

別紙 2

水平 2 方向を考慮した耐震評価について

工事計画認可申請における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価の評価部位に対し、耐震安全上考慮する必要のある経年劣化事象が想定される場合は、経年劣化事象を考慮した水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価を行う。

水平 2 方向を考慮した耐震評価については、工事計画認可申請にて水平 2 方向を考慮した耐震評価を行う設備を対象とする。評価方針を以下に示す。

1. 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価方針

機器・配管系において、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合に影響を受ける可能性がある設備（部位）の評価を行う。

評価対象は、耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故対処施設の機器・配管系並びにこれらの施設への波及的影響防止のために耐震評価を実施する設備とする。

対象とする設備を機種ごとに分類し、それぞれの構造上の特徴により荷重の伝達方向、その荷重を受ける構造部材の配置及び構成等により水平 2 方向の地震力による影響を受ける可能性のある設備（部位）を抽出する。

構造上の特徴により影響の可能性のある設備（部位）は、水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響の検討を実施する。水平各方向の地震力が 1 : 1 で入力された場合の発生値を従来の評価結果の荷重又は算出応力等を水平 2 方向及び鉛直方向に整理して組み合わせる又は新たな解析等により高度化した手法を用いる等により、水平 2 方向の地震力による設備（部位）に発生する荷重や応力を算出する。

これらの検討により、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせた荷重や応力の結果が従来の発生値と同等である場合は影響がある設備として抽出せず、従来の発生値を超えて耐震性への影響が懸念される場合は、設備が有する耐震性への影響を確認する。

設備が有する耐震性への影響が確認された場合は、詳細な手法を用いた検討等、新たに設計上の対応策を講じる。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価は、基準地震動 S_0 を対象とするが、複数の基準地震動 S_0 における地震動の特性及び包絡関係、地震力の包絡関係を確認し、代表可能である場合は代表の基準地震動 S_0 にて評価する。また、水平各方向の地震動は、それぞれの位相を変えた地震動を用いることを基本とするが、保守的な手法を用いる場合もある。

2. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法

機器・配管系において、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響を受ける可能性があり、水平 1 方向及び鉛直方向の従来評価に加え、更なる設計上の配慮が必要な設備について、構造及び発生値の増分の観点から抽出し、影響を評価する。影響評価は従来設計で用いている質点系モデルによる評価結果を用いて行うことを基本とする。影響評価のフローを第 1 図に示す。

なお、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響を検討する際は、地震時に水平 2 方向及び鉛直方向それぞれの最大応答が同時に発生する可能性は極めて低いとした考え方である Square-Root-of-the-Sum-of-the-Squares 法（以下「最大応答の非同時性を考慮した SRSS 法」という。）又は組合せ係数法（1.0 : 0.4 : 0.4）を適用する。この組合せ方法については、現状の耐震評価は基本的におおむね弾性範囲でとどまる体系であることに加え、国内と海外の機器の耐震解析は、基本的に線形モデルにて実施している等類似であり、水平 2 方向及び鉛直方向の位相差は機器の応答にも現れることから、米国 Regulatory Guide 1.92 の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考としているものである。

① 評価対象となる設備の整理

耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系並びにこれらの施設への波及的影響防止のために耐震評価を実施する設備を評価対象とし、代表的な機種ごとに分類し整理する（第 1 図 ①）。

② 構造上の特徴による抽出

機種ごとに構造上の特徴から水平 2 方向の地震力が重複する観点、もしくは応答軸方向以外の振動モード（ねじれ振動等）が生じる観点にて検討を行い、水平 2 方向の地震力による影響の可能性がある設備を抽出する（第 1 図 ②）。

③ 発生値の増分による抽出

水平 2 方向の地震力による影響の可能性がある設備に対して、水平 2 方向の地震力が各方向 1 : 1 で入力された場合に各部にかかる荷重や応力を求め、従来の水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる設計に対して、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した発生値の増分を用いて影響を検討し、耐震性への影響が懸念される設備を抽出する。

また、建物・構築物及び屋外重要土木構築物の検討により、機器・配管系への影響の可能性のある部位が抽出された場合は、機器・配管系への影響を評価し、耐震性への影響が懸念される設備を抽出する。

影響の検討は、機種ごとの分類に対して地震力の寄与度に配慮し耐震裕度が小さい設備（部位）を対象とする（第 1 図 ③）。

④ 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価

③の検討において算出された荷重や応力を用いて、設備の耐震性への影響を確認する（第 1 図 ④）。

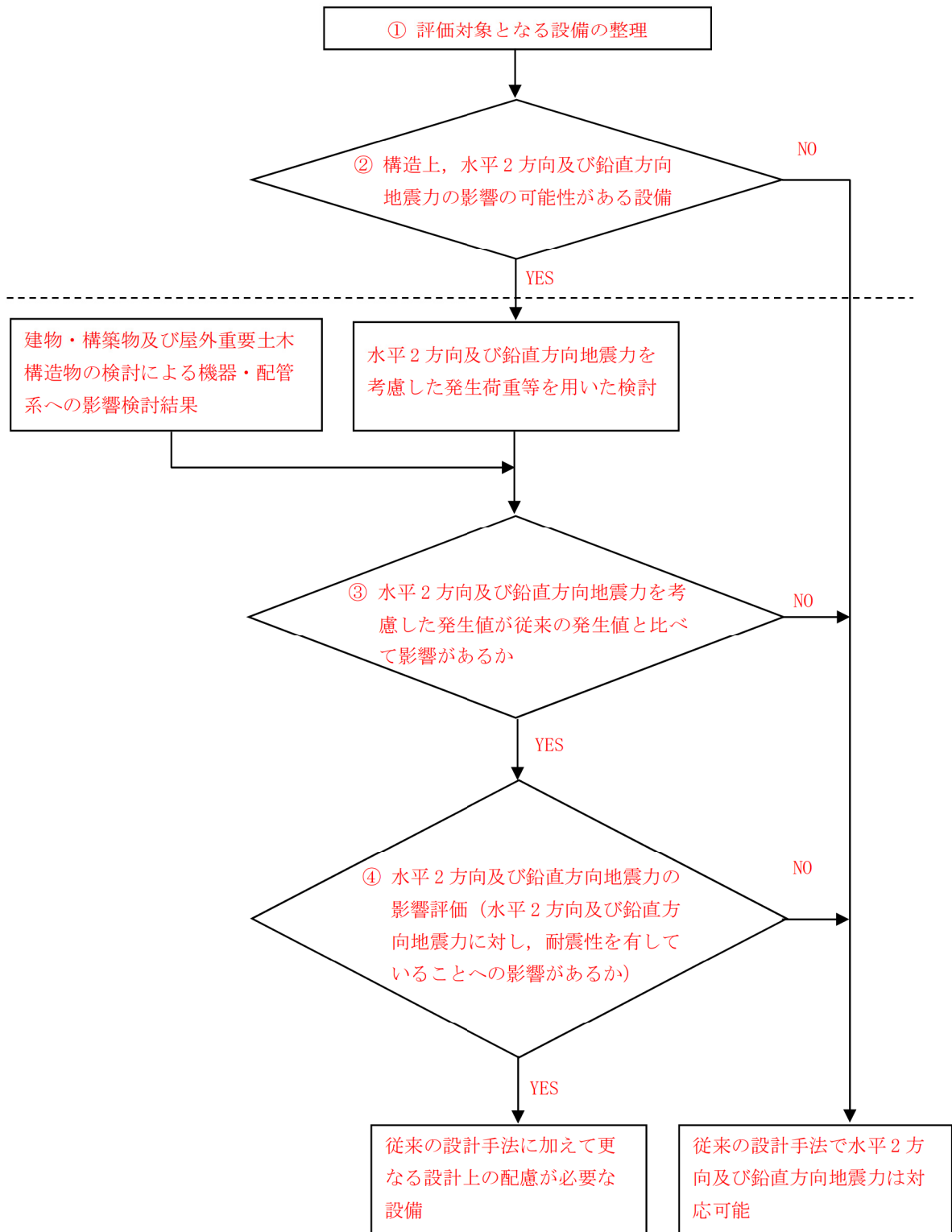


図 1 水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した影響評価フロー

3. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価設備（部位）の抽出

評価対象設備を機種ごとに分類した結果を、第 3-2-1 表に示す。機種ごとに分類した設備の各評価部位、応力分類に対し構造上の特徴から水平 2 方向の地震力による影響を水平 2 方向の地震力が重複する観点より検討し、影響の可能性のある設備を抽出した。

(1) 水平 2 方向の地震力が重複する観点

水平 1 方向の地震力に加えて、さらに水平直交方向に地震力が重複した場合、水平 2 方向の地震力による影響を検討し、影響が軽微な設備以外の影響検討が必要となる可能性があるものを抽出する。以下の場合には、水平 2 方向の地震力により影響が軽微な設備であると整理した（別紙 4.1 参照）。なお、ここでの影響が軽微な設備とは、構造上の観点から発生応力への影響に着目し、その増分が 1 割程度以下となる機器を分類しているが、水平 1 方向地震力による裕度（許容応力／発生応力）が 1.1 未満の機器については個別に検討を行うこととする。

a. 水平 2 方向の地震力を受けた場合でも、その構造により水平 1 方向の地震力しか負担しないもの

横置き容器等は、水平 2 方向の地震力を想定した場合、水平 1 方向を拘束する構造であることや水平各方向で振動特性及び荷重の負担断面が異なる構造であることにより、特定の方向の地震力の影響を受ける部位であるため、水平 1 方向の地震力しか負担しないものとして分類した

b. 水平 2 方向の地震力を受けた場合、その構造により最大応力の発生箇所が異なるもの

一様断面を有する容器類の胴板等は、水平 2 方向の地震力を想定した場合、それぞれの水平方向地震力に応じて応力が最大となる箇所があることから、最大応力の発生箇所が異なり、水平 2 方向の地震力を組み合わせても影響が軽微であるものとして分類した。その他の設備についても同様の理由から最大応力の発生箇所が異なり、水平 2 方向の地震力を組み合わせても影響が軽微であるものとして分類した。

c. 水平 2 方向の地震力を組み合わせても水平 1 方向の地震による応力と同等と言えるもの

原子炉圧力容器スタビライザ及び格納容器スタビライザは、周方向 8 箇所を支持する構造で配置されており、水平 1 方向の地震力を 6 体で支持する設計としており、水平 2 方向の地震力を想定した場合、地震力を負担する部位が増え、また、最大反力を受けもつ部位が異なることで、水平 1 方向の地震力による荷重と水平 2 方向の地震力を想定した場合における荷重が同等になるものであり、水平

2方向の地震を組み合わせても1方向の地震による応力と同等のものと分類した。

スタビライザと同様の支持方式を有するその他の設備についても、同様の理由から水平2方向の地震を組み合わせても1方向の地震による応力と同様のものと分類した。

d. 従来評価において、水平2方向の考慮をした評価を行っているもの

蒸気乾燥器支持ブラケット等は、従来評価において、水平2方向地震を考慮した評価を行っているため、水平2方向の影響を考慮しても影響がないものとして分類した。

(2) 水平方向とその直交方向が相関する振動モード（ねじれ振動等）が生じる観点

水平方向とその直交方向が相関する振動モードが生じることで優位な影響が生じる可能性のある設備を抽出する。

機器・配管系設備のうち、水平方向の各軸方向に対して均等な構造となっている機器は、評価上有意なねじれ振動は生じない。

一方、3次元的な広がりを持つ配管系等は、系全体として考えた場合、有意なねじれ振動が発生する可能性がある。しかし、水平方向とその直交方向が相関する振動が想定される設備は、従来設計より3次元のモデル化を行っており、その振動モードは適切に考慮した評価としているため、この観点から抽出される機器は無かった。

(3) 水平1方向及び鉛直方向地震力に対する水平2方向及び鉛直方向地震力の増分の観点

(1)及び(2)にて影響の可能性のある設備について、水平2方向の地震力が各方向1:1で入力された場合に各部にかかる荷重や応力を求め、従来の水平1方向及び鉛直方向地震力の設計手法による発生値と比較し、その増分により影響の程度を確認し、耐震性への影響が懸念される設備を抽出した。

水平1方向に対する水平2方向の地震力による発生値の増分の検討は、機種毎の分類に対して地震力の寄与度に配慮し耐震裕度が小さい設備(部位)を対象とする。別紙4.4に対象の考え方を示し、別紙1.4表に(1)及び(2)において抽出された設備のうち対象とした部位や応力分類の詳細を示す。水平2方向の地震力の組合せは米国 Regulatory Guide1.92の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考として非同時性を考慮したSRSS法により組合せ、発生値の増分を算出する。増分の算出は、従来の評価で考慮している保守性により増分が低減又は包絡されることも考慮する。算出の方法を以下に示す。

- ・ 従来の評価データを用いた簡易的な算出では、地震・地震以外の応力に分離可能なものは地震による発生値のみを組み合わせた後、地震以外による応力と組み合わせ算出する。

- ・ 設備（部位）によっては解析等で求められる発生荷重より大きな設計荷重を用いているものもあるため、設計荷重が上記組合せによる発生値を上回ることを確認したものは、水平 2 方向の地震力による発生値の増分はないものとして扱う。
- ・ 応答軸が明確な設備で、設備の応答軸の方向あるいは厳しい応力が発生する向きへ地震力を入力している場合は、耐震性への影響が懸念されないものとして扱う。

今回の耐震計算では、一部設備については、建物・構築物、土木構造物及び建屋－機器連成解析モデルにおける地震応答解析から得られる最大応答加速度（ZPA），設計用床応答曲線及び地震荷重（せん断力，モーメント及び軸力）に係数倍した耐震評価条件（以下，本資料では「設計用地震力」という。）を用いている。水平 2 方向の地震力は、水平方向の地震力に対する方向性を踏まえれば、水平 1 方向の地震力を $\sqrt{2}$ 倍以上した地震力を耐震評価条件とすれば、水平 2 方向の地震力による増分を考慮したといえる。これより、 $\sqrt{2}$ 倍以上の設計用地震力を適用した設備については、水平 2 方向及び鉛直方向による地震力に対する影響の懸念はないと整理する。

4. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価

3. (3)において抽出された設備について、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を想定した発生値（発生荷重，発生応力，応答加速度）を以下の方法により算出する。発生値の算出における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せは、米国 Regulatory Guide 1.92 の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考として非同時性を考慮した SRSS 法を適用する。

(1) 従来評価データを用いた算出

従来の水平 1 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせた評価結果を用いて、以下の条件により水平 2 方向及び鉛直方向の地震力に対する発生値を算出することを基本とする。

- ・ 水平各方向及び鉛直方向地震力をそれぞれ個別に用いて従来の発生値を算出している設備は、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせて水平 2 方向を考慮した発生値の算出を行う。

$$\text{水平 2 方向発生値} = \sqrt{\{(\text{NS 方向発生値})^2 + (\text{EW 方向発生値})^2 + (\text{UD 方向発生値})^2\}}$$

- ・ 水平 1 方向と鉛直方向の地震力を組合せた上で従来の発生値を各方向で算出している設備は、鉛直方向を含んだ水平各方向別の発生値を組み合わせて水平 2 方向を考慮した発生値の算出を行う。

$$\text{水平 2 方向発生値} = \sqrt{\{(\text{NS+UD 方向地震力による発生値})^2 + (\text{EW+UD 方向地震力による発生値})^2\}}$$

- ・ 水平各方向を包絡した床応答曲線による地震力と鉛直方向の地震力を組み合わせた上で従来の発生値を算出している設備は、鉛直方向を含んだ水平各方向同一の

発生値を組み合わせて水平 2 方向を考慮した発生値の算出を行う。

$$\text{水平 2 方向発生値} = \sqrt{\{(\text{NS+UD 方向地震力による発生値})^2 + (\text{NS+UD 方向地震力による発生値})^2\}}$$

$$\text{または, } \sqrt{\{(\text{EW+UD 方向地震力による発生値})^2 + (\text{EW+UD 方向地震力による発生値})^2\}}$$

また、算出にあたっては必要に応じて以下も考慮する。

- ・ 発生値が地震以外の応力成分を含む場合、地震による応力成分と地震以外の応力成分を分けて算出する。

5. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価結果

4. の影響評価条件において算出した発生値に対して設備の耐震性への影響を確認する。評価した内容を設備（部位）毎に以下に示し、その影響評価結果については重大事故等の状態も考慮した結果について別紙 4.3 に示す。

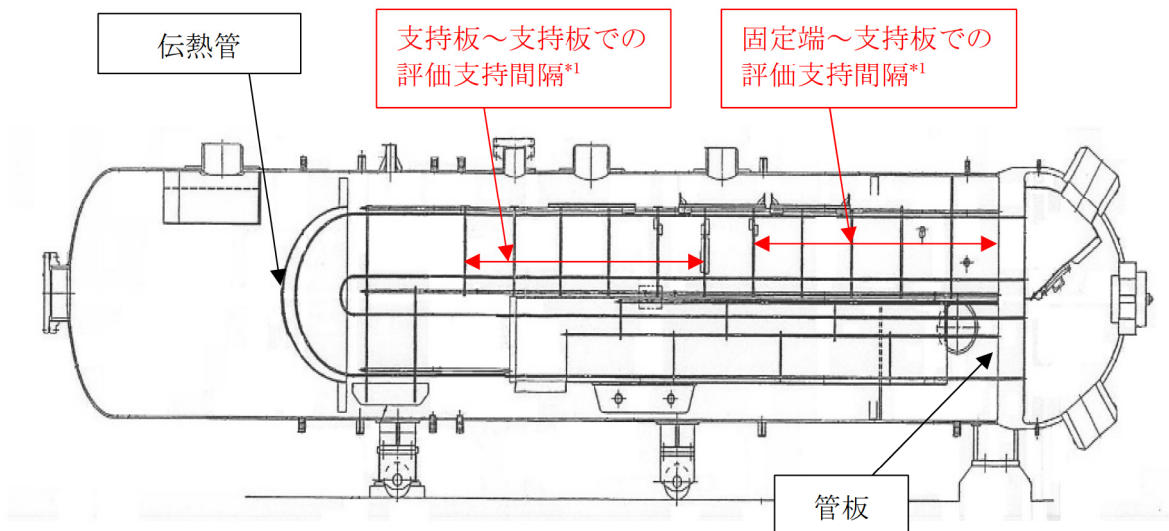
腐食（流れ加速型腐食）に対する耐震安全評価について

2. 第3給水加熱器の伝熱管の耐震安全性評価について

給水加熱器については、経年劣化事象として管支持板の腐食が想定され、伝熱管支持間隔の拡大により、伝熱管の耐震安全性に影響を及ぼす可能性があるため、耐震安全性評価を実施した。

なお、設計上の施栓基準である「固定端（管板）から支持板」、「支持板から支持板」までのそれぞれの伝熱管の支持間隔^{*1}喪失（支持長さ 2.5 スパン）を考慮し、伝熱管の耐震評価を実施した。

第3給水加熱器の構造図を図1に示す。



*1：管支持板の間隔は、同じ方向からの支持の間隔を1スパンとする。

図1 第3給水加熱器構造図

第3給水加熱器伝熱管の主な諸元を表1に示す。

表1 第3給水加熱器伝熱管の主な諸元

項目	記号	諸元
材質	—	SUS27TB
外径	Do	
内径	Di	
板厚	t	
運転圧力（管側）（運転データより）	P1	
運転圧力（胴側）（熱精算図より）	P2	
支持間隔（固定（管板）～支持（管支持板））	L	
支持間隔（支持（管支持板）～支持（管支持板））	L	
許容応力	—	166 MPa

評価に用いる床応答スペクトルを図2に示す。

プラント名 : 東海第二発電所
構造物名 : タービン建屋
方向 : 水平方向
波形名 : Sd-D1、Sd-11、Sd-12、Sd-13、Sd-14、Sd-21、Sd-22 及び Sd-31
(柔構造のため 1/2 Sd を評価に用いる)
標高 : EL8.200m
減衰 : 1.0 (%)

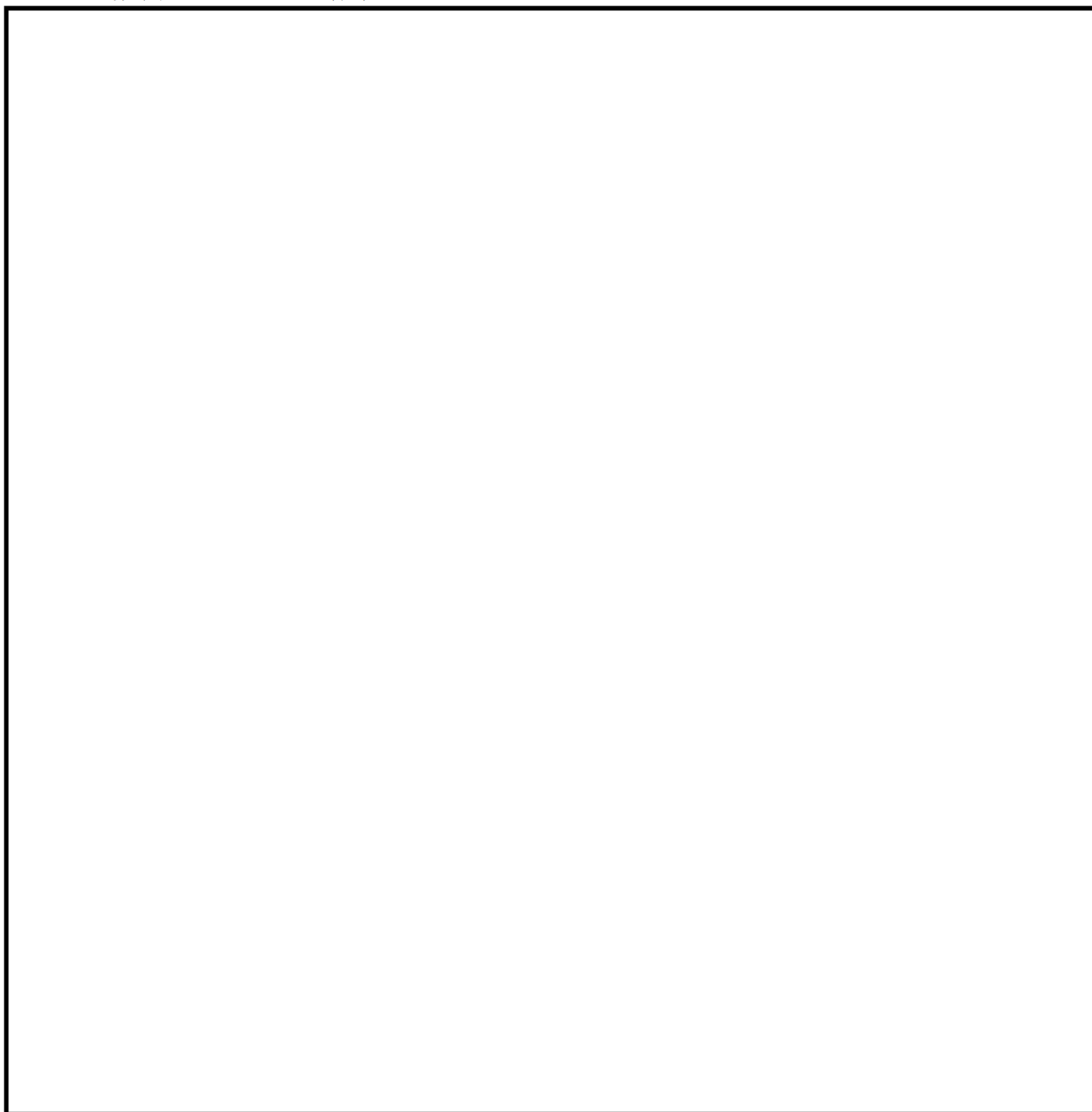


図2 第3 給水加熱器設置場所 (タービン建屋 1 階) の床応答スペクトル

片方の端部形状が固定端，支持端であっても計算手法については同様であるため，評価結果において発生応力の高い「支持板から支持板」の計算過程を以下に示す。

(1) 固有振動数の算出

① 伝熱管の断面二次モーメント： I [m⁴]を以下により求める。

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) \\ &= \frac{\pi}{64} ((\text{□})^4 - (\text{□})^4) \\ &= \text{□} \times 10^{-9} \text{ [m}^4\text{]} \end{aligned}$$

D_o ：伝熱管外形[m]

D_i ：伝熱管内径[m]

② 伝熱管の単位長さ当たりの重量： m [kg/m]を以下により求める。

$$\begin{aligned} m &= \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \times \gamma \\ &= \frac{\pi}{4} ((\text{□})^2 - (\text{□})^2) \times 8030 \\ &= 0.375882 \text{ [kg/m]} \end{aligned}$$

γ ：伝熱管比重[kg/m³]

(機械工学便覧 第1章 工業材料一般 (材料学より))

③ チューブの相当重量[kg/m]： m_e を以下より求める。

$$m_e = m_{e1} + m_{e2} + m_{e3}$$

m_{e1} ：チューブ内付加重量[kg/m]

m_{e2} ：チューブ外付加重量[kg/m]

m_{e3} ：チューブの単位当たりの重量[kg/m]

$$m_{e1} [\text{lb/ft}] = 0.00545 \times \rho_i [\text{lb/ft}^3] \times D_i^2 [\text{in}]$$

(「STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION (TEMA) NINTH EDITION V-7.1」より)

$$\begin{aligned} m_{e1} [\text{kg/m}] &= 0.00545 \times \rho_i [\text{lb/ft}^3] \times D_i^2 [\text{in}] \times \frac{0.453592}{0.3048} \\ &= 0.00545 \times \text{□} [\text{lb/ft}^3] \times (\text{□})^2 [\text{in}] \times \frac{0.453592}{0.3048} \\ &= \text{□} [\text{kg/m}] \end{aligned}$$

ρ_i ：内部流体重量[lb/ft³]

(内部流体の温度及び圧力より非体積を算出)

$$\begin{aligned}
me2[\text{kg/m}] &= 0.00545 \times \rho_o[\text{lb/ft}^3] \times Do^2[\text{in}] \times \frac{0.453592}{0.3048} \\
&= 0.00545 \times \boxed{} [\text{lb/ft}^3] \times (\boxed{})^2[\text{in}] \times \frac{0.453592}{0.3048} \\
&= \boxed{} [\text{kg/m}]
\end{aligned}$$

ρ_o : 外部流体重量[lb/ft^3]

(外部流体の圧力から飽和蒸気の非体積を算出)

$$me3 = m = \boxed{} [\text{kg/m}]$$

したがって、チューブの相当重量 : me は

$$\begin{aligned}
me &= me1 + me2 + me3 \\
&= \boxed{} + \boxed{} + \boxed{} \\
&= \boxed{} [\text{kg/m}]
\end{aligned}$$

④ 伝熱管の固有振動数 (1次) : $fn[\text{Hz}]$ を以下により求める。

$$\begin{aligned}
fn &= \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \times \sqrt{\frac{E \times 10^6 \times I}{me}} && \text{(機械工学便覧 A3編 力学・機械力学より)} \\
&= \frac{\lambda^2}{2 \times 3.14 \times (\boxed{})^2} \times \sqrt{\frac{1.824 \times 10^5 \times 10^6 \times \boxed{}}{\boxed{}}} \\
&= \boxed{} [\text{Hz}]
\end{aligned}$$

λ : 振動係数

(機械工学便覧 A3編 力学・機械力学 表19より引用)

L : 管支持板スパン[m]

E : 伝熱管縦弾性係数

(2005 設計・建設規格 第I編 付録図表Part6 I-付録図表-99より)

よって固有周期 (1次) [s] : T は以下となる。

$$\begin{aligned}
T &= \frac{1}{fn} \\
&= \frac{1}{\boxed{}} = \boxed{} [\text{s}]
\end{aligned}$$

(2) 発生応力の算出

① チューブの断面係数 : $Z[\text{m}^3]$ を以下より求める。

$$\begin{aligned}
Z &= \frac{\pi (Do^4 - Di^4)}{32 Do} \\
&= \frac{\pi}{32} \times \frac{((\boxed{})^4 - (\boxed{})^4)}{\boxed{}} = \boxed{} [\text{m}^3]
\end{aligned}$$

② 自重による曲げモーメント：Ma [N・m]を以下より求める。

$$Ma = \frac{me \times L \times 9.80665 \times L}{4} \quad (\text{機械工学便覧 新版より})$$

$$= \frac{(\quad) \times (\quad) \times 9.80665 \times (\quad)}{4} = \quad [N \cdot m]$$

L：管支持板スパン[m]

③ 地震時の曲げモーメント：Mb [N・m]を以下より求める。

$$Mb = \frac{me \times L \times 9.80665 \times CH \times L}{4} \quad (\text{機械工学便覧 新版より})$$

$$= \frac{(\quad) \times (\quad) \times 9.80665 \times (\quad) \times (\quad)}{4}$$

$$= \quad [N \cdot m]$$

CH：加速度（1次）（設計用応答スペクトルから引用）

④ 自重+地震による発生応力：σa [N/m²]を以下より求める。

$$\sigma_a = \frac{(Mb + Ma)}{Z}$$

$$= \frac{(\quad + \quad)}{1.6414 \times 10^{-7}}$$

$$= \quad [N/m^2] = \quad [MPa]$$

⑤ 内圧による応力：σp [MPa]を以下より求める。

$$\sigma_P = \frac{\max(P1, P2) \times Di}{4t}$$

$$= \frac{\max(4.60, 0.354) \times 0.0139}{4 \times \quad} = \quad [MPa]$$

P1：運転圧力（管側）[MPa]

P2：運転圧力（胴側）[MPa]

T：板厚 [mm]

⑥ 伝熱管に作用する発生応力：σ [MPa]は以下となる。

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_P \quad (\text{「圧力容器」より})$$

$$= \quad + \quad = 163 \quad [MPa]$$

したがって、伝熱管の腐食を想定した耐震評価については、発生応力 163 MPa が許容応力 166 MPa を下回ることを確認した。