

歴史的地盤遺跡の変状解析 ～遺跡保存への地盤工学の貢献～

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

三村 衛

地盤遺跡に対する考え方

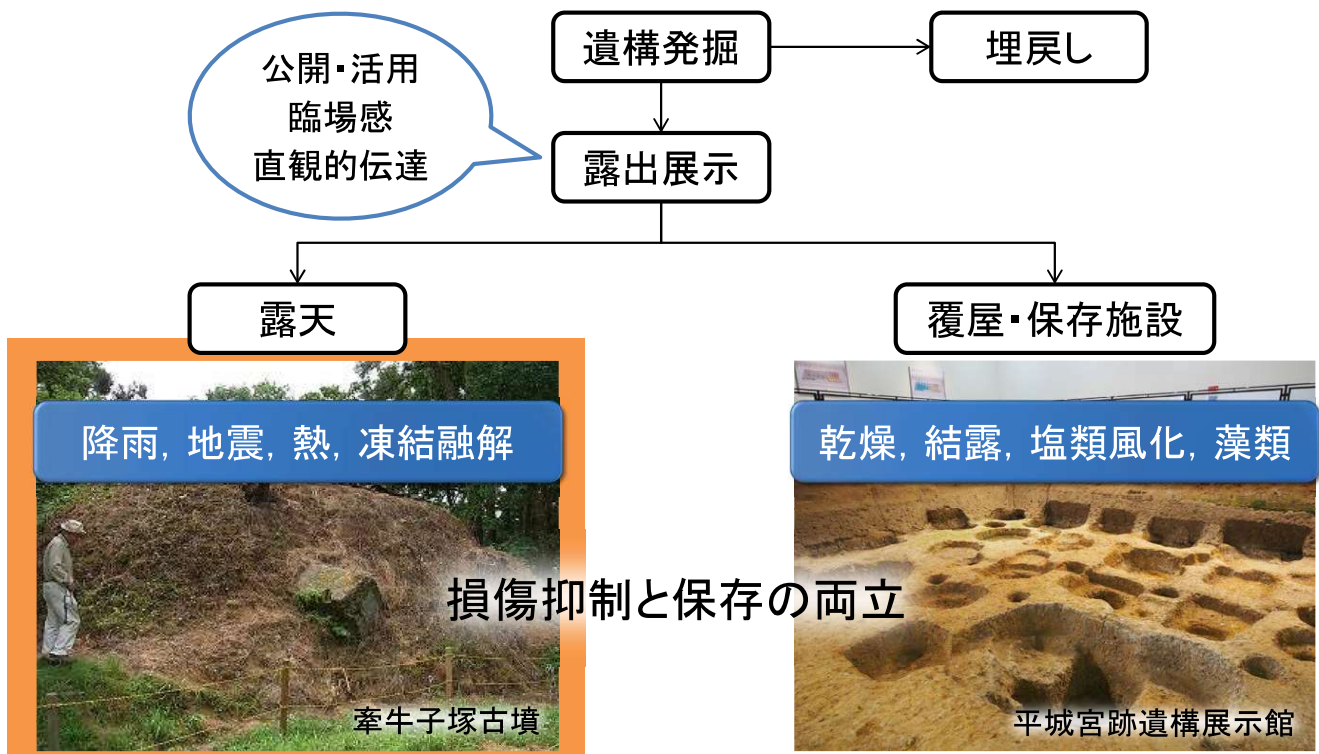
- 従来のイメージ
 - 考古学的価値に特化, 一部研究者や好事家のためのもの
 - 建設工事の障害
 - 発掘コストの負担
- この10年における意識変化
 - 国や地方固有の財産
 - 保全意識の高まり
 - 復元, 整備することにより, 地域の文化的核として活用する



既往の考古学的な調査に工学的なアプローチを加える必要性

- 無対策で保全できるのか → 使われている土の物性と安定状態の把握
- 対策が必要と判断された場合 → 期待される効果と副作用の評価
- 復元や付加的な構造物を構築 → 真正性の確保と新たなトラブルの可能性

地盤遺跡修復、保全の流れ



損傷機構の解明・科学的根拠に基づく保存方法

地盤遺跡の修復・保存に関わる課題



本日の話題

1. 斜面に構築された敷石の基礎となる粘性土による人工盛土の変状と破壊の要因分析
～奈良県明日香村の酒船石遺跡亀形石造物周囲の敷石
～不飽和有限要素解析による浸透・変形の連成解析
2. 雨水浸透を墳丘を模した盛土構造物で制御するための手法提案と実施事例
～大分県日田市のガランドヤ古墳石室の保護
～想定される墳丘を模した盛土による保護施設の構築
～細粗互層による遮水構造の活用(キャピラリーバリア)

話題1.

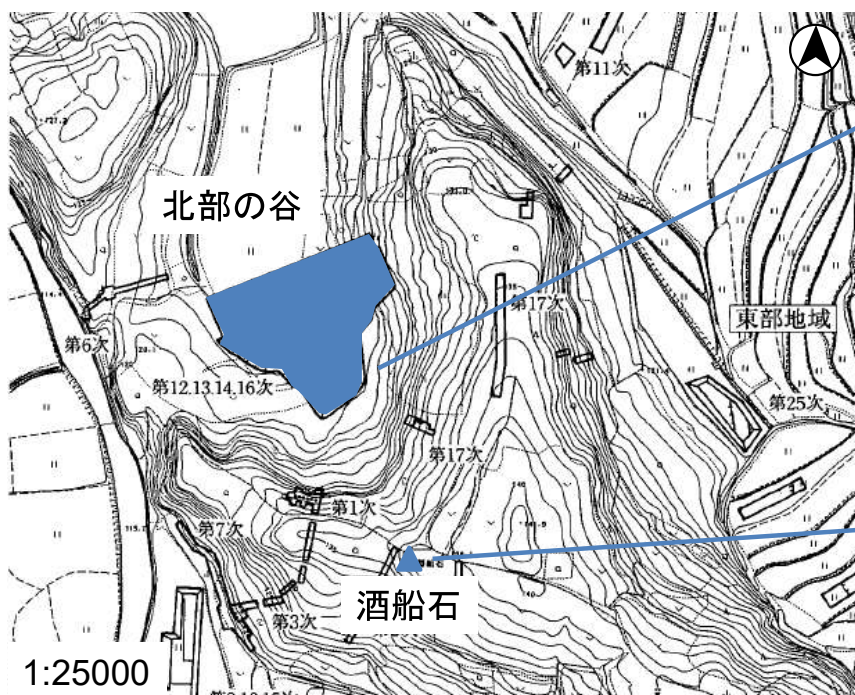
斜面に構築された敷石の基礎となる粘性土による人工盛土の変状と破壊の要因分析

奈良県明日香村・酒船石遺跡亀形石造物周囲敷石斜面の変状

不飽和有限要素解析による浸透・変形の連成解析

酒船石遺跡(奈良県明日香村)

飛鳥時代特有の石造物群, 湧水施設, 石垣



相原(2004)



湧水を受ける亀形石造物



丘陵で発見された酒船石

降雨で崩壊した北部の谷

1999年に発掘されてから露出展示



崩壊(40~70cm)
台風21号(2017年10月)

石段

亀形石造物

降雨時の浸透一変形挙動を明らかにし, 適切な保全方法を提案する

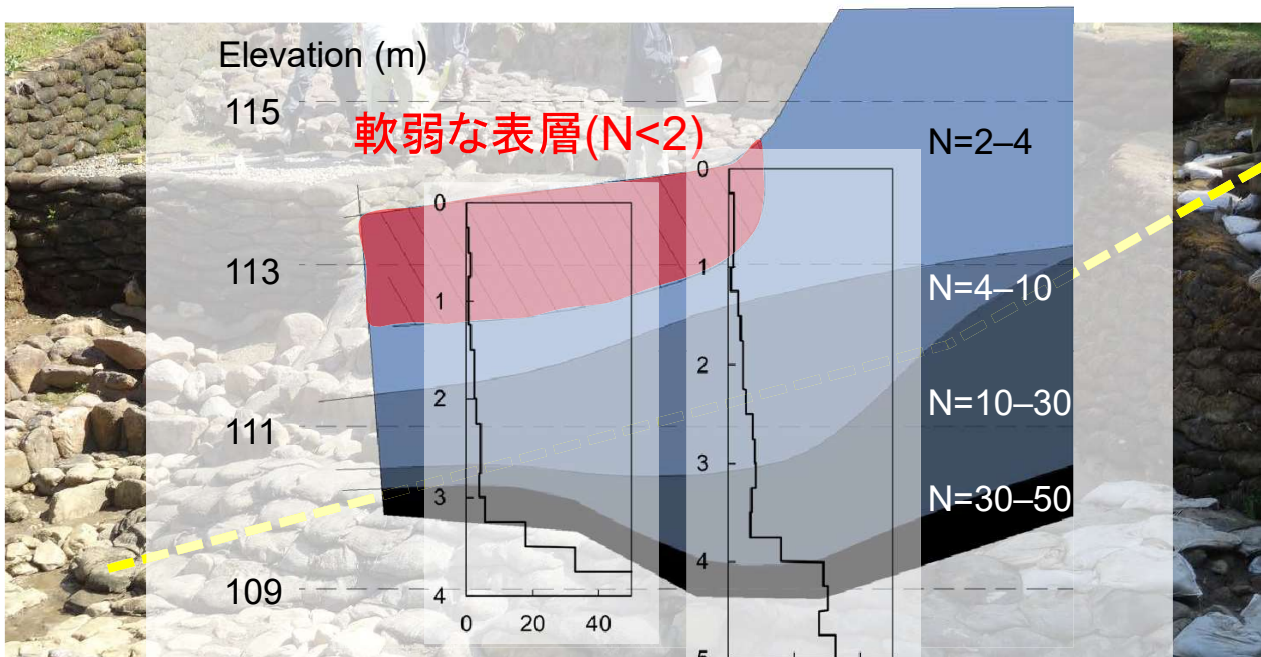


- 石材を背面に粘性土を敷き詰めて設置するという形で石敷を構築している。
- 斜面の一部が大きく変状し、下部に向かって流動してしまっている。
- 図はすべり土塊と滑っていない領域の境界部分を拡大したものの。



遺構の地盤構造と土質

崩壊斜面でサウンディング試験 (SPT・SWS)

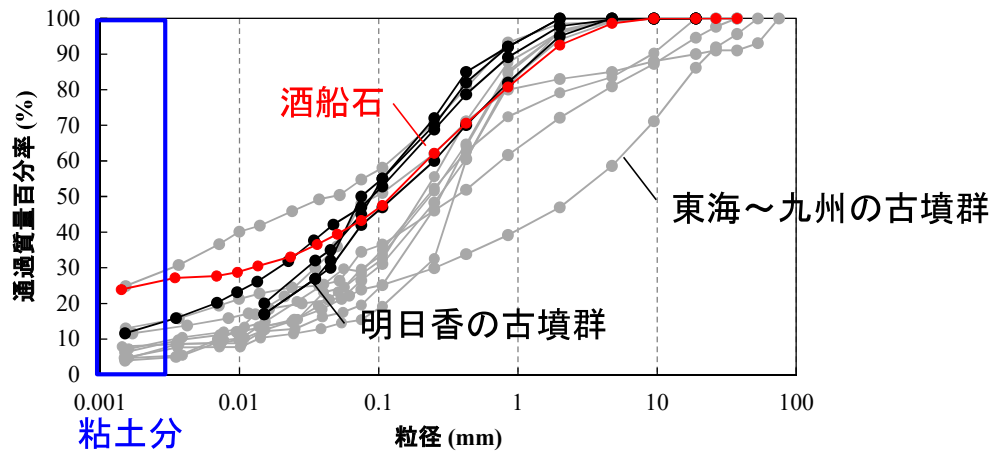


厚さ2mの軟弱な表層内ですべりが生じている

表層土の物理的性質

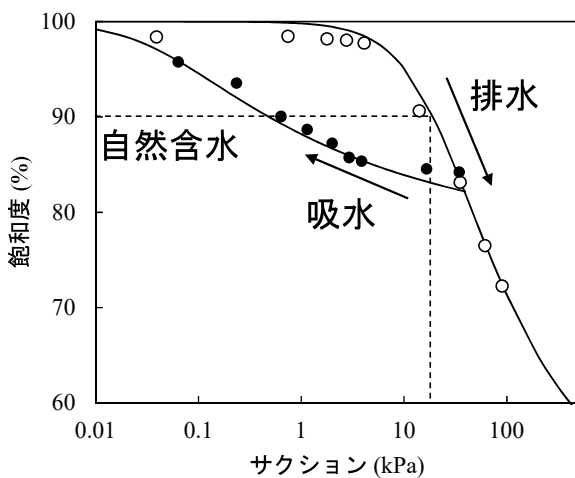


- 風化の進んだまさ土
- 細粒分含有率:43%
- 粘土が多い
- $w_L=43\%$, $I_p=14$
- $w_n=31\%$ ($S_r=90\%$)



表層土の浸透特性

□ 保水性



- 水頭法・加圧法を併用
- Van Genuchtenモデルで補完
- 自然含水 ($S_r=90\%$) は20kPa相当
- サクシオン20kPa以下を検討範囲とする

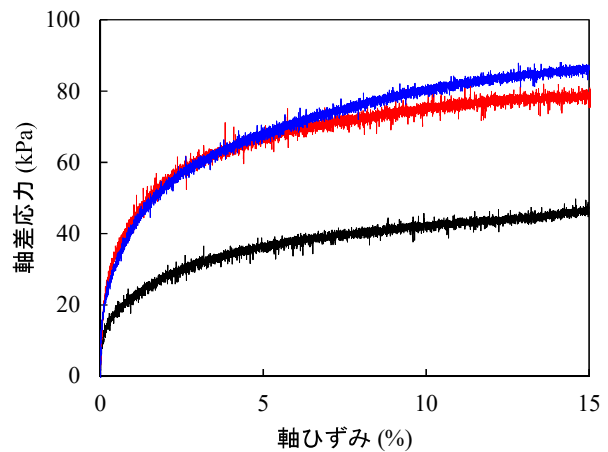
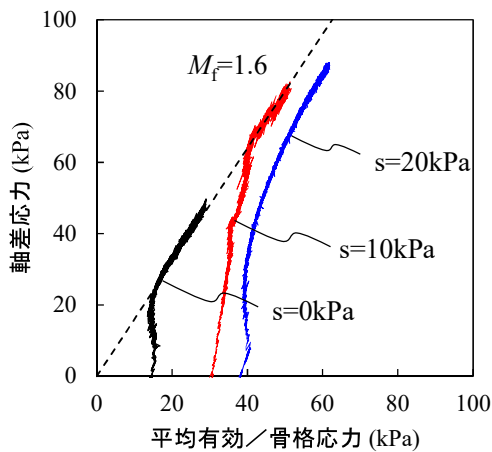
□ 透水性

- 圧密試験から間接的に評価
- 飽和透水係数: $k_s=3.4 \times 10^{-4}$ cm/s

表層土の力学特性

- 不飽和三軸圧縮試験
- 拘束圧: 20kPa (表層想定)
- 排気・非排水
- 載荷速度: 0.1%/min

サクション (kPa)	セル圧 (kPa)	間隙水圧 (kPa)	間隙空気 (kPa)
0	220	200	—
10	220	190	200
20	220	180	200



弾塑性モデルを用いた浸透一変形解析

飽和砂の繰返し弾塑性構成モデル (Oka et al., 1999)

- 微小ひずみ理論
- 弾塑性理論に基づくひずみ増分の加法性
- 非関連流動則
- 過圧密境界面
- 非線形移動硬化則

不飽和砂に拡張した構成モデル (加藤ら, 2009) を実装した, 有限要素解析プログラム LIQCA2018 を用いて, 降雨による変形の過程を解析する

- Oka et al: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, 49(5), 661-680, 1999.
- 加藤ら: 不飽和浸透一変形解析手法と河川堤防への適用, *土木学会論文集C*, 65(1), 226-240, 2009.

不飽和砂への拡張

サクシジョンの2つの効果を考慮したモデル化

□ 粒子間力への影響

骨格応力を応力変数に採用

$$\text{骨格応力 } \sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - p^F \delta_{ij}$$

$$\text{平均間隙圧 } p^F = s_r p^f + (1 - s_r) p^a$$

s_r 飽和度 p^f 間隙水圧 p^a 間隙空気圧

□ 降伏応力と、塑性変形に対する土粒子骨格の剛性への影響

サクシジョンによる骨格構造変化を構成式に導入

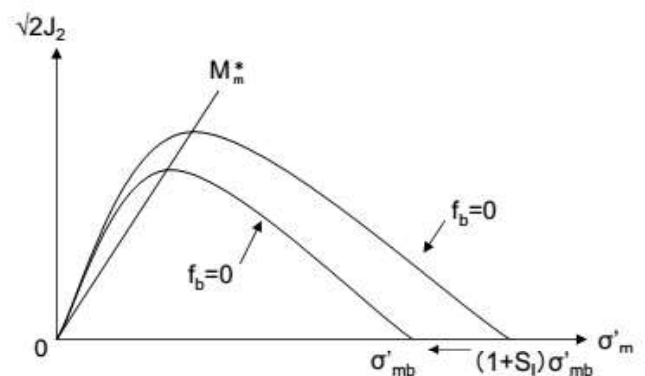
サクシジョンを考慮した過圧密境界面

湿潤に伴うサクシジョン低下によって、過圧密境界面が縮小

$$\text{過圧密境界面 } f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}}$$

$$\bar{\eta}_{(0)}^* = \{(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)\}^{1/2}$$

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{mbi} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} v^p\right) \left[1 + S_l \exp\left\{-s_d \left(\frac{P_i^C}{P^C} - 1\right)\right\}\right]$$



LIQCA2018マニュアル

η_{ij}^* 応力比テンソル σ'_{mbi} σ'_{mb} の初期値

P^C 現在のサクシジョン P_i^C サクシジョンの初期値 S_l s_d サクシジョンパラメータ

サクシオンを考慮した降伏関数と硬化関数

湿潤に伴うサクシオン低下によって、硬化パラメータが低減・剛性低下

$$\text{降伏関数} \quad f = \{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)\}^{1/2} - k = 0$$

$$d\chi_{ij}^p = B^*(A^*de_{ij}^p - \chi_{ij}^*d\gamma^p)$$

$$B^* = (B_{suc}^* - B_{max}^*)\exp(-C_f \cdot \gamma_{(n)}^{p*}) + B_1^*$$

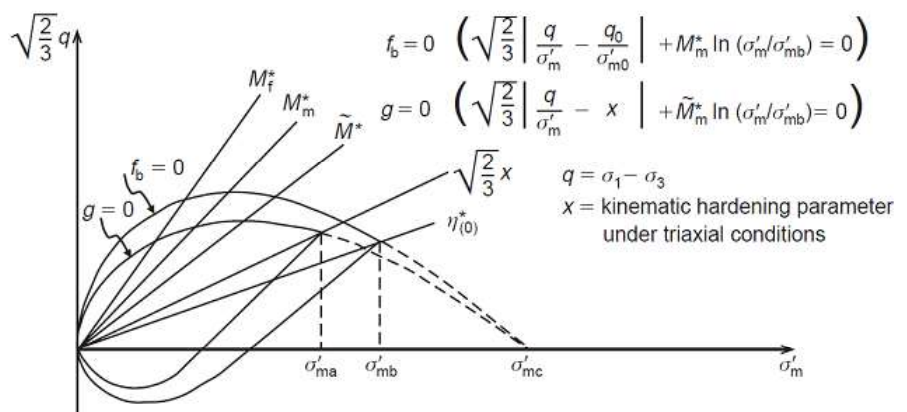
$$B_{suc}^* = B_0^* \left[1 + S_{IB} \exp \left\{ -s_{db} \left(\frac{P_i^C}{PC} - 1 \right) \right\} \right] \quad B_0^* \text{をサクシオンに応じて割増}$$

$A^* = M_f^*$ B_0^* B^* の初期値 B_1^* B^* の下限値 B_{max}^* 変相線到達後に低減 (初期は B_{suc}^* と等しい)
 $\gamma_{(n)}^{p*}$ 応力反転時からの塑性偏差ひずみの累積値 C_f B^* の低下速度
 P^C 現在のサクシオン P_i^C サクシオンの初期値 S_{IB} s_{db} サクシオンパラメータ

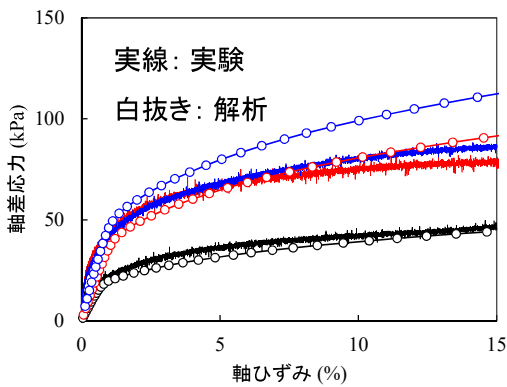
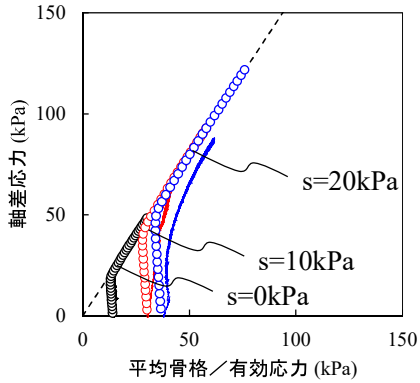
塑性ポテンシャル関数

$$g = \{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)\}^{1/2} + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} = 0 \quad \text{非関連流れ則}$$

$$\tilde{M}^* \begin{cases} -\frac{\eta^*}{\ln(\sigma'_m/\sigma'_{mc})} & f_b < 0 \\ M_m^* & f_b \geq 0 \end{cases}$$



パラメータ設定

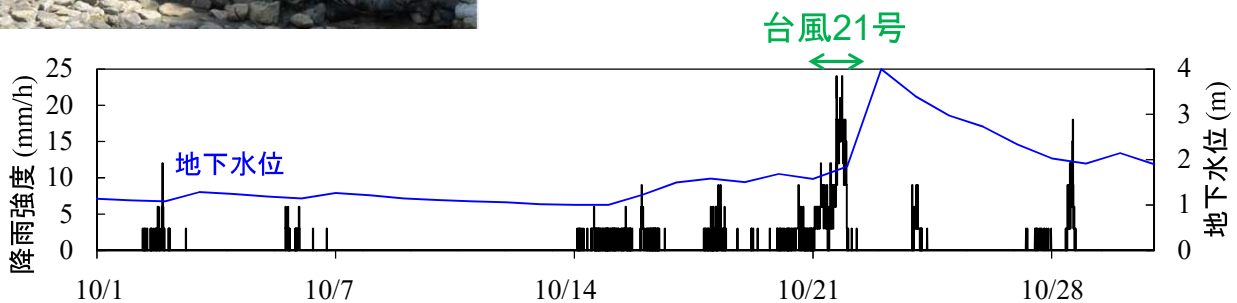
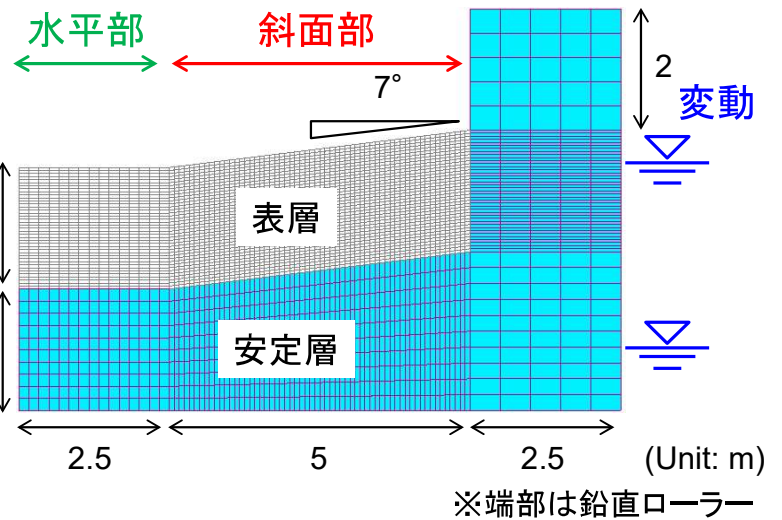


Density (t/m^3)	ρ	1.84
Coefficient of permeability (m/s)	k	3.37×10^{-6}
Initial void ratio	e_0	0.94
Compression index	λ	0.0825
Swelling index	κ	0.0075
Quasi-overconsolidation ratio	OCR*	1.0
Initial shear modulus ratio	G_0/σ'_{m0}	67.01
Phase transformation stress ratio	M_m^*	1.06
Failure stress ratio	M_f^*	1.31
Hardening function parameters	B_0^*	1500
	B_1^*	60
	C_f	500
Referential strain parameters	$\gamma_r^{P^*}$	0.005
	$\gamma_r^{E^*}$	0.008
Anisotropy disappearance parameter	C_d	2000
Dirantancy coefficient parameters	D_0^*	0.6
	n	2.0
SWCC parameters	α	0.489
	n'	1.474

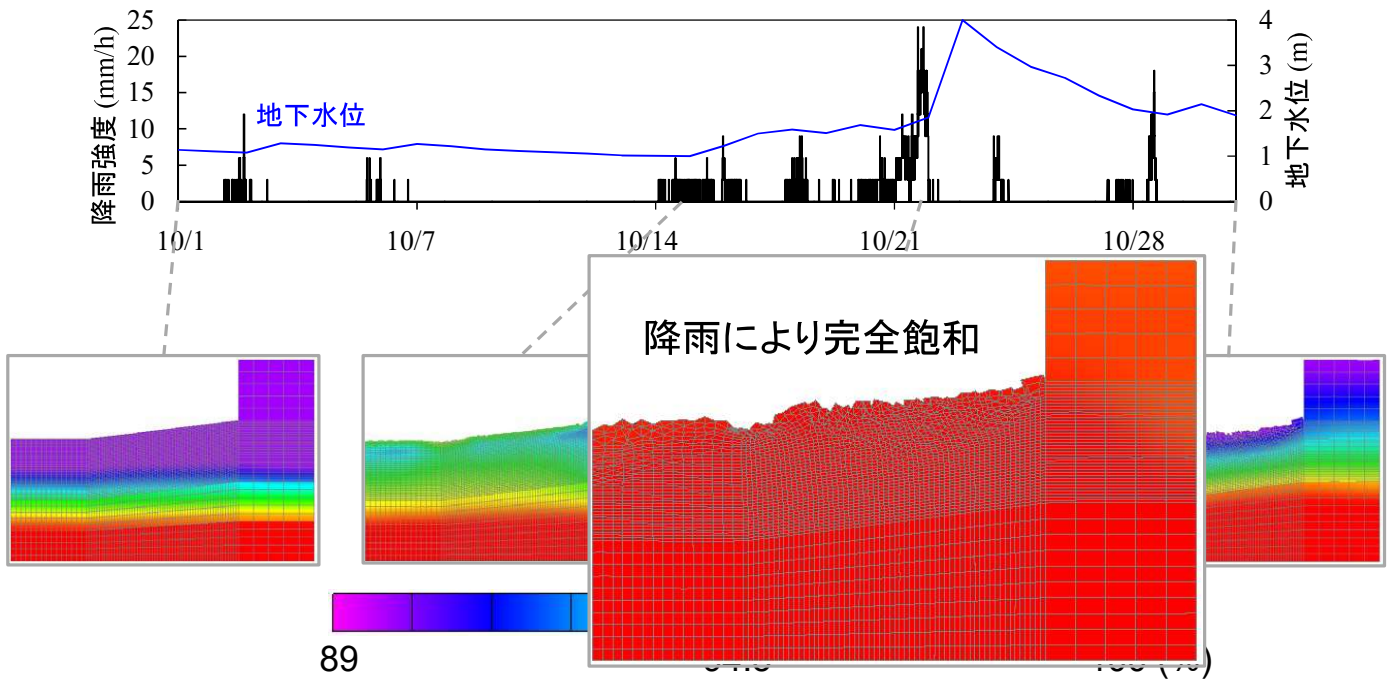
- 飽和度以外は共通のパラメータで再現
- 過圧密境界面, 剛性へのサクシヨンの影響はなし

解析条件

- 2017年10月の1か月間
- 台風による大雨(24mm/h)
- 実効雨量をもとに地下水位設定

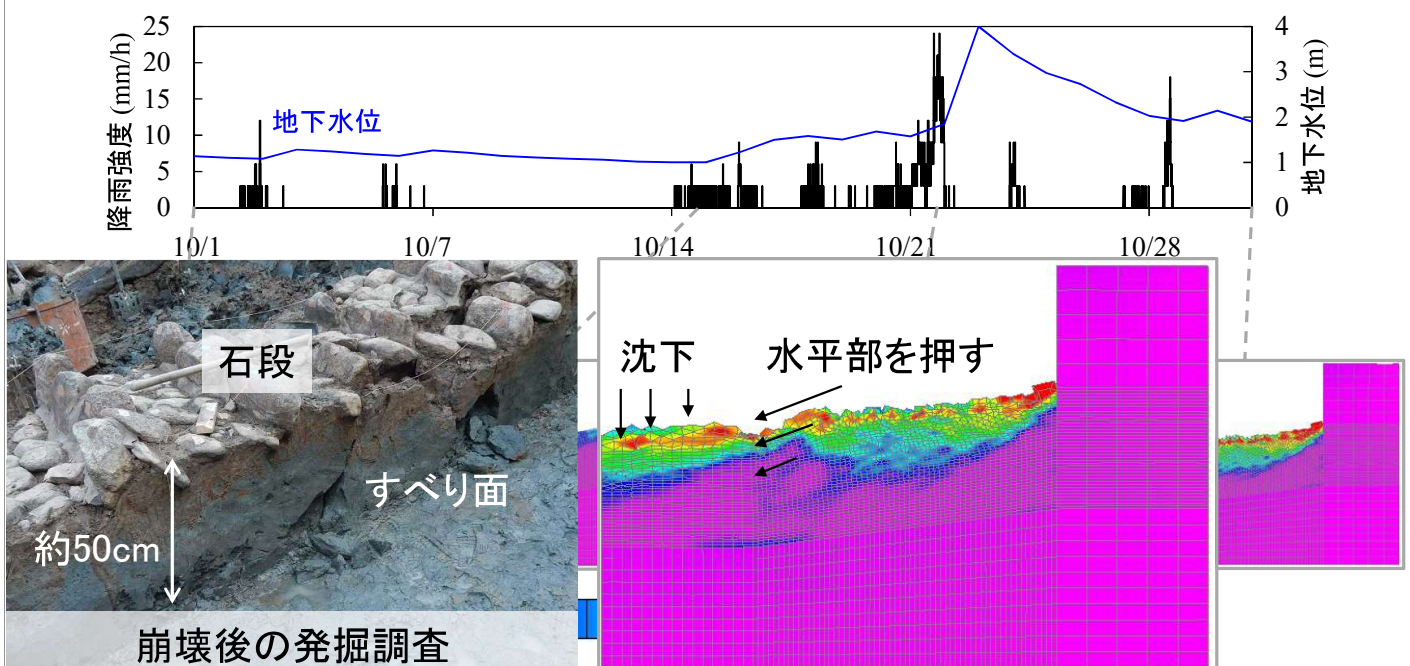


飽和度の変化



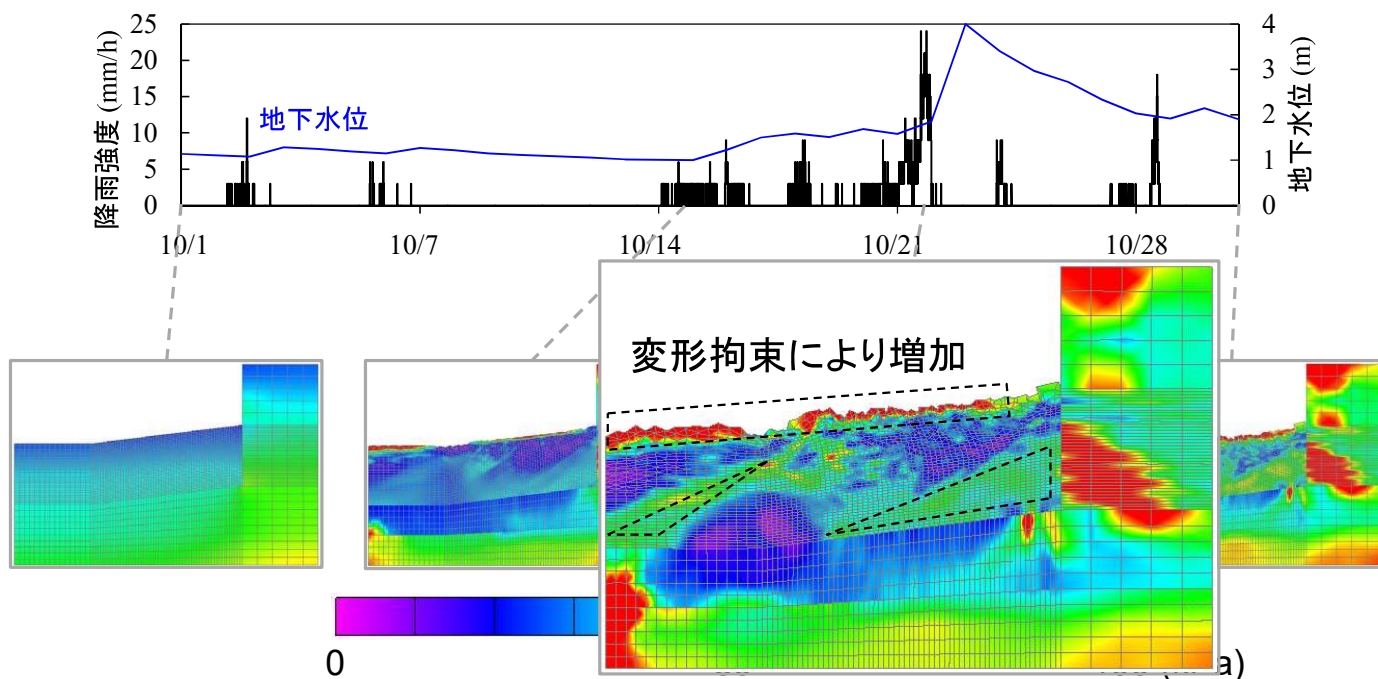
断続的な降雨により飽和度上昇。台風時は地表面まで飽和。

浸透に伴う変形(塑性偏差ひずみの累積値)



飽和度上昇に伴って変形進行。斜面部と水平部にすべり発生。

崩壊メカニズム(平均骨格応力)



すべりは浸潤に伴う骨格応力の低下で説明される。

修復方法

① 骨格応力が低下しないように、地下水位の上昇を抑制する



- 降雨よりも地下水の寄与が大きければ有効
- 遺構の改変規模が小さくて済む

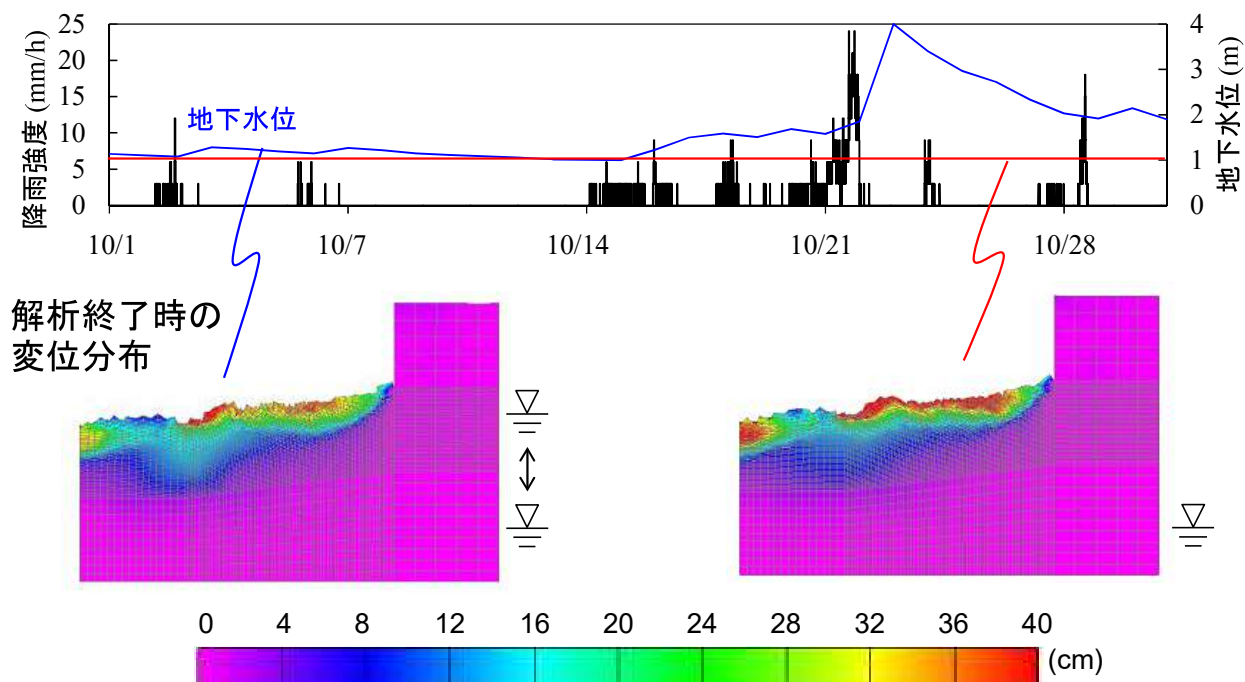
② 軟弱な表層を良質材料(高透水性, 湿潤しても強度・剛性高い)に置換



- 表層土はそもそも盛土材には不適合
- 置換の効果は確実
- 遺構の改変規模が大きい

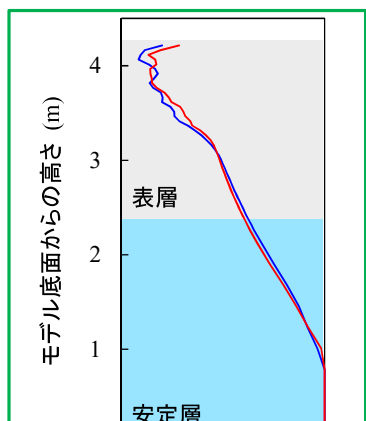
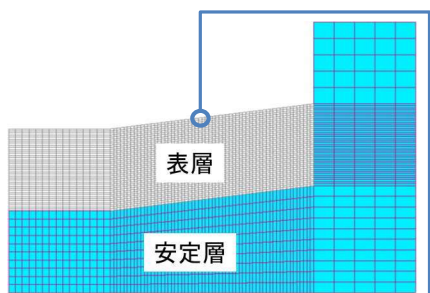
①と②のどちらが適切? 地下水の骨格応力, 変形への寄与を調べる

骨格応力, 変形に対する地下水の寄与 (①の適用性)

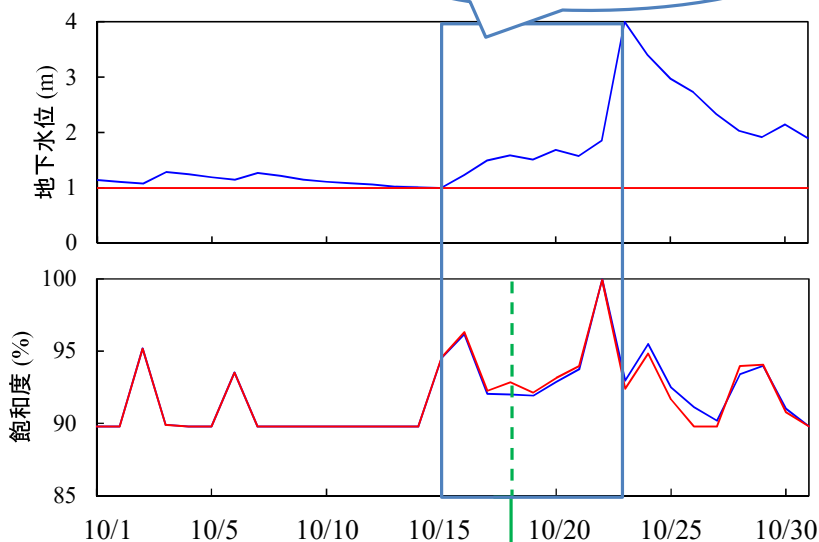


地下水位を下げた方がむしろ変形が大きい → ①は効果なし

地下水位低下は逆効果？



地下水位低い方が地表の飽和度高い？



深さ方向の飽和度分布確認

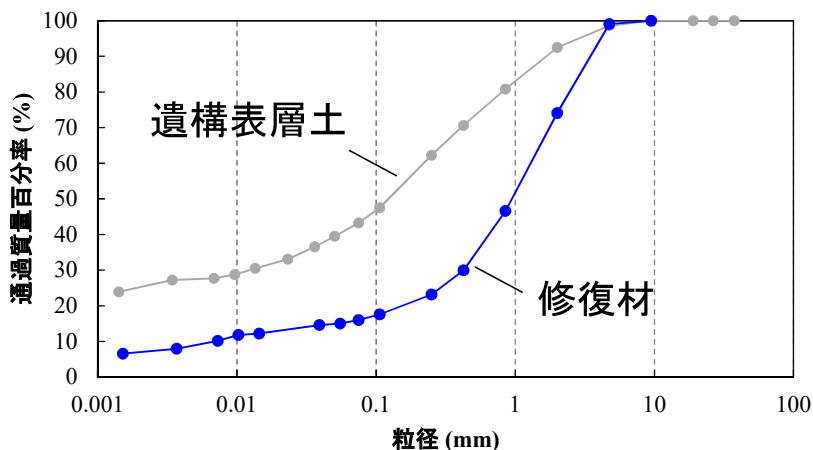
地下水位を低くすると、地盤内の飽和度が下がる分、表層に雨水が滞水する結果、骨格応力が下がり変形が大きくなる。

修復方法の提案—②軟弱表層の置換—

修復材



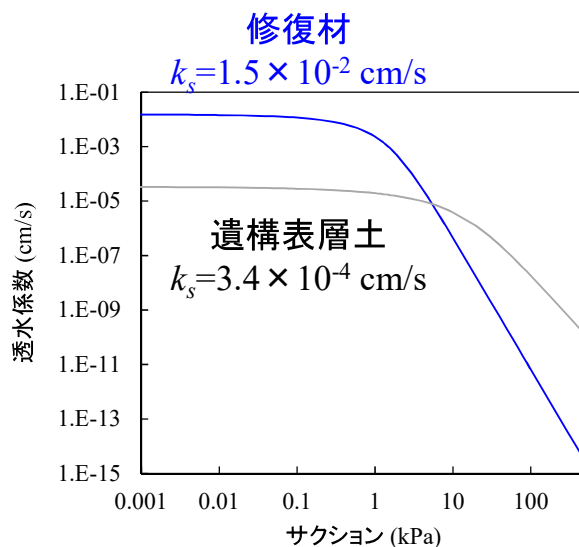
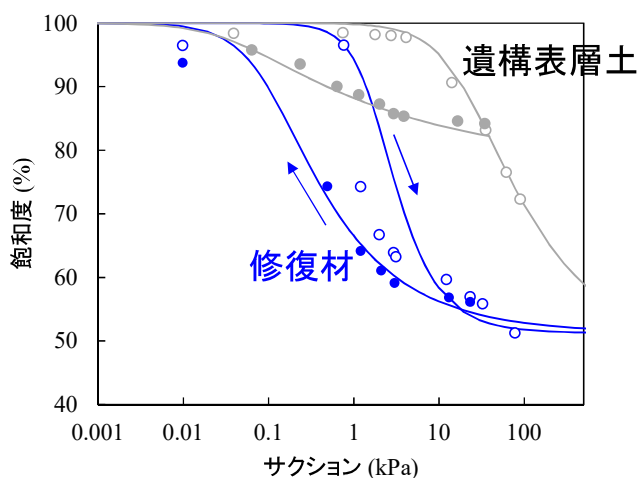
- 高透水性・保水性低い
- 締固めに適している
- 湿潤しても強度・剛性高い



吉野郡大淀町の採石場で入手

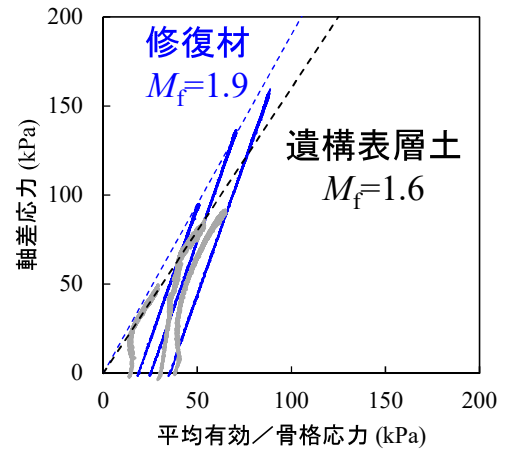
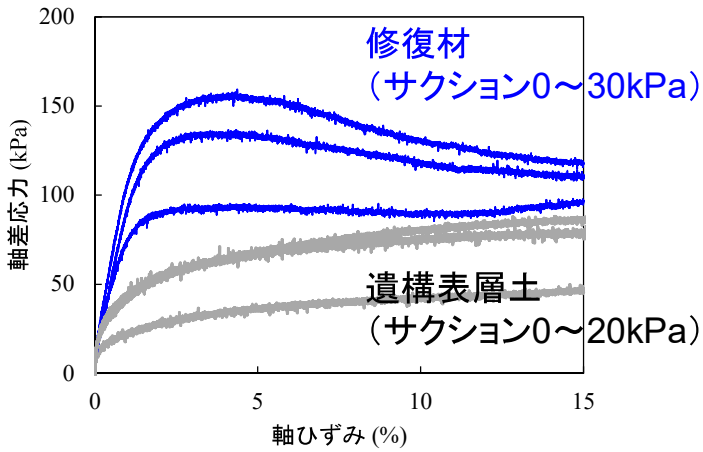
締固め度90%を想定して、表層を置換した場合の浸透—変形挙動を評価

修復材の浸透特性



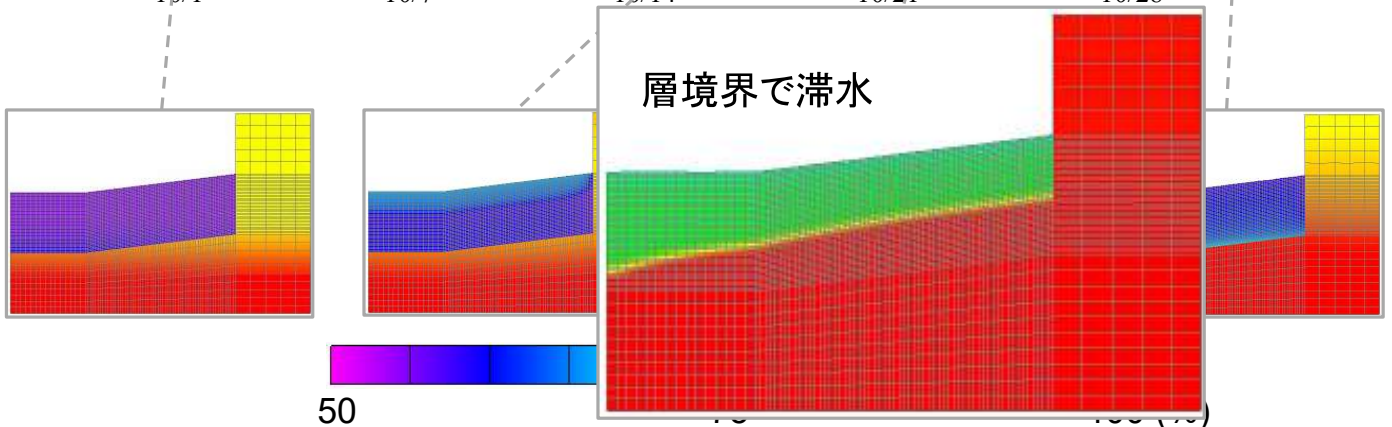
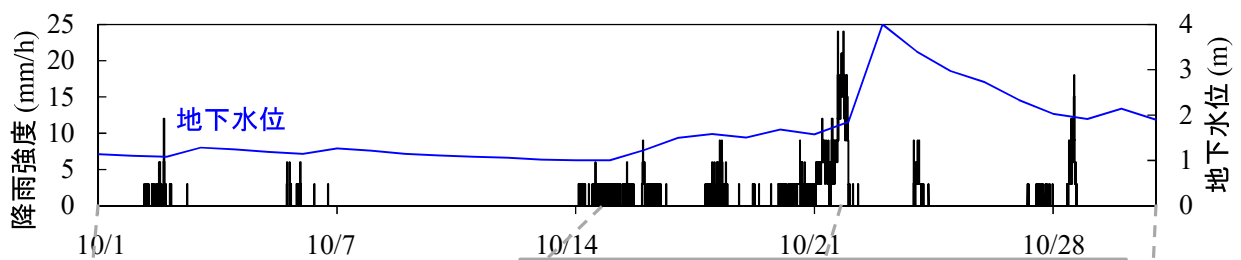
保水性が低く、飽和透水係数は500倍程度。

修復材の力学特性



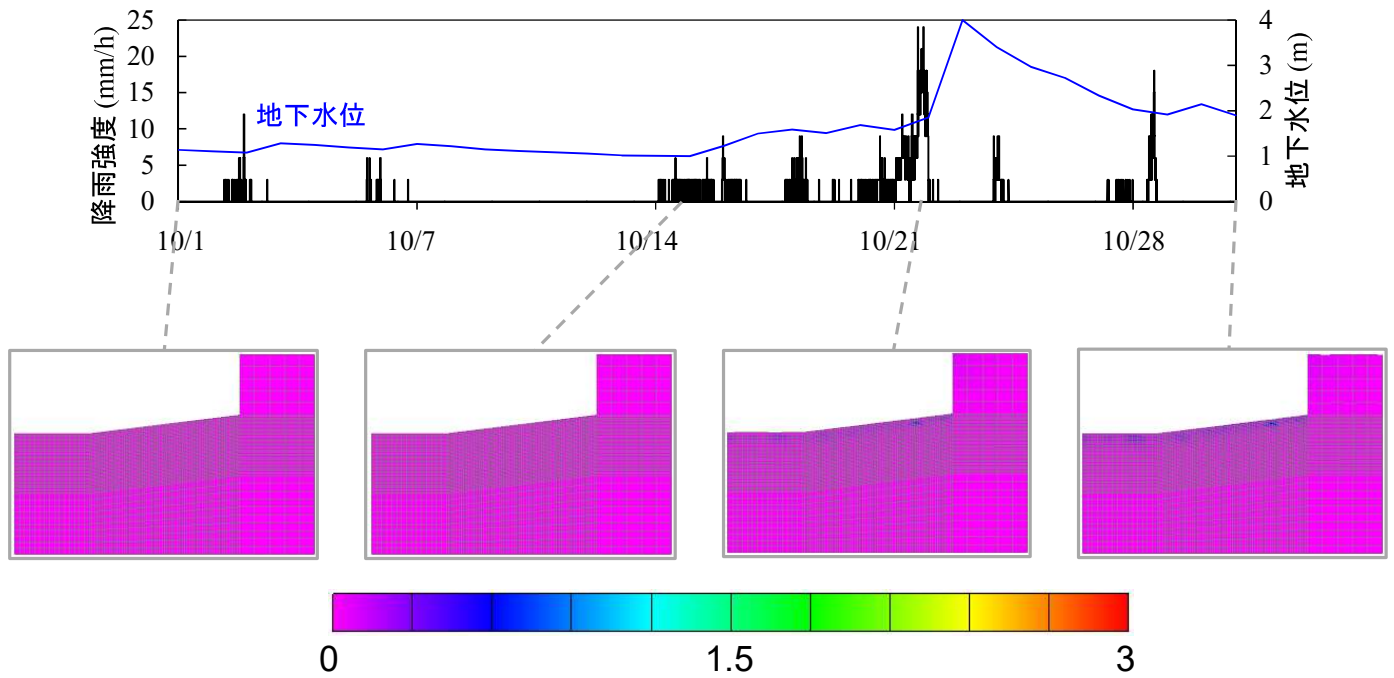
修復材は飽和時にも強く、不飽和でさらに強度を発揮する。

飽和度の変化(修復後)



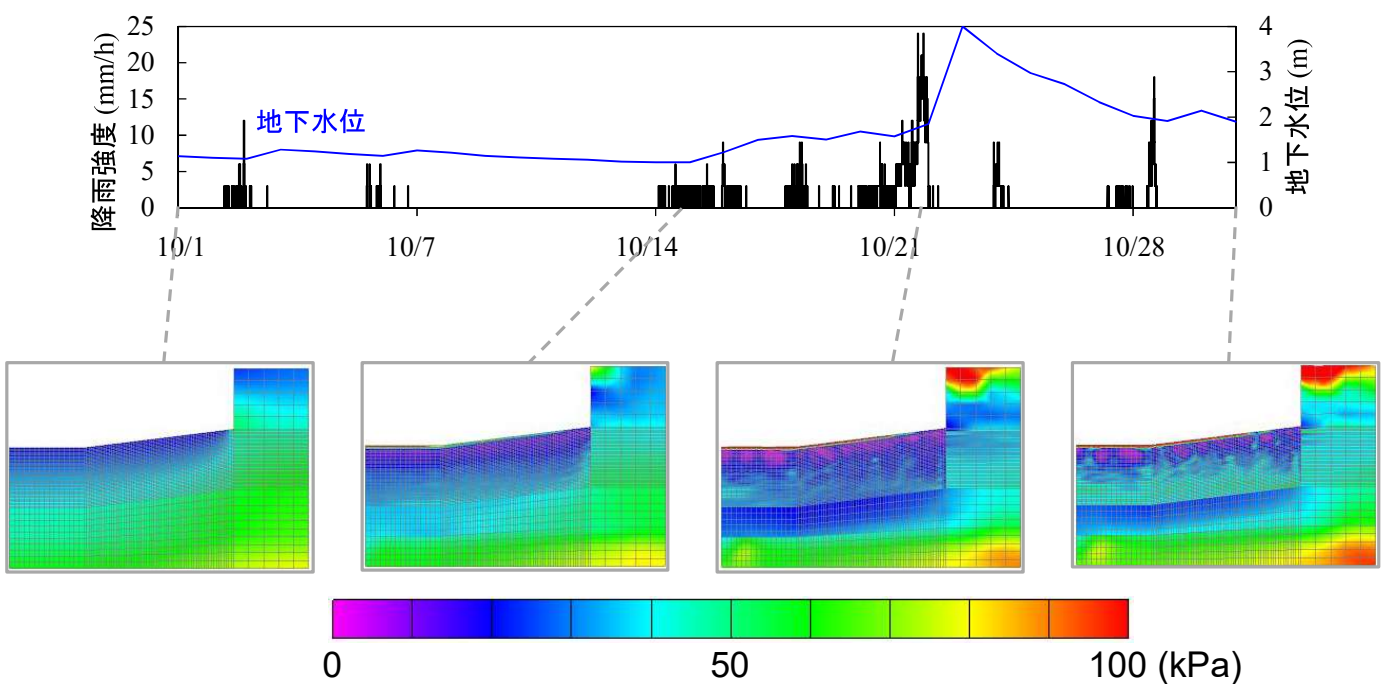
高透水性・低保水性のため飽和度低い。大雨のときは層境界で滞水。

浸透に伴う変形(修復後)



飽和度が上昇してもほとんど変形しない。

平均骨格応力(修復後)



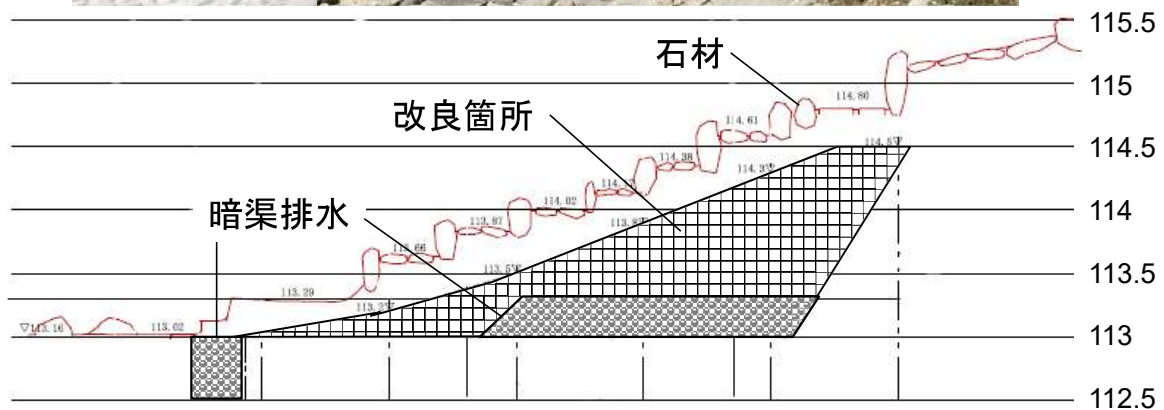
骨格応力が低下しても十分な強度・剛性を維持している。

実際の修復



2020年5月撮影

Elevation (m)



話題1. のまとめ

酒船石遺跡の遺構土の浸透・力学特性を調査し、降雨による崩壊機構を数値解析で明らかにした。これに基づき、適切な保全方法を提案した。

- 遺構表層土は、細粒分が多い。深さ2mまでの軟弱な領域ですべりが発生した。
- 表層のすべりを数値解析で再現した。すべりは、浸潤に伴う骨格応力(土粒子間力)の低下で説明される。
- 地下水位は、変形量の増大には寄与しないため、地下水位を低く維持しても変形抑制には効果がない。
- すべりの素因である表層を、高透水性・低保水性かつ浸潤時にも十分な強度を有する材料に置換すると変形を確実に抑制できる。

話題2.

雨水浸透を墳丘を模した盛土構造物で 制御するための手法提案と実施事例

大分県日田市・ガランドヤ古墳石室の保護

想定される墳丘を模した盛土による保護施設の構築

細粗互層による遮水構造の活用(キャピラリーバリア)

ガランドヤ古墳(大分県日田市) 6世紀中～後期

環境暴露により劣化した 壁画の保護

- 墳丘の損失
- 石室の屋外環境の暴露
- 壁画の剥離(結露, 塩類風化)



修復前の露出した石室



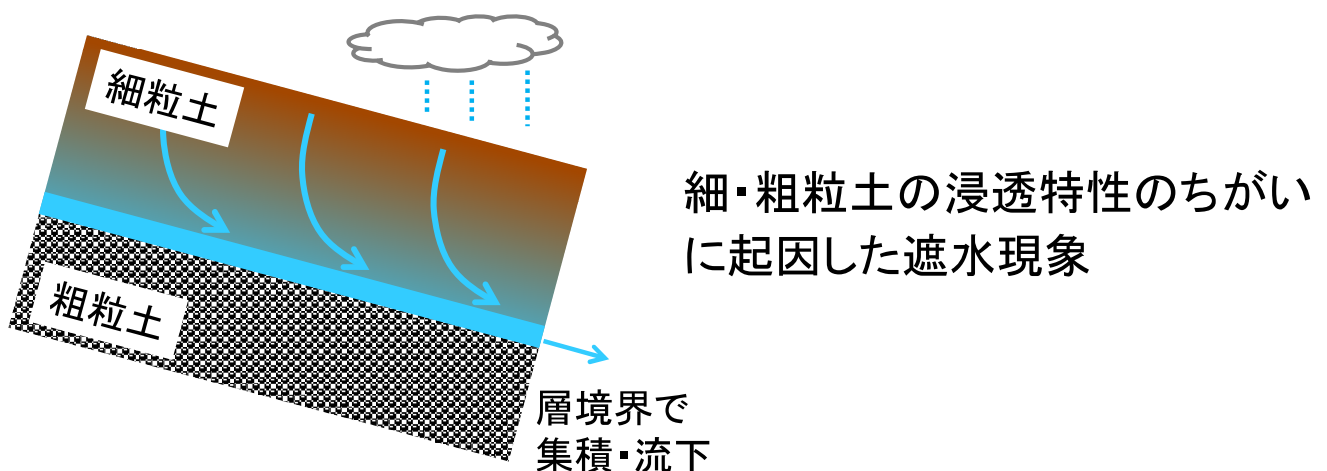
修復・整備の目的と制約条件

- 遺跡の真正性を毀損させない。
- 石室が暴露されていることによる雨水の浸透、石室内温度と外気温差による石材表面への結露と蒸発散による塩類析出を防止する。
- 元々一般に見えていた石室を埋め戻して見えない状態にするのは避けたい。
- 整備にあたり、墳丘が存在したことを明示的に表せるような形を整えたい。



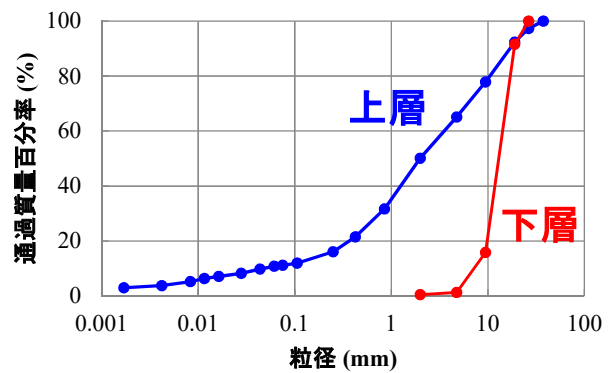
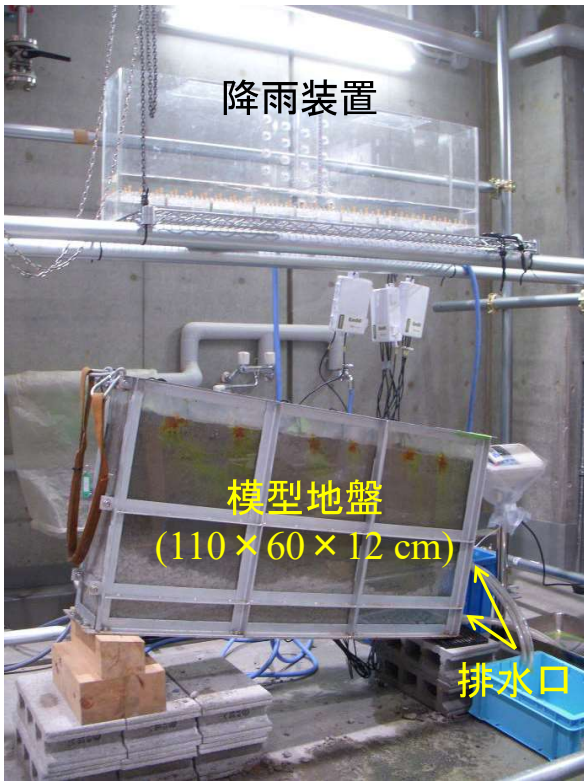
力学的、化学的安定性を確保し、遺跡の本質的価値を毀損しない形とし、さらに一般に公開できる仕組みを考える

キャピラリーバリア(毛管遮水層)



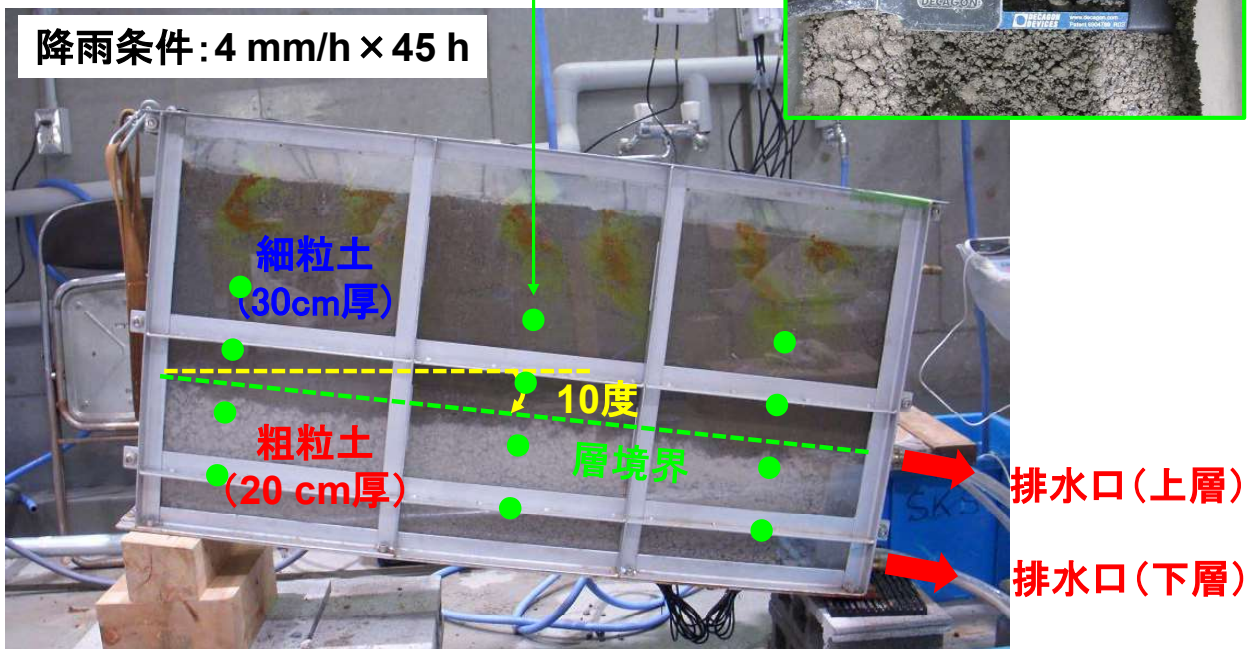
キャピラリーバリアの遮水のメカニズムを解明し、
墳丘内部への雨水の浸透抑制法として利用する

模型実験

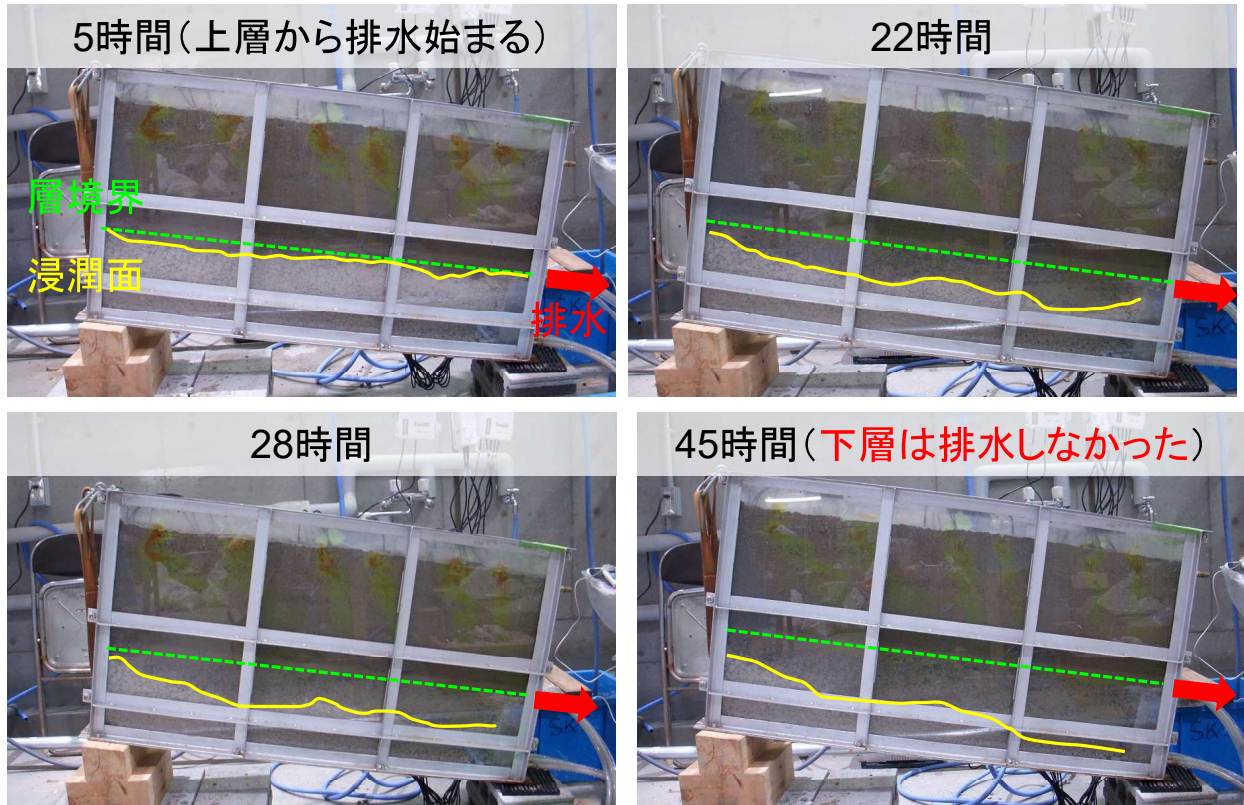


模型地盤

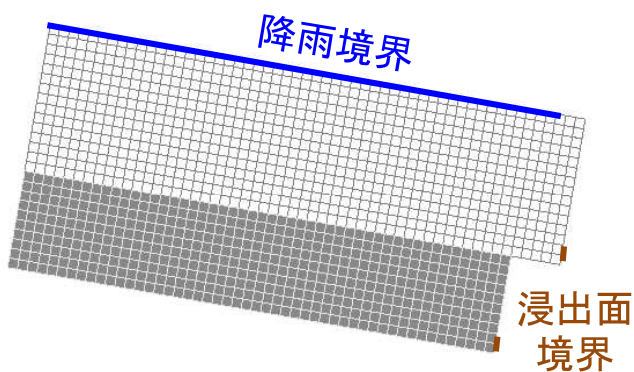
- 測定項目: ① 上下層からの排水
② 地盤内の飽和度



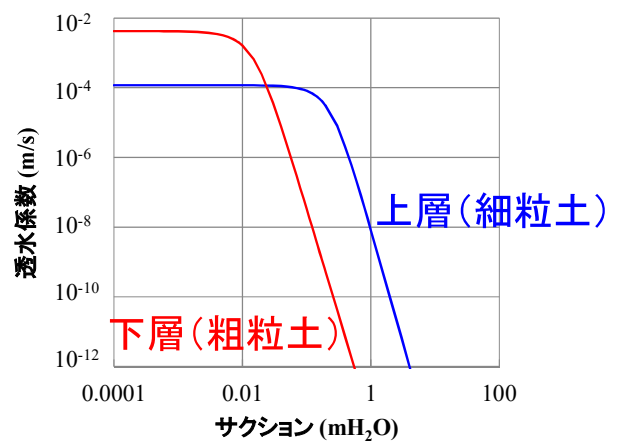
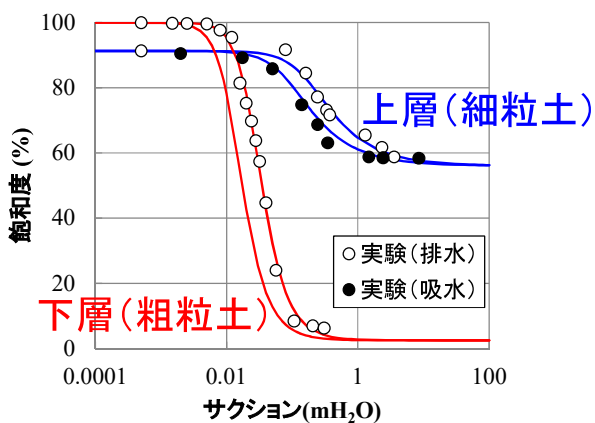
キャピラリーバリアによる遮水



飽和・不飽和浸透流解析による現象の説明

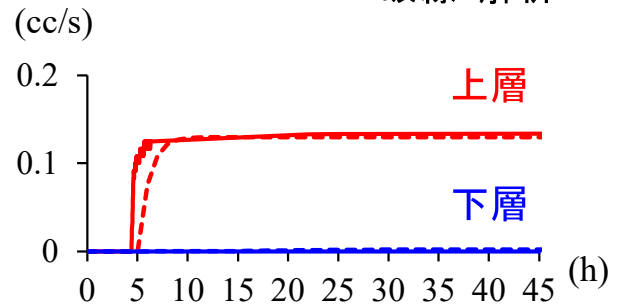
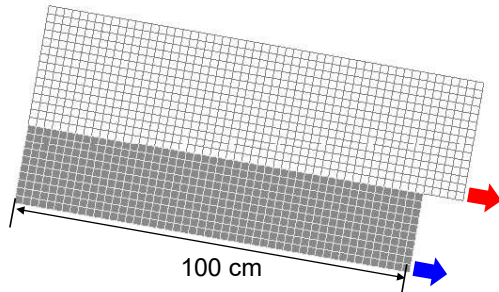


- 浸透流解析 (AC-UNSAF2D)
- 浸透特性→室内試験とvan Genuchtenモデルで評価

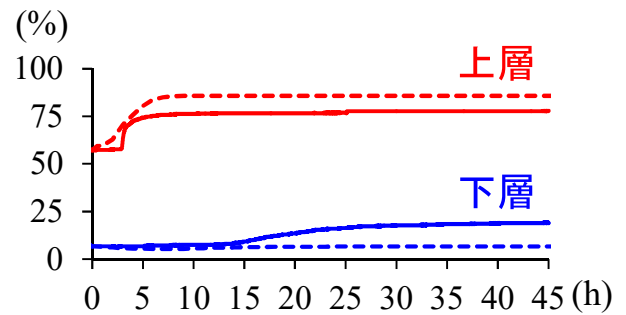
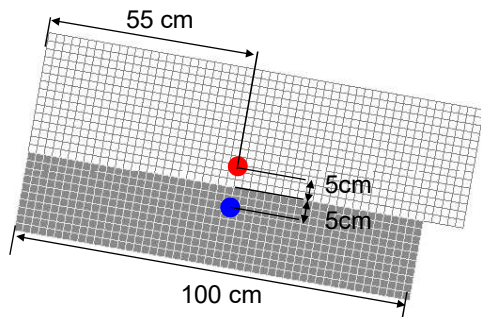


実験と解析の比較

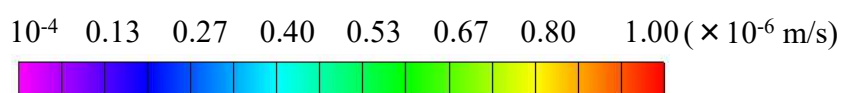
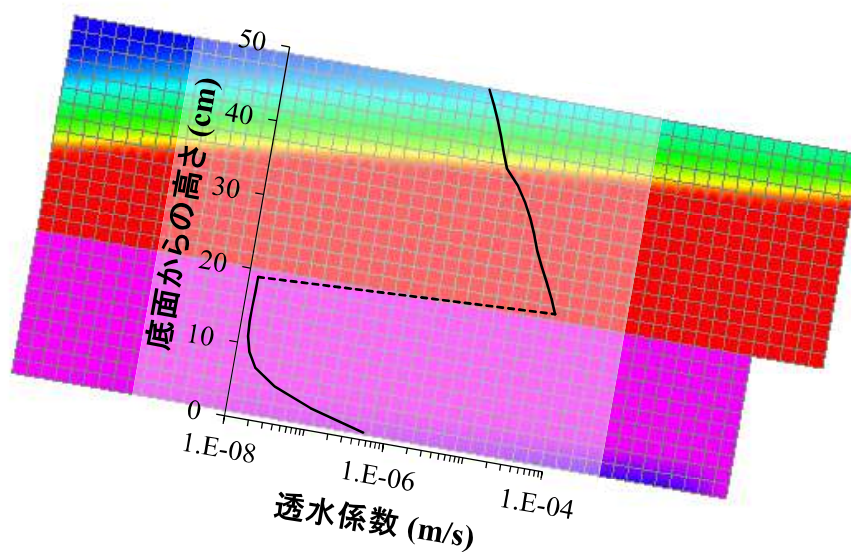
排水量の比較



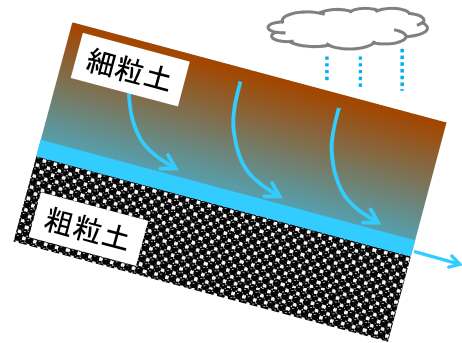
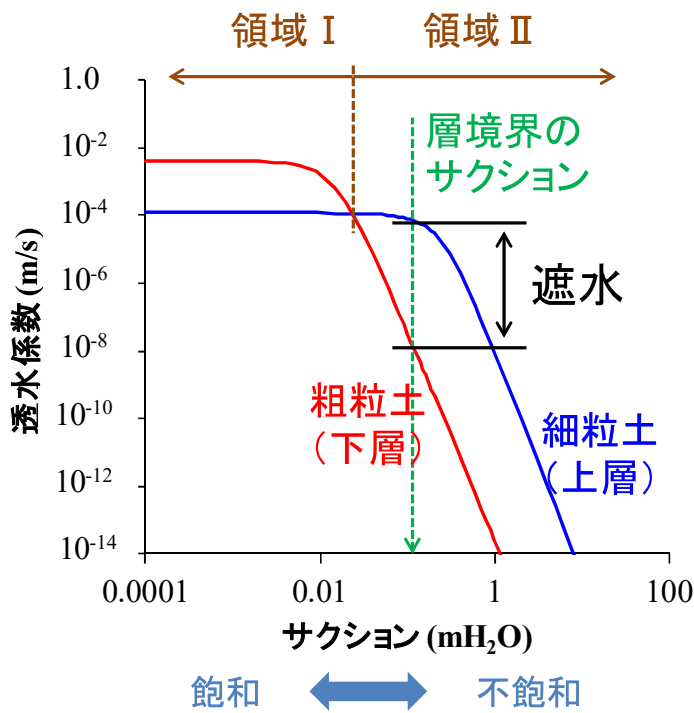
飽和度の比較



透水係数の分布 (定常時)



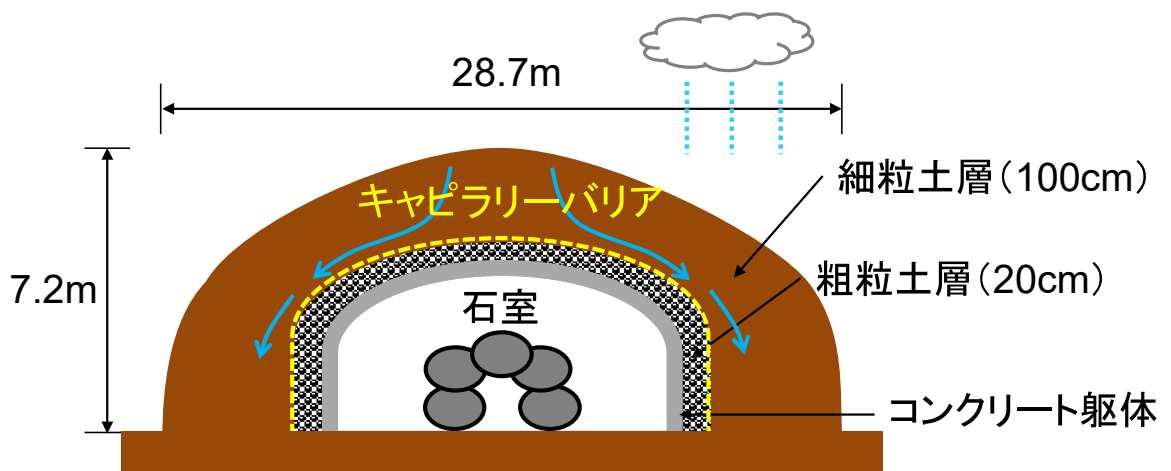
キャピラリーバリアの仕組み



キャピラリーバリアの条件

- ① 領域 II を持つ土の組み合わせ
- ② 透水係数の差が大きいほど遮水性が高い

キャピラリーバリアを利用した古墳の保護施設



- 第一遮水層として機能
- 特別な維持管理の必要なし
- 覆土の断熱性 → 施設内の温度変化を抑制

保護施設の施工の様子

コンクリート製の躯体



細粗粒土からなる覆土



施設内の石室



露出した石室を保護する施設



話題2. のまとめ

- 古墳の修復・保存の課題のひとつは、**墳丘内部への水分移動の抑制**
- キャピラリーバリアは、雨水の浸透抑制法として利用できる
- キャピラリーバリアは、細・粗粒土の**不飽和透水係数の差異**に起因する
- 大分県日田市・ガランドヤ古墳の露出した石室を保存するため、キャピラリーバリアを発現する覆土を用いた保護施設を提案し、施工した。

講演のまとめ

- 歴史的地盤構造物の修復と保全は、地盤工学の知見に基づいた技術的根拠に裏付けされた工法を採る必要がある。
- 使用されている土の物理的・力学的特性の把握、適切なモデル化、実験と数値解析によるメカニズムの解明によって、現在の遺跡の状態を評価し、必要な修復と保全方法を提案することが求められる。
- 歴史的地盤構造物の保全には、当該遺跡が保有する本質的価値を毀損することがないように配慮が求められる。一方で、土構造物には耐震性がほとんどなく、地震による大きな被害も昨今では発生している。修復や補強に際し、どの程度の現代工法であれば本質的価値を損なわないのかについては解を得ていない。地盤工学の貢献が期待されている。