

第20回新都市社会技術セミナー
令和5年10月23日

「宙水」が道路盛土安定性に及ぼす影響の 評価法と対策法の構築

プロジェクトリーダー

肥後 陽介

京都大学 大学院工学研究科 都市社会工学専攻

幹事・産メンバー代表

甲斐 誠士

大日本ダイヤコンサルタント (株)

河井 克之

近畿大学

片岡 沙都紀

北見工業大学

木戸 隆之祐

京都大学

小島 幹生

大日本ダイヤコンサルタント

吉村 貢

ソイルアンドロックエンジニアリング

石井 正紀

ソイルアンドロックエンジニアリング

重富 正幸

ソイルアンドロックエンジニアリング

加藤 良輔

日建設計

由井 洋和

日建設計

中西 典明

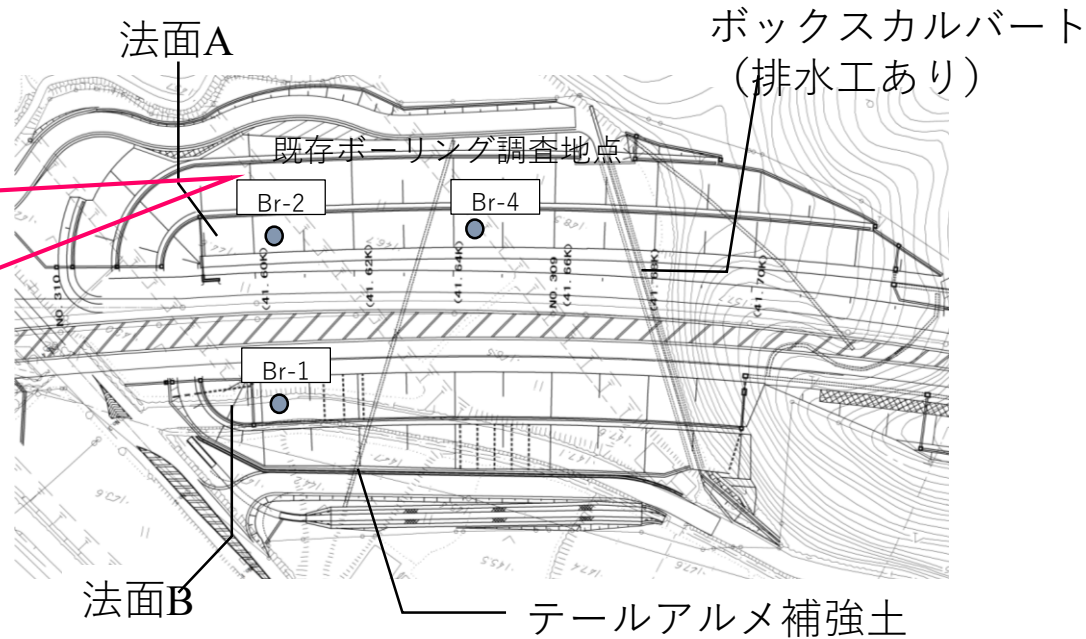
建設工学研究所

道路盛土における宙水（事例）

道路盛土
(国道, 有料道路)

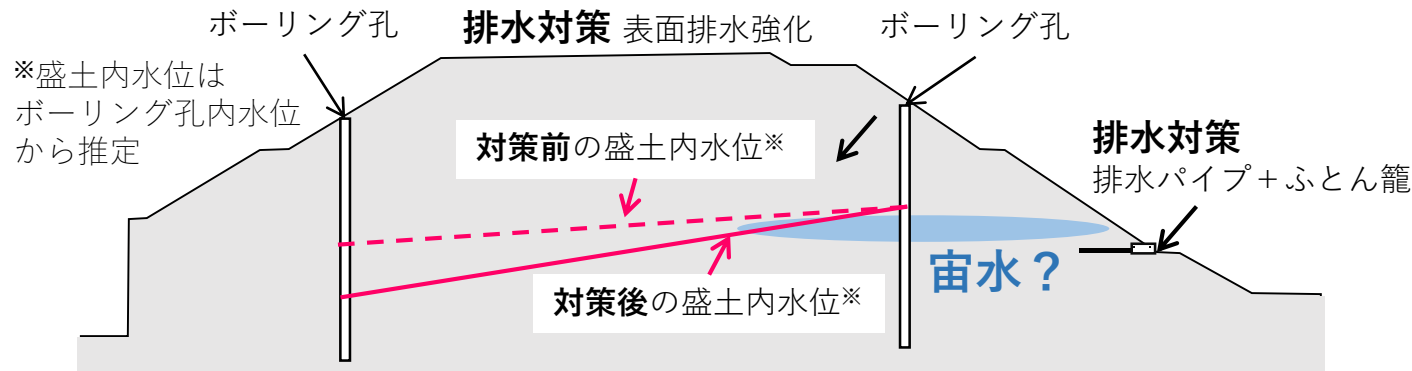
法面A:
対策後も絶え間なく湧水があり、表層すべりを繰り返している。

法面B:
対策後は変状なし

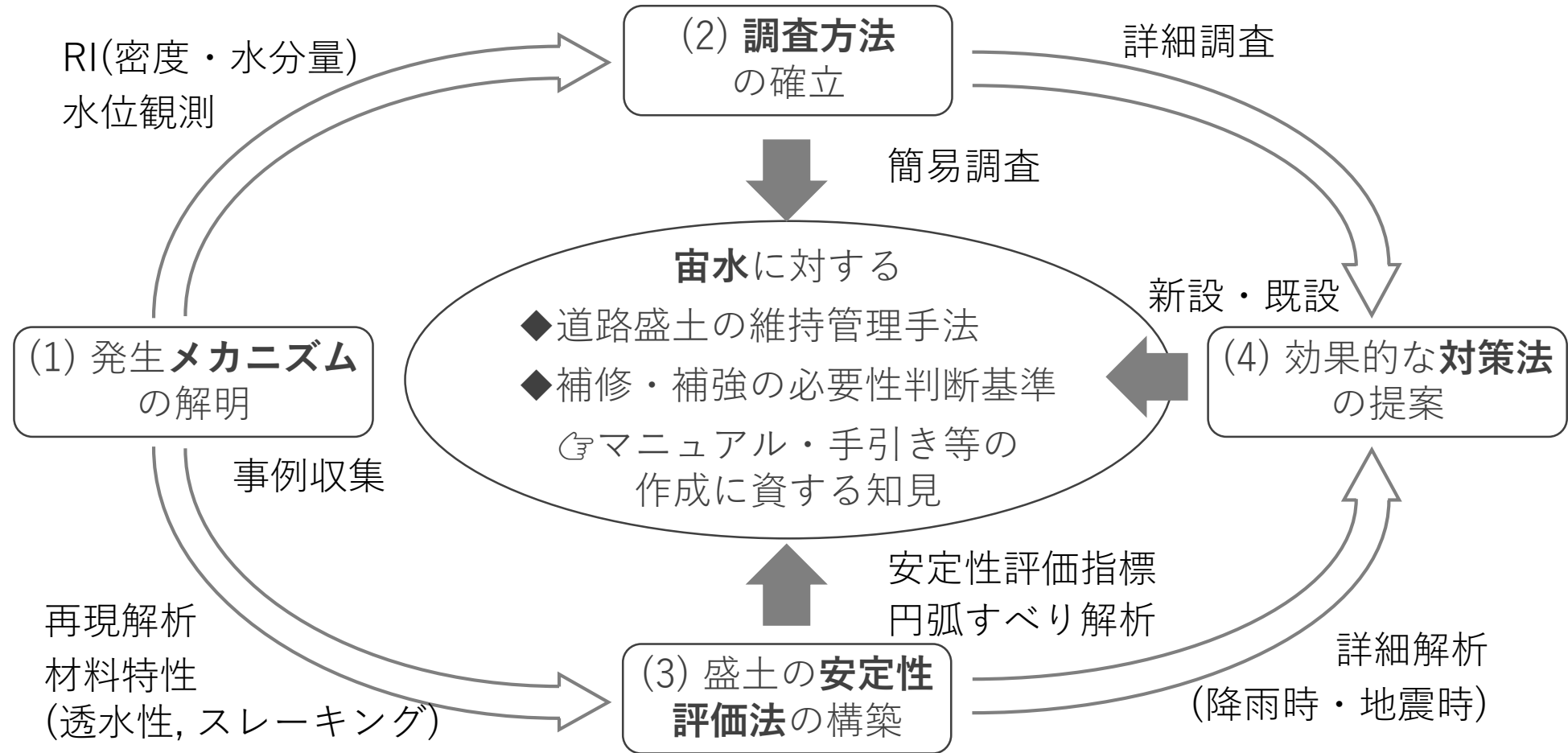


● 粘土層などの介在しない均質な材料の盛土であっても宙水が発生

● 宙水は「地下水位」低下を目的とした排水工では排水できない。



研究の目的



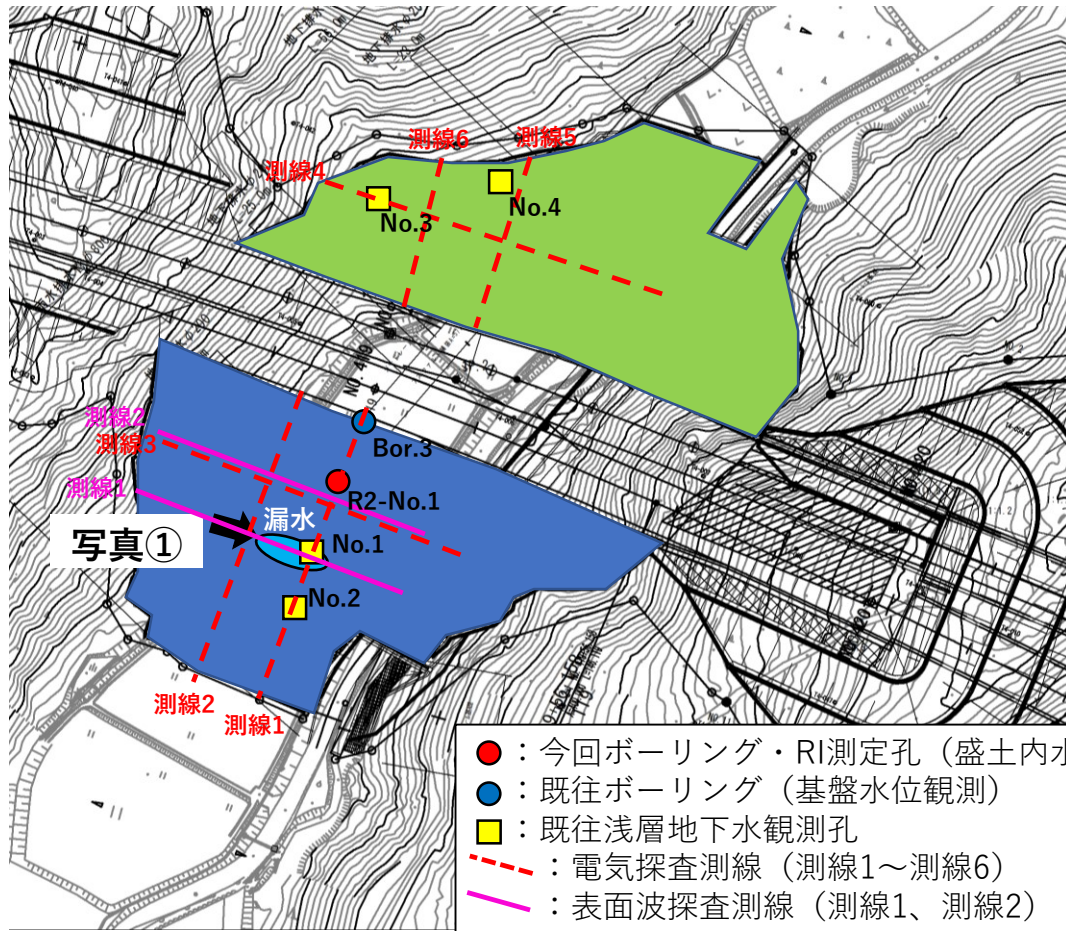
1-2) 宙水の特定のための地盤調査

2-1) 宙水の位置・広がりをも特定する詳細調査

宙水が発生している箇所を中心に、ボーリング調査や挿入型RI測定、電気探査、表面波探査を実施した。

【詳細調査の内容】

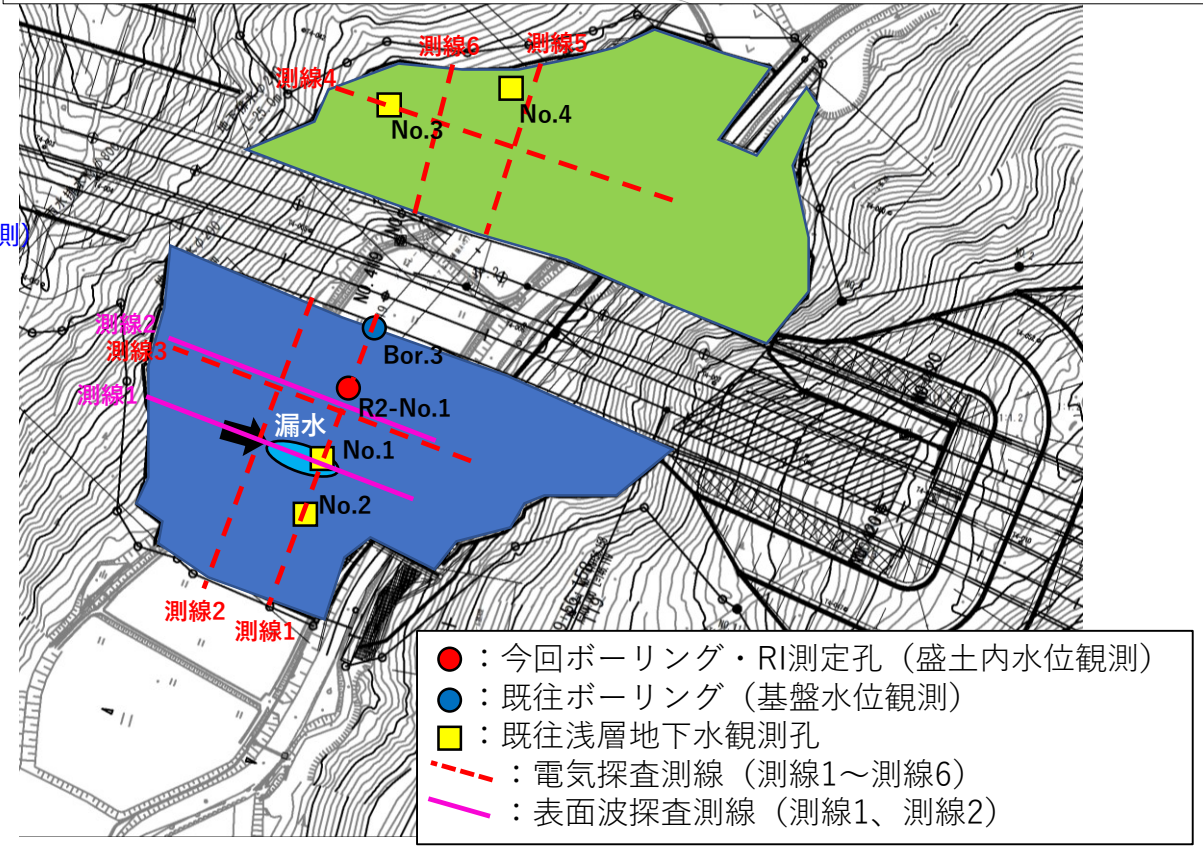
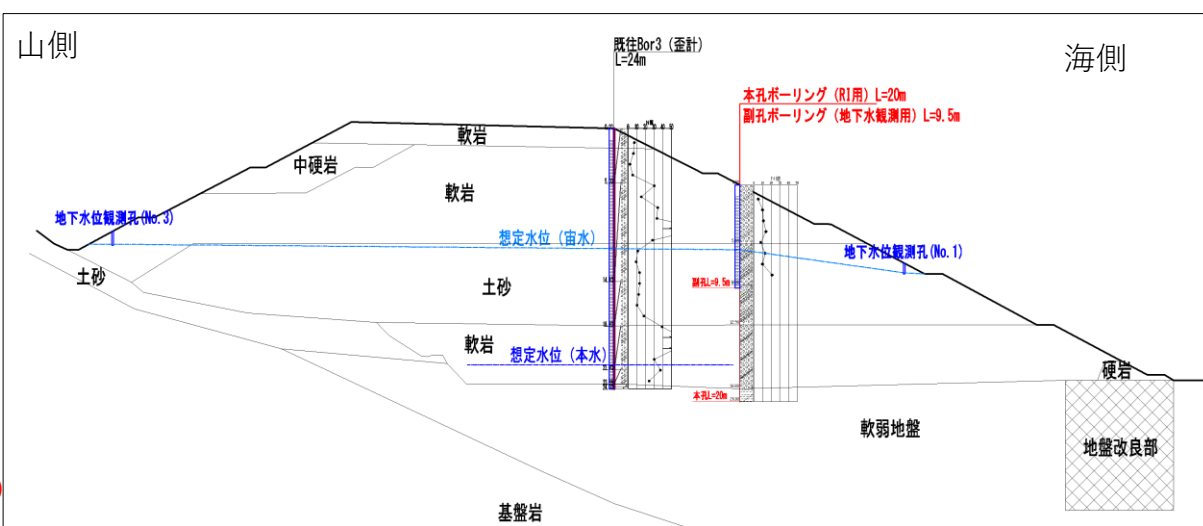
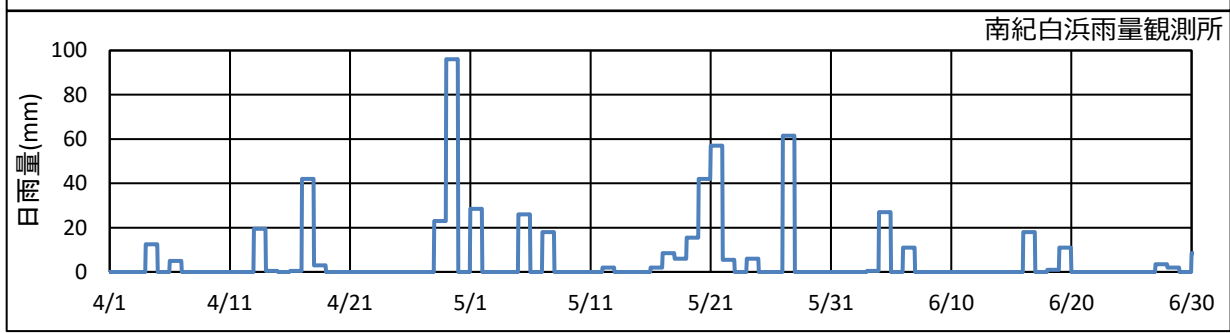
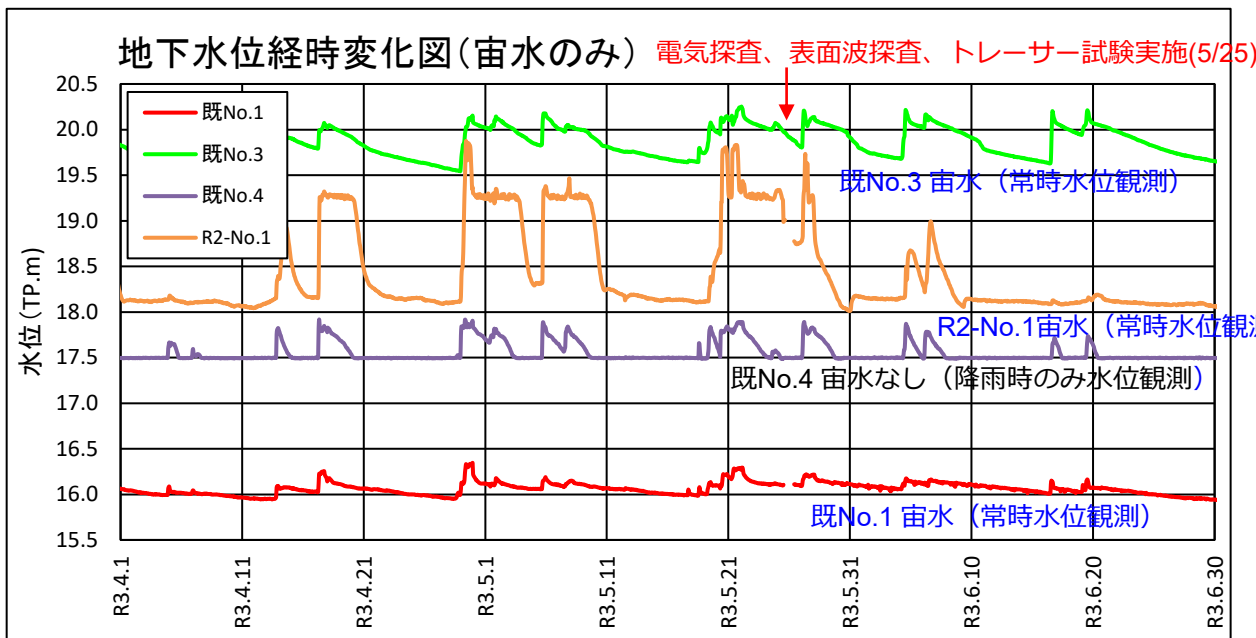
- ・ ボーリング：地層の確認。
- ・ 挿入型RI測定：深度方向の飽和状況の把握。
- ・ 電気探査：地下水の広がりへの推定。
- ・ 表面波探査：地下水と地盤の緩み域の関連の把握。
- ・ トレーサー試験：地下水の流動方向の推定。



地下水位観測

常時地下水位が確認される(既No.1,既No.3,R2-No.1)
 降雨時のみ水位が確認される(既No.4)が存在する。

- ・ R3.5.25は事前1週間の積算雨量132mm(豊水期)
 (電気探査、表面波探査、トレーサー試験を実施)

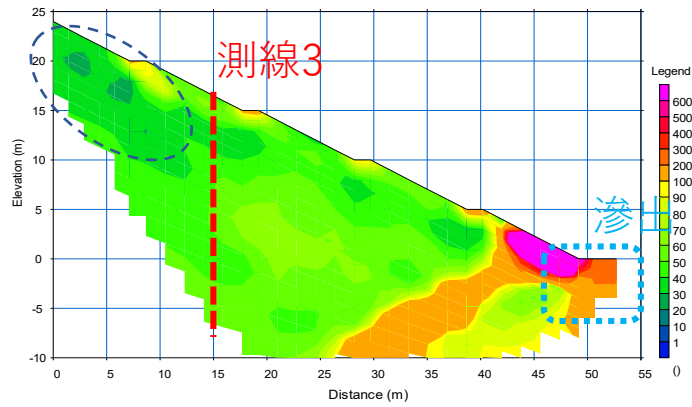


- : 今回ボーリング・RI測定孔 (盛土内水位観測)
- : 既往ボーリング (基盤水位観測)
- : 既往浅層地下水観測孔
- - - : 電気探査測線 (測線1~測線6)
- - - : 表面波探査測線 (測線1、測線2)

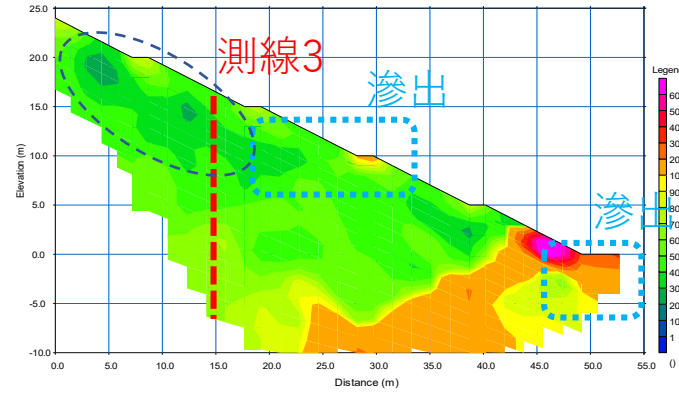
2-1) 宙水の位置・広がり を特定する 詳細調査: 電気比抵抗探査

5/25
1週間積算
雨量
272mm

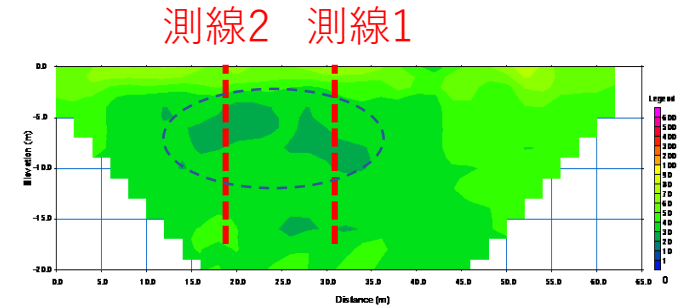
測線2
南法横断面(滲出無)



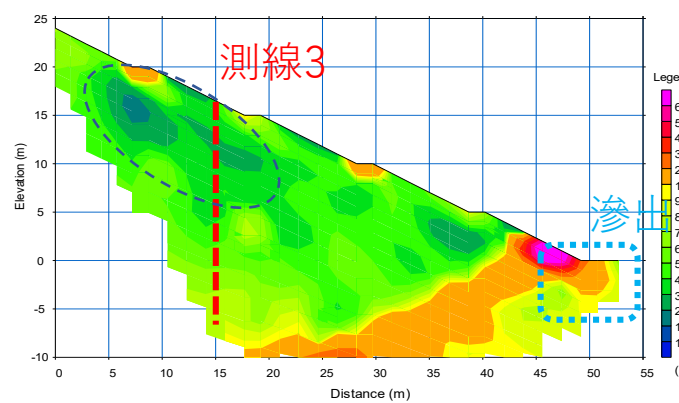
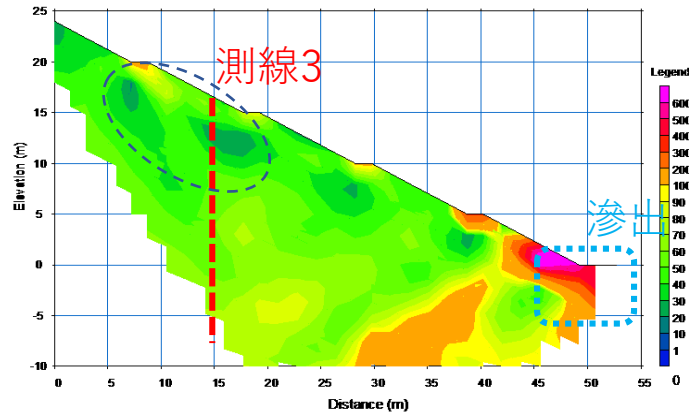
測線1
南法横断面(滲出部)



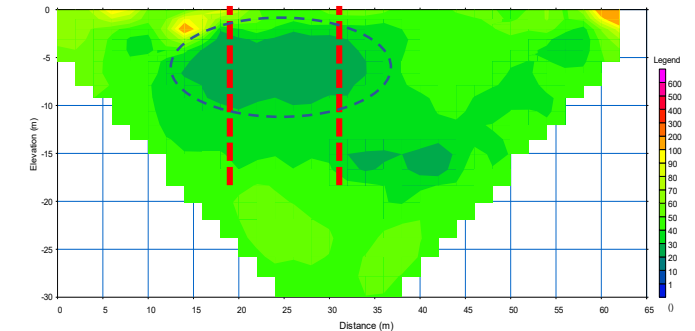
測線3
南法縦断面



10/4
1週間積算
雨量
3mm



測線2 測線1

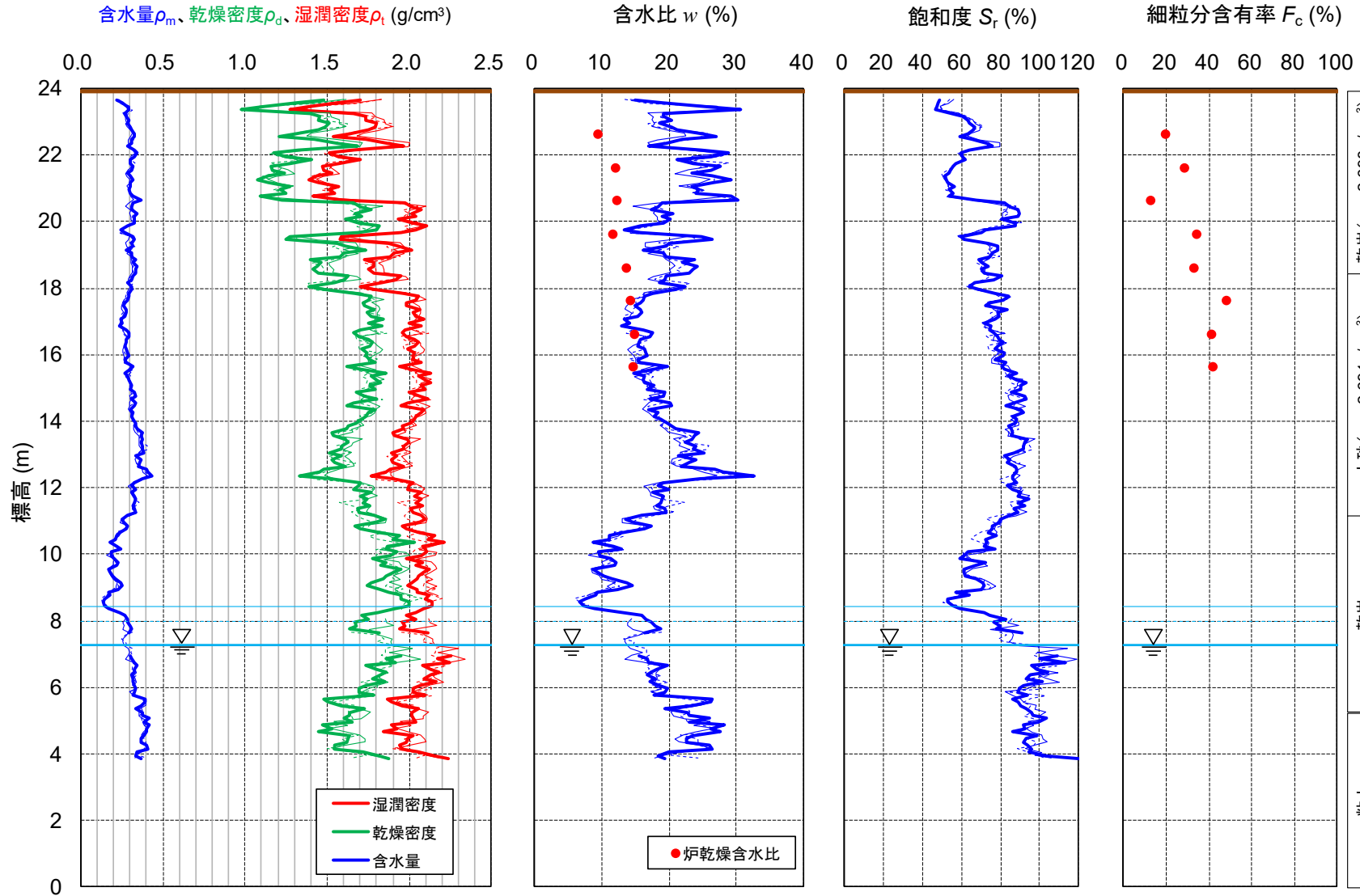


降雨がない時でも法面から3,4m深に含水比の高い領域→宙水
一定量の降雨によって表面に滲出

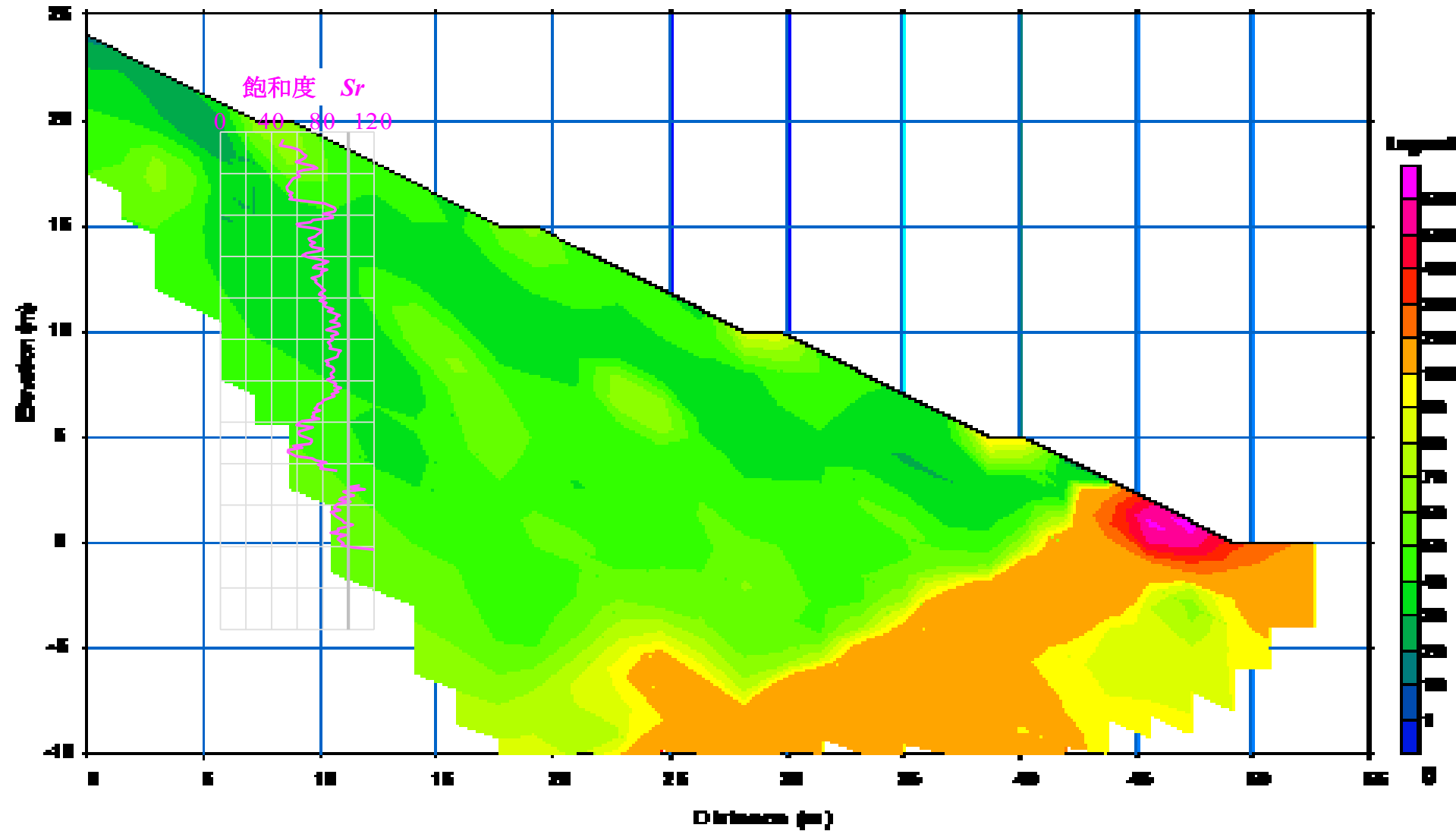
1-2) 宙水の特定のための地盤調査：挿入型RI密度水分計地盤検層

検層孔名称 R2-No.1

実施回数	1回目	2回目	3回目
調査年月日	2021/1/14	2021/2/19	2021/7/6
線種	細実線	細破線	太実線



1-2) 宙水の特定のための地盤調査：挿入型RI密度水分計地盤検層



2-2)簡易調査における点検項目

①盛土漏水調査

目的：漏水量とのり面変状の関連把握

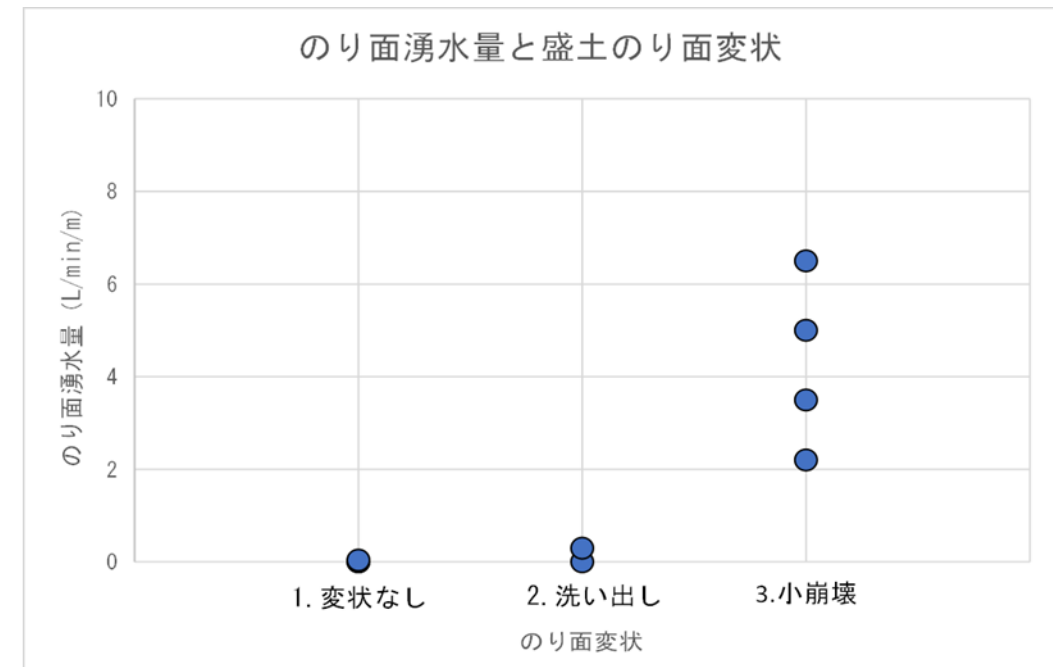
調査手法：盛土のり面の漏水量を直受法で測定。漏水部ののり面の変状を観察。

調査結果

2L/min以上（漏水範囲1m当たり）の漏水がある盛土は、のり面に小崩壊等の変状が確認された。

今回は事前降雨が少ない時期での観測であったため、今後、豊水期のデータも収集し簡易的な点検で概略評価できる漏水量の推定を行う。

整理番号	管理者	対象箇所	住所	漏水量	漏水箇所幅	1m当たりの漏水量 (L/min/m)	変状
1	国土交通省 紀南河川国道	一般国道42号	和歌山県新宮市	しみ出し	-	-	のり面変状なし テールアルメ変状小
2	国土交通省 紀南河川国道	一般国道42号	和歌山県新宮市	5.0L/min(既往) 湧水池あり	-	5.0	のり面小崩壊
3	国土交通省 紀南河川国道	一般国道42号	和歌山県東牟婁郡那智勝浦町	3.5L/min	1.0m	3.5	のり面小崩壊
4	国土交通省 和歌山河川国道	紀勢自動車道	和歌山県西牟婁郡白浜町	しみ出し	-	-	洗い出し
5	国土交通省 和歌山河川国道	24号橋本道路	和歌山県紀の川市	湧水なし	-	-	変状なし
6	NEXCO西日本 福知山高速道路	舞鶴若狹自動車道	福井県大飯郡高浜町	①2.2L/min	1.0m	2.2	のり面小崩壊
				②2.8L/min	0.4m	6.5	のり面小崩壊
7	NEXCO西日本 和歌山高速道路	飯和自動車道	和歌山県日高郡みなべ町	①0.15L/min	2.0m	0.04	変状なし
				②1.05L/min	3.5m	0.30	のり面若干洗い出し 崩壊はなし



2-2)簡易調査における点検項目

②植生

盛土に宙水があり地下水が浅い場合、他の乾燥地エリアと植生が異なる場合がある。地下水が浅い場合は、コケやシダ類のような親水性植物が繁茂する場合がある他、秋や冬でも草が緑色を呈す場合がある。

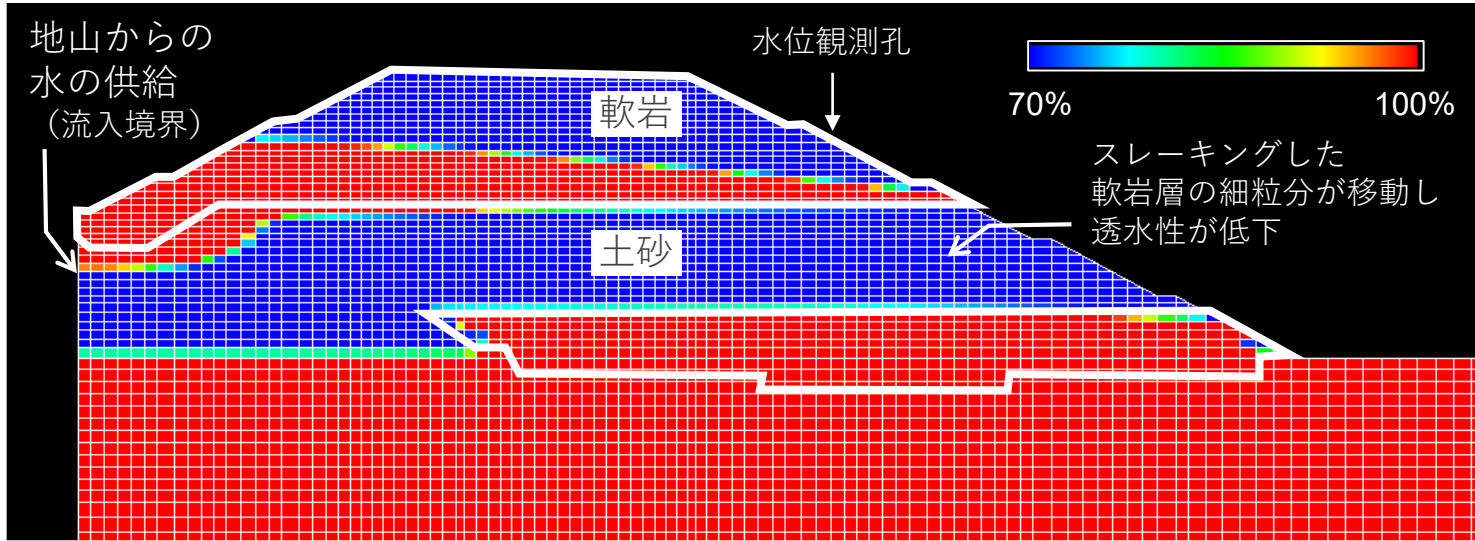
点検時には、上記のような植生に注視することも必要である。

**植生によって地下水が
滲み出る領域を判定可能？**

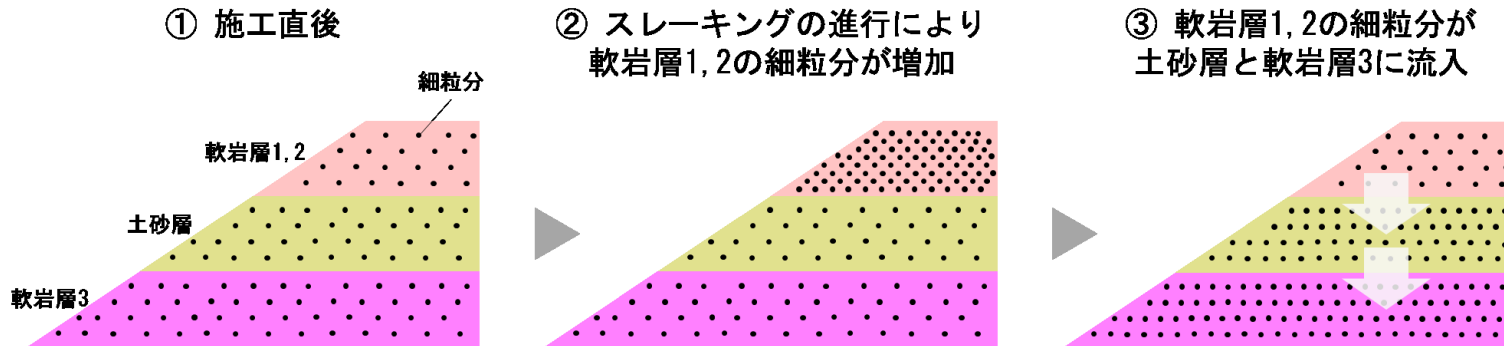


1-4) 宙水発生 の再現解析

3-1) 宙水を有する盛土の安定性評価のための詳細解析



飽和度コンター図 (白線内が透水層)



スレーキングによる透水性低下の概念図

- 山側とは反対の水位観測孔位置で地下水位が1.8m程度上昇
→宙水の発生

- 透水層と難透水層の透水係数の2オーダー程度の差で宙水発生が生じることを定性的に確認

- スレーキングした軟岩層の細粒分が下層に目詰まりし透水性が低下した可能性 (e.g., 澤野ら, 2020)**

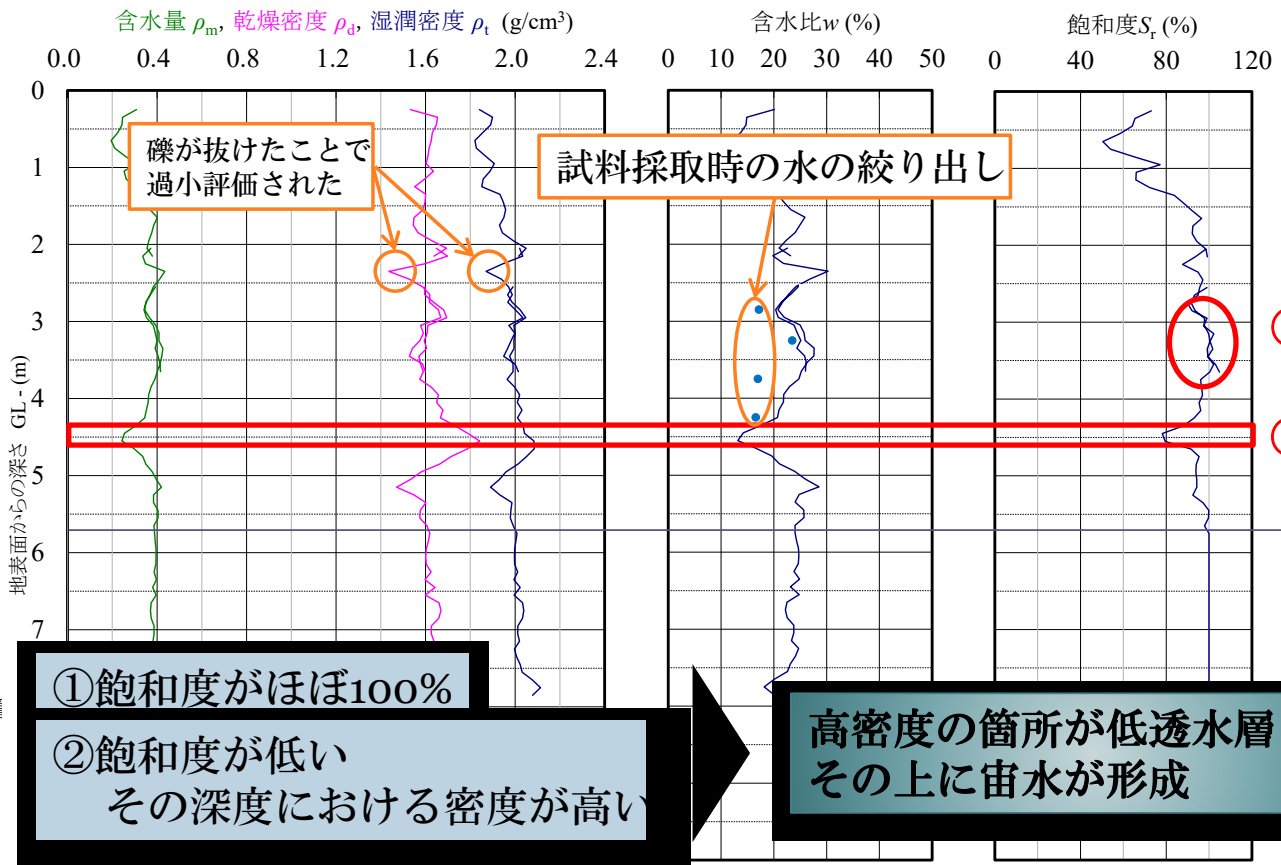
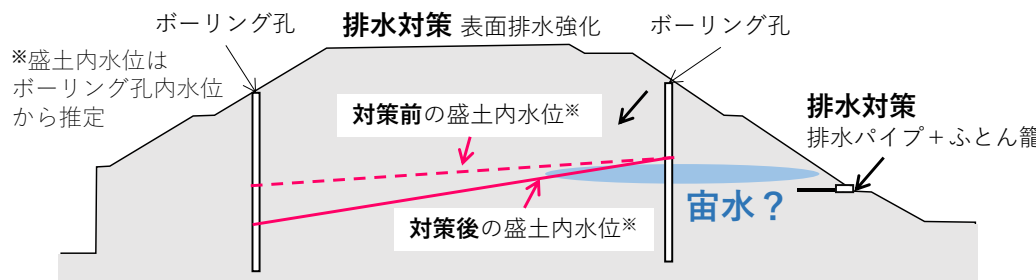
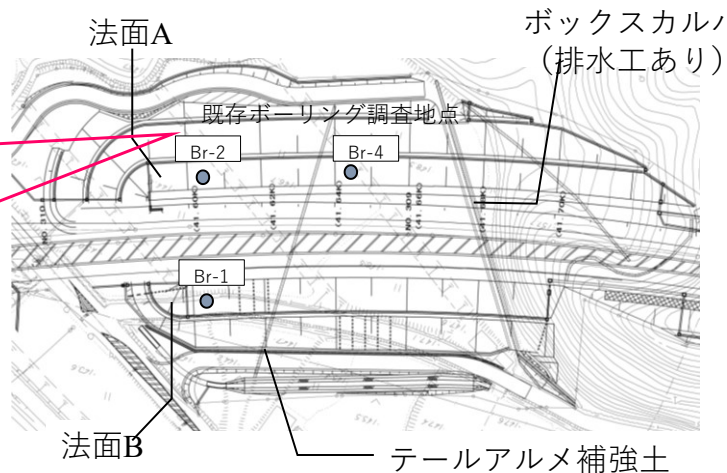
澤野幸輝, 長尾和之, 加村晃良, 風間基樹: 供用後に変状が発生した脆弱岩ずりを用いた盛土の物性変化と変状原因, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.76, No.3, pp.306-319, 2020.

参考：締固め度のばらつきによる宙水（スライド2の事例）

道路盛土
(国道, 有料道路)

法面A:
対策後も絶え間なく湧水があり, 表層すべりを繰り返している.

法面B:
対策後は変状なし



均質な材料による盛土（同一材料による盛土造成, スレーキングなど性状変化なし）

☛ 締固め度のばらつきによる遮水層の形成（工事用道路として利用？）

1-3) 宙水の要因となる盛土材の特性把握のための室内試験

対象試料

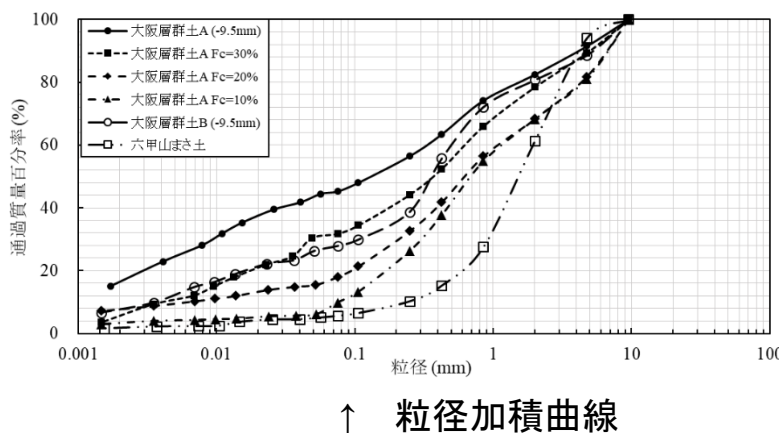
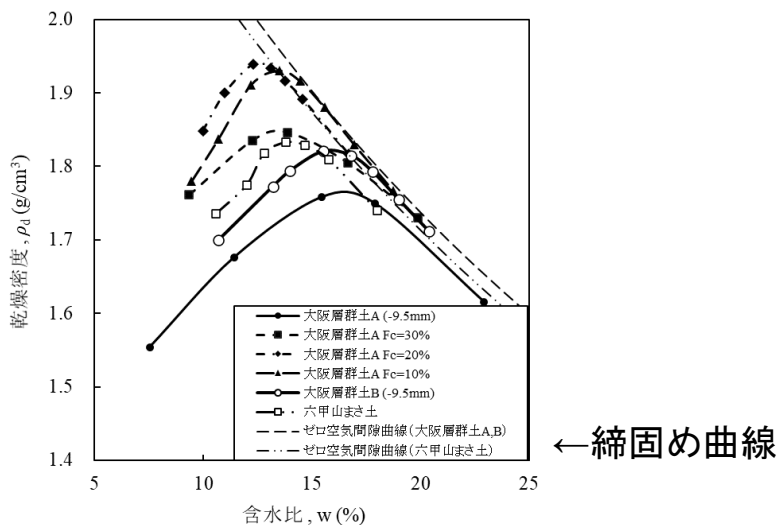
① 宙水の発生が確認された盛土から採取した大阪層群土

② 盛土材料として多用されている六甲山まさ土

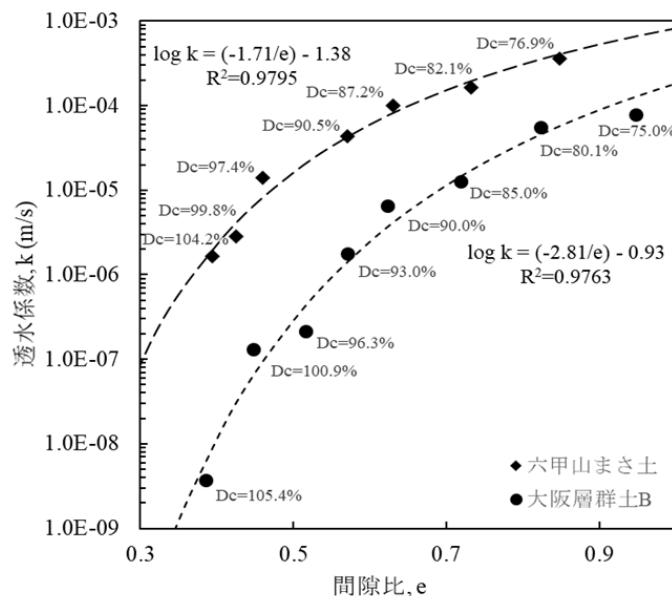
→ 9.5mmふるい通過分を室内試験に使用。



水洗いとふるい分けにより、細粒分含有率 $F_c=10,20,30\%$ の試料を作製した。



◆ 間隙比 e と透水係数 k の関係



【結果】

間隙比の増大に伴う透水係数の上昇は逡減する傾向 (非線形挙動)

【 e と $\log k$ の関係式】

$$\log k = \frac{a}{e} + b \quad (a, b: \text{フィッティングパラメータ})$$

・ 六甲山まさ土: $\log k = \frac{-1.71}{e} - 1.38$ ($R^2=0.9795$)

・ 大阪層群土: $\log k = \frac{-2.81}{e} - 0.93$ ($R^2=0.9763$)

【透水係数に影響を及ぼす因子】 ⇒ 水の相の大きさ + 水の相の屈曲性

間隙比の増大 ⇒

水の相の拡大に影響(大)
屈曲性の減少には影響(小)

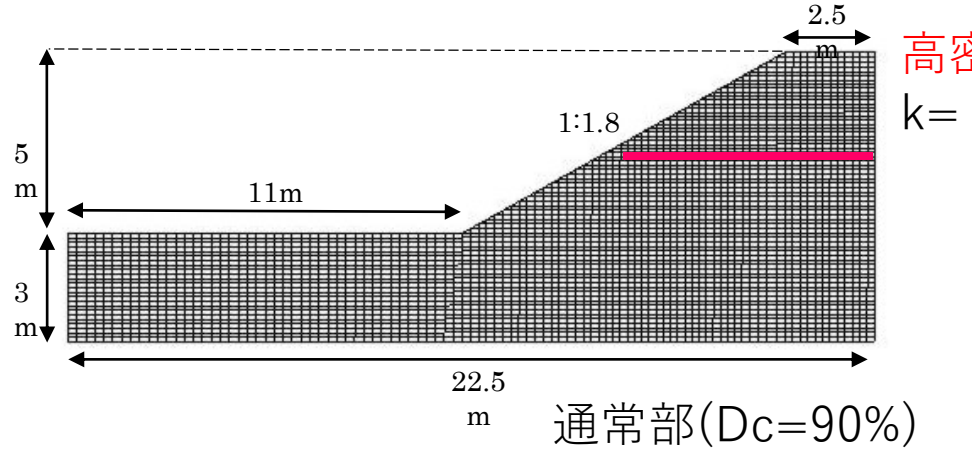
⇒

e の増大による
 k の上昇は逡減

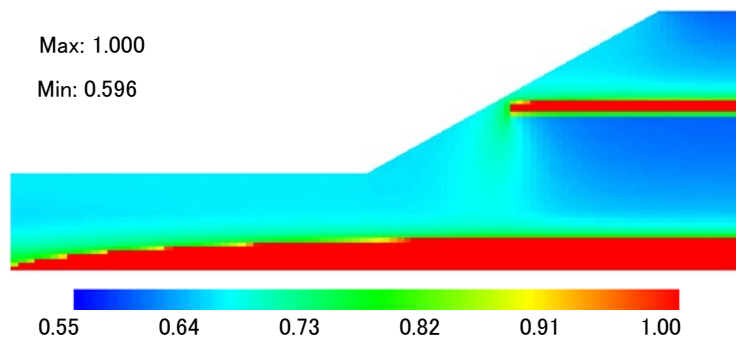
3-1) 宙水を有する盛土の安定性評価のための詳細解析

動的解析および不飽和土の解析が可能な詳細解析法*で、宙水を有する盛土の安定性を評価。

*LIQCA-SF13 (一般団法人LIQCA液状化地盤研究所, 2013)



● 常時 (宙水の発生)

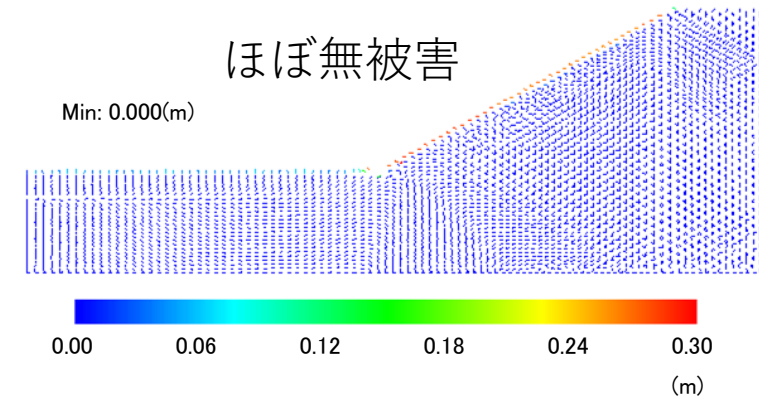


高密度層 (Dc=100%)
 $k = 2.32 \times 10^{-8}$ (m/s)

通常部 (Dc=90%)
 $k = 1.34 \times 10^{-5}$ (m/s)

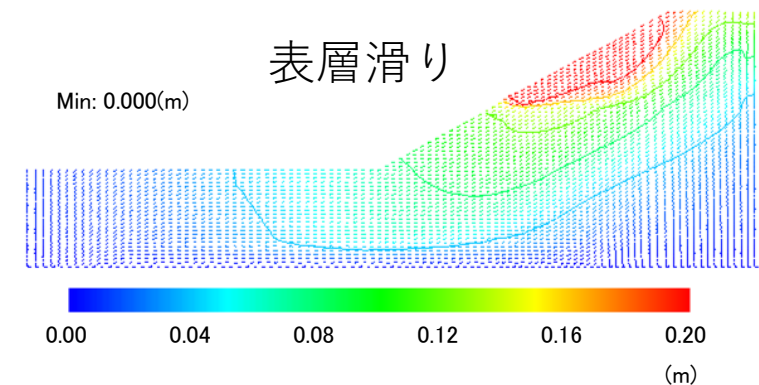
● 降雨時 (5 mm/h × 24 h = 120 mm)

ほぼ無被害



● 地震時 (1Hz, 400gal, 30秒サイン波)

表層滑り



3-2)円弧すべり解析による安定性評価法の確立

円弧滑り計算による安全率を介して、宙水の程度（水分量，分布）から盛土の変状を予測し，盛土の安定性評価法を確立する。

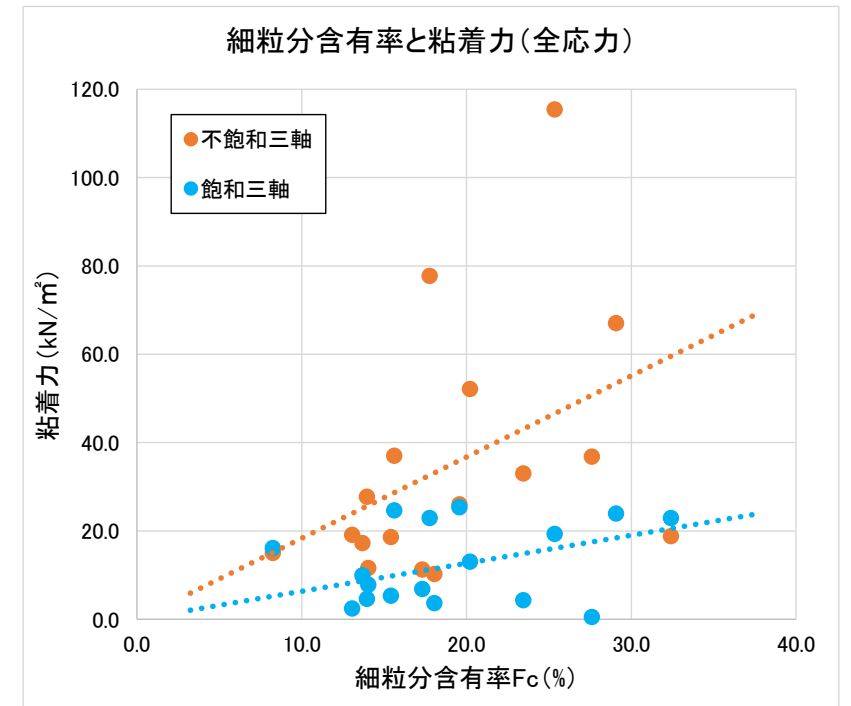
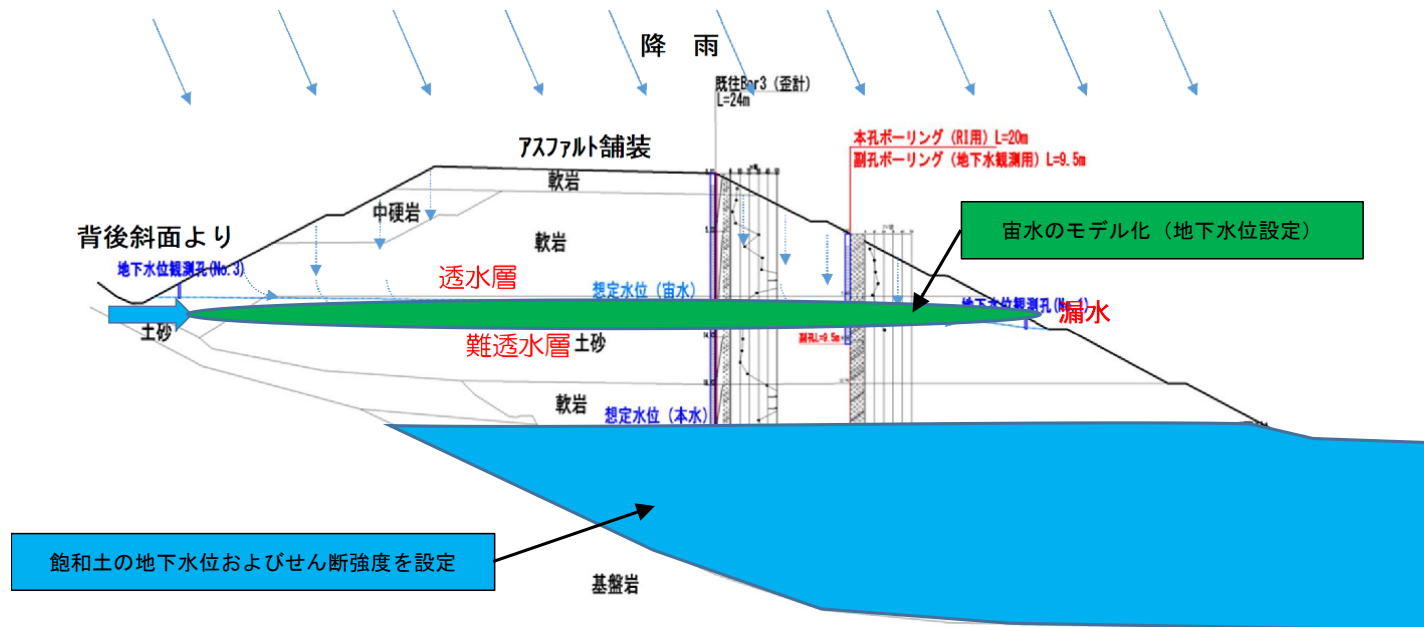
解析手法：円弧すべり計算

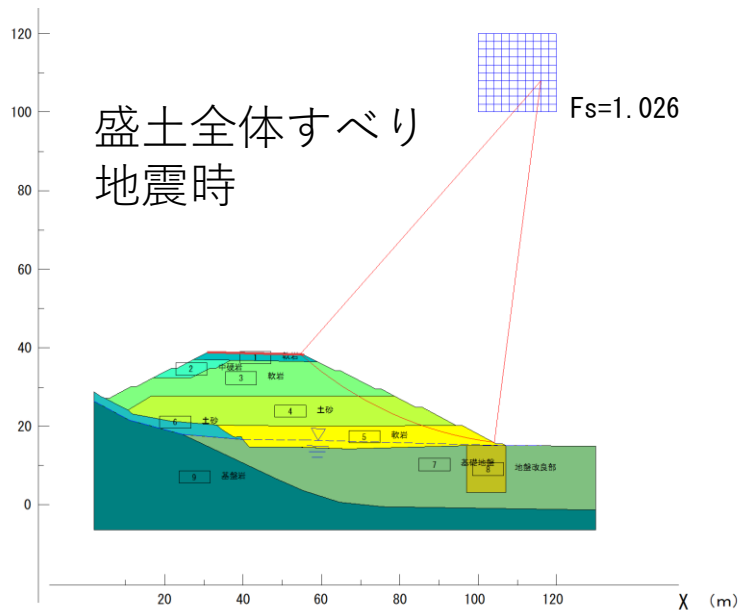
解析条件：地盤モデル 芝山地区

地下水条件 調査結果および詳細解析結果と同様に設定

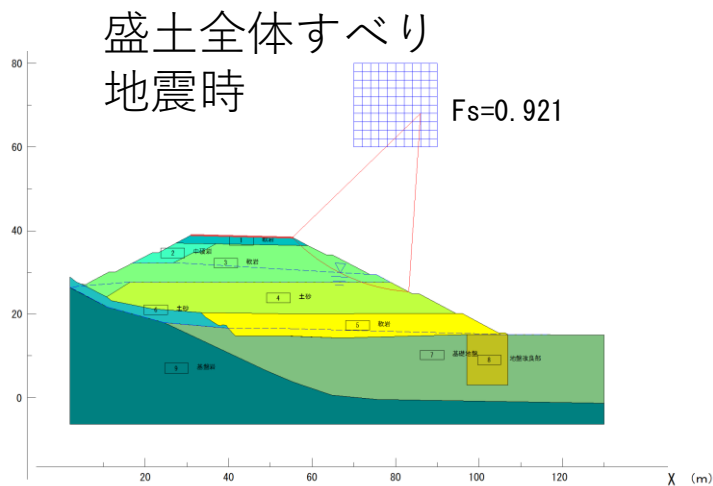
強度特性 飽和三軸圧縮試験強度、不飽和三軸圧縮試験強度の試験結果を参考

⇒宙水の発生による盛土の飽和度の変化から、盛土安定性への影響を予測する

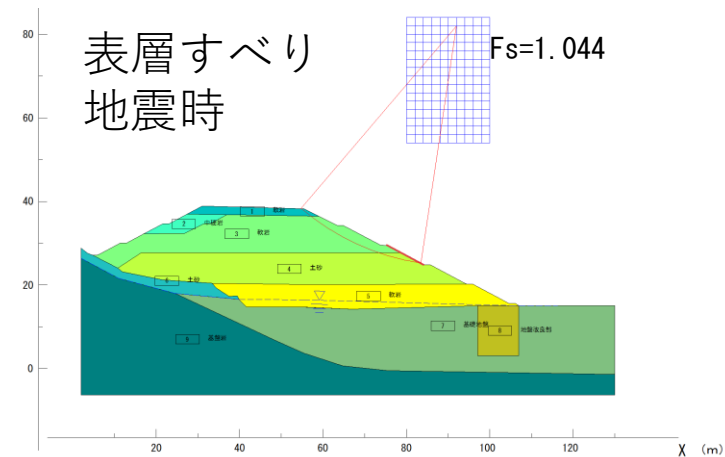




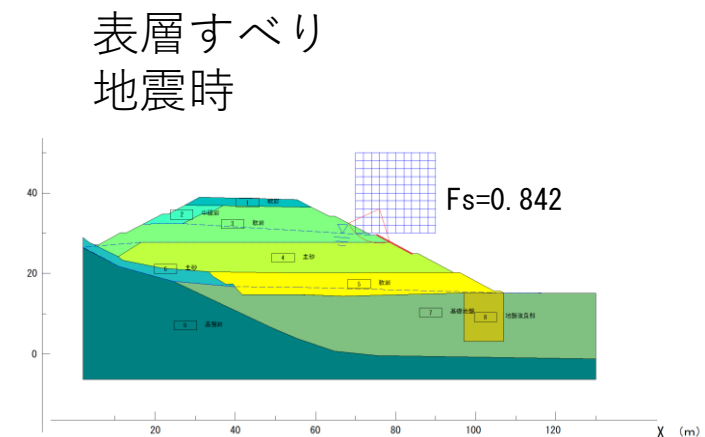
宙水なし



宙水あり



宙水なし



宙水あり

● 盛土全体のすべり面

宙水により安全率 F_s が11%の低下
(1.026 → 0.921)

● 小段法面付近の小さいすべり面

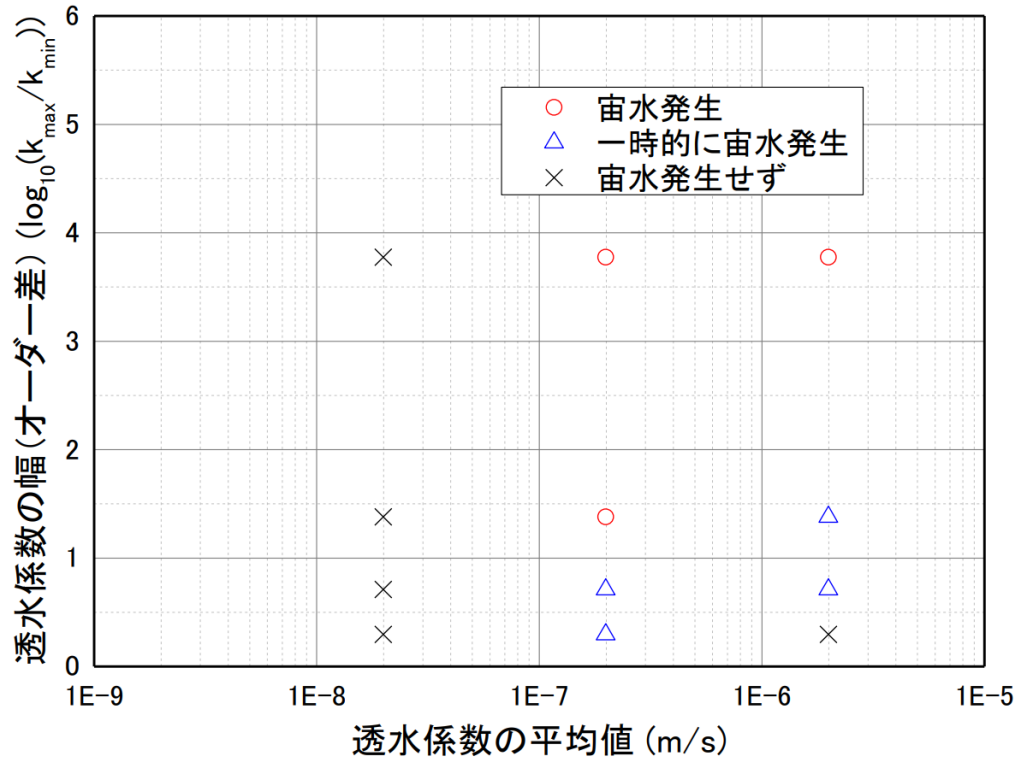
宙水により安全率 F_s が19%の低下
(1.044 → 0.842)

・ 宙水がない場合
法面全体を薄くすべるすべり面が最小

・ 宙水がある場合
宙水の発生しているのり面の小規模な
すべり面が最小の安全率となる。

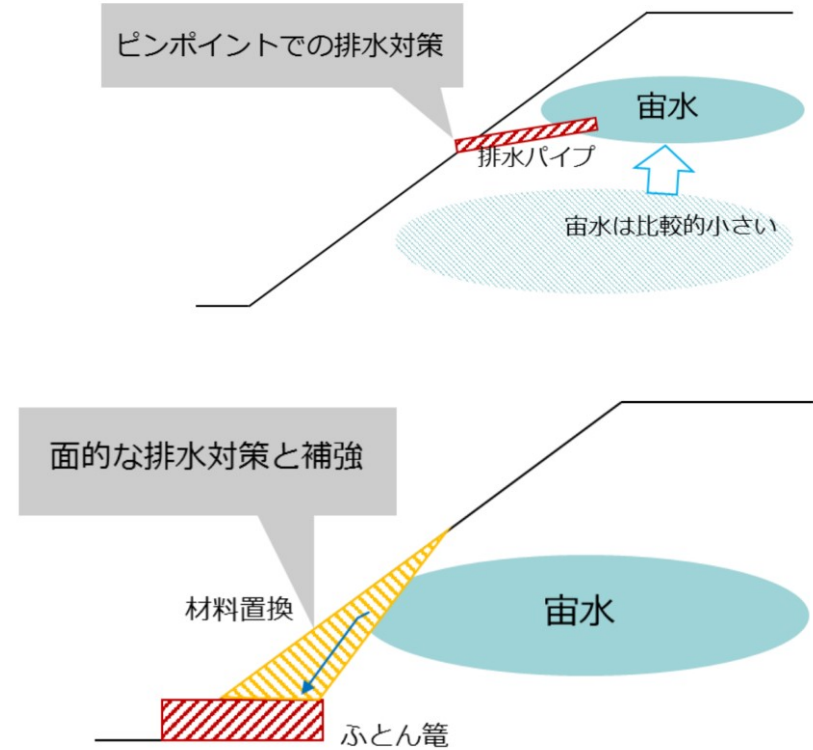
4-1)新設盛土の適切な施工法の提案

4-2)既設盛土における宙水排水手法および強化法の提案



(新設盛土) 透水性に着目した締固め管理

均質かつ透水性の低い盛土の造成



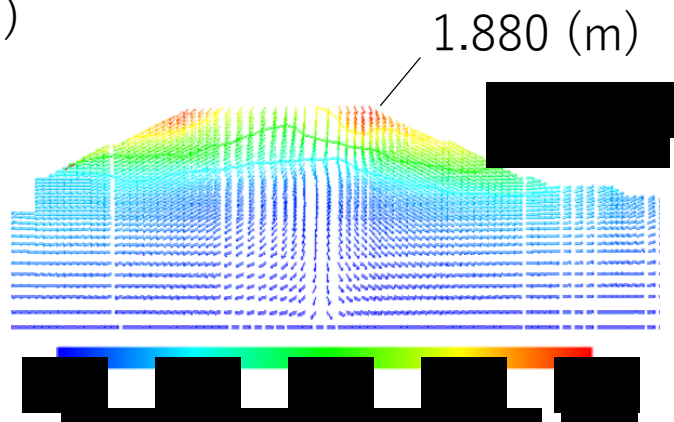
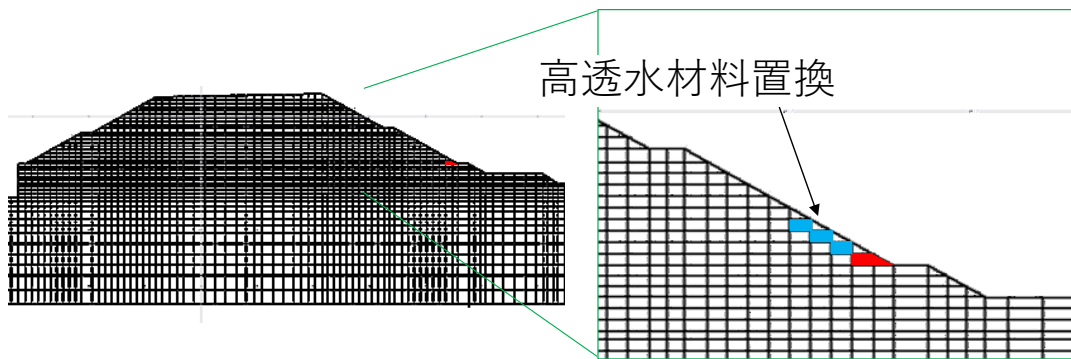
(既設盛土) 排水工の設置

宙水位置を特定し, 位置に応じた排水工

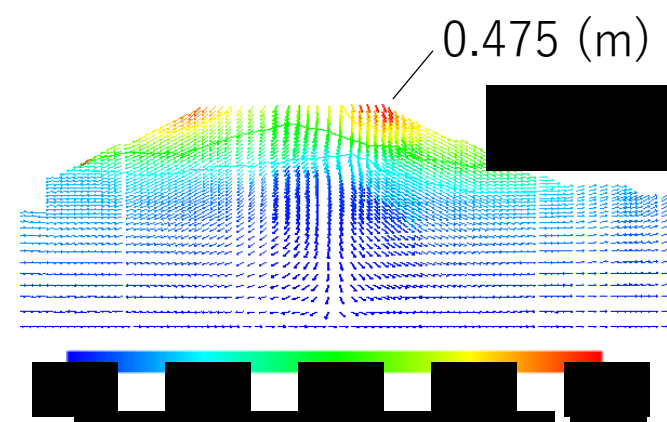
● 柴地区盛土

ふとん籠(h:0.5m, d:1.75m)

高透水材料置換



ふとん籠なし



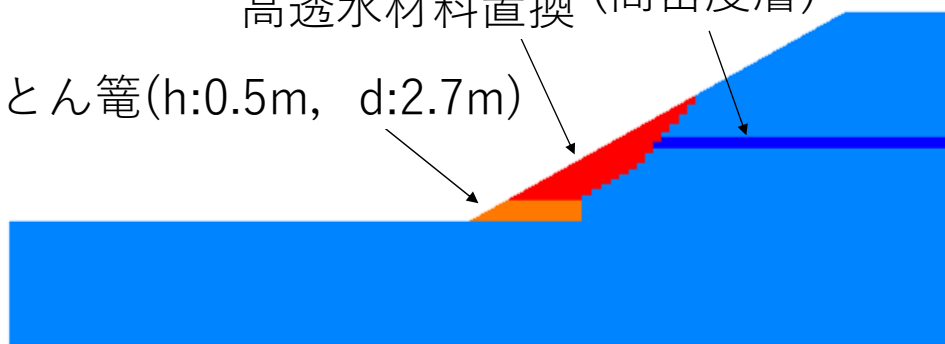
ふとん籠あり

● 模型片盛土

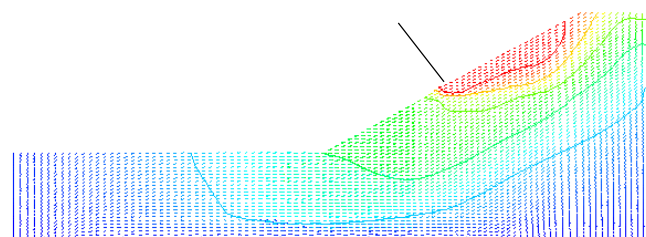
低透水層
(高密度層)

高透水材料置換

ふとん籠(h:0.5m, d:2.7m)

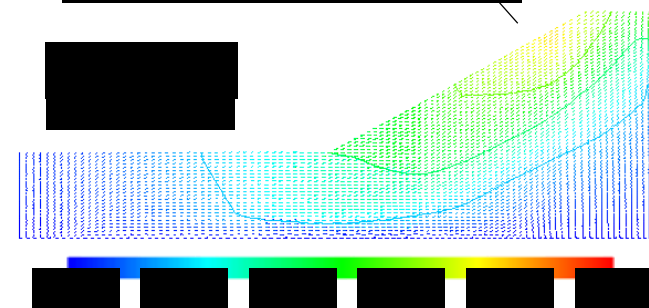


0.229 (m)



ふとん籠なし

0.156 (m)



ふとん籠あり

研究総括

(1) 発生メカニズム

盛土内の低透水層が宙水の発生要因

- ✓ 締固め度のばらつき（盛土材が均質な場合）
- ✓ スレーキングによる細粒分の移動（細粒土の目詰まり）

(2) 調査方法

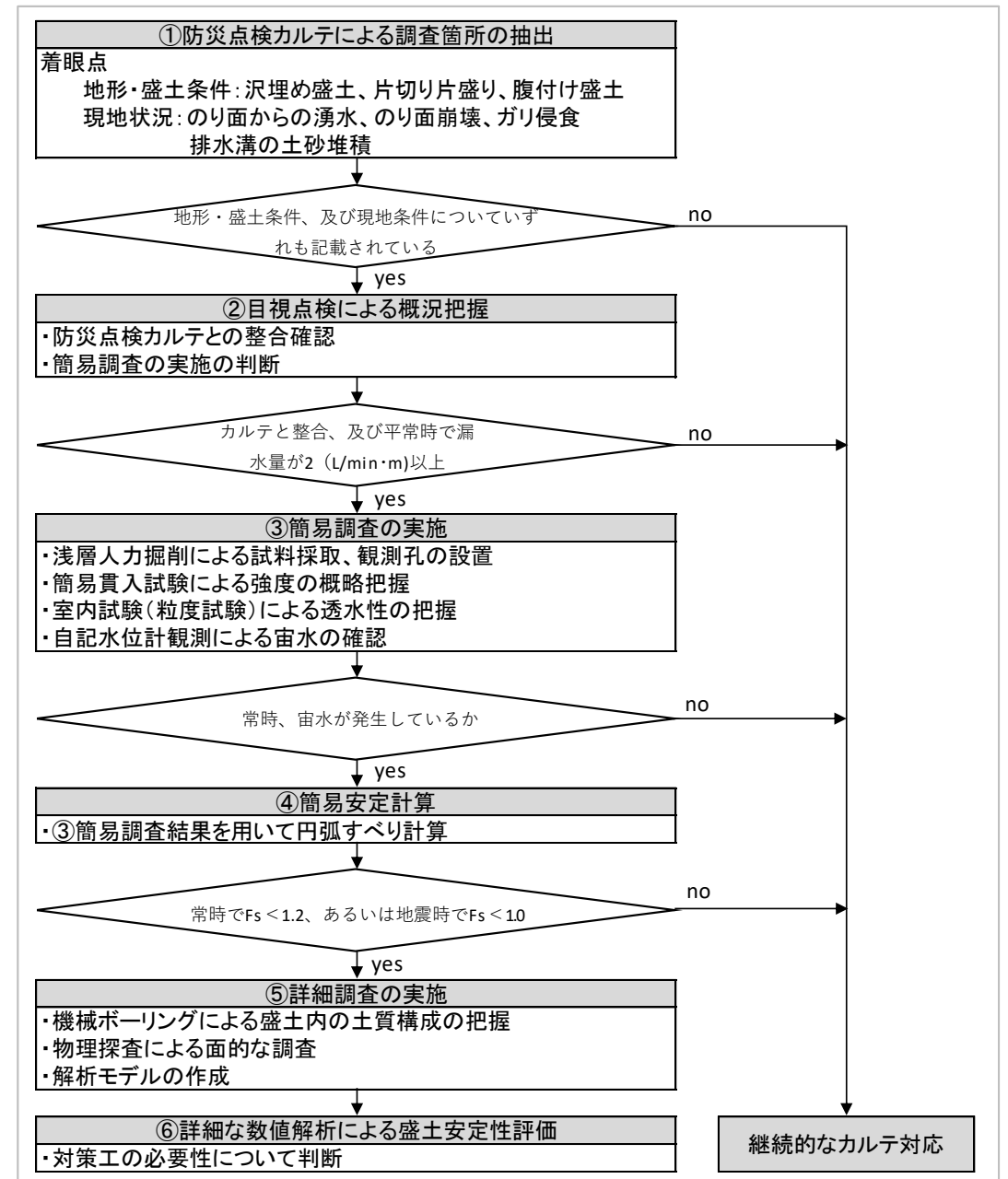
目視点検～簡易調査～詳細調査の段階的手順を提示（右図）

(3) 安定性評価法

宙水による変状は主に地震時の表層滑りに限られる。
円弧すべり計算における宙水の考慮手法を提示。

(4) 対策工

- 新設：均質（材料、透水性）な盛土の造成
- 既設：ボーリング等の点的排水（宙水位置を特定）
ふとん籠等の面的排水（宙水位置を未特定）



宙水調査の流れ（安定性評価法および対策工を含む）

①防災点検カルテによる調査箇所の抽出

● 盛土箇所の地形区分

谷埋め盛土，腹付け盛土

排水対策が十分でない場合，盛土が不均質な場合

● 小段からの漏水

宙水がある場合は，盛土の小段から漏水あり

盛土の点検では小段や小段の排水溝に注視

● 盛土表面の状態

漏水によりのり面が洗われて礫が多く露出

点検時に漏水がなくても降雨後に漏水している場合あり

● 排水構造物の健全性

排水構造物がない場合や構造物が健全でない場合

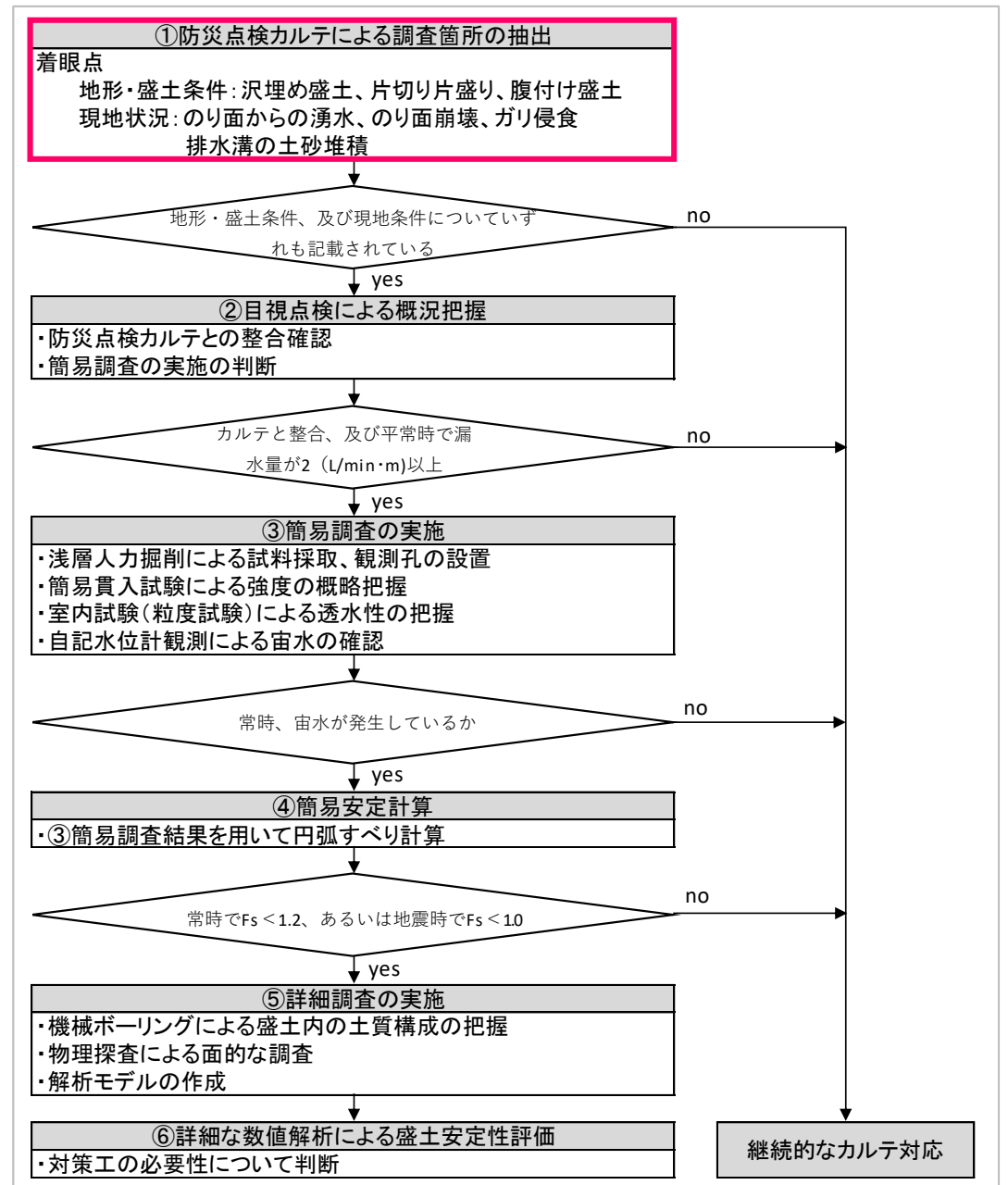
道路面の表流水の処理方法，背後地盤と盛土境界の排水

施設の有無，健全性

● 植生

地下水が浅い場合，コケやシダ類のような親水性植物が

繁茂する他，秋や冬でも草が緑色を呈する

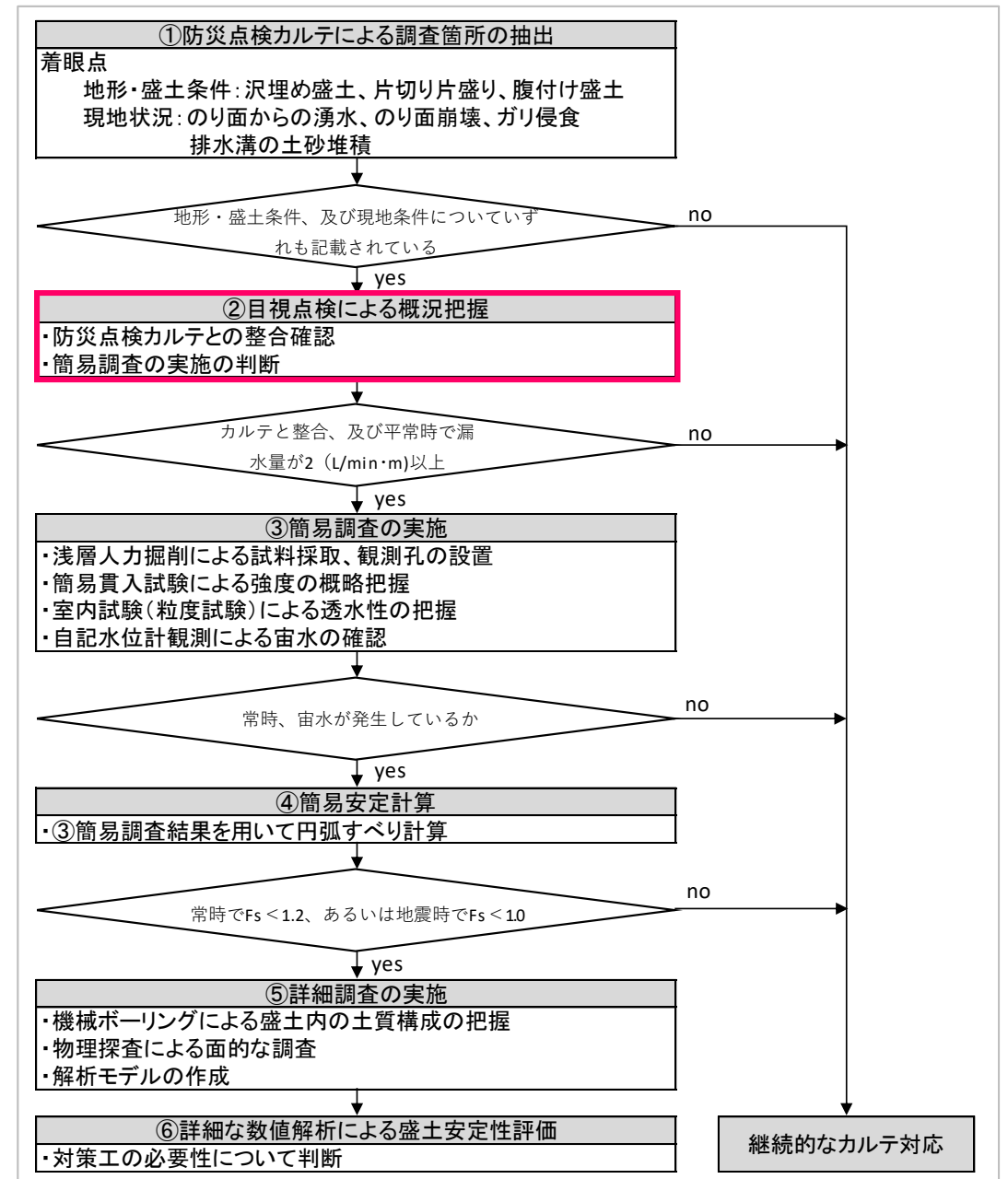


宙水調査の流れ（安定性評価法および対策工を含む）

①目視点検による概況把握

カルテの確認で抽出した盛土において、とくに宙水に関する現地確認を行い、簡易調査や詳細調査、安定検討等の必要性について判断を行う。

- 現地では宙水の発生位置や漏水量、それに伴う変状等について目視で確認を行う。宙水が多い場合は、盛土表面の泥濘化や土砂の吸出しによって、表層崩壊が発生する場合がある。とくに、降雨後だけでなく平常時から漏水している箇所は注意が必要である。
- 平時から漏水が発生しており、何らかの変状が発生している箇所は、別途調査が必要である。
- なお、本研究では宙水が発生している盛土について漏水量を測定した。その結果、無降雨時においても2L/min（漏水している区間は1m単位）以上漏水している箇所で、のり面の小崩壊等が発生していることが確認された



宙水調査の流れ（安定性評価法および対策工を含む）

③簡易調査

● 簡易水位観測孔の設置，水位観測

漏水が発生している箇所及びしていない箇所で実施。
漏水の高さより0.5m～1.0m上方～漏水高さ-0.5m程度

● 簡易貫入試験

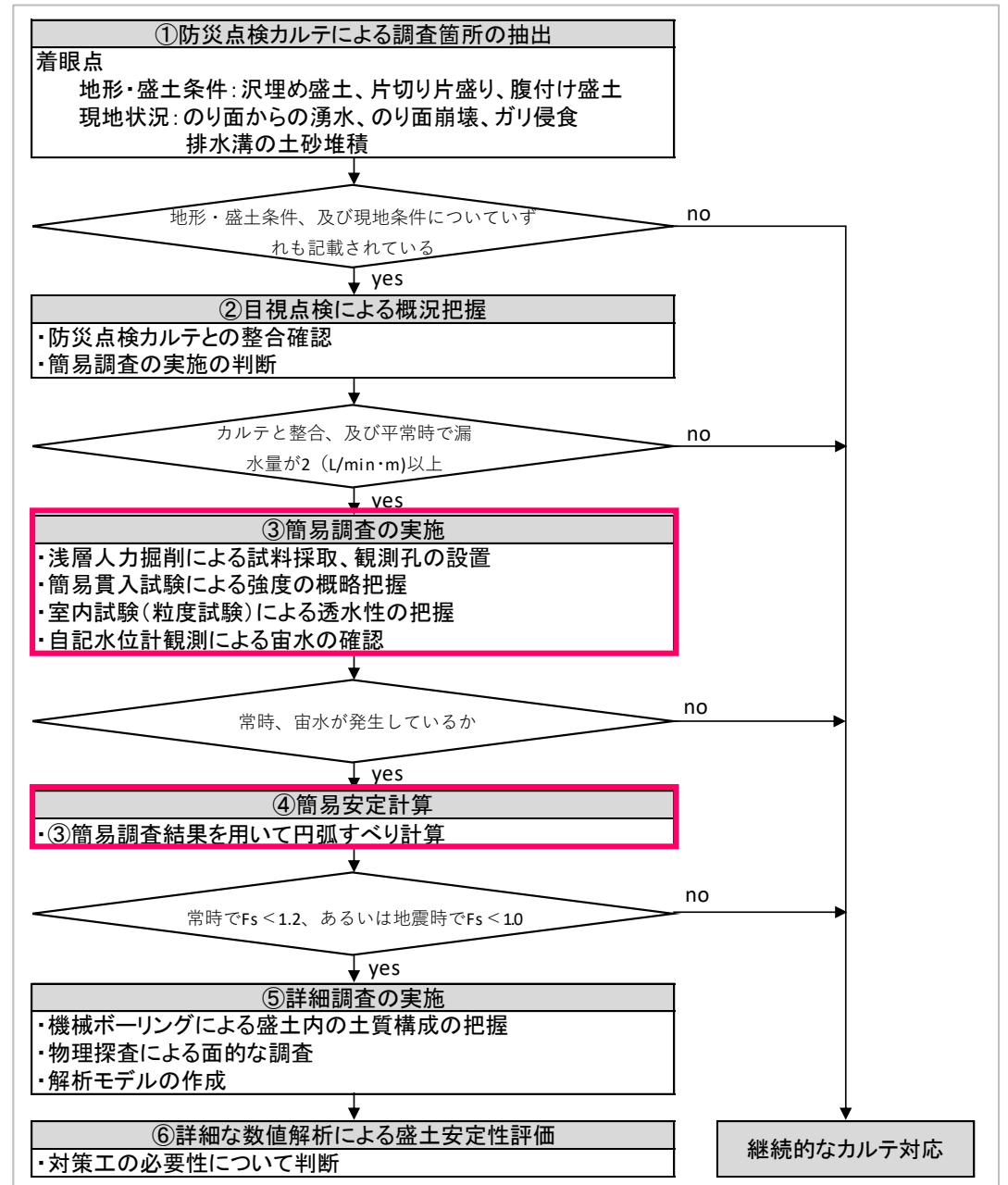
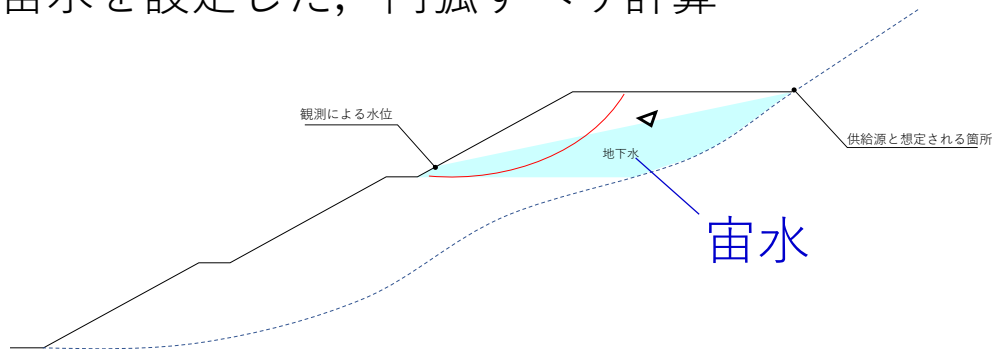
Nd値を把握し，各種の地盤定数値（湿潤密度，粘着力，内部摩擦角）を推定し，簡易すべり計算の資料とする。

● 試料採取，室内土質試験

盛土材を少量採取し，土質の判別，室内土質試験（粒度，含水，土粒子の密度等）。粒度から透水係数の推定

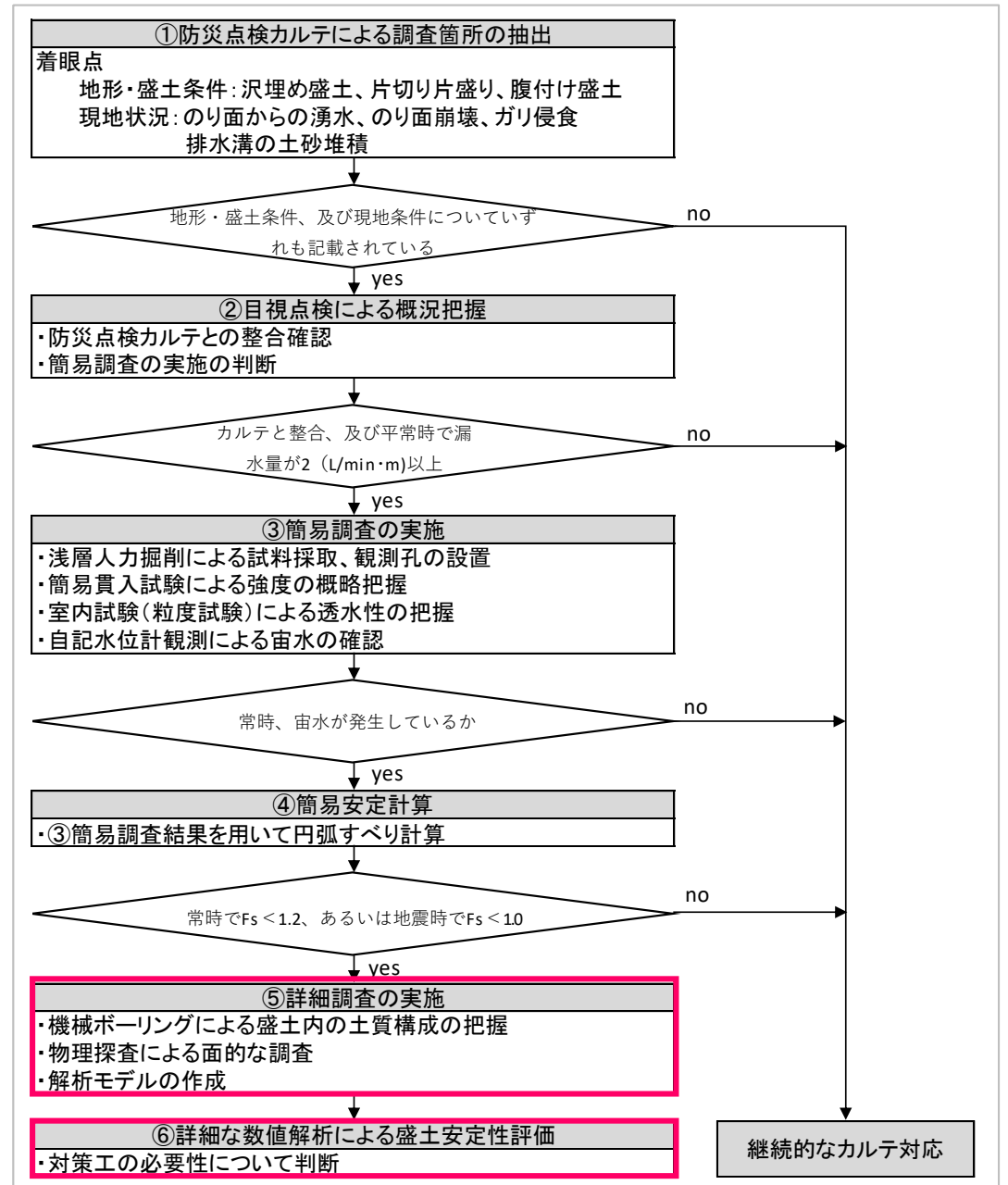
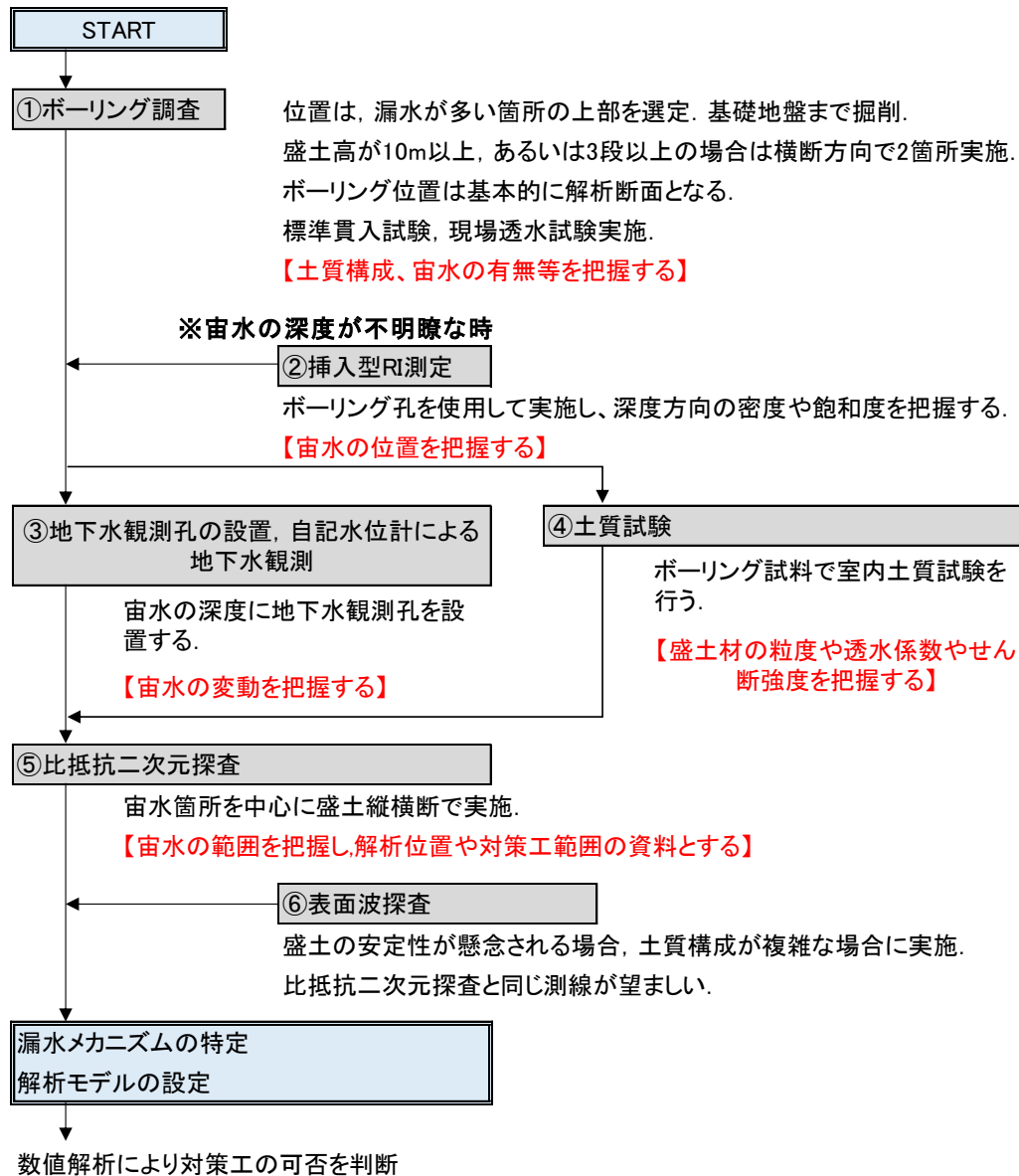
④簡易安定計算

- 宙水を設定した，円弧すべり計算



宙水調査の流れ（安定性評価法および対策工を含む）

⑤ 詳細調査～⑥ 詳細解析による安定性評価



宙水調査の流れ（安定性評価法および対策工を含む）