

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-028-2-2 改0
提出年月日	2020年4月7日

建屋－機器連成地震応答解析の補足について

2020年4月

東京電力ホールディングス株式会社

目 次

1. 地震応答解析モデルの設定について	1
2. 誘発上下動の考慮方法	70
3. 建屋－機器連成解析固有の材料物性の不確かさ等の検討ケースについて	84
4. 燃料交換ベローズの耐震性について	104
5. 地震応答解析及び静的解析における最大応答加速度と最大応答変位の関係について ...	111
6. 今回工認における静的震度について	

下線：今回提出範囲

1. 地震応答解析モデルの設定について

1.1 はじめに

地震応答解析モデルの設定については、V-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の解析モデルの設定方針に基づいており、設定内容については、V-2-2-2「原子炉本体の基礎の地震応答計算書」及びV-2-3-2「炉心、原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物の地震応答計算書」で説明している。

ここで、今回工認の地震応答解析モデルは、既工認のモデル諸元を適用することを基本とするが、適正な地震応答解析を実施する観点及び鉛直方向応答を適切に評価する観点から、新たに原子炉本体基礎への非線形復元力特性の考慮と鉛直方向地震応答解析モデルの追加を行っている。今回工認での水平方向の地震応答解析モデルを図 1.1-1 に、鉛直方向の地震応答解析モデルを図 1.1-2 に示す。

本章では、地震応答解析モデルに関して、既工認での設定内容及び今回工認での設定内容等について説明する。

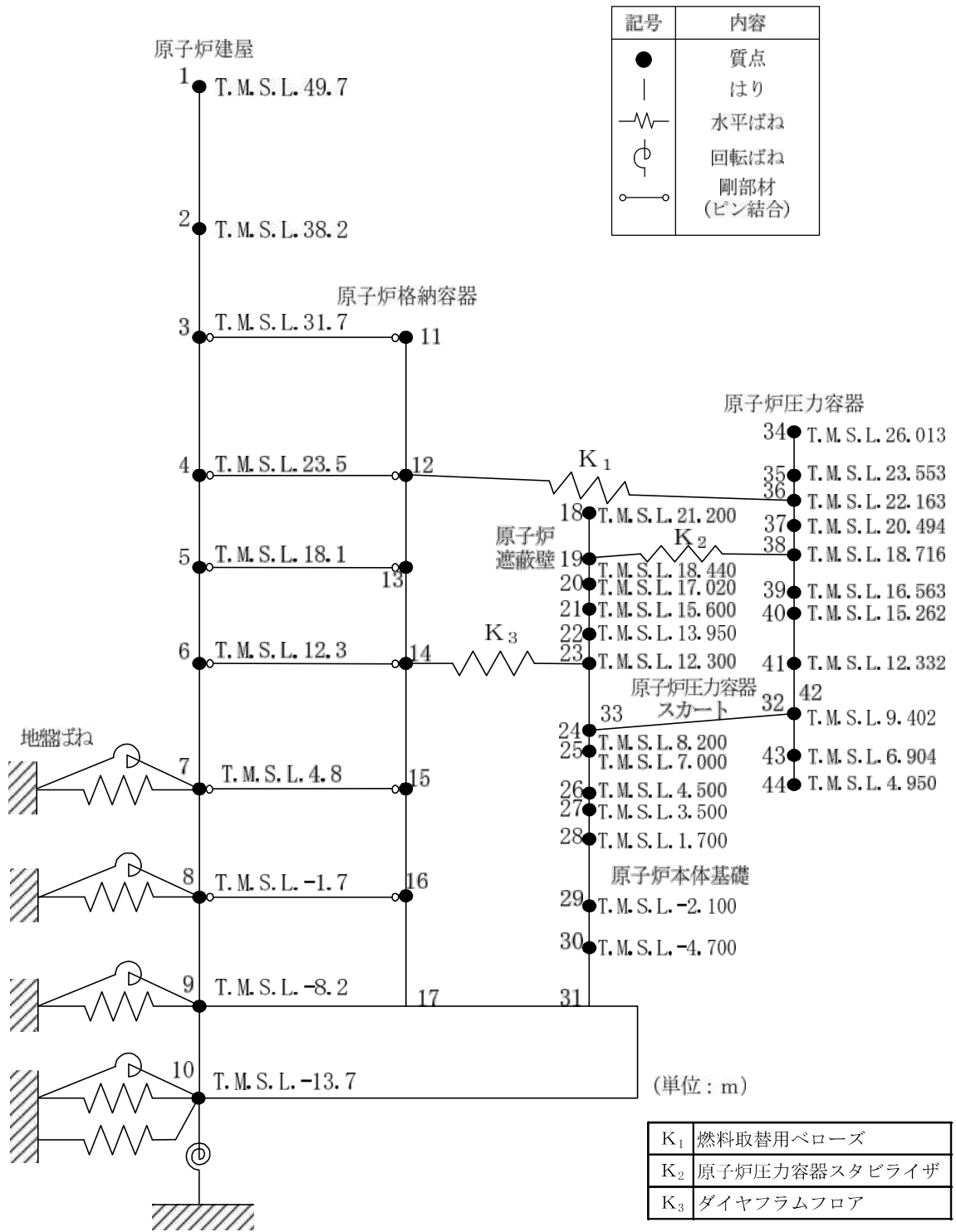


図 1.1-1 (1/4) 水平方向地震応答解析モデル (大型機器系, NS 方向)

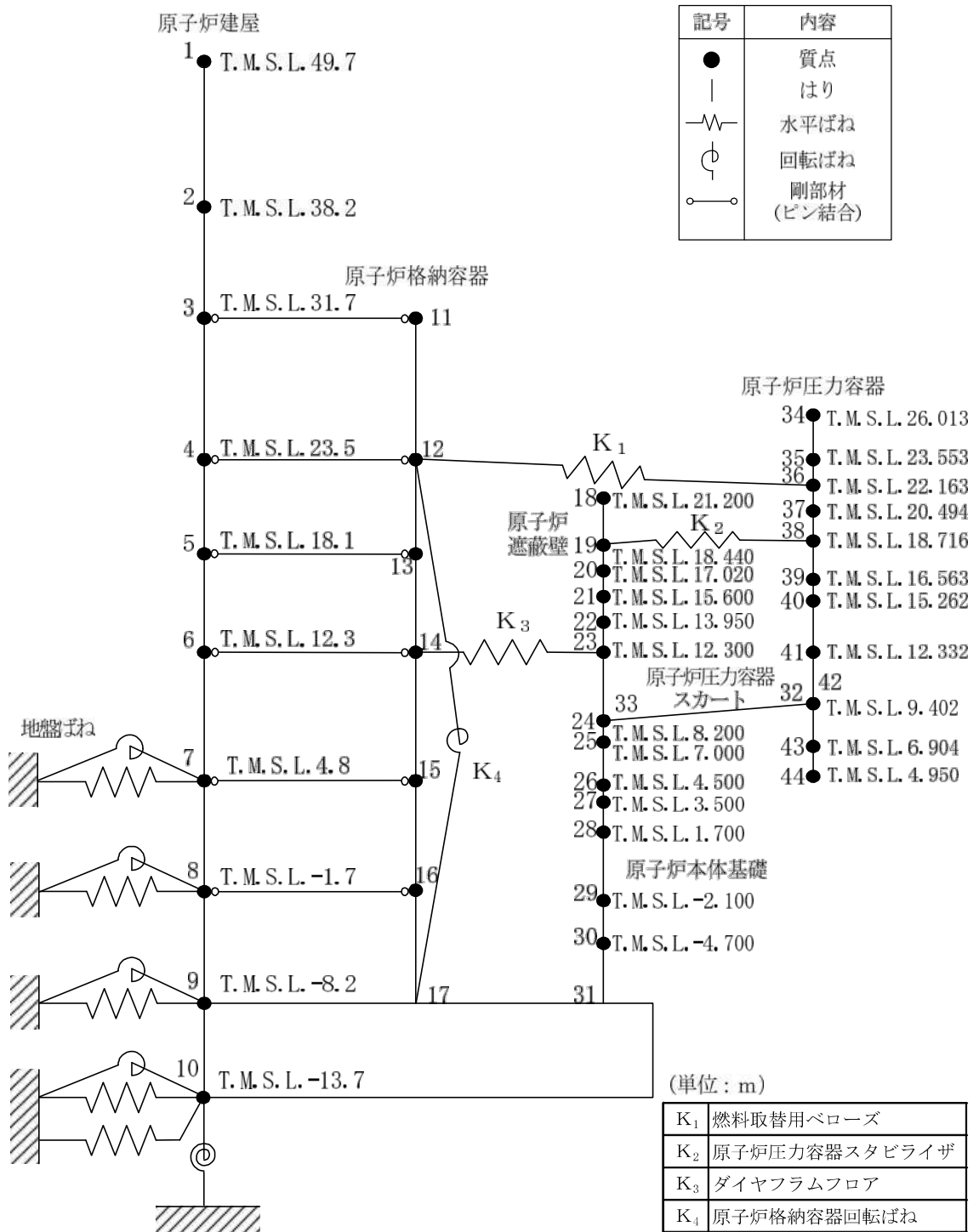


図 1.1-1 (2/4) 水平方向地震応答解析モデル (大型機器系, EW 方向)

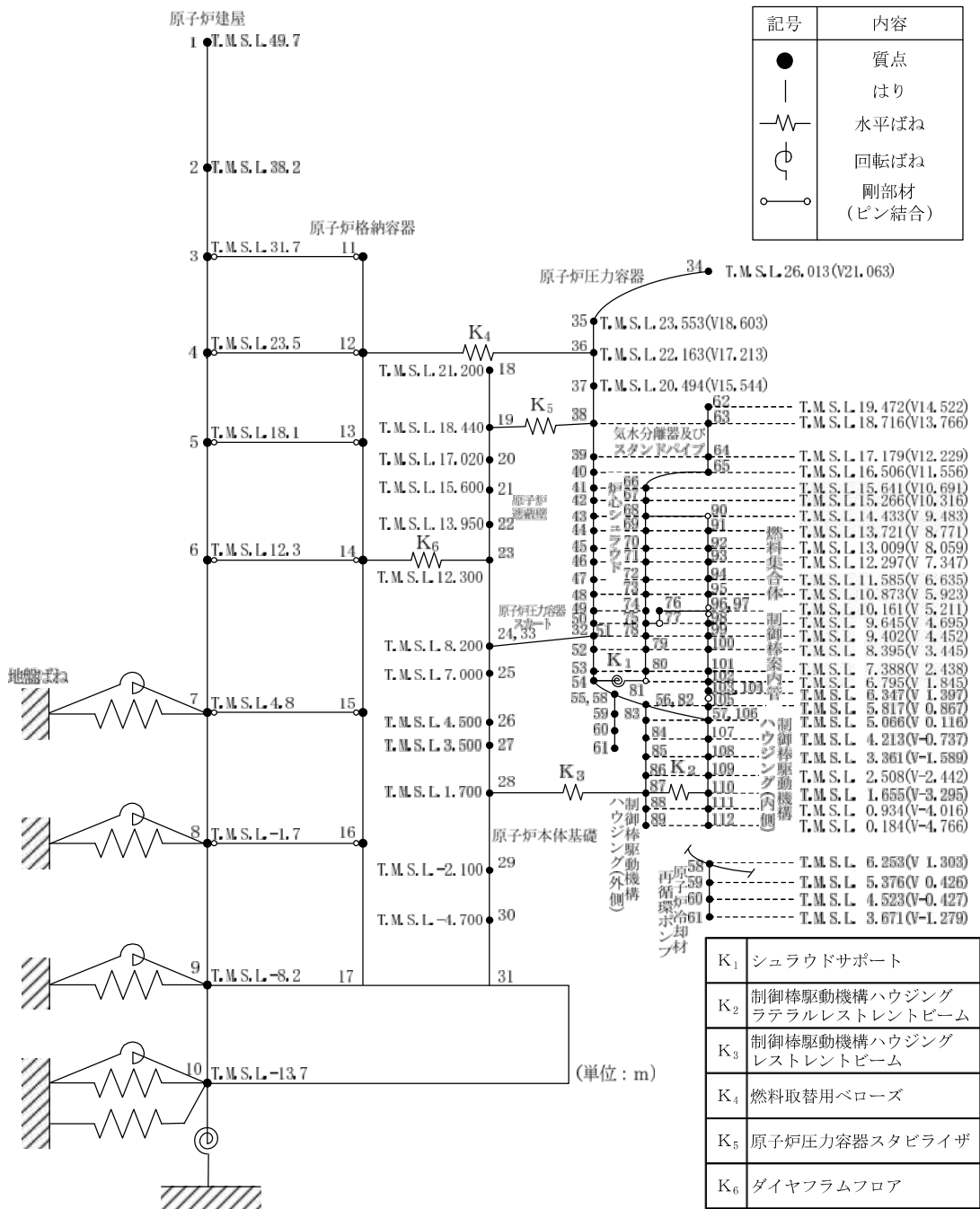


図 1.1-1 (3/4) 水平方向地震応答解析モデル (炉内構造物系, NS 方向)

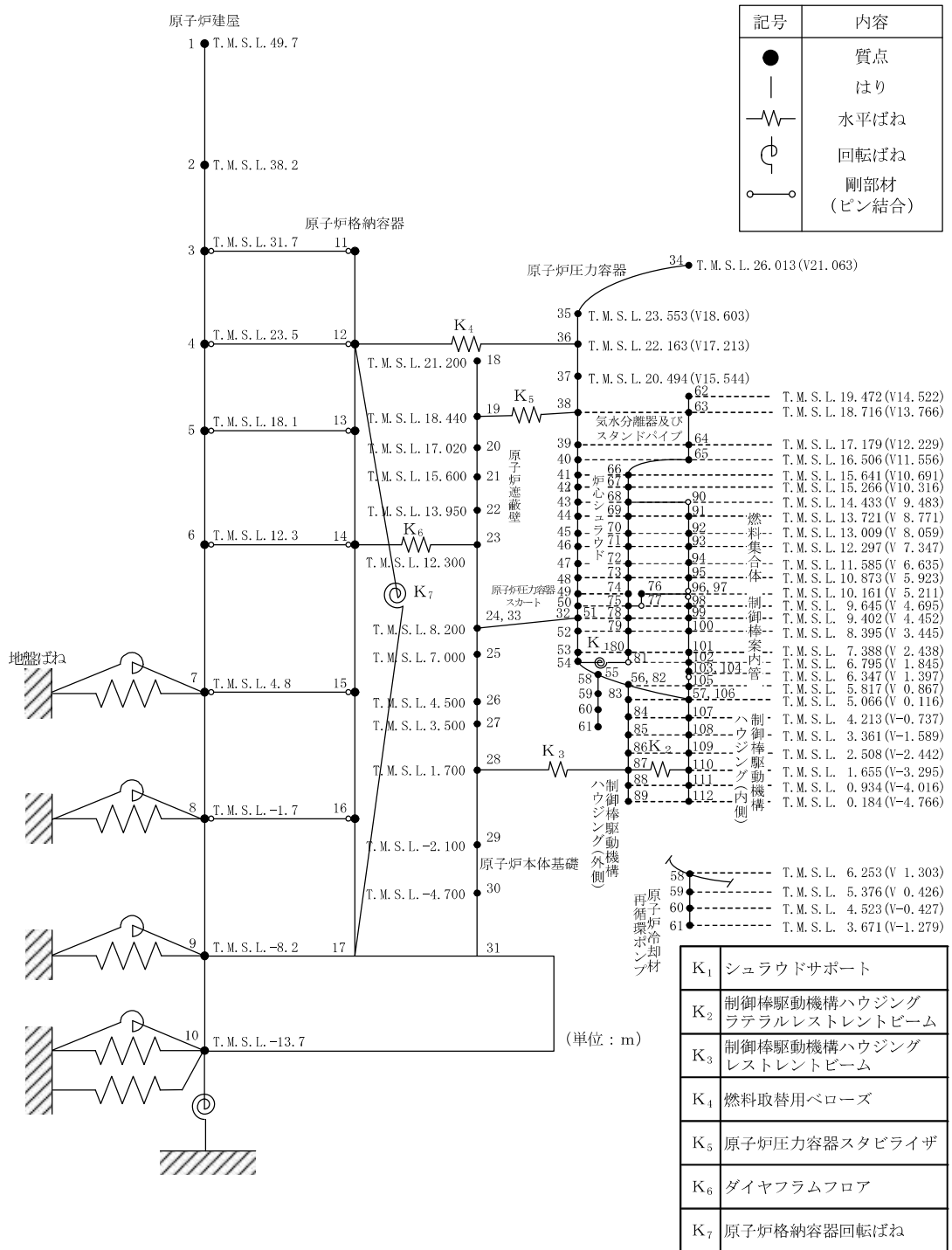


図 1.1-1 (4/4) 水平方向地震応答解析モデル (炉内構造物系, EW 方向)

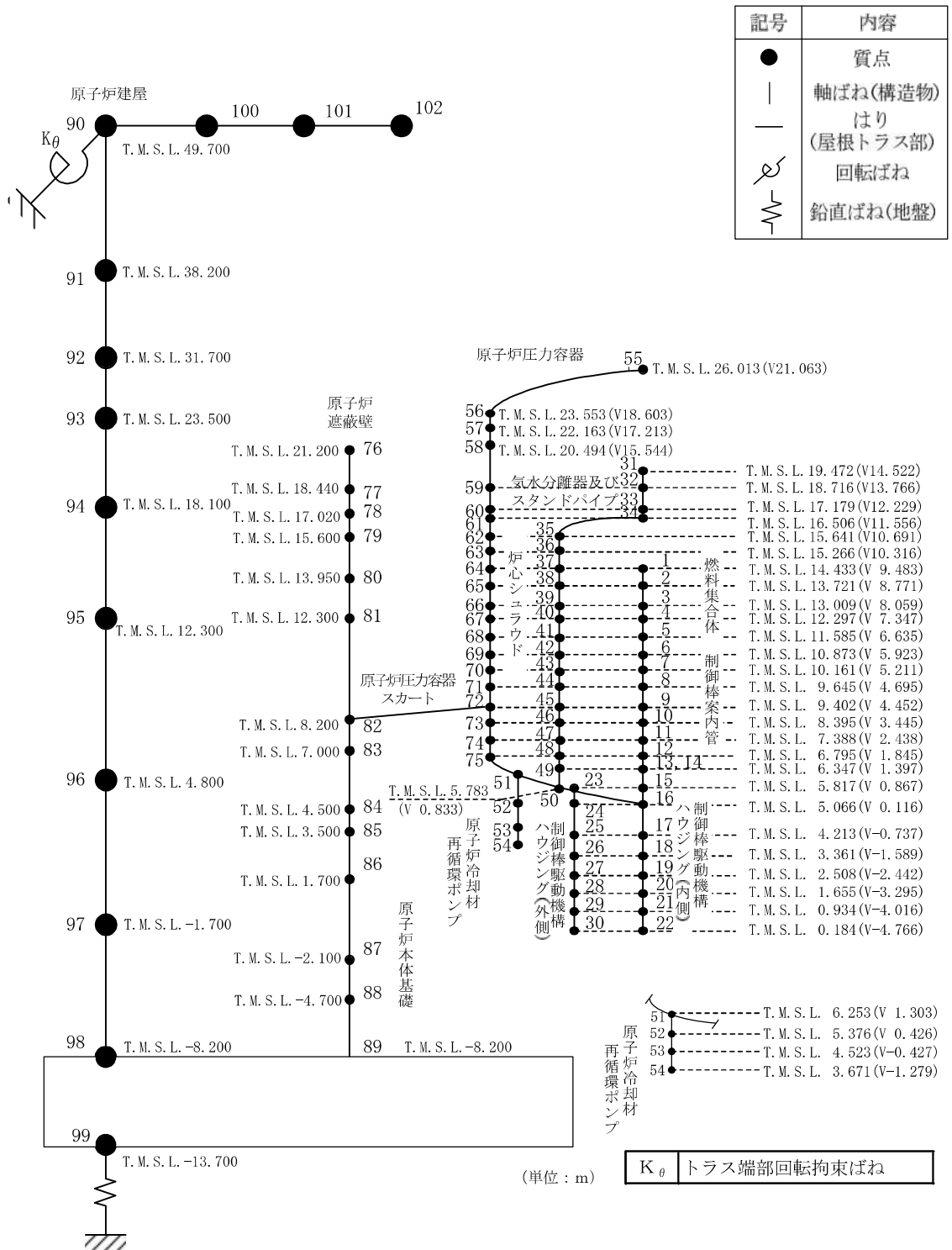


図 1.1-2 鉛直方向地震応答解析モデル

1.2 既工認同様の地震応答解析モデルの設定方法

1.2.1 質点位置

解析モデルの質点位置は、各構造物の振動性状を適切に評価できるよう配慮するとともに、部材の剛性が変化する点、構造的に不連続となる位置、応力評価点等を考慮して設定する。なお、炉内構造物系の解析モデルの原子炉圧力容器胴板の質点位置は、大型機器系の質点位置をベースとして炉水の付加質量効果の反映を簡便に算定するため、原子炉圧力容器内部構造物の質点位置と同一標高となるように設定する。

1.2.2 質点質量

質点質量は、各構造物の連続する2質点間の質量の1/2を各質点に加え、2質点間の付加物等の質量も考慮する。なお、質量は定格運転時質量を使用する。

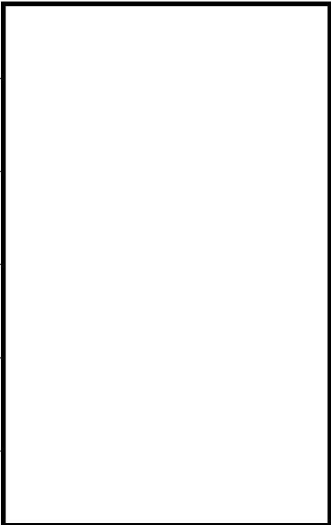
1.2.3 断面剛性（有効せん断断面積及び断面二次モーメント）

各構造物の連続する質点間のはりは、等価な曲げ及びせん断剛性を有するようモデル化しており、断面二次モーメント及び有効せん断断面積の設定に際しては、公称寸法を使用し、原則として部材中央の断面で評価する。

1.2.4 構造物間ばね定数

各構造物間を接続する各機器を等価なばねでモデル化する。ばね定数の設定に際しては、ばねとしてモデル化する部材の形状を考慮して、材料力学の梁の公式、文献等による理論式又はFEM解析によりばね定数を算定する。ばね定数の数値一覧を表1.2.4-1に、ばね定数の算定方法の詳細を以下に示す。

表 1.2.4-1 各機器のばね定数

No.	名称	ばね定数
K ₁	シュラウドサポート	
K ₂	制御棒駆動機構ハウジング ラテラルレストレント	
K ₃	制御棒駆動機構ハウジング レストレントビーム	
K ₄	燃料取替用ベローズ	
K ₅	原子炉圧力容器スタビライザ	
K ₆	ダイヤフラムフロア	

(1) シュラウドサポート : K₁

a. シュラウドサポートの構造

シュラウドサポートは、シュラウドサポートシリンダ、シュラウドサポートプレート及びシュラウドサポートレグからなる溶接構造物である。シュラウドサポートレグ下端及びシュラウドサポートプレート外周が原子炉圧力容器に溶接固定されており、シュラウドサポートシリンダを介して炉心シュラウドを支持する。

シュラウドサポートの構造概要を図 1.2.4-1 に示す。

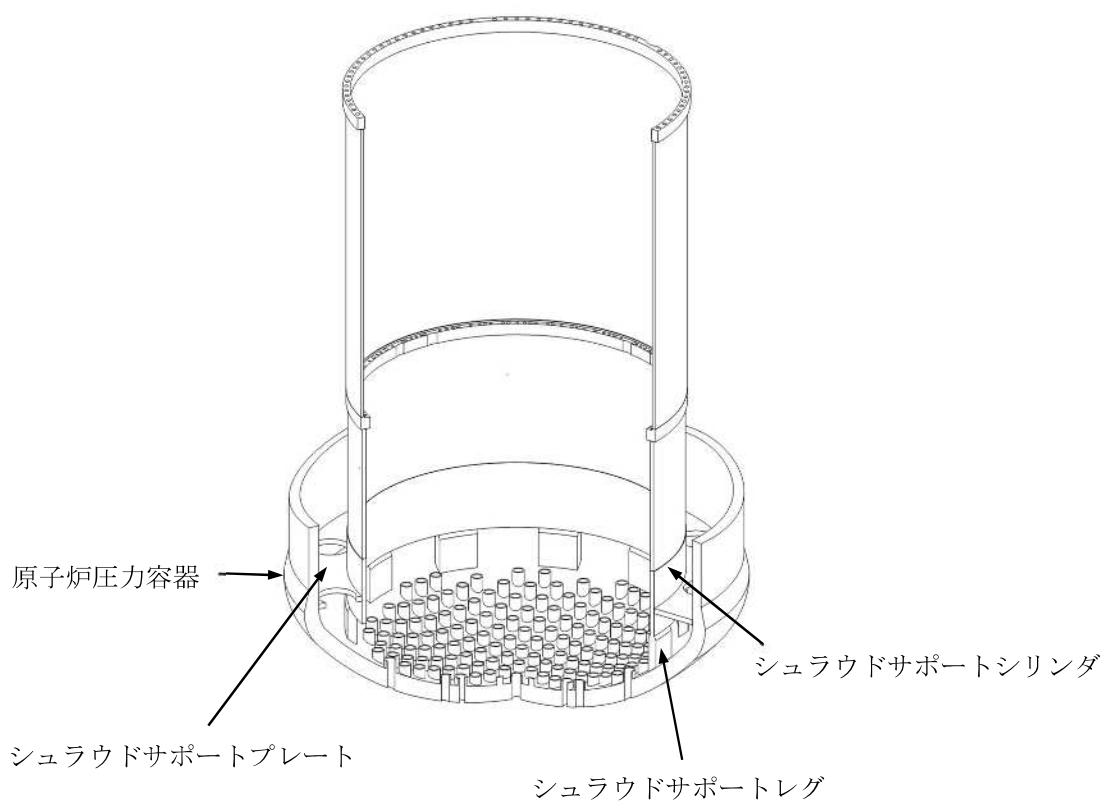


図 1.2.4-1 シュラウドサポートの構造概要

b. シュラウドサポートのばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

シュラウドサポート全体でのばね定数 K_1 は、シュラウドサポートシリンダ、シュラウドサポートレグ及びシュラウドサポートプレートの回転ばね定数を算出し、以下の通り組み合わせて算定する。図 1.2.4-2 にばね全体の模式図を示す。

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{K_{MA1}} + \frac{1}{K_{MA2}}} + K_{MB}$$

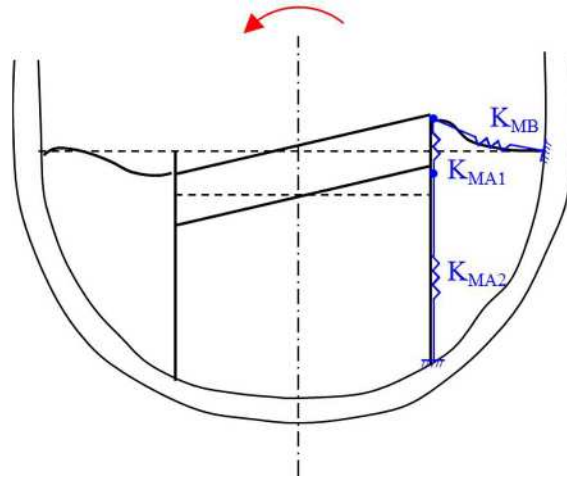


図 1.2.4-2 全体ばねの模式図

ここで、

K_{MA1} : シュラウドサポートシリンダのばね定数

K_{MA2} : シュラウドサポートレグのばね定数

K_{MB} : シュラウドサポートプレートのばね定数

(b) 構成部材のばね定数算定方法

イ. シュラウドサポートシリンダ K_{MA1}

シュラウドサポートシリンダのばね定数 K_{MA1} は、以下の式に基づき算定する。

$$K_{MA1} = \frac{R_m^2 \cdot A_1 \cdot E}{2L_1}$$

ロ. シュラウドサポートレグ K_{MA2}

シュラウドサポートレグのばね定数 K_{MA2} は、以下の式に基づき算定する。

$$K_{MA2} = \frac{R_m^2 \cdot A_2 \cdot E}{2L_2}$$

(c) シュラウドサポートプレート K_{MB}

シュラウドサポートプレートのばね定数 K_{MB} は、以下の式^[1]に基づき算定する。

$$K_{MB} = \frac{\pi \cdot R_m^2 \cdot E \cdot t_3^3}{3C_2 \cdot D_o^2 \cdot (1 - \nu^2)}$$

ここで、以下の各記号は図 1.2.4-3 に示す原子炉圧力容器断面図による。

$$R_m : = \frac{1}{2}(D_i - t_1) = \boxed{} \text{(m)}$$

A_1 : シュラウドサポートシリンダ断面積

$$= \pi \cdot t_1 (D_i - t_1) = \boxed{} \text{(m}^2\text{)}$$

A_2 : シュラウドサポートレグ断面積

$$= N \cdot B \cdot t_1 = \boxed{} \text{(m}^2\text{)}$$

L_1 : シュラウドサポートシリンダ長さ = 0.4475 (m)

L_2 : シュラウドサポートレグ長さ = $\boxed{}$ (m)

t_1 : シュラウドサポートシリンダ厚さ = $\boxed{}$ (m)

t_2 : シュラウドサポートレグ厚さ = $\boxed{}$ (m)

t_3 : シュラウドサポートプレート厚さ = $\boxed{}$ (m)

D_o : 原子炉圧力容器内径 = $\boxed{}$ (m)

D_i : 炉心シュラウド外径 = $\boxed{}$ (m)

$$C_1 : = \frac{D_i - t_1}{D_o} = \boxed{} \text{(—)}$$

$$C_2 : = \frac{1}{8} \left\{ 1 - C_1^2 - \frac{4C_1^2}{1 - C_1^2} \left(\ln \frac{1}{C_1} \right)^2 \right\} = \boxed{} \text{(—)}$$

B : シュラウドサポートレグ幅 = $\boxed{}$ (m)

N : シュラウドサポートレグ個数 = $\boxed{}$ (—)

E : 縦弾性係数 = $\boxed{}$ (t/m²)

ν : ポアソン比 = $\boxed{}$ (—)

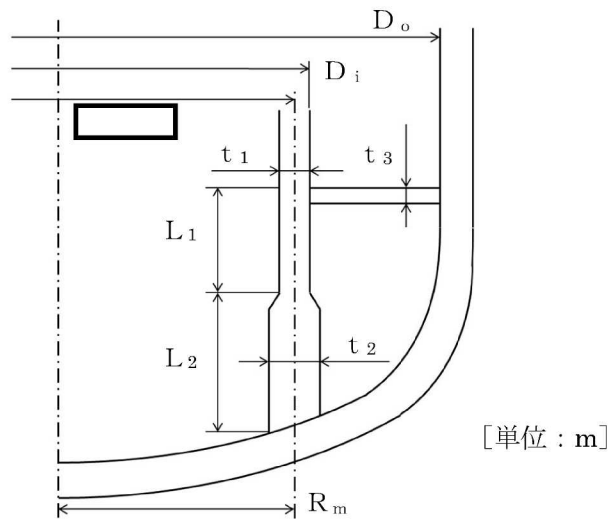


図 1.2.4-3 原子炉圧力容器断面図

(3) シュラウドサポートのばね定数算定結果

以上より算定した構成部材及び全体のばね定数の算定結果を表 1.2.4-2 に示す。

表 1.2.4-2 シュラウドサポートのばね定数

	記号	ばね定数
シュラウドサポートシリンダのばね定数	K_{MA1}	
シュラウドサポートレグのばね定数	K_{MA2}	
シュラウドサポートプレートのばね定数	K_{MB}	
シュラウドサポートのばね定数	K_1	

(2) 制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレント：K₂

a. 制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレントの構造

制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレントは，制御棒駆動機構ハウジングの下端フランジにボルト締結にて設置された構造物であり，ヘッドボルト，ベース（ヘッドボルト有とボルト無の2種類）からなる。

制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレントは地震時に制御棒駆動機構ハウジングを水平方向に支持し，制御棒駆動機構ハウジングレストレントビームへ荷重を伝達する。隣り合う制御棒駆動機構ハウジングは制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレントを介して互いに接触により取り合うため，圧縮方向の荷重は伝達するが，引張方向の荷重は伝達しない構造である。

制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレントの構造概要を図 1.2.4-4 に示す。

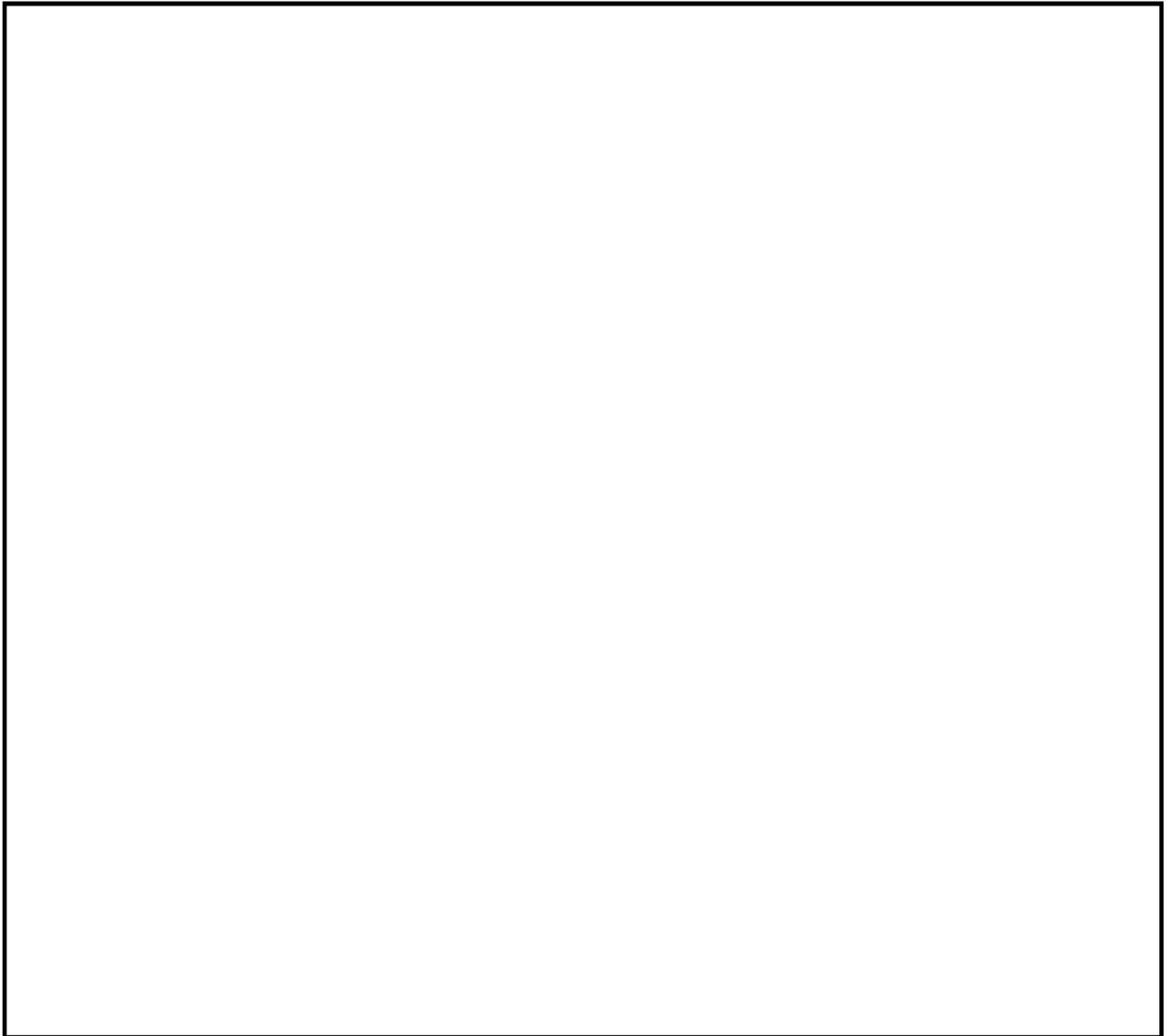


図 1.2.4-4 制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレントの構造概要

b. 制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレントのばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

制御棒駆動機構ハウジング（内側）と制御棒駆動機構ハウジング（外側）は、それぞれ最短部材の中心部と最長部材の最外部の制御棒駆動機構ハウジングを代表させてモデル化している。また、制御棒駆動機構ハウジング（内側）は、本分の制御棒駆動機構ハウジングの重量、断面剛性をモデル化しているため、制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレント全体のばね定数 K_2 は、中央1列の直列ばね定数を倍することで算定する。

図1.2.4-4中ので囲んだ中央1列には、制御棒駆動機構ハウジング間のラテラルレストレント個と制御棒駆動機構ハウジング／レストレントビーム間のラテラルレストレント個が直列に接続されているため、全体のばね定数は以下の式に基づき算定する。

$$K_2 = \text{$$

ここで、

K_A : 制御棒駆動機構ハウジング間のラテラルレストレントのばね定数

K_B : 制御棒駆動機構ハウジング／レストレントビーム間のラテラルレストレントのばね定数

(b) 構成部材のばね定数算定方法

イ. 制御棒駆動機構ハウジング間のラテラルレストレント

制御棒駆動機構ハウジング間のラテラルレストレントのばね定数 K_A は、以下の式に基づき算定する。

$$K_A = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{P1}}\right) + \left(\frac{1}{K_{P2}}\right) + \left(\frac{1}{K_{P3}}\right) + \left(\frac{1}{K_{P4}}\right) + \left(\frac{1}{K_{P5}}\right) + \left(\frac{1}{K_{P6}}\right)}$$

$$K_{Pi} = \frac{A_i \cdot E_i}{l_i}, \quad i = 1 \sim 6$$

- ロ. 制御棒駆動機構ハウジング／レストレントビーム間のラテラルレストレント
 制御棒駆動機構ハウジング／レストレントビーム間のラテラルレストレントのばね定数 K_B は、以下の式に基づき算定する。

$$K_B = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{P1}}\right) + \left(\frac{1}{K_{P2}}\right) + \left(\frac{1}{K_{P3}}\right) + \left(\frac{1}{K_{P4}}\right)}$$

$$K_{P_i} = \frac{A_i \cdot E_i}{l_i}, \quad i = 1 \sim 4$$

ここで、各記号は図 1.2.4-5 に示す制御棒駆動機構ハウジング間及び制御棒駆動機構ハウジング／レストレントビーム間のラテラルレストレントの構成部材構造図による。

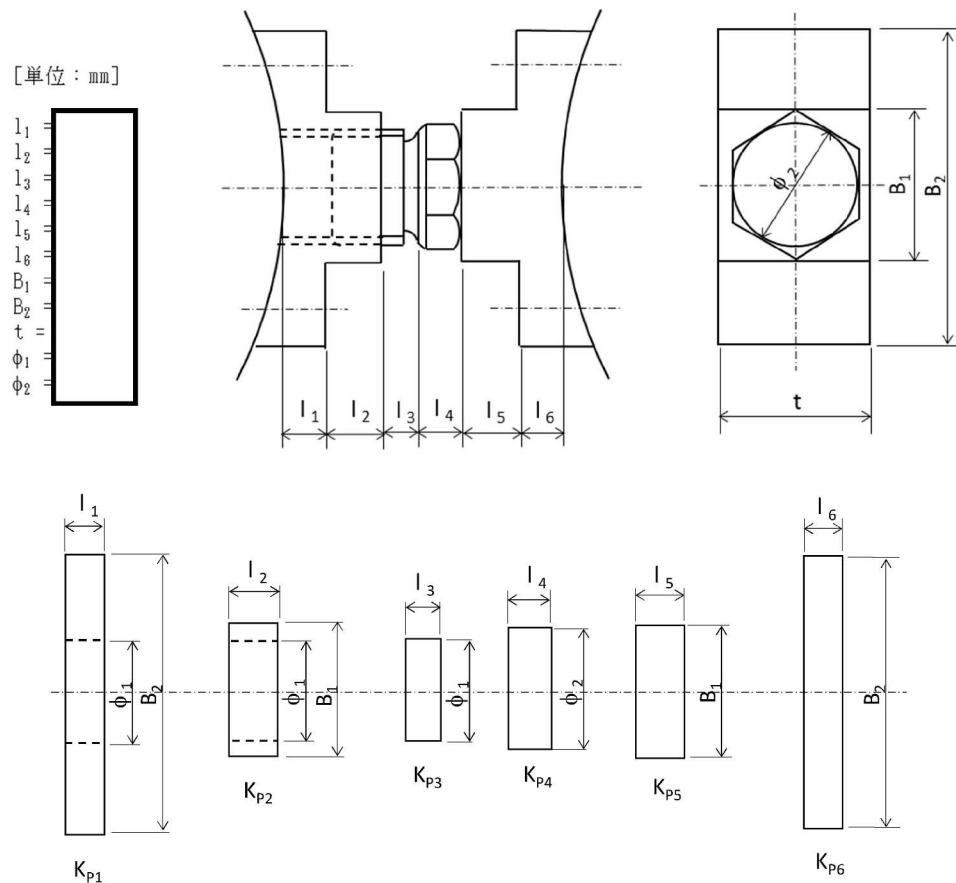


図 1.2.4-5 制御棒駆動機構ハウジング間及び制御棒駆動機構ハウジング／レストレントビーム間のラテラルレストレントの構成部材構造図

c. シュラウドサポートのばね定数算定結果

以上より算定した構成部材及び全体のばね定数の算定結果を表 1.2.4-3 に示す。

表 1.2.4-3 シュラウドサポートのばね定数

	記号	ばね定数
制御棒駆動機構ハウジング間のラテラルレストレントのばね定数	K_A	
制御棒駆動機構ハウジング／レストレントビーム間のラテラルレストレントのばね定数	K_B	
制御棒駆動機構ハウジングラテラルレストレントのばね定数	K_2	

(3) 制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム：K₃

a. 制御棒駆動機構ハウジングレストレントビームの構造

制御棒駆動機構ハウジングレストレントビーム（以下「CRDHレストレントビーム」という。）は、原子炉本体基礎に対し、サポートビームを介して設置され、サポートビームは原子炉本体基礎に溶接接続された構造物である。構成部材としてはCRDHレストレントビーム、サポートビームからなる。

CRDHレストレントビームは、制御棒駆動機構ハウジングの水平方向地震荷重を受けるが、CRDHレストレントビームは制御棒駆動機構ハウジングを接触のみで支持しているため、圧縮方向の荷重は伝達するが引張方向の荷重は伝達しない構造である。

CRDHレストレントビームの構造概要を図 1.2.4-6 に示す。

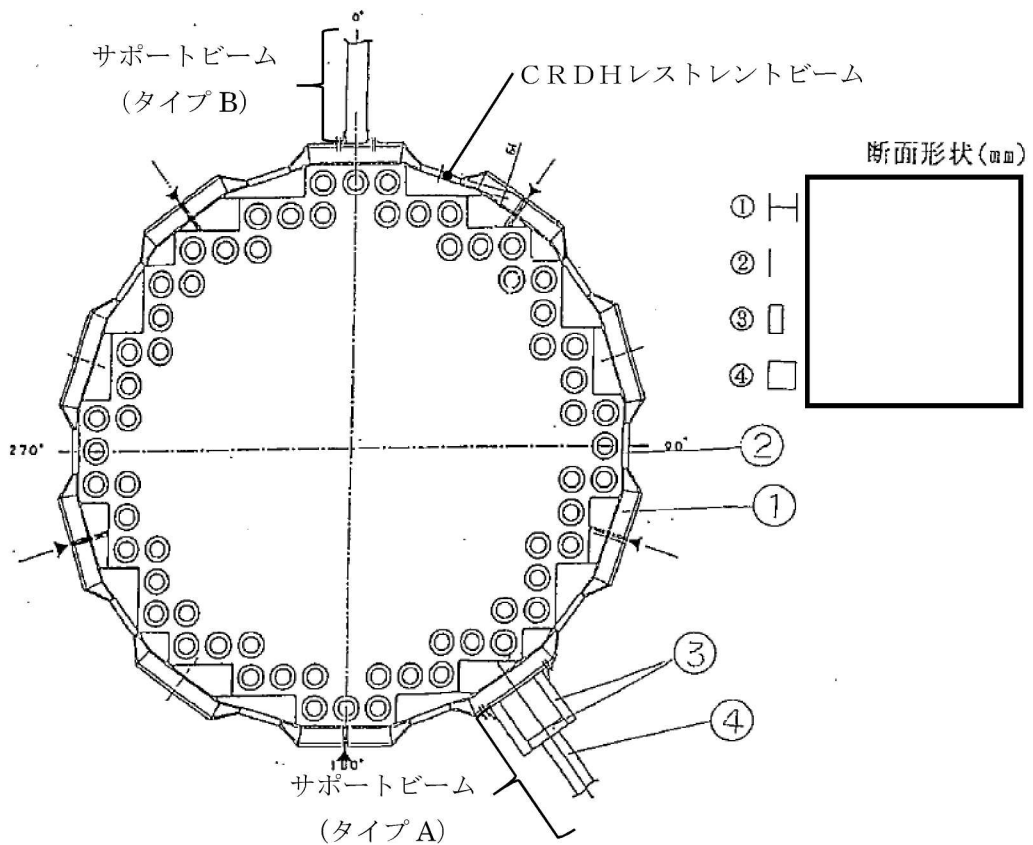


図 1.2.4-6 CRDHレストレントビームの構造概要

b. CRDHレストレントビームのばね定数算定方法

CRDHレストレントビームのばね定数 K_3 は、FEM解析により算定する。具体的には、制御棒駆動機構ハウジングの列ごとに設定した水平荷重を静的に付加した際の最大変位量を全水平荷重で除することにより算定する。

c. 計算方法

計算機コード「NASTRAN」により、各部材に断面積、断面二次モーメント、重量等を与えるビーム要素モデルで解析する。

d. 計算条件

(a) 解析モデル

CRDHレストレントビームの解析モデルを図 1.2.4-7 に示す。

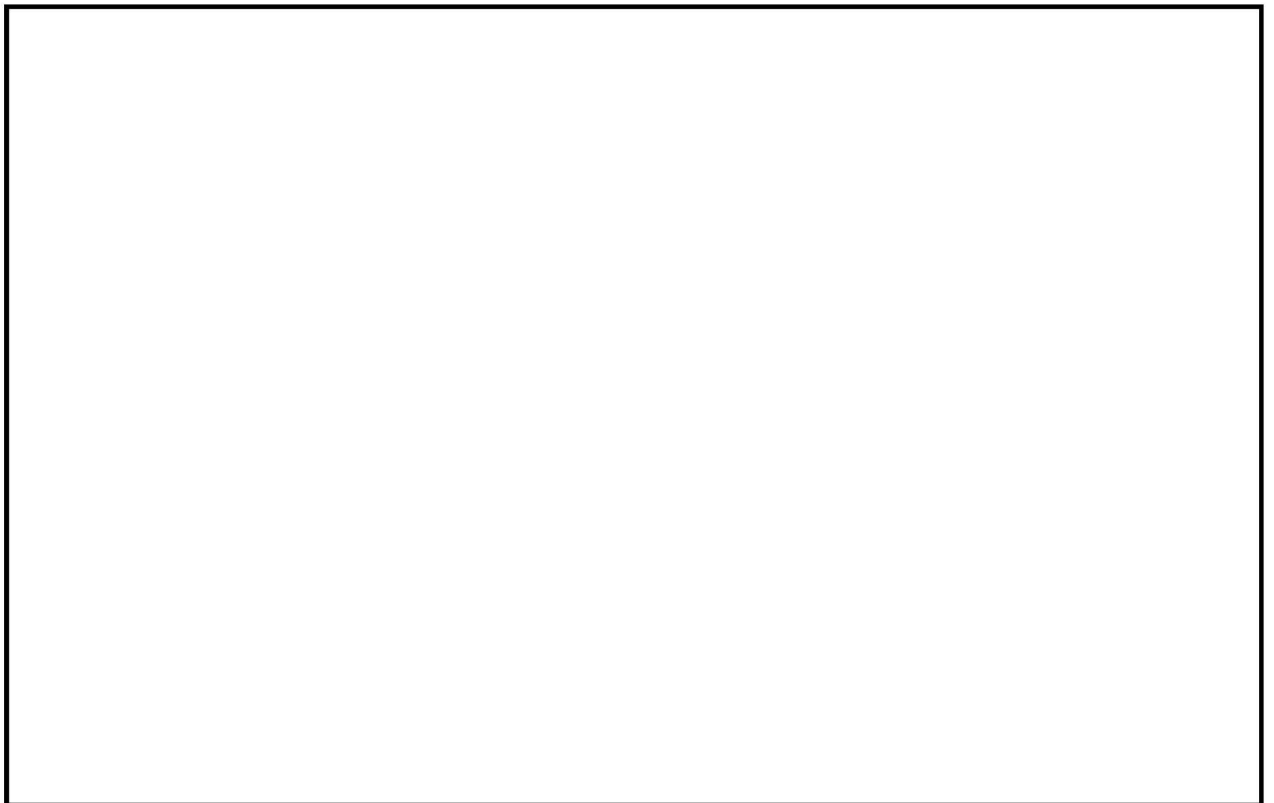


図 1.2.4-7 CRDHレストレントビーム解析モデル

(b) 各構成部材の材料物性

解析に用いる材料物性を以下に示す。

縦弾性係数 $E = \square$, ポアソン比 $\nu = \square$

(c) 荷重条件

CRDH全水平荷重 W を, 制御棒駆動機構ハウジングの列ごとの本数に応じて分配した荷重 W_i を付加する。荷重の分配は以下に示すとおりである。

CRD17本 : $W_1 = \square$
CRD15本 : $W_2 = \square$
CRD13本 : $W_3 = \square$
CRD11本 : $W_4 = \square$
CRD 7本 : $W_5 = \square$
CRD 3本 : $W_6 = \square$

(d) 境界条件

サポートビーム端部は原子炉本体基礎に溶接されていることから境界条件は固定とする。

e. CRDHレストレントビームのばね定数算定結果

水平荷重を負荷した際の変形図を図 1.2.4-8 に, ばね定数の算定結果を表 1.2.4-4 に示す。

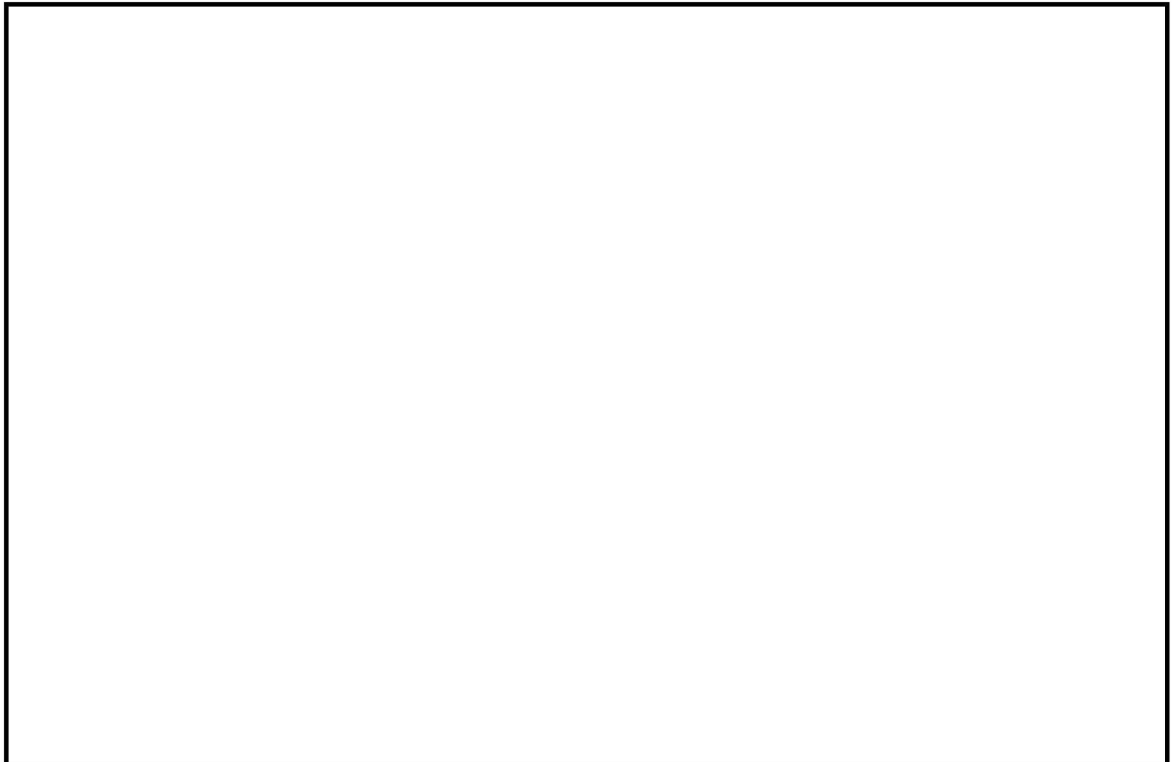


図 1.2.4-8 CRDHレストレントビームの変形図

表 1.2.4-4 CRDHレストレントビームのばね定数

全水平荷重 W	最大変位量 δ	ばね定数 K_3

(4) 燃料取替用ベローズ : K₄

a. 燃料取替用ベローズの構造

燃料取替用ベローズは、燃料取替時にバルクヘッド上部へ水張りを行なう際に、原子炉圧力容器と原子炉格納容器トップスラブの間を接続するためのステンレス製の構造物であり、運転時の原子炉圧力容器と原子炉格納容器との熱移動量を吸収できるように蛇腹構造としている。

燃料取替用ベローズの構造概要を図 1.2.4-9 に示す。

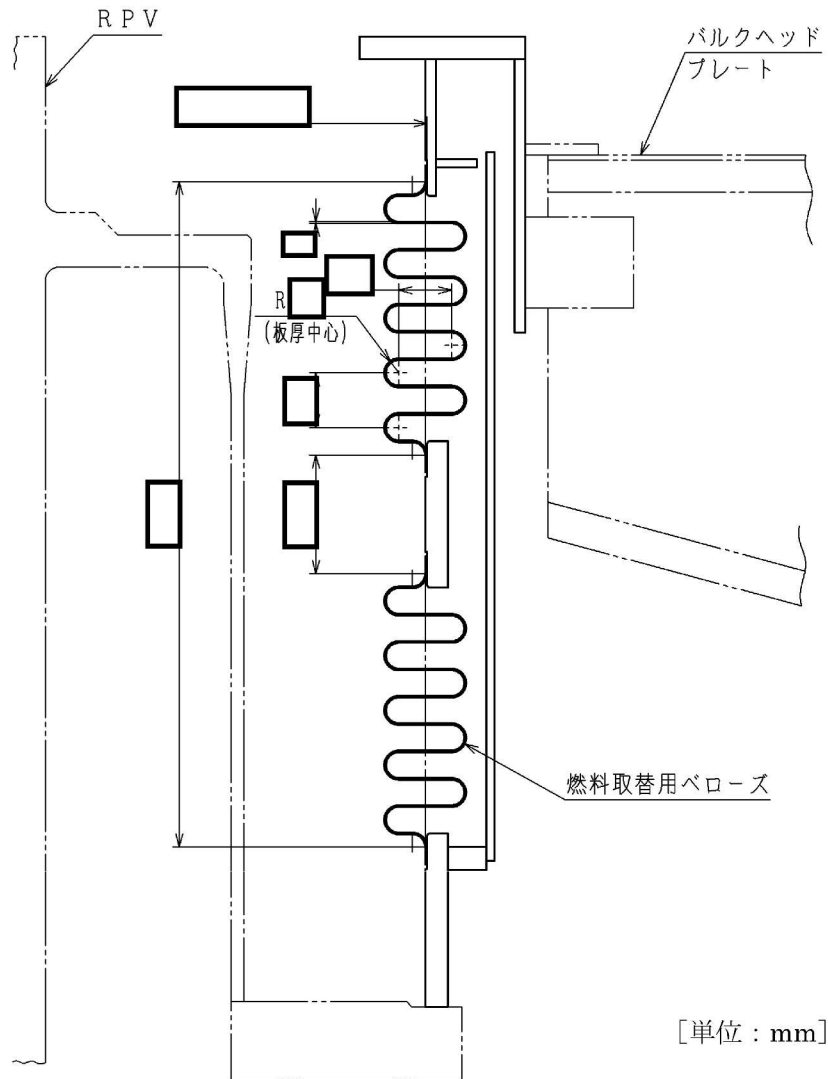


図 1.2.4-9 燃料取替用ベローズの構造概要

b. 燃料取替用ベローズのばね定数算定方法

燃料取替用ベローズのばね定数 K_4 は、文献より導出される計算式の組合せでばね定数を算定する。

(a) 1山あたりの鉛直方向ばね定数^[2]： K_V

$$K_V = \frac{E \cdot \pi \cdot D_m \cdot t^3}{24 \cdot \left\{ \frac{a^3}{12} + \frac{\pi}{4} \cdot a^2 \cdot r + 2 \cdot a \cdot r^2 + \frac{\pi}{2} \cdot r^3 \right\}}$$

(b) 水平方向変位 1mm (単位長さ) に対する鉛直方向変位^[3]： δ_y

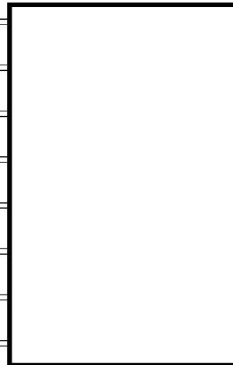
$$\delta_y = \frac{3 \cdot D_m}{2 \cdot N \cdot \left\{ L + 1 \cdot \left(\frac{1}{L} + 1 \right) \right\}}$$

(c) 径方向ばね定数^[4]： K_4

$$K_4 = \frac{K_V \cdot D_m \cdot \delta_y}{2 \cdot L}$$

ここで、

E : ベローズの縦弾性係数
 D_m : ベローズ平均半径
L : ベローズ長さ
t : ベローズ板厚
a : 円板部の厚さ
r : 山・谷の半径
l : 中間長さ
N : 山の個数



- c. 燃料取替用ベローズのばね定数算定結果
燃料取替用ベローズのばね定数の算定結果を表 1.2.4-5 に示す。

表 1.2.4-5 燃料取替用ベローズのばね定数

部位	記号	ばね定数
燃料取替用ベローズ	K ₄	

(5) 原子炉圧力容器スタビライザ： K_5

a. 原子炉圧力容器スタビライザの構造

原子炉圧力容器スタビライザ（以下「RPVスタビライザ」という。）は、原子炉遮蔽壁頂部に円周状に8箇所設置され、原子炉圧力容器附属構造物であるスタビライザブラケットを、あらかじめ初期締付荷重を与えた2組のさらばねを介して両側から挟み込む構造であり、原子炉圧力容器と原子炉遮蔽壁との水平方向地震荷重を伝達する。

RPVスタビライザの構造概要を図1.2.4-10に示す。

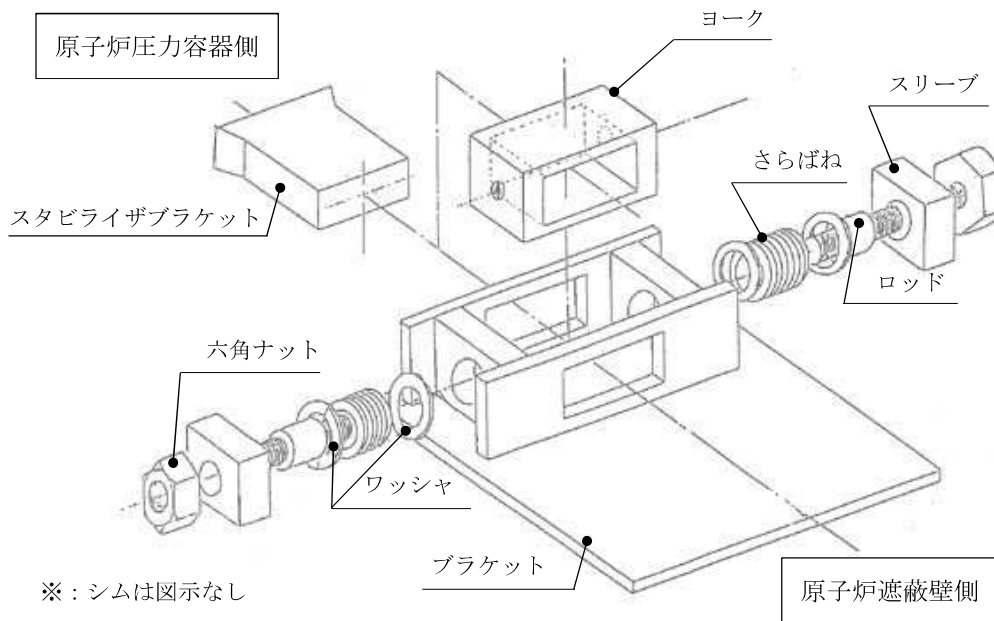


図1.2.4-10 R P Vスタビライザの構造概要

b. R P Vスタビライザのばね定数算定方法

(a) 全体でのばね定数算定方法

RPVスタビライザのばね定数 K_5 は、RPVスタビライザの構成部材のうち、スタビライザブラケットからの水平方向荷重に対して寄与する部材を対象とし、これらの構成要素のばね定数を並列及び直列に組み合わせて算定する。なお、RPVスタビライザの構成部材のうち、ヨークは、引張側と圧縮側でそれぞれの値を考慮する。

図1.2.4-11に全体ばねの模式図を示す。

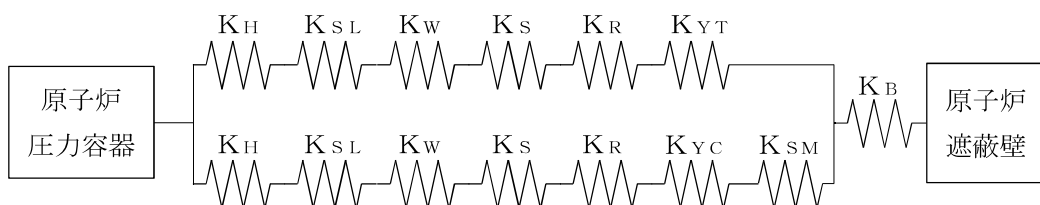


図1.2.4-11 全体ばねの模式図

R P Vスタビライザ 1 基あたりのばね定数をKとすると、Kは次式により算定される。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{K_H} + \frac{1}{K_{SL}} + \frac{1}{K_W} + \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_{YT}}} + \frac{1}{\frac{1}{K_H} + \frac{1}{K_{SL}} + \frac{1}{K_W} + \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_{YC}} + \frac{1}{K_{SM}}} + \frac{1}{K_B}}$$

R P Vスタビライザ 8 基分の全体でのばね定数 K_5 は、1 基あたりのばね定数Kより、荷重—変位の関係から算定する。図 1. 2. 4—12 に示すとおり R P Vスタビライザに強制変位 x を負荷した場合に強制変位と同じ方向に生じる全体荷重 W を算出する。 90° 及び 270° の位置に設置された R P Vスタビライザに生じる荷重を W_1 、 45° 、 135° 、 225° 及び 315° の位置に設置された R P Vスタビライザに生じる荷重を W_2' とし、荷重 W_2' の強制変位 x と同じ方向の分力を W_2 とする。強制変位 x を負荷したときの 45° 、 135° 、 225° 及び 315° の位置に設置された R P Vスタビライザに生じる接線方向の変位は $x \cdot \cos \alpha$ であることから、荷重 W_2' は以下のとおりとなる。

$$W_2' = K \cdot x \cdot \cos \alpha$$

図 1. 2. 4—12 内の拡大図の関係から強制変位 x と同じ方向の分力 W_2 は以下のとおりとなる。

$$W_2 = W_2' \cdot \cos \alpha = K \cdot x \cdot \cos^2 \alpha$$

したがって、F P Vスタビライザ 8 基（全体）のばね定数Kは以下の通りとなる。

$$W = 2 \cdot W_1 + 4 \cdot W_2 = 2 \cdot (K \cdot x) + 4 \cdot (K \cdot x \cdot \cos^2 \alpha) = 4 \cdot K \cdot x$$

$$K_5 = \frac{W}{x} = 4 \cdot K$$

ここで、

- K_S : さらばねのばね定数
- K_W : ワッシャのばね定数
- K_H : 六角ナットのばね定数
- K_{SL} : スリーブのばね定数
- K_R : ロッドのばね定数
- K_{SM} : シムのばね定数
- K_{YT} : ヨークの引張方向ばね定数
- K_{YC} : ヨークの圧縮方向ばね定数
- K_B : ブラケットのばね定数

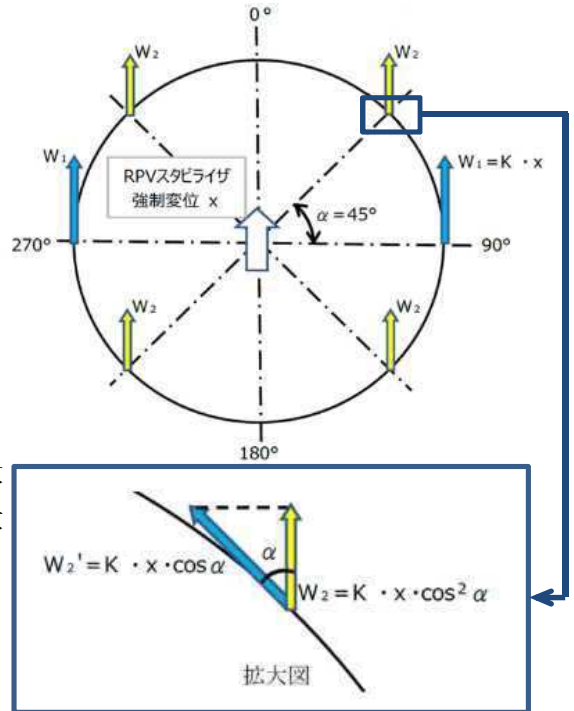


図 1. 2. 4—12 水平荷重の分配

(b) 評価部材のばね定数算定方法

イ. さらばね K_S

さらばねのばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_S = n \cdot K_{S1}$$

ここで、

K_{S1} : 一枚あたりのばね定数 = (t/mm)

n : さらばねの積層枚数 = (-)

ロ. ワッシャ K_W

ワッシャの軸方向ばね定数は、以下の式に基づき算定する。

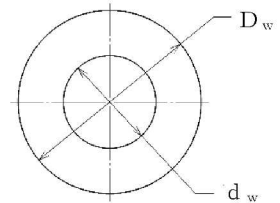
$$K_W = \frac{A_W \cdot E}{L_W}$$

ここで、

A_W : 断面積 = $\frac{\pi \cdot (D_w^2 - d_w^2)}{4} =$ $\times 10^4$ (mm²)

L_W : 板厚 (2枚分) = (mm)

E : 縦弾性係数 = kg/mm²



$D_w =$ mm

$d_w =$ mm

$t =$ mm

ハ. 六角ナット K_H

六角ナット のばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_H = \frac{A_H \cdot G_H}{R_H}$$

ここで、

A_H : ねじ穴側面積 = $2\pi \cdot R_H \cdot L =$ (mm²)

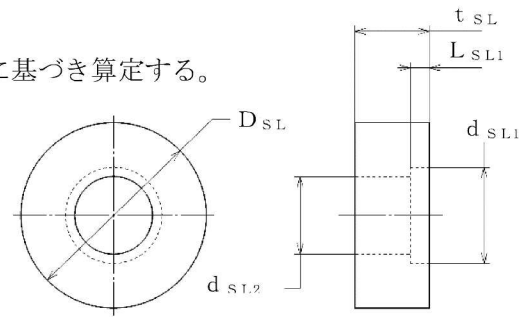
R_H : 穴の半径 = (mm)

G_H : せん断弾性係数 = kg/mm²

ニ. スリーブ K_{SL}

スリーブのばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_{SL} = \frac{E}{\frac{L_{SL1}}{A_{SL1}} + \frac{L_{SL2}}{A_{SL2}}}$$



ここで、

A_{SL1} : 座繰り穴側の断面積

$$= \frac{\pi \cdot (D_{SL}^2 - d_{SL1}^2)}{4} = \boxed{} (\text{mm}^2)$$

[単位: mm]

$D_{SL} = \boxed{}$

$d_{SL1} = \boxed{}$

$d_{SL2} = \boxed{}$

$t_{SL} = \boxed{}$

$L_{SL1} = \boxed{}$

A_{SL2} : ねじ穴側の断面積

$$= \frac{\pi \cdot (D_{SL} - d_{SL2})^2}{4} = \boxed{} (\text{mm}^2)$$

L_{SL1} : 座繰り穴深さ = $\boxed{}$ (mm)

L_{SL2} : ねじ穴深さ

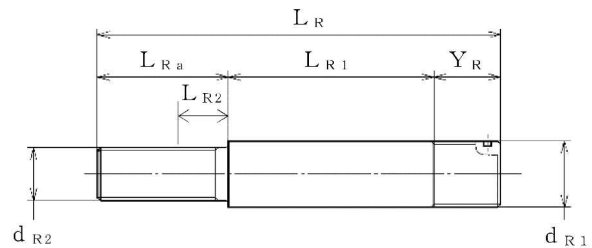
$$= t_{SL} - L_{SL1} = \boxed{} (\text{mm})$$

E : 縦弾性係数 = $\boxed{}$ (kg/mm²)

ホ. ロッド K_R

ロッドのばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_R = \frac{E}{\frac{L_{R1}}{A_{R1}} + \frac{L_{R2}}{A_{R2}}}$$



ここで、

A_{R1} : 丸棒部断面積

$$= \frac{\pi \cdot d_{R1}^2}{4} = \boxed{} (\text{mm}^2)$$

[単位: mm]

$L_R = \boxed{}$

$L_{Ra} = \boxed{}$

$Y_R = \boxed{}$

$d_{R1} = \boxed{}$

$d_{R2} = \boxed{}$

A_{R2} : ねじ部断面積

$$= \frac{\pi \cdot d_{R2}^2}{4} = \boxed{} (\text{mm}^2)$$

L_{R1} : 丸棒部長さ

$$= L_R - (L_{Ra} + Y_R) = \boxed{} (\text{mm})$$

L_{R2} : 丸棒部先端からスリーブの六角ナット側端面の距離 = $\boxed{}$ (mm)

E : 縦弾性係数 = $\boxed{}$ (kg/mm²)

へ. シム K_{SM}

シムのばね定数は、以下の式に基づき算定する。

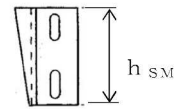
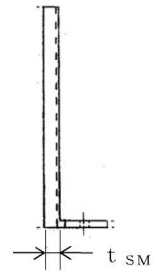
$$K_{SM} = \frac{A_{SM} \cdot E}{t_{SM}}$$

$h_{SM} = \square \text{ mm}$

$t_{SM} = \square \text{ mm}$

シムとヨークの

接触長さ = $\square \text{ mm}$



ここで、

A_{SM} : 断面積

$$= \square \cdot h_{SM} = \square \text{ (mm}^2\text{)}$$

t_{SM} : 厚さ = $\square \text{ (mm)}$

E : 縦弾性係数 = $\square \text{ (kg/mm}^2\text{)}$

ト. ヨーク (引張方向) K_{YT}

ヨーク (引張方向) のばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_{YT} = \frac{1}{\frac{1}{K_{YS1}} + \frac{1}{K_{YTE}} + \frac{1}{K_{YB}} + \frac{1}{K_{YS2}}}$$

ここで、

①～④ : 図 1.2.4-13 に示すヨークのばね定数算定のための計算モデル分割による。

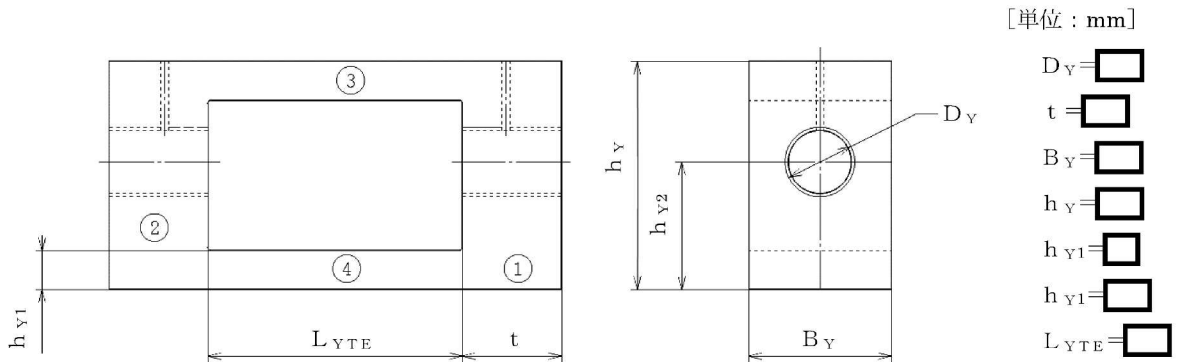


図 1.2-13 ヨークのばね定数算定のための計算モデル

K_{YS1} : ①及び②ねじ部のせん断によるばね定数

$$= \frac{A_{YS1} \cdot G_Y}{R_Y} = \square \text{ (kg/mm)}$$

A_{YS1} : ①及び②のねじ穴側面積

$$= 2\pi \cdot R_Y \cdot Y_R = \square \text{ (mm}^2\text{)}$$

R_Y : ねじ穴半径

$$= \frac{D_Y}{2} = \boxed{} \text{ (mm)}$$

G_Y : せん断弾性係数 = $\boxed{}$ (kg/mm²)

K_{YTE} : ③及び④の引張りによるばね定数

$$= \frac{A_{YTE} \cdot E}{L_{YTE}} = \boxed{} \text{ (kg/mm)}$$

A_{YTE} : ③及び④の断面積

$$= 2 \cdot h_{Y1} \cdot B_Y = \boxed{} \text{ (mm}^2\text{)}$$

L_{YTE} : ③及び④の長さ = $\boxed{}$ (mm)

K_{YB} : ①及び②の曲げによるばね定数

$$= \frac{6E \cdot I \cdot c}{\frac{c}{l'} \cdot \left(a + \frac{c}{2}\right) \cdot \left(e + \frac{c}{2}\right) \cdot \left\{ \left(a + \frac{c}{2}\right) \left(l' + e + \frac{c}{2}\right) - \frac{c^2}{4} - \left(a + \frac{c}{2}\right)^2 \right\} + \frac{(c/2)^4}{4}}$$
$$= \boxed{} \text{ (kg/mm)}$$

I : 断面二次モーメント = $\boxed{}$ (mm⁴)

E : 縦弾性係数 = $\boxed{}$ (kg/mm²)

K_{YS2} : ①及び②板部のせん断によるばね定数

$$= \frac{l' \cdot G_Y \cdot l \cdot t}{1.2 \cdot d \cdot (a + c/2)} = \boxed{} \text{ (kg/mm)}$$

なお、以下の各記号は図 1.2.4-14 に示す①及び②の曲げによるばね定数計算モデルによる。

a : 支持端から分布荷重作用範囲の内、支持端から近い端点の距離

$$= \boxed{} \text{ (mm)}$$

b : 支持端から分布荷重作用範囲の内、支持端から遠い端点の距離

$$= \boxed{} \text{ (mm)}$$

c : 分布荷重作用範囲 = $\boxed{}$ (mm)

d : 分布荷重作用範囲中央から支持端（他端）の距離 = $\boxed{}$ (mm)

e : 支持端（他端）から分布荷重作用範囲の内、支持端（他端）から近い端点の距離 = $\boxed{}$ (mm)

l : ①及び②板部の幅 = $\boxed{}$ (mm)

l' : 支持端間の距離 = $\boxed{}$ (mm)

t : ①及び②板部の厚さ = $\boxed{}$ (mm)

R_l : 支持端に作用する反力 = $\frac{d \cdot W \cdot C}{l}$

w : ヨークに作用する分布荷重

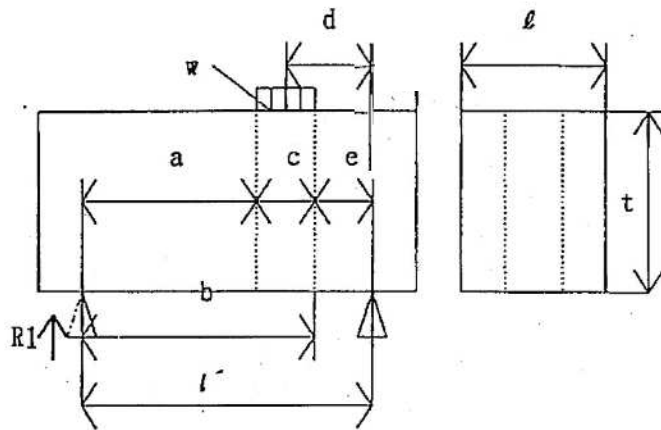


図 1.2.4-14 ①及び②の曲げによるばね定数計算モデル

チ. ヨーク (圧縮方向) K_{YC}

ヨーク (圧縮方向) ばね定数は、以下の式に基づき算定する。

$$K_{YC} = K_{YS1}$$

リ. ブラケット K_B

ブラケットばね定数 K_B は、GE の先行プラント共通の実績値を用いる。

c. R P Vスタビライザのばね定数算定結果

以上より算定した構成部材，R P Vスタビライザ 1 基及び全体のばね定数の算定結果を表 1. 2. 4-6 に示す。

表 1. 2. 4-6 R P Vスタビライザのばね定数

	記号	ばね定数
さらばねのばね定数	K_S	
ワッシャのばね定数	K_W	
六角ナットのばね定数	K_H	
スリーブのばね定数	K_{SL}	
ロッドのばね定数	K_R	
シムのばね定数	K_{SM}	
ヨークの引張方向ばね定数	K_{YT}	
ヨークの圧縮方向ばね定数	K_{YC}	
ブラケットのばね定数	K_B	
R P Vスタビライザ 1 基分のばね定数	K	
R P Vスタビライザ全体のばね定数	K_5	

(6) ダイヤフラムフロア : K₆

a. ダイヤフラムフロアの構造

ダイヤフラムフロアは、軸対称形状の円環平板の鉄筋コンクリートスラブ構造物である。円環内周端は原子炉本体基礎に結合支持され、円環外周端は原子炉格納容器に荷重を伝える構造になっている。

ダイヤフラムフロアの構造概要を図 1.2.4-15 に示す。

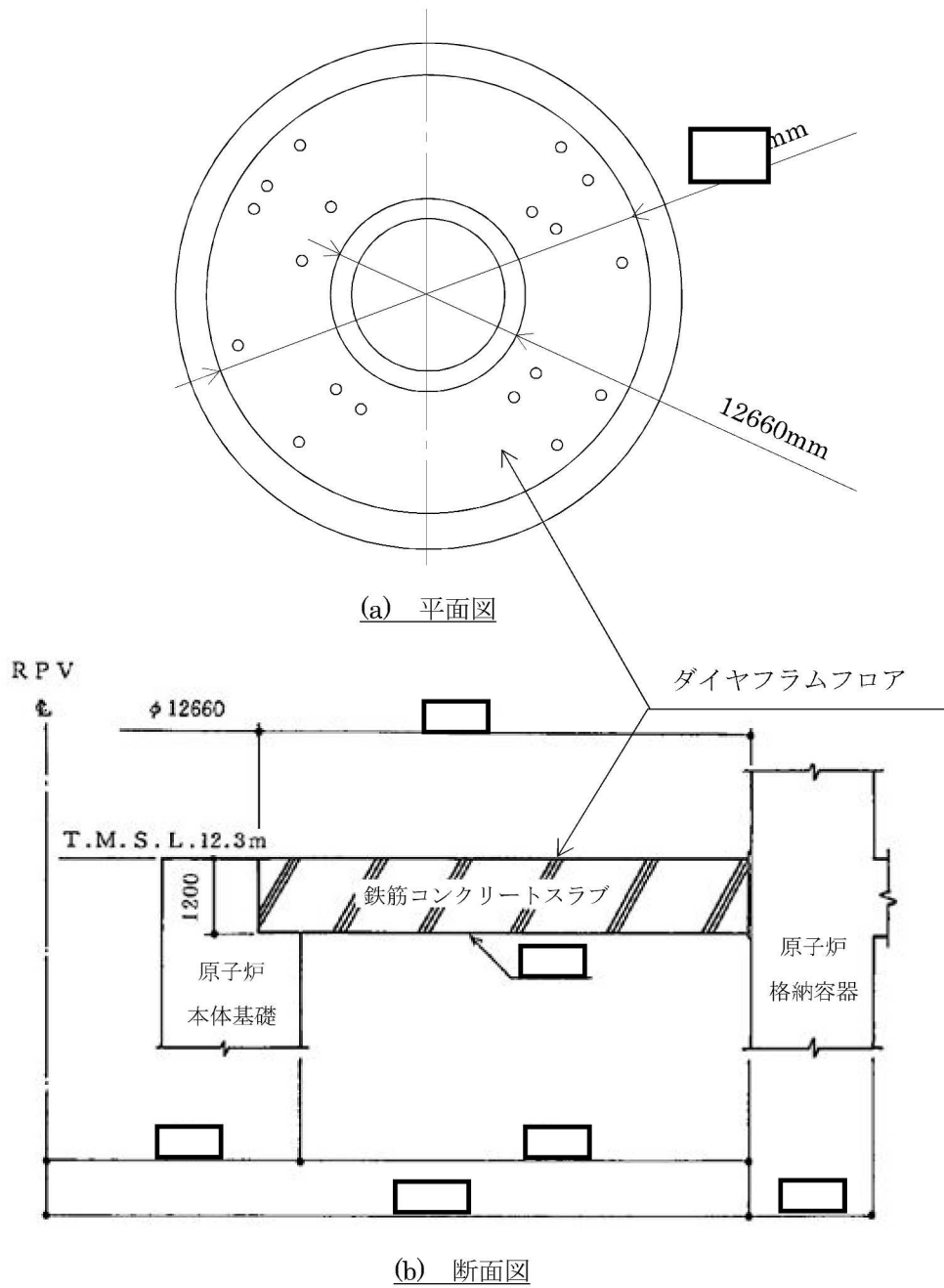


図 1.2.4-15 ダイヤフラムフロアの構造概要

b. ダイヤフラムフロアのばね定数算定方法

ダイヤフラムフロアのばね定数 K_6 は、FEM 解析により算定する。具体的には、原子炉本体基礎側に一様の強制変位を与えた際の反力の合計を最大変位量で除することにより算定する。

c. 計算方法

計算機コード「NASTRAN」により、各部材ごとに断面積、断面二次モーメント、重量等を与えるシェル要素モデルで解析する。

d. 計算条件

(a) 解析モデル

ダイヤフラムフロアの解析モデルは対称性を考慮した 180° 対称モデルとしている。ダイヤフラムフロアの解析モデルを図 1.2.4-16 に示す。

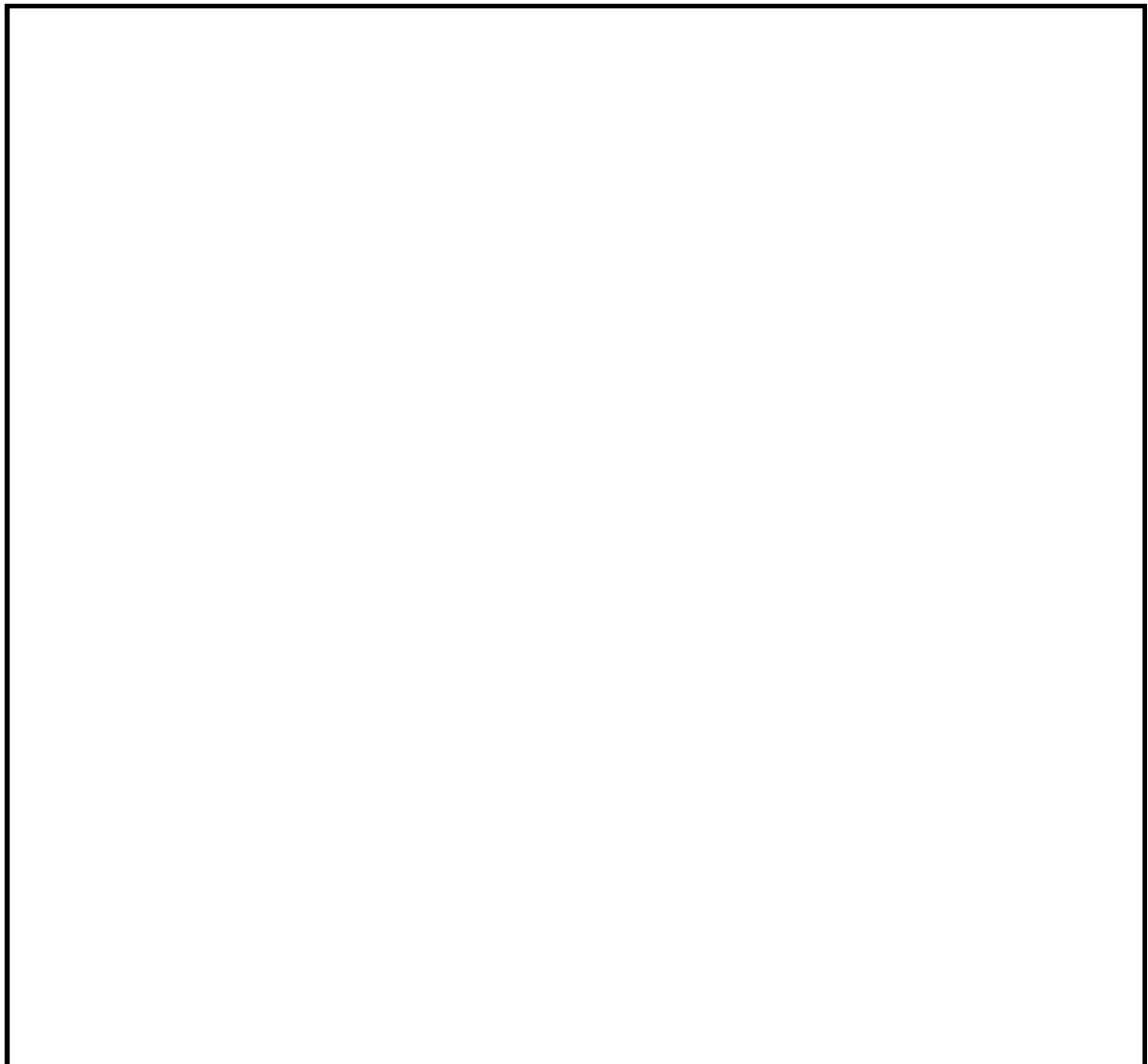


図 1.2.4-16 ダイヤフラムフロア解析モデル図

(b) 各構成部材の材料物性

解析に用いる材料物性を以下に示す。

縦弾性係数 $E = \boxed{}$ kg/mm², ポアソン比 $\nu = \boxed{}$

(c) 条件

ダイヤフラムフロア内面である原子炉本体基礎側に一様の強制変位を与える。

(d) 境界条件

ダイヤフラムフロア外面である原子炉格納容器側を固定とする。

e. ダイヤフラムフロアのばね定数算定結果

強制変位を負荷した際の変形図を図 1.2.4-17 に、ばね定数の算定結果を表 1.2.4-7 に示す。

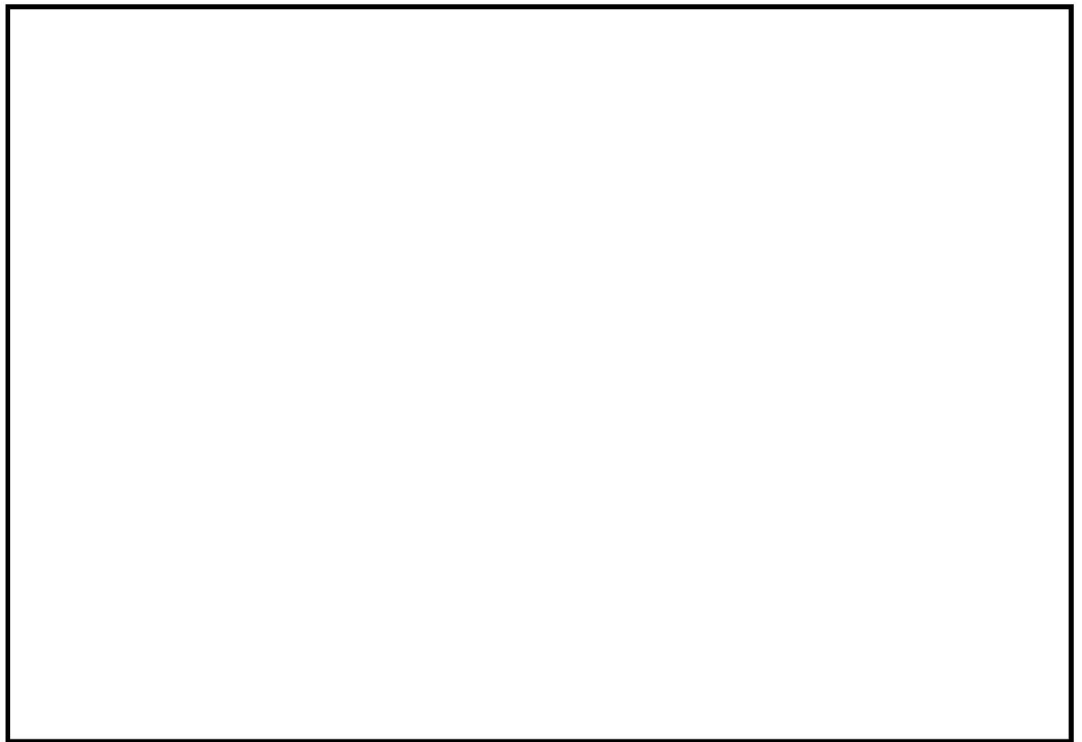


図 1.2.4-17 ダイヤフラムフロアの変形図

表 1.2.4-7 ダイヤフラムフロアのばね定数

反力の合計 ΣR_x	最大変位量 δ	ばね定数 K_6

参考文献

[1] : Roark 「FORMURAS OF STRESS AND STRAIN, 4th edition」 Table X No.20

[2] : 配管技術(1967)

[3] : The M.W.Kellogg Co. 「Design of Piping System」

[4] : Expansion Joint Manufacturers Association 「STANDARD OF THE EXPANSION JOINT
MANUFACTURERS ASSOCIATION, 5th edition」 Table III

1.2.5 原子炉内部構造物の水中での振動の影響を考慮するための付加質量について

(1) 水の付加質量

構造物が流体中で振動する場合、流体—構造物間の相互作用により水中構造物は、複雑な振動特性を示し、固有振動数及び応答が低下することが知られている。一般に、このような現象を評価するため、「付加質量」の概念が用いられている。

付加質量の概念としては、流体中にある構造物が加速度 α を受けて運動する場合、構造物は流体を押し進めて進むことになり、構造物には流体を排除するのに必要な力 F_w が作用する。 F_w は、 α に比例することが知られており、

$$F_w = m_v \cdot \alpha \quad (\text{式 1})$$

で表される。ここで、 m_v は構造物の形状等によって決定される質量である。また、周囲に流体が存在しないとした場合に、質量 M の物体に α の加速度を与えるために必要な力 F_s は、

$$F_s = M \cdot \alpha \quad (\text{式 2})$$

で表される。したがって、流体中の場合、同一の加速度を与えるために必要な力 F は、上述の力の和として下記にて表される。

$$F = F_s + F_w = (M + m_v) \cdot \alpha \quad (\text{式 3})$$

(式 3) は、同一の加速度を与えるために流体中においてはあたかも質量が m_v だけ増加したような傾向を示すことを意味している。このような現象を付加質量効果と呼び、 m_v を付加質量（又は仮想質量）と呼んでいる。地震応答解析モデルにおいては、流体—構造物間の相互作用の影響のある水平方向について、この付加質量を考慮している。

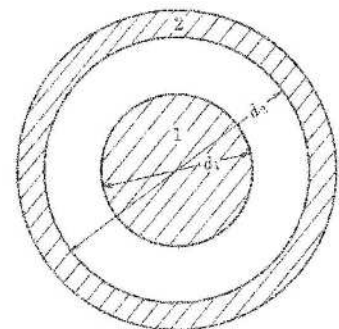
(2) 地震応答解析モデルにおける水の付加質量効果

地震応答解析モデルにおける水の付加質量効果については、燃料集合体と炉心シュラウドとの関係や、炉心シュラウドと原子炉圧力容器との関係など等価な 2 重円筒と考え、水の付加質量を考慮した質量マトリックスを構造重量による質量マトリックスに足し合わせ、全体の運動方程式を、下式を用いて構築している。(出典：J E A G 4 6 0 1-1987)

$$\begin{bmatrix} M^V & -M^V - M^D \\ -M^V - M^D & M^V + 2M^D + M^F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4})$$

ここで、

- M^V : 仮想質量
- M^D : 排除質量
- M^F : 円筒間の水の質量
- y_1 : 内筒の変位
- y_2 : 外筒の変位



d_1 : 内筒外径 d_2 : 外筒内径

2 重円筒モデル概念図

1.2.6 原子炉冷却材再循環ポンプの減衰定数

原子炉冷却材再循環ポンプ（Reactor Internal Pump）（以下「RIP」という。）については、水平方向の設計用減衰定数として3.0%を適用している。この設計用減衰定数は、実機同等の試験体を用いた振動試験により得られた減衰定数の下限値を下回るよう設定されている。

本項において、RIPの水平方向に適用する設計用減衰定数3.0%とした振動試験の概要及びその結果を示す。

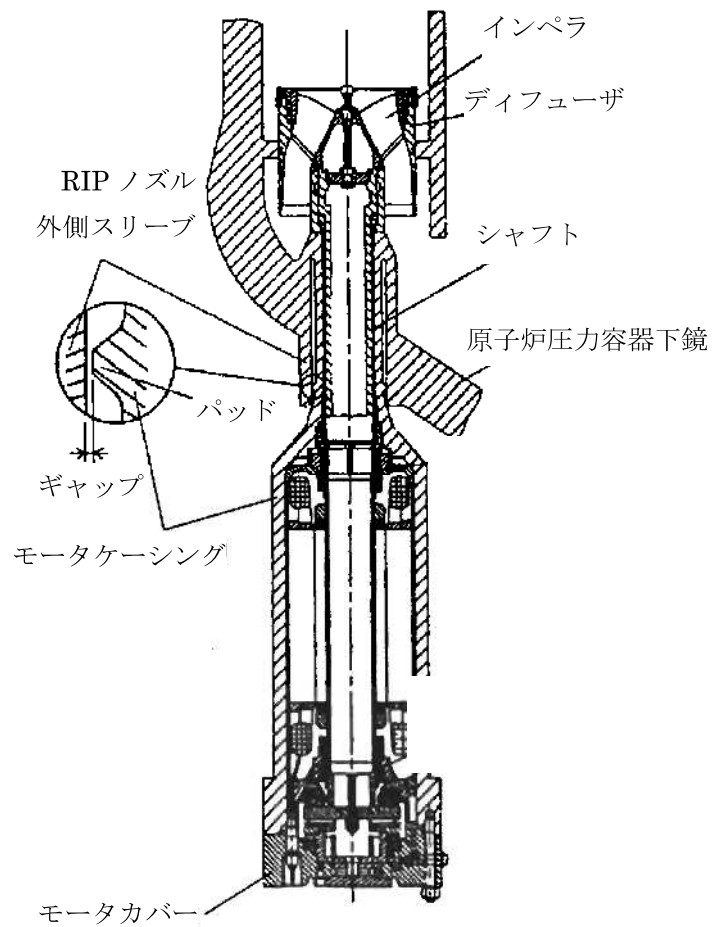


図 1.2.6-1 RIP 概要図

(1) RIP の減衰定数確認試験

a. 振動試験の方法及び試験装置

原子炉圧力容器及び RIP 1 台を実規模大で模擬し、実機運転状態と同様の高温・高圧状態にて試験を実施した。試験装置の概要を図 1.2.6-2 に示す。

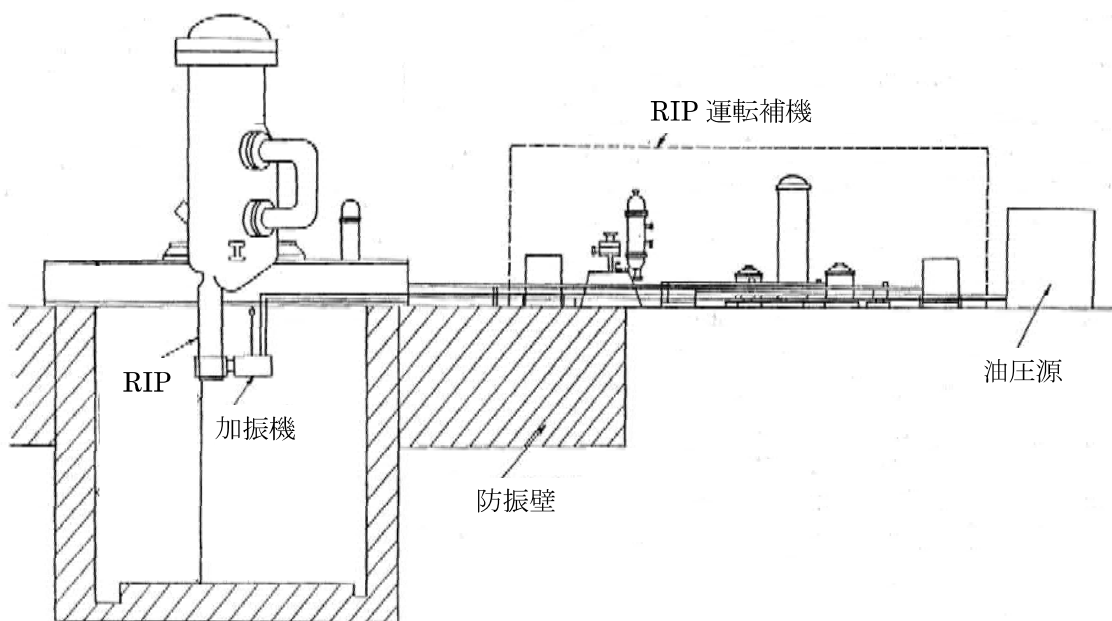


図 1.2.6-2 試験装置概要図^[1]

b. 試験結果

本試験においては、ケーシング下端変位が約 1.5mm 相当までの試験を実施している。試験により得られたモータケーシング下端応答変位に対する 1 次固有振動数及び減衰比の関係を図 1.2.6-3 に示す。

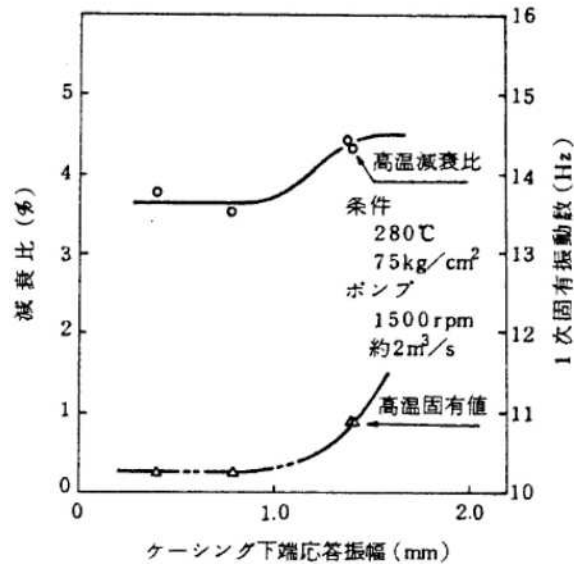


図 1.2.6-3 ケーシング下端変位と固有振動数及び減衰比との関係^[1]

モータケーシング下端応答変位が約 1mm 以下の領域では、ほぼ一定の値を示している。モータケーシング下端応答変位が約 1mm を超えると、固有振動数も減衰定数も上昇する傾向があり、パッドが RIP ノズル外側スリーブに接触していると考えられる。減衰定数は、パッド接触前でも 3.0% 以上であり、パッドが接触するような大きな変位では減衰定数はさらに大きくなる。

c. 設計用減衰定数

振動試験結果より、パッドが RIP ノズル外側スリーブに接しない低変位振幅領域において、水平方向の減衰定数は約 3.5%、また、パッドが接するような大变位振幅領域においては、さらに減衰定数が大きくなることが確認された。

設計用減衰定数は、この試験で取得された減衰定数の下限値を下回るよう 3.0% に設定した。

参考文献

[1] : 高島他, 原子炉内蔵型再循環ポンプとポンプシステムの開発, 日本機械学会 (1987年)

1.3 新たに採用する地震応答解析モデルの設定

1.3.1 原子炉本体基礎のスケルトン曲線の設定方法

既工認では、建屋—機器連成地震応答解析モデルにおけるRPVペDESTALのモデル化は、剛性一定の線形仮定としていた。

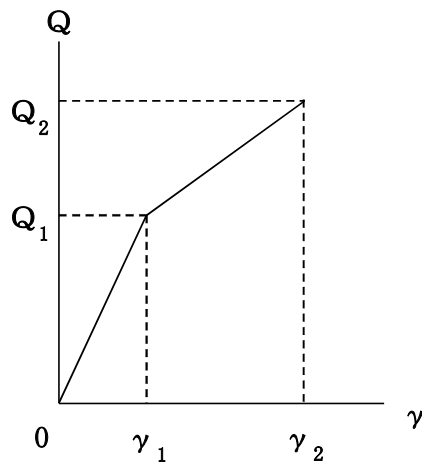
今回工認では、基準地震動の増大に伴いより適正な地震応答解析を実施する観点から、RPV ペDESTALも原子炉建屋と同様にコンクリートの剛性変化を考慮した非線形解析モデルを採用する。非線形解析モデルの設定に当たっては、鉄筋コンクリートの評価手法として実績のある手法に加え、鋼板とコンクリートの複合構造としての特徴に留意した既往の知見を参考にして行う。

本項は、RPV ペDESTALのスケルトン曲線の設定について説明するものである。

(1) RPV ペDESTALのスケルトン曲線の設定方法

a. せん断力—せん断ひずみ関係（ $Q-\gamma$ 関係）

せん断力—せん断ひずみ関係（ $Q-\gamma$ 関係）は、コンクリートのひび割れを表す第1折点と鋼板の降伏を表す第2折点までを設定する。RPV ペDESTALのせん断力—せん断ひずみ関係を図1.3.1-1に示す。



Q_1 : 第1折点のせん断力

Q_2 : 第2折点のせん断力

γ_1 : 第1折点のせん断ひずみ

γ_2 : 第2折点のせん断ひずみ

図1.3.1-1 RPV ペDESTALのせん断力—せん断ひずみ関係

(a) 第1折れ点の設定

RPV ペデスタルにおけるせん断力のスケルトン曲線の第1折点は、以下の式より算出している。

【下部ペデスタル】

$$Q_1 = \left(A_C + \left(\frac{G_S}{G_C} \right) \cdot A_S \right) \cdot \tau_{cr}$$

$$\gamma_1 = \tau_{cr} / G_C$$

$$\text{ただし, } \tau_{cr} = 0.5 \cdot \sqrt{0.31 \sqrt{\sigma_B} \cdot (0.31 \sqrt{\sigma_B} + \sigma_v)}$$

【上部ペデスタル】

$$Q_1 = \left(A_C + \left(\frac{G_S}{G_C} \right) \cdot A_S \right) \cdot \tau_{cr}$$

$$\gamma_1 = \tau_{cr} / G_C$$

$$\text{ただし, } \tau_{cr} = \sqrt{0.31 \sqrt{\sigma_B} \cdot (0.31 \sqrt{\sigma_B} + \sigma_v)}$$

ここで,

A_C : コンクリートのせん断断面積 (mm^2)

A_S : 鋼板のせん断断面積 (mm^2)

G_C : コンクリートのせん断弾性係数 (N/mm^2)

G_S : 鋼板のせん断弾性係数 (N/mm^2)

σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

σ_v : 鋼板を考慮した鉛直方向軸応力度 (圧縮を正, N/mm^2)

(b) 第2折れ点の設定

RPV ペデスタルにおけるせん断力のスケルトン曲線の第2折点は、以下の式より算出している。

【下部ペデスタル】

$$Q_2 = \frac{(K_\alpha + K_\beta)}{\sqrt{(3 \cdot K_\alpha^2 + K_\beta^2)}} \cdot A_s \cdot \sigma_y$$

$$\gamma_2 = \frac{Q_2}{(K_\alpha + K_\beta)}$$

ただし、 $K_\alpha = A_s \cdot G_s$

$$K_\beta = \frac{(\cos \theta)^2 \cdot H}{2 \left[\frac{1 - \nu_c^2}{E_c' \cdot t_c \cdot \sin 2\theta} + \frac{1}{2 \cdot E_s} (C1 + C2) \right]}$$

【上部ペデスタル】

下部ペデスタルと同様

ここで、

A_s : 鋼板のせん断断面積 (mm²)

G_s : 鋼板のせん断弾性係数 (N/mm²)

E_c' : ひび割れを考慮したコンクリートのヤング係数 (N/mm²)

E_s : 鋼板のヤング係数 (N/mm²)

K_α : 鋼板のせん断剛性 (N)

K_β : ひび割れ後の鋼板による拘束効果を考慮したコンクリートの有効せん断剛性 (N)

σ_y : 鋼板の降伏点強度 (N/mm²)

ν_c : コンクリートのポアソン比

H : コンクリートの高さ (mm)

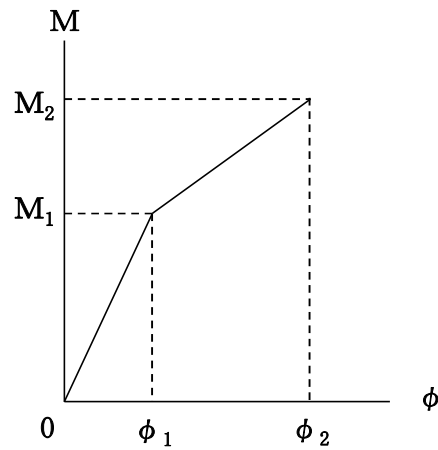
t_c : コンクリート板厚 (mm)

θ : せん断ひび割れ角度

$C1, C2$: 寸法とせん断ひび割れ角度 θ から定まる係数

b. 曲げモーメントー曲率関係 (M- ϕ 関係)

曲げモーメントー曲率関係 (M- ϕ 関係) は、コンクリートのひび割れを表す第1折点と鋼板の降伏を表す第2折点までを設定する。RPV ペデスタルの曲げモーメントー曲率関係を図 1.3.1-2 に示す。



M_1 : 第1折点の曲げモーメント

M_2 : 第2折点の曲げモーメント

ϕ_1 : 第1折点の曲率

ϕ_2 : 第2折点の曲率

図 1.3.1-2 RPV ペデスタルの曲げモーメントー曲率関係

(a) 第1折れ点の設定

RPV ペデスタルにおける曲げモーメントのスケルトン曲線の第1折点は、以下の式より算出している。

【下部ペデスタル】

$$M_1 = Z_e (f_t + \sigma_v)$$

$$\phi_1 = M_1 / (E_c \cdot I_e)$$

ただし、 $f_t = 0$

【上部ペデスタル】

$$M_1 = Z_e (0.5 f_t + \sigma_v)$$

$$\phi_1 = M_1 / (E_c \cdot I_e)$$

ここで、

Z_e : 鋼板を考慮した断面係数 (mm³)

f_t : コンクリートの曲げ引張強度 (N/mm²)

σ_v : 鋼板を考慮した鉛直方向軸応力度 (圧縮を正, N/mm²)

E_c : コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

I_e : 鋼板を考慮した断面二次モーメント (mm⁴)

(b) 第2折れ点の設定

RPV ペデスタルにおける曲げモーメントのスケルトン曲線の第2折点は、以下の式より算出している。

【下部ペデスタル】

$$M_2 = M_y$$

$$\phi_2 = \phi_y$$

【上部ペデスタル】

下部ペデスタルと同様

ここで、

M_y : 鋼板降伏時モーメント (N・mm)

ϕ_y : 鋼板降伏時曲率 (1/mm)

(2) RPV ペDESTALのスケルトン曲線

a. 水平方向モデル

水平方向は、RPV ペDESTALの各質点間を等価な曲げ、せん断剛性を評価した多質点系モデルとしている。

代表として、「原子炉本体基礎の地震応答解析モデル」のモデル図を図 1.3.1-3 及び図 1.3.1-4 に、基本ケースの RPV ペDESTALの諸元を表 1.3.1-2 及び表 1.3.1-3 に示す。

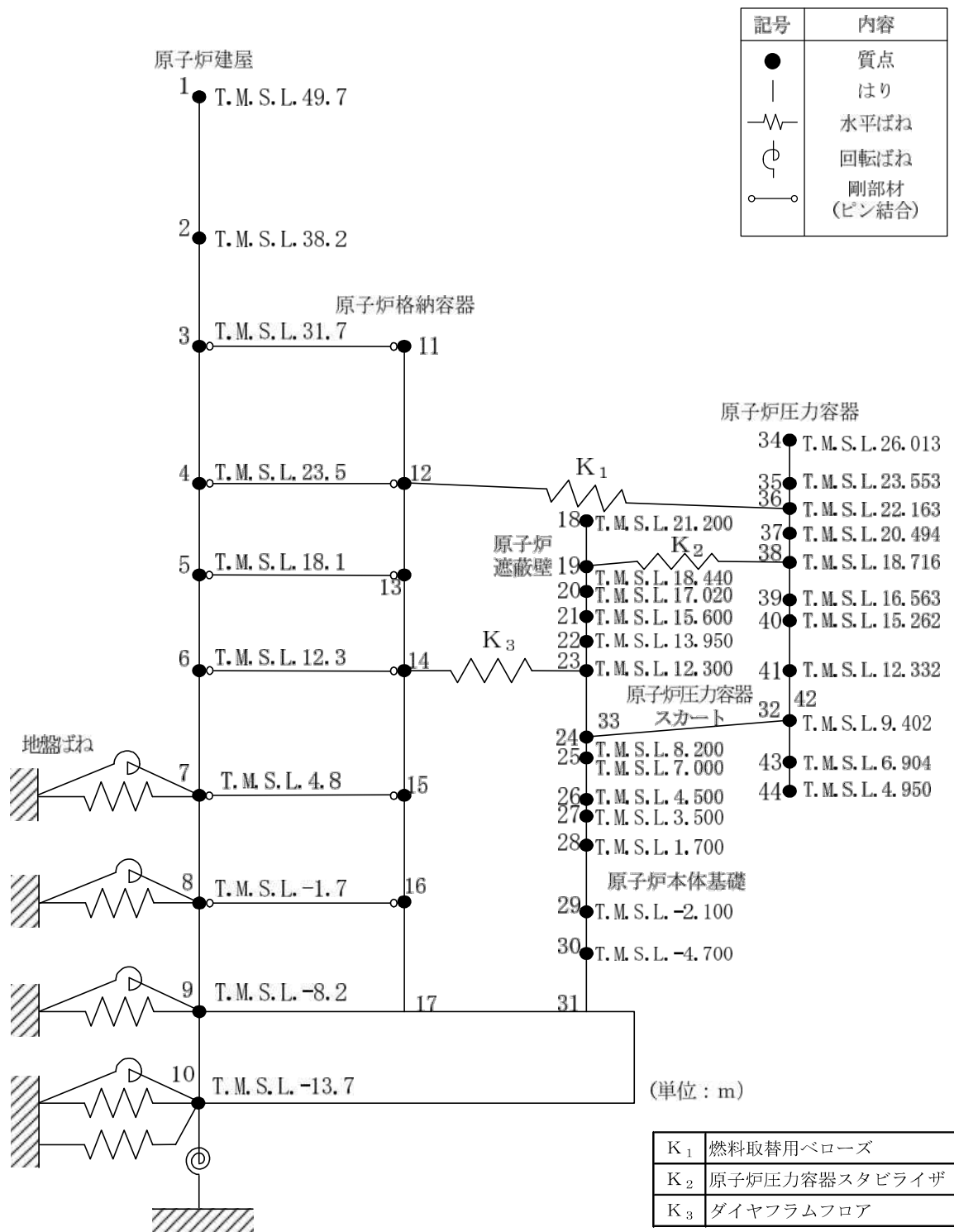


図 1.3.1-3 原子炉压力容器，原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎地震応答解析モデル
(NS 方向 誘発上下動を考慮しない場合)

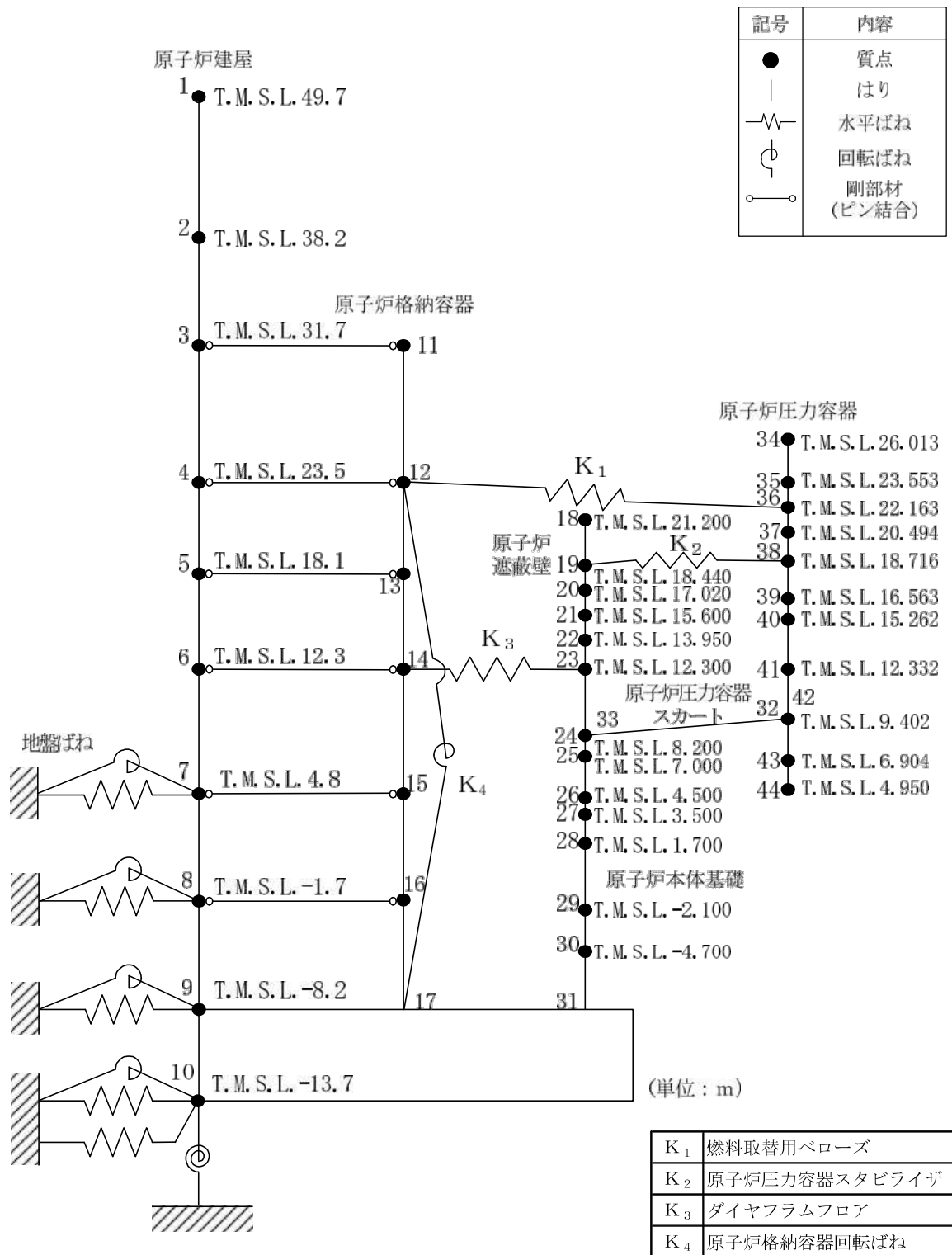


図 1.3.1-4 原子炉圧力容器，原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎地震応答解析モデル
(EW 方向 誘発上下動を考慮しない場合)

表 1.3.1-2 地震応答解析モデル諸元 (NS 方向)

質点番号	分類	要素番号	質量 (t)	断面二次 モーメント (m^4)	有効せん断 断面積 (m^2)
23	上部 ペDESTAL	21			
24		22			
25		23			
26		24			
27	下部 ペDESTAL	25			
28		26			
29		27			
30		28			
31					

表 1.3.1-3 地震応答解析モデル諸元 (EW 方向)

質点番号	分類	要素番号	質量 (t)	断面二次 モーメント (m^4)	有効せん断 断面積 (m^2)
23	上部 ペDESTAL	21			
24		22			
25		23			
26		24			
27	下部 ペDESTAL	25			
28		26			
29		27			
30		28			
31					

b. 使用材料の物性値

基本ケースの地震応答解析に用いる RPV ペデスタルの使用材料の物性値を表 1.3.1-4 及び表 1.3.1-5 に示す。

表 1.3.1-4 使用材料の物性値 (コンクリート)

使用材料	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	せん断弾性係数 G_c (N/mm ²)
コンクリート* : $\sigma_B = 29.4$ (N/mm ²)		

注記* : 設計基準強度に基づくコンクリート強度

表 1.3.1-5 使用材料の物性値 (鋼板)

使用材料	ヤング係数 E_s (N/mm ²)	せん断弾性係数 G_s (N/mm ²)
鋼板 : <input type="text"/>		

c. せん断力のスケルトン曲線

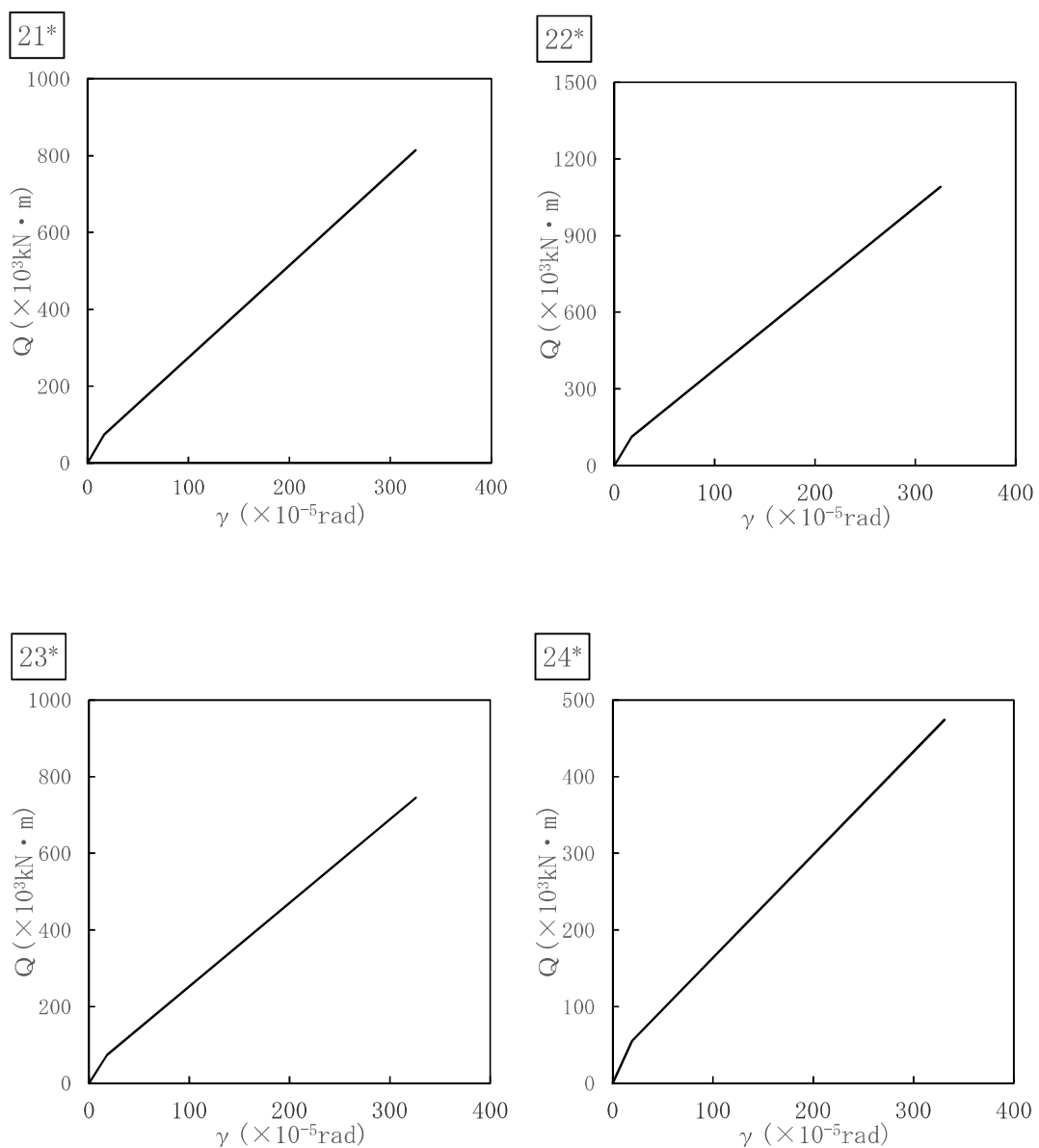
基本ケースのRPVペデスタルの各要素におけるせん断力のスケルトン曲線の諸数値を表1.3.1-6及び表1.3.1-7に、スケルトン曲線を図1.3.1-5及び図1.3.1-6に示す。

表 1.3.1-6 せん断力のスケルトン曲線 (NS 方向)

質点番号	要素番号	Q_1 ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	γ_1 ($\times 10^{-5} \text{rad}$)	Q_2 ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	γ_2 ($\times 10^{-5} \text{rad}$)
23	21	74.8	16.6	814	325
24	22	112	17.1	1090	325
25					
26	23	73.6	18.2	745	326
27	24	55.4	19.5	474	331
28	25	36.4	9.30	394	333
29	26	29.6	9.60	330	333
30	27	37.2	9.60	389	333
31	28	37.2	9.70	379	333

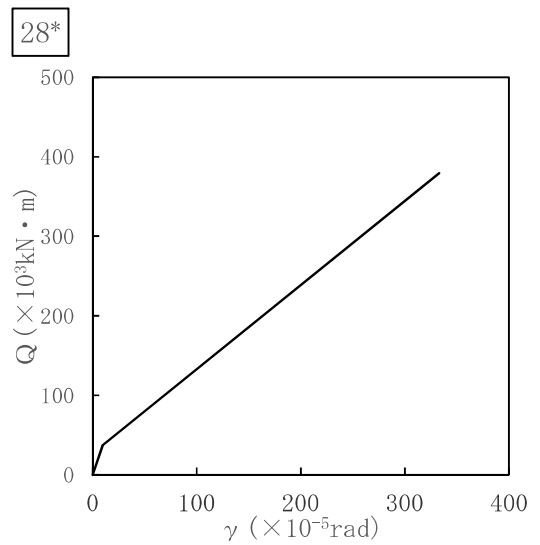
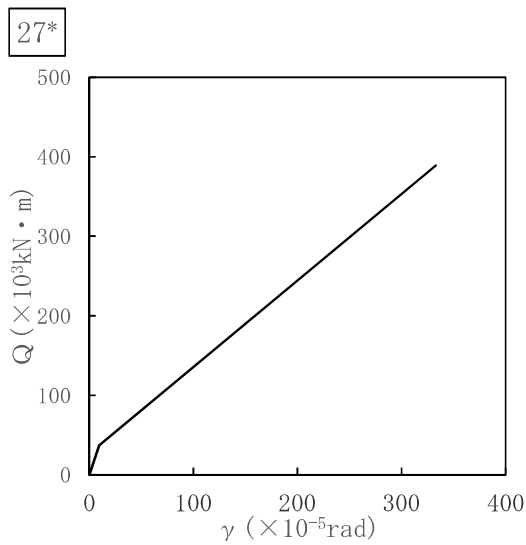
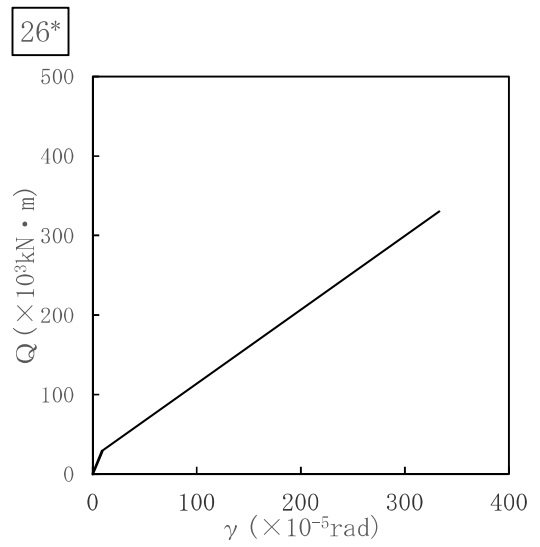
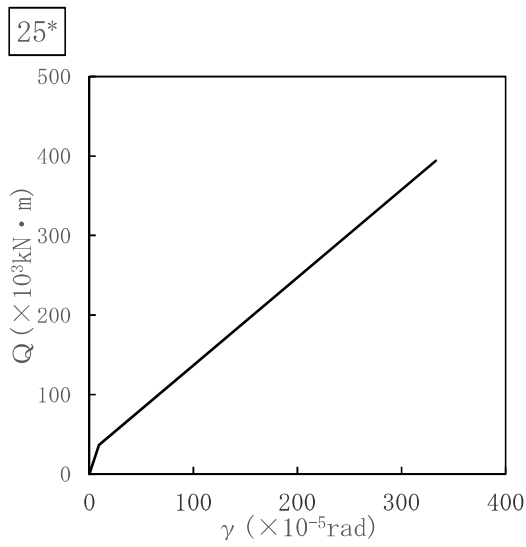
表 1.3.1-7 せん断力のスケルトン曲線 (EW 方向)

質点番号	要素番号	Q_1 ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	γ_1 ($\times 10^{-5} \text{rad}$)	Q_2 ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	γ_2 ($\times 10^{-5} \text{rad}$)
23	21	73.5	16.6	804	324
24	22	112	17.1	1090	325
25					
26	23	73.2	18.2	737	325
27	24	55.4	19.5	474	331
28	25	36.4	9.30	394	333
29	26	37.6	9.60	394	333
30	27	37.2	9.60	389	333
31	28	37.2	9.70	379	333



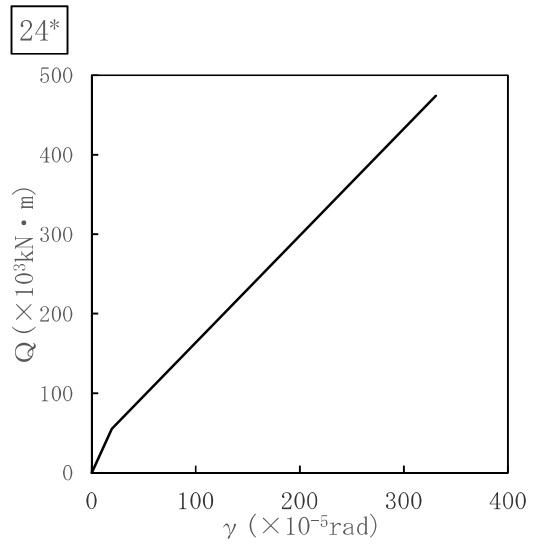
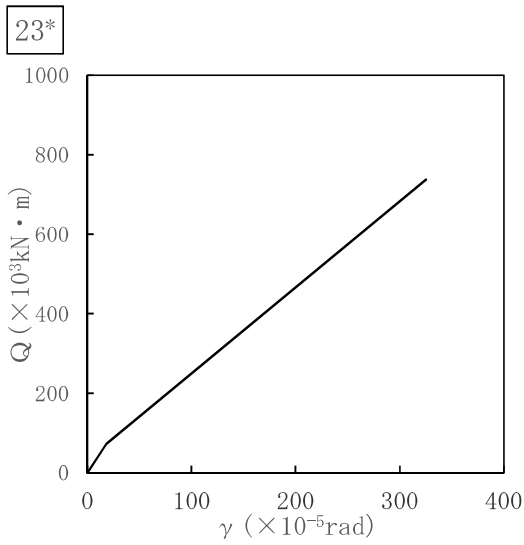
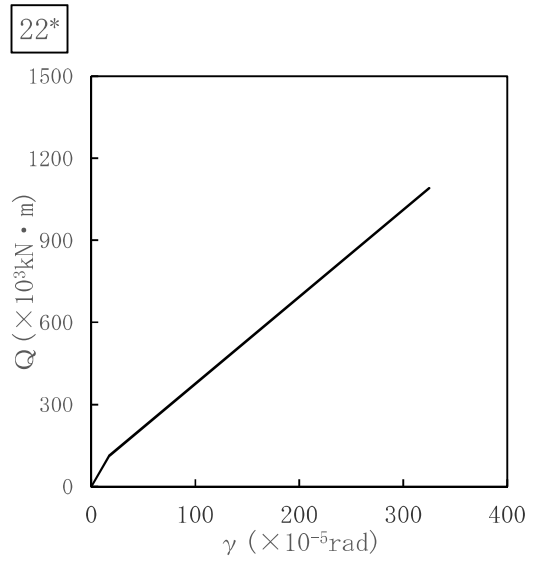
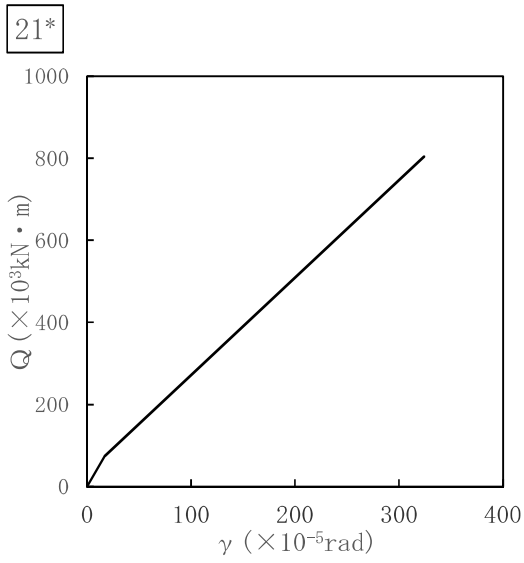
注記*：各図上に記載の要素番号は表 1.3.1-6 に対応。

図 1.3.1-5 (1) せん断力のスケルトン曲線 (NS 方向)



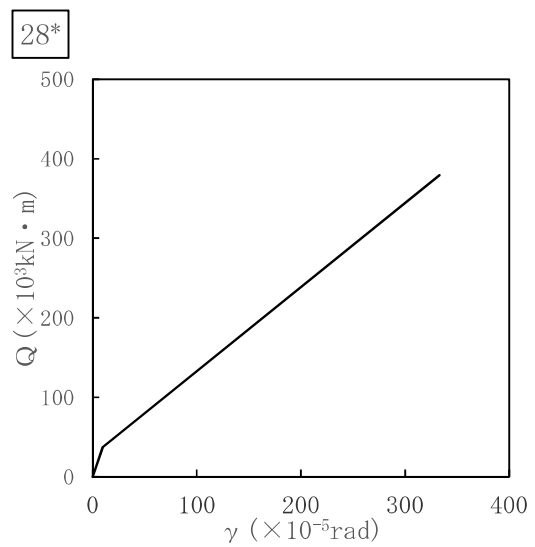
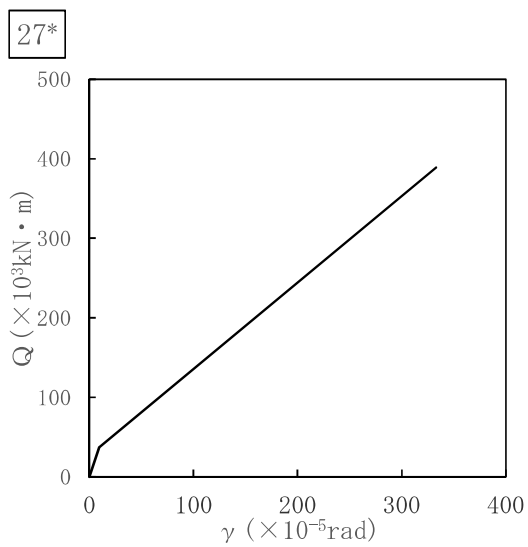
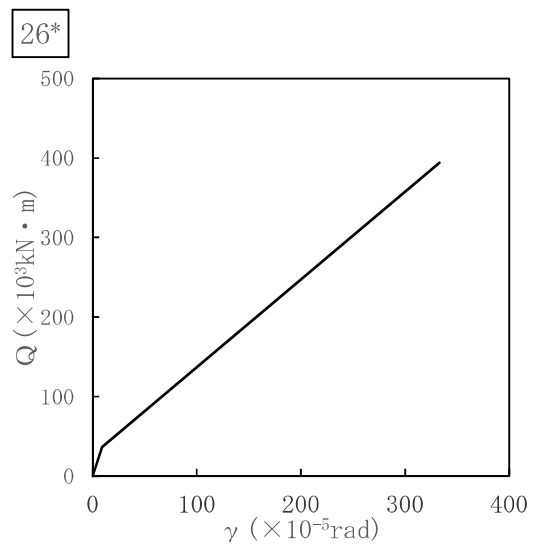
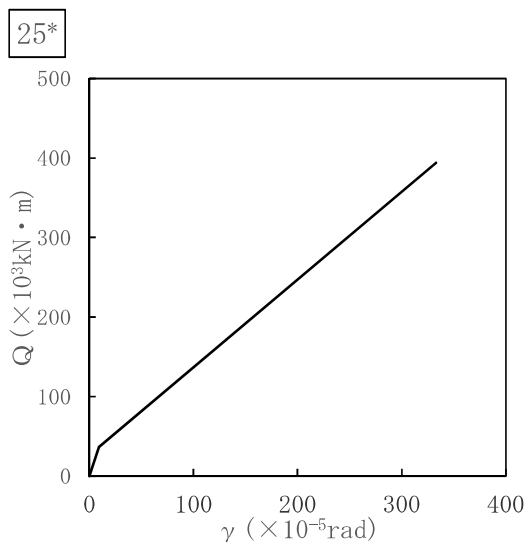
注記*：各図上に記載の要素番号は表 1.3.1-6 に対応。

図 1.3.1-5 (2) せん断力のスケルトン曲線 (NS 方向)



注記*：各図上に記載の要素番号は表 1.3.1-7 に対応。

図 1.3.1-6 (1) せん断力のスケルトン曲線 (EW 方向)



注記*：各図上に記載の要素番号は表 1.3.1-7 に対応。

図 1.3.1-6 (2) せん断力のスケルトン曲線 (EW 方向)

d. 曲げモーメントのスケルトン曲線

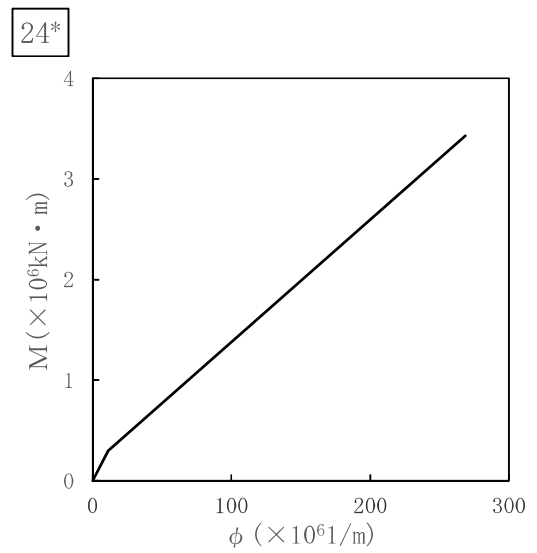
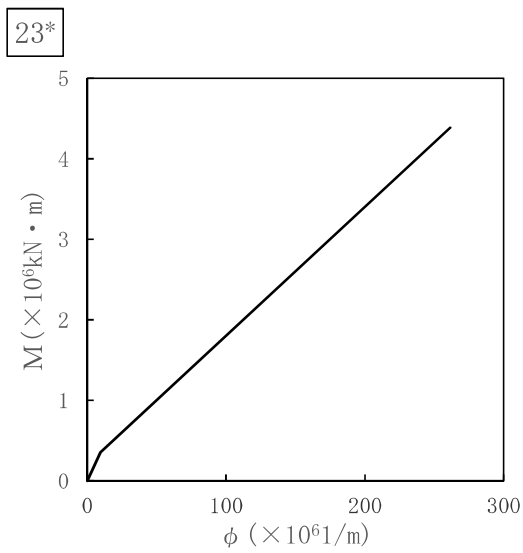
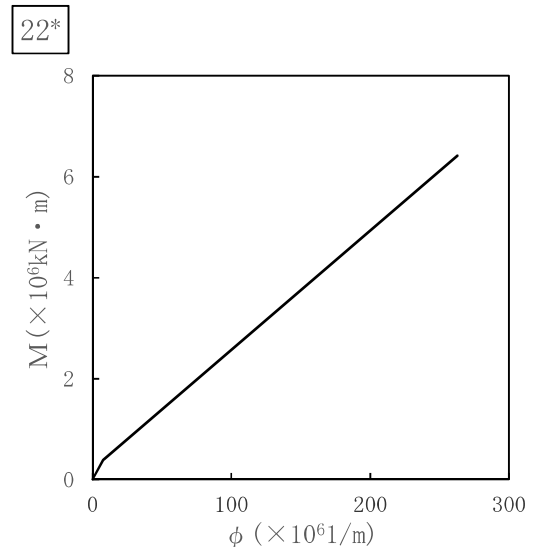
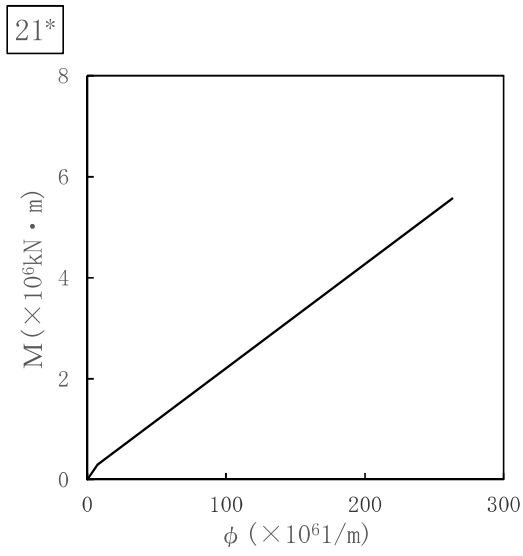
基本ケースの RPV ペDESTAL の各要素における曲げモーメントのスケルトン曲線の諸数値を表 1.3.1-8 及び表 1.3.1-9 に、スケルトン曲線を図 1.3.1-7 及び図 1.3.1-8 に示す。

表 1.3.1-8 曲げモーメントのスケルトン曲線 (NS 方向)

質点番号	要素番号	M_1 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_1 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)	M_2 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_2 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)
23	21	0.298	7.28	5.57	263
24	22	0.388	7.90	6.42	263
25	23	0.353	9.52	4.39	262
26	24	0.299	11.4	3.43	269
27	25	0.154	4.31	3.63	249
28	26	0.186	5.21	3.63	249
29	27	0.180	5.10	3.34	248
30	28	0.192	5.49	3.36	249

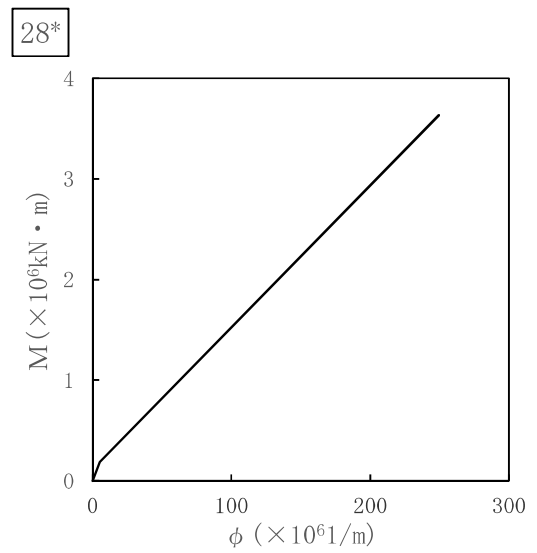
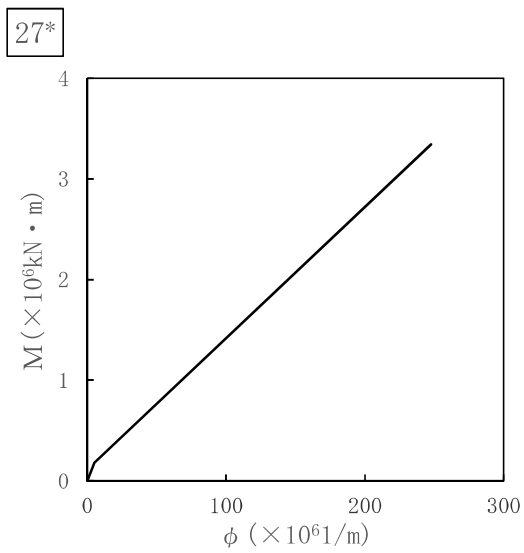
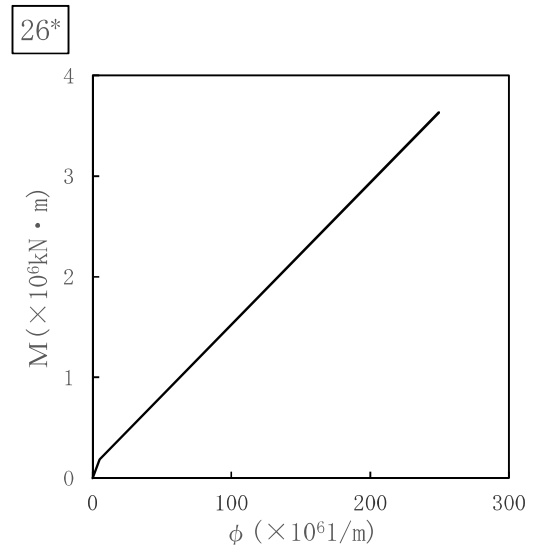
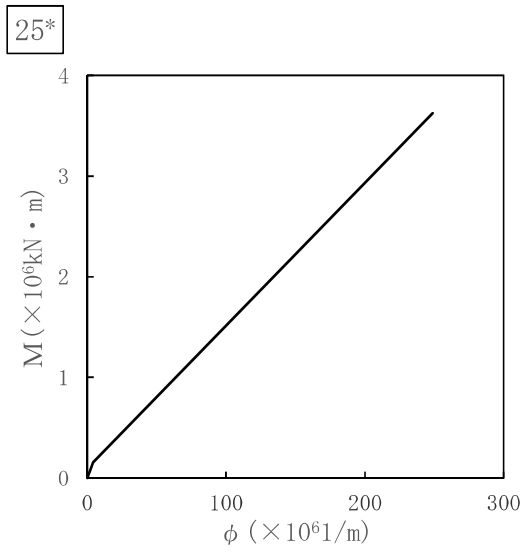
表 1.3.1-9 曲げモーメントのスケルトン曲線 (EW 方向)

質点番号	要素番号	M_1 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_1 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)	M_2 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_2 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)
23	21	0.300	7.28	5.64	263
24	22	0.388	7.90	6.42	263
25	23	0.354	9.52	4.42	262
26	24	0.299	11.4	3.43	269
27	25	0.154	4.31	3.63	249
28	26	0.143	5.21	2.66	249
29	27	0.180	5.10	3.34	248
30	28	0.192	5.49	3.36	249



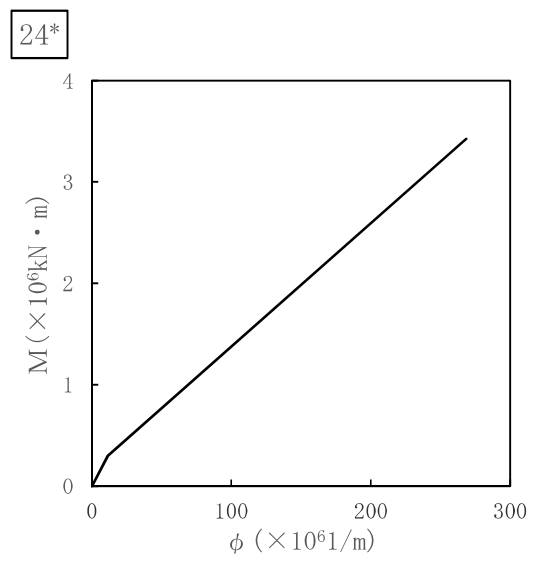
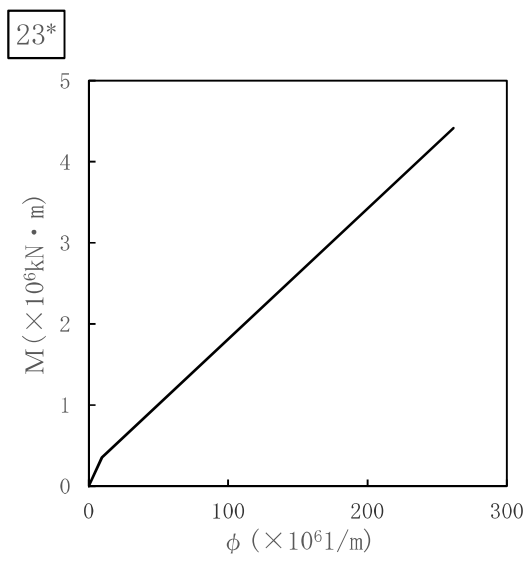
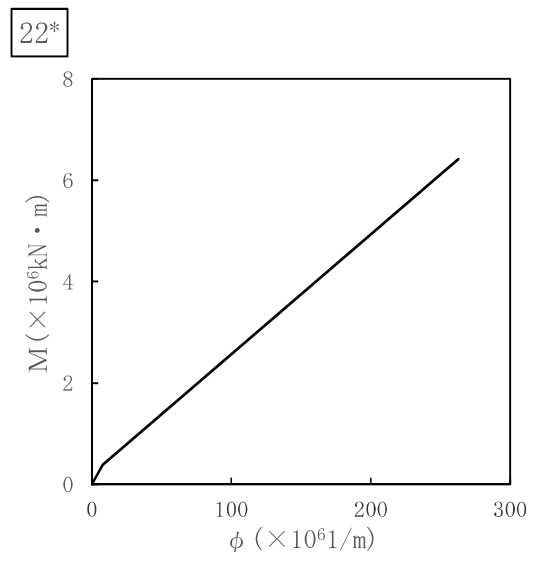
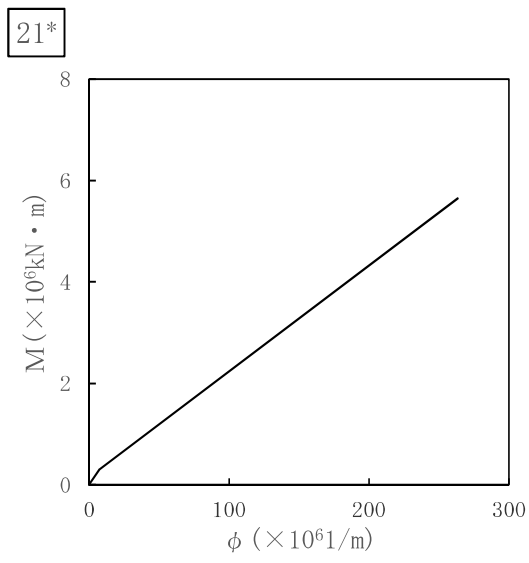
注記*：各図上に記載の要素番号は表 1.3.1-8 に対応。

図 1.3.1-7 (1) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (NS 方向)



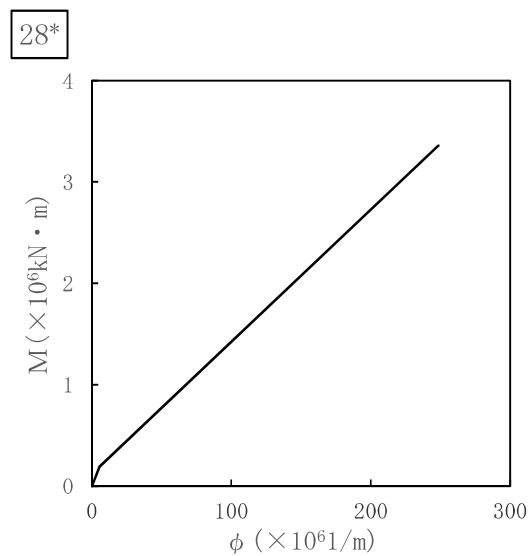
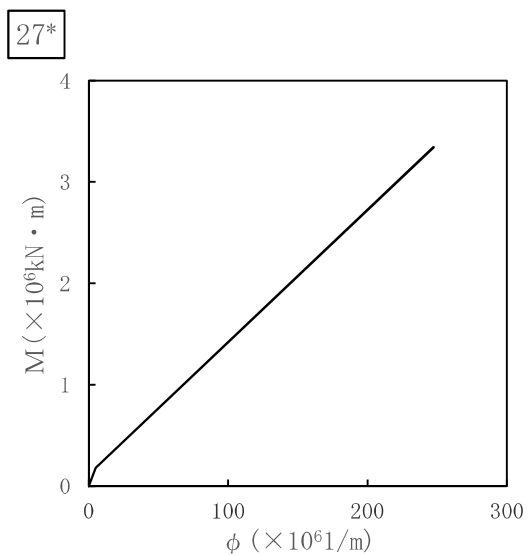
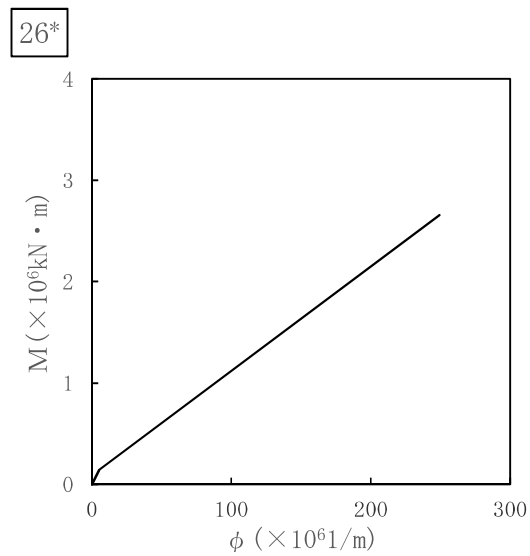
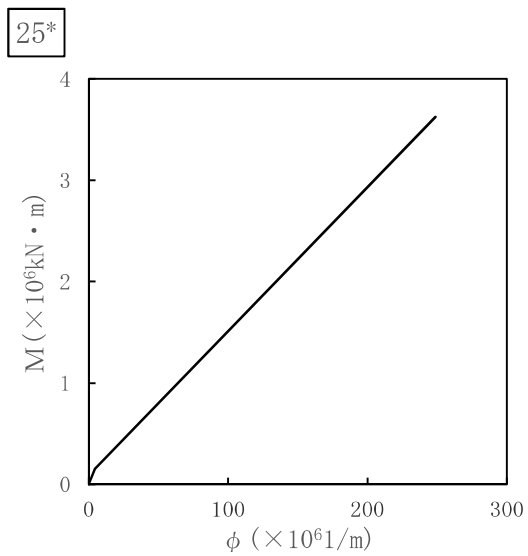
注記*：各図上に記載の要素番号は表 1. 3. 1-8 に対応。

図 1. 3. 1-7 (2) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (NS 方向)



注記* : 各図上に記載の要素番号は表 1.3.1-9 に対応。

図 1.3.1-8 (1) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (EW 方向)



注記*：各図上に記載の要素番号は表 1.3.1-9 に対応。

図 1.3.1-8 (2) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (EW 方向)

1.3.2 鉛直方向解析モデル

(1) 鉛直方向解析モデルの扱い

既工認においては、動的地震動を水平方向に対してのみ考慮すればよく、設計の進捗にあわせて、段階的に以下の大型機器系と炉内構造物系の2種類の水平方向解析モデルを用いて分割申請を行っていた。

大型機器系： 原子炉建屋～原子炉格納容器～原子炉遮蔽壁・原子炉本体基礎～
原子炉圧力容器

炉内構造物系： 原子炉建屋～原子炉格納容器～原子炉遮蔽壁・原子炉本体基礎～
原子炉圧力容器～炉内構造物（気水分離器・炉心シュラウド、燃料集合体、制御棒案内管）～制御棒駆動機構ハウジング・原子炉冷却材再循環ポンプ

これに対して、今回工認では、鉛直動的地震動が導入されたことから、原子炉本体及び炉内構造物について、鉛直方向応答を適切に評価する観点で、水平方向応答解析モデルとは別に鉛直方向応答解析モデル（図 1.3.2-1 参照）を新たに採用し、鉛直地震動に対する評価を実施している。

ここで、水平方向解析モデルについては、既工認との連続性から、既工認と同様に大型機器系と炉内構造物系の2種類の解析モデルを使用するが、鉛直方向については、実機に合わせて構造物をモデル化できることから、建設工認のように設計進捗に応じたモデルの使い分けの必要がないため、炉内構造物等も含めてモデル化した炉内構造物系のみを使用している（表 1.3.2-1 参照）。

表 1.3.2-1 既工認と今回工認において使用している解析モデル

	既工認	今回工認
水平方向	大型機器系 (図 1.3.2-2, 図 1.3.2-3) 炉内構造物系 (図 1.3.2-4, 図 1.3.2-5)	大型機器系 (図 1.3.2-6, 図 1.3.2-7) 炉内構造物系 (図 1.3.2-8, 図 1.3.2-9)
鉛直方向	—	炉内構造物系 (図 1.3.2-1)

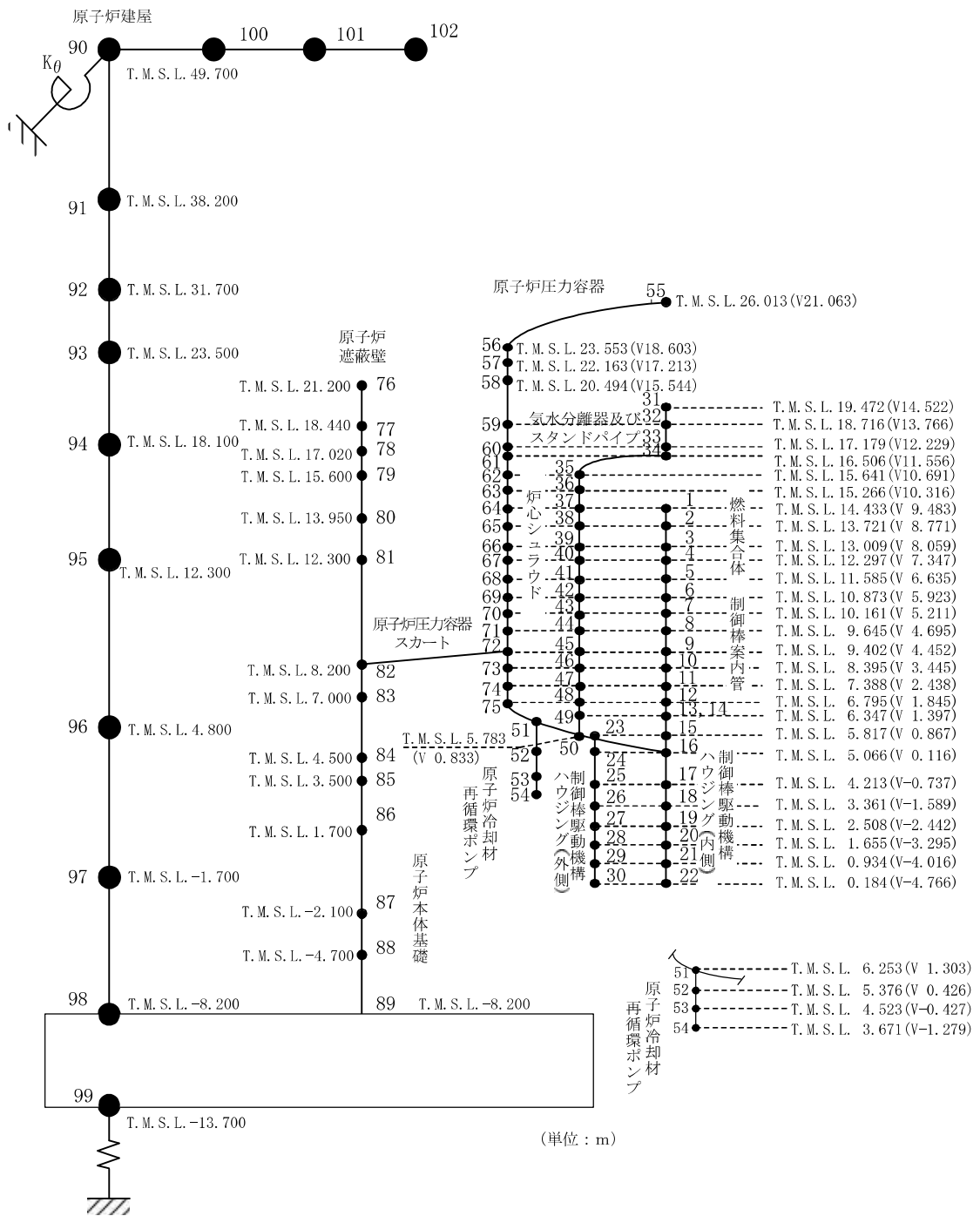


図 1.3.2-1 鉛直方向解析モデル：炉内構造物系

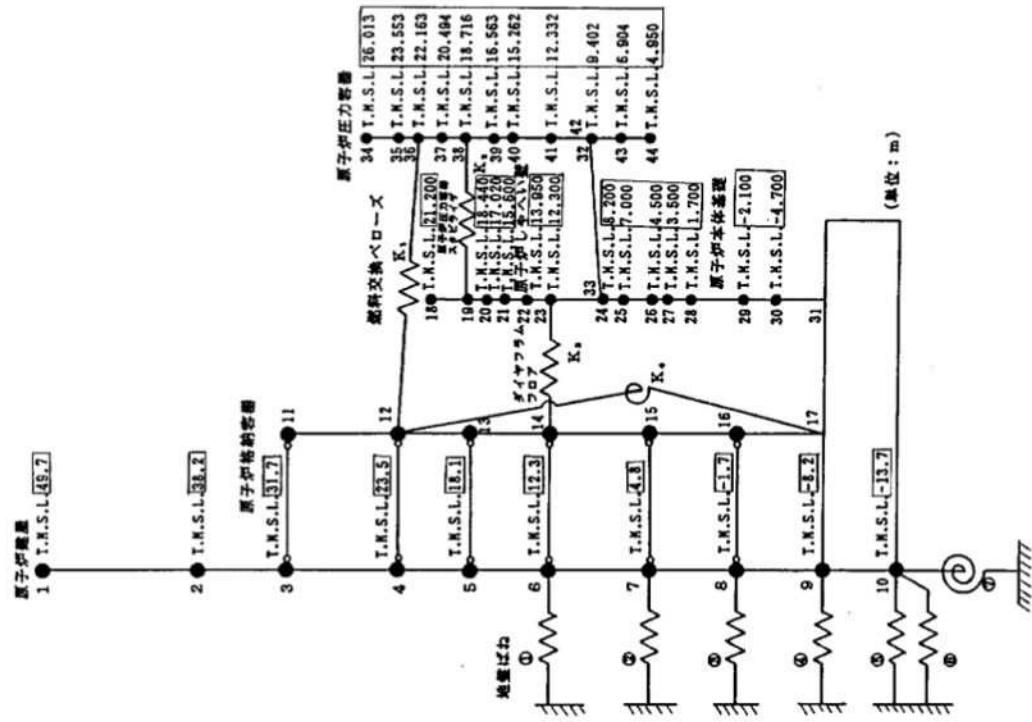


図 1.3.2-2 NS 方向解析モデル：大型機器系
(既工認：分割申請第 1 回)

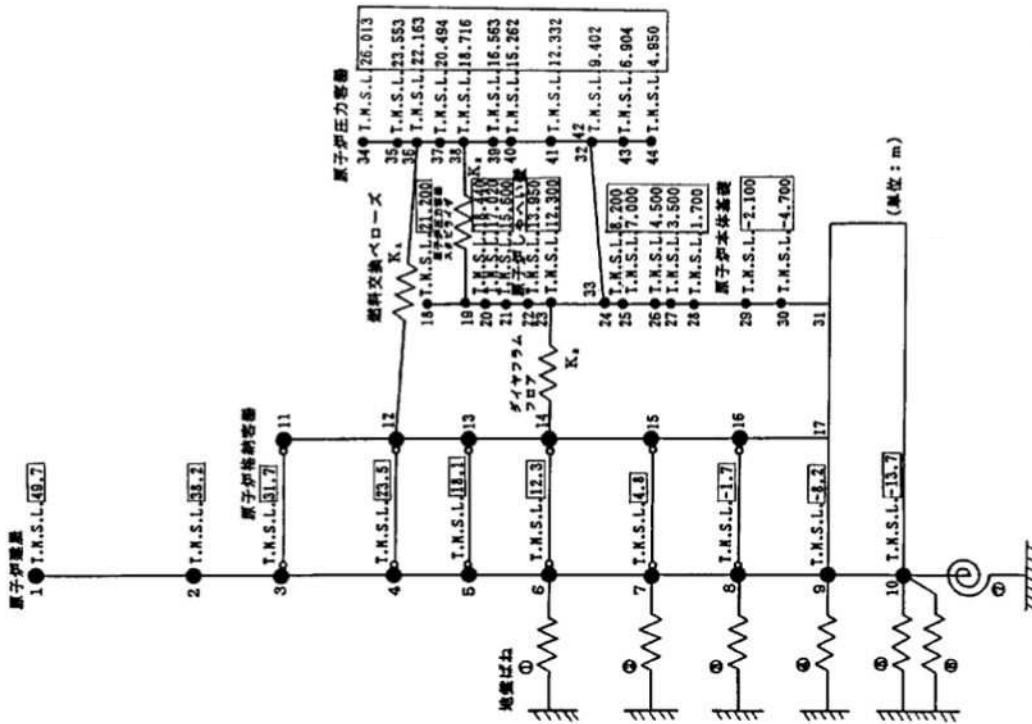


図 1.3.2-3 EW 方向解析モデル：大型機器系
(既工認：分割申請第 1 回)

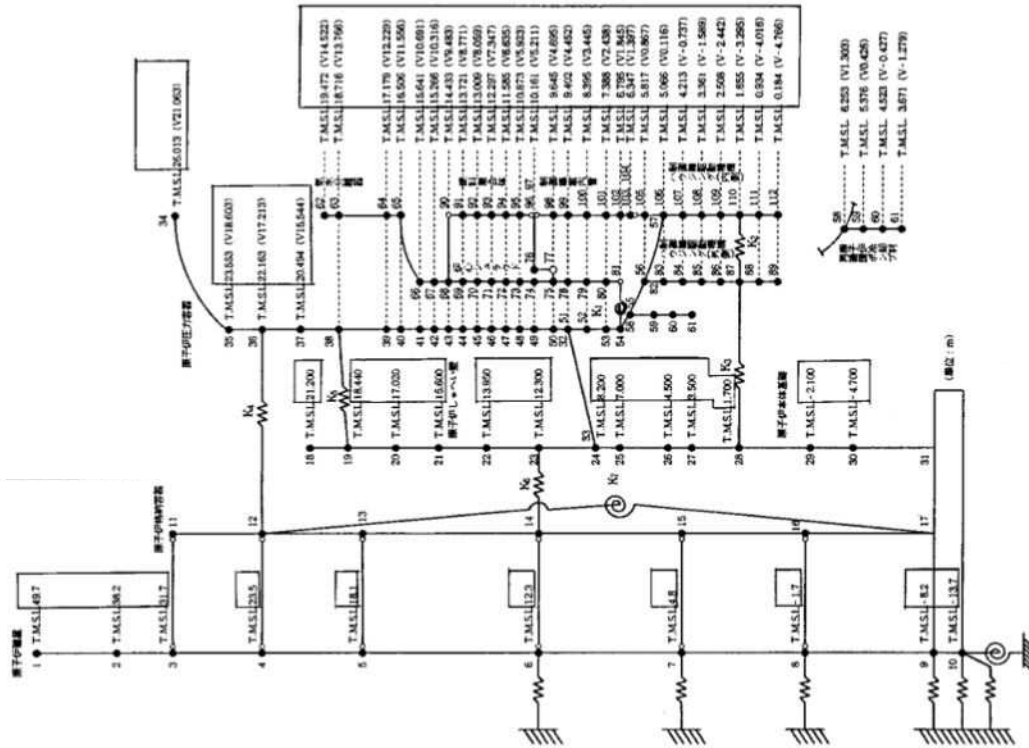


図 1.3.2-5 EW 方向解析モデル：炉内構造物系
(既工認：分割申請第5回)

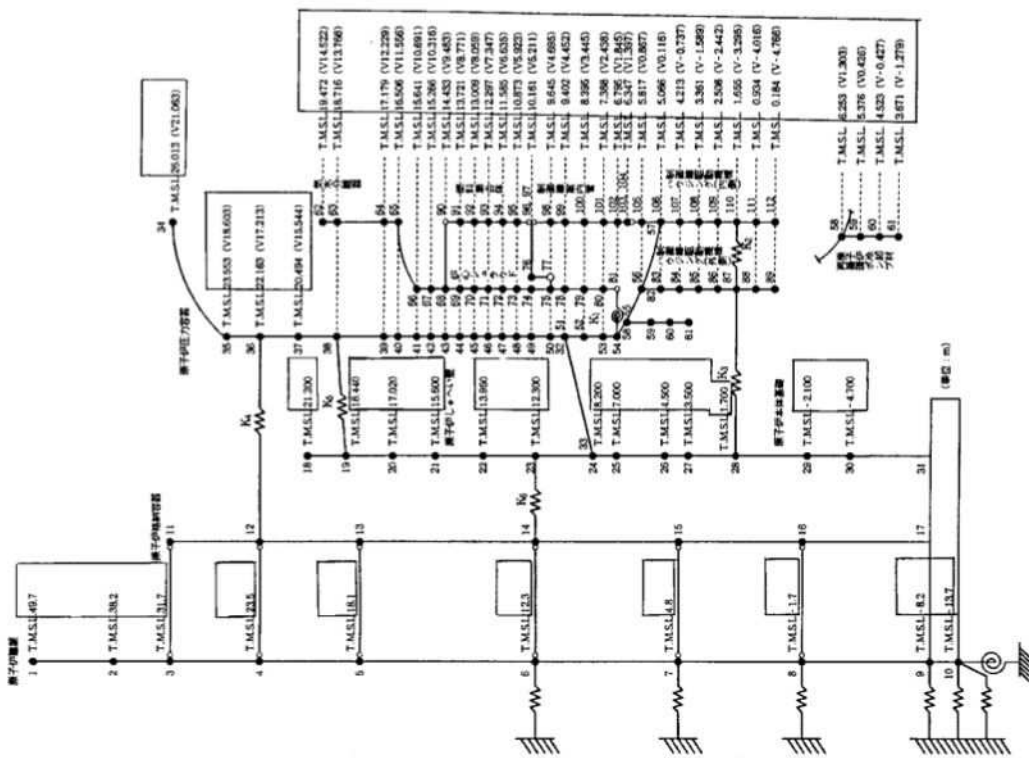


図 1.3.2-4 NS 方向解析モデル：炉内構造物系
(既工認：分割申請第5回)

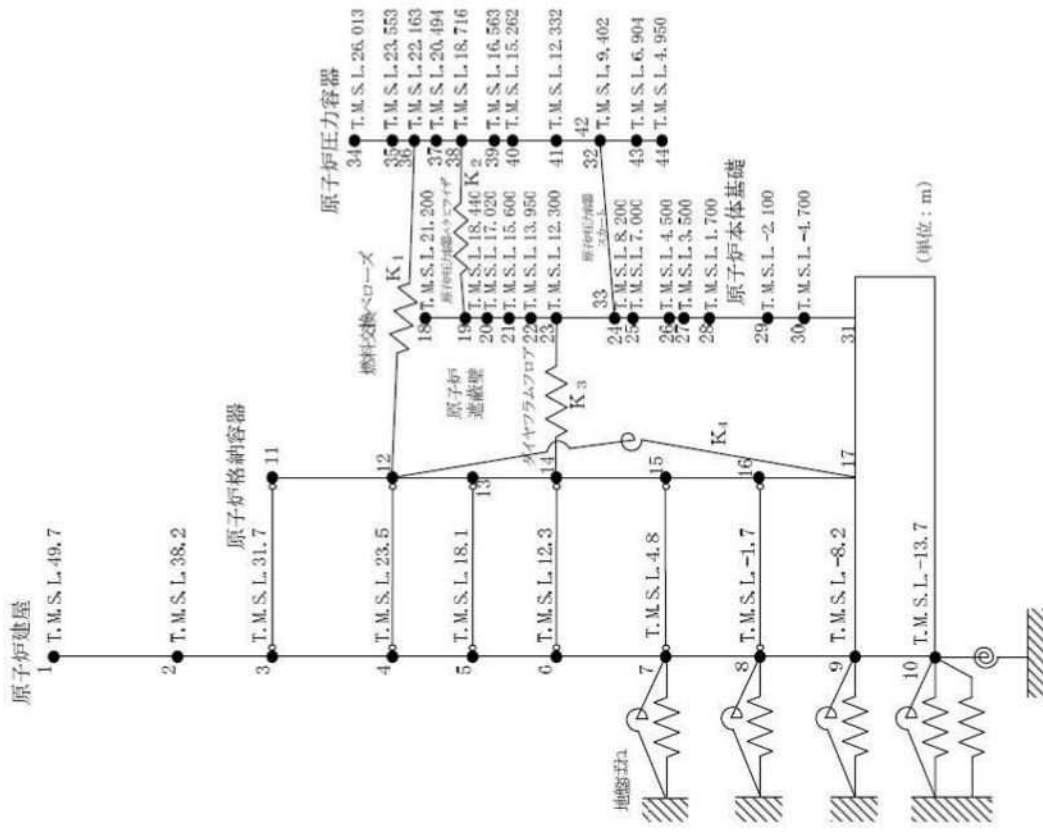


図 1.3.2-7 EW 方向解析モデル：大型機器系
(今回工認)

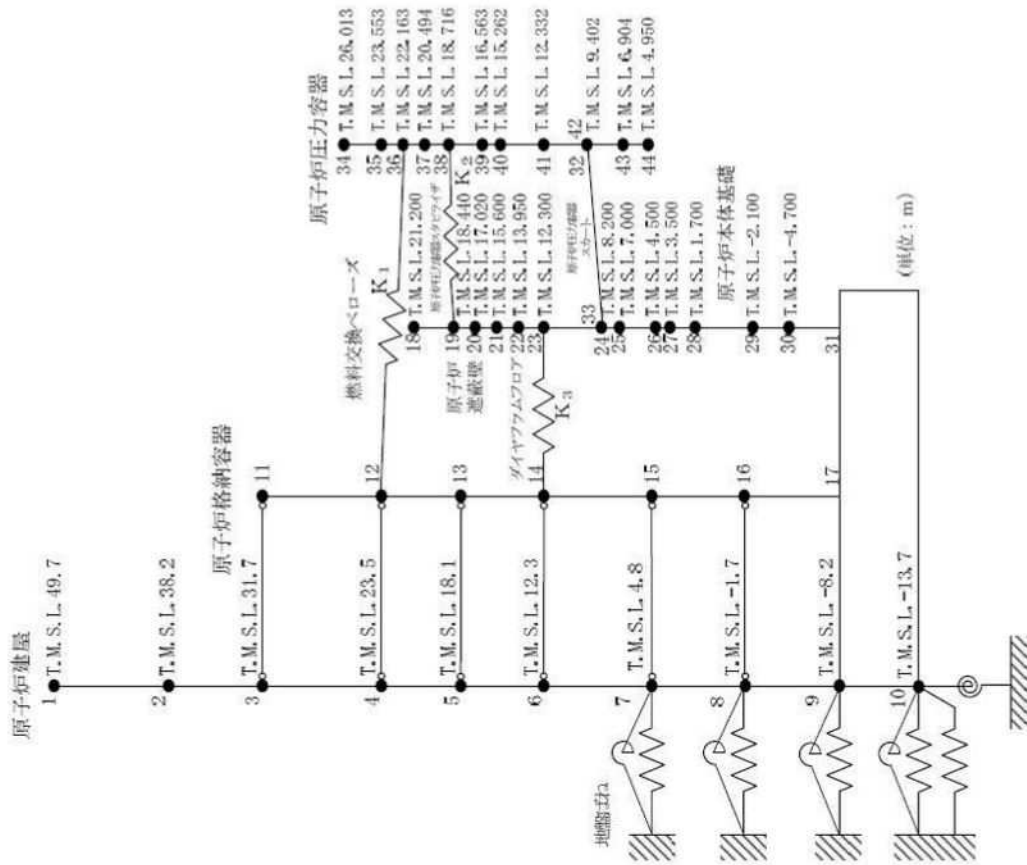


図 1.3.2-6 NS 方向解析モデル：大型機器系
(今回工認)

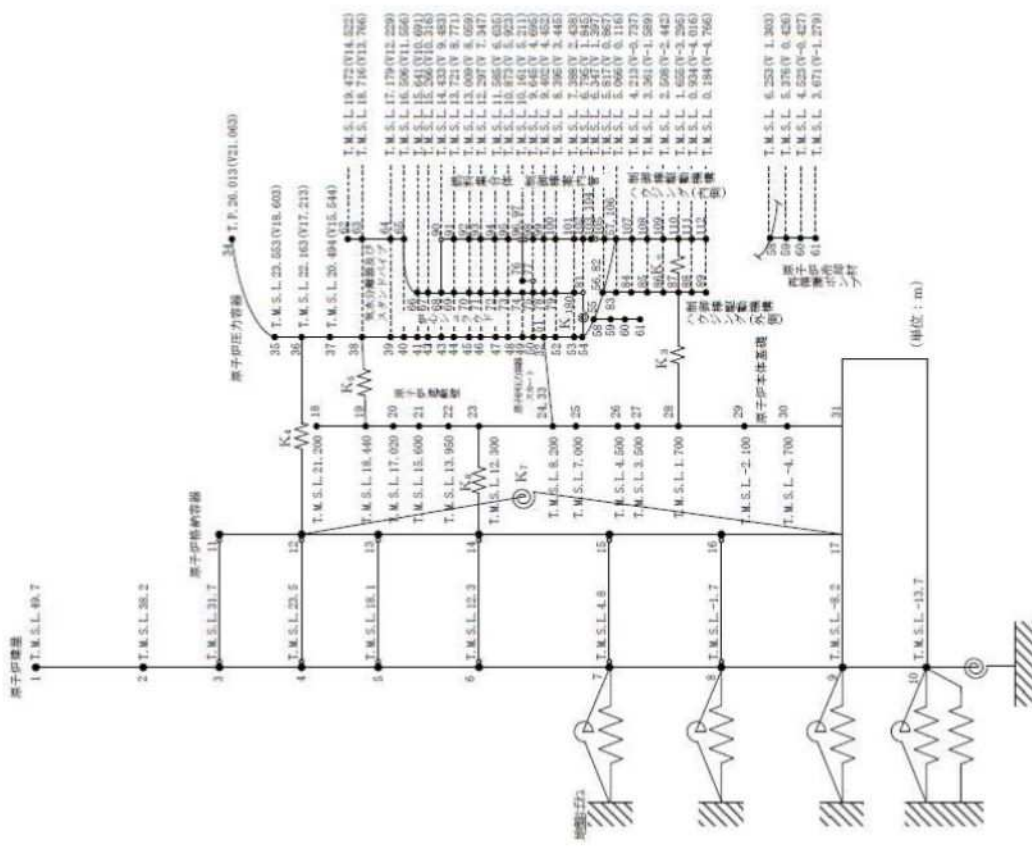


図 1.3.2-9 EW 方向解析モデル：炉内構造物系 (今回工認)

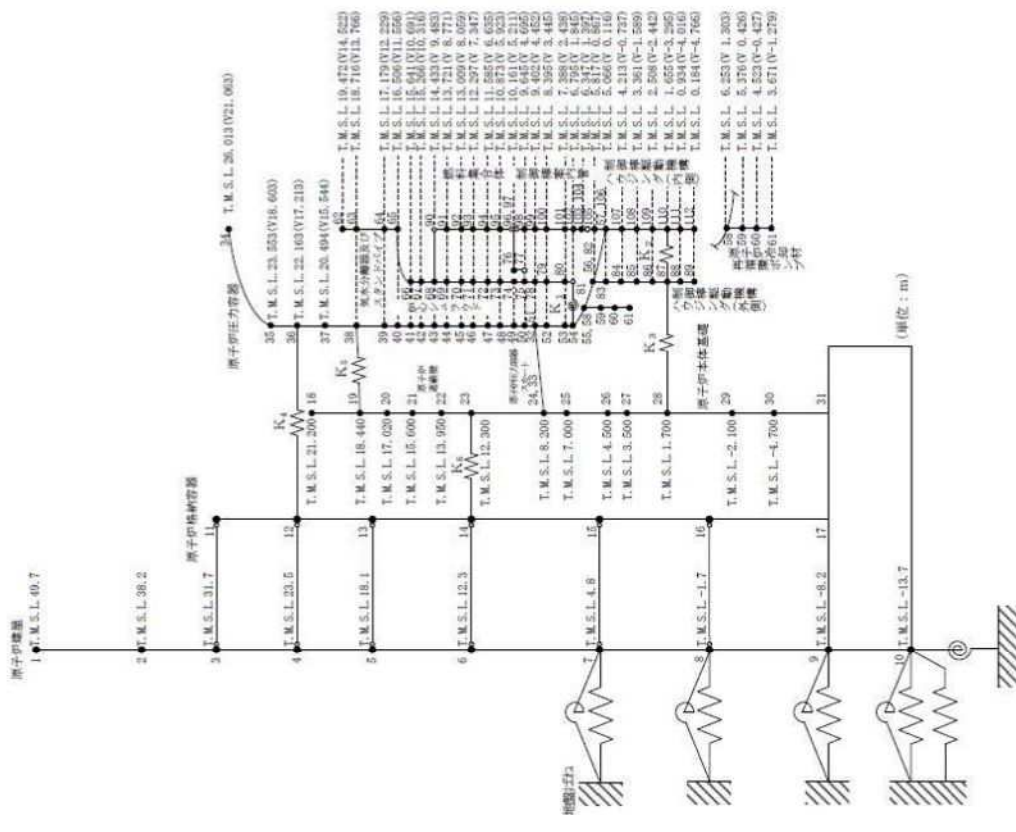


図 1.3.2-8 NS 方向解析モデル：炉内構造物系 (今回工認)

(2) 鉛直方向解析モデルの設定について

新たに作成する鉛直方向解析モデルは、水平方向解析モデルとの整合を図ることを基本とし、上下方向の自由度のみを有する、集中質量質点と軸圧縮ばねで構成されるモデルとして作成している。

鉛直方向解析モデルの質点質量算定の基本方針は、水平方向解析モデルと同様とし、炉水の質量は炉水を支持する部位の面積に対応して配分する等、荷重伝達経路を考慮して振り分けを行う。なお、上下方向の振動特性に影響を与えない支持構造物等の設備は、質量のみを考慮する。

鉛直方向解析モデルの断面剛性算定の基本方針は、円筒形またはそれに準ずる構造物について、下式により全断面を用いてばね定数を算定している。

$$K = AE/L$$

ここで、

A : 断面積 (m²)

E : 縦弾性係数 (t/m²)

L : 部材長 (m)

鉛直方向解析モデルの質点質量及びばね定数の算定例を以下に示す。

a. 質点質量

(a) 原子炉压力容器上部鏡板 (質点番号 : 55)



水平方向解析モデル及び鉛直方向解析モデルにおける原子炉压力容器上部鏡板の質点質量の算定結果を表 1.3.2-2 に示す。



鉛直方向解析モデル質点質量 = 
 =  = 22.10(t)

表 1.3.2-2 原子炉压力容器上部鏡板の質点質量算定結果

		水平方向 解析モデル	鉛直方向 解析モデル	備考
質点番号		34	55	
標高 T. M. S. L. (m)		26.013		
本体質量(t)				
付加物 質量 (t)	ベント及び 上蓋スプレイノズル			
	上蓋吊り金具			
炉水質量(t)				
質点質量(t)		22.62	<u>22.10</u>	

b. ばね定数

(a) 原子炉压力容器胴板（質点番号：68-69）

原子炉压力容器胴板の断面剛性は、各部材の諸元を用いて、全断面によるばね定数を以下の通り算定する。

$$\begin{aligned}
 A &= (\text{NS 方向有効せん断断面積}) + (\text{EW 方向有効せん断断面積}) \\
 &= \boxed{} + \boxed{} = \boxed{} \text{ (m}^2\text{)} \\
 E &= \boxed{} \text{ (t/m}^2\text{)} \\
 L &= 0.712 \text{ (m)}
 \end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{A E}{L} \\
 &= \frac{\boxed{} \times \boxed{}}{0.712} = \boxed{} \text{ t/m} \rightarrow \boxed{} \text{ (kN/m)}
 \end{aligned}$$

(b) 原子炉压力容器下部鏡板（質点番号：16-23）

原子炉压力容器下部鏡板は形状が円筒ではなく水平方向の広がりを持つことから、原子炉压力容器下部鏡板の断面剛性は理論式^[1]を用いて、以下の通り算定する。原子炉压力容器下部鏡板の構造概要を図 1.3.2-10 に示す。

$$\begin{aligned}
 \Delta y &= \frac{\rho \cdot R^2}{E} \left\{ \sin^2 \theta + (1 + \nu) \cdot \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right\}^{[1]} \\
 P &= 2\pi \cdot R^2 (1 - \cos \theta) \cdot t \cdot \rho \\
 K &= \frac{P}{\Delta y} = \frac{2\pi (1 - \cos \theta) \cdot t \cdot E}{\sin^2 \theta + (1 + \nu) \cdot \ln \frac{2}{1 + \cos \theta}} \\
 &= \frac{2\pi \times (1 - \cos \boxed{}) \times \boxed{} \times \boxed{}}{\sin^2 \boxed{} + (1 + 0.3) \cdot \ln \frac{2}{1 + \cos \boxed{}}} = \boxed{} \text{ (kN/m)}
 \end{aligned}$$

ここで

- y : 高さ
- Δy : 高さ y に対する変形量
- P : 自重
- R : 面内半径
- ρ : 単位体積重量

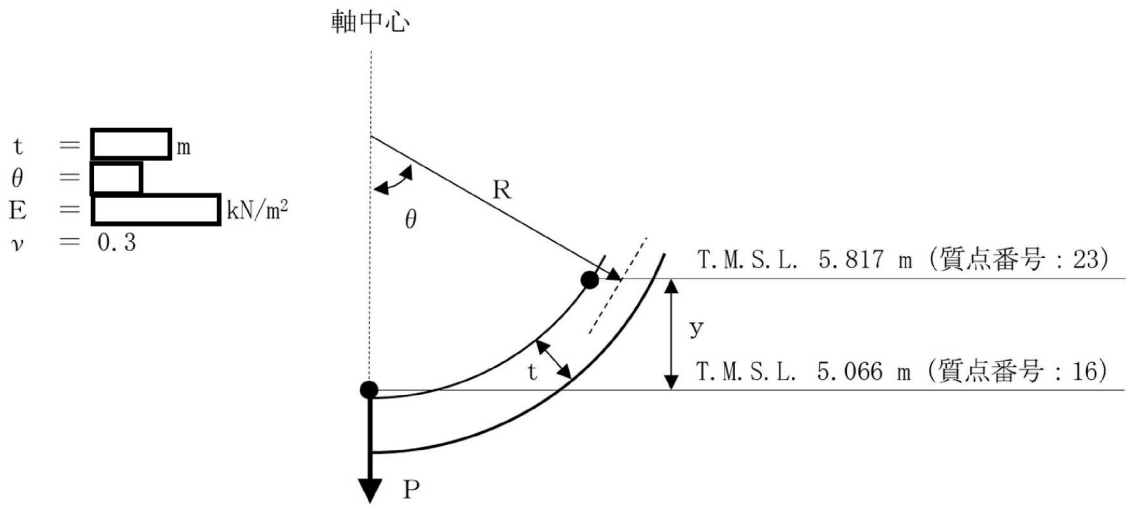


図 1.3.2-10 原子炉压力容器下部鏡板 (質点 16-23) の構造概要

参考文献

[1] : Roark 「FORMURAS OF STRESS AND STRAIN, 6th edition」 Table 28 No.3c

2. 誘発上下動の考慮方法

本章は、建屋応答解析における各入力地震動が接地率に与える影響を踏まえた誘発上下動の考慮方法を以下に示す。

2.1 考慮方針

V-2-1-6「地震応答解析の基本方針」のうち、「2. 地震応答解析の基本方針」に基づき誘発上下動を考慮する場合には、鉛直方向地震力に対する鉛直方向の応答時刻歴に、以下の通り誘発上下動の応答時刻歴を時々刻々加算及び減算をする。

- ・ $V + X_v$
- ・ $V + Y_v$
- ・ $V - X_v$
- ・ $V - Y_v$

ここで、

V : 鉛直方向地震力に対する鉛直方向の応答時刻歴

X_v : X方向地震力に対する誘発上下動の応答時刻歴

Y_v : Y方向地震力に対する誘発上下動の応答時刻歴

2.2 考慮方法

誘発上下動の考慮フローを図 2-1 に、図 2-1 中の各手順の詳細を 2.2.1～2.2.3 に示す。

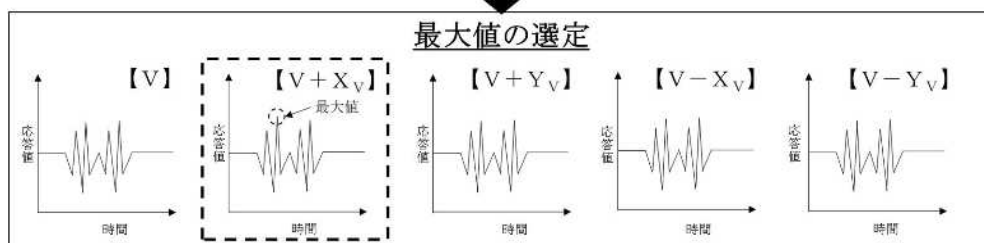
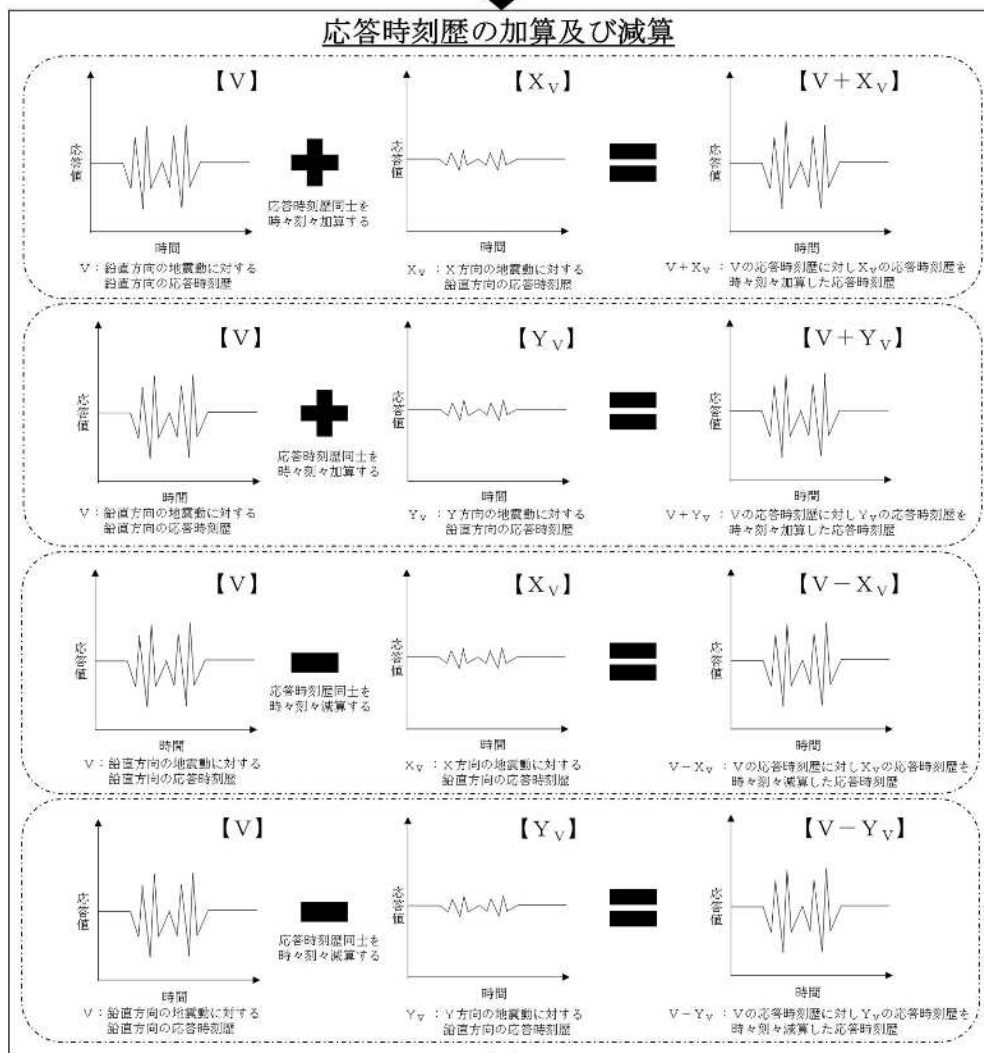
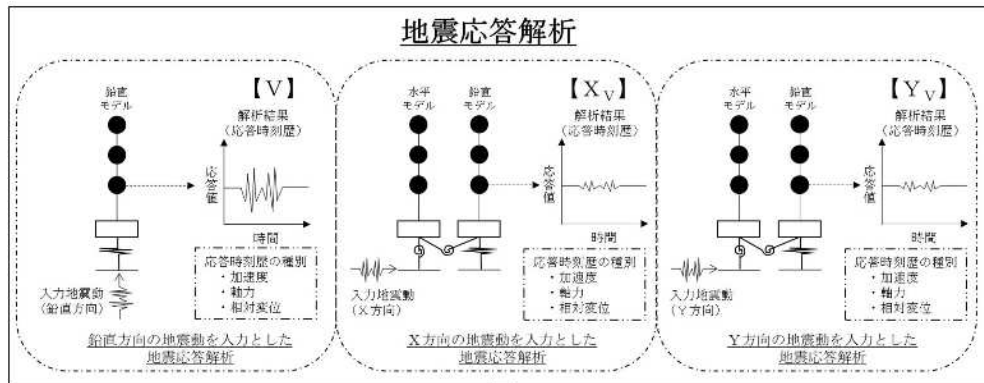


図 2-1 誘発上下動の考慮フロー

2.2.1 地震応答解析

誘発上下動を考慮した地震応答解析を実施する場合、水平加振により励起される上下応答を評価するため、水平方向と鉛直方向の地震応答解析モデルを、基礎底面で回転・鉛直連成ばねを用いて連成した解析モデルを用い、水平方向の地震力を入力とした浮き上がり非線形地震応答解析を行う。地震応答解析モデルを図 2-2 及び図 2-3 に示す。

また、誘発上下動を考慮した地震応答解析は、工事計画に係る補足説明資料【KK7 補足-025-1 原子炉建屋の原子炉建屋の地震応答計算書に関する補足説明資料】に記載の接地率を踏まえて実施し、ケース 7 及び 8 の接地率は基本ケースの接地率に準ずる。基準地震動 S_s について、誘発上下動を考慮した地震応答解析を実施する解析ケース及び入力地震動を表 2-1 に示す。なお、弾性設計用地震動 S_d による地震応答解析においては、全ての解析ケース及び入力地震動に対して接地率が 65%を上回るため、誘発上下動を考慮しない。

以降は、X方向を NS 方向、Y方向を EW 方向に置き換えて示す。

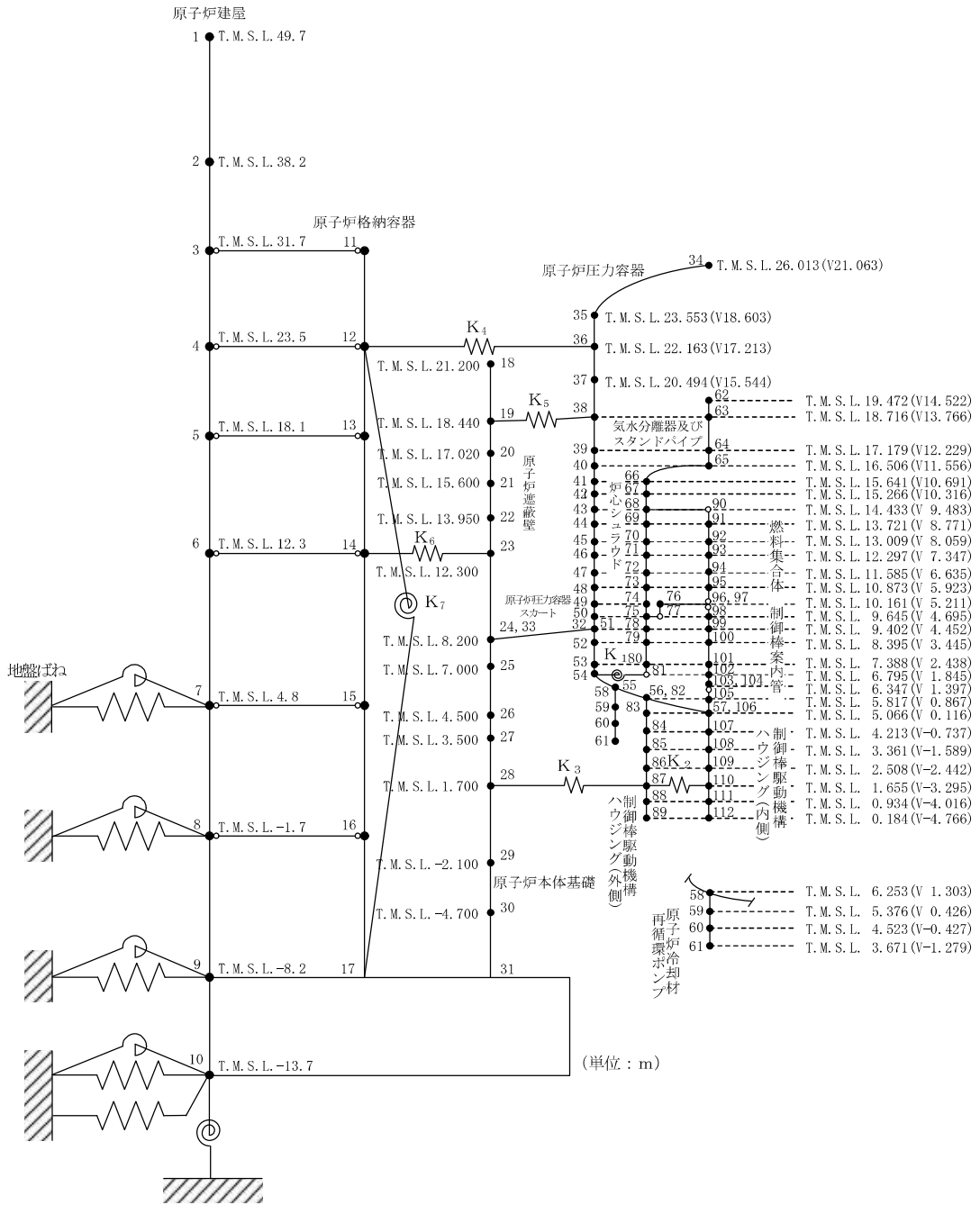


図 2-2 地震応答解析モデル (鉛直方向)

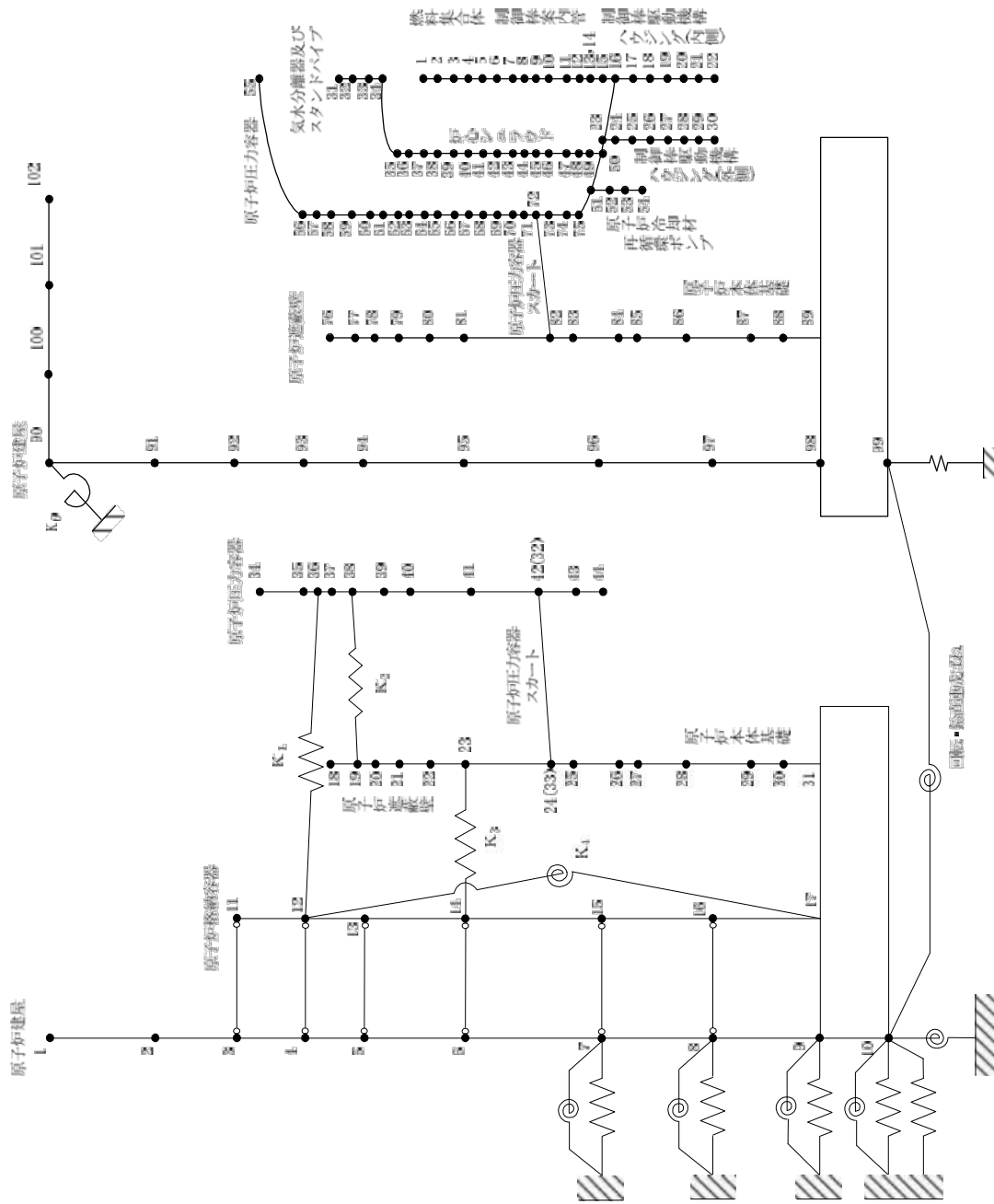


図 2-3 (2/4) 原子炉压力容器, 原子炉遮壁及び原子炉本体基礎 地震応答解析モデル (EW 方向 誘発上下動を考慮する場合)

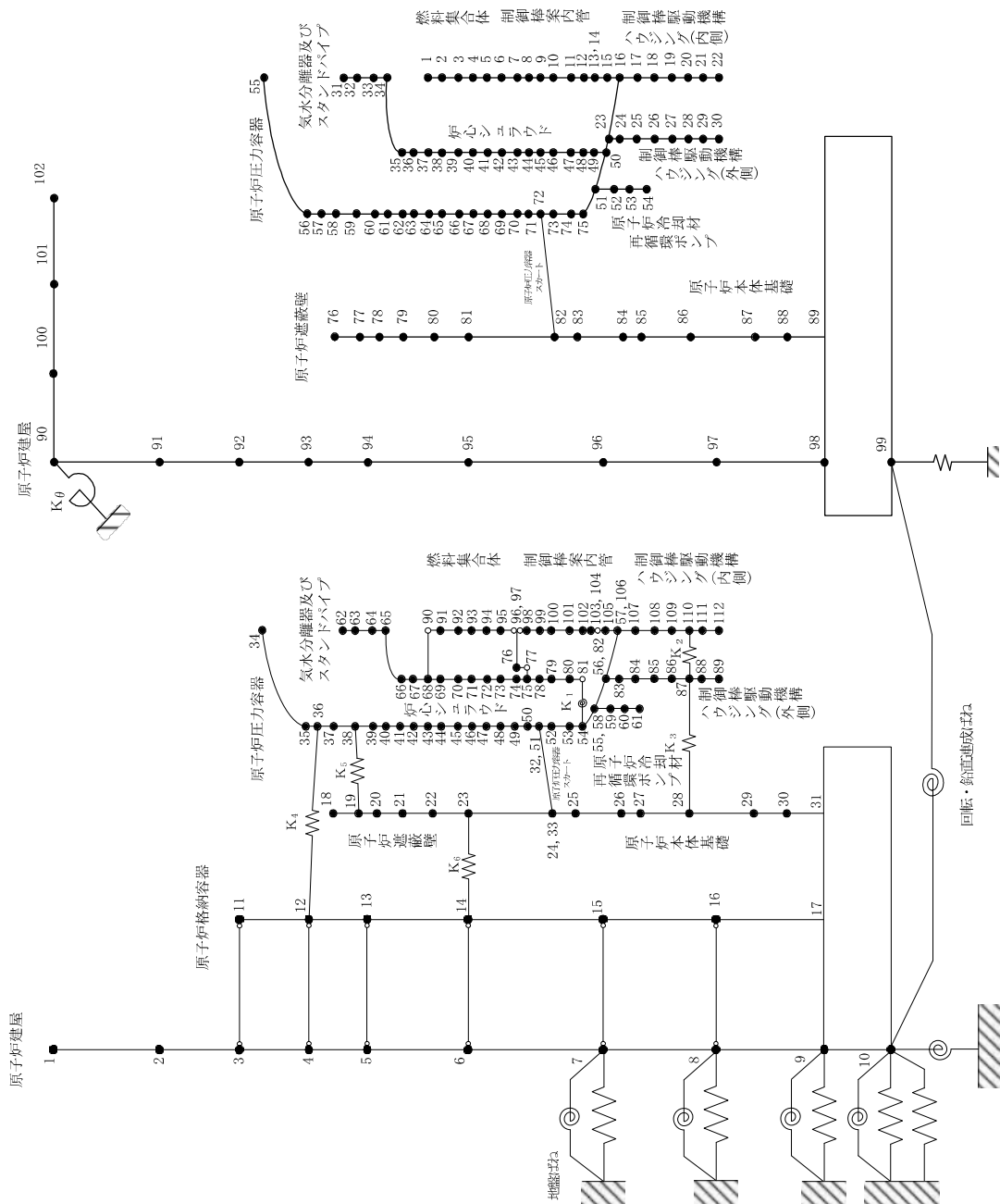


図2-3 (3/4) 原子炉本体 地震応答解析モデル (NS方向 誘発上下動を考慮する場合)

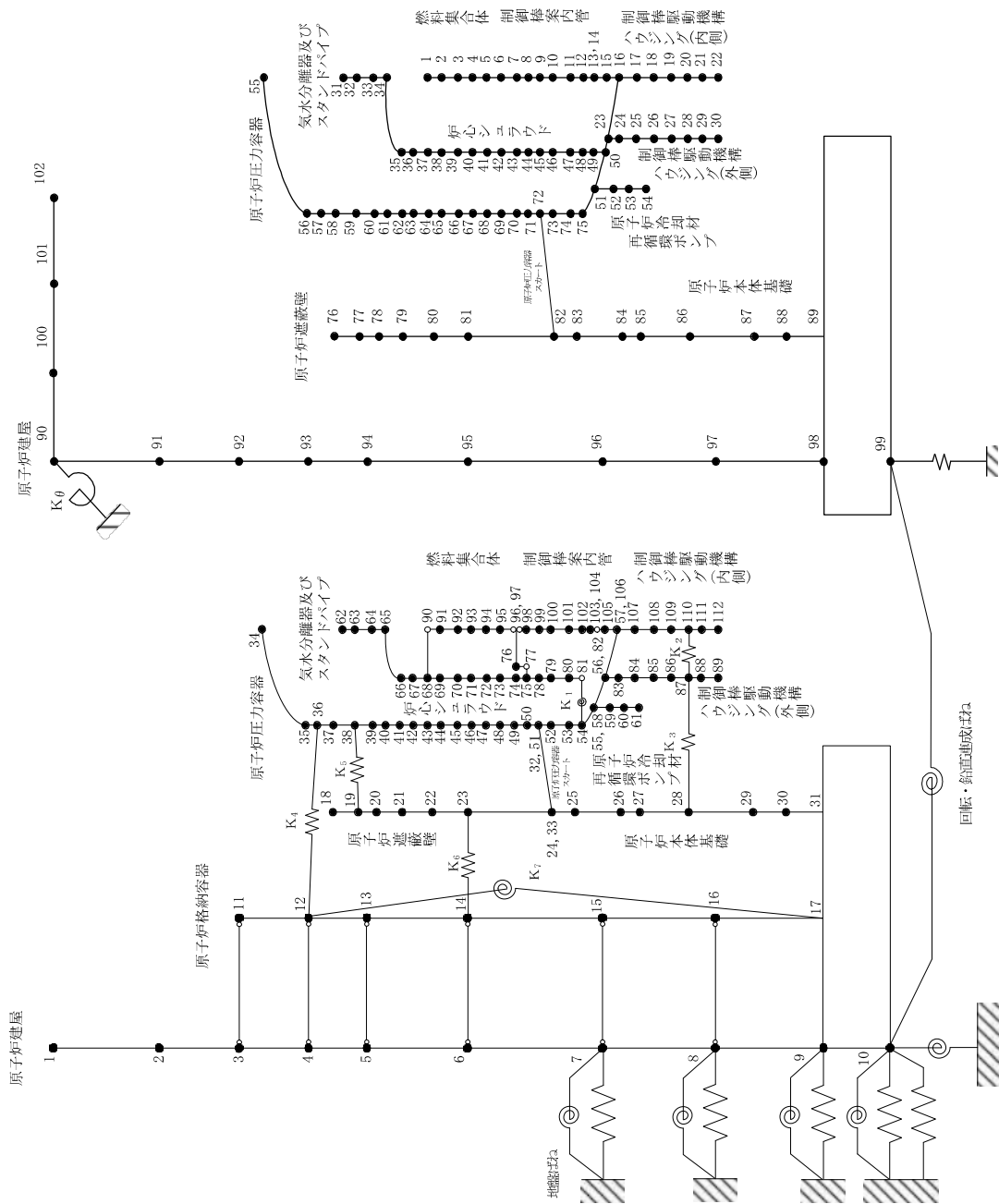


図2-3 (4/4) 原子炉本体 地震応答解析モデル (EW方向 誘発上下動を考慮する場合)

表 2-1 誘発上下動を考慮するケース及び地震動（基準地震動 S s）

	Ss-1		Ss-2		Ss-3		Ss-4		Ss-5		Ss-6		Ss-7		Ss-8		
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	
①ケース 1 (工認モデル)				考慮													
②ケース 2 (建屋剛性+ σ , 地盤剛性+ σ)																	
③ケース 3 (建屋剛性- σ , 地盤剛性- σ)				考慮											考慮		
④ケース 4 (建屋剛性 コア平均)				考慮													
⑤ケース 5 (建屋剛性- 2σ)				考慮													
⑥ケース 6 (回転ばね低減)	考慮	考慮		考慮											考慮		考慮
⑦ケース 7 (実強度)				考慮													
⑧ケース 8 (曲線近似包絡)				考慮													

注： 上記表のハッチングは、基本ケースの地震力等を踏まえ、材料物性の不確かさ等を考慮したケースでは検討に用いない地震動。

2.2.2 応答時刻歴の加算及び減算

誘発上下動を考慮した応答値を算定する場合は、鉛直方向の地震力に対する地震応答解析結果（解析モデルは図2-2を使用）と、NS及びEW方向の地震力に対する地震応答解析結果（解析モデルは図2-3を使用）で、以下の通り応答時刻歴の時々刻々加算と減算を行う。

- ・ $V + NS_v$
- ・ $V + EW_v$
- ・ $V - NS_v$
- ・ $V - EW_v$

2.2.3 最大値の選定

誘発上下動を考慮した応答値として、2.2.2で作成した以下の加算及び減算した応答時刻歴に加え、鉛直方向の地震力に対する応答時刻歴（V）より、最大値を選定する。

- ・ V
- ・ $V + NS_v$
- ・ $V + EW_v$
- ・ $V - NS_v$
- ・ $V - EW_v$

2.3 各耐震条件の作成方法

耐震評価に適用する耐震条件のうち、誘発上下動を考慮する以下の各耐震条件の作成手順を

2.3.1～2.3.3に示す。

- ・最大応答加速度
- ・床応答スペクトル
- ・軸力

2.3.1 最大応答加速度

地震応答解析～最大応答加速度算定までの手順を図2-4に示す。

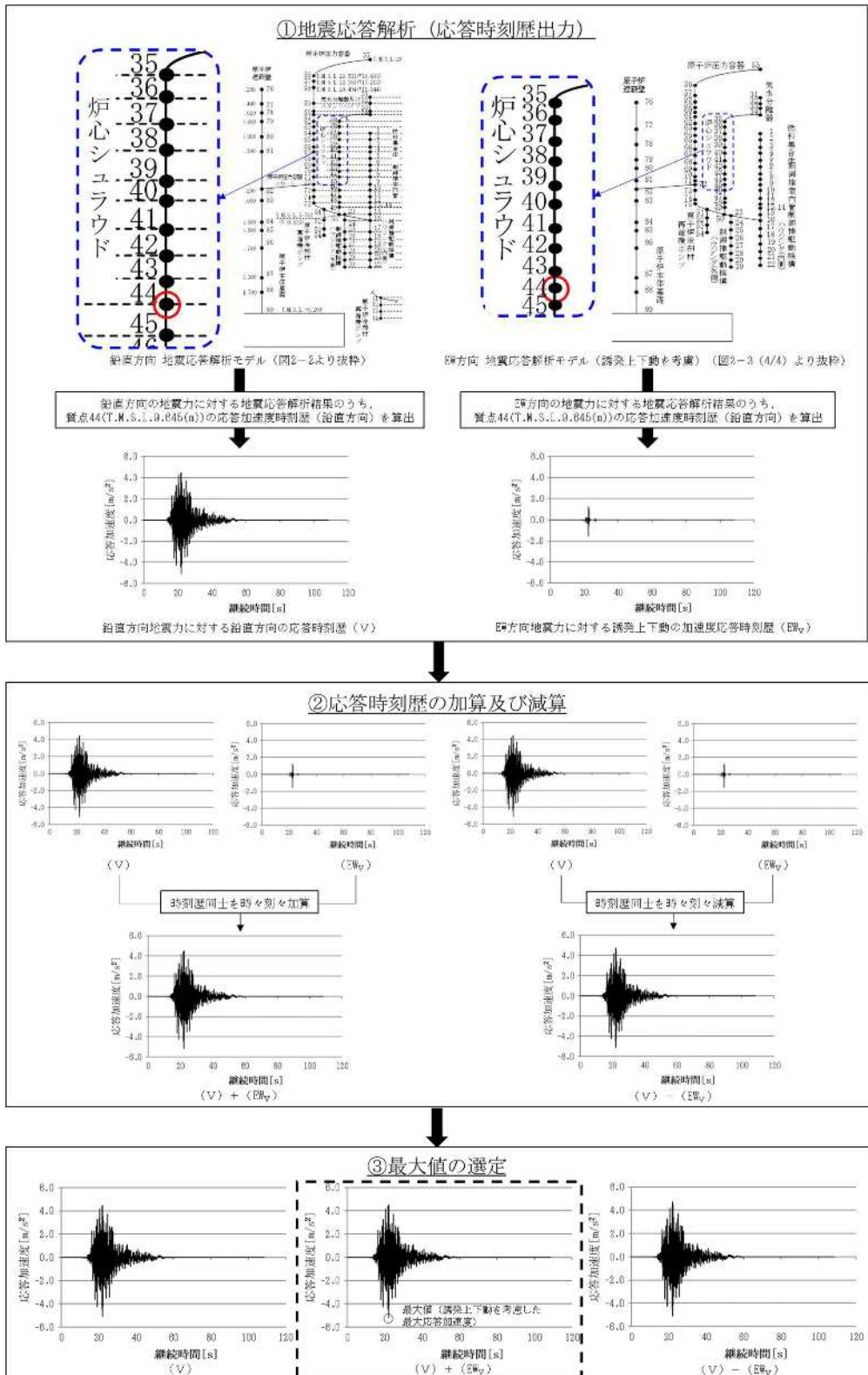


図2-4 誘発上下動を考慮した耐震条件作成手順（最大応答加速度）
（炉心シュラウド T.M.S.L. 9.645(m) 基本ケース, Ss-2, EW方向の例）

2.3.2 床応答スペクトル

地震応答解析～床応答スペクトル作成までの手順を図2-5に示す。

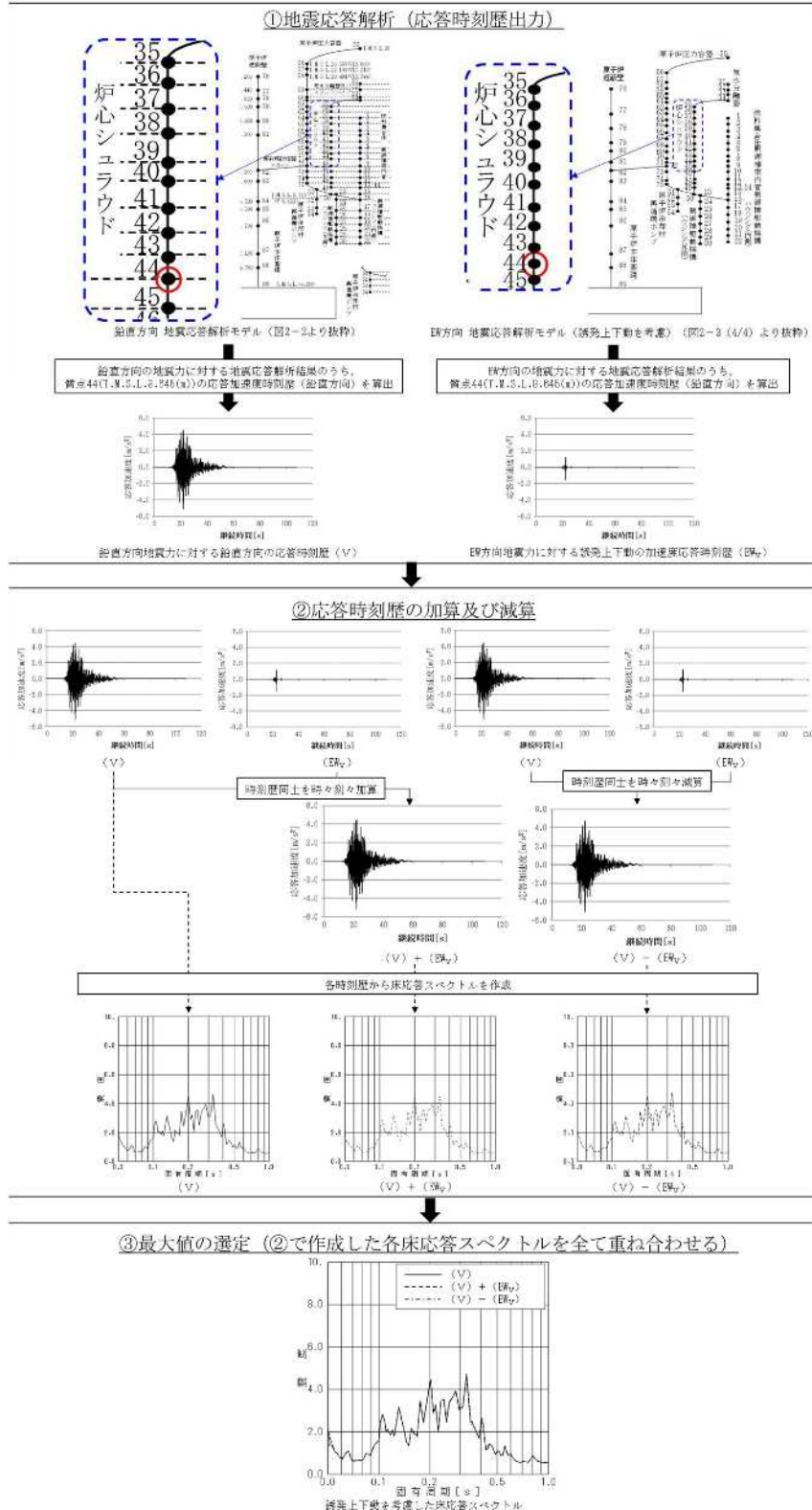


図2-5 誘発上下動を考慮した耐震条件作成手順（床応答スペクトル）
（炉心シュラウド T.M.S.L. 9.645(m) 基本ケース, Ss=2, EW方向の例）

2.3.3 軸力

地震応答解析～軸力算定までの手順を図2-6に示す。

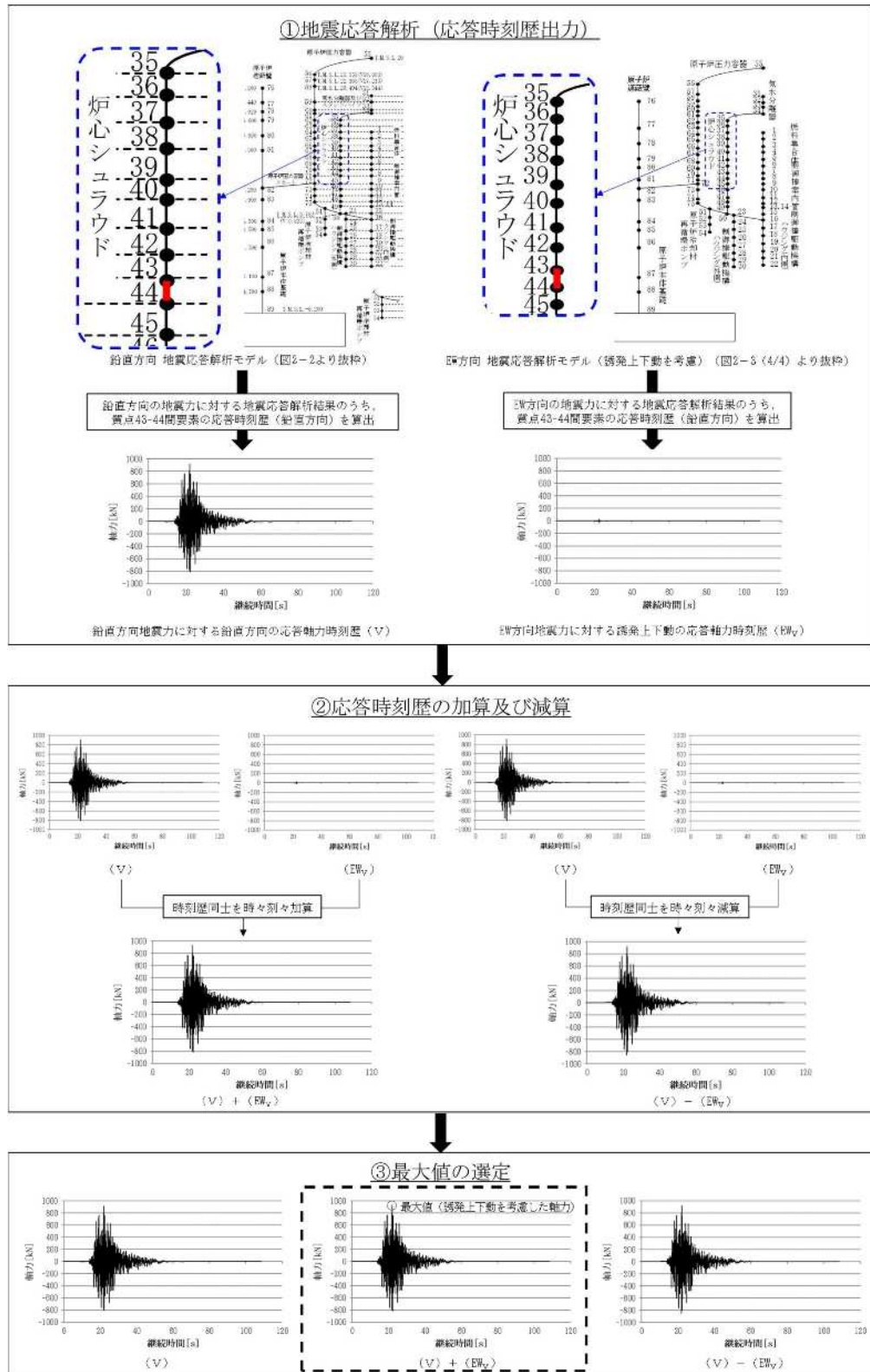


図2-6 誘発上下動を考慮した耐震条件作成手順（軸力）

（炉心シュラウド 質点43-44間要素 基本ケース，Ss-2，EW方向の例）

3. 建屋－機器連成解析固有の材料物性の不確かさ等の検討ケースについて

本章は、建屋－機器連成解析固有の材料物性の不確かさ等の検討ケースについて説明するものである。

3.1 検討方針

建屋－機器連成解析においては、原子炉建屋（以下「R/B」という。）の地震応答解析にて考慮する材料物性の不確かさに加えて、建屋と連成させる「原子炉本体基礎の地震応答解析モデル」及び「炉心、原子炉圧力容器および圧力容器内部構造物の地震応答解析モデル」におけるRPVペDESTALとダイヤフラムフロアのコンクリート剛性の材料物性の不確かさ及びRPVペDESTALの復元力特性の設定手法特有の配慮について検討する。

3.2 材料物性の不確かさ等

3.2.1 RPVペDESTALとダイヤフラムフロアのコンクリート剛性

原子炉本体基礎とダイヤフラムフロアのコンクリートについては、R/B等のような施工時の「91日強度データ」がなく、プラント運転開始後にもコア採取を実施していないが、R/B等と同様に現実のコンクリート強度は設計基準強度を上回ると考えられる。

3.2.2 手法特有の配慮

今回工認では、RPVペDESTALの復元力特性について、より現実に近い地震応答解析を実施するため、内部に充てんされたコンクリートのひび割れに伴う剛性変化を考慮したスケルトン曲線を採用している。このスケルトン曲線は、第1折点を内部コンクリートのひび割れが生じる点、第2折点を鋼板が降伏する点として2直線で近似しており、第1折点を越えた範囲では剛性が一定との仮定に基づいている。しかしながら、実現象としてのRPVペDESTALの挙動は、第1折点で初期ひび割れが生じた後も、荷重の増加に伴い内部コンクリートのひび割れは徐々に増加していくこととなる。ひび割れの増加はコンクリートの剛性低下を意味することから、第1折点から第2折点の間の区間は直線で近似するよりも、徐々に剛性すなわちスケルトン曲線の勾配が低下する曲線で近似する方が実現象に近いと考えられる。

3.3 材料物性の不確かさ等の設定

建屋－機器連成解析にて考慮する不確かさ等の設定を3.3.1及び3.3.2に、解析ケースを表3-1に示す。

表 3-1 材料物性の不確かさを考慮する解析ケース

検討ケース	コンクリート剛性			回転ばね定数	地盤剛性	RPV ベースタルのスケルトン曲線の設定方法	備考
	R/B	RPV ベースタル	ダイヤフラムフロア				
①ケース 1 (工認モデル)	実強度 43.1N/mm ²	設計基準強度 29.4N/mm ²	設計基準強度 32.3N/mm ²	100%	標準地盤	折線近似	基本ケース
②ケース 2 (建屋剛性+ σ , 地盤剛性+ σ)	実強度+ σ 46.0N/mm ²	設計基準強度 29.4N/mm ²	設計基準強度 32.3N/mm ²	100%	標準地盤+ σ (砂層+13%, 小安田層+25%, 西山層+10%)	折線近似	地盤剛性の変化に伴い、回転ばね定数が変化
③ケース 3 (建屋剛性- σ , 地盤剛性- σ)	実強度- σ 40.2N/mm ²	設計基準強度 29.4N/mm ²	設計基準強度 32.3N/mm ²	100%	標準地盤- σ (砂層-13%, 小安田層-25%, 西山層-10%)	折線近似	地盤剛性の変化に伴い、回転ばね定数が変化
④ケース 4 (建屋剛性 コア平均)	実強度 (コア平均) 55.7N/mm ²	設計基準強度 29.4N/mm ²	設計基準強度 32.3N/mm ²	100%	標準地盤	折線近似	
⑤ケース 5 (建屋剛性-2 σ)	実強度-2 σ 37.2N/mm ²	設計基準強度 29.4N/mm ²	設計基準強度 32.3N/mm ²	100%	標準地盤	折線近似	
⑥ケース 6 (回転ばね低減)	実強度 43.1N/mm ²	設計基準強度 29.4N/mm ²	設計基準強度 32.3N/mm ²	50%	標準地盤	折線近似	
⑦ケース 7 (実強度)	実強度 43.1N/mm ²	実強度 39.2N/mm ²	実強度 43.1N/mm ²	100%	標準地盤	折線近似	
⑧ケース 8 (曲線近似包絡)	実強度 43.1N/mm ²	設計基準強度 29.4N/mm ²	設計基準強度 32.3N/mm ²	100%	標準地盤	折線近似 (曲線近似を包絡)	

3.3.1 RPV ペDESTALとダイヤフラムフロアのコンクリート剛性（ケース7：実強度）

RPV ペDESTALとダイヤフラムフロアのコンクリート強度には、既工認と同様に設計基準強度を用いることを基本としているが、R/B 等と同様の検討として実強度相当を考慮する。

なお、ダイヤフラムフロアの実強度は、ダイヤフラムフロアの設計基準強度が R/B と同じ値であることから、R/B と同じ値（43.1N/mm²）を用いることとするが、RPV ペDESTAL は実測したコンクリート強度がないことから、R/B 等で実測値をもとに設定したコンクリート強度を参照し、実強度を想定する。

具体的には、以下の通り R/B のコンクリート実強度（43.1N/mm²）に、RPV ペDESTAL の設計基準強度（29.4N/mm²）と R/B の設計基準強度（32.3N/mm²）の比率を乗じることにより、影響評価に用いる RPV ペDESTAL の実強度を 39.2N/mm² と想定する。

$$\begin{aligned} \text{RPV ペDESTAL の実強度} &= \text{R/B の実強度} \times \frac{\text{RPV ペDESTAL の設計基準強度}}{\text{R/B の設計基準強度}} \\ &= 43.1 \text{ (N/mm}^2\text{)} \times \frac{29.4 \text{ (N/mm}^2\text{)}}{32.4 \text{ (N/mm}^2\text{)}} \\ &= 39.2 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

RPV ペDESTALとダイヤフラムフロアのコンクリート強度に実強度を用いることを踏まえて設定した RPV ペDESTAL のスケルトン曲線及びダイヤフラムフロアのばね定数を以下に示す。

(1) RPV ペDESTALのスケルトン曲線

a. せん断力のスケルトン曲線

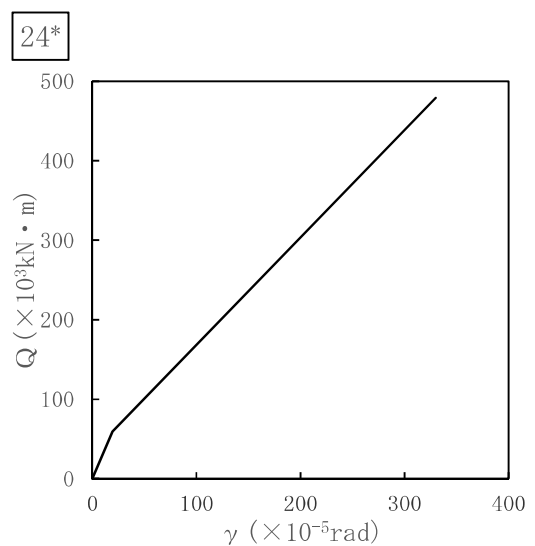
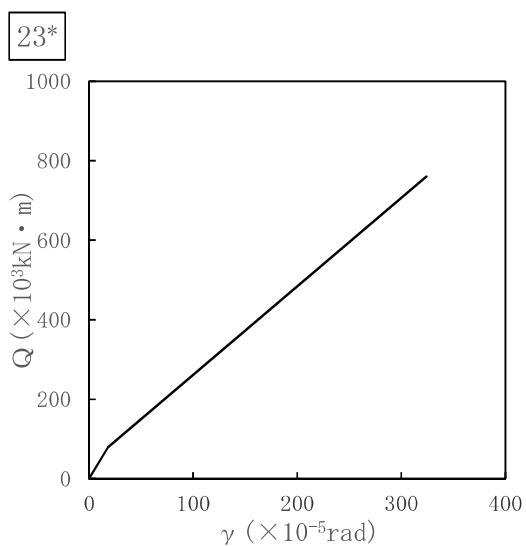
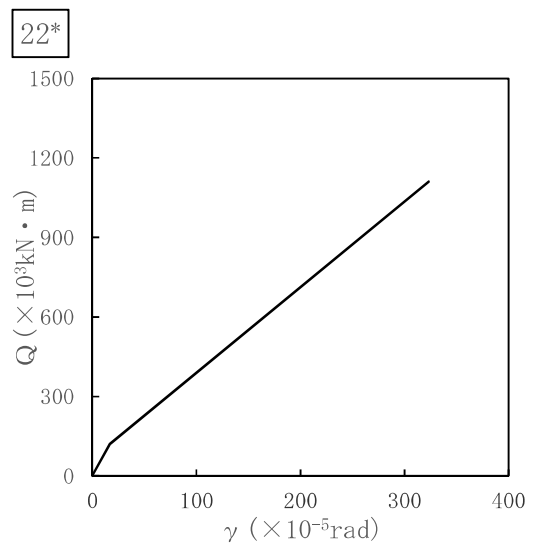
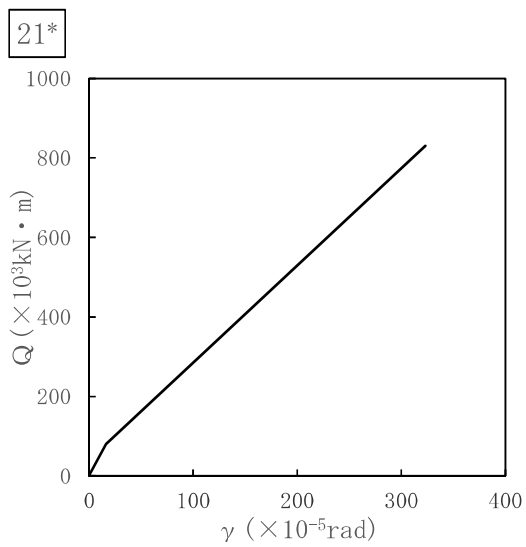
ケース7のRPVペDESTALの各要素におけるせん断力のスケルトン曲線の諸数値を表3-2及び表3-3に、スケルトン曲線を図3-1及び図3-2に示す。

表3-2 せん断力のスケルトン曲線 (NS方向)

質点番号	要素番号	Q_1 ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	γ_1 ($\times 10^{-5} \text{rad}$)	Q_2 ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	γ_2 ($\times 10^{-5} \text{rad}$)
23	21	81.3	16.5	830	323
24	22	122	17.0	1110	323
25					
26	23	79.3	18.0	760	324
27	24	59.5	19.2	479	330
28	25	39.7	9.20	395	333
29	26	32.2	9.40	331	333
30	27	40.5	9.40	390	333
31	28	40.6	9.50	380	333

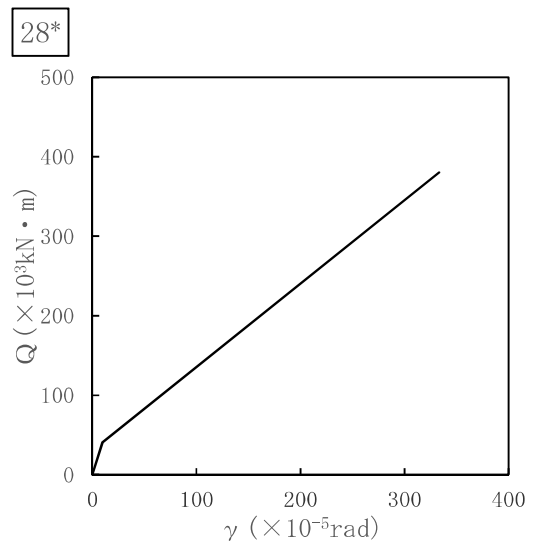
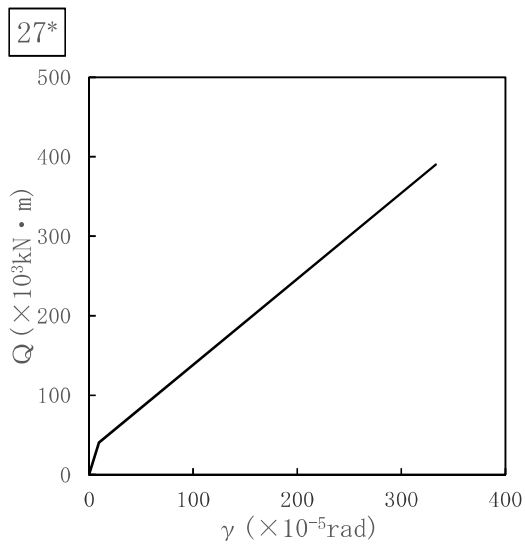
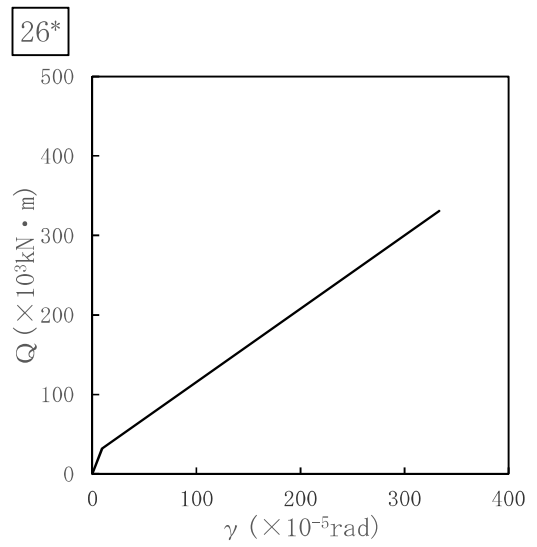
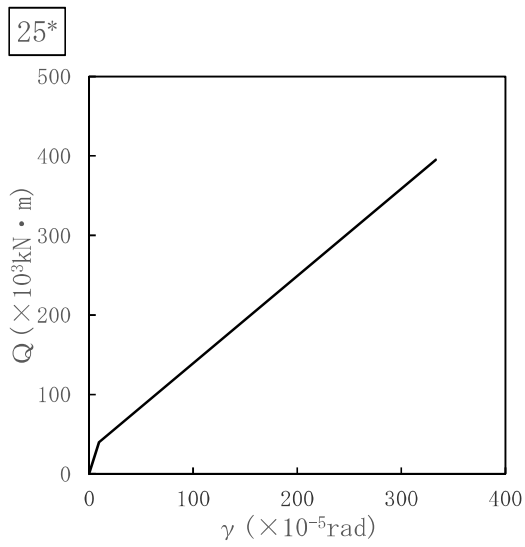
表3-3 せん断力のスケルトン曲線 (EW方向)

質点番号	要素番号	Q_1 ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	γ_1 ($\times 10^{-5} \text{rad}$)	Q_2 ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}$)	γ_2 ($\times 10^{-5} \text{rad}$)
23	21	79.9	16.5	820	323
24	22	122	17.0	1110	323
25					
26	23	78.9	18.0	753	324
27	24	59.5	19.2	479	330
28	25	39.7	9.20	395	333
29	26	41.0	9.40	395	333
30	27	40.5	9.40	390	333
31	28	40.6	9.50	380	333



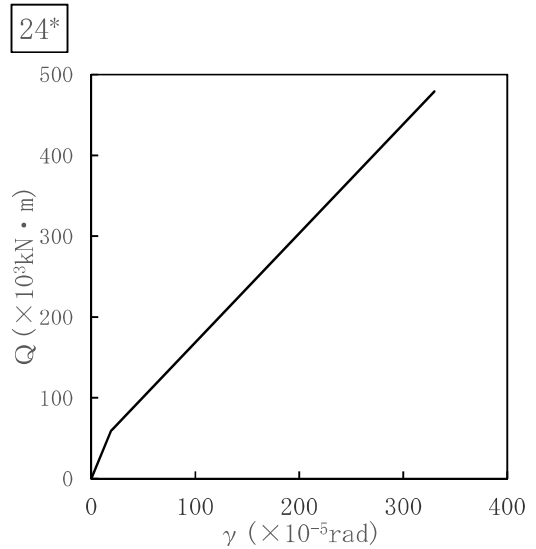
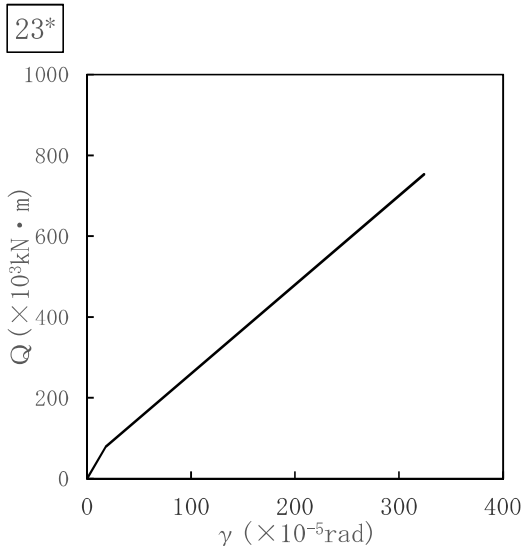
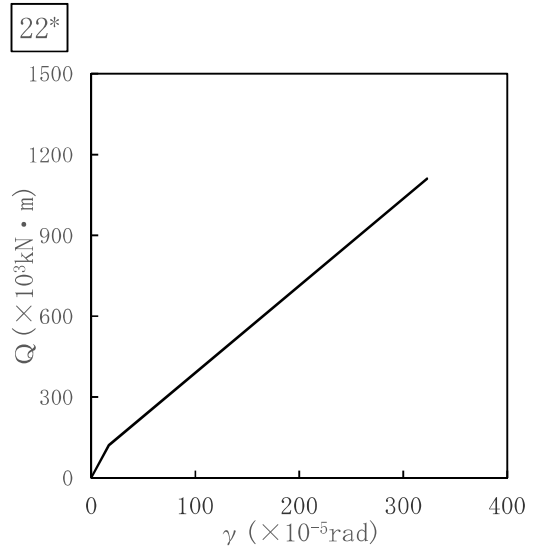
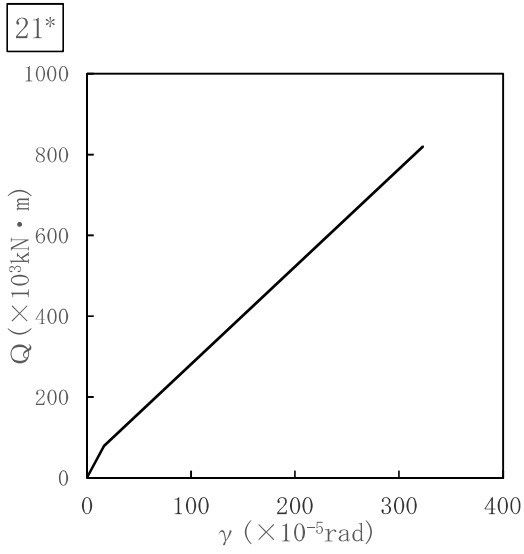
注記*：各図上に記載の要素番号は表 3-6 に対応。

図 3-1 (1) せん断力のスケルトン曲線 (NS 方向)



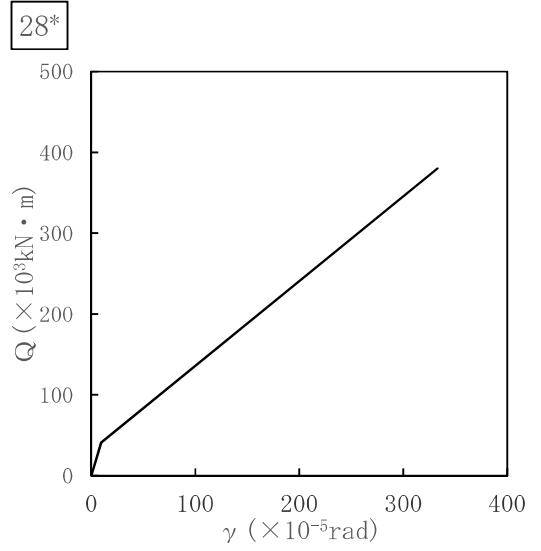
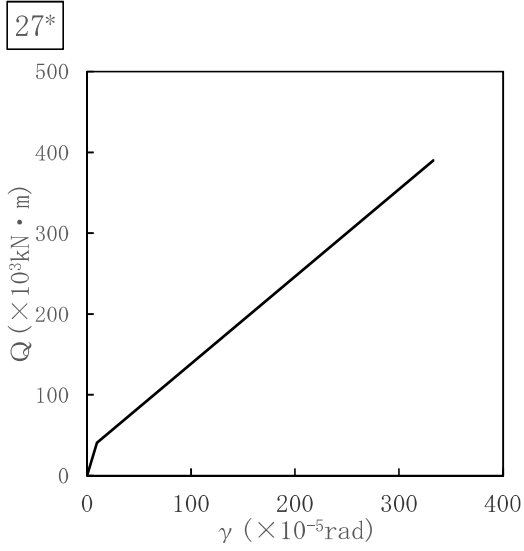
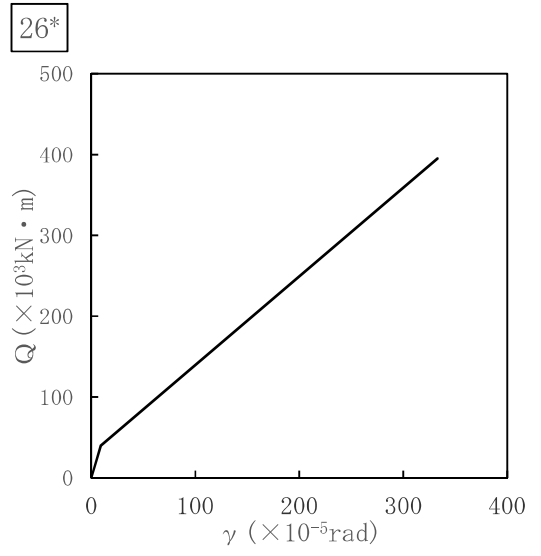
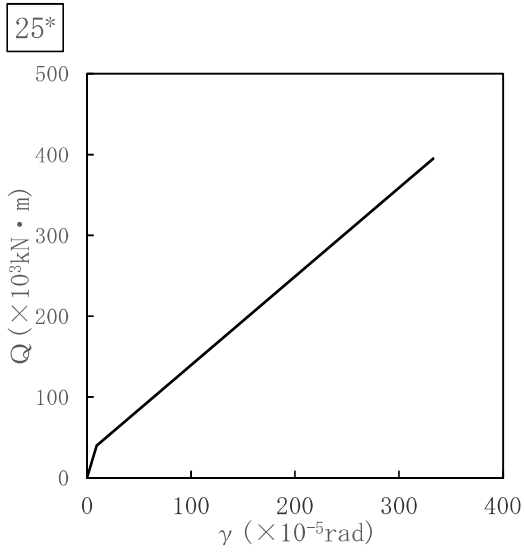
注記*：各図上に記載の要素番号は表 3-6 に対応。

図 3-1 (2) せん断力のスケルトン曲線 (NS 方向)



注記*：各図上に記載の要素番号は表 3-7 に対応。

図 3-2 (1) せん断力のスケルトン曲線 (EW 方向)



注記*：各図上に記載の要素番号は表 3-7 に対応。

図 3-2 (2) せん断力のスケルトン曲線 (EW 方向)

b. 曲げモーメントのスケルトン曲線

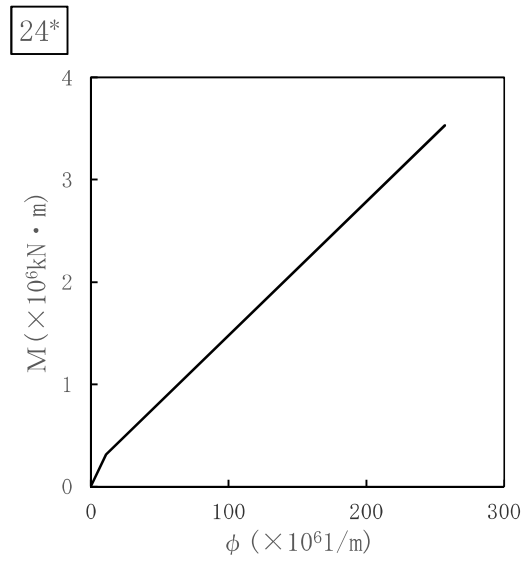
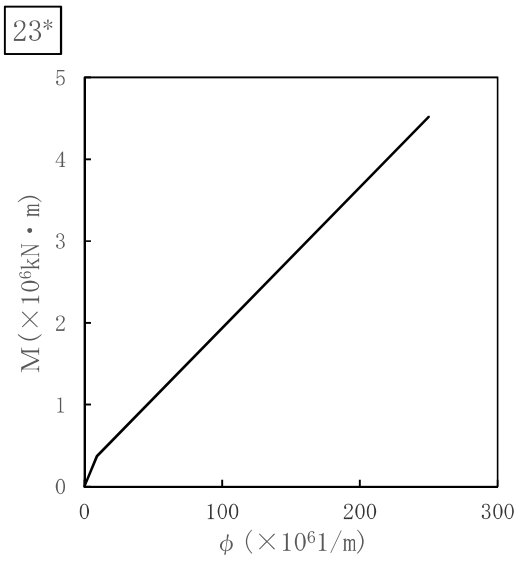
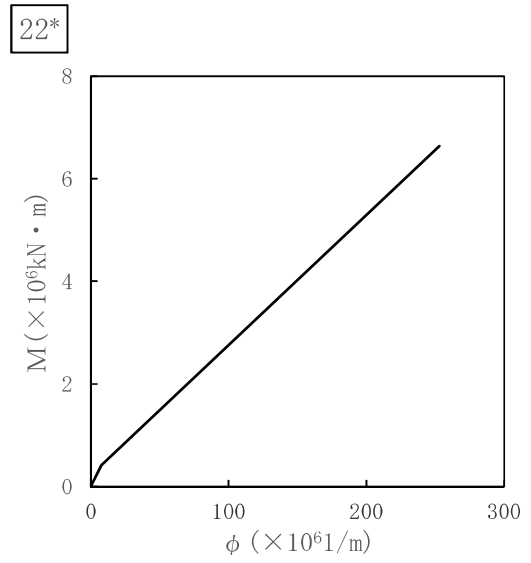
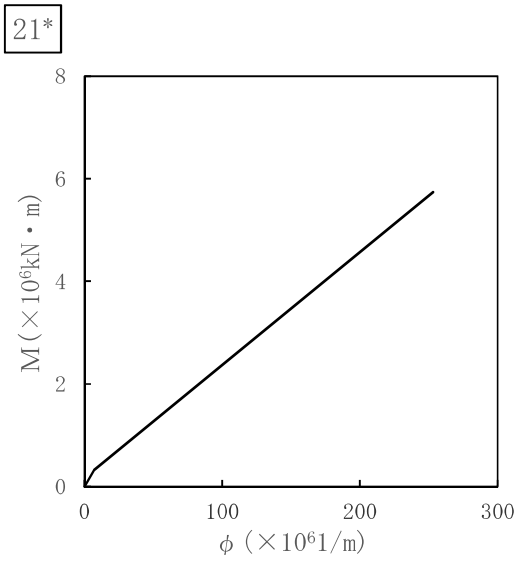
基本ケースの RPV ペDESTAL の各要素における曲げモーメントのスケルトン曲線の諸数値を表 3-4 及び表 3-5 に、スケルトン曲線を図 3-3 及び図 3-4 に示す。

表 3-4 曲げモーメントのスケルトン曲線 (NS 方向)

質点番号	要素番号	M_1 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_1 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)	M_2 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_2 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)
23	21	0.321	7.19	5.74	253
24	22	0.417	7.78	6.64	253
25	23	0.372	9.23	4.52	250
26	24	0.313	11.0	3.53	257
27	25	0.153	3.89	3.75	238
28	26	0.185	4.71	3.75	238
29	27	0.180	4.62	3.46	236
30	28	0.193	5.01	3.48	237

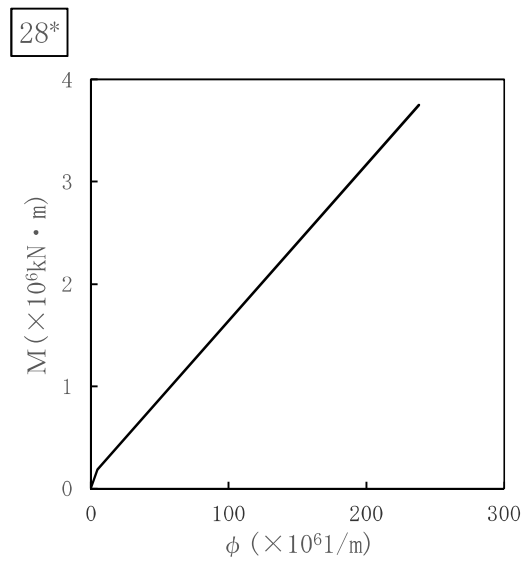
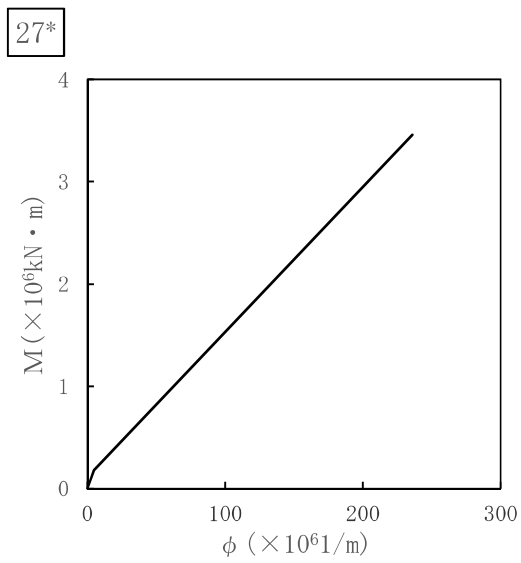
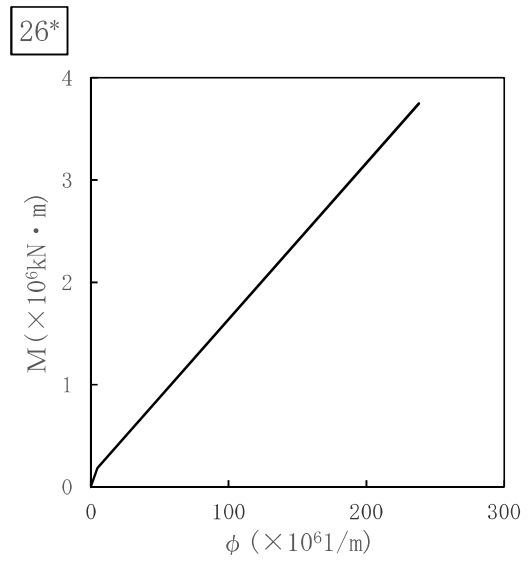
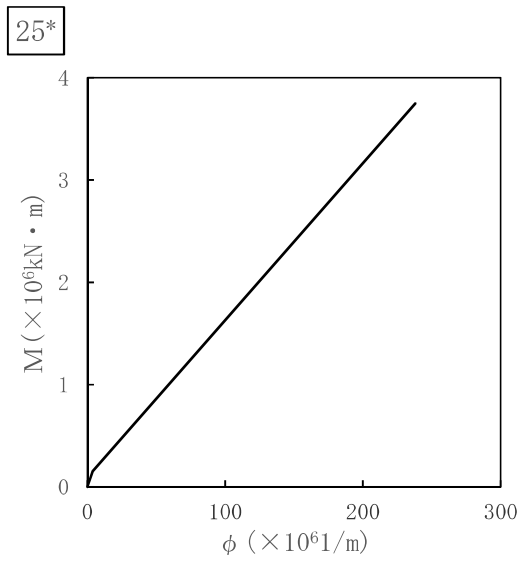
表 3-5 曲げモーメントのスケルトン曲線 (EW 方向)

質点番号	要素番号	M_1 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_1 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)	M_2 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_2 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)
23	21	0.323	7.19	5.82	253
24	22	0.417	7.78	6.64	253
25	23	0.373	9.23	4.55	251
26	24	0.313	11.0	3.53	257
27	25	0.153	3.89	3.75	238
28	26	0.143	4.71	2.74	238
29	27	0.180	4.62	3.46	236
30	28	0.193	5.01	3.48	237



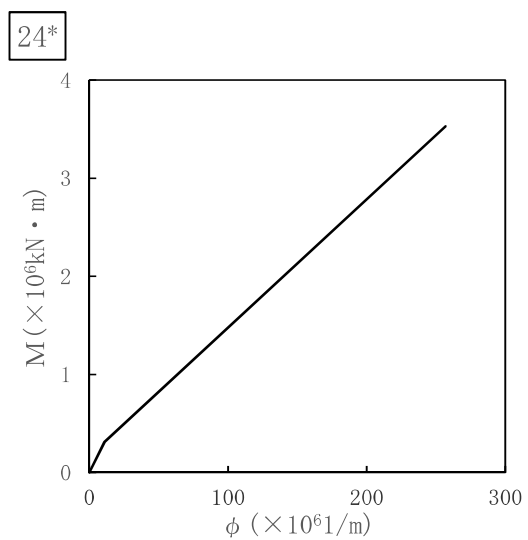
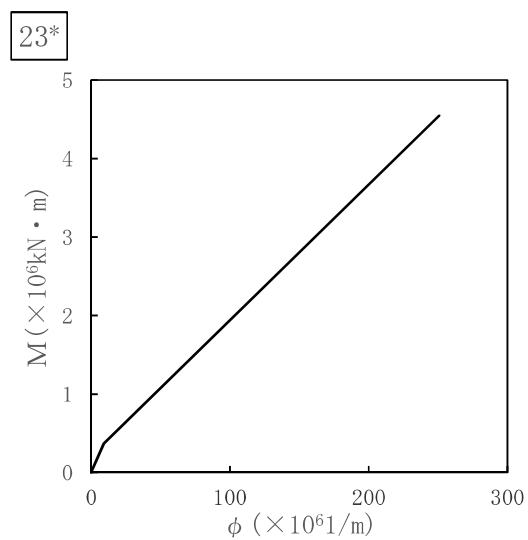
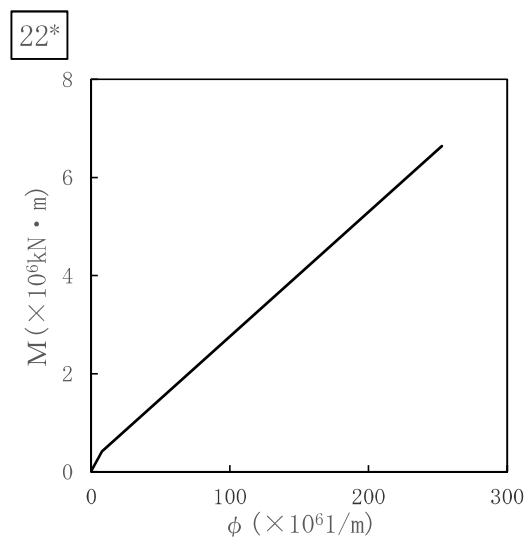
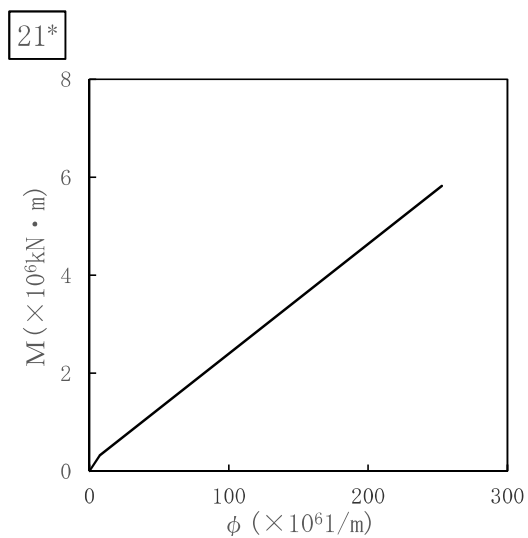
注記* : 各図上に記載の要素番号は表 3-8 に対応。

図 3-3 (1) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (NS 方向)



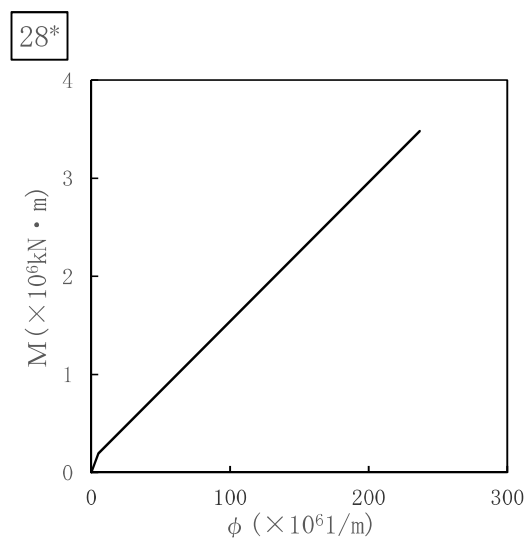
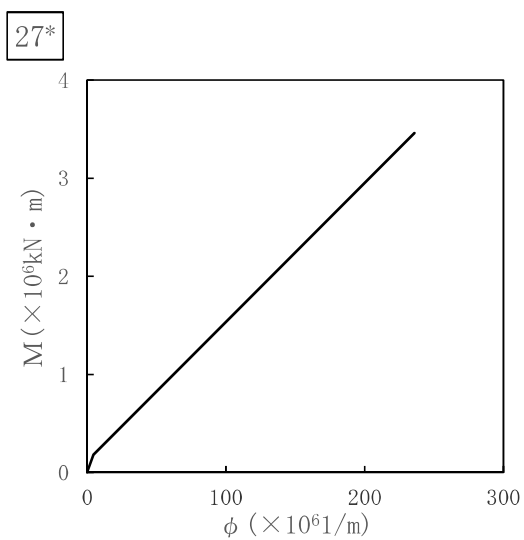
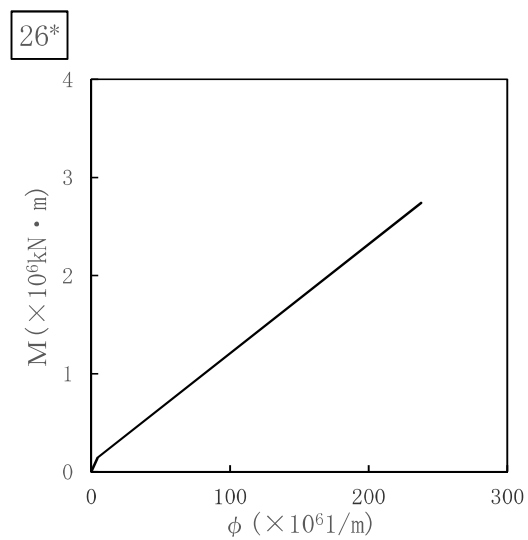
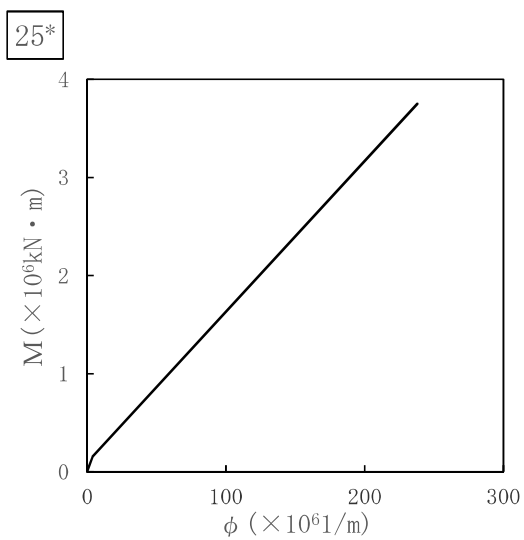
注記* : 各図上に記載の要素番号は表 3-8 に対応。

図 3-3 (2) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (NS 方向)



注記*：各図上に記載の要素番号は表 3-9 に対応。

図 3-4 (1) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (EW 方向)



注記*：各図上に記載の要素番号は表 3-9 に対応。

図 3-4 (2) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (EW 方向)

(2) ダイヤフラムフロアのばね定数

ダイヤフラムフロアのばね定数は、コンクリート強度に実強度を考慮したダイヤフラムフロアのモデルを用いて、基本ケースと同様に FEM 解析により算定する。

算定したばね定数を表 3-6 に示す。

表 3-6 ダイヤフラムフロアのコンクリート強度及びばね定数

	基本ケース	ケース 7
コンクリート強度	32.3N/mm ²	43.1N/mm ²
ばね定数		

3.3.2 手法特有の配慮（ケース8：曲線近似包絡）

RPV ペデスタルのスケルトン曲線の設定は折線近似を基本としているが、現実には上に凸な曲線になると考えられることから、各要素、各方向（NS、EW 方向）の曲げモーメントのスケルトン曲線について、曲線近似を包絡するように、基本ケースの折線近似のスケルトン曲線の第二勾配の領域を一律同じ値だけ嵩上げした曲線近似包絡のスケルトン曲線を考慮する（図3-1）。

なお、スケルトン曲線の曲線近似は、第1折点以降に対して第2折点の算出と同様の手法で曲げモーメントと曲率の関係を求め、プロットすることにより行う。

曲線近似包絡により設定したスケルトン曲線の諸数値を表3-2及び表3-3に、スケルトン曲線を図3-2及び図3-3に示す。

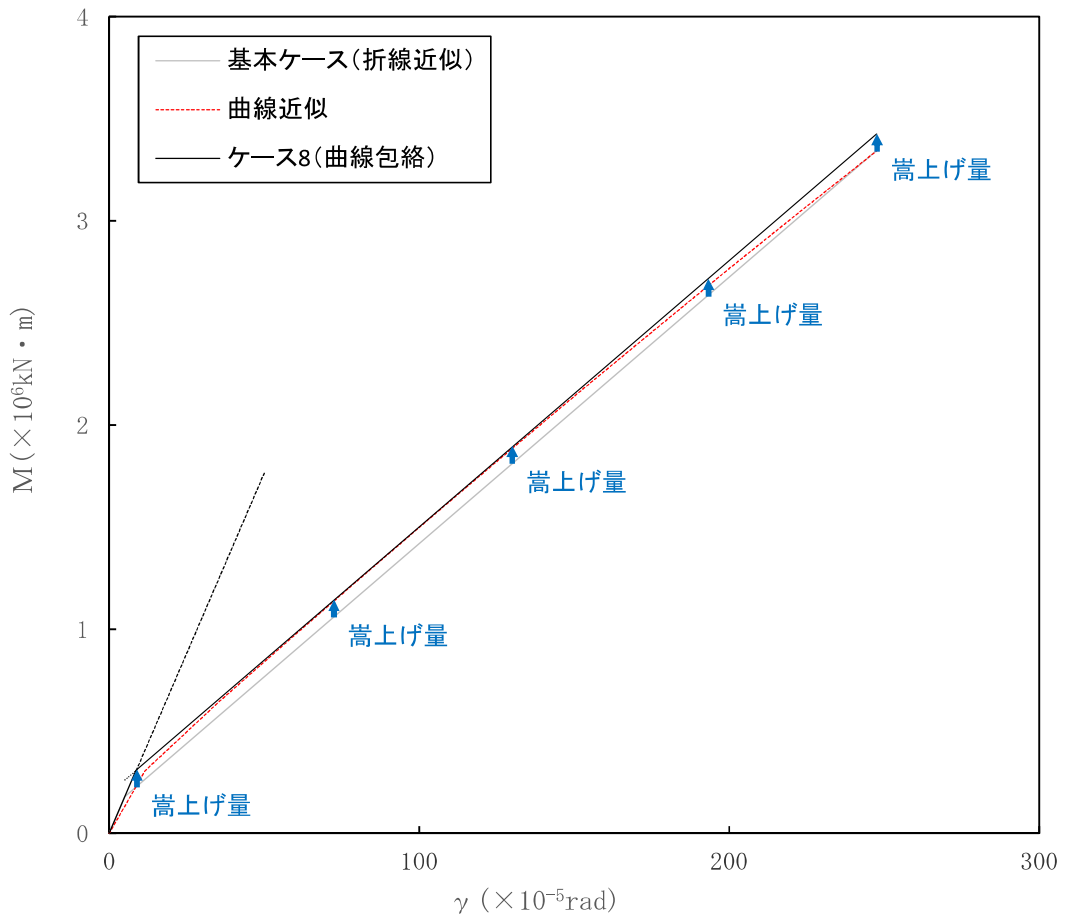


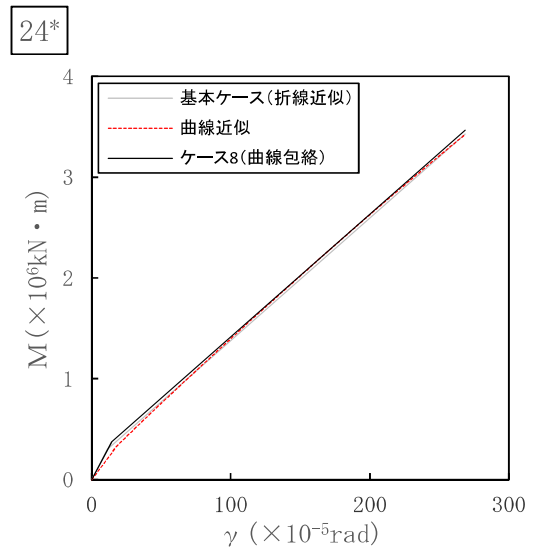
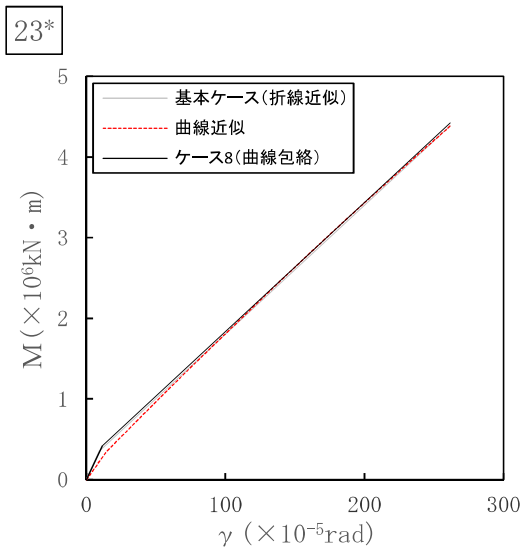
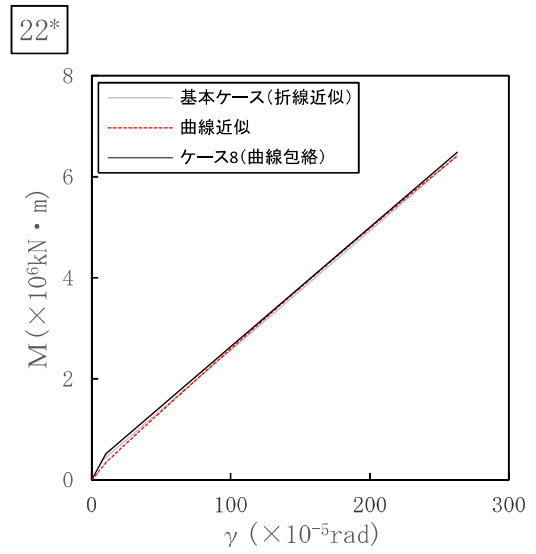
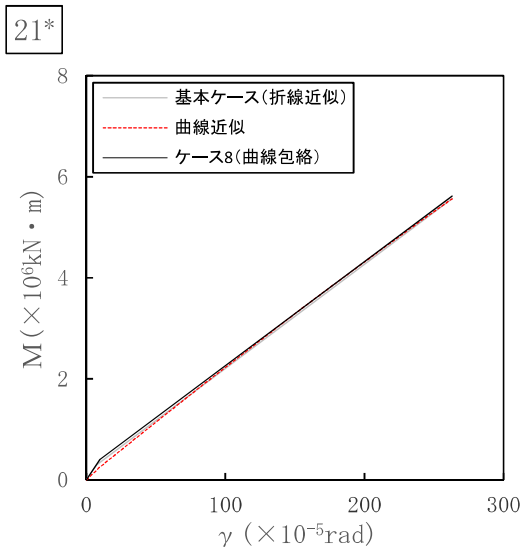
図3-1 曲線近似を包絡したスケルトン曲線 概要図

表 3-2 曲げモーメントのスケルトン曲線 (NS 方向)

質点番号	要素番号	M_1 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_1 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)	M_2 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_2 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)
23	21	0.405	9.90	5.62	263
24					
25	22	0.512	10.4	6.48	263
26	23	0.421	11.3	4.43	262
27	24	0.374	14.2	3.47	269
28	25	0.288	8.07	3.71	249
29	26	0.312	8.76	3.71	249
30	27	0.308	8.74	3.43	248
31	28	0.327	9.36	3.45	249

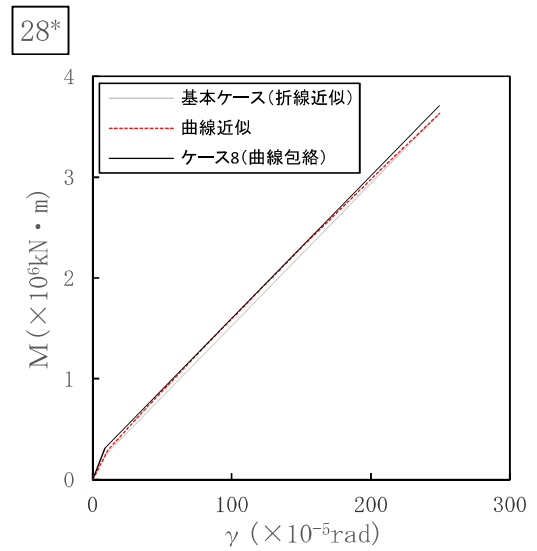
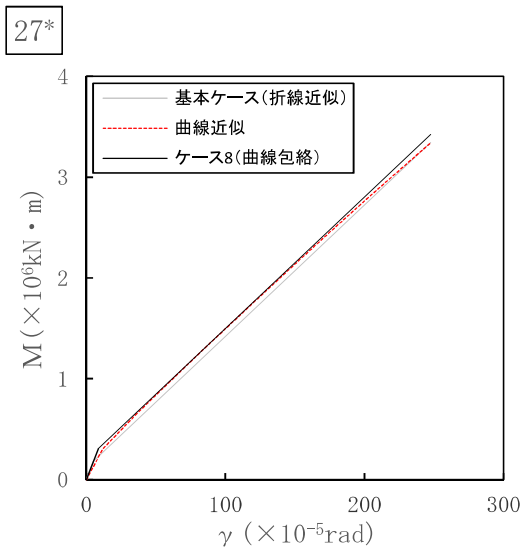
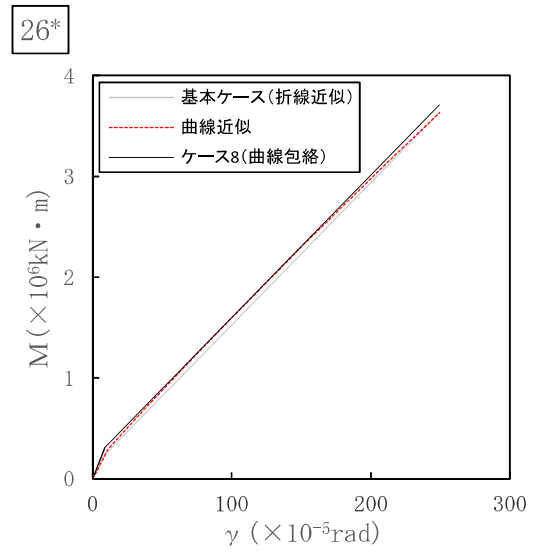
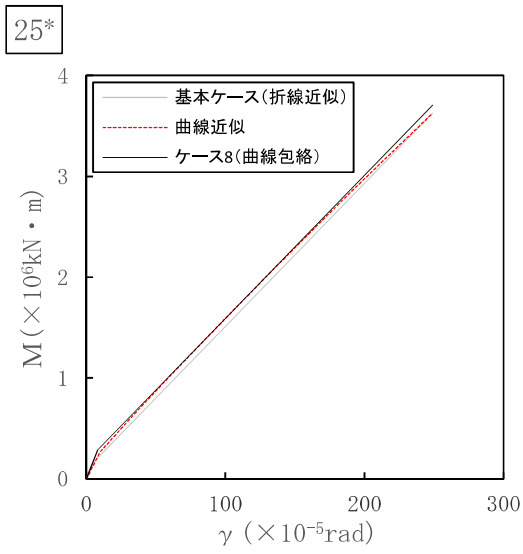
表 3-3 曲げモーメントのスケルトン曲線 (EW 方向)

質点番号	要素番号	M_1 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_1 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)	M_2 ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	ϕ_2 ($\times 10^{-6} 1/\text{m}$)
23	21	0.411	9.97	5.70	263
24					
25	22	0.512	10.4	6.48	263
26	23	0.423	11.4	4.46	262
27	24	0.374	14.2	3.47	269
28	25	0.288	8.06	3.71	249
29	26	0.270	9.84	2.74	249
30	27	0.308	8.74	3.43	248
31	28	0.327	9.36	3.45	249



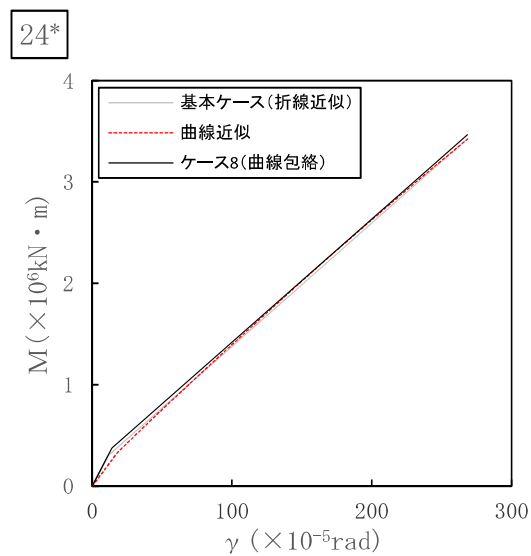
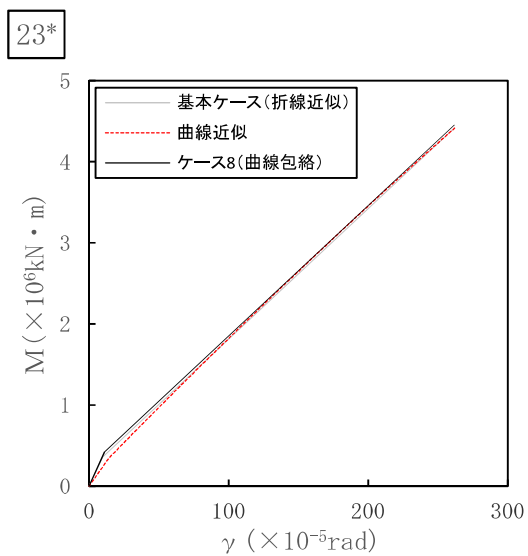
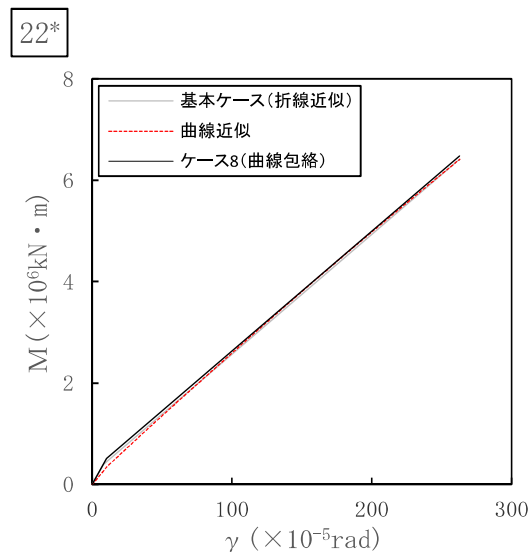
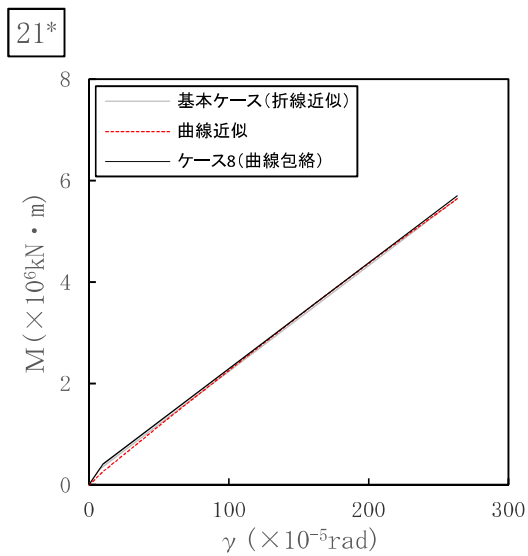
* : 各図上に記載の要素番号は表 3-2 に対応。

図 3-2 (1) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (NS 方向)



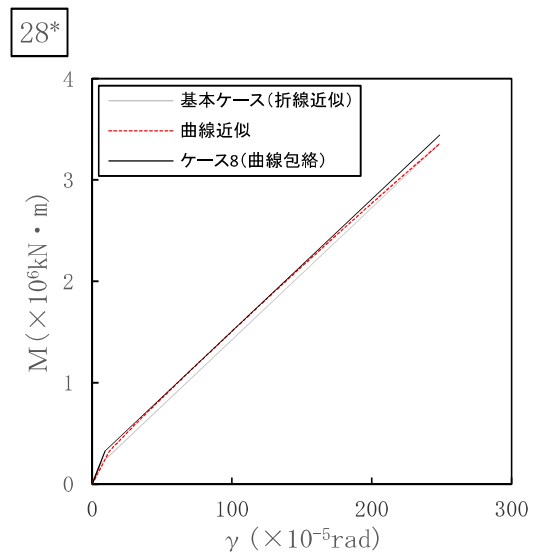
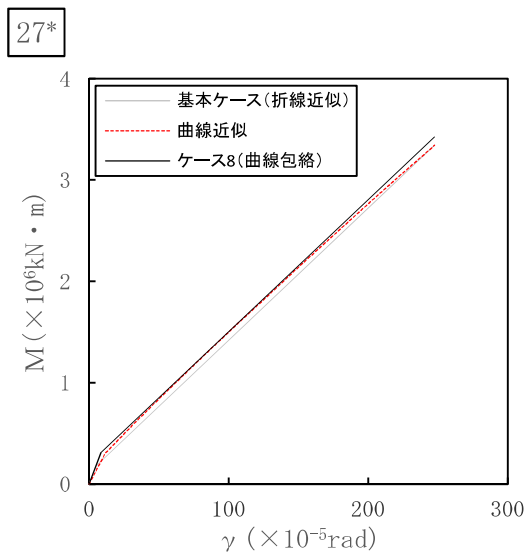
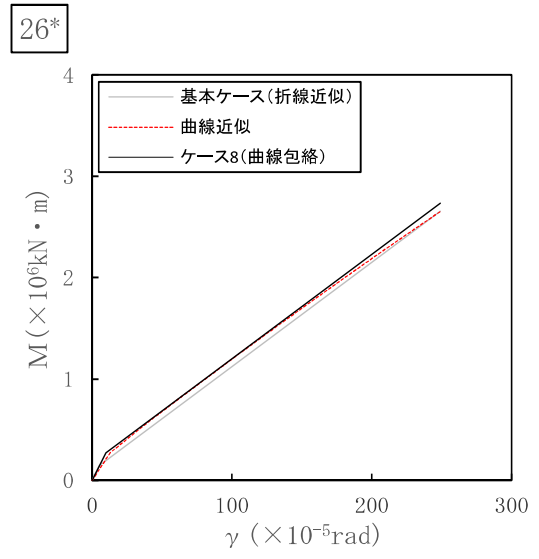
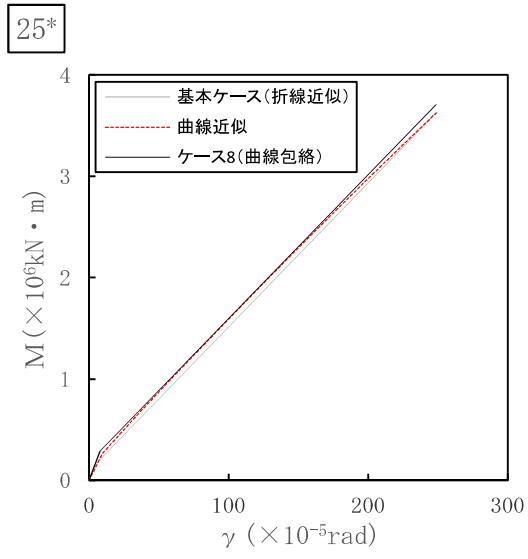
* : 各図上に記載の要素番号は表 3-2 に対応。

図 3-2 (2) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (NS 方向)



* : 各図上に記載の要素番号は表 3-3 に対応。

図 3-3 (1) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (EW 方向)



* : 各図上に記載の要素番号は表 3-3 に対応。

図 3-3 (2) 曲げモーメントのスケルトン曲線 (EW 方向)

4. 燃料取替用ベローズの耐震性について

4.1 概要

燃料取替用ベローズは地震時の要求機能はないが、大型機器系及び炉内構造物系の地震応答解析モデルでばねとして考慮していることから、モデル上期待できることを確認した。確認結果を本章に示す。

4.2 一般事項

4.2.1 構造概要

燃料取替用ベローズは、燃料取替時にバルクヘッド上部へ水張りを行なう際に、原子炉圧力容器と原子炉格納容器トップスラブの間を接続するためのステンレス製の構造物であり、運転時の原子炉圧力容器と原子炉格納容器との熱移動量を吸収できるよう蛇腹構造としている。

燃料取替用ベローズの概略図を図 4-1 に示す。

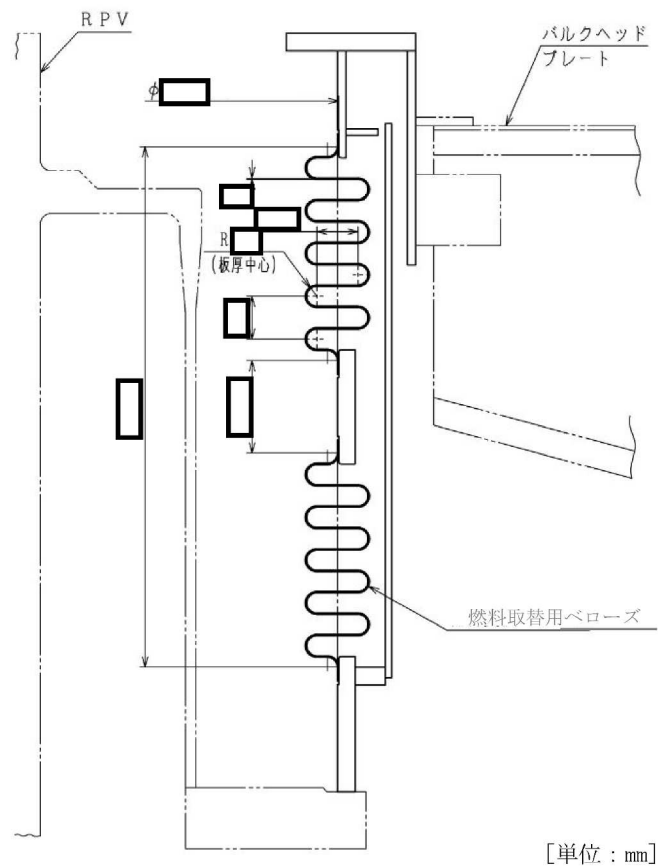


図 4-1 燃料取替用ベローズの概略図

4.2.2 評価方針

燃料取替用ベローズの健全性評価については、プラントの状態に応じベローズが変形する変位量及び繰返し回数に対して疲労評価を行うこととする。ここでいうプラントの状態とは、起動・停止時、燃料交換時、地震時である。

4.2.3 適用規格

燃料取替用ベローズの適用規格としては、設計時には告示501第43条8項を準用していたため、今回評価ではJ S M E 設計・建設規格^[1]「PVD-3410 伸縮継手の疲労評価」を準用する。

4.3 評価条件

燃料取替用ベローズの評価条件として、各状態の変位量と設計繰返し回数を表4-1に示す。本評価においては、設計時に想定していた各状態の条件(ケース1~3)に加え、今回工認における基準地震動 S_s に対する条件(ケース4)を考慮し、保守的な評価条件とした。

ケース4の地震時変位量は、基準地震動 S_s による基本ケース及び材料物性の不確かさ等を考慮した条件での、燃料取替用ベローズ両端に作用する相対変位量の最大値である。

表 4-1 燃料取替用ペロロースの評価条件

検討段階	ケース	状態	最高使用温度 (°C)	最高使用圧力 (kg/mm ²)	変位量 (mm)			角変位 θ (°)	設計繰返し回 数 (回)
					軸方向 Δx	軸直方向 Y1	半径方向 Y2		
設計時評価	1	起動・停止	302	0					
	2	燃料交換時	66	0.99					
	3	地震時*1	302	0					
今回評価	4	地震時*2	302	0					

*1：設計時は、地震時に想定する荷重の組合せを考慮した変位の最大値を設定。

*2：今回評価においては、基準地震動 S_s を用いた大型機器系地震応答解析 (V-2-2-4 原子炉本体の基礎の地震応答計算書) における、水平方向のばね反力より求めた変位量を軸直方向変位量、鉛直方向のペロロース設置位置近傍の質点での相対変位を軸方向変位量として用いる。

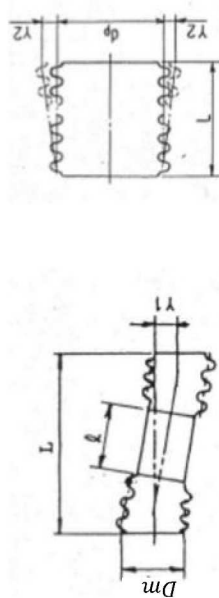


図 4-2 燃料取替用ペロロース変形図 (左：軸直方向、右：半径方向)

4.4 評価方法

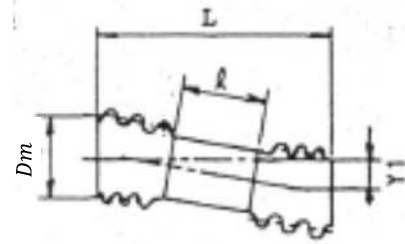
燃料取替用ベローズの耐震性評価においては、表 4-1 に示す各方向の変位量よりベローズ軸方向の変位量(全伸縮量)を算定し、算定した全伸縮量より求めた繰返しピーク応力強さに対する許容繰返し回数と設計繰返し回数より、疲労累積係数を算出する。

4.4.1 軸方向変位量の算定方法

(1) 軸直方向変位を軸方向変位に換算^[2]

$$L_1 = \frac{3 \cdot Dm \cdot Y1}{L + l\{(l/L) + 1\}}$$

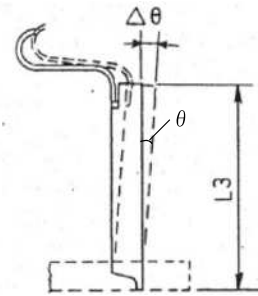
Dm : ベローズの平均径 (mm)
 $Y1$: 軸直角方向変位量 (mm)
 l : 中間パイプ長さ (mm)
 L : ベローズの長さ (mm)



(2) 角変位を半径方向変位に換算

$$\Delta\theta = L3 \cdot \theta \cdot \frac{\pi}{180}$$

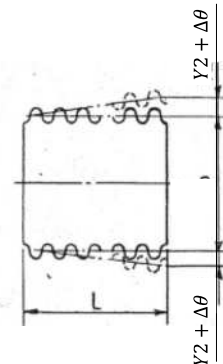
$L3$: 下端部管長 (mm)
 θ : 角変位 (°)
 $\Delta\theta$: 半径方向変位 (mm)



(3) 半径方向変位を軸方向変位に換算

$$\Delta L2 = \sqrt{L^2 + (Y2 + \Delta\theta)^2} - L$$

$Y2$: 半径方向変位量 (mm)
 $\Delta\theta$: (2) で求めた半径方向変位 (mm)
 $\Delta L2$: 軸方向変位量 (mm)



(4) 軸方向変位量の合計(全伸縮量)

$$\delta = 2\Delta L1 + 2\Delta L2 + 2\Delta x$$

$\Delta L1$: 軸直方向変位による軸方向変位量 (mm)
 $\Delta L2$: 半径方向変位による軸方向変位量 (mm)
 Δx : 軸方向変位量 (mm)
 δ : 全伸縮量 (mm)

4.4.2 疲労累積係数の算定方法（J S M E 設計・建設規格^[1]PVD-3410 より）

J S M E 設計・建設規格^[1]PVD-3410 より，下式（PVD-8.1）（PVD-8.2）にて算定した繰返し応力を繰返しピーク応力強さとし，付録材料図表 Part8 図 2 において，これに対応する許容繰返し回数が設計繰返し回数以上であることを確認する。本評価においては，考慮する 4 ケースについて設計繰返し回数と許容繰返し回数との比を求め，その和が 1 以下であることを確認する。

$$\sigma_p = \frac{\sigma}{2} \quad (\text{PVD-8.1})$$

$$\sigma = \frac{1.5Et\delta}{n\sqrt{bh^a}} + \frac{Ph^2}{2t^2c} \quad (\text{PVD-8.2})$$

- σ_p : 繰返し応力 (MPa)
- σ : (PVD-8.2) 式により計算した値 (MPa)
- E : 付録図表 Part6 に規定する材料の縦弾性係数 (MPa)
- t : 継手部の板の厚さ (mm)
- δ : 全伸縮量 (mm)
- n : 継手部の波数の 2 倍の値
- b : 継手部の波のピッチの 1/2 (mm)
- h : 継手部の波の高さ (mm)
- c : 継手部の層数 (-)
- P : PVD-3310 に定めるところによる。(最高使用圧力 (MPa))

4.4.3 機器諸元

本評価に用いる寸法等の諸元について表 4-2 に示す。

表 4-2 燃料取替用ベローズ諸元

項目	記号	単位	数値	備考
ベローズの縦弾性係数	E	MPa		ベローズの材料は である。一例として 302°C の値を示す。
ベローズの平均半径	Dm	mm		
中間長さ	l	Mm		
ベローズ長さ	L	Mm		
下端部管長	$L3$	Mm		
ベローズ板厚	t	mm		
山の個数	N	-		
山数の 2 倍の値	n	-		$N \times 2$
山のピッチ	p	mm		
山のピッチの 1/2	b	mm		$p/2$
山の高さ	h	mm		

4.5 評価結果

4.3 評価条件及び 4.4 評価方法に基づき、疲労評価を実施した。各ケースの設計繰返し回数と許容繰返し回数との比 (N_b/N_c) 及び各ケースの比の総和より求めた疲労累積係数を表 4-3 に示す。

評価結果より、燃料交換用ベローズの疲労累積係数が以下であることを確認した。

表 4-3 燃料取替用ベローズ疲労評価結果

検討段階		設計時評価			今回評価
ケース		1	2	3	4
状態		起動・停止	燃料交換時	地震時	地震時
設計繰返し回数(回)	N_b				
許容繰返し回数(回)	N_c				
N_b/N_c					
疲労累積係数		0.430			
評価基準値		≤ 1			
判定		○			

参考文献

- [1] : 財団法人 機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005年版) <第 I 編軽水炉規格> JSME S NC1-2005」及び 2007 年補正版 (本資料では「J S M E 設計・建設規格」と称す)
- [2] : The M.W.Kellogg Co. 「Design of Piping System」

5. 地震応答解析及び静的解析における最大応答加速度と最大応答変位の関係について

地震応答計算書中の応答分布図における，地震応答解析及び静的解析の結果に関して，最大応答加速度では概ね同等の傾向であるが，最大応答変位では静的解析結果が比較的小さい傾向を示している（図5-1参照）。

本章では，応答分布図に記載する地震応答解析及び静的解析の最大応答加速度と最大応答変位について説明するとともに，この関係が表れる理由について説明する。

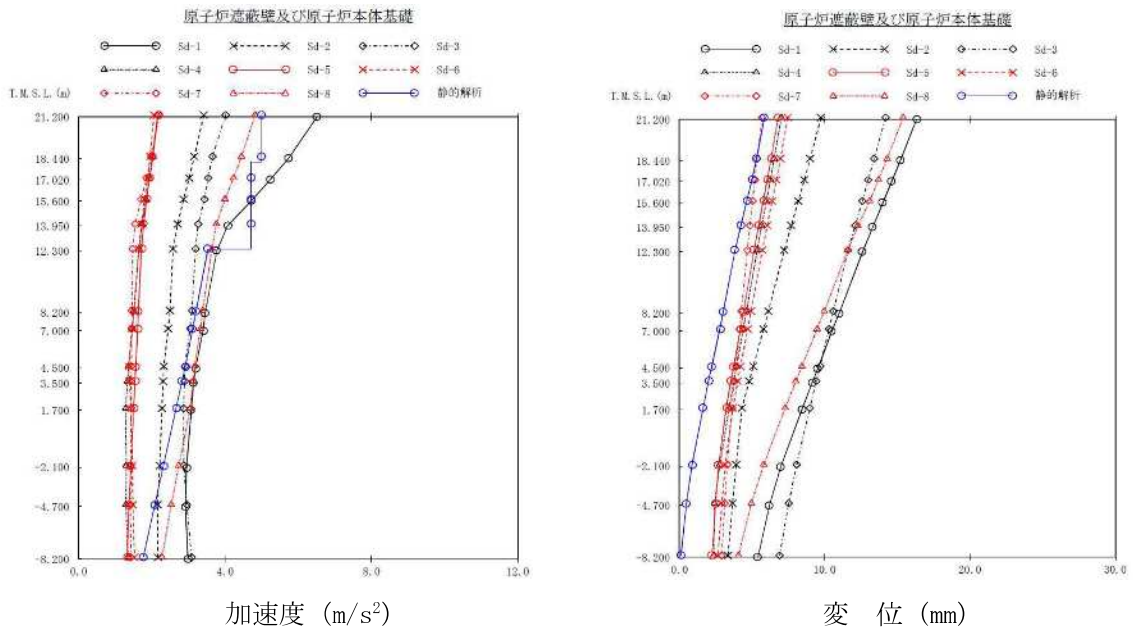


図5-1 地震応答解析及び静的解析における最大応答加速度と最大応答変位の関係
(大型機器系，原子炉遮蔽壁及び原子炉本体基礎の例)

地震応答解析では最大応答変位について基礎下端の変位も算定されているのに対して，静的解析では基礎下端固定としている。この差により，静的解析の最大応答加速度に対し，最大応答変位が地震応答解析と比較して小さな値となると考えられる。