

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-工-B-22-0014_改0
提出年月日	2021年2月25日

VI-5-7 計算機プログラム（解析コード）の概要

・SLIP02HDW1

2021年2月

東北電力株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
1.1 使用状況一覧.....	2
2. 解析コードの概要.....	3
3. 解析手法.....	4
3.1 一般事項.....	4
3.2 解析コードの特徴.....	4
3.3 解析手法.....	5
3.4 解析フローチャート.....	6
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	7
3.5.1 検証 (Verification)	7
3.5.2 妥当性確認 (Validation)	13
3.5.3 評価結果.....	13

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SLIP02HDW1について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-1-1-6-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	ver. 4.07

2. 解析コードの概要

項目	コード名 SLIP02HDW1
使用目的	2次元有限要素法によるすべり計算
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2006年
使用したバージョン	ver. 4.07
コードの概要	<p>SLIP02HDW1（以下「本解析コード」という。）は、すべり安全率算定を行う解析コードである。本解析コードの主な特徴は、以下のとおりである。</p> <p>①2次元有限要素法による地震応答解析プログラムの地盤応力から、任意のすべり線の安全率を時刻歴で算定することができる。</p> <p>②要素の破壊状態により、各要素の強度をピーク強度、残留強度、強度なしから判定することができる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・すべり線が通過する要素ごとの滑動力と抵抗力の解析解が、理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作確認を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容のとおり、すべり安全率算定に関して検証していることから、解析の目的に照らして本工事計画の解析に適用することは妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本資料は、すべり安全率算定用解析コード SLIP02HDW1 の概要である。

本解析コードは、鹿島建設株式会社によって開発されたすべり安全率算定を行うプログラムである。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴として、以下の①、②を挙げることができる。

- ① 2次元有限要素法による地震応答解析プログラムの地盤応力から、任意のすべり線の安全率を時刻歴で算定することができる。
- ② 要素の破壊状態により、各要素の強度をピーク強度、残留強度、強度なしから判定することができる。

3.3 解析手法

静的解析から得られる常時応力と動的解析から得られる地震時増分応力を足し合わせて、時刻歴のすべり安全率（想定すべり線に沿った要素を対象とした各時刻におけるせん断力とせん断抵抗力の比）を式(1)のように計算する。

$$\text{すべり安全率 } F_s = \frac{\text{すべり線が通る要素の抵抗力の総和の瞬間値}}{\text{すべり線が通る要素の滑動力の総和の瞬間値}} = \frac{\sum R_i \cdot L_i}{\sum \tau_i \cdot L_i} \quad (1)$$

なお、すべり安全率を算定する際、破壊要素の抵抗強度に関しては、各時間断面の破壊形態により以下に示した強度低下を考慮する。

(1) せん断破壊

せん断破壊した要素の強度定数には、残留強度を用いる。

(2) 引張破壊あるいは複合破壊

引張応力の発生により引張破壊あるいは複合破壊した要素の強度定数は、その要素を通るすべり面の直応力 σ_n により以下に示した強度定数を用いる。

- ・直応力 σ_n が圧縮の場合、強度定数に残留強度を用いる。
- ・直応力 σ_n が引張の場合、強度定数を 0 とする。

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-1 に示し、破壊判定のフローチャートを図 3-2 に示す。

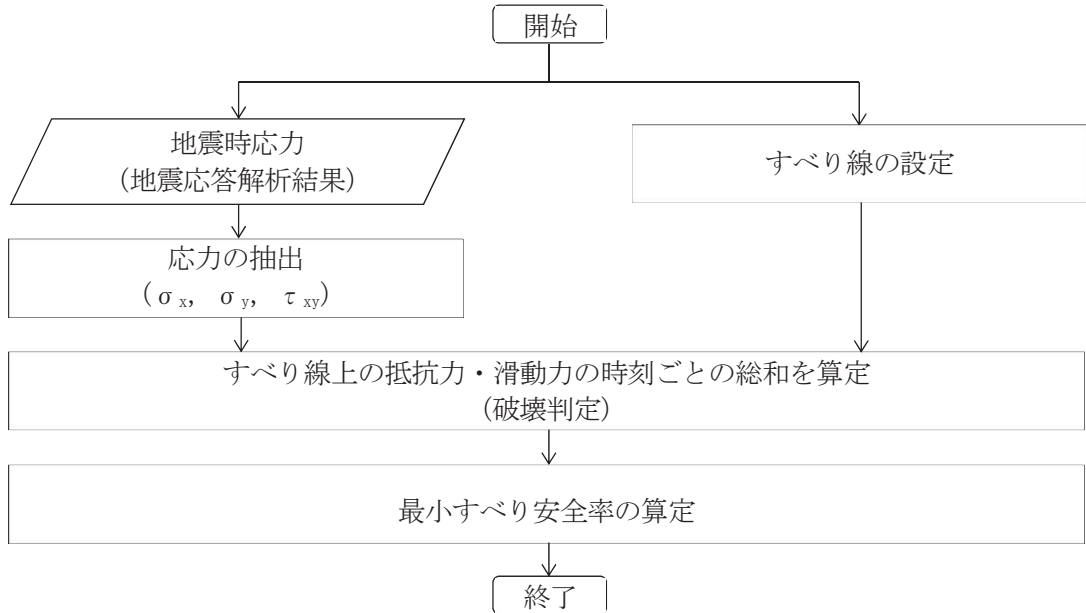


図3-1 解析のフローチャート

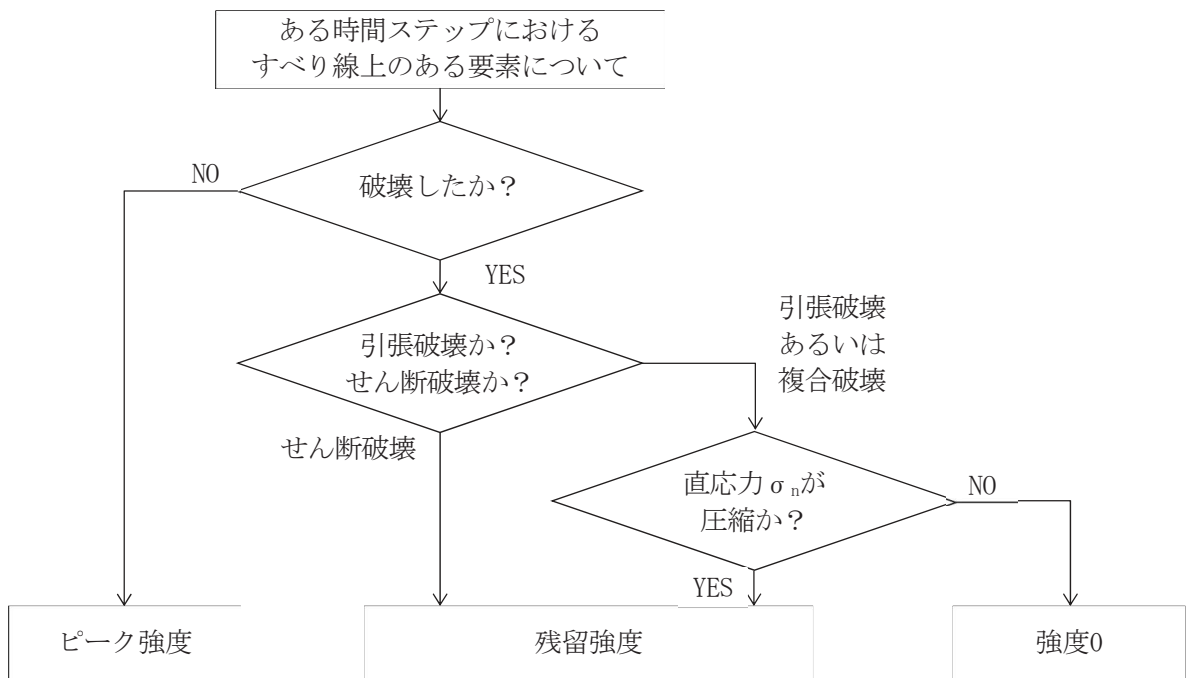


図3-2 破壊判定フローチャート

3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

本解析コードを本解析に用いることについて、動作確認 (動作検証) として理論解との比較を、また妥当性確認を実施した。詳細な内容については下記のとおりとする。

3.5.1 検証 (Verification)

すべり線が通過する要素の滑動力や抵抗力を解析結果と理論解で比較を行った。

(1) 解析条件

解析モデル及び検証用すべり線を図 3-3 に、強度定数を表 3-1 に示す。

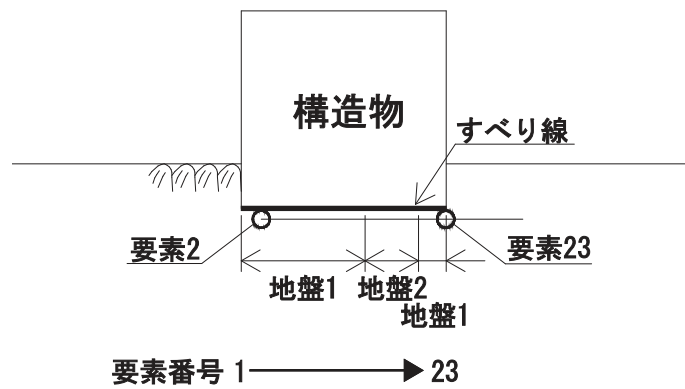


図3-3 解析モデル及び検証用すべり線

表3-1 強度定数

地盤区分	ピーク強度 (kgf/cm ²)	残留強度 (kgf/cm ²)
地盤 1	$\tau_p = 8.1 + \sigma_N \tan 55.7^\circ$	$\tau_r = 3.3 \times \sigma_N^{0.64}$
地盤 2	$\tau_p = 8.3 + \sigma_N \tan 54.5^\circ$	$\tau_r = 3.7 \times \sigma_N^{0.62}$

(2) 検証結果

すべり線が通過する要素の滑動力及び抵抗力を解析解と理論解で比較を行った。本解析コードによる解析解一覧を表 3-2 に、要素番号 2 の理論解を図 3-4 に、要素番号 23 の理論解を図 3-5 に示す。要素番号 2 及び 23 において、解析解と理論解は一致している。

また、理論解一覧を表 3-3 に、すべり線全体におけるすべり安全率の解析解と理論解との比較を表 3-4 に示す。すべり安全率及び滑動力，抵抗力の理論解と，解析解が一致することを確認できる。

表 3-2 本解析コードによる解析解一覧

0 ELS.	SIG-X	SIG-Y	TAU-XY	EL	ANG	R	R*EL	S	S*EL	N	N*EL	IEP	NST	MAT	NoL	PW	C1	C2	C3	C4	C3-CU	C4-CU	FS	Msum	NST	MAT	JF
1	-10.970	-11.264	-5.902	275.000	0.0	24.223	6661.2	-5.902	-1623.1	-10.998	-3024.5	0	1	25	1	0.266	-10.998	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-4.104	25	1	25	1
2	-9.975	-8.612	-3.897	275.000	0.0	20.332	5591.4	-3.897	-1071.6	-8.344	-2294.7	0	1	25	1	0.267	-8.344	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.218	25	1	25	1
3	-8.790	-6.982	-3.587	275.000	0.0	17.942	4934.2	-3.587	-986.5	-6.714	-1846.4	0	1	25	1	0.268	-6.714	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.002	25	1	25	1
4	-8.170	-6.829	-3.499	275.000	0.0	17.719	4872.9	-3.499	-962.2	-6.562	-1804.5	0	1	25	1	0.268	-6.562	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.064	25	1	25	1
5	-7.873	-7.013	-3.330	275.000	0.0	17.989	4947.0	-3.330	-915.7	-6.746	-1855.1	0	1	25	1	0.267	-6.746	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.403	25	1	25	1
6	-7.405	-6.888	-3.180	275.000	0.0	17.806	4896.6	-3.180	-874.6	-6.621	-1820.7	0	1	25	1	0.268	-6.621	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.599	25	1	25	1
7	-7.154	-6.867	-3.222	495.000	0.0	17.775	8798.6	-3.222	-1594.7	-6.600	-3266.9	0	1	25	1	0.268	-6.6	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.518	25	1	25	1
8	-6.820	-6.663	-3.114	495.000	0.0	17.475	8650.1	-3.114	-1541.5	-6.395	-3165.6	0	1	25	1	0.268	-6.395	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.611	25	1	25	1
9	-6.707	-5.569	-2.999	625.889	0.0	15.903	9953.3	-2.999	-1877.1	-5.323	-3331.4	0	1	25	1	0.246	-5.323	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.302	25	1	25	1
10	-8.305	-5.320	-3.905	371.828	0.0	15.507	5766.0	-3.905	-1451.8	-5.053	-1878.8	0	1	27	1	0.268	-5.053	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-3.972	27	1	27	1
11	-7.231	-8.214	-1.894	364.392	0.0	19.748	7195.8	-1.894	-690.1	-7.945	-2895.2	0	1	27	1	0.268	-7.945	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-10.427	27	1	27	1
12	-6.785	-7.333	-2.763	55.800	0.0	18.396	1026.5	-2.763	-154.2	-7.024	-391.9	0	1	25	1	0.310	-7.024	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-6.657	25	1	25	1
13	-6.343	-6.355	-2.609	554.654	0.0	17.024	9442.4	-2.609	-1447.2	-6.088	-3376.5	0	1	25	1	0.268	-6.088	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-6.525	25	1	25	1
14	-5.820	-5.386	-2.779	520.000	0.0	15.603	8113.7	-2.779	-1444.9	-5.118	-2661.6	0	1	25	1	0.268	-5.118	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.615	25	1	25	1
15	-5.697	-4.715	-2.783	520.000	0.0	14.619	7602.1	-2.783	-1447.0	-4.447	-2312.6	0	1	25	1	0.268	-4.447	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-5.254	25	1	25	1
16	-5.634	-4.252	-2.811	533.389	0.0	13.942	7436.5	-2.811	-1499.6	-3.985	-2125.6	0	1	25	1	0.267	-3.985	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-4.959	25	1	25	1
17	-6.225	-4.235	-3.125	7.991	0.0	13.800	110.3	-3.125	-25.0	-3.888	-31.1	0	1	25	1	0.347	-3.888	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-4.416	25	1	25	1
18	-5.187	-3.876	-3.038	498.620	0.0	13.463	6713.0	-3.038	-1515.0	-3.683	-1836.3	0	1	24	1	0.193	-3.683	9999	-0.951	8.3	-0.951	8.3	-4.431	24	1	24	1
19	-5.750	-3.836	-3.159	244.765	0.0	13.335	3263.9	-3.159	-773.1	-3.591	-879.1	0	1	24	1	0.245	-3.591	9999	-0.951	8.3	-0.951	8.3	-4.222	24	1	24	1
20	-6.309	-3.602	-3.281	244.764	0.0	12.954	3170.7	-3.281	-803.2	-3.320	-812.6	0	1	24	1	0.282	-3.32	9999	-0.951	8.3	-0.951	8.3	-3.948	24	1	24	1
21	-7.672	-3.686	-3.481	2.643	0.0	12.979	34.3	-3.481	-9.2	-3.337	-8.8	0	1	24	1	0.349	-3.337	9999	-0.951	8.3	-0.951	8.3	-3.728	24	1	24	1
22	-6.572	-2.395	-2.508	273.802	0.0	11.259	3082.8	-2.508	-686.6	-2.155	-590.1	0	1	25	1	0.240	-2.155	9999	-0.972	8.1	-0.972	8.1	-4.490	25	1	25	1
23	-8.453	-1.577	-4.029	274.026	0.0	3.950	1082.5	-4.029	-1104.1	-1.324	-362.9	10	3	25	1	0.253	3.3	0.64	-1.324	9999	3.95	0	-0.980	295	3	25	10

抵抗力/すべり力 123345.8 -24497.8
安全率 5.035

- 0 ELS. : 要素番号
- SIG-X : σ_x (kgf/cm²)
- SIG-Y : σ_y (kgf/cm²)
- TAU-XY : τ_{xy} (kgf/cm²)
- EL : 線分長 (cm)
- ANG : すべり面角 (°)
- R : 抵抗力 (kgf/cm²)
- R*EL : 抵抗力 (kgf/cm)
- S : すべり応力 (kgf/cm²)
- S*EL : すべり力 (kgf/cm)
- N : 垂直応力 (kgf/cm²)
- N*EL : 垂直力 (kgf/cm)
- IEP : TH破壊判定 0=非破壊, 1=せん断破壊, 10=片引張, 11=せん断破壊+片引張, 20=両引張, 21=せん断破壊+両引張
- NST : 物性グループ
- MAT : 材料番号
- NoL : 線分番号
- PW : 間隙水圧 (kgf/cm²)
- C1 : JFにより異なる
- C2 : JFにより異なる
- C3 : JFにより異なる
- C4 : JFにより異なる
- C3-CU : JFにより異なる
- C4-CU : JFにより異なる
- FS : 局所安全率
- Msum : 総材料番号
- NST : 物性グループ
- MAT : 材料番号
- JF : JF

JF	C1	C2	C3	C4	C3-CU	C4-CU	備考
1	ダミー	ダミー	-φ	C	-φ	C	$\tau_R = C + \sigma \tan \phi$ (σ: 計算ステップ)
10	A	B	ダミー	ダミー	A · σ _v ²	0.0	$\tau_R = A \times \sigma^2$ (σ: 計算ステップ)
71	ダミー	ダミー	-φ _{CU}	C _{CU}	0.0	C _{CU} + σ _{CU30} · tan φ _{CU}	$\tau_R = C_{CU} + \sigma \tan \phi_{CU}$ (σ: CU30)
73	ダミー	ダミー	-φ _{CU}	C _{CU}	C _{CU} + σ _{CU30} · tan φ _{CU}	0.0	$\tau_R = C_{CU} + \sigma \tan \phi_{CU}$ (σ _v : CU30)
3	σ _v	ダミー	C	-φ	C	-φ	$\tau_R = C + \sigma_v \cdot \tan \phi$ (σ _v : 計算ステップ)

要素番号	2	理論解安全率	-5.218	解析解安全率	-5.218
材料番号	25 (地盤1)				
構成節点	節点番号	X座標	Y座標	・応力変換式	
	I	1143	-3539	-475	$\sigma_n = (\sigma_y + \sigma_x)/2 + (\sigma_y - \sigma_x)/2 \cdot \cos(-2\theta) + \tau_{xy} \cdot \sin(-2\theta)$
	J	1142	-3539	-800	$\tau_n = S = -(\sigma_y - \sigma_x)/2 \cdot \sin(-2\theta) + \tau_{xy} \cdot \cos(-2\theta)$
	K	2139	-3264	-800	
	L	2138	-3264	-475	
すべり線交点		X座標	Y座標		
A点		-3539	-480		
B点		-3264	-480		
すべり線の通過長L(cm)				275	* $L = ((XB-XA)^2 + (YB-YA)^2)^{0.5}$
すべり線の角度 α (y軸となす角度, °)				0	* $\theta = \tan^{-1}((XB-XA)/(YB-YA))$
強度定数					
健全強度	せん断強度 τ_0 (kgf/cm ²)			8.1	
	内部摩擦角 ϕ (°)			55.7	
残留強度※	A			3.3	※強度定数A、Bは、下式の係数を示す
	B			0.64	$\tau = A \times \sigma^B$
応力(kgf/cm ²)	常時応力	地震時増分応力	常時+地震時増分応力		
σ_x	-5.748	-4.227	-9.975		
σ_y	-5.448	-3.164	-8.612		
τ_{xy}	-1.598	-2.299	-3.897		
浮力	0.268		0.268		
σ_N	(kgf/cm ² , 圧縮-, 引張+)		-8.612	* $\sigma_n = (\sigma_y + \sigma_x)/2 + (\sigma_y - \sigma_x)/2 \cdot \cos(-2\theta) + \tau_{xy} \cdot \sin(-2\theta)$	
σ_3	(kgf/cm ² , 圧縮-, 引張+)		-13.250	* $\sigma_3 = (\sigma_y + \sigma_x)/2 - (((\sigma_y - \sigma_x)/2)^2 + \tau_{xy}^2)^{0.5}$	
σ_1	(kgf/cm ² , 圧縮-, 引張+)		-5.338	* $\sigma_1 = (\sigma_y + \sigma_x)/2 + (((\sigma_y - \sigma_x)/2)^2 + \tau_{xy}^2)^{0.5}$	
要素ごとの安全係数 f_s			3.039	* $f_s = \text{ABS}((\tau_0 - ((\sigma_y + \sigma_x)/2 + \text{浮力}) \cdot \tan \phi) \cdot \cos \phi) / (((\sigma_y - \sigma_x)/2)^2 + \tau_{xy}^2)^{0.5}$	
破壊判定	$\sigma_1 < 0, f_s > 1.0 \Rightarrow$		IEP=0	*ピーク強度	
せん断抵抗応力R(kgf/cm ²)			20.332	* $R = \tau_p = \tau_0 - (\sigma_N + \text{浮力}) \cdot \tan \phi$ (ピーク強度)	
せん断応力S(kgf/cm ²)			-3.897	* $S = -(\sigma_y - \sigma_x)/2 \cdot \sin(-2\theta) + \tau_{xy} \cdot \cos(-2\theta)$	
せん断抵抗力(kgf/cm)			5591.4	* $R \times L$	
せん断力(kgf/cm)			-1071.6	* $S \times L$	

図3-4 要素番号2の理論解

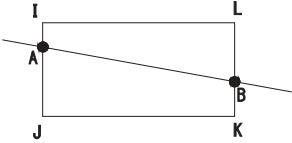
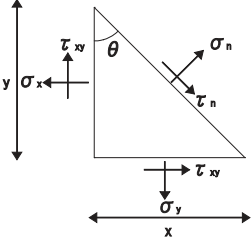
要素番号	23	理論解安全率	-0.980	解析解安全率	-0.980
材料番号	25 (地盤1)				
構成節点	節点番号	X座標	Y座標	・応力変換式 $\sigma_n = (\sigma_y + \sigma_x) / 2 + (\sigma_y - \sigma_x) / 2 * \cos(-2\theta) + \tau_{xy} * \sin(-2\theta)$ $\tau_n = S = -(\sigma_y - \sigma_x) / 2 * \sin(-2\theta) + \tau_{xy} * \cos(-2\theta)$	
I	2177	3650.765	-475		
J	2178	3723.204	-774.524		
K	1559	3926	-800		
L	1574	3931	-475		
					
すべり線交点	X座標	Y座標			
A点	3651.974	-480			
B点	3926	-480			
すべり線の通過長L(cm)			274.026	*L = ((XB-XA)^2 + (YB-YA)^2)^0.5	
すべり線の角度α (y軸となす角度, °)			0	*θ = tan ⁻¹ ((XB-XA)/(YB-YA))	
強度定数					
健全強度	せん断強度 τ ₀ (kgf/cm ²)			8.1	
	内部摩擦角 φ (°)			55.7	
残留強度※	A			3.3	※強度定数A、Bは、下式の係数を示す
	B			0.64	τ = A × σ ^B
応力(kgf/cm ²)	常時応力	地震時増分応力	常時+地震時増分応力		
σ _x	-11.601	3.147	-8.453		
σ _y	-8.630	7.053	-1.577		
τ _{xy}	-0.320	-3.709	-4.029		
浮力	0.253	0.253			
σ _n	(kgf/cm ² , 圧縮-, 引張+)			-1.577	*σ _n = (σ _y + σ _x) / 2 + (σ _y - σ _x) / 2 * cos(-2θ) + τ _{xy} * sin(-2θ)
σ ₃	(kgf/cm ² , 圧縮-, 引張+)			-10.312	*σ ₃ = (σ _y + σ _x) / 2 - (((σ _y - σ _x) / 2) ² + τ _{xy} ²) ^{0.5}
σ ₁	(kgf/cm ² , 圧縮-, 引張+)			0.282	*σ ₁ = (σ _y + σ _x) / 2 + (((σ _y - σ _x) / 2) ² + τ _{xy} ²) ^{0.5}
要素ごとの安全係数fs			1.605	*fs = ABS((τ ₀ - ((σ _y + σ _x) / 2 + 浮力) * tan φ) * cos φ) / (((σ _y - σ _x) / 2) ² + τ _{xy} ²) ^{0.5}	
破壊判定	σ ₁ > 0, fs > 1.0 ⇒		IEP=10	*残留強度	
せん断抵抗応力R(kgf/cm ²)			3.950	*R = τ ₀ = A * (σ _n + 浮力) ^B (残留強度)	
せん断応力S(kgf/cm ²)			-4.029	*S = -(σ _y - σ _x) / 2 * sin(-2θ) + τ _{xy} * cos(-2θ)	
せん断抵抗力(kgf/cm)			1082.5	*R × L	
せん断力(kgf/cm)			-1104.1	*S × L	

図3-5 要素番号23の理論解

3.5.2 妥当性確認 (Validation)

すべり安全率の算定に本解析コードを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・ 検証の内容のとおり、すべり安全率算定に関して検証していることから、解析の目的に照らして本解析に適用することは妥当である。

3.5.3 評価結果

本解析コードを本解析に用いるにあたり、検証及び妥当性確認として理論解との比較を実施し、解析解が理論解と一致することを確認した。したがって、本解析コードを本解析に用いることは妥当である。