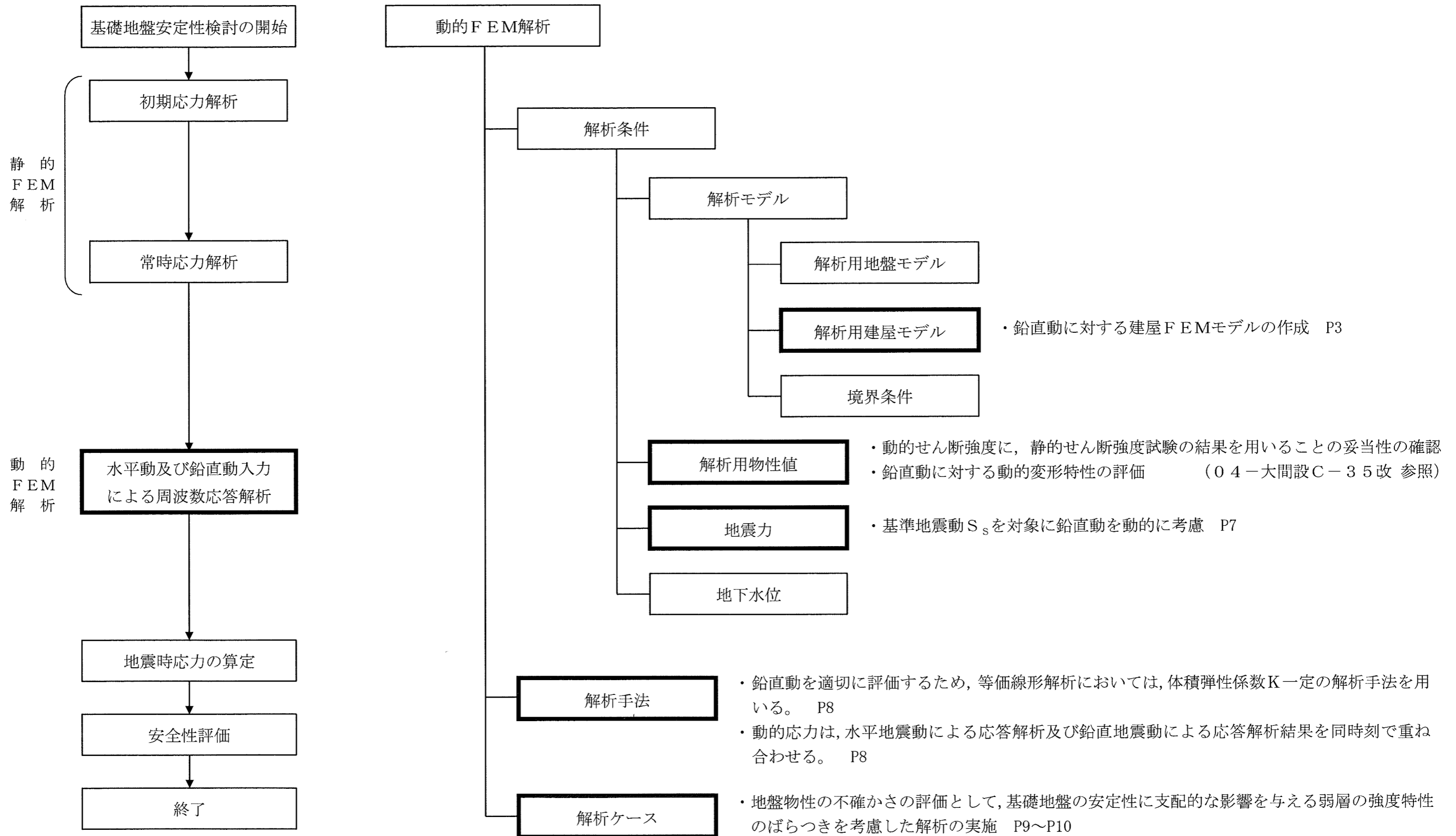


電源開発株式会社
大間原子力発電所

原子炉施設設置地盤の安定性検討の方針

平成19年1月
原子力発電安全審査課

指針改訂に伴う原子炉施設設置地盤の安定性検討の主な留意点について



動的 FEM 解析による安定性検討フロー

概要

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（平成 18 年 9 月 19 日）によれば、建物・構築物は、十分な支持性能をもつ地盤に設置されなければならないとされていることから、燃料補助建屋を含む原子炉建屋基礎地盤（以下「原子炉施設設置地盤」という。）の安定性について、以下の検討を行っている。

原子炉施設設置地盤の安定性を検討するに当たって、建屋基礎底面の支持力、基礎地盤のすべり及び建屋基礎底面の沈下に対する安全性について、基準地震動 S_s を用いる動的 FEM 解析を主体とした検討を行っている。

原子炉施設設置地盤の安定性検討の流れを図-1 に示す。

I. 原子炉建屋基礎地盤の安定性検討

1. 慣用法による安定性検討
2. 動的 FEM 解析による安定性検討（基本解析）

II. 原子炉建屋基礎地盤の安定性検討（比較解析）

III. 燃料補助建屋基礎地盤の安定性検討

1. 慣用法による安定性検討
2. 動的 FEM 解析による安定性検討

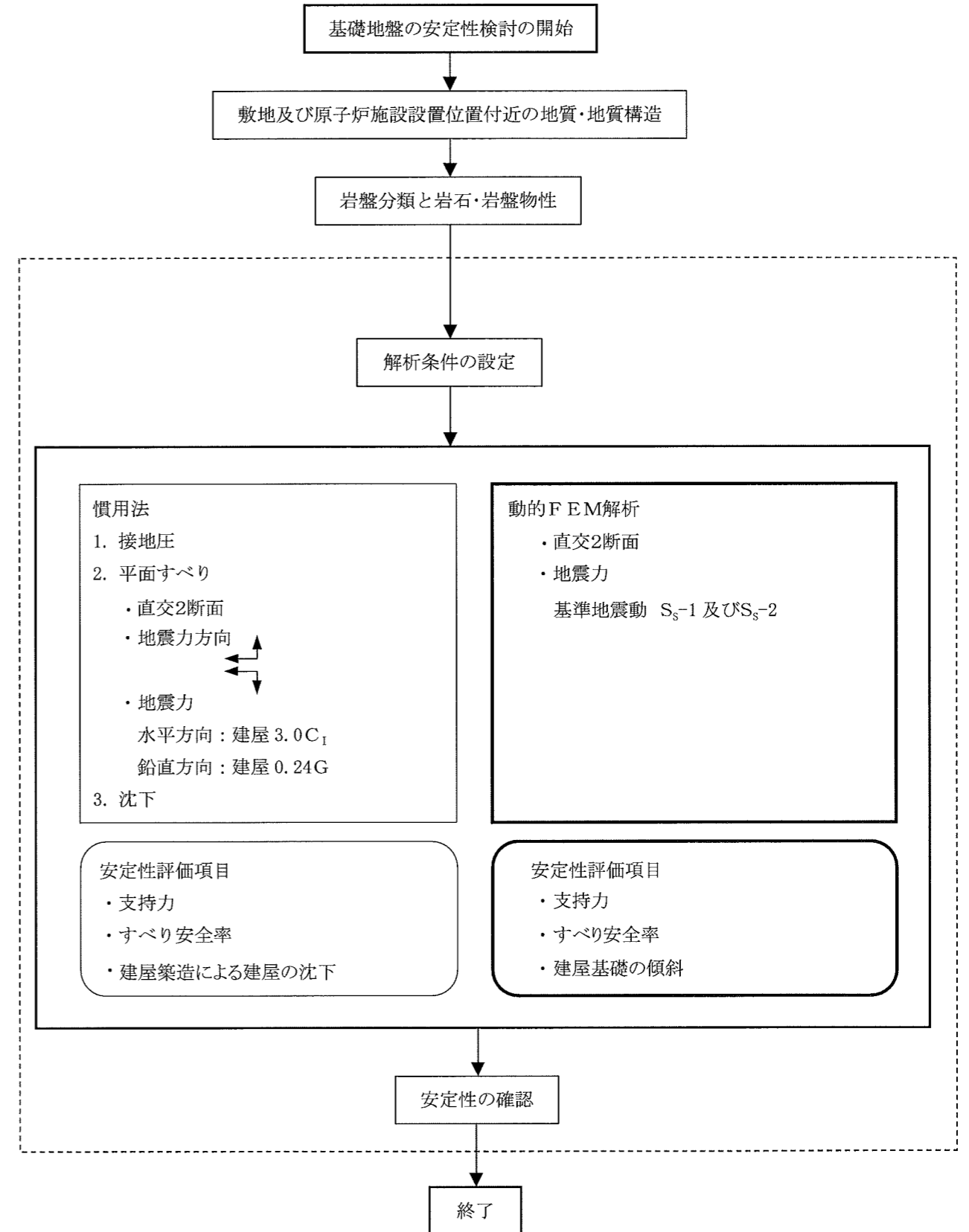


図-1 原子炉施設設置地盤の安定性検討フロー

I. 原子炉建屋基礎地盤の安定性検討

1. 慣用法による安定性検討

1.1 解析条件

(1) 解析断面

炉心を通る南北方向断面であるX-X'断面と、これに直交し炉心を通る東西方向断面であるY-Y'断面としている。

(2) 地震力

水平方向： 建屋に地震層せん断力係数 $3.0C_1$ に基づく地震力

鉛直方向： 建屋に $0.24G$

1.2 解析手法・安定性評価

(1) 支持力に対する検討

原子炉建屋を剛体とみなし、かつ建屋に作用する荷重を建屋基礎底面地盤のみで支持させるものとし、その基礎底面における接地圧分布より原子炉建屋基礎底面地盤（淡灰色火山礫凝灰岩）の常時及び地震時の支持力に対する安定性を検討している。

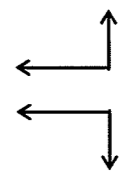
(2) 平面すべりに対する検討

原子炉建屋基礎底面の岩盤区分である淡灰色火山礫凝灰岩のブロックせん断試験結果による強度 ($\tau = 0.52 + \sigma \tan 35^\circ$ (N/mm²)) を用いて、平面的なすべり安定性を検討している。平面すべりの検討ケースを表-1 に示す。

(3) 沈下に対する検討

原子炉建屋及びタービン建屋築造による沈下量、並びに隣接して設置するタービン建屋及び廃棄物処理建屋によって原子炉建屋に生じる不同沈下に対する安全性を検討している。原子炉建屋の沈下に対する検討位置を図-2 に示す。

表-1 慣用法検討ケース

解析手法	解析断面	地震力方向
慣用法 (平面すべり)	X-X' 断面	
	Y-Y' 断面	

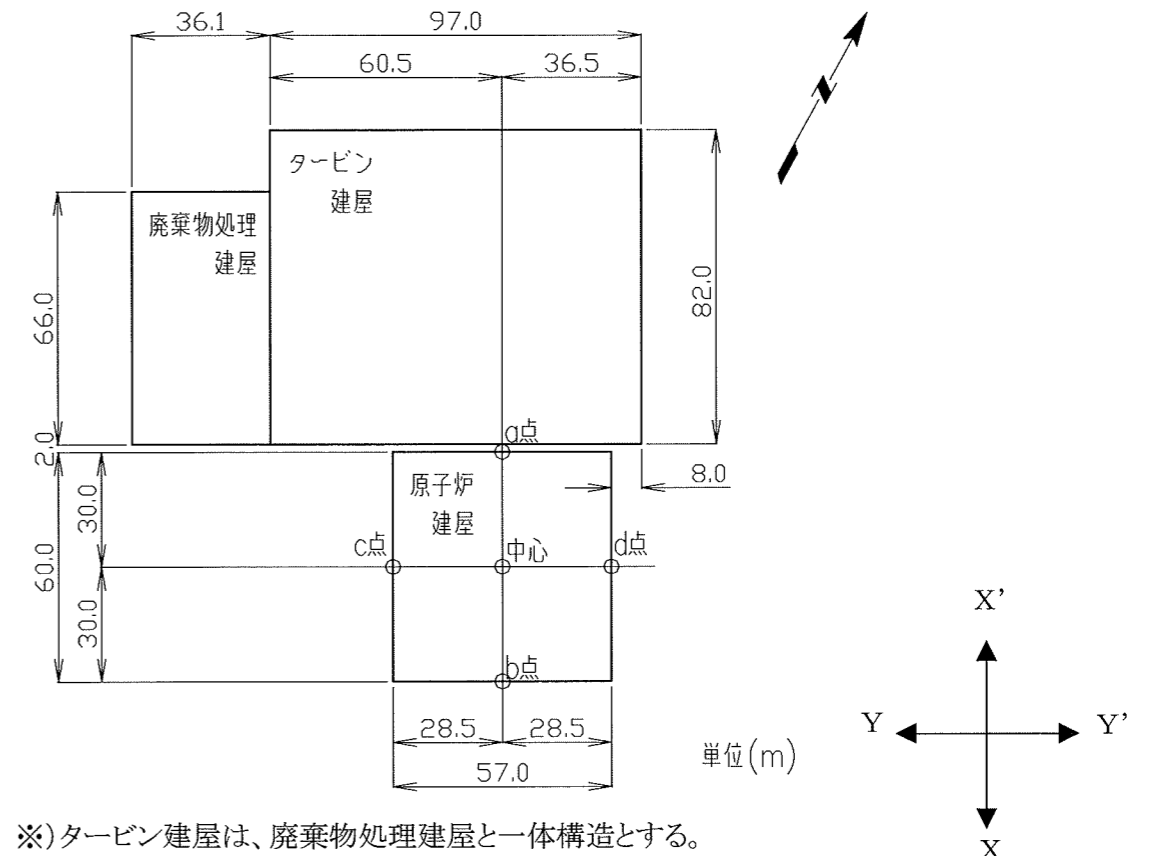


図-2 原子炉建屋の沈下に対する検討位置

2. 動的FEM解析による安定性検討 (基本解析)

2.1 解析条件

(1) 解析モデル

炉心を通る南北方向断面であるX-X'断面と、これに直交し炉心を通る東西方向断面であるY-Y'断面としている。

- X-X'断面 (南北方向断面) : 幅800m (炉心位置から左 (南) ~300m, 右 (北) ~500m), 深さT.P. -300mまで
- Y-Y'断面 (東西方向断面) : 幅600m (炉心位置から左 (西) ~300m, 右 (東) ~300m), 深さT.P. -300mまで

岩盤及び建屋については平面ひずみ要素 (原則として四角形要素) を用い, 断層及びシームについては厚さを持たないジョイント要素によりモデル化している。

建屋モデルは, 水平動及び鉛直動用の多質点系モデルから, それぞれの有限要素モデルに変換することにより作成している。

解析用要素分割図を図-3に示す。

ctf 粗粒凝灰岩	st シルト岩	nlv(R) 安山岩溶岩(塊状・規則性節理部)	alt 細粒凝灰岩, 粗粒凝灰岩 暗灰色火山凝灰岩及びシルト岩
lltf 淡灰色火山凝灰岩	st(H) シルト岩(硬質部)	nlv(I) 安山岩溶岩(塊状・不規則性節理部)	表土
dltf 暗灰色火山凝灰岩	sd(W) 堆積岩(風化部)	blv 安山岩溶岩(角礫状)	埋戻・盛土材
tb 凝灰角礫岩		da デイサイト	断層
atf 酸性凝灰岩		ba 玄武岩(角礫状)	シーム
ptf 軽石凝灰岩			
py(C) 火山砕屑岩(クリンカー質部)			
py(W) 火山砕屑岩(風化部)			

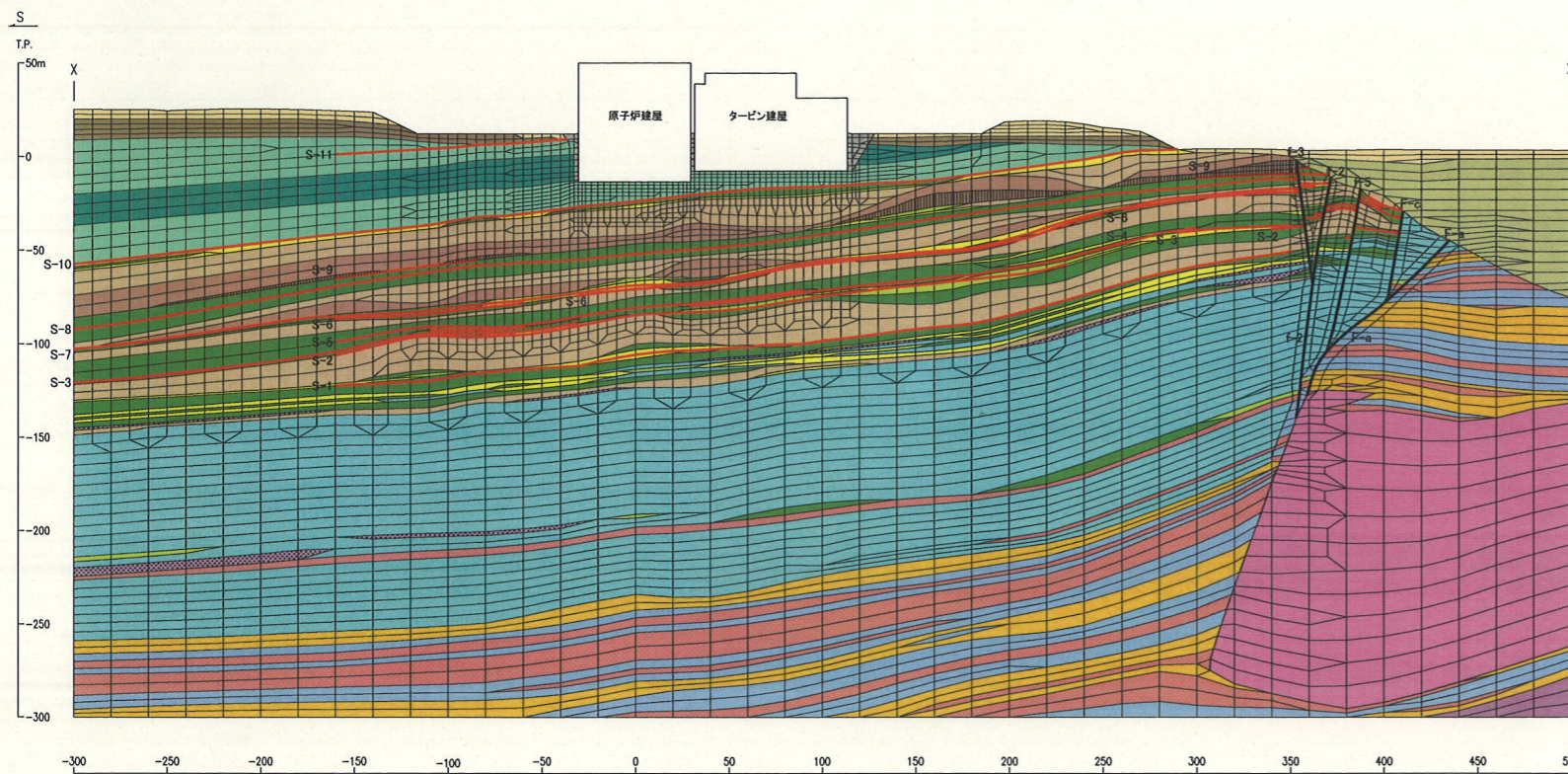


図-3(1) 解析用要素分割図(X-X'断面)

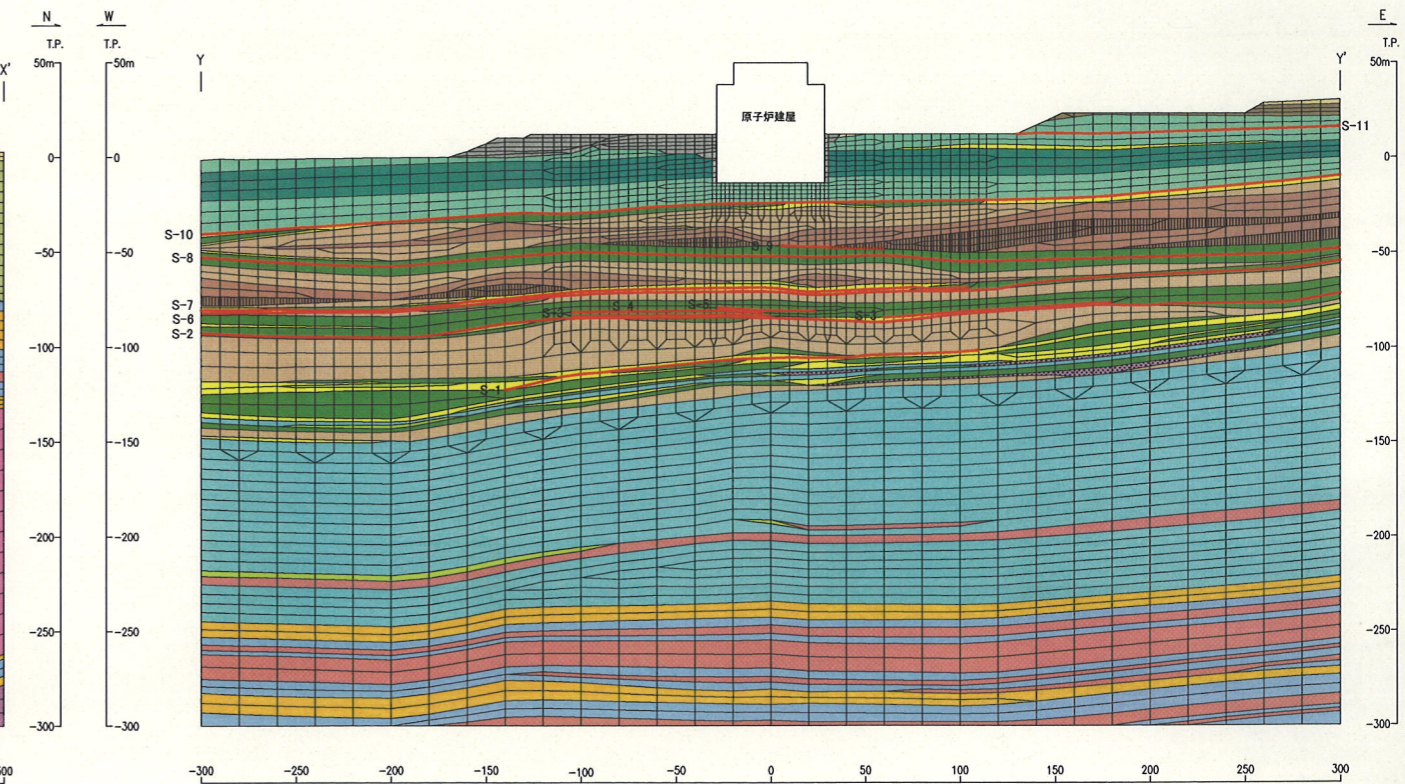


図-3(2) 解析用要素分割図(Y-Y'断面)

PS 検層による速度層断面図を図-4に示す。

速度層区分	P波速度 Vp (km/s)	S波速度 Vs (km/s)	動ポアソン比 ν_d
①	0.84	0.36	0.45
②	1.91	0.83	0.38
③	2.63	1.12	0.39
④	1.81	0.64	0.43
⑤	2.08	0.90	0.38
北①	1.86	0.57	0.45
北②	1.69	0.49	0.45
北③	1.86	0.67	0.43
北④	3.77	1.63	0.39

動ポアソン比 ν_d のうち、速度層①については慣用値を設定
その他の速度層についてはVp, Vsより算定

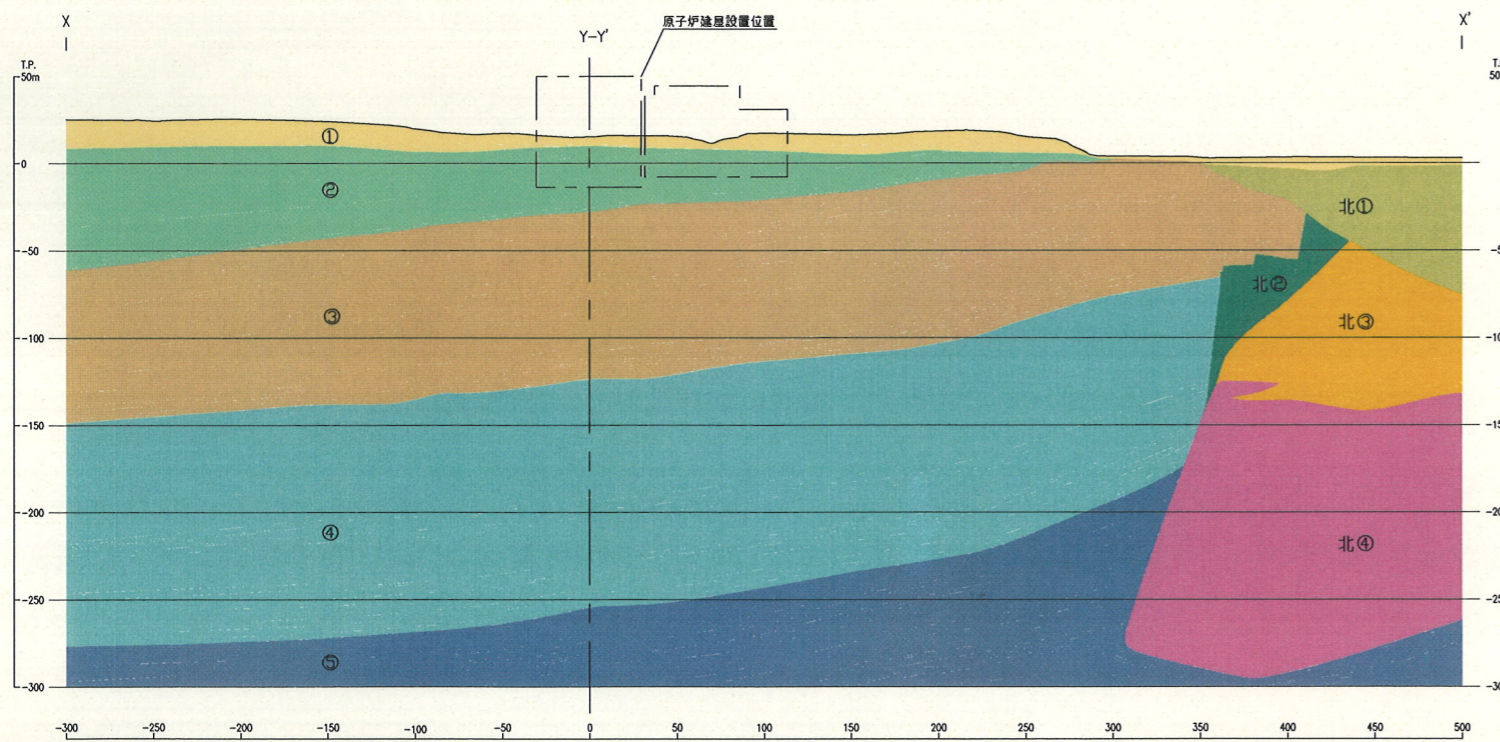


図-4(1) PS 検層による速度層断面図 (X - X' 断面)

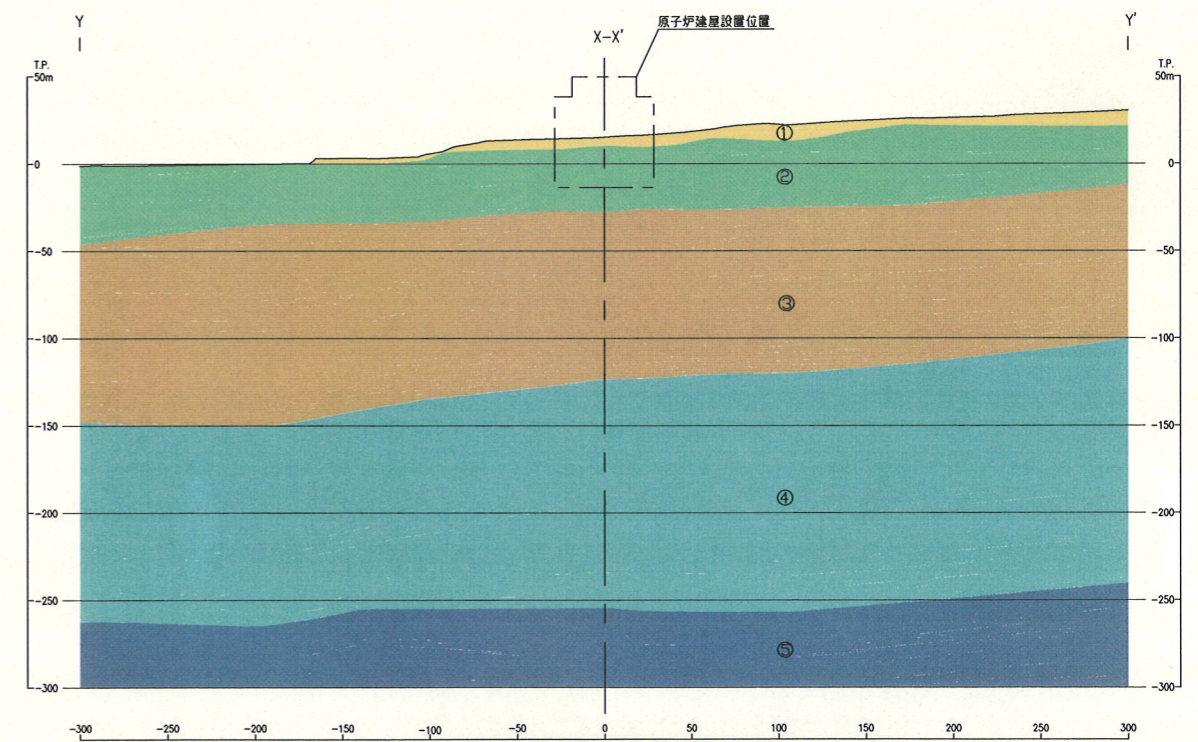


図-4(2) PS 検層による速度層断面図 (Y - Y' 断面)

I. 原子炉建屋基礎地盤の安定性検討

常時応力算定時における境界条件は、図-5 に示すとおりモデル下端を固定境界、側方を鉛直ローラとしている。動的FEM解析における境界条件は、図-6 に示すとおりモデル下端を粘性境界、側方をエネルギー伝達境界としている。

地下水位は、図-7 に示すとおり地表面及び基礎スラブ上面に設定している。

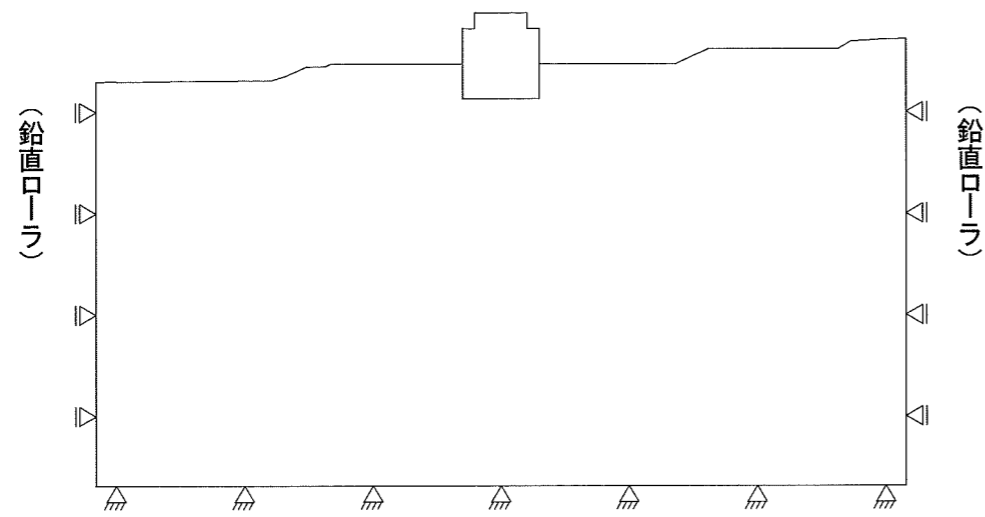


図-5 常時応力算定時における境界条件

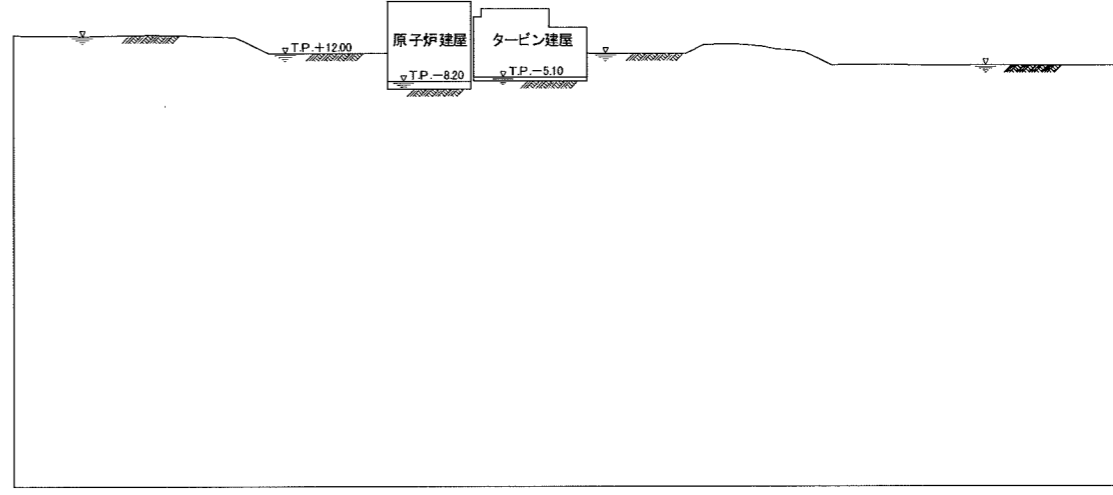


図-7(1) 地下水位設定図 (X-X' 断面)

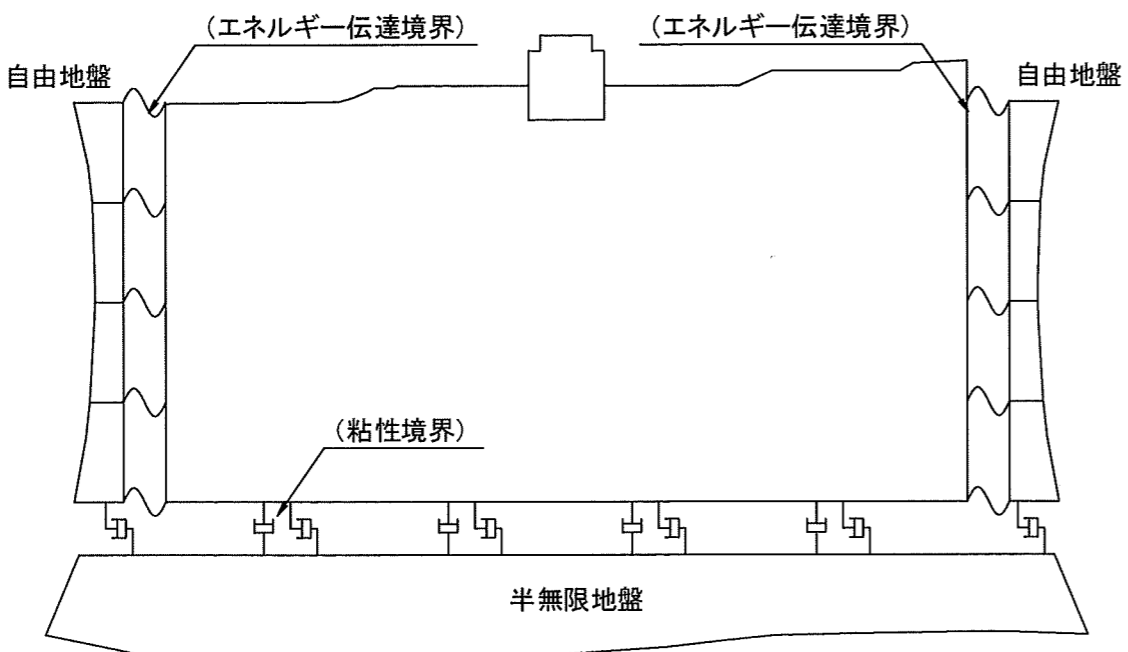


図-6 動的FEM解析における境界条件

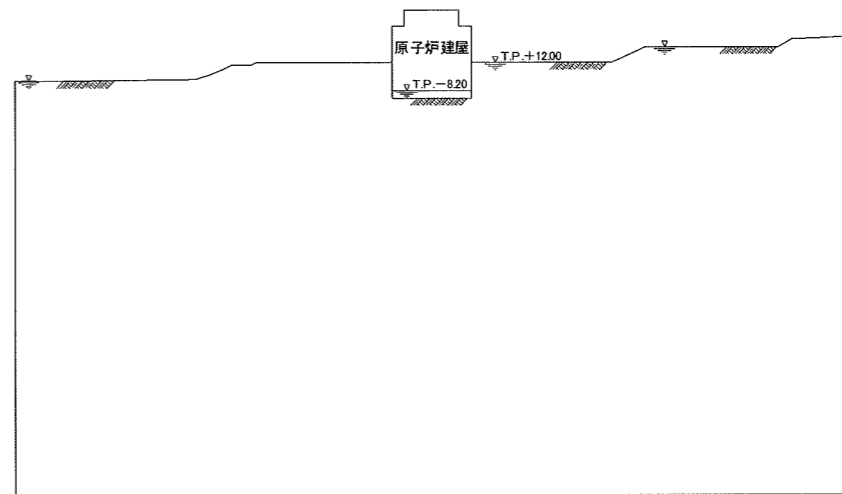


図-7(2) 地下水位設定図 (Y-Y' 断面)

(2) 解析物性値

解析用物性値を表-2 に示す。

表-2(1) 解析用物性値

	物理特性		強度特性		動的変形特性			静的変形特性					
	密度 γ (g/cm ³)		せん断強度 τ (N/mm ²)	残留強度 (N/mm ²)	動せん断弾性係数 G_d ($\times 10^8$ N/mm ²)	動ポアソン比 ν_d	減衰定数 h	静弾性係数 E (静せん断弾性係数 G) ($\times 10^8$ N/mm ²)	静ポアソン比 ν				
細粒凝灰岩	1.59	$(\tau/0.45)^2=1+\sigma/0.18$ $\tau=0.76+\sigma \tan 18^\circ$	$(-0.18\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.66\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 0.66\text{N/mm}^2$)	0.79 $\sigma^{0.43}$	表-2(2) 解析用物性値(動的変形特性) 参照	0.45	$\gamma > 4.4 \times 10^{-4}$ $h=0.041+0.084(\log \gamma + 3.4)$ $\gamma \leq 4.4 \times 10^{-4}$ h=0.041	G=0.0265 $\sigma^{0.36}$	0.48				
粗粒凝灰岩	1.91	$(\tau/2.44)^2=1+\sigma/1.51$ $\tau=3.90+\sigma \tan 9^\circ$	$(-1.51\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 3.44\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 3.44\text{N/mm}^2$)	1.55 $\sigma^{0.49}$									
淡灰色火山礫凝灰岩	1.83	$(\tau/0.61)^2=1+\sigma/0.21$ $\tau=1.43+\sigma \tan 8^\circ$	$(-0.21\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.21\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.21\text{N/mm}^2$)	1.12 $\sigma^{0.36}$									
暗灰色火山礫凝灰岩	1.95	$(\tau/1.51)^2=1+\sigma/0.58$ $\tau=2.73+\sigma \tan 14^\circ$	$(-0.58\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.10\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 2.10\text{N/mm}^2$)	1.34 $\sigma^{0.51}$									
凝灰角礫岩	2.05	$(\tau/0.50)^2=1+\sigma/0.15$ $\tau=1.27+\sigma \tan 16^\circ$	$(-0.15\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.58\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.58\text{N/mm}^2$)	1.22 $\sigma^{0.50}$									
酸性凝灰岩	1.69	$(\tau/1.56)^2=1+\sigma/0.79$ $\tau=2.36+\sigma \tan 12^\circ$	$(-0.79\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.58\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.58\text{N/mm}^2$)	1.48 $\sigma^{0.42}$									
軽石凝灰岩	1.65	$(\tau/0.78)^2=1+\sigma/0.33$ $\tau=1.47+\sigma \tan 11^\circ$	$(-0.33\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.25\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.25\text{N/mm}^2$)	1.16 $\sigma^{0.37}$									
火山砕屑岩 (クリンカー質部)	1.94	$(\tau/0.13)^2=1+\sigma/0.01$ $\tau=1.06+\sigma \tan 14^\circ$	$(-0.01\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.08\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.08\text{N/mm}^2$)	1.10 $\sigma^{0.51}$									
シルト岩	1.48	$(\tau/1.45)^2=1+\sigma/0.87$ $\tau=2.37+\sigma \tan 15^\circ$	$(-0.87\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 4.27\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 4.27\text{N/mm}^2$)	1.36 $\sigma^{0.34}$									
シルト岩 (硬質部)	1.52	$(\tau/2.37)^2=1+\sigma/1.35$ $\tau=3.76+\sigma \tan 6^\circ$	$(-1.35\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.49\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 2.49\text{N/mm}^2$)	1.37 $\sigma^{0.36}$									
安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部)	2.40	$\tau=1.32+\sigma \tan 45^\circ$		$\sigma \tan 47^\circ$									
安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部)	2.36	$\tau=1.53+\sigma \tan 29^\circ$		$\sigma \tan 47^\circ$									
安山岩溶岩 (角礫状)	2.18	$(\tau/1.09)^2=1+\sigma/0.38$ $\tau=1.12+\sigma \tan 38^\circ$	$(-0.38\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.05\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 0.05\text{N/mm}^2$)	1.27 $\sigma^{0.75}$									
デイサイト	2.39	$\tau=1.53+\sigma \tan 29^\circ$		$\sigma \tan 47^\circ$									
玄武岩 (角礫状)	2.13	$(\tau/1.36)^2=1+\sigma/0.91$ $\tau=1.45+\sigma \tan 27^\circ$	$(-0.91\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.79\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 0.79\text{N/mm}^2$)	1.04 $\sigma^{0.61}$									
断層内物質	1.60	$\tau=0.23+\sigma \tan 21^\circ$		$\tau=0.19+\sigma \tan 21^\circ$						0.45	$\gamma > 4.4 \times 10^{-4}$ $h=0.041+0.084(\log \gamma + 3.4)$ $\gamma \leq 4.4 \times 10^{-4}$ h=0.041	G=0.0265 $\sigma^{0.36}$	0.48
シーム	1.71	$\tau=0.24+\sigma \tan 19^\circ$		$\tau=0.19+\sigma \tan 18^\circ$						0.45	$\gamma > 9.0 \times 10^{-4}$ $h=0.021+0.159(\log \gamma + 3.0)$ $\gamma \leq 9.0 \times 10^{-4}$ h=0.021	G=0.0412 $\sigma^{0.22}$	0.48
火山砕屑岩 (風化部)	1.57	$\tau=0.07+\sigma \tan 8^\circ$		$\tau=0.07+\sigma \tan 7^\circ$						0.45	$\gamma > 2.7 \times 10^{-5}$ $h=0.024+0.034(\log \gamma + 4.6)$ $\gamma \leq 2.7 \times 10^{-5}$ h=0.024	0.121 $\sigma^{0.65}$	0.48
堆積岩 (風化部)	2.00	$\tau=0.39+\sigma \tan 20^\circ$		$\tau=0.39+\sigma \tan 19^\circ$	0.45	$\gamma > 8.8 \times 10^{-5}$ $h=0.022+0.067(\log \gamma + 4.1)$ $\gamma \leq 8.8 \times 10^{-5}$ h=0.022	0.143 $\sigma^{0.65}$	0.49					
表土	1.47	$\tau=0.03+\sigma \tan 10^\circ$		$\tau=0.02+\sigma \tan 10^\circ$	0.45	$\gamma > 2.4 \times 10^{-4}$ $h=0.019+0.082(\log \gamma + 3.6)$ $\gamma \leq 2.4 \times 10^{-4}$ h=0.019	0.123 $\sigma^{0.53}$	0.48					
埋戻・盛土材	1.90	$\tau=0.25+\sigma \tan 14^\circ$		$\tau=0.25+\sigma \tan 14^\circ$	0.45	$\gamma > 2.8 \times 10^{-5}$ $h=0.013+0.045(\log \gamma + 4.6)$ $\gamma \leq 2.8 \times 10^{-5}$ h=0.013	0.053 $\sigma^{0.31}$	0.48					

※初期応力解析では、初期地圧測定結果を踏まえ、静的変形特性は一律な物性値 (E=100N/mm², $\nu=0.49$) を使用している。

表-2(2) 解析用物性値 (動的変形特性)

速度層区分	岩盤区分	動せん断弾性係数 G_d ($\times 10^8$ N/mm ²)	動ポアソン比 ν_d
②	細粒凝灰岩	1.10	0.38
	淡灰色火山礫凝灰岩	1.26	
	暗灰色火山礫凝灰岩	1.34	
	凝灰角礫岩	1.41	
③	細粒凝灰岩	1.99	0.39
	粗粒凝灰岩	2.40	
	暗灰色火山礫凝灰岩	2.45	
	火山砕屑岩 (クリンカー質部)	2.43	
	シルト岩	1.86	
	安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部)	3.01	
	安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部)	2.96	
	安山岩溶岩 (角礫状)	2.73	
④	粗粒凝灰岩	0.78	0.43
	暗灰色火山礫凝灰岩	0.80	
	酸性凝灰岩	0.69	
	軽石凝灰岩	0.68	
	火山砕屑岩 (クリンカー質部)	0.79	
	シルト岩	0.61	
	シルト岩 (硬質部)	0.62	
⑤	酸性凝灰岩	1.37	0.38
	軽石凝灰岩	1.34	
	シルト岩 (硬質部)	1.23	
	玄武岩 (角礫状)	1.73	
北②	粗粒凝灰岩	0.46	0.45
	酸性凝灰岩	0.41	
	シルト岩	0.36	
	シルト岩 (硬質部)	0.36	
北③	酸性凝灰岩	0.76	0.43
	軽石凝灰岩	0.74	
	シルト岩	0.66	
	シルト岩 (硬質部)	0.68	
北④	デイサイト	1.07	0.39
	デイサイト	6.35	

(3) 地震力

表-3 に動的FEM解析の検討ケースを示す。基準地震動は、図-8 に示す S_s-1 及び S_s-2 の2種類とし、図-9 に入力地震動設定の考え方を示す。

水平方向： 基準地震動 S_s (水平方向) を、炉心位置において一次元応答解析により入力基盤面 (T. P. -300m) まで引戻した地震波

鉛直方向： 基準地震動 S_s (鉛直方向) を、炉心位置において一次元応答解析により入力基盤面 (T. P. -300m) まで引戻した地震波

表-3 動的FEM解析検討ケース

解析手法	解析断面	地震力
動的FEM解析	X-X' 断面	基準地震動 S_s-1 及び S_s-2
	Y-Y' 断面	

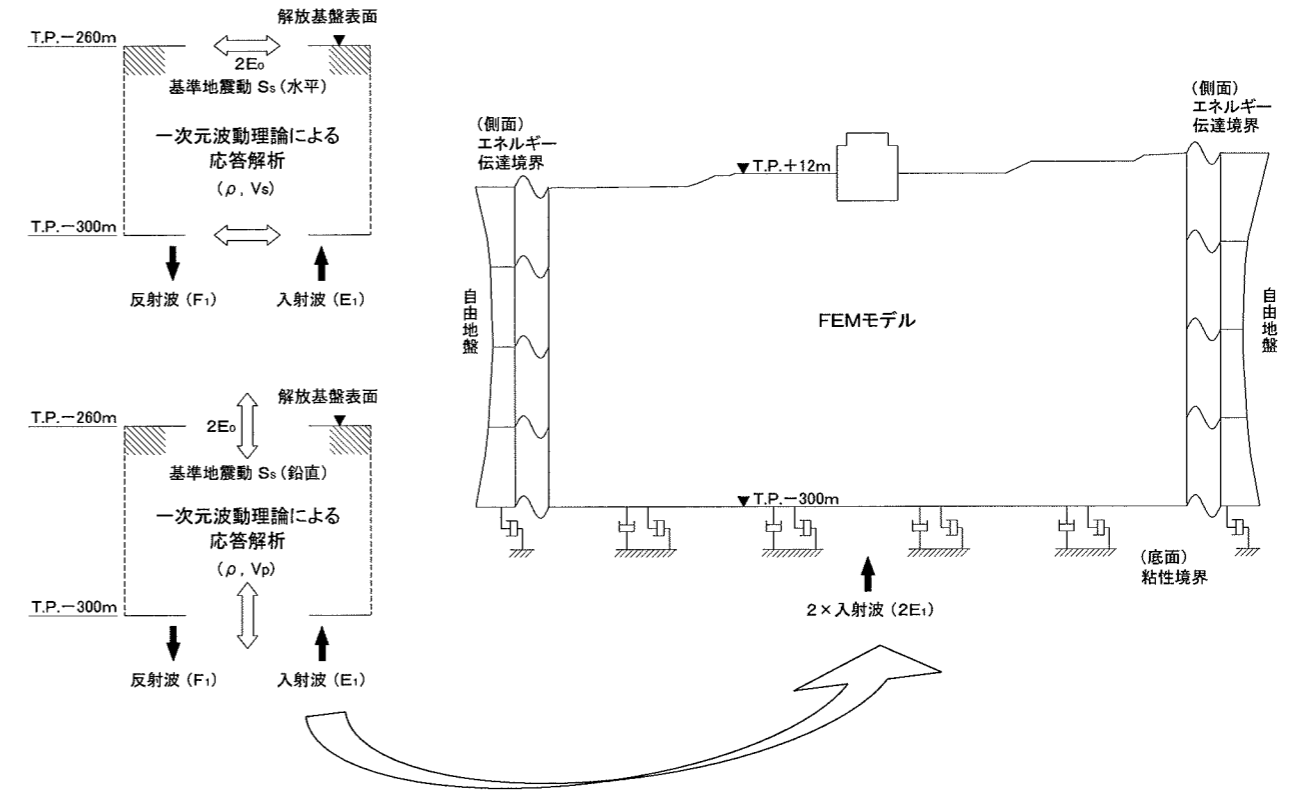


図-9 入力地震動設定の考え方

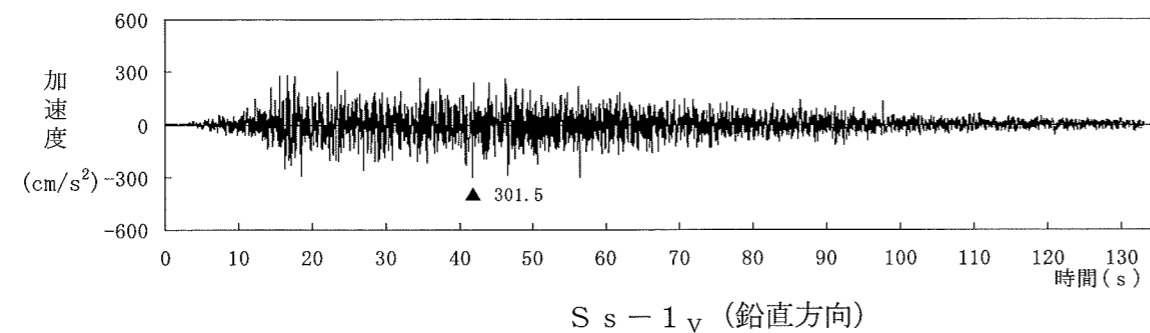
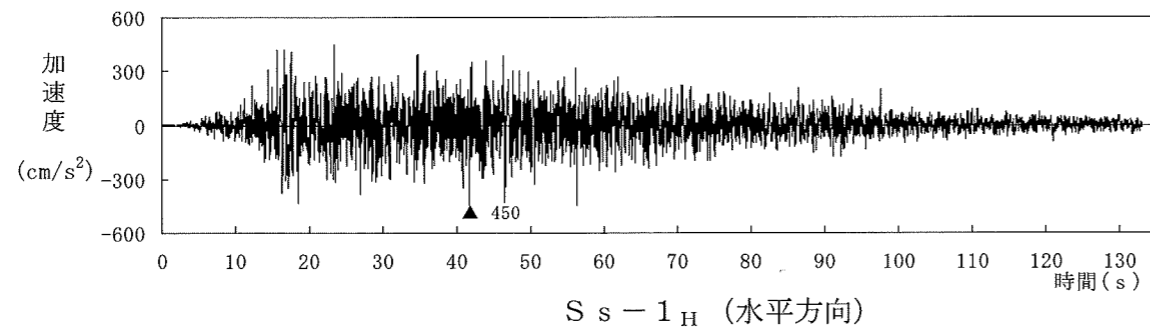


図-8(1) 基準地震動 S_s-1

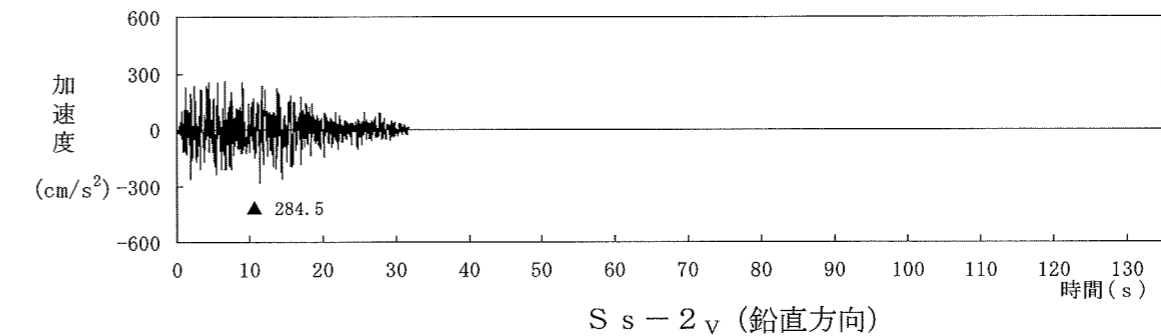
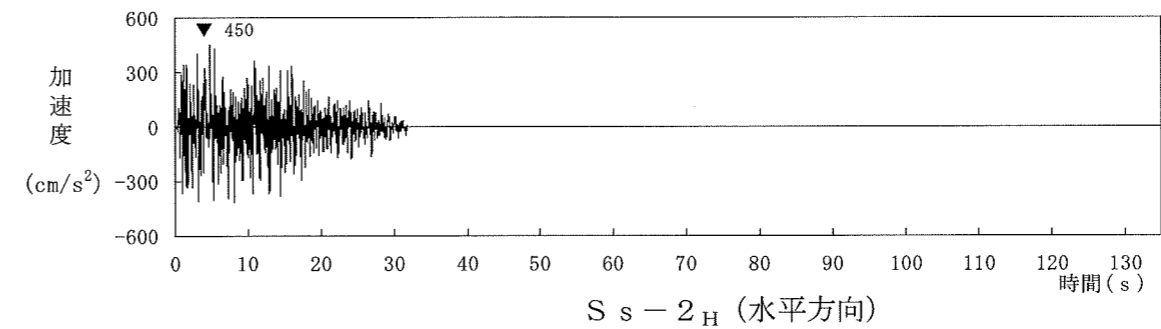


図-8(2) 基準地震動 S_s-2

2.2 解析手法

動的FEM解析による安定性検討フローを図-10に示す。

- 動的FEM解析は、等価線形化法により動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性を考慮した周波数応答解析手法を用いている。
- 等価線形解析においては、動的鉛直動を考慮し、初期の動せん断弾性係数及び動ポアソン比からあらかじめ体積弾性係数を求めておき、動せん断弾性係数が変動しても体積弾性係数は初期値一定として解析を実施している。
- 動的応力は、水平地震動による応答解析及び鉛直地震動による応答解析結果を同時刻で重ね合わせることで求められている。

2.3 安定性評価

(1) 支持力に対する検討

原子炉建屋の接地圧が最大となる時刻における主応力分布と要素ごとの安全率を求め、建屋基礎底面の支持力について検討している。

(2) すべりに対する検討

原子炉建屋基礎底面沿いの想定すべり線、断層及びシームを通る想定すべり線並びに応力状態を考慮した想定すべり線について検討するとともに、すべり安全率が最小となる時刻における主応力分布と要素ごとの安全率について検討している。

(3) 沈下に対する検討

原子炉建屋の相対変位量を求め、建屋基礎の傾斜について検討している。

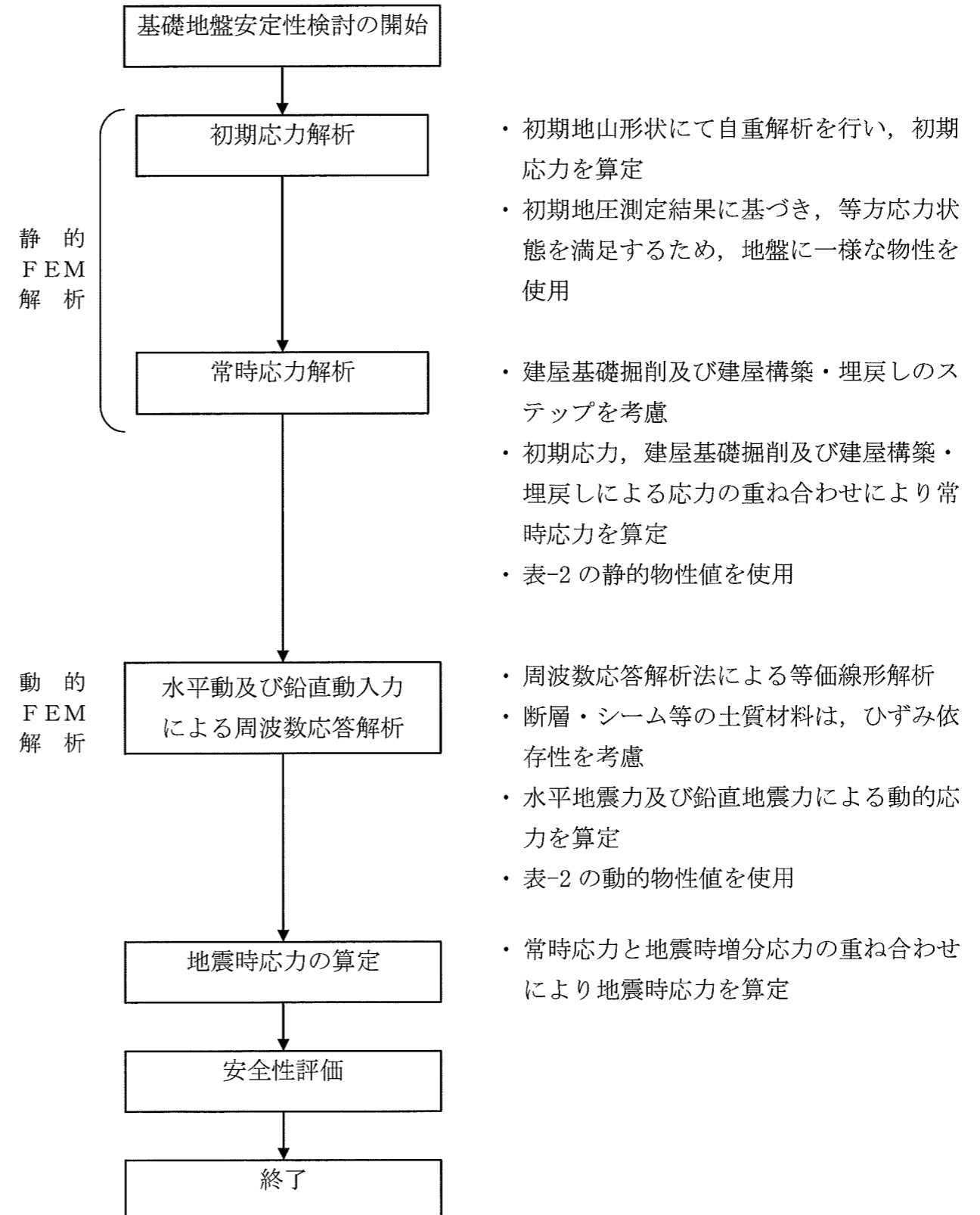


図-10 動的FEM解析による安定性検討フロー

II. 原子炉建屋基礎地盤の安定性検討 (比較解析)

1. 既往のFEM解析事例

強度特性の低減及び変形特性の低減が基礎地盤安定性に与える影響について検討している、既往のFEM解析事例を表-4に示す。

解析結果によれば、強度特性を低減させた場合には基礎地盤のすべり安全率が低下するが、変形特性を低減させた場合にはすべり安全率及び建屋基礎傾斜のいずれもほぼ基本解析と同等であり、変形特性や地盤の非線形性が基礎地盤安定性に与える影響は小さいとしている。

表-4 既往の基礎地盤FEM解析事例 (最小すべり安全率及び最大建屋基礎傾斜)

	解析条件				解析結果				基本解析との比較
	基本解析に対する物性値の変更内容	解析手法	地震力	最小すべり安全率		最大建屋基礎傾斜			
				比較解析	基本解析	比較解析	基本解析		
強度特性を低減させた解析	断層内物質及びシームの強度特性を低減させた解析	断層内物質及びシームの強度特性： 平均値 - 1σ	動的FEM	水平方向：基準地震動 S ₂ 鉛直方向：地盤 0.1G, 建屋 0.23G	3.1	3.6	同右	1/12,000	すべり安全率低下
	シームの応力履歴を考慮して強度特性を低減させた解析	応力履歴を考慮する範囲のシームの強度特性： 平均値 × 0.7	同上	同上	3.2	3.6	同右	1/12,000	すべり安全率低下
	シームの風化部を考慮して強度特性を低減させた解析	風化部を考慮する範囲のシームの強度特性： τ = 0.0 (N/mm ²)	同上	同上	3.4	3.6	同右	1/12,000	すべり安全率低下
変形特性を低減させた解析	断層内物質及びシームの変形特性を低減させた解析 ¹⁾	断層内物質及びシームの変形特性： 平均値 - 1σ	静的FEM	水平方向：地盤 0.2G, 建屋 3C ₁ 鉛直方向：地盤 0.1G, 建屋 0.24G	3.4	3.4	1/5,900	1/6,000	すべり安全率ほぼ同等 建屋基礎傾斜ほぼ同等
	地盤剛性の非線形性を考慮した解析 ²⁾	引張降伏要素及びせん断破壊要素の剛性を低減	同上	同上	4.3	4.3	1/5,900	1/6,000	すべり安全率ほぼ同等 建屋基礎傾斜ほぼ同等
	淡灰色火山礫凝灰岩の変形特性を低減させた解析 ²⁾	割れ目の影響を考慮する範囲の淡灰色火山礫凝灰岩の変形特性： 平均値 - 1σ	同上	同上	3.6	3.6	1/3,500	1/3,700	すべり安全率ほぼ同等 建屋基礎傾斜ほぼ同等

1) 解析の内容は、参考資料を参照。

2) 淡灰色火山礫凝灰岩の割れ目を対象とした岩盤変形試験結果と、岩盤変形試験結果7点の平均値 - 1σ (σ : 標準偏差) がほぼ等しいことから、変形特性 (静弾性係数) を低減させる範囲の静弾性係数は、岩盤変形試験結果の平均値 - 1σ の値を解析に用いるとしている。

2. 比較解析の実施方針

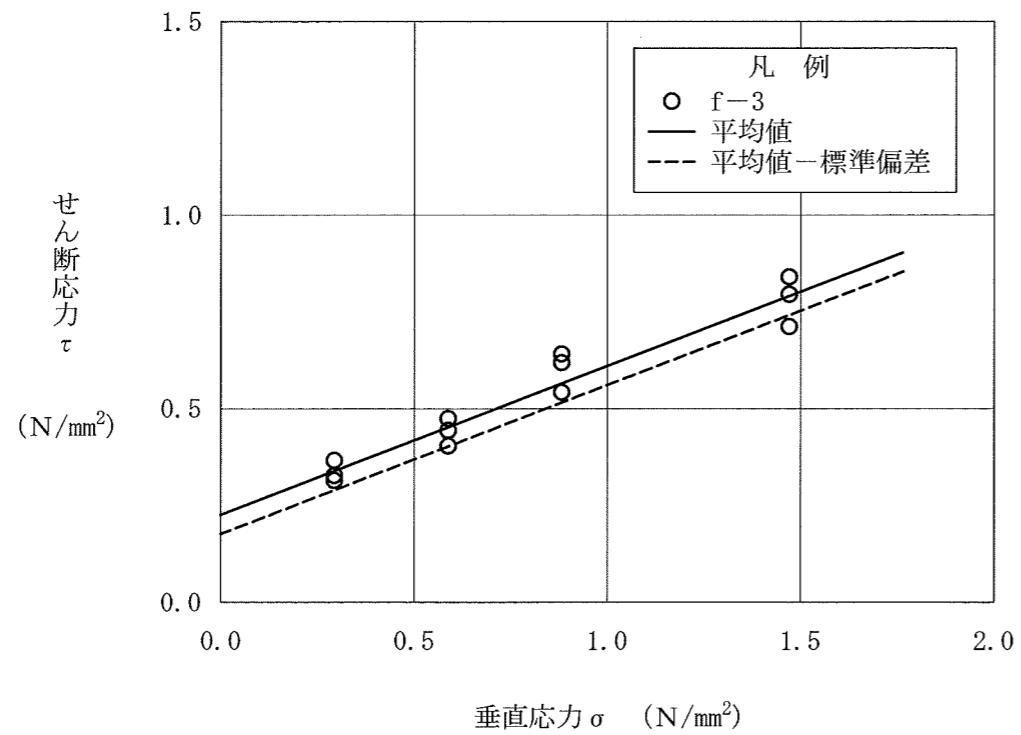
既往のFEM解析事例(表-4)をふまえ、基本解析に加え、以下に示す動的FEM解析による比較解析を実施する。

- 地盤物性の不確かさの評価として、基礎地盤の安定性に支配的な影響を与える弱層の強度特性及び変形特性のばらつきを考慮した解析を実施。
- 基礎地盤の安定性に影響を与える可能性のある場合の解析として、シームの応力履歴を考慮して強度特性を低減させた解析、シームの風化部を考慮して強度特性を低減させた解析、燃料補助建屋を付加したモデルによる解析及びT. P. +4.8mまでMMRによる建屋埋込み効果を考慮した解析を実施。

表-5 比較解析(動的FEM解析)の解析ケース

解析ケース		解析断面	地震力	備考
地盤物性のばらつきを考慮した解析	断層内物質及びシームの強度特性を低減させた解析	基本解析において すべり安全率が 最小となる断面 (X-X'断面)	基本解析において すべり安全率が 最小となる地震動 (基準地震動S _s -1)	断層内物質及びシームの強度特性：平均値-1σ(σ：標準偏差) 表-2の解析用物性値(断層内物質及びシーム以外は平均値) 図-11の断層内物質の強度特性、図-12のシームの強度特性 図-3の解析用要素分割図
	断層内物質及びシームの変形特性を低減させた解析			断層内物質及びシームの変形特性：平均値-1σ(σ：標準偏差) 表-2の解析用物性値(断層内物質及びシーム以外は平均値) 図-13の断層内物質の変形特性、図-14のシームの変形特性 図-3の解析用要素分割図
基礎地盤の安定性に影響を与える可能性のある場合を考慮した解析	シームの応力履歴を考慮して強度特性を低減させた解析 ¹⁾	基本解析において すべり安全率が 最小となる断面 (X-X'断面)	基本解析において すべり安全率が 最小となる地震動 (基準地震動S _s -1)	応力履歴を考慮する範囲のシームS-10の強度特性：平均値×0.7 表-2の解析用物性値(応力履歴を考慮する範囲のシームS-10以外は平均値) 図-15のシームの強度特性 図-16の解析用要素分割図
	シームの風化部を考慮して強度特性を低減させた解析 ²⁾			風化部を考慮する範囲のシームS-10の強度特性：τ=0.0(N/mm ²) 表-2の解析用物性値(風化部を考慮する範囲のシームS-10以外は平均値) 図-17の解析用要素分割図
	燃料補助建屋を付加したモデルによる解析	Y-Y'断面	基準地震動 S _s -1及びS _s -2	燃料補助建屋のFEMモデルを付加 表-6の解析用物性値 図-18の解析用要素分割図
	T. P. +4.8mまでMMRによる建屋埋込み効果を考慮した解析	X-X'断面 Y-Y'断面	基準地震動 S _s -1及びS _s -2	原子炉建屋と掘削面の間をT. P. +4.8mまでマンメイドロック(MMR)で埋戻し、建屋の埋込み状況を反映した解析モデル 表-6の解析用物性値 図-19の解析用要素分割図

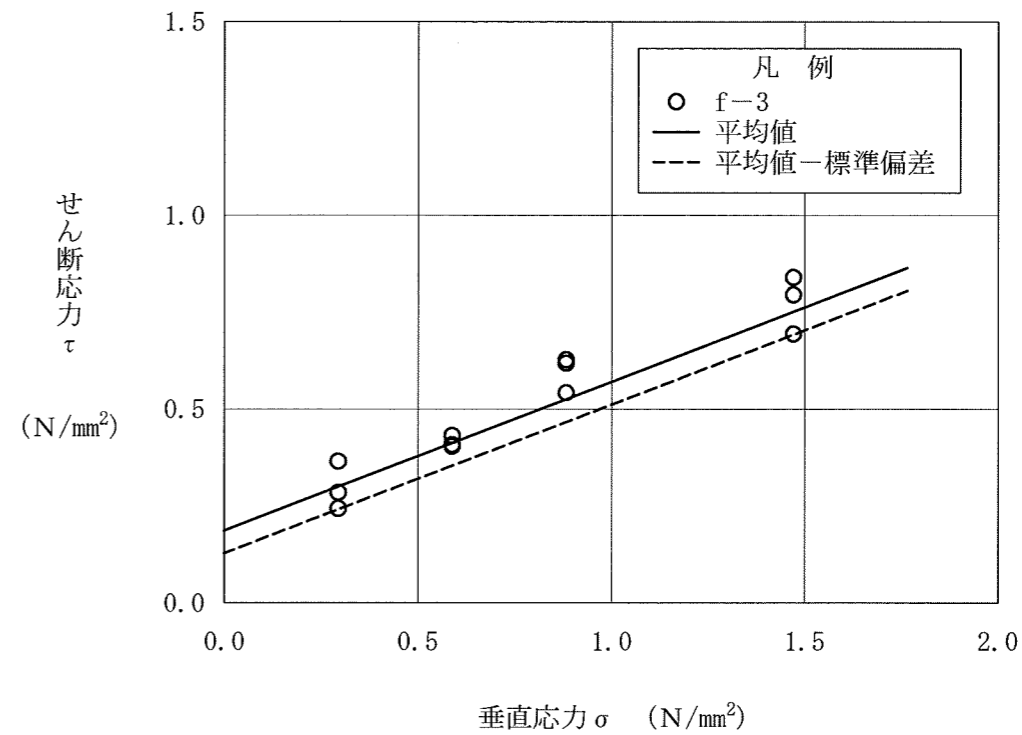
- 1) 原子炉建屋構築の過程において、地山状態(初期)から基礎の掘削(除荷)、建屋の構築・埋戻し(再載荷)により変化するシームの応力履歴に伴いシームの強度が低下することを考慮して、図-16に示す範囲のシームS-10の強度特性を低減させた解析を実施する。
- 2) 原子炉建屋直下に分布するシームのうちS-10については、地表面付近の一部が風化岩中に存在し、その部分が風化に伴い強度低下することを考慮して、図-17に示す範囲のシームのS-10の強度特性を低減させた解析を実施する。



ピーク強度

平均値 $\tau = 0.23 + \sigma \tan 21^\circ$ (N/mm²)

平均値-標準偏差 $\tau = 0.18 + \sigma \tan 21^\circ$ (N/mm²)

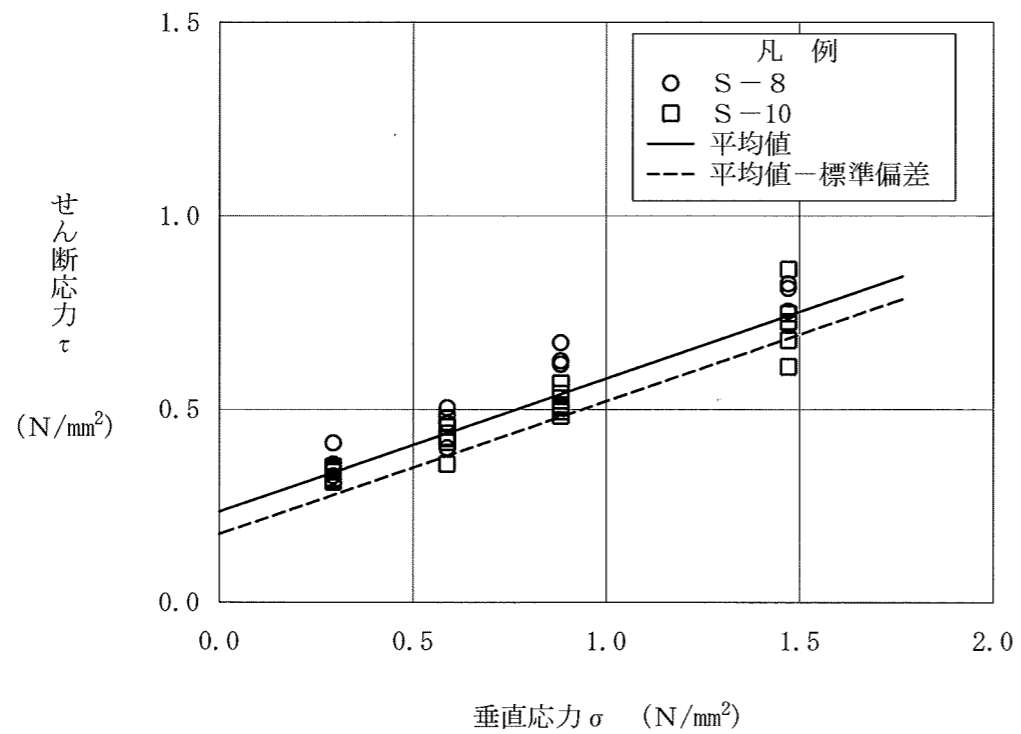


残留強度

平均値 $\tau = 0.19 + \sigma \tan 21^\circ$ (N/mm²)

平均値-標準偏差 $\tau = 0.13 + \sigma \tan 21^\circ$ (N/mm²)

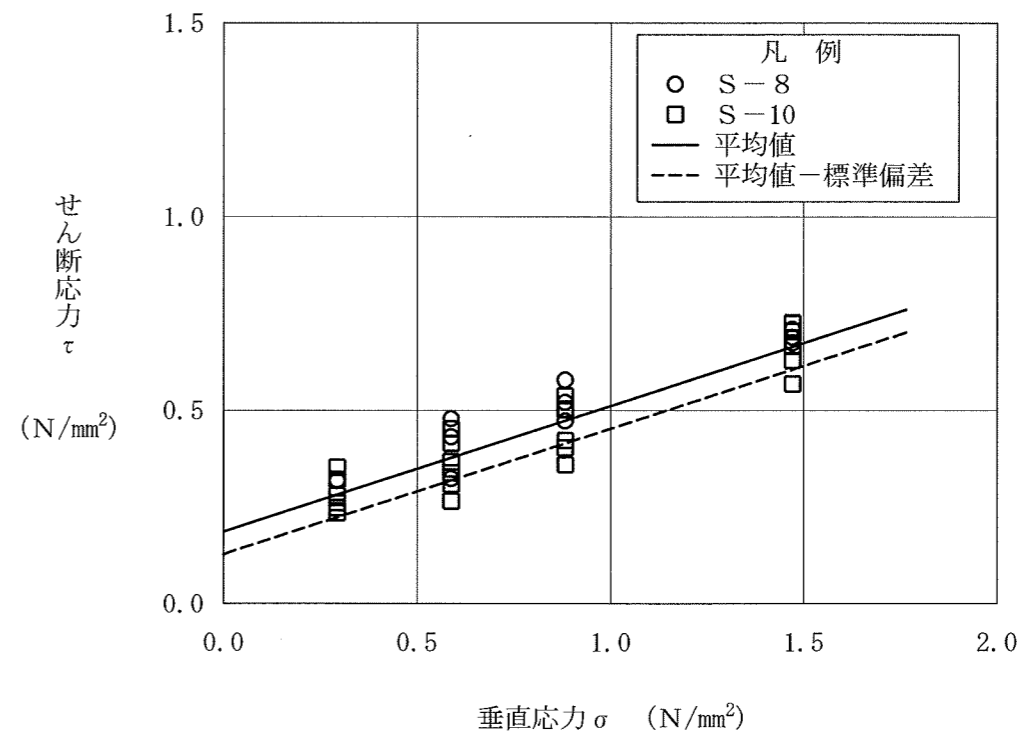
図-11 断層内物質の強度特性 (断層内物質及びシームの強度特性を低減させた解析)



ピーク強度

平均値 $\tau = 0.24 + \sigma \tan 19^\circ$ (N/mm²)

平均値-標準偏差 $\tau = 0.18 + \sigma \tan 19^\circ$ (N/mm²)

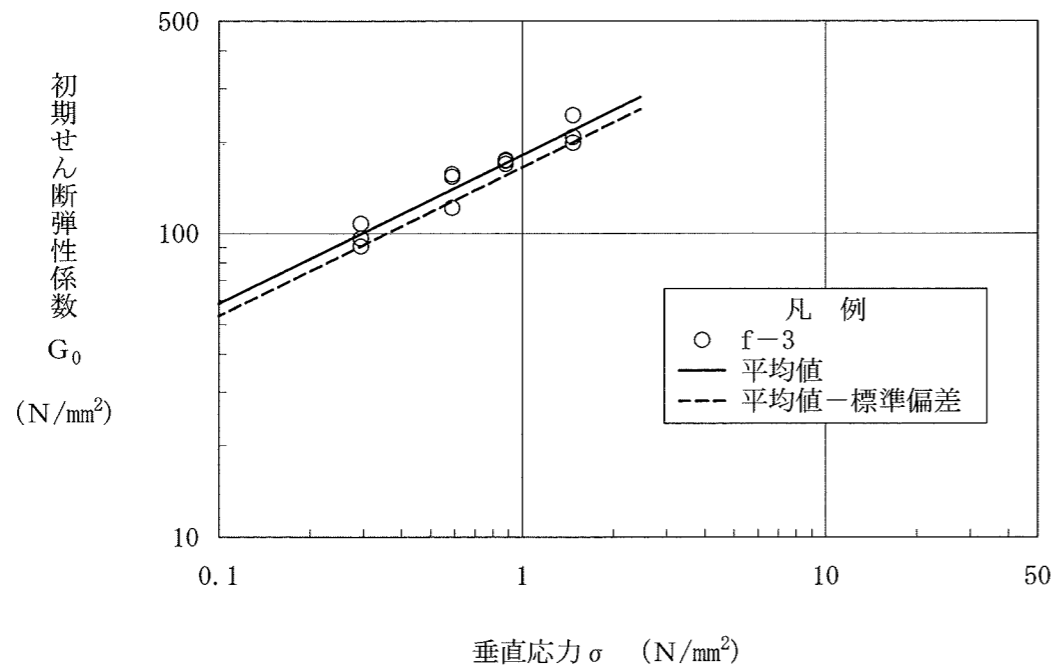


残留強度

平均値 $\tau = 0.19 + \sigma \tan 18^\circ$ (N/mm²)

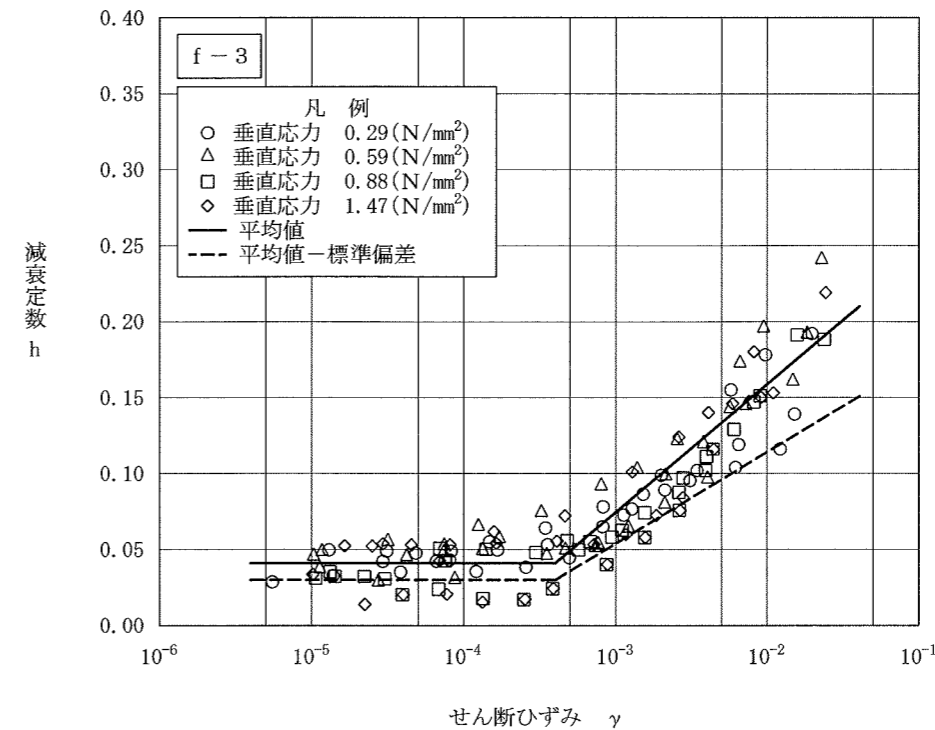
平均値-標準偏差 $\tau = 0.13 + \sigma \tan 18^\circ$ (N/mm²)

図-12 シームの強度特性 (断層内物質及びシームの強度特性を低減させた解析)



凡例
○ f-3
— 平均値
- - 平均値-標準偏差

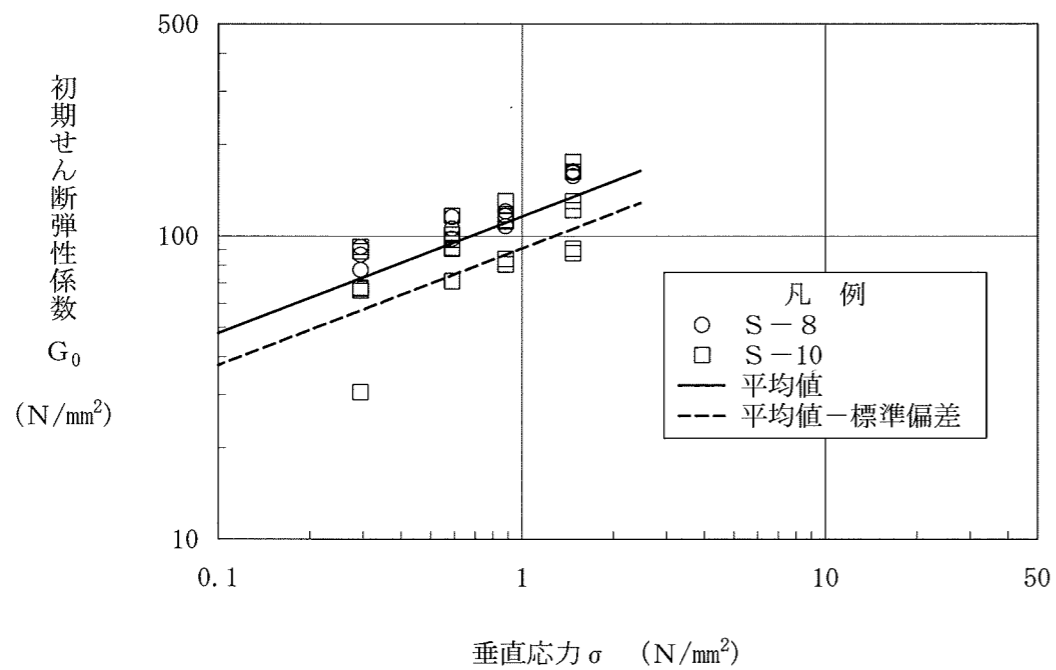
平均値 $G_0 = 181 \sigma^{0.49} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
 平均値-標準偏差 $G_0 = 165 \sigma^{0.49} \text{ (N/mm}^2\text{)}$



凡例
○ 垂直応力 0.29 (N/mm²)
△ 垂直応力 0.59 (N/mm²)
□ 垂直応力 0.88 (N/mm²)
◇ 垂直応力 1.47 (N/mm²)
— 平均値
- - 平均値-標準偏差

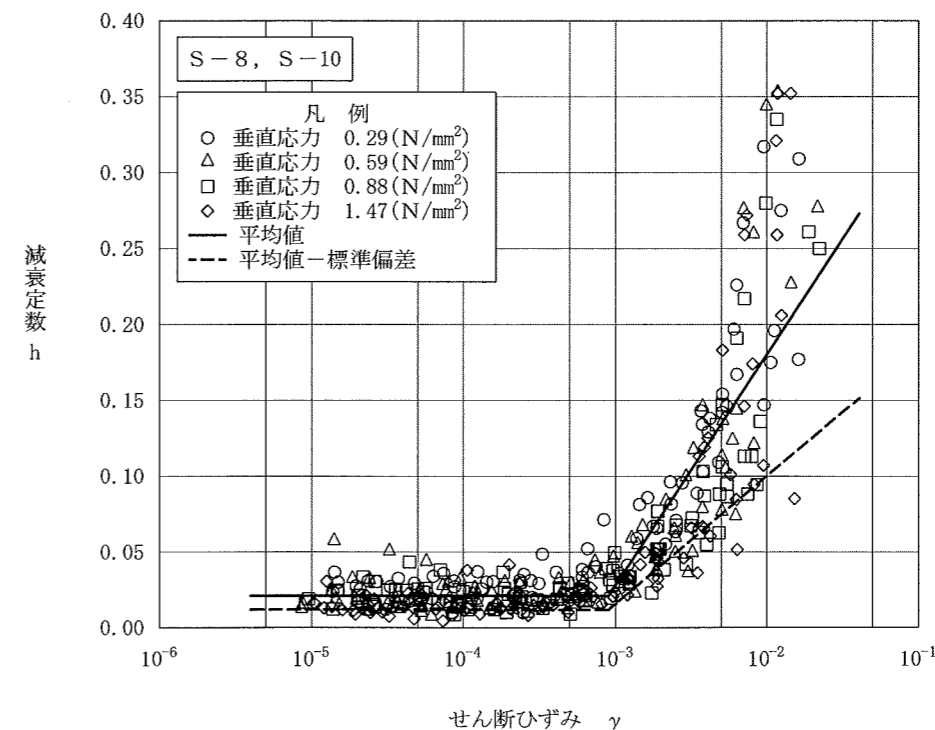
平均値 $h = 0.041$ ($\gamma \leq 4.4 \times 10^{-4}$)
 $h = 0.041 + 0.084(\log \gamma + 3.4)$ ($\gamma > 4.4 \times 10^{-4}$)
 平均値-標準偏差 $h = 0.030$ ($\gamma \leq 4.4 \times 10^{-4}$)
 $h = 0.030 + 0.060(\log \gamma + 3.4)$ ($\gamma > 4.4 \times 10^{-4}$)

図-13 断層内物質の変形特性 (断層内物質及びシームの変形特性を低減させた解析)



凡例
○ S-8
□ S-10
— 平均値
- - 平均値-標準偏差

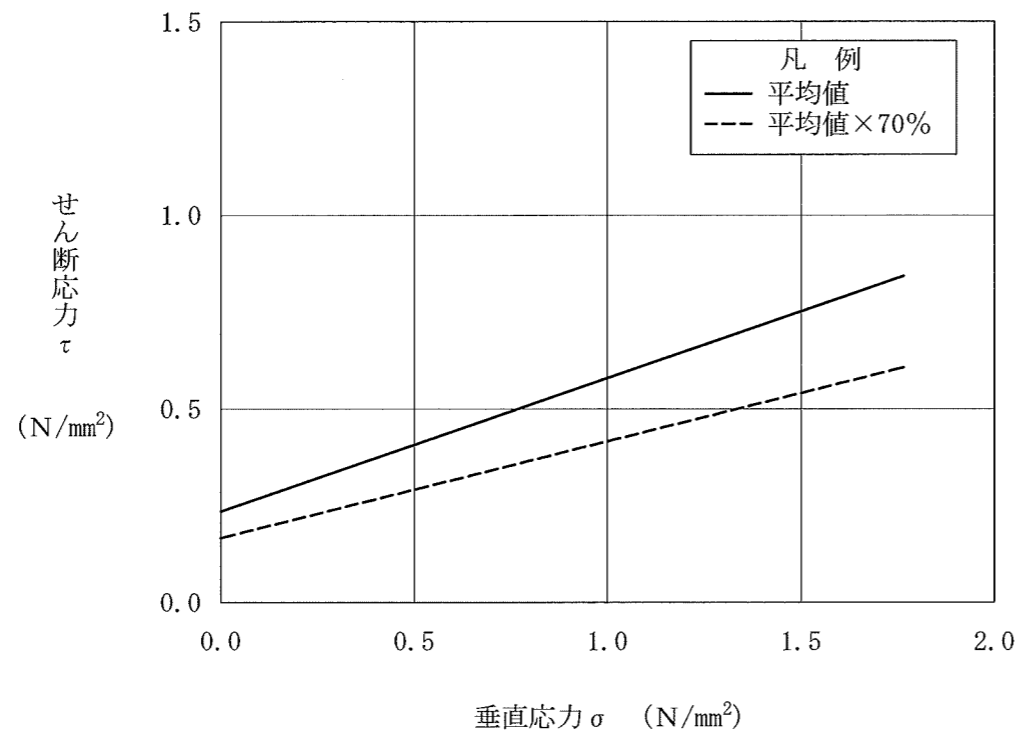
平均値 $G_0 = 116 \sigma^{0.39} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
 平均値-標準偏差 $G_0 = 91 \sigma^{0.39} \text{ (N/mm}^2\text{)}$



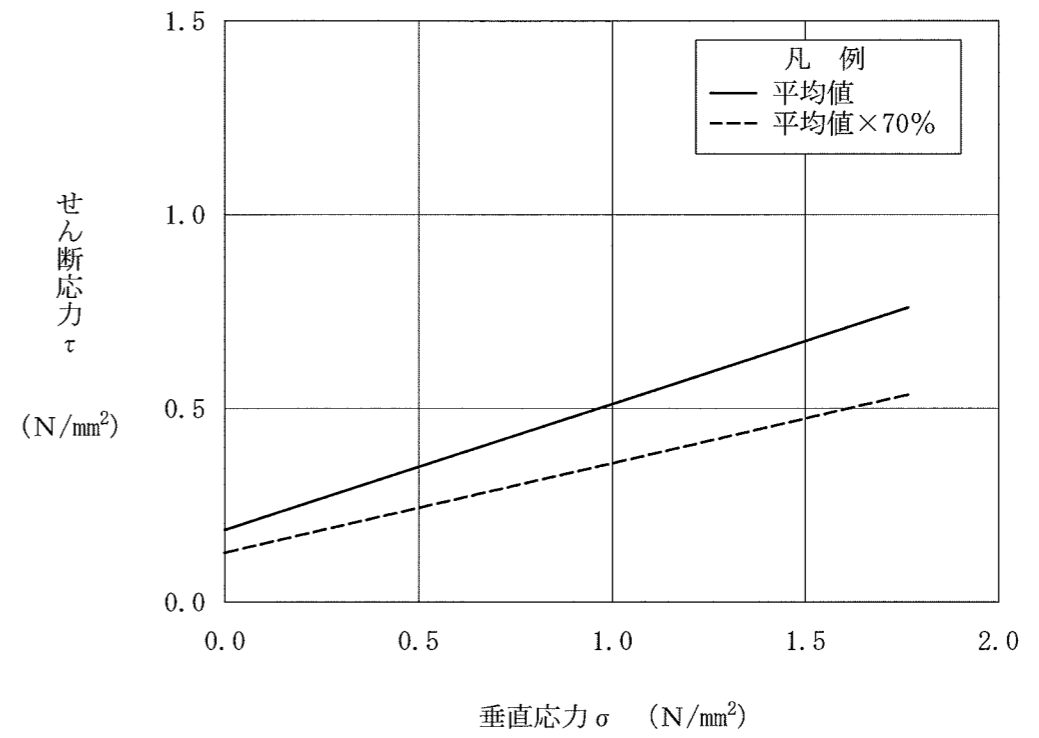
凡例
○ 垂直応力 0.29 (N/mm²)
△ 垂直応力 0.59 (N/mm²)
□ 垂直応力 0.88 (N/mm²)
◇ 垂直応力 1.47 (N/mm²)
— 平均値
- - 平均値-標準偏差

平均値 $h = 0.021$ ($\gamma \leq 9.0 \times 10^{-4}$)
 $h = 0.021 + 0.159(\log \gamma + 3.0)$ ($\gamma > 9.0 \times 10^{-4}$)
 平均値-標準偏差 $h = 0.012$ ($\gamma \leq 9.0 \times 10^{-4}$)
 $h = 0.012 + 0.088(\log \gamma + 3.0)$ ($\gamma > 9.0 \times 10^{-4}$)

図-14 シームの変形特性 (断層内物質及びシームの変形特性を低減させた解析)



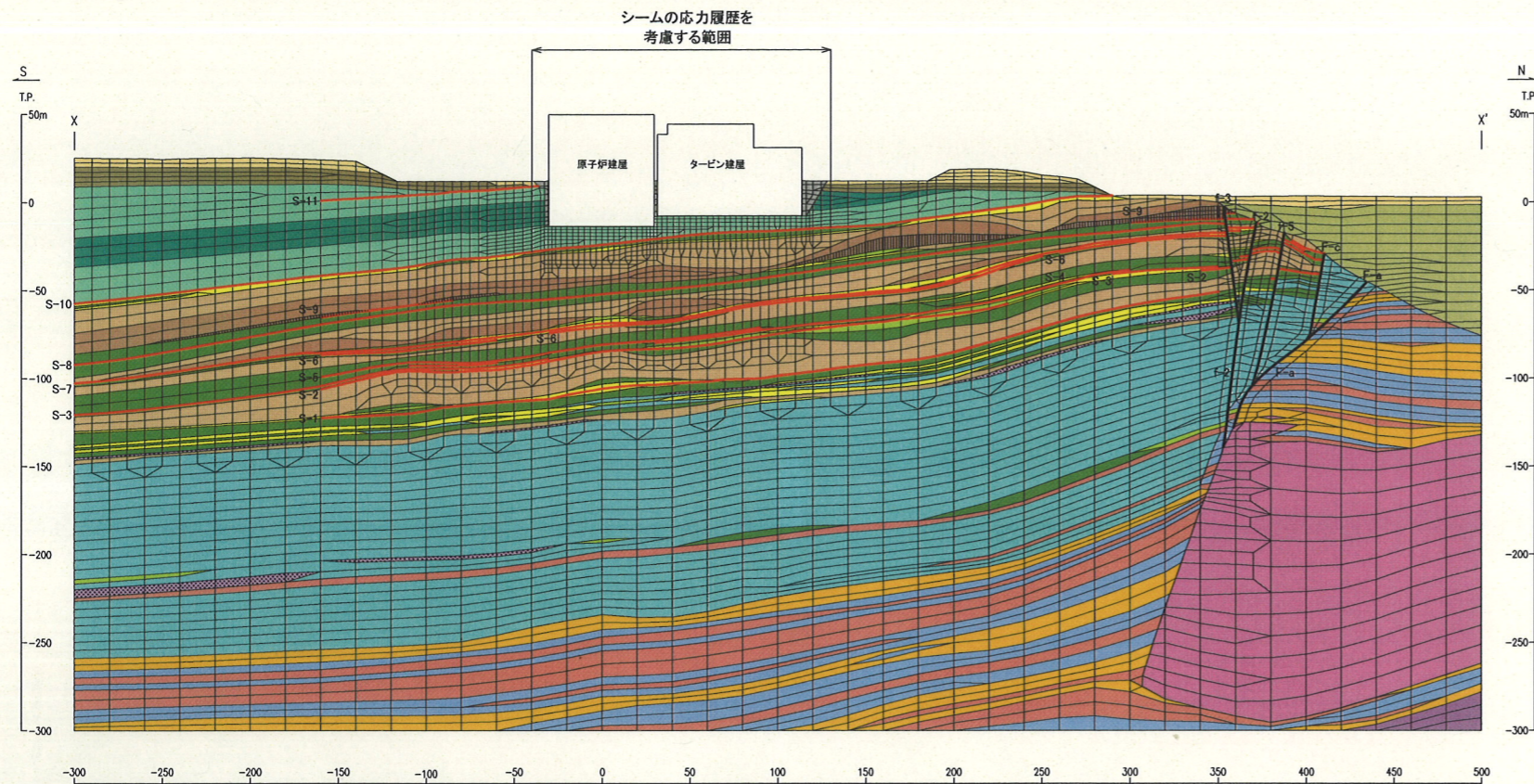
	ピーク強度	
平均値	$\tau = 0.24 + \sigma \tan 19^\circ$	(N/mm ²)
平均値×70%	$\tau = 0.17 + \sigma \tan 14^\circ$	(N/mm ²)



	残留強度	
平均値	$\tau = 0.19 + \sigma \tan 18^\circ$	(N/mm ²)
平均値×70%	$\tau = 0.13 + \sigma \tan 13^\circ$	(N/mm ²)

図-15 シームの強度特性
(シームの応力履歴を考慮して強度特性を低減させた解析)

II. 原子炉建屋基礎地盤の安定性検討 (比較解析)



- | | | | |
|----------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------------------|
| ctf 粗粒凝灰岩 | st シルト岩 | mfv(R) 安山岩溶岩(塊状・規則性節理部) | akt 細粒凝灰岩, 粗粒凝灰岩
暗灰色火山礫凝灰岩及びシルト岩 |
| lltf 淡灰色火山礫凝灰岩 | st(I) シルト岩(硬質部) | mfv(L) 安山岩溶岩(塊状・不規則性節理部) | 表土 |
| dltf 暗灰色火山礫凝灰岩 | sd(W) 堆積岩(風化部) | blv 安山岩溶岩(角礫状) | 埋戻・盛土材 |
| tb 凝灰角礫岩 | | da デイサイト | 断層 |
| atf 酸性凝灰岩 | | ba 玄武岩(角礫状) | シーム |
| ptf 軽石凝灰岩 | | | |
| py(C) 火山砕屑岩(クリンカー質部) | | | |
| py(W) 火山砕屑岩(風化部) | | | |

図-16 解析用要素分割図 (シームの応力履歴を考慮して強度特性を低減させた解析, X-X' 断面)

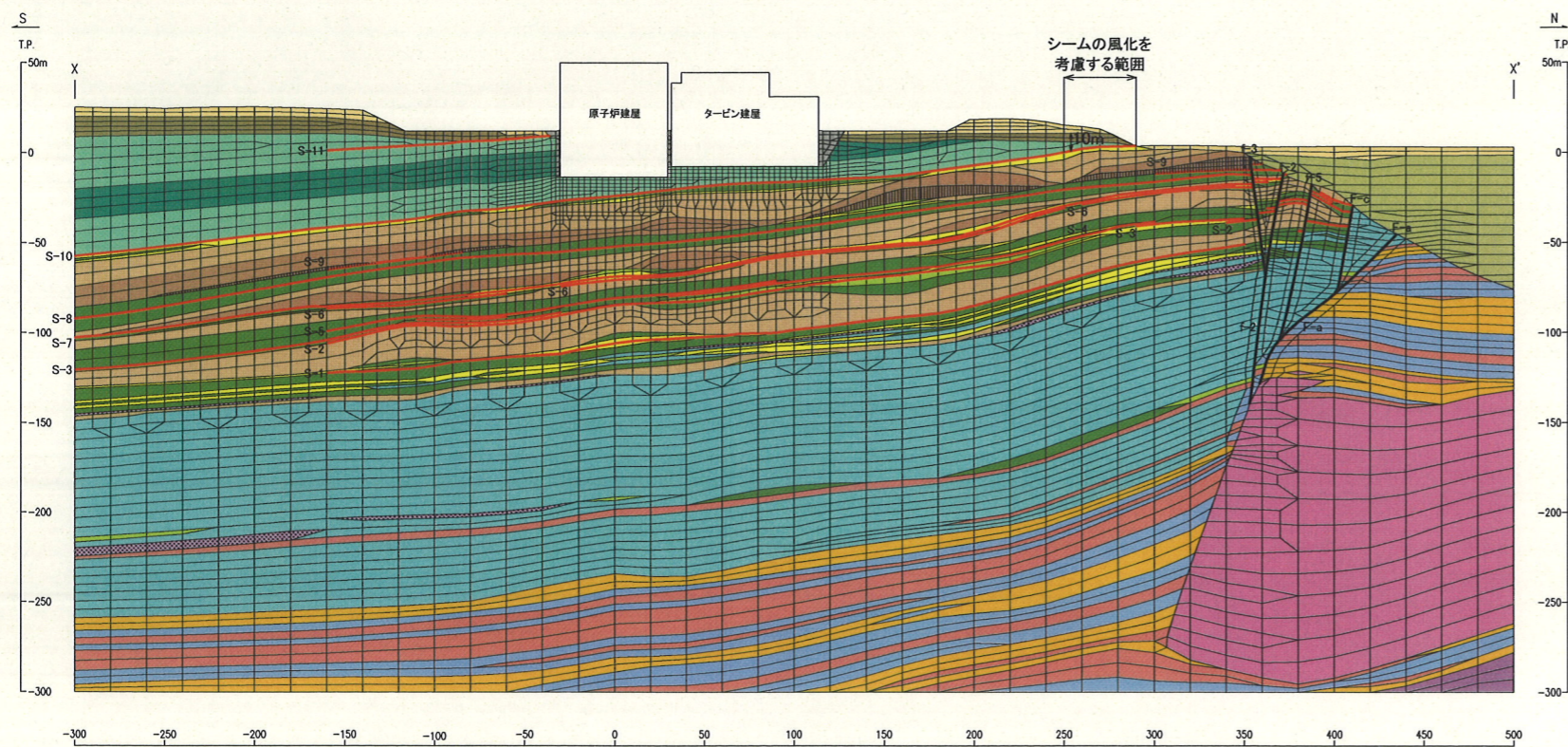


図-17 解析用要素分割図 (シームの風化部を考慮して強度特性を低減させた解析, X-X' 断面)

II. 原子炉建屋基礎地盤の安定性検討 (比較解析)

- | | | | |
|----------------------|-----------------|--------------------------|------------------------------------|
| ctf 粗粒凝灰岩 | st シルト岩 | m&v(R) 安山岩溶岩(塊状・規則性節理部) | alt 細粒凝灰岩, 粗粒凝灰岩
暗灰色火山凝灰岩及びシルト岩 |
| sttf 淡灰色火山凝灰岩 | st(H) シルト岩(硬質部) | m&v(L) 安山岩溶岩(塊状・不規則性節理部) | 表土 |
| dstf 暗灰色火山凝灰岩 | sd(W) 堆積岩(風化部) | blv 安山岩溶岩(角礫状) | 埋戻・盛土材 |
| tb 凝灰角礫岩 | | da デイサイト | MMR |
| atf 酸性凝灰岩 | | ba 玄武岩(角礫状) | 断層 |
| ptf 軽石凝灰岩 | | | シーム |
| py(C) 火山砕屑岩(クリンカー質部) | | | |
| py(W) 火山砕屑岩(風化部) | | | |

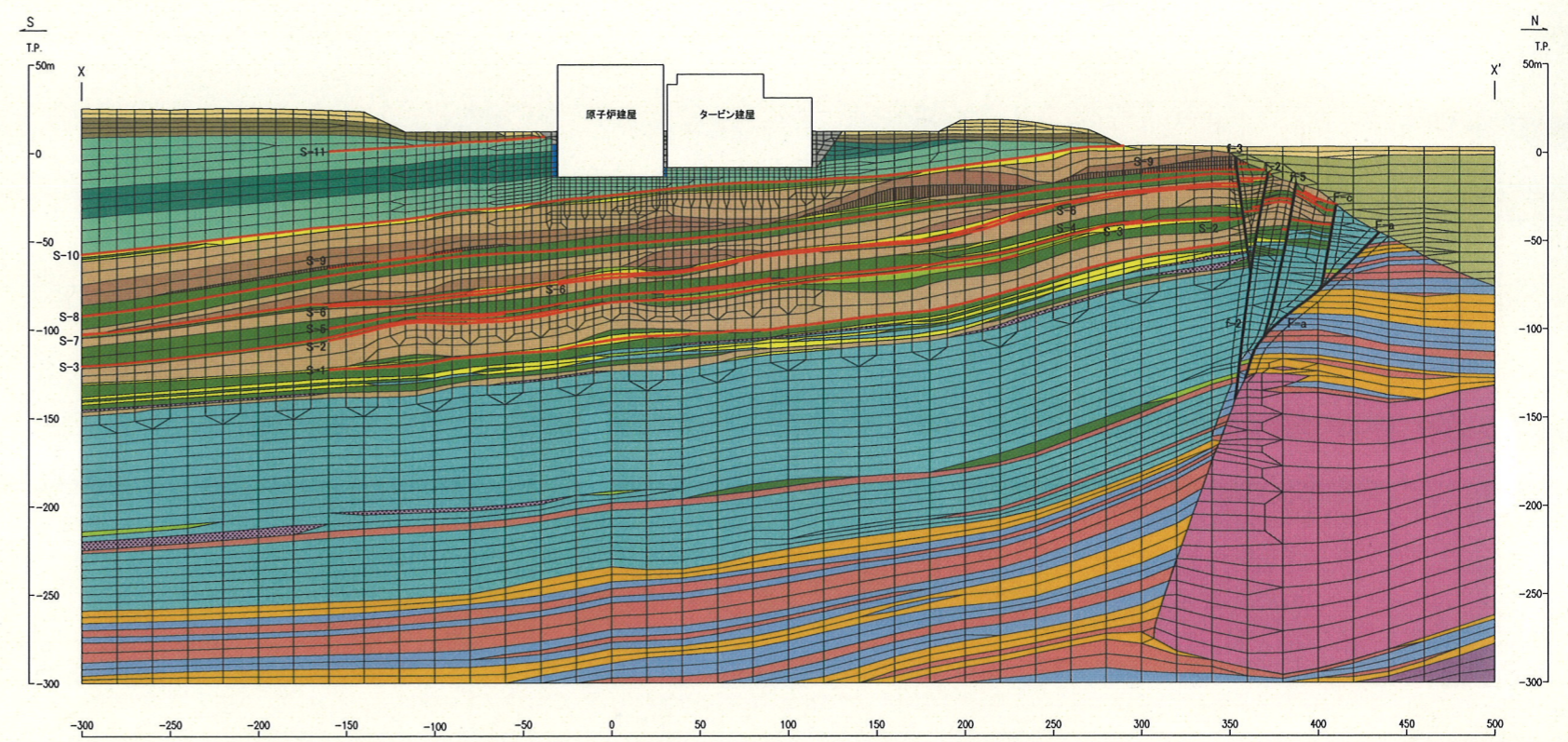


図-19(1) 解析用要素分割図
(T. P. +4.8mまでMMRによる建屋埋込み効果を考慮した解析, X-X' 断面)

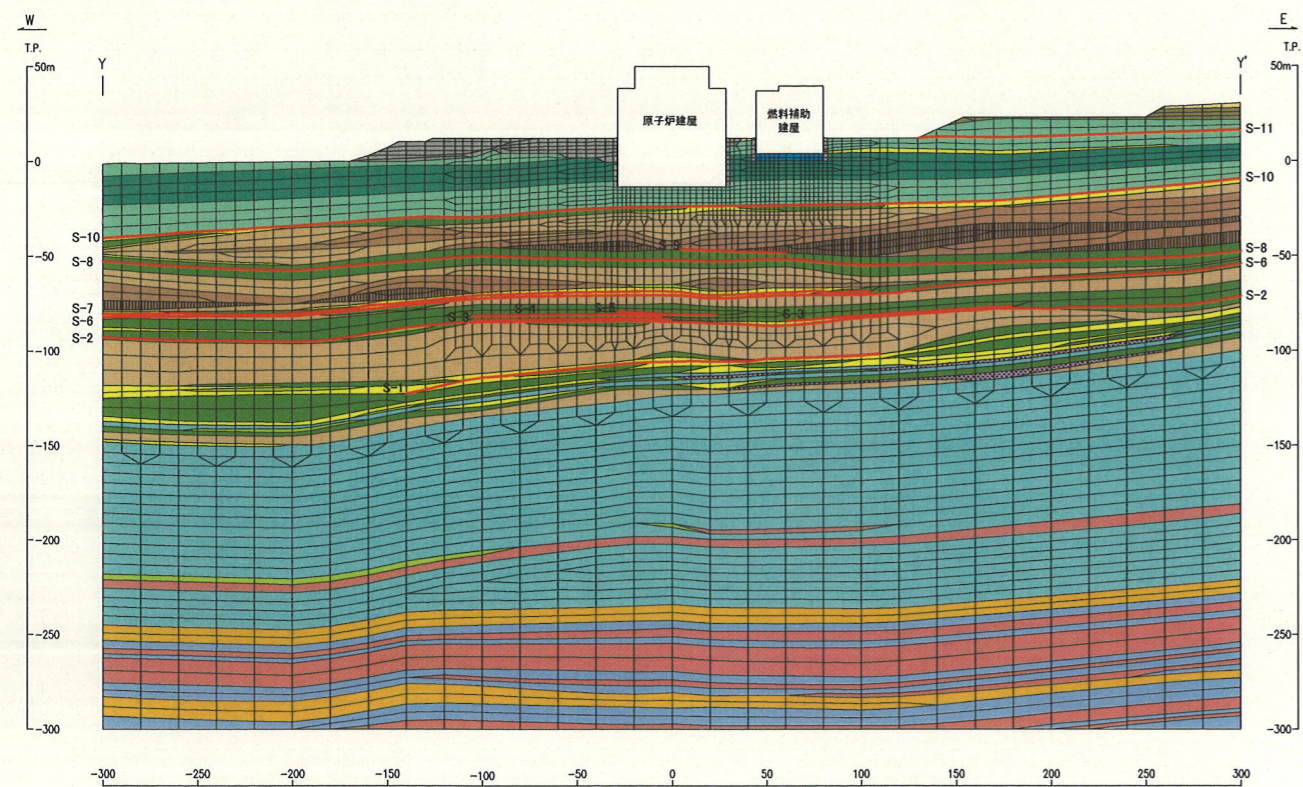


図-18 解析用要素分割図 (燃料補助建屋を付加したモデルによる解析, Y-Y' 断面)

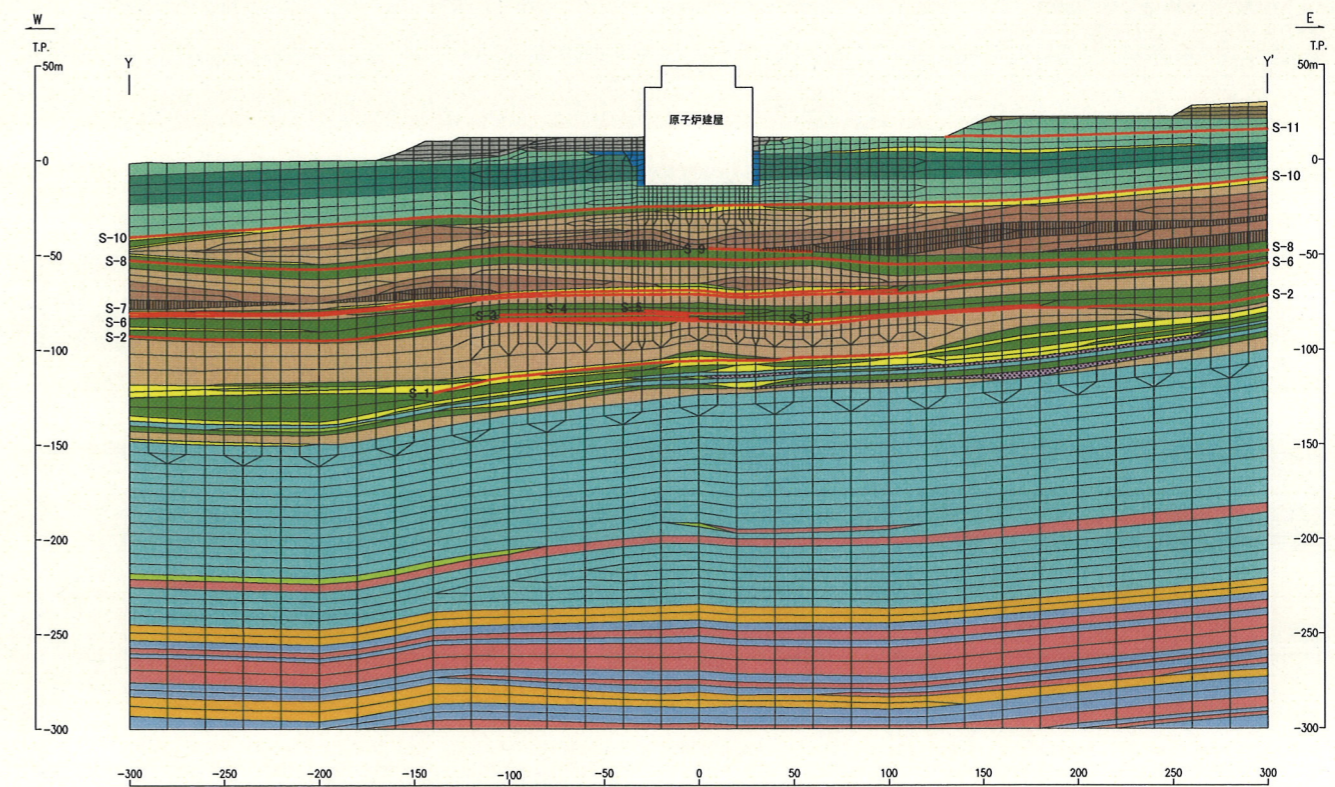


図-19(2) 解析用要素分割図
(T. P. +4.8mまでMMRによる建屋埋込み効果を考慮した解析, Y-Y' 断面)

II. 原子炉建屋基礎地盤の安定性検討(比較解析)

表-6(1) 解析用物性値

(燃料補助建屋を付加したモデルによる解析, T. P. +4.8mまで MMR による建屋埋込み効果を考慮した解析, 燃料補助建屋基礎地盤の安定性検討)

	物理特性		強度特性		動的変形特性			静的変形特性						
	密度 γ (g/cm ³)	せん断強度 τ (N/mm ²)	せん断強度 τ (N/mm ²)	残留強度 (N/mm ²)	動せん断弾性係数 G_d (動弾性係数 E_d) ($\times 10^3$ N/mm ²)	動ポアソン比 ν_d	減衰定数 h	静弾性係数 E (静せん断弾性係数 G) ($\times 10^3$ N/mm ²)	静ポアソン比 ν					
細粒凝灰岩	1.59	$(\tau/0.45)^2=1+\sigma/0.18$ $\tau=0.76+\sigma \tan 18^\circ$	$(-0.18\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.66\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 0.66\text{N/mm}^2$)	0.79 $\sigma^{0.43}$	表-6(2) 解析用物性値(動的変形特性) 参照	0.45	$\gamma > 4.4 \times 10^{-4}$ $h=0.041+0.084(\log \gamma +3.4)$ $\gamma \leq 4.4 \times 10^{-4}$ $h=0.041$	0.83 $\sigma^{0.29}$	0.43					
粗粒凝灰岩	1.91	$(\tau/2.44)^2=1+\sigma/1.51$ $\tau=3.90+\sigma \tan 9^\circ$	$(-1.51\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 3.44\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 3.44\text{N/mm}^2$)	1.55 $\sigma^{0.49}$						0.03	2.40 $\sigma^{0.13}$	0.45		
淡灰色火山礫凝灰岩	1.83	$(\tau/0.61)^2=1+\sigma/0.21$ $\tau=1.43+\sigma \tan 8^\circ$	$(-0.21\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.21\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.21\text{N/mm}^2$)	1.12 $\sigma^{0.36}$						0.03	1.36 $\sigma^{0.21}$	0.44		
暗灰色火山礫凝灰岩	1.95	$(\tau/1.51)^2=1+\sigma/0.58$ $\tau=2.73+\sigma \tan 14^\circ$	$(-0.58\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.10\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 2.10\text{N/mm}^2$)	1.34 $\sigma^{0.51}$						0.03	2.20 $\sigma^{0.13}$	0.45		
凝灰角礫岩	2.05	$(\tau/0.50)^2=1+\sigma/0.15$ $\tau=1.27+\sigma \tan 16^\circ$	$(-0.15\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.58\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.58\text{N/mm}^2$)	1.22 $\sigma^{0.50}$						0.03	1.41 $\sigma^{0.27}$	0.47		
酸性凝灰岩	1.69	$(\tau/1.56)^2=1+\sigma/0.79$ $\tau=2.36+\sigma \tan 12^\circ$	$(-0.79\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.58\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.58\text{N/mm}^2$)	1.48 $\sigma^{0.42}$						0.03	1.46 $\sigma^{0.18}$	0.45		
軽石凝灰岩	1.65	$(\tau/0.78)^2=1+\sigma/0.33$ $\tau=1.47+\sigma \tan 11^\circ$	$(-0.33\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.25\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.25\text{N/mm}^2$)	1.16 $\sigma^{0.37}$						0.03	0.65 $\sigma^{0.29}$	0.47		
火山砕屑岩 (クリンカー質部)	1.94	$(\tau/0.13)^2=1+\sigma/0.01$ $\tau=1.06+\sigma \tan 14^\circ$	$(-0.01\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.08\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 1.08\text{N/mm}^2$)	1.10 $\sigma^{0.51}$						0.03	0.20 $\sigma^{0.60}$	0.48		
シルト岩	1.48	$(\tau/1.45)^2=1+\sigma/0.87$ $\tau=2.37+\sigma \tan 15^\circ$	$(-0.87\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 4.27\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 4.27\text{N/mm}^2$)	1.36 $\sigma^{0.34}$						0.03	0.89 $\sigma^{0.21}$	0.44		
シルト岩 (硬質部)	1.52	$(\tau/2.37)^2=1+\sigma/1.35$ $\tau=3.76+\sigma \tan 6^\circ$	$(-1.35\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.49\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 2.49\text{N/mm}^2$)	1.37 $\sigma^{0.36}$						0.03	0.90 $\sigma^{0.20}$	0.45		
安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部)	2.40	$\tau=1.32+\sigma \tan 45^\circ$		$\sigma \tan 47^\circ$						0.03	2.18	0.19		
安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部)	2.36	$\tau=1.53+\sigma \tan 29^\circ$		$\sigma \tan 47^\circ$						0.03	1.63	0.28		
安山岩溶岩 (角礫状)	2.18	$(\tau/1.09)^2=1+\sigma/0.38$ $\tau=1.12+\sigma \tan 38^\circ$	$(-0.38\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.05\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 0.05\text{N/mm}^2$)	1.27 $\sigma^{0.75}$						0.03	1.70 $\sigma^{0.62}$	0.46		
デイサイト	2.39	$\tau=1.53+\sigma \tan 29^\circ$		$\sigma \tan 47^\circ$						0.03	1.63	0.26		
玄武岩 (角礫状)	2.13	$(\tau/1.36)^2=1+\sigma/0.91$ $\tau=1.45+\sigma \tan 27^\circ$	$(-0.91\text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.79\text{N/mm}^2)$ ($\sigma \geq 0.79\text{N/mm}^2$)	1.04 $\sigma^{0.61}$						0.03	2.17 $\sigma^{0.26}$	0.30		
断層内物質	1.60	$\tau=0.23+\sigma \tan 21^\circ$		$\tau=0.19+\sigma \tan 21^\circ$						$C_0=0.181 \sigma^{0.49}$ $G_d/G_0=1/(1+\gamma/0.0015)$	0.45	$\gamma > 4.4 \times 10^{-4}$ $h=0.041+0.084(\log \gamma +3.4)$ $\gamma \leq 4.4 \times 10^{-4}$ $h=0.041$	$G=0.0265 \sigma^{0.36}$	0.48
シーム	1.71	$\tau=0.24+\sigma \tan 19^\circ$		$\tau=0.19+\sigma \tan 18^\circ$						$C_0=0.116 \sigma^{0.39}$ $G_d/G_0=1/(1+\gamma/0.0039)$	0.45	$\gamma > 9.0 \times 10^{-4}$ $h=0.021+0.159(\log \gamma +3.0)$ $\gamma \leq 9.0 \times 10^{-4}$ $h=0.021$	$G=0.0412 \sigma^{0.22}$	0.48
火山砕屑岩 (風化部)	1.57	$\tau=0.07+\sigma \tan 8^\circ$		$\tau=0.07+\sigma \tan 7^\circ$						$C_0=0.115 \sigma^{0.25}$ $G_d/G_0=1/(1+\gamma/0.0010)$	0.45	$\gamma > 2.7 \times 10^{-5}$ $h=0.024+0.034(\log \gamma +4.6)$ $\gamma \leq 2.7 \times 10^{-5}$ $h=0.024$	0.121 $\sigma^{0.65}$	0.48
堆積岩 (風化部)	2.00	$\tau=0.39+\sigma \tan 20^\circ$		$\tau=0.39+\sigma \tan 19^\circ$	$C_0=0.69$ $G_d/G_0=1/(1+\gamma/0.0008)$	0.45	$\gamma > 8.8 \times 10^{-5}$ $h=0.022+0.067(\log \gamma +4.1)$ $\gamma \leq 8.8 \times 10^{-5}$ $h=0.022$	0.143 $\sigma^{0.66}$	0.49					
表土	1.47	$\tau=0.03+\sigma \tan 10^\circ$		$\tau=0.02+\sigma \tan 10^\circ$	$C_0=0.142 \sigma^{0.55}$ $G_d/G_0=1/(1+\gamma/0.0015)$	0.45	$\gamma > 2.4 \times 10^{-4}$ $h=0.019+0.082(\log \gamma +3.6)$ $\gamma \leq 2.4 \times 10^{-4}$ $h=0.019$	0.123 $\sigma^{0.53}$	0.48					
埋戻・盛土材	1.90	$\tau=0.25+\sigma \tan 14^\circ$		$\tau=0.25+\sigma \tan 14^\circ$	$C_0=0.563 \sigma^{0.61}$ $G_d/G_0=1/(1+\gamma/0.0004)$	0.45	$\gamma > 2.8 \times 10^{-5}$ $h=0.013+0.045(\log \gamma +4.6)$ $\gamma \leq 2.8 \times 10^{-5}$ $h=0.013$	0.053 $\sigma^{0.31}$	0.48					
MMR	2.35	$\tau=3.60+\sigma \tan 40^\circ$		$\tau=0.00$	$E_d=20.6$	0.20	0.03	20.6	0.20					

※初期応力解析では、初期地圧測定結果を踏まえ、静的変形特性は一般的な物性値 ($E=100\text{N/mm}^2$, $\nu=0.49$) を使用している。

表-6(2) 解析用物性値 (動的変形特性)

速度層区分	岩盤区分	動せん断弾性係数 G_d ($\times 10^3\text{N/mm}^2$)	動ポアソン比 ν_d
②	細粒凝灰岩	1.10	0.38
	淡灰色火山礫凝灰岩	1.26	
	暗灰色火山礫凝灰岩	1.34	
③	凝灰角礫岩	1.41	0.39
	細粒凝灰岩	1.99	
	粗粒凝灰岩	2.40	
	暗灰色火山礫凝灰岩	2.45	
	火山砕屑岩 (クリンカー質部)	2.43	
	シルト岩	1.86	
	安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部)	3.01	
	安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部)	2.96	
④	安山岩溶岩 (角礫状)	2.73	0.43
	粗粒凝灰岩	0.78	
	暗灰色火山礫凝灰岩	0.80	
	酸性凝灰岩	0.69	
	軽石凝灰岩	0.68	
	火山砕屑岩 (クリンカー質部)	0.79	
	シルト岩	0.61	
⑤	シルト岩 (硬質部)	0.62	0.38
	酸性凝灰岩	1.37	
	軽石凝灰岩	1.34	
	シルト岩 (硬質部)	1.23	
北②	玄武岩 (角礫状)	1.73	0.45
	粗粒凝灰岩	0.46	
	酸性凝灰岩	0.41	
北③	シルト岩	0.36	0.43
	シルト岩 (硬質部)	0.36	
	酸性凝灰岩	0.76	
	軽石凝灰岩	0.74	
	シルト岩	0.66	
北④	シルト岩 (硬質部)	0.68	0.39
	デイサイト	1.07	
北④	デイサイト	6.35	

Ⅲ. 燃料補助建屋基礎地盤の安定性検討

1. 慣用法による安定性検討

1.1 解析条件

(1) 解析断面

燃料補助建屋中心を通る南北方向断面である X-X' 断面と、これに直交する東西方向断面である Y-Y' 断面としている。

(2) 地震力

水平方向： 建屋に地震層せん断力係数 $3.0C_1$ に基づく地震力

鉛直方向： 建屋に $0.24G$

1.2 解析手法・安定性評価

(1) 支持力に対する検討

燃料補助建屋を剛体とみなし、かつ建屋に作用する荷重を建屋基礎底面地盤のみで支持させるものとし、その基礎底面における接地圧分布より燃料補助建屋基礎底面地盤（凝灰角礫岩）の常時及び地震時の支持力に対する安定性を検討している。

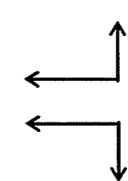
(2) 平面すべりに対する検討

燃料補助建屋基礎底面の岩盤区分である凝灰角礫岩のせん断強度として、淡灰色火山礫凝灰岩のブロックせん断試験結果から推定した強度 ($\tau = 0.47 + \sigma \tan 35^\circ$ (N/mm²)) を用いて、平面的なすべり安定性を検討している。平面すべりの検討ケースを表-7 に示す。

(3) 沈下に対する検討

燃料補助建屋築造による沈下量を求め、安全性を検討している。燃料補助建屋の沈下に対する検討位置を図-20 に示す。

表-7 慣用法検討ケース

解析手法	解析断面	地震力方向
慣用法 (平面すべり)	X-X' 断面	
	Y-Y' 断面	

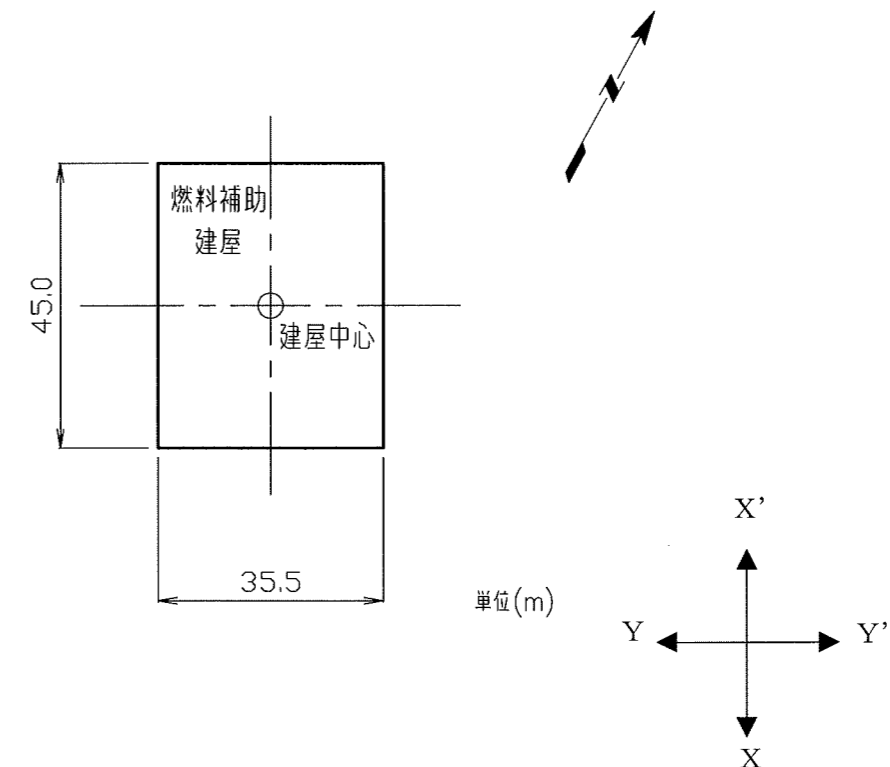


図-20 燃料補助建屋の沈下に対する検討位置

2. 動的FEM解析による安定性検討

2.1 解析条件

(1) 解析モデル

燃料補助建屋中心を通る南北方向断面であるX-X'断面と、これに直交する東西方向断面であるY-Y'断面としている。

- ・ X-X'断面（南北方向断面）： 幅550m（燃料補助建屋中心位置から左（南）～250m，右（北）～300m），深さT.P. -300mまで
- ・ Y-Y'断面（東西方向断面）： 幅600m（炉心位置から左（西）～300m，右（東）～300m），深さT.P. -300mまで

解析用要素分割図を図-21に示す。

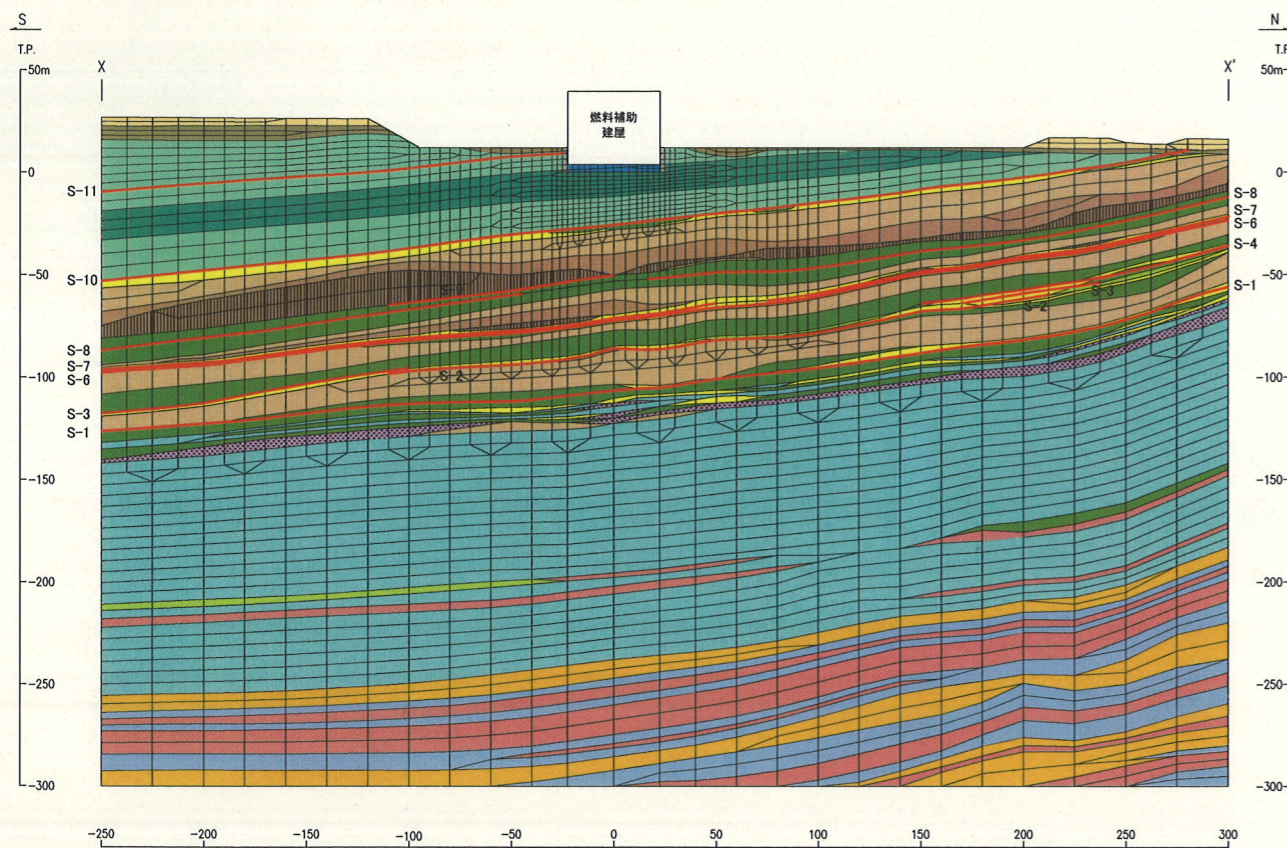
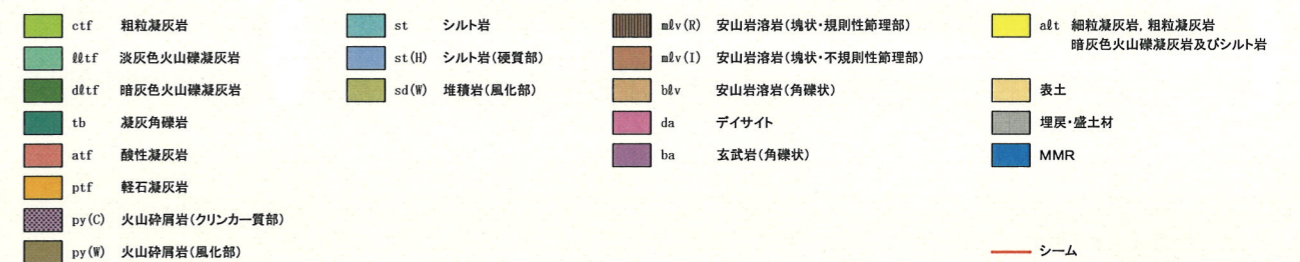


図-21(1) 解析用要素分割図(燃料補助建屋, X-X'断面)

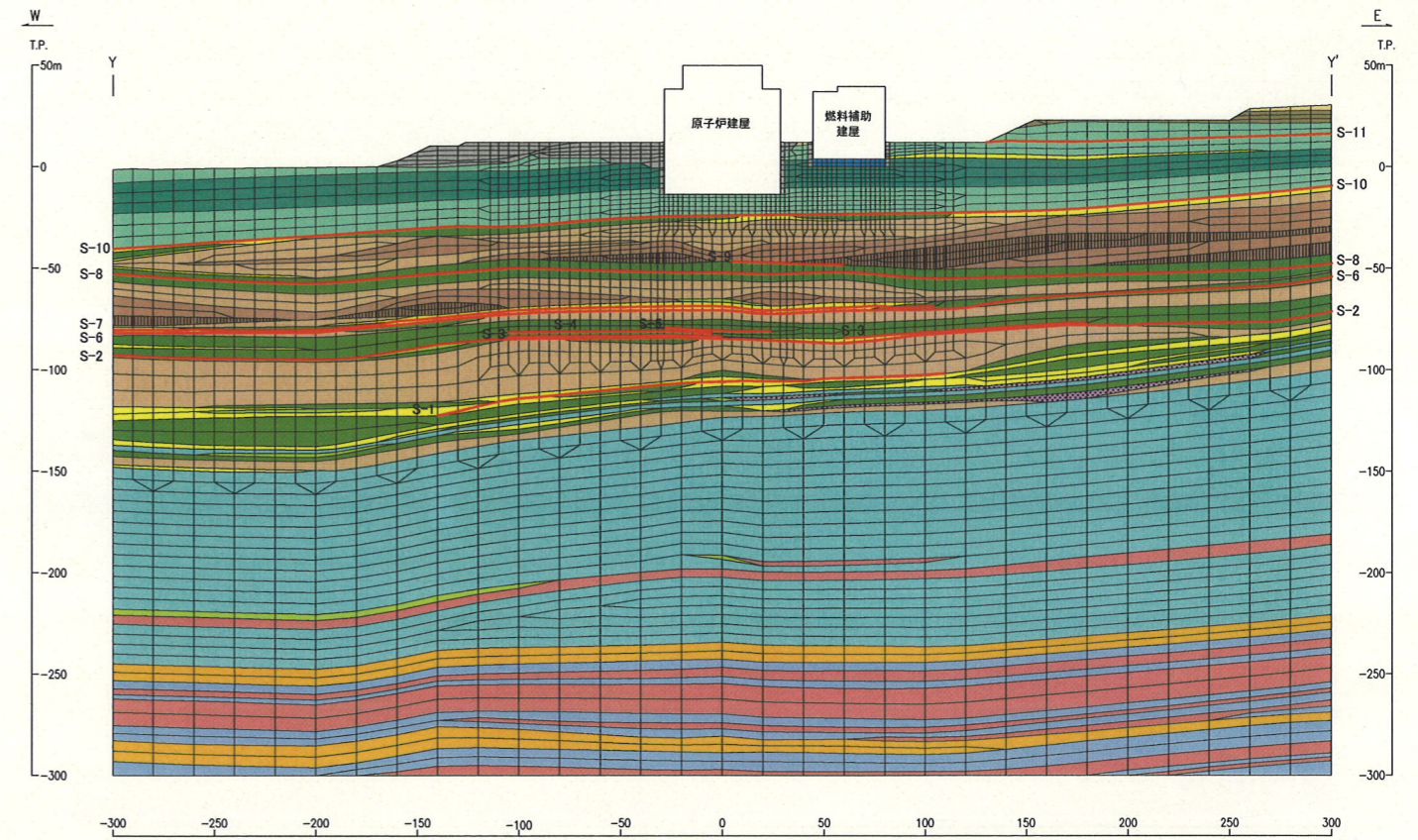


図-21(2) 解析用要素分割図(燃料補助建屋, Y-Y'断面)

Ⅲ. 燃料補助建屋基礎地盤の安定性検討

PS 検層による速度層断面図を図-22に示す。

速度層区分	P波速度 V_p (km/s)	S波速度 V_s (km/s)	動ポアソン比 ν_d
①	0.84	0.36	0.45
②	1.91	0.83	0.38
③	2.63	1.12	0.39
④	1.81	0.64	0.43
⑤	2.08	0.90	0.38

動ポアソン比 ν_d のうち、速度層①については慣用値を設定
その他の速度層については V_p 、 V_s より算定

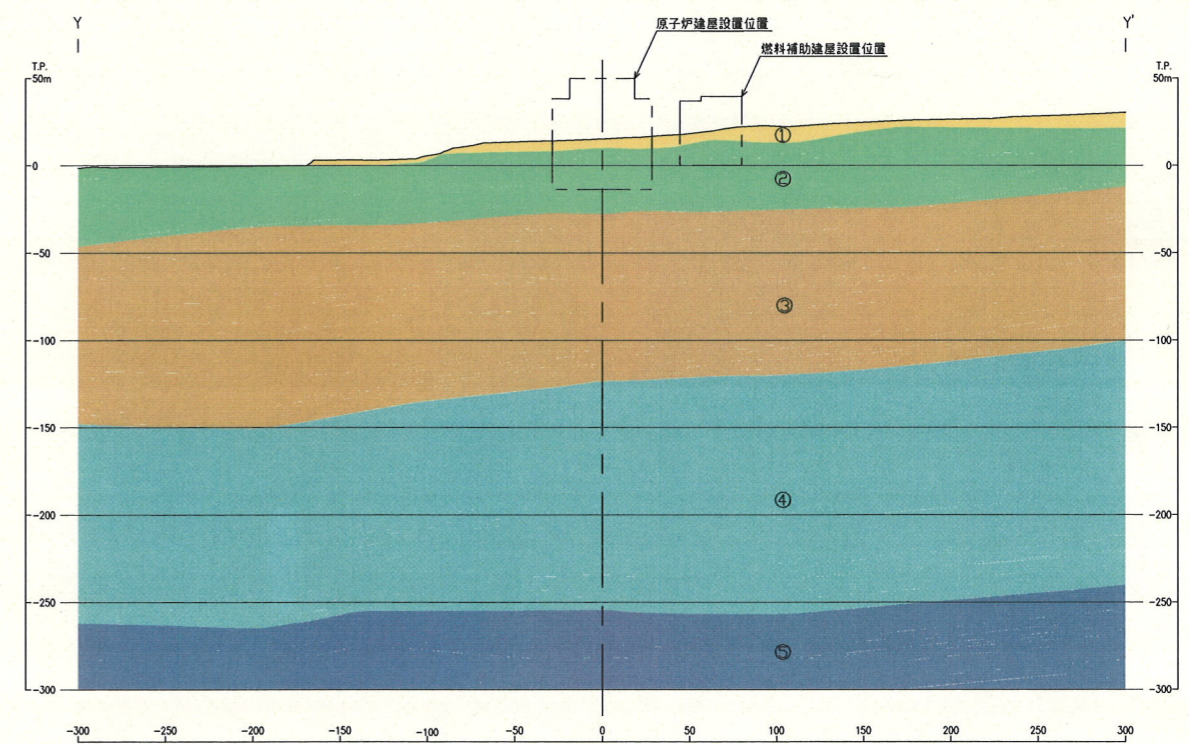
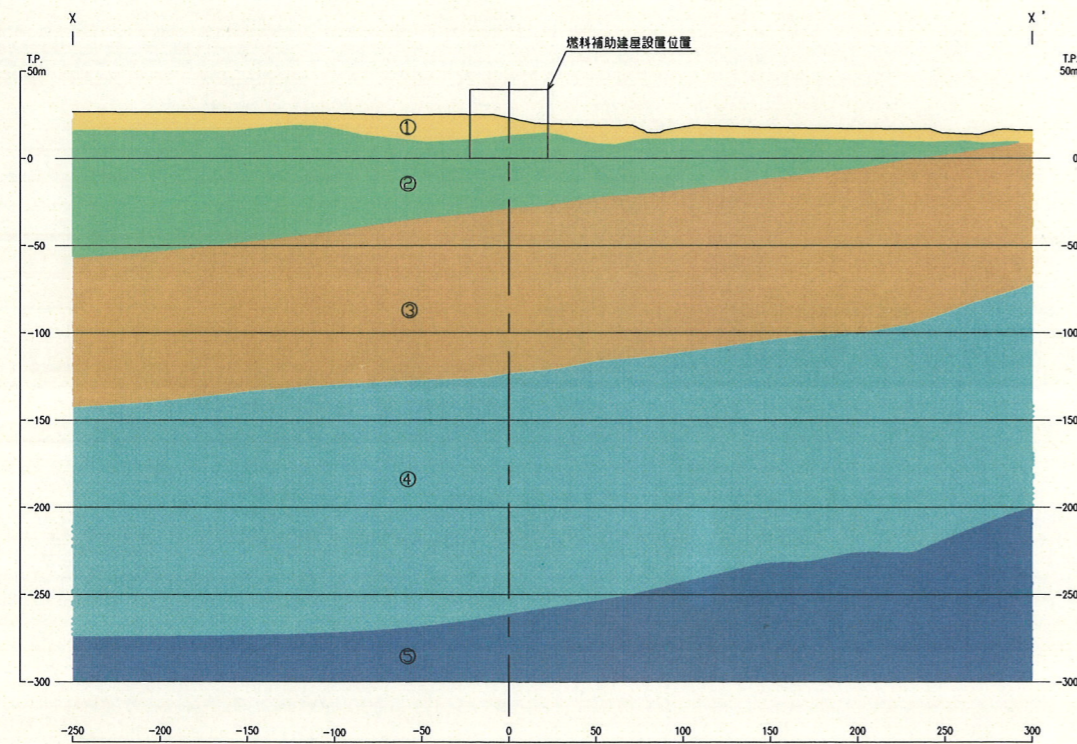


図-22(1) PS 検層による速度層断面図 (燃料補助建屋, X-X' 断面)

図-22(2) PS 検層による速度層断面図 (燃料補助建屋, Y-Y' 断面)

地下水位は、図-23 に示すとおり地表面及び基礎スラブ上面に設定している。
 その他の解析条件については、原子炉建屋基礎地盤の安定性検討と同様としている。

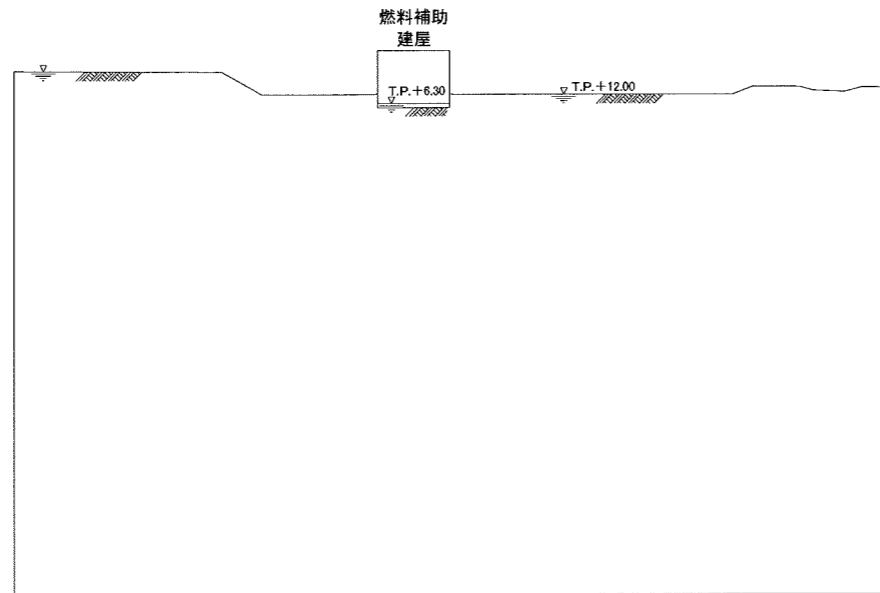


図-23(1) 地下水位設定図（燃料補助建屋，X-X' 断面）

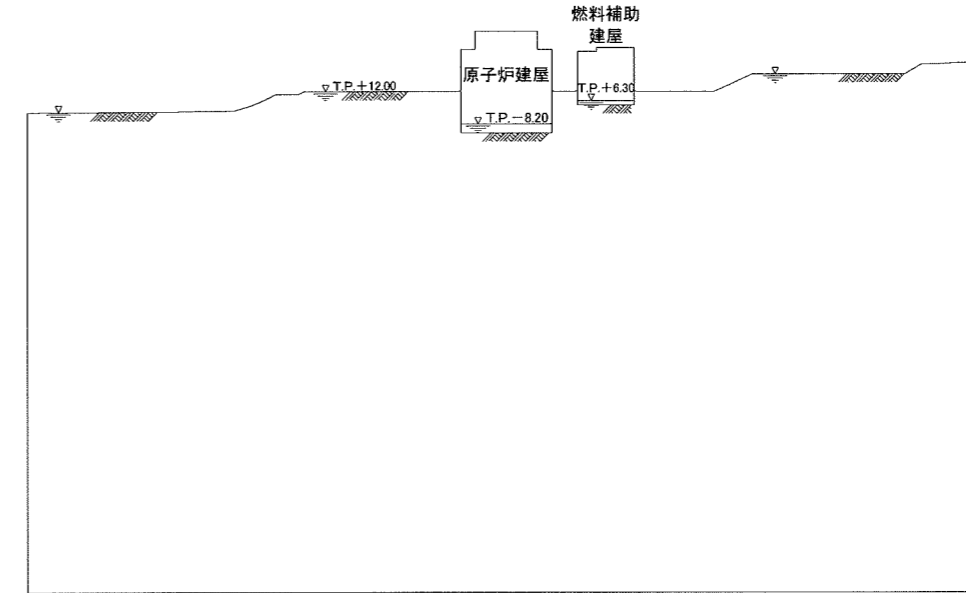


図-23(2) 地下水位設定図（燃料補助建屋，Y-Y' 断面）

(2) 解析用物性値

解析用物性値は、表-6 に示すとおり原子炉建屋基礎地盤の安定性検討（比較検討）と同様としている。

(3) 地震力

地震力は、原子炉建屋基礎地盤の安定性検討と同様としている。

2.2 解析手法

解析手法は、原子炉建屋基礎地盤の安定性検討と同様としている。

2.3 安定性評価

安定性評価は、原子炉建屋基礎地盤の安定性検討と同様としている。

断層内物質及びシームの変形特性を低減させた検討

1. はじめに

原子炉建屋基礎地盤の安定性を評価する目的で、地盤物性値の平均値を用いた静的FEM解析（以下「基本検討」という。）と断層内物質及びシームの静せん断弾性係数を平均値より1σ低減させた場合の静的FEM解析（以下「変形特性を低減させた検討」という。）を行い、比較・検討している。

2. 解析条件

2.1 解析モデル

炉心を通る東西方向断面であるY-Y'断面としている。

解析モデルの幅は、炉心位置から左（西）へ400m、右（東）へ300mとしている。解析モデルの深さは、T.P. -280mまでとしている。

解析用要素分割図を図-1に示す。

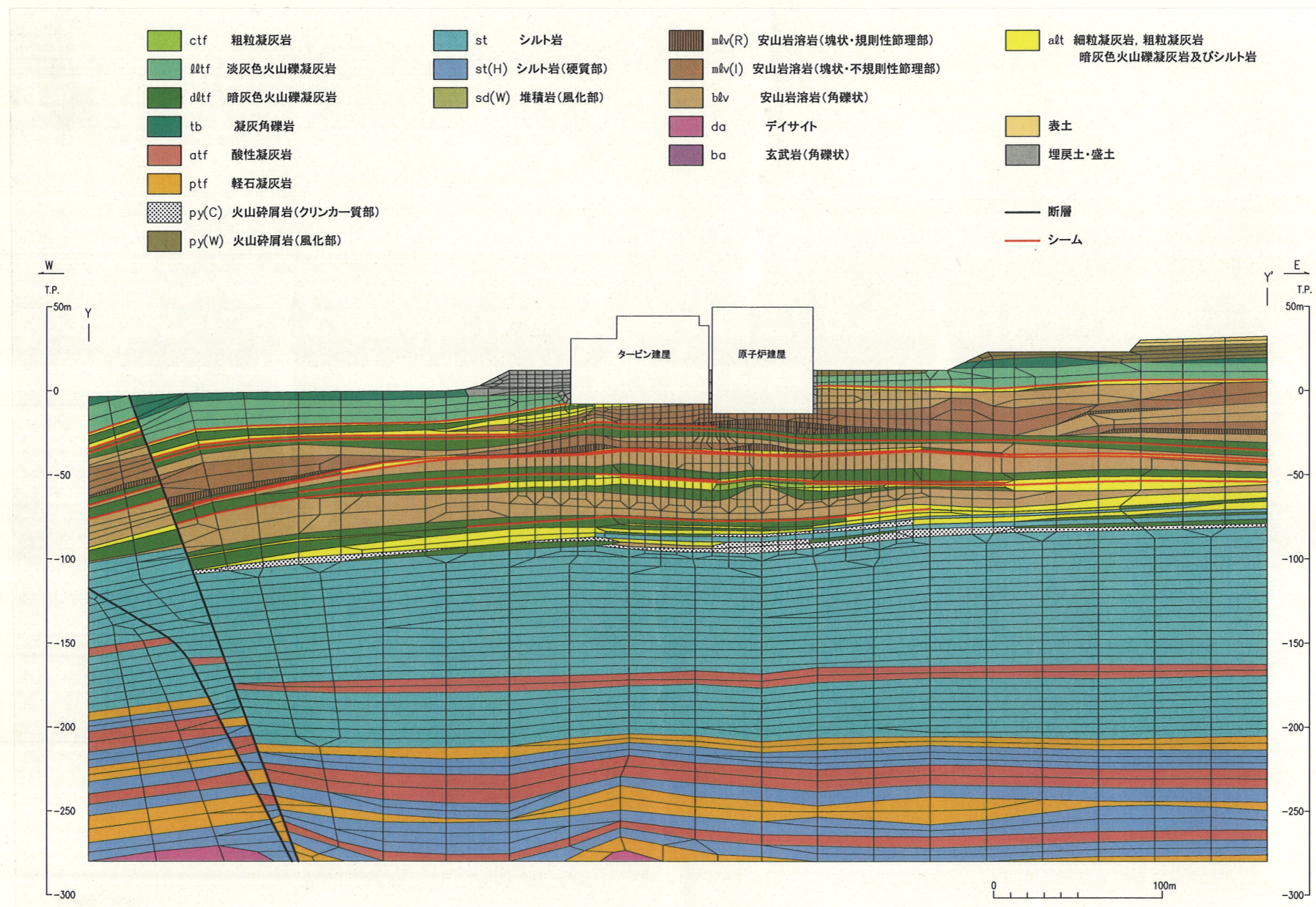


図-1 解析用要素分割図 (Y-Y' 断面)

静的FEM解析における境界条件は、モデル下端については固定境界とし、モデル側方については常時応力及び鉛直地震力による増分応力算定時には鉛直ローラ、水平地震力による増分応力算定時には水平ローラとしている。境界条件を図-2に示す。

地下水位は、図-3に示すとおり地表面及び基礎スラブ上面に設定している。

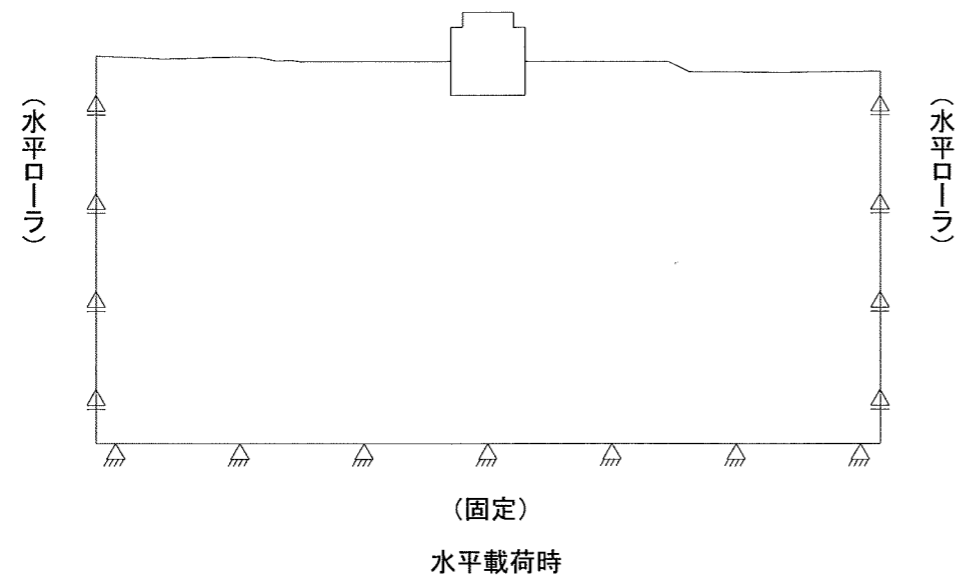
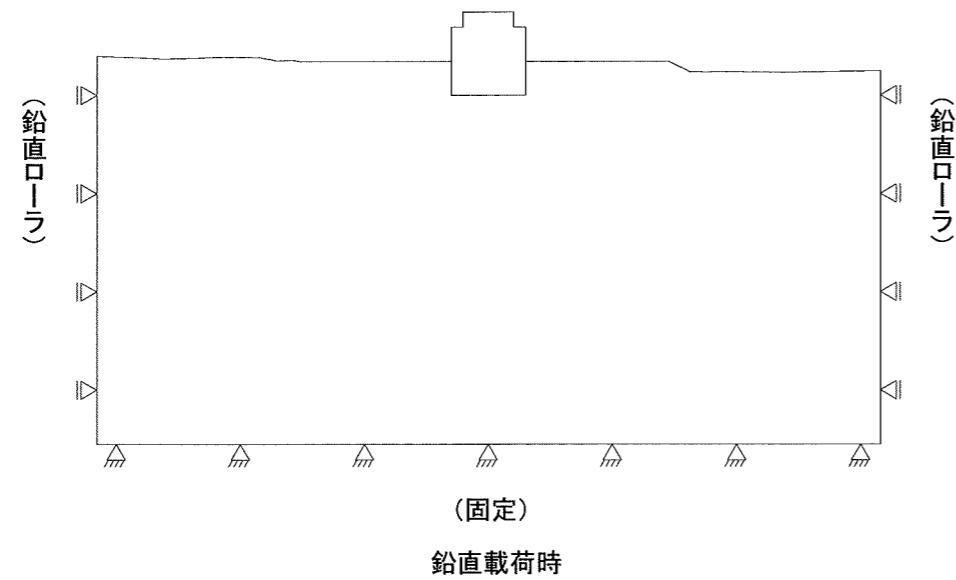


図-2 静的FEM解析における境界条件

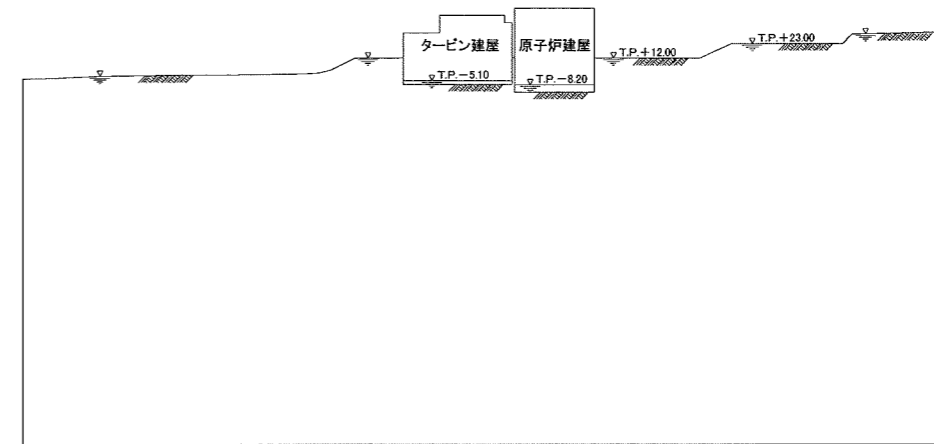


図-3 地下水位設定図 (Y-Y' 断面)

2.2 解析用物性値

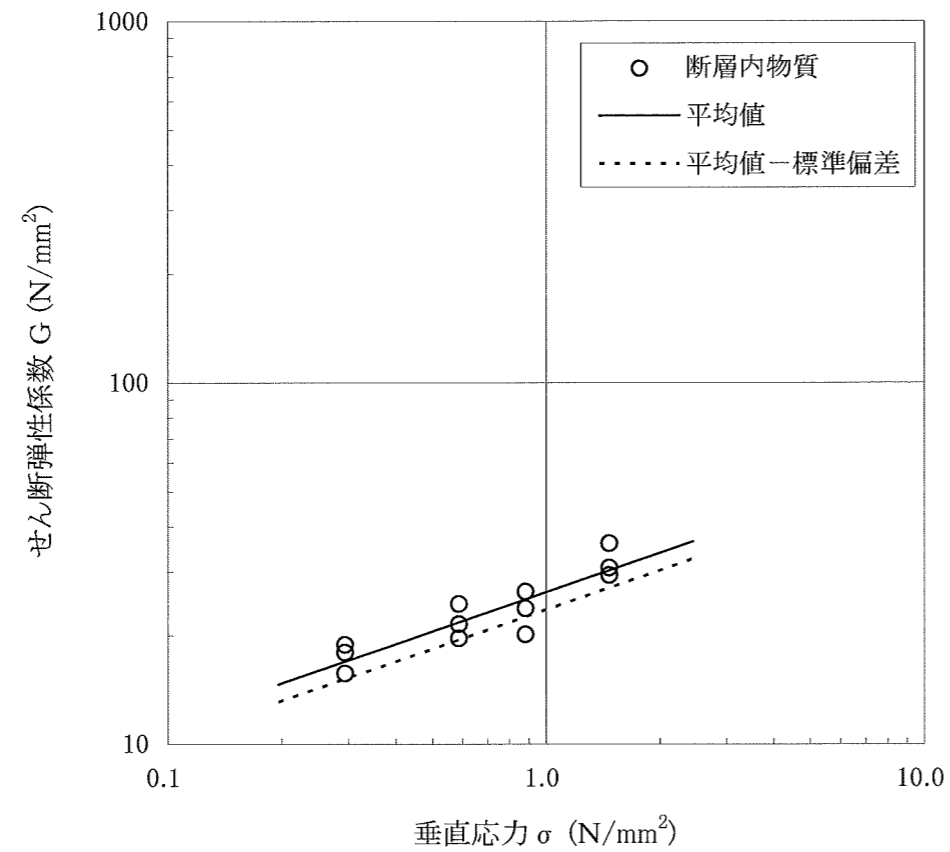
解析用物性値を表-1 に示す。

基本検討は表-1 の物性値を用い、変形特性を低減させた検討では基本検討で用いている平均値から断層内物質及びシームの静せん断弾性係数を 1 σ 低減させた値を設定している。

表-1 解析用物性値

	物理特性	強度特性		静的変形特性		
	密度 γ (g/cm ³)	せん断強度 τ (N/mm ²)		残留強度 (N/mm ²)	静弾性係数 E (静せん断弾性係数 G) (× 10 ³ N/mm ²)	静ポアソン比 ν
細粒凝灰岩	1.61	$(\tau / 0.46)^2 = 1 + \sigma / 0.19$ $\tau = 0.76 + \sigma \tan 17^\circ$	$(-0.19 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.60 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 0.60 \text{N/mm}^2)$	$0.77 \sigma^{0.44}$	$0.91 \sigma^{0.21}$	0.43
粗粒凝灰岩	1.89	$(\tau / 2.30)^2 = 1 + \sigma / 1.25$ $\tau = 3.75 + \sigma \tan 9^\circ$	$(-1.25 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.92 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 2.92 \text{N/mm}^2)$	$1.59 \sigma^{0.49}$	$2.57 \sigma^{0.11}$	0.45
淡灰色火山礫凝灰岩	1.80	$(\tau / 1.16)^2 = 1 + \sigma / 0.64$ $\tau = 1.73 + \sigma \tan 19^\circ$	$(-0.64 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.99 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 2.99 \text{N/mm}^2)$	$1.20 \sigma^{0.51}$	$2.01 \sigma^{0.30}$	0.45
暗灰色火山礫凝灰岩	1.94	$(\tau / 1.54)^2 = 1 + \sigma / 0.65$ $\tau = 2.81 + \sigma \tan 14^\circ$	$(-0.65 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.57 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 2.57 \text{N/mm}^2)$	$1.37 \sigma^{0.50}$	$2.03 \sigma^{0.08}$	0.46
凝灰角礫岩	2.05	$(\tau / 0.57)^2 = 1 + \sigma / 0.15$ $\tau = 1.44 + \sigma \tan 15^\circ$	$(-0.15 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.28 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 1.28 \text{N/mm}^2)$	$1.25 \sigma^{0.51}$	$1.54 \sigma^{0.27}$	0.46
酸性凝灰岩	1.68	$(\tau / 1.49)^2 = 1 + \sigma / 0.72$ $\tau = 2.31 + \sigma \tan 12^\circ$	$(-0.72 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.50 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 1.50 \text{N/mm}^2)$	$1.51 \sigma^{0.39}$	$1.51 \sigma^{0.20}$	0.45
軽石凝灰岩	1.65	$(\tau / 0.79)^2 = 1 + \sigma / 0.34$ $\tau = 1.49 + \sigma \tan 10^\circ$	$(-0.34 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.27 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 1.27 \text{N/mm}^2)$	$1.14 \sigma^{0.39}$	$0.65 \sigma^{0.25}$	0.46
火山碎屑岩 (クリンカー質部)	1.95	$(\tau / 0.12)^2 = 1 + \sigma / 0.01$ $\tau = 1.01 + \sigma \tan 15^\circ$	$(-0.01 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.20 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 1.20 \text{N/mm}^2)$	$1.06 \sigma^{0.52}$	$0.20 \sigma^{0.60}$	0.48
シルト岩	1.47	$(\tau / 1.30)^2 = 1 + \sigma / 0.71$ $\tau = 2.15 + \sigma \tan 16^\circ$	$(-0.71 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 3.18 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 3.18 \text{N/mm}^2)$	$1.34 \sigma^{0.33}$	$0.88 \sigma^{0.19}$	0.43
シルト岩 (硬質部)	1.52	$(\tau / 2.20)^2 = 1 + \sigma / 1.04$ $\tau = 3.65 + \sigma \tan 7^\circ$	$(-1.04 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.28 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 2.28 \text{N/mm}^2)$	$1.40 \sigma^{0.41}$	$0.93 \sigma^{0.21}$	0.45
安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部)	2.39	$\tau = 1.32 + \sigma \tan 45^\circ$		$1.21 \sigma^{0.62}$	2.18	0.18
安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部)	2.37	$\tau = 1.53 + \sigma \tan 29^\circ$		$1.21 \sigma^{0.62}$	1.63	0.28
安山岩溶岩 (角礫状)	2.17	$\tau = 0.75 + \sigma \tan 38^\circ$		$1.01 \sigma^{0.59}$	2.47	0.47
デイサイト	2.39	$\tau = 1.53 + \sigma \tan 29^\circ$		$1.21 \sigma^{0.62}$	1.63	0.26
玄武岩 (角礫状)	2.11	$(\tau / 1.33)^2 = 1 + \sigma / 0.94$ $\tau = 1.36 + \sigma \tan 29^\circ$	$(-0.94 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.18 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 0.18 \text{N/mm}^2)$	$1.08 \sigma^{0.63}$	$1.95 \sigma^{0.30}$	0.29
断層内物質	1.60	$\tau = 0.23 + \sigma \tan 21^\circ$		$\tau = 0.19 + \sigma \tan 21^\circ$	$G = 0.0265 \sigma^{0.36}$	0.48
シーム	1.65	$\tau = 0.25 + \sigma \tan 20^\circ$		$\tau = 0.22 + \sigma \tan 18^\circ$	$G = 0.0437 \sigma^{0.29}$	0.48
火山碎屑岩 (風化部)	1.63	$\tau = 0.07 + \sigma \tan 9^\circ$		$\tau = 0.07 + \sigma \tan 6^\circ$	$0.157 \sigma^{0.74}$	0.48
堆積岩 (風化部)	2.00	$\tau = 0.39 + \sigma \tan 20^\circ$		$\tau = 0.39 + \sigma \tan 19^\circ$	$0.143 \sigma^{0.66}$	0.49
表土	1.47	$\tau = 0.03 + \sigma \tan 10^\circ$		$\tau = 0.02 + \sigma \tan 10^\circ$	$0.123 \sigma^{0.53}$	0.48
埋戻・盛土材	1.54	$\tau = 0.22 + \sigma \tan 11^\circ$		$\tau = 0.22 + \sigma \tan 9^\circ$	$0.267 \sigma^{0.73}$	0.48

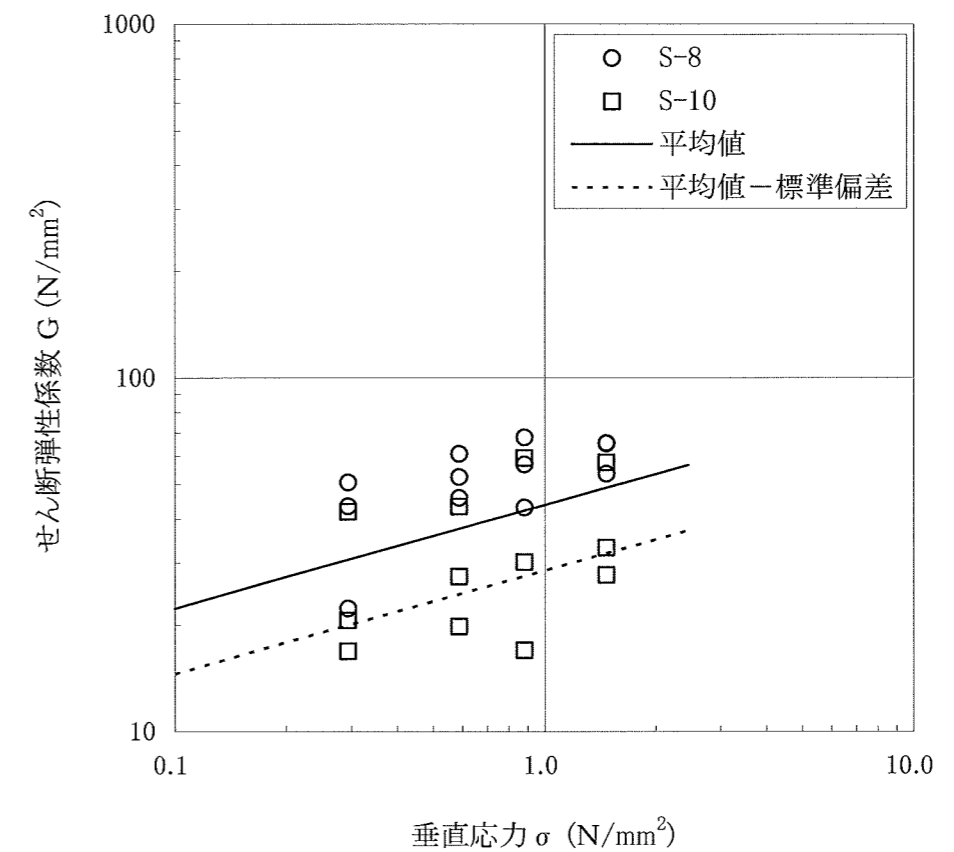
平均値から 1 σ 低減させた断層内物質及びシームの静せん断弾性係数を図-4 及び図-5 に示す。



静的単純せん断試験結果(変形)

平均値	$G = 26.5 \sigma^{0.36}$	(N/mm ²)
平均値-標準偏差	$G = 23.5 \sigma^{0.36}$	(N/mm ²)

図-4 断層内物質の変形特性



静的単純せん断試験結果(変形)

平均値	$G = 43.7 \sigma^{0.29}$	(N/mm ²)
平均値-標準偏差	$G = 28.5 \sigma^{0.29}$	(N/mm ²)

図-5 シームの変形特性

2.3 地震力

水平方向の地震力については地盤に 0.2G, 各建屋には地震層せん断力係数 $3.0C_1$ に基づく地震力を, 鉛直方向の地震力については地盤に 0.1G, 各建屋に 0.24G を作用させている。作用方向は, 基本検討においてすべり安全率が最小となる水平左向き及び鉛直下向きとしている。

3. 解析手法

静的 FEM 解析では, 地震時応力は常時応力と地震時増分応力との重ね合わせにより求めている。

常時応力は, 地盤の自重計算により求まる初期応力に, 建屋基礎掘削に伴う解放力と, 建屋及び盛土荷重とを考慮して求め, 地震時増分応力は, 2.3 に示した静的震度を地震力荷重として求めている。

4. 解析結果

4.1 すべり安全率

すべり安全率は、原子炉建屋基礎底面沿いの想定すべり線，断層及びシームを通る想定すべり線並びに応力状態を考慮した想定すべり線について検討している。

すべり安全率を基本検討の結果と比較して表-2 に示す。変形特性を低減させた検討のすべり安全率は、基本検討結果とほぼ同等であり，最小すべり安全率は 3.4 である。

表-2 すべり安全率一覧表 静的FEM解析，(Y-Y' 断面，断層内物質及びシームの変形特性を低減させた検討)

すべり線 番号	すべり線形状	地震力 方向	すべり安全率		すべり線 番号	すべり線形状	地震力 方向	すべり安全率	
			基本検討	変形特性を 低減させた 検討				基本検討	変形特性を 低減させた 検討
1		←	14.8	14.7	6		←	3.4	3.4
2		←	10.3	10.3	7		←	3.6	3.6
3		←	9.3	9.3					
4		←	5.6	5.6					
5		←	8.9	8.9					

— すべり線
 - - - 断層・シーム
 ○ すべり安全率の最小値

4.2 原子炉建屋基礎底面の変位

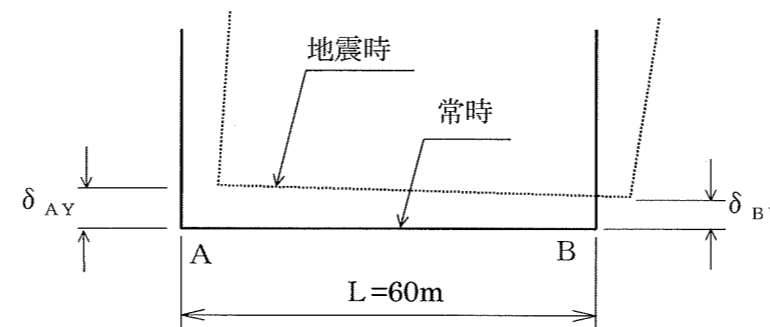
原子炉建屋基礎底面両端の相対変位について検討している。

原子炉建屋基礎底面の変位を基本検討の結果と比較して表-3 に示す。変形特性を低減させた検討の地震時の原子炉建屋基礎底面両端における鉛直方向相対変位量は 1.02 cm, その時の原子炉建屋基礎の傾斜は約 1/5,900 であり, 基本検討結果とほぼ同等である。

表-3 原子炉建屋基礎の傾斜 静的 FEM 解析 (Y-Y' 断面, 断層内物質及びシームの変形特性を低減させた検討)

	地震力方向	相対変位量 (cm)	勾配
		鉛直方向 $\delta_{AY} - \delta_{BY}$	$\frac{ \delta_{AY} - \delta_{BY} }{L}$
基本検討		-1.00	1/6,000
変形特性を低減させた検討		-1.02	1/5,900

(注) 記号の説明



δ_{AY} , δ_{BY} は上向きを正とする。
鉛直方向相対変位は左上りを正とする。

地盤剛性の非線形性を考慮した検討

1. はじめに

原子炉建屋基礎地盤の安定性を評価する目的で、線形の静的FEM解析（以下「基本検討」という。）と地盤剛性の非線形性を考慮した静的FEM解析（以下「地盤剛性の非線形性を考慮した検討」という。）を行い、比較・検討している。

2. 解析条件

2.1 解析モデル

炉心を通る東西方向断面であるY-Y'断面としている。

解析モデルの幅は、炉心位置から左（西）へ400m、右（東）へ300mとしている。解析モデルの深さは、T.P. -280mまでとしている。

解析用要素分割図を図-1に示す。

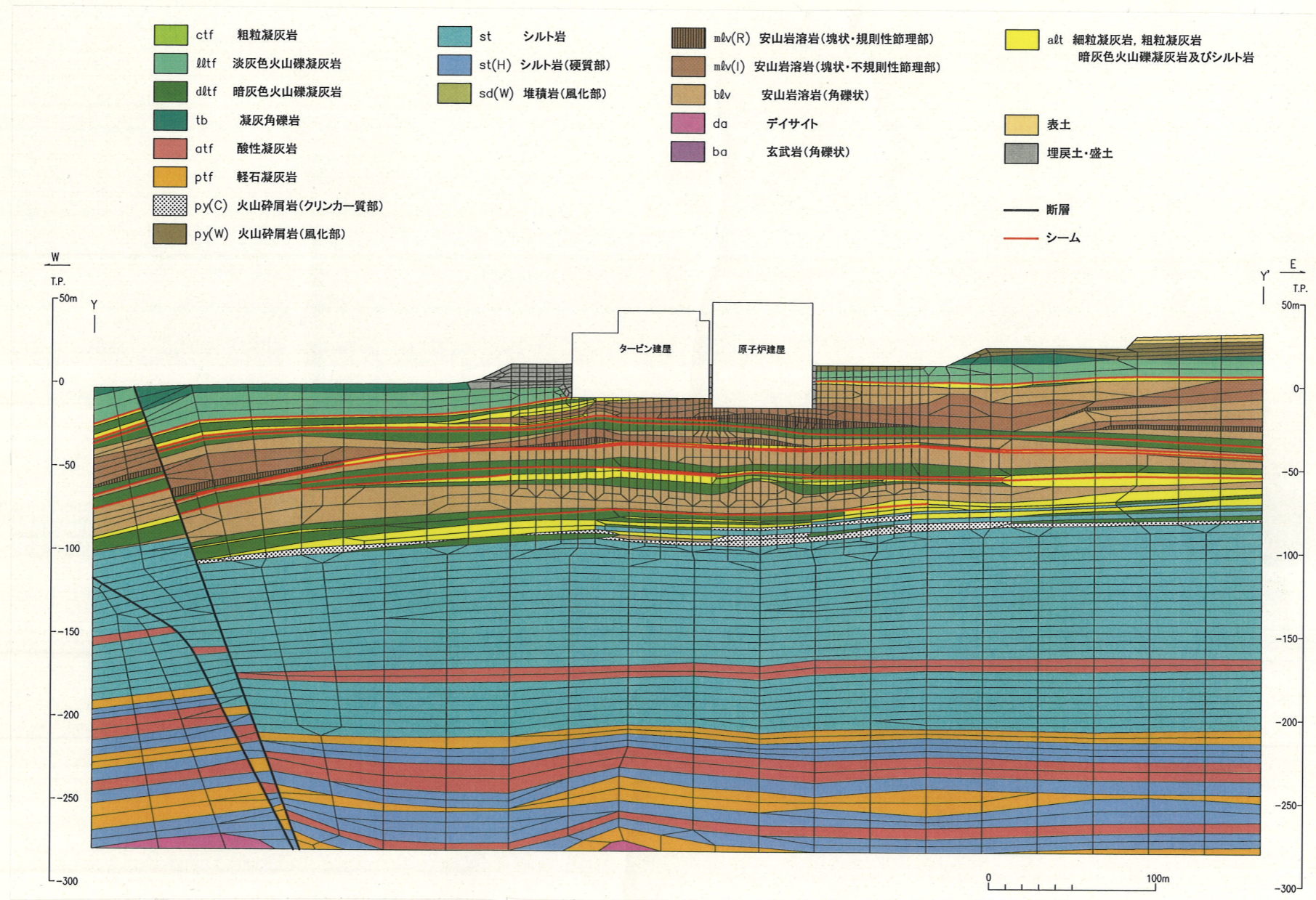


図-1 解析用要素分割図 (Y-Y' 断面)

静的FEM解析における境界条件は、モデル下端については固定境界とし、モデル側方については常時応力及び鉛直地震力による増分応力算定時には鉛直ローラ、水平地震力による増分応力算定時には水平ローラとしている。境界条件を図-2に示す。

地下水位は、図-3に示すとおり地表面及び基礎スラブ上面に設定している。

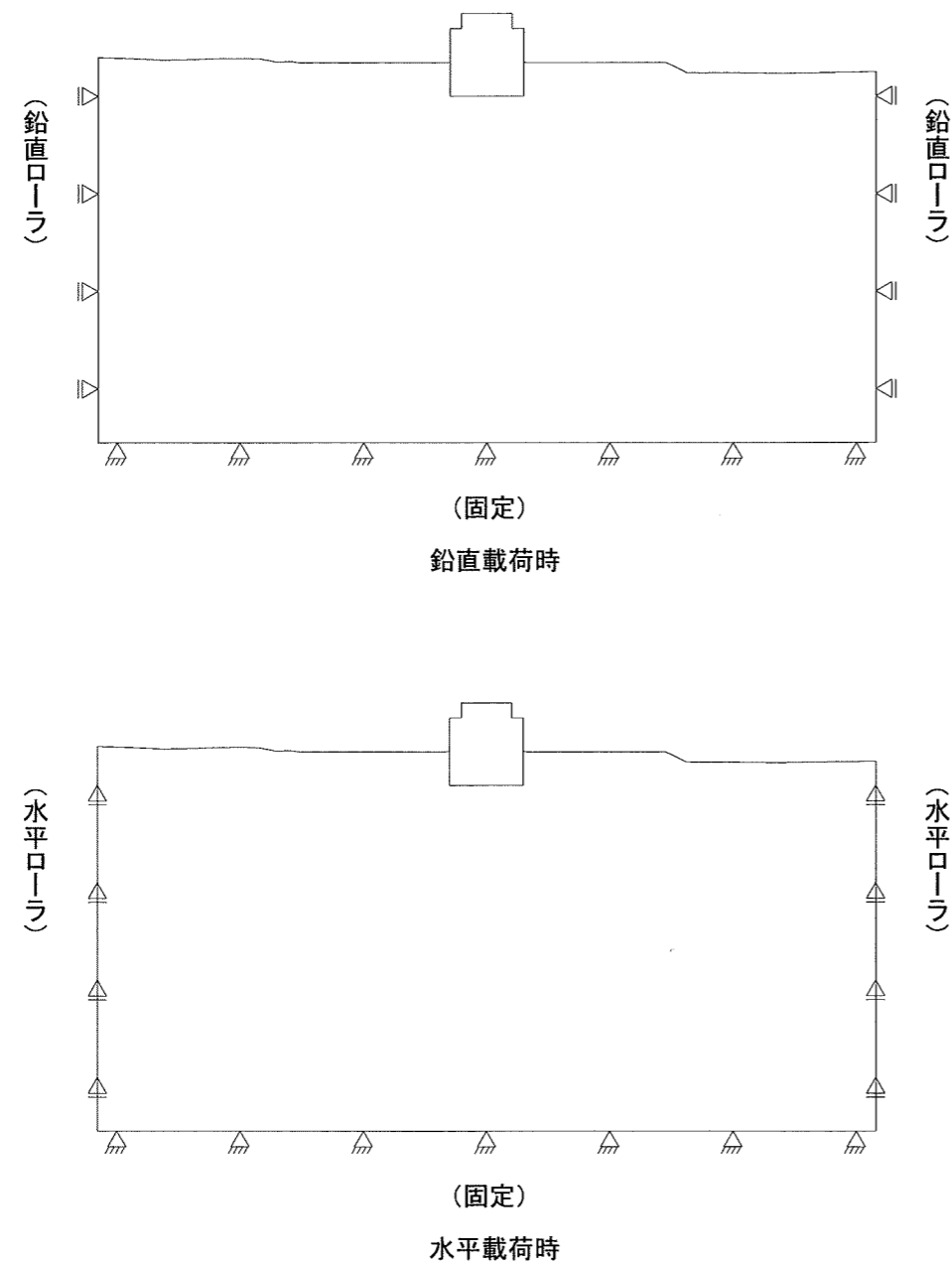


図-2 静的FEM解析における境界条件

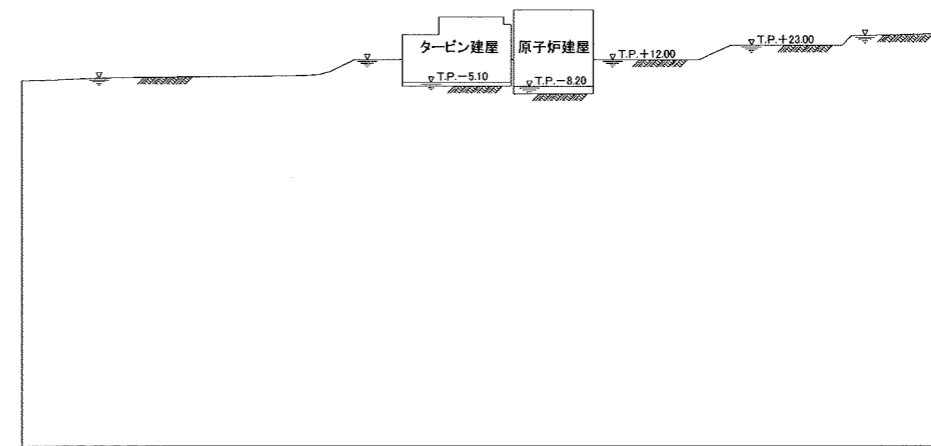


図-3 地下水位設定図 (Y-Y' 断面)

2.2 解析用物性値

解析用物性値を表-1 に示す。

表-1 解析用物性値

	物理特性		強度特性		静的変形特性	
	密度 γ (g/cm^3)	せん断強度 τ (N/mm^2)	せん断強度 τ (N/mm^2)	残留強度 (N/mm^2)	静弾性係数 E (静せん断弾性係数 G) ($\times 10^3 \text{N/mm}^2$)	静ポアソン比 ν
細粒凝灰岩	1.61	$(\tau/0.46)^2=1+\sigma/0.19$ $\tau=0.76+\sigma \tan 17^\circ$	$(-0.19 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.60 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 0.60 \text{N/mm}^2)$	$0.77 \sigma^{0.44}$	$0.91 \sigma^{0.21}$	0.43
粗粒凝灰岩	1.89	$(\tau/2.30)^2=1+\sigma/1.25$ $\tau=3.75+\sigma \tan 9^\circ$	$(-1.25 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.92 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 2.92 \text{N/mm}^2)$	$1.59 \sigma^{0.49}$	$2.57 \sigma^{0.11}$	0.45
淡灰色火山礫凝灰岩	1.80	$(\tau/1.16)^2=1+\sigma/0.64$ $\tau=1.73+\sigma \tan 19^\circ$	$(-0.64 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.99 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 2.99 \text{N/mm}^2)$	$1.20 \sigma^{0.51}$	$2.01 \sigma^{0.30}$	0.45
暗灰色火山礫凝灰岩	1.94	$(\tau/1.54)^2=1+\sigma/0.65$ $\tau=2.81+\sigma \tan 14^\circ$	$(-0.65 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.57 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 2.57 \text{N/mm}^2)$	$1.37 \sigma^{0.50}$	$2.03 \sigma^{0.08}$	0.46
凝灰角礫岩	2.05	$(\tau/0.57)^2=1+\sigma/0.15$ $\tau=1.44+\sigma \tan 15^\circ$	$(-0.15 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.28 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 1.28 \text{N/mm}^2)$	$1.25 \sigma^{0.51}$	$1.54 \sigma^{0.27}$	0.46
酸性凝灰岩	1.68	$(\tau/1.49)^2=1+\sigma/0.72$ $\tau=2.31+\sigma \tan 12^\circ$	$(-0.72 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.50 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 1.50 \text{N/mm}^2)$	$1.51 \sigma^{0.39}$	$1.51 \sigma^{0.20}$	0.45
軽石凝灰岩	1.65	$(\tau/0.79)^2=1+\sigma/0.34$ $\tau=1.49+\sigma \tan 10^\circ$	$(-0.34 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.27 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 1.27 \text{N/mm}^2)$	$1.14 \sigma^{0.39}$	$0.65 \sigma^{0.25}$	0.46
火山砕屑岩 (クリンカー質部)	1.95	$(\tau/0.12)^2=1+\sigma/0.01$ $\tau=1.01+\sigma \tan 15^\circ$	$(-0.01 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 1.20 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 1.20 \text{N/mm}^2)$	$1.06 \sigma^{0.52}$	$0.20 \sigma^{0.60}$	0.48
シルト岩	1.47	$(\tau/1.30)^2=1+\sigma/0.71$ $\tau=2.15+\sigma \tan 16^\circ$	$(-0.71 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 3.18 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 3.18 \text{N/mm}^2)$	$1.34 \sigma^{0.33}$	$0.88 \sigma^{0.19}$	0.43
シルト岩 (硬質部)	1.52	$(\tau/2.20)^2=1+\sigma/1.04$ $\tau=3.65+\sigma \tan 7^\circ$	$(-1.04 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 2.28 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 2.28 \text{N/mm}^2)$	$1.40 \sigma^{0.41}$	$0.93 \sigma^{0.21}$	0.45
安山岩溶岩 (塊状・規則性節理部)	2.39	$\tau=1.32+\sigma \tan 45^\circ$		$1.21 \sigma^{0.62}$	2.18	0.18
安山岩溶岩 (塊状・不規則性節理部)	2.37	$\tau=1.53+\sigma \tan 29^\circ$		$1.21 \sigma^{0.62}$	1.63	0.28
安山岩溶岩 (角礫状)	2.17	$\tau=0.75+\sigma \tan 38^\circ$		$1.01 \sigma^{0.59}$	2.47	0.47
デイサイト	2.39	$\tau=1.53+\sigma \tan 29^\circ$		$1.21 \sigma^{0.62}$	1.63	0.26
玄武岩 (角礫状)	2.11	$(\tau/1.33)^2=1+\sigma/0.94$ $\tau=1.36+\sigma \tan 29^\circ$	$(-0.94 \text{N/mm}^2 \leq \sigma < 0.18 \text{N/mm}^2)$ $(\sigma \geq 0.18 \text{N/mm}^2)$	$1.08 \sigma^{0.63}$	$1.95 \sigma^{0.30}$	0.29
断層内物質	1.60	$\tau=0.23+\sigma \tan 21^\circ$		$\tau=0.19+\sigma \tan 21^\circ$	$G=0.0265 \sigma^{0.36}$	0.48
シーム	1.65	$\tau=0.25+\sigma \tan 20^\circ$		$\tau=0.22+\sigma \tan 18^\circ$	$G=0.0437 \sigma^{0.29}$	0.48
火山砕屑岩 (風化部)	1.63	$\tau=0.07+\sigma \tan 9^\circ$		$\tau=0.07+\sigma \tan 6^\circ$	$0.157 \sigma^{0.74}$	0.48
堆積岩 (風化部)	2.00	$\tau=0.39+\sigma \tan 20^\circ$		$\tau=0.39+\sigma \tan 19^\circ$	$0.143 \sigma^{0.66}$	0.49
表土	1.47	$\tau=0.03+\sigma \tan 10^\circ$		$\tau=0.02+\sigma \tan 10^\circ$	$0.123 \sigma^{0.53}$	0.48
埋戻・盛土材	1.54	$\tau=0.22+\sigma \tan 11^\circ$		$\tau=0.22+\sigma \tan 9^\circ$	$0.267 \sigma^{0.73}$	0.48

2.3 地震力

水平方向の地震力については地盤に 0.2G、各建屋には地震層せん断力係数 $3.0C_i$ に基づく地震力を、鉛直方向の地震力については地盤に 0.1G、各建屋に 0.24G を作用させている。作用方向は、基本検討において引張応力の発生する領域がやや連続的に存在する水平右向き及び鉛直上向きとしている。

3. 解析手法

非線形解析は、線形解析と同様に、地盤の自重、建屋基礎掘削に伴う解放力と建屋及び盛土の荷重とを考慮した常時応力と、静的震度による地震時増分応力を重ね合わせて最終的な地震時応力を求めるものである。地震時増分応力については、荷重増分法による地盤剛性の非線形性を考慮している。具体的には、地盤の一部の要素に引張応力が発生した場合及びせん断強度以上のせん断応力が発生した場合の逐次破壊形態を模擬するもので、荷重を段階的（水平地震力を 40 分割、鉛直地震力を 20 分割）に作用させ、各段階ごとに引張降伏した要素及びせん断降伏した要素について図-4 に示す条件により物性を低下させ、最終的な応力状態を求めている。

- 各荷重段階において、引張降伏した要素については、次の荷重段階における解析用物性値を次のように低下させる。

$$\begin{aligned} E_1 &= E_0 \\ E_2 &\doteq 0 \\ \nu_1 &= \nu_2 = 0 \\ G &\doteq 0 \end{aligned}$$

- 各荷重段階において、せん断降伏した要素については、次の荷重段階における解析用物性値を次のように低下させる。

$$\begin{aligned} E_1 &= E_2 \doteq 0 \\ \nu_1 &= \nu_2 = 0 \\ G &\doteq 0 \end{aligned}$$

ここで、
 E : 弾性係数
 G : せん断弾性係数
 ν : ポアソン比
 E_0 : 健全時の弾性係数
 添字 (1,2) : 主応力方向

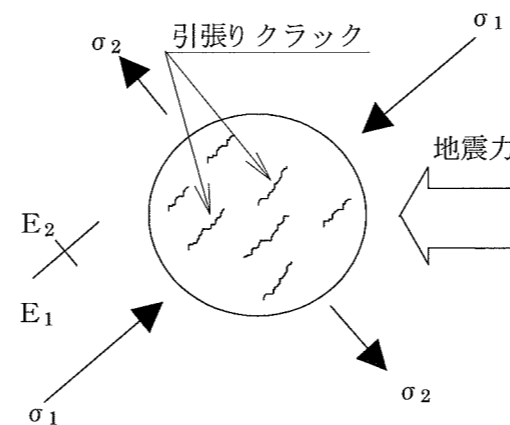


図-4 非線形解析における物性値低減方法

4. 解析結果

4.1 すべり安全率

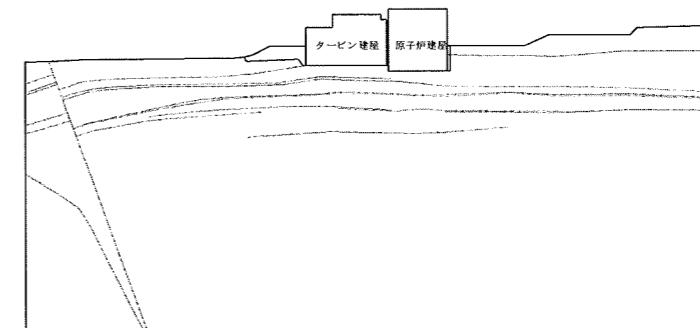
すべり安全率は、原子炉建屋基礎底面沿いの想定すべり線、断層及びシームを通る想定すべり線並びに応力状態を考慮した想定すべり線について検討している。

すべり安全率を基本検討の結果と比較して表-2 に示す。地盤剛性の非線形性を考慮した検討のすべり安全率は、すべり線 No. 4 において基本検討結果が 6.6 に対して 6.2，すべり線 No. 5 において基本検討結果が 8.6 に対して 8.3 である。非線形解析の結果、引張降伏した領域が拡大するのに伴い、この領域を通るすべり線については、すべり安全率がやや低下する傾向を示すが、最小すべり安全率については基本検討結果とほぼ同等であり、4.3 である。

表-2 すべり安全率一覧表 静的 FEM 解析, (Y-Y' 断面, 地盤剛性の非線形性を考慮した検討)

すべり線 番号	すべり線形状	地震力 方向	すべり安全率		すべり線 番号	すべり線形状	地震力 方向	すべり安全率	
			基本検討	地盤剛性の 非線形性を 考慮した 検討				基本検討	地盤剛性の 非線形性を 考慮した 検討
1		↑	10.7	10.6	6		↑	4.6	4.6
2		↑	12.9	12.2	7		↑	4.3	4.3
3		↑	12.1	11.6					
4		↑	6.6	6.2					
5		↑	8.6	8.3					

すべり線
 断層・シーム
 すべり安全率の最小値



4.2 原子炉建屋基礎底面の変位

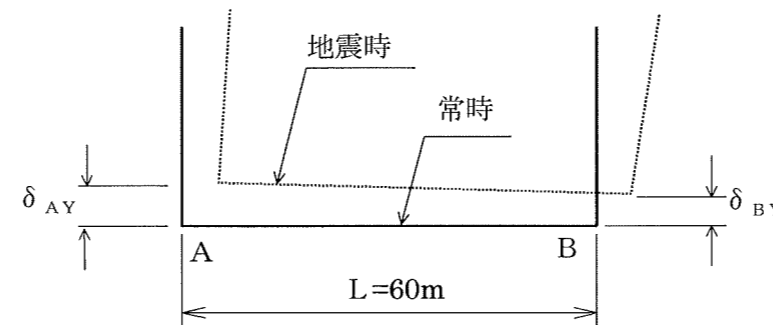
原子炉建屋基礎底面両端の相対変位について検討している。

原子炉建屋基礎底面の変位を基本検討の結果と比較して表-3 に示す。地盤剛性の非線形性を考慮した検討の地震時の原子炉建屋基礎底面両端における鉛直方向相対変位量は 1.02 cm, その時の原子炉建屋基礎の傾斜は約 1/5,900 であり, 基本検討結果とほぼ同等である。

表-3 原子炉建屋基礎の傾斜 静的 FEM 解析 (Y-Y' 断面, 地盤剛性の非線形性を考慮した検討)

	地震力方向	相対変位量 (cm)	勾配
		鉛直方向 $\delta_{AY} - \delta_{BY}$	$\frac{ \delta_{AY} - \delta_{BY} }{L}$
基本検討		1.00	1/6,000
地盤剛性の非線形性を考慮した検討		1.02	1/5,900

(注) 記号の説明



δ_{AY}, δ_{BY} は上向きを正とする。
鉛直方向相対変位は左上りを正とする。