

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会  
耐震・構造設計小委員会  
第31回構造WG資料  
構造 W31-4-2 より抜粋

資料第2号  
〔健全委第21-2号〕  
より抜粋

# 原子炉本体基礎（RPVペDESTAL） 復元力特性について

平成21年6月10日

東京電力株式会社

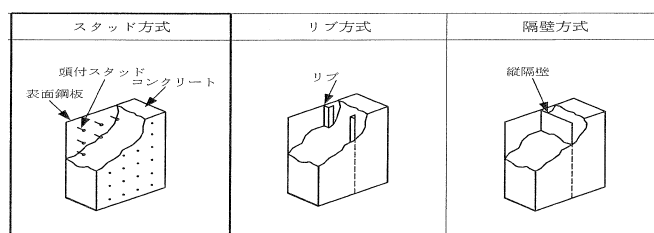
## 1. 原子炉本体基礎に復元力特性を設定する背景

柏崎刈羽原子力発電所各号機の原子炉本体基礎（以下、RPV ペデスタルという）は、いずれも鋼板円筒殻の内部にコンクリートを充填した構造となっている。現行の耐震設計では、RPV ペデスタルは線形仮定をおいて地震応答解析を実施している。

しかしながら、地震による建屋の変形が大きく、その弾塑性特性に応じて剛性が低下した場合には、建屋と並列ばねを形成する RPV ペデスタルが、解析上、大きな力を負担することになる。そこで、既往の試験結果を参考にして、RPV ペデスタルの地震時の挙動を実態に合わせる弾塑性モデル化手法を検討した。

## 2. 原子炉本体基礎（RPV ペデスタル）の構造

RPV ペデスタルは内外にある2枚の円筒鋼板（内筒，外筒）から構成されている。これらの鋼板は縦リブ鋼板（隔壁）により一体化され、鋼板間にコンクリートを充填した構造物であり、隔壁方式の鋼板コンクリート構造物（以下、SC 構造という）である。壁内には垂直管（ベント管）が10本内蔵されている（次頁の概要図参照）。



【参考】SC 構造物の方式イメージ図

（出典：「鋼板コンクリート構造耐震設計技術指針 建物・構築物編 JEAG4618-2005」 以下、SC 指針という）

地震時には、ダイアフラムフロアを介して、RPV ペデスタル頂部に原子炉建屋からせん断力が伝達される。

原子炉本体（RPV）のスカート状の支持脚が、RPV ペデスタルのブラケットに設置され、120本の基礎ボルトによって固定されており、地震時にRPVからRPV ペデスタルにせん断力・モーメントが伝達される。

RPV ペデスタル基部は、リングガーダを介してアンカーボルト（内筒側160本，外筒側320本）により原子炉格納容器底部に定着されており、RPV ペデスタルに付加された荷重は、この基部に伝達される。

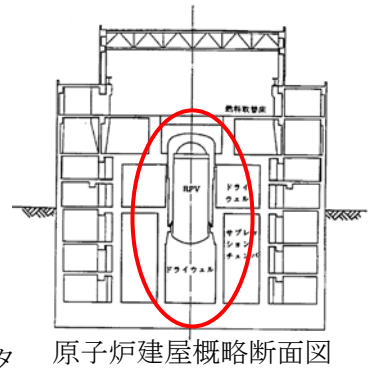
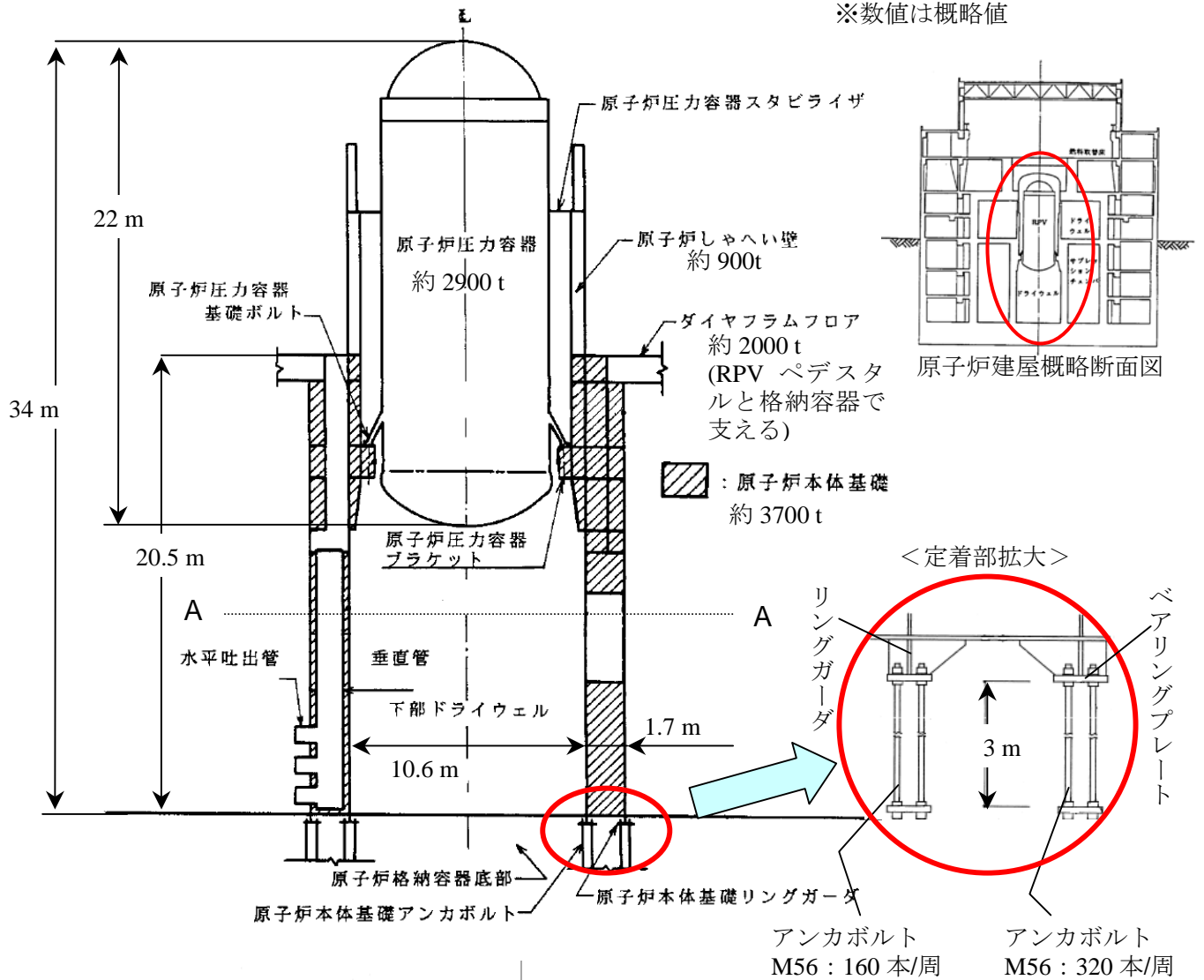
RPV ペデスタルを構成している主要な鋼板には、ボイラーなどに用いられる高張力鋼（SPV490）が用いられている。

表 RPV ペデスタルの鋼板に用いられる材料

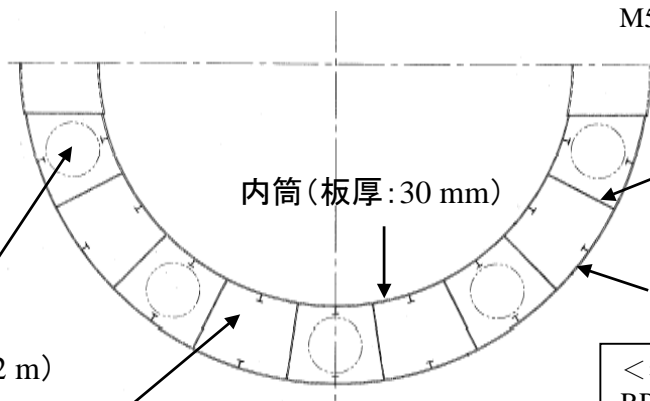
	材料	降伏点又は耐力	引張強さ
RPV ペデスタル構造材	SPV490	490 MPa	610～740 MPa
(参考)	SM490	355 MPa	490～610 MPa

構造材：内筒，外筒，隔壁

※数値は概略値



<定着部拡大>



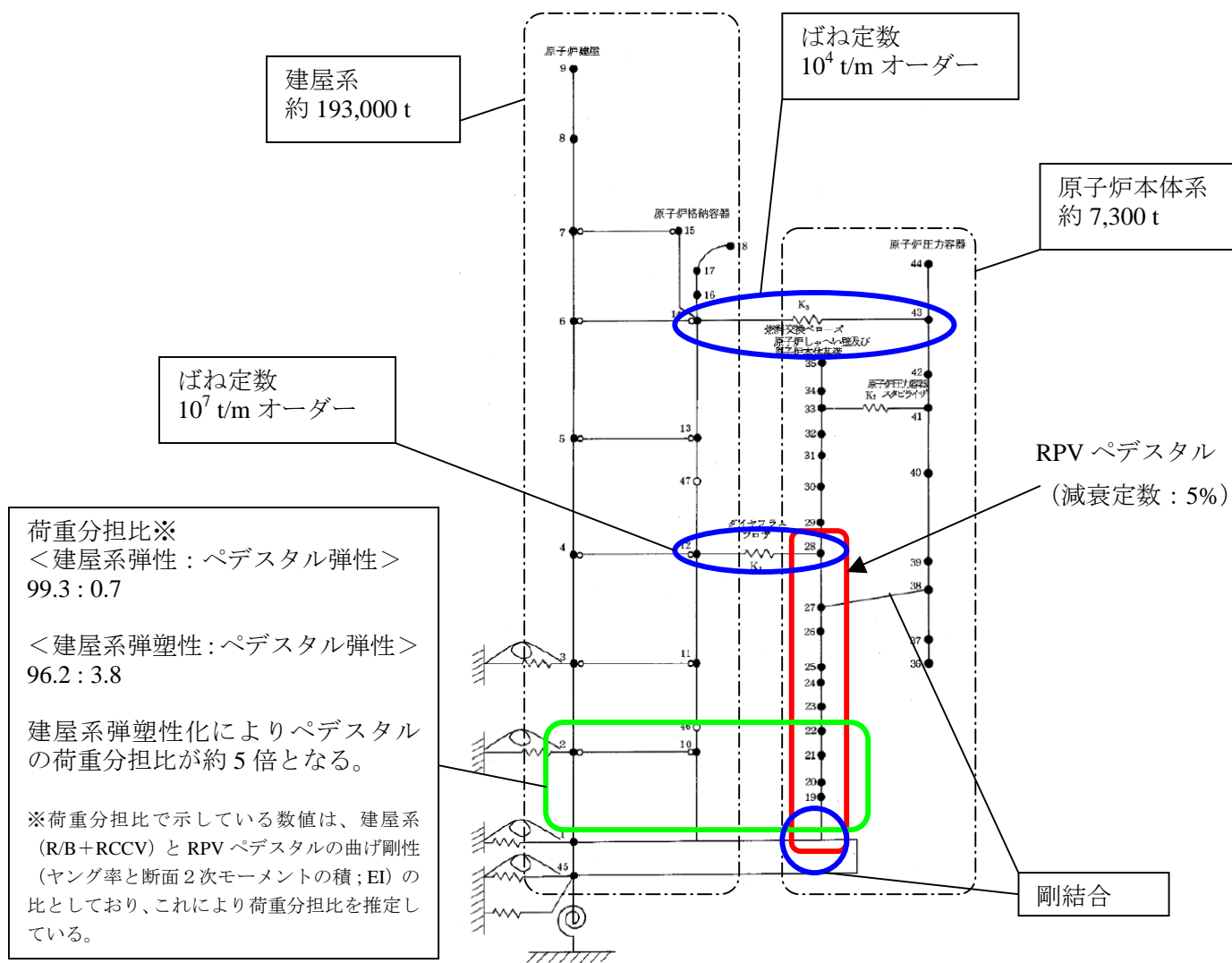
<参考>  
 RPV ペDESTAL の  $T/t =$  約 57~38  
 SC 指針の適用範囲は  
 $30 \leq T/t \leq 200$   
 $3.2 \text{ mm} \leq t \leq 40 \text{ mm}$

RPV ペDESTAL 概要図

### 3. 地震応答解析モデル

RPV ペDESTALは、RPV と同様に、多質点でモデル化する。断面形状の違いを考慮して分割し、質点間を等価な曲げ、せん断剛性を有する無質量のはり又は無質量のばねで結合する。

2. で述べた構造を踏まえ、ダイアフラムフロアの剛性と等価なばねにより原子炉格納容器と結合し、RPV と RPV ペDESTALは、RPV 設置位置で剛に結合して相互影響を考慮している。また、RPV ペDESTALは原子炉建屋基礎版と剛に結合されている。なお、RPV ペDESTALは、減衰定数を5%としている。



RPV ペDESTAL部の地震応答解析モデル (NS 方向の例)

#### 4. RPV ペデスタル復元力特性

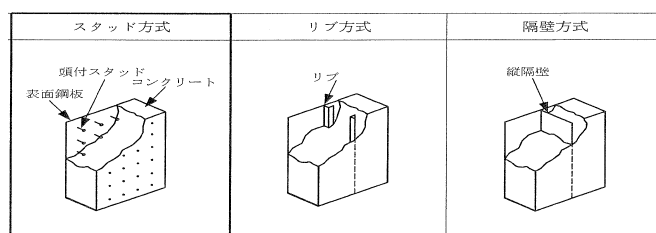
##### <基本方針>

- ・ 鋼板が降伏する第2折点までを設定範囲とした。
- ・ SC 指針の復元力特性の評価を参考に、RPV ペデスタルの特徴を踏まえて、復元力特性を評価した。
- ・ 既往の RPV ペデスタル復元力特性取得試験結果を参照し、上記の復元力特性評価の考え方が適切であることを確認した。

##### (1) SC 指針の復元力特性の評価

SC 構造物に関する既往の復元力特性の評価手法として、SC 指針を参考にした。

SC 指針で述べられている復元力特性評価式はスタッド方式を対象としたものであるが、RPV ペデスタルは隔壁方式の構造物であるため、SC 指針の評価式に RPV ペデスタルの構造上の特徴を考慮して、RPV ペデスタルの復元力特性を評価した。



【2. の再掲】 SC 構造物の方式イメージ図 (SC 指針抜粋)

## (2) せん断変形 (せん断力 $Q$ - せん断ひずみ度 $\gamma$ )

### a. 第1折点

コンクリートのせん断ひび割れにより剛性が変化する点

$Q_1$  : (コンクリートの断面積 + 鋼板の等価断面積)  $\times$  コンクリートのせん断ひび割れ強度

$\gamma_1$  : コンクリートのせん断ひび割れ強度 / コンクリートのせん断弾性係数

(違いを考慮したポイント)

RPV ペDESTALの壁には、直管が埋め込まれているなど、断面に開口欠損があるため、開口欠損の形状に応じてコンクリートせん断ひび割れ強度を減じて第1折点の  $Q_1$  および  $\gamma_1$  を評価した (基本となる評価式は、【参考】SC 指針における復元力特性評価式 参照)。

### b. 第2折点

鋼板の降伏により剛性が変化する点

$Q_2$  : 鋼板降伏時せん断力。鋼板負担分のせん断力とコンクリート負担分のせん断力の累加による。なお、コンクリート負担分のせん断力は、ひび割れ後のコンクリートの有効せん断剛性を考慮

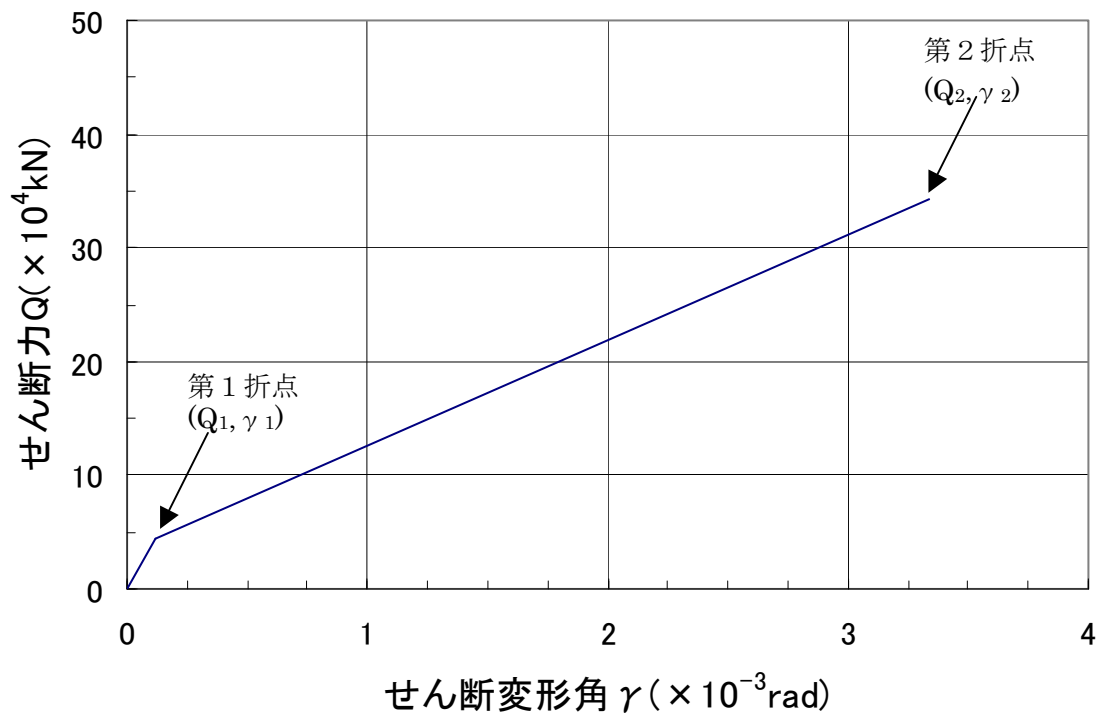
$\gamma_2$  :  $Q_2 /$  (鋼板のせん断剛性 + ひび割れ後のコンクリートの有効せん断剛性)

(違いを考慮したポイント)

RPV ペDESTALは、二重円筒の空隙を、たてリブで一定の間隔に区切った、隔壁構造である。この構造を考慮してひび割れ後のコンクリートの有効せん断剛性を既往の文献\*に基づき設定。

\*: 松尾 他: 鋼板コンクリート耐震壁に関する研究 その3. せん断荷重-変形関係の解析, 日本建築学会学術講演梗概集 (1992年)

次頁に、6号機のRPVペDESTALに設定したせん断変形スケルトンカーブを示す。



6号機 RPV ペデスタル脚部 せん断変形スケルトンカーブ

(3) 曲げ変形 (モーメント  $M$ —曲率  $\phi$ )

a. 第1折点

コンクリートの曲げひび割れにより剛性が変化する点

$M_1$ : 鋼板を考慮した断面係数  $\times$  コンクリートの曲げ引張強度

$\phi_1$ :  $M_1 /$  (コンクリートのヤング係数 $\times$ 鋼板を考慮した断面2次モーメント)

b. 第2折点

鋼板の降伏により剛性が変化する点

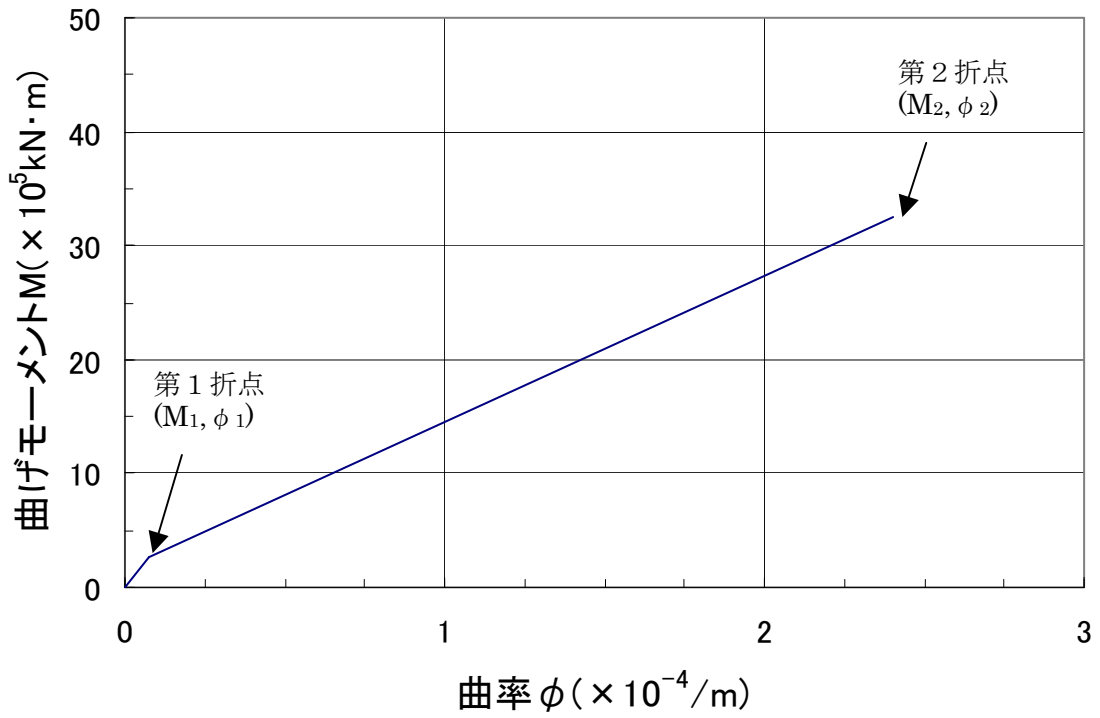
$M_2$ : 引張鋼板降伏時モーメント

$\phi_2$ : 引張鋼板降伏時曲率

(違いを考慮したポイント; 第1, 第2折点共通)

ベースプレートによりコンクリートが分断されているため、RPV ペデスタル脚部ではコンクリートの曲げ引張強度を無視する(基本となる評価式は、【参考】SC 指針における復元力特性評価式 参照)。

次頁に、6号機のRPVペデスタルに設定した曲げ変形スケルトンカーブを示す。



6号機 RPV ペDESTAL脚部 曲げ変形スケルトンカーブ

【参考】SC 指針における復元力特性評価式

<せん断変形>

(第1折点) コンクリートのせん断ひびわれにより剛性が変化する点

$$Q_1 = (A_c + (G_s/G_c) \cdot A_s) \cdot \tau_\sigma \quad \dots\dots\dots (2.2.1)$$

$$\gamma_1 = \tau_\sigma / G_c \quad \dots\dots\dots (2.2.2)$$

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

(第2折点) 鋼板の降伏により剛性が変化する点

$$Q_2 = (K_\alpha + K_\beta) / \sqrt{(3K_\alpha^2 + K_\beta^2)} \cdot A_s \cdot \sigma_y \quad \dots\dots\dots (2.2.3)$$

$$\gamma_2 = Q_2 / (K_\alpha + K_\beta) \quad \dots\dots\dots (2.2.4)$$

ただし,  $K_\alpha = A_s \cdot G_s$

$$K_\beta = 1 / \{4 / (A_c \cdot E_c') + 2 \cdot (1 - \nu_s) / (A_s \cdot E_s)\}$$

- $A_s$  : 鋼板のせん断断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $A_c$  : コンクリートのせん断断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $G_s$  : 鋼板のせん断弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $G_c$  : コンクリートのせん断弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_s$  : 鋼板のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_c'$  : コンクリートのひびわれを考慮したヤング係数で, コンクリートのヤング係数に0.7を乗じた値を用いてもよい (N/mm<sup>2</sup>)
- $\nu_s$  : 鋼板のポアソン比
- $\sigma_y$  : 鋼板を考慮した鉛直方向軸応力度 (圧縮を正, N/mm<sup>2</sup>)
- $K_\alpha$  : 鋼板のせん断剛性
- $K_\beta$  : ひびわ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

- $\sigma_y$  : 鋼板の降伏点強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度で設計基準強度  $F_c$  を用いてよい (N/mm<sup>2</sup>)
- $\nu_1$  : コンクリート圧縮強度の有効係数で,  $0.7 - \sigma_B / 200$  を用いてよい

< 曲げ変形 >

(第1折点) コンクリートの曲げひびわれにより剛性が変化する点

$$M_1 = Z_e \cdot (f_i + \sigma_v) \dots\dots\dots (2.2.7)$$

$$\phi_1 = M_1 / (E_c \cdot I_e) \dots\dots\dots (2.2.8)$$

$$\text{ただし, } f_i = 0.38 \cdot \sqrt{\sigma_B}$$

(第2折点) 鋼板の降伏により剛性が変化する点

$$M_2 = M_y \dots\dots\dots (2.2.9)$$

$$\phi_2 = \phi_y \dots\dots\dots (2.2.10)$$

$I_e$  : 鋼板を考慮した断面2次モーメント (mm<sup>4</sup>)

$Z_e$  : 鋼板を考慮した断面係数 (mm<sup>3</sup>)

$f_i$  : コンクリートの曲げ引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_v$  : 鋼板を考慮した鉛直方向軸応力度 (圧縮を正, N/mm<sup>2</sup>)

$E_c$  : コンクリートのヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度で, 設計基準強度  $F_c$  を用いてよい (N/mm<sup>2</sup>)

$M_y$  : 鋼板降伏時モーメント (N・mm)

$\phi_y$  : 鋼板降伏時曲率 (1/mm)

以上は、SC 指針より抜粋

#### (4) 試験結果との比較

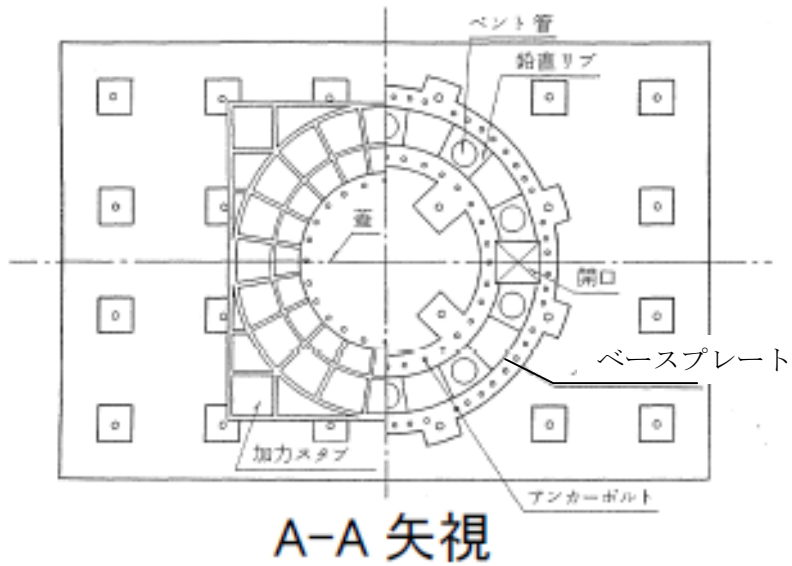
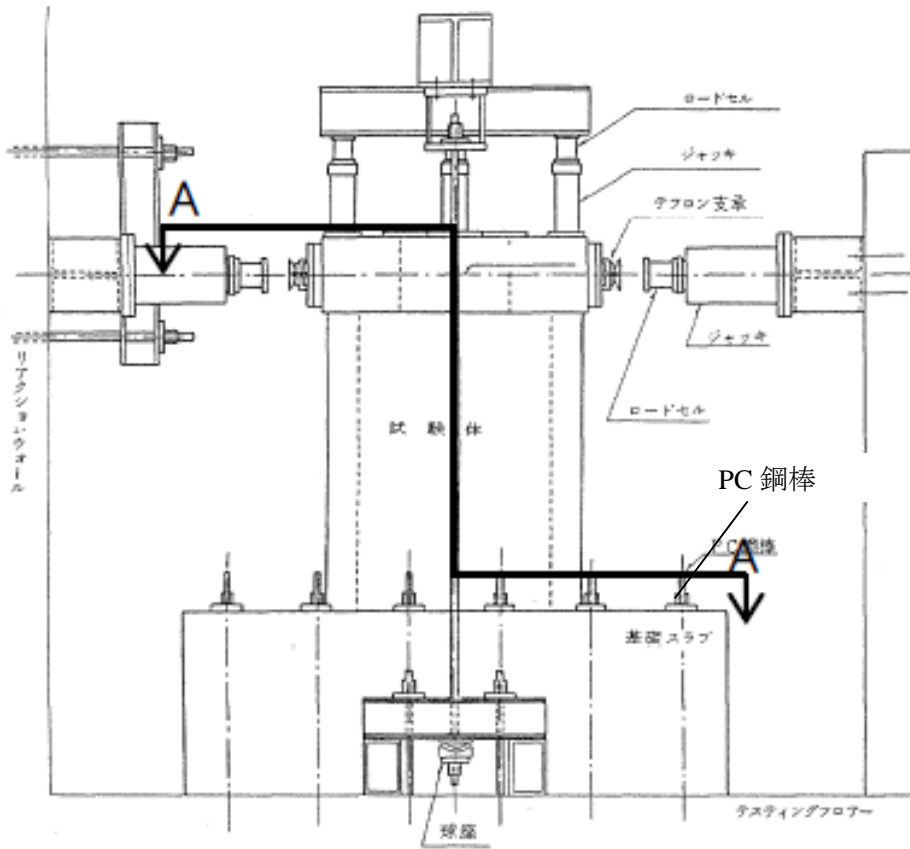
##### a. RPV ペDESTALの静加力試験について

改良型沸騰水型原子炉（以下、ABWR という）の RPV ペDESTALは、ベント管が埋め込まれているという構造上の特徴を有している。ABWR の開発にあたり、この特殊な構造をもった RPV ペDESTALの荷重－変位特性を把握するために、1 / 10 縮小試験体を用いて静加力試験を行い、荷重－変形特性を取得した。

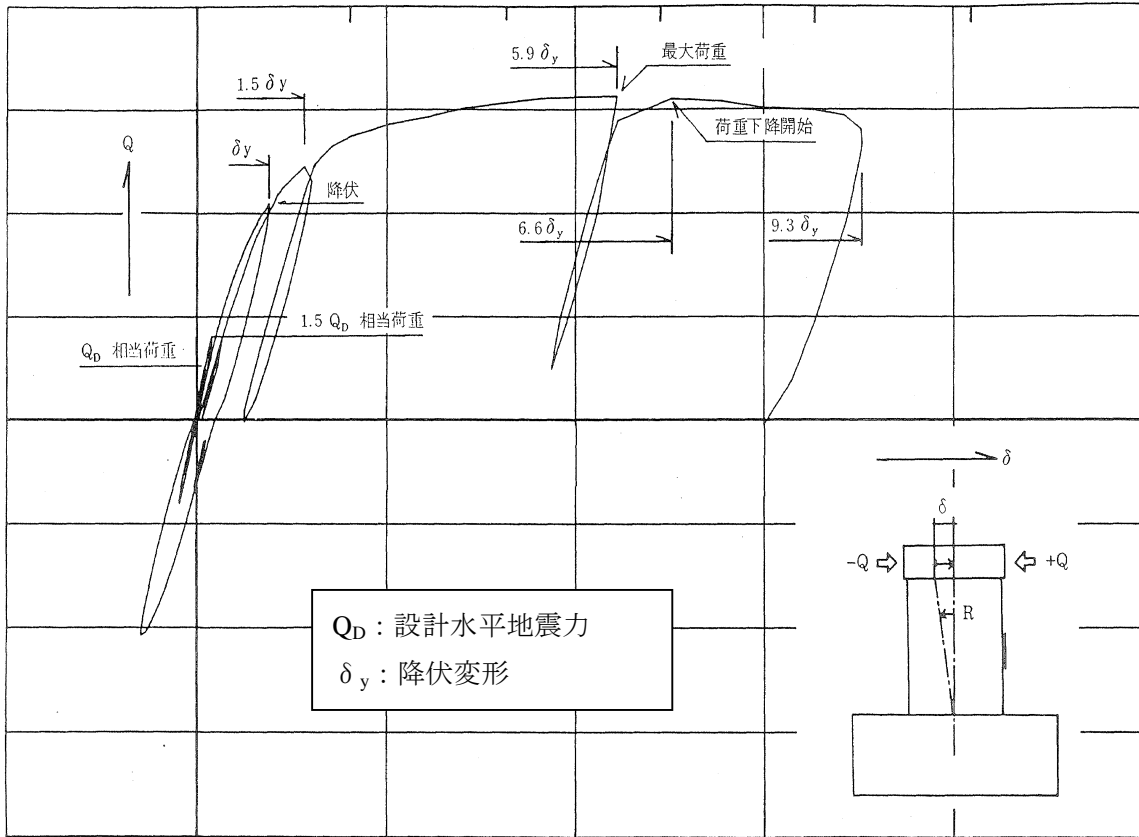
試験体は、PC 鋼棒を介してベースプレートにプレストレス力を作用させており、測定データがベースプレートの変形の影響を受けないようにしている。

試験体頂部に水平力を加え、基礎スラブを不動点として全体変形  $\delta$  ( $= \delta_s$  (せん断変形) +  $\delta_M$  (曲げ変形)) と  $\delta_M$  を測定している。

加力レベルは、弾性範囲、設計荷重、設計荷重の 1.5 倍、鋼板降伏レベルを経て、鋼板が座屈するレベルまで加力した。(得られた加力変位特性は次々頁参照)



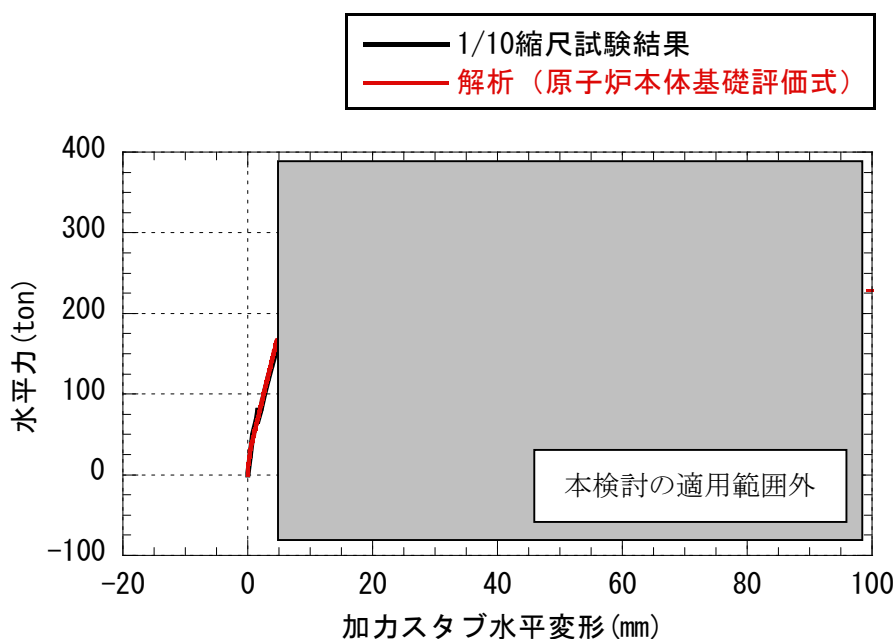
原子炉本体基礎の 1/10 縮尺試験体と加力装置の概要



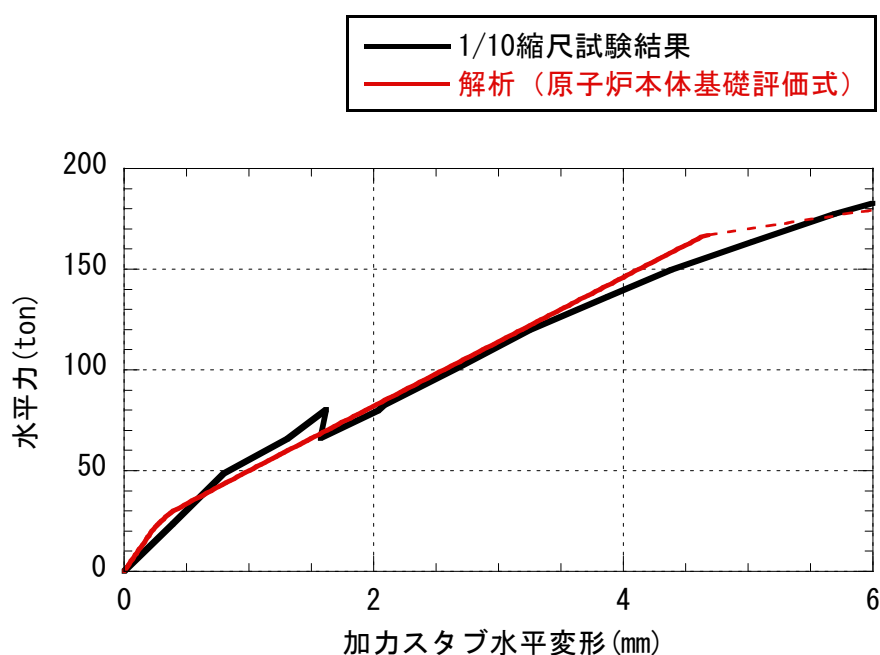
原子炉本体基礎 1/10 縮尺試験体で得られた復元力特性図

b. 試験結果との対比

6号機で検討した復元力特性評価の考え方をを用いて、1/10試験体のスケルトンカーブを設定し、試験で得られた荷重-変位特性と比較した結果、よい一致を見た。



(a) 試験結果全体とスケルトンカーブの比較

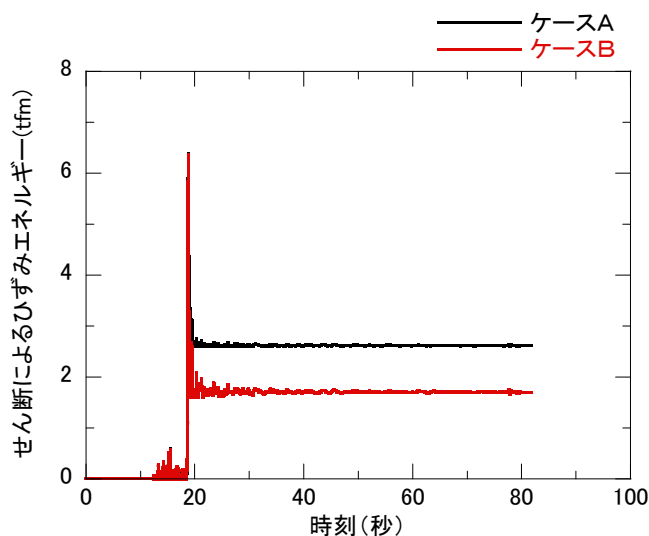
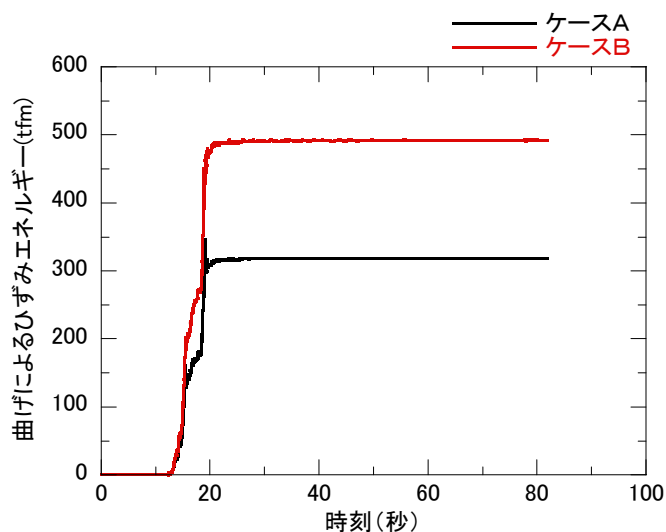


(b) スケルトンカーブ適用範囲近傍の拡大図

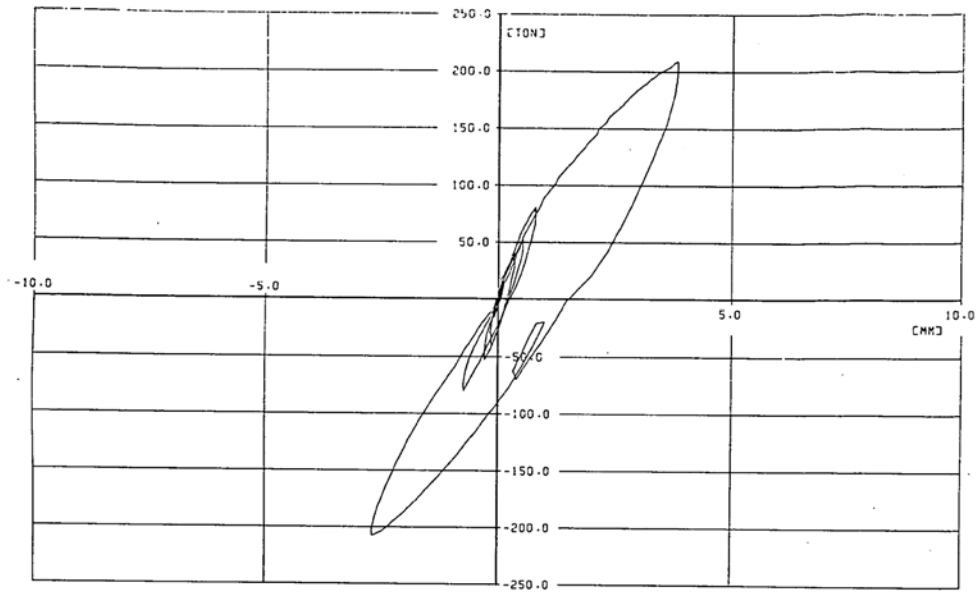
### c. 履歴特性の検証

試験で得られた曲げ変形の履歴特性は、ディグレイディングトリリニアモデルに近い紡錘型の安定したループ形状が得られている。

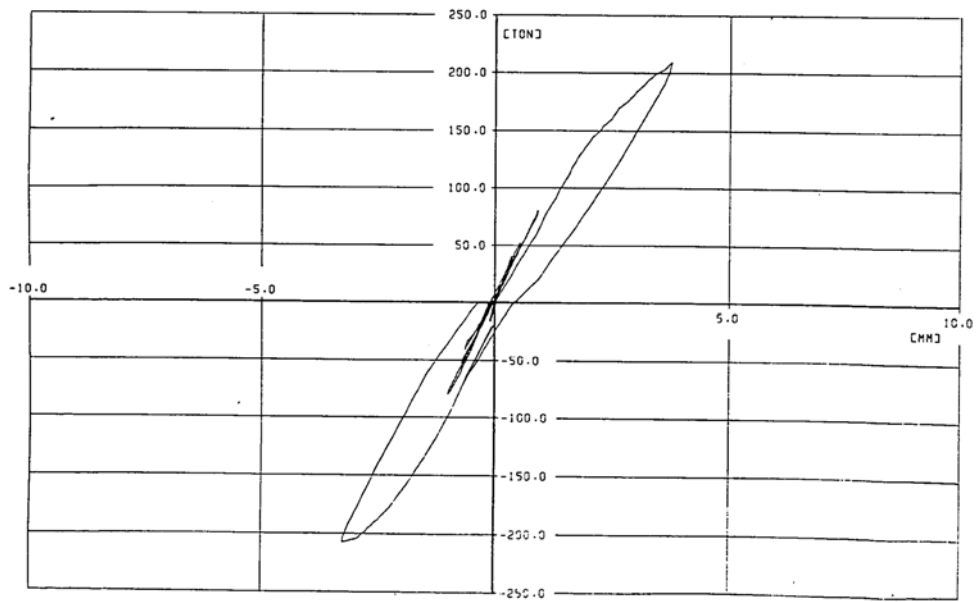
SC 指針で定められている曲げ・せん断変形特性ともに最大点指向型を採用するケース（ケース A）と、試験結果を踏まえ、曲げ変形特性にディグレイディングトリリニア、せん断変形特性に原点指向型を採用したケース（ケース B）とで、パラメータスタディを行った結果、RPV ペDESTALの弾塑性応答解析には、消費エネルギーが小さい最大点指向型を採用することとした。



履歴特性のパラメータスタディによるひずみエネルギー比較



(a) 水平力-曲げ変形関係



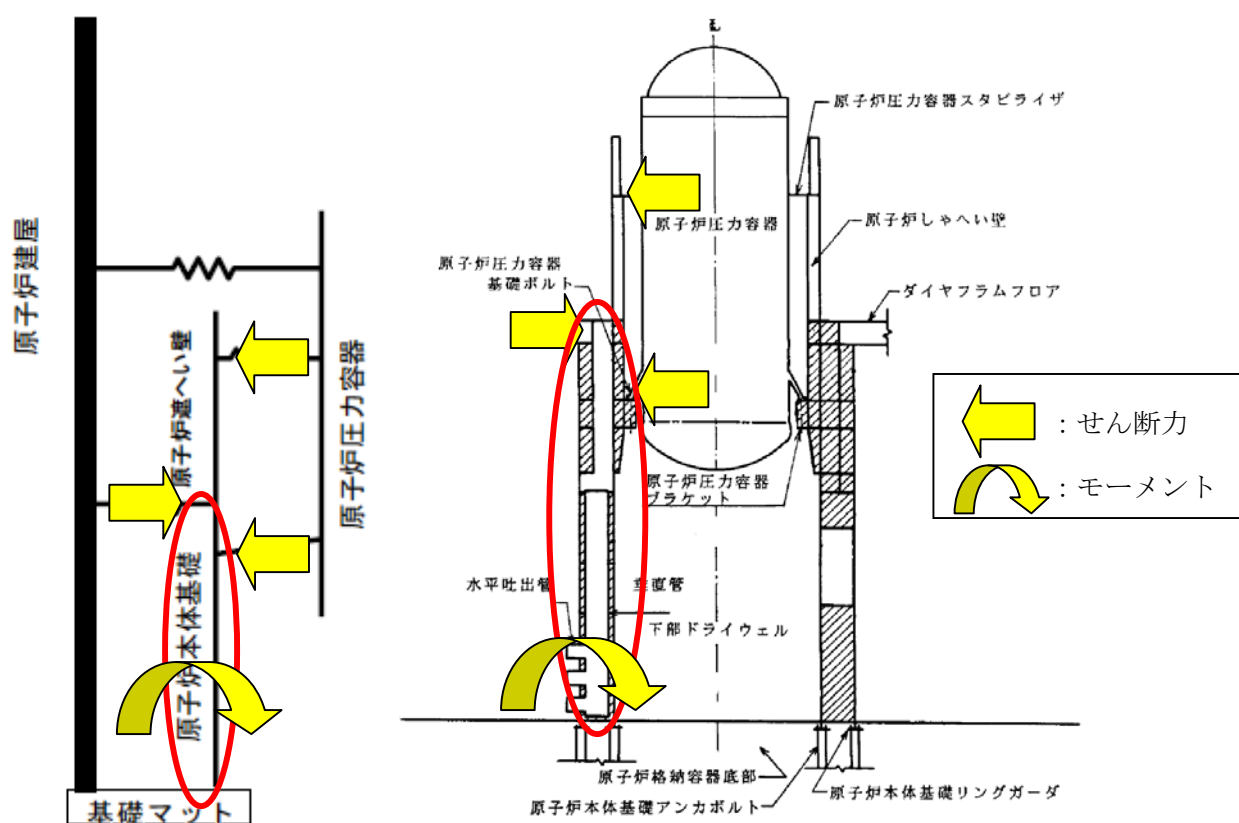
(b) 水平力-せん断変形関係

実験における曲げ及びせん断の履歴特性

## 5. RPV ペDESTAL耐震性評価

### (1) 耐震性評価で想定する損傷モード

RPV ペDESTALには、原子炉建屋や RPV から伝達されるせん断力によってモーメントが生じる。そのモーメントにより、a. 鋼板の構造材が降伏する、b. 定着部のアンカボルトが引き抜ける、という2つの損傷モードで RPV を支持する機能が喪失することが想定される。RPV ペDESTALの耐震性評価では、この a. および b. の損傷モードに対する評価を行う。



RPV ペDESTALに伝達される荷重のイメージ図

(2) RPV ペデスタル耐震性評価の評価基準値

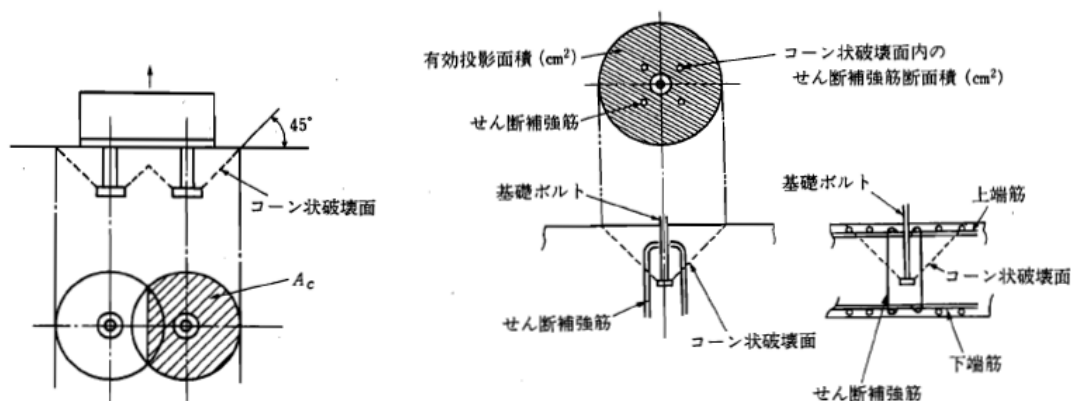
前述した損傷モードに対応した評価部位毎の評価基準値を下表に示す。

RPV ペデスタル耐震性評価の評価基準値

部位	評価項目	評価基準値
円筒部	鋼材の応力	「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」(日本建築学会)における短期許容応力度
ベアリングプレート		
アンカボルト		
アンカボルト部 コンクリート	コンクリートの強度	「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」(日本電気協会)におけるシアコーン強度

(補足) シアコーン強度について

RPV アンカボルトのシアコーン強度を評価する場合は、下図に示す群効果とせん断補強筋効果を考慮している。

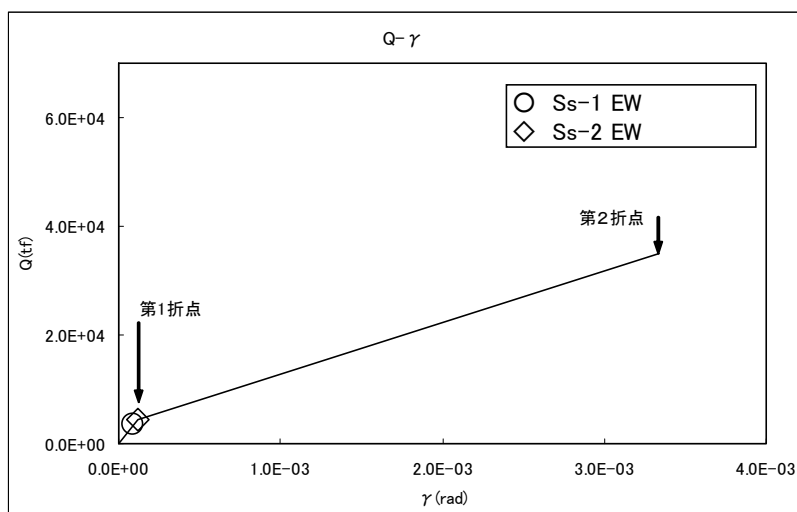


群効果のイメージ図とせん断補強筋の概念図  
(JEAG4601-1991 追補版より抜粋)

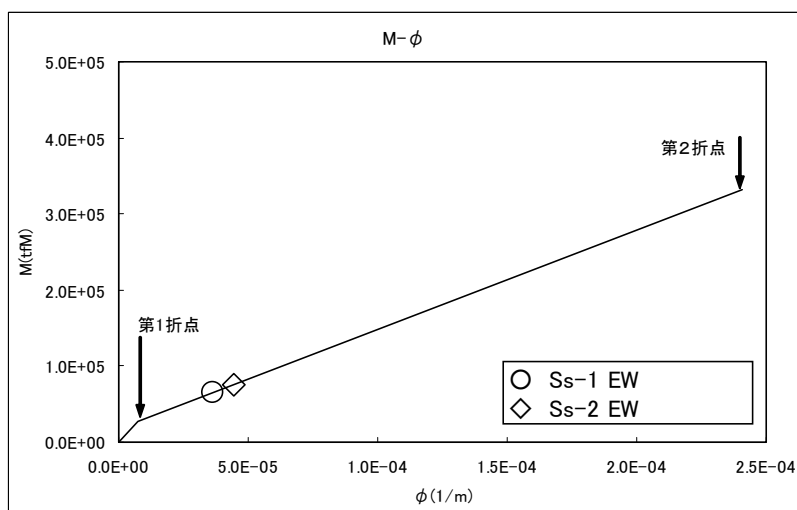
### (3) RPV ペデスタルの地震応答荷重

RPV ペデスタルの地震荷重は、3. で述べた地震応答解析モデルを用いて、時刻歴地震応答解析を行うことで算出される。評価用の地震荷重は、地震応答解析によって得られる時刻歴荷重の最大値を用いる。(地震応答解析により得られた荷重は次頁に示す。)

なお、基準地震動 Ss による RPV ペデスタル基部の地震応答荷重は、曲げ変形において、復元力特性上の第一折点をやや上回るレベルであった。(下図参照)



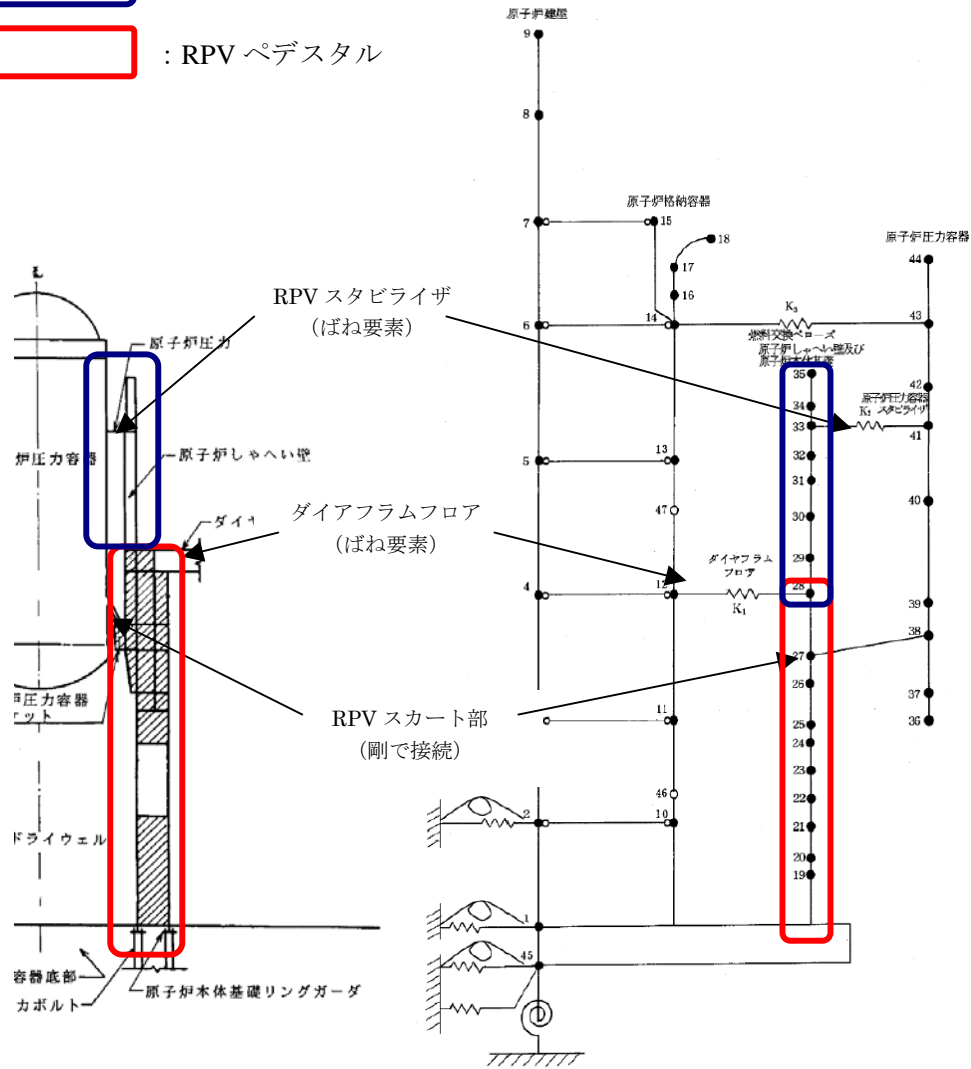
(a)せん断



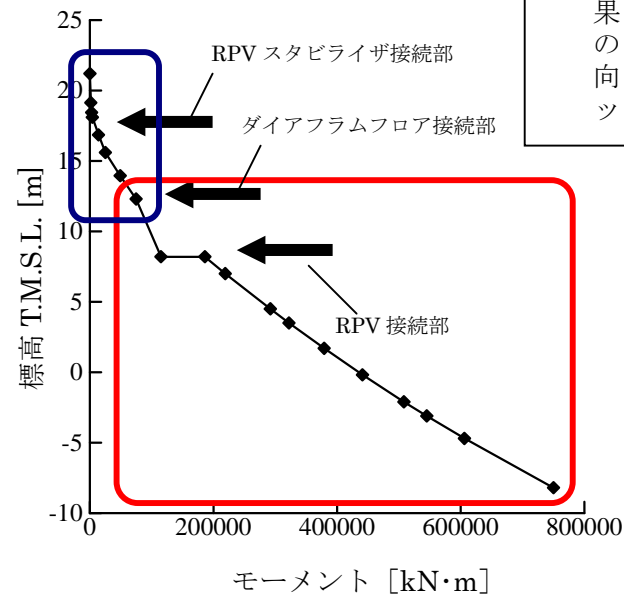
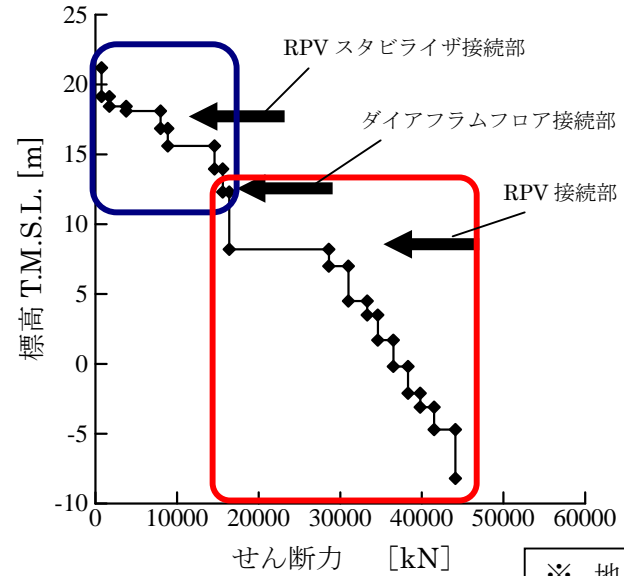
(b)曲げ

原子炉本体基礎基部の最大応答せん断力及び最大応答曲げモーメント  
(基準地震動 Ss-1, Ss-2 EW 方向の例)

- : 遮へい壁
- : RPV ペDESTAL



RPV ペDESTAL 地震応答解析モデル (水平動)

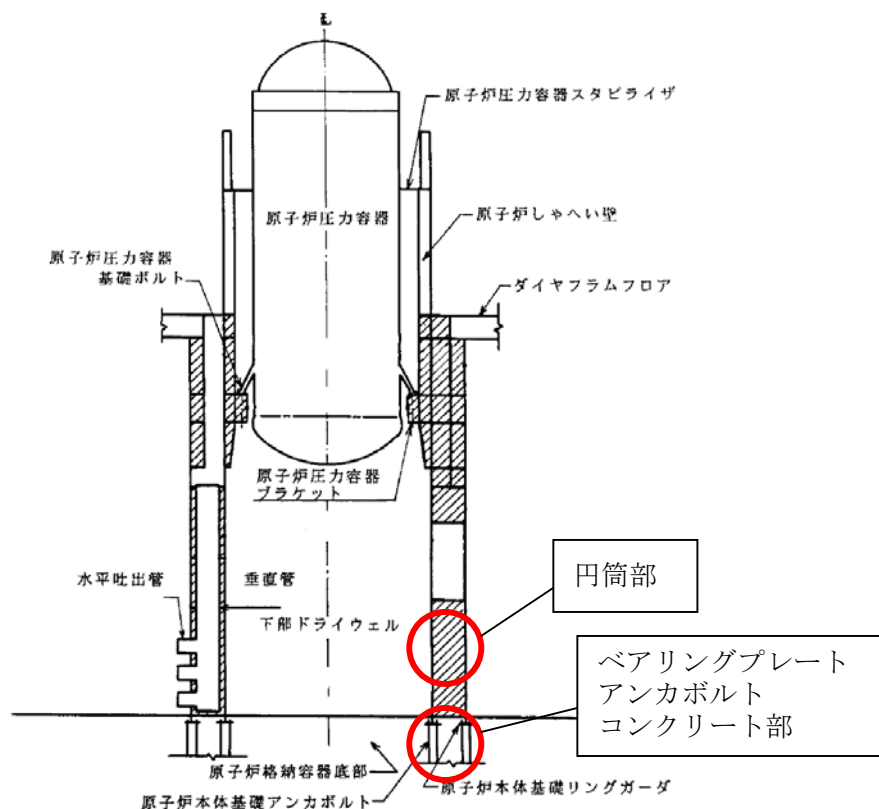


※ 地震応答解析結果は、Ss-1～Ss-5のNS方向・EW方向を包絡してプロットしている。

RPV ペDESTAL 地震応答解析結果 (水平動)

#### (4) RPV ペDESTALの耐震安全性評価結果

RPV ペDESTALは、基準地震動  $S_s$  に対して耐震安全性を確保していることを確認した。



評価結果一覧表

(単位:  $N/mm^2$ )

部 位	発生応力	許容基準値
円筒部 (隔壁)	組合せ応力度	許容組合せ応力度
	384	427
ベアリングプレート	曲げ応力度	許容曲げ応力度
	309	492
アンカボルト	引張応力度	許容引張応力度
	283	686

(単位:  $kN/4.5^\circ$ )

コンクリート部	引抜力	許容基準値
	3331	5947