

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-026-1 改3
提出年月日	2020年5月20日

原子炉建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料

2020年 5月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

V-2-2-2「原子炉建屋の耐震性についての計算書」及びV-2-9-3-1「原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）の耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 応力解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 2 応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 3 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 4 原子炉建屋の既工認時の設計用地震力と今回工認における静的地震力  
及び弾性設計用地震動  $S_d$  による地震力の比較

別紙 5 原子炉建屋改造工事に伴う評価結果の影響について

別紙 6 大物搬入建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料

別紙 7 保有水平耐力の安全余裕の考え方

下線部：今回ご提示資料

## 別紙 6-4 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方

## 目 次

1. 概要 ..... 別紙 6-4-1
2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 ..... 別紙 6-4-2

## 1. 概要

本資料は、大物搬入建屋基礎スラブの応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件についての概要を示すものである。

## 2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

大物搬入建屋基礎スラブの応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件を表 2-1 に示す。

杭基礎の底面地盤ばねの設定における基本的な考え方は，以下のとおり。

- 水平ばね

地震応答解析モデルにおける地盤部分の擬似 3 次元 FEM モデルを用いて無質量剛基礎による水平方向の加振解析を行い，算定した複素インピーダンスの実部から設定する。

- 鉛直ばね

水平ばねと同様に算定した複素インピーダンスの実部から設定する。水平加力時の鉛直ばねについては，転倒モーメントを適切に評価するため，回転方向の加振解析により算出した回転ばねより設定する。鉛直加力時及び長期荷重時の鉛直ばねについては，ロッキング挙動が卓越しないため，鉛直方向の加振解析から算出した鉛直ばねより設定する。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方\*については、以下のとおり。

- ・ はり要素

はり要素の場合は、曲げの変位関数が3次で精度が高いため、基本的に要素分割の細分化は不要であるが、部材の接合点間で変位情報出力や荷重入力がある場合には複数要素に細分し、曲線部材がある場合はその曲線が直線近似できる程度の分割にすることが一般的である。また、分布荷重がある場合や分布質量が関係する自重荷重などの計算では、要素分割することにより質量分布がより正確になり、解析結果の精度が向上する。更に、要素分割の細分化により、変形図やモード図で構造物の変形状態を容易に把握することが可能となる。

- ・ シェル要素

要素分割は、基本的には発生する応力状態によって決まり、構造形状と荷重状態より要素分割数を考慮する。要素形状の縦横比（アスペクト比）は、重要部分で1:2以下、その他の領域や応力変化が少ない領域では、1:3程度までで、分割に際しては4角形要素を利用して格子状とするのが一般的である。曲面版構造の場合は、平板要素や軸対象シェル要素の大きさは、集中荷重や不連続部を含む曲面部近傍では $2.5\sqrt{R/t}$ を10~20分割すると適切な応力分布が求められ、構造物の半径（R）と板厚（t）が考慮されている。また、面内曲げ・軸力及び面外のせん断や曲げを受ける部材のシェル要素の辺の長さは、シェルの広がり方向の応力分布の状態から決まり、応力変化が大きい領域は要素を小さくする必要がある。

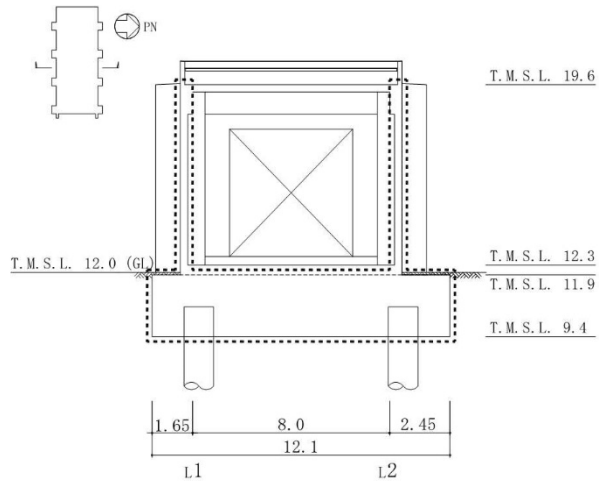
注記\*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形CAE協会，2008年）

表 2-1 大物搬入建屋基礎スラブ(1/2)

モデル概要

○モデル化範囲

- 基礎スラブ及び基礎スラブより立ち上がる T.M.S.L. 11.9m～T.M.S.L. 19.6m の耐震壁をモデル化する。柱については考慮しない。



：モデル化範囲を示す。  
(単位：m)

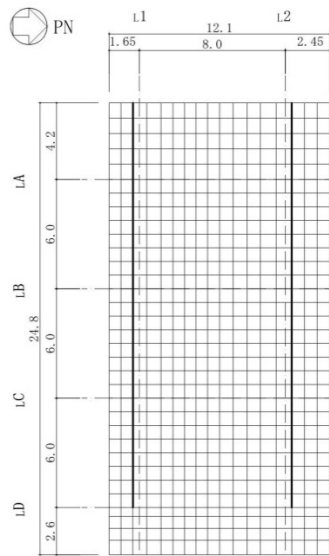
モデル化範囲

○使用要素

- 基礎スラブ：シェル要素
- 耐震壁：はり要素

○要素分割

- 要素の一边の長さを 1m 程度とし、耐震壁の配置を考慮して分割する。



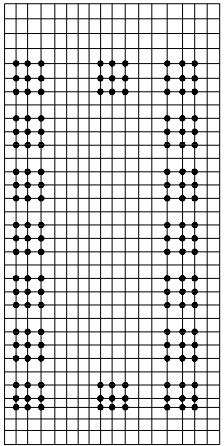
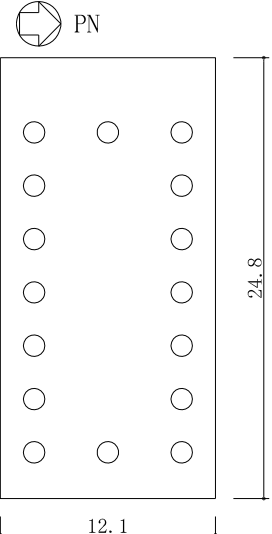
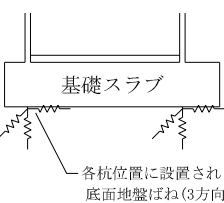
注：太線は壁の位置を示す。

モデル概要

(単位：m)



表 2-1 大物搬入建屋基礎スラブ(2/2)

境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎スラブの境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎スラブと上部構造物との境界部においては, 上部構造物の耐震壁の剛性を考慮することで, 基礎スラブの応力・変形状態を評価する。</li> <li>基礎スラブから立ち上がる柱については, その剛性を考慮しない。</li> </ul>	
はり要素の剛性 (断面性能)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>軸剛性 (軸断面積) : <math>A = t \times h</math></li> <li>曲げ剛性 (断面二次モーメント) : <math>I = t \times h^3 / 12 + A \times (h / 2 + D / 2)^2</math></li> <li>せん断剛性 (せん断断面積) : <math>A_s = t \times h</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>t : 壁厚</li> <li>h : モデル化する壁の高さ</li> <li>D : 基礎スラブ厚(2.5m)</li> </ul>
基礎スラブと杭の境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎スラブ底面の地盤ばね                             <ul style="list-style-type: none"> <li>設定に用いる水平ばね, 回転ばね及び鉛直ばねは, 地震応答解析モデルにおける地盤部分の擬似 3 次元 FEM モデルを用いて加振解析を行い, 算定した複素インピーダンスの実部から設定する。解析に用いる水平ばね及び鉛直ばねは以下のとおりとする。</li> <li>水平ばね : 設定した水平ばねを離散化</li> <li>鉛直ばね : 水平加力時は設定した回転ばねを離散化して鉛直ばねを算定</li> <li>鉛直加力時及び長期荷重時は鉛直ばねを離散化</li> </ul> </li> <li>上記の地盤ばね (3 方向) は杭中心とその周囲の 8 節点を含めて 9 本のばねを設けることでモデル化する。</li> </ul>	
 <p>● : 地盤ばね</p>	 <p>PN</p> <p>12.1</p> <p>24.8</p> <p>(単位:m)</p> <p>○ : 場所打ち鋼管コンクリート杭</p>
 <p>基礎スラブ</p> <p>各杭位置に設置される底面地盤ばね(3方向)</p>	

## 別紙6-4-1 底面地盤ばねの設定方法

## 目 次

1. 概要·····	別紙 6-4-1-1
2. 算出方法·····	別紙 6-4-1-1
3. 算出結果·····	別紙 6-4-1-7

## 1. 概要

本資料は、V-2-9-3-1 別紙1(Ⅱ)「大物搬入建屋の耐震性についての計算書」における、応力解析に用いる基礎スラブ底面の地盤ばね定数の設定方法を示すものである。

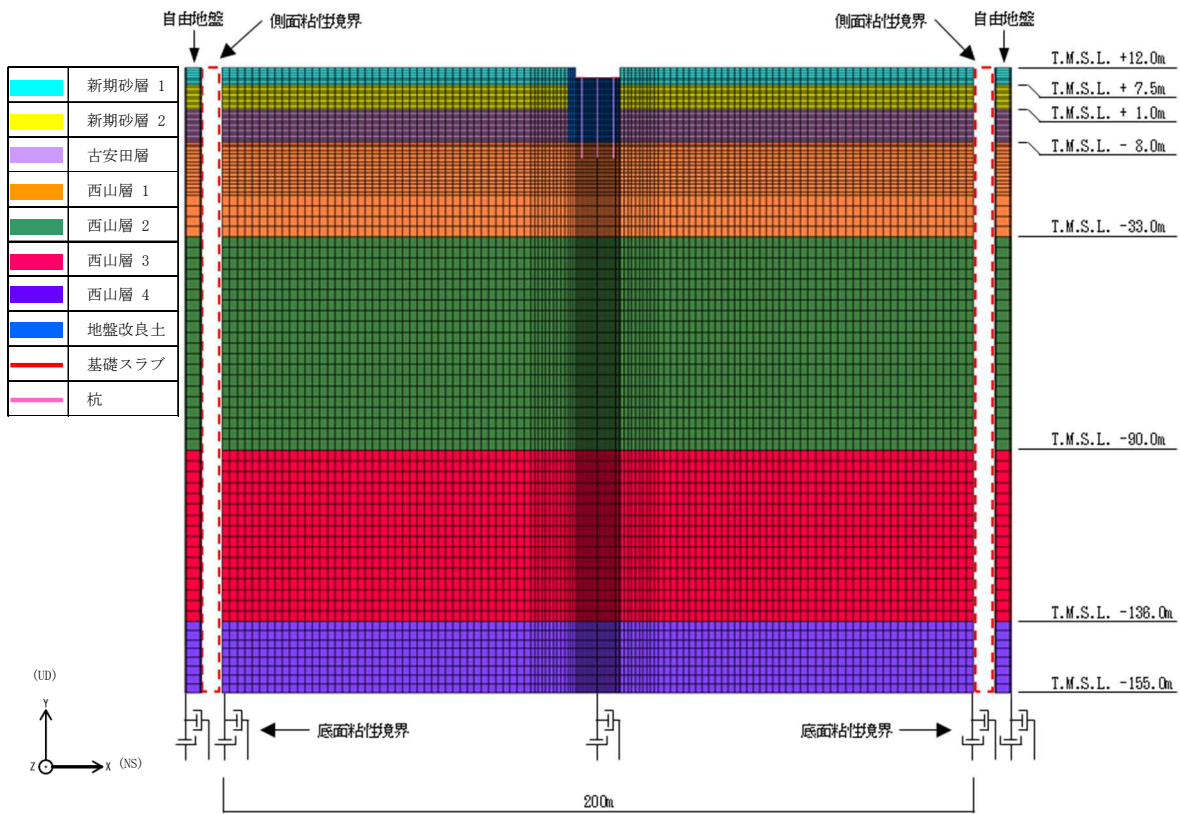
## 2. 算出方法

応力解析に用いる基礎スラブ底面の地盤ばね定数は大物搬入建屋の地震応答解析モデルを用いた加振解析により算出する。

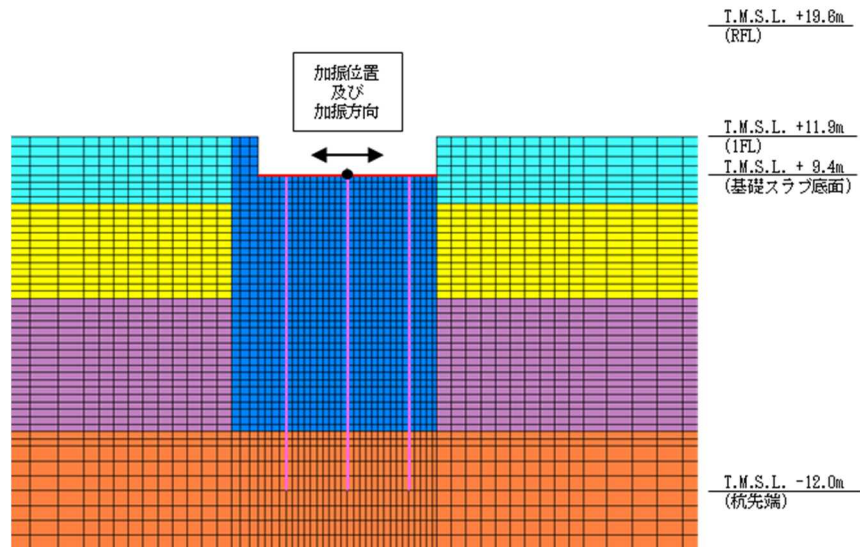
解析モデルは、V-2-9-3-1 別紙1(Ⅰ)「大物搬入建屋の地震応答計算書」における擬似3次元FEMモデルのうち、建屋及び基礎スラブの一軸多質点系モデルを除いたものとする。地盤定数は、建屋応答に支配的である基準地震動  $S_s-1$  の等価地盤物性値とする。解析モデルを図2-1～図2-3に、地盤定数を表2-1に示す。

加振方法は単位加振、加振位置は基礎スラブ中央とし、加振方向はNS方向、EW方向及び鉛直方向とする。解析には、解析コード「SoilPlus」を用いる。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

地盤ばね定数は、加振解析で算出したインピーダンスの実部の値のうち、振動数が0.1Hzの際の値とする。地盤ばね定数とインピーダンスの概念図を図2-4に示す。

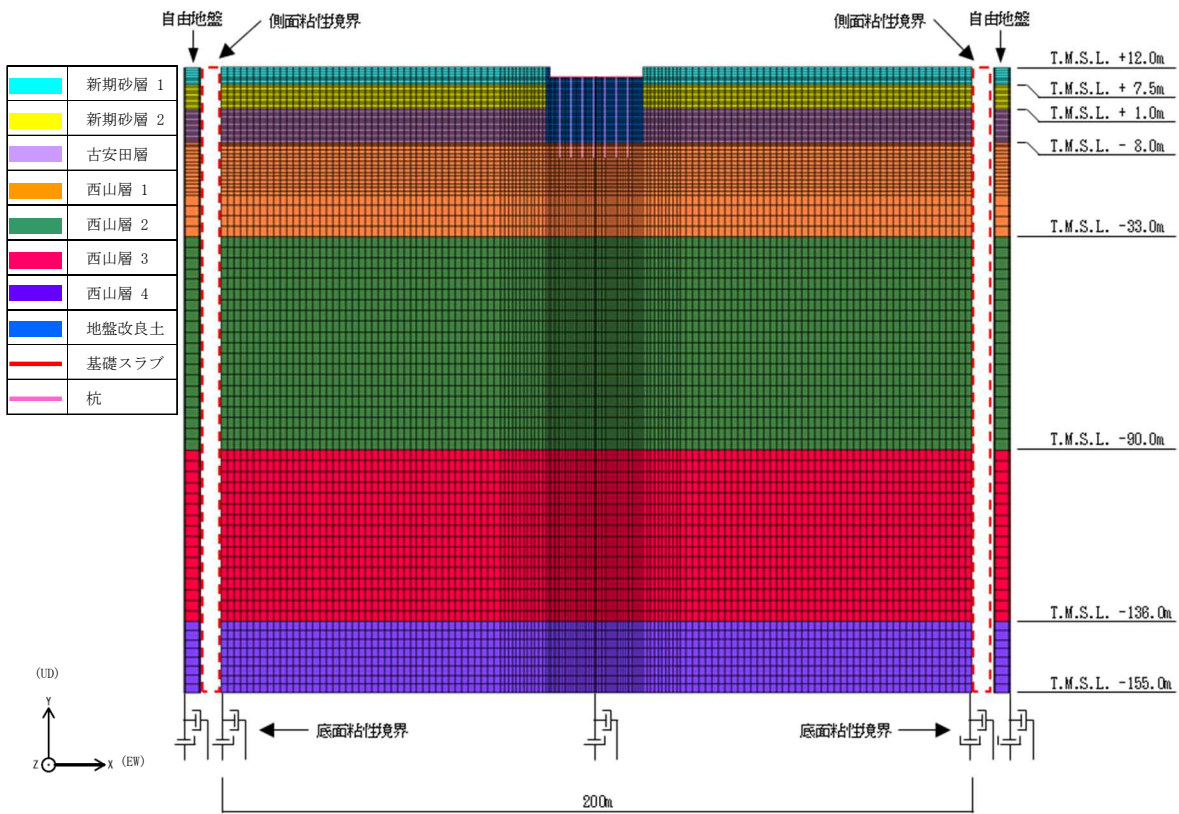


(a) 全体モデル

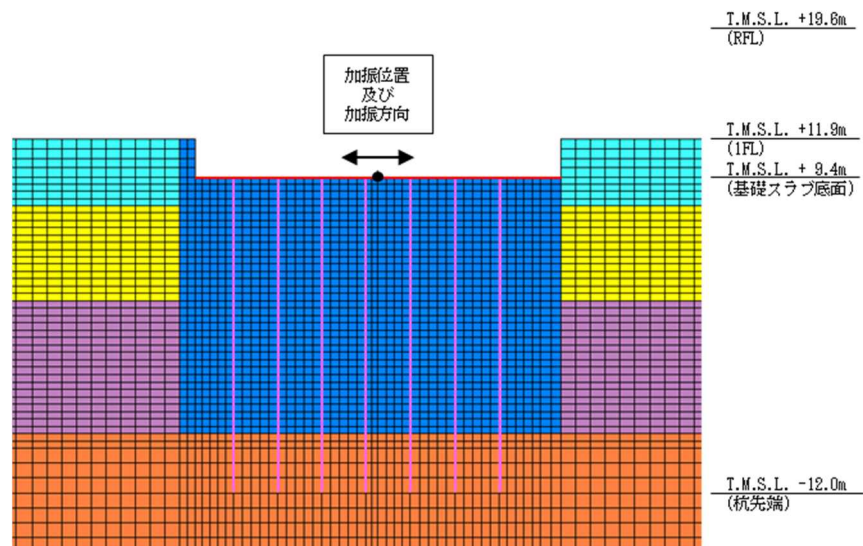


(b) 建屋周辺拡大図

図 2-1 解析モデル (NS 方向)

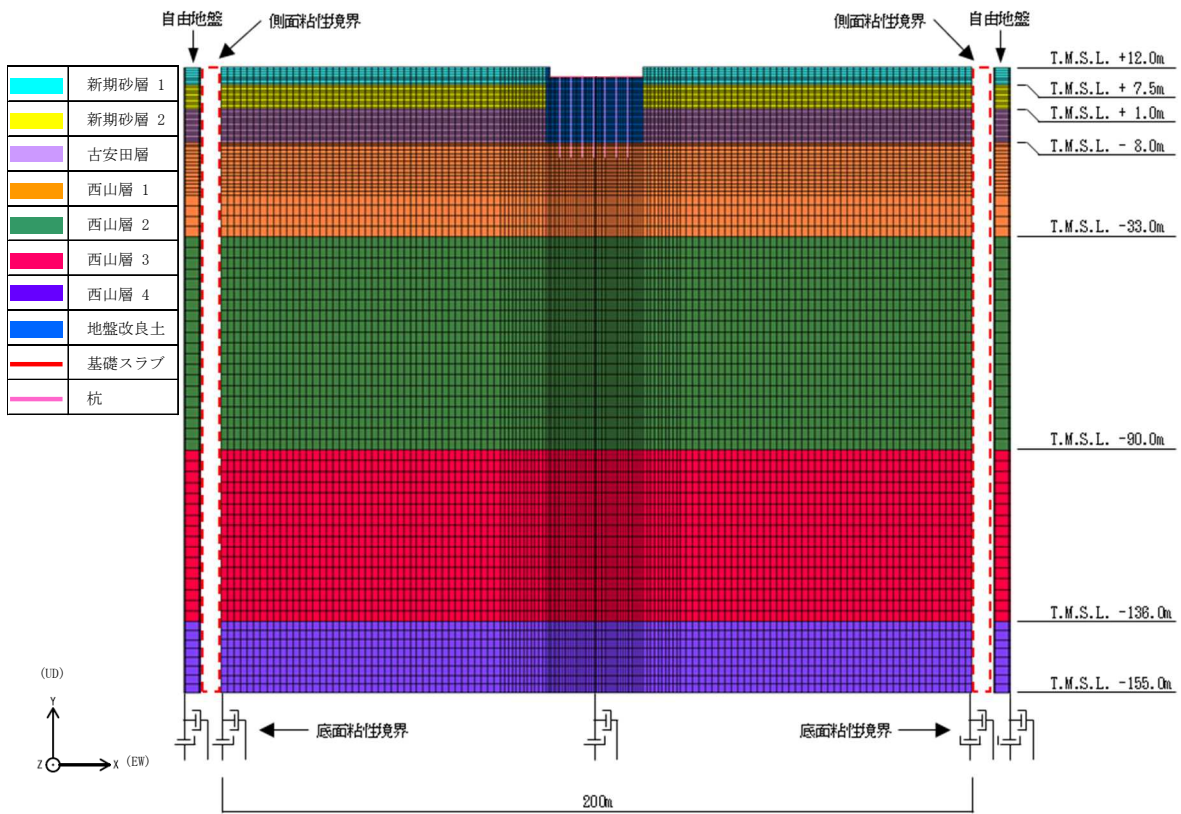


(a) 全体モデル

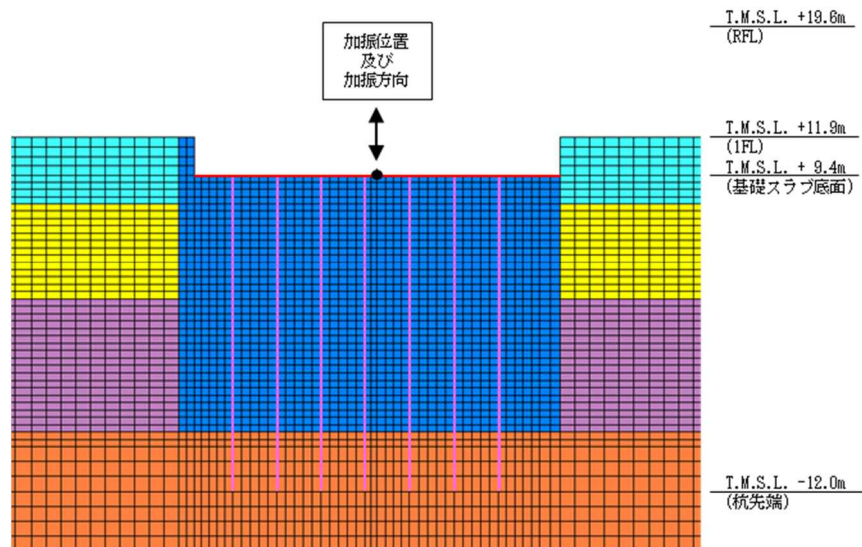


(b) 建屋周辺拡大図

図 2-2 解析モデル (EW 方向)



(a) 全体モデル



(b) 建屋周辺拡大図

図 2-3 解析モデル (鉛直方向)

表 2-1 地盤定数

(a) 建屋下部

標高 T. M. S. L. (m)	地層	せん断波 速度 $V_s$ (m/s)	単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比 $\nu$	せん断弾性 係数 $G$ ( $\times 10^5$ kN/m <sup>2</sup> )	初期せん断 弾性係数 $G_0$ ( $\times 10^5$ kN/m <sup>2</sup> )	剛性低下率 $G/G_0$	減衰定数 $h$ (%)
+12.0	新期砂層 置換	810	17.9	0.302	11.7	12.0	0.98	0
+1.0								
-8.0	古安田層 置換	800	18.0	0.302	10.9	11.7	0.94	1
-33.0	西山層	490	17.0	0.451	3.78	4.16	0.91	3
		530	16.6	0.446	4.13	4.75	0.87	3
		590	17.3	0.432	5.28	6.14	0.86	3
		650	19.3	0.424	7.32	8.32	0.88	3
-136.0								
-155.0								
$\infty$	椎谷層	720	19.9	0.416	10.5	10.5	1.00	-

(b) 建屋周囲

標高 T. M. S. L. (m)	地層	せん断波 速度 $V_s$ (m/s)	単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比 $\nu$	せん断弾性 係数 $G$ ( $\times 10^5$ kN/m <sup>2</sup> )	初期せん断 弾性係数 $G_0$ ( $\times 10^5$ kN/m <sup>2</sup> )	剛性低下率 $G/G_0$	減衰定数 $h$ (%)
+12.0	新期砂層	150	16.1	0.347	0.107	0.369	0.29	22
+7.5								
+1.0		200	16.1	0.308	0.0722	0.657	0.11	29
-8.0	古安田層	330	17.3	0.462	0.998	1.92	0.52	6

注：T. M. S. L. -8.0m 以深は建屋下部の値を採用する。



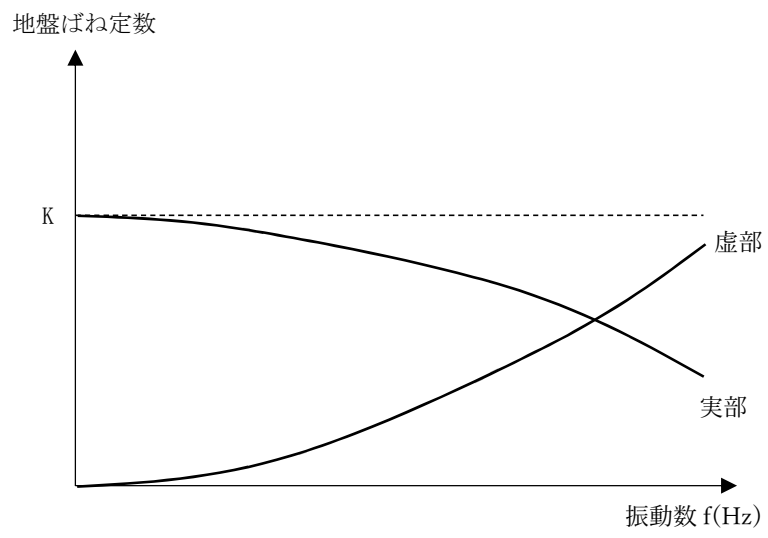
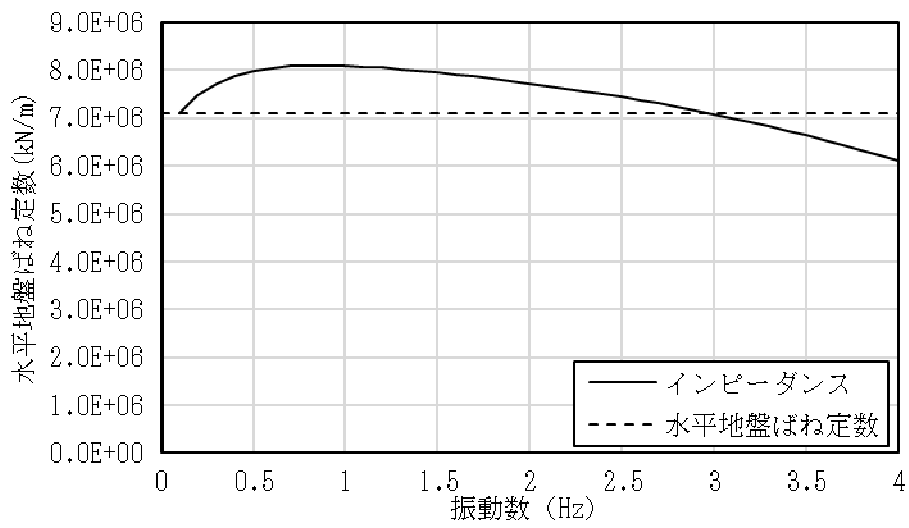


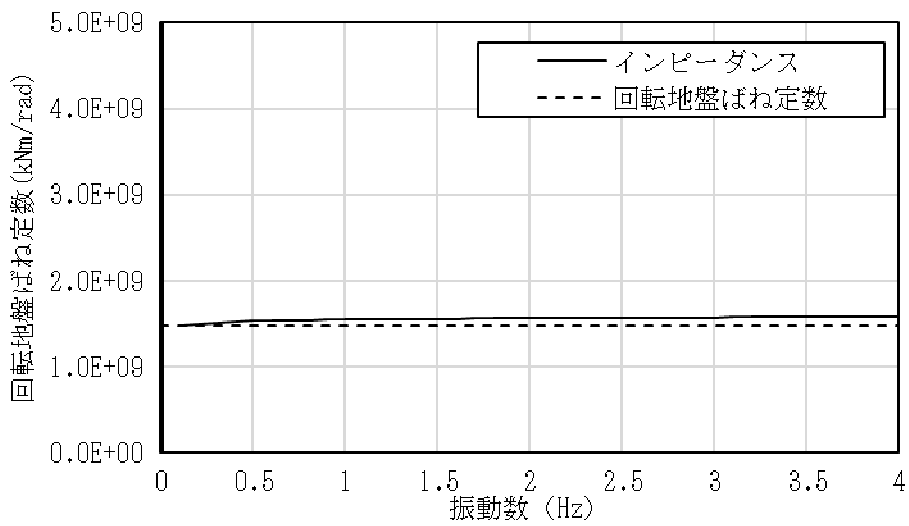
図 2-4 地盤ばね定数とインピーダンスの概念図

### 3. 算出結果

インピーダンスの算出結果を図 3-1～図 3-3 に，作成した地盤ばね定数を表 3-1 に示す。

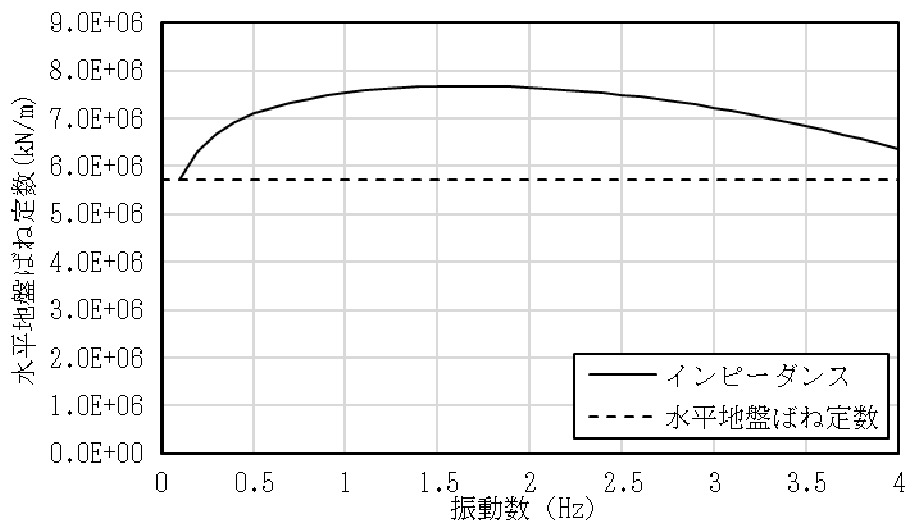


(a) 水平方向

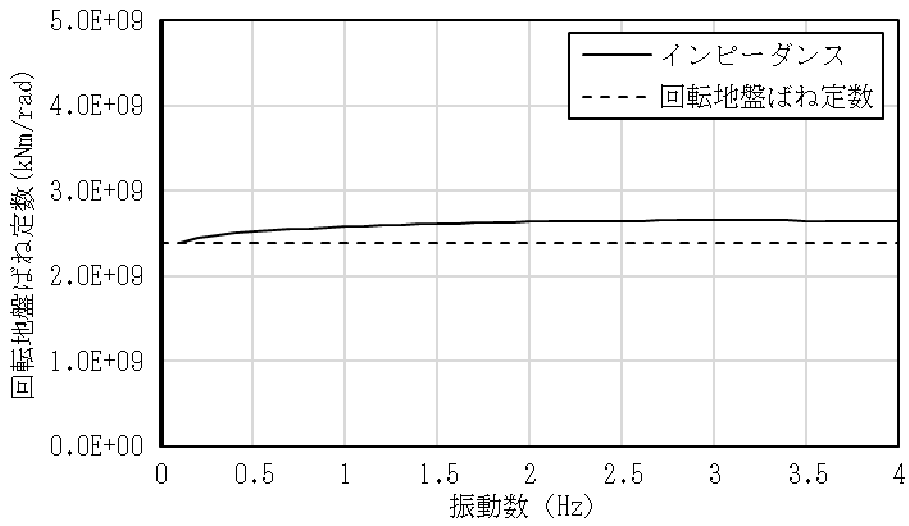


(b) 回転方向

図 3-1 インピーダンス (NS 方向)



(a) 水平方向



(b) 回転方向

図 3-2 インピーダンス (EW 方向)

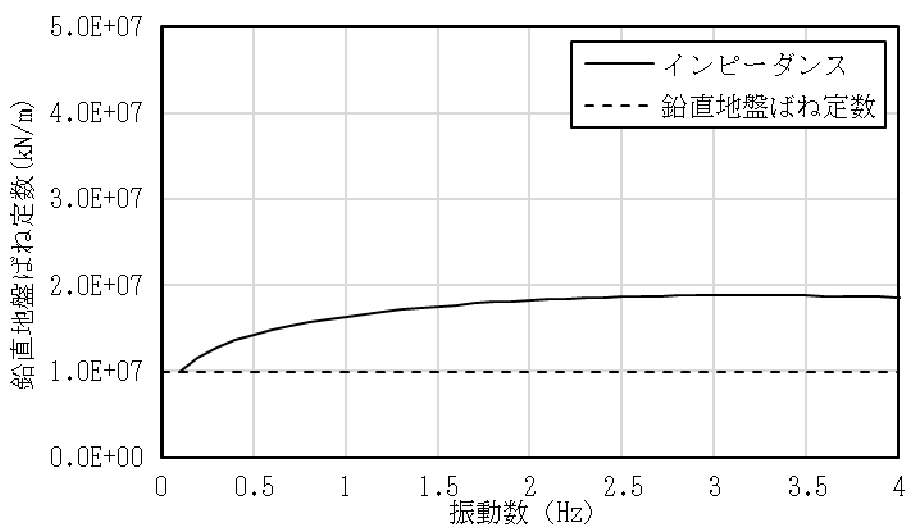


図 3-3 インピーダンス (鉛直方向)

表 3-1 地盤ばね定数

ばねの種類	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
水平地盤ばね (kN/m)	$7.11 \times 10^6$	$5.73 \times 10^6$	
回転地盤ばね (kN·m/rad)	$1.47 \times 10^9$	$2.38 \times 10^9$	
鉛直地盤ばね (kN/m)			$9.91 \times 10^6$

別紙6-7 杭の極限支持力及び最大引抜き抵抗力の設定

## 目 次

1. 概要 ..... 別紙 6-7-1
2. 杭の極限支持力及び最大引抜き抵抗力の設定 ..... 別紙 6-7-1

## 1. 概要

本資料は、V-2-9-3-1「原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）の耐震性についての計算書」別紙 1（Ⅱ）「大物搬入建屋の耐震性についての計算書」において用いる杭の極限支持力及び最大引抜き抵抗力の設定方法を示すものである。

## 2. 杭の極限支持力及び最大引抜き抵抗力の設定

大物搬入建屋において、杭の極限支持力及び最大引抜き抵抗力は、「建築基礎構造設計指針」（（社）日本建築学会，2001 改定）に基づき設定する。極限支持力及び最大引抜き抵抗力の評価式を次頁に、極限支持力及び最大引抜き抵抗力の算定に用いる諸元と算定結果を表 2-1 に、杭の設計に用いる極限支持力及び最大引抜き抵抗力を表 2-2 に示す。



$$\begin{aligned}
R_u &= R_p + R_f \\
R_p &= q_p \cdot A_p \\
R_f &= R_{fs} + R_{fc} \\
R_{fs} &= \tau_s \cdot L_s \cdot \varphi \\
\tau_s &= 3.3N \\
R_{fc} &= \tau_c \cdot L_c \cdot \varphi \\
R_{TC} &= \left( \sum \tau_{sti} L_{si} + \sum \tau_{cti} L_{ci} \right) \varphi + W
\end{aligned}$$

ここで、

- $R_u$  : 極限支持力 (kN)
- $R_p$  : 極限先端支持力 (kN)
- $R_f$  : 極限周面摩擦力 (kN)
- $q_p$  : 極限先端支持力度 (kN/m<sup>2</sup>) (上限値  $q_p = 7500$  kN/m<sup>2</sup>)
- $A_p$  : 杭先端の閉塞断面積 (m<sup>2</sup>)
- $R_{fs}$  : 砂質土部分の極限周面摩擦力 (kN)
- $R_{fc}$  : 粘性土部分の極限周面摩擦力 (kN)
- $\tau_s$  : 砂質土の極限周面摩擦力度 (上限  $N=50$ ) (kN/m<sup>2</sup>) \*
- $L_s$  : 砂質土部分の長さ (m)
- $N$  : 平均 N 値
- $\varphi$  : 杭の周長 (m)
- $\tau_c$  : 粘性土の極限周面摩擦力度 (kN/m<sup>2</sup>) (上限  $\tau_c=100$ ) \*
- $L_c$  : 粘性土部分の長さ (m)
- $R_{TC}$  : 最大引抜き抵抗力 (kN)
- $\tau_{sti}$  : 砂質土の i 層における杭引抜き時の最大周面摩擦力度で、押込み時の極限周面摩擦力度の 2/3 とする (kN/m<sup>2</sup>)
- $\tau_{cti}$  : 粘性土の i 層における杭引抜き時の最大周面摩擦力度で、押込み時の極限周面摩擦力度と同一とする (kN/m<sup>2</sup>)
- $L_{si}$  : 砂質土の i 層における杭の長さ (m)
- $L_{ci}$  : 粘性土の i 層における杭の長さ (m)
- $W$  : 杭の自重で、地下水位以下の部分については浮力を考慮する (kN)

注記\* : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度であり、杭の施工方法及び地盤種別により、標準貫入試験の N 値及び地盤の粘着力を用いて定められる。大物搬入建屋に用いる場所打ち鋼管コンクリート杭では、施工時に鋼管の外周面にグラウトを充填することから、地盤との摩擦面は場所打ちコンクリート杭と同等である。このため、場所打ちコンクリート杭工法の値を参考に、砂質土の場合は 3.3N (上限  $N=50$ ) (kN/m<sup>2</sup>)、粘性土の場合は  $c (\leq 100)$  (kN/m<sup>2</sup>) とする (N は標準貫入試験の N 値、c は地盤の粘着力)。

表 2-1 極限支持力及び最大引抜き抵抗力の算定に用いる諸元と算定結果

項目		算定結果
極限支持力 $R_u$ (kN)		15055
極限先端支持力 $R_p$ (kN)		6987
極限先端支持力度 $q_p$ (kN/m <sup>2</sup> )		6178
杭先端の閉塞断面積 $A_p$ (m <sup>2</sup> )		1.131
極限周面摩擦力 $R_f$ (kN)		8068
砂質土部分の極限周面摩擦力 $R_{fs}$ (kN)		0* <sup>1</sup>
粘性土部分の極限周面摩擦力 $R_{fc}$ (kN)		8068
粘性土の極限周面摩擦力度 $\tau_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	地盤改良土* <sup>2</sup> (T. M. S. L. 9.4m~T. M. S. L. -8.0m)	100* <sup>4</sup>
	西山層* <sup>3</sup> (T. M. S. L. -8.0m~T. M. S. L. -12.0m)	100* <sup>4</sup>
杭の周長 $\phi$ (m)		3.770
最大引抜き抵抗力 $R_{Tc}$ (kN)		8494
杭の自重 $W$ (kN)		426

注記\*1：杭周囲に砂質土が存在しないため

\*2：地盤改良土は粘性土として評価する

\*3：支持層である西山層への杭の根入れ長さは4.0mである

\*4：V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づく地盤改良土及び西山層の粘着力はそれぞれ4000kN/m<sup>2</sup>及び1410kN/m<sup>2</sup>であることから、粘性土の極限周面摩擦力度は上限値である100kN/m<sup>2</sup>を採用する

表 2-2 杭の設計に用いる極限支持力及び最大引抜き抵抗力  
(単位：×10<sup>3</sup>kN)

極限支持力	最大引抜き抵抗力
15.0	8.49

注：短期時は上記に2/3を乗じた値とする。

別紙 6-9 応力解析における地下水位設定の影響について

## 目 次

1. 概要	別紙 6-9-1
2. 検討方法	別紙 6-9-2
3. 検討結果	別紙 6-9-3

## 1. 概要

大物搬入建屋の耐震評価における地下水位は、地表面（T.M.S.L. 12.0m）に設定し、基礎スラブ底面に地下水による浮力を考慮している。一方、大物搬入建屋近傍の地下水位の実測値は、年間平均で T.M.S.L. 8.56m\* で、基礎スラブの厚さが 2.5m であるため、年間平均の実測値に基づく地下水位を考慮した場合、基礎スラブ底面に浮力は作用しない。

本資料では、応力解析における設計条件としての地下水位設定（T.M.S.L. 12.0m）と、年間平均の実測値に基づく地下水位設定（T.M.S.L. 8.56m）に基づく浮力の違いが応力解析に与える影響について確認する。

注記\*：V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」の補足説明資料「地盤の支持性能について」を参照

## 2. 検討方法

基礎スラブの応力解析においては、浮力を荷重の組合せに考慮しているため、本資料では荷重の組合せから浮力を無視して検討を実施する。なお、応力解析における地震荷重は、浮力の違いが応力解析に与える影響を確認する観点から、両ケースともに地下水位を地表面(T.M.S.L. 12.0m)に設定した地震応答解析から算定する。荷重の組合せを比較して表 2-1 に示す。

表 2-1 荷重の組合せ

	荷重の組合せ
浮力考慮ケース	$V L + S s + B L$
浮力無視ケース	$V L + S s$

$V L$  : 鉛直荷重

$S s$  :  $S s$  地震荷重 (水平・鉛直)

$B L$  : 浮力

### 3. 検討結果

浮力の有無を考慮した解析結果の比較を表 3-1 に示す。

解析結果より、浮力無視ケースの検定値は、おおむね浮力考慮ケースの検定値を若干上回るものの、許容限界に対して余裕があることを確認した。

表 3-1 解析結果の比較

項目	方向	要素番号	荷重 ケース	検定値	
				浮力考慮 ケース	浮力無視 ケース
軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	NS	55	2-3	0.849	0.844
	EW	451	2-5	0.309	0.319
面外せん断力	NS	55	2-3	0.880	0.894
	EW	86	2-3	0.787	0.793