



不飽和土の力学挙動に与えるサクションの影響
—せん断挙動を中心として—

神戸大学大学院
工学研究科市民工学専攻
加藤 正司

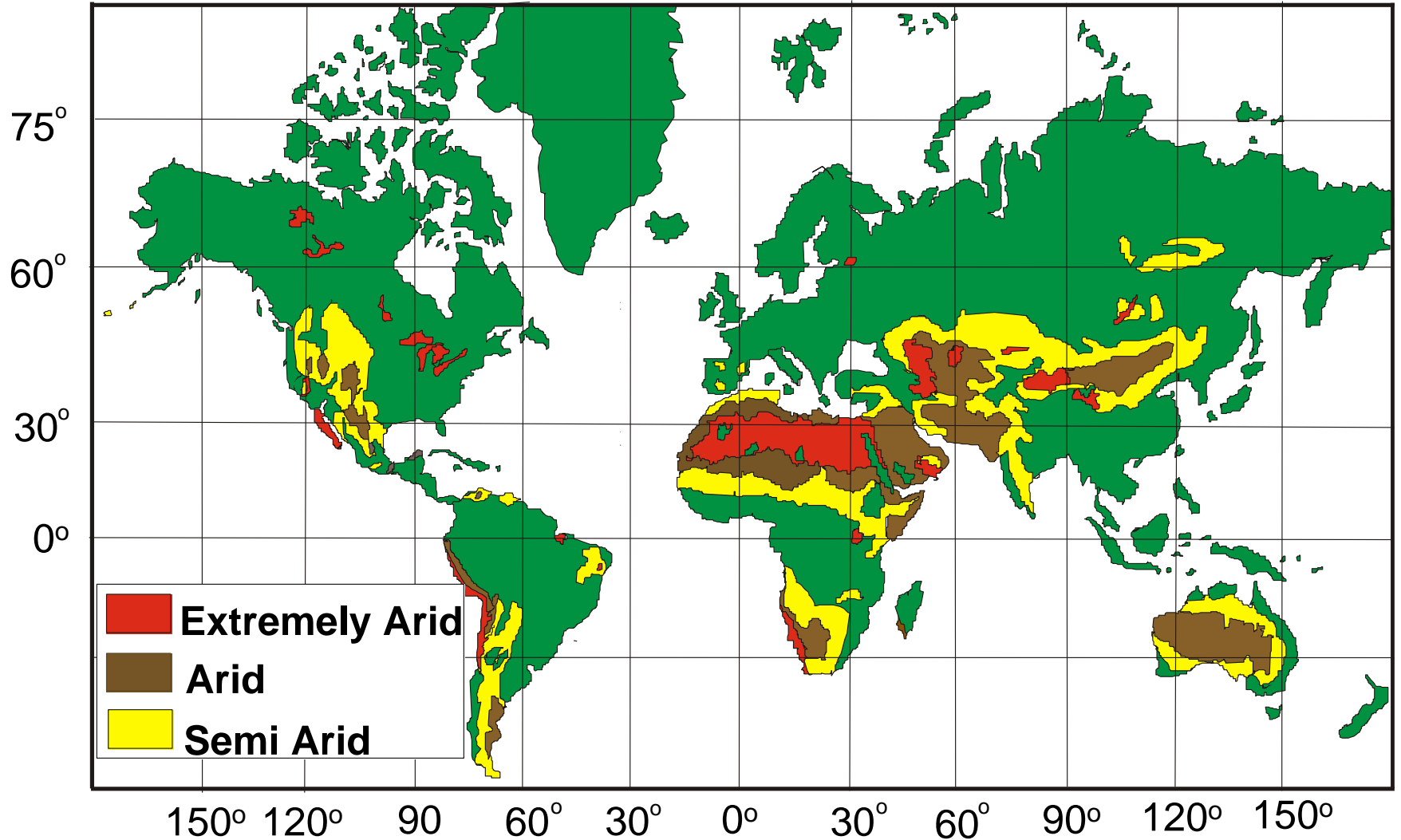
Oroville Dam

本日の発表内容

1. はじめに
2. 不飽和土とは
3. 二つのサクシヨン効果
4. 不飽和土のせん断時の挙動(実験的方法)
5. 不飽和土の研究成果の応用例
(疎水材を用いた高機能遮水層の開発)

1. はじめに

地球上での乾燥地域の分布



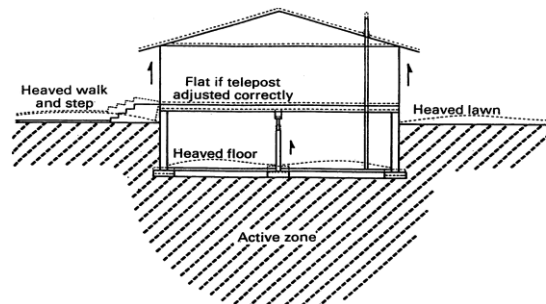
乾いた地盤が起こす問題



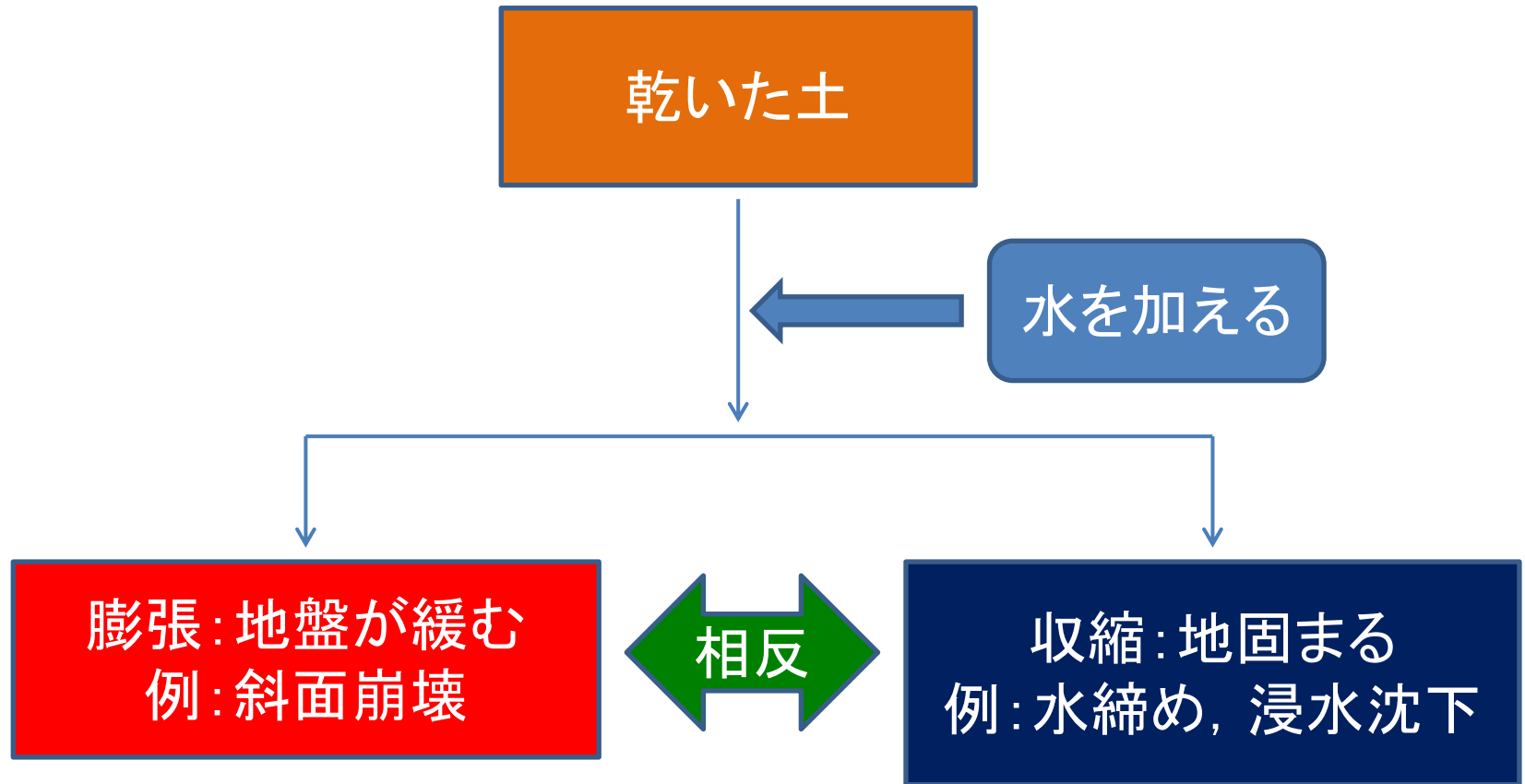
平成16年 台風21号による斜面崩壊

EXPANSIVE SOILS PROBLEMS

Ground movements associated with the construction of shallow footings on an expansive soil



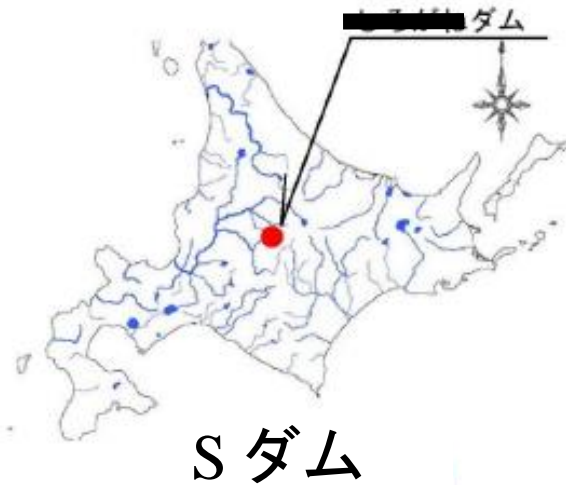
乾いた土に水を加えるとどうなる？



1.1 「地盤が緩む」の例

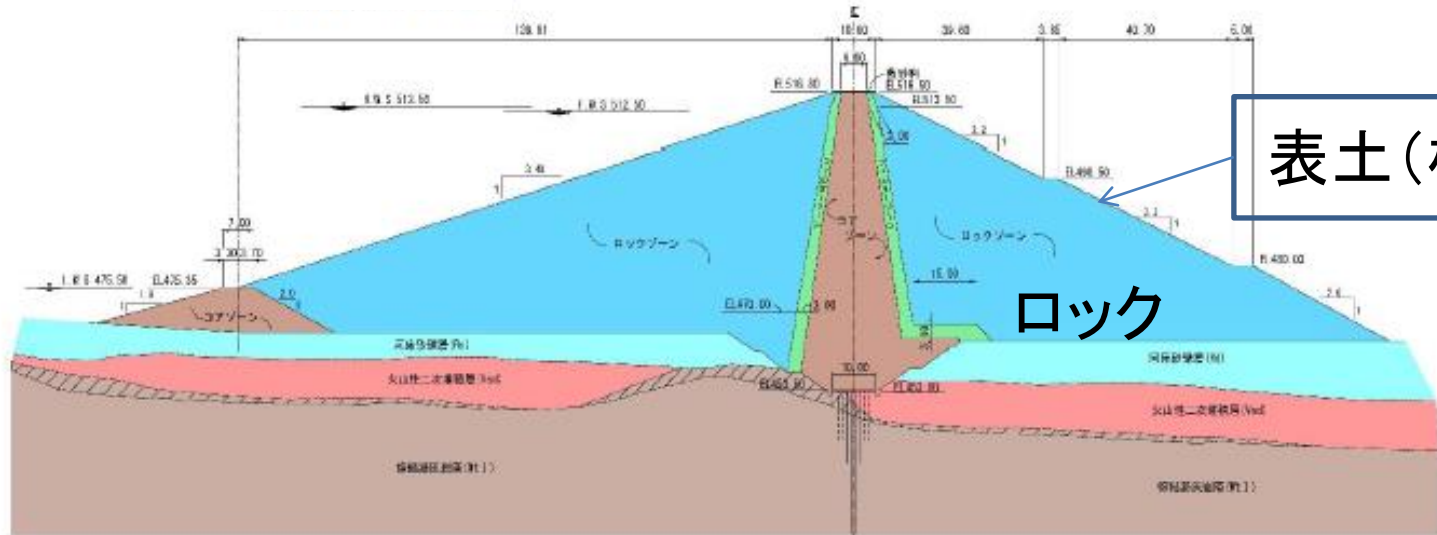
天気予報：雨によって地盤が緩んでいますので、
土砂災害に注意

Sダムの降雨による表層崩壊事例



〇〇ダム諸元表

堤体	型式	中心遮水ゾーン型フィルダム
	堤高	63.50m
	堤頂長	611.00m
	堤体積	1,387,000m ³
	堤頂標高	EL516.80m (保護層0.3m含む)
	堤頂幅	10.00m
	平均法勾配	上流 1:3.4~4.0 下流 1:2.0~2.2



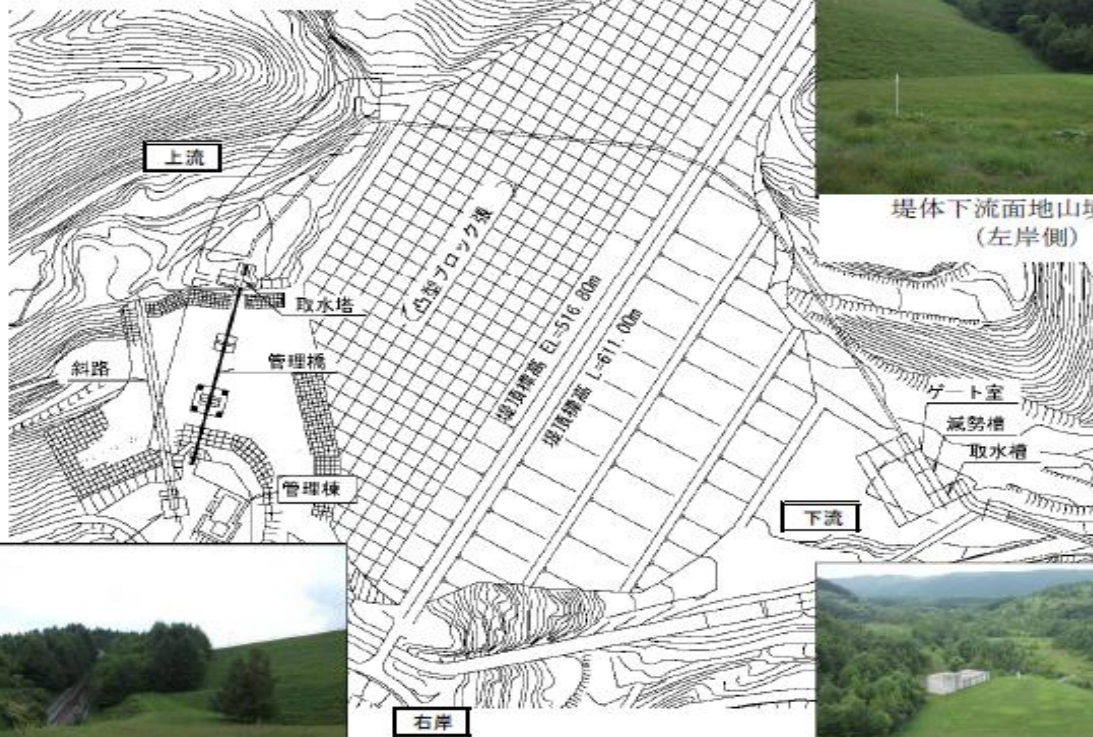
〇〇ダム堤体標準断面図

※斜線部は風化帯である

Sダム 被災前



堤体上流



堤体下流面地山境界部
(左岸側)



堤体下流面地山境界部
(右岸側)



堤体下流面全景

堤体状況図

堤体下流

豪雨によるダム下流斜面の崩壊



2016.08.1撮影
水土総研報告書より

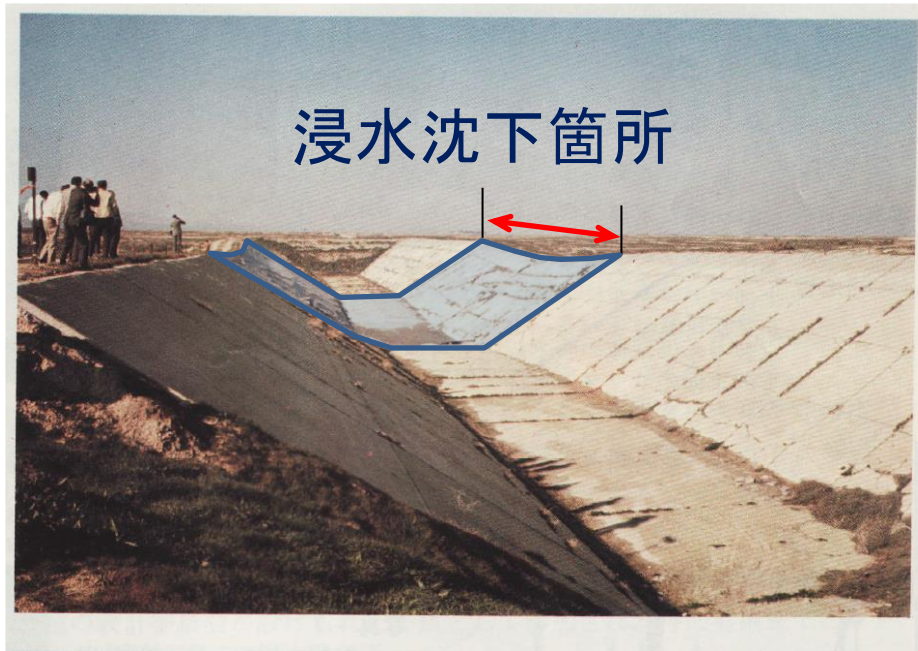
2016.07.31 最大降雨76 mm/h

1.2 「地盤が固まる」の例

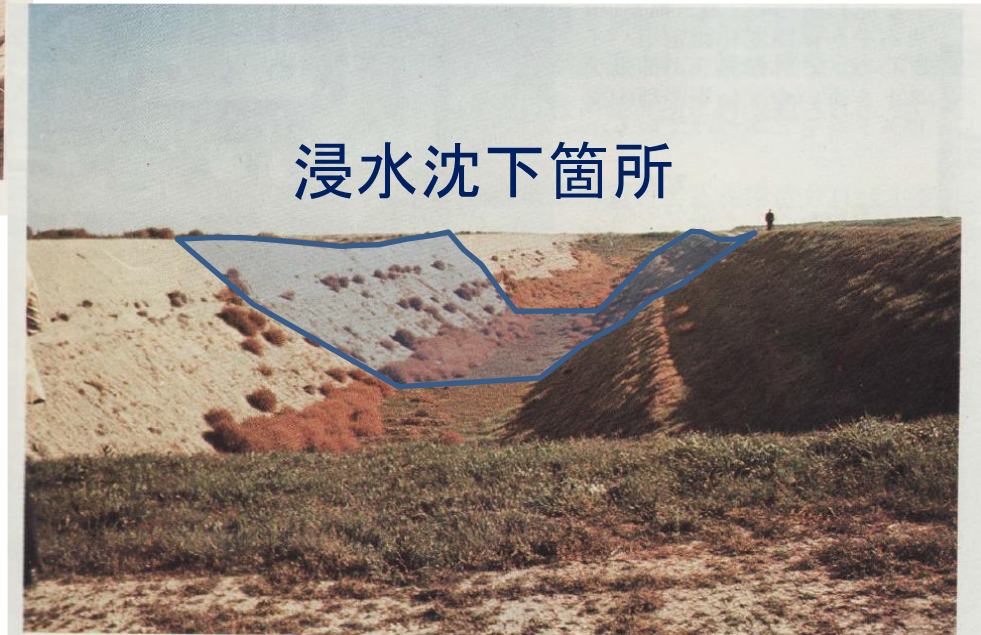
(浸水沈下: Collapse due to wetting)

アメリカでの浸水沈下実験

浸水沈下箇所



浸水沈下箇所



口絵写真, 土と基礎 29(6), 1981

Cougarダム浸水沈下

- ・H = 158 m
- ・ロック材はD8トラクタとブルドーザを用い, Pass2回

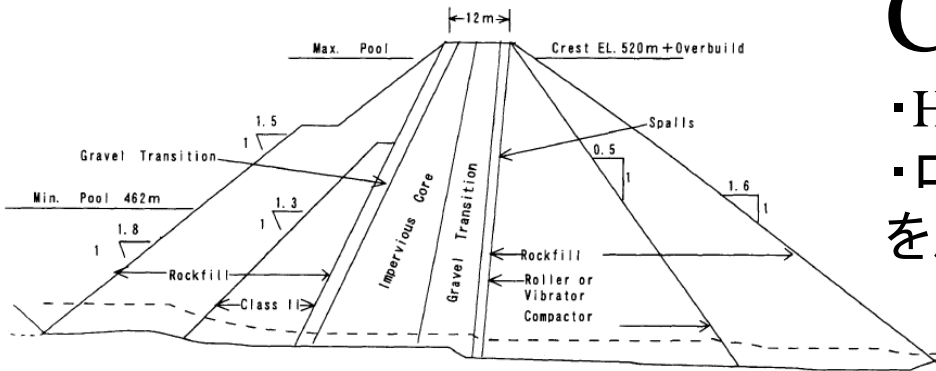
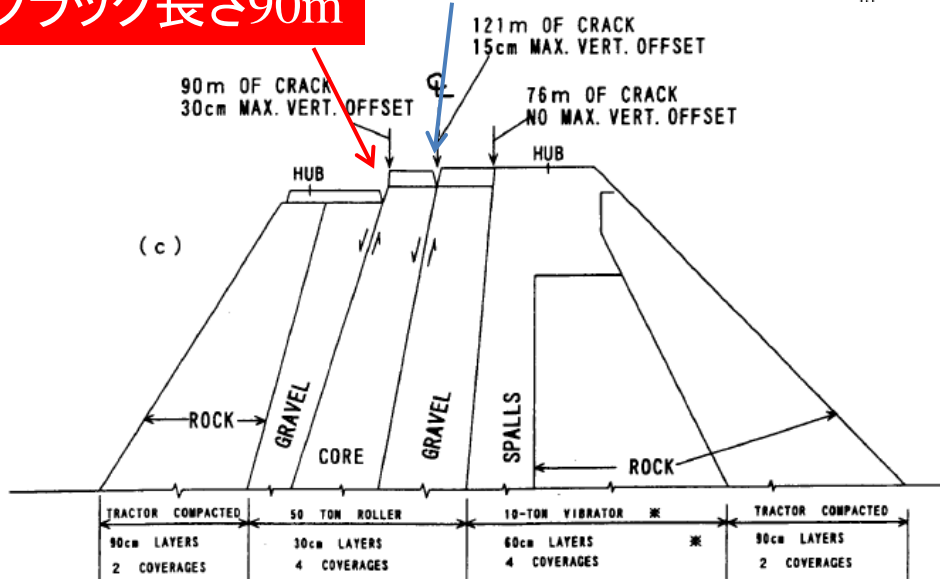


図-5 Cougar ダムの最大断面 (Pope, 1967)

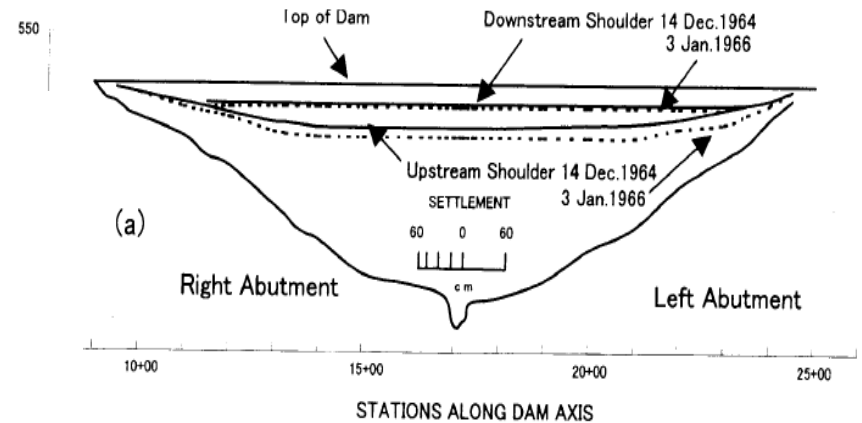
30cm沈下
クラック長さ90m

15cm沈下
クラック長さ121m



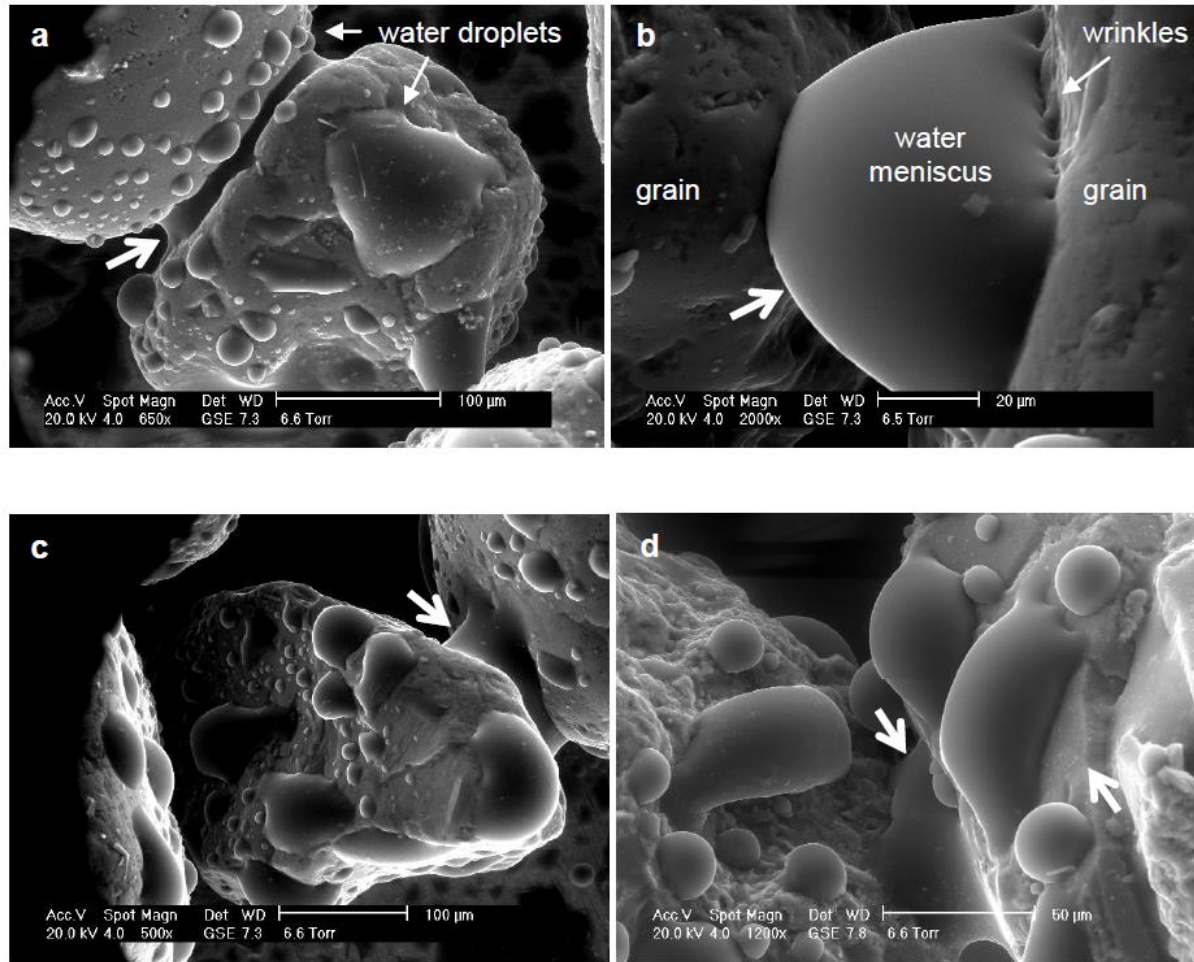
* VARIATIONS EXPLAINED IN TXET

図-6 Cougar ダムの挙動



2. 不飽和土とは

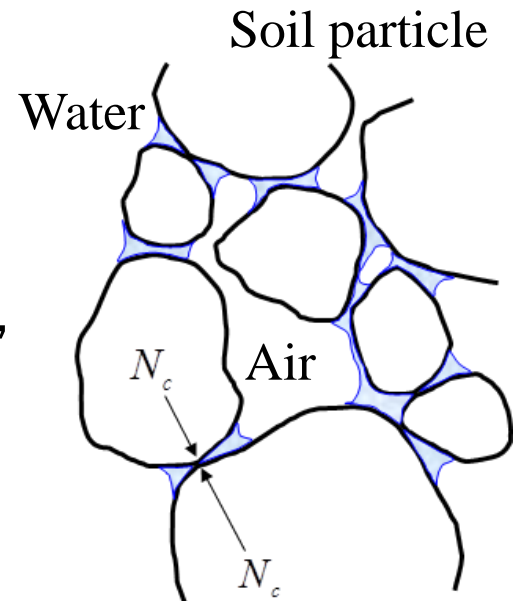
砂粒子間に形成されたメニスカス水の状況



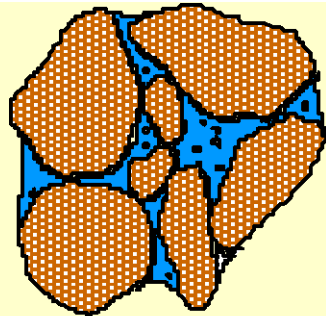
(Lourenço et al, Geotechnique 62(3):193-199 · March 2012)

不飽和土とは？

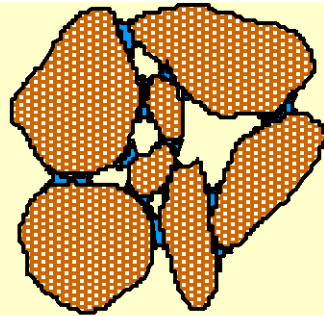
- 土は**土粒子**とその隙間(**間隙**)からなる。
- 一般に、その間隙は水と空気で満たされている。
飽和土：間隙が水だけで満たされている。
不飽和土：間隙が水と空気で満たされている。
- 土は一般には不飽和状態にある。
- つまり、土は三相からなる。固相(土粒子)、
液相(水)と気相(空気)からなる。
- 三相間で相互作用が生じる。



実際の土における可能な不飽和形態 と水分特性曲線

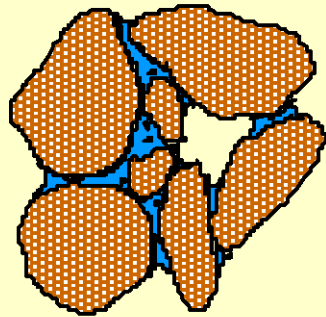


封入不飽和



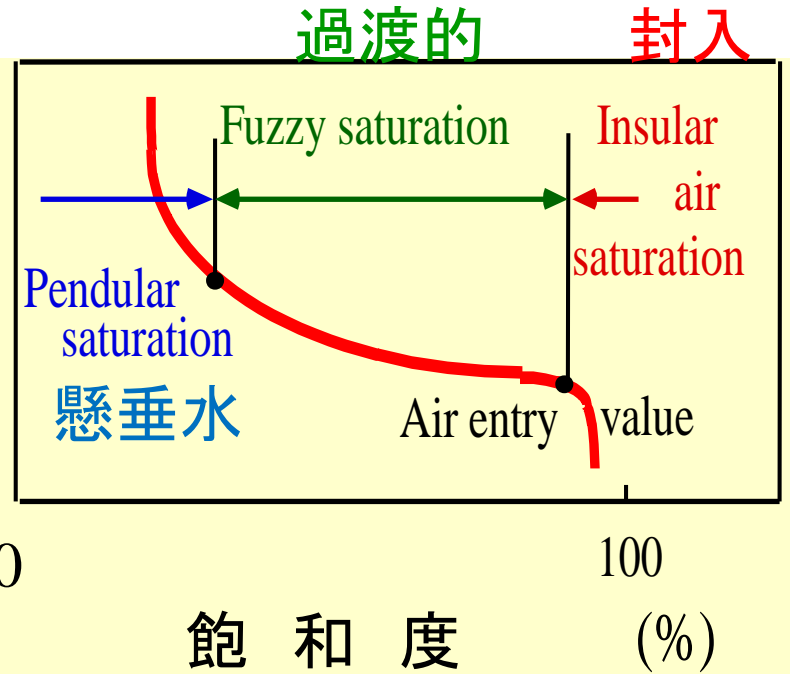
懸垂水不飽和

ポテンシオン

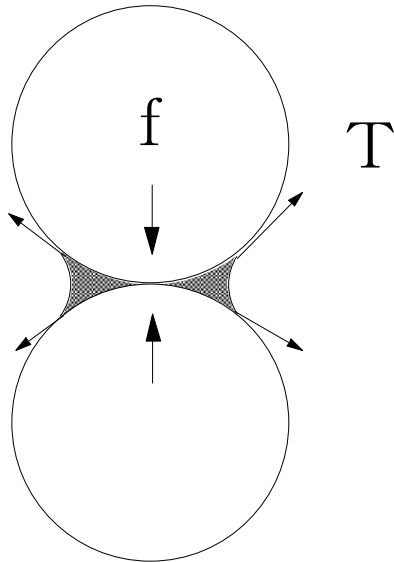


過渡的不飽和

- 土粒子
- 間隙水
- 間隙空気



サクシオンと粒子間圧縮力



2球モデル

T : 水の表面張力

u_a : 間隙空気圧

u_w : 間隙水圧

$$u_a > u_w$$

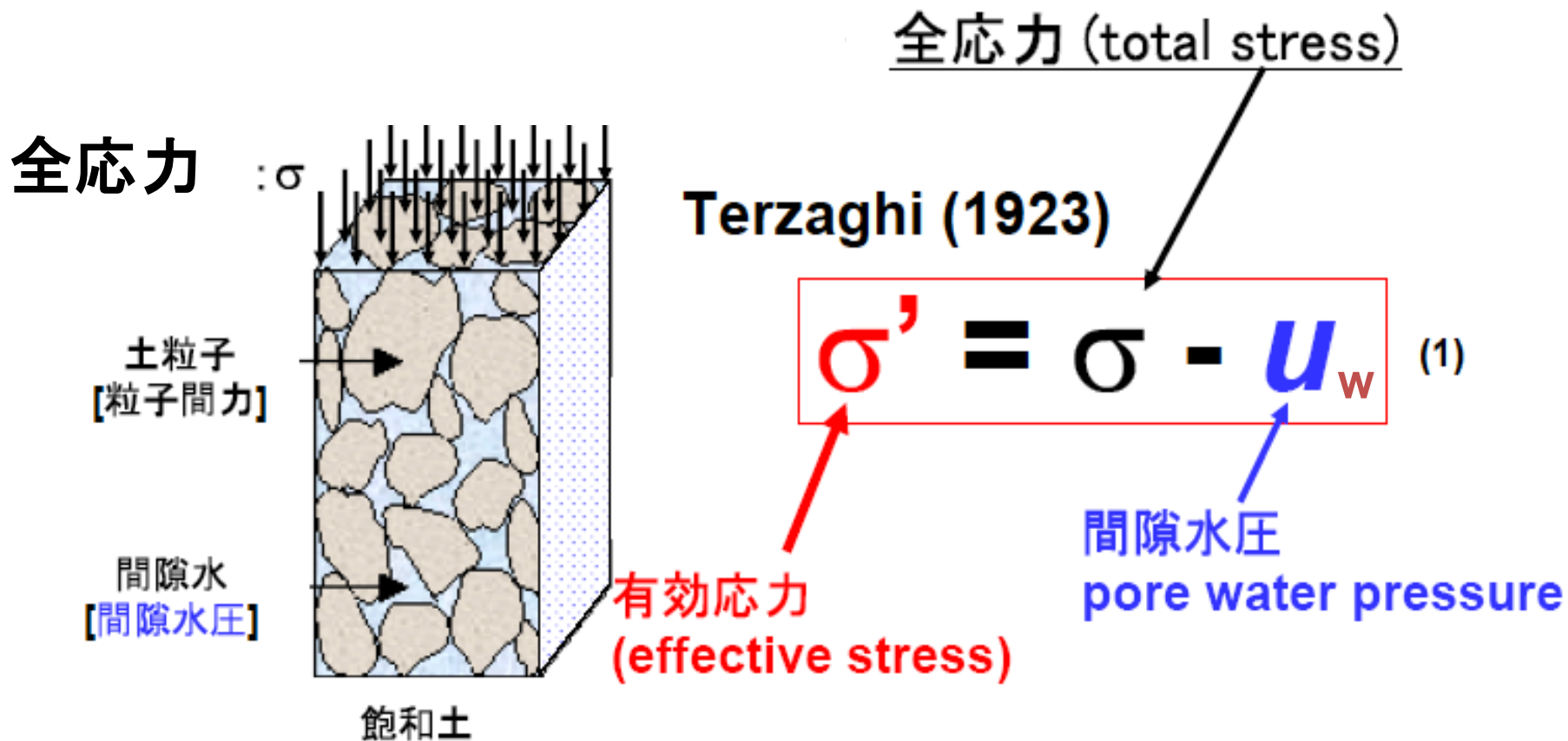
サクシオン $s = u_a - u_w$



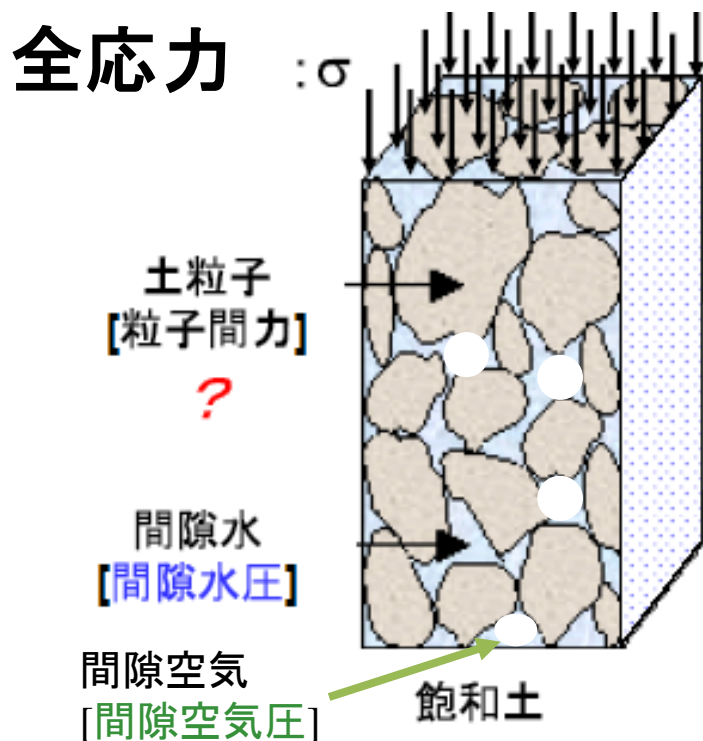
粒子間圧縮力 f

3. 二つのサクション効果

飽和土の有効応力



不飽和土の有効応力



全応力 (total stress)

Bishop (1961)

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

有効応力 (effective stress)

間隙流体圧
pore fluid pressure

Bishopの有効応力式

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

σ' :有効応力

σ :全応力

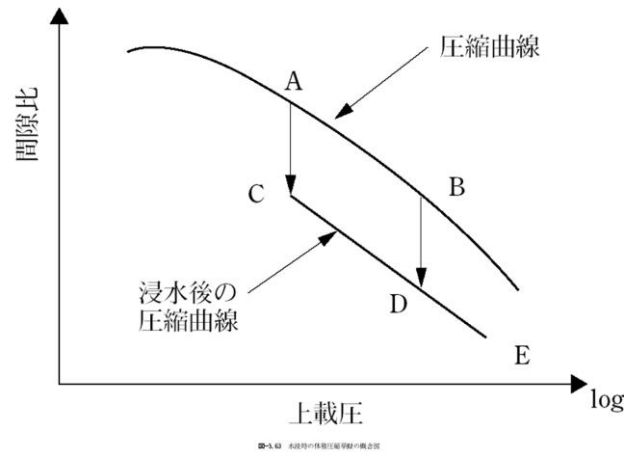
χ :履歴により決まる係数, $\chi = \mathbf{S}_r$ を提案

u_a, u_w :間隙水圧および空気圧

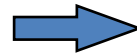
飽和土と不飽和土に関する研究の流れ

年代	飽和土に関するトピック	不飽和土に関するトピック
1920	Terzaghiの有効応力 Casagrandeの限界間隙比	
1940	Taylorのエネルギー補正式	
1960	Hvorslevの破壊規準 Roscoeのカムクレイモデル	Bishopの有効応力式 ⇔ Burlandの批判 Colemanのひずみ増分式 Matyasの状態面 Fredlundの2つの応力状態変数
1970		Fredlundの破壊規準
1990		AlonsoのBaroseraモデル Wheelerの限界状態モデル

Bishopの有効応力式とコラプス



Bishopの有効応力式



$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

外部載荷応力項

サクシヨンの寄与分
(内力的成分)

コラプス（水浸時の体積圧縮）
を説明できない

水浸すると $u_a = u_w \rightarrow \sigma'$ は小さくなる

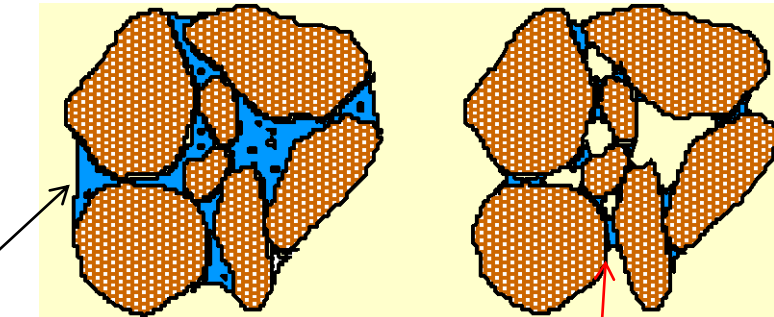


体積膨張

同時に加えるのはおかしい？

実際の土における二つのサクション効果

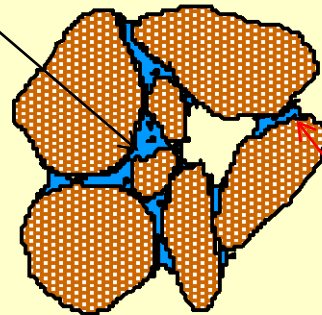
飽和に近い状態



封入不飽和

懸垂水不飽和

- ・飽和土のように、間隙水圧は中立応力として作用
- ・有効応力としてサクションを評価



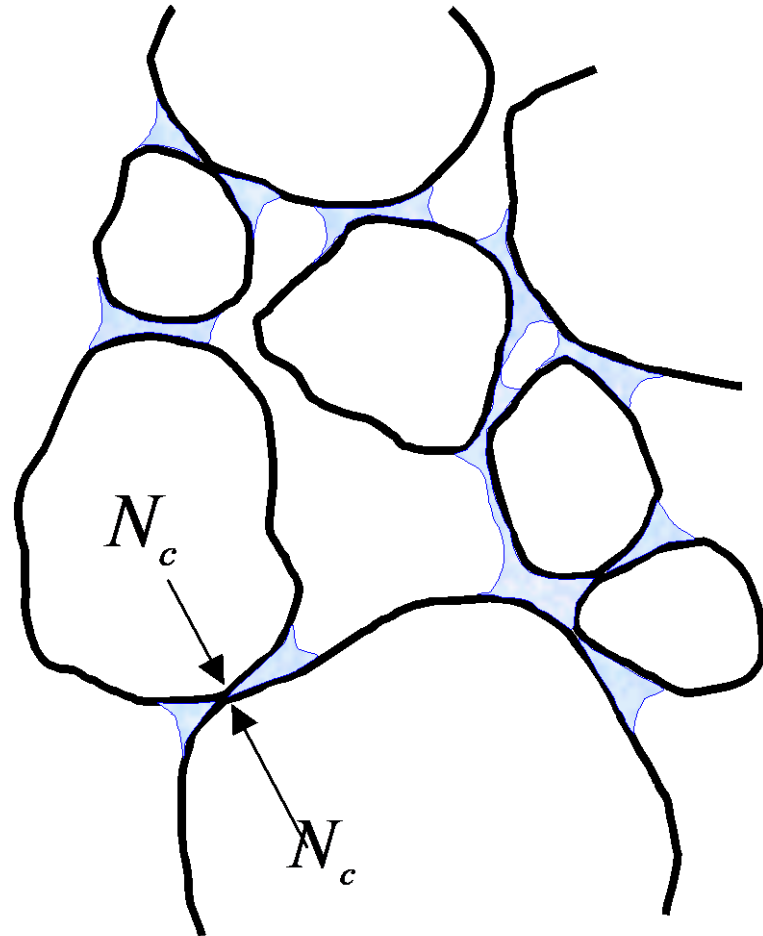
過渡的不飽和

- 土粒子
- 間隙水
- 間隙空気

別のサクション効果の考慮
= 内部拘束効果

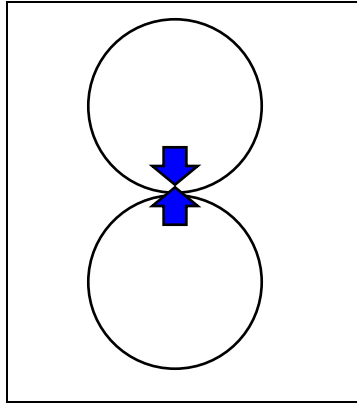
サクシジョンの内部拘束効果

- 右の図で、サクシジョンは毛管力(N_c)を生む。
- 毛管力は土粒子を引き付ける力であり、糊のような効果がある。
- 土粒子は、この糊のようなくっ付ける力(毛管力)で動き難くなる。
- これが、サクシジョンによる内部拘束効果

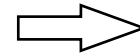


土中水はメニスカスの中に保持される。

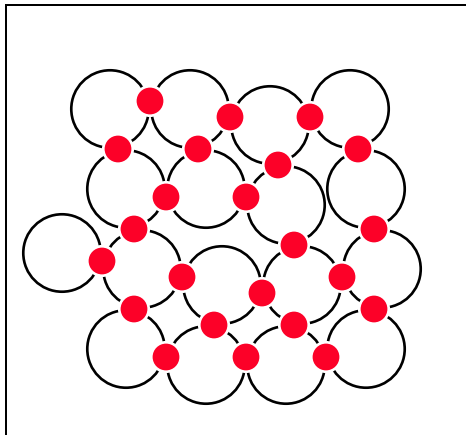
サクシヨンの影響



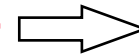
粒子間応力を増す



土骨格応力
(Bishop式)



土骨格剛性を増す



力学定数

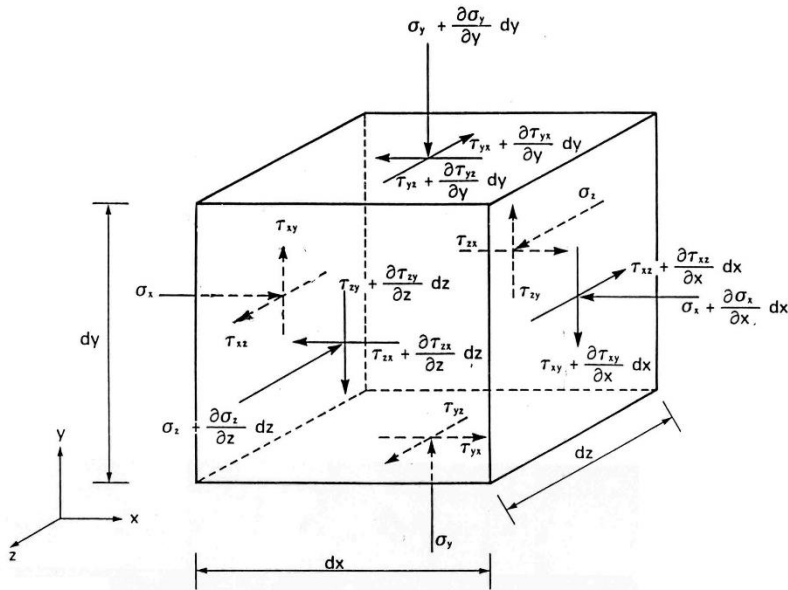
変形 λ

強度 c

2つの応力状態変数

(Fredlund & Morgenstern, 1977)

微小要素に関する力のつり合い

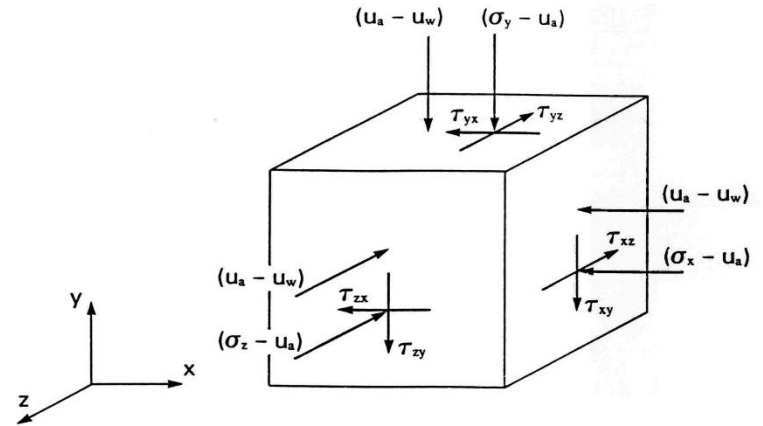


Normal and shear stresses on a cubical soil element of infinitesimal dimensions

B - 2

$(\sigma - u_a)$; 基底応力 (Net stress)

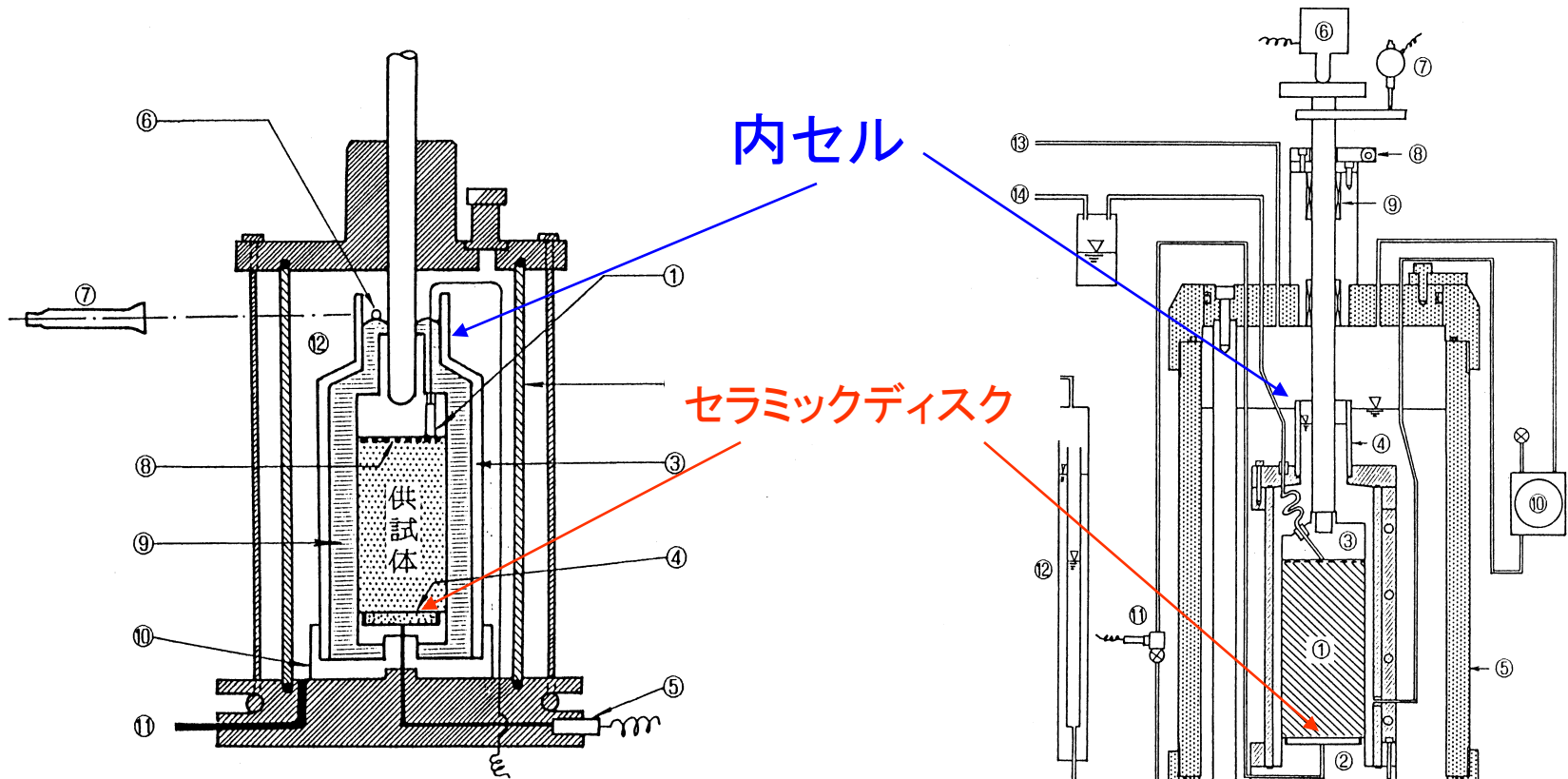
$(u_a - u_w)$; サクシオン (Suction)



The stress state variables for an unsaturated soil using the combination of $(\sigma - u_a)$ and $(u_a - u_w)$

4. 不飽和土のせん断時の挙動 (実験的方法)

不飽和土の三軸セル



内セル

セラミックディスク

- ①：間隙空気圧用圧力変換器 ②：三軸圧縮室（外セル）
- ③：一体型内セル ④：セラミック・ディスク付ベDESTAL（アクリル製）
- ⑤：間隙水圧用圧力変換器 ⑥：ステンレスボール（体積変化測定用）
- ⑦：読取り顕微鏡（体積変化測定用）
- ⑧：ガラス・ファイバー・クロス付キャップ ⑨：水銀
- ⑩：ステンレス製台座 ⑪：セル圧（水圧）供給 ⑫：セル水

- ①：供試体 ②：セラミック・ディスク付ベDESTAL
- ③：ガラス・ファイバー・クロス付キャップ ④：分割型内セル
- ⑤：三軸圧縮室（外セル） ⑥：ロードセル ⑦：変位計
- ⑧：ロッド・クランプ ⑨：ボール・ベアリング ⑩：微差圧計
- ⑪：間隙水圧計 ⑫：耐圧ビューレット ⑬：セル圧制御
- ⑭：間隙空気圧制御 ⑮：間隙水圧制御

Bishopの二重セル

改良された二重セル

セラミックディスクについて



セラミックディスクの概観

素焼きの陶磁版

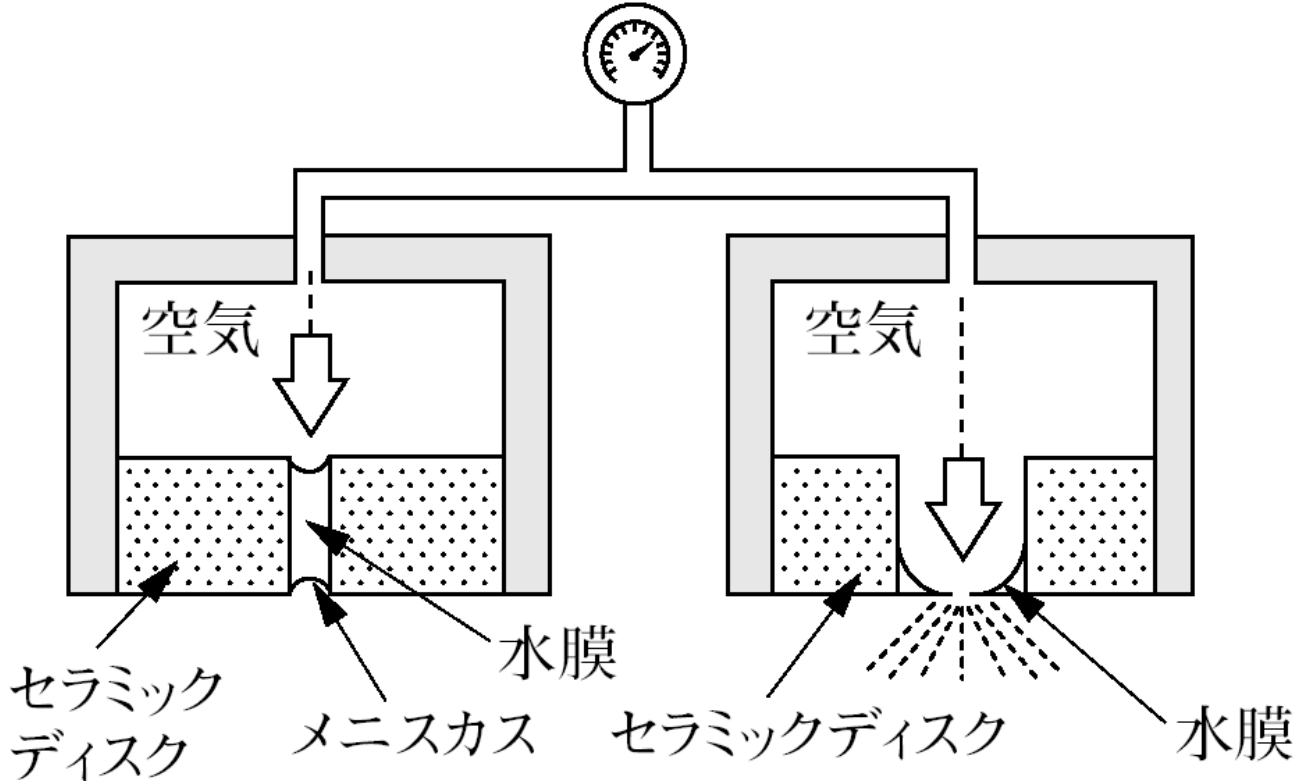
(<http://www.soilmoisture.com/0600.html>より)



セラミックディスクの表面の
電子顕微鏡写真

(<http://www.hosokawamicron.co.jp/main/1news/news2/0040210.html>より)

セラミックディスクの原理



(a) 孔径が小さく空気圧が
AEV以下の場合

(b) 孔径が大きく
空気圧がAEV以上
の場合

AEV = Air Entry Value (空気侵入値)

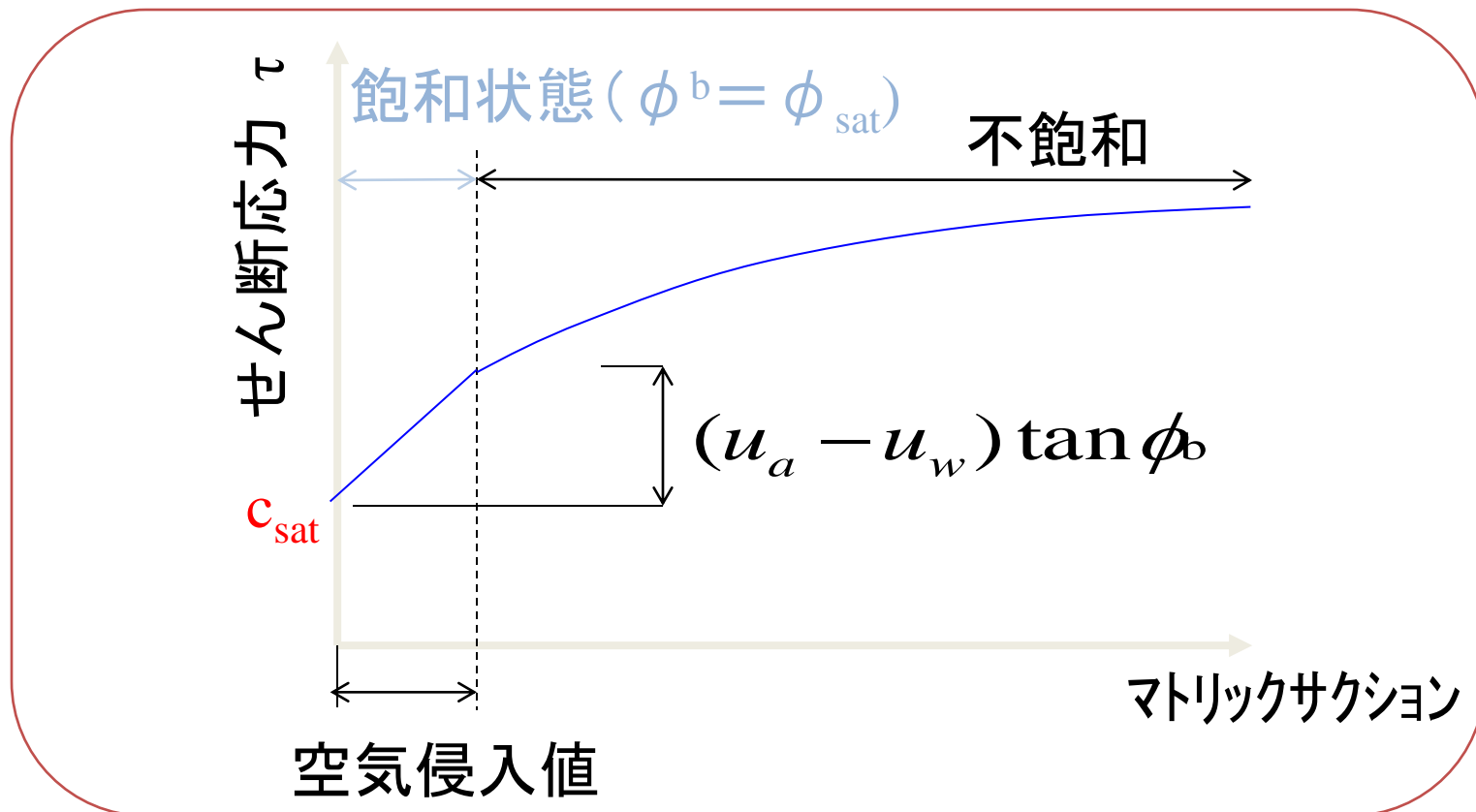
Fredlundの破壊規準

$$\tau_f = c_{sat} + (\sigma - u_a) \tan \phi_{net} + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

飽和状態での粘着力

基底応力によるせん断強度
実用的には $\phi_{net} = \phi_{sat}$

サクシオンによるせん断強度増分



不飽和状態でのせん断強度を求めるには？

$$\tau_f = c_{\text{sat}} + (\sigma - u_a)_f \tan \phi_{\text{net}} + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

飽和化試料の
三軸圧縮試験

水分特性試験

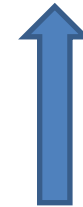
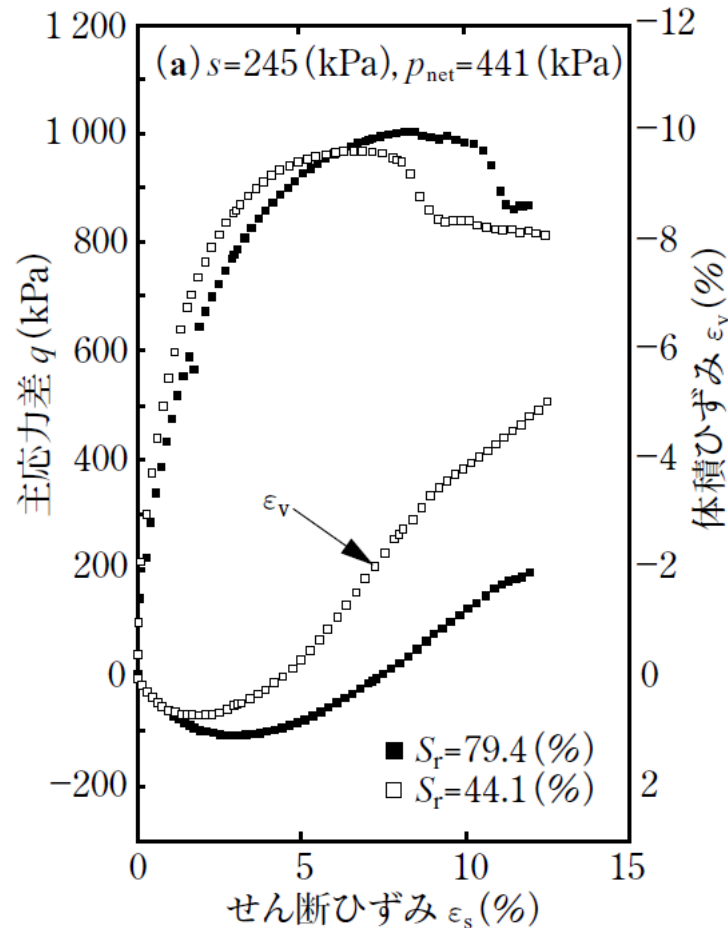
または

サクションを測定した
一軸圧縮試験

+

不飽和状態でのサクション

せん断時のダイレイタンスー



飽和度が低い
(サクションが高い)
とダイレイタンスーは
増加

図-3.19

ダイレイタンシーへのサクシヨンの影響

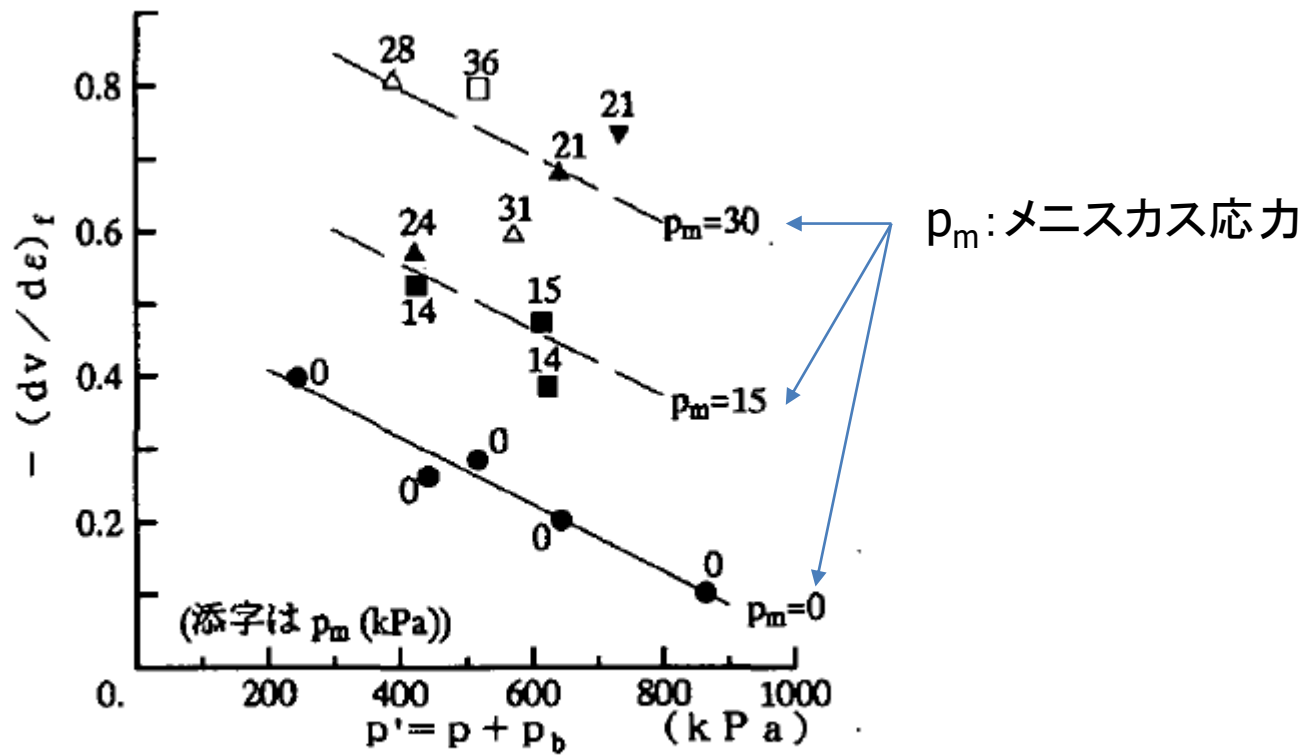


図-7 メニスカス応力がダイレイタンシーに与える影響

(軽部ら, 土木学会論文集 No. 575/111-40, 49-58, 1997)

不飽和土の限界状態について

限界状態を用いた構成モデル

Alonso et al.(1990)

Kohgo et al.(1993)

Wheeler & Sivakmar(1995)

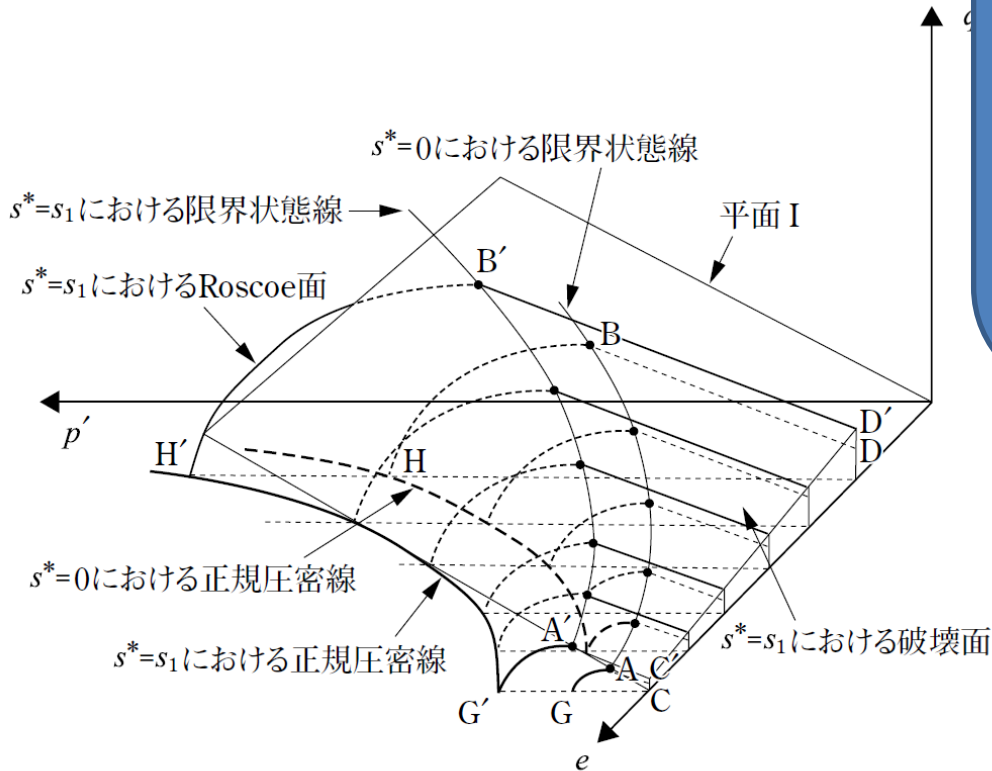
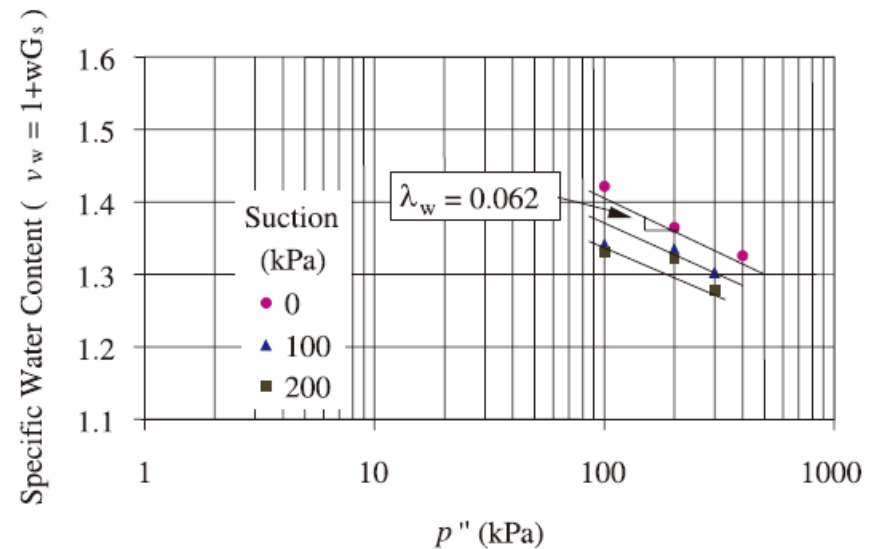
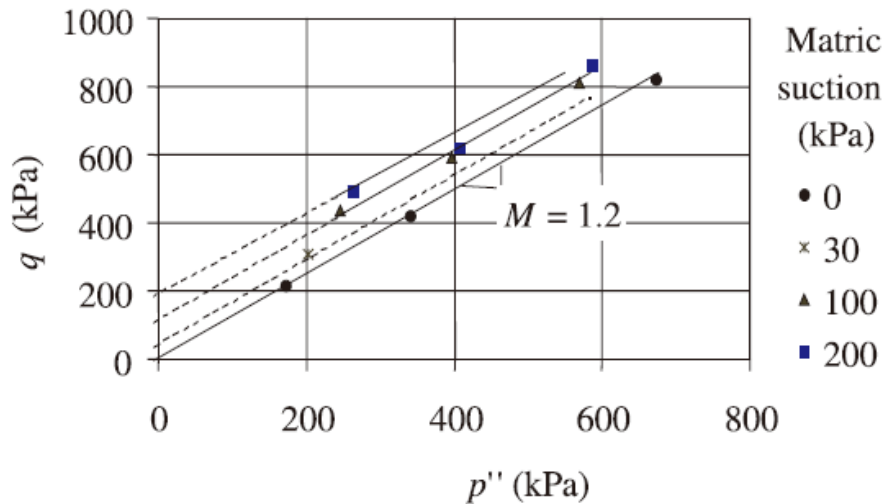


図-4.32 不飽和土に対する状態境界面

不飽和土の試験の問題点
 ○体積変化の測定方法
 ○セラミックや供試体の透水性の
 低さにどう対処するか

限界状態線の存在について

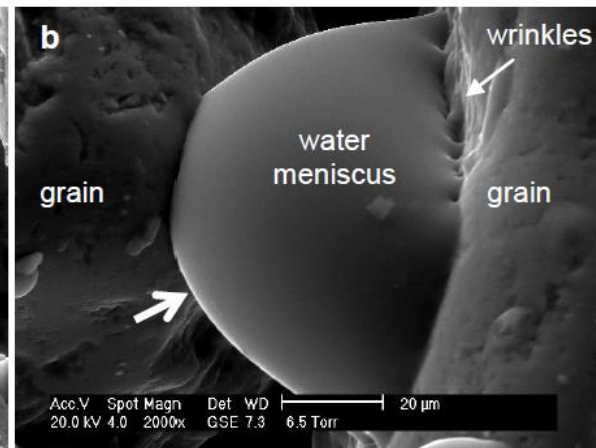
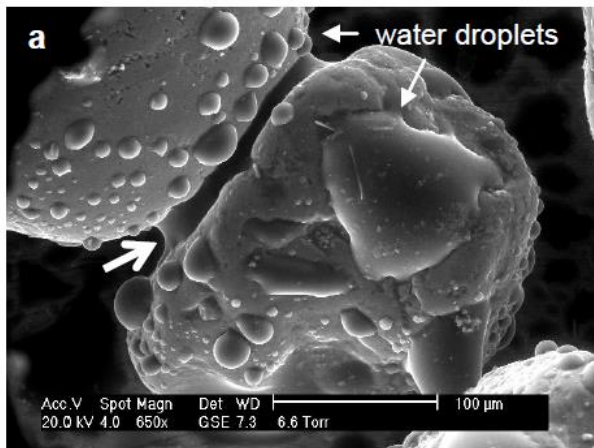
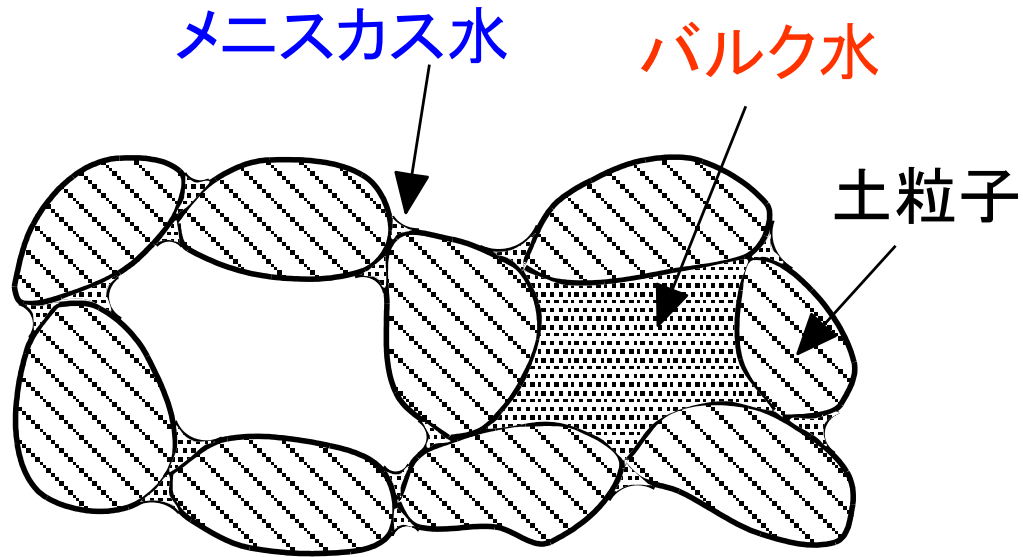
(Q. Wang et al., Can. Geotech. J. 39: 213–218, 2002)



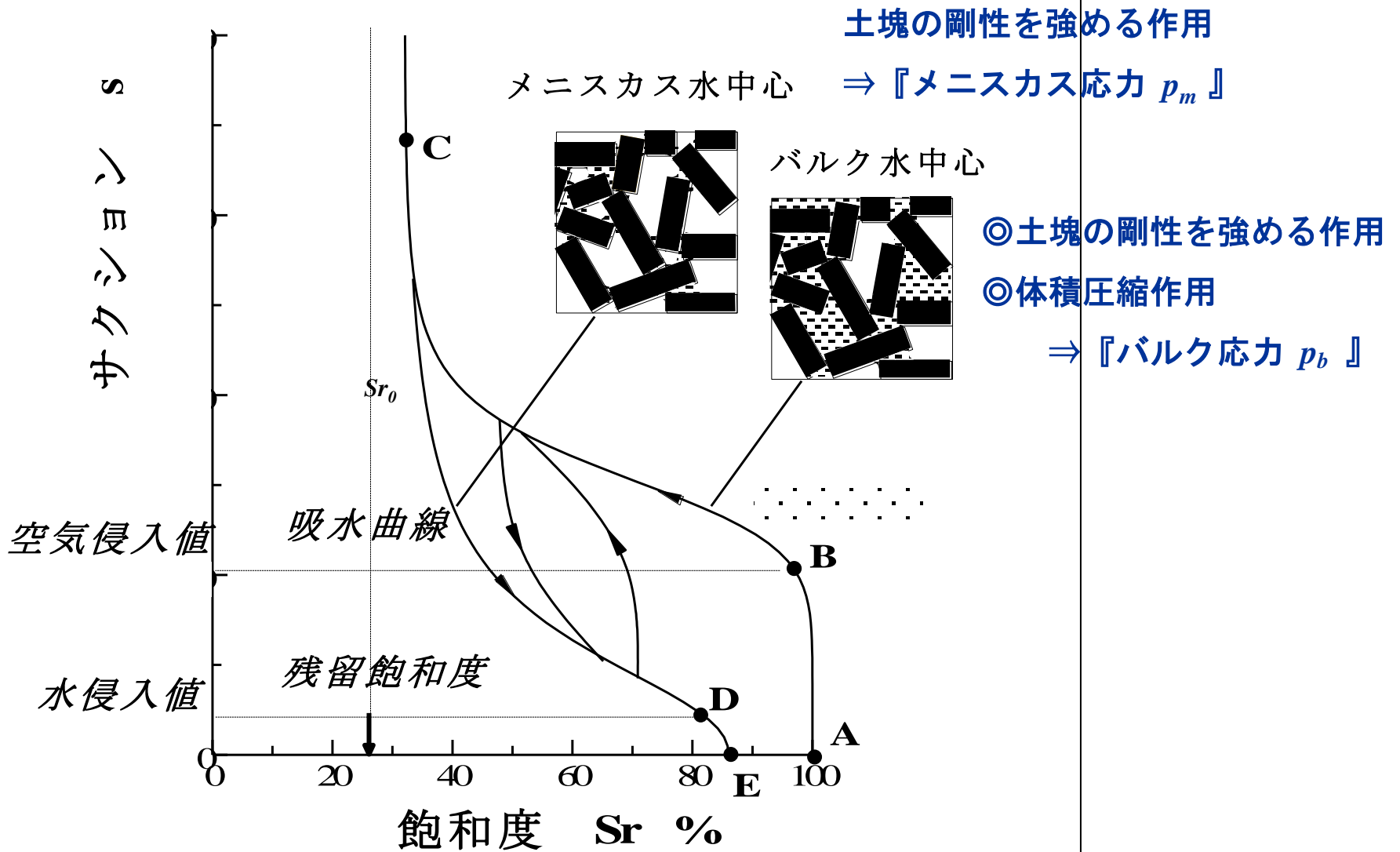
p''	$p'' = (1/3)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - u_a$
q	$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$
s	$s = (u_a - u_w)$
v	$v = 1 + e$
v_w	$v_w = 1 + wG_s$

($q \sim p'' \sim s$)空間に、限界状態線が存在する

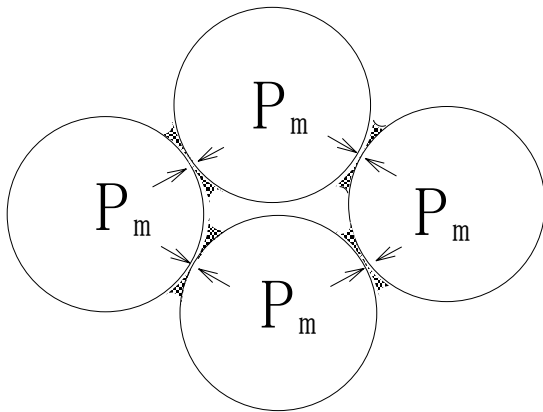
バルク水とメニスカス水の概念図



★ 水分特性曲線と不飽和土の間隙水の分布状態 ★



メニスカス水と粒子間圧縮内力



P_m : メニスカス水による圧縮内力



粒子接平面に垂直に作用

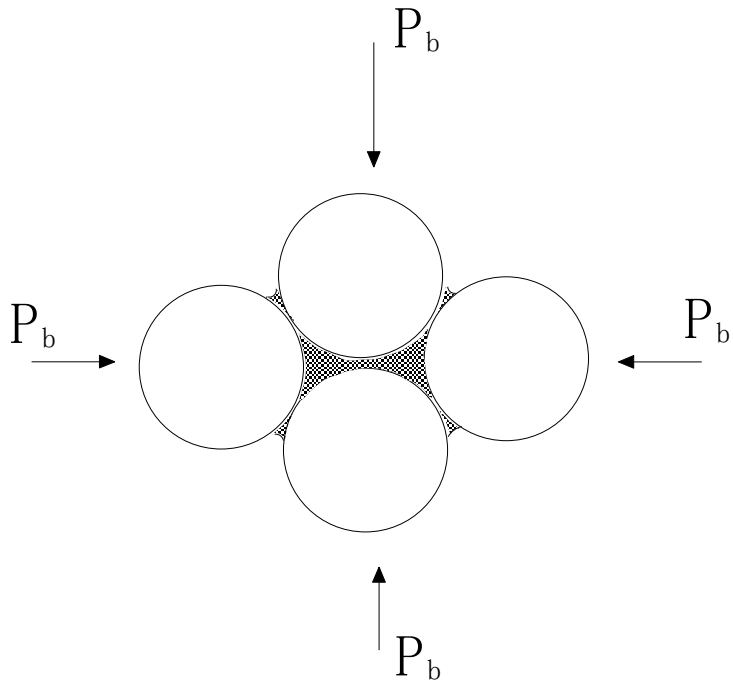


粒子接点の滑りに対する抵抗を増加



メニスカス応力

バルク水による圧縮内力



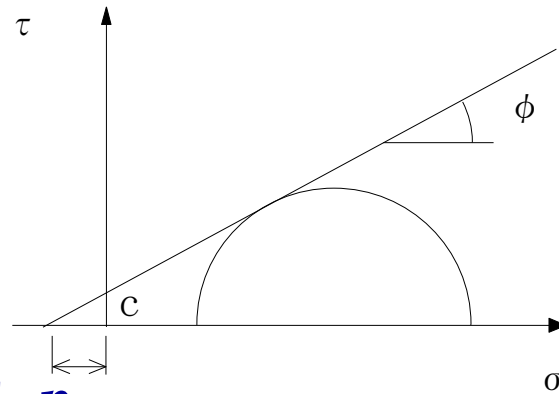
P_b : バルク水による圧縮内力

粒子接点に対しせん断力を作用

粒子接点に滑りを生じる

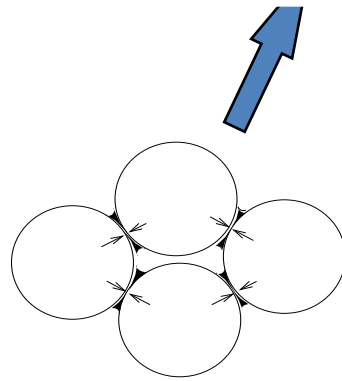
バルク応力

サクシヨン応力の定義

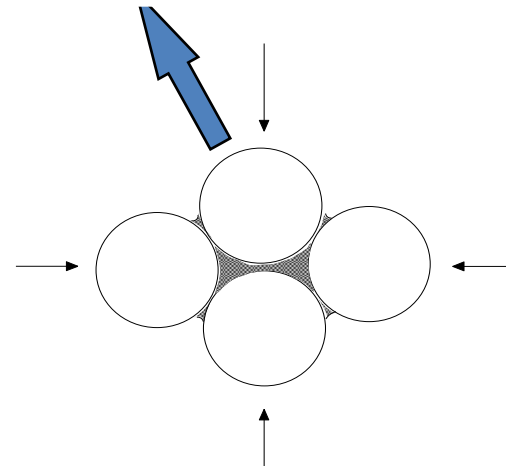


サクシヨン応力 p_s

$$p_s = p_m + p_b = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} S$$



メニスカス応力



バルク応力

不飽和土の破壊時の応力状態について (基底応力による三軸圧縮試験整理結果)

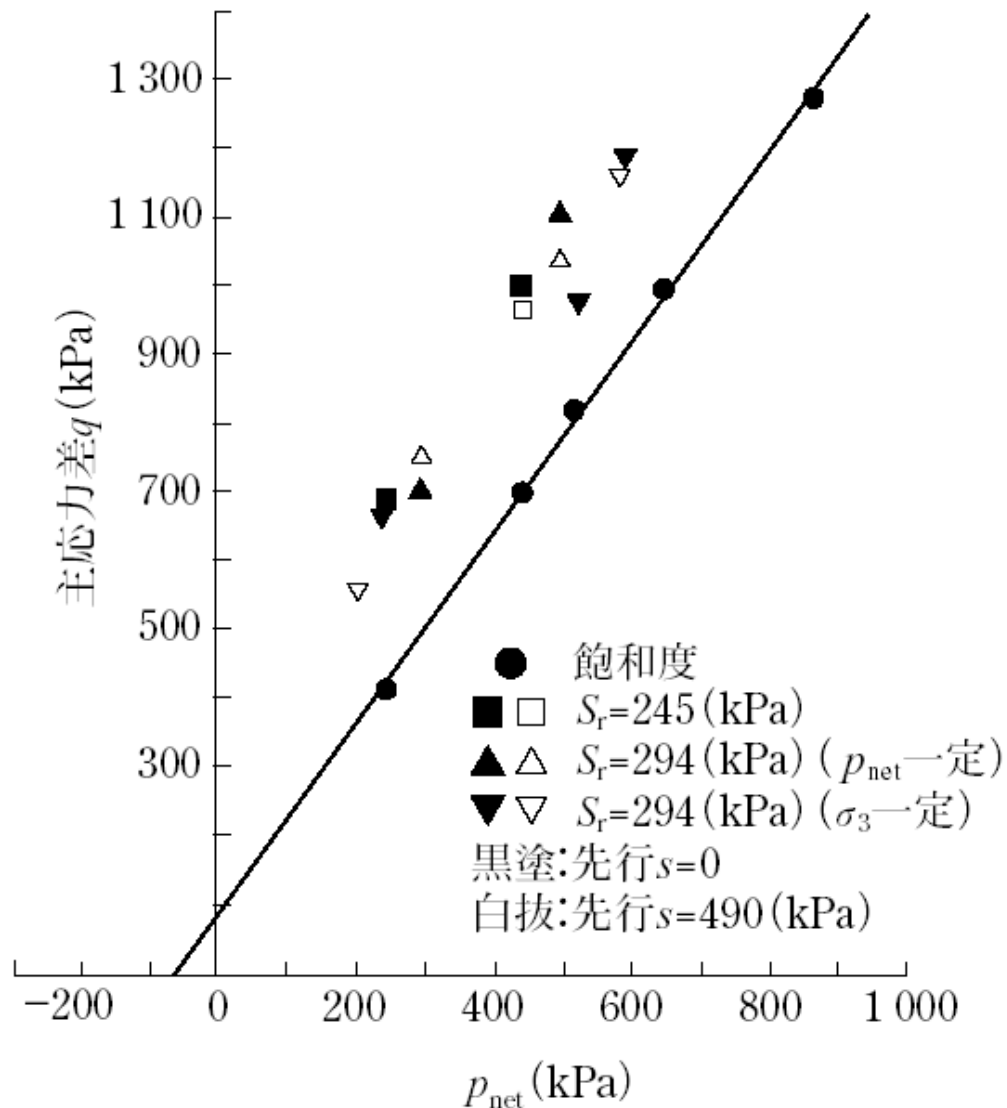


図-3.25 主応力差がピーク時の応力状態 (p_{net}, q)²⁰

不飽和土の破壊時の応力状態について

(サクション応力を考慮した三軸圧縮試験整理結果)

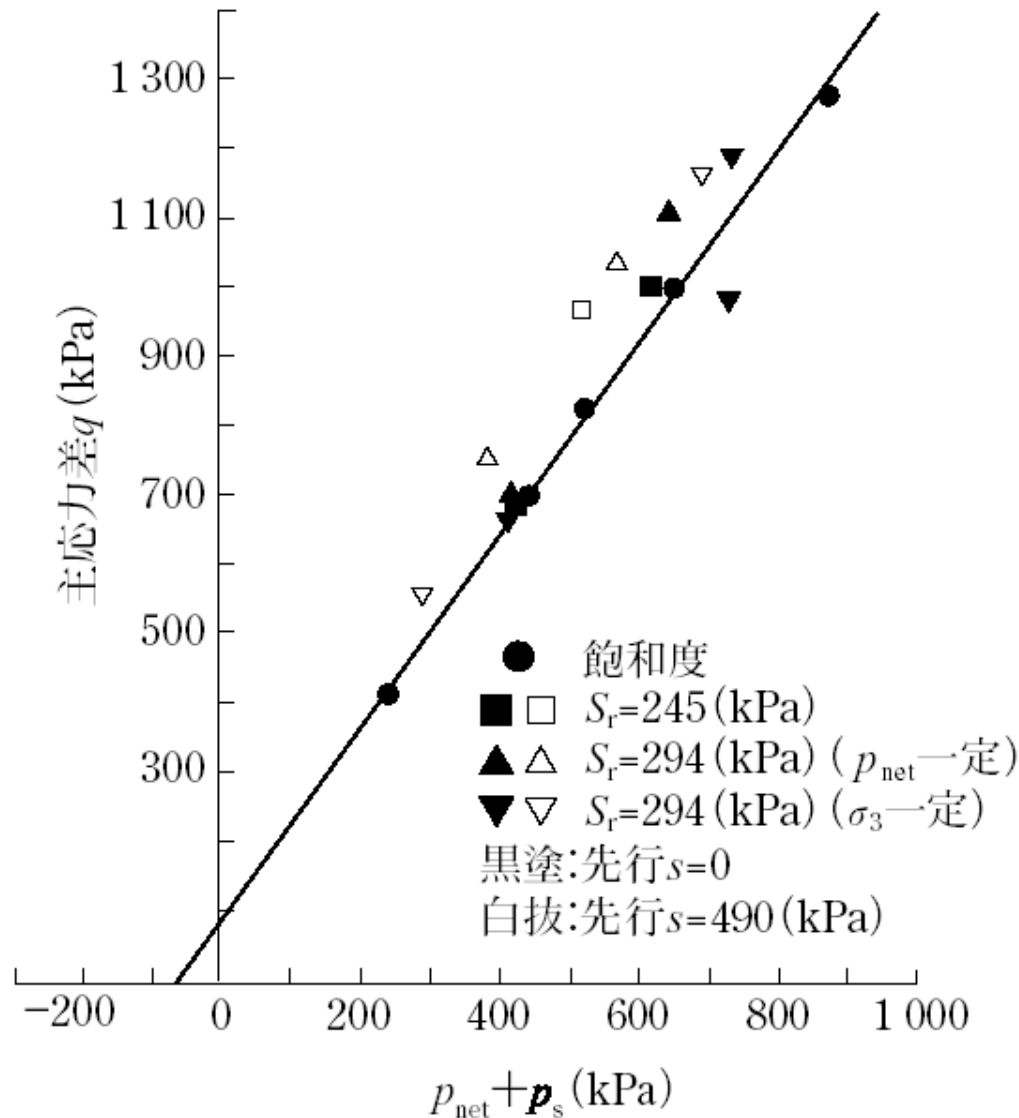
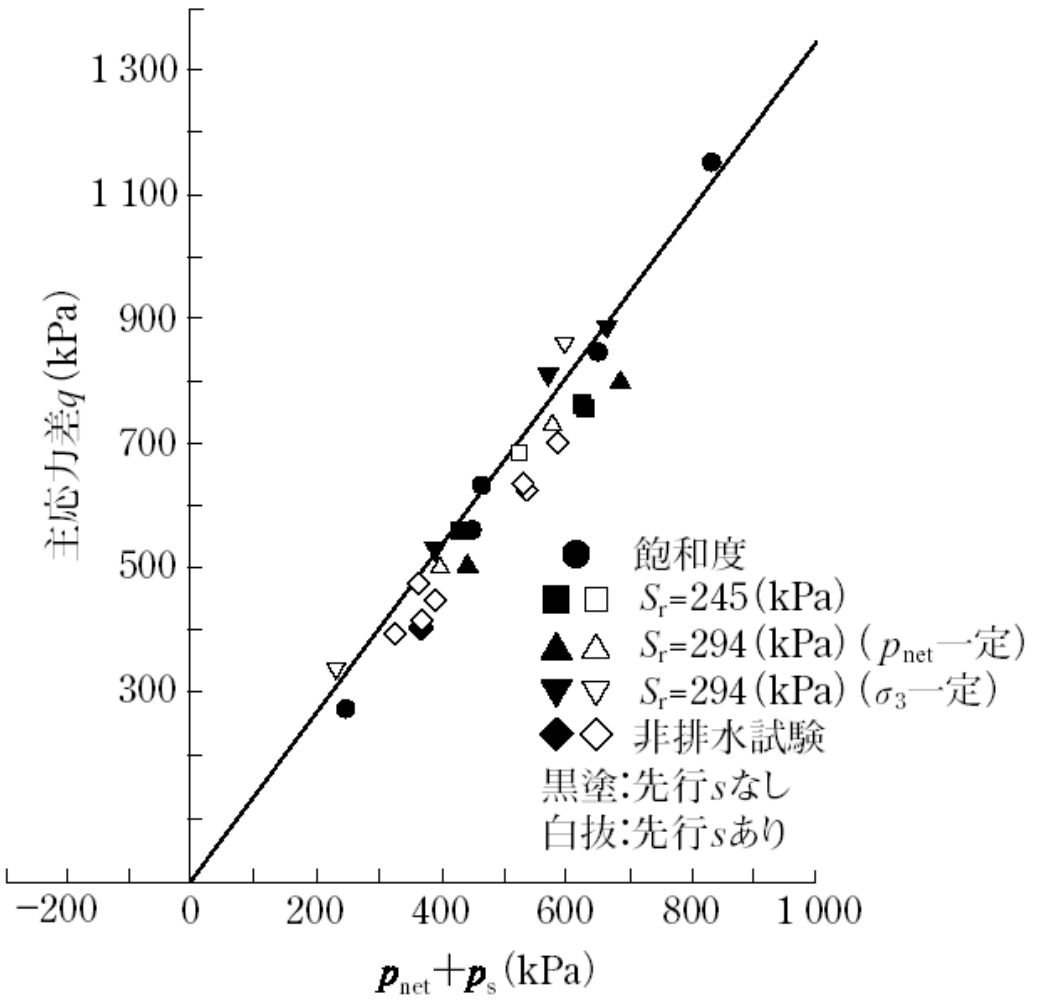


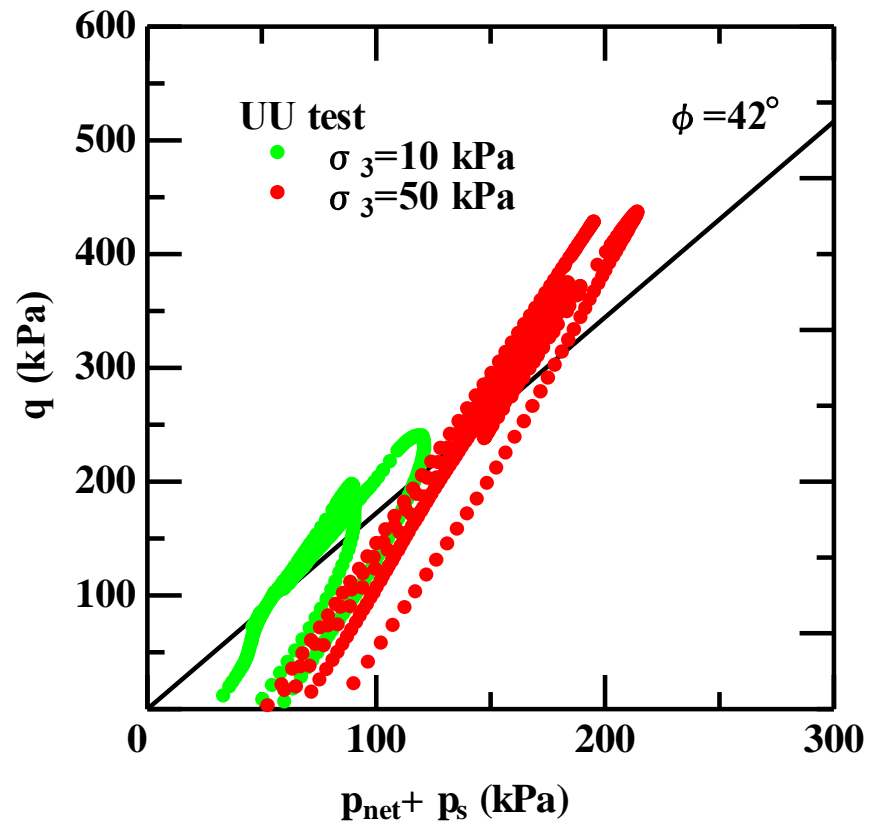
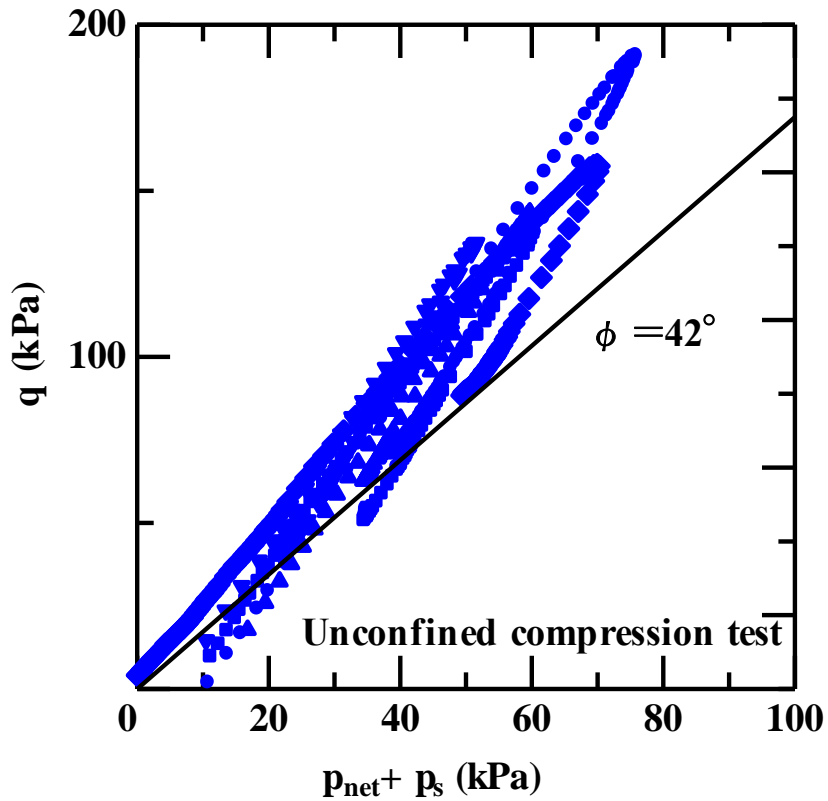
図-3.26 種差応力ピーク時の応力状態 ($p_{\text{net}} + p_s, q$) 平面²⁰⁾

不飽和土の限界状態へのサクシオン応力の影響

(サクシオン応力を考慮した最大圧縮点での三軸圧縮試験整理結果)

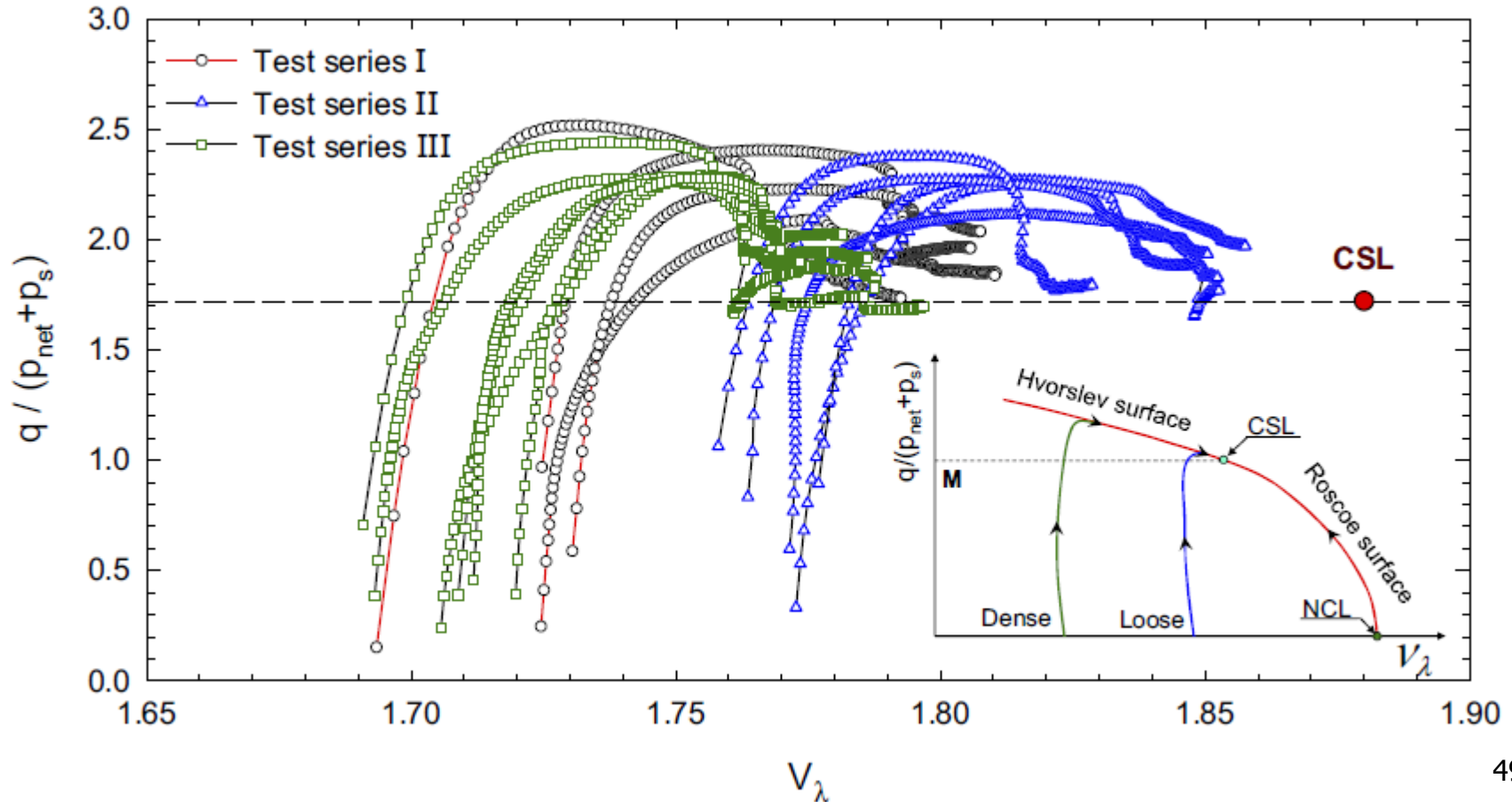


不飽和土の一軸圧縮試験における 残留強度に至るまでの応力経路

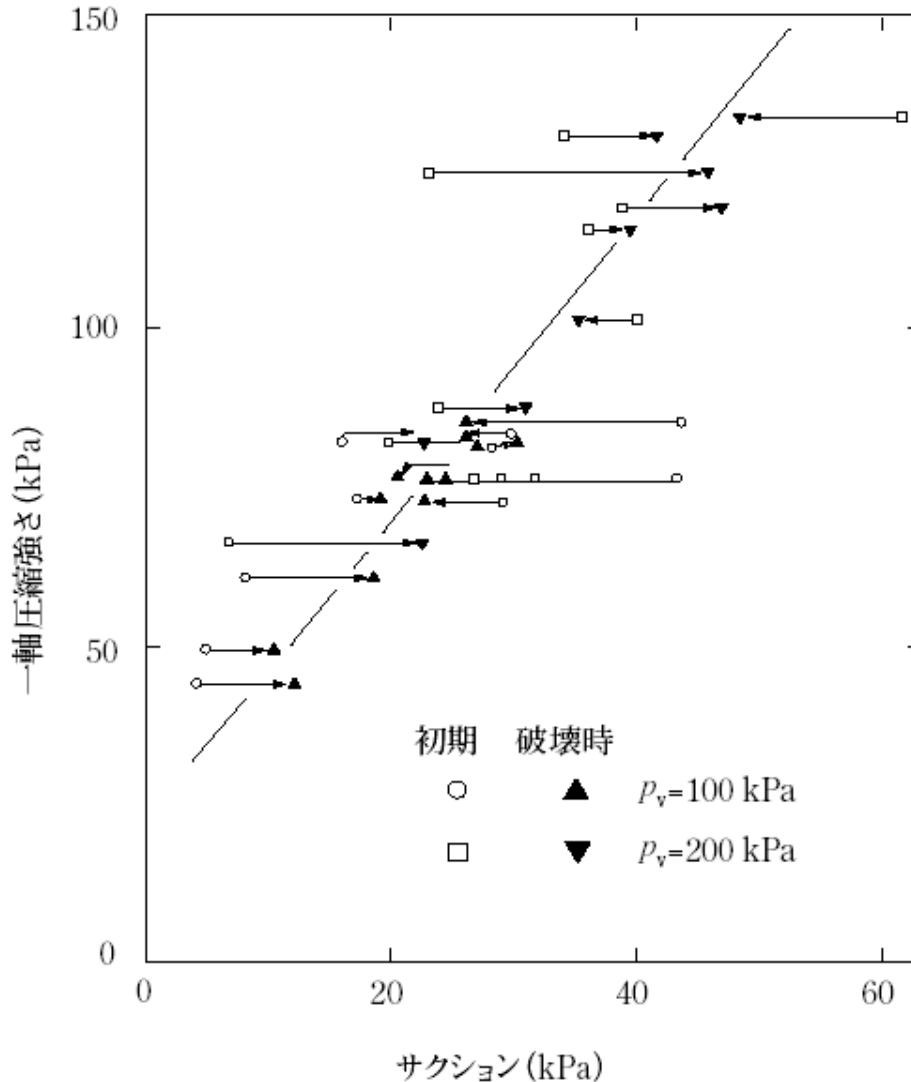


せん断時に膨張する不飽和土での 限界状態の存在 (Kim et al, 2016)

不飽和土の一軸圧縮試験



高飽和領域における破壊時サクシヨンと一軸圧縮強さの関係 (阿部(1994))



- 予圧密した試料を成形後、一軸圧縮試験を実施。

- 予圧密した試料 ⇒ 高飽和度



低飽和度では？

- 一軸圧縮試験 ⇒ 無拘束圧

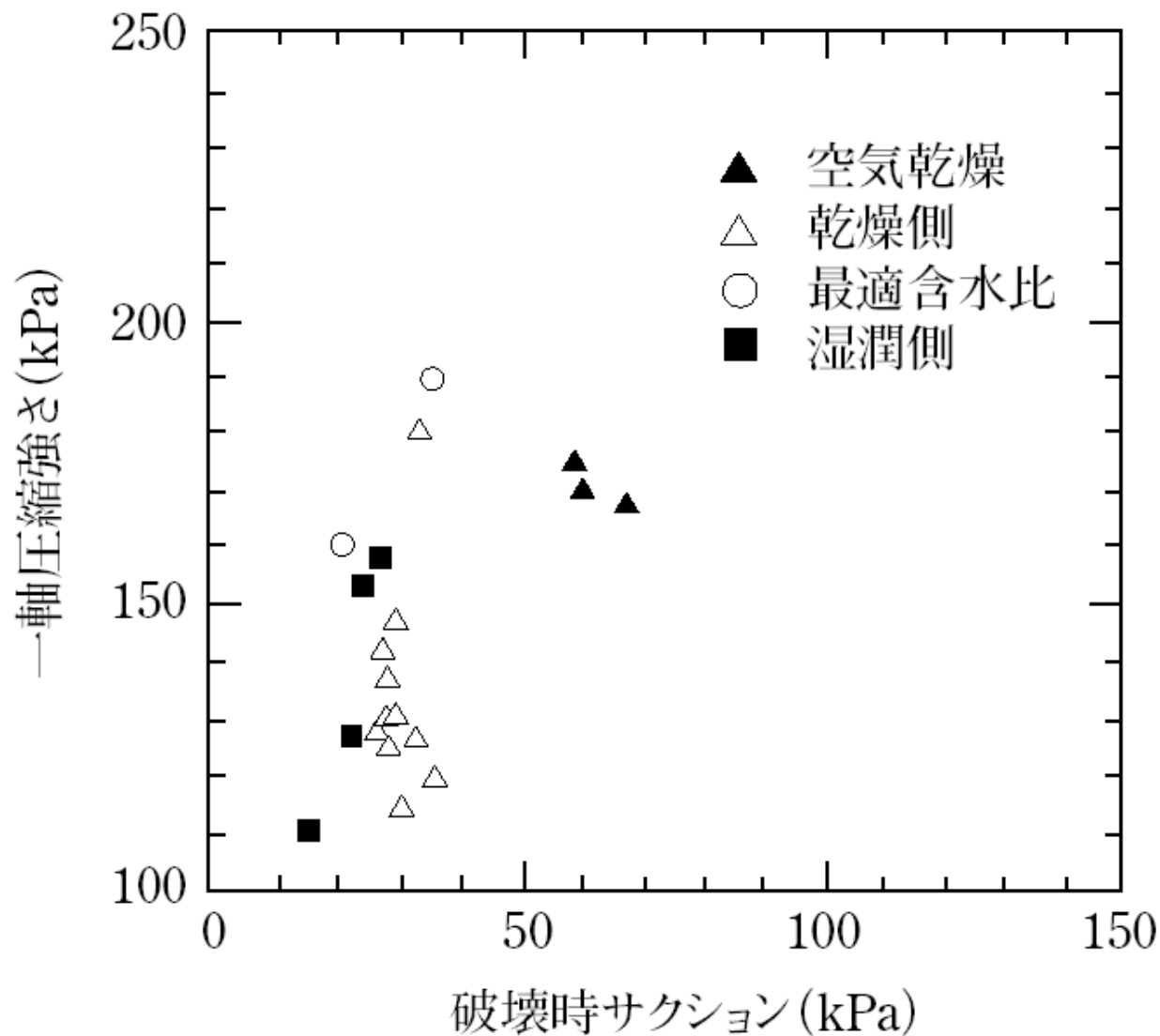


低拘束圧状態での挙動

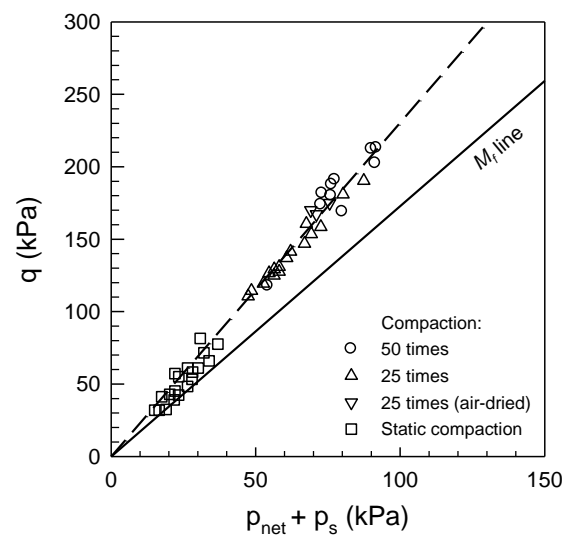
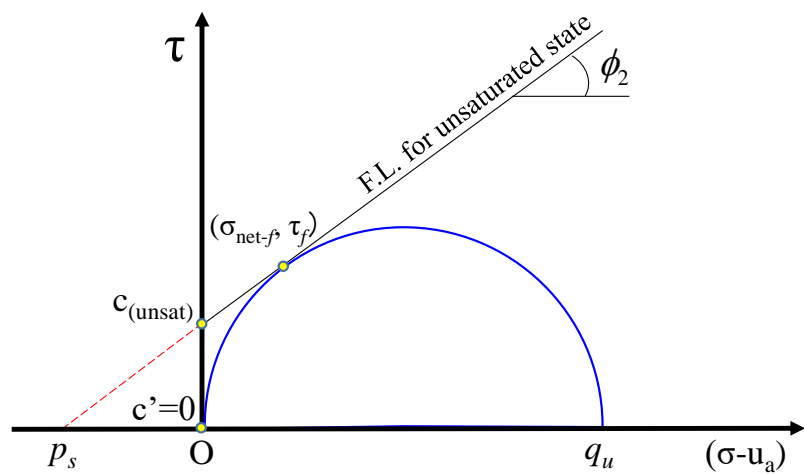


斜面の表層崩壊

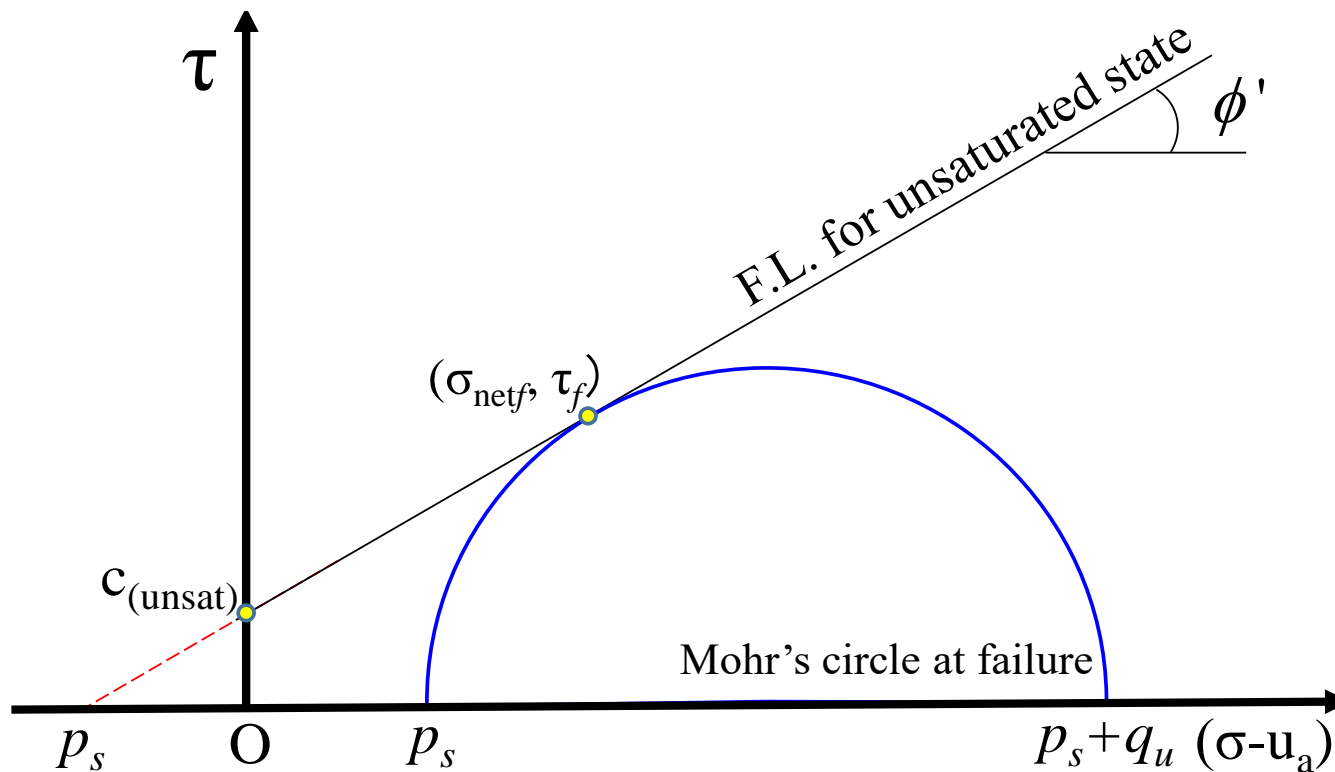
締固め供試体における破壊時サクシヨンと一軸圧縮強さの関係



締め固め供試体における破壊時の応力状態の解析



一軸圧縮試験における2つのサクション応力の効果を考慮した場合の破壊時モール円と破壊包絡線

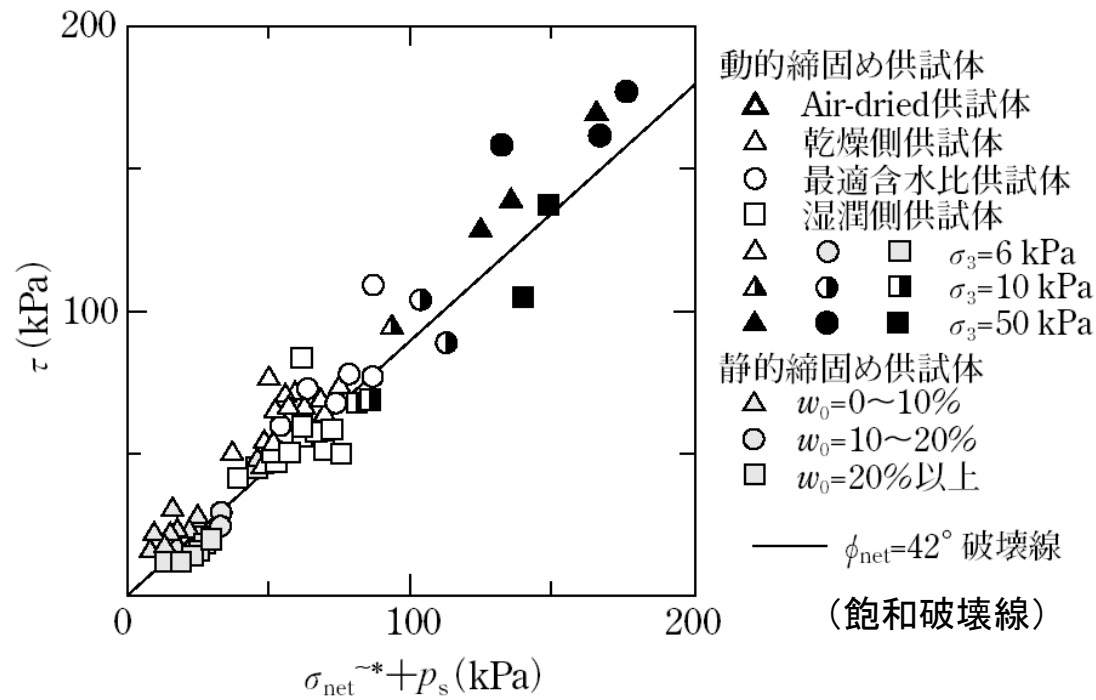
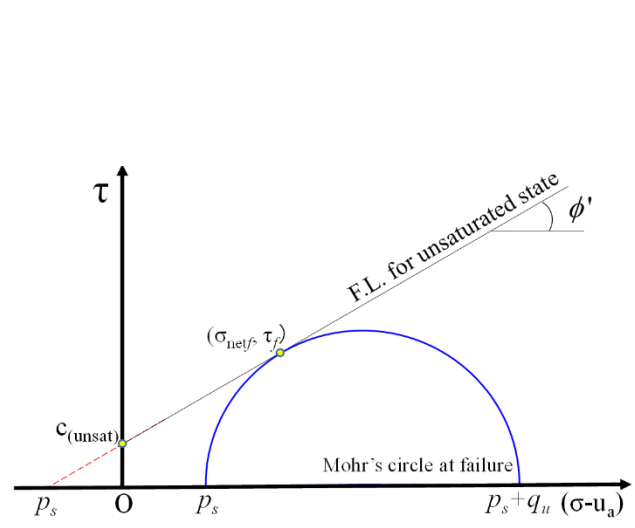


内部拘束効果

拘束応力的効果

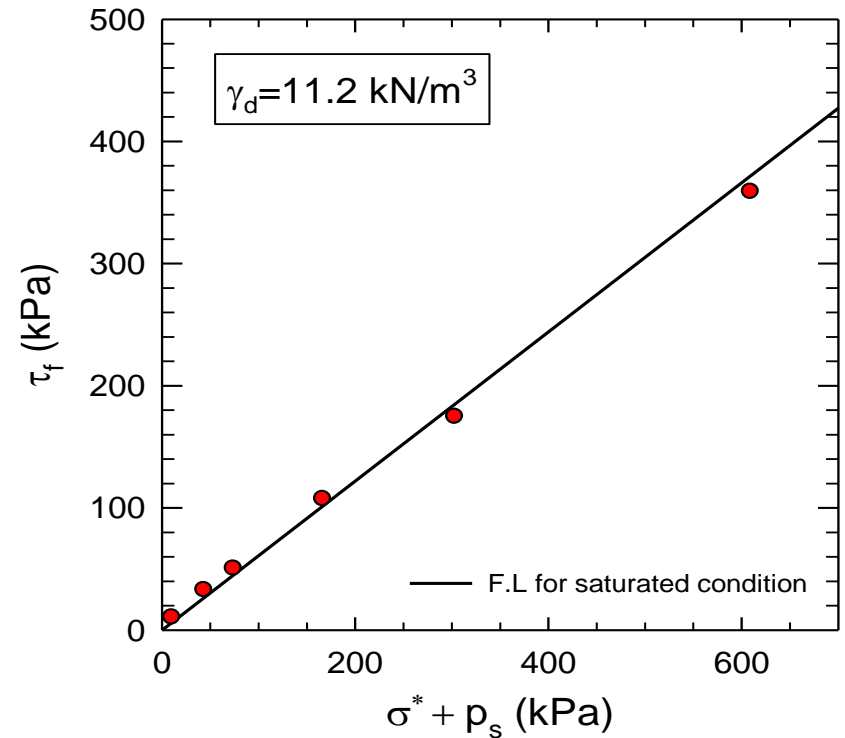
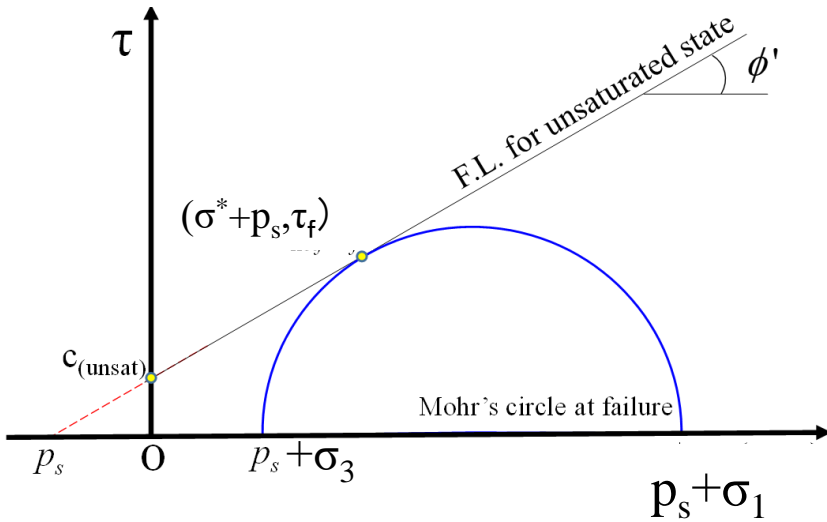
2つのサクション応力の効果を考える

一軸圧縮試験におけるサクション応力を考慮した破壊時モール円と破壊包絡線



低拘束圧状態では、2つのサクション応力の効果が影響

2つのサクション応力の効果を考慮した場合の一軸・三軸圧縮試験の破壊包絡線



不飽和土では、2つのサクション応力の効果が破壊時に影響

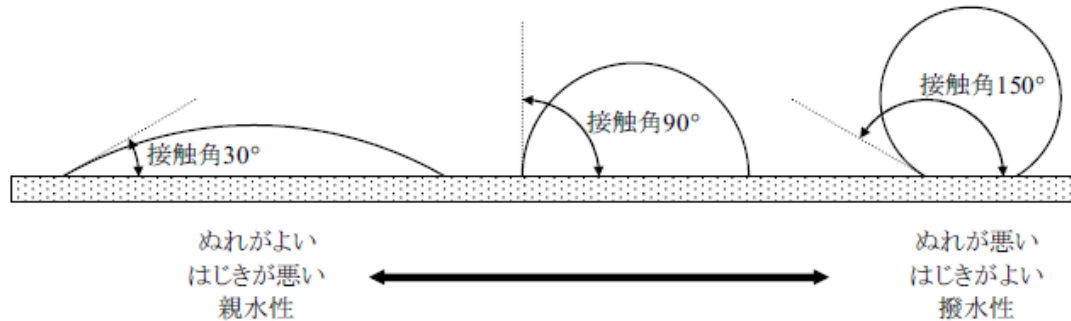
5. 不飽和土の研究成果の応用例

疎水材を用いた高機能遮水層の開発

共同研究者; 金 秉洙 准教授(壇国大学)

研究背景

自然界に存在する疎水性土

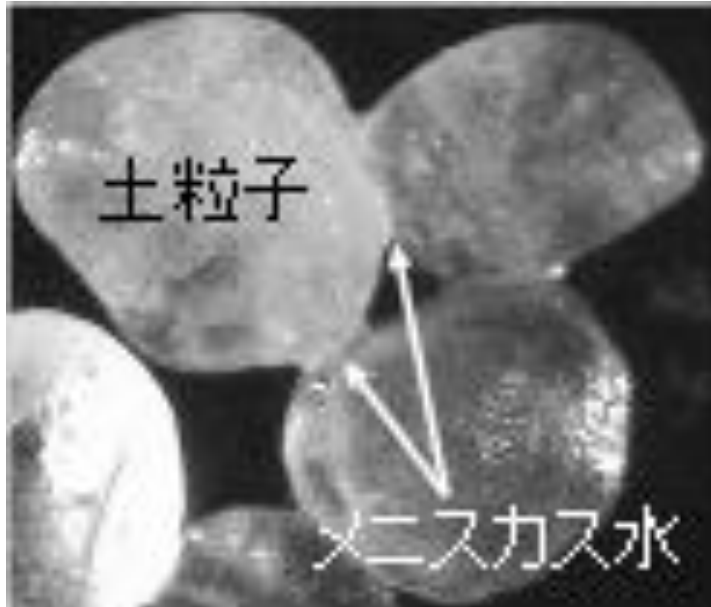


自然地盤内の疎水性層; 植物油, バクテリア, 山火事などが原因

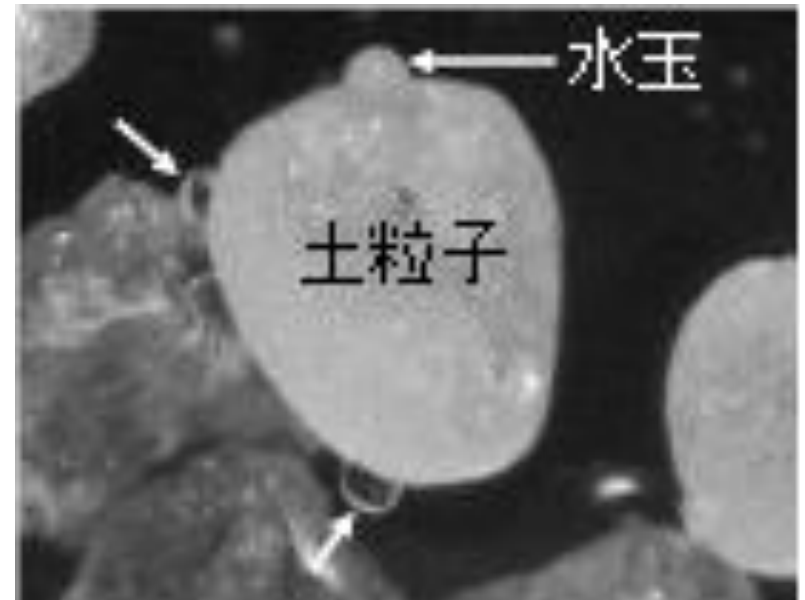


疎水性層の影響による氾濫

粒子レベルの水のつき方の違い



(a) 親水性砂
(b) 疎水性砂



疎水性をもつ土粒子の表面は、水に対して 拡散障壁として作用。

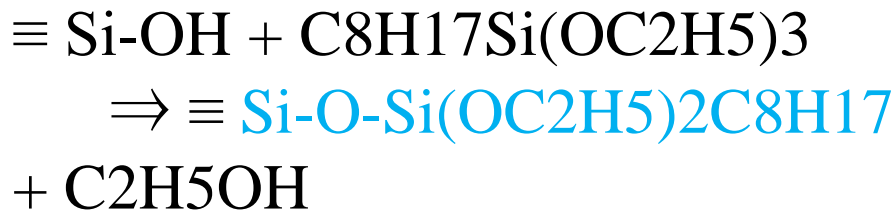
疎水性の発生メカニズム



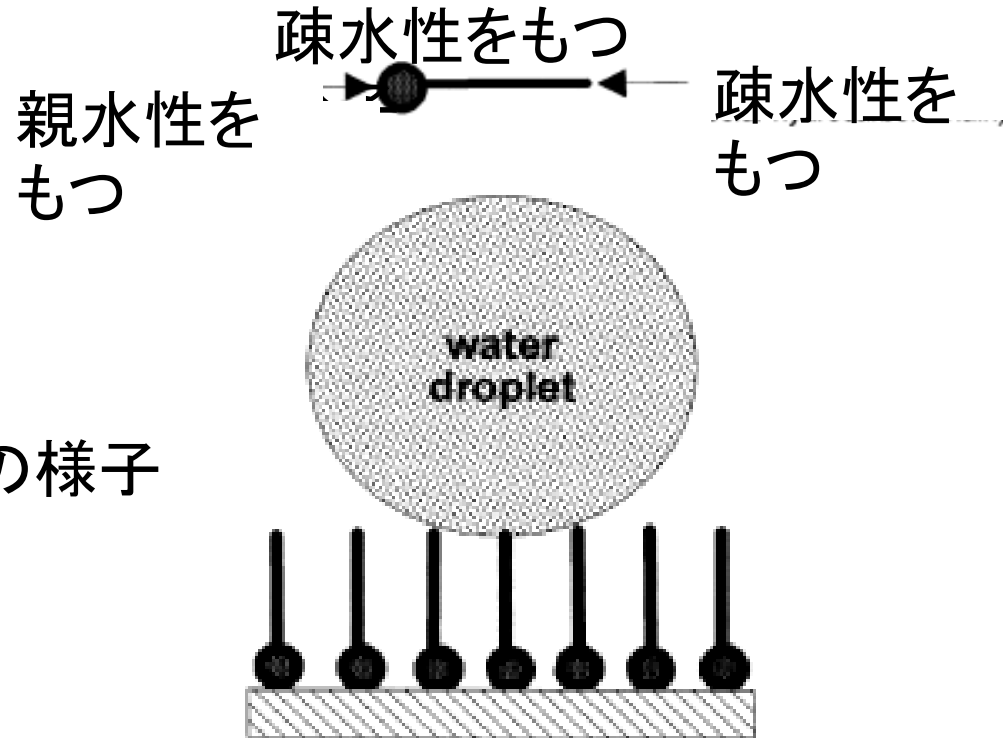
疎水性をもつ豊浦砂上の水滴の様子

:疎水材になった豊浦砂は、落下した水を浸透させない。

シラン処理における化学変化



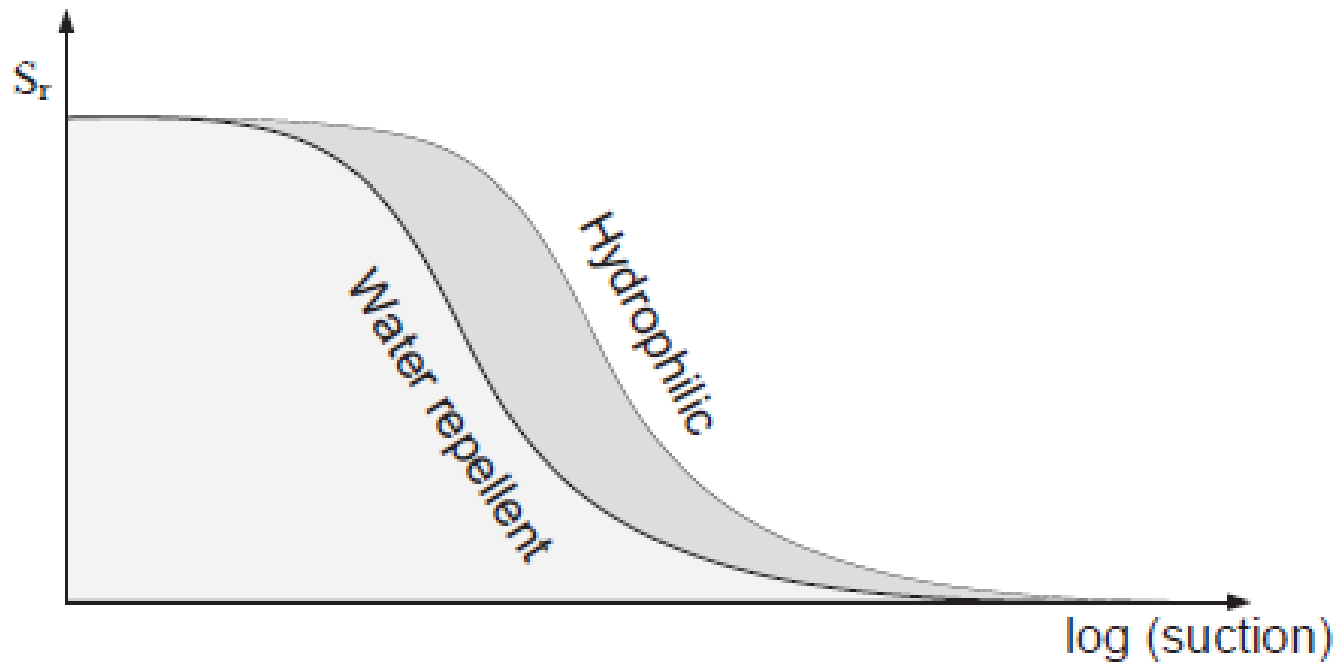
両親媒性物質
(テトラエトキシシラン化合物)



両親媒性物質の疎水性側の部分が材料表面に整列し、水の水の双極性と反発する
両親媒性物質は数分子レベルの層でも疎水性を発揮する

疎水性が土の力学特性与える 影響（その1）

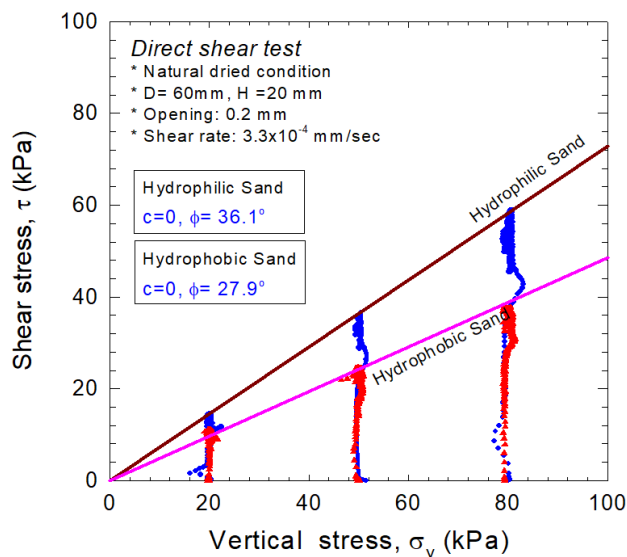
土の水分特性に違いが生じる



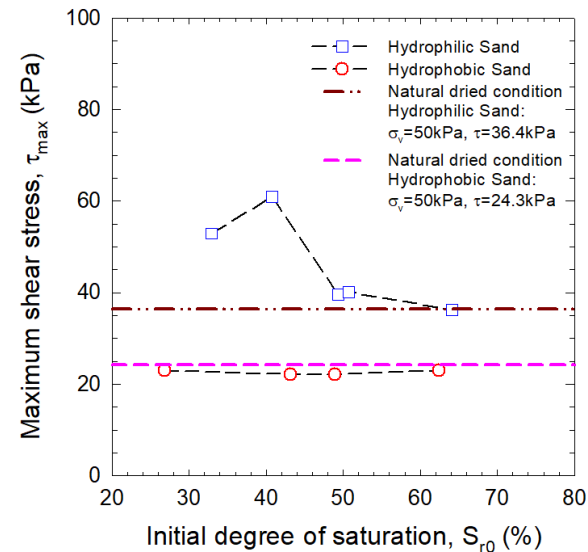
疎水性が土の力学特性与える影響 (その2)

内部摩擦角が変化する

• Direct Shear Test



< Direct Shear Test
in natural dried condition >

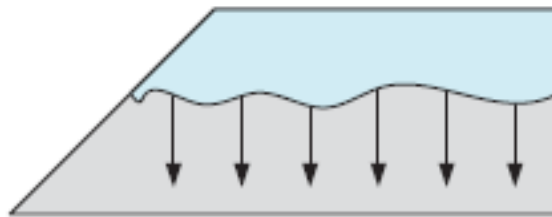


< Variation of τ_{max}
according to the initial S >

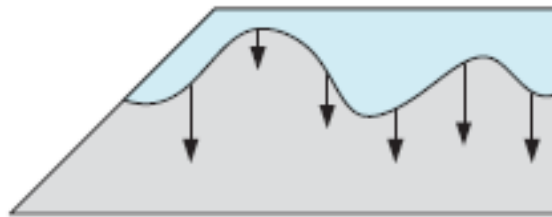
疎水性を持つ層がある場合の 雨水浸透の違い

地表面が親水性の場合

(a) 

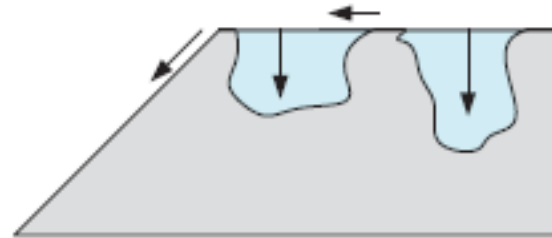


(b) 

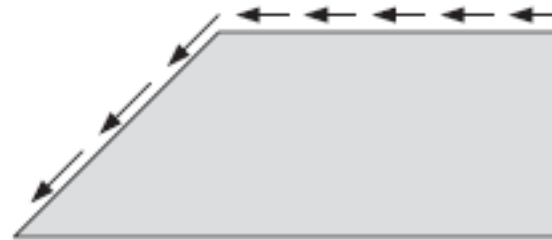


地表面がかなり疎水性の場合

(c) 



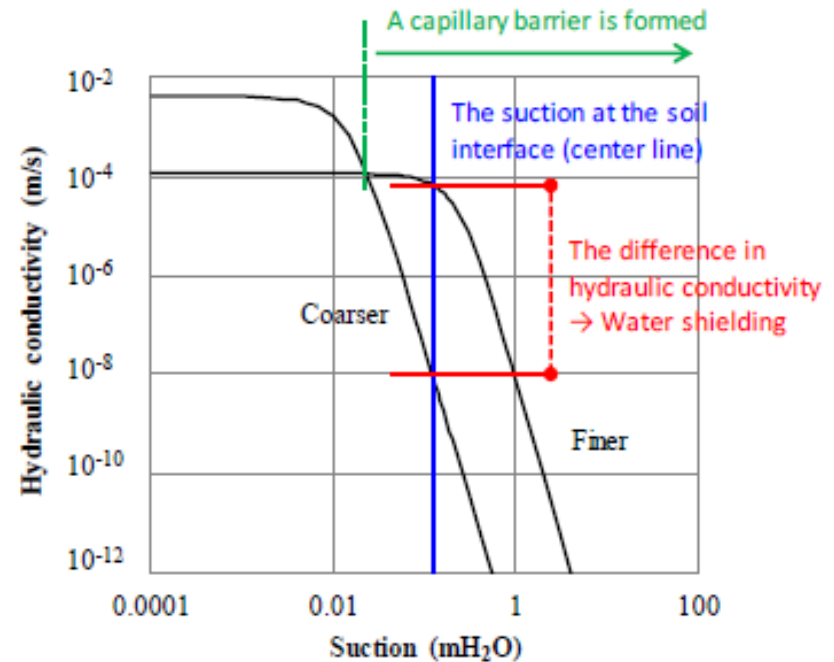
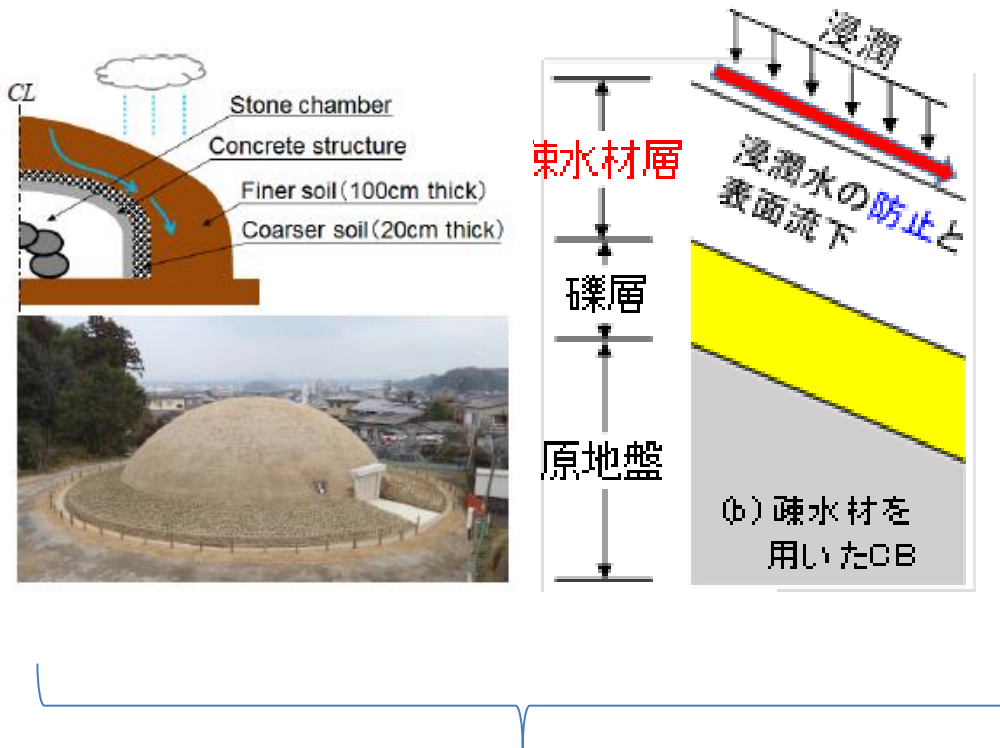
(d) 



地表面がわずかに疎水性の場合

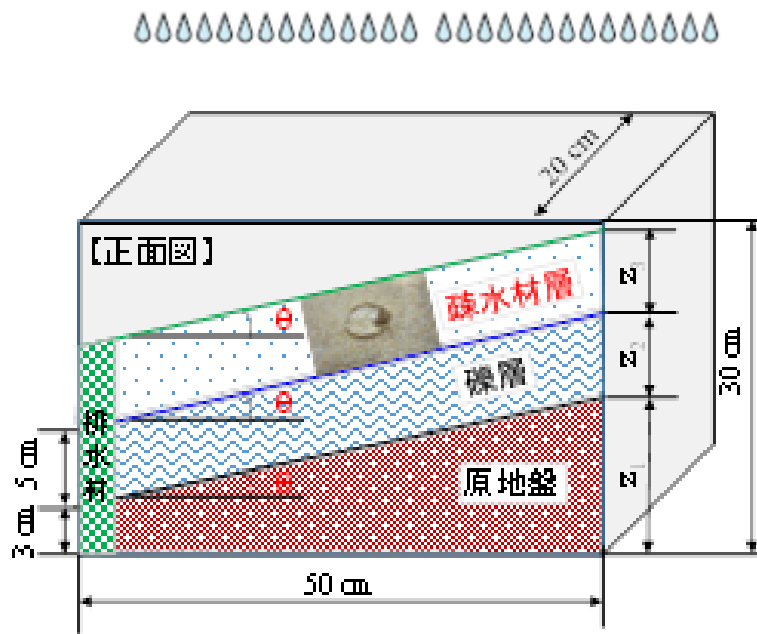
地表面が完全に疎水性の場合

キャピラリーバリアへの適用 (その1)



従来のキャピラリーバ
リア

キャピラリーバリアへの適用 (その2)



疎水性層を取り入れた
キャピラリーバリア

検討事項

- ・シラン処理の効果
土の種類, 溶液濃度
- ・シラン処理の持続性
長期間, 効果が持続?
- ・疎水層の止水効果
層厚, 雨量強度

実験内容

実験	実験の目的
長期暴露試料を用いた 接触角測定試験	疎水性材料の長期耐久性の検討. 作製した疎水性測定.
土カラムによる 降雨耐水性試験	疎水性材料の現場適用性の検討 疎水性材料による遮水層が、雨水浸透をどれほど防げるかどうかを検討.
小型土槽を用いた遮水層の 長期耐水性試験	小型土槽内に、遮水層を持つ斜面を作製し、長期間自然暴露して、雨水の浸透を防ぐかどうかを検討.

コンクリート被覆養生材とは？

コンクリート被覆養生材は、コンクリート表面に吸水防止層を形成して、コンクリート内部への水や劣化因子の浸透を防止する材料。シラン・シロキサン系の材料



メリット

- ・短期間で作製できる
- ・特殊な試薬が必要なく安価
- ・自然乾燥で十分

⇒ リーズナブル

実験で用いたコンクリート被覆養生材

引用元：https://www.kajima.co.jp/tech/c_renewal/material/index.html#!body_01

疎水性材料の作製方法

シラン試薬処理

土試料,
イソプロピルアルコール,
シラン試薬
を 50:50:3 の比率で混合
↓
3日放置
↓
1日炉乾燥

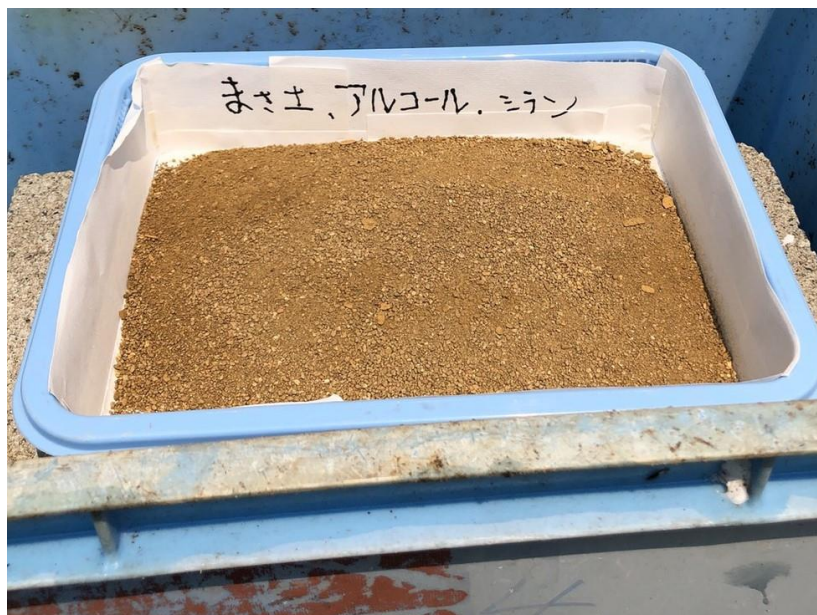
コンクリート被覆養生材処理

土試料, 水
コンクリート被覆養生材
を 50:50:1 の比率で混合
↓
1日放置
↓
1日自然乾燥

この2種類の作製方法を豊浦砂, まさ土に適用して疎水性材料を作製

長期暴露試料を用いた
接触角測定試験

自然暴露試料の作製

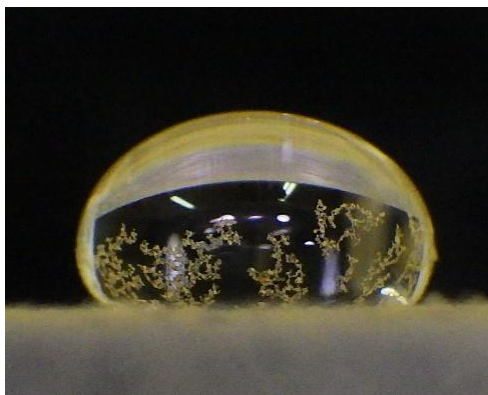


4種類の疎水性試料を、
約6か月間暴露し続ける。

図-3 自然暴露の例

接触角測定試験 ～接触角測定方法～

1. カメラのレンズと同じ高さの実験台に両面テープを貼り、疎水性材料の層を作る.
2. マイクロピペットを用いて70 μ lの水を滴下する.
3. 横から写真撮影する.

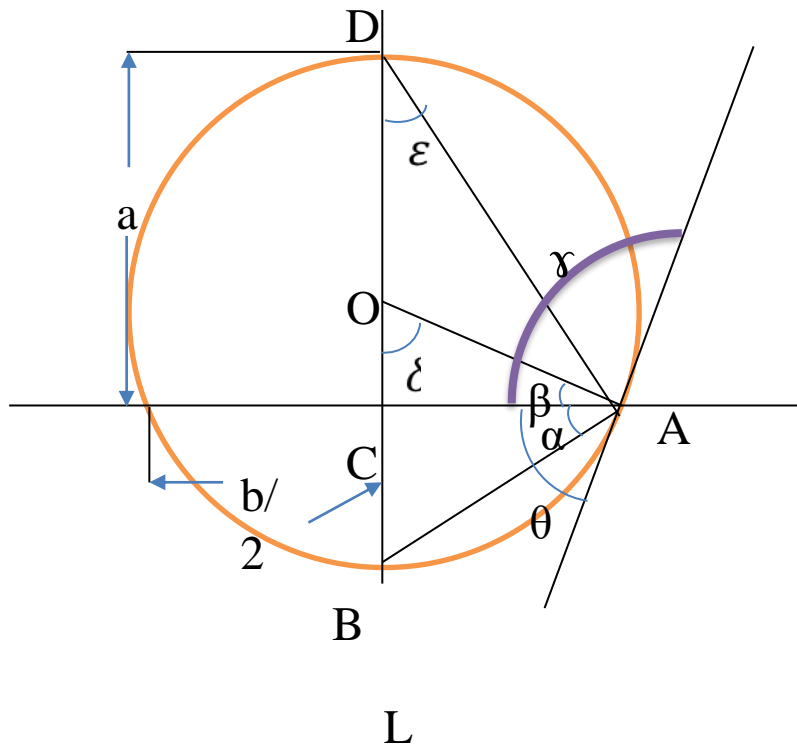
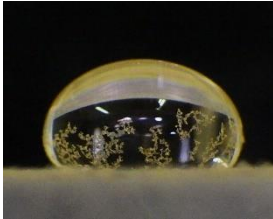


撮影された水滴



写真撮影時の様子

2θ法による接触角の測定



水滴が球形であると仮定した場合、

接線と線分DBの交点をL とすると、 $\triangle OAL$ と $\triangle ACL$ は相似なので $\delta = \theta$ である。

$\triangle OAC$ は直角三角形なので $\beta + \delta + \frac{\pi}{2} = \pi$

$\triangle OAB$ は二等辺三角形なので $2(\alpha + \beta) + \delta = \pi$

上の二式を連立すると $\delta = 2\alpha = \theta$ となる。

また $\triangle ADB$ と $\triangle CAB$ も相似なので $\varepsilon = \alpha$ である。

$$\tan \alpha = \tan \varepsilon = \frac{b/2}{a}$$

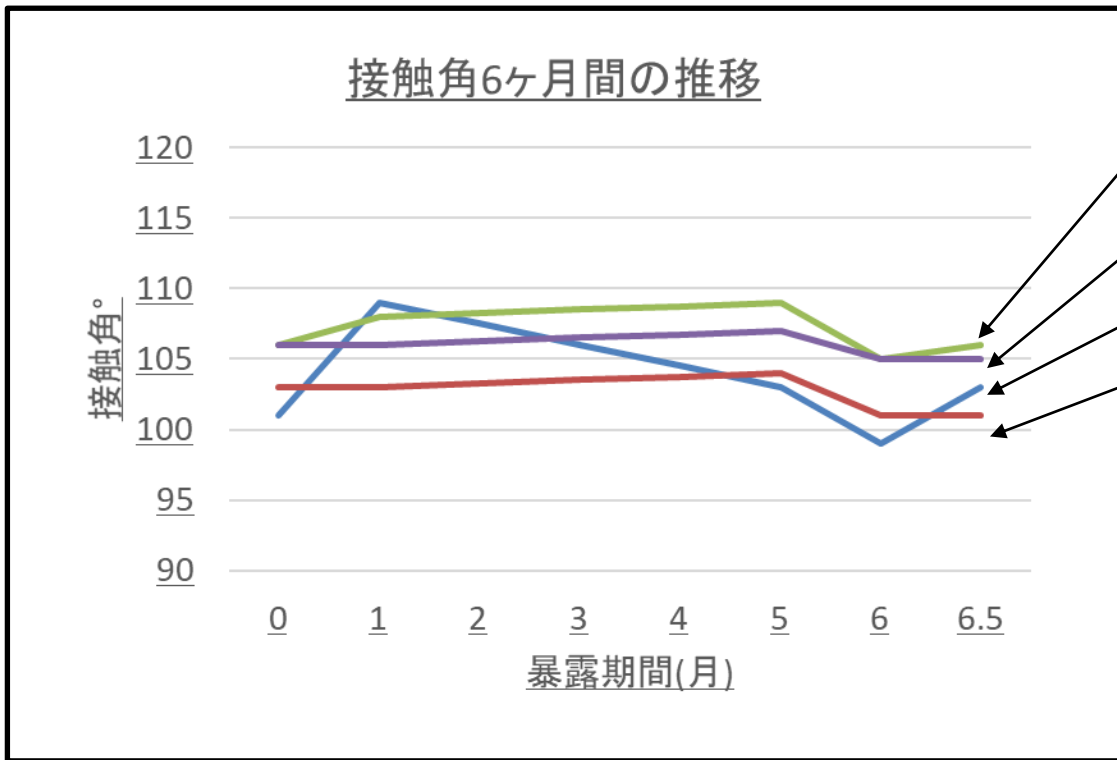
$$\tan \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \cot \alpha = \frac{a}{b/2}$$

$$\frac{\pi}{2} - \alpha = \tan^{-1} \frac{2a}{b}$$

$$\pi - \theta = 2 \tan^{-1} \frac{2a}{b}$$

$$\gamma = 2 \tan^{-1} \frac{2a}{b}$$

接触角測定試験結果



シリル試薬処理ま
さ土
被覆養生材処理ま
さ土
シリル試薬処理
豊浦砂
被覆養生材処理
豊浦砂

- いずれの作製方法でも疎水性が確認
- 疎水性を約6ヶ月間維持する。

土カラムを用いた降雨試験

使用した降雨装置の概念図及び写真

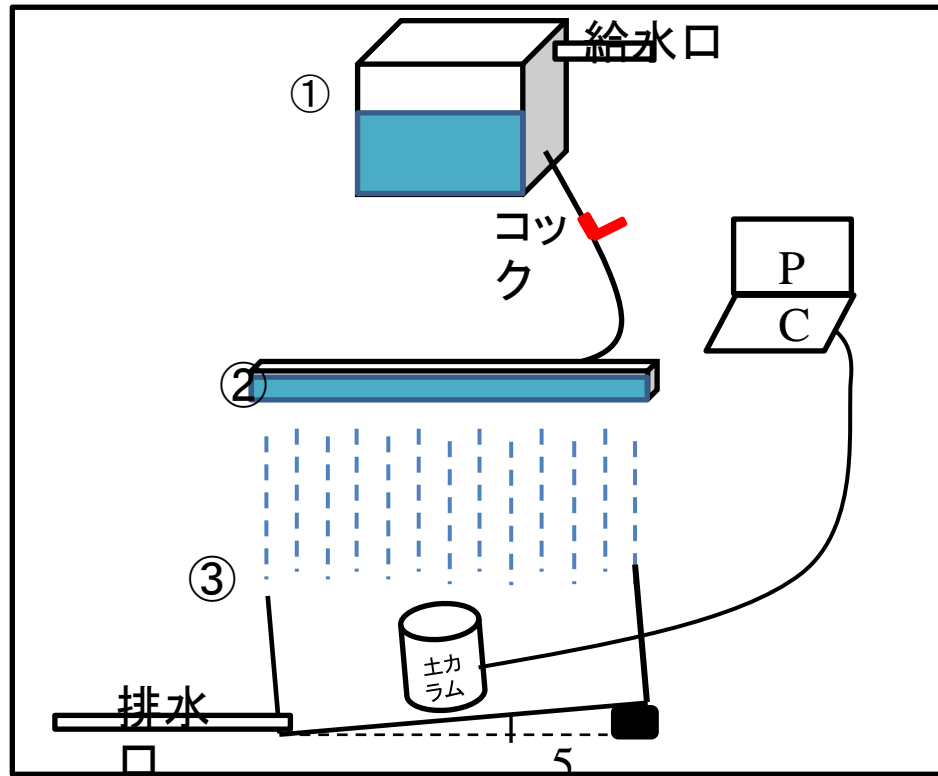


図-7 降雨装置の
概念図

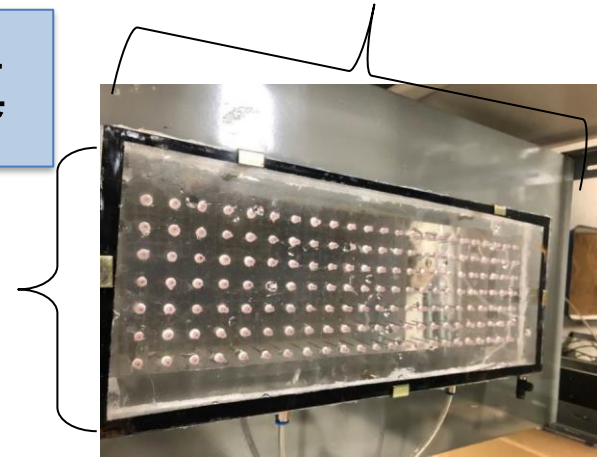


図-8-2 降雨装置上か
らの写真

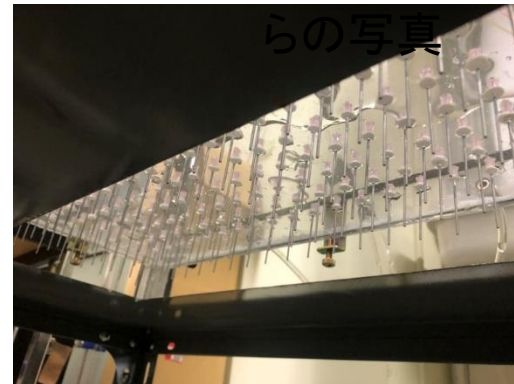


図-8-1 降雨装置下か
らの写真

使用した土カラム, 水分計

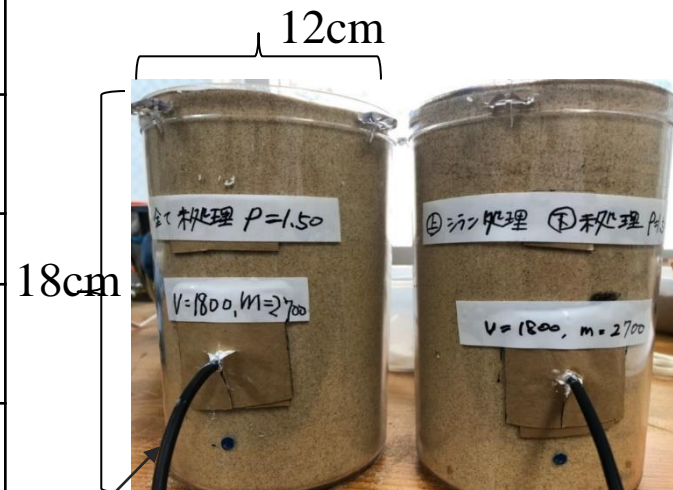
表-1 使用した土カラム

土カラムの種類	乾燥密度	概要
①未処理の豊浦砂	全て 1.5g/ml 体積 1800ml	全て未処理の豊浦砂で作製した土カラム
②シラン試薬処理豊浦砂		上層4.5cmシラン試薬処理豊浦砂 下層13.5cm未処理の豊浦砂 で作製した土カラム
③被覆養生材処理豊浦砂		上層9cm被覆養生材処理豊浦砂 下層9cm未処理の豊浦砂 で作製した土カラム
④未処理のまさ土		全て未処理のまさ土で作製した土カラム
⑤シラン試薬処理まさ土		上層4.5cmシラン試薬処理まさ土 下層13.5cm未処理のまさ土 で作製した土カラム
⑥被覆養生材処理まさ土		上層9cm被覆養生材処理まさ土 下層9cm未処理のまさ土 で作製した土カラム

- ・全ての土カラムの下層部に途中水分計を差し込んだ
- ・被覆養生材処理層の厚さはシラン試薬処理層の2倍



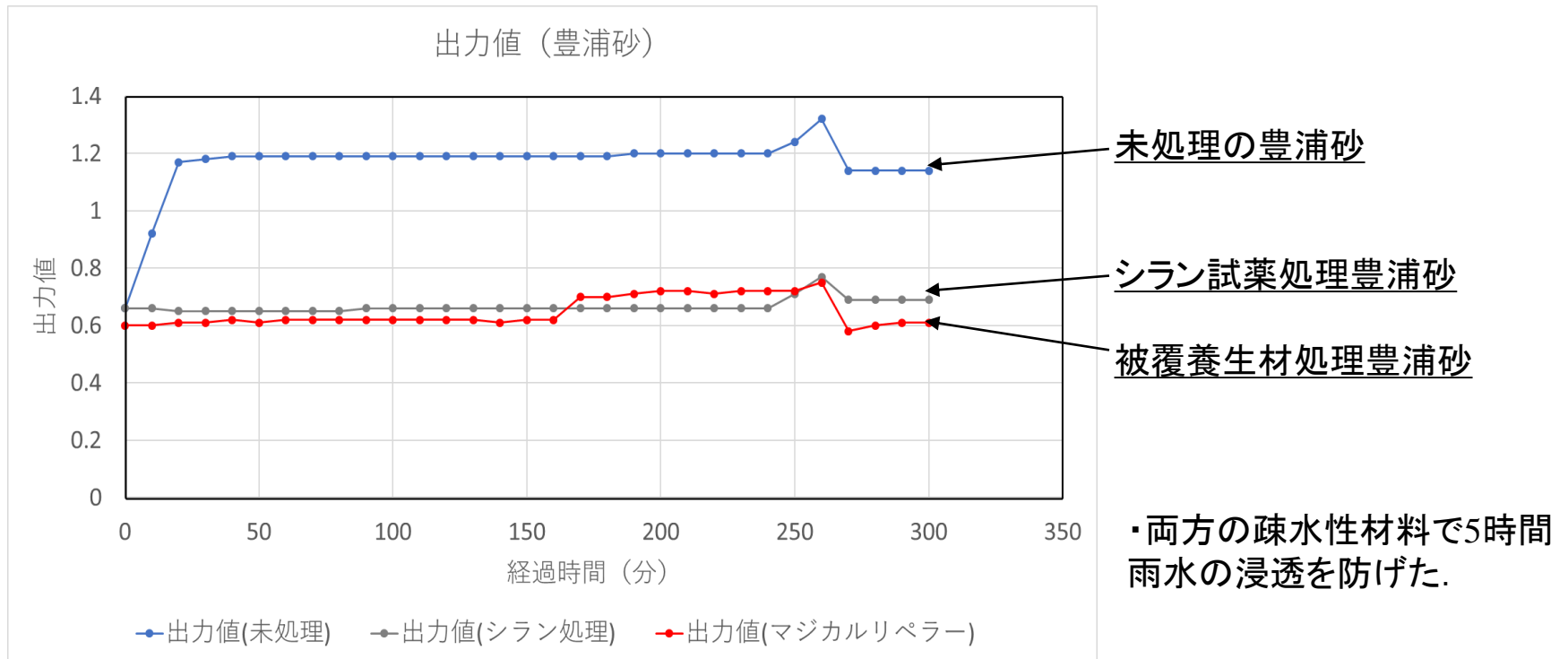
使用した水分計



水分計のコード

土カラムの例

降雨実験試験結果(豊浦砂の土カラム; 100mm/hr)



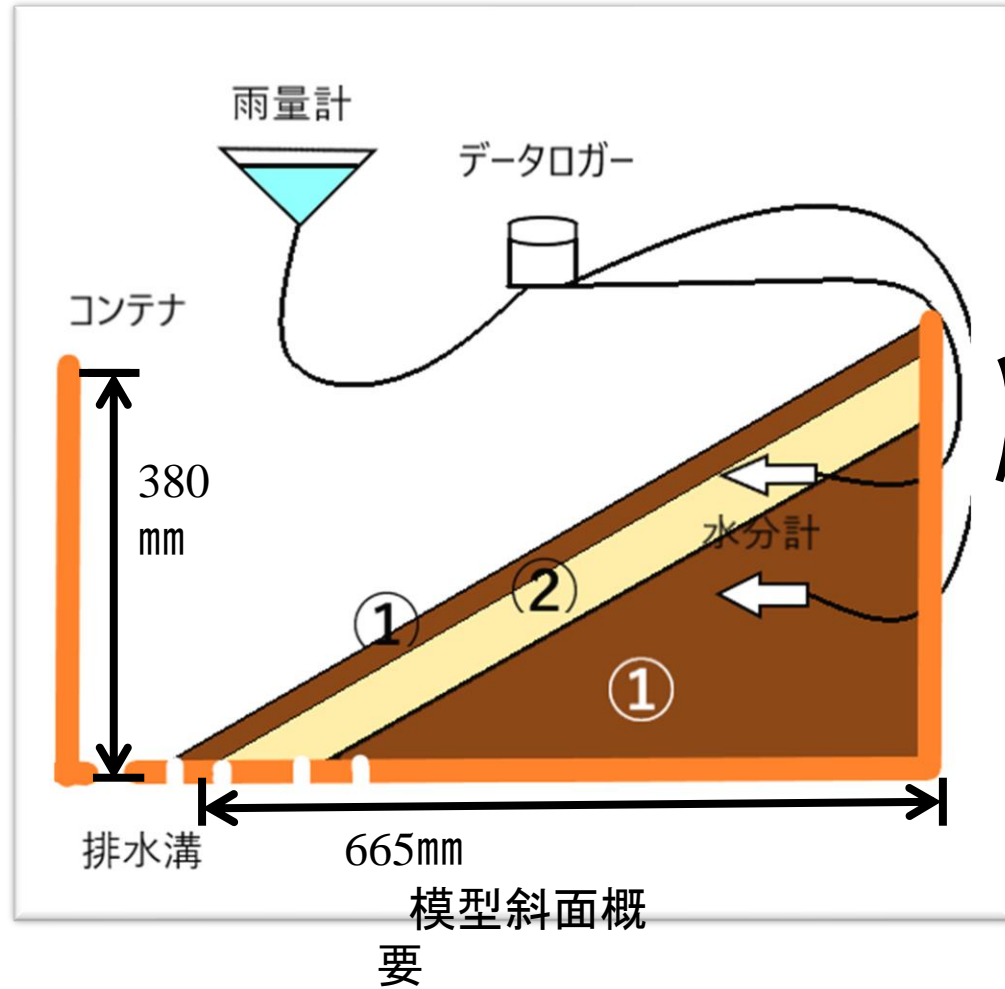
小型土槽を用いた遮水層の 長期耐水性試験

模型斜面実験



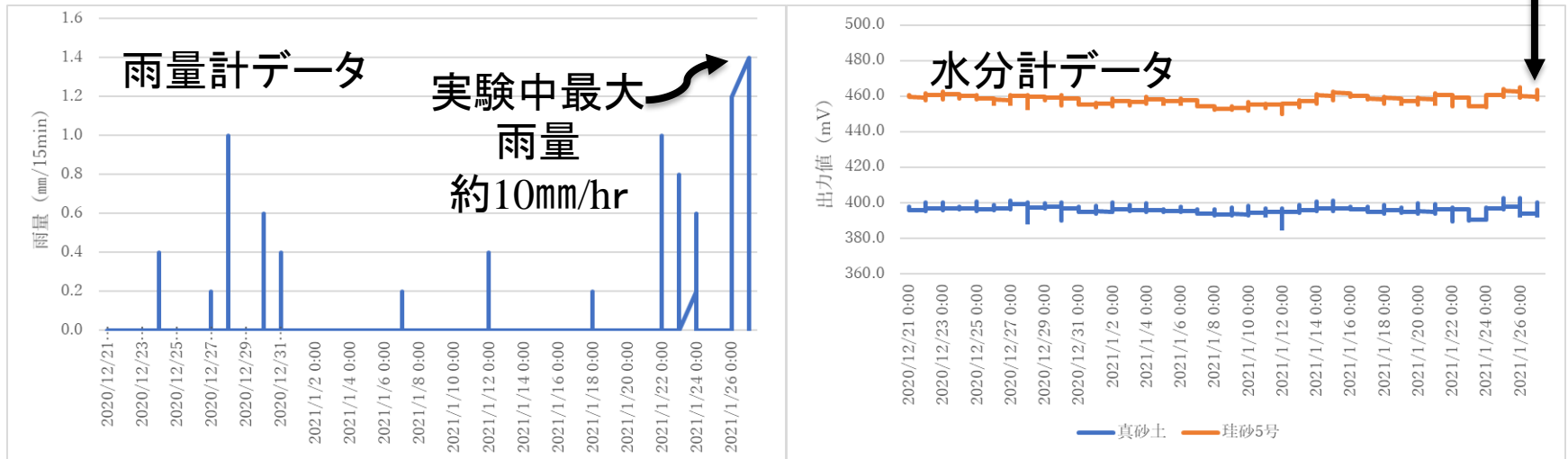
真砂土層の水分計の出力値が
上昇していなければ
②が遮水していると言える

- ①真砂土(疎水性なし)
- ②珪砂5号(疎水性あり)



模型斜面実験の測定結果

雨量計データ(左)と水分計データ(右)



暴露状態で長期にわたって水分計出力変動は見られない

まとめ

- 作製した疎水性材料を長期自然暴露して接触角の変化を測定した結果、6ヶ月間疎水性を発揮。 → 疎水性材料の長期耐久性を確認
- シラン処理した疎水性材料は、100mm/hの雨に対して、5時間雨水浸透を防いだ。 → 豪雨に耐えられる可能性を確認
- 小型土槽の遮水層が、自然暴露状態で1カ月間、雨水の浸透を防いだ。 → 現場への適用性を確認。
現在も測定は継続し、約7か月間雨水の浸透を防いでいる。