

紀の川市西脇地区斜面崩落に関する 調査検討会

解析資料

目次

1. 安定解析	1
2. 浸透流解析	6
3. 補強土壁排水工の検討	10
4. 連成解析	15
(付：連成解析結果)	
5. 崩落斜面の原因について	17

1. 安定解析

1.1 目的

- ① 地質調査結果で明らかにした複合すべりをもとに、補強土壁盛土の影響、地下水位上昇の影響を安定解析で検討する。
- ② 地質調査結果で明らかにした複合すべりをもとに、補強土壁盛土前の当初地形に対し、地下水位上昇の影響を安定解析で把握する。
- ③ 斜面崩落により最終的には複合すべり面形状が形成されたと考えられるが、斜面崩落発生直後のすべり面形状は不明である。そこで、すべり面を特定せず、繰り返し円弧すべり計算によって、斜面崩落現象の再現、補強土壁盛土の影響、地下水位上昇の影響を検討する。

1.2 方法

(1) すべり面モデル設定

すべり面のモデル設定は、以下の2つを適用する。

① 「複合すべり面」

- ・ 地質調査結果をもとに、斜面崩落すべり面はDt（崩積土）層・D（強風化岩）層に複合すべり面で設定。
- ・ 斜面崩落土砂収支を検討した結果、複合すべりによる発生土砂量と堆積土砂量は整合していることを確認済み（第3回検討会別冊資料）。
- ・ 安定解析式はヤンプー法を適用。

② 「試行円弧すべり」

- ・ 想定する範囲は、Dt（崩積土）層・D（強風化岩）層内に設定。
- ・ 斜面崩落崖頂点を円弧すべり通過点として指定。
- ・ 盛土部で円弧すべりは発生しない。
- ・ 安定解析式はフェレニウス法を適用。

(2) 土質定数の設定

- ・ Dt（崩積土）、D層（風化岩）より複数の不攪乱試料を採取・試験し、試験値の平均値を各層の土質定数とした。安定解析に用いる定数を表1.1に示す。

表 1.1 安定解析に用いる定数

区分	単位体積重量 γ (kN/m ³)	既往三軸圧縮試験 (CD) 結果 ¹⁾		三軸圧縮試験 (CUバー) 結果 (有効応力) ²⁾		備考
		粘着力C (KN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力C (KN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	
盛土	19	試験値:23 設計値:0	30	2	36	試験結果値
Dt	18	—	—	4.5	35.4	試験結果平均値
D	18	—	—	3.0	34.9	試験結果平均値
D~CL	18	—	—	(84)	(40)	N値からの推定

(3) 複合すべりの安定解析ケース設定 (断面モデル: 図 1.1)

1) 盛土・地下水位の影響検討

- ① 当初地形（盛土前・地下水位無し）
- ② 盛土後（地下水位無し）
- ③ 盛土後（地下水位は盛土下面付近）
- ④ 盛土後（地下水位は地表付近まで上昇）
- ⑤ 盛土後（静水圧以上の水圧上昇を仮定し、盛土天端付近でさらに0.5m上昇）*
- ⑥ 盛土後（静水圧以上の水圧上昇を仮定し、盛土天端付近でさらに1.0m上昇）*

※ケース⑤⑥は第3回検討会意見を踏まえて実施

2) 当初地形に対する地下水位の影響検討 (断面モデル: 図 1.2)

- ① 当初地形（盛土前・地下水位無し）
- ② 当初地形（盛土前に対し地下水位を地表まで上昇）

(4) 試行円弧すべりの安定解析ケース設定 (断面モデル: 図 1.7)

- ① 当初地形（盛土前・地下水位無し）
- ② 盛土後（地下水位無し）
- ③ 盛土後（地下水位は盛土下面付近）
- ④ 盛土後（地下水位は地表付近まで上昇）

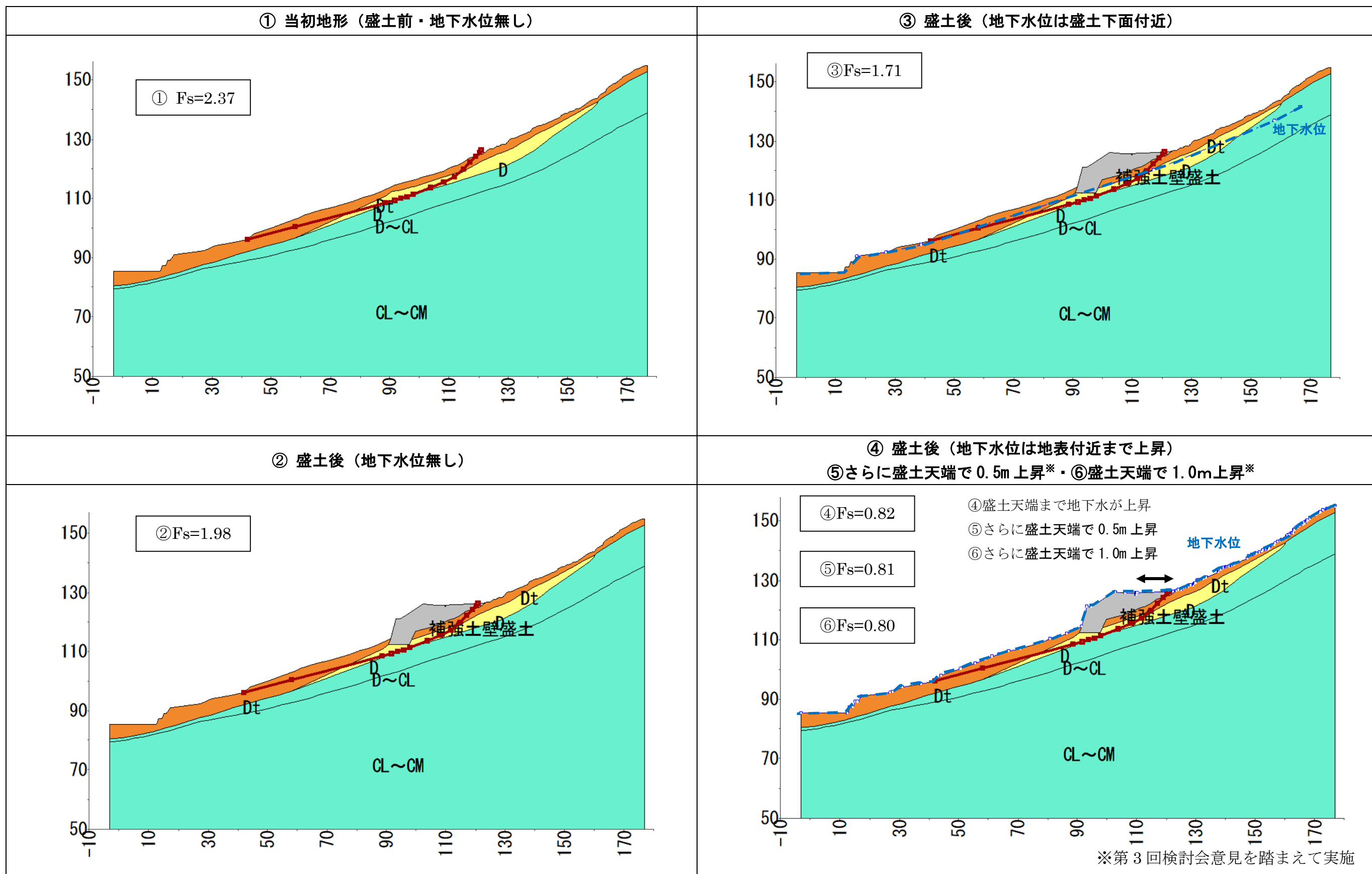


図 1.1 盛土・地下水位の影響検討：複合すべり 断面モデルと安定解析ケース

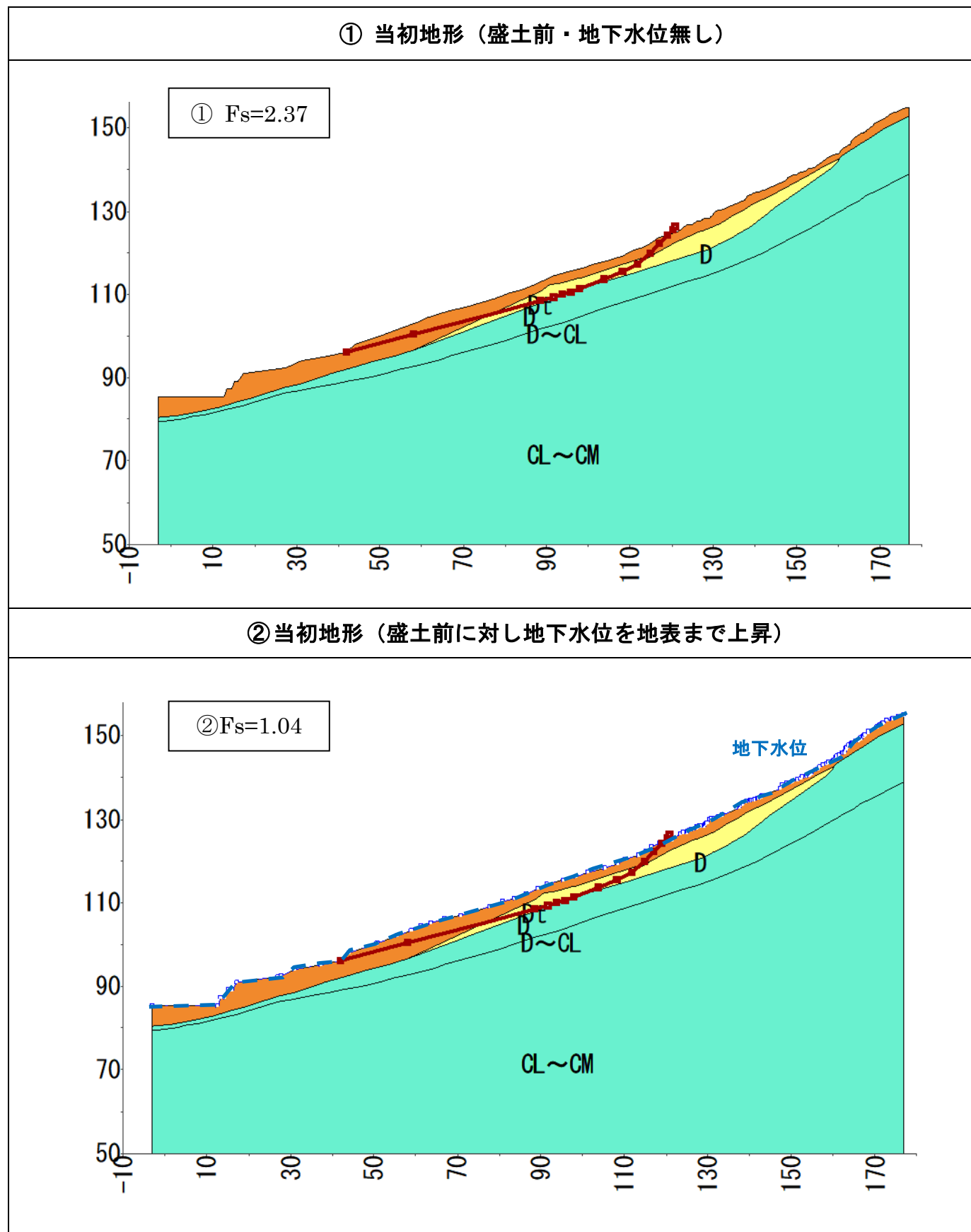


図 1.2 当初地形に対する地下水位の影響検討： 複合すべり 断面モデルと安定解析ケース

1.3 結果

(1) 複合すべりによる盛土・地下水位の影響検討結果

盛土・地下水による安全率の変化フローを図 1.3 に、安全率の変化グラフを図 1.5 に示す。

- 盛土段階で安全率は低下するが、1 は大きく上回っている。
- 地下水位が盛土下面付近の段階では、安全率 1 を大きく上回っている。
- 盛土後、地下水位が地表付近まで上昇したケースで、安全率は 1 を下回る。
- 地表面の水たまりを想定するために設定した、「ケース⑤盛土天端付近で地表より 0.5m 上昇」、「ケース⑥盛土天端付近で地表より 1.0m 上昇」のケースでは、安全率はさらに低下するが、低下幅は小さい。

項目	三軸圧縮試験結果 (有効応力)	
	Dt	D
C' (KN/m ²)	4.5	3.0
φ' (°)	35.4	34.9

ケース	安全率
① 当初地形(盛土前・地下水位無し)	2.37 39%down
② 盛土後(地下水位無し)	1.98 27%down
③ 盛土後(地下水位は盛土下面付近)	1.71 89%down
④ 盛土後(地下水位は地表まで上昇)	0.82 1%down
⑤ 盛土後(地下水位はさらに盛土天端で地表+0.5mまで上昇)*	0.81 1%down
⑥ 盛土後(地下水位はさらに盛土天端で地表+1.0mまで上昇)*	0.80

図 1.3 盛土・地下水による安全率の変化 (複合すべり面)

※第 3 回検討会意見を踏まえて実施

(2) 複合すべりによる当初地形に対する地下水位の影響検討結果

当初地形 (盛土前) に対し、地表まで地下水位を上昇させた安全率の変化フローを図 1.4 に示す。

- 当初地形に対し、地下水位が地表まで上昇したケースを試算した結果、安全率は大きく低下するものの、安全率 1 は上回る。

項目	三軸圧縮試験結果 (有効応力)	
	Dt	D
C' (KN/m ²)	4.5	3.0
φ' (°)	35.4	34.9

ケース	安全率
① 当初地形(盛土前・地下水位無し)	2.37 133%down
② 当初地形(地下水位は地表付近まで上昇)	1.04

図 1.4 当初地形における安全率の変化 (複合すべり面)

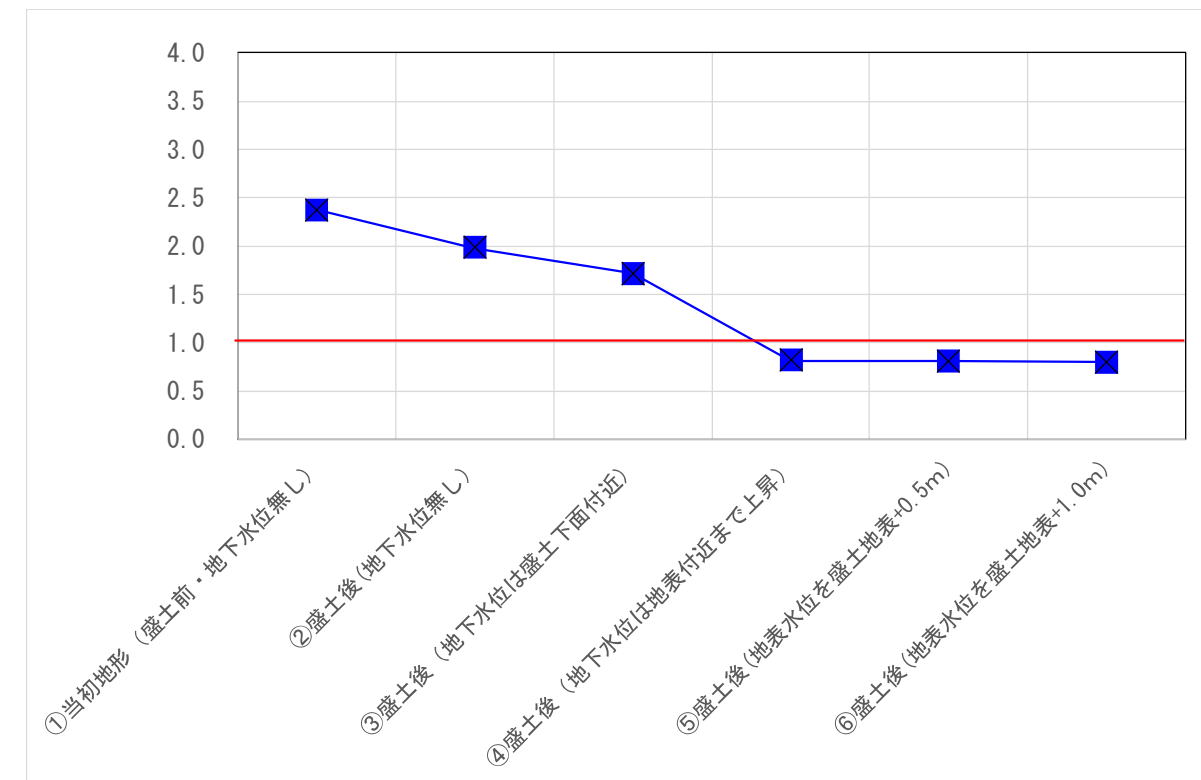


図 1.5 盛土・地下水による安全率の変化グラフ (複合すべり面)

(3) 試行円弧すべりによる斜面崩落現象・盛土・地下水位の影響検討結果

安全率の変化フローを図 1.6 に、安定解析断面モデルと安定解析結果を図 1.7 に示す。

- ケース③盛土後、地下水位が盛土下面付近の場合、円弧すべりの最小安全率は $F_s > 1.0$ となった。
- ケース④地下水位を地表面付近に想定した場合、最小安全率 $F_s = 0.72$ の円弧すべりが発生する結果となった。この円弧すべり範囲は、補強土壁のり尻ではなく下方斜面に出現している。
- 地下水位を地表面付近までの上昇を想定したケース④で、最大半径円弧すべりの安全率は、 $F_s = 0.76$ と 1 を大きく下回っている。この最大半径円弧すべりの範囲は、複合すべりの範囲と概ね一致している。
- 複合すべりと同様に、地下水位が地表付近まで上昇したケースで、安全率 1 を大きく下回る結果が得られた。

項目	三軸圧縮試験結果 (有効応力)	
	Dt	D
C' (KN/m ²)	4.5	3.0
ϕ' (°)	35.4	34.9

ケース	安全率	
①当初地形(盛土前・地下水位無し)	1.98	
	16%down	
②盛土後(地下水位無し)	1.82	
	23%down	
③盛土後(地下水位は盛土下面付近)	1.59	
	87%down	83%down
④盛土後(地下水位は地表面付近まで上昇)	0.72	0.76
	(最小安全率円弧)	(最大半径円弧)

図 1.6 盛土・地下水による安全率の変化 (試行円弧すべり)

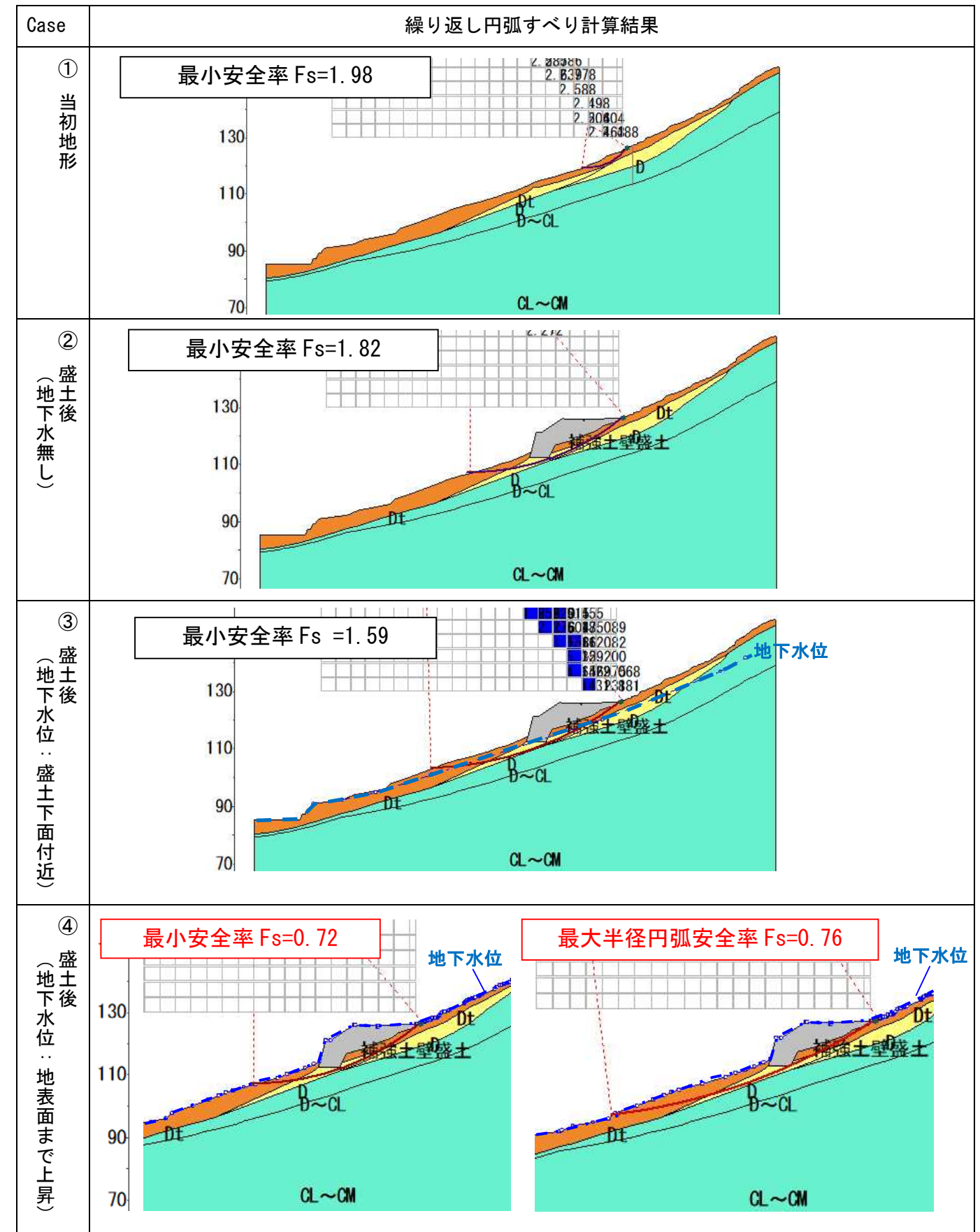


図 1.7 安定解析断面モデル (試行円弧すべり) と安定解析結果

2. 浸透流解析

2.1 目的

第3回検討会では、雨水を全て地表面に与える条件とした浸透流解析を実施している。しかしながら、実現象として雨水の全てが地山に浸透するのではなく、一部は表面流として流出する事が知られている(表2.1)。このため、降雨浸透条件の違いを考慮した浸透流解析を行うことで、斜面崩落に与える降雨の影響等について確認を行う事を目的とする。

2.2 方法

(1) 計算条件の設定

- ① 二次元浸透流解析エンジン：AC - UNSAF2D ver. 2013
- ② 断面モデル：地質断面図をもとにモデルを作成(図2.2)
- ③ 各層の透水係数：現場透水試験結果等を参考に設定(表2.2、表2.3)
- ④ 降雨条件 10月14日～10月22日までの時間雨量を全域に入力(表2.5)
- ⑤ 地表面からの水の浸出条件：浸出なし。(崩壊発生前に斜面や補強土盛土からの極端な湧水等、排水の状況が確認されていないため)
- ⑥ 降雨浸透条件：表2.4のとおり、複数ケース検討を実施

表2.2 各層の透水係数(第3回検討会資料より)

地質区分	設定透水係数(cm/sec)	根拠
Dt	1×10^{-4}	現場透水試験結果の代表値を適用した。 (試験結果: 1.67×10^{-4} cm/sec $\sim 3.26 \times 10^{-4}$ cm/sec)
D	1×10^{-7}	細粒分を含む風化岩であることから、「非常に低い」値を参考に感度調整。
補強土壁盛土	1×10^{-5}	現場透水試験結果代表値を適用した。 (試験結果: 1.08×10^{-5} cm/s $\sim 8.42 \times 10^{-6}$ cm/s と、 10^{-5} オーダー)
D~CL	1×10^{-7}	基盤岩として「非常に低い」の値を採用。
CL~CM		

表2.3 透水係数と透水性・対応する土の種類の関係

透水性	透水係数 k (m/s)				
	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}
透水性	実質上不透水	非常に低い	低い	中位	高い
対応する土の種類	粘土性(C)	微細砂、シルト、砂-シルト-粘土混合土(SF)(S-P)(M)	砂及びれき(礫)(GW)(GP)(SW)(SP)(G-F)	清浄なれき(GW)(GP)	
透水係数を直接測定する方法	特殊な変水位透水試験	変水位透水試験	定水位透水試験	特殊な変水位透水試験	
透水係数を間接的に測定する方法	圧密試験結果から計算	なし	清浄な砂及びれきは、粒度と開けき(隙)比から計算		

表2.1 地表面の工種別基礎流出係数

地表面の種類		流出係数
路面	舗砂利装	0.70~0.95
	道	0.30~0.70
路肩、のり面等	細粒土	0.40~0.65
	粗粒土	0.10~0.30
	硬岩	0.70~0.85
	軟岩	0.50~0.75
砂質土の芝生	勾配 0~2%	0.05~0.10
	" 2~7%	0.10~0.15
	" 7%以上	0.15~0.20
粘性土の芝生	勾配 0~2%	0.13~0.17
	" 2~7%	0.18~0.22
	" 7%以上	0.25~0.35
屋根	間地	0.75~0.95
	芝、樹林の多い公園	0.20~0.40
勾配の緩い山地		0.10~0.25
	勾配の急な山地	0.20~0.40
田、水面		0.40~0.60
	畑	0.70~0.80
		0.10~0.30

道路土工要綱(平成21年)日本道路協会 p.134

(2) 降雨浸透条件の設定

検討した降雨浸透条件を以下に示す。

表2.4 雨水浸透条件 検討ケース一覧表

検討ケース	検討条件	内容
基本ケース	降雨100%を地山に設定	・流出係数0。降雨の100%を設定。
検討ケース①	地表面の流出係数を考慮	・表2.1の「勾配の緩い山地」として流出係数を中央値の0.3を採用 ・ 降雨の70%を設定し解析を実施
検討ケース②	地山の透水係数を上限値とした降雨浸透を設定	・地表面の地質別に設定した透水係数(表2.2)に応じて、浸透可能な雨量を設定し、解析を実施 ・Dt層の透水係数 1×10^{-4} cm/s \rightarrow 1時間当たり最大3.6mm/h浸透
検討ケース③	降雨浸透は考えずに斜面上端と下端で境界条件として水面を設定	・地表面からの降雨の浸透は無いものとし、斜面上端と下端に地下水位面を境界条件として設定 ・その上で斜面上端から地下水が流入する解析を実施

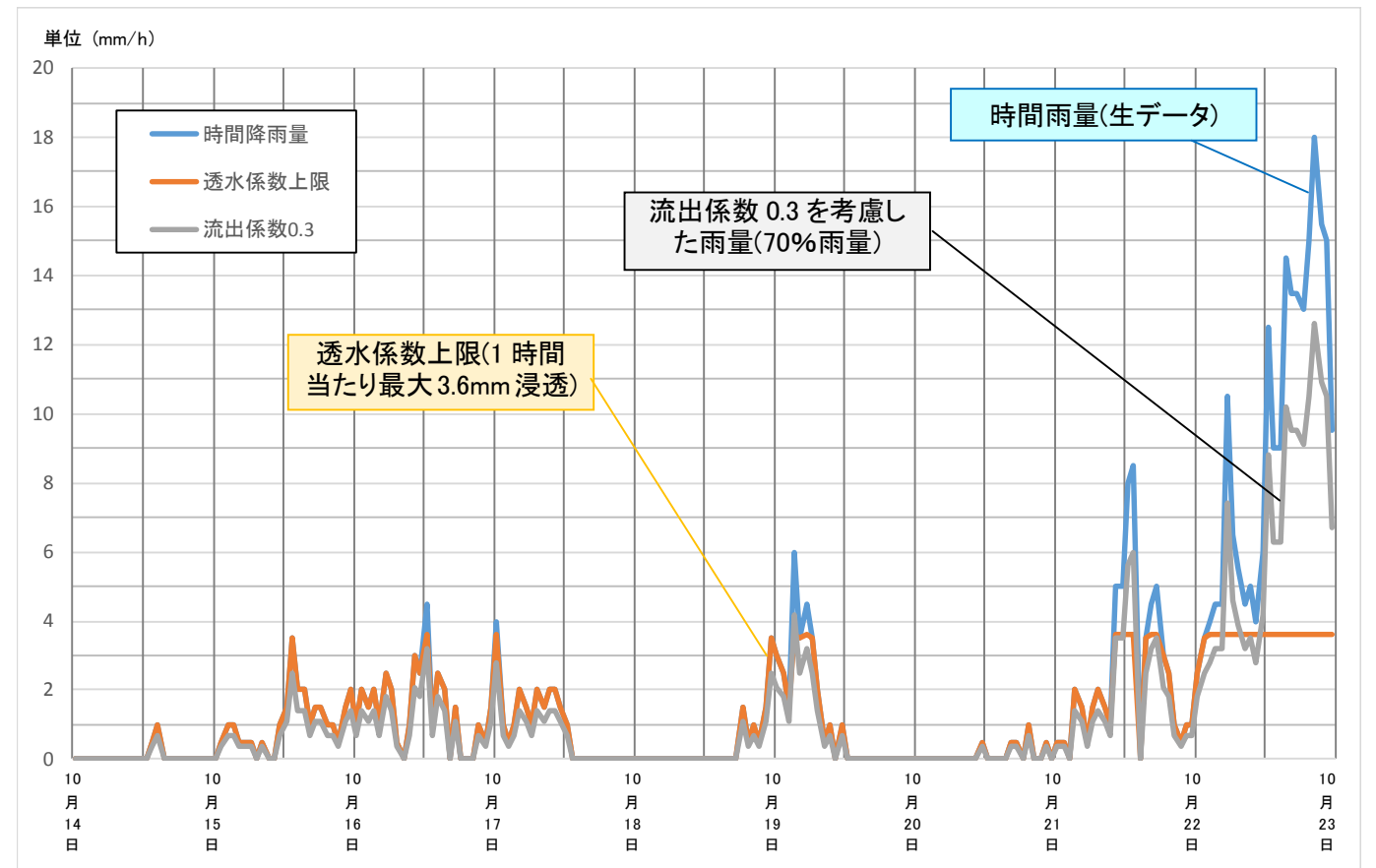


図2.1 雨水浸透条件を考慮した1時間当たりの降雨量変化グラフ

10月14日の降り始めから10月22日までの時間雨量を全域に降らせる

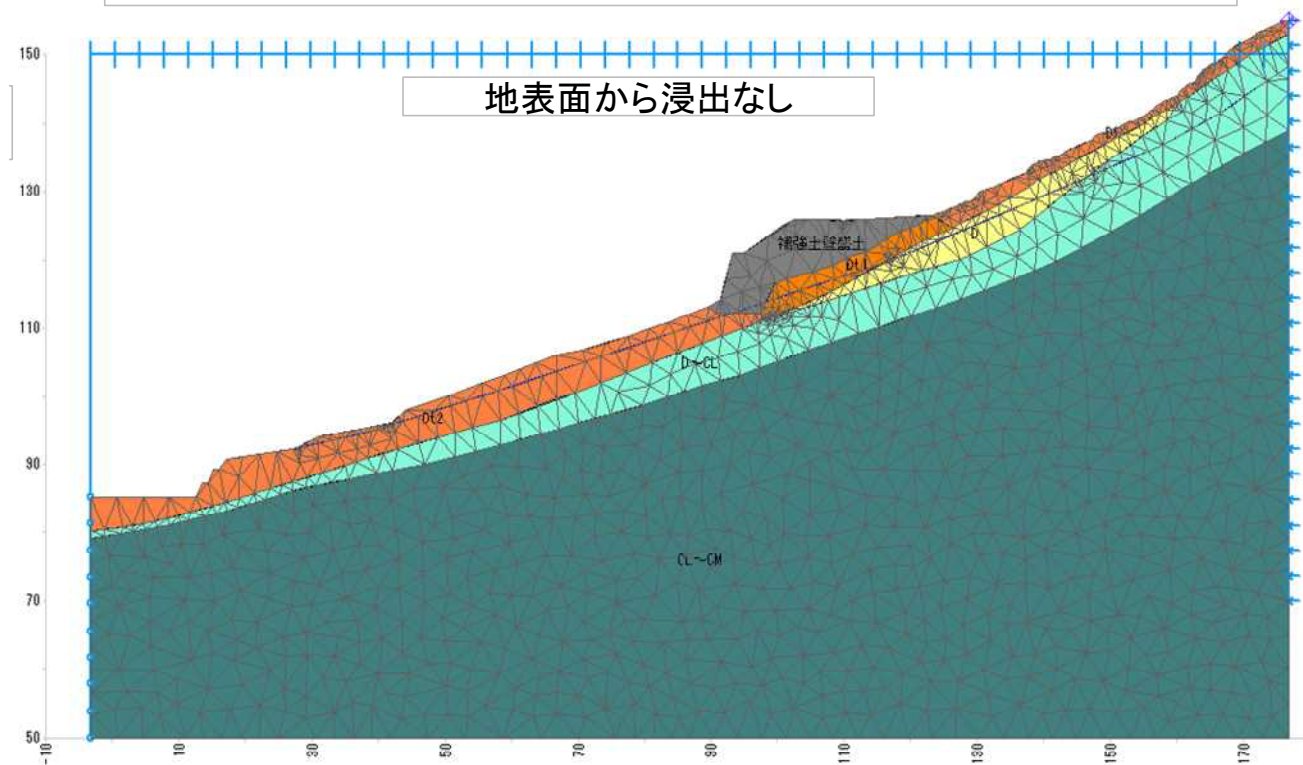


図 2.2 浸透流解析 境界条件

表 2.5 浸透流解析に用いる降水量データ

経過日	0日目	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目
時刻	10月14日	10月15日	10月16日	10月17日	10月18日	10月19日	10月20日	10月21日	10月22日
0:00	0	0	1	4	0	3	0	0.5	2.5
1:00	0	0.5	2	1	0	2.5	0	0.5	3.5
2:00	0	1	1.5	0.5	0	1.5	0	0	4
3:00	0	1	2	1	0	6	0	2	4.5
4:00	0	0.5	1	2	0	3.5	0	1.5	4.5
5:00	0	0.5	2.5	1.5	0	4.5	0	0.5	10.5
6:00	0	0.5	2	1	0	3.5	0	1.5	6.5
7:00	0	0	0.5	2	0	2	0	2	5.5
8:00	0	0.5	0	1.5	0	0.5	0	1.5	4.5
9:00	0	0	1	2	0	1	0	1	5
10:00	0	0	3	2	0	0	0	5	4
11:00	0	1	2.5	1.5	0	1	0.5	5	6
12:00	0	1.5	4.5	1	0	0	0	8	12.5
13:00	0.5	3.5	1	0	0	0	0	8.5	9
14:00	1	2	2.5	0	0	0	0	0	9
15:00	0	2	2	0	0	0	0	3.5	14.5
16:00	0	1	0	0	0	0	0.5	4.5	13.5
17:00	0	1.5	1.5	0	0	0	0.5	5	13.5
18:00	0	1.5	0	0	1.5	0	0	3	13
19:00	0	1	0	0	0.5	0	1	2.5	15
20:00	0	1	0	0	1	0	0	1	18
21:00	0	0.5	1	0	0.5	0	0	0.5	15.5
22:00	0	1.5	0.5	0	1.5	0	0.5	1	15
23:00	0	2	1.5	0	3.5	0	0	1	9.5
日雨量	1.5	24.5	33.5	21	8.5	29	3	59.5	219

2.3 結果

(1) 検討ケース①結果（地表面の流出係数を考慮した解析）

- ・地表面の流出係数を 0.3 とした場合でも、盛土地表面まで高い圧力水頭が確認される。
- ・基本ケースである降雨の 100% を地山に設定したケースと比較して、盛土内に若干の水頭の変化が認められるが、大きな差は認められない。

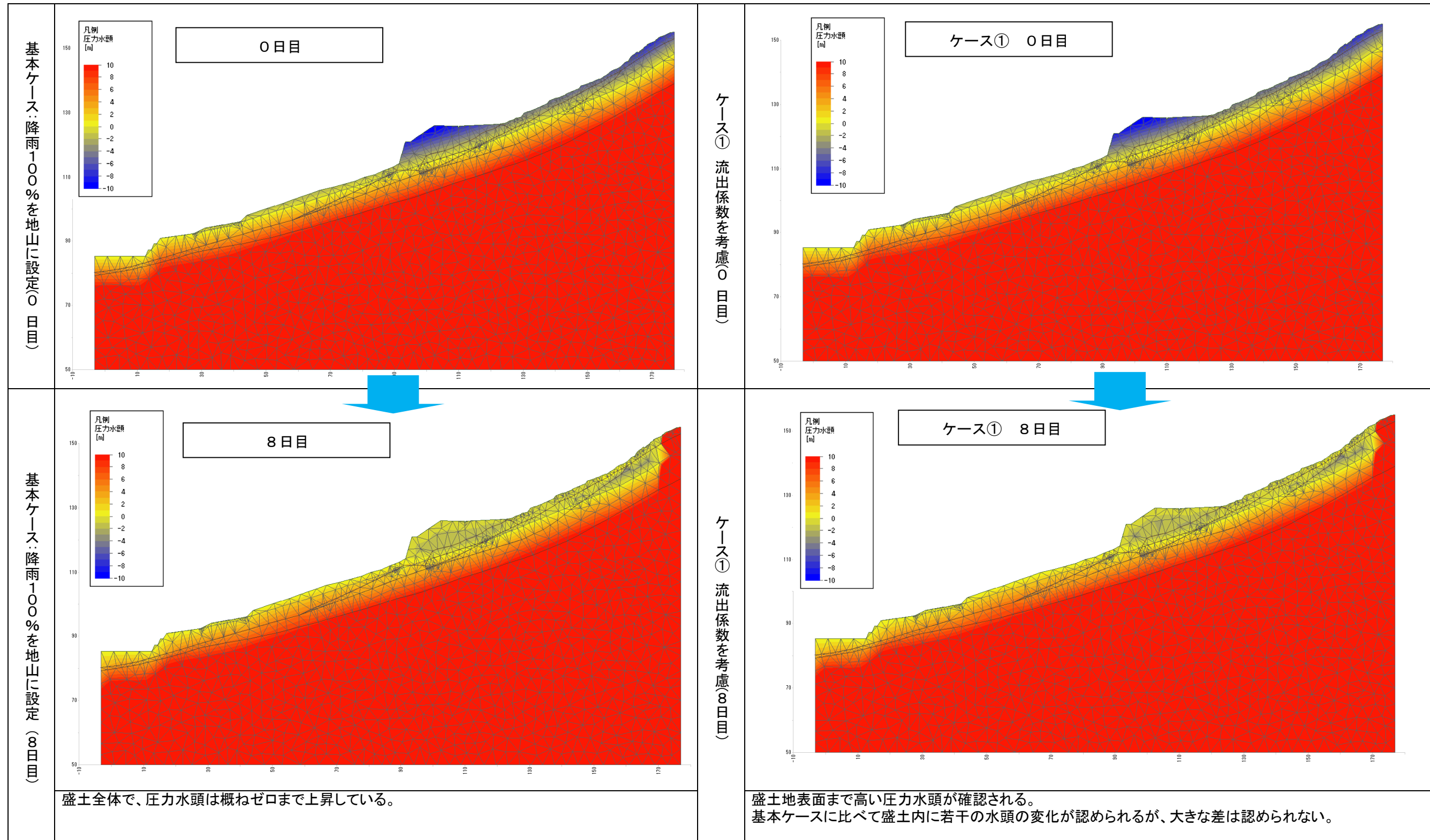


図 2.3 雨水浸透条件を考慮した浸透流解析結果 1

(2) 検討ケース②結果（透水係数を上限値とした降雨浸透解析）

- ・盛土地表面まで高い水頭が確認される。基本ケース、検討ケース①と大きな差は認められない。

(3) 検討ケース③結果（降雨浸透なし・斜面上端下端に地下水面を設定した解析）

- ・盛土の基底面付近の圧力水頭はわずかに上昇するものの、盛土表面（地表面付近）の水頭は初期状態と変わらず低い状態が維持される結果となった。

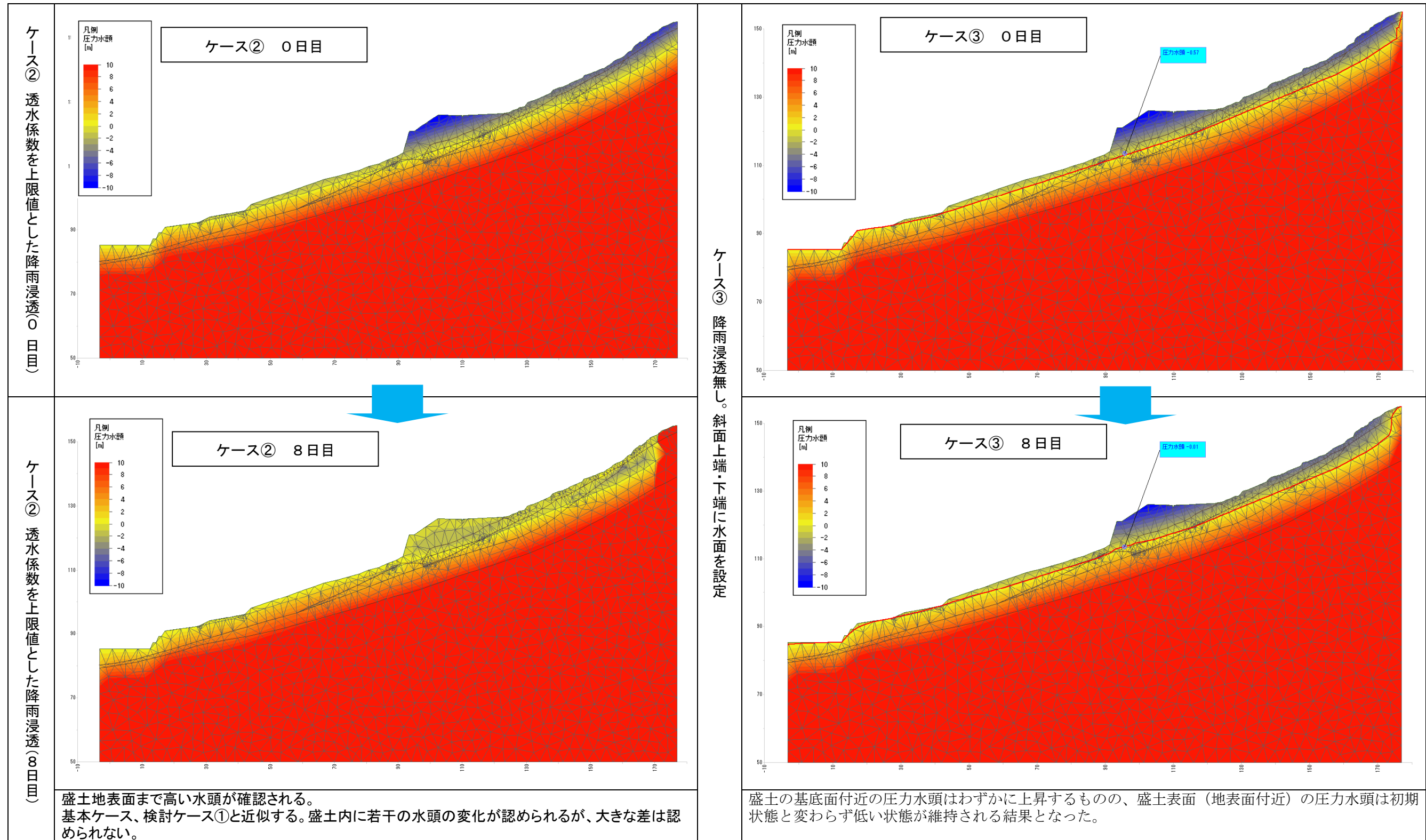


図 2.4 雨水浸透条件を考慮した浸透流解析結果 2

3. 補強土壁排水工の検討

3.1 目的

農道補強土壁において、背面および底面に排水層を設置した場合の補強土内の圧力水頭の変化について、二次元浸透流解析で検証する。

3.2 方法

(1) 計算条件の設定

- ① 土質定数・降雨条件：2.1 節と同様とする。
- ② 断面モデル：補強土壁背面および底面に排水層を設置（図 3.1）。補強土壁のり尻部の排水層は、地表への浸出有りの条件とする。
- ③ 排水層の配置：補強土壁排水層は、底面、掘削部に配置する。
排水層は砕石とし厚さは 50cm とする。
補強土壁背面は、掘削面まで砕石とする。

(2) 排水層の条件の設定

- 1) 排水層のある場合と無い場合の比較検証を実施。
- 2) 排水層の透水係数：「 1×10^{-2} 」「 1×10^{-3} 」「 1×10^{-1} 」の 3 ケース（表 3.1）を設定する。

道路土工-盛土工指針 p. 163~164（右図）によると、盛土の基底排水層に用いる材料の透水係数は $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ とされている。本検討では比較検証のため「 1×10^{-1} 」のケースも検討を行う。

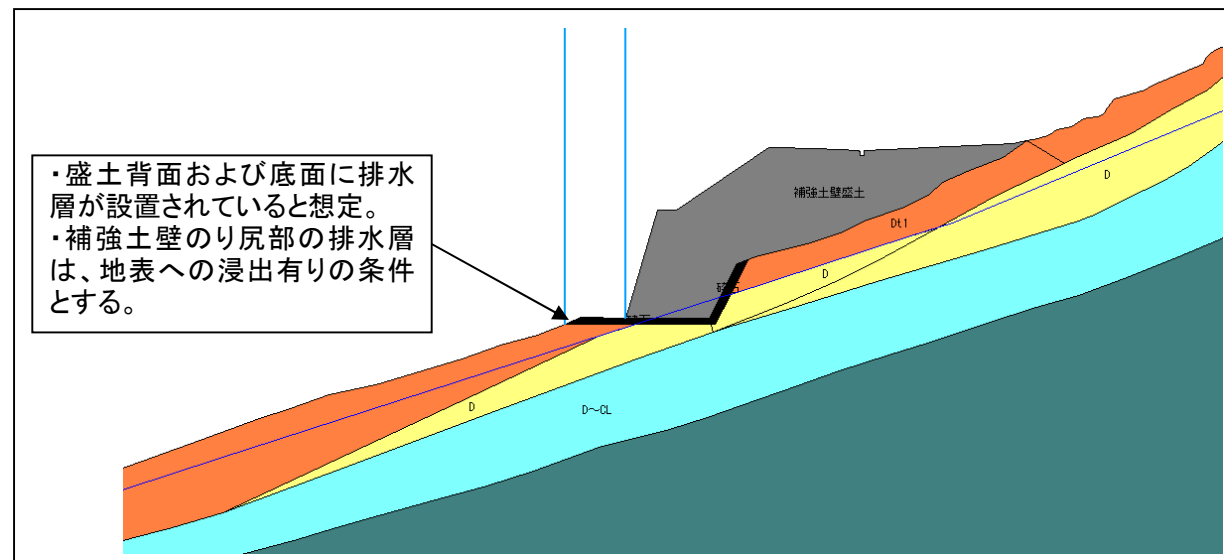


図 3.1 排水層を想定した模式断面図（盛土周辺拡大図）

表 3.1 各層の透水係数

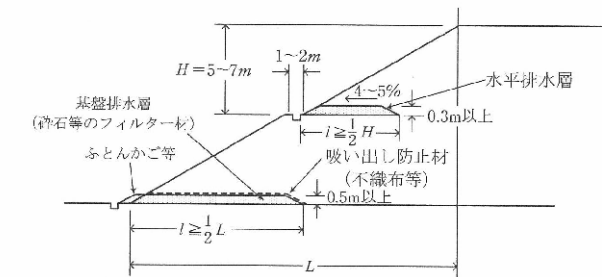
地質区分	設定透水係数(cm/sec)	根拠
排水層	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-3}$	参考資料より、 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ に設定。 比較検証のため、 1×10^{-1} に設定したケースも解析。

【参考資料】（道路土工-盛土工指針 p. 163~164）

2) 水平排水層

盛土内の浸透水を排除するため、必要に応じて解図 4-9-9 のように盛土の一定高さごとに水平の排水層を挿入する。特に、長大のり面を有する高盛土、片切り片盛り、切り盛り境部、沢を埋めた盛土や傾斜地盤上の盛土では、水平排水層を設置する必要がある。また、含水比の高い土で高盛土を構築すると、盛土内部の間隙水圧が上昇しり面のはらみ出しや崩壊が生じることがあるので、透水性の良い材料で水平排水層を敷設し、間隙水圧を低下させて盛土の安定性を高めることが行われる。最近では排水材料として高い排水機能をもつ不織布等を使用する場合もある。また、盛土が取り付いている地山からの浸透水が盛土内へ浸透してくる場合の崩壊防止にも効果が期待される。

水平排水層は小段毎に設置することを標準とする。なお、水平排水層の機能を十分に発揮できるように、適切な排水勾配及び層厚を確保しなければならない。砕石または砂を用いる場合は、①透水係数が $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 程度以上、かつ盛土材料の透水係数の 100 倍程度以上の良質な材料、②排水勾配が 4~5% 程度、③層厚 30 cm 以上、④長さは小段高さの 1/2 以上あれば、排水機能は満足できるものとみなしてよい。また解図 4-9-9 に示すように不織布等の吸い出し防止材を設置することが望ましい。



解図 4-9-9 水平排水層及び基盤排水層の例

- 163 -

3) 基盤排水層

地山から盛土への水の浸透を防止するために地山の表面に基盤排水層を設ける必要がある（解図 4-9-10 参照）。特に、地下水位の高い箇所に盛土を構築するような場合、長大のり面を有する高盛土、片切り片盛り、切り盛り境部、沢を埋めた盛土や傾斜地盤上の盛土等の雨水や浸透水の影響が大きいと想定される盛土では設置する必要があり、慎重な検討を要する。基盤排水層には、砕石または砂等の透水性が高く、せん断強さの大きい土質材料を用いるものとし、透水係数、吸い出し防止材は水平排水層に準じる。基盤排水層の厚さは浸透流量の大小によって異なるが、一般には 50cm 程度以上である。また長さについては、雨水や浸透水の影響が大きいと想定される盛土で降雨の作用に対する安定性の照査を省略した場合には、解図 4-9-9 に示すようにり尻からのり肩までの水平距離の 1/2 以上を標準とするが、特に湧水が多い箇所や高盛土では原地盤の段切りを施工しない範囲全面に設置するのが望ましい。特に浸透水の多いときには、排水層の中に集水管を埋設すると効果的である。沢埋め盛土における基盤排水層の設置例を解図 4-9-8 に示す。

3.3 排水層の有無を想定した浸透流解析結果

- ・排水層有り（透水係数 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ）の場合、排水層無しの場合に比べて、盛土内の圧力水頭は若干低下する傾向にあるが、最終的には盛土地表面の圧力水頭は地表まで上昇(飽和)し、盛土内部も飽和に近い状態になる。
- ・台風 21 号による降水量は非常に多かったため、排水層を設置していたとしても、補強土壁盛土の地下水をすべて排水することは困難であったと考えられる。

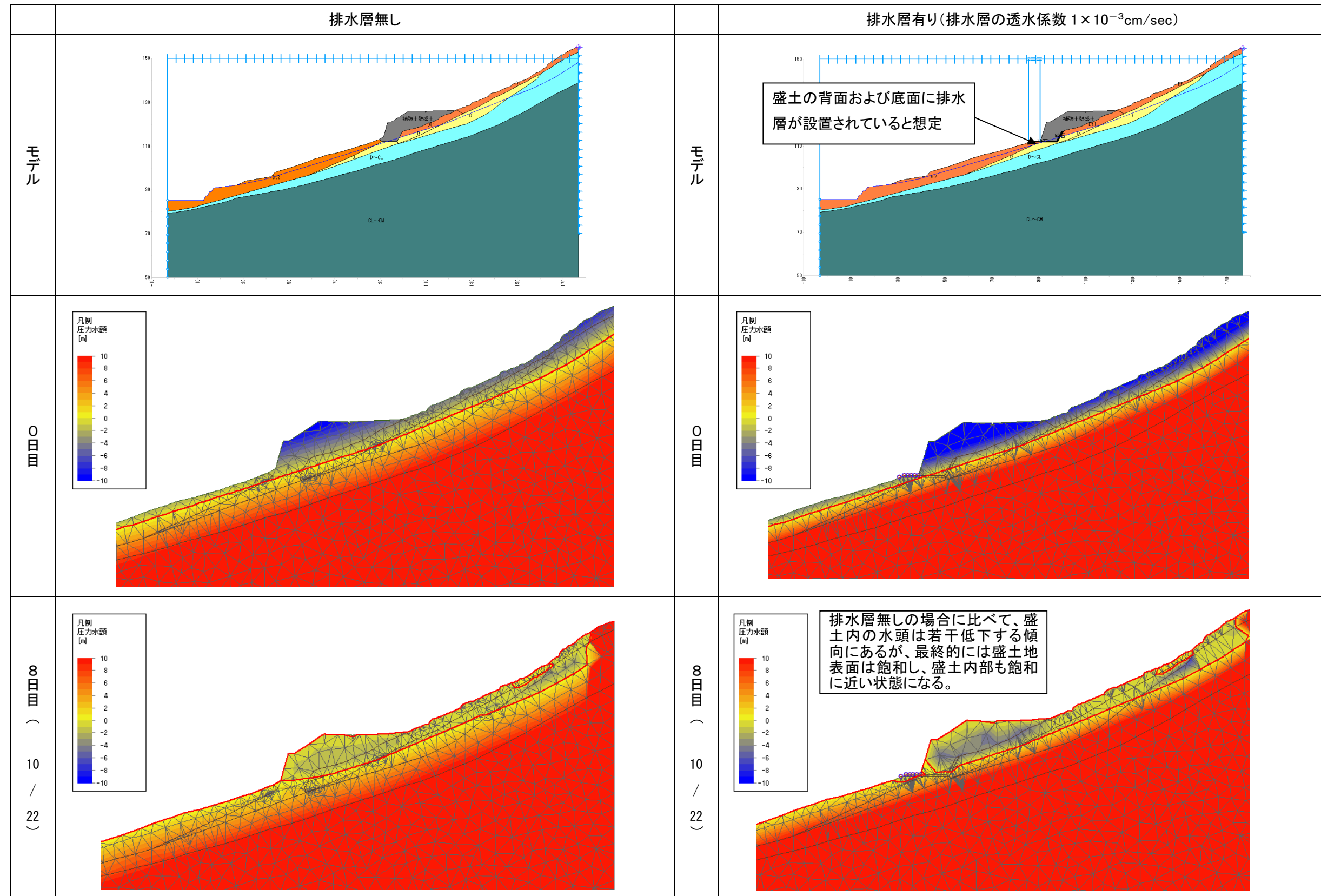


図 3.2 排水層無しと排水層有り（透水係数 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ）との解析結果比較

3.4 排水層の透水係数を変化させた浸透流解析結果

- ・いずれのケースも盛土内の圧力水頭は大きく上昇する。
- ・透水係数の違いによる盛土内圧力水頭分布に大きな違いは認められない。

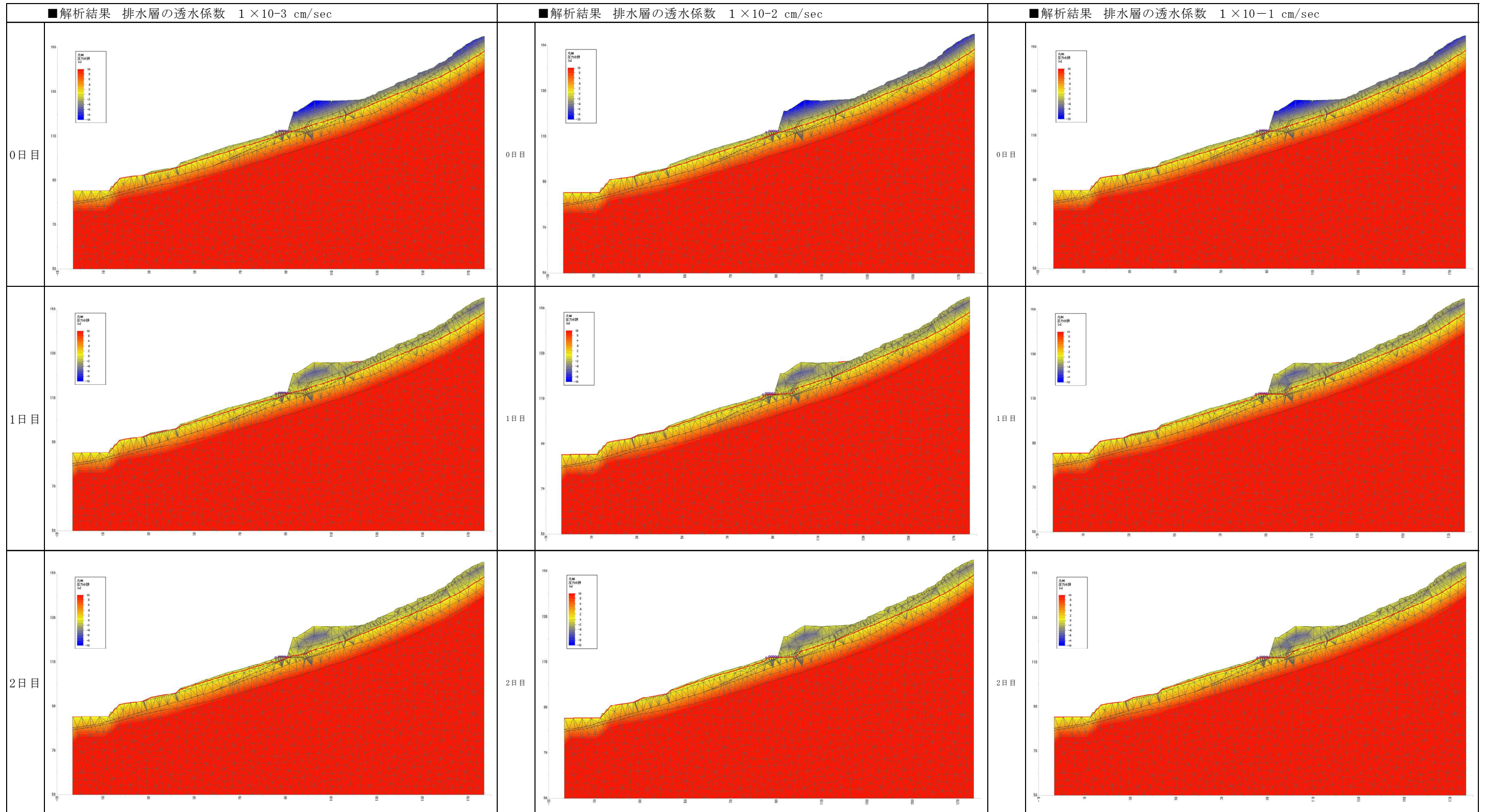


図 3.3 排水層の透水係数を変化させた場合の解析結果比較 (1/3)

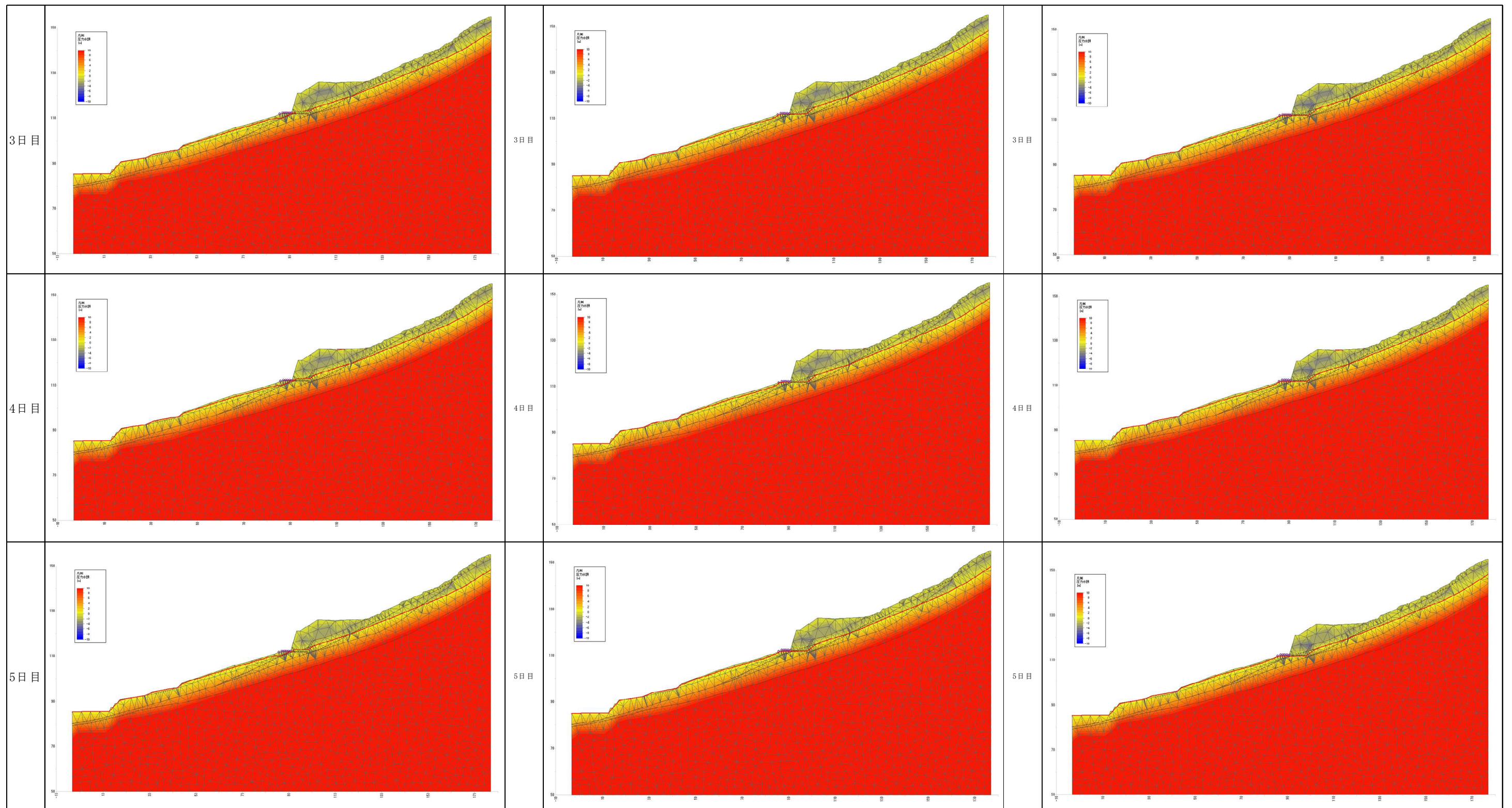


図 3.3 排水層の透水係数を変化させた場合の解析結果比較(2/3)

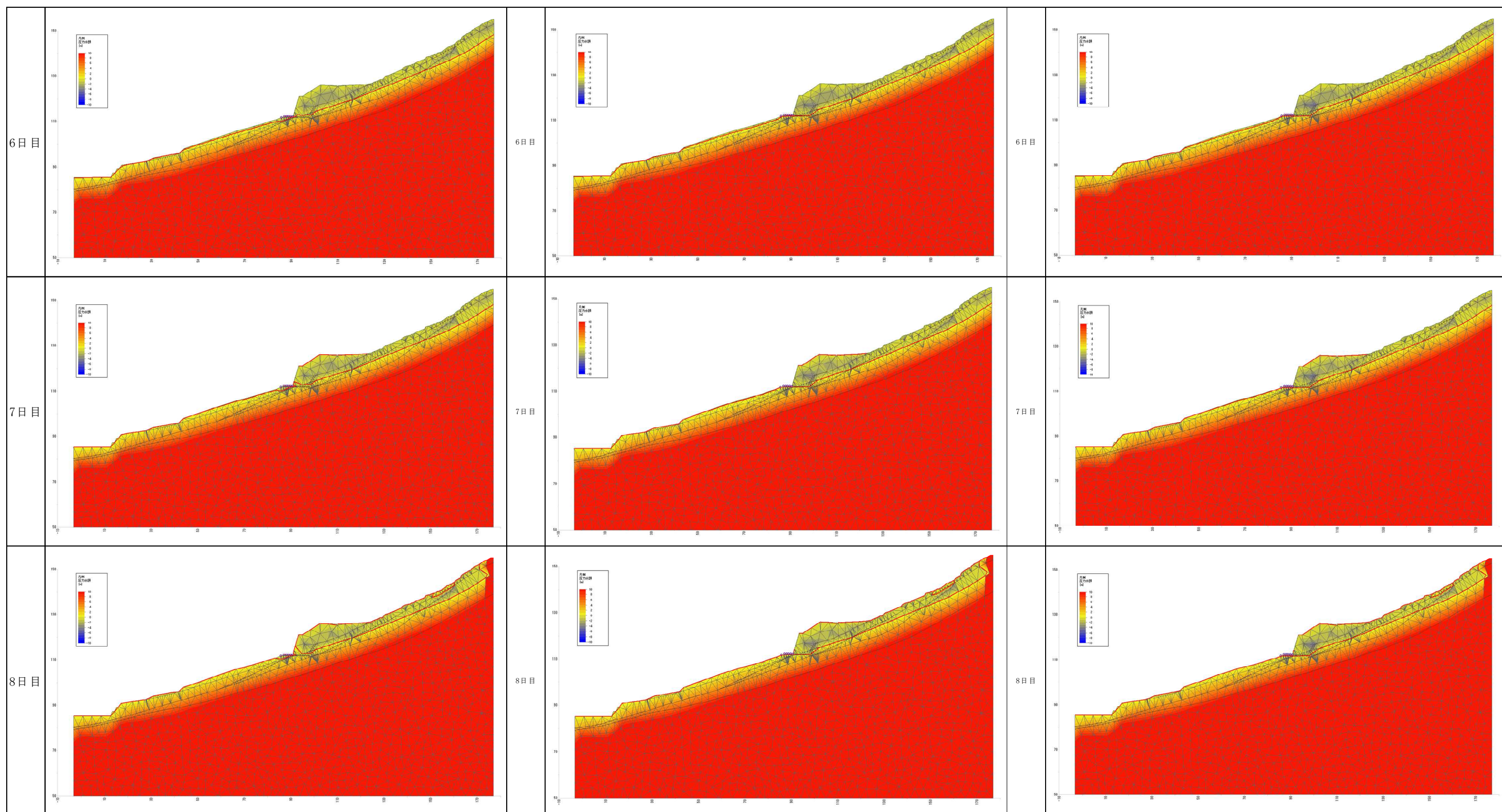


図 3.3 排水層の透水係数を変化させた場合の解析結果比較(3/3)

4. 連成解析

4.1 目的

西脇地区で発生した崩落の原因究明の解析として実施した浸透流解析の結果を基に、補強土壁盛土背後斜面から地下水の浸透過程でどのような応力が作用したかを評価するため、浸透流解析と同じ降雨、浸透条件で弾性連成解析（完全連成）を行い変位や応力を求めた。

4.2 方法

(1) 計算条件の設定

- ① 土質定数、地質毎の透水係数は浸透流解析と同様とする
- ② 断面モデル、降雨条件も浸透流解析と同様とする
- ③ 解析方法は、弾性解析とする。

(2) 検討手順

- ① 連成解析プログラムにおける浸透流解析の再現
- ② 浸透-変形連成解析（双方向）の実施*（別冊資料参照）

※本検討は、高度な解析技術と特殊なソフトウェアを用いる必要があったため、大西委員長に助言を頂きながら、広島大学大学院 工学研究科 橋本助教により実施したものである。

4.3 結果

図 4.1～4.3 に連成解析結果で得られた間隙水圧分布図（8 日目）、変位ベクトル図（8 日目）、最大せん断ひずみ分布図（8 日目）を、図 4.4 に初期段階からの時系列変化を示す。連成解析結果を以下に示す。

- ・浸透流解析と同じ降雨、浸透条件で弾性連成解析（完全連成）を行ったところ、上部斜面地表、補強土壁盛土上面、下部斜面地表付近まで、間隙水圧 0kPa に近い領域（飽和に近い領域）が広がっている。
- ・補強土壁盛土背後斜面から地下水の浸透過程をみると、特に顕著な挙動は認められないものの、盛土より先に背後斜面の間隙水圧が上昇している。
- ・補強土壁盛土と、補強土壁盛土の下方斜面に、変位が生じている。変位が生じた範囲は、地質調査結果で明らかにした複合すべり範囲と概ね一致している。

4.4 考察

- ・連成解析の結果でも、上部斜面、補強土壁盛土、下部斜面地表付近まで、間隙水圧 0kPa に近い領域（飽和に近い領域）が広がっており、地下水位は地表付近まで上昇したと考えられる。
- ・変位の発生は、盛土部の間隙水圧が上昇したためと考えられる。
- ・間隙水圧の上昇により有効応力が低下し、変位を誘発させたと解釈できる。
- ・補強土壁盛土下方斜面の変位ベクトルおよび最大せん断ひずみの分布は、崩壊に至る前兆現象を示唆している可能性がある。

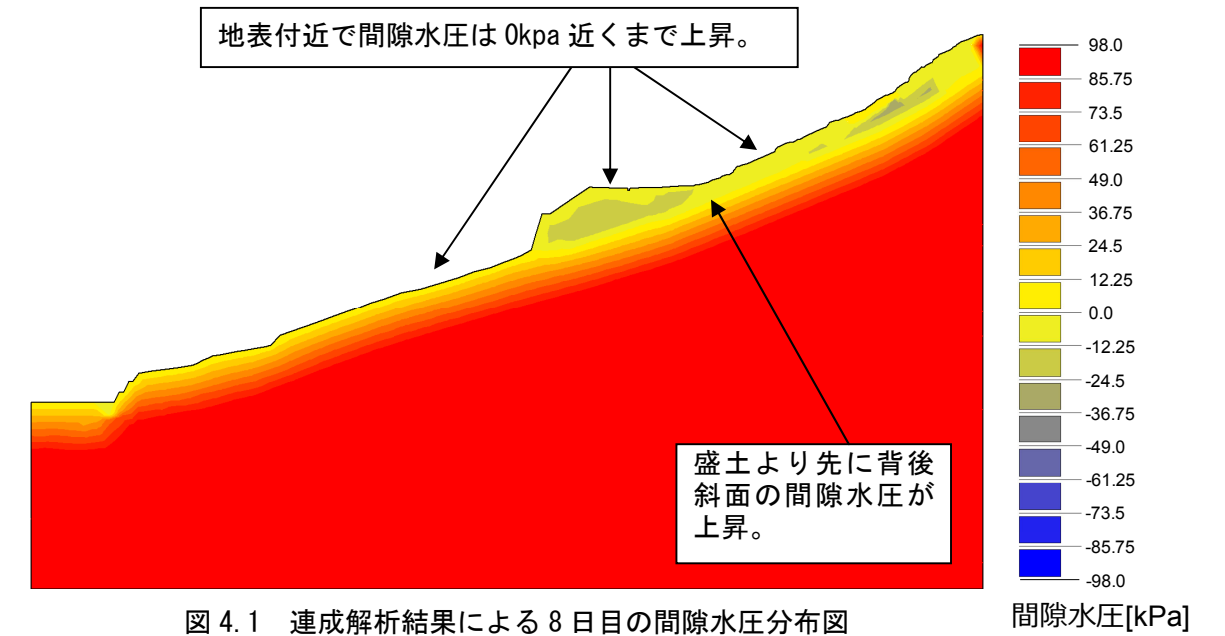


図 4.1 連成解析結果による 8 日目の間隙水圧分布図

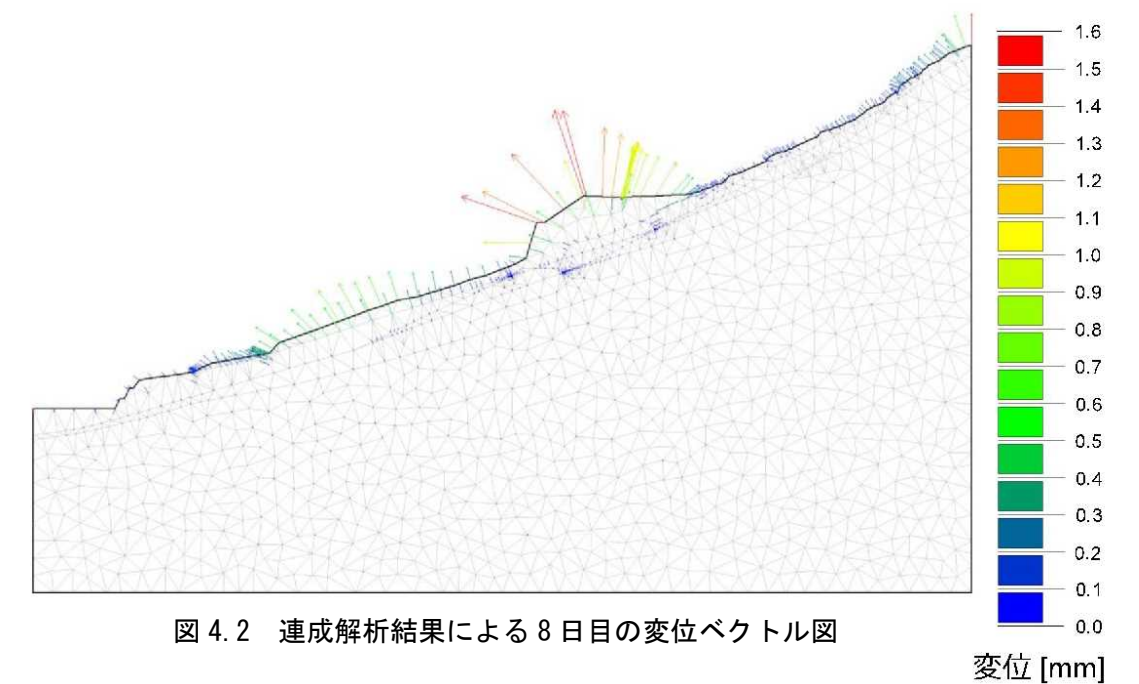


図 4.2 連成解析結果による 8 日目の変位ベクトル図

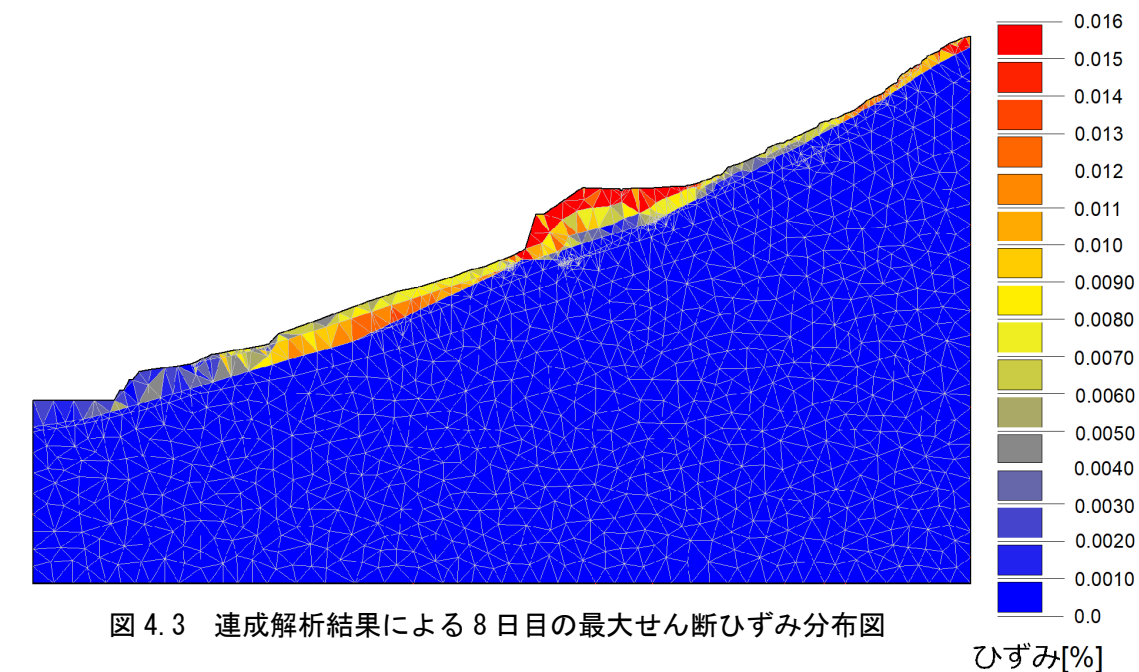


図 4.3 連成解析結果による 8 日目の最大せん断ひずみ分布図

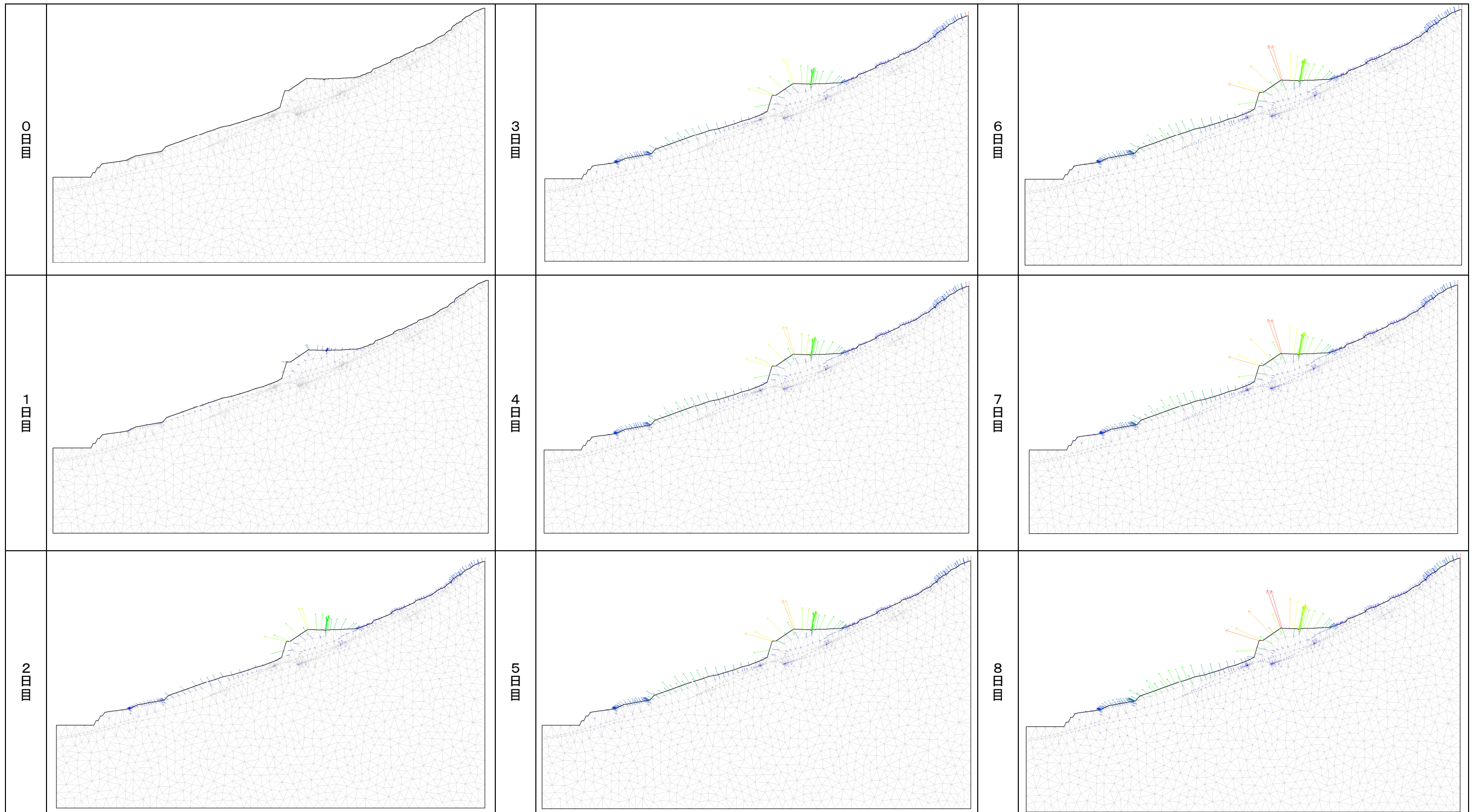


図 4.4 連成解析における時系列の変化図（変位ベクトル図）

5. 斜面崩落の原因について

1) 当初地質調査・施工状況

施工前の斜面には湧水や排水施設は認められなかった。また、地すべり性の変状は認められなかった。設計段階においては、地質調査結果等をもとに設計を行い、雨水処理を計画していた。ただし、ボーリング地質調査では、地下水は確認されておらず、補強土壁工は、「地下水位なし」の条件で設計されていた。

補強土壁基礎部は、施工時における平板載荷試験、掘削基礎部確認の結果、当初地質調査・設計のとおりD層（強風化岩）が分布し、設計値を満足する支持力が確保できることを確認していた。また、掘削面に湧水等は確認されなかった。

2) 斜面崩落に対する補強土壁盛土と地下水の影響

斜面安定解析の結果、補強土壁盛土施工後の安全率は低下するものの、安全率1を大きく上回っていた。補強土壁盛土後、地下水位が地表面付近まで上昇した段階で安全率1を大きく下回った。

斜面崩落に、補強土壁盛土建設に伴う斜面バランスの低下は影響したものの、地下水上昇の影響が極めて大きかったと考えられる。

3) 補強土壁背面および底面排水層の有無による影響

浸透流解析の結果、台風21号豪雨により地表付近まで地下水が上昇することが再現された。

また、補強土壁盛土背面および底面に排水層を設置した場合の影響について、浸透流解析を実施した結果、排水層がない場合とほとんど変わらず、地下水位は地表付近まで上昇する計算結果が得られた。

このことから、補強土壁背面および底面に排水層があったとしても、台風21号による記録的な豪雨では、補強土壁盛土内の地下水位の上昇を防ぐことはできなかったと考えられる。

4) 斜面崩落発生機構について

(ア) 素因

① 集水地形の分布

補強土壁盛土背後斜面は集水地形を呈し、表流水、地下水が補強土壁盛土に流入しやすい地形を呈している。

② 補強土壁基礎部から山側に脆弱な地質の分布

斜面崩落後の調査では、補強土壁基礎部から山側のD層（強風化岩）分布域に、脆弱な灰白色粘土が流れ盤構造で露出し、併せて電気探査の結果、補強土壁基礎部に相対的に比抵抗値の低い部分が分布した。これは、補強土壁基礎部に潜在的な弱層の存在を示唆している可能性がある。

不攪乱資料を採取し三軸圧縮試験（CUバー）を実施した結果、補強土壁基礎部に相当するD層（強風化岩）のせん断強度は、当初設計で想定していた強度（N値からの推定）より著しく低い値を示した。

なお、施工当時の写真からは、掘削底面、掘削壁面には、褐色化した強風化岩が分布しているものの、灰白色の粘土層の分布は確認できなかった。脆弱な灰白色粘土層は、補強土壁基礎部より深い深度に局所的に挟在していたと考えられる。

補強土壁基礎部の地盤は、構造物の基礎として必要な支持力を有していたが、外的安定に必要なせん断強度は、当初設計時に想定した強度より著しく低かった。

これは補強土壁基礎部のD（強風化岩）層は、周辺に地すべりを多数有する地質帯であり、風化作用を受けることでせん断強度が低下しやすい地盤であったためと考えられる。

ただし、このD（強風化岩）層の脆弱な弱層は施工時の掘削面には分布せず、局所的な分布であったため、調査及び工事では捉えることができなかったと考えられる。

(イ) 誘因

① 補強土壁盛土による斜面バランスの低下

農道建設に伴う補強土壁盛土が上載荷重として作用し、斜面バランスが低下した。

② 台風21号による記録的な豪雨

台風21号による記録的な豪雨により、基盤岩と強風化岩～崩積土との境界付近に多量の地下水が供給され、盛土部まで地下水位が大幅に上昇し、斜面が不安定化を増したと考えられる。

(ウ) 発生機構

西脇地区の斜面崩落は、地形、地質に起因する素因に加え、台風21号による記録的な豪雨による大幅な地下水位上昇が誘因となって、補強土壁盛土の基盤としていたD（強風化岩）層の潜在的な弱層をすべり面として、すべり破壊が生じたと考えられる。

崩落した土砂は移動の過程で残留強度が著しく低下したため、長距離を流動化し、家屋に到達したと考えられる。

5) 再発防止に向けて

1) 補強土壁の計画・設計について

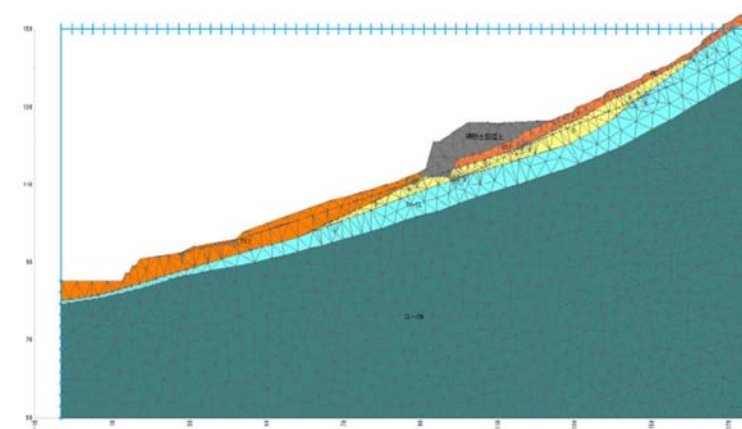
- ① 地形判読（特に小規模な地すべり地形、崩壊跡地形の分布）
- ② 十分な地質調査の実施。
- ③ 出水期を含めた地下水位分布の把握。
- ④ 地下水の上昇を考慮した底面および背面の排水層の設置。
- ⑤ 調査設計の際は、住民に聞き取り調査を十分に行う。特に地下水、湧水や、排水施設、地すべり、斜面崩壊の有無など。

2) 既設補強土壁について

- ① 既設補強土壁の点検、周辺地形判読、既往地質調査資料を見直すとともに、カルテとして整理し、維持管理に役立てる。
- ② 当該斜面と同様な地形、地質、地下水条件を有する場合は、地下水対策、補強対策を検討する。

和歌山県西脇地区斜面浸透解析 ～浸透－変形連成解析の実施～

解析モデル



変形に関する物性値

	ヤング率 [kPa]	ポアソン比	単位体積重量 [kN/m³]
盛土	1.0×10 ⁵	0.3	19
Dt	1.0×10 ⁵	0.3	18
D	1.0×10 ⁷	0.3	18
D~CL	1.0×10 ⁷	0.3	18

底面の節点は完全固定，側方は水平のみ固定とした。

連成解析手法の概要

支配方程式：空気の圧縮性が高く，空気圧が常に大気圧に保たれるとする簡易3相系定式化（例えば，加藤ら [2009]）

①混合体（土+水）の釣合式 $\nabla \cdot \sigma + \rho b = 0$

②水の連続式 $\nabla \cdot v + n\dot{S}_r + \dot{n}S_r = 0$

+ひずみの適合条件，土骨格の構成式，

有効応力式，ダルシー則，水分特性曲線モデル

Bishopの有効応力式 ($\sigma = \sigma' + \chi p_w I$) のパラメータ χ に飽和度 S_r を用いる $\sigma = \sigma' + S_r p_w I$ を使用。



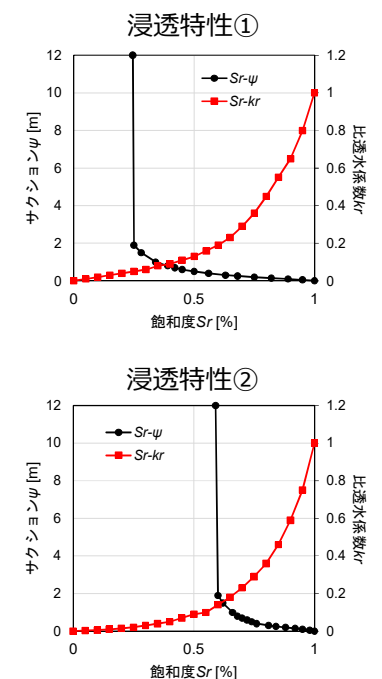
境界条件

変位，表面力，水圧，流量，降雨，その他・・・

これらの基礎式からなる境界値問題の弱形式をFEM，および後退差分で空間・時間離散化し解析する。

浸透特性の設定

	飽和透水係数 k [m/s]	初期間隙率	不飽和浸透特性
盛土	1.0×10 ⁻⁷	0.1	②
Dt	1.0×10 ⁻⁶	0.2	①
D	1.0×10 ⁻⁹	0.1	②
D~CL	1.0×10 ⁻⁹	0.1	②



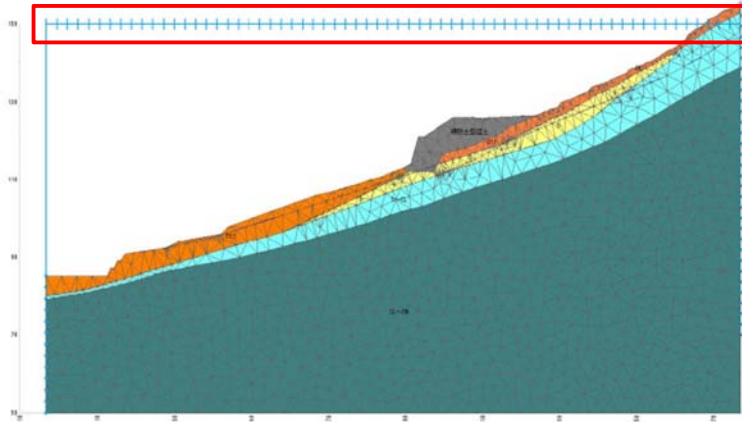
浸透流解析と同じ浸透特性を設定。

降雨条件

解析モデル

降雨条件

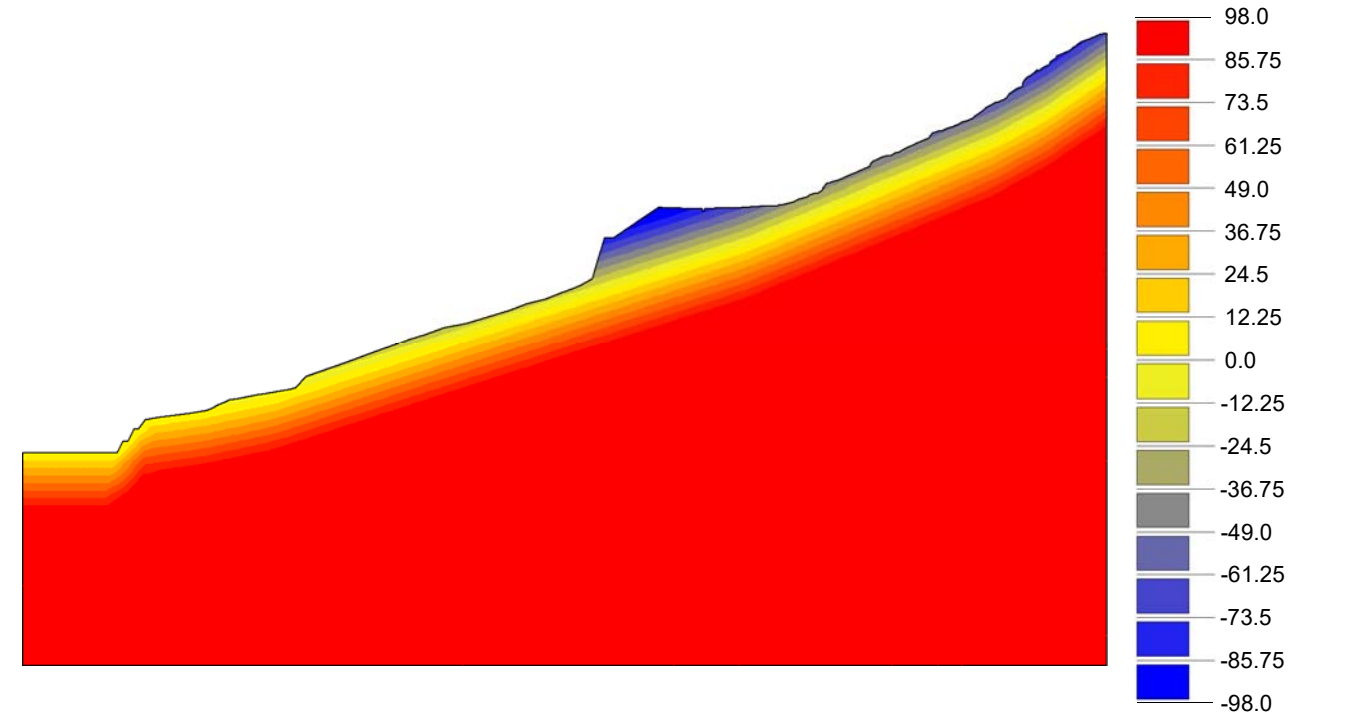
経過日	0日目	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目
時刻	10月14日	10月15日	10月16日	10月17日	10月18日	10月19日	10月20日	10月21日	10月22日
0:00	0	0	1	4	0	3	0	0.5	2.5
1:00	0	0.5	2	1	0	2.5	0	0.5	3.5
2:00	0	1	1.5	0.5	0	1.5	0	0	4
3:00	0	1	2	1	0	6	0	2	4.5
4:00	0	0.5	1	2	0	3.5	0	1.5	4.5
5:00	0	0.5	2.5	1.5	0	4.5	0	0.5	10.5
6:00	0	0.5	2	1	0	3.5	0	1.5	6.5
7:00	0	0	0.5	2	0	2	0	2	5.5
8:00	0	0.5	0	1.5	0	0.5	0	1.5	4.5
9:00	0	0	1	2	0	1	0	1	5
10:00	0	0	3	2	0	0	0	5	4
11:00	0	1	2.5	1.5	0	1	0.5	5	6
12:00	0	1.5	4.5	1	0	0	0	8	12.5
13:00	0.5	3.5	1	0	0	0	0	8.5	9
14:00	1	2	2.5	0	0	0	0	0	9
15:00	0	2	2	0	0	0	0	3.5	14.5
16:00	0	1	0	0	0	0	0.5	4.5	13.5
17:00	0	1.5	1.5	0	0	0	0.5	5	13.5
18:00	0	1.5	0	0	1.5	0	0	3	13
19:00	0	1	0	0	0.5	0	1	2.5	15
20:00	0	1	0	0	1	0	0	1	18
21:00	0	0.5	1	0	0.5	0	0	0.5	15.5
22:00	0	1.5	0.5	0	1.5	0	0.5	1	15
23:00	0	2	1.5	0	3.5	0	0	1	9.5
日雨量	1.5	24.5	33.5	21	8.5	29	3	59.5	219



全域に浸透流解析と同じ降雨履歴を設定.

5

間隙水圧分布 | 初期状態 (10月14日0時)



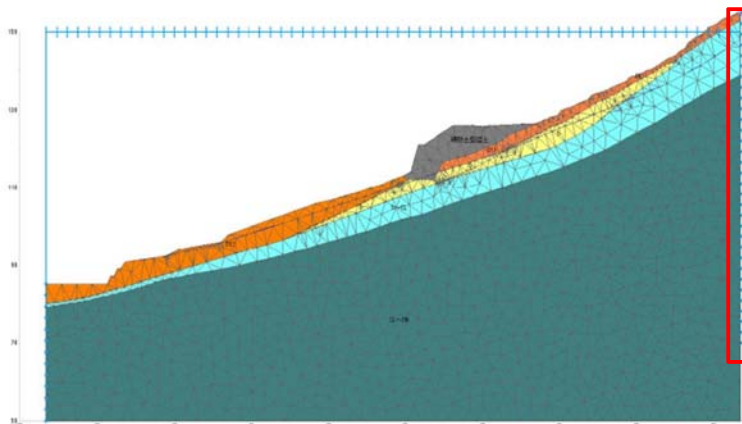
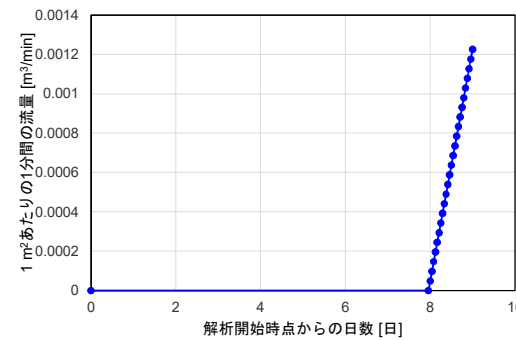
間隙水圧[kPa]

7

上流からの流入条件

解析モデル

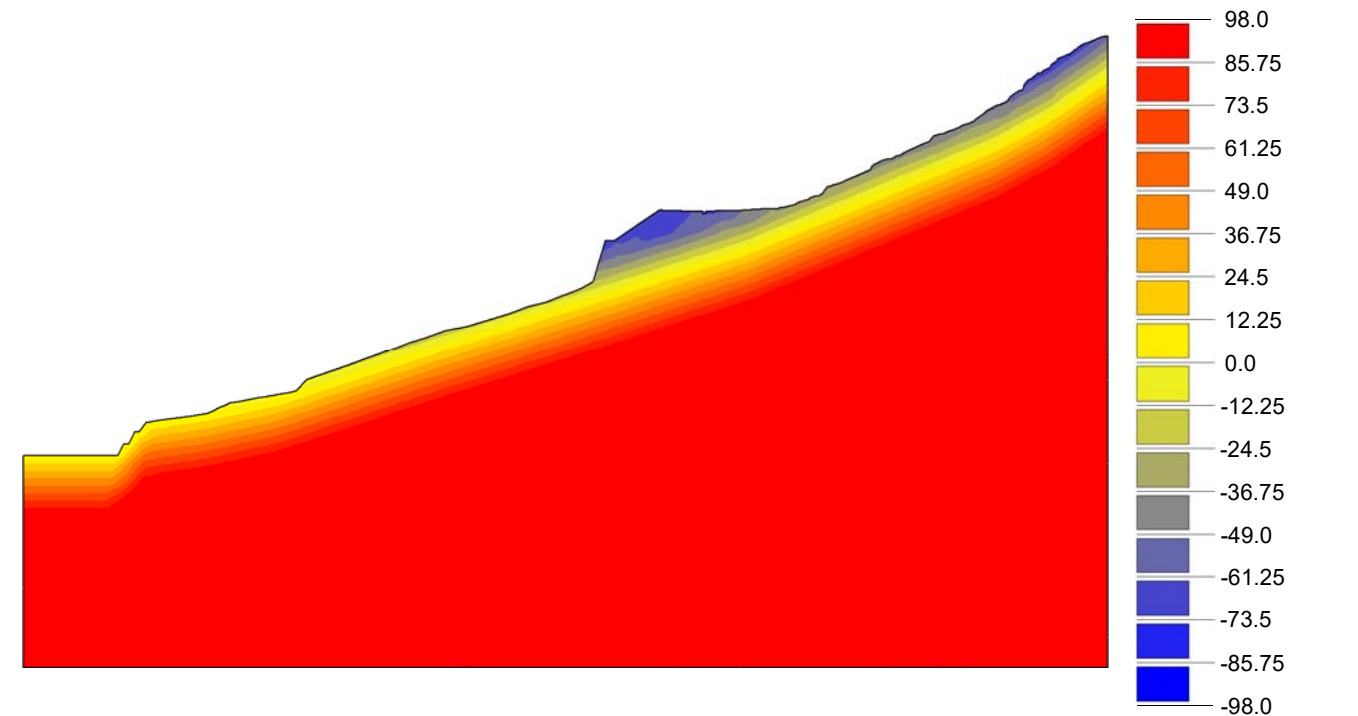
流量条件



崩壊が発生した最終日にモデル右端からDt層に最大で0.1m³/min (単位面積あたり約1.2×10⁻³m³/min) の地下水を供給.

6

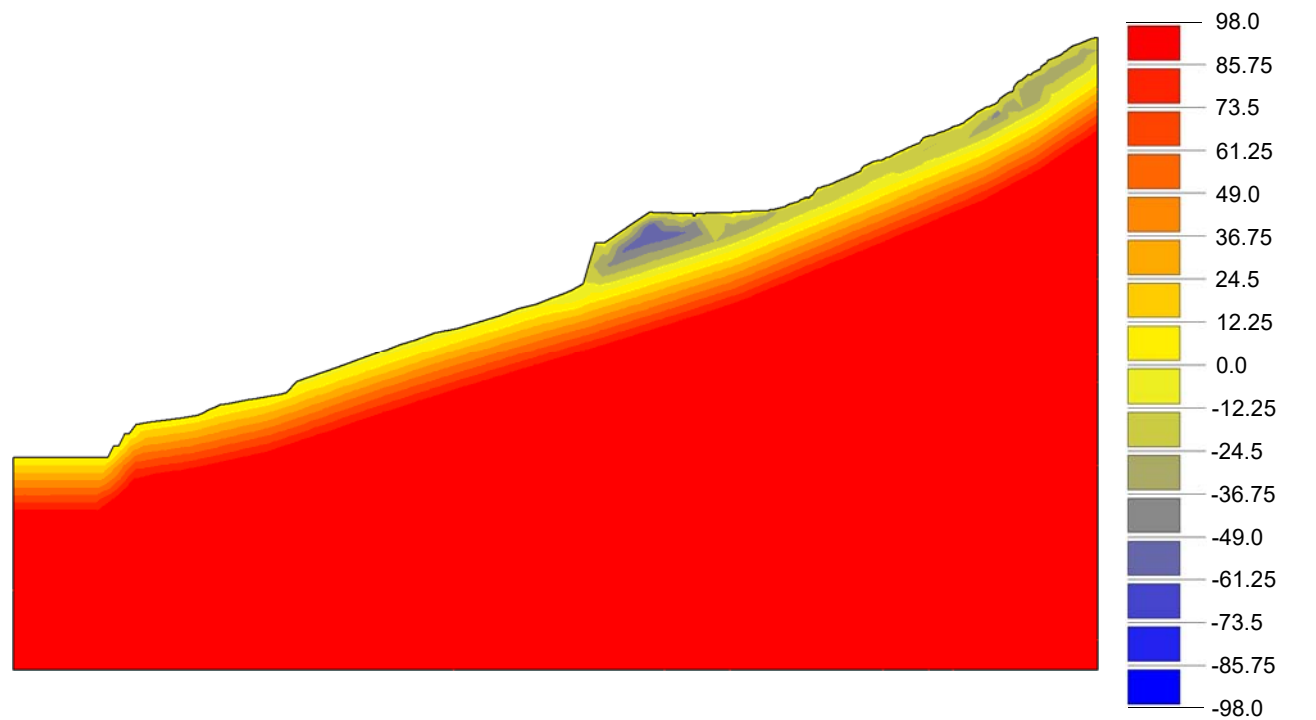
間隙水圧分布 | 1日経過 (10月15日0時)



間隙水圧[kPa]

8

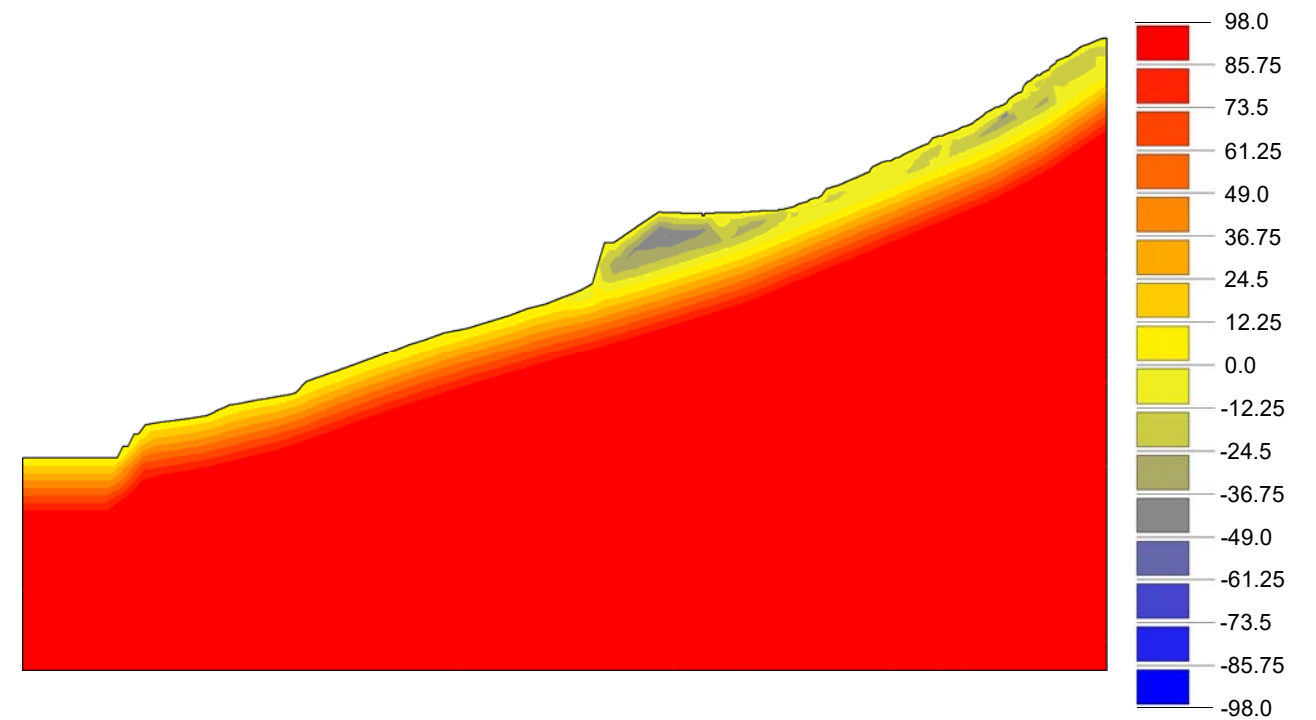
間隙水圧分布 | 2日経過 (10月16日0時)



間隙水圧[kPa]

9

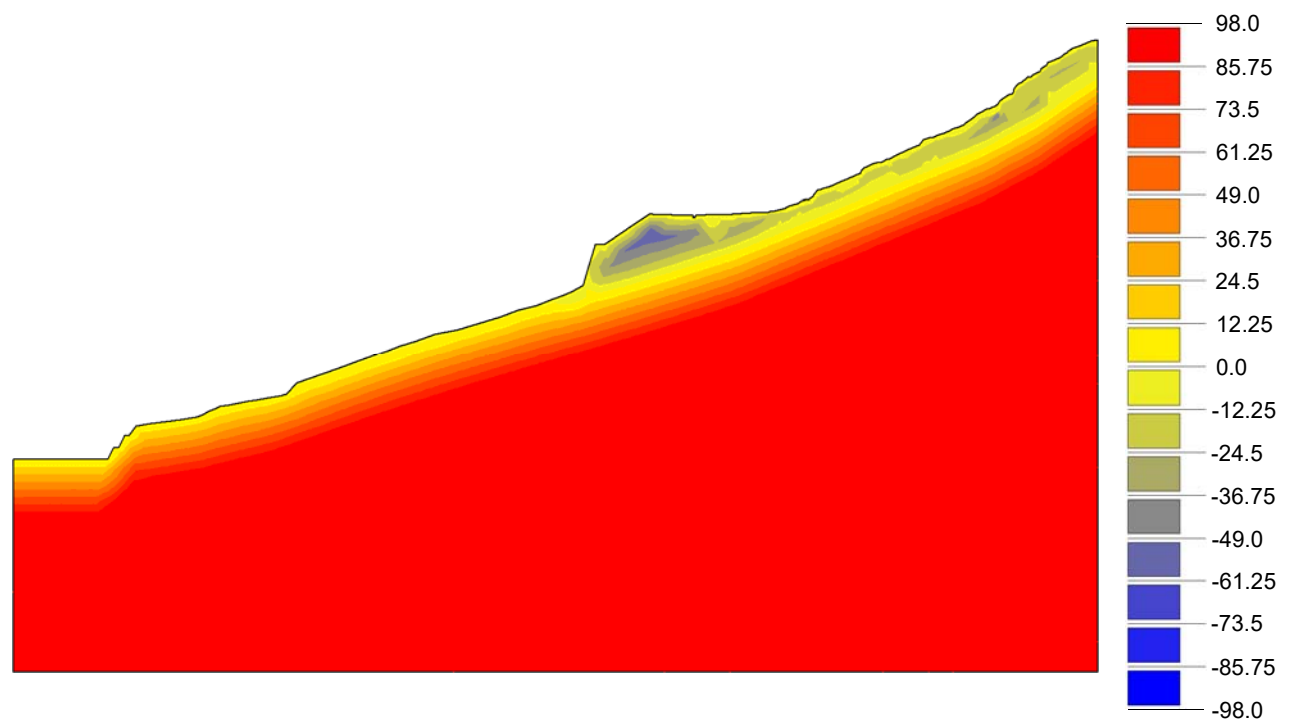
間隙水圧分布 | 4日経過 (10月18日0時)



間隙水圧[kPa]

11

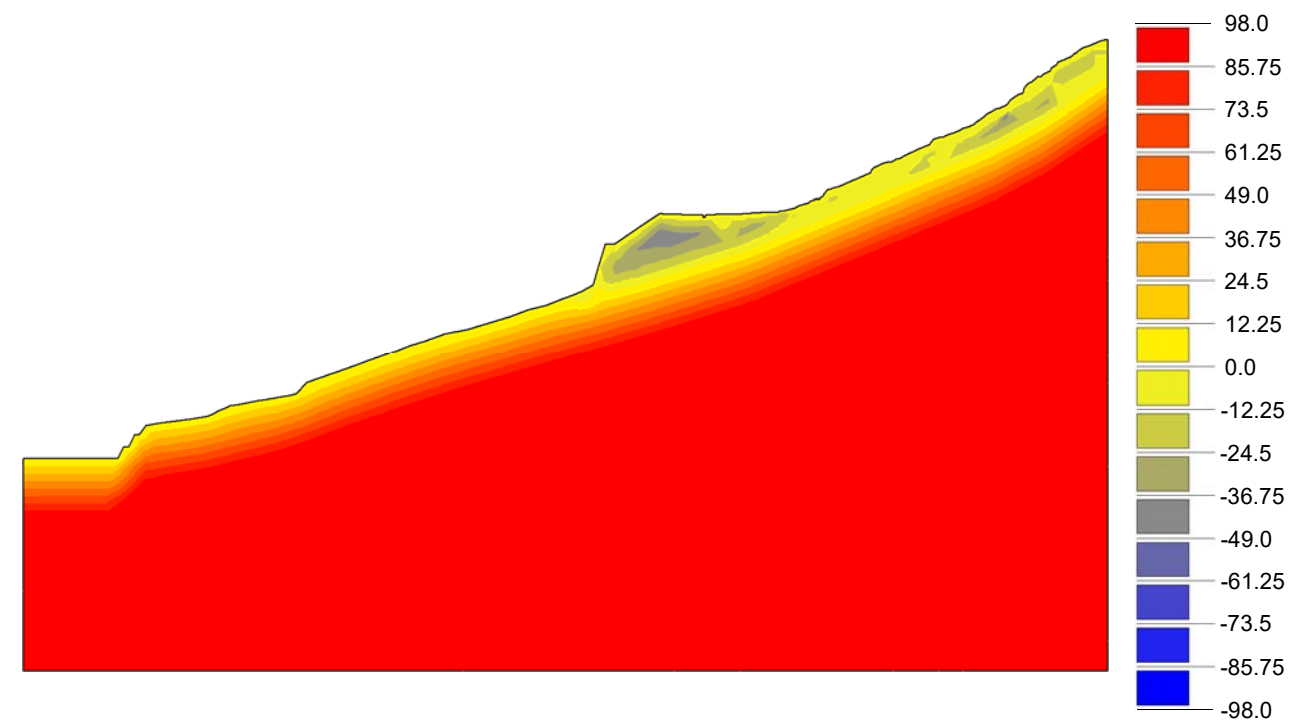
間隙水圧分布 | 3日経過 (10月17日0時)



間隙水圧[kPa]

10

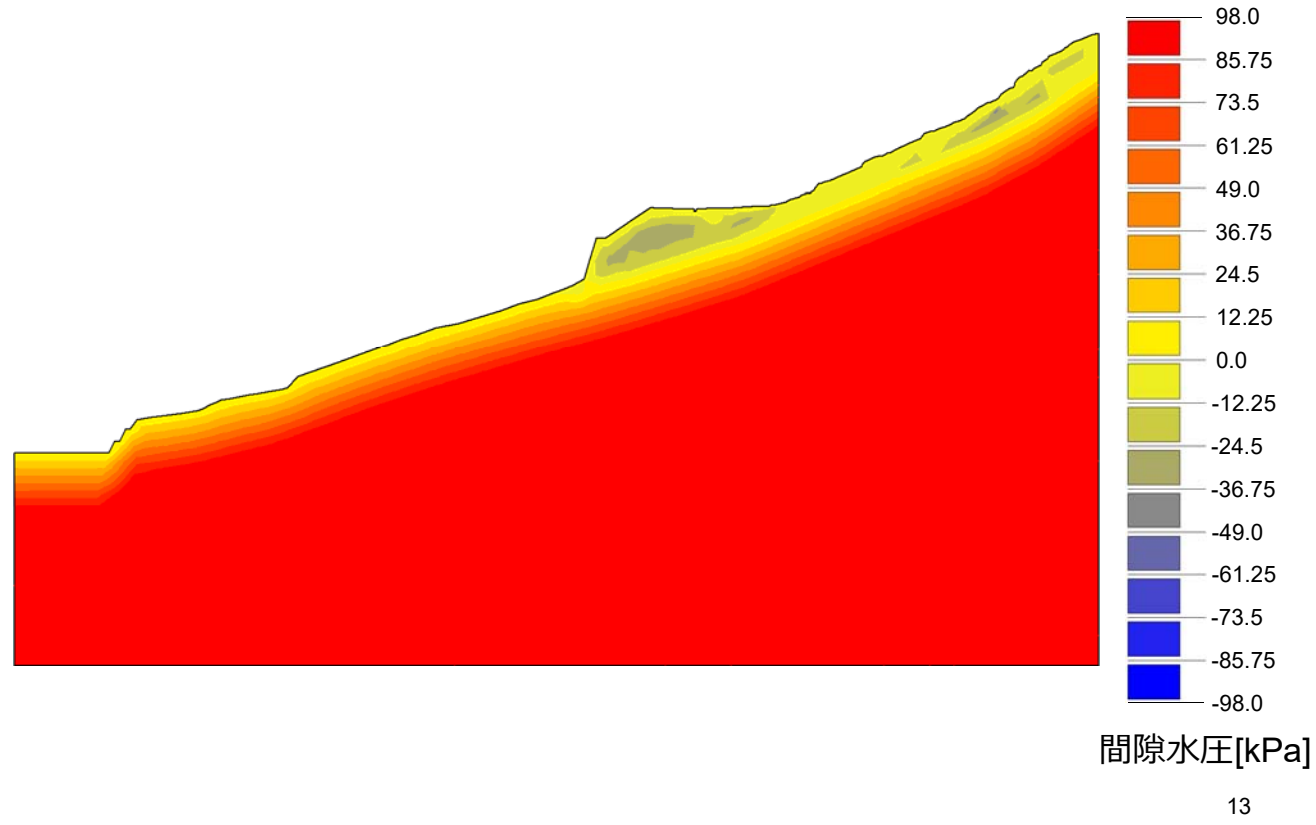
間隙水圧分布 | 5日経過 (10月19日0時)



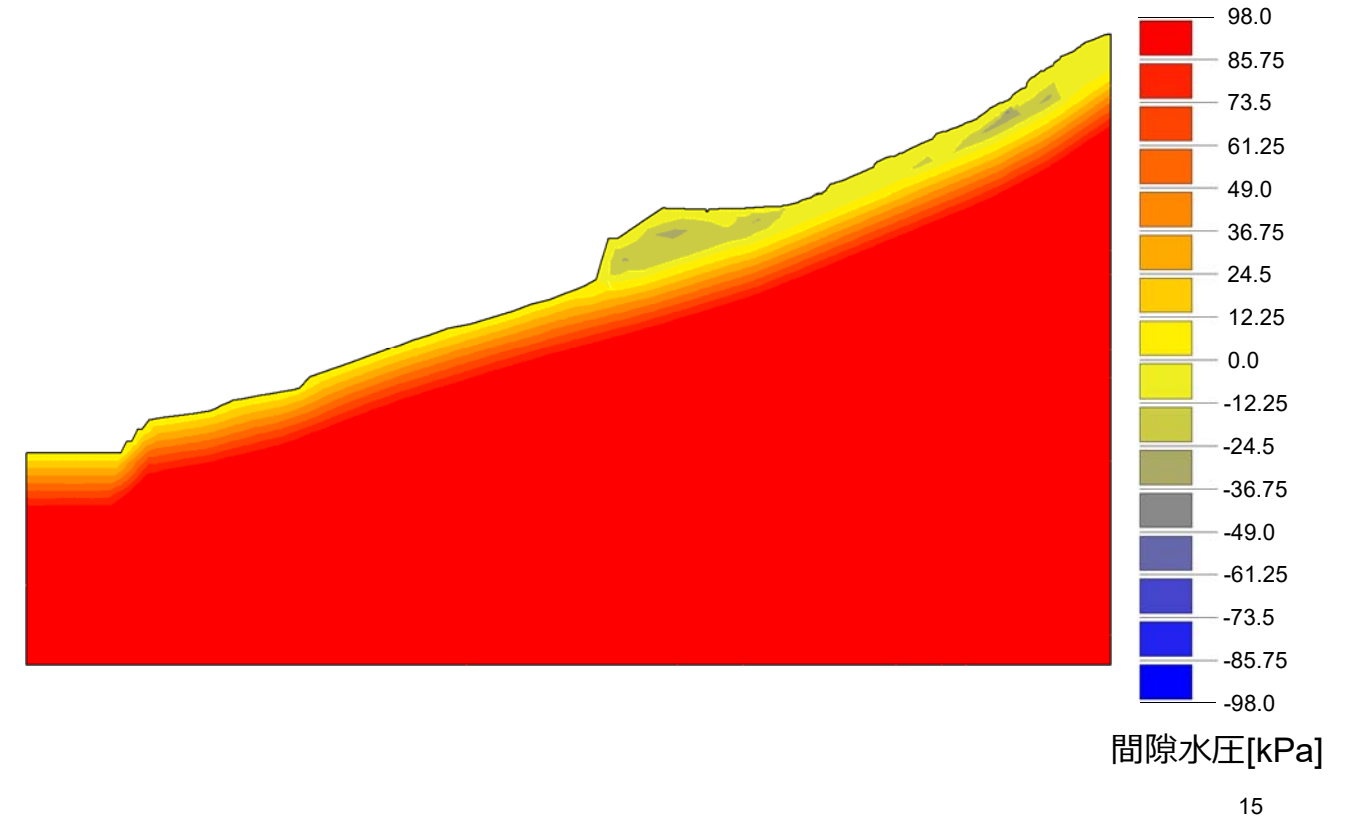
間隙水圧[kPa]

12

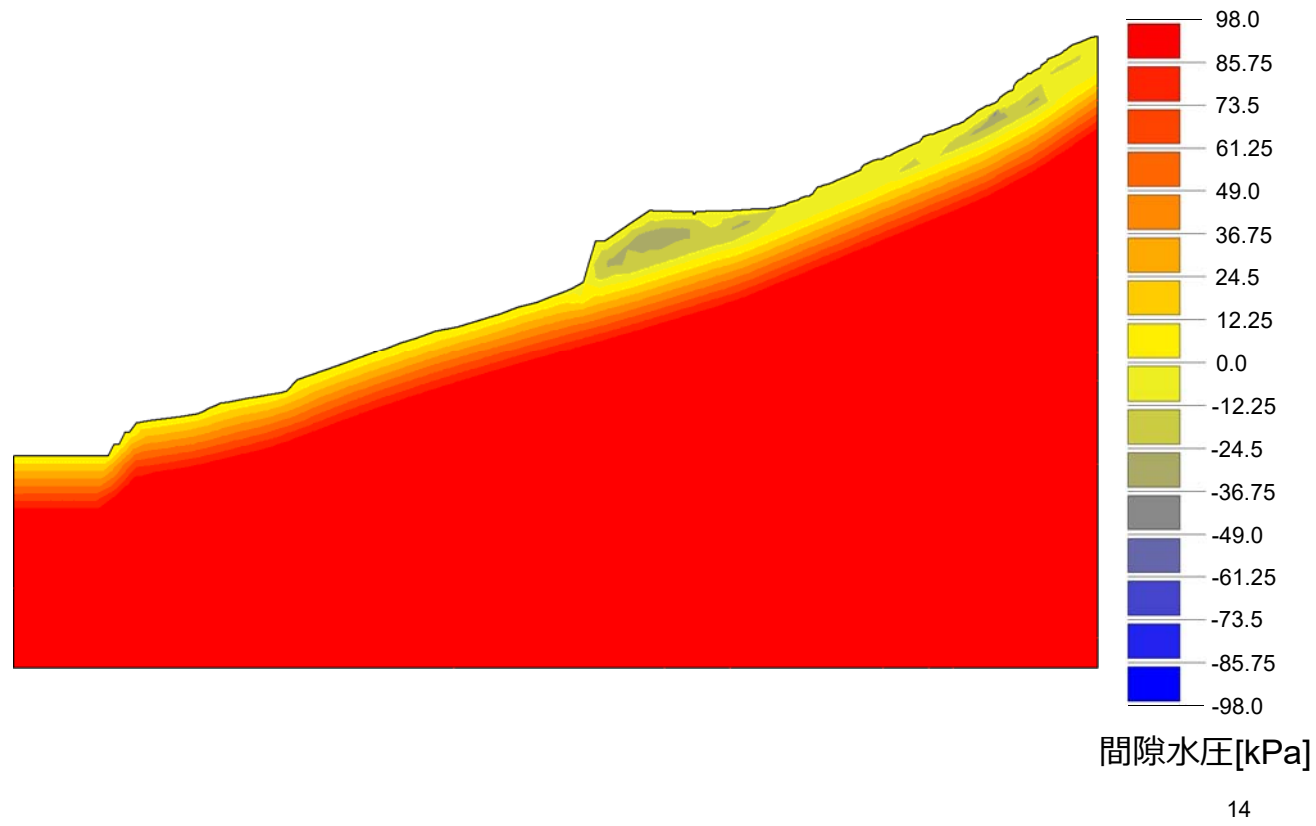
間隙水圧分布 | 6日経過 (10月20日0時)



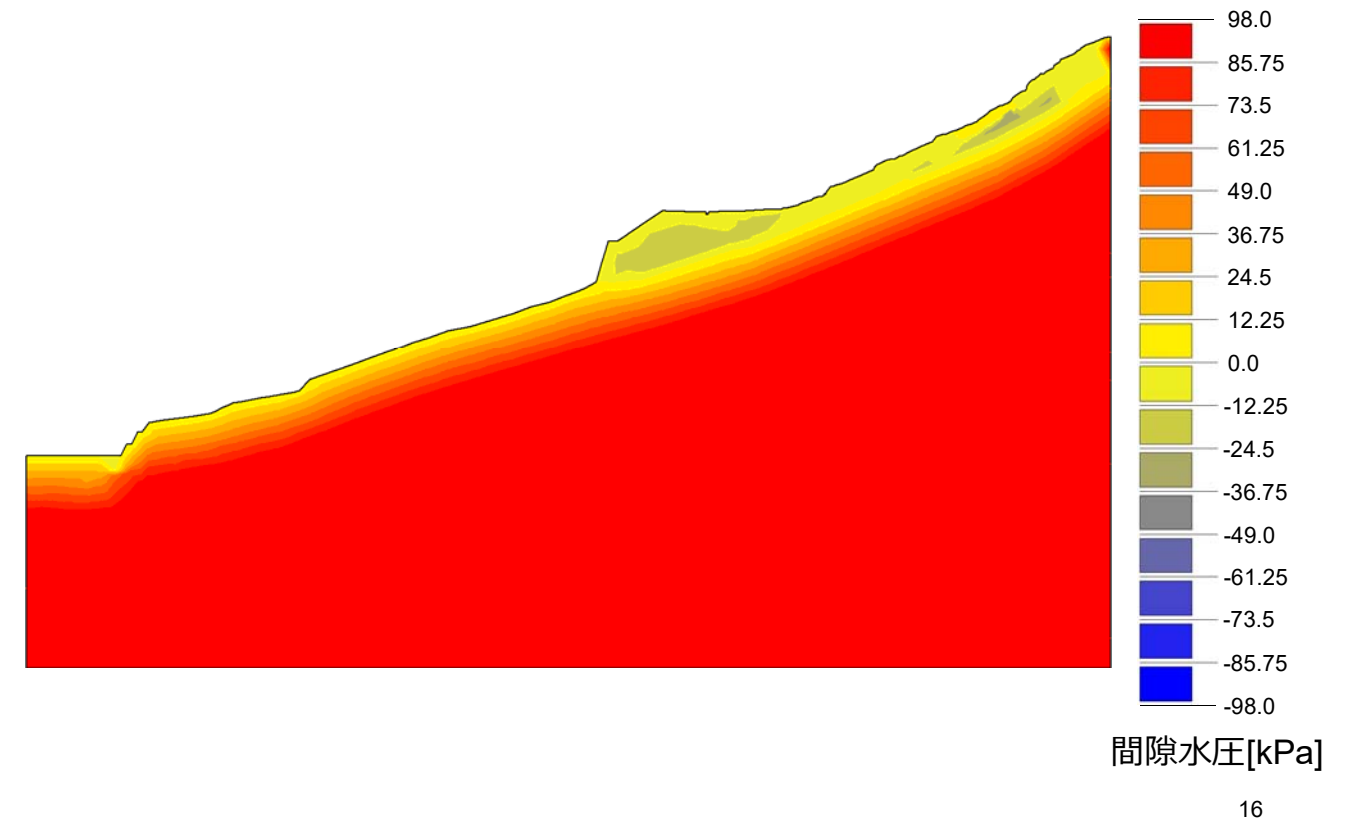
間隙水圧分布 | 8日経過 (10月22日0時)



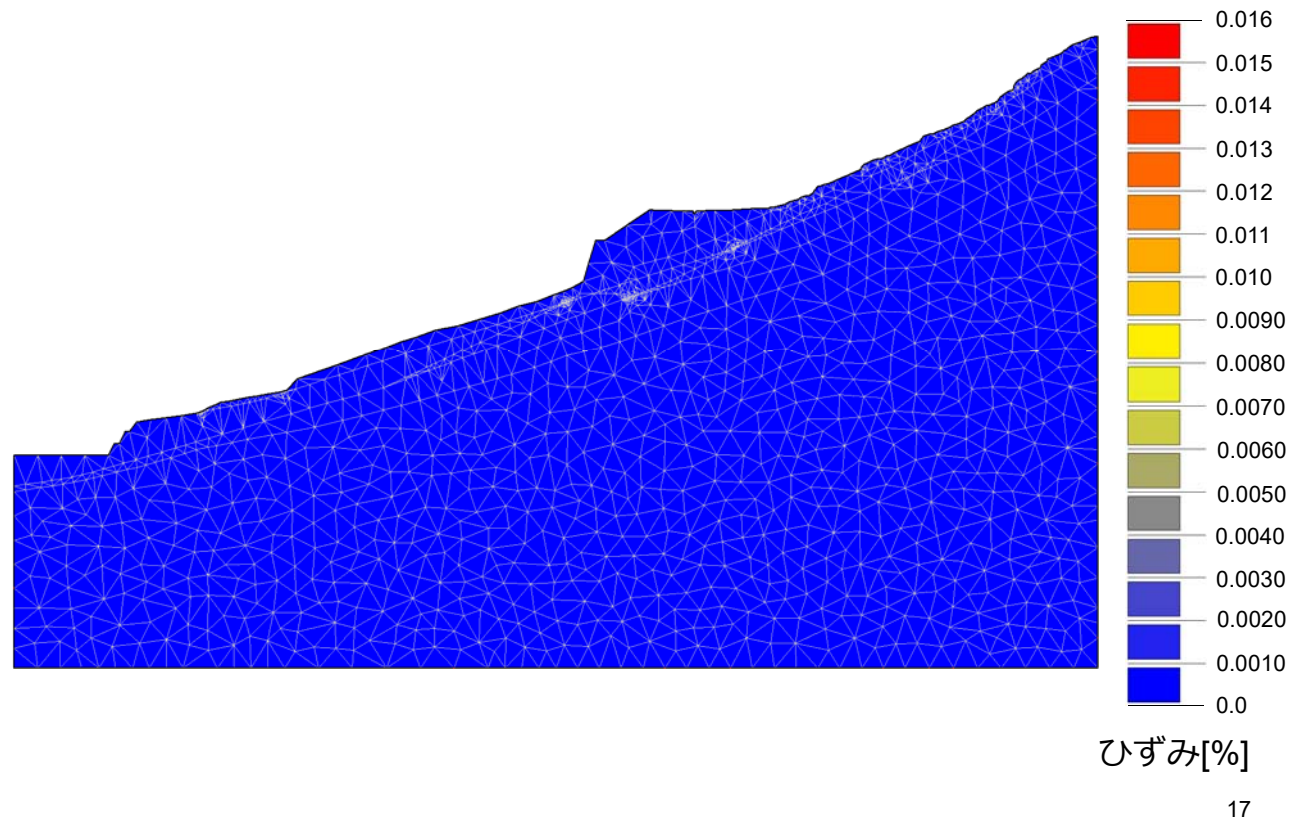
間隙水圧分布 | 7日経過 (10月21日0時)



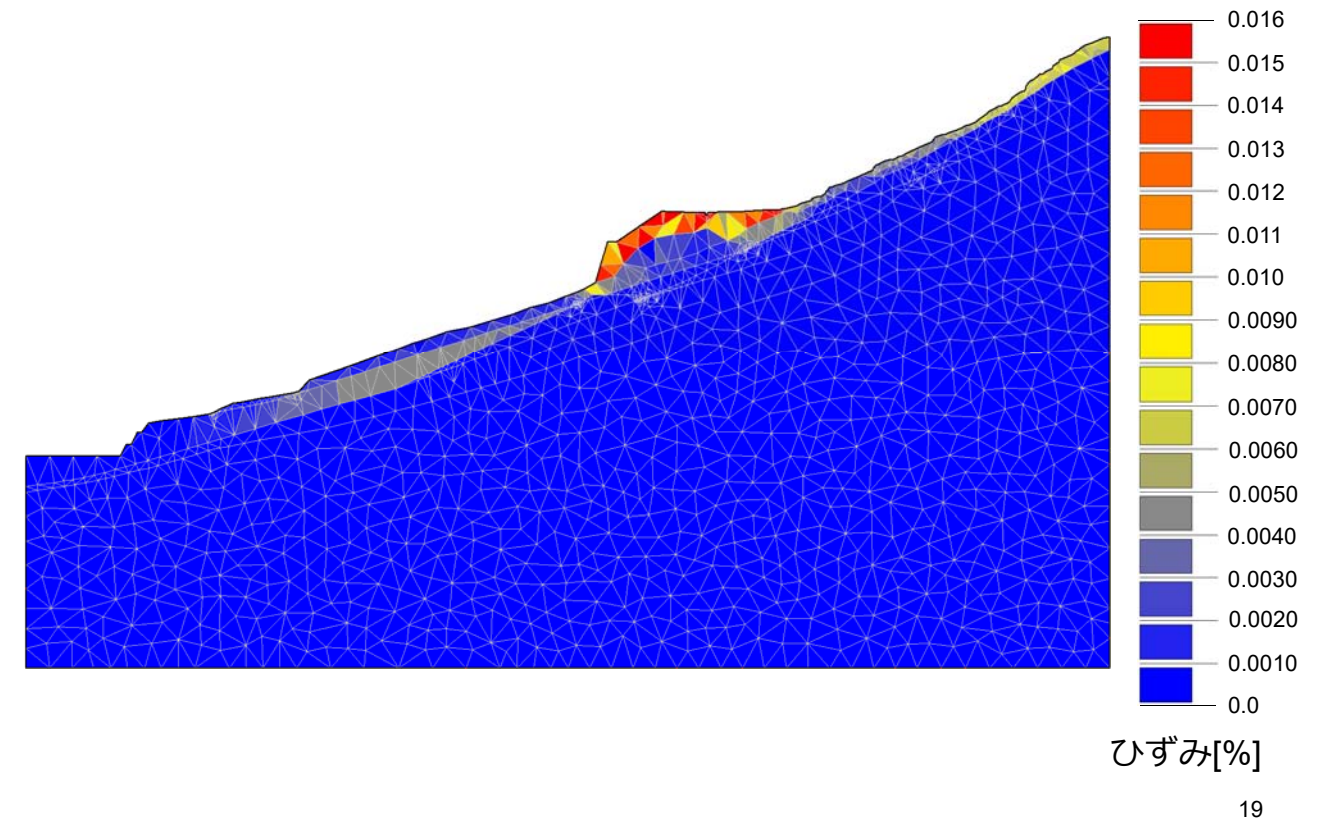
間隙水圧分布 | 9日経過 (10月23日0時)



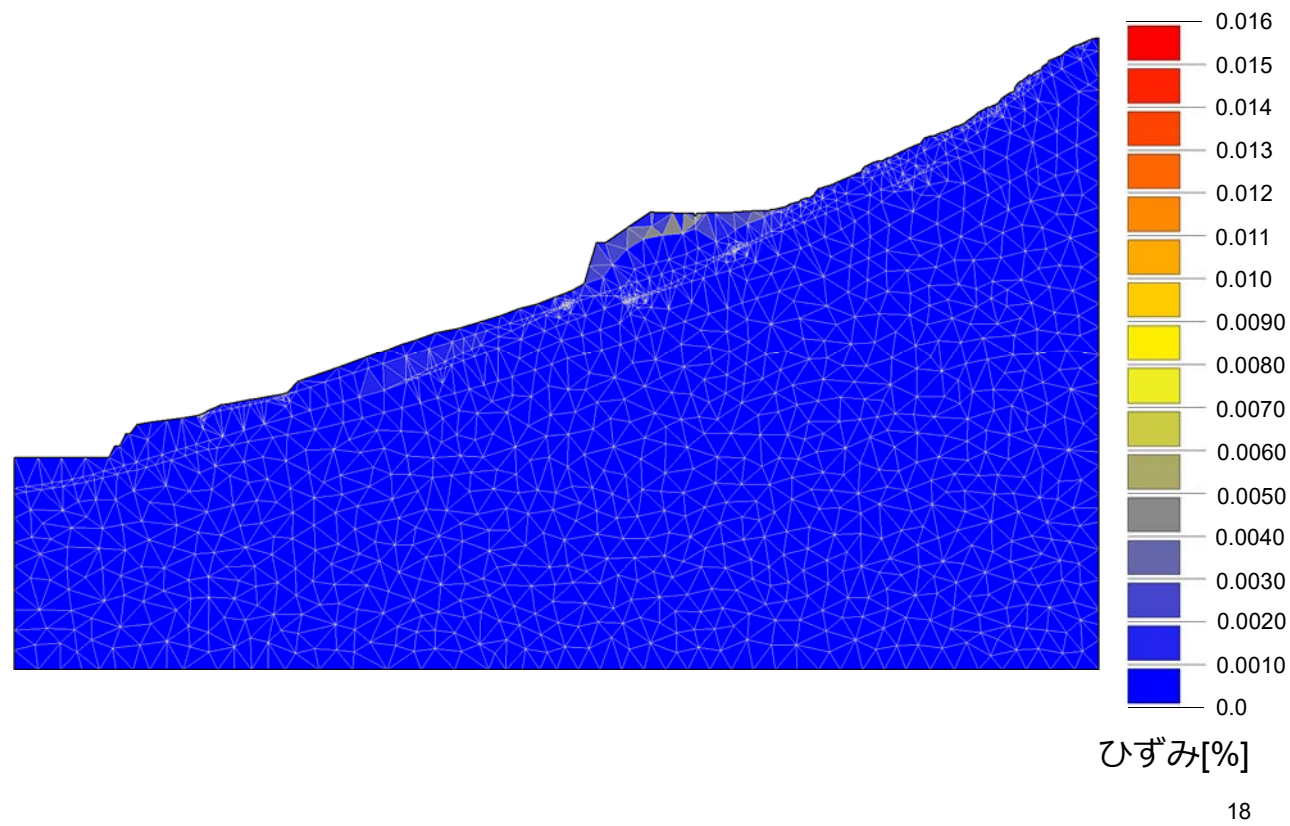
最大せん断ひずみ分布 | 初期状態 (10月14日0時)



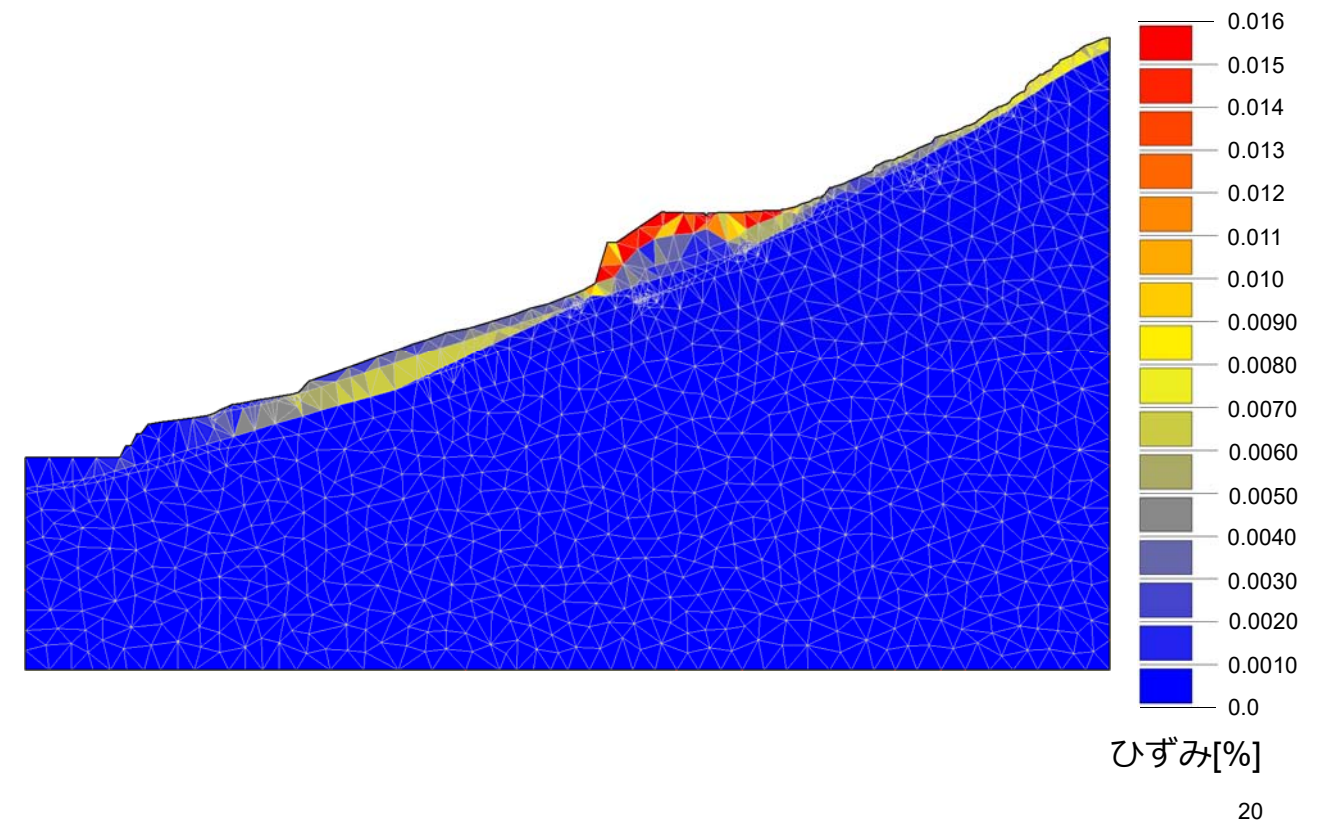
最大せん断ひずみ分布 | 2日経過 (10月16日0時)



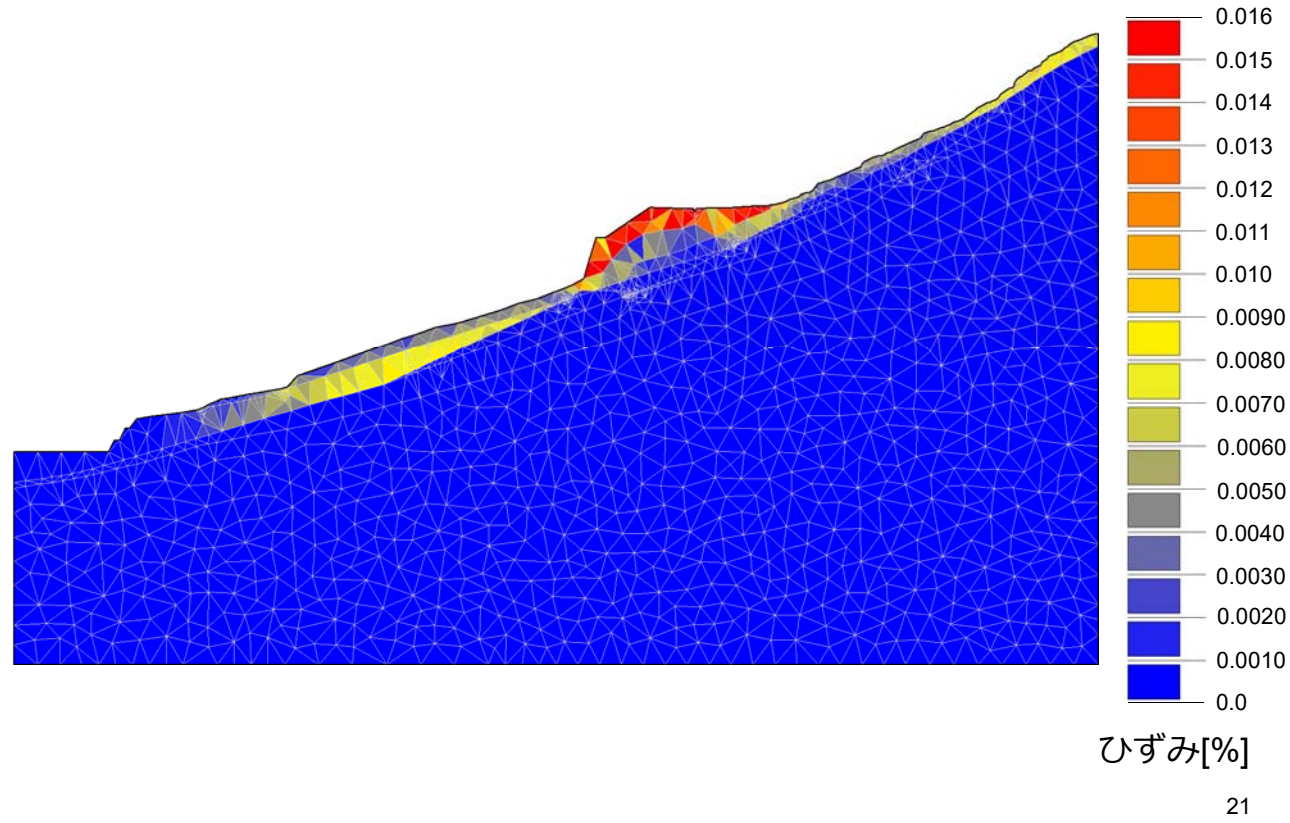
最大せん断ひずみ分布 | 1日経過 (10月15日0時)



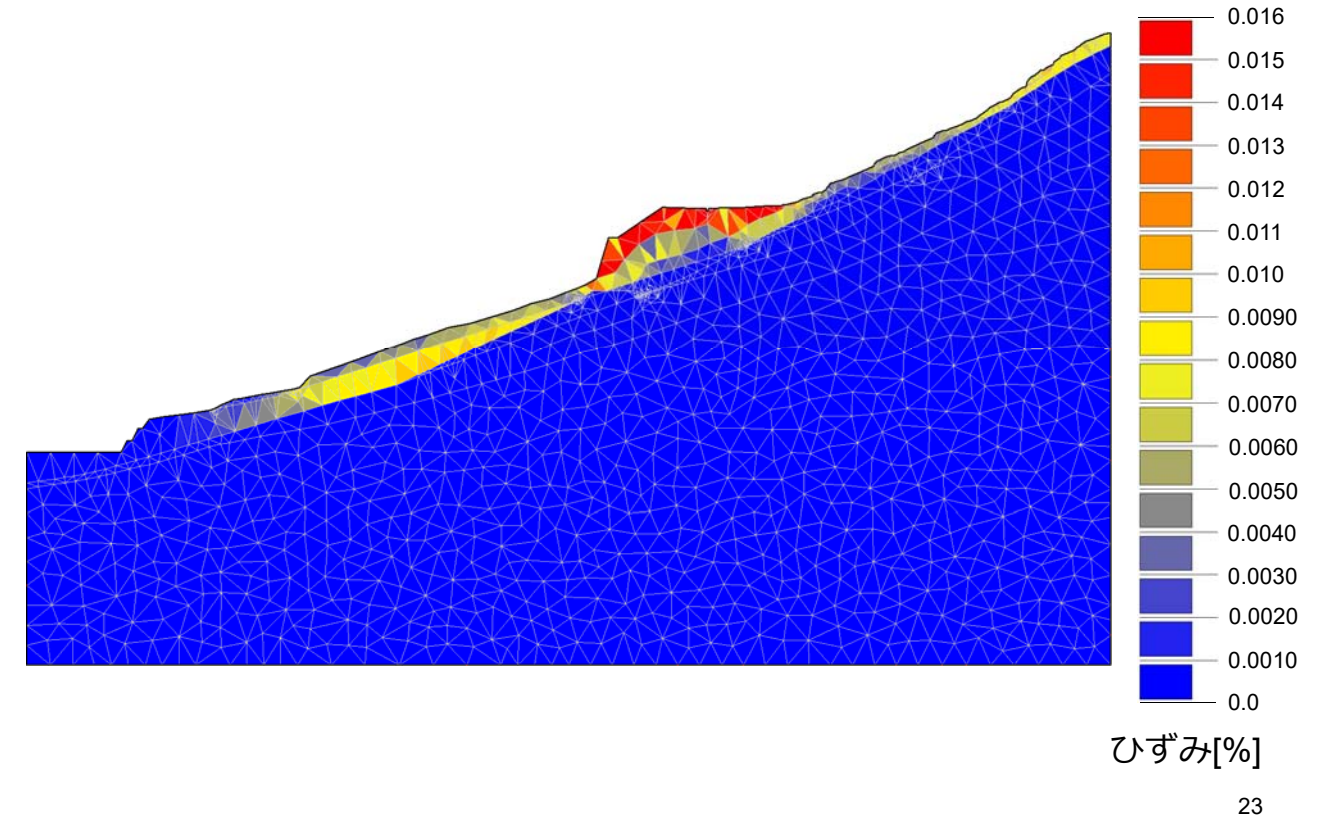
最大せん断ひずみ分布 | 3日経過 (10月17日0時)



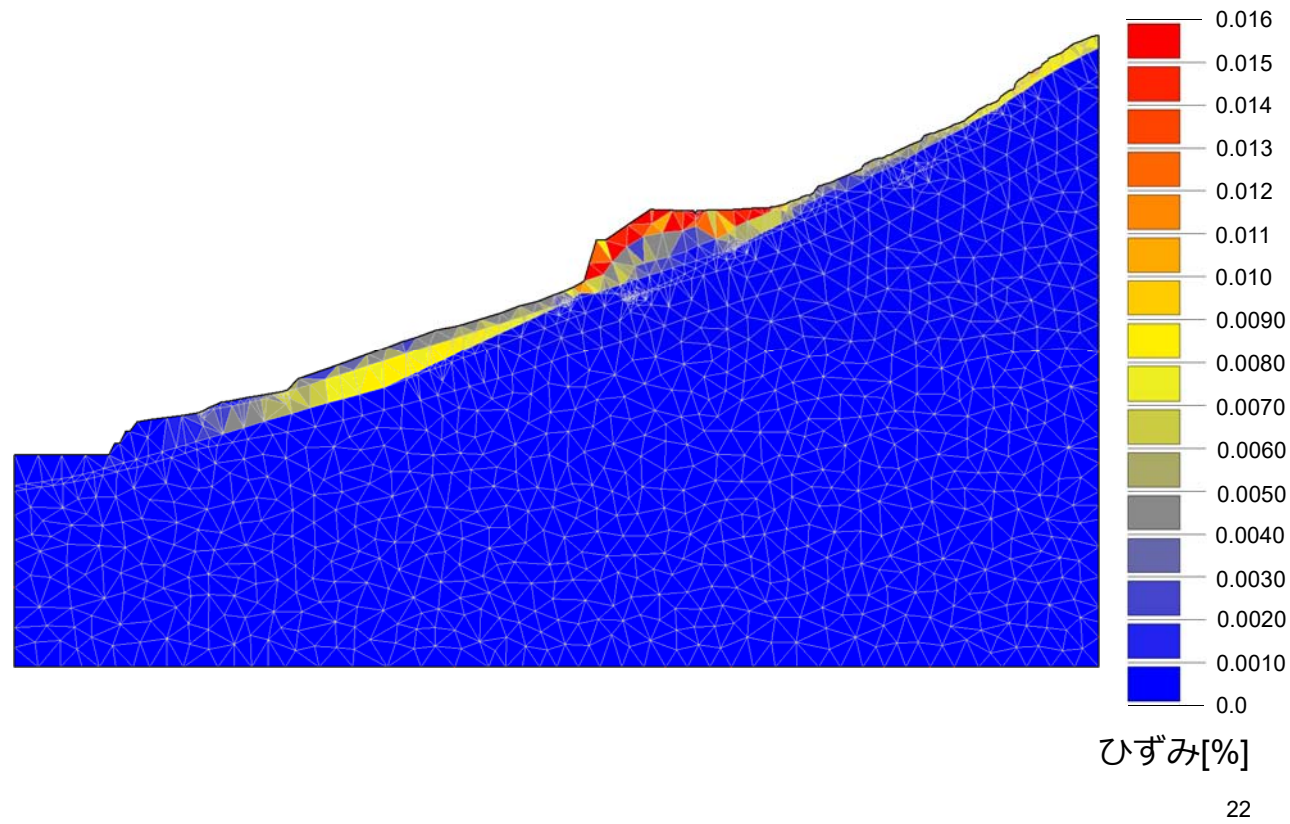
最大せん断ひずみ分布 | 4日経過 (10月18日0時)



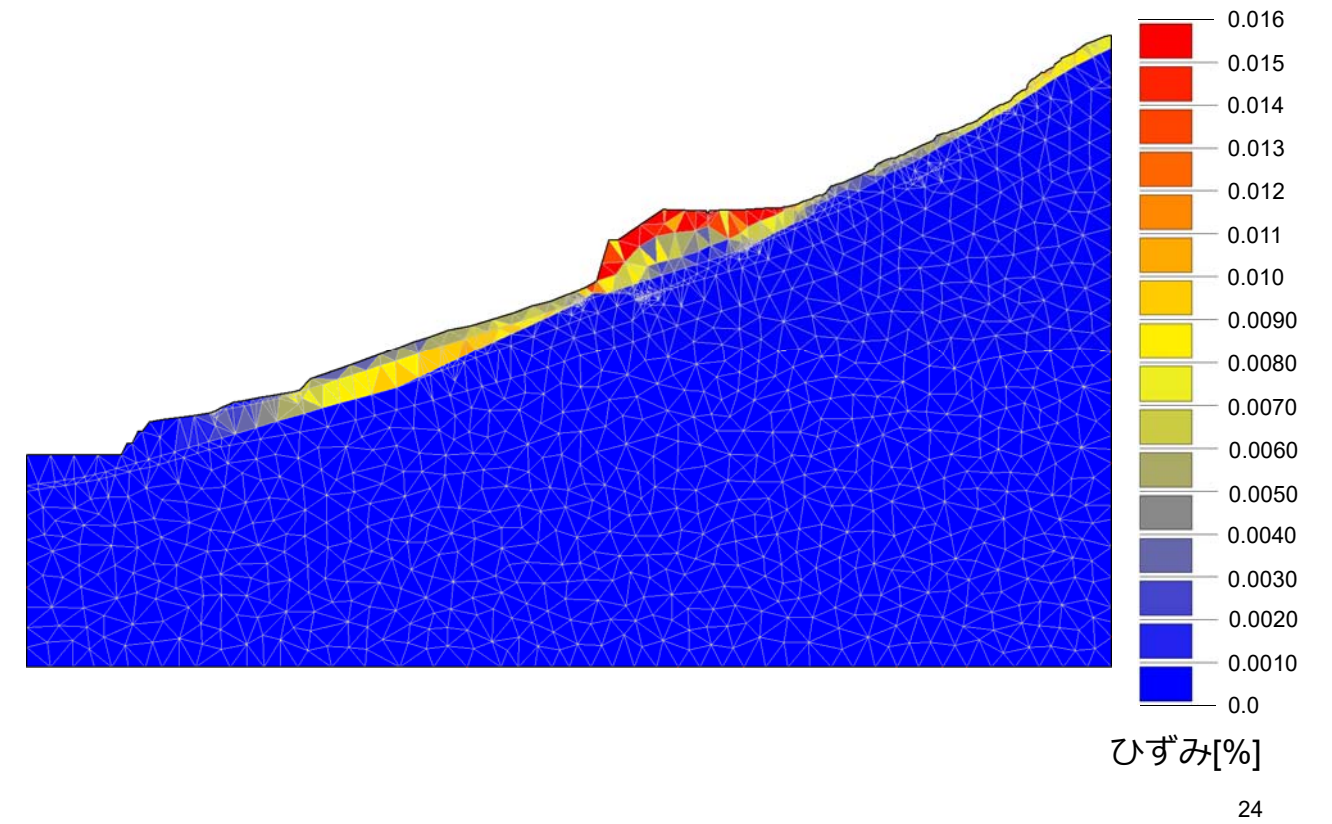
最大せん断ひずみ分布 | 6日経過 (10月20日0時)



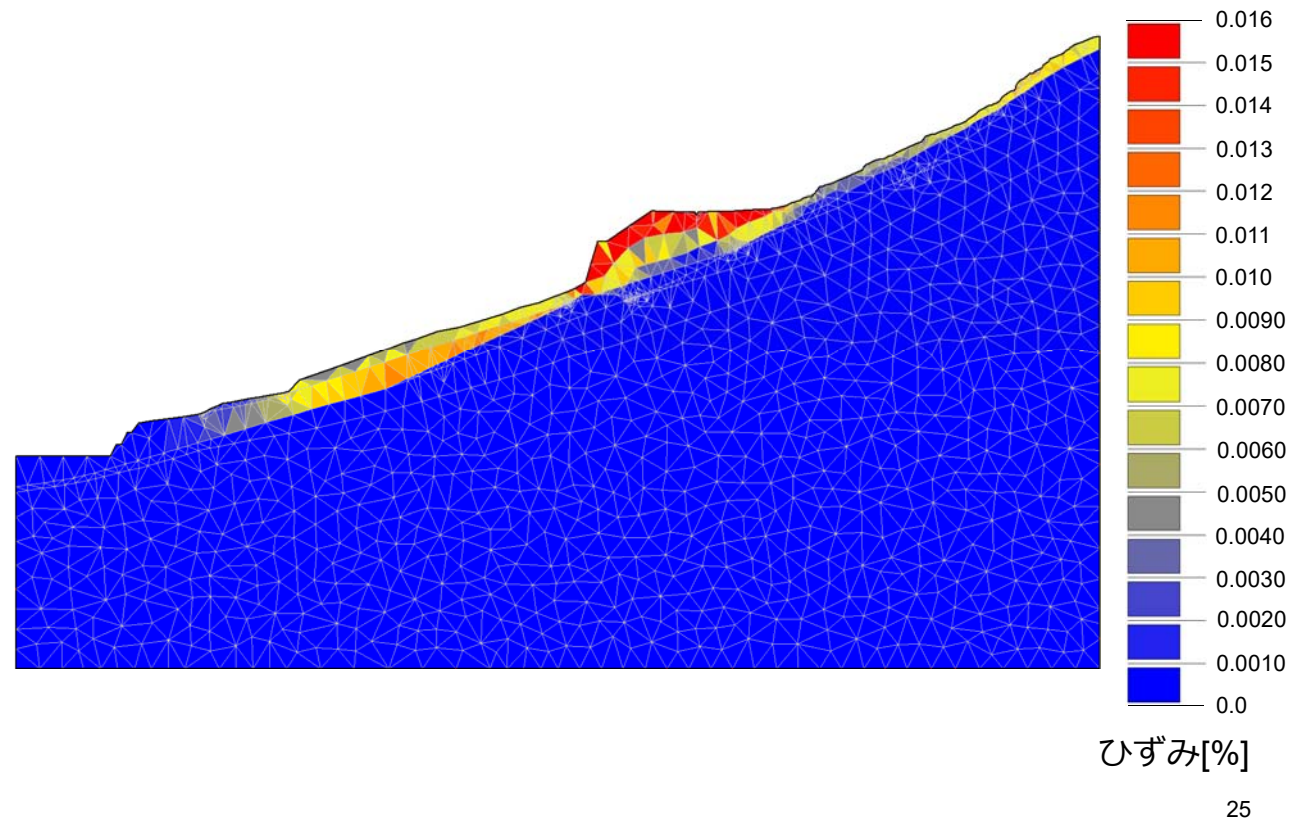
最大せん断ひずみ分布 | 5日経過 (10月19日0時)



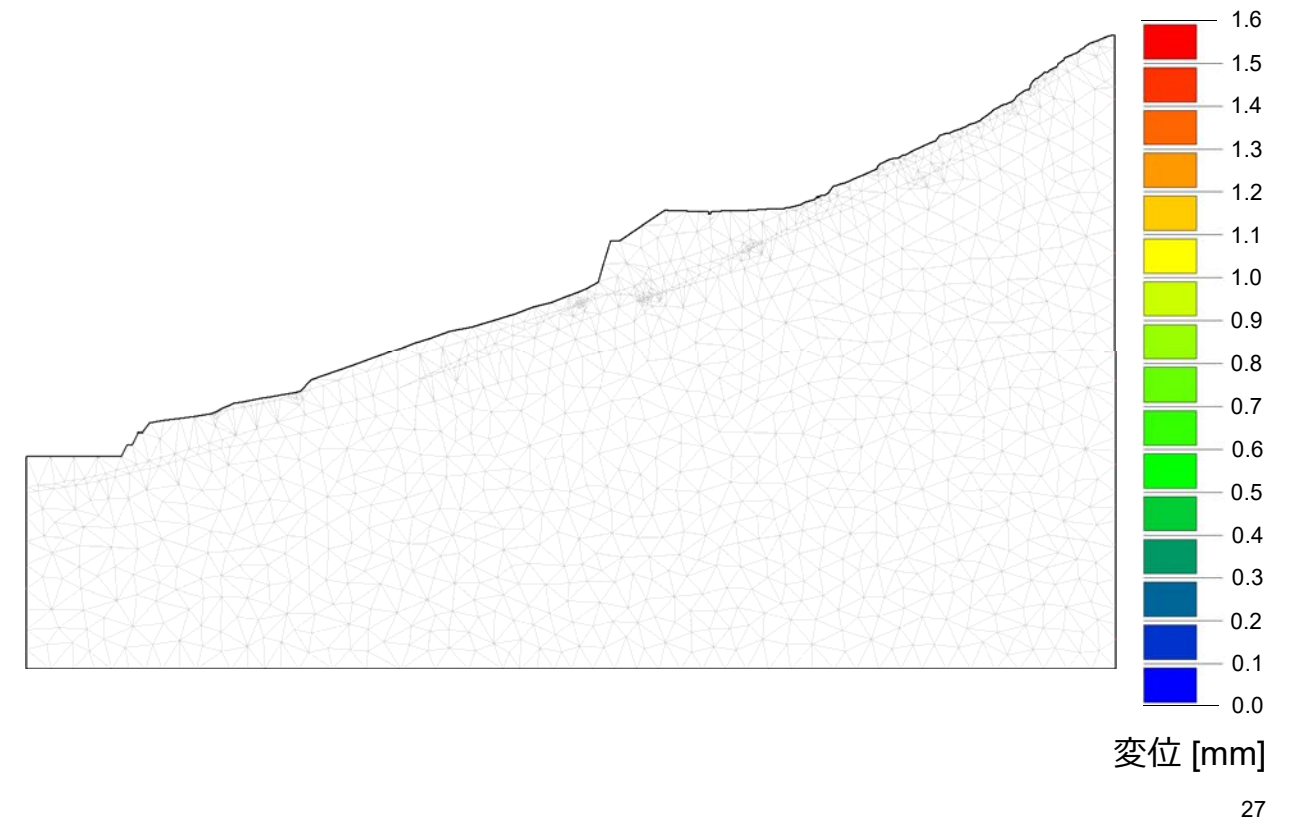
最大せん断ひずみ分布 | 7日経過 (10月21日0時)



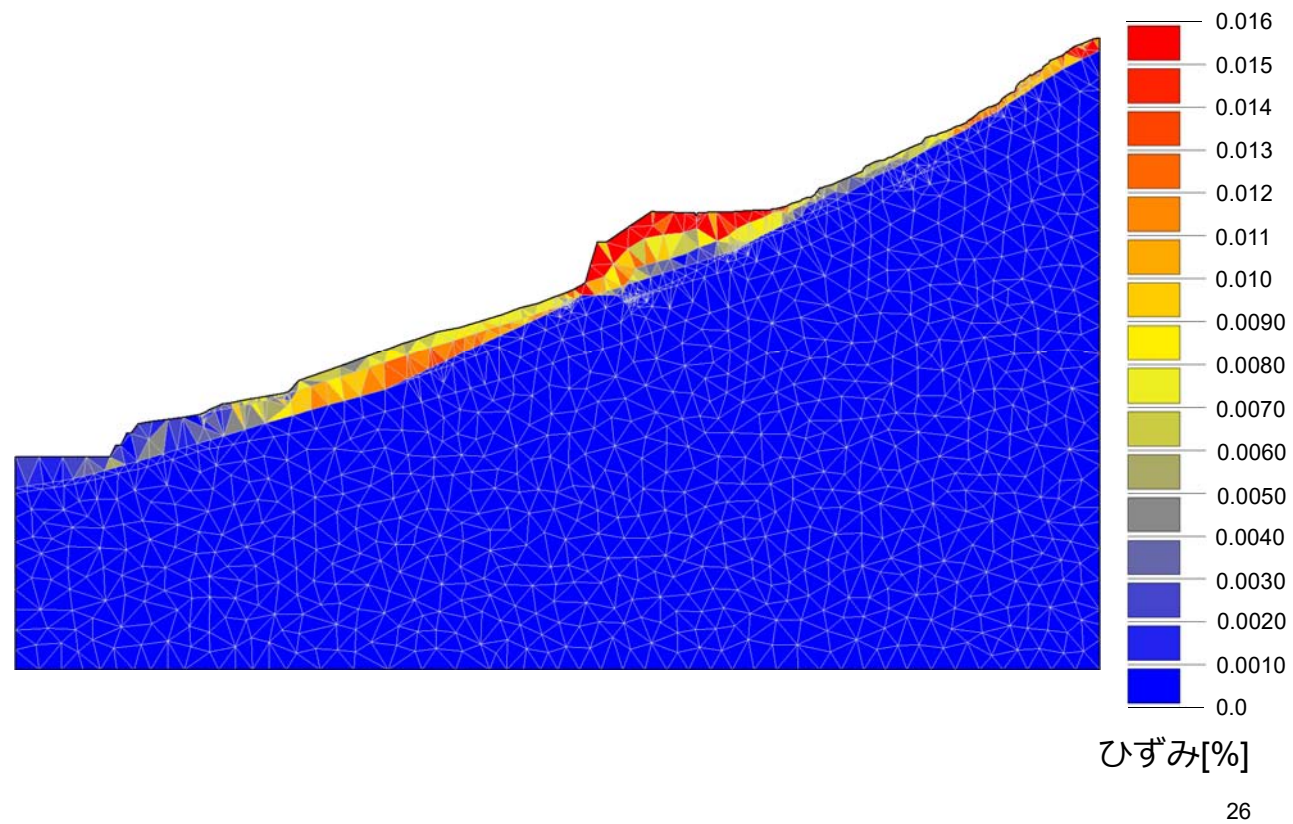
最大せん断ひずみ分布 | 8日経過 (10月22日0時)



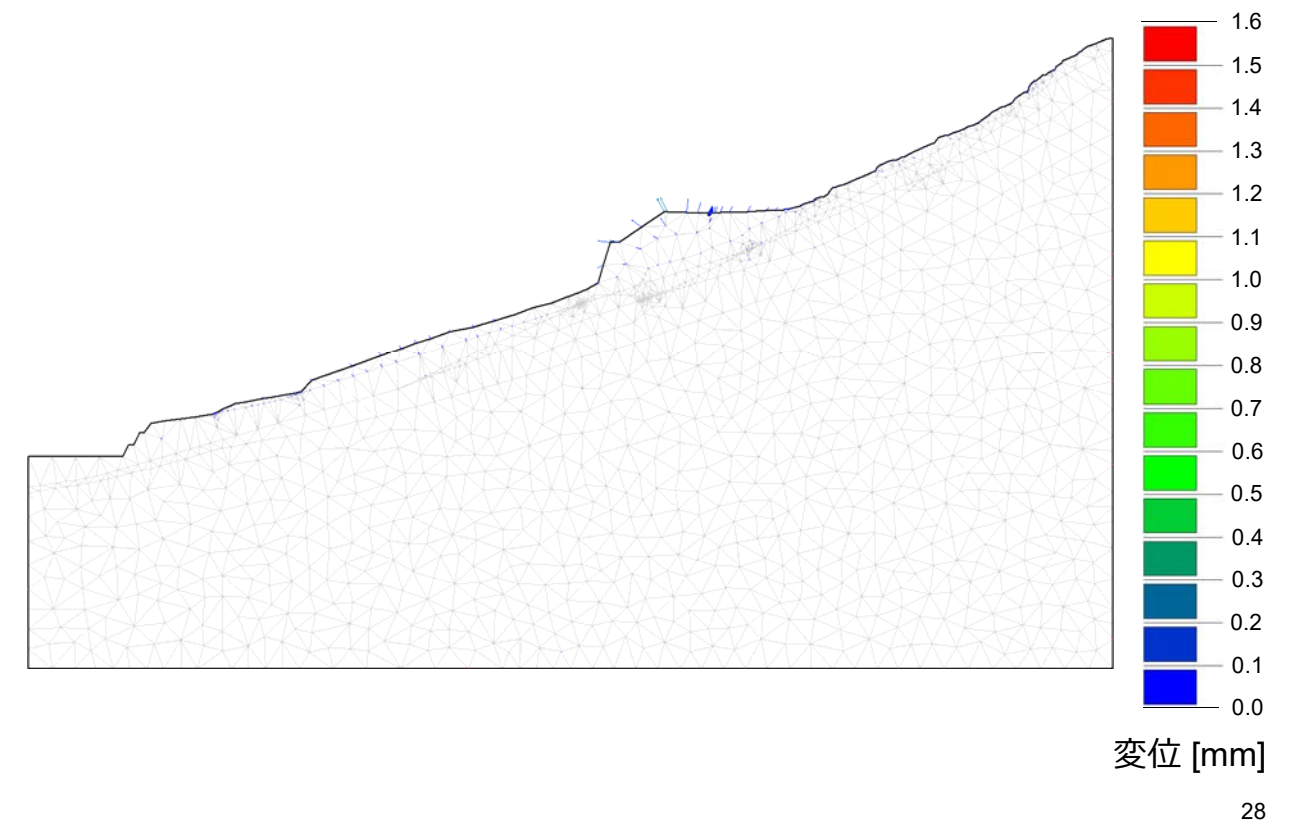
変位ベクトル図 | 初期状態 (10月14日0時)



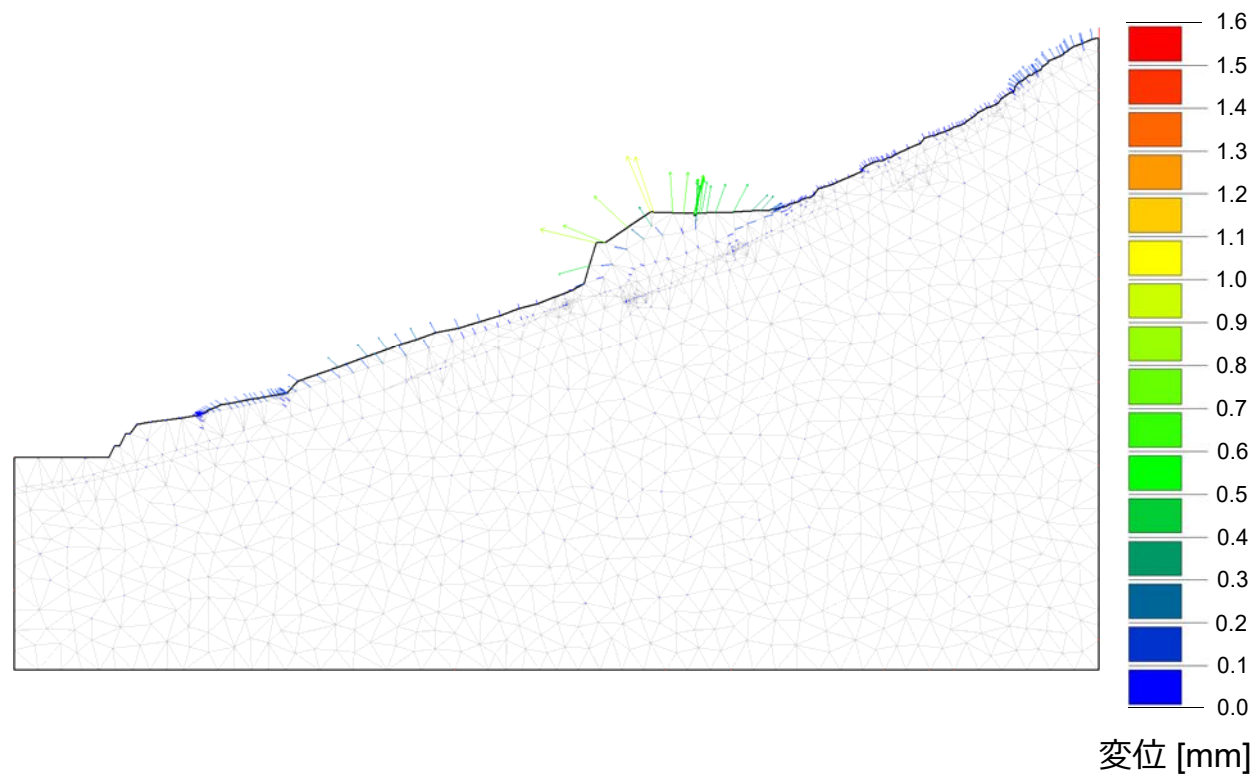
最大せん断ひずみ分布 | 9日経過 (10月23日0時)



変位ベクトル図 | 1日経過 (10月15日0時)

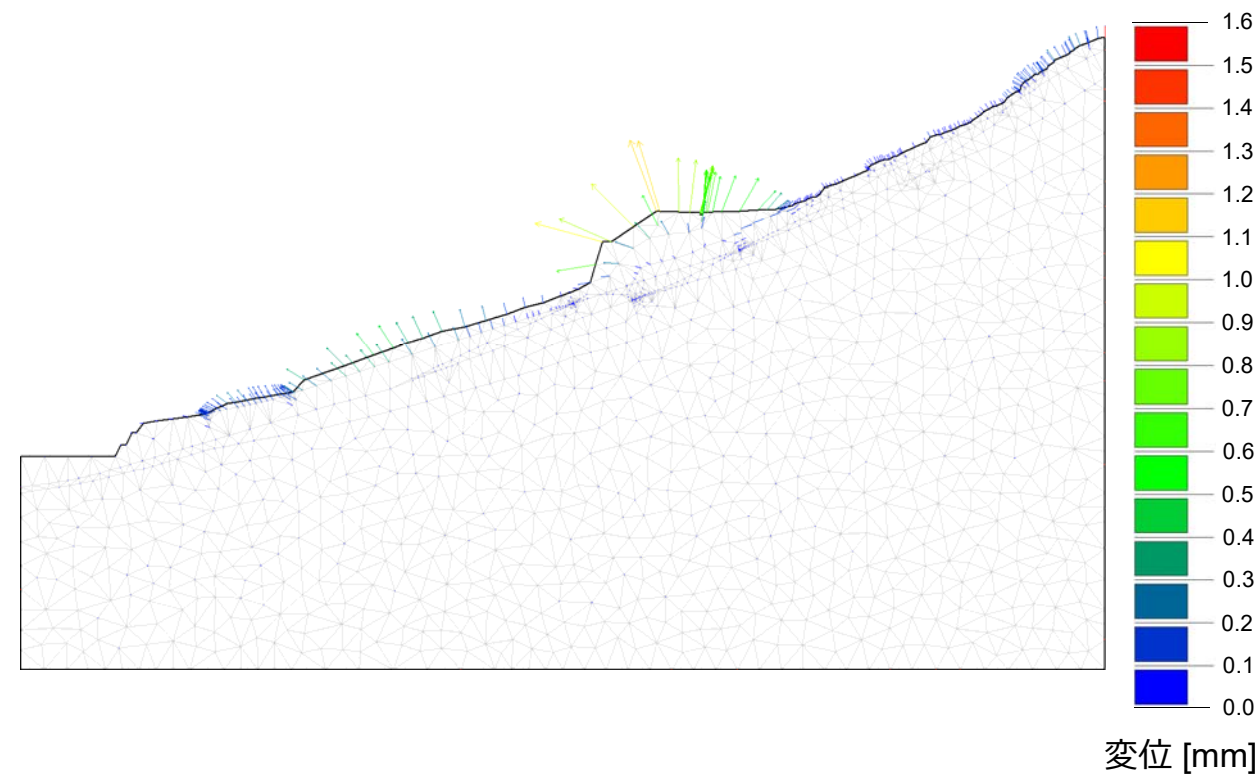


変位ベクトル図 | 2日経過 (10月16日0時)



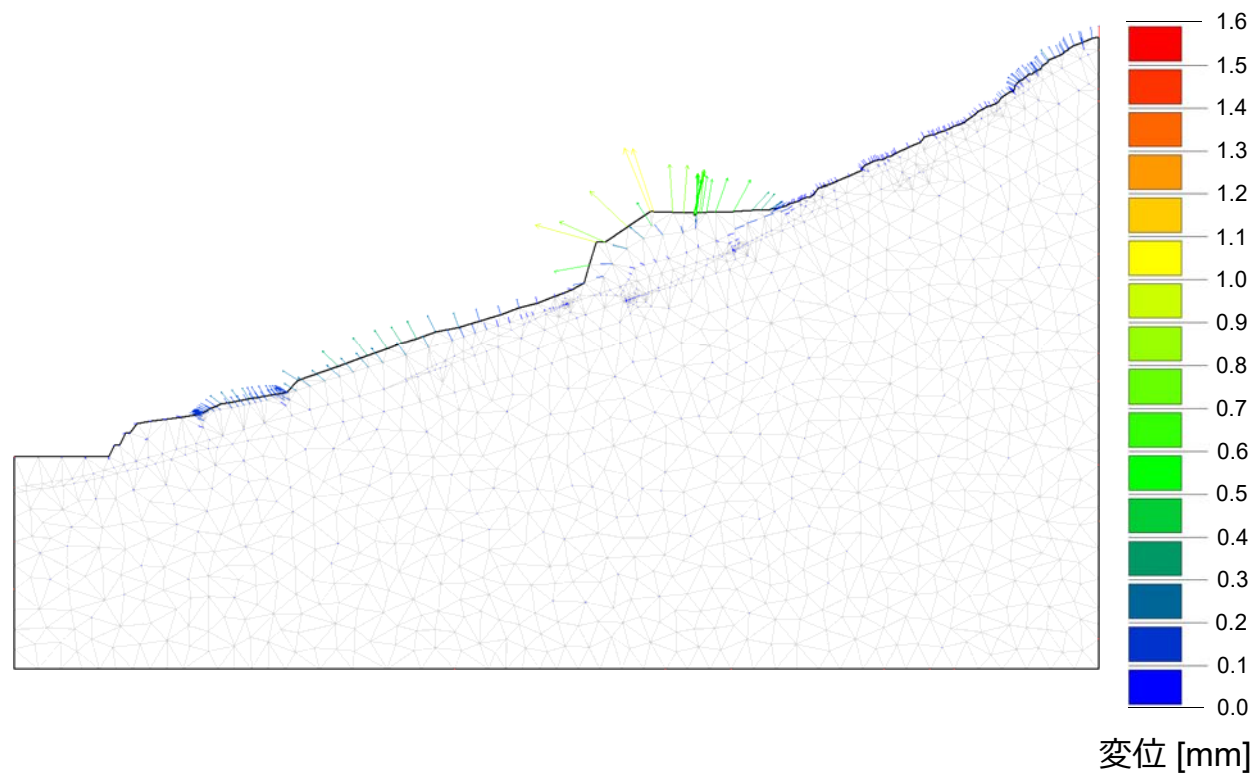
29

変位ベクトル図 | 4日経過 (10月18日0時)



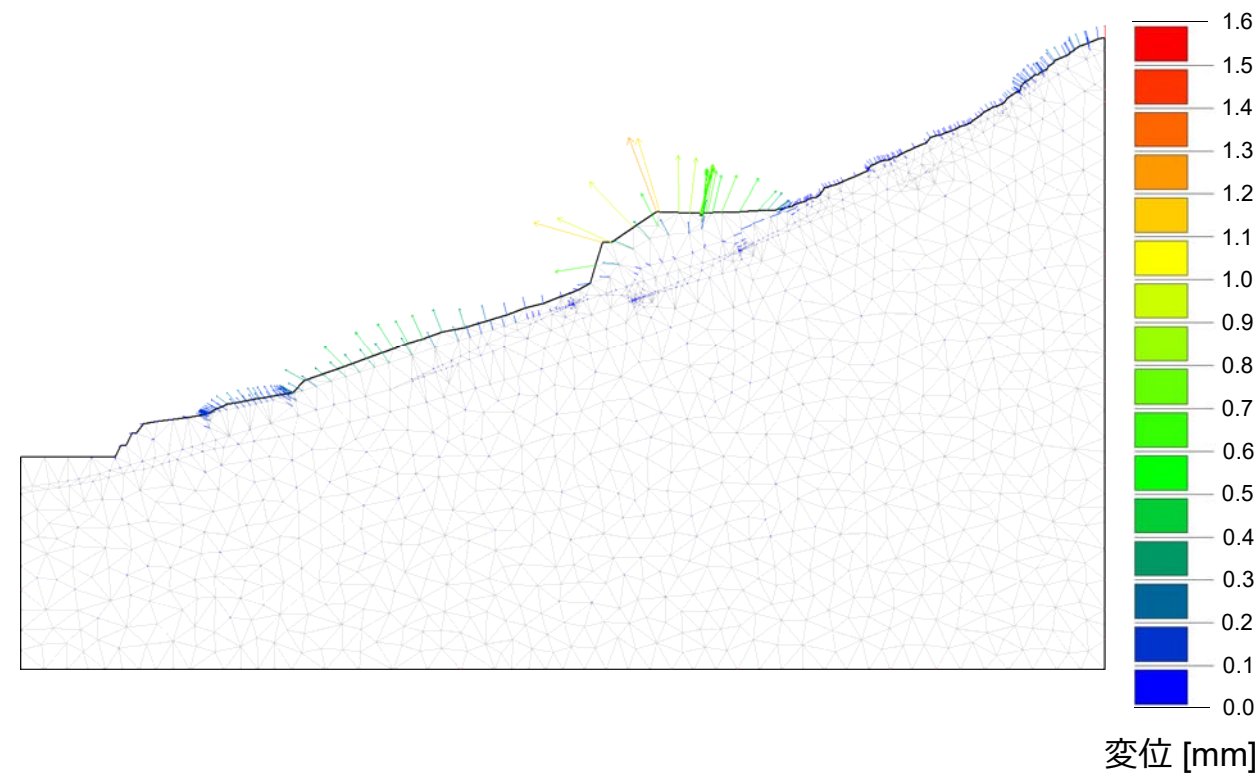
31

変位ベクトル図 | 3日経過 (10月17日0時)



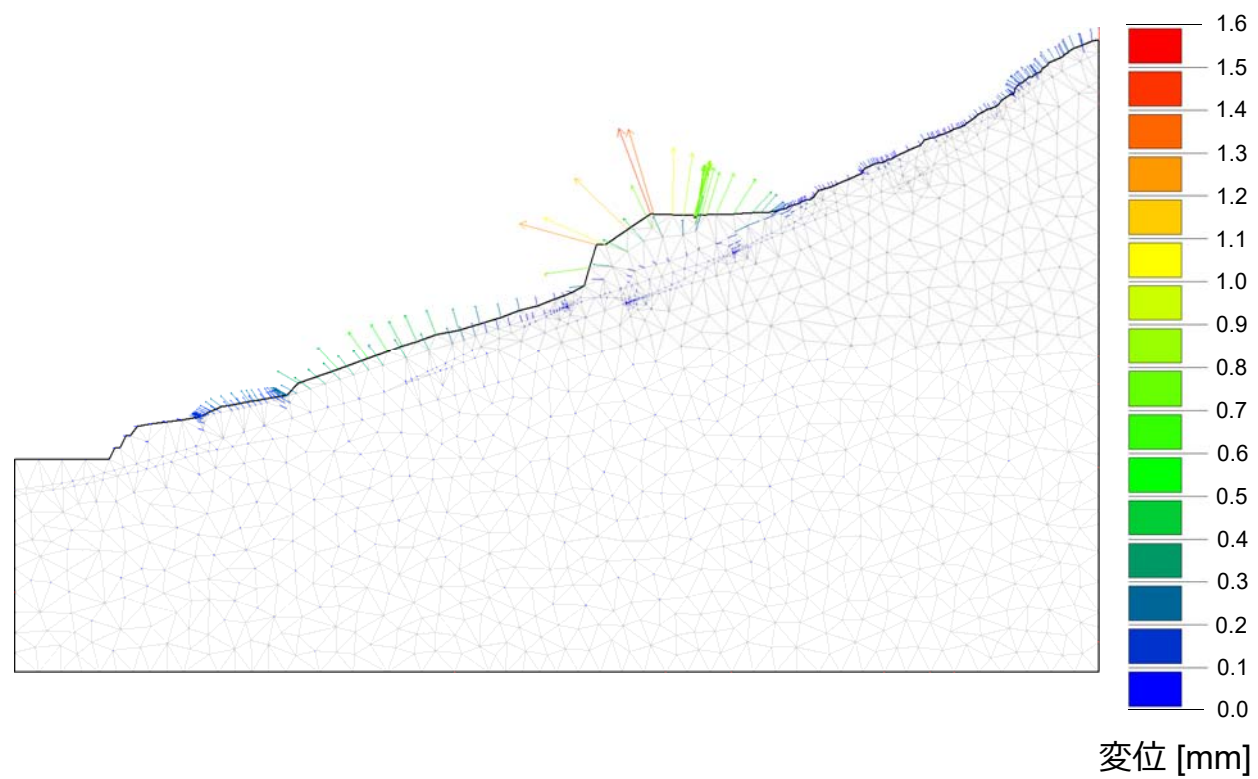
30

変位ベクトル図 | 5日経過 (10月19日0時)



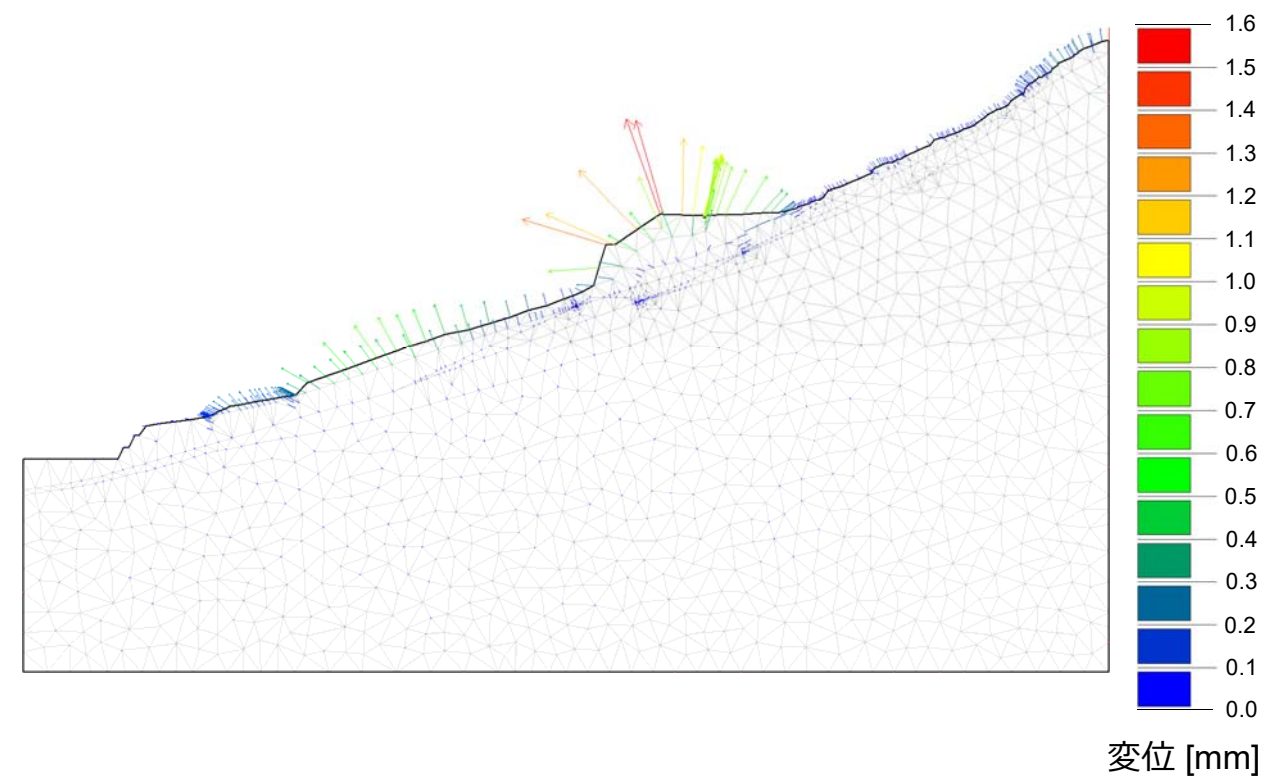
32

変位ベクトル図 | 6日経過 (10月20日0時)



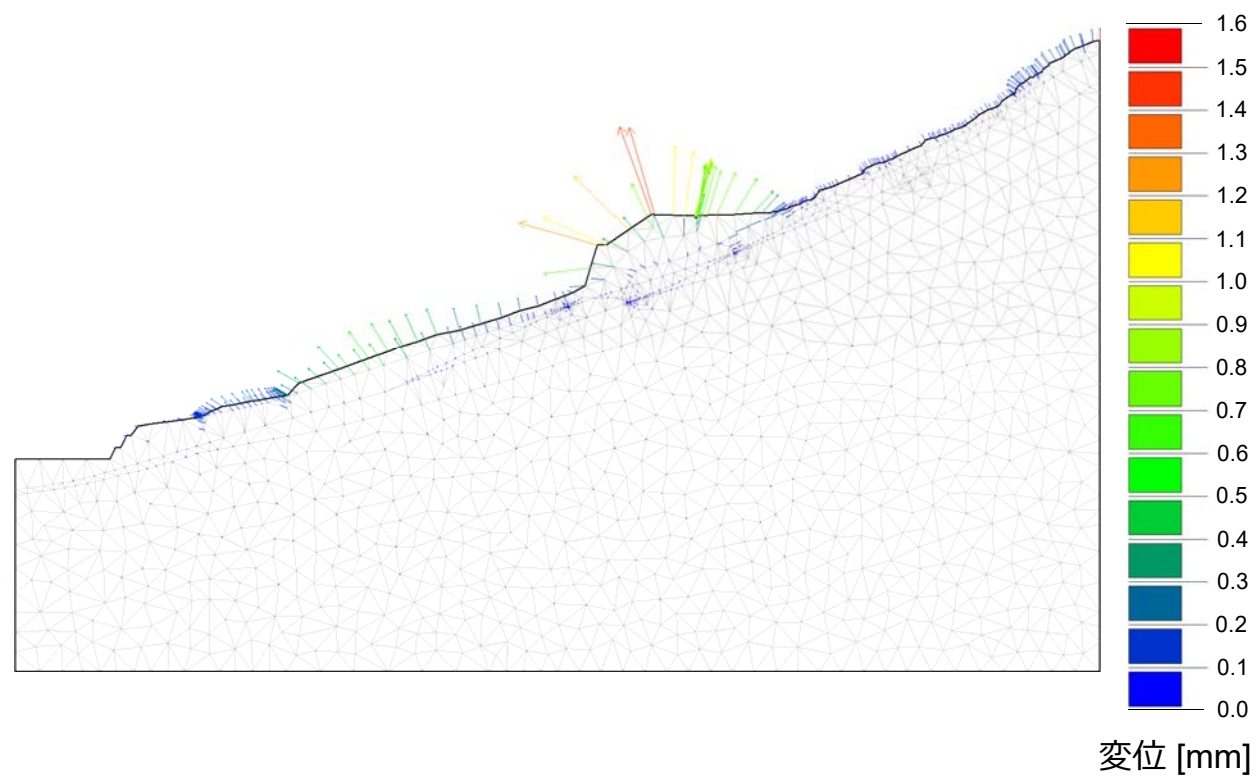
33

変位ベクトル図 | 8日経過 (10月22日0時)



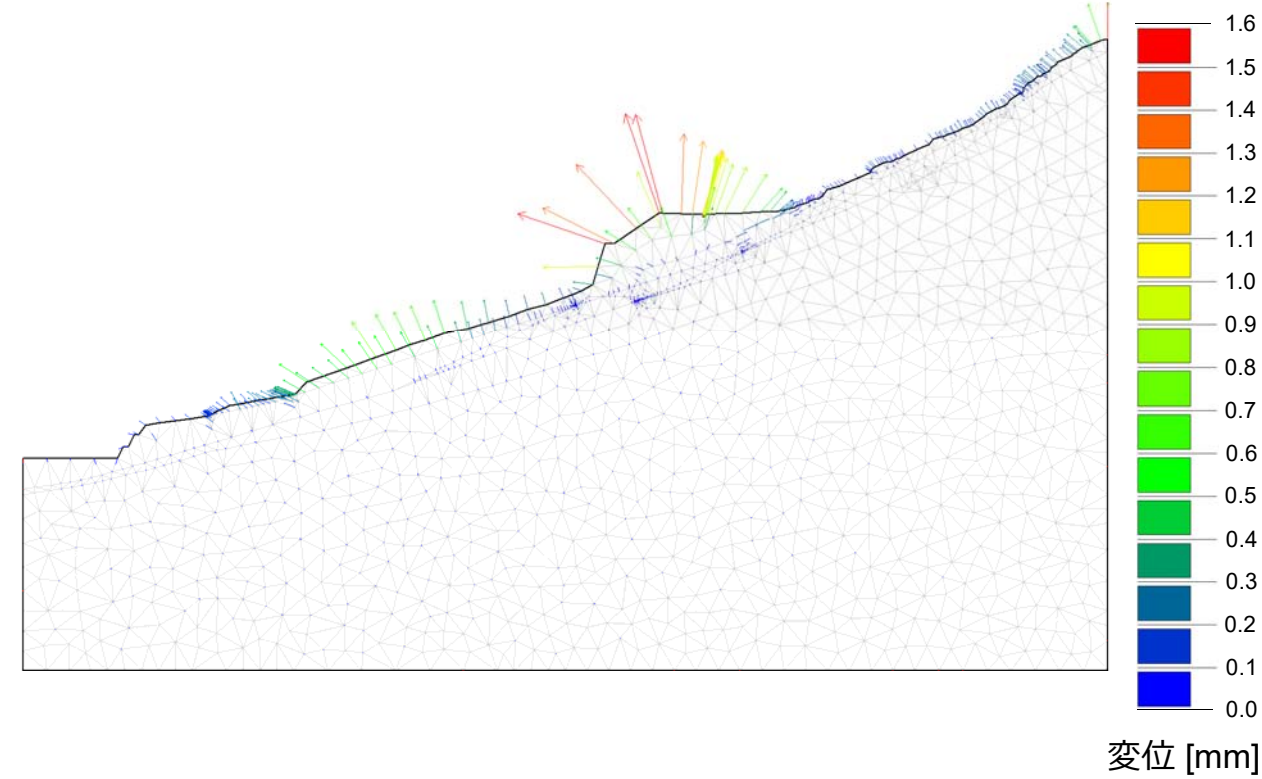
35

変位ベクトル図 | 7日経過 (10月21日0時)



34

変位ベクトル図 | 9日経過 (10月23日0時)



36