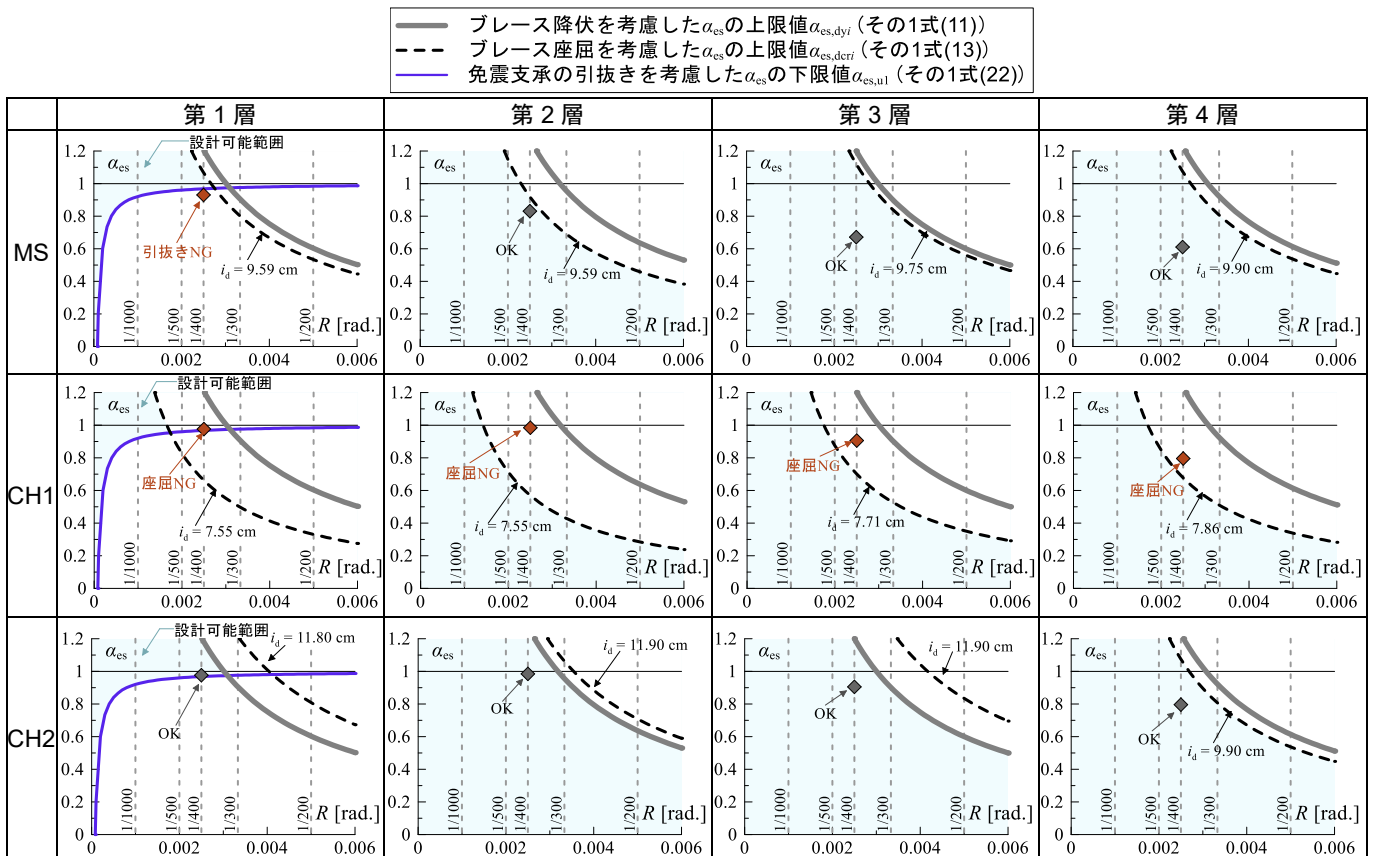


図13 実効変形比に基づく降伏・座屈および引抜きの判定

発生する。一方、CH1 より  $i_d$  が大きいブレース断面の CH2 では、 $i_d$  (表 4)  $>$   $i_{der}$  (表 3) となり、図 1 の S11 で OK という判定となることから、本設計フローでは CH2 では、必要条件 [1] ~ [3] を満たすといえる。次節では、ART HACHI を入力したときの地震応答を確認し、ここでの判定が妥当であることを確認する。

### 3.4 本設計手法での判定と時刻歴応答解析結果の比較

ART HACHI を入力地震動とした時刻歴応答解析を MS, CH1, CH2 に対して行い、得られた最大層間変形角 (解析)、および各層のブレース降伏発生時の層間変形角  $R_{dy}$ 、ブレース座屈発生時の層間変形角  $R_{der}$ 、第 1 層の支承の引抜き発生時の層間変形角  $R_{u,1}$  を図 14 に示す。なお、 $R_{dy,i}$ 、 $R_{der,i}$ 、 $R_{u,1}$  は以下の式 (1) ~ (3) により求められる。

$$R_{dy,i} = \min_j \left( \frac{1}{\alpha_{cs,ij}} \cdot \frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{2}{\sin 2\theta_{ij}} \right) \quad (1)$$

$$R_{der,i} = \min_j \left\{ \left( \frac{\pi i_{d,ij}}{H_i} \right)^2 \frac{\tan \theta_{ij}}{\alpha_{cs,ij}} \right\} \quad (2)$$

$$R_{u,1} = \min_k \left| \frac{-(1 - C_v)\sigma_{0,k}}{(1 - \alpha_{cs,1k})L_{eq,k}} \cdot \frac{A_{H,k}}{K_{vc,k}} \right| \quad (3)$$

図 14 より、MS と CH2 の解析結果は、1/400 rad. 以内に収まっており、図 9(b) に示した応答と概ね等しくなっている。一方、CH1 では、第 1,2,4 層で  $R_{der}$  以上の応答となり、ブレースに座屈が生じた。これに起因して、第 2,4 層では、応答が設計クライテリア以上となった。

図 15 には、Y1 構面の各免震支承の最大引張面圧  $\sigma_{vt}$  の解析値と予測値の比較を示す。なお、同図の  $\sigma_{vt}$  は  $C_v = 0.3$  として上下地震動の影響を考慮しており、 $\sigma_{vt}$  の予測値はその 1 式 (21) により算出している ( $R_i$  には図 9(b) に示した応答を代入した)。いずれのモデルも、X6,8 等の免震支承で、予測値が解析値から若干の乖離がみられたが、全体の傾向としては概ね良好な精度で面圧を予測できている。

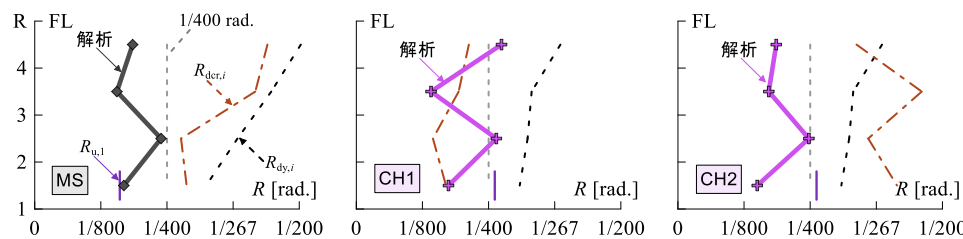


図 14 地震入力時の最大層間変形角

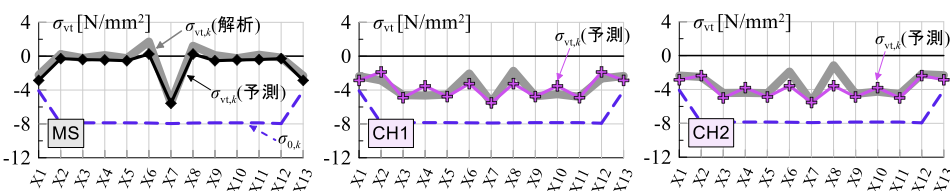


図 15 地震入力時の Y1 構面の最大引張面圧 (上下動を 0.3G として考慮)

MS では特に X6,8 の支承の  $\sigma_{vt}$  が大きく、解析値と予測値ともに  $\sigma_{vt} > 0$  となっていることから引抜きが発生していることがわかる。一方、CH1, CH2 では MS よりも変動面圧が小さく、すべての支承で  $\sigma_{vt} < 0$  となっており引抜きが生じていないことが確認できる。

これらの解析結果および 3.3 節で行った本設計手法の判定結果の比較を、表 5(a)~(c) にモデルごとに示す。MS では引抜きが発生するのを判定できており (表 5(a)), CH1 ではブレースに座屈が発生するのを正しく判定できている (表 5(b))。また、表 5(c) より、CH2 にはブレースの降伏、座屈および免震支承の引抜きが発生しないことを設計時に判定できており、本設計手法は簡便でありながら実用上十分な評価精度を得られることが示された。

## 4. まとめ

本報では、ブレース配置によって異なる、ブレースの降伏・全体座屈および免震支承の引抜きの影響を、実効変形比により評価できることに着目し、実効変形比に基づいたブレース配置の設計手法の提案、およびその設計例を示した。本報その 1・2 を以下に要約する。

- 1) 状態 N, R 解析を免震建物に準用することで、ブレースの実効変形を考慮したバネ系を作成できる。これにより、任意のブレース剛性に対して実効変形比が算出でき、ブレースの降伏・座屈および免震支承の引抜きが発生する実効変形比の範囲を定式化できる。
- 2) ブレースの降伏・座屈および免震支承の引抜きを実効変形比に基づいて評価し、ブレース配置を決定する設計フローを示し、設計例を提示した。判定結果と解析結果が良い対応となっており、本設計手法の有用性が示唆された。

謝辞および参考文献はその 1 にまとめて記す。

表 5 設計時の判定と解析結果

| (a) MS  |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|
|         | 降伏    | 座屈    | 引抜き   |
| 4F      | ○ (○) | ○ (○) | -     |
| 3F      | ○ (○) | ○ (○) | -     |
| 2F      | ○ (○) | ○ (○) | -     |
| 1F      | ○ (○) | ○ (○) | × (×) |
| (b) CH1 |       |       |       |
|         | 降伏    | 座屈    | 引抜き   |
| 4F      | ○ (○) | × (×) | -     |
| 3F      | ○ (○) | × (○) | -     |
| 2F      | ○ (○) | × (×) | -     |
| 1F      | ○ (○) | × (×) | ○ (○) |
| (c) CH2 |       |       |       |
|         | 降伏    | 座屈    | 引抜き   |
| 4F      | ○ (○) | ○ (○) | -     |
| 3F      | ○ (○) | ○ (○) | -     |
| 2F      | ○ (○) | ○ (○) | -     |
| 1F      | ○ (○) | ○ (○) | ○ (○) |

※ ( ) 外は設計時の判定、( ) 内は解析結果を示す

\*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 大学院生  
 \*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)  
 \*3 東京工業大学 未来産業技術研究所 助教・Ph.D.  
 \*4 JFE シビル株式会社  
 \*5 JFE スチール株式会社

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology\*1  
 Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng\*2  
 Assistant Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.\*3  
 JFE Civil Engineering & Construction Corporation\*4  
 JFE Steel Corporation\*5