

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	耐震機電 02 R0
提出年月日	令和 3 年 1 月 19 日

設工認に係る補足説明資料

【水平方向と鉛直方向の動的地震力の
二乗和平方根(S R S S)法による組合せについて】

目 次

1. 概要	1
2. 水平方向と鉛直方向の地震力の組合せ法	1
3. 水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の組合せ法について	1
3.1 荷重の組合せ法の概要	1
4. S R S S法適用に対する妥当性	5
4.1 再処理事業所に対する適用根拠について	5
5. まとめ	7

■ : 商業機密上の観点から公開できない箇所

1. 概要

今回設工認の耐震設計では、これまで静的な取扱いのみであった鉛直方向の地震力について、動的な地震力を考慮することとなるとともに、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力による荷重を適切に組み合わせることが必要となる。

従来の水平方向及び鉛直方向の荷重の組合せは、静的な地震力による鉛直方向の荷重には地震継続時間や最大加速度の生起時刻のような時間の概念がなかったことから、水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の最大値同士の絶対値の和としていた（以下「絶対値和法」という。）。

一方、水平方向及び鉛直方向の両者がともに動的な地震力である場合、両者の最大加速度の生起時刻に差があるという実挙動を踏まえると、従来と同じように絶対値和法を用いるのではなく、時間的な概念を取り入れた荷重の組み合わせ法を検討する必要がある。

本資料では、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力の組合せ法のうち、二乗和平方根法（以下「SRSS法（Square Root of the Sum of the Squares）」という。）による組合せ法の妥当性を説明するものである。

なお、SRSS法による組合せは、東海第二発電所及び柏崎刈羽原子力発電所7号機の新規制基準工認において適用実績のある手法である。

2. 再処理事業所で用いる荷重の組合せ法

再処理事業所では、静的な地震力による荷重の組合せについては、従来どおり絶対値和法を用いて評価を行う。また、動的な地震力による荷重の組合せについては、既往知見に基づき、SRSS法を用いて評価を行うことも可能である。

3. 水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の組合せ法について

3.1 荷重の組合せ法の概要

絶対値和法とSRSS法の概要を以下に示す。

(1) 絶対値和法

本手法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）※を絶対値和で組み合わせる方法である。

この方法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重が同時刻に同位相で生じることを仮定しており、組合せ法の中で最も大きな荷重を与える。本手法は、主に地震力について時間の概念がない静的地震力による荷重の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重（又は応力）} = |M_H|_{\max} + |M_V|_{\max}$$

M_H ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

M_V ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

(2) SRSS法

本手法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重（又は応力）※を二乗和平方根で組み合わせる方法である。

この方法は、水平方向及び鉛直方向の地震力による最大荷重の生起時刻に時間的なずれがあるという実挙動を考慮しており、水平方向及び鉛直方向地震動の同時入力による時刻歴応答解析との比較において平均的な荷重を与える。本手法は、動的な地震力による荷重の組合せに使用する。

$$\text{組合せ荷重（又は応力）} = \sqrt{(M_H)_{\max}^2 + (M_V)_{\max}^2}$$

M_H ：水平方向地震力による荷重（又は応力）

M_V ：鉛直方向地震力による荷重（又は応力）

※：荷重の段階で組み合わせる場合と、荷重により発生した応力の段階で組み合わせる場合がある。応力の段階で組み合わせる場合は、その妥当性を確認した上で用いる。

(補足) 荷重または応力による組合せについて

水平方向及び鉛直方向の動的地震力をS R S S法で組み合わせる際、評価対象の機器の形状や部位に応じて荷重の段階で組み合わせる場合と、荷重により発生した応力の段階で組み合わせる場合がある。ここでは、その使い分けについて具体例を用いて説明する。

A. 荷重の段階で組合せを行う場合

横形ポンプの基礎ボルトの引張応力の評価を例とすると、以下の式1、式2で示すように水平方向地震力と鉛直方向地震力の組合せは、荷重である水平方向地震力によるモーメント ($m \cdot g \cdot C_H \cdot h$) と鉛直方向地震力によるモーメント ($m \cdot g \cdot C_V \cdot l_1$) を組み合わせる (図1)。

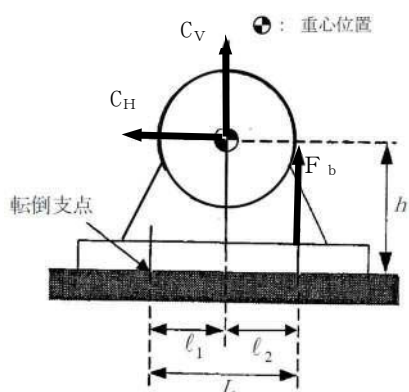
本手法については、非同時性を考慮する地震荷重についてのみS R S S法で組み合わせられており、実績のある妥当な手法である。

【絶対値和法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{mg(C_H h + C_V l_1) + mgC_p(h + l_1) + M_p - mgl_1\} \quad \dots \text{(式1)}$$

【S R S S法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{mg\sqrt{(C_H h)^2 + (C_V l_1)^2} + mgC_p(h + l_1) + M_p - mgl_1\} \quad \dots \text{(式2)}$$



- F_b : 基礎ボルトに生じる引張力
- C_H : 水平方向震度
- C_V : 鉛直方向震度
- C_p : ポンプ振動による震度
- g : 重力加速度
- h : 据付面から重心までの距離
- l_1, l_2 : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離
($l_1 \leq l_2$)
- L : 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離
- m : 機器の運転時質量
- M_p : ポンプ回転により働くモーメント

図1 横形ポンプに作用する震度

B. 応力による組合せを行う場合

横置円筒形容器の脚部の組合せ応力の評価を例とすると、脚部には水平方向地震力による曲げモーメント $M_{\ell 1}$ 及び鉛直方向荷重 P_{ℓ} 、鉛直方向地震力による鉛直荷重 $(R_1 + m_{s1}g)C_v$ が作用する (図2)。

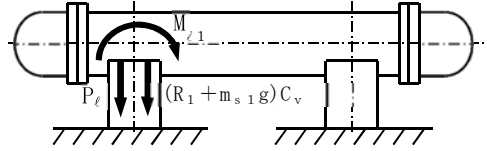


図2 横置円筒形容器の脚部に作用する荷重

水平方向地震力による応力 σ_{s2} 及び鉛直方向地震力による圧縮応力 σ_{s4} は式3、式4で表され、脚部の組合せ応力の評価の際は、これらの応力をSRSS法により組み合わせて式6を用いて評価を行う。

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{\ell 1}}{Z_{sy}} + \frac{P_{\ell}}{A_s} \quad \dots \text{(式3)}$$

$$\sigma_{s4} = \frac{R_1 + m_{s1} \cdot g}{A_s} \cdot C_v \quad \dots \text{(式4)}$$

σ_{s2} : 水平方向地震力により第1脚に生じる曲げ及び圧縮応力の和
 $M_{\ell 1}$: 水平方向地震力により第1脚底面に作用する曲げモーメント
 P_{ℓ} : 水平方向地震力により胴の第1脚つけ根部に作用する鉛直方向荷重
 Z_{sy} : 第1脚の断面係数
 A_s : 脚の断面積

σ_{s4} : 鉛直方向地震力により第1脚に生じる圧縮応力
 R_1 : 第1脚が受ける自重による荷重
 m_{s1} : 第1脚の質量
 g : 重力加速度
 C_v : 鉛直方向震度

【絶対値和法】

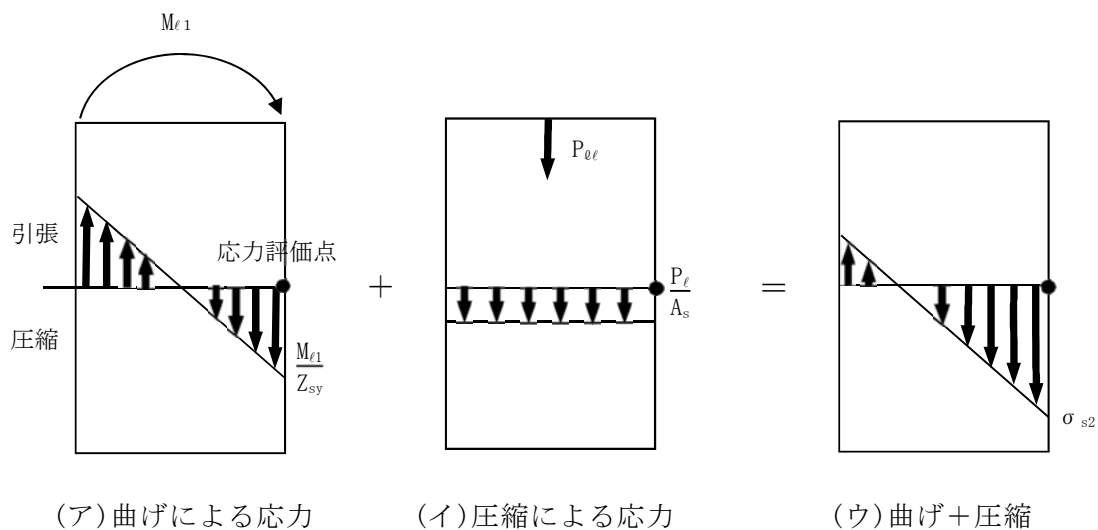
$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s4})^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots \text{(式5)}$$

【SRSS法】

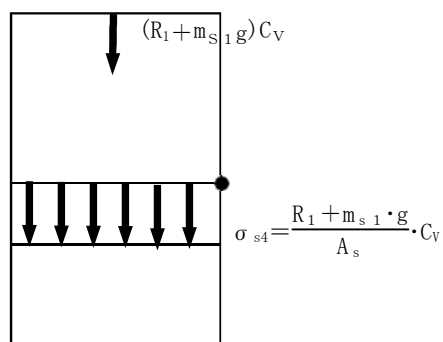
$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s4}^2})^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots \text{(式6)}$$

$\sigma_{s\ell}$: 水平方向地震力及び鉛直方向地震力が作用した場合の第1脚の組合せ応力
 σ_{s1} : 運転時質量により第1脚に生じる圧縮応力
 τ_{s2} : 水平方向地震力により第1脚に生じるせん断応力

ここで、水平方向地震力による応力 σ_{s2} 及び鉛直方向地震力による圧縮応力 σ_{s4} は図3の示すように、ともに脚部の外表面の圧縮応力を表すものであり、脚部の同一評価点、同一応力成分であることから、これらの組合せをSRSS法により行うことは妥当である。



(a) 水平方向地震力による応力評価点の応力



(b) 鉛直方向地震力による応力評価点の応力

図3 横置円筒形容器の脚部に作用する地震力による応力概念図

4. S R S S法適用に対する妥当性

先行発電炉の記載内容としては、水平方向及び鉛直方向の最大加速度の生起時刻に差に対して記載されていることから、再処理事業所についても生起時刻の差について確認しS R S S法適用に対する妥当性を示す。

4.1 再処理事業所に対する適用根拠について

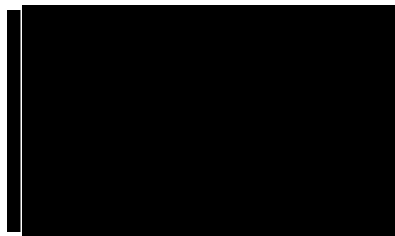
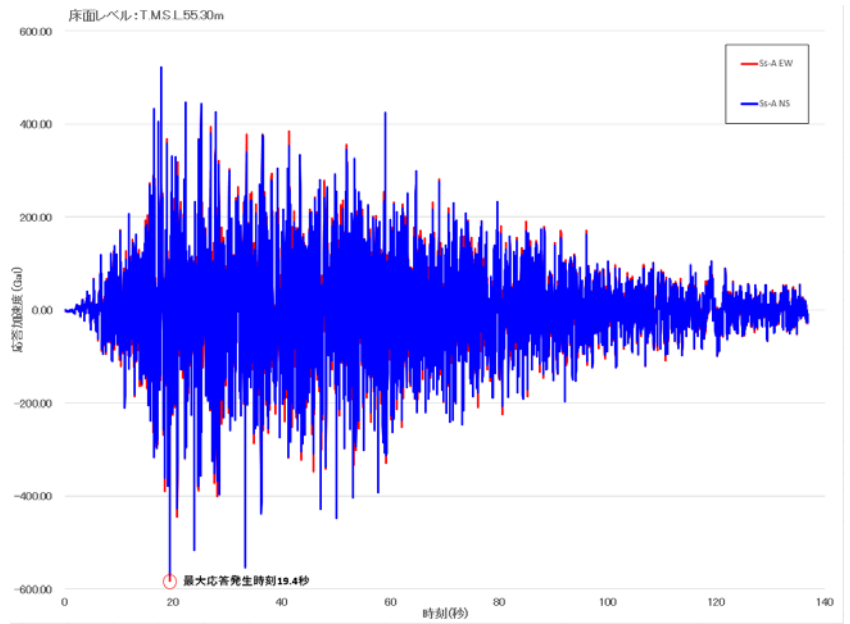
再処理事業所における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について、安全冷却水B冷却塔を例に、再処理事業所の耐震性評価において主要な地震動である S_s-A に対する水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差を確認した。ここで、機器・配管系の耐震評価に用いる水平方向の設計用震度は、全ての地震動に対する南北方向及び東西方向の最大応答加速度を包絡した値を用いることを踏まえ、水平方向の最大応答値の生起時刻については、南北方向及び東西方向を通じた最大応答加速度の生起時刻を用いた。

図4及び表1に示すように、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には約2.9秒～約21.6秒の差があり、再処理事業所においても水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には差があることを確認した。

なお、その他の基準地震動についても水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には差があることは確認している。



安全冷却水B冷却塔モデル
(南北方向, 東西方向共通)



安全冷却水B冷却塔モデル
(鉛直方向 (南北方向と共通))

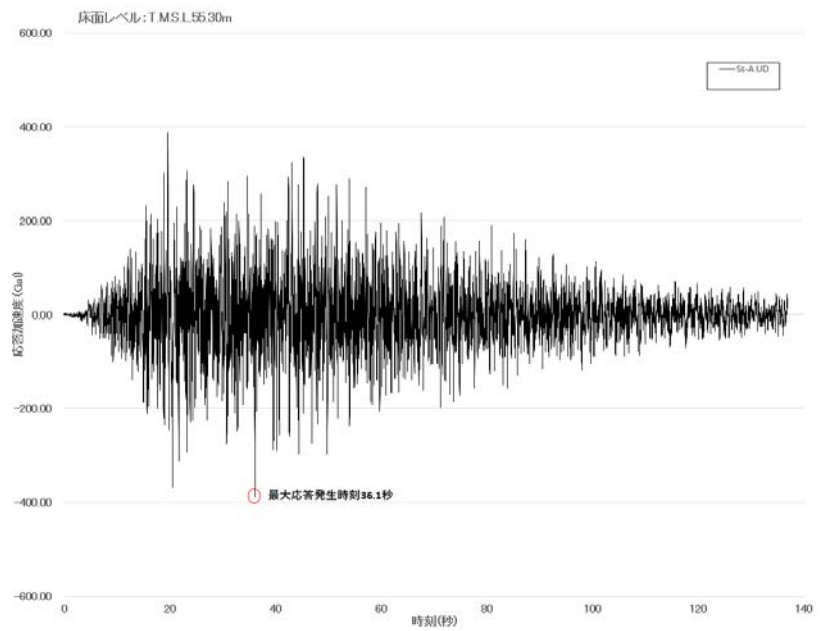


図4 安全冷却水B冷却塔の応答値 (T.M.S.L. 55.30 m の例)

表 1 最大応答値の生起時刻の差（安全冷却水B冷却塔）

位置 (m)	最大応答値の生起時刻（秒）		生起時刻の差（秒）
	水平方向	鉛直方向	
	25.2	46.8	21.6
	33.2	36.1	2.9
	19.4	36.1	16.7
	19.4	36.1	16.7

5. まとめ

以上から、再処理事業所では、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力の荷重の組合せ法としてSRSS法を用いることとする。