

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-024-01 改 05
提出年月日	2023年1月26日

原子炉建物の地震応答計算書に関する補足説明資料

2023年1月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

VI-2-2-2「原子炉建物の地震応答計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。
なお、他建物・構築物の地震応答計算書の記載内容を共通的に補足する内容についても、本資料で代表し説明する。

今回提出範囲：

- 別紙 1 地震応答解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較
 - 別紙 1-1 原子炉建物の地震応答解析モデルの各種ばねの算定について
 - 別紙 1-2 地震応答解析モデルにおける基本ケースの設定の考え方について
 - 別紙 1-3 原子炉建物の地震応答解析モデルにおける床剛モデルの妥当性について
- 別紙 2 地震応答解析における耐震壁のせん断スケルトン曲線の設定
- 別紙 3 地震応答解析における材料物性の不確かさに関する検討
 - 別紙 3-1 建物剛性の不確かさによる建物応答への影響に関する考察
 - 別紙 3-2 材料物性の不確かさを考慮した検討に用いる地震動の選定について
 - 別紙 3-3 材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果
 - 別紙 3-4 建物剛性と地盤物性の不確かさを考慮した場合の鉄骨造屋根トラスの影響について
 - 別紙 3-5 積雪荷重の考慮による建物応答への影響について
 - 別紙 3-6 建物剛性の不確かさを考慮した場合の燃料プール及び基礎スラブの影響について
 - 別紙 3-7 建物剛性及び地盤物性の不確かさを考慮した場合の建物-機器連成地震応答解析結果に与える影響
 - 別紙 3-8 機器・配管系の影響検討における刺激係数を考慮した条件比率の算出
- 別紙 4 地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート造部の減衰定数に関する検討
 - 別紙 4-1 原子炉建物の基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する最大応答せん断ひずみ
 - 別紙 4-2 各建物の図面集
- 別紙 5 地震応答解析における原子炉建物の重大事故等時の高温による影響
 - 別紙 5-1 重大事故時等の環境を考慮した原子炉本体地震応答解析モデルの設定
 - 別紙 5-2 重大事故時等の環境を考慮した場合の建物-機器連成地震応答解析結果に与える影響
- 別紙 6 原子炉建物のコンクリート剛性に対する地震観測記録による傾向分析
 - 別紙 6-1 コンクリートの経年劣化の影響について
- 別紙 7 原子炉建物における改造工事に伴う重量増加を反映した地震応答解析
 - 別紙 7-1 原子炉建物に対する改造工事の概要
 - 別紙 7-2 改造工事に伴う重量増加を反映した検討
 - 別紙 7-2-1 改造工事に伴う重量増加を反映した検討における応力平均化の考え方
 - 別紙 7-3 改造工事に伴う重量増加による建物-機器連成地震応答解析結果に与える影響

(参考資料 1) 計算機プログラム (解析コード) の概要

別紙 3-8 機器・配管系の影響検討における

刺激係数を考慮した条件比率の算出

目 次

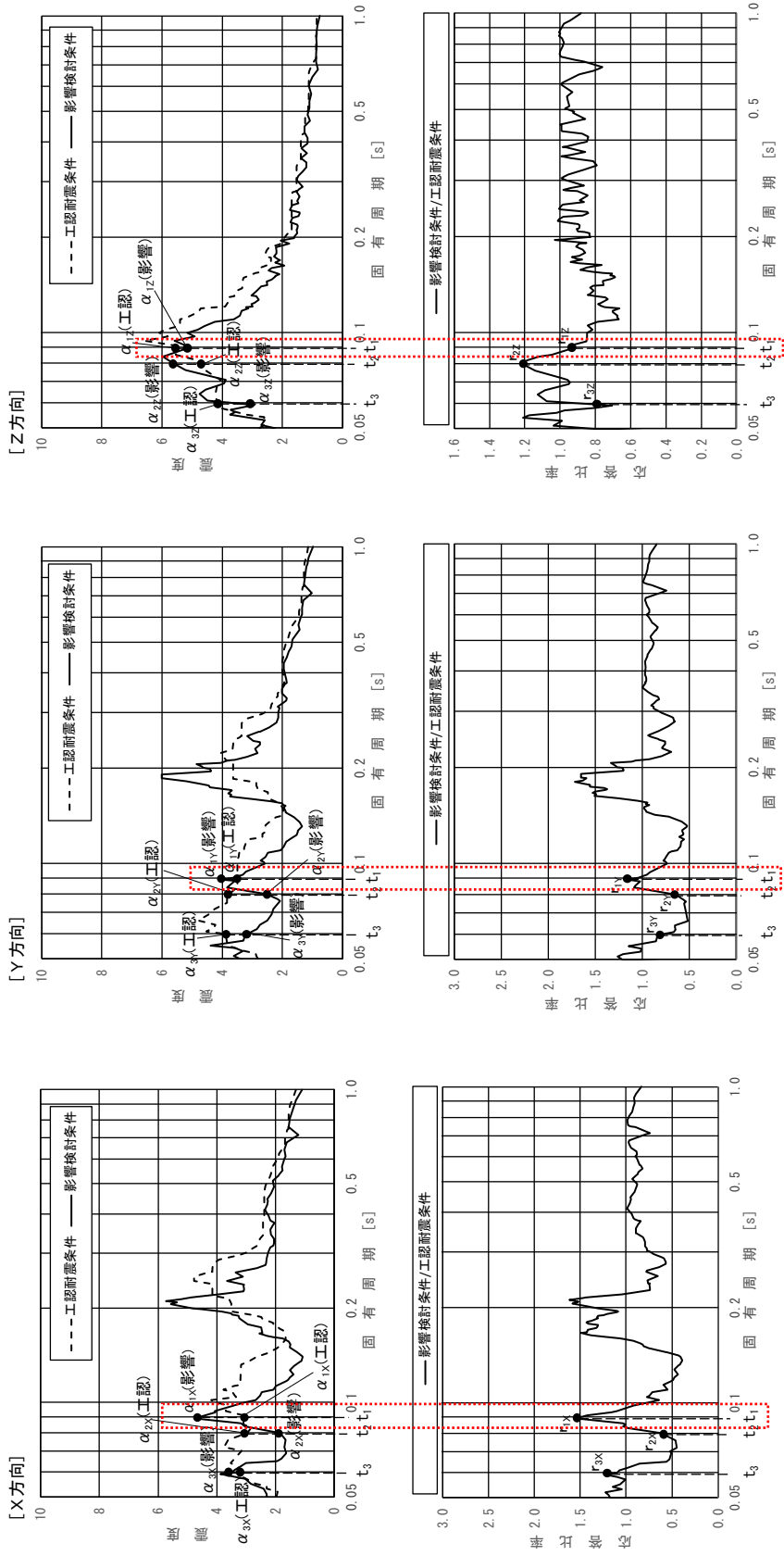
1. 概要	別紙 3-8-1
2. 条件比率の算出方法	別紙 3-8-1
3. スペクトルモード解析との比較	別紙 3-8-4
4. 刺激係数を考慮した条件比率の保守性	別紙 3-8-5
5. 条件比率の算出例及び発生応力の比較	別紙 3-8-6

1. 概要

本資料は、機器・配管系のうちスペクトルモーダル解析を実施している設備の影響検討の簡易評価に適用する刺激係数を考慮した条件比率の算出方法についてまとめたものである。

2. 条件比率の算出方法

本項では、刺激係数を考慮しない条件比率及び刺激係数を考慮した条件比率の算出方法を示す。条件比率の算出方法のイメージを図1に示す。



[刺激係数を考慮しない条件比率 (条件比率①)]

1次モードにおける条件比率 = $\max[r_{1x}, r_{1y}, r_{1z}] \Rightarrow$ 各モードの最大値を簡易評価に適用

[刺激係数を考慮した条件比率 (条件比率②)]

$$1 \text{ 次モードにおける条件比率} = \frac{\sqrt{(\alpha_{1x(\text{影響})} \times \beta_{1x})^2 + (\alpha_{1y(\text{影響})} \times \beta_{1y})^2 + (\alpha_{1z(\text{影響})} \times \beta_{1z})^2}}{\sqrt{(\alpha_{1x(\text{工認})} \times \beta_{1x})^2 + (\alpha_{1y(\text{工認})} \times \beta_{1y})^2 + (\alpha_{1z(\text{工認})} \times \beta_{1z})^2}}$$

\Rightarrow 各モードの最大値を簡易評価に適用

t_1, t_2, t_3 : 設備の固有周期
 $\beta_{1x(y,z)}$: i 次モードの各方向における刺激係数

図1 条件比率算出方法のイメージ

(1) 刺激係数を考慮しない条件比率の算出方法

影響検討においては、影響検討用耐震条件が耐震計算に用いる耐震条件を上回る場合、条件比率と設備の裕度を比較した簡易評価を実施する。この条件比率については、(影響検討用耐震条件) / (耐震計算に用いる耐震条件) にて算出する。具体的には、スペクトルモーダル解析を実施している設備の i 次モードにおける (影響検討用耐震条件) / (耐震計算に用いる耐震条件) による条件比率 (以下「条件比率①」という。) は以下の式(1)にて算出する。

$$[\text{条件比率①}] = \text{MAX} \left(\frac{\alpha_{iX(\text{影響})}}{\alpha_{iX(\text{工認})}}, \frac{\alpha_{iY(\text{影響})}}{\alpha_{iY(\text{工認})}}, \frac{\alpha_{iZ(\text{影響})}}{\alpha_{iZ(\text{工認})}} \right) \dots (1)$$

ここで、

- $\alpha_{iX(\text{影響})}$, $\alpha_{iY(\text{影響})}$, $\alpha_{iZ(\text{影響})}$: 影響検討ケースの各方向の設計震度
- $\alpha_{iX(\text{工認})}$, $\alpha_{iY(\text{工認})}$, $\alpha_{iZ(\text{工認})}$: 工認の耐震計算に用いる各方向の設計震度

ただし、条件比率①は過大な値となる場合もあるため、スペクトルモーダル解析を実施している設備については、刺激係数を考慮してモードごとにより精緻に条件比率を算出する。

(2) 刺激係数を考慮した条件比率の算出方法

スペクトルモーダル解析においては、モード座標系における各モードの応答変位の最大値を設計用床応答スペクトルより求めて、これにモードベクトルを乗じて空間座標系での応答変位に変換し、モード合成を行って地震応答を算出する。

したがって、モード座標系における応答変位の比を算出することにより、今回工認ケースに対する影響検討ケースの影響を把握することができる。

- i 次モードの各方向における設計震度 (固有周期における応答スペクトルの震度) を α_{iX} , α_{iY} , α_{iZ}
- i 次モードの各方向における刺激係数を β_{iX} , β_{iY} , β_{iZ}
- i 次モードの固有角振動数を ω_i

とすると、 i 次モードのモード座標系における応答変位の最大値 $q_{i\text{max}}$ は以下の式(2)のとおり表される。なお、 $q_{i\text{max}}$ 算出にあたっては各方向の最大応答の非同時性を考慮して SRSS 法を適用する。

$$q_{i\text{max}} = \sqrt{\left(\frac{\alpha_{iX} \times \beta_{iX}}{\omega_i^2} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_{iY} \times \beta_{iY}}{\omega_i^2} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_{iZ} \times \beta_{iZ}}{\omega_i^2} \right)^2} \dots (2)$$

したがって、今回工認ケースにおける i 次モードの応答変位の最大値 $q_{i\text{max}(\text{工認})}$ と影響検討ケースにおける応答変位の最大値 $q_{i\text{max}(\text{影響})}$ の比 s_i は、以下の式(3)により算出される。

$$\begin{aligned}
s_i &= \frac{q_{\text{imax(影響)}}}{q_{\text{imax(工認)}}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\alpha_{iX(\text{影響})} \times \beta_{iX}}{\omega_i^2}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{iY(\text{影響})} \times \beta_{iY}}{\omega_i^2}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{iZ(\text{影響})} \times \beta_{iZ}}{\omega_i^2}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\alpha_{iX(\text{工認})} \times \beta_{iX}}{\omega_i^2}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{iY(\text{工認})} \times \beta_{iY}}{\omega_i^2}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{iZ(\text{工認})} \times \beta_{iZ}}{\omega_i^2}\right)^2}} \\
&= \frac{\sqrt{\left(\alpha_{iX(\text{影響})} \times \beta_{iX}\right)^2 + \left(\alpha_{iY(\text{影響})} \times \beta_{iY}\right)^2 + \left(\alpha_{iZ(\text{影響})} \times \beta_{iZ}\right)^2}}{\sqrt{\left(\alpha_{iX(\text{工認})} \times \beta_{iX}\right)^2 + \left(\alpha_{iY(\text{工認})} \times \beta_{iY}\right)^2 + \left(\alpha_{iZ(\text{工認})} \times \beta_{iZ}\right)^2}} \dots (3)
\end{aligned}$$

式(3)により各モードにおける応答変位の比 s_i （以下「条件比率②」という。）を算出し、その最大値 s_{max} （ $= \max(s_1, s_2, \dots, s_n)$ ）を刺激係数を考慮した条件比率とする。

3. スペクトルモーダル解析との比較

設備の耐震評価にあたっては、式(2)より算出した*i*次モードの応答変位の最大値にモードベクトルを乗じて空間座標系に変換し（式(4)）、モード合成を行うことによって地震荷重（あるいは地震モーメント）を算出する（式(5)）。ここで、モード合成にあたっては各モードの最大応答の非同時性を考慮してSRSS法を適用する。

$$u_{\text{imax}} = q_{\text{imax}} \varphi_i \dots (4)$$

$$u_{\text{max}} = \sqrt{(u_{1\text{max}})^2 + (u_{2\text{max}})^2 + \dots + (u_{n\text{max}})^2} \propto F \dots (5)$$

ここで、

- u_{imax} : 空間座標系における*i*次モードの応答変位の最大値
- u_{max} : 空間座標系における応答変位の最大値
- φ_i : *i*次モードの固有ベクトルの成分
- F : 地震荷重（あるいは地震モーメント）

なお、実際の工認評価におけるスペクトルモーダル解析では各加振方向、各モードの地震荷重（あるいは地震モーメント）を算出し、モード合成を行った後に加振方向の合成を行うことから、前述の手法と合成の順序が異なっているが、前述の手法と同一の結果が得られることを以下に示す。

実際の工認評価のスペクトルモーダル解析における手法（モード合成⇒加振方向合成）を算出方法1、刺激係数を考慮した条件比率の算出に適用する手法（加振方向合成⇒モード合成）を算出方法2とする。方法1によって算出される地震荷重（あるいは地震モーメント） $F_{\text{方法1}}$ は(6)式のとおり表される。

$$F_{X(Y,Z)} = \sqrt{F_{1X(Y,Z)}^2 + F_{2X(Y,Z)}^2 + \dots + F_{nX(Y,Z)}^2}$$

$$F_{\text{方法1}} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2} \dots (6)$$

ここで、

- $F_{X(Y,Z)}$: 空間座標系におけるX(Y,Z)方向加振による地震荷重の最大値
- $F_{iX(Y,Z)}$: 空間座標系におけるX(Y,Z)方向加振によるi次モードの地震荷重の最大値

また、方法2によって算出される地震荷重（あるいは地震モーメント） $F_{\text{方法2}}$ は(7)式のとおり表される。

$$F_{i\text{次}} = \sqrt{F_{iX}^2 + F_{iY}^2 + F_{iZ}^2}$$

$$F_{\text{方法2}} = \sqrt{F_{1\text{次}}^2 + F_{2\text{次}}^2 + \dots + F_{n\text{次}}^2} \dots (7)$$

ここで、

- $F_{i\text{次}}$: 空間座標系におけるi次モードの地震荷重の最大値

(6)式及び(7)式に示すとおり、モード合成及び加振方向合成はいずれもSRSS法で実施することから、以下が成り立つ。

$$F_{\text{方法1}} = F_{\text{方法2}}$$

4. 刺激係数を考慮した条件比率の保守性

本項では、刺激係数を考慮した条件比率の保守性について示す。

影響検討ケースにおける空間座標系によるi次モードの応答変位の最大値を $u_{\text{imax(影響)}}$ とすると、 $u_{\text{imax(影響)}}$ は(3)式及び(4)式より(8)式のとおり表される。

$$u_{\text{imax(影響)}} = q_{\text{imax(影響)}} \varphi_i = s_i q_{\text{imax(工認)}} \varphi_i \dots (8)$$

(8)式について、(5)式と同様にSRSS法を適用してモード合成を行うと、影響検討ケースにおける空間座標系による応答変位の最大値 $u_{\text{max(影響)}}$ は(9)式のとおり表される。

$$u_{\text{max(影響)}} = \sqrt{(s_1 q_{1\text{max(工認)}} \varphi_1)^2 + (s_2 q_{2\text{max(工認)}} \varphi_2)^2 + \dots + (s_n q_{n\text{max(工認)}} \varphi_n)^2} \dots (9)$$

一方、刺激係数を考慮した条件比率 s_{\max} ($= \max(s_1, s_2, \dots, s_n)$) を用いて今回工認ケースにおける空間座標系による応答変位の最大値 $u_{\max(\text{工認})}$ から影響検討ケースにおける応答変位の最大値を算出し、その値を $u_{\max(\text{影響,比率から算出})}$ とすると、 $u_{\max(\text{影響,比率から算出})}$ は(10)式のとおり表される。

$$u_{\max(\text{影響,比率から算出})} = s_{\max} u_{\max(\text{工認})} \quad \dots (10)$$

(4)式及び(5)式より(10)式を変形すると

$$\begin{aligned} u_{\max(\text{影響,比率から算出})} &= s_{\max} u_{\max(\text{工認})} \\ &= s_{\max} \sqrt{(u_{1\max(\text{工認})})^2 + (u_{2\max(\text{工認})})^2 + \dots + (u_{n\max(\text{工認})})^2} \\ &= s_{\max} \sqrt{(q_{1\max(\text{工認})} \varphi_1)^2 + (q_{2\max(\text{工認})} \varphi_2)^2 + \dots + (q_{n\max(\text{工認})} \varphi_n)^2} \\ &= \sqrt{(s_{\max} q_{1\max(\text{工認})} \varphi_1)^2 + (s_{\max} q_{2\max(\text{工認})} \varphi_2)^2 + \dots + (s_{\max} q_{n\max(\text{工認})} \varphi_n)^2} \quad \dots (11) \end{aligned}$$

ここで、 $s_{\max} = \max(s_1, s_2, \dots, s_n)$ であることから、(12)式が成り立つ。

$$\begin{aligned} &\sqrt{(s_1 q_{1\max(\text{工認})} \varphi_1)^2 + (s_2 q_{2\max(\text{工認})} \varphi_2)^2 + \dots + (s_n q_{n\max(\text{工認})} \varphi_n)^2} \\ &\cong \sqrt{(s_{\max} q_{1\max(\text{工認})} \varphi_1)^2 + (s_{\max} q_{2\max(\text{工認})} \varphi_2)^2 + \dots + (s_{\max} q_{n\max(\text{工認})} \varphi_n)^2} \quad \dots (12) \end{aligned}$$

(9)式、(11)式、(12)式より(13)式が成り立つ。

$$u_{i\max(\text{影響})} \cong u_{\max(\text{影響,比率から算出})} \quad \dots (13)$$

したがって、刺激係数を考慮した条件比率はモード合成を考慮せず、各モードの応答比率の最大値を適用することから、スペクトルモーダル解析による耐震評価よりも保守的な値となる。

5. 刺激係数を考慮した条件比率の算出例及び発生応力の比較

本項では、簡単な仮定条件を用いて刺激係数を考慮した条件比率の算出方法の例を示し、さらに実機配管を例に用いて刺激係数を考慮した条件比率が詳細評価（スペクトルモーダル解析）よりも安全側であることを示す。

(1) 仮定条件による条件比率算出例

刺激係数を考慮した条件比率の算出例を表4-1に示す。

1次モードでは、耐震計算に用いる耐震条件と影響検討用耐震条件の設計震度を比較し、鉛直方向において影響検討ケースの設計震度が3倍になるため、条件比率①は3.00となる。一方、刺激係数を考慮すると、鉛直方向の刺激係数は非常に小さな値であり、刺激係数の大きなNS方向が支配的となるため条件比率②は0.83となる。

2次モード及び3次モードにおいても同様の手法で条件比率を算出し、全モードの最大値から全体の条件比率を求めると、条件比率①では刺激係数が小さく応答にほとんど寄与しない1次モードの鉛直方向の震度比により条件比率①が定まるが、条件比率②は応答への影響度を反映して2次モードの比率で決まり、条件比率①より小さい値となることがわかる。

表 4-1 刺激係数を考慮した条件比率の算出例

振動モード	設計震度						刺激係数			条件比率①*1	条件比率②*2
	耐震計算に用いる耐震条件			影響検討用耐震条件							
	NS	EW	鉛直	NS	EW	鉛直	NS	EW	鉛直		
1次	5.0	5.0	5.0	4.0	5.0	15.0	0.15	0.02	0.01	3.00	0.83
2次	5.0	5.0	5.0	8.0	8.0	6.0	0.04	0.02	0.02	1.60	1.55
3次	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	6.0	0.02	0.02	0.10	1.20	1.18
全体の条件比率（各モードの最大値）										3.00	1.55

注記*1：式(1)による条件比率

*2：式(3)による条件比率

(2) 実例による条件比率算出例及び算出応力の比較

残留熱除去系配管（RHR-PD-4）における建物剛性変動考慮耐震条件による条件比率の算出結果を表 4-2 に示し、工認耐震条件における発生応力、工認耐震条件における発生応力に条件比率を乗じて算出した発生応力及び建物剛性変動考慮耐震条件を適用した耐震評価による発生応力を表 4-3 に示す。なお、表 4-3 に示す発生応力は地震慣性力による応力であり、内圧等による発生応力を含まない値である。

表 4-3 のとおり、刺激係数を考慮した条件比率（条件比率②）より算出した発生応力は建物剛性変動考慮耐震条件を適用した耐震評価による発生応力を上回っており、刺激係数を考慮した条件比率が保守的な値であることがわかる。

表 4-2 刺激係数を考慮した条件比率の算出例 (RHR-PD-4)

振動モード	固有周期 (s)	設計震度						刺激係数			条件比率 ①*1	条件比率 ②*2
		工認耐震条件 (設計用床応答 スペクトル I)			建物剛性変動考慮 耐震条件							
		NS	EW	鉛直	NS	EW	鉛直	NS	EW	鉛直		
1次										1.31	1.07	
2次										1.23	1.11	
3次										1.64	1.24	
4次										1.34	1.13	
		全体の条件比率 (各モードの最大値)									1.64	1.24

注記*1 : 式(1)による条件比率

*2 : 式(3)による条件比率

表 4-3 地震慣性力による算出応力の比較 (RHR-PD-4)

評価点	応力分類	算出応力 (地震慣性力による応力) *1, *2 [MPa]				許容 応力 [MPa]
		工認評価	工認評価×条 件比率①	工認評価×条 件比率②	詳細評価*3	
31N	一次応力	106	174	132	118	366
	一次+ 二次応力	359 (0.0161)	589	446	401 (0.0341)	366

注記*1 : (条件比率による発生応力) = (工認耐震条件における発生応力) × (条件比率)
として算出

*2 : カッコ内は疲労累積係数 (地震慣性力以外による発生応力を含めたピーク応力にて算出した値) を示す

*3 : 建物剛性変動考慮耐震条件を用いたスペクトルモーダル解析による算出値