

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	耐震機電 02 R1
提出年月日	令和 3 年 3 月 2 日

耐震設計の基本方針に関する補足説明資料

#### IV 耐震性に関する説明書

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. <u>概要及び適用範囲</u> .....	1
2. <u>再処理施設及び廃棄物管理施設</u> で用いる荷重の組合せ法.....	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.....	6
4.1 <u>先行発電炉における研究結果の再処理施設及び廃棄物管理施設への適用につい</u> <u>て</u> .....	6
4.2 <u>先行発電炉における研究結果</u> .....	6
4.3 <u>再処理施設及び廃棄物管理施設</u> に対する適用根拠について.....	20
5. まとめ .....	22
6. <u>参考文献</u> .....	22

■ : 商業機密の観点から公開できない箇所

## 1. 概要及び適用範囲

今回申請する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合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「S R S S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。

本資料は耐震計算手法に対する全体方針であり、適用範囲は再処理施設、廃棄物管理施設、MOX燃料加工施設のうち、既認可時より鉛直方向の地震力として動的な地震力を考慮した設計において、水平方向及び鉛直方向の動的な地震力の組合せ法としてS R S S法による組合せを適用していたMOX燃料加工施設を除く、再処理施設及び廃棄物管理施設の申請対象設備を対象とする。

## 2. 再処理施設及び廃棄物管理施設で用いる荷重の組合せ法

再処理施設及び廃棄物管理施設の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S R S S法を用いることを基本とするが、既設工認の評価結果から耐震設計上の余裕がある設備については絶対値和法にて評価を行う。

## 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S R S S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が仮定しており、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。

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

$M_H$ ：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) S R S S 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3.1-1式、第3.1-2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3.1-1図)。

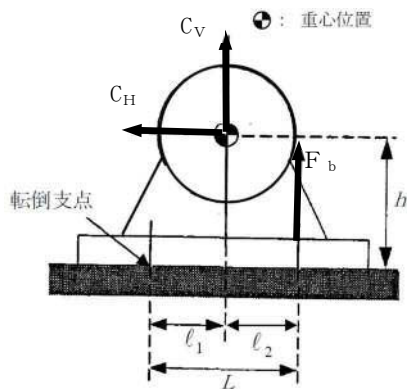
本手法については、非同時性を考慮する地震荷重についてのみSRSS法で組み合わせしており、実績のある妥当な手法である。

【絶対値和法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{ mg (C_H h + C_V l_1) + mg C_p (h + l_1) + M_p - mg l_1 \} \quad \dots \text{(第3.1-1式)}$$

【SRSS法】

$$F_b = \frac{1}{L} \{ mg \sqrt{(C_H h)^2 + (C_V l_1)^2} + mg C_p (h + l_1) + M_p - mg l_1 \} \quad \dots \text{(第3.1-2式)}$$

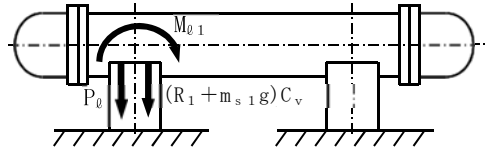


- $F_b$  : 基礎ボルトに生じる引張力
- $C_H$  : 水平方向震度
- $C_V$  : 鉛直方向震度
- $C_p$  : ポンプ振動による震度
- $g$  : 重力加速度
- $h$  : 据付面から重心までの距離
- $l_1, l_2$  : 重心と基礎ボルト間の水平方向距離  
( $l_1 \leq l_2$ )
- $L$  : 支点としている基礎ボルトより最大引張応力がかかる基礎ボルトまでの距離
- $m$  : 機器の運転時質量
- $M_p$  : ポンプ回転により働くモーメント

第3.1-1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  $P_{\ell}$ 、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3.1-2図）。



第3.1-2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  $\sigma_{s2}$  及び鉛直方向地震力による圧縮応力  $\sigma_{s4}$  は第3.1-3式、第3.1-4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て第3.1-6式を用いて評価を行う。

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{\ell 1}}{Z_{sy}} + \frac{P_{\ell}}{A_s} \quad \dots \text{ (第3.1-3式)}$$

$$\sigma_{s4} = \frac{R_1 + m_{s1} \cdot g}{A_s} \cdot C_V \quad \dots \text{ (第3.1-4式)}$$

$\sigma_{s2}$  : 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  
 $P_{\ell}$  : 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

$\sigma_{s4}$  : 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】

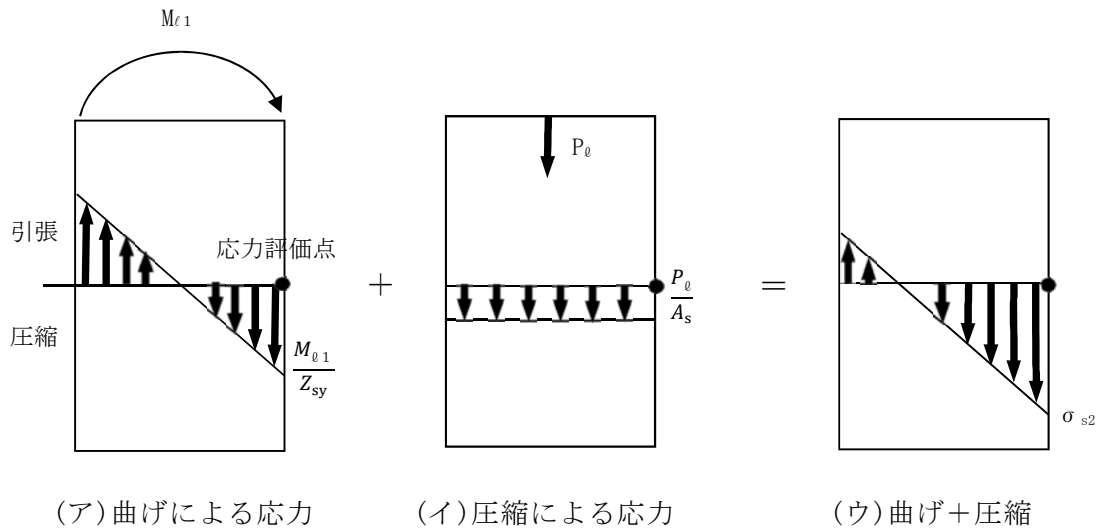
$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s4})^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots \text{ (第3.1-5式)}$$

【SRSS法】

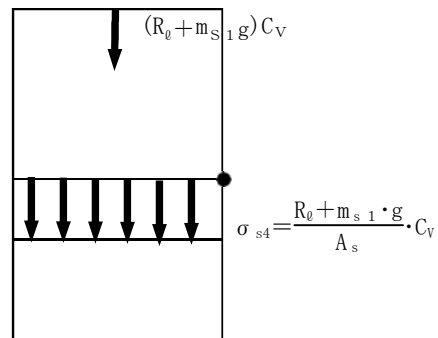
$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s4}^2})^2 + 3\tau_{s2}^2} \quad \dots \text{ (第3.1-6式)}$$

$\sigma_{s\ell}$  : 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  
 $\sigma_{s1}$  : 運転時質量により第1脚に生じる圧縮応力  
 $\tau_{s2}$  : 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  $\sigma_{s2}$  及び鉛直方向地震力による圧縮応力  $\sigma_{s4}$  は第3.1-3図の示すように、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



第3.1-3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

#### 4. S R S S法適用に対する妥当性

##### 4.1 先行発電炉における研究結果の再処理施設及び廃棄物管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においても、それぞれの最大加速度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、S R S S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、水平方向及び鉛直方向に空間的な広がりを持つ配管を代表に、最大加速度の生起時刻に差がある場合はS R S S法による荷重の組合せが妥当であることを示していることから、当社においても生起時刻に差があることを確認することで本研究結果は適用可能である。

##### 4.2 先行発電炉における研究結果

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S R S S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

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4.2-1図から第4.2-3図に示す。

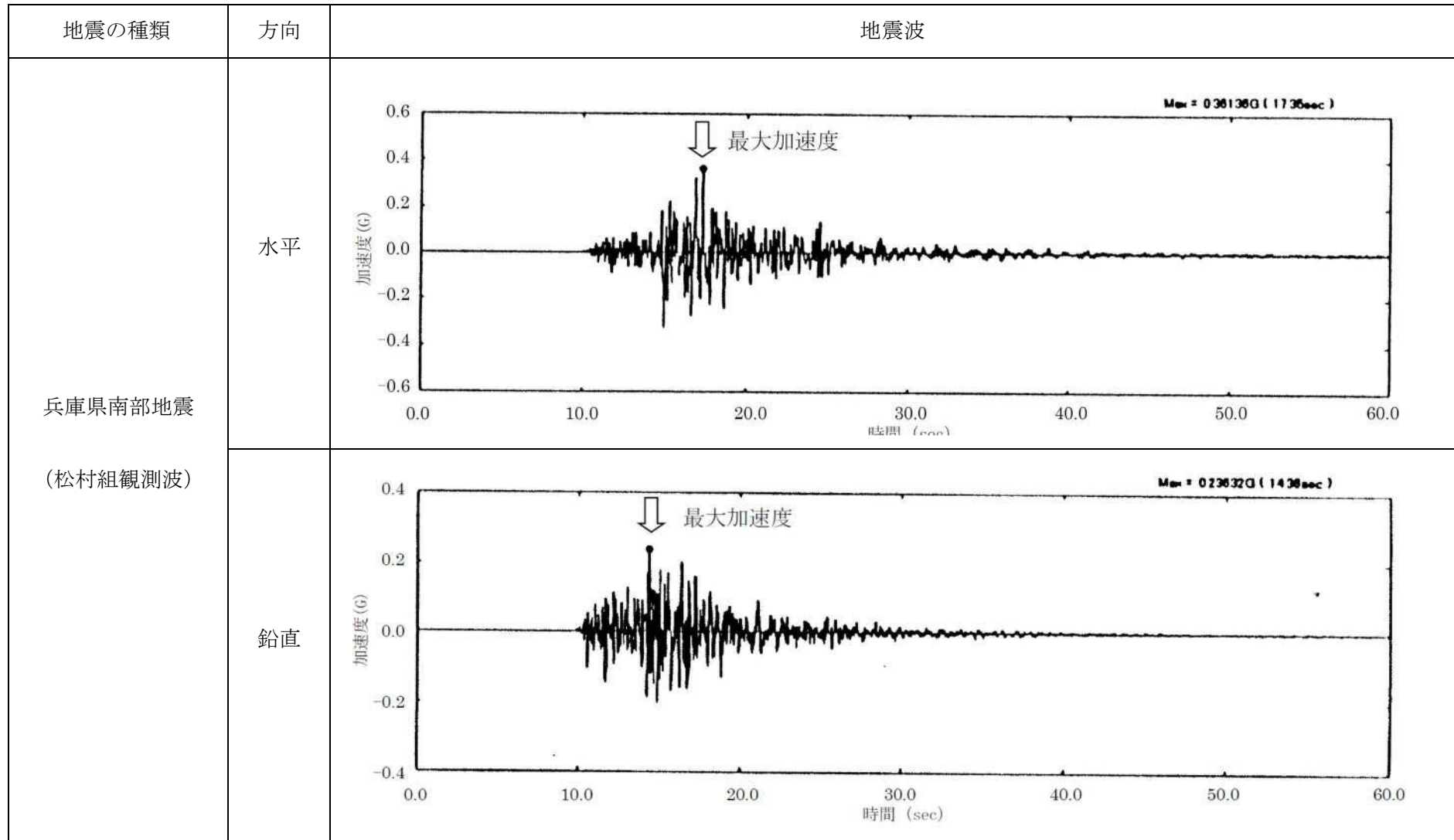
###### (3) 解析結果

解析結果を第4.2-4図から第4.2-7図に示す。第4.2-4図から第4.2-7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S R S S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。

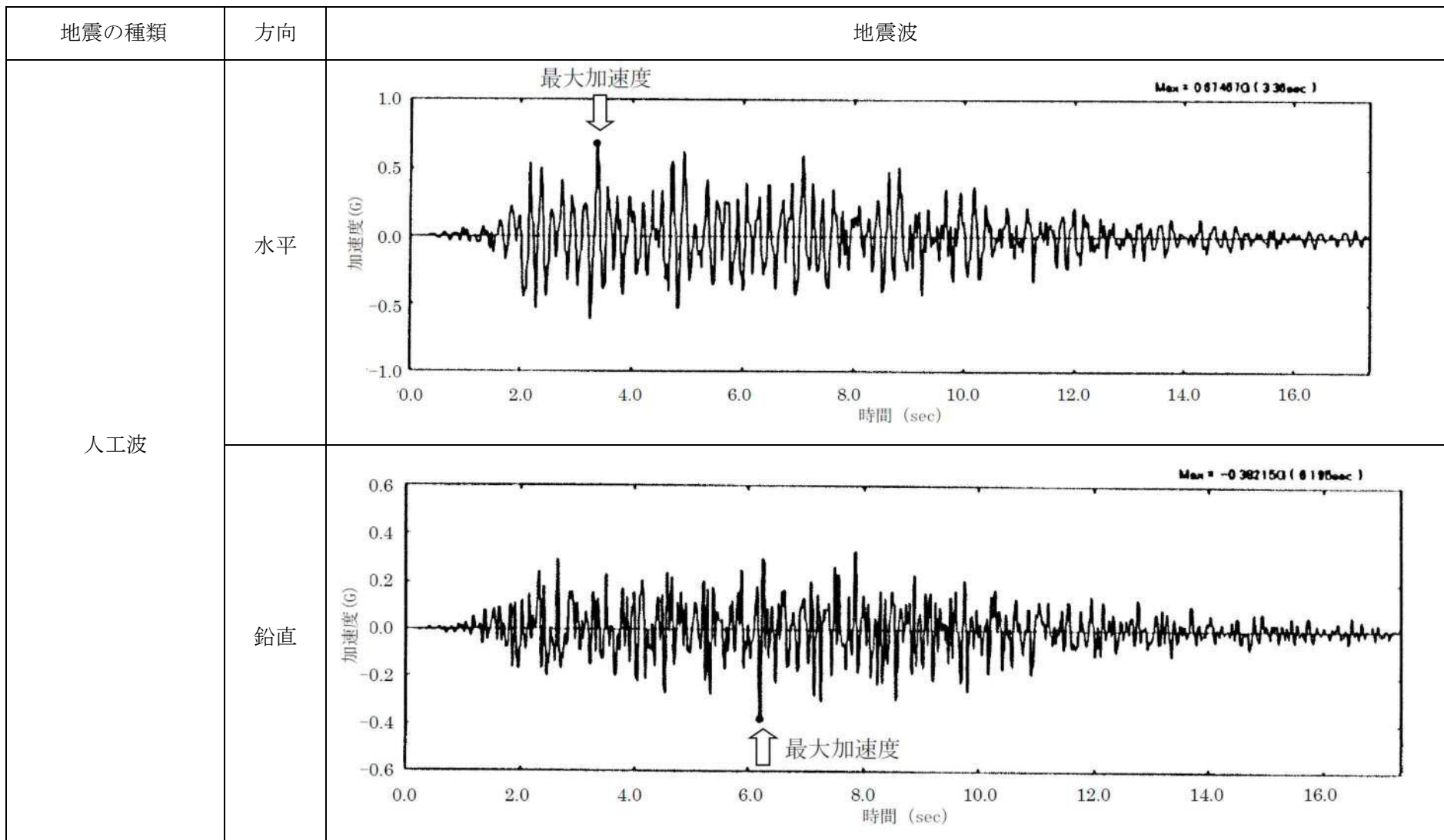
第4.2-4図から第4.2-7図より、いずれの配管系においても最大応力発生点においては、時刻歴応答解析法に対してS R S S法の方が約1.1倍から約1.4倍の比率で上回る結果となった。最大応力発生点におけるS R S S法と同時入力による時刻歴応答解析との評価結果の比較を第4.2-1表に示す。また、最大応力発生点の部位を第4.2-8図から第4.2-11図に示す。

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4.2-12図に示す。第4.2-12図は、第4.2-4図から第4.2-7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4.2-12図より、S R S S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。

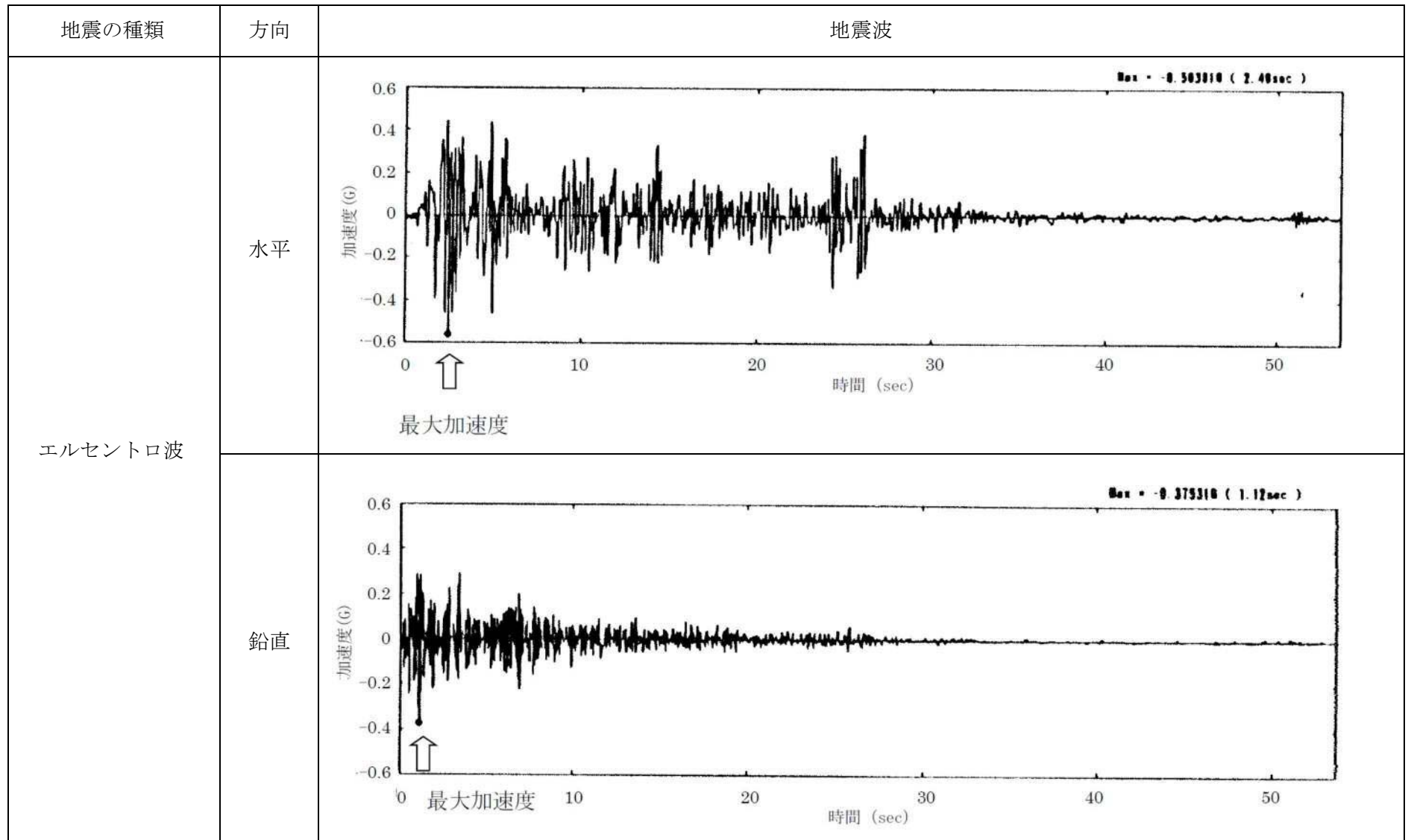




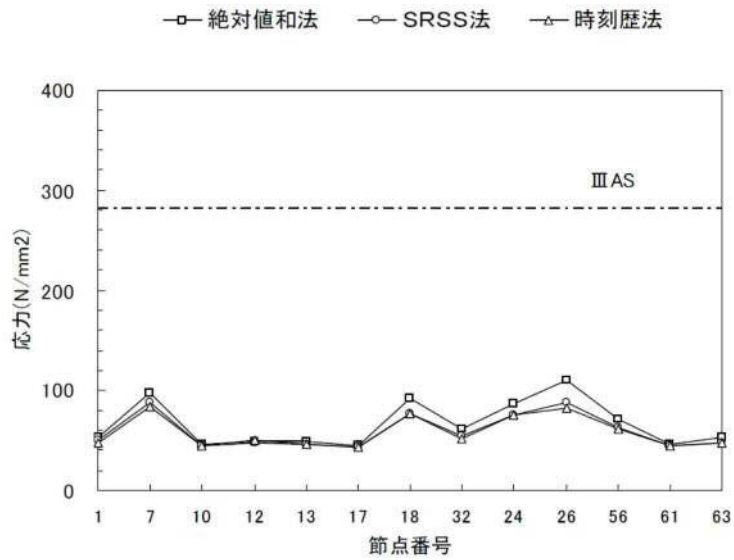
第4.2-1図 機器・配管系への入力地震動（兵庫県南部地震）



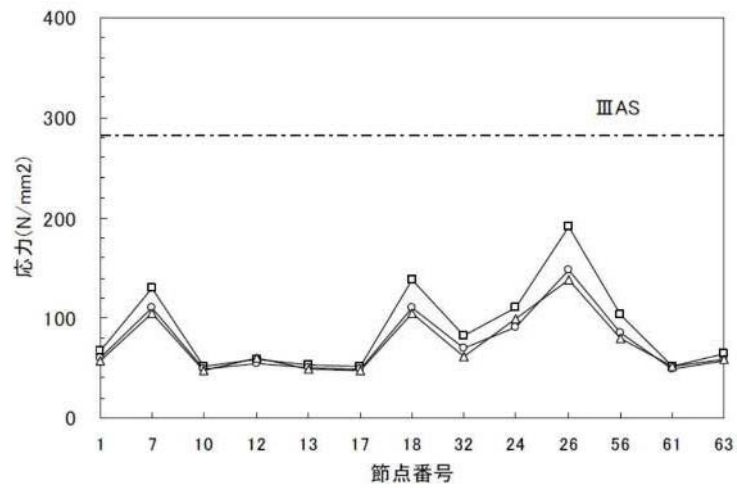
第4.2-2図 機器・配管系への入力地震動（人工波）



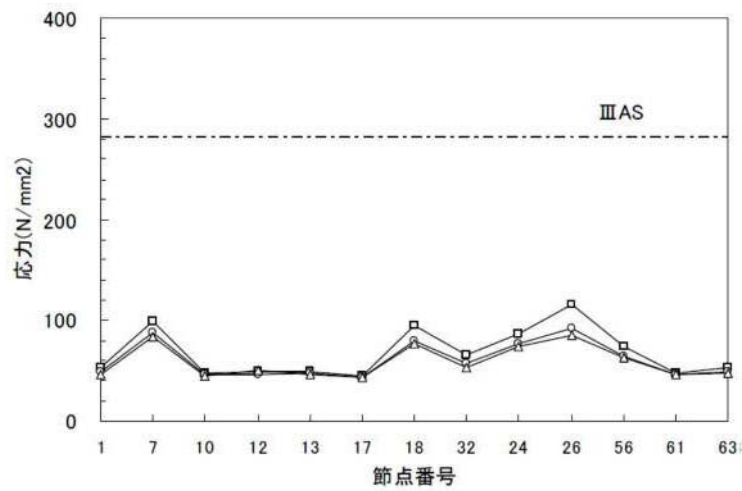
第4.2-3図 機器・配管系への入力地震動（エルセントロ波）



兵庫県南部地震（松村組観測波）

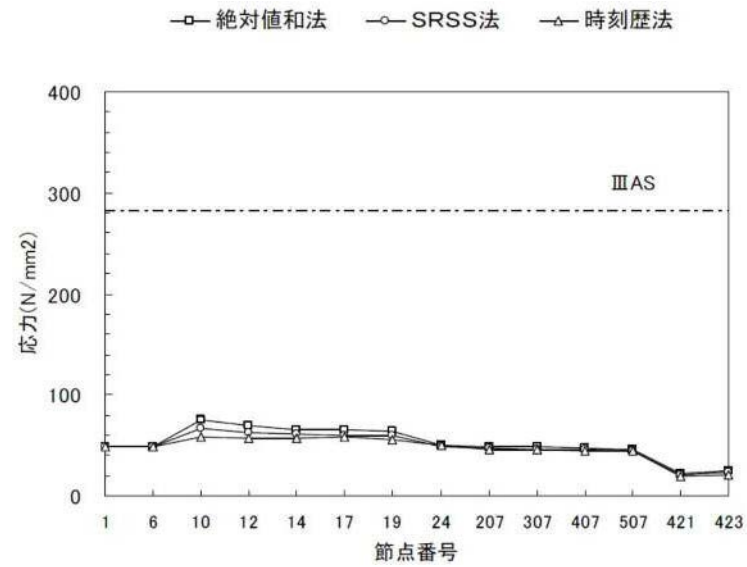


人工波

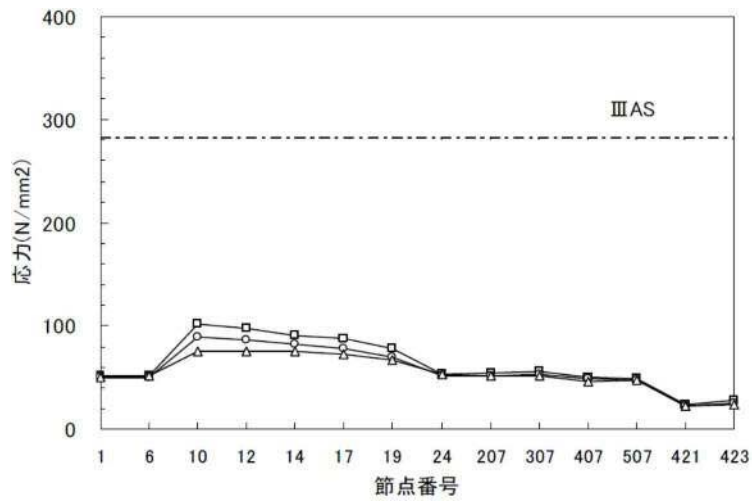


エルセントロ波

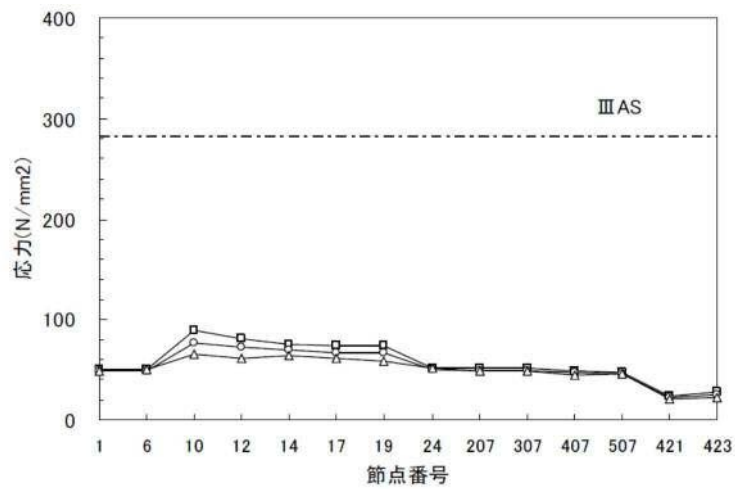
第4.2-4図 主要な部位における発生応力 (FDW-001 Aプラント)



兵庫県南部地震（松村組観測波）

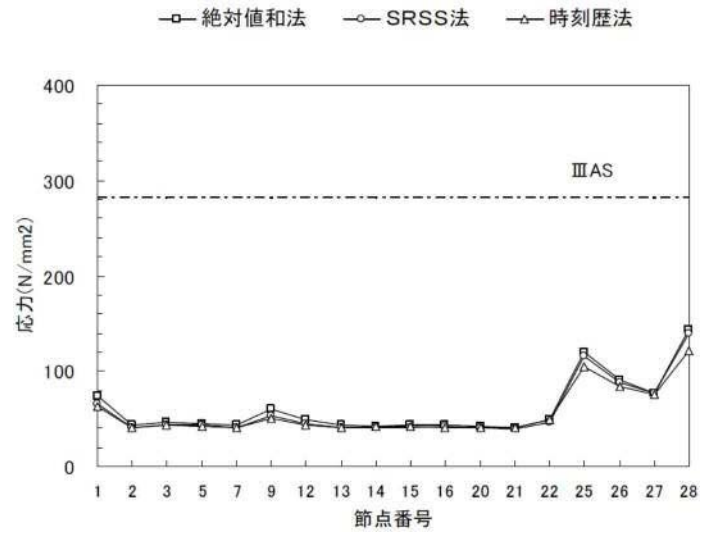


人工波

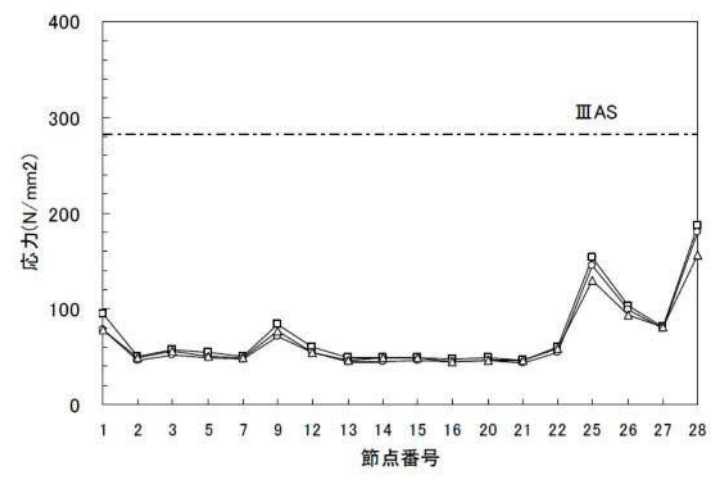


エルセントロ波

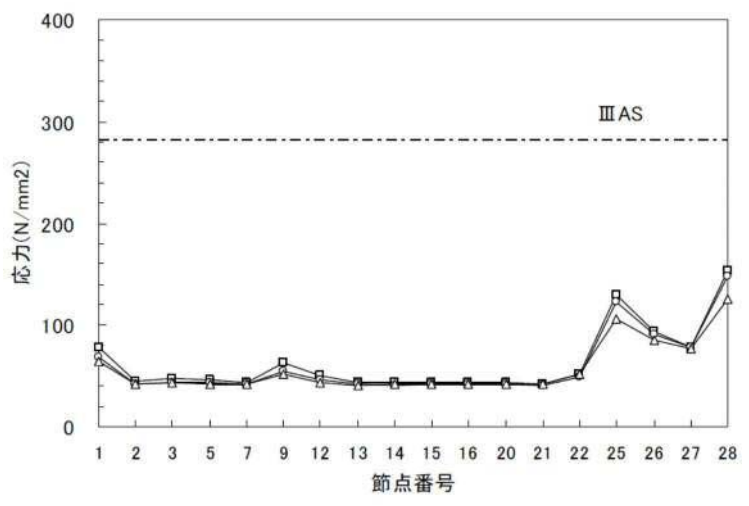
第4.2-5図 主要な部位における発生応力（MS-001 Aプラント）



兵庫県南部地震（松村組観測波）



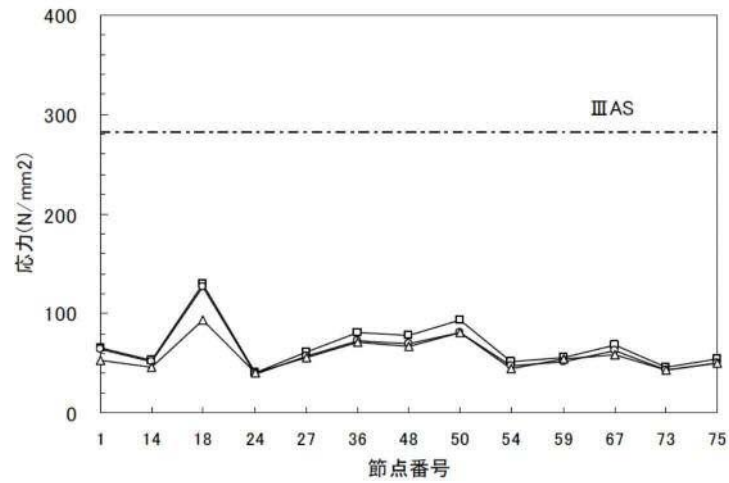
人工波



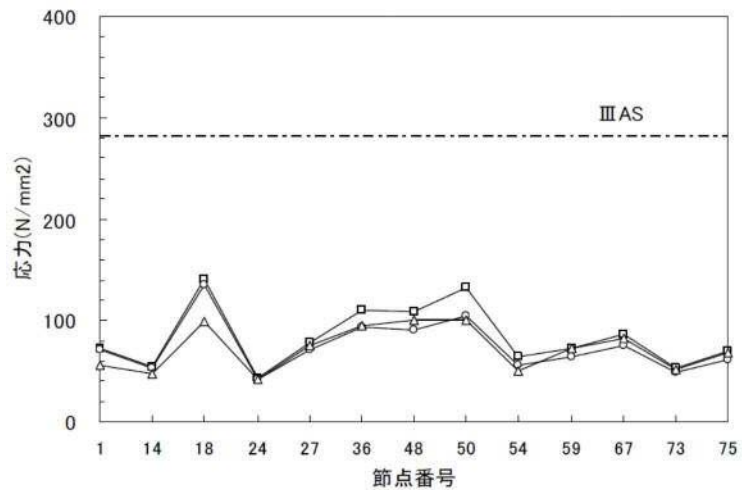
エルセントロ波

第4.2-6図 主要な部位における発生応力（RHR-001 Aプラント）

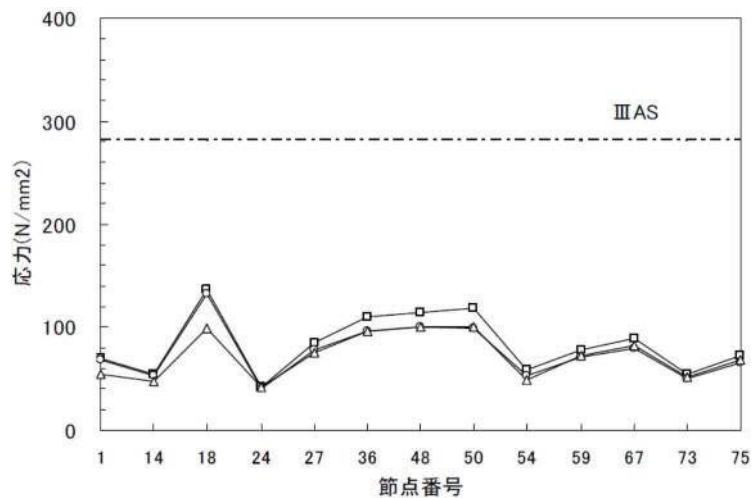
□—絶対値和法    ○—SRSS法    △—時刻歴法



兵庫県南部地震（松村組観測波）



人工波



エルセントロ波

第4.2-7図 主要な部位における発生応力 (FDW-001 Bプラント)

第4.2-1表 S R S S 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）

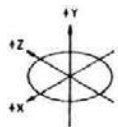
解析対象配管	入力地震波	最大応力発生点	S R S S / 同時入力
FDW-001 (Aプラント)	松村組観測波	分岐部(節点 No26)	1.08
	人工波	分岐部(節点 No26)	1.08
	エルセントロ波	分岐部(節点 No26)	1.08
MS-001 (Aプラント)	松村組観測波	分岐部(節点 No10)	1.15
	人工波	分岐部(節点 No10)	1.20
	エルセントロ波	分岐部(節点 No10)	1.18
RHR-001 (Aプラント)	松村組観測波	拘束点(節点 No28)	1.15
	人工波	拘束点(節点 No28)	1.15
	エルセントロ波	拘束点(節点 No28)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

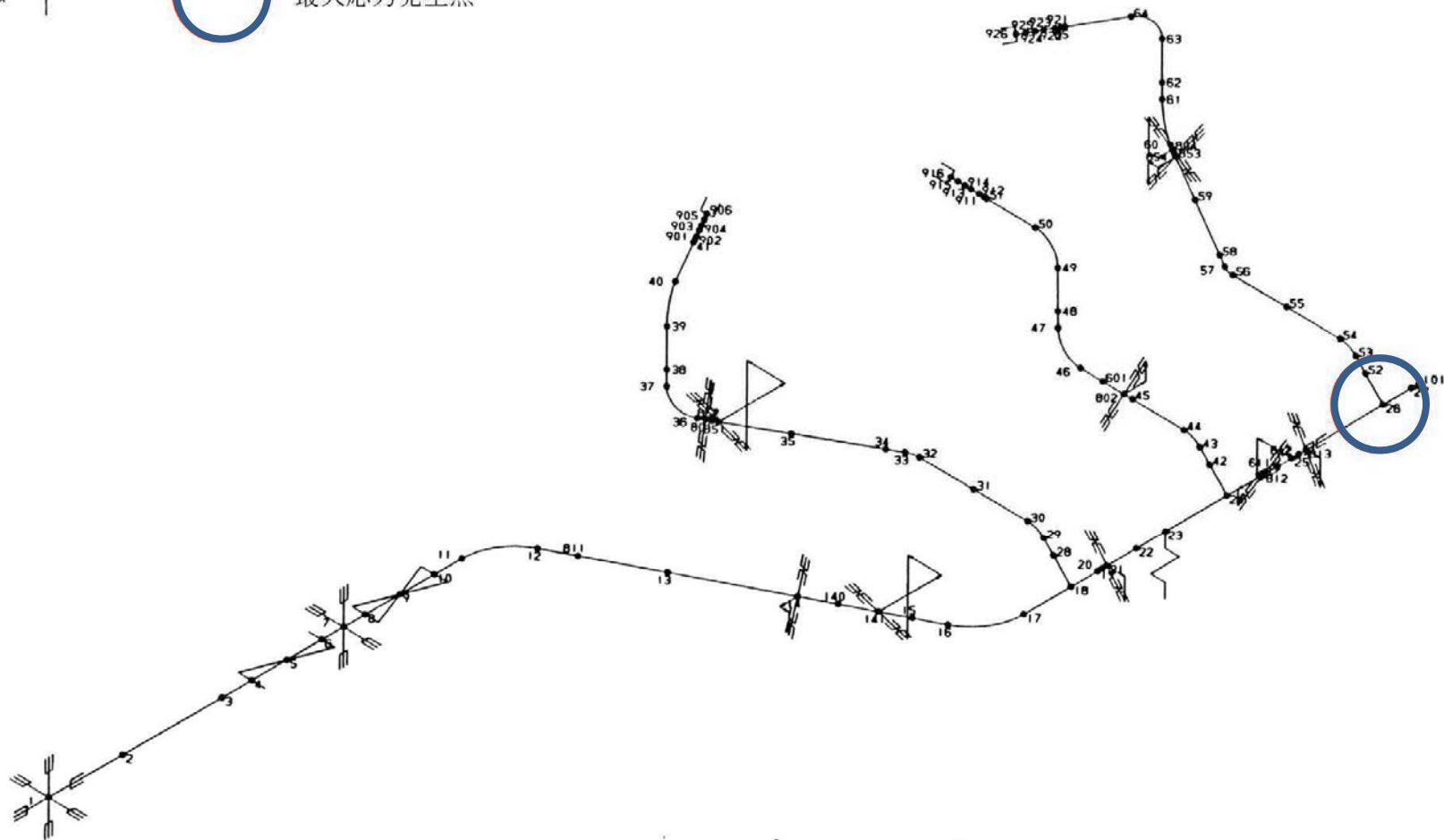
MS：主蒸気系配管

RHR：残留熱除去系配管





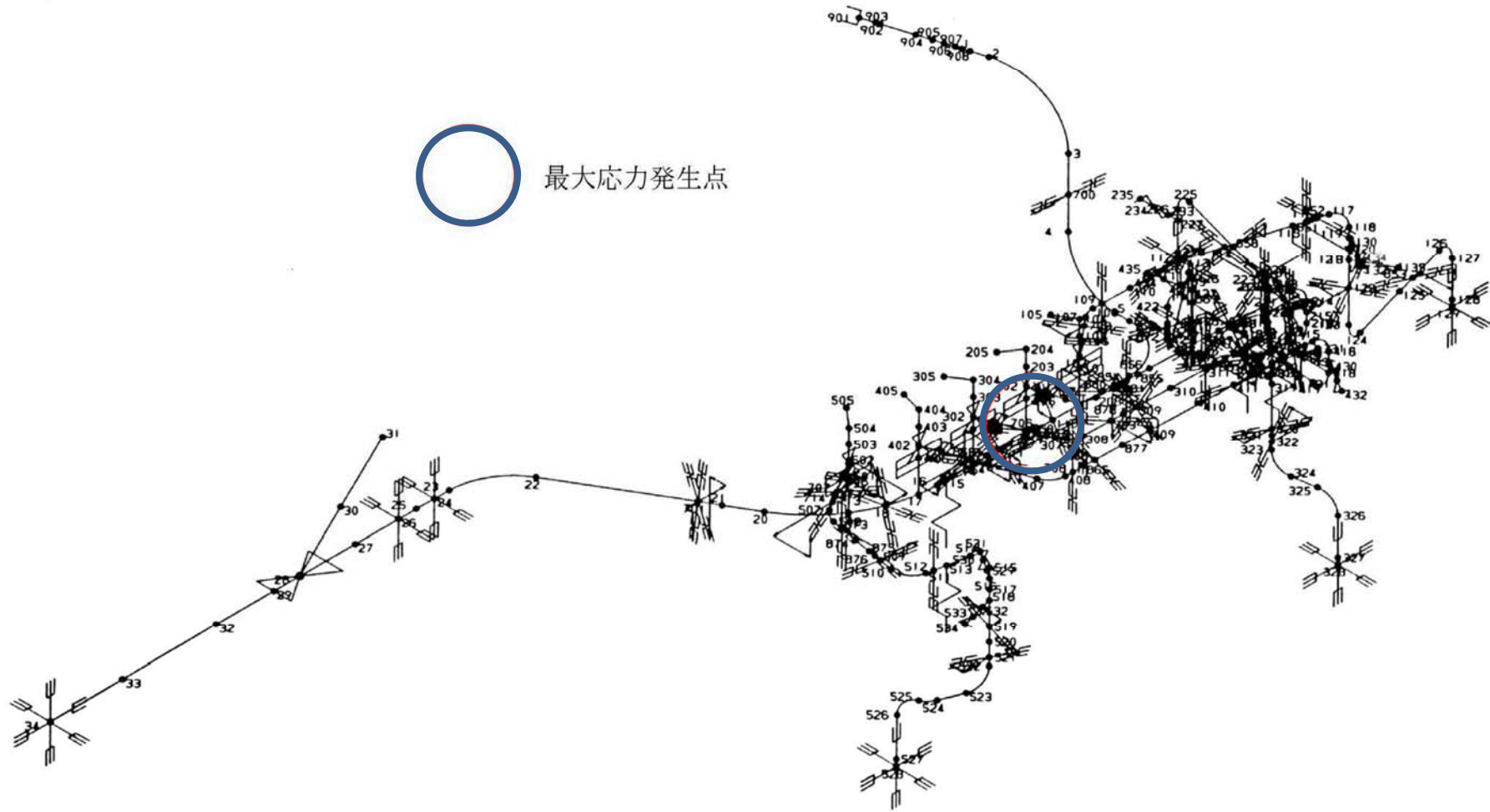
最大応力発生点



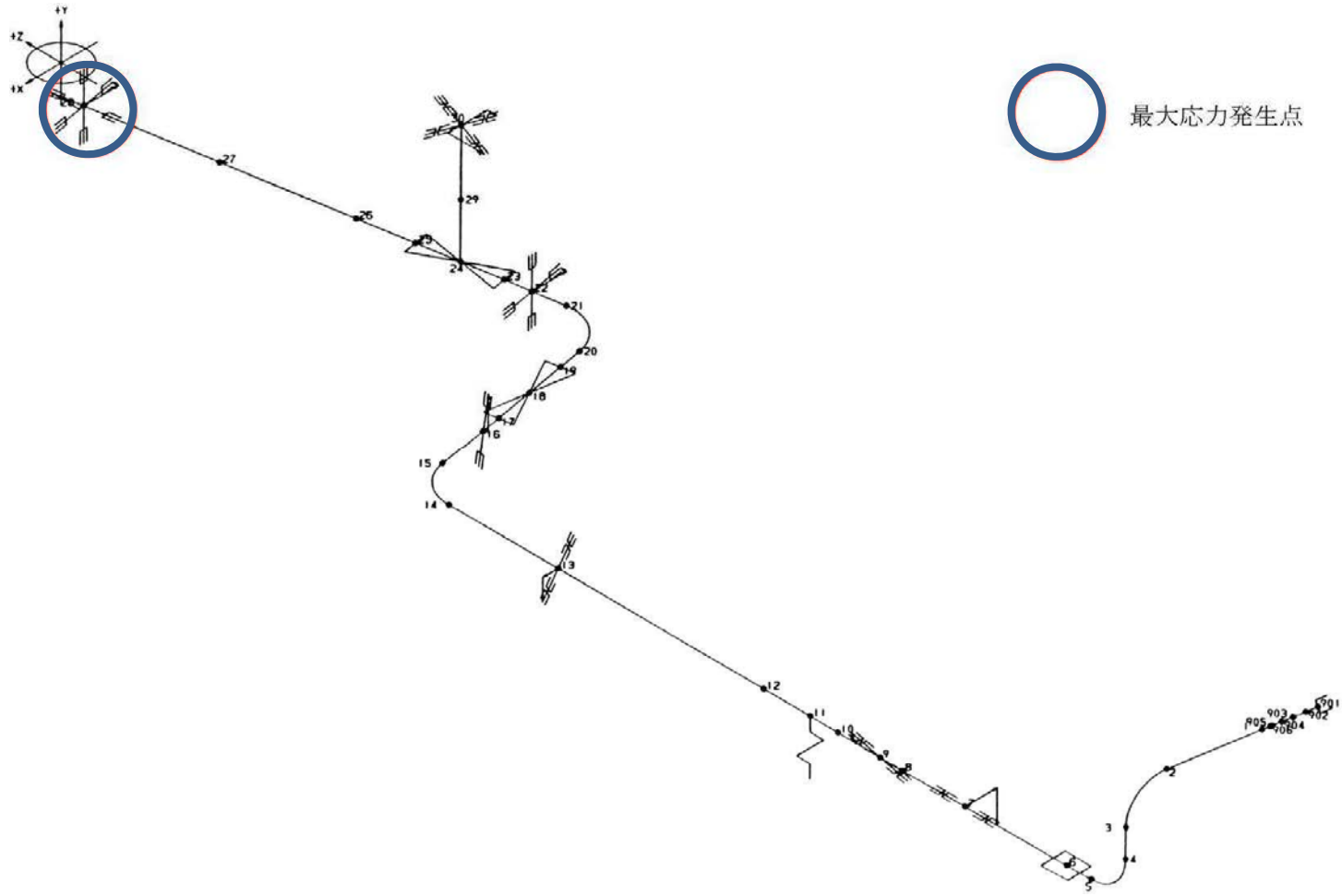
第4.2-8図 給水系配管 (FDW-001 Aプラント)



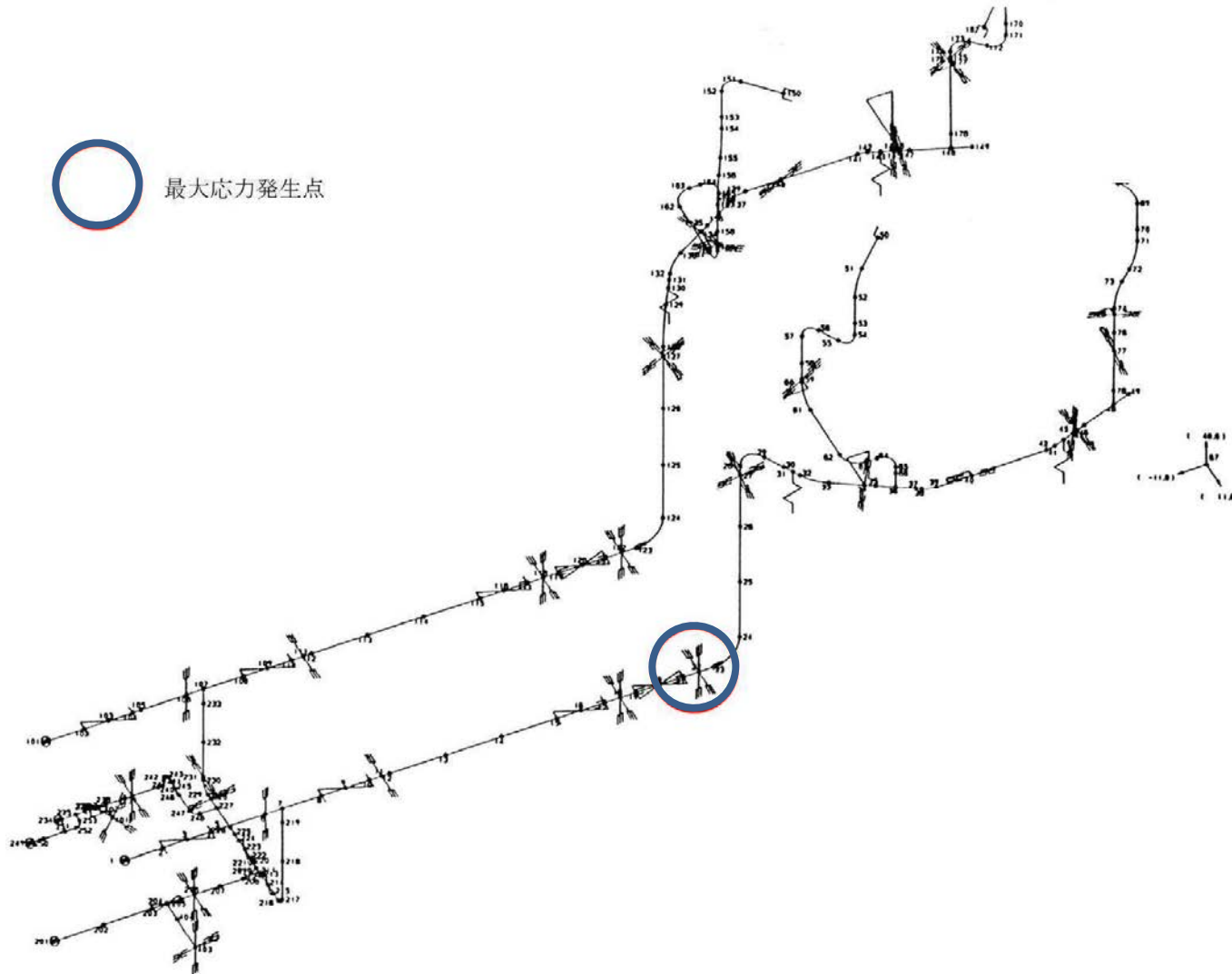

 最大応力発生点



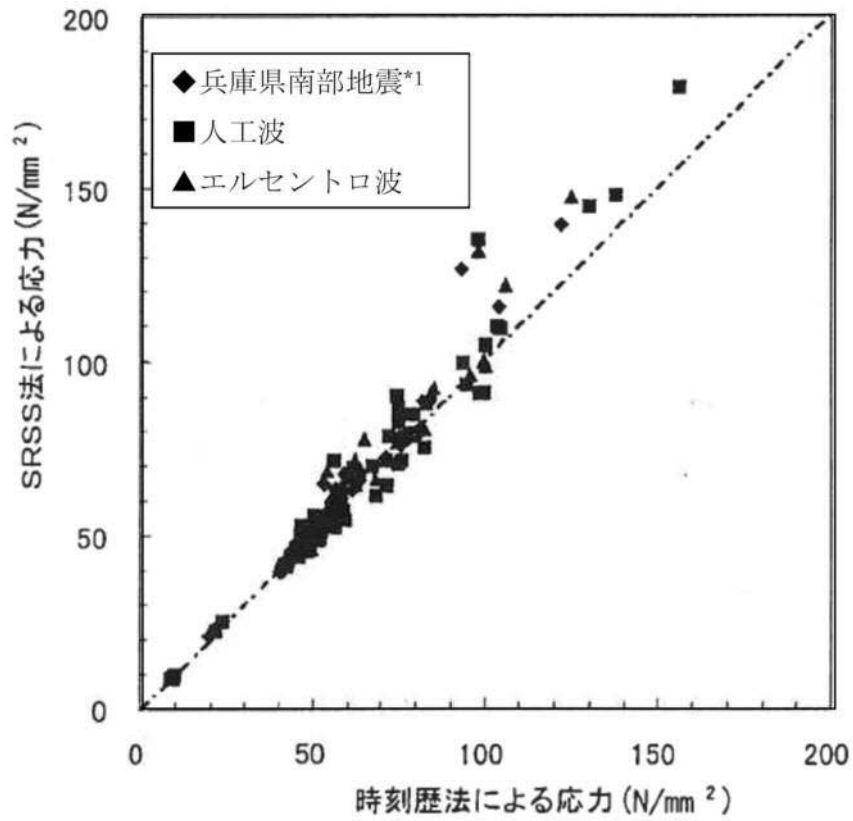
第4.2-9図 主蒸気系配管 (MS-001 Aプラント)



第4.2-10図 残留熱除去系配管 (RHR-001 Aプラント)



第4.2-11図 給水系配管 (FDW-001 Bプラント)



注記

\* 1 : 松村組観測波

第4.2-12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)

#### 4.3 再処理施設及び廃棄物管理施設に対する適用根拠について

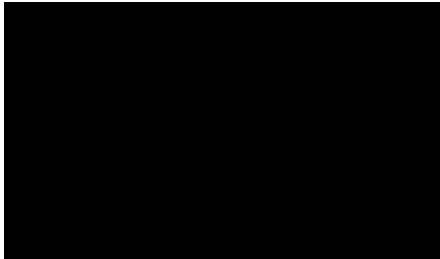
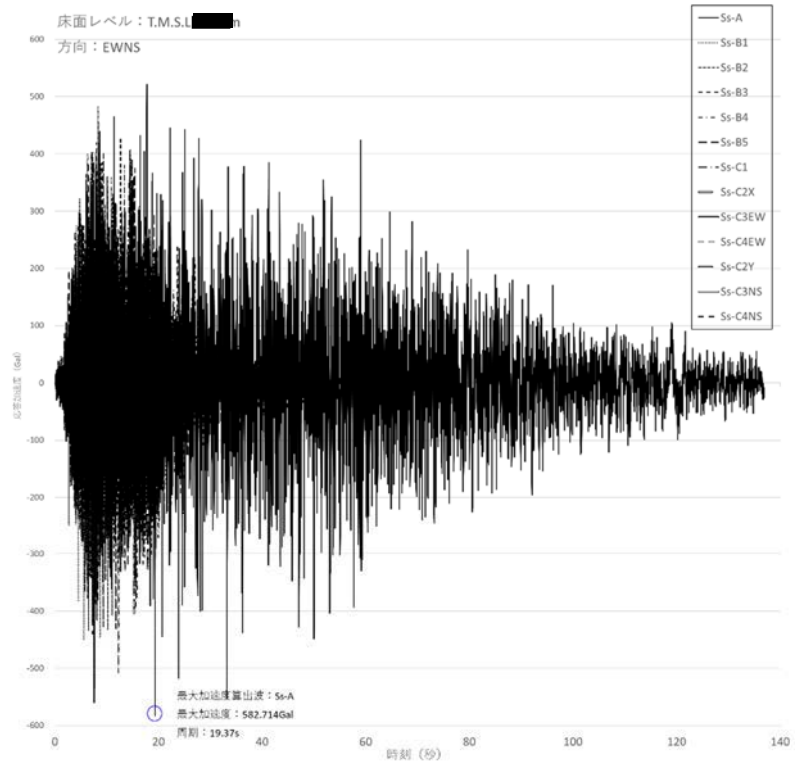
再処理施設及び廃棄物管理施設における水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差について、XXXXXXXXXXを対象に、基準地震動である $S_s-A$ 、 $S_s-B1\sim B5$ 、 $S_s-C1\sim C5$ に対する水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻の差を確認した。ここで、機器・配管系の耐震評価に用いる水平方向の設計用震度は、全ての地震動に対する南北方向及び東西方向の最大応答加速度を包絡した値を用いることを踏まえ、水平方向の最大応答値の生起時刻については、南北方向及び東西方向を通じた最大応答加速度の生起時刻を用いた。

第4.3-1図及び第4.3-1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、再処理施設及び廃棄物管理施設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。

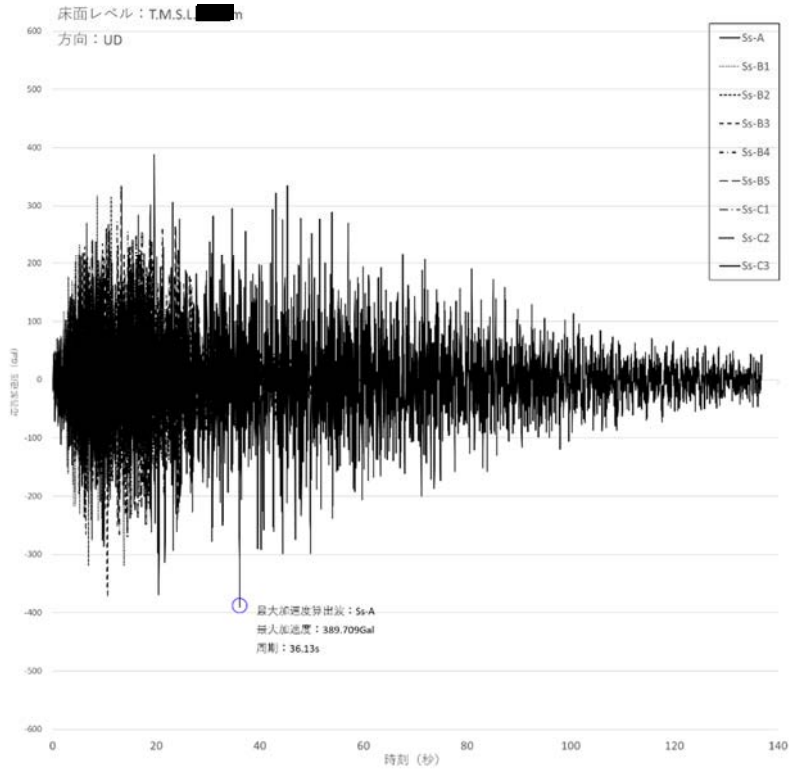
なお、その他の屋外構築物及び建屋の地震応答についても水平方向及び鉛直方向の最大応答値の生起時刻には差があることを確認している。



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4.3-1図 [redacted] の応答値 (T.M.S.L. [redacted] m の例)

第4.3-1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

5. まとめ

以上から、再処理施設及び廃棄物管理施設では、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S R S S法を用いることとする。

6. 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)