

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-41_改0
提出年月日	2021年9月22日

補足-600-41 基礎地盤の安定性評価について

目次

1. 概要	1
2. 解析条件	2
2.1 解析モデル	2
2.2 解析手法	4
2.3 解析用地盤物性値の設定	5
2.4 解析用建屋モデルの設定	10
2.5 原子炉建屋の建屋重量について	11
3. 評価内容及び評価結果	12
3.1 評価内容	12
3.2 評価結果	15
3.3 まとめ	16

1. 概要

原子炉建屋の基礎地盤の安定性評価においては、設置（変更）許可段階において、建屋の補強を考慮したモデルを用いて評価を実施している。本資料は、設置（変更）許可以降、原子炉建屋について設備の補強や追加等の補強仕様が確定したことから、その重量の増加（以下「増加重量」という。）を踏まえた基礎地盤の安定性評価について説明するものである。

設置（変更）許可における基礎地盤の安定性評価で用いたモデル（以下「設置（変更）許可モデル」という。）と、増加重量の影響を考慮したモデル（以下「補強反映モデル」という。）により評価結果を比較する。

増加重量を考慮した補強反映モデルに対して、原子炉建屋が基準地震動 S_s による地震力に対する基礎地盤のすべり、基礎地盤の支持力及び基礎底面の傾斜に対して十分な安全性を有することを確認する。

2. 解析条件

2.1 解析モデル

解析条件は、設置（変更）許可申請に基づく条件を基本とする。評価対象断面位置図を図 2-1 に、解析用要素分割図を図 2-2 に示す。

評価は、設置（変更）許可モデルにおいて、基礎地盤のすべり安全率の評価結果が最も厳しい結果となった、原子炉建屋 EW 断面を対象に実施する。

2.2 解析手法

基礎地盤のすべり，基礎地盤の支持力及び基礎底面の傾斜に関する安全性については，有限要素法に基づく二次元地震応答解析（以下「動的解析」という。）により検討した。

動的解析では，動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性を考慮するため，等価線形化法による周波数応答解析手法を用いた。なお，常時応力は，地盤の自重計算により求まる初期応力，建屋基礎掘削に伴う解放力及び建屋・埋戻土の荷重を考慮した有限要素法に基づく二次元静的解析により求めた。

基礎地盤のすべりに対する安全性については，動的解析により求まる地震時増分応力と常時応力を重ね合わせた地震時応力から検討した。基礎地盤の支持力に対する安全性については，岩盤支持力試験の結果に基づき，動的解析により求まる地震時増分応力と常時応力を重ね合わせた地震時応力から算出した建屋接地圧に対して検討した。基礎底面の傾斜に対する安全性については，動的解析により求まる地震時の原子炉建屋の相対変位及び傾斜に対する安全性を検討した。

2.3 解析用地盤物性値の設定

解析用物性値は、添付書類「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき設定する。評価に用いる解析用物性値を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

表 2-1(1) 解析用物性値一覧 (狐崎部層)

岩種・岩級		物理特性	強度特性			変形特性				
		単位体積重量 γ (kN/m ³)	静的・動的特性			静的特性		動的特性		
			せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	残留強度 τ (N/mm ²)	静弾性係数 E_s (N/mm ²)	静ポアソン比 ν_s	動せん断弾性係数 G_d (N/mm ²)	動ポアソン比 ν_d	減衰定数 h
B級	砂岩	26.4	1.72	43.0	$1.30 \sigma^{0.73}$	1,770	0.25	第 2-1(2) 参照	0.03	
	頁岩	26.9	1.58	46.0	$1.36 \sigma^{0.62}$	2,160	0.28		0.03	
	ひん岩	28.7	1.72	43.0	$1.30 \sigma^{0.73}$	1,770	0.31		0.03	
C _H 級	砂岩	26.2	1.72	43.0	$1.30 \sigma^{0.73}$	1,770	0.24		0.03	
	頁岩	26.6	1.58	46.0	$1.36 \sigma^{0.62}$	2,160	0.25		0.03	
	ひん岩	28.0	1.72	43.0	$1.30 \sigma^{0.73}$	1,770	0.29		0.03	
C _M 級	砂岩	25.2	0.49	47.0	$1.16 \sigma^{0.62}$	980	0.26		0.03	
	頁岩	25.8	0.49	47.0	$1.16 \sigma^{0.62}$	980	0.20		0.03	
	ひん岩	25.2	0.49	47.0	$1.16 \sigma^{0.62}$	980	0.26		0.03	
C _L 級	砂岩	24.1	0.46	44.0	$0.73 \sigma^{0.76}$	400	0.31		0.03	
	頁岩	24.1	0.44	27.0	$0.58 \sigma^{0.31}$	400	0.31		0.03	
	ひん岩	24.1	0.46	44.0	$0.73 \sigma^{0.76}$	400	0.31		0.03	
D級	砂岩	20.2	0.10	24.0	$0.41 \sigma^{0.49}$	78	0.38	$G_0 = 255.4 \sigma^{0.26}$ $G_d / G_0 =$ $1 / (1 + 119 \gamma^{0.63})$	$h =$ $0.085 \gamma /$ $(0.00026 + \gamma)$ $+ 0.028$	
	頁岩	20.2	0.10	24.0	$0.12 \sigma^{0.21}$	39	0.38			
	ひん岩	20.2	0.10	24.0	$0.41 \sigma^{0.49}$	78	0.38			

表 2-1 (2) 解析用物性値一覧 (狐崎部層)

岩種・岩級		速度層	動的変形特性	
			動せん断弾性係数 $G_d(N/mm^2)$	動ポアソン比 ν_d
B級 及び C _H 級	砂岩	第 2 速度層	1.5×10^3	0.44
		第 3 速度層	5.9×10^3	0.40
		第 4 速度層	13.2×10^3	0.36
		第 5 速度層	16.5×10^3	0.35
	頁岩	第 2 速度層	1.6×10^3	0.44
		第 3 速度層	6.0×10^3	0.40
		第 4 速度層	13.5×10^3	0.36
		第 5 速度層	16.7×10^3	0.35
	ひん岩	第 3 速度層	6.4×10^3	0.40
		第 4 速度層	14.2×10^3	0.36
		第 5 速度層	17.6×10^3	0.35
	C _M 級	砂岩	第 1 速度層	0.2×10^3
第 2 速度層			1.5×10^3	0.44
第 3 速度層			5.7×10^3	0.40
第 4 速度層			12.7×10^3	0.36
第 5 速度層			15.8×10^3	0.35
頁岩		第 1 速度層	0.2×10^3	0.48
		第 2 速度層	1.5×10^3	0.44
		第 3 速度層	5.9×10^3	0.40
		第 4 速度層	13.0×10^3	0.36
		第 5 速度層	16.2×10^3	0.35
ひん岩		第 2 速度層	1.5×10^3	0.44
		第 3 速度層	5.7×10^3	0.40
		第 4 速度層	12.7×10^3	0.36
C _L 級		第 1 速度層	0.2×10^3	0.48
		第 2 速度層	1.4×10^3	0.44
	第 3 速度層	5.5×10^3	0.40	
D級	第 1 速度層	表 2-1(1) 参照	0.48	
	第 2 速度層		0.44	

表 2-2 (1) 解析用物性値一覧 (盛土ほか)

岩種・岩級	物理特性	強度特性				変形特性				
	単位 体積重量 γ (kN/m ³)	静的・動的特性				静的特性		動的特性		
		せん断 強度 τ_0 (N/mm ²)	内部 摩擦角 ϕ (°)	引張 強度 σ_t (N/mm ²)	残留強度 τ (N/mm ²)	静弾性 係数 E_s (N/mm ²)	静ポア ソン比 ν_s	動せん断 弾性係数 G_d (N/mm ²)	動ポア ソン比 ν_d	減衰定数 h
盛土	20.6	0.06	30.0	—	$0.06 + \sigma \tan 30.0^\circ$	$198 \sigma^{0.60}$	0.40	$G_0 = 382 \sigma^{0.71}$ $G_d/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.00036)^*$	0.48	$h = 0.183 \gamma / (\gamma + 0.000261)$
旧表土	19.0	0.08	26.2	—	$0.08 + \sigma \tan 26.2^\circ$	$302 \sigma^{0.80}$	0.40	$G_0 = 211 \sigma^{0.42}$ $G_d/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.00087)$	0.46	$\gamma < 3 \times 10^{-4}$ $h = 0.125 + 0.020 \log \gamma$ $3 \times 10^{-4} \leq \gamma < 2 \times 10^{-2}$ $h = 0.374 + 0.0911 \log \gamma$ $2 \times 10^{-2} \leq \gamma$ $h = 0.22$
断層 及び シーム	18.6	0.067	22.2	—	$0.067 + \sigma \tan 22.2^\circ$	圧縮方向 $124.5 \sigma^{0.90}$ せん断方向 $44.43 \sigma^{0.90}$	0.40	$G_0 = 192.3 \sigma^{0.74}$ $G_d/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.0012)^*$	0.46	$\gamma < 1 \times 10^{-4}$ $h = 0.024$ $1 \times 10^{-4} \leq \gamma < 1.6 \times 10^{-2}$ $h = 0.024 + 0.089 (\log \gamma + 4)$ $1.6 \times 10^{-2} \leq \gamma$ $h = 0.22$

*注：残存剛性率 (G_d/G_0) が小さい領域は次式で補間 $G_0 = E_s / 2(1 + \nu_s)$, $G_d/G_0 = 1 / (1 + \gamma / \gamma_m)$, $\gamma_m = \tau_f / G_0$

表 2-2 (2) 解析用物性値一覧 (盛土ほか)

岩種・岩級	物理特性	強度特性				変形特性				
	単位 体積重量 γ (kN/m ³)	静的・動的特性				静的特性		動的特性		
		せん断 強度 τ_0 (N/mm ²)	内部 摩擦角 ϕ (°)	引張 強度 σ_t (N/mm ²)	残留強度 τ (N/mm ²)	静弾性 係数 E_s (N/mm ²)	静ポア ソン比 ν_s	動せん断 弾性係数 G_d (N/mm ²)	動ポア ソン比 ν_d	減衰定数 h
セメント改良土	21.6	0.65	44.3	0.46	$0.21 + \sigma$ $\tan 40.9^\circ$	690	0.26	$G_0 = 1670$ $G_d/G_0 =$ $1 / (1 + \gamma / 0.00085)$	0.36	$\gamma < 3.8 \times 10^{-5}$ $h = 0.014$ $3.8 \times 10^{-5} \leq \gamma$ $h = 0.151 + 0.031 \log \gamma$
改良地盤	20.6	1.39	22.1	0.65	$0.51 + \sigma$ $\tan 34.6^\circ$	4,480	0.19	$G_0 = 1940$ $G_d/G_0 =$ $1 / (1 + \gamma / 0.00136)$	0.35	$\gamma < 1.2 \times 10^{-4}$ $h = 0.031$ $1.2 \times 10^{-4} \leq \gamma < 5.2 \times 10^{-3}$ $h = 0.227 + 0.050 \log \gamma$ $5.2 \times 10^{-3} \leq \gamma$ $h = 0.113$
背面補強工	24.0	—				28,000	0.2	11,667	0.2	0.05
置換コンクリート	22.5									

2.4 解析用建屋モデルの設定

原子炉建屋の建屋モデルは、質点系モデルを基にモデル化を行った。

図 2-3 にモデル化手法の概念図を示す。下端固定の多質点系モデルから建屋各層の水平剛性 K_H 、鉛直剛性 K_V 及び曲げ剛性 K_ϕ を用いて、せん断剛性 G_i 、ヤング係数 E_i 及びポアソン比 ν_i を求め、等価な有限要素モデルを作成し、水平及び鉛直地震動の同時入力に対応したモデル化を実施した。

モデル化は水平方向及び鉛直方向の1次モードの固有周期が、質点系モデルと有限要素モデルで一致するように実施している。表 2-3 に、原子炉建屋における質点系モデルと有限要素モデルの振動特性の比較を示す。

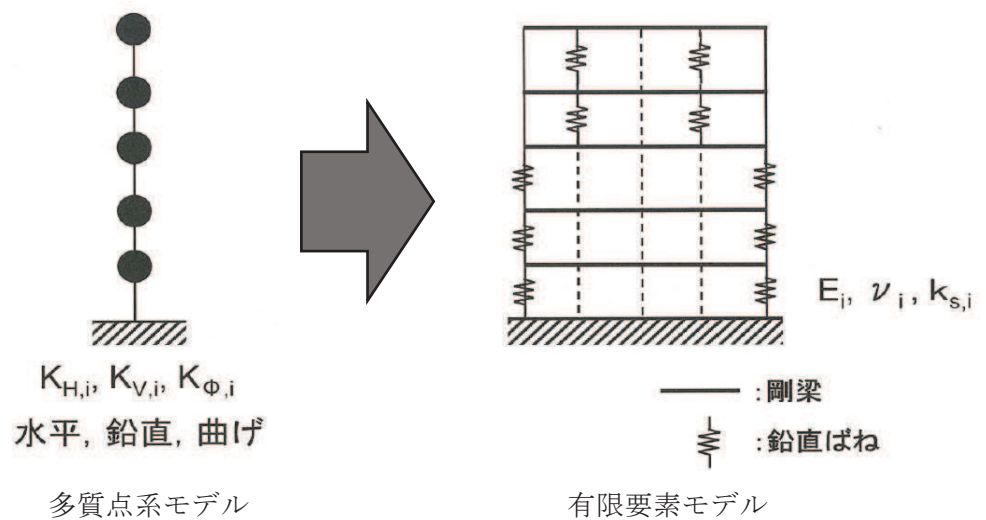


図 2-3 モデル化手法の概念図

表 2-3 原子炉建屋の振動特性比較 (固有周期)

方向	モード数	固有周期 (s)		固有周期誤差 (%)
		質点系モデル	有限要素モデル	
水平	1次	0.21	0.21	0.0
鉛直	1次	0.076	0.076	0.0

2.5 原子炉建屋の建屋重量について

設置（変更）許可モデル，補強反映モデルの建屋重量の比較及び設置（変更）許可モデルに対する重量の増加割合を表 2-4 に示す。

設置（変更）許可モデルと補強反映モデルの重量はほぼ同等であり，地盤安定性の評価に与える影響は小さい。念のため，以降で地盤の安定性評価に与える影響を定量的に確認する。

表 2-4 建屋モデルの重量比較

原子炉建屋モデル重量(kN)		
設置（変更）許可モデル(A)	補強反映モデル(B)	増加割合(B)/(A)
3,414,970	3,458,950	1.013

3. 評価内容及び評価結果

3.1 評価内容

増加重量の影響を確認するため、原子炉建屋モデルを設置（変更）許可モデルから補強反映モデルに変更し、基礎地盤の安定性評価を実施する。

評価項目、評価対象断面及び地震動は、表 3-1 に示す設置（変更）許可の評価結果のうち、最も厳しい結果となる条件を対象とし、基礎地盤のすべりと基礎地盤の支持力に対して $S_s - N1$ （++），基礎底面の傾斜に対して $S_s - N1$ （-+）により確認する。

表 3-2 に基礎地盤支持力の評価基準値を示す。

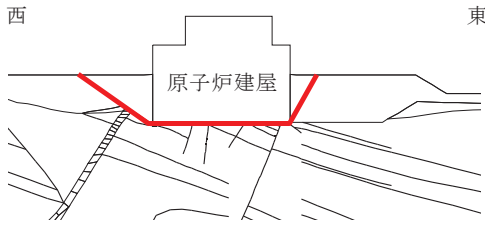
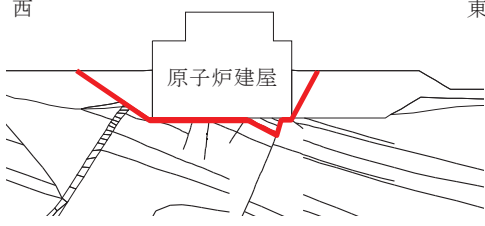
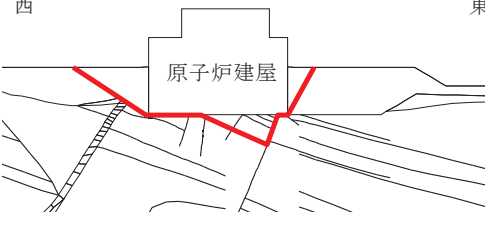
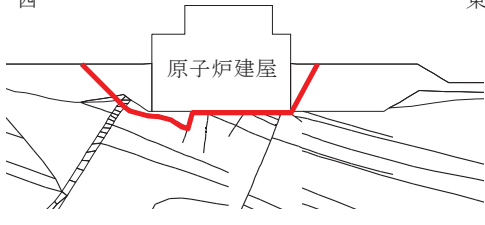
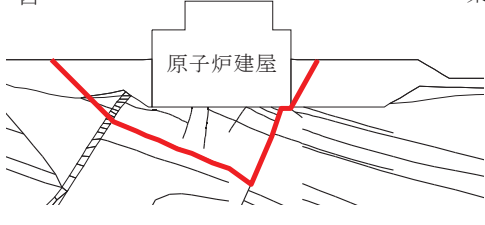
表 3-1 評価対象断面及び地震動

評価項目	評価対象地震動	備考
基礎地盤のすべり (すべり安全率)	$S_s - N1$ (++)	設置（変更）許可の すべり安全率評価一覧 (表 3-3 参照)
基礎地盤の支持力 (最大接地圧)	$S_s - N1$ (++)	設置（変更）許可の 基礎地盤の支持力評価一覧 (表 3-4 参照)
基礎底面の傾斜 (最大傾斜)	$S_s - N1$ (-+)	設置（変更）許可の 基礎底面の傾斜評価一覧 (表 3-5 参照)

表 3-2 基礎地盤支持力の評価基準値

対象施設	基礎地盤支持力の評価基準値 (N/mm^2)	備考
原子炉建屋	13.7	狐崎部層の岩盤 支持力試験の結果

表 3-3 設置（変更）許可のすべり安全率 評価結果一覧

	すべり面形状	基準地震動* (位相)	発生時刻 (秒)	最小すべり 安全率
1	 <p>建屋底面のすべり</p>	S _s -N1 (++)	7.56	2.5
2	 <p>建屋底面+断層・シームのすべり</p>	S _s -N1 (++)	7.56	2.0
3	 <p>建屋底面+断層・シームのすべり</p>	S _s -N1 (++)	7.57	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">1.6</div> (1.54) [2.9]
4	 <p>建屋底面+断層・シームのすべり</p>	S _s -N1 (-+)	7.55	3.2
5	 <p>断層・シームのすべり</p>	S _s -N1 (++)	7.73	2.5

○ : すべり安全率の最小値 — (red) : すべり面 — (black) : 断層・シーム

() : 地盤物性のばらつきを考慮した安全率 [] : 静的非線形解析による安全率

※ : 基準地震動の (++) は正位相, (-+) は水平反転, (+-) は鉛直反転, (--) は水平反転かつ鉛直反転を示す。

表 3-4 設置（変更）許可の基礎地盤の支持力 評価結果一覧

基準地震動* (位相)	発生時刻 (秒)	最大接地圧 (N/mm ²)	評価基準値 (N/mm ²)
S s - N 1 (++)	7.62	3.9	13.7

*注：基準地震動の（++）は正位相，（-+）は水平反転，（+-）は鉛直反転，（--）は水平反転かつ鉛直反転を示す。

表 3-5 設置（変更）許可の基礎底面の傾斜 評価結果一覧

基準地震動* (位相)	発生時刻 (秒)	最大相対変位量 (cm)	最大傾斜
S s - N 1 (-+)	7.80	0.56	1/15,000

*注：基準地震動の（++）は正位相，（-+）は水平反転，（+-）は鉛直反転，（--）は水平反転かつ鉛直反転を示す。

3.2 評価結果

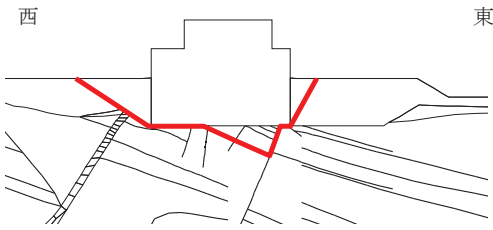
評価結果一覧を表 3-6 に示す。

基礎地盤の安定性評価について建屋モデル重量の影響を確認するため、設置（変更）許可モデルの地盤安定性評価結果と補強反映モデルの評価結果を比較する。

建屋モデル重量の影響について、設置（変更）許可モデルと補強反映モデルの評価結果を比較すると最小すべり安全率，最大接地圧及び最大傾斜とも変更はない。

以上より，増加重量による設置（変更）許可時の基礎地盤安定性評価への影響はないことを確認した。

表 3-6 評価結果一覧

評価項目	地震動	評価結果*	
		設置（変更） 許可モデル	補強反映 モデル
基礎地盤のすべり (すべり安全率)  建屋底面+断層・シームのすべり	S s - N 1 (++)	1.6 (1.62)	1.6 (1.61)
基礎地盤の支持力 (最大接地圧) (N/mm ²)	S s - N 1 (++)	3.9 (3.87)	3.9 (3.93)
基礎底面の傾斜 (最大傾斜)	S s - N 1 (-+)	1/15,000 (1/15,058)	1/15,000 (1/15,032)

注*：()は，桁処理なしの値を示す。

3.3 まとめ

原子炉建屋が設置される基礎地盤の安定性に関して、建屋重量増加を踏まえた補強反映モデルに対して基礎地盤の安定性評価を実施した。その結果、原子炉建屋を設置する地盤が基準地震動 S_s による地震力による基礎地盤のすべり、基礎地盤の支持力及び基礎底面の傾斜に対して十分な安全性を有することを確認した。

また、建屋モデルの重量変更の影響について、設置（変更）許可モデルと補強反映モデルの評価結果の比較により、基礎地盤の安定性評価結果に変更はないことから、設置（変更）許可時の基礎地盤安定性評価への影響はないことを確認した。