

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	耐震機電 02 R3
提出年月日	令和4年 11 月 24 日

設工認に係る補足説明資料

耐震設計の基本方針に関する

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

1. 文章中の下線部は、R2からR3への変更箇所を示す。
2. 本資料(R3)は、令和3年4月20日に提示した「耐震設計の基本方針に関する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 R2」に対し、他補足説明資料との記載程度の整合に伴い記載の拡充及び見直しを行ったものである。

目 次

1. 概要	1
2. 荷重組合せ方法について	1
2.1 水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の組合せ方法について	1
3. 荷重組合せ方法の適用について	6
3.1 先行発電炉における研究結果の再処理施設への適用について	6
3.2 先行発電炉における研究結果について	6
3.3 再処理施設に対する適用根拠について	21
4. まとめ	23
参考文献	23

■: 商業機密の観点から公開できない箇所

1. 概要

本資料は、再処理施設に対する、以下に示す添付書類における設計方針について補足説明するものである。なお、MOX燃料加工施設については既認可時より本資料の設計方針を踏まえた申請を行っていることから、補足説明対象外としている。

・再処理施設 添付書類「IV-1-1-5 地震応答解析の基本方針」

ここでは、耐震評価上、鉛直方向の動的地震力考慮に伴う二乗和平方根法(以下「SRSS法(Square Root of the Sum of the Squares)」という。)適用の妥当性について示す。

なお、本資料で示す内容については再処理施設の後次回申請設備についても適用するものとし、廃棄物管理施設については別途整理するものとする。

2. 荷重組合せ方法について

今回申請する設工認の耐震設計では、鉛直方向の地震力についてこれまでの静的な地震力に加え、動的な地震力についても考慮することから、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では、静的な地震力による鉛直方向の荷重に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合せ法であるSRSS法の適用について検討する必要がある。

以下に、水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の組合せ方法の概要を示す。

2.1 水平方向及び鉛直方向の地震力による荷重の組合せ方法について

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)

注記 * : 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。

次項にて、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力による荷重の組み合わせであるSRSS法の適用に対する妥当性について示す。

(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SRSS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、以下の第2.1-1式、第2.1-2式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(第2.1-1図)。

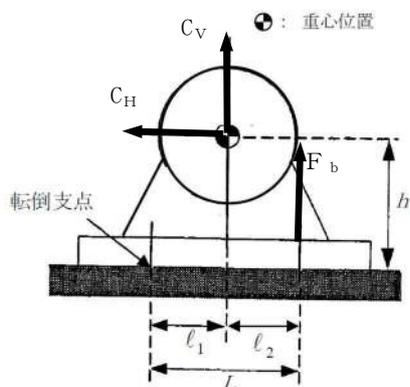
本手法については、非同時性を考慮する地震荷重についてのみSRSS法で組み合わせしており、実績のある妥当な手法である。

【絶対値和法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{ mg(C_H h + C_V l_1) + mgC_p(h + l_1) + M_p - mg l_1 \} \dots (\text{第2.1-1式})$$

【SRSS法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{ mg\sqrt{(C_H h)^2 + (C_V l_1)^2} + mgC_p(h + l_1) + M_p - mg l_1 \} \dots (\text{第2.1-2式})$$

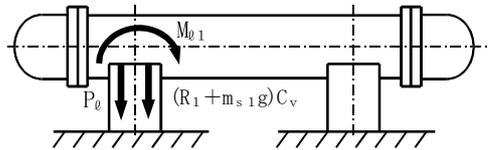


F_b : 基礎ボルトに生じる引張力
 C_H : 水平方向震度
 C_V : 鉛直方向震度
 C_p : ポンプ振動による震度
 g : 重力加速度
 h : 据付面から重心までの距離
 l_1, l_2 : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離
 $(l_1 \leq l_2)$
 L : 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離
 m : 機器の運転時質量
 M_p : ポンプ回転により働くモーメント

第2.1-1図 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(第2.1-2図)。



第2.1-2図 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} は第2.1-3式、第2.1-4式で表され、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、第2.1-6式を用いて評価を行う。

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{\ell 1}}{Z_{sy}} + \frac{P_{\ell}}{A_s} \quad \dots \text{(第2.1-3式)}$$

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

$$\sigma_{s4} = \frac{R_1 + m_{s1} \cdot g}{A_s} \cdot C_V \quad \dots \text{(第2.1-4式)}$$

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】

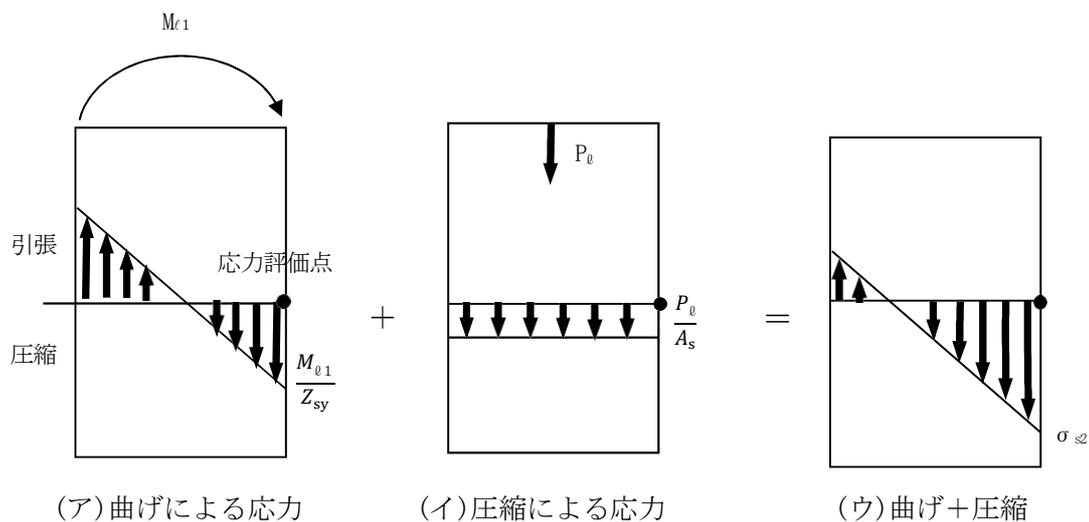
$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s4})^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots \text{(第2.1-5式)}$$

【SRSS法】

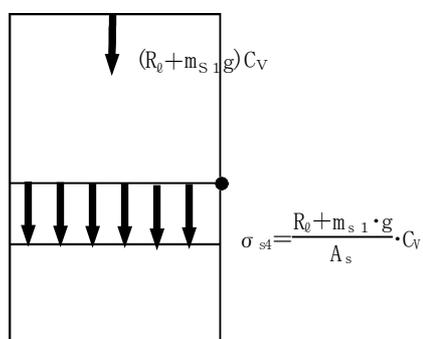
$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s4}^2})^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots \text{(第2.1-6式)}$$

$\sigma_{s\ell}$: 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} は第 2.1-3 図に示すように、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

第2.1-3図 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

3. 荷重組合せ方法の適用について

3.1 先行発電炉における研究結果の再処理施設への適用について

先行発電炉における研究では、地震動の大きさによらず水平方向地震力と鉛直方向地震力が同時に発生した場合であっても、それぞれの最大応答値の生起時刻には差があり、特定の部位に対して同時に最大加速度が加わらないことの確認を行うことにより、SRSS法による荷重の組合せに対する妥当性を示している。

本研究では代表設備として、水平方向及び鉛直方向に空間的な広がりを持ち、鉛直方向の地震応答が水平方向の応答と同様に大きくなる配管を選定した上で、最大応答値の生起時刻に差がある場合はSRSS法による荷重の組合せが妥当であることを確認している。

本研究結果の当社への適用性として、配管に対する設計、施工等は先行発電炉と同様であることから、最大応答値の生起時刻に差があることの確認を行うことで、SRSS法を適用することができる。

3.2 先行発電炉における研究結果について

先行発電炉における研究では、実機配管系に対して、水平及び鉛直地震動による最大荷重をSRSS法により組み合わせた場合と水平及び鉛直方向地震動の同時入力による時刻歴応答解析法により組み合わせた場合との比較検討を以下のとおり行っている。

(1) 解析対象配管系モデル

解析対象とした配管は、発電炉代表プラントにおける格納容器内の配管系で給水系(FDW)×2本、残留熱除去系(RHR)及び主蒸気系(MS)の計4本の配管モデルである。当該配管系は、耐震Sクラスに分類されるものである。

(2) 入力地震動

解析に用いた入力地震動は、地震動の違いによる影響を確認するため、兵庫県南部地震(松村組観測波)、人工波及びエルセントロ波の3波を用いた。機器・配管系への入力地震動となる原子炉建屋中間階の応答波の例を第3.2-1図から第3.2-3図に示す。

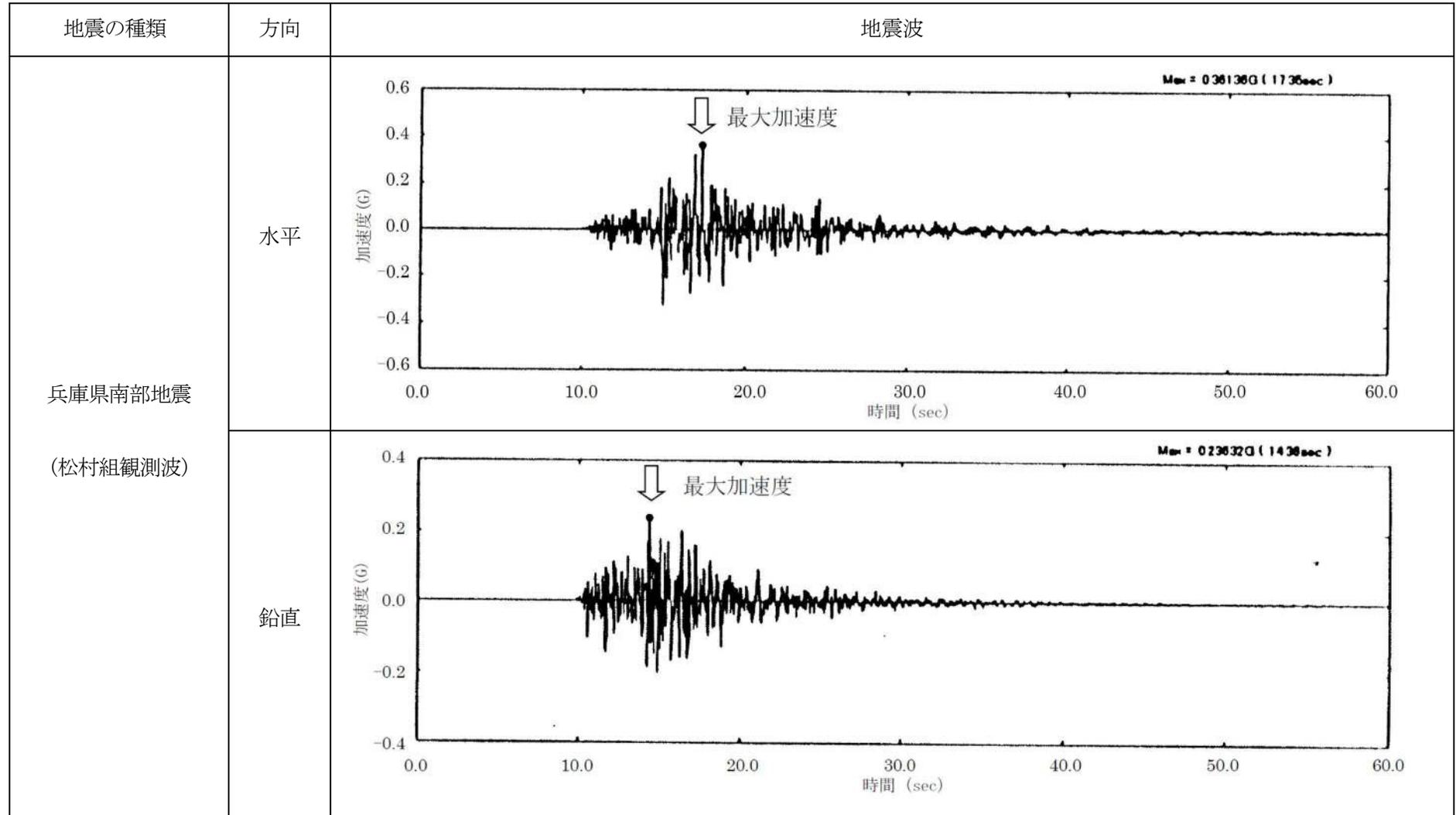
(3) 解析結果

解析結果を第3.2-4図から第3.2-7図に示す。第3.2-4図から第3.2-7図は、水平方向及び鉛直方向の応力に対して、同時入力による時刻歴応答解析法及びSRSS法により組み合わせた結果をまとめたものであり、参考までに絶対値和法による結果も併記した。

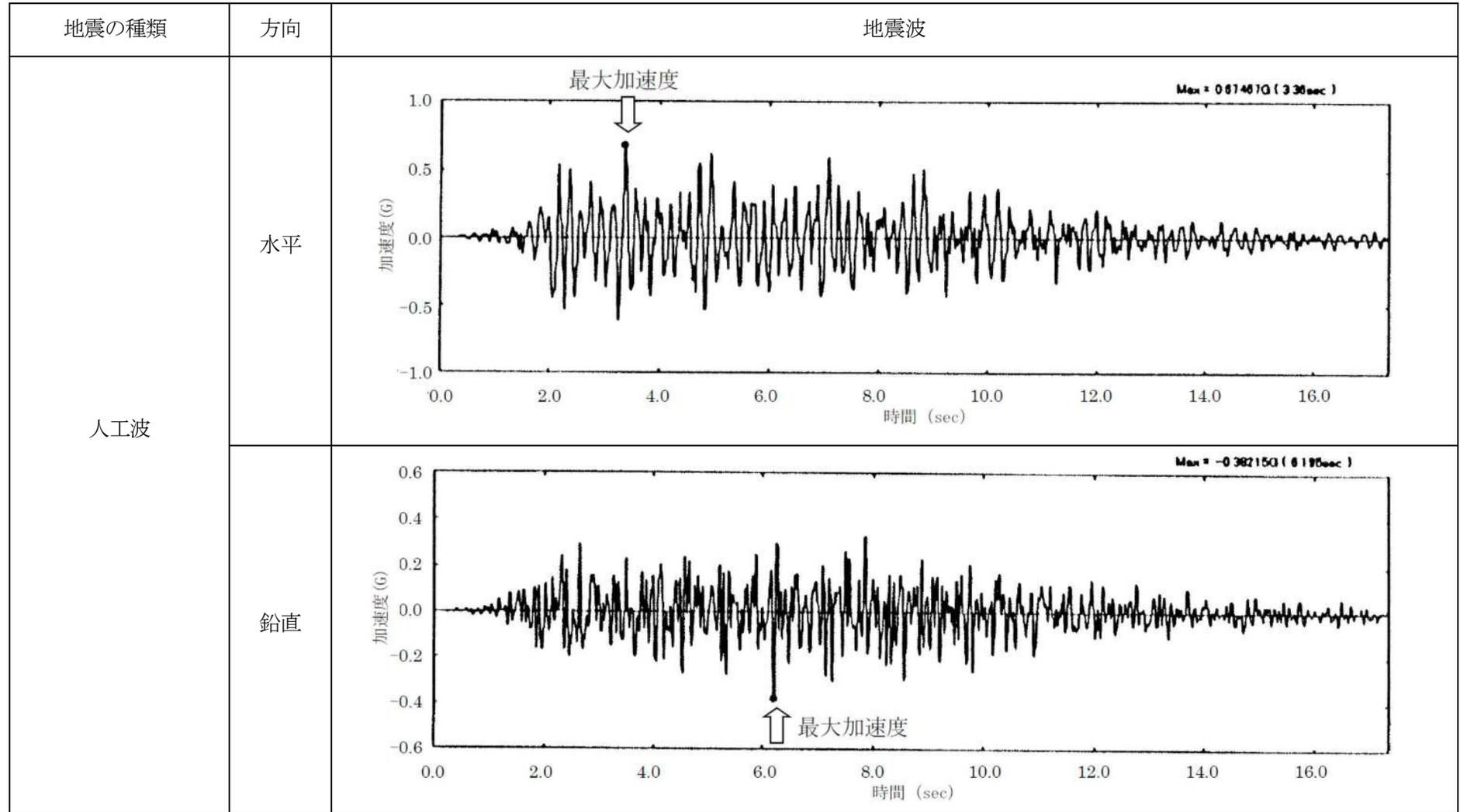
第3.2-4図から第3.2-7図より、いずれの配管系においても最大応力発生点においては、時刻歴応答解析法に対してSRSS法の方が約 1.1 倍から約 1.4 倍の比率で上回る結果とな

った。最大応力発生点におけるSRSS法と同時入力による時刻歴応答解析との評価結果の比較を第3.2-1表に示す。また、最大応力発生点の部位を第3.2-8図から第3.2-11図に示す。

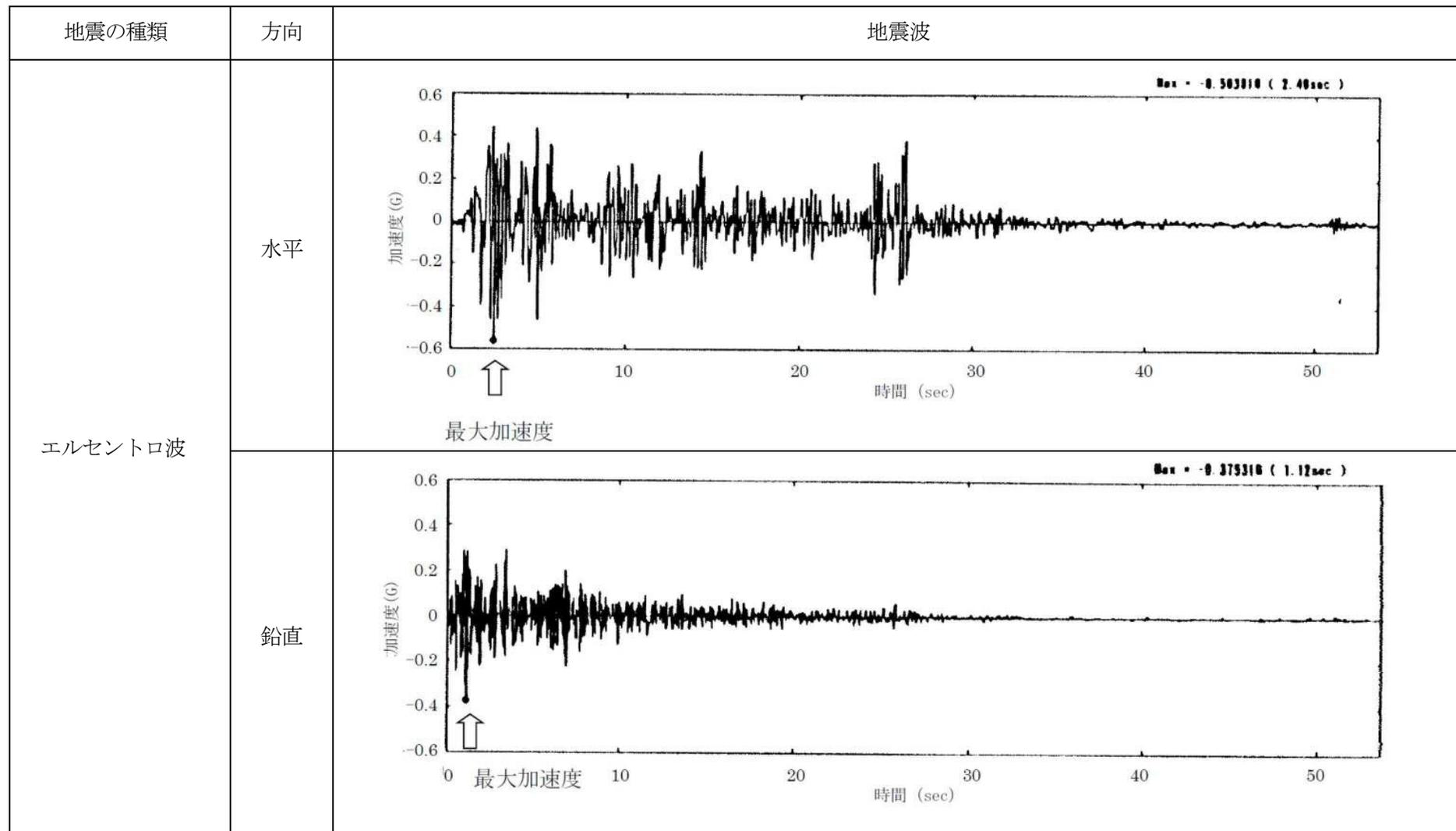
さらに、配管系全体の傾向を確認するため、配管系の主要な部位における発生応力の比較を第3.2-12図に示す。第3.2-12図は、第3.2-4図から第3.2-7図に基づき、各配管モデルの節点の応力値をプロットしたものである。第3.2-12図より、SRSS法は発生応力の低い領域では同時入力による時刻歴応答解析法に対して平均的な結果を与え、発生応力の増加に伴い保守的な結果を与える傾向にあることが確認できる。



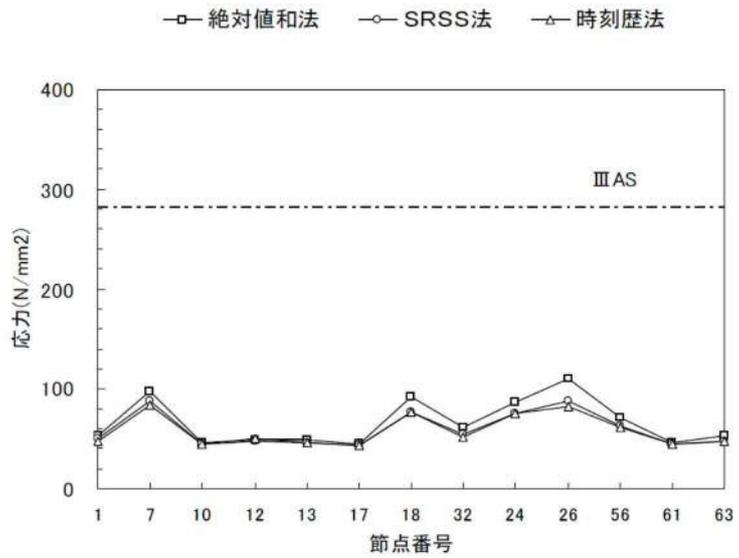
第3.2-1図 機器・配管系への入力地震動(兵庫県南部地震)



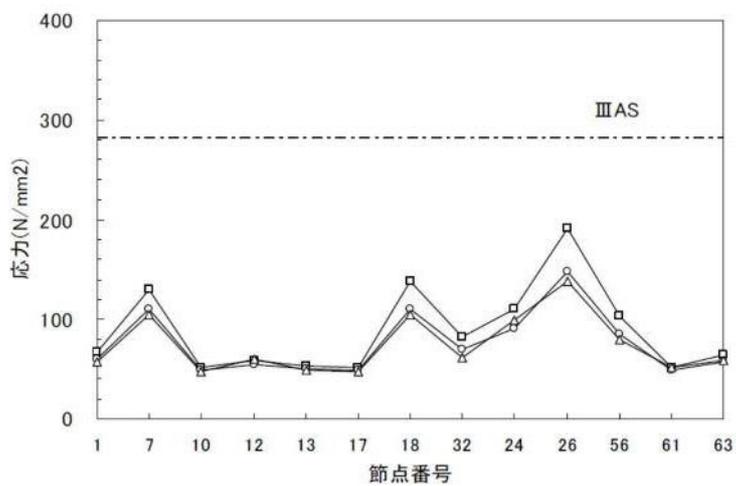
第3.2-2図 機器・配管系への入力地震動(人工波)



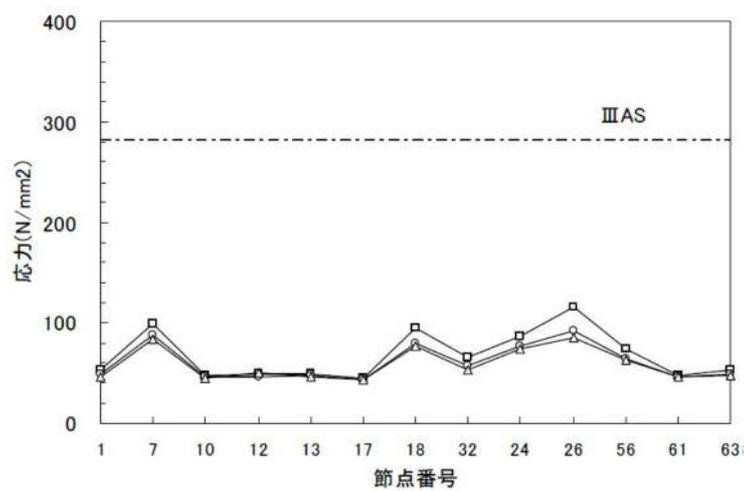
第3.2-3図 機器・配管系への入力地震動(エルセントロ波)



兵庫県南部地震(松村組観測波)

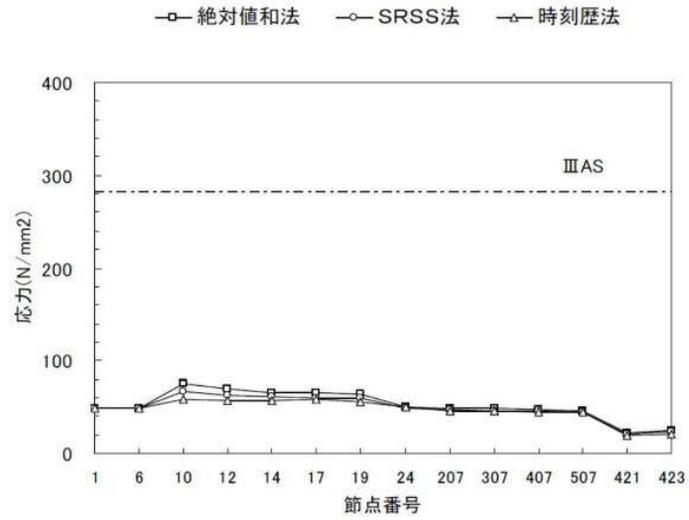


人工波

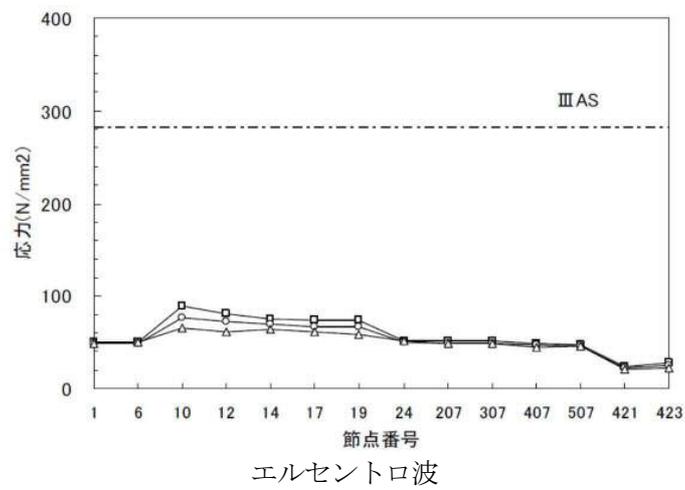
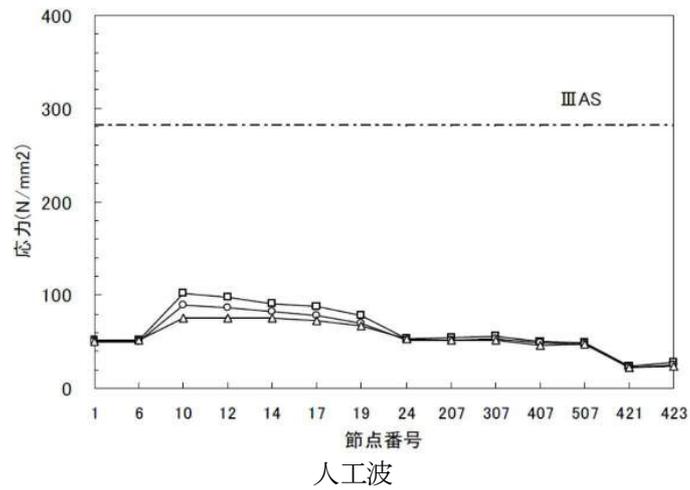


エルセントロ波

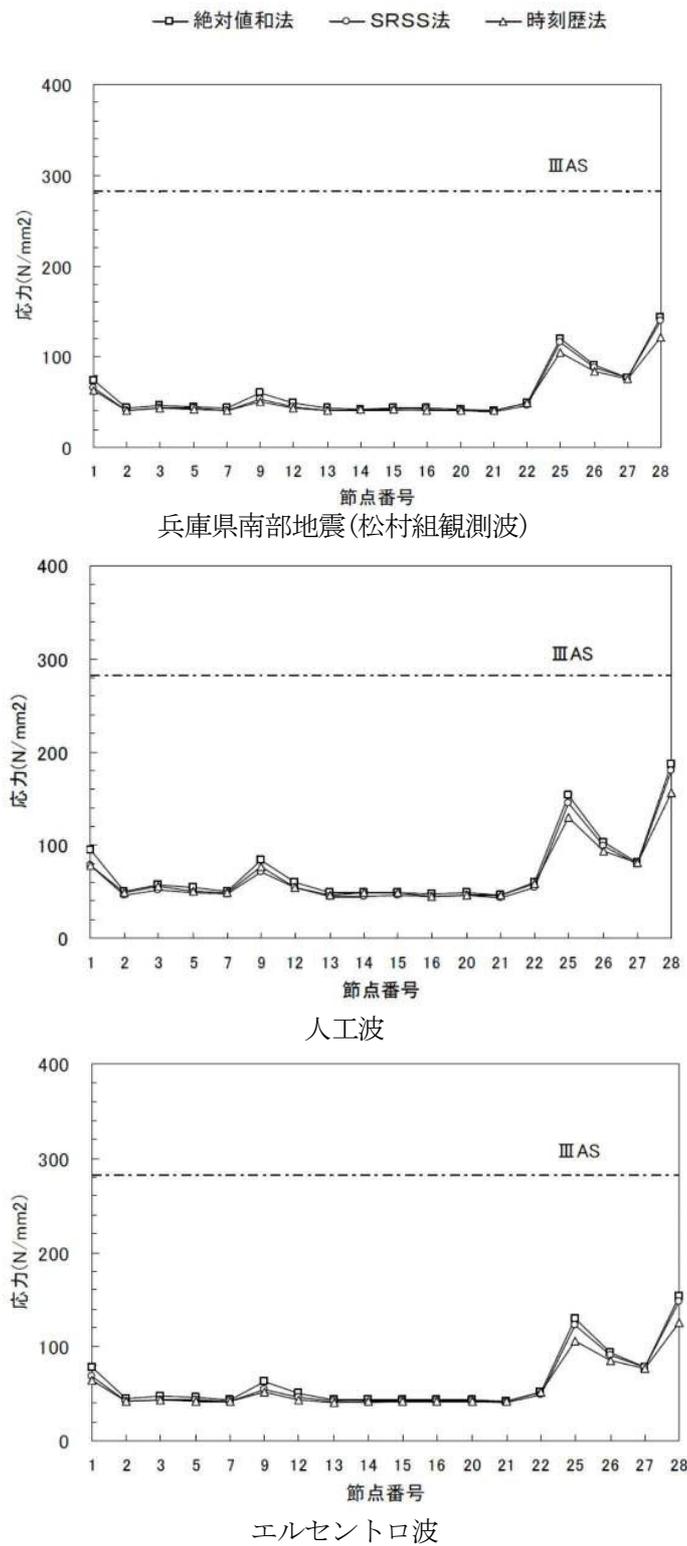
第3.2-4図 主要な部位における発生応力(FDW-001 Aプラント)



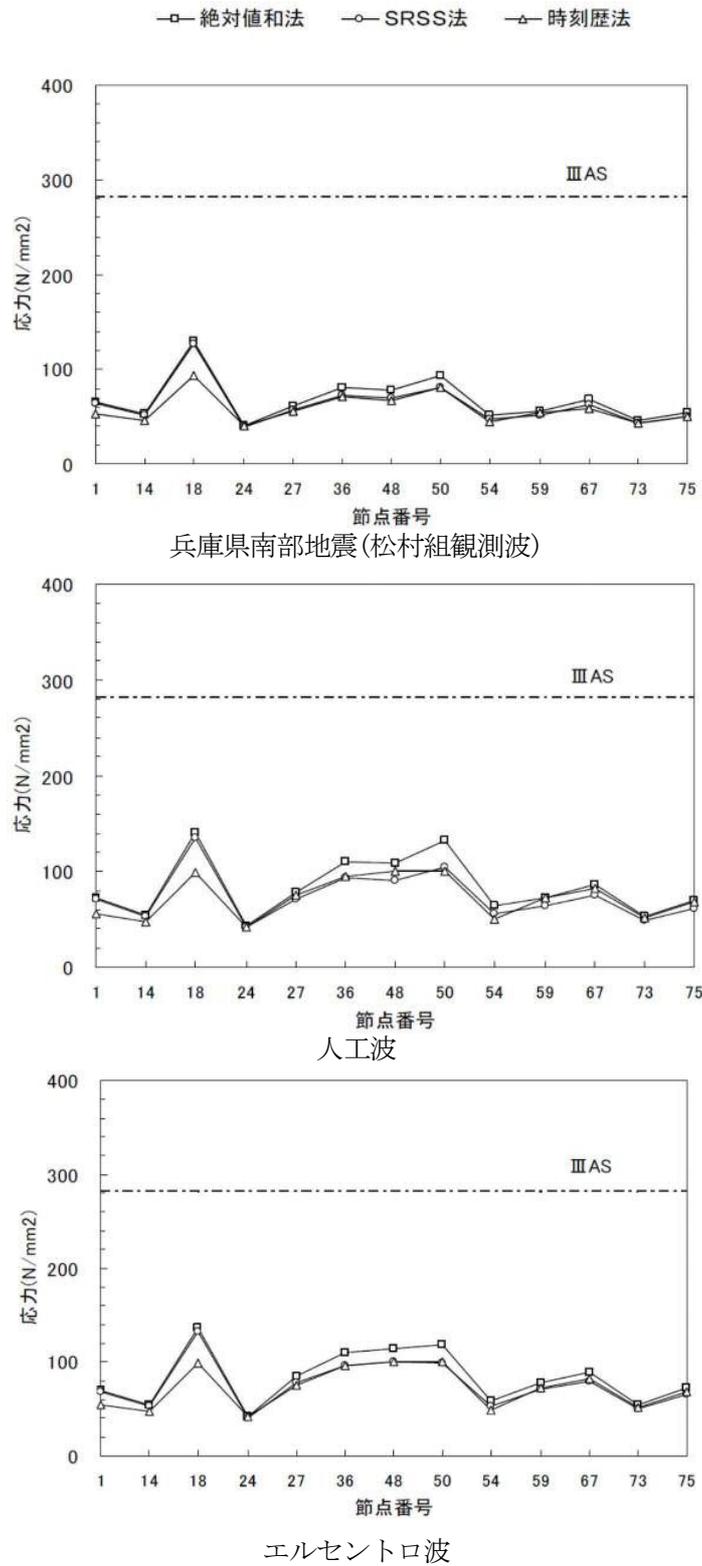
兵庫県南部地震(松村組観測波)



第3.2-5図 主要な部位における発生応力(MS-001 Aプラント)



第3.2-6図 主要な部位における発生応力(RHR-001 Aプラント)



第3.2-7図 主要な部位における発生応力(FDW-001 Bプラント)

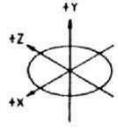
第3.2-1表 SRSS法と同時入力による時刻歴応答解析法との比較(最大応力発生点)

解析対象配管	入力地震波	最大応力発生点	SRSS/同時入力
FDW-001 (Aプラント)	松村組観測波	分岐部(節点 No26)	1.08
	人工波	分岐部(節点 No26)	1.08
	エルセントロ波	分岐部(節点 No26)	1.08
MS-001 (Aプラント)	松村組観測波	分岐部(節点 No10)	1.15
	人工波	分岐部(節点 No10)	1.20
	エルセントロ波	分岐部(節点 No10)	1.18
RHR-001 (Aプラント)	松村組観測波	拘束点(節点 No28)	1.15
	人工波	拘束点(節点 No28)	1.15
	エルセントロ波	拘束点(節点 No28)	1.18
FDW-001 (Bプラント)	松村組観測波	拘束点(節点 No18)	1.35
	人工波	拘束点(節点 No18)	1.37
	エルセントロ波	拘束点(節点 No18)	1.34

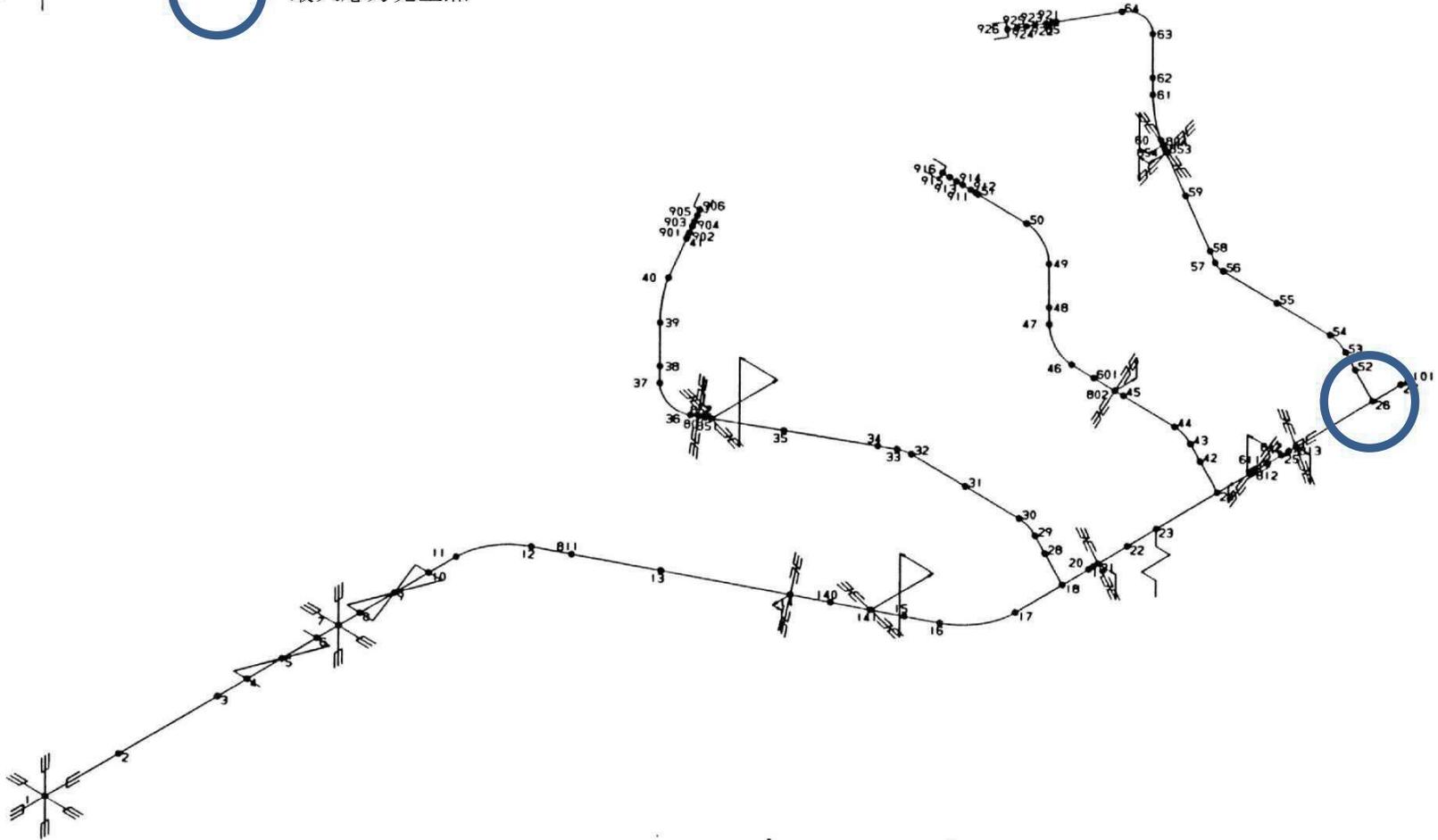
FDW：給水系配管

MS：主蒸気系配管

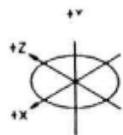
RHR：残留熱除去系配管



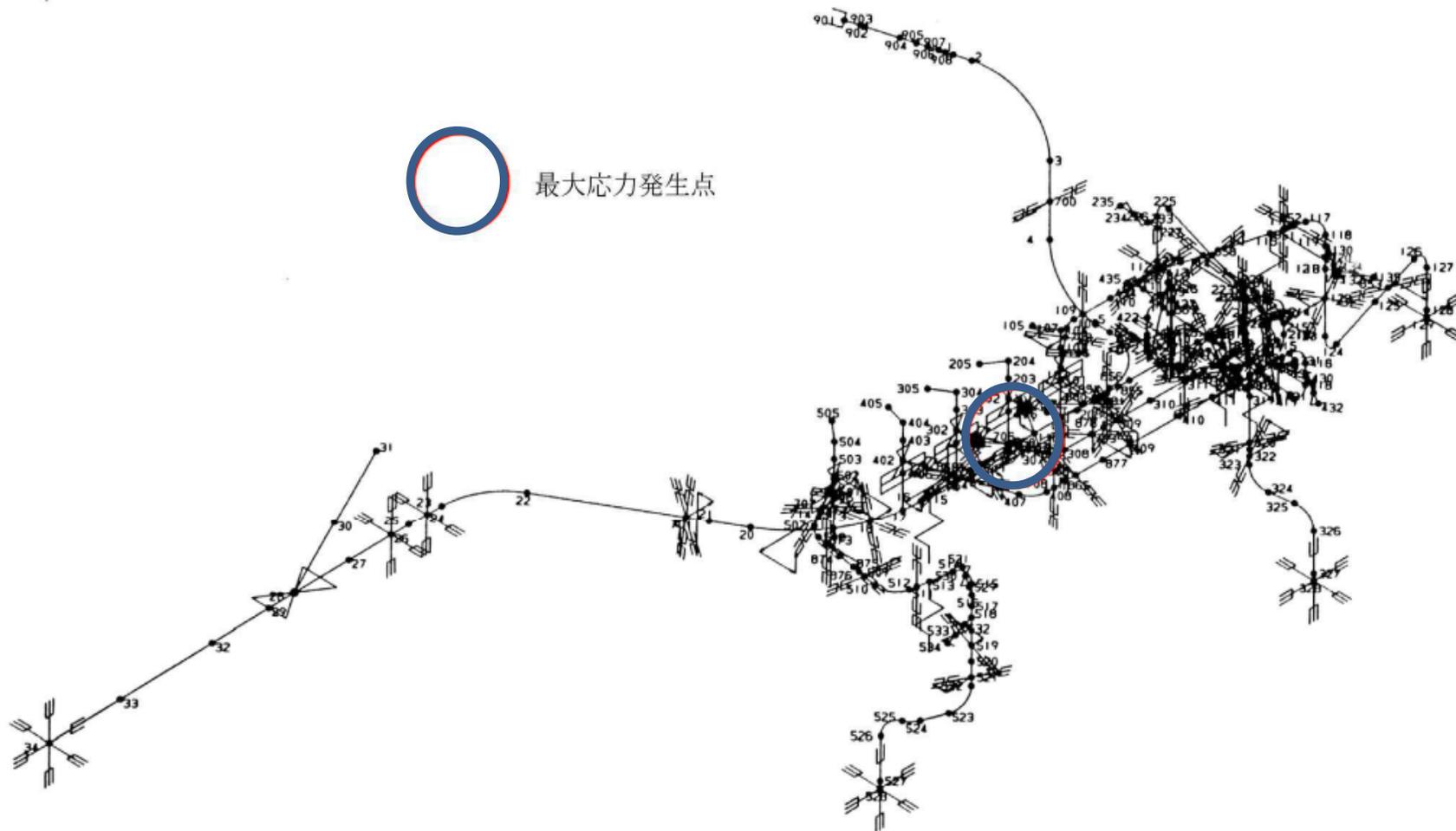
最大応力発生点



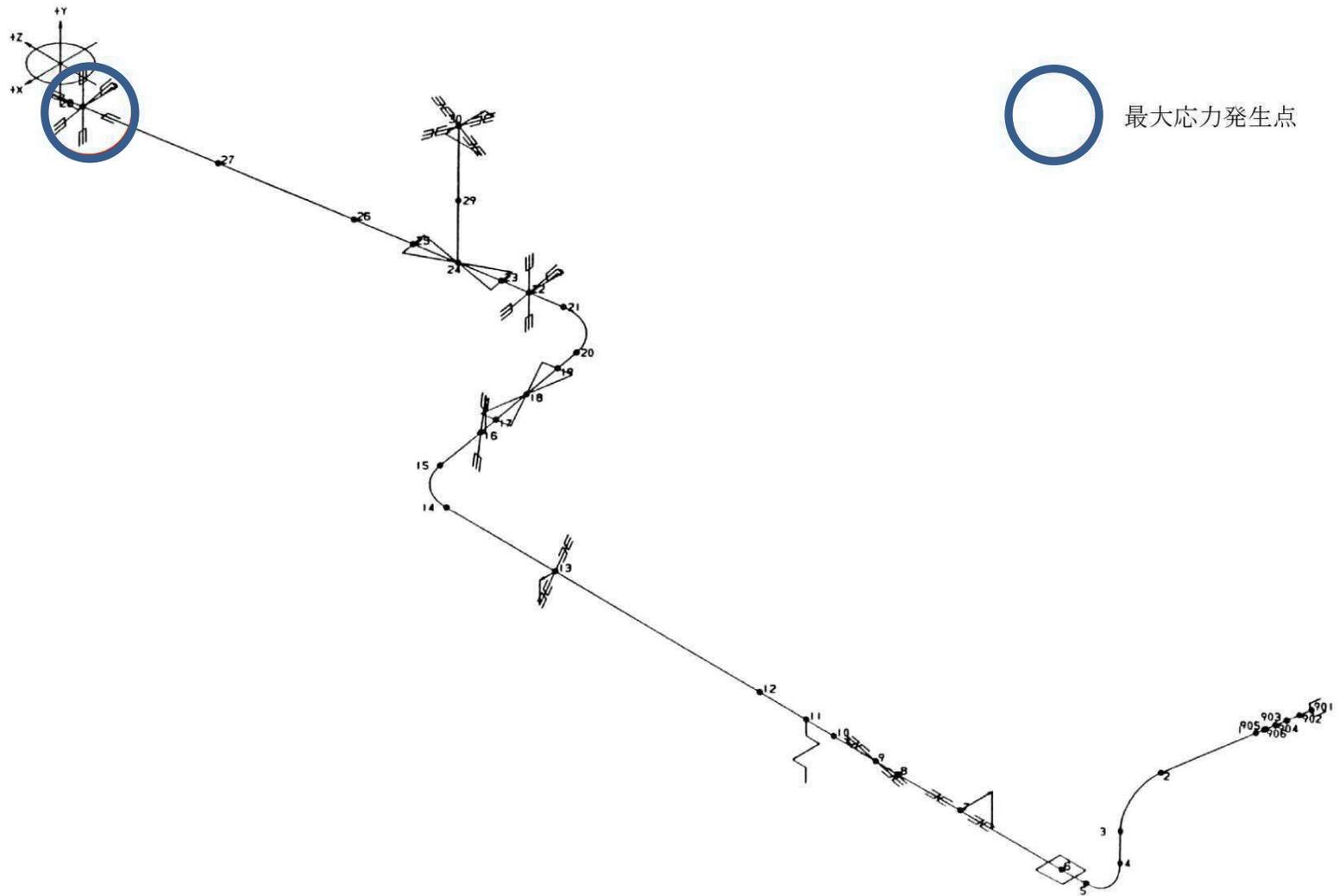
第3.2-8図 給水系配管(FDW-001 Aプラント)



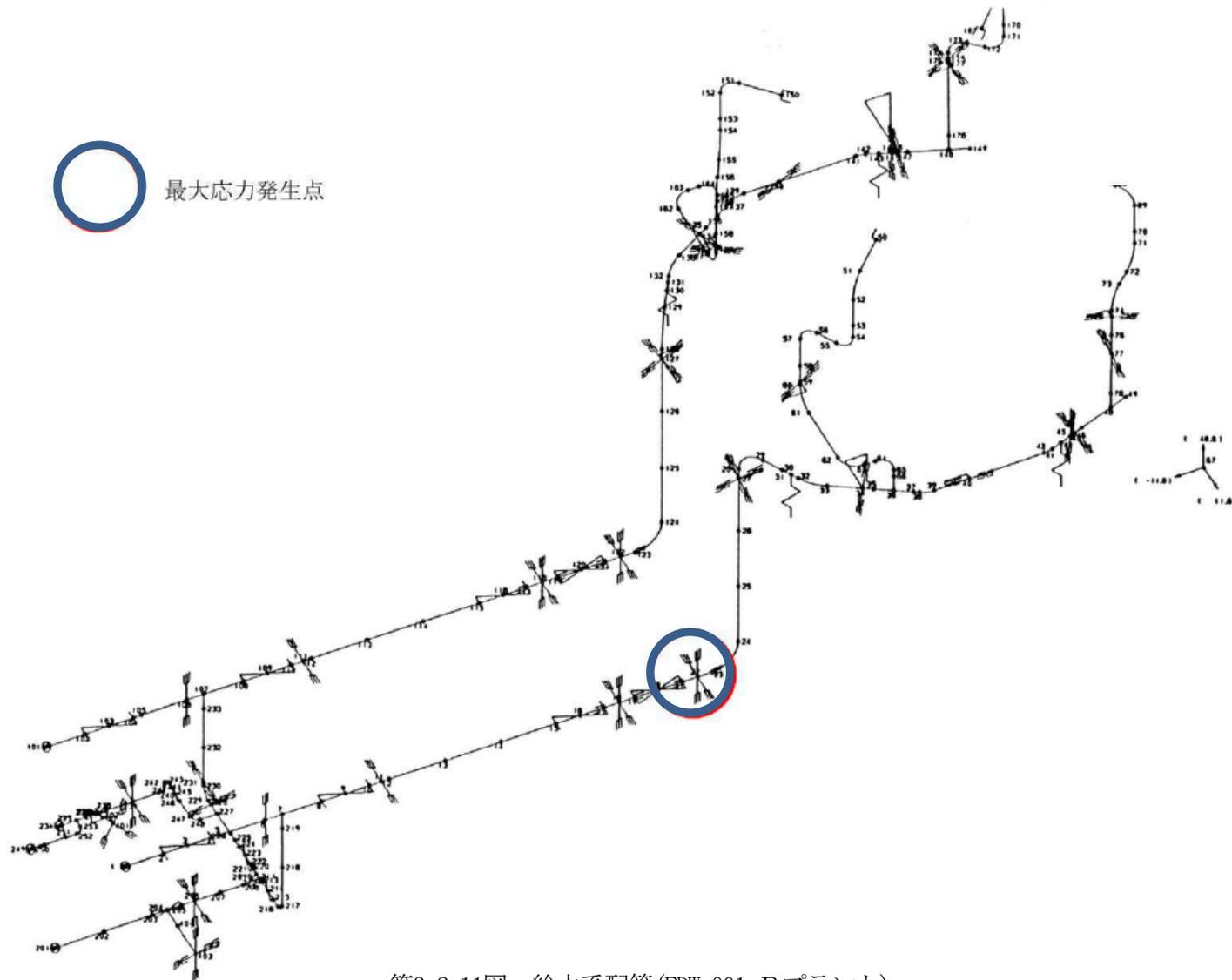
最大応力発生点

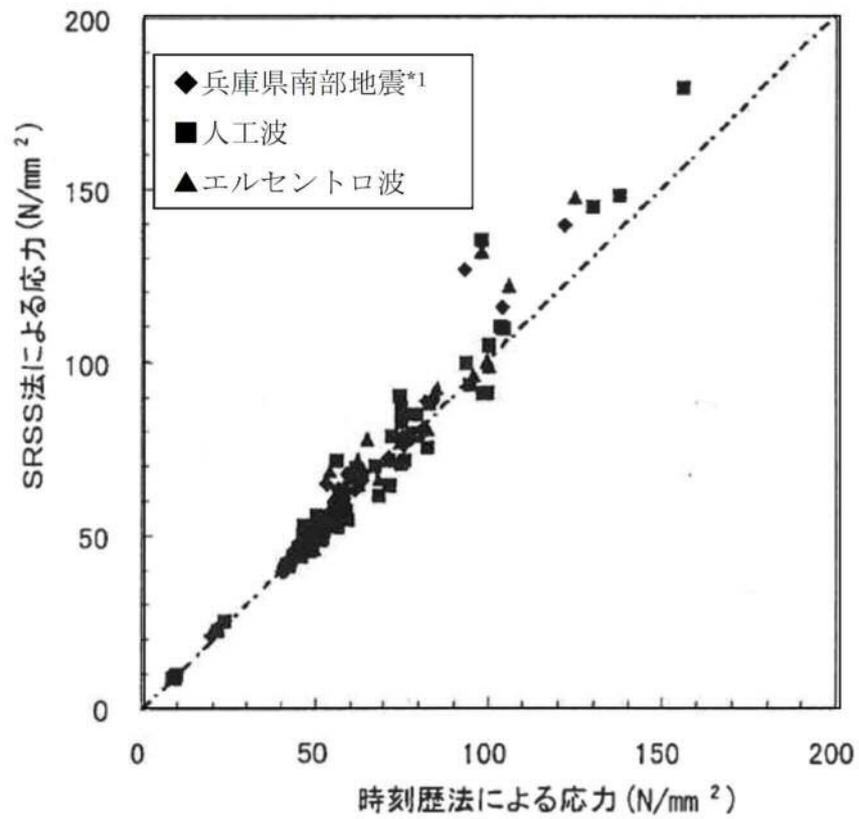


第3.2-9図 主蒸気系配管 (MS-001 Aプラント)



第3.2-10図 残留熱除去系配管 (RHR-001 Aプラント)





注記

* 1 : 松村組観測波

第3.2-12図 SRSS法による応力と時刻歴応答解析による応力の比較(主要部位)

3.3 再処理施設に対する適用根拠について

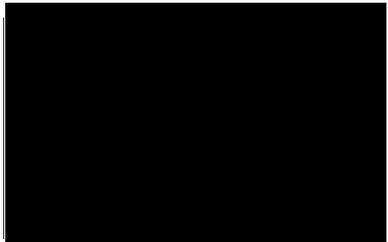
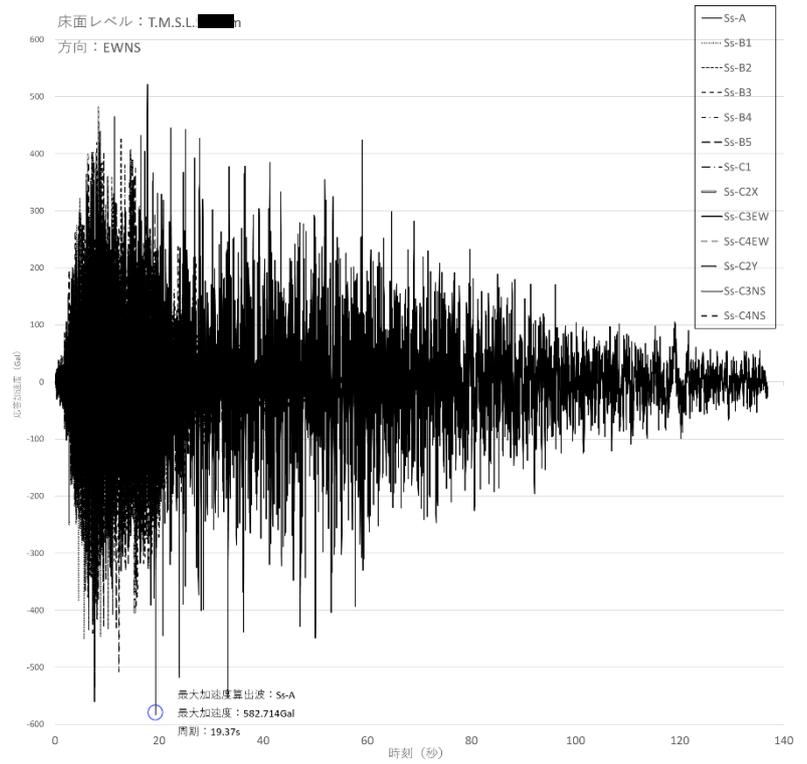
再処理施設における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について、
 を対象に、基準地震動である S_s-A 、 $S_s-B1\sim B5$ 、 $S_s-C1\sim C5$ 、に対する水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差を確認した。ここで、機器・配管系の耐震評価に用いる水平方向の設計震度は、全ての地震動に対する南北方向及び東西方向の最大応答加速度を包絡した設計用地震力を用いることを踏まえ、水平方向の最大応答値の生起時刻については、南北方向及び東西方向を通じた最大応答加速度の生起時刻を用いた。

第3.3-1図及び第3.3-1表に示すように、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には約2.31秒～約28.76秒の差があり、 については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。

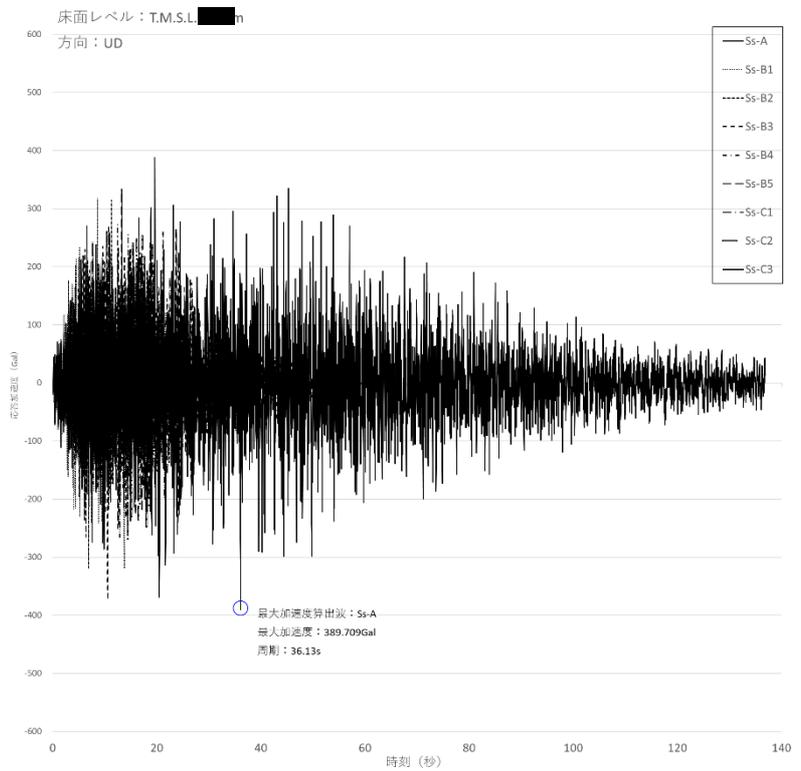
なお、その他再処理施設において設計用地震力を用いて評価を行う施設の地震応答についても、水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には差があることを確認している。



モデル
(南北方向, 東西方向共通)



モデル
(鉛直方向(南北方向と共通))



第3.3-1図 [Redacted] の応答値(T. M. S. L. [Redacted] m の例)

第3.3-1表 最大応答値の生起時刻の差

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	
	9.01	6.70	2.31
	7.37	36.13	28.76
	19.37	36.13	16.76
	19.37	36.13	16.76

4. まとめ

以上から、再処理施設の水平方向及び鉛直方向の動的な地震による荷重の組合せ方法としてSRSS法を適用して評価を行う。ただし、既設工認の評価結果から耐震設計上余裕がある設備については絶対値和法にて評価を行う。

参考文献

電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究(ステップ2)」
(平成7年～平成10年)