

土のせん断

－ 砂と粘土の比較から －

長岡技術科学大学 豊田浩史

内 容

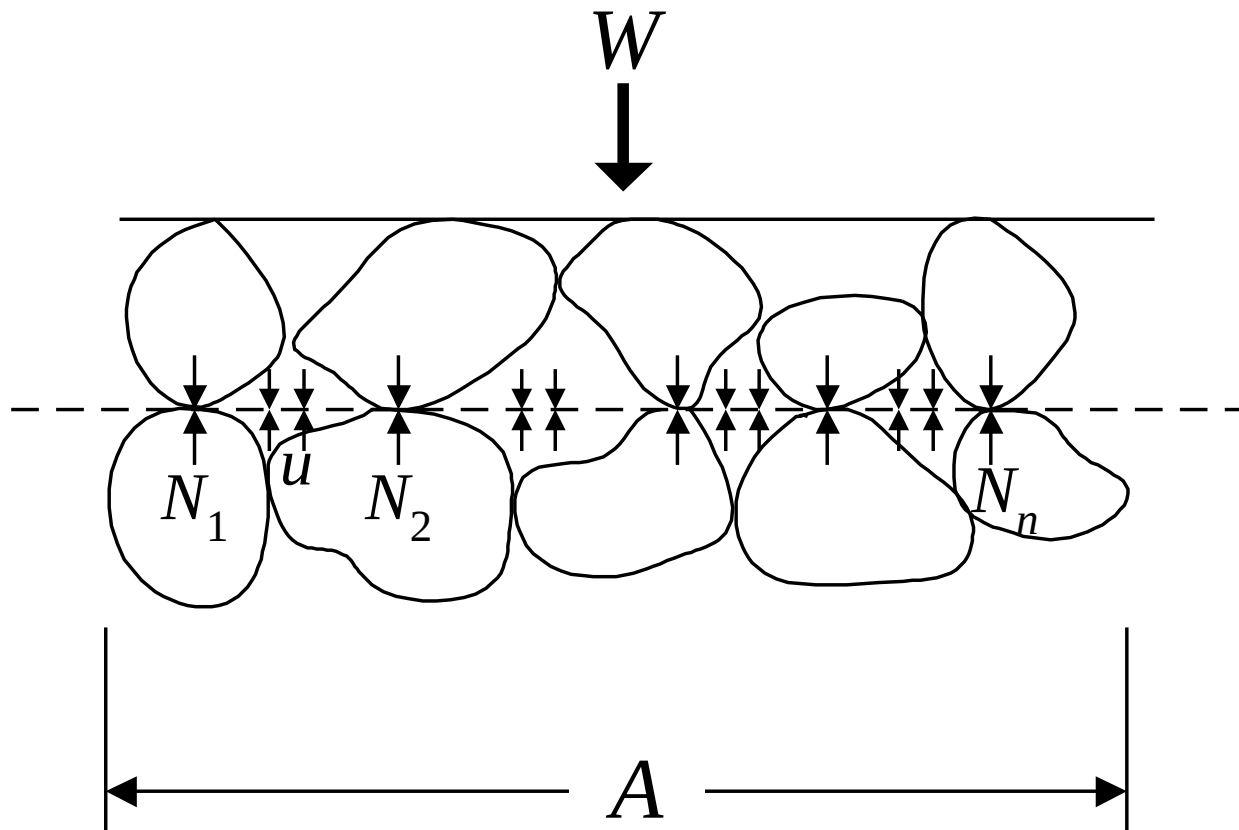
1. 土粒子の違い
 2. せん断前：圧密特性
 3. せん断強さ：モール・クーロンの破壊規準
 4. せん断強さ：利用と求め方
 5. 排水せん断特性の理解
 6. 非排水せん断特性の理解
 7. 破壊と限界状態($q - p'$, $e - \log p'$)
-
8. 異方性について
 9. まさ土の特殊性



応用問題なので時間があれば

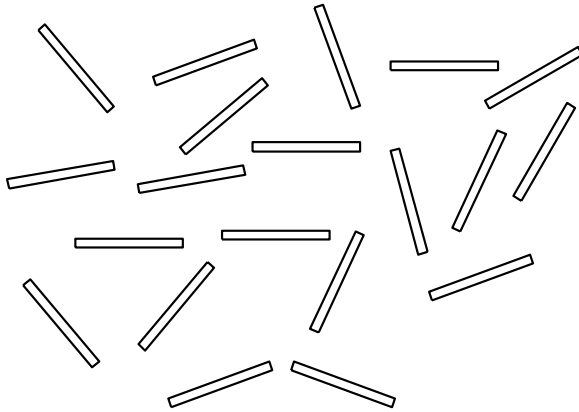
土粒子による違いを理解しよう

砂と粘土の違いは粒子の大きさだけ？

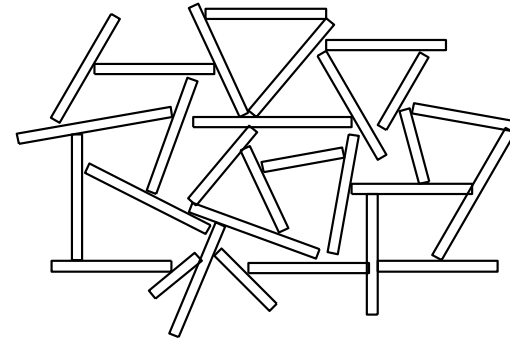


砂粒子は物理的接触により安定を保つ
(単粒構造と呼ぶ)

配向性
無し

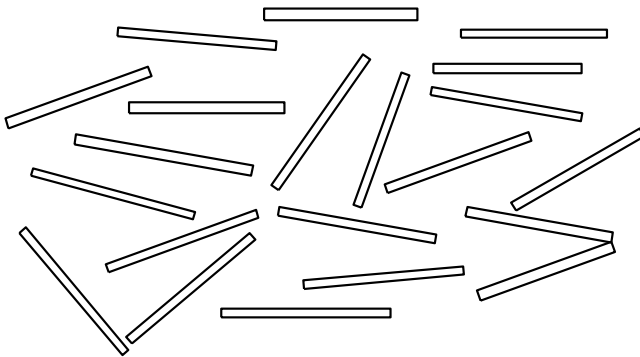


(a) Random structure
ランダム構造

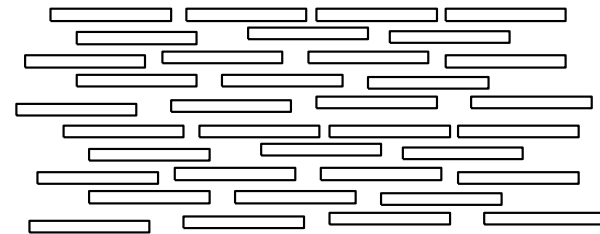


(b) Flocculent structure
綿毛構造

配向性
有り

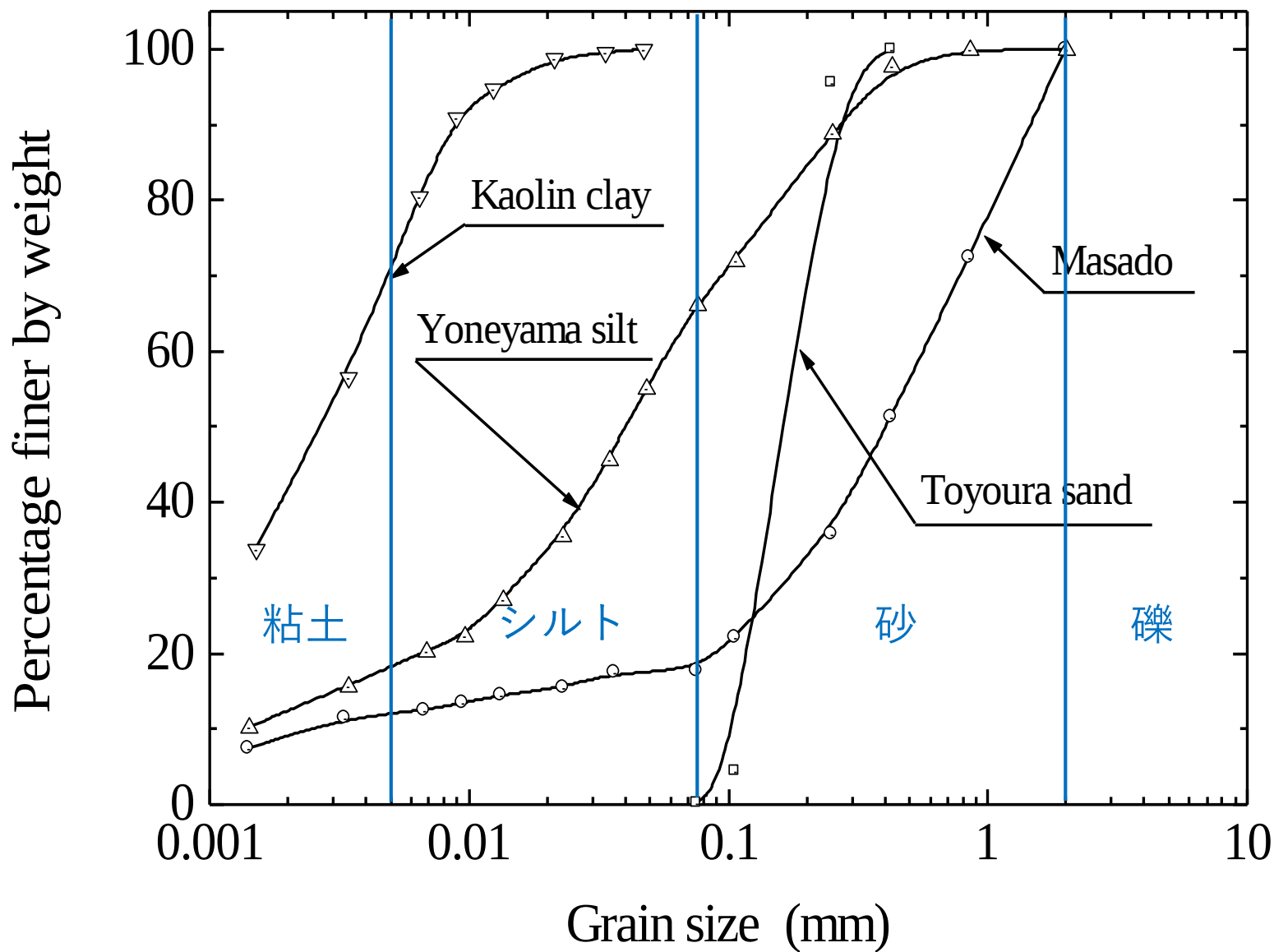


(c) Dispersed structure
分散構造



(d) Oriented Structure
配向構造

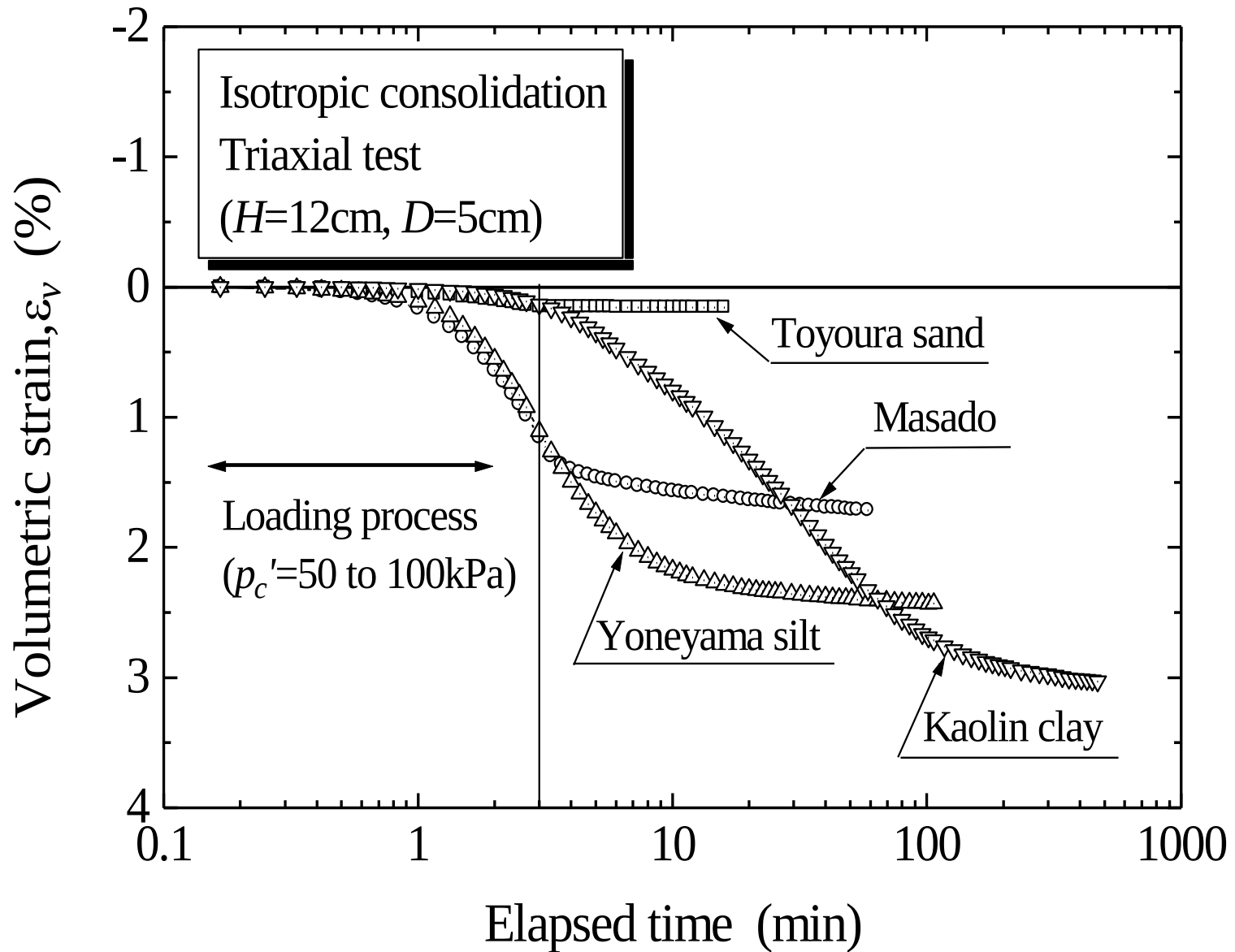
粘土粒子の配列
物理的接触 + 電荷により安定



実験試料の粒径加積曲線

せん断前の挙動を見てみよう 圧密特性（等方圧密）

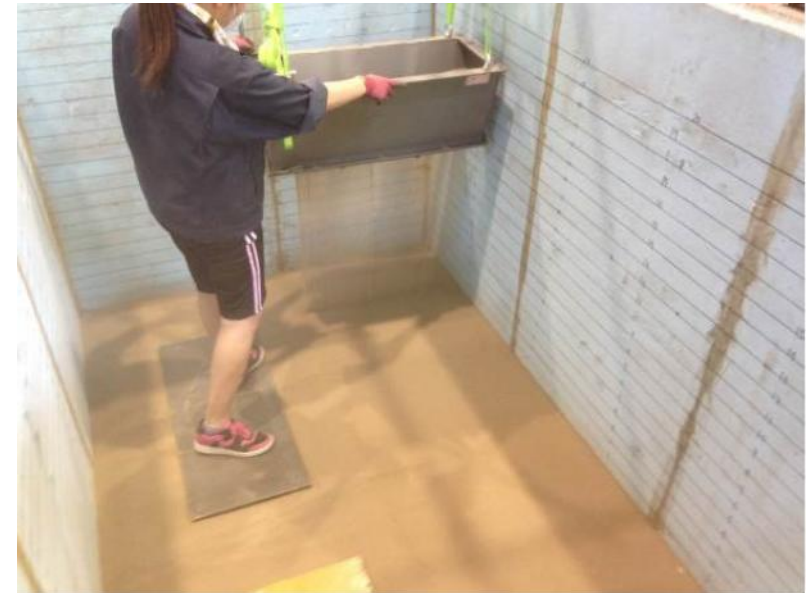
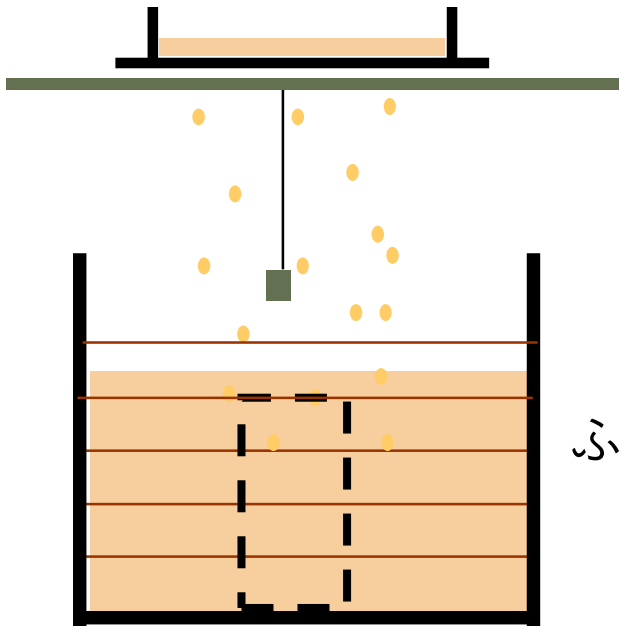
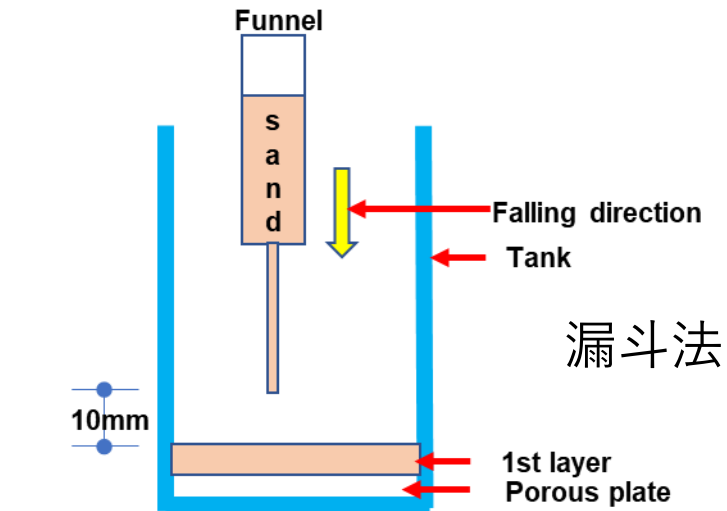
砂と粘土の違いはなに？



圧密量と圧密時間の違いに着目

供試体作製（砂）：再構成

空中落下法



大型土槽

供試体作製（粘土）：再構成

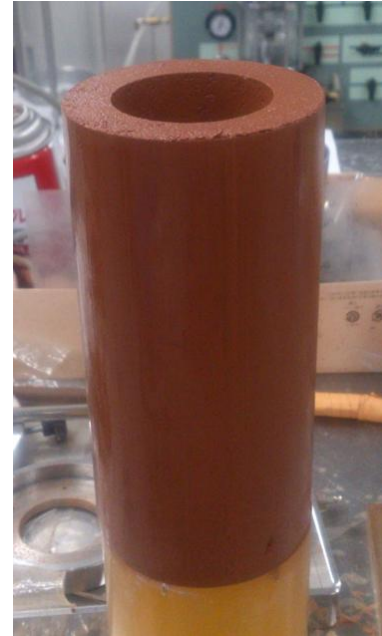
スラリー法



スラリー



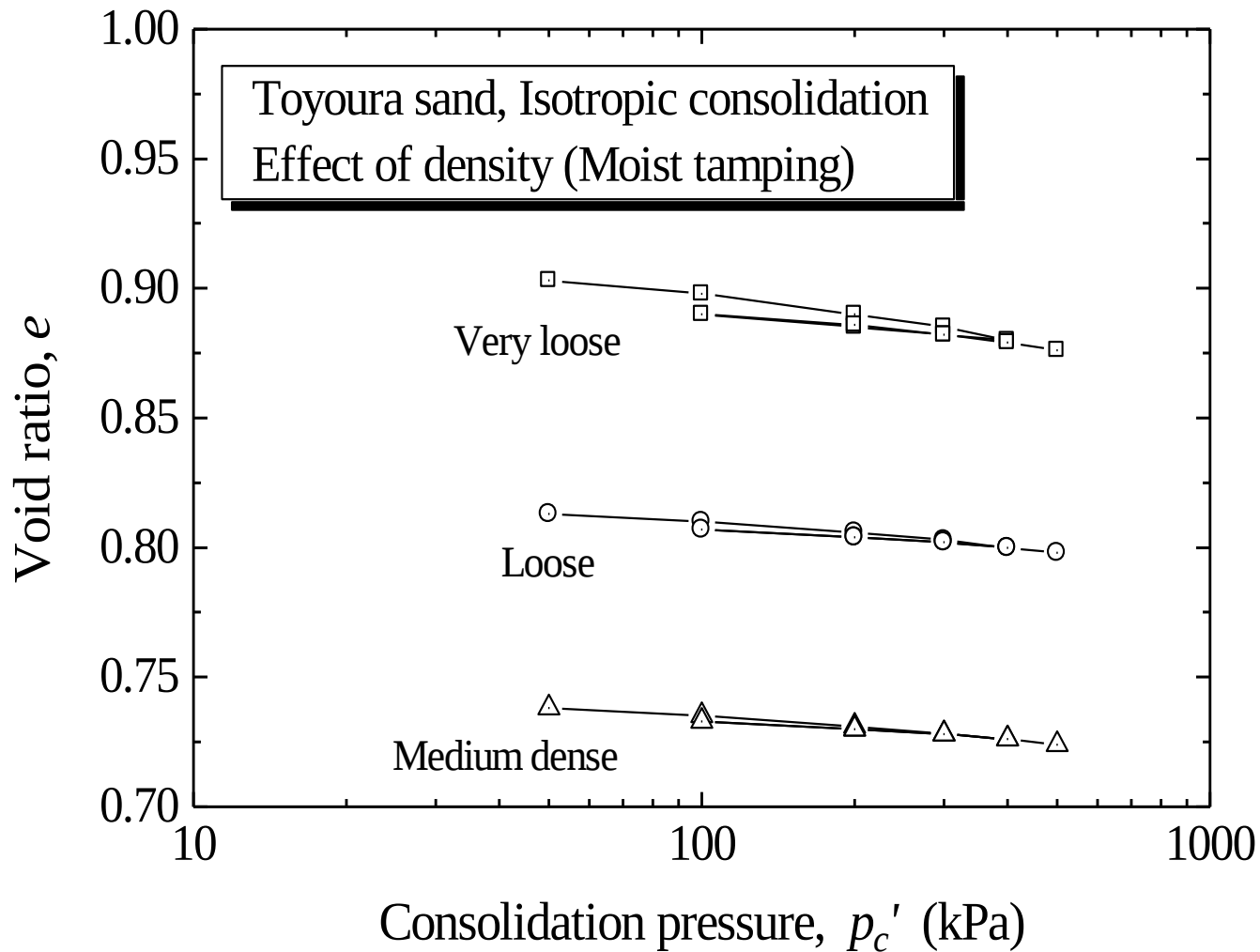
一次元圧密



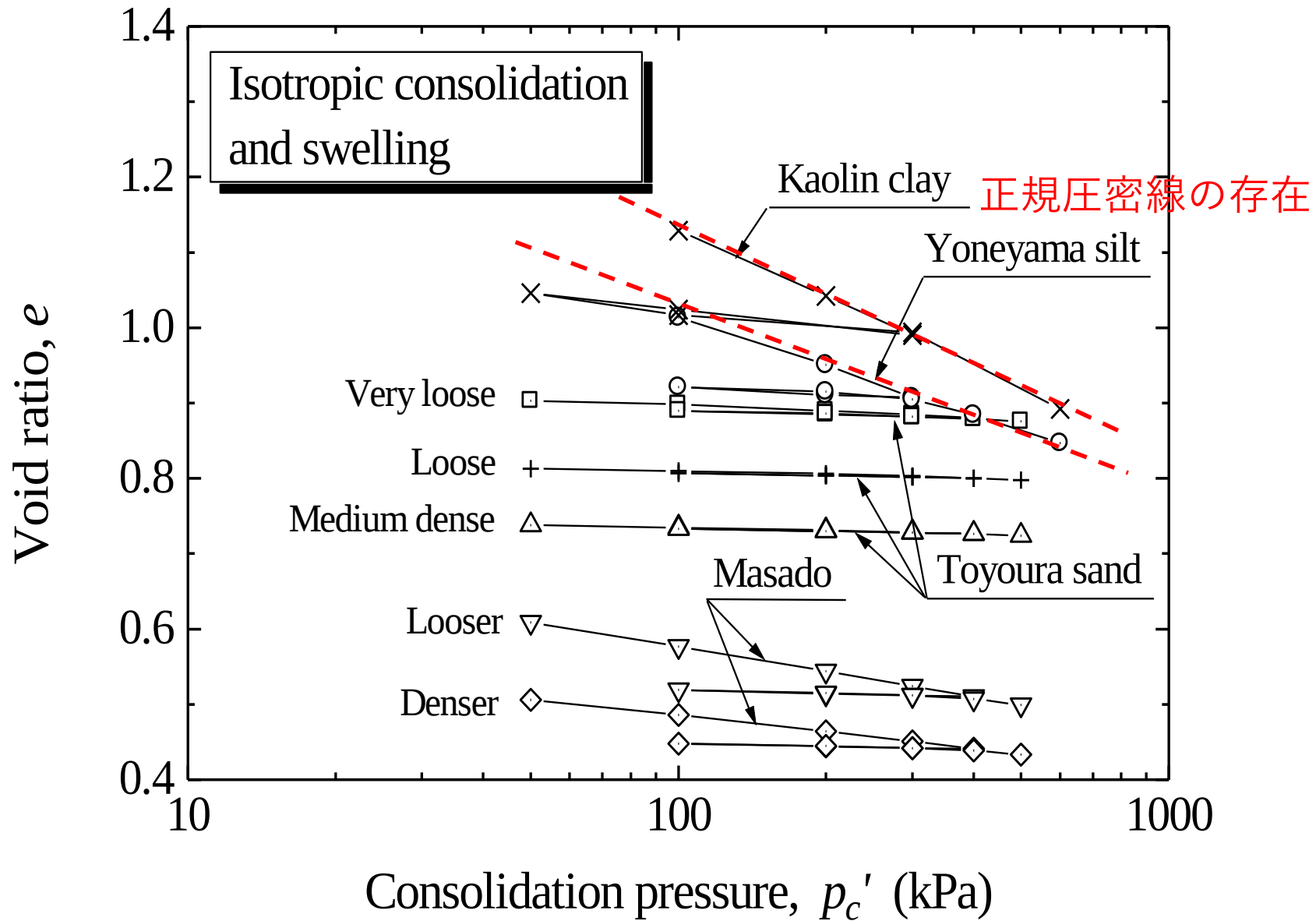
成形
トリミング



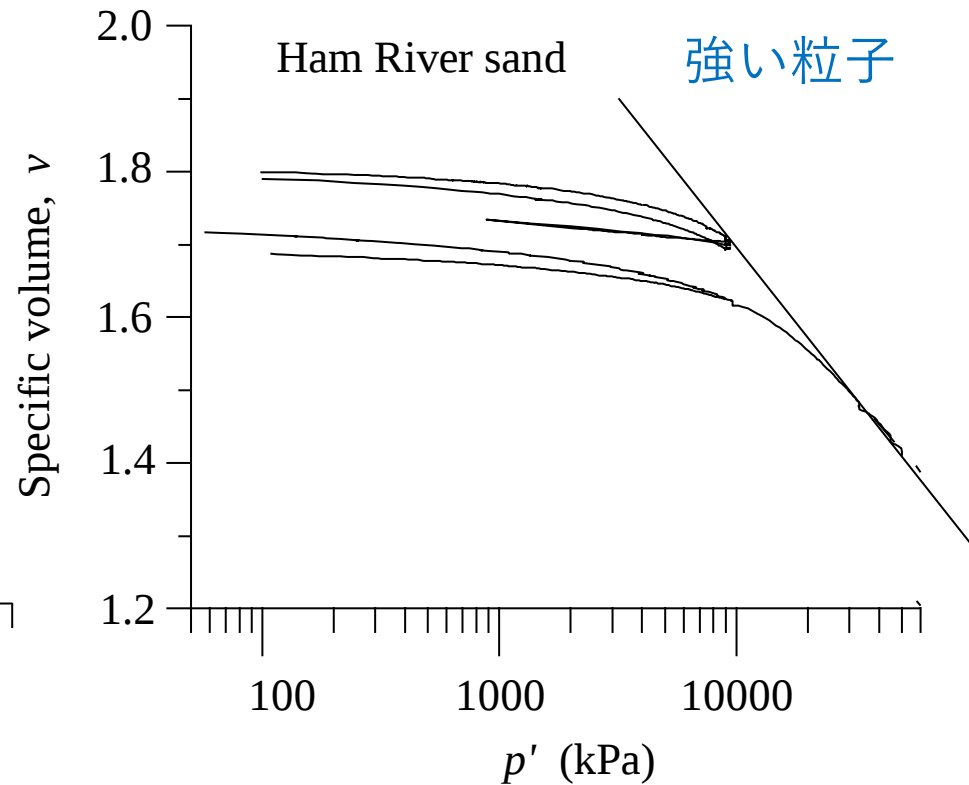
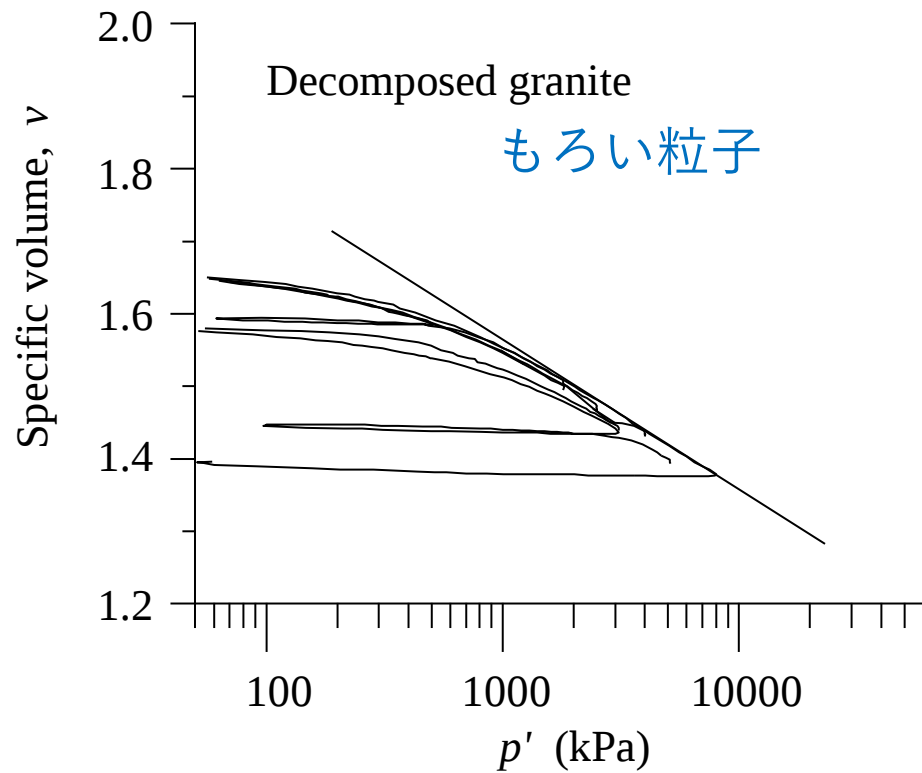
設置



豊浦砂の圧密曲線：初期パッキング異存
過圧密比（OCR）の理解

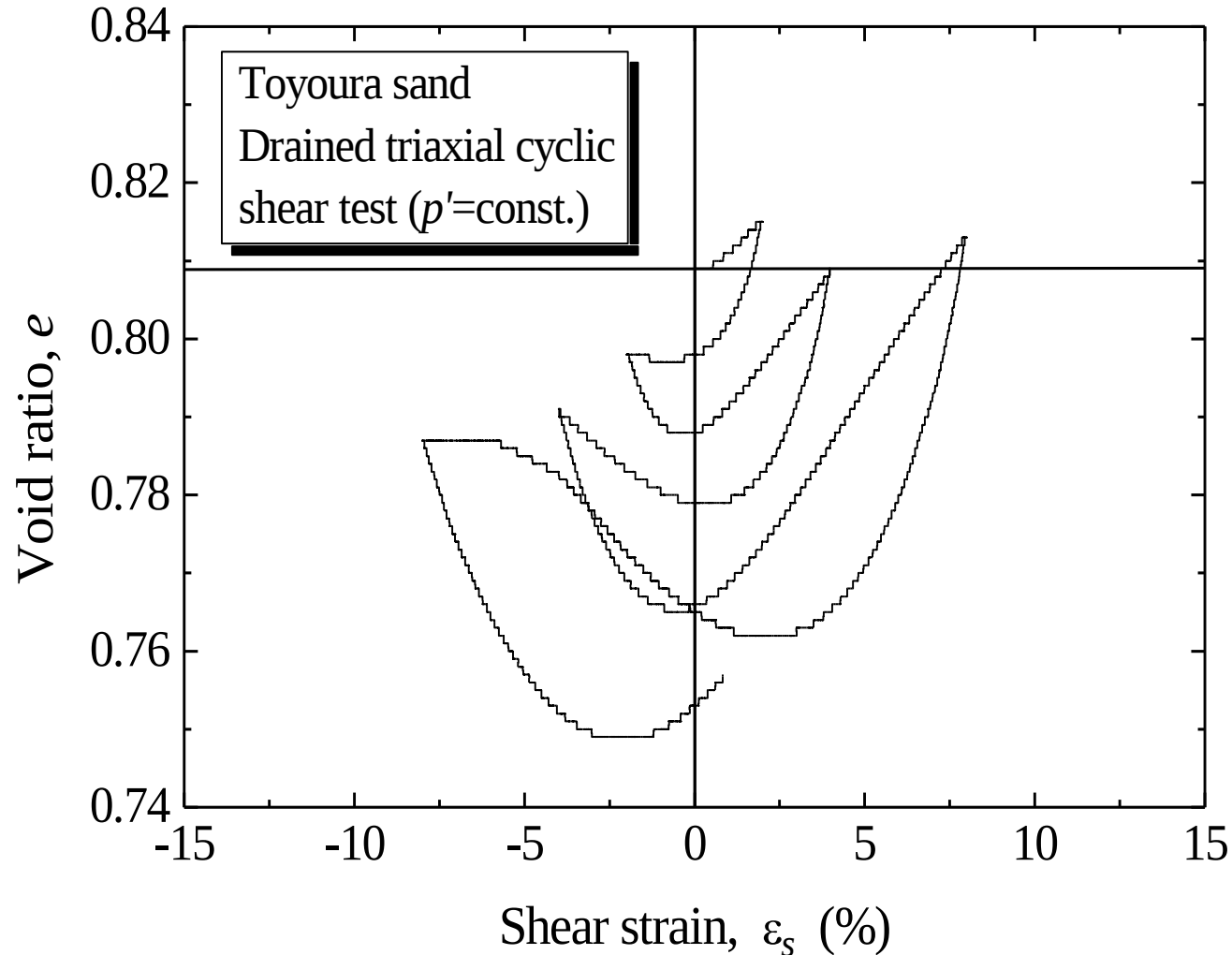


様々な土の圧密曲線



砂質土の高圧等方圧密(Coop and Lee, 1993)
粒子破碎により粘土と同じような正規圧密線が現れる

砂は圧密ではあまり密にならないが. . .



砂の繰返しせん断による高密度化
液状化と関係する挙動です！

せん断強さの表し方

砂も粘土も同じです

モール・クーロンの破壊規準

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{全応力表示})$$

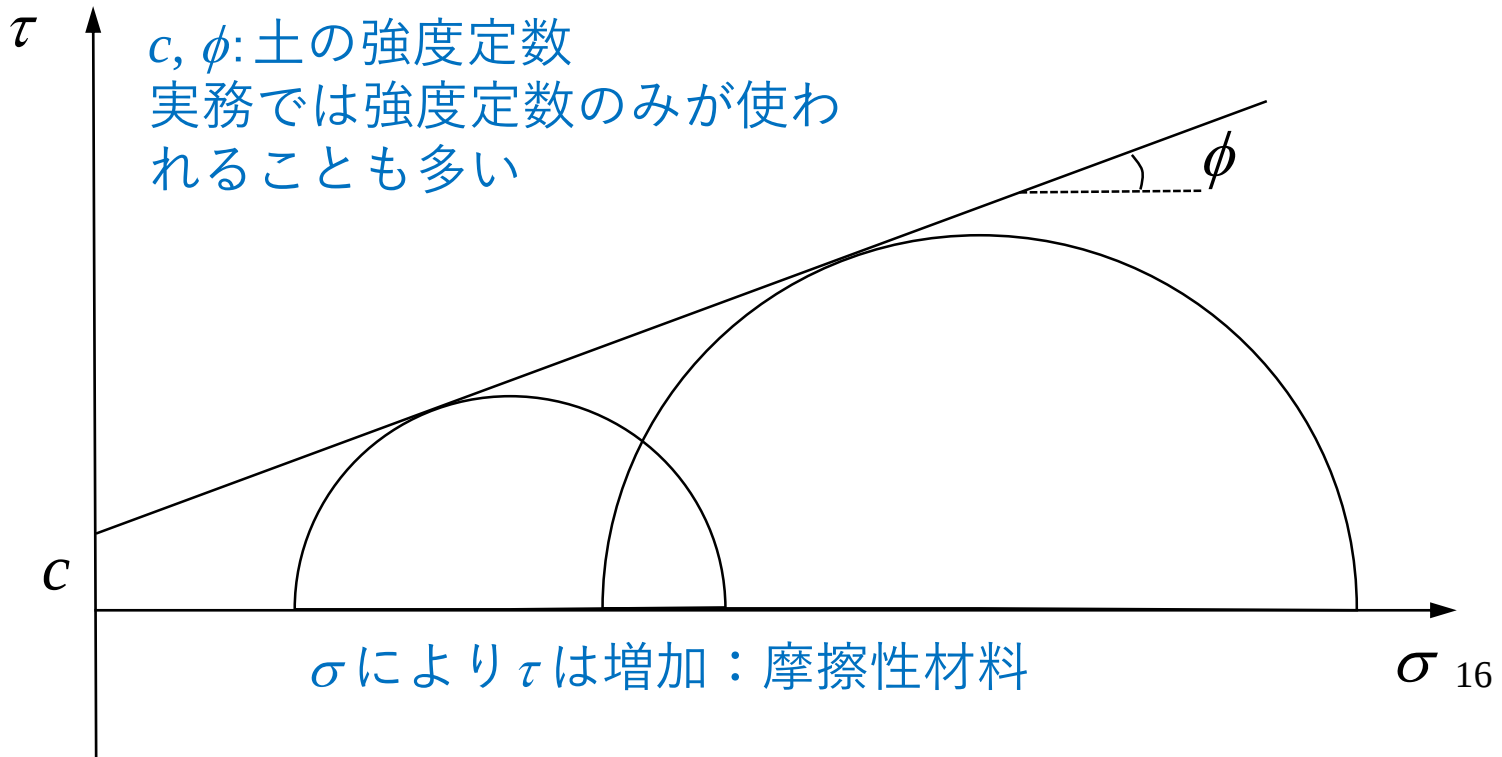
$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (\text{有効応力表示})$$

有効応力の原理

$$\sigma' = \sigma - u$$

u : 間隙水圧

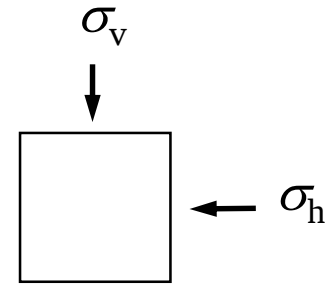
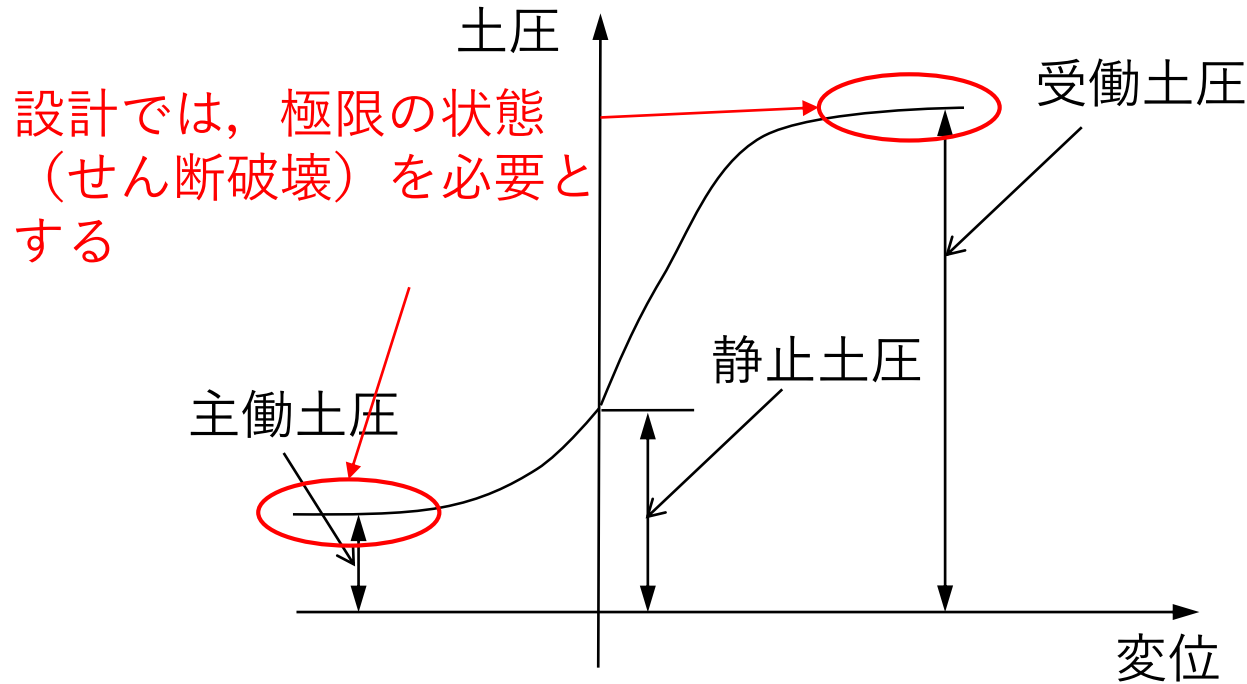
土の強さは有効応力に支配されるが、実務的には全応力を用いることも多い（間隙水圧を測定しない非排水試験結果を使うため）。



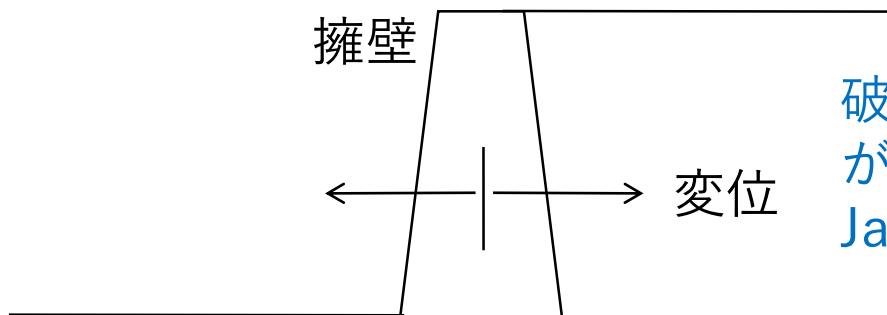
せん断強さ (c, ϕ) の利用

- 土圧
- 斜面安定
- 支持力

土圧の種類



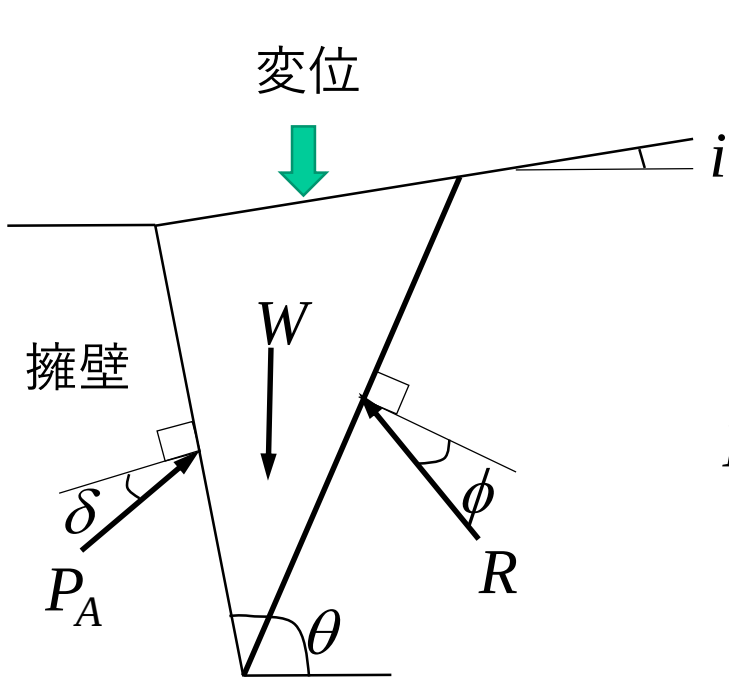
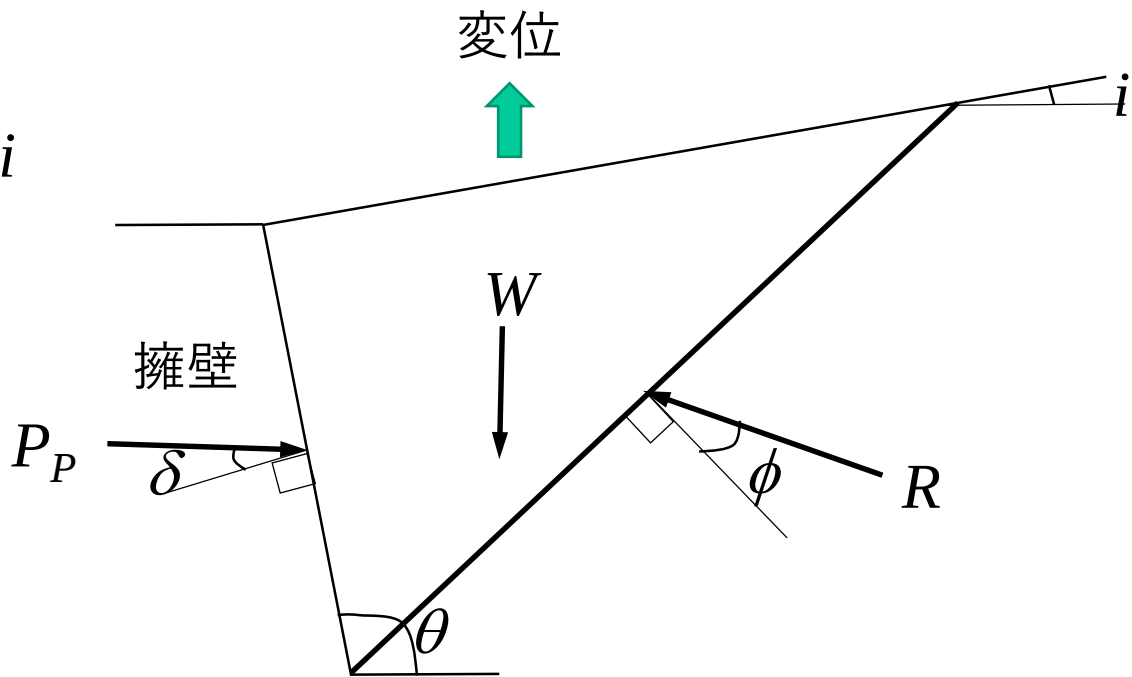
$$K = \sigma_h / \sigma_v$$



破壊を考えない静止土圧係数も ϕ が関係、例えば
Jakyの式： $K_0 = 1 - \sin \phi$

クーロン土圧

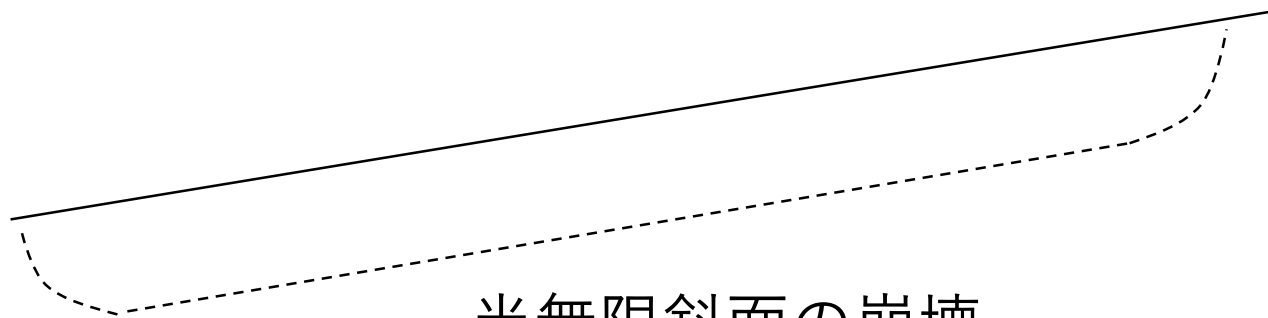
δ : 土と壁面の摩擦角

主働土圧：最大の P_A 

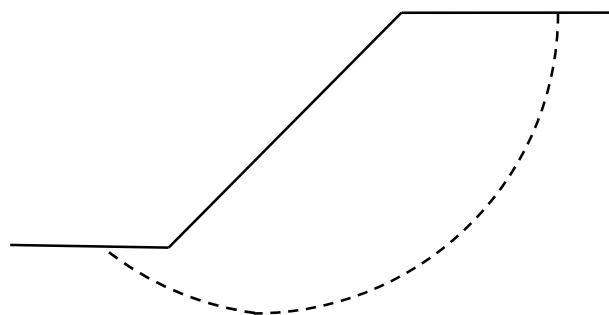
受働土圧：最小の P_p

極限の状態（せん断破壊）をくさび形で表現。
せん断破壊なので， c ， ϕ を使います。

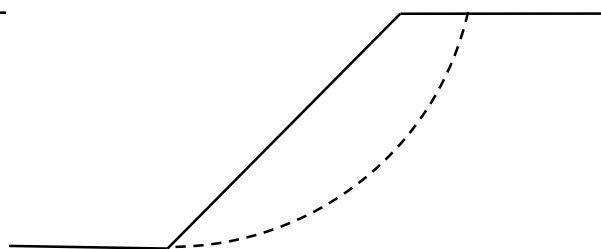
斜面崩壊の種類



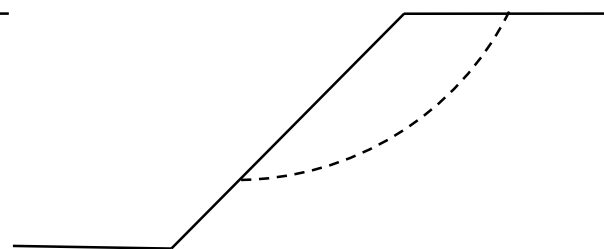
半無限斜面の崩壊



底部破壊



斜面先破壊

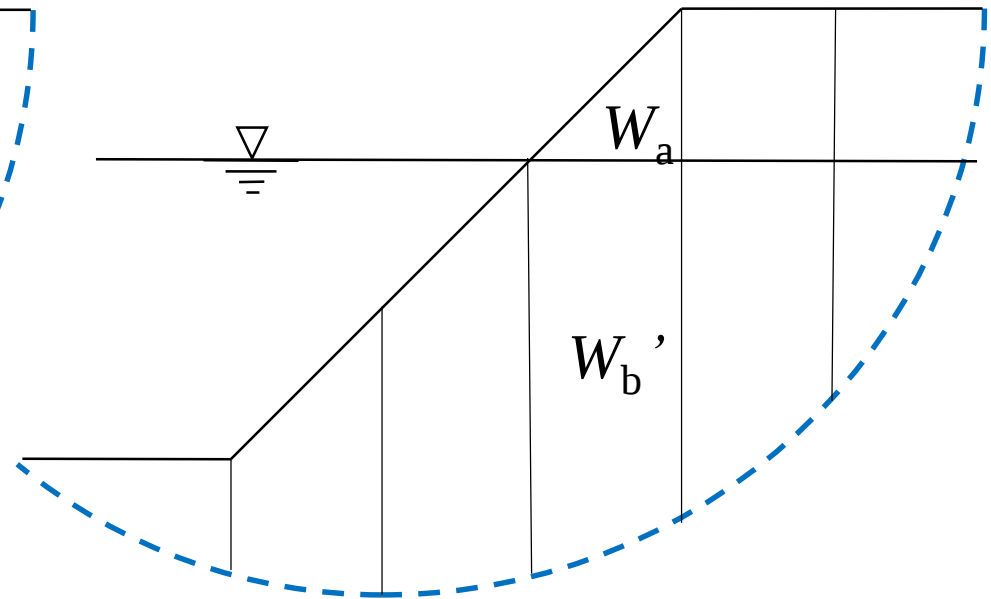
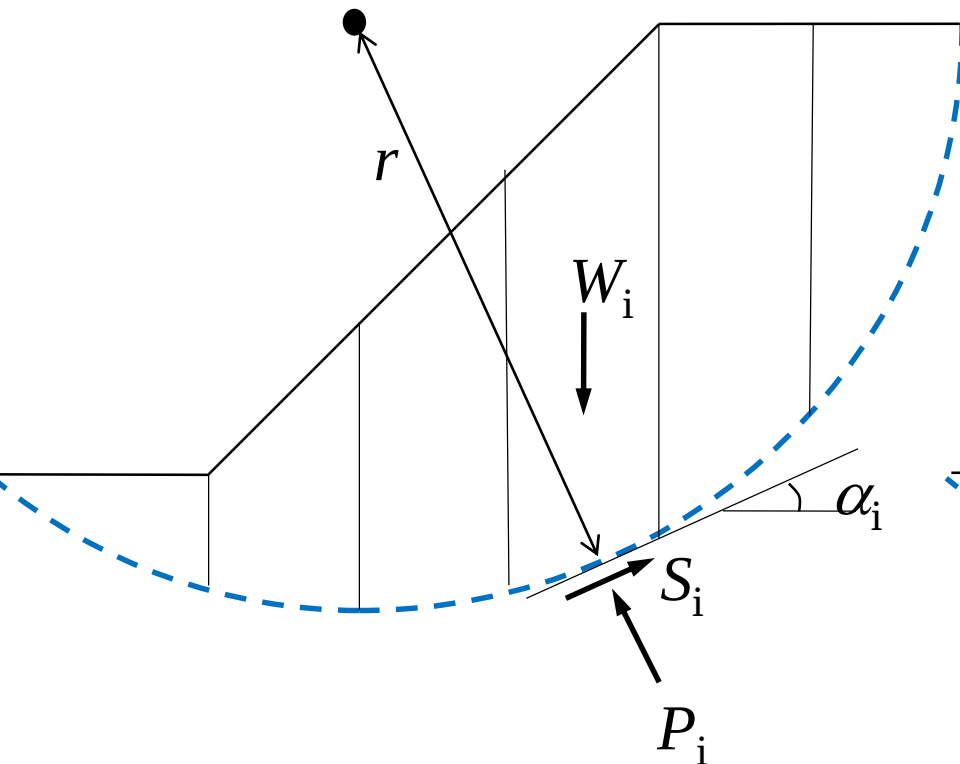


斜面内破壊

有限斜面の崩壊（円弧すべり）

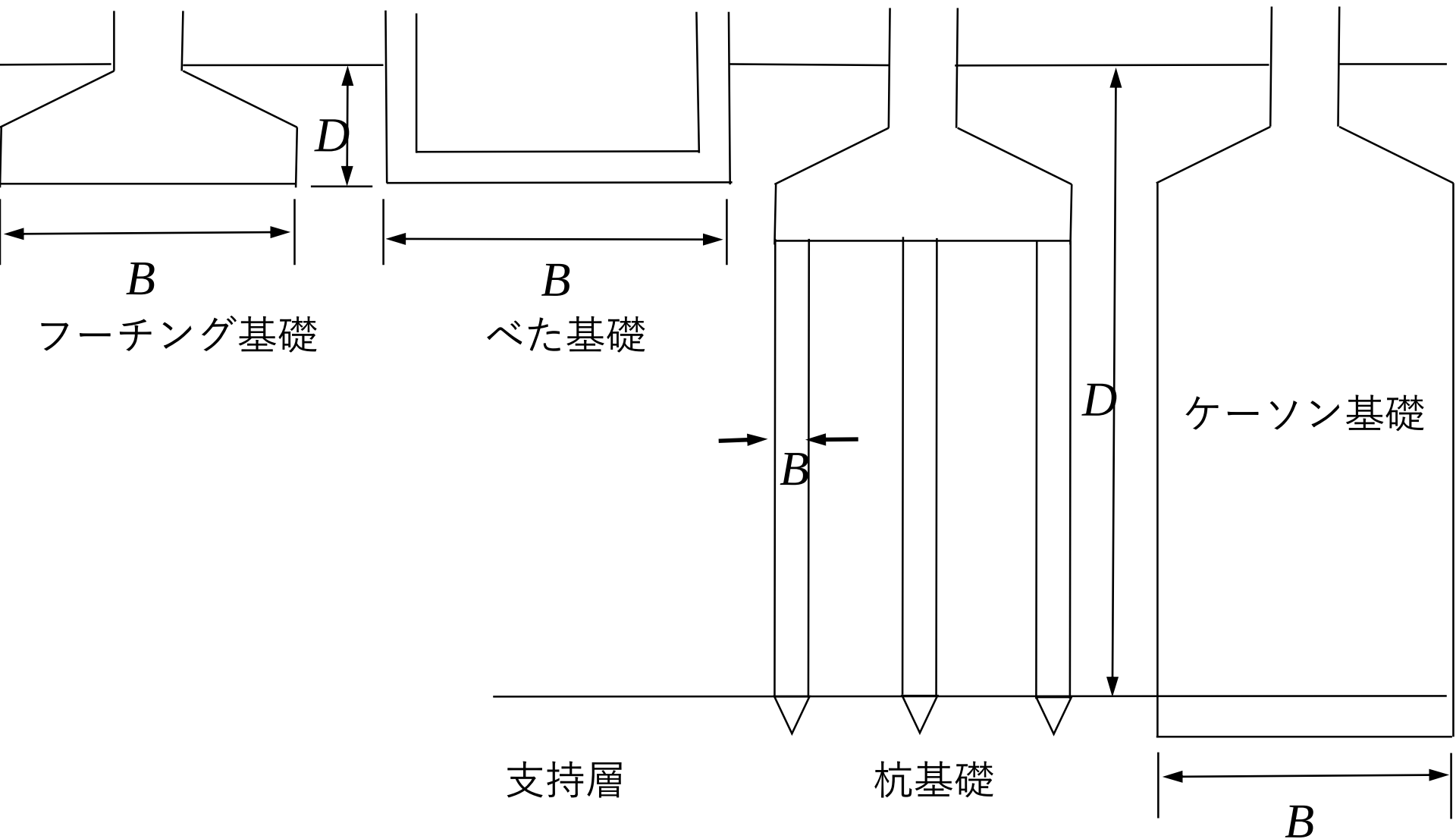
円弧すべり（スライス法）

せん断抵抗 S_i で c, ϕ を使います.

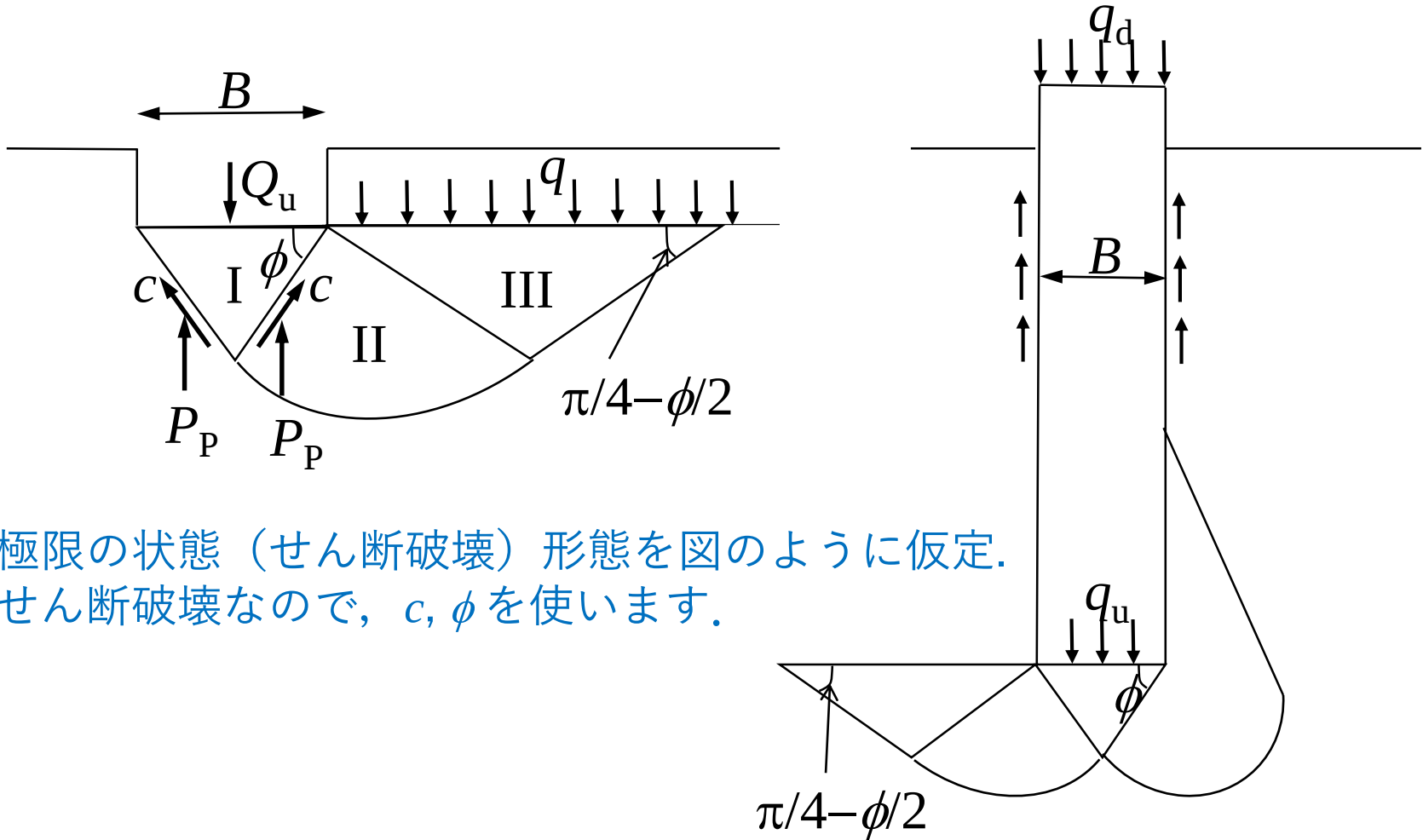


水浸斜面の場合

基礎形式



テルツァギーの支持力



極限の状態（せん断破壊）形態を図のように仮定.
せん断破壊なので, c, ϕ を使います.

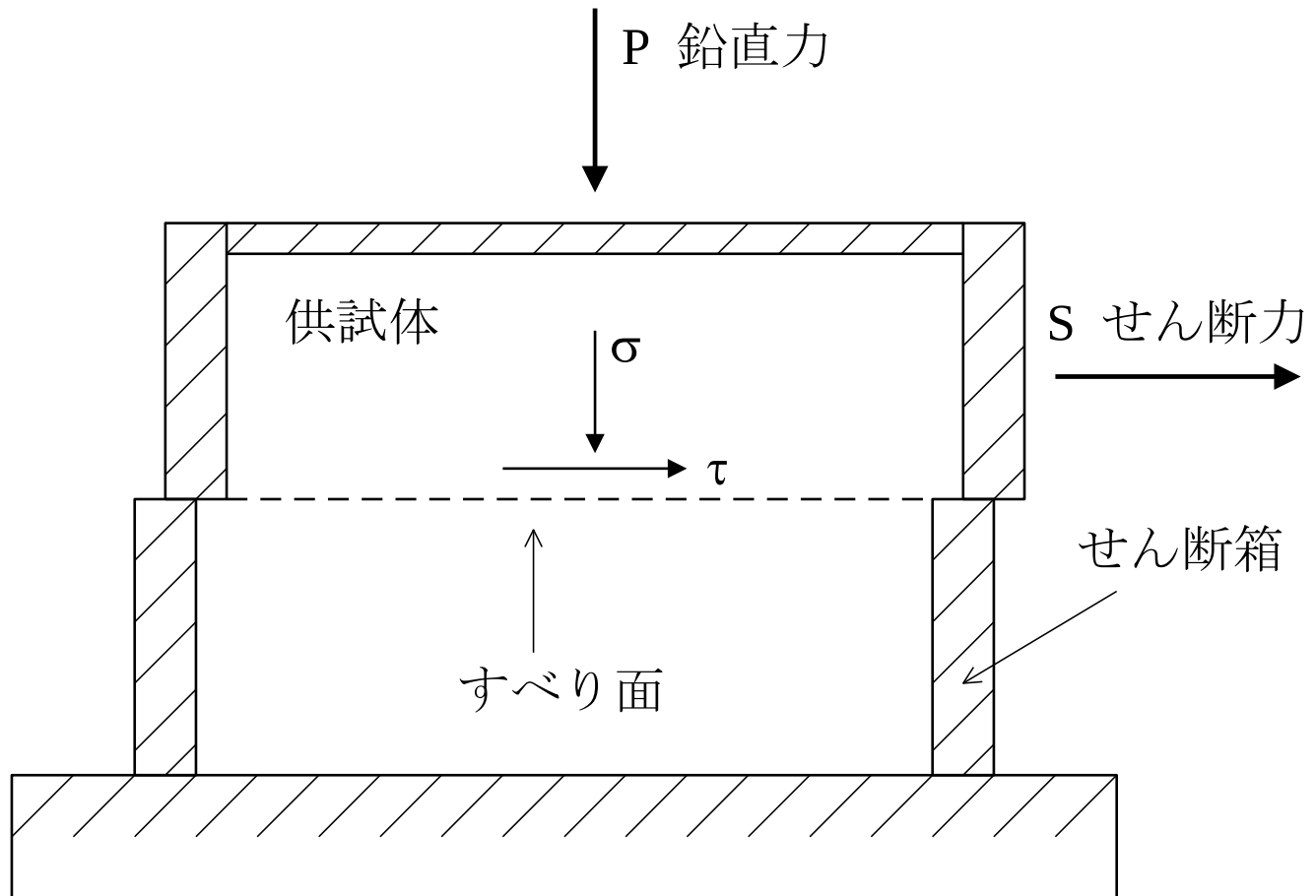
テルツァギー

マイヤーホッフ

せん断強さ (c, ϕ) を求める

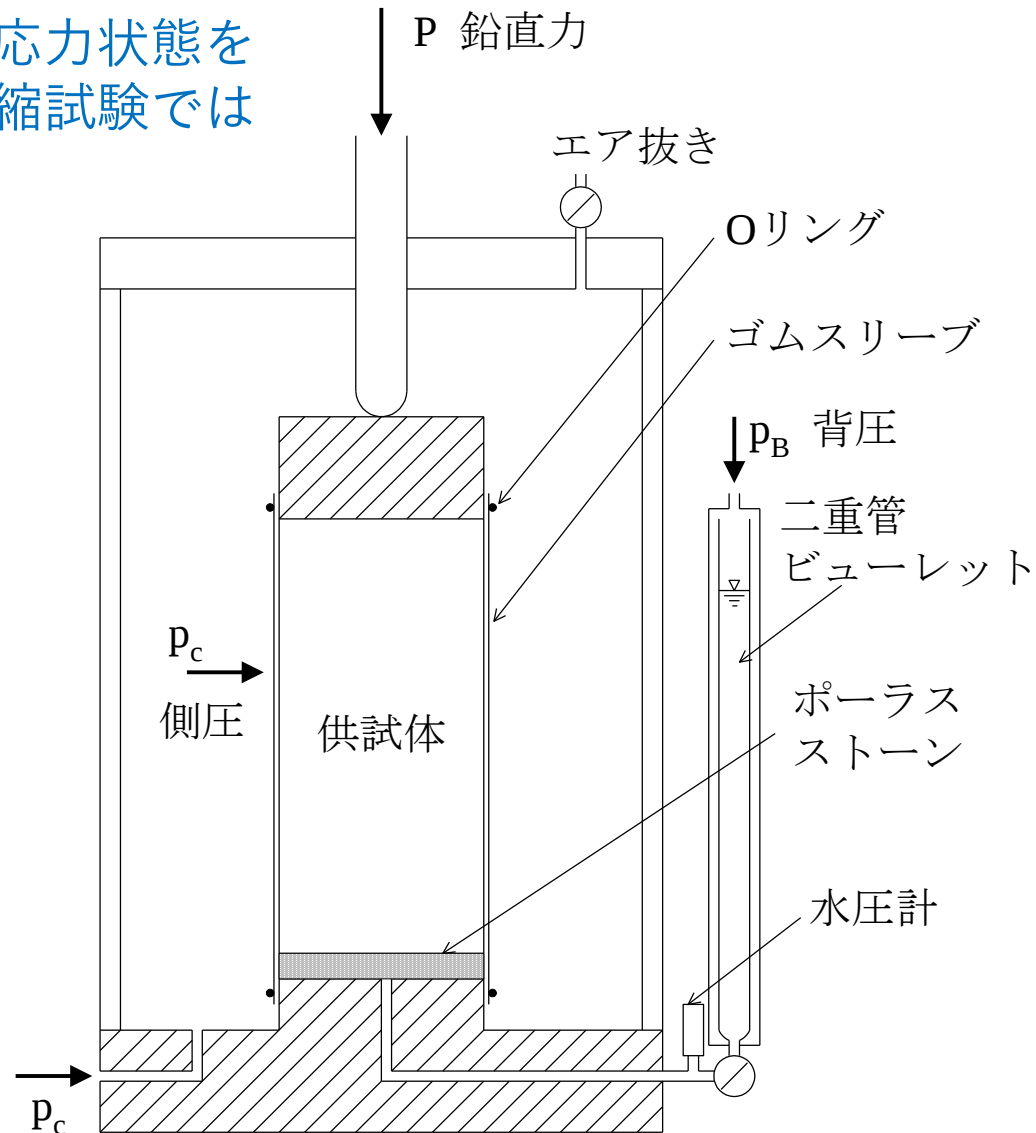
- 一面せん断試験
- 三軸圧縮試験

一面せん断試験



三軸圧縮試験

地盤の深いところの応力状態を再現できる。一軸圧縮試験では不可。



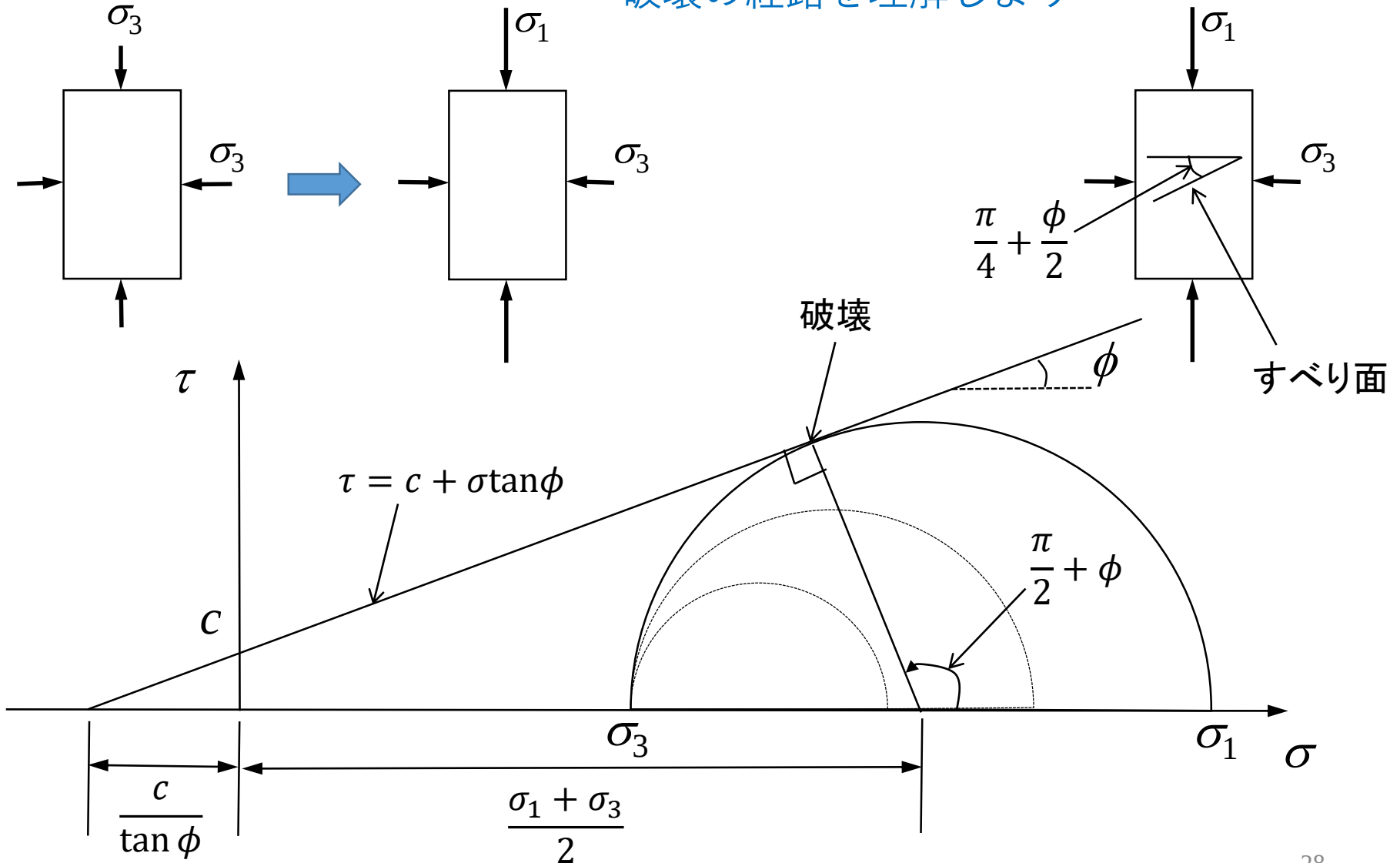
せん断試験条件

1. 圧密をするか, 2. せん断中に排水するか, で以下の3種類がある.

- 非圧密非排水 (UU) せん断
短期 (盛土) 施工短期安定
- 圧密非排水 (CU) せん断
段階 (盛土) 施工短期安定
- 圧密排水 (CD) せん断
段階 (盛土) 施工長期安定

三軸圧縮試験の解釈

破壊の経路を理解しよう



σ, τ 以外の表現

拘束圧成分とせん断成分を考える

- p, q プロット

$$p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3, \quad q = \sigma_1 - \sigma_3$$

三次元応力状態を考慮

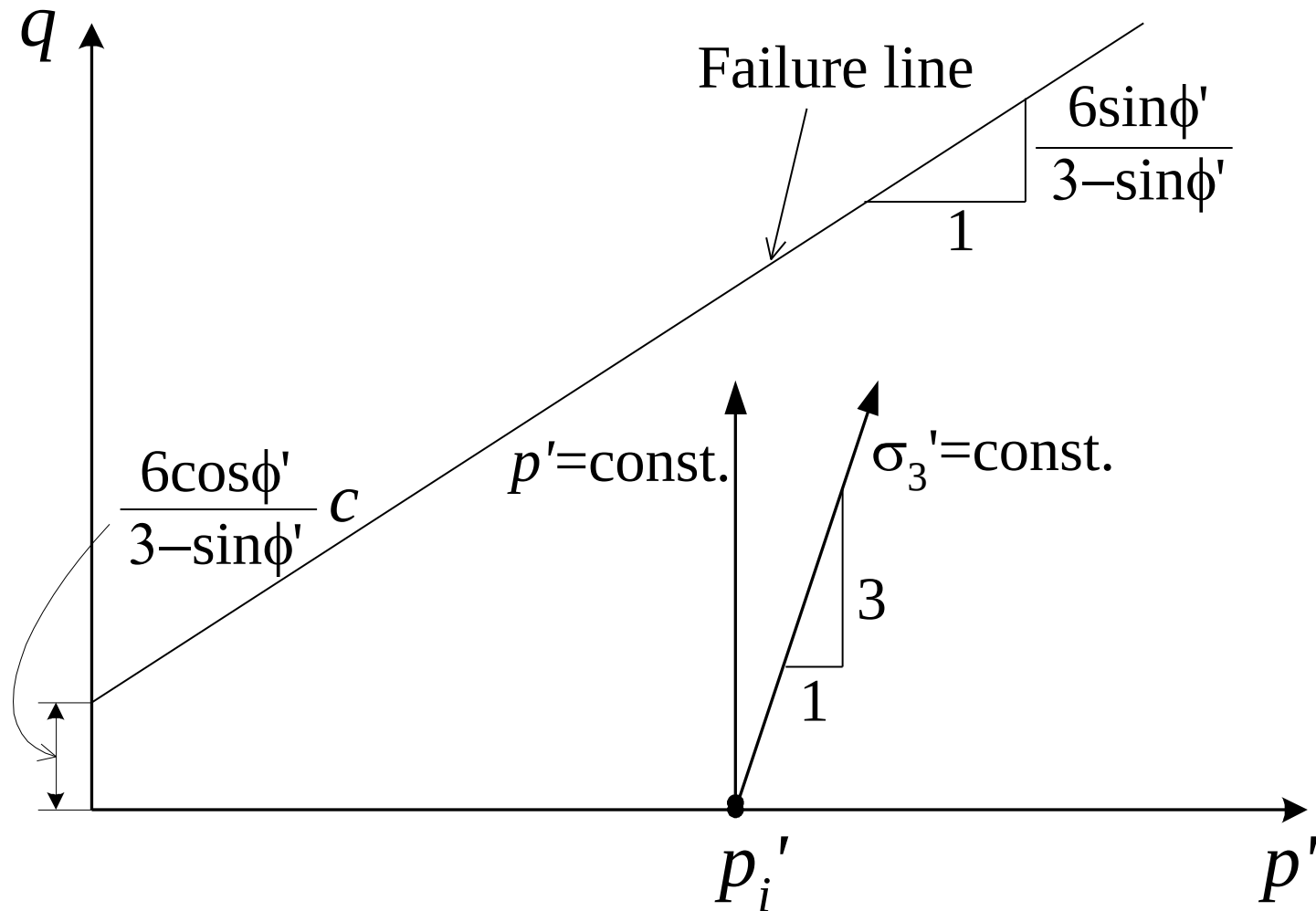
- t, s プロット

$$t' = (\sigma_1' + \sigma_3')/2, \quad s = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

二次元（最大主応力と最小主応力）を考慮

研究的：

$p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$, $q = \sigma_1 - \sigma_3$ を使ってみよう

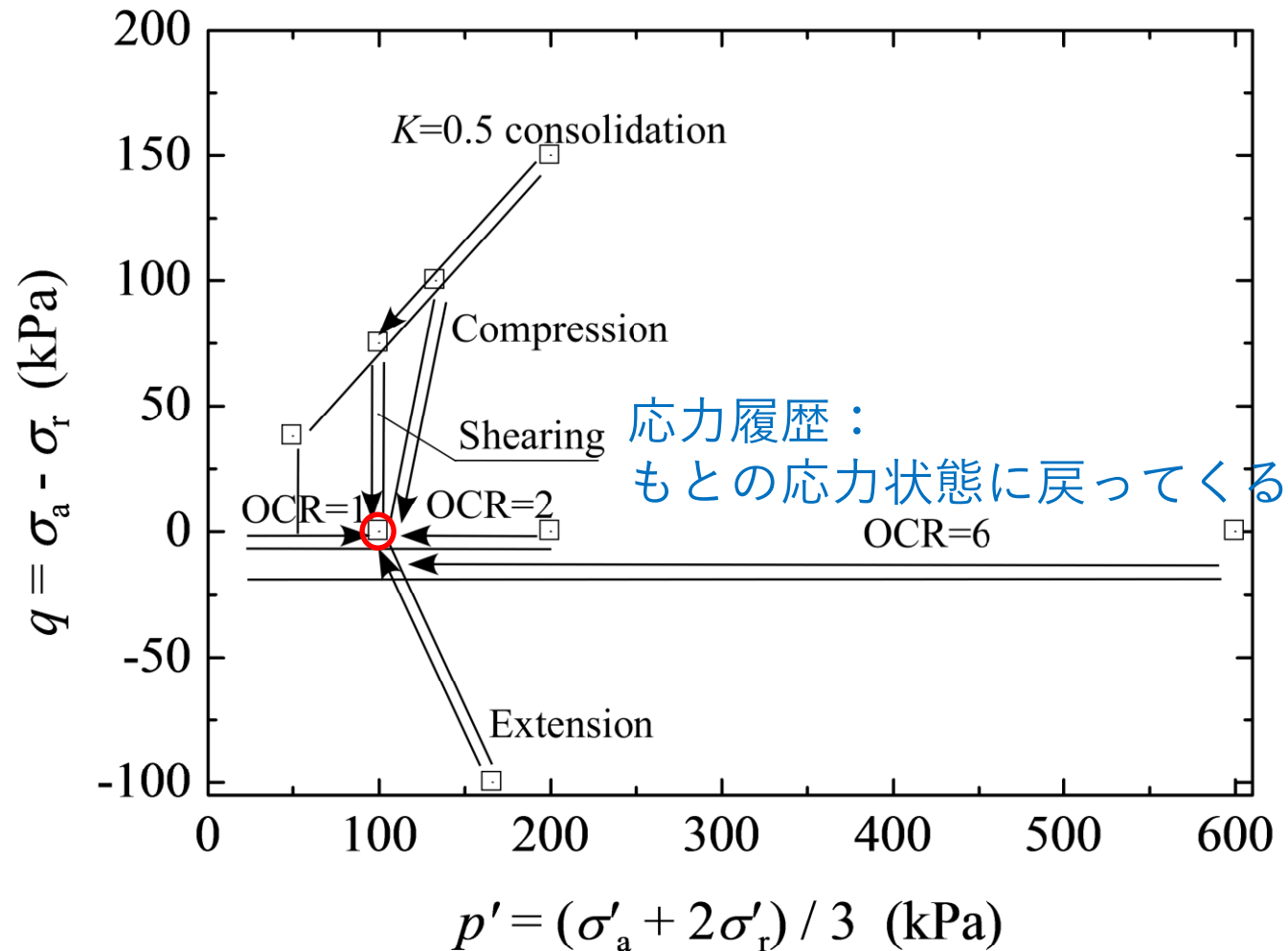


三軸圧縮試験の応力径路

使用した変数が違うのみで， σ ， τ 表示と同じです。

応力履歴

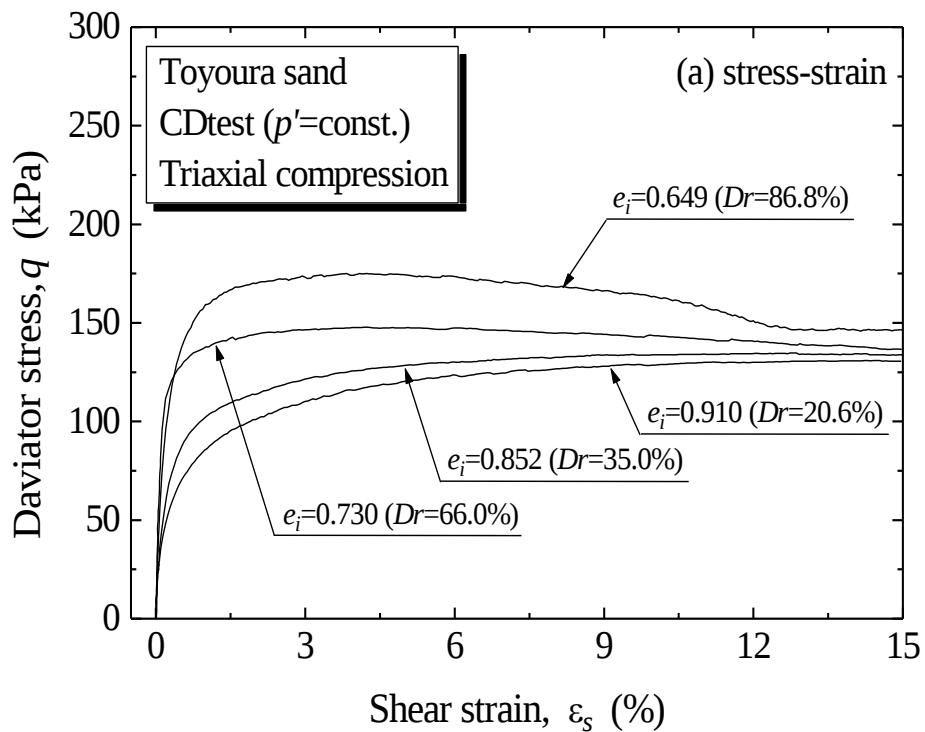
過圧密比（OCR）を理解しよう



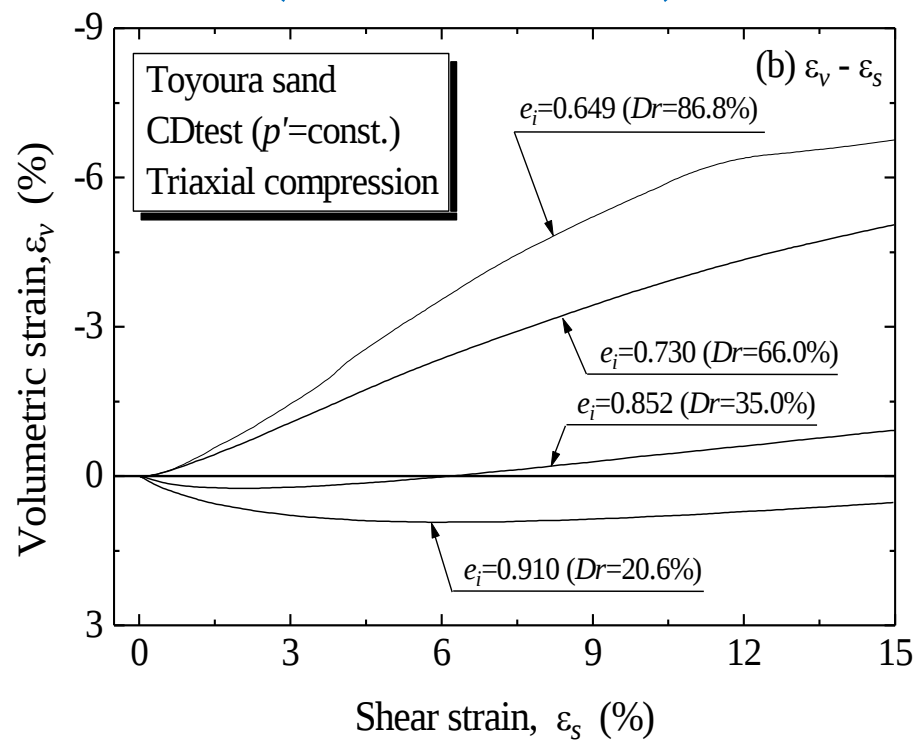
排水せん断特性

砂と粘土，結構似てそう？

密だとピークが現れる

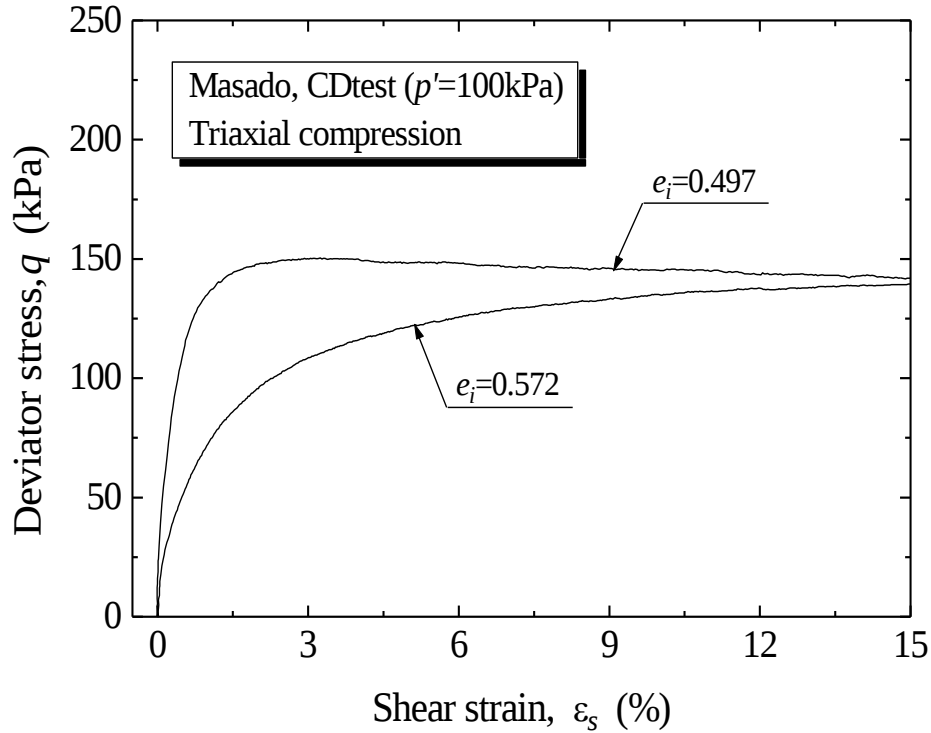


密だと体積膨張
(ダイレタンスー)

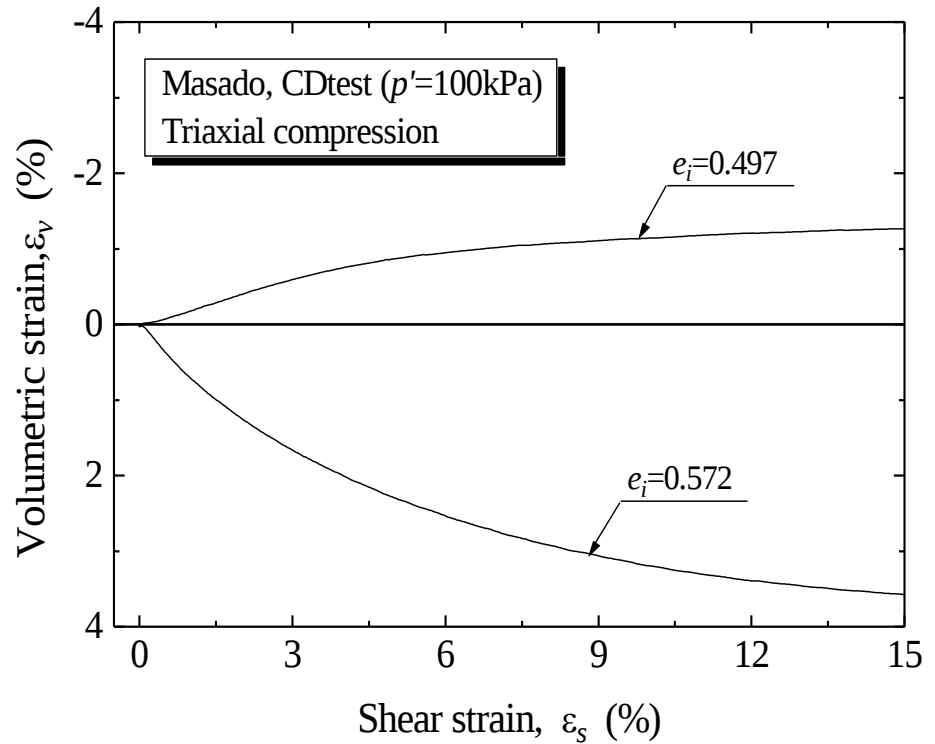


豊浦砂の p' 一定排水圧縮試験

密だとピークが現れる



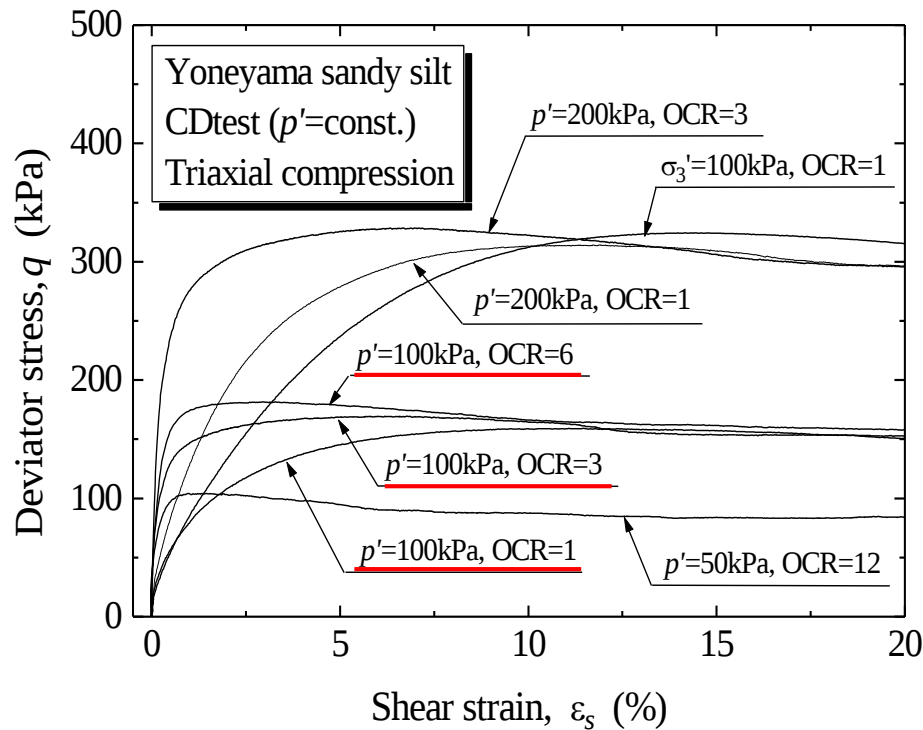
密だと体積膨張
(ダイレタンスー)



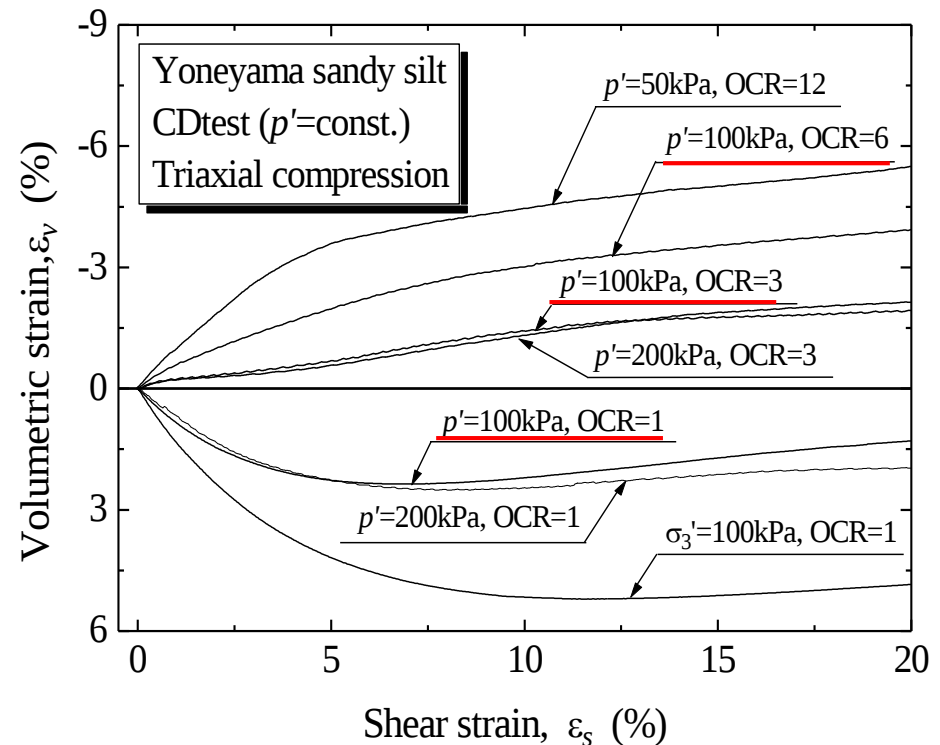
まさ土の p' 一定排水圧縮試験

豊浦砂に比べ、体積圧縮しやすい（粒子破碎が影響？）

過圧密だとピークが現れる



過圧密だと体積膨張
(ダイレタンス)



米山粘性土の p' 一定排水圧縮試験

砂と粘土の違い

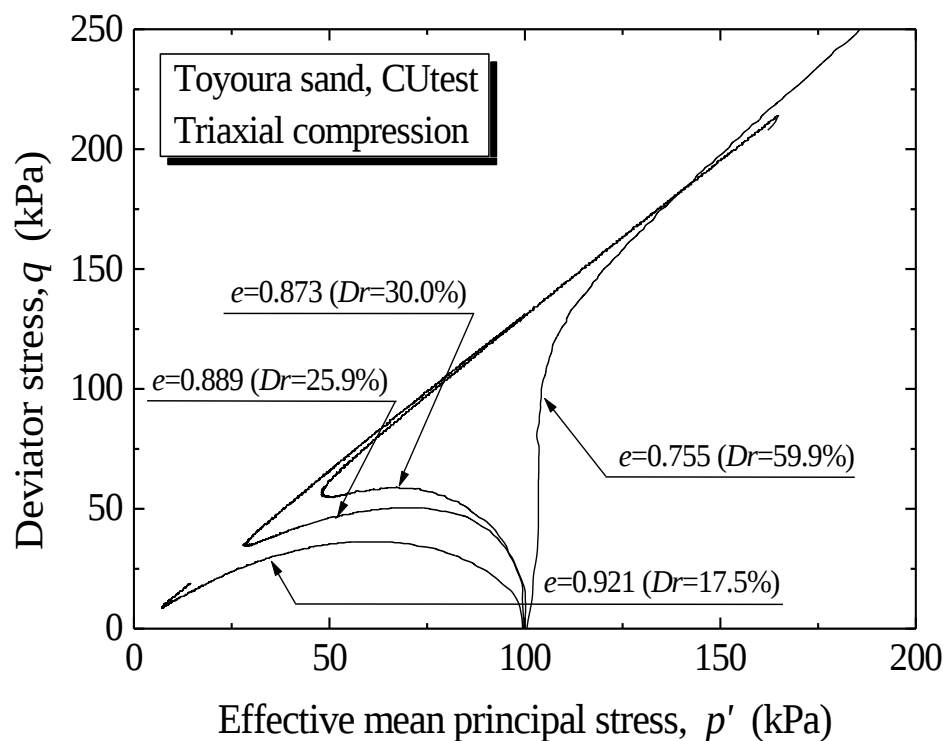
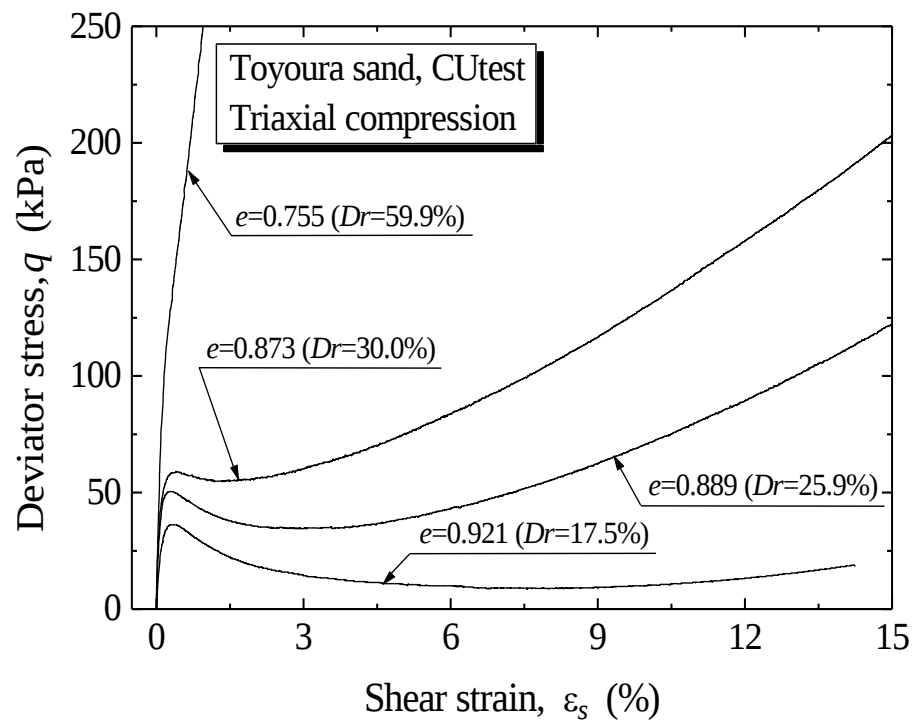
砂：密度（間隙比等）で議論

粘土：応力状態（過圧密比等）で議論

非排水せん断特性

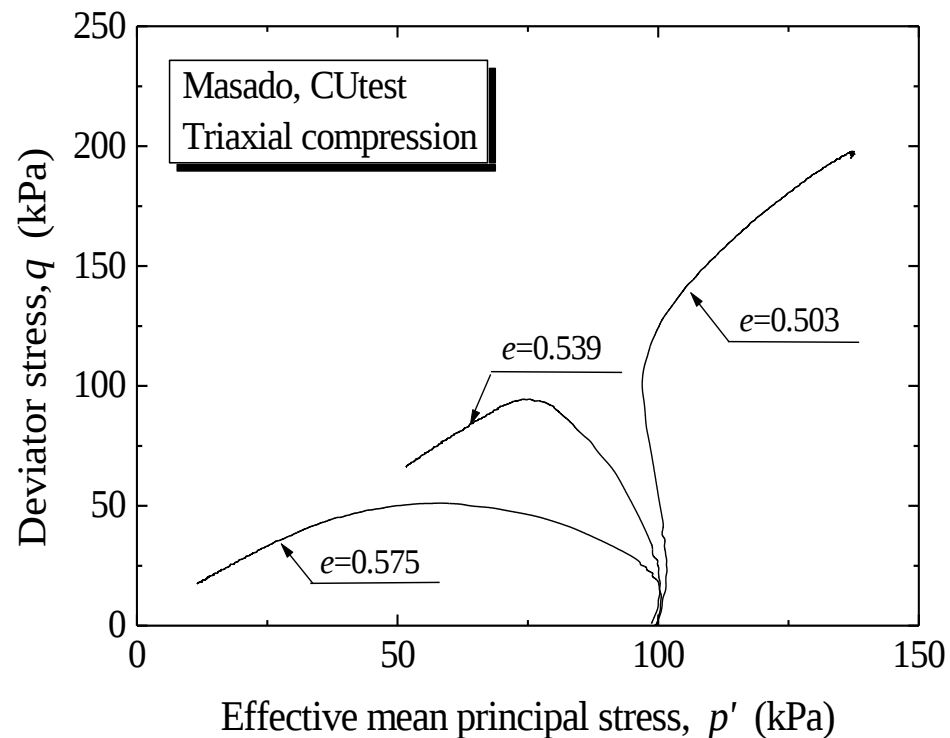
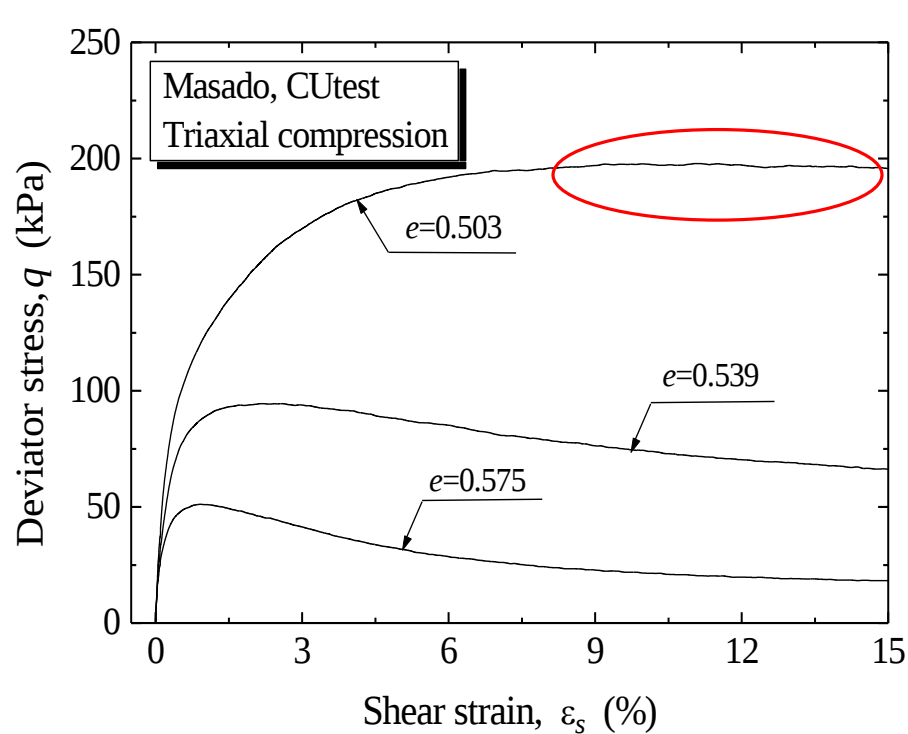
非排水状態を侮るな！

密だと p' が増加，つまり間隙水圧が減少
排水試験の体積膨張と関係します



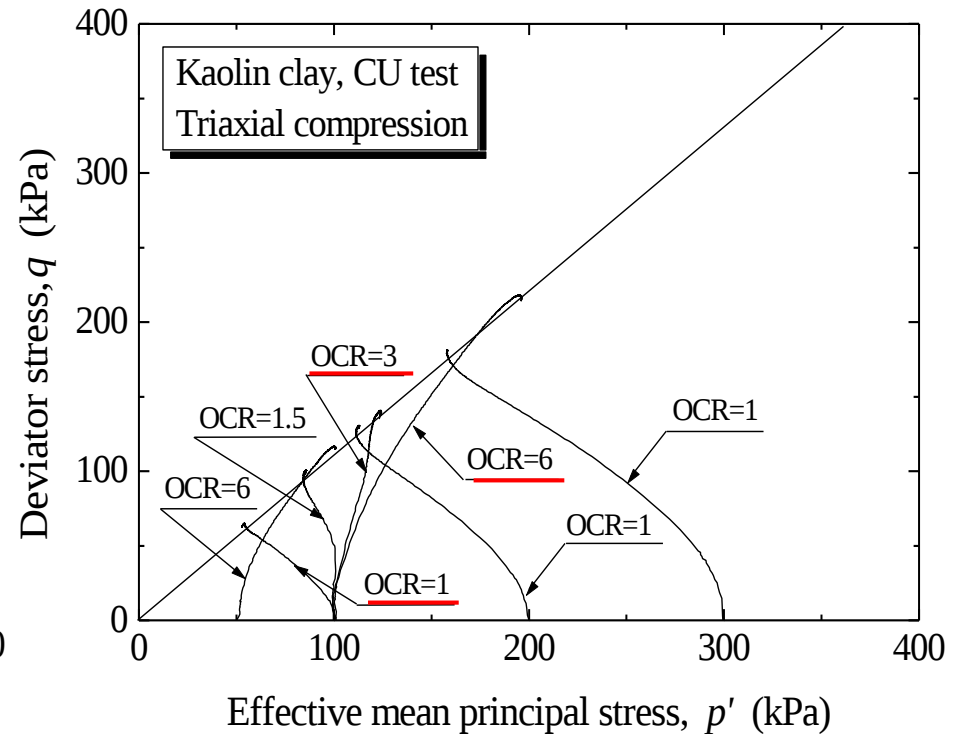
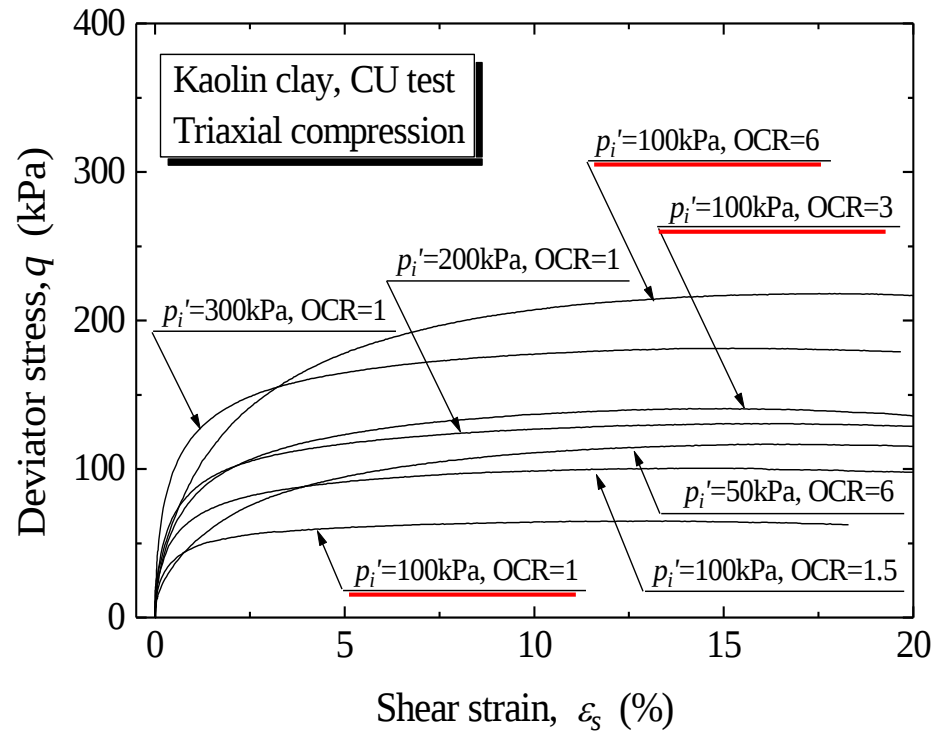
豊浦砂の非排水圧縮試験
密度により，最終到達点が激変

密だと p' が増加，つまり間隙水圧が減少
排水試験の体積膨張と関係します



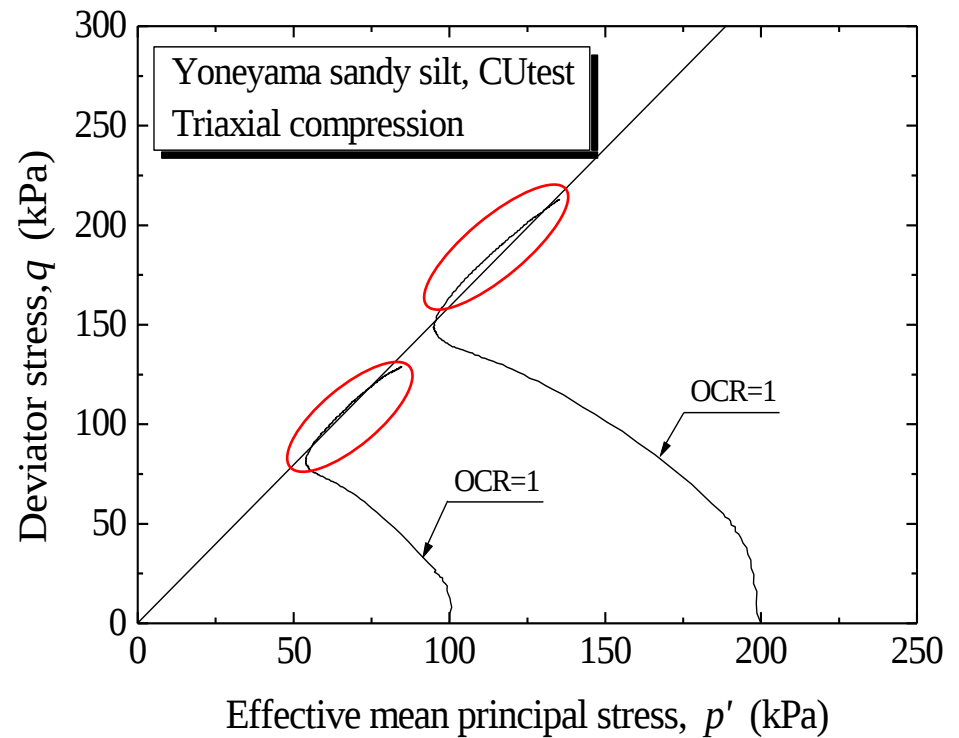
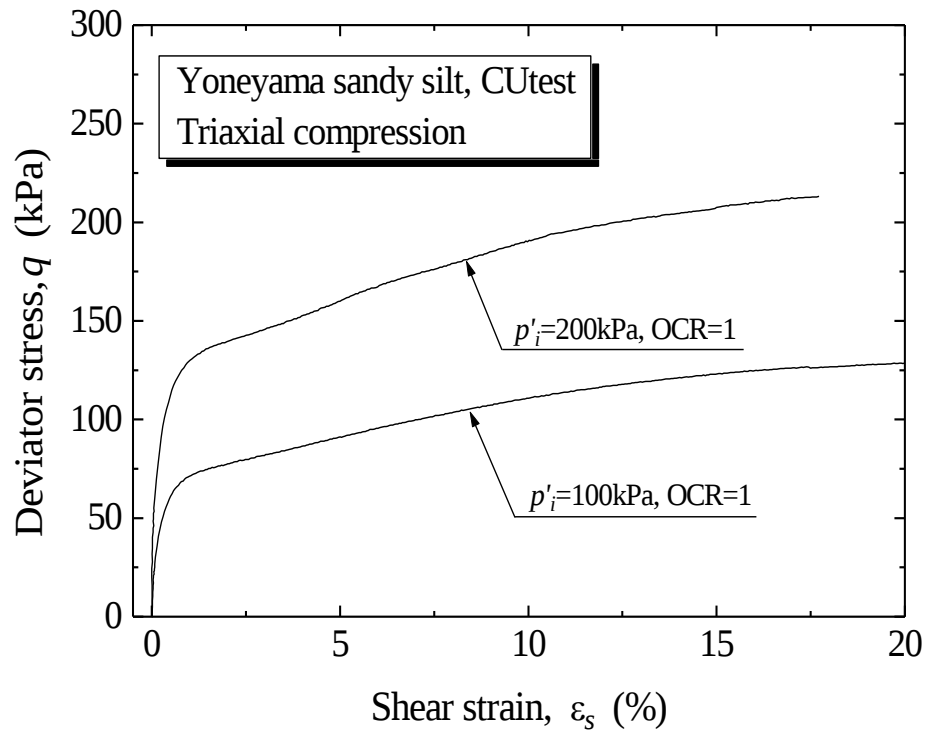
まさ土の非排水圧縮試験
密度により，最終到達点が激変

過圧密だと p' が増加, つまり間隙水圧が減少
排水試験の体積膨張と関係します



カオリン粘土の非排水圧縮試験
OCRにより非排水強度は激変

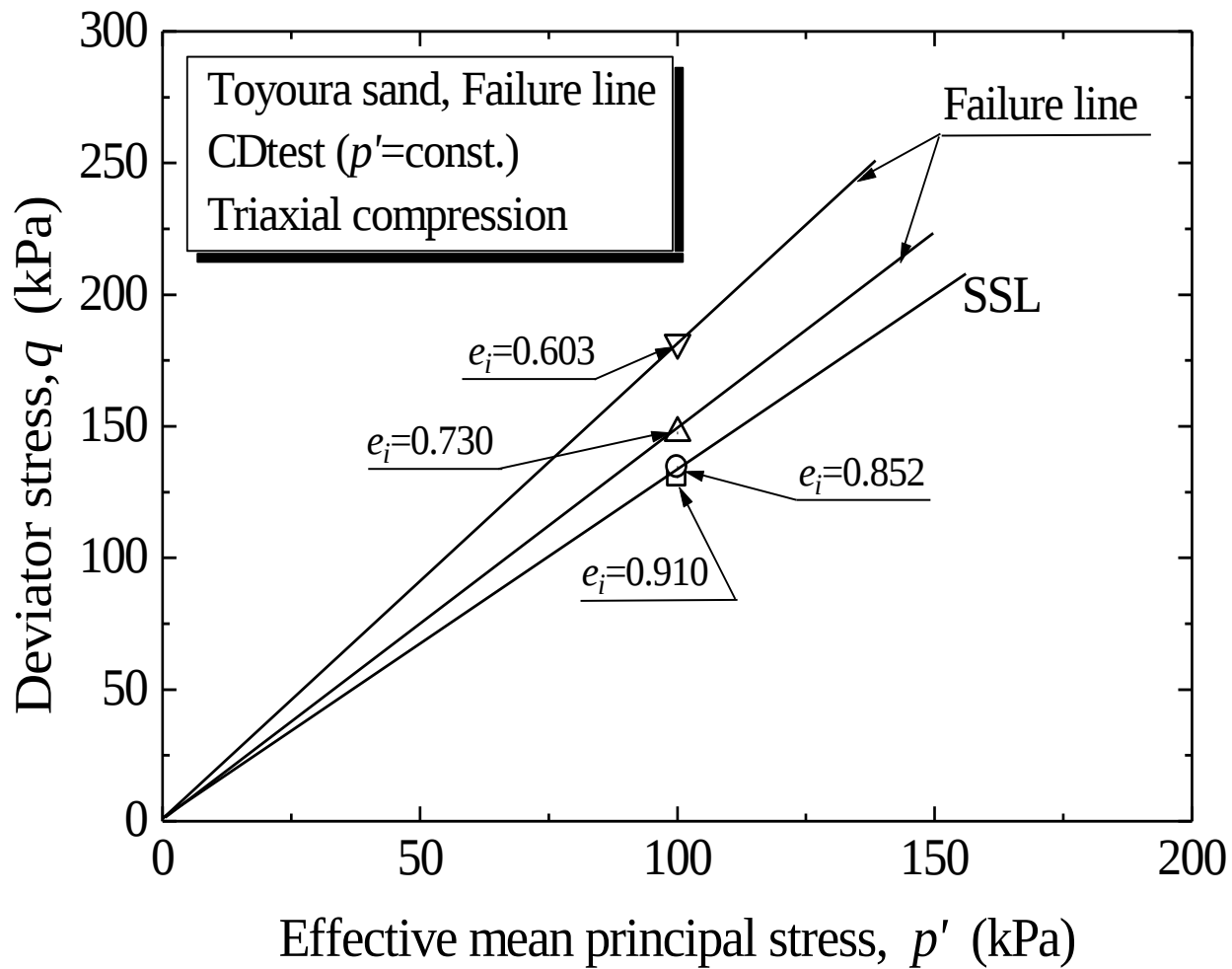
最後に破壊線に沿ってせん断応力が上昇。
砂に似た挙動（砂分が含まれるから）。



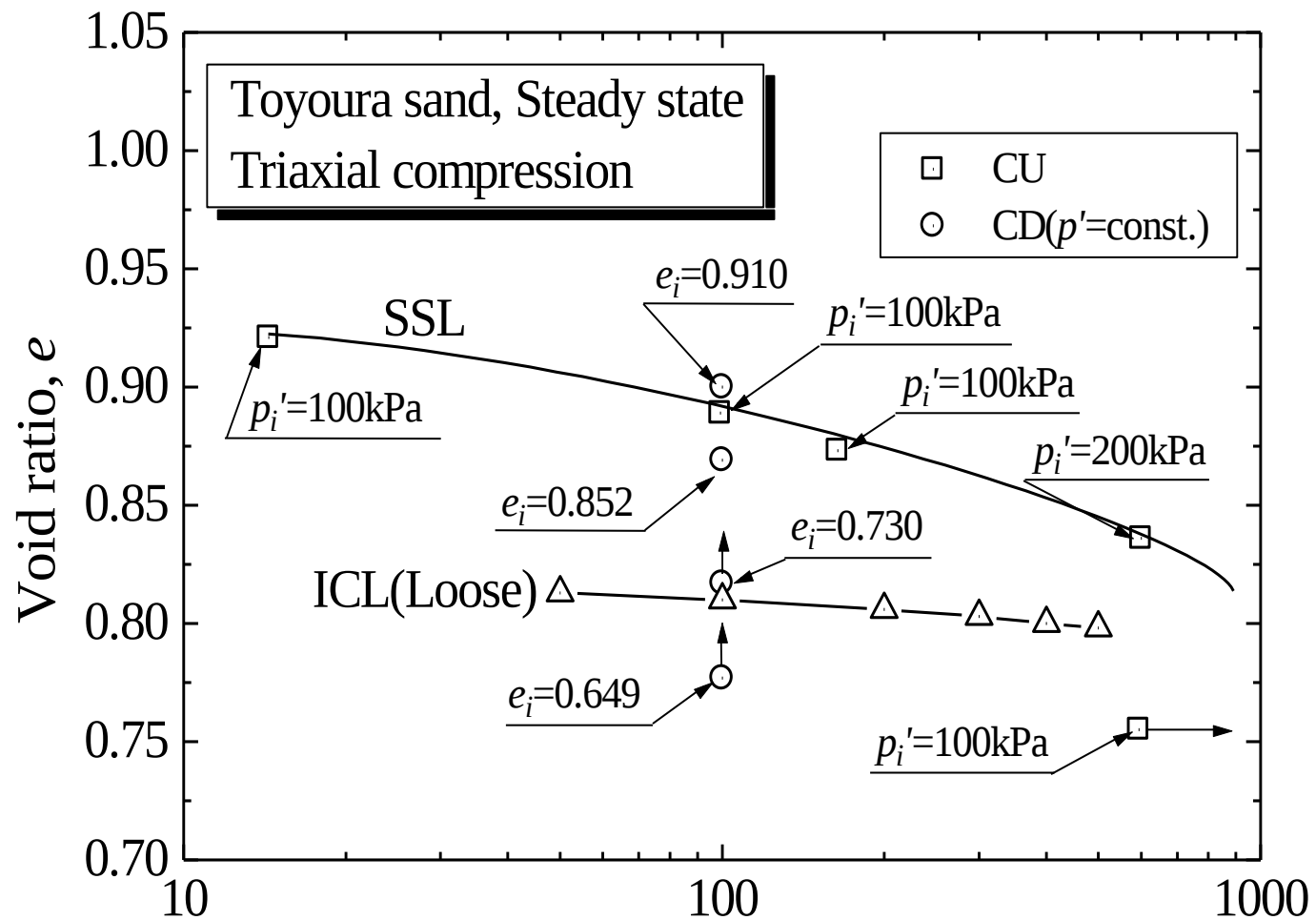
米山粘性土の非排水圧縮試験

破壊と限界状態

密度や過圧密による破壊線の理解

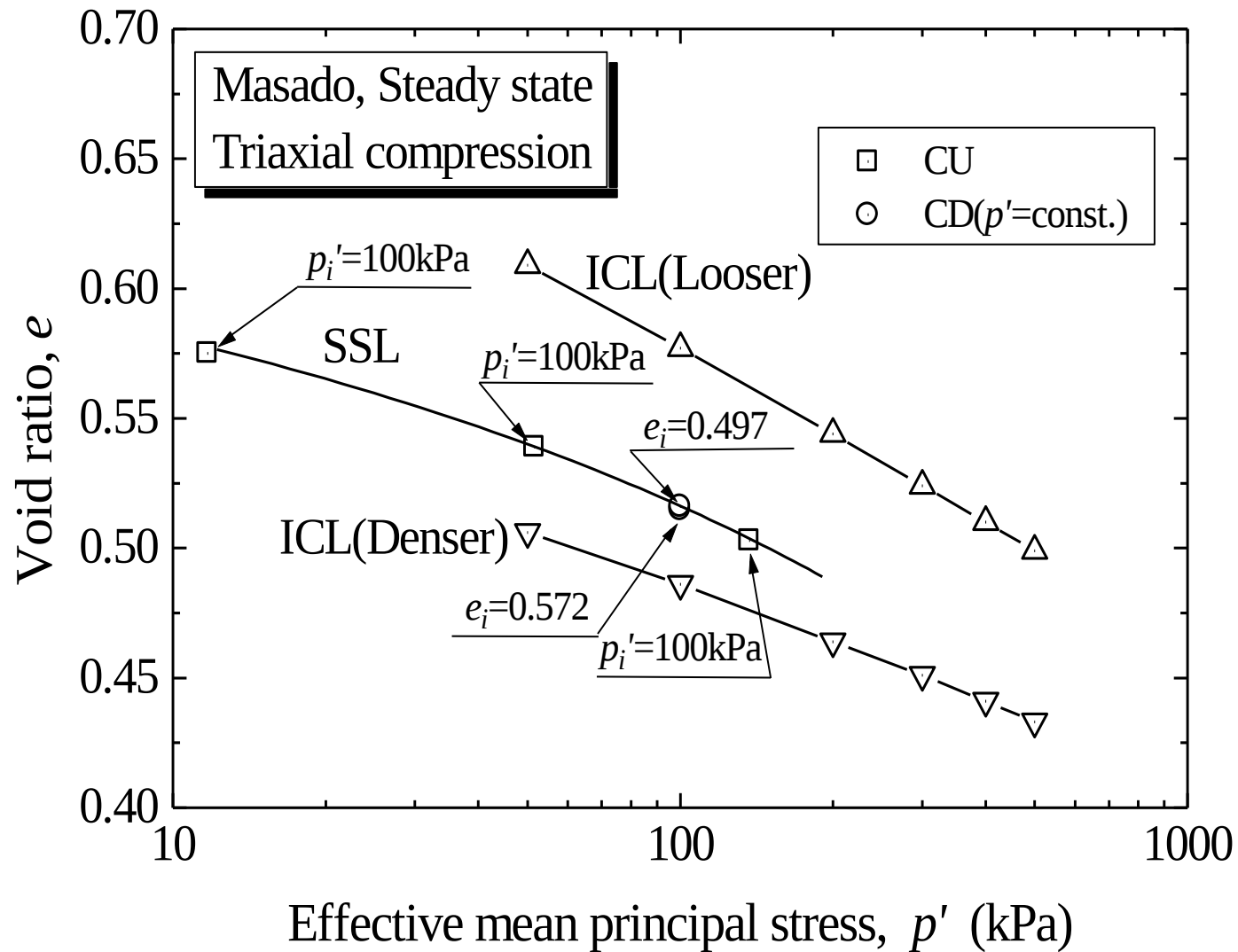


豊浦砂の破壊と限界状態($q - p'$ 平面)
 砂：密なほど ϕ' は大きくなる



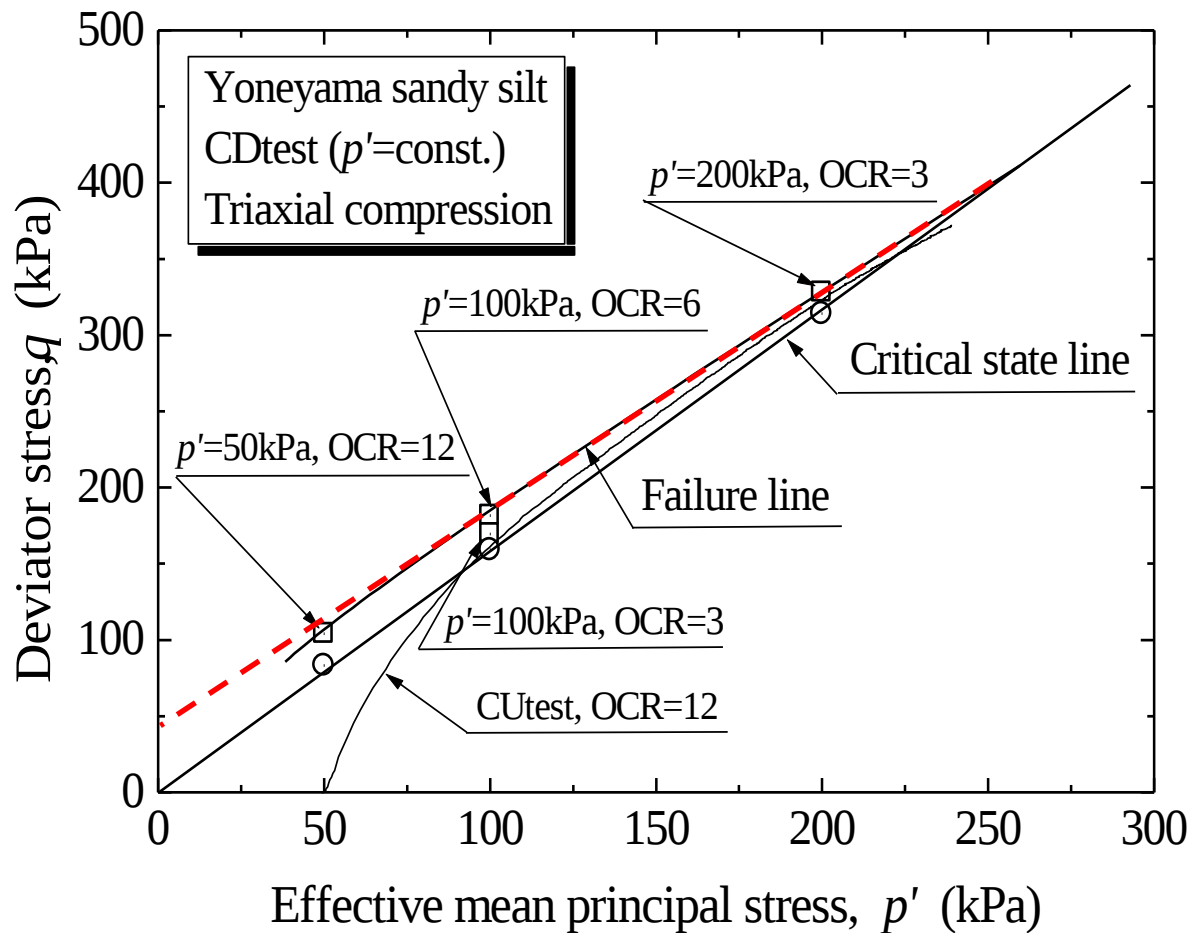
Effective mean principal stress, p' (kPa)
 豊浦砂の限界状態($e - \log p'$ 平面)

限界（定常）状態線は，ゆる詰めの上に上
 ひずみの局所化が発生して限界状態線に達しない（矢印）



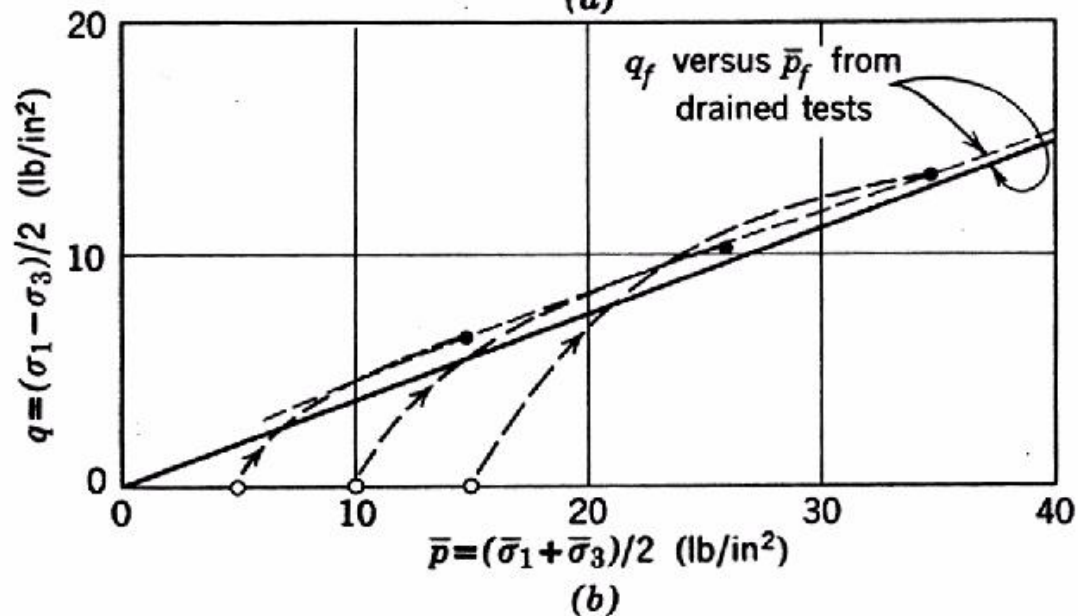
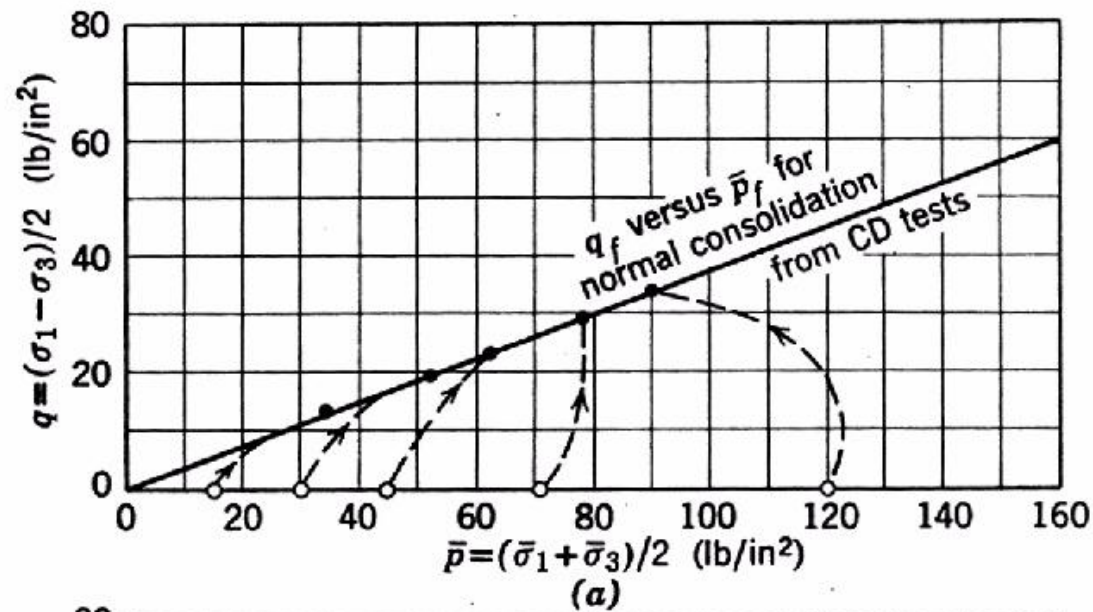
まさ土の限界状態($e - \log p'$ 平面)

限界 (定常) 状態線は、ゆる詰めと密詰めの間にある

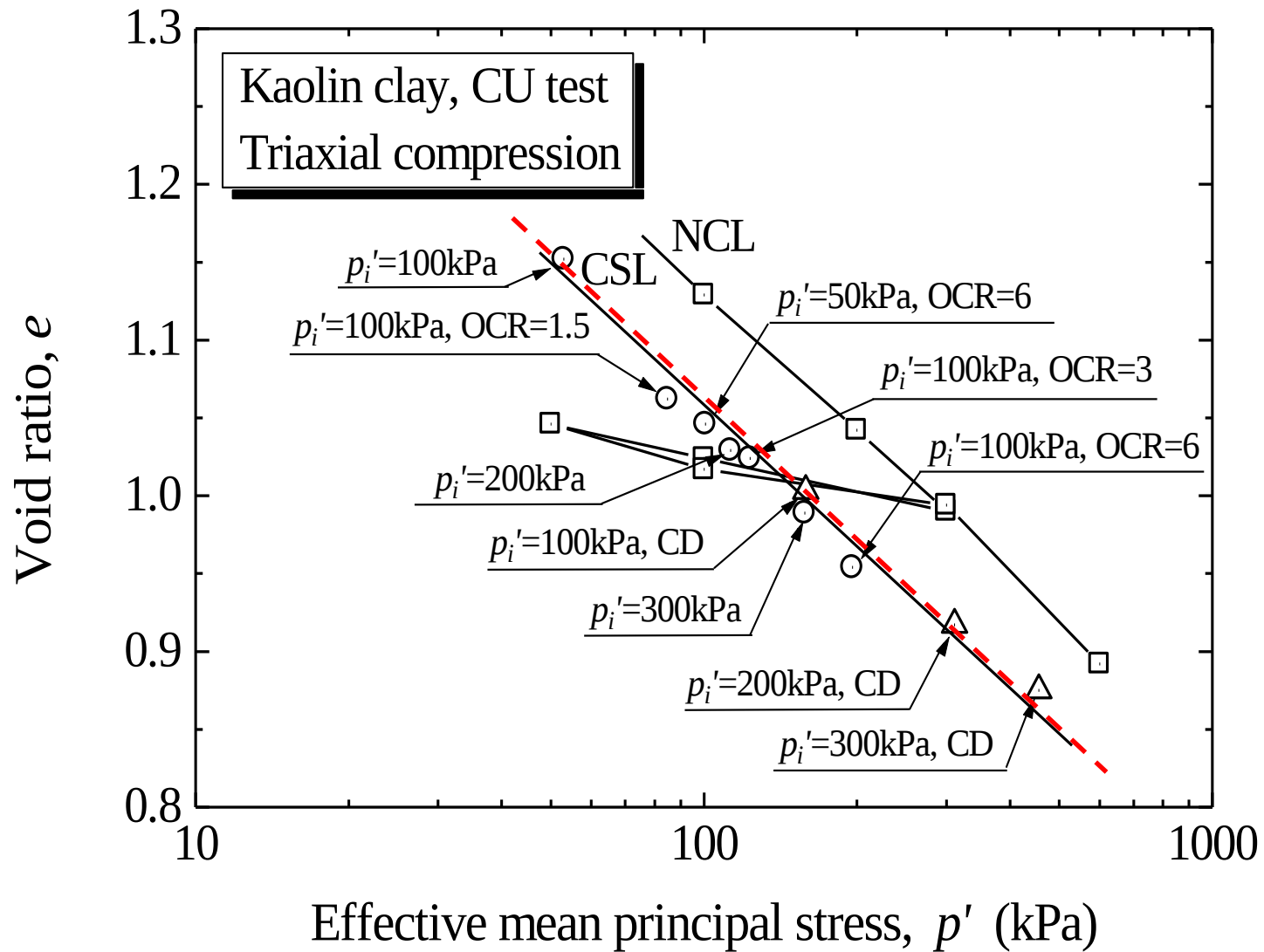


米山粘性土の破壊と限界状態($q - p'$ 平面)

粘土のOCR供試体： c' が現れ ϕ' は小さく
 p' が大きくなると正規圧密と同じ

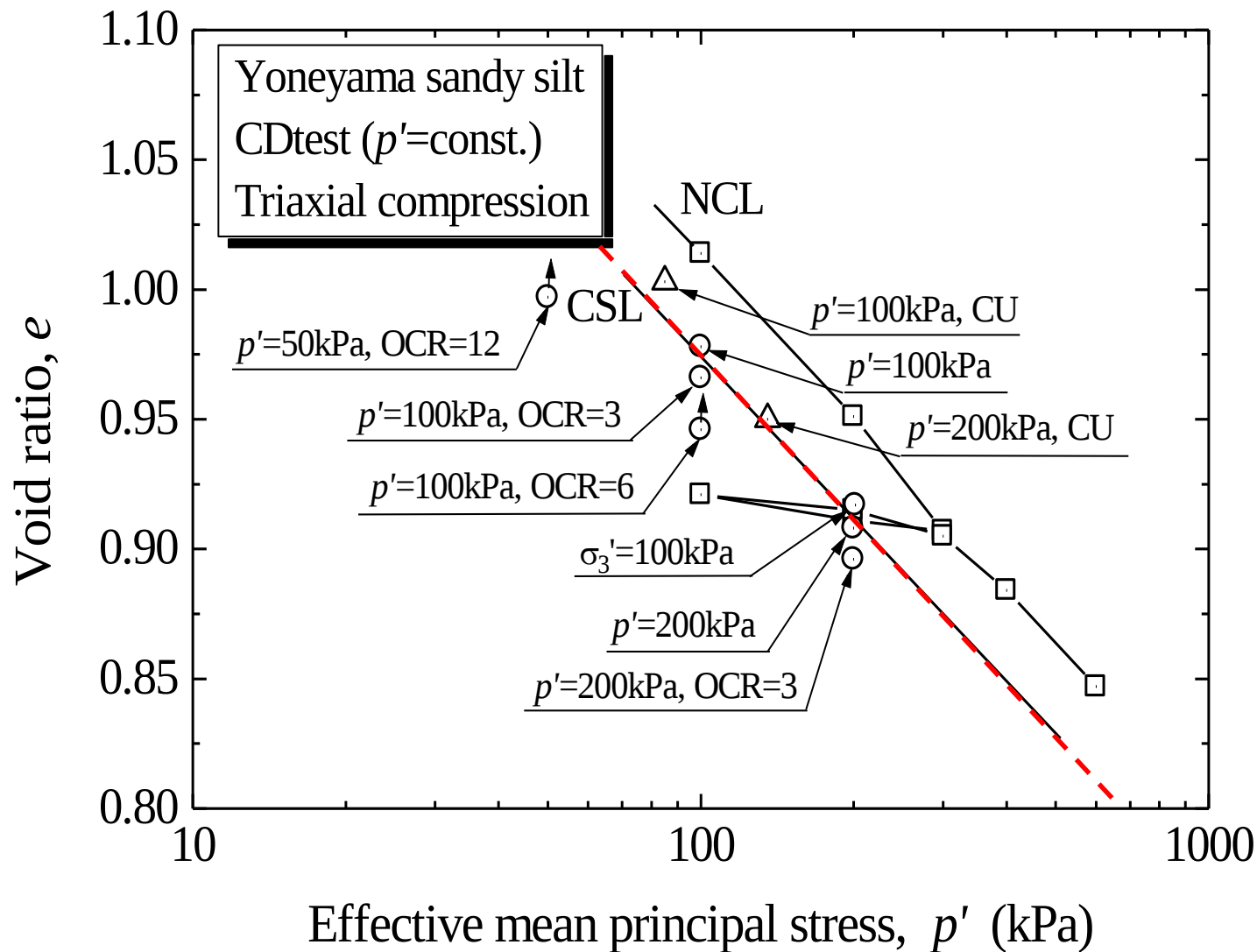


過圧密粘土の破壊線(Lambe and Whitman, 1969)₄₆



カオリン粘土の限界状態($e - \log p'$ 平面)

限界状態線は、正規圧密線の左側



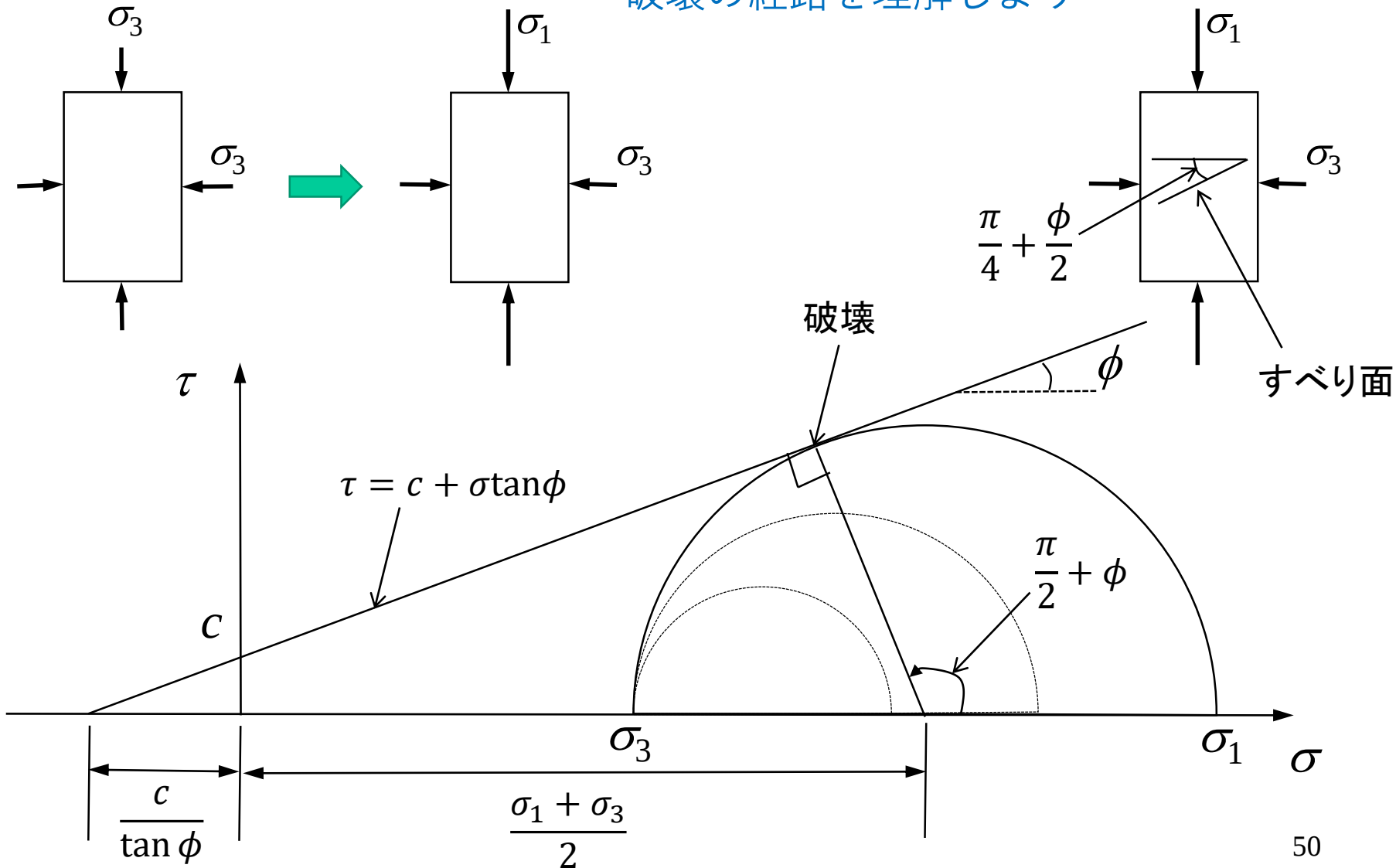
米山粘性土の限界状態($e - \log p'$ 平面)

限界状態線は、正規圧密線の左側

ひずみの局所化の写真

三軸圧縮試験の解釈

破壊の経路を理解しよう



ひずみの局所化(排水三軸飽和土)

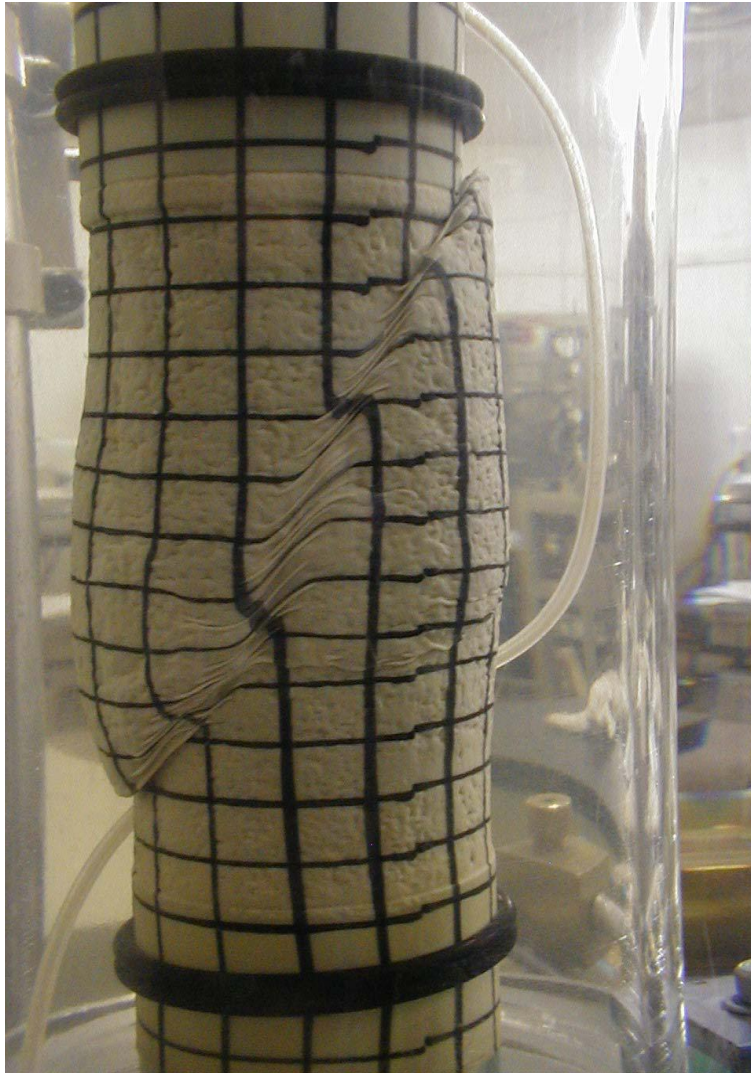


密な豊浦砂



過圧密米山粘性土

ひずみの局所化(三軸不飽和土)

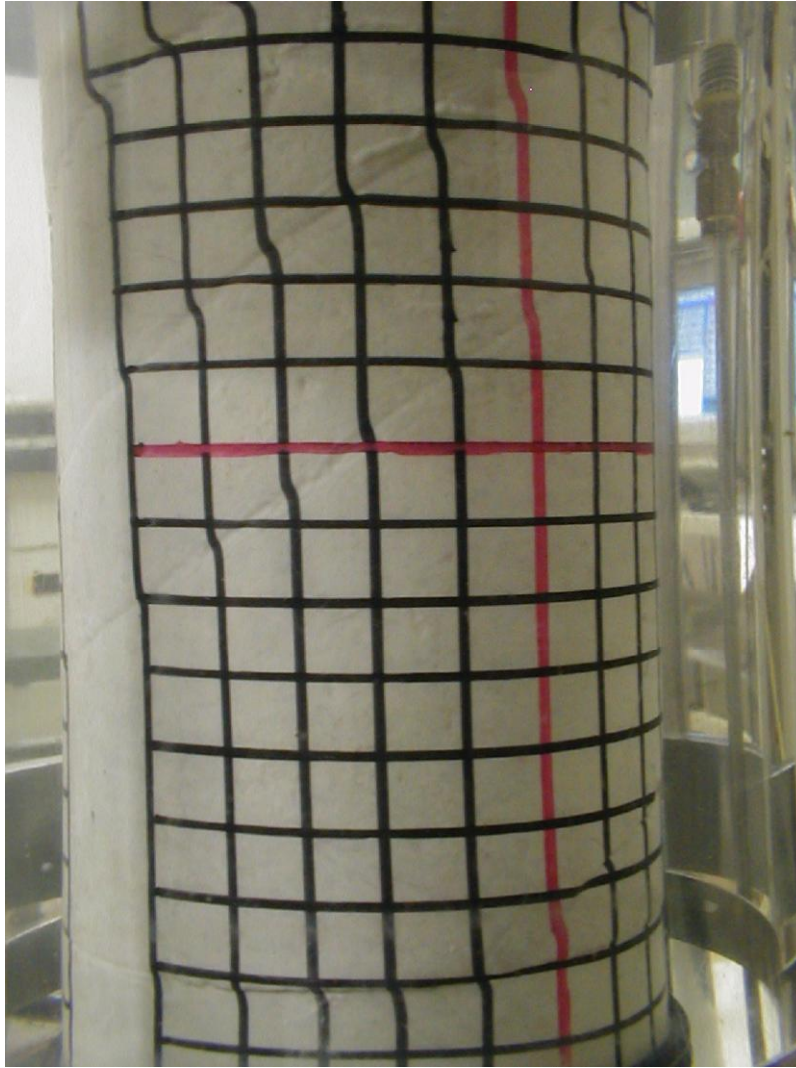


不飽和米山粘性土



せん断面の観察

ひずみの局所化(中空不飽和土)

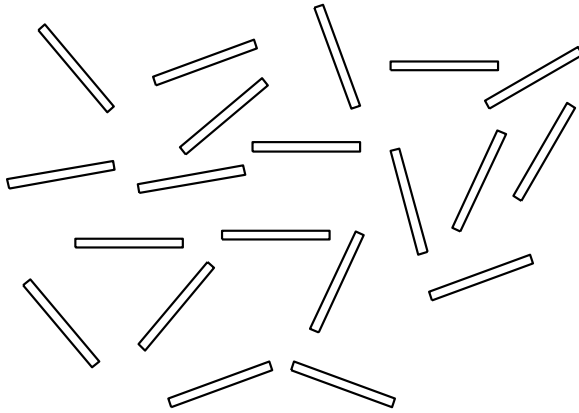


不飽和米山粘性土

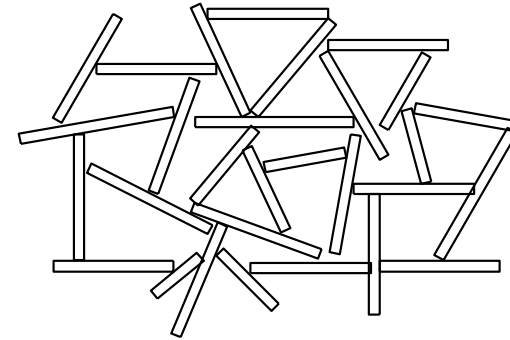


せん断面の観察

配向性
無し

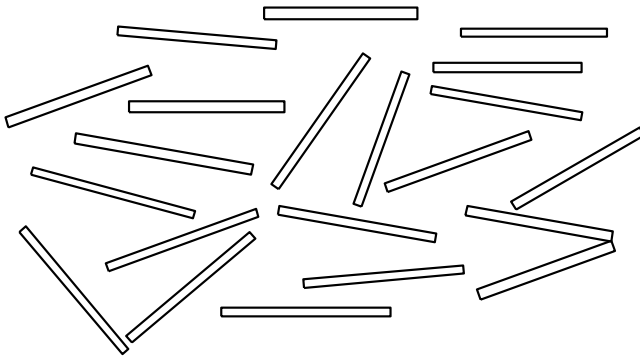


(a) Random structure
ランダム構造

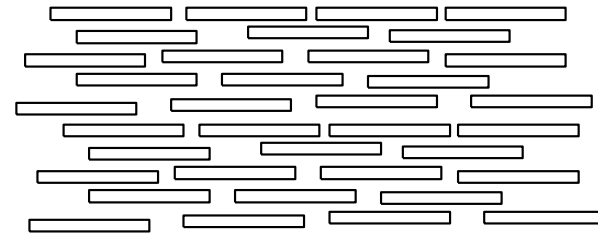


(b) Flocculent structure
綿毛構造

配向性
有り



(c) Dispersed structure
分散構造



(d) Oriented Structure
配向構造

粘土粒子の配列
物理的接触 + 電荷により安定

ひずみの局所化(局所せん断)



リングせん断試験：大変形により，条痕が現れる
カオリン粘土

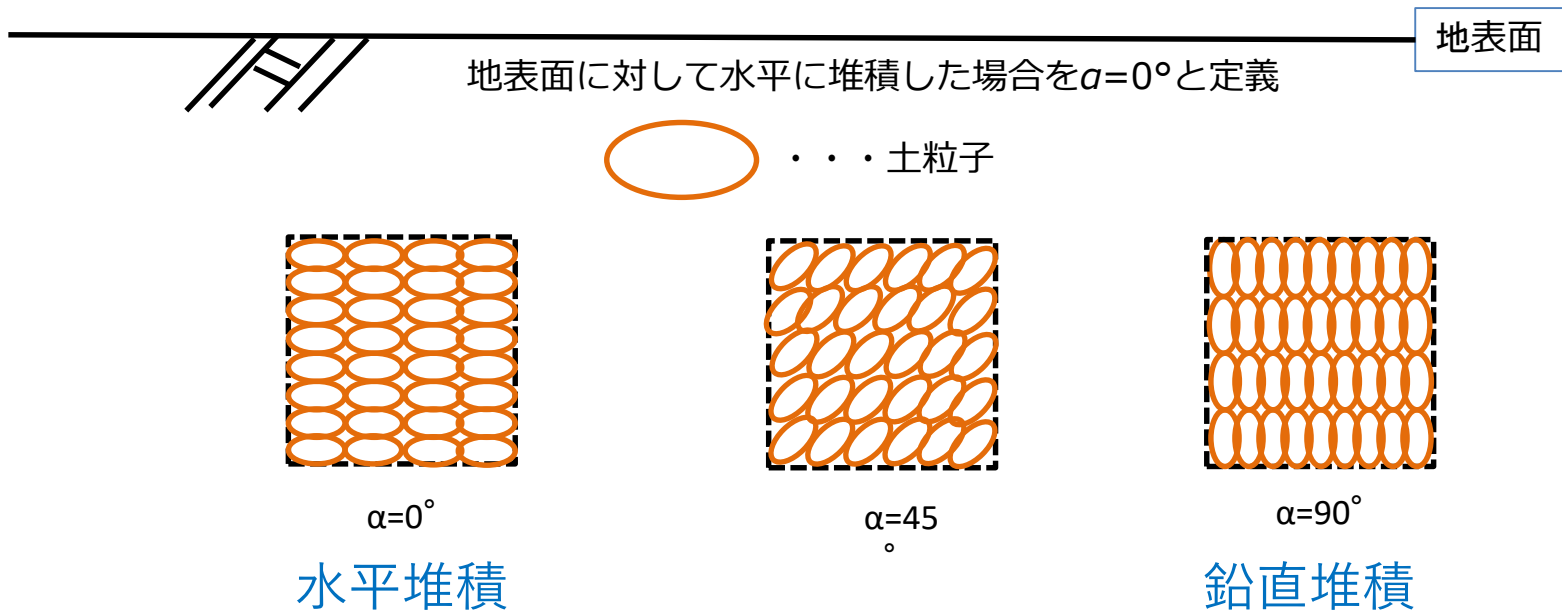


米山粘性土

応用問題 異方性について

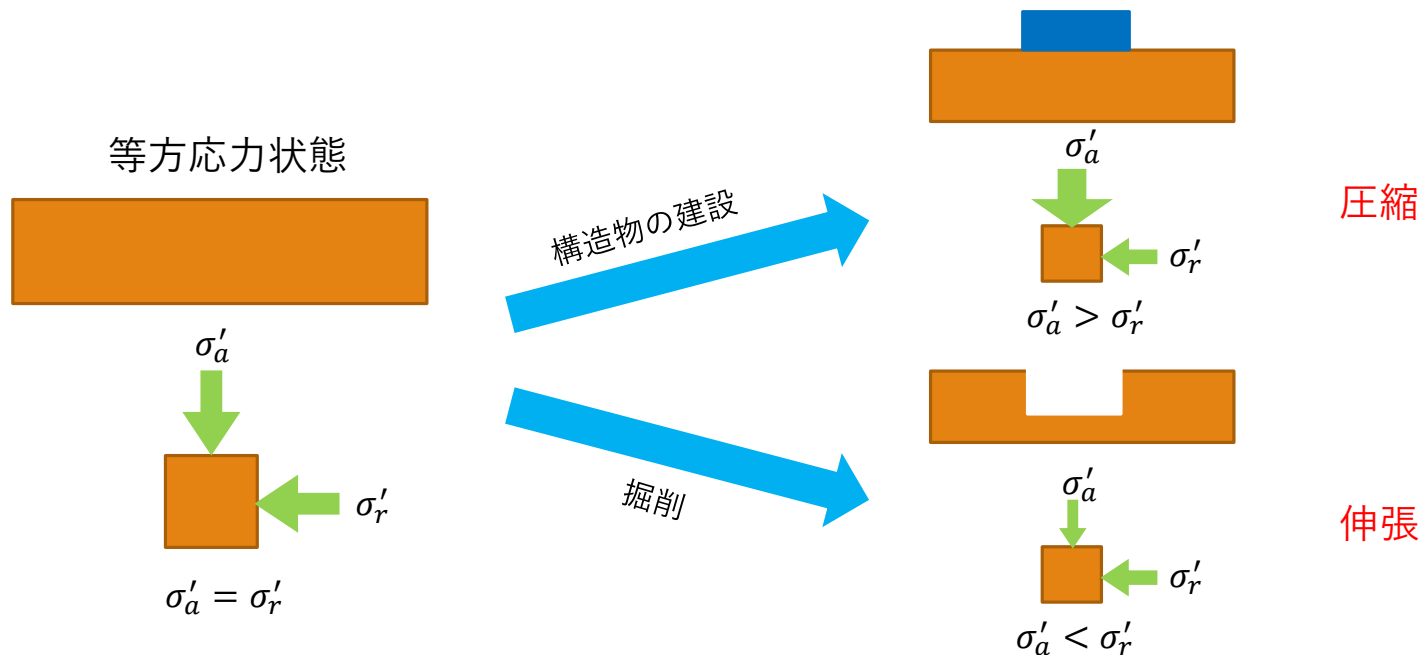
固有異方性

固有異方性 $\Rightarrow$ 粒子形状や堆積時の粒子配向性により発生する



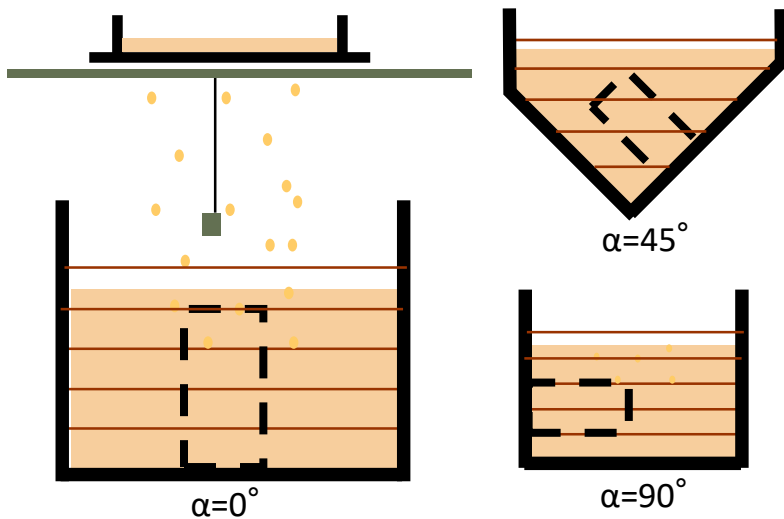
誘導異方性

誘導異方性 ⇒ 構造物の建設や応力履歴より発生する

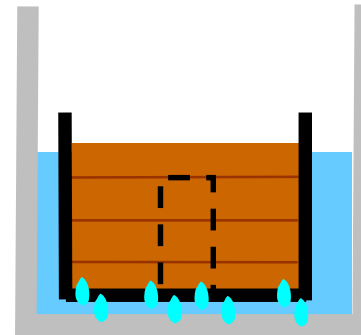


供試体作製方法（固有異方性）

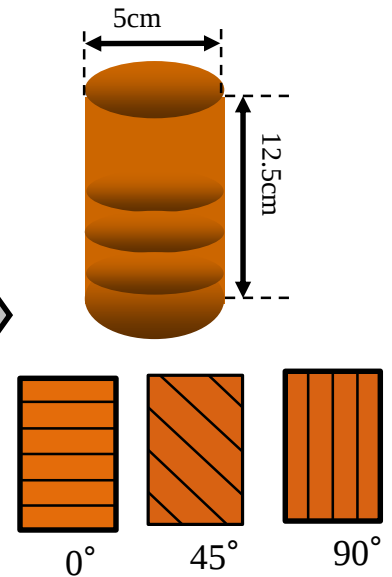
空中落下法⇒密な供試体となる



モールド内に一定の高さを保ちながら砂を落とす

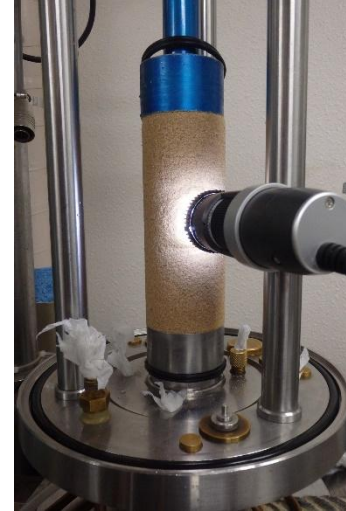


水中養生を行う

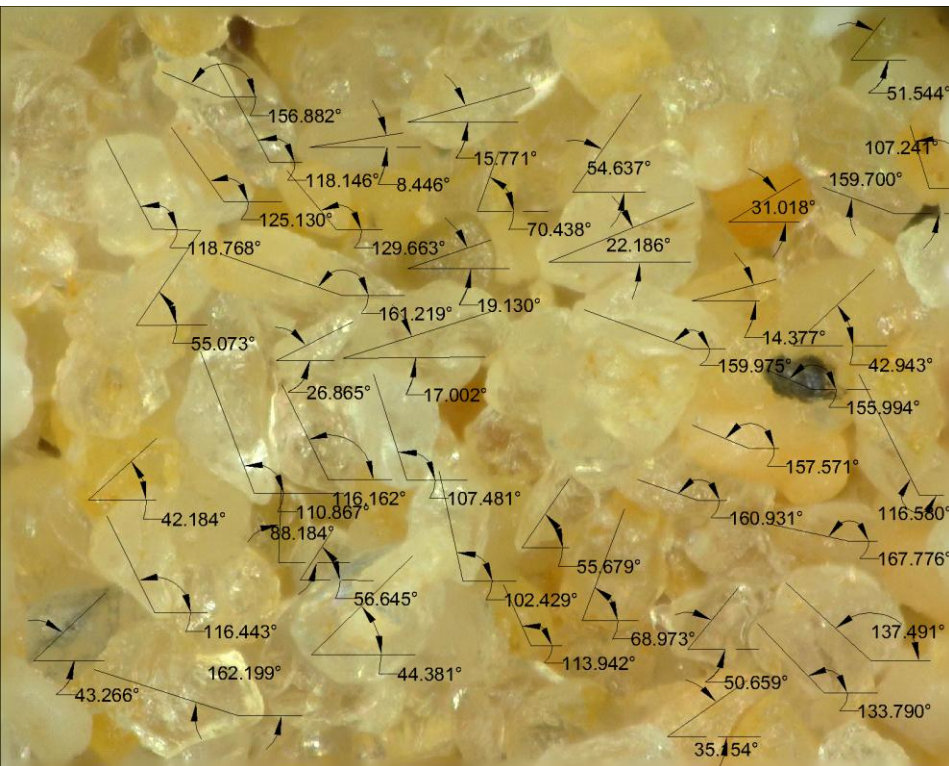


トリミングを行い供試体を形成する

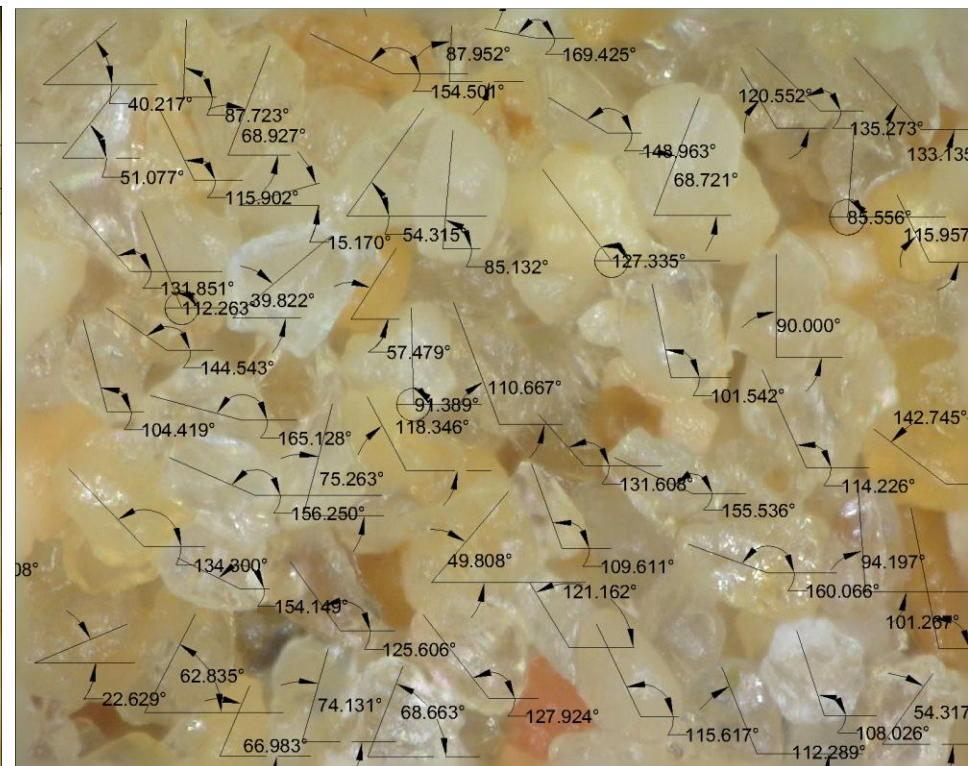
Sand particle orientation



Triaxial specimen: Toyoura sand, $D_r=40\%$, Wet tamping



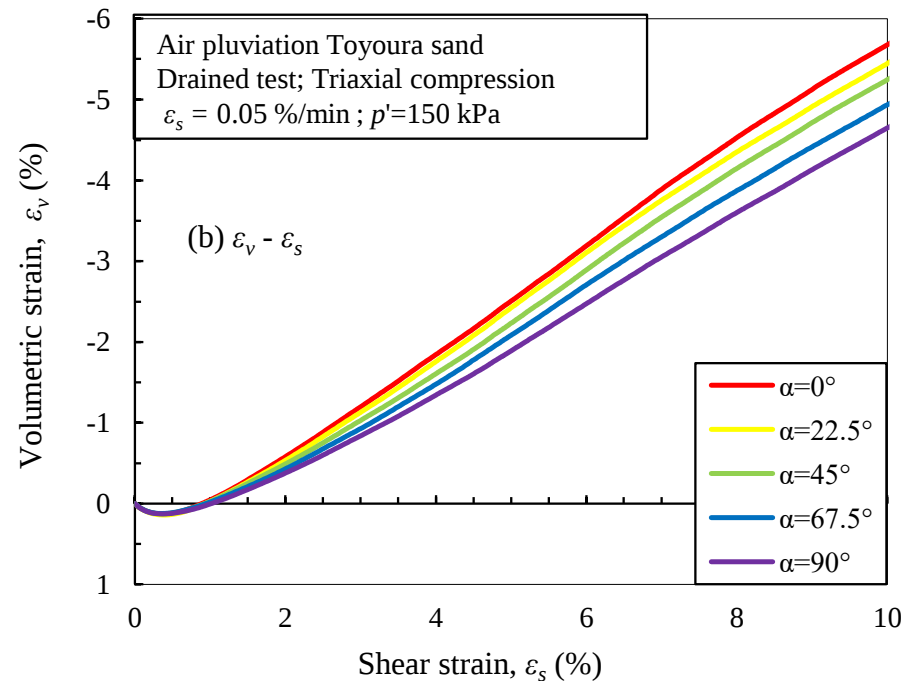
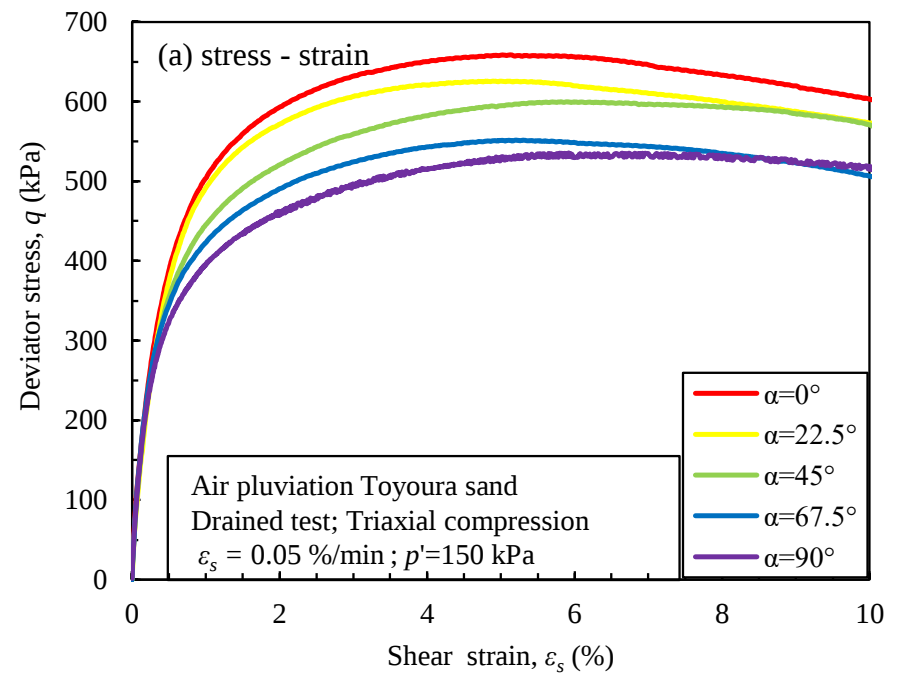
After consolidation



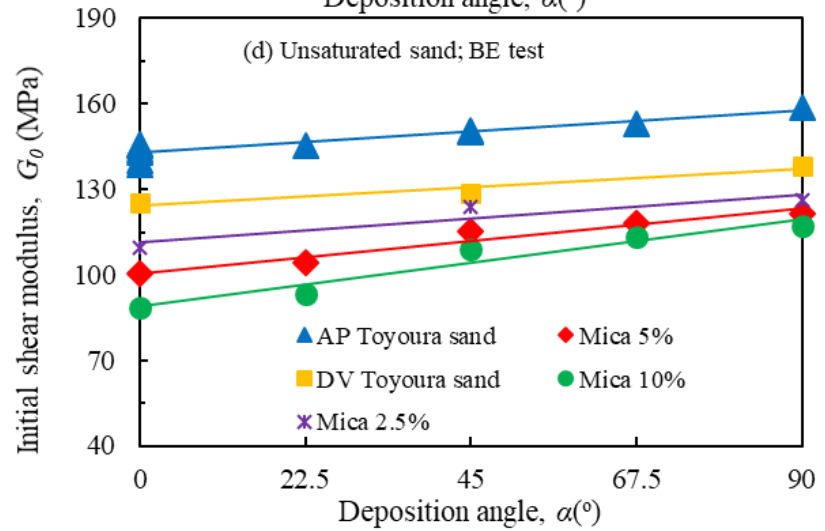
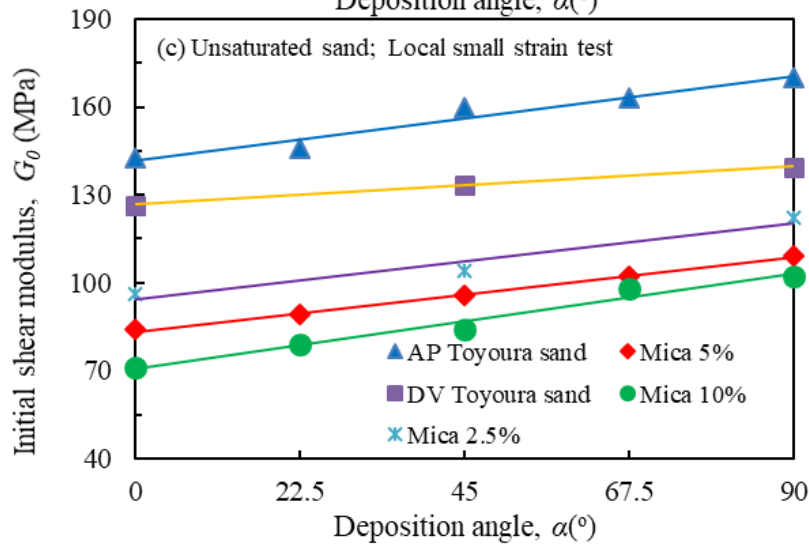
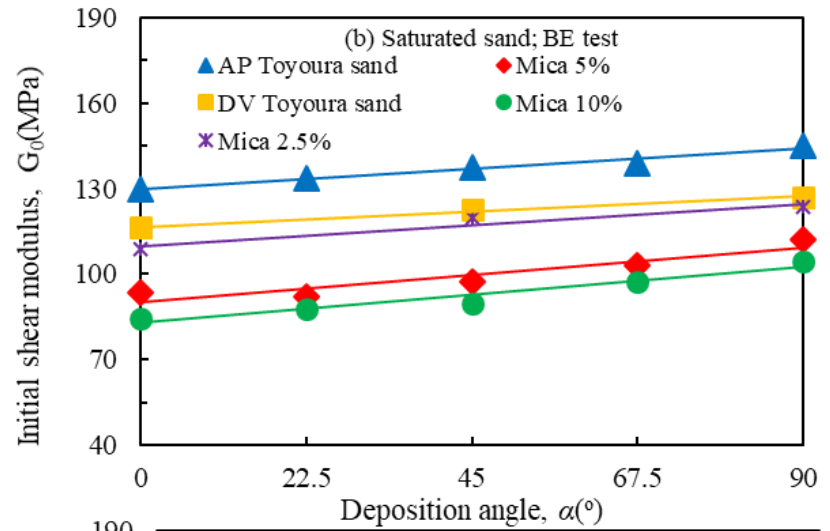
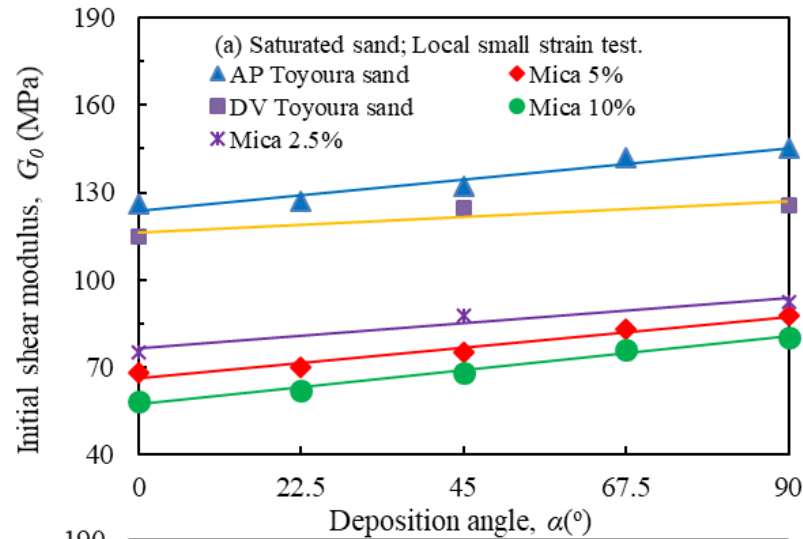
After liquefaction

排水強度異方性 三軸試驗

水平堆積：強度大
鉛直堆積：強度小



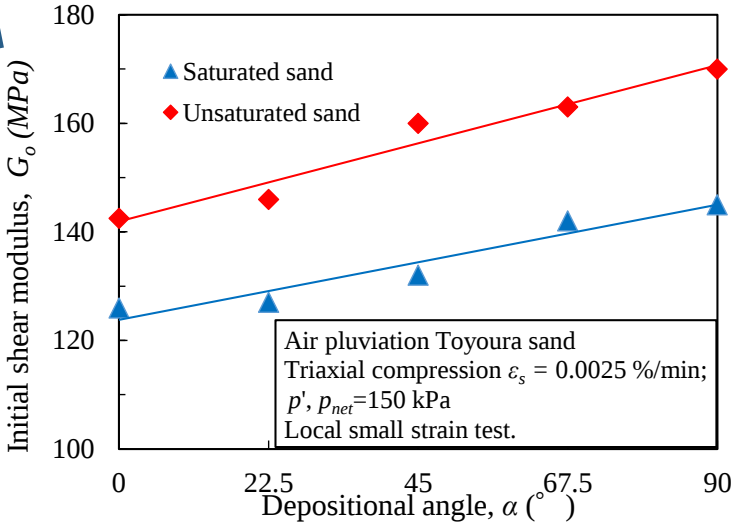
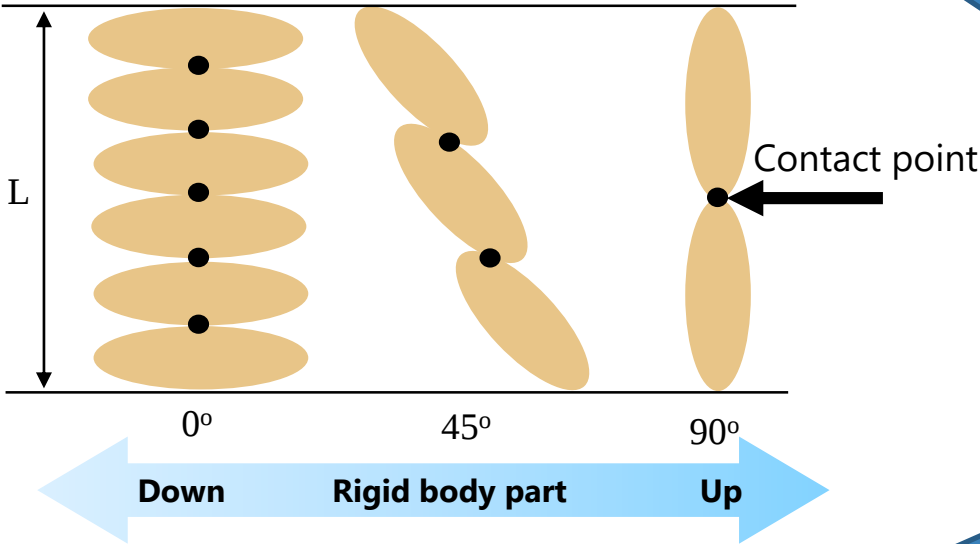
せん断剛性率 G_0



水平堆積 : G_0 小
鉛直堆積 : G_0 大

TESTING RESULTS AND DISCUSION: Explanation

Why initial shear modulus G_0 increase with the increase of α



Depositional angle α increases from 0° to 90°	
Number contact points	Decrease
Rigid body part	Increase

大変形に対して安定
(強度増加)

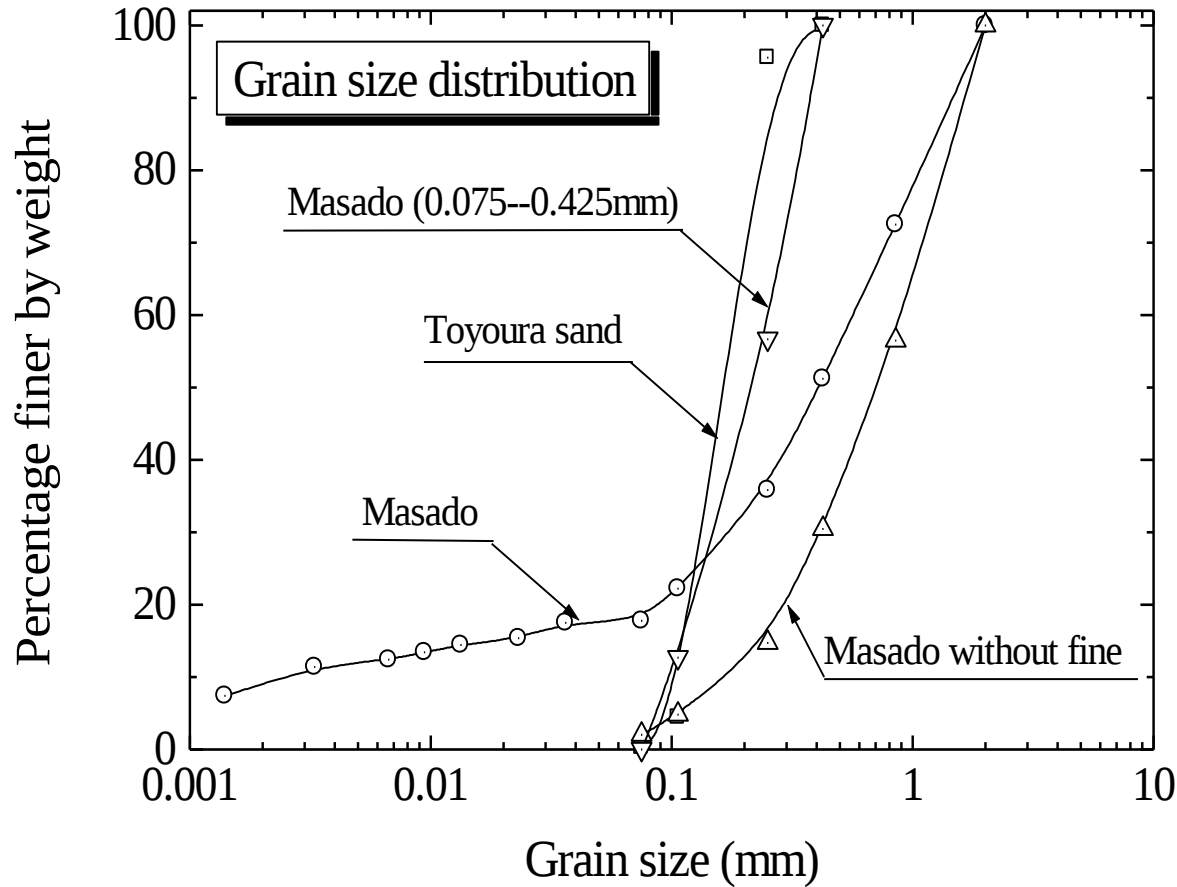
波動が伝わりやすい
(剛性増加)

応用問題

まさ土の特殊性

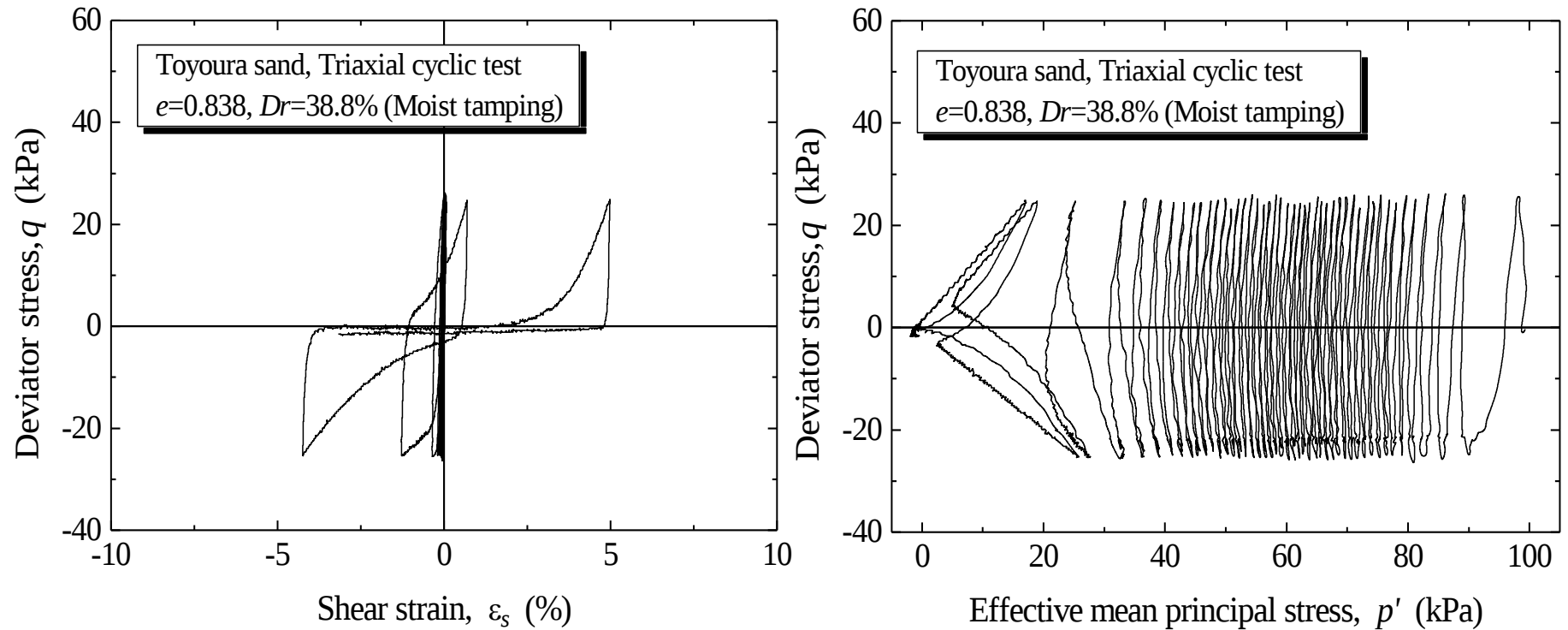
－液状化挙動を基に－

まさ土の特殊性



- 細粒分の影響
- 粒子破碎の影響
- 粒度分布の影響

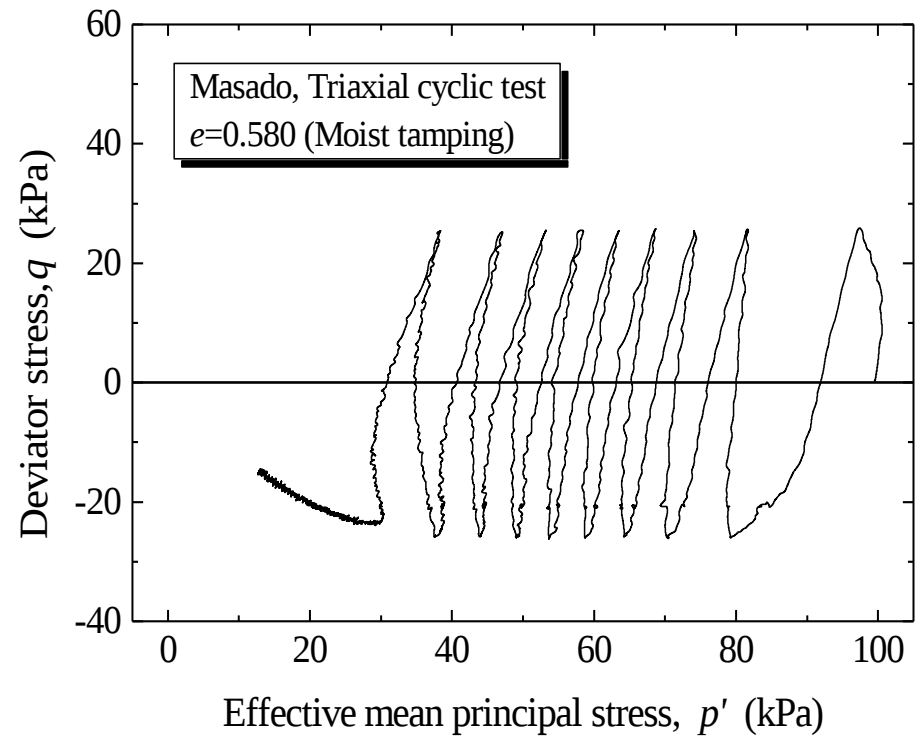
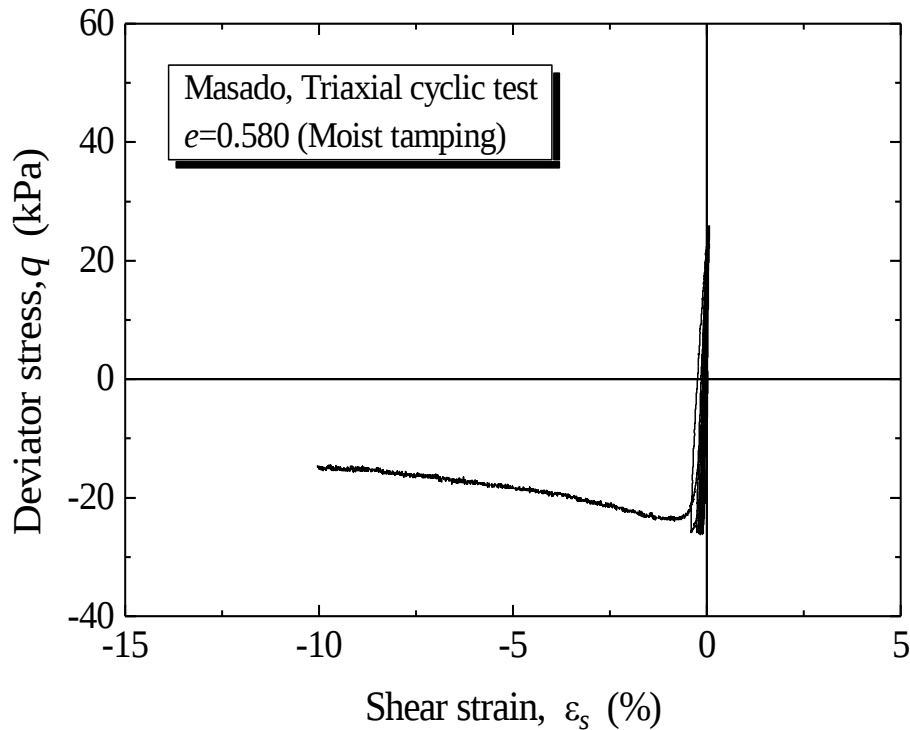
豊浦砂



豊浦砂の非排水繰返しせん断試験

オーソドックスな液状化試験結果

まさ土（調整なし）

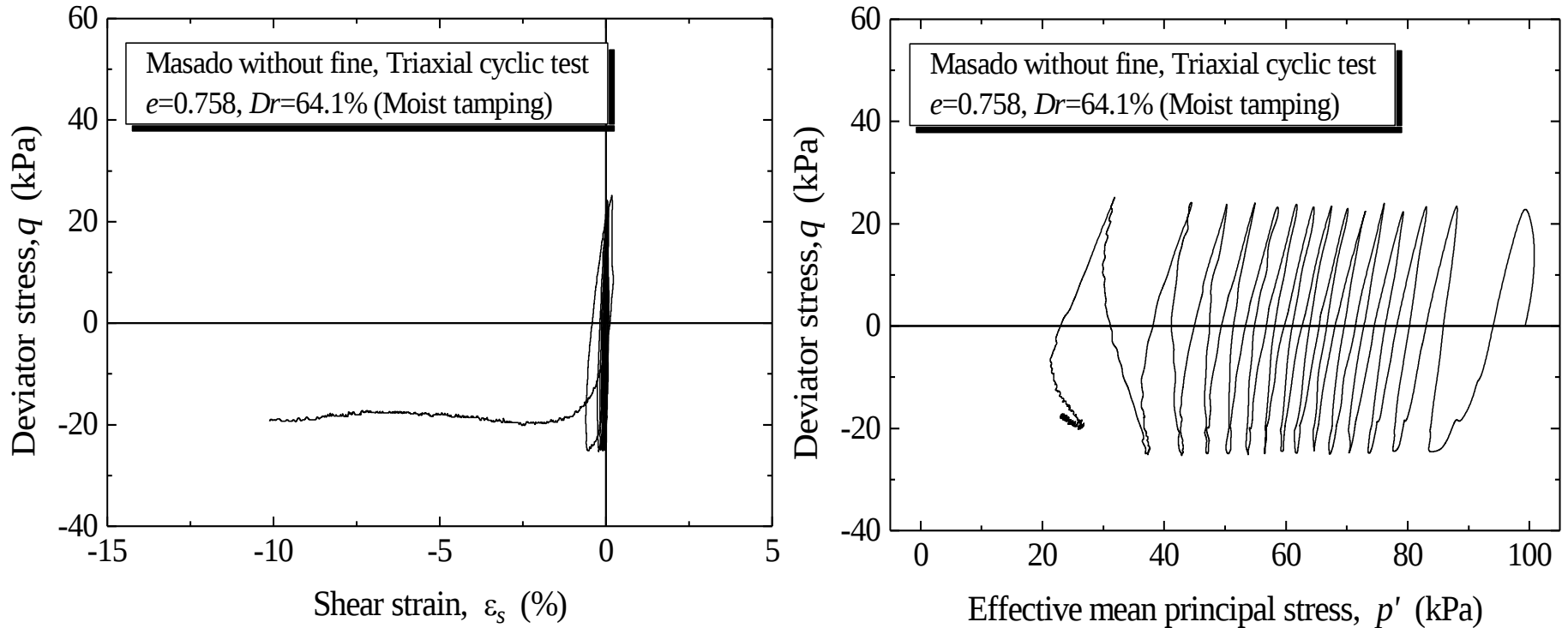


まさ土の非排水繰返しせん断試験

$p'=0$ にならないのに大変形

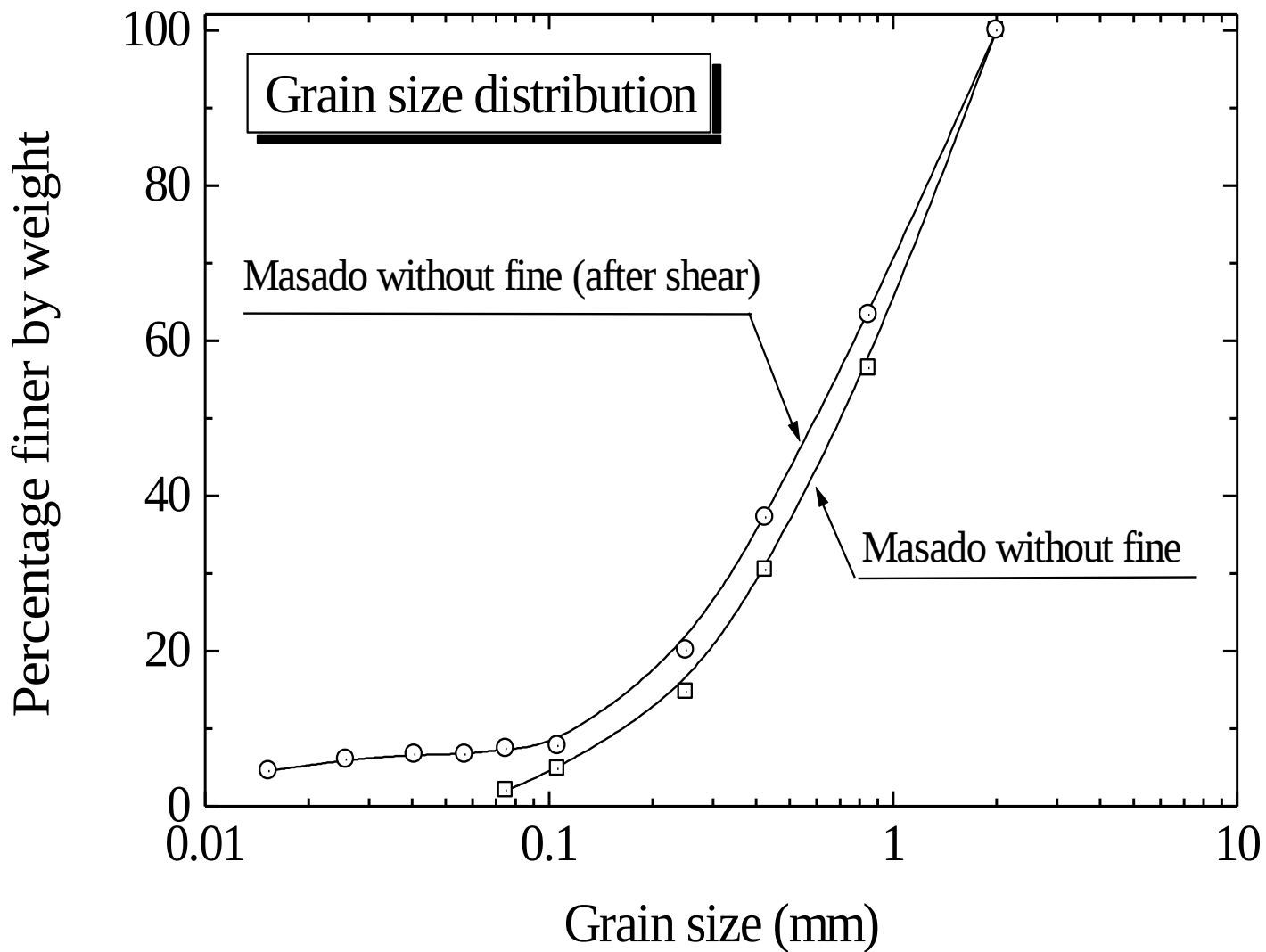
液状化せずとも長距離流動を引き起こす可能性あり！

まさ土（細粒分無し）



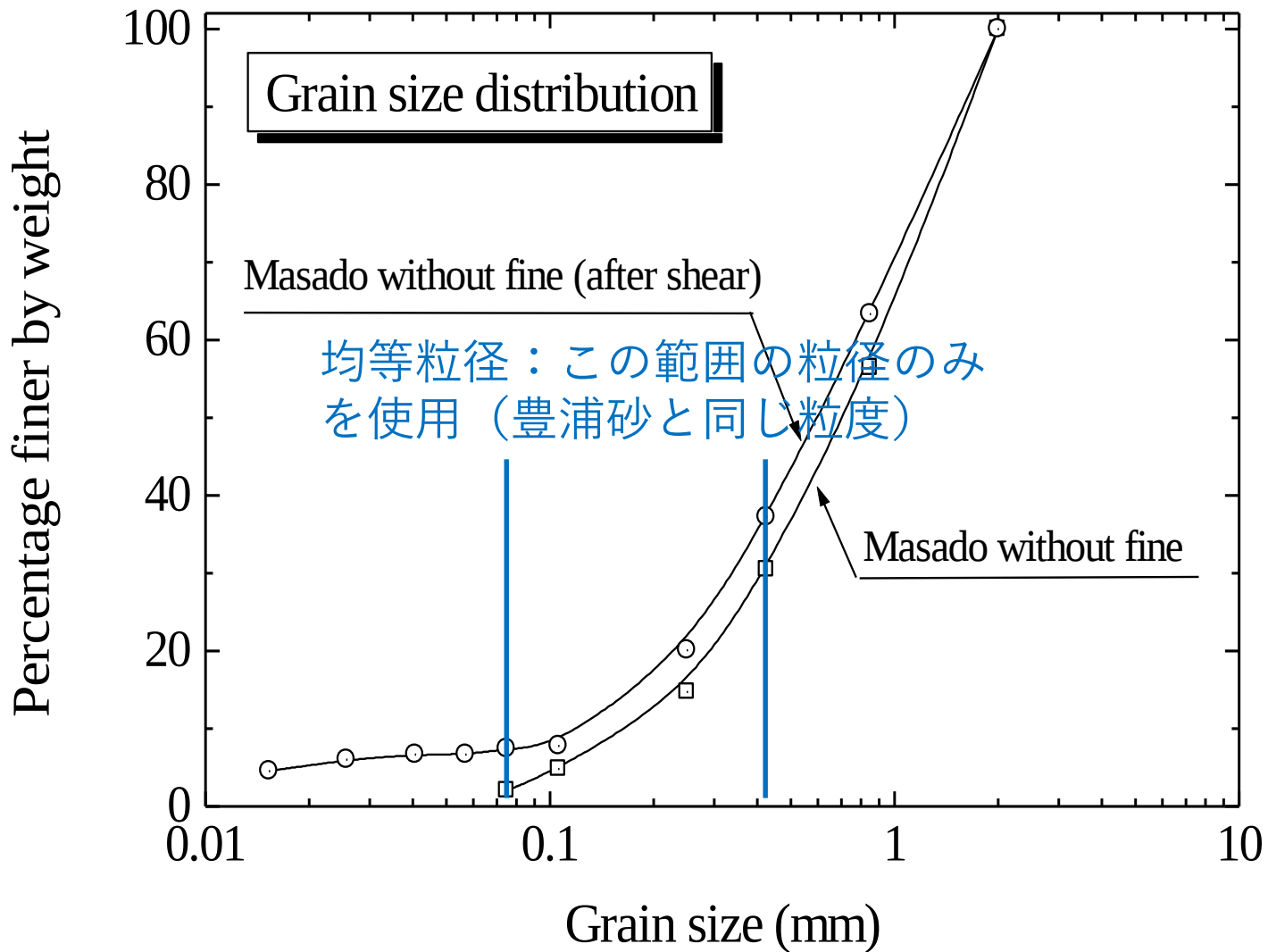
細粒分なしまさ土の非排水繰返しせん断試験

$p'=0$ にならないのに大変形
細粒分は関係ない



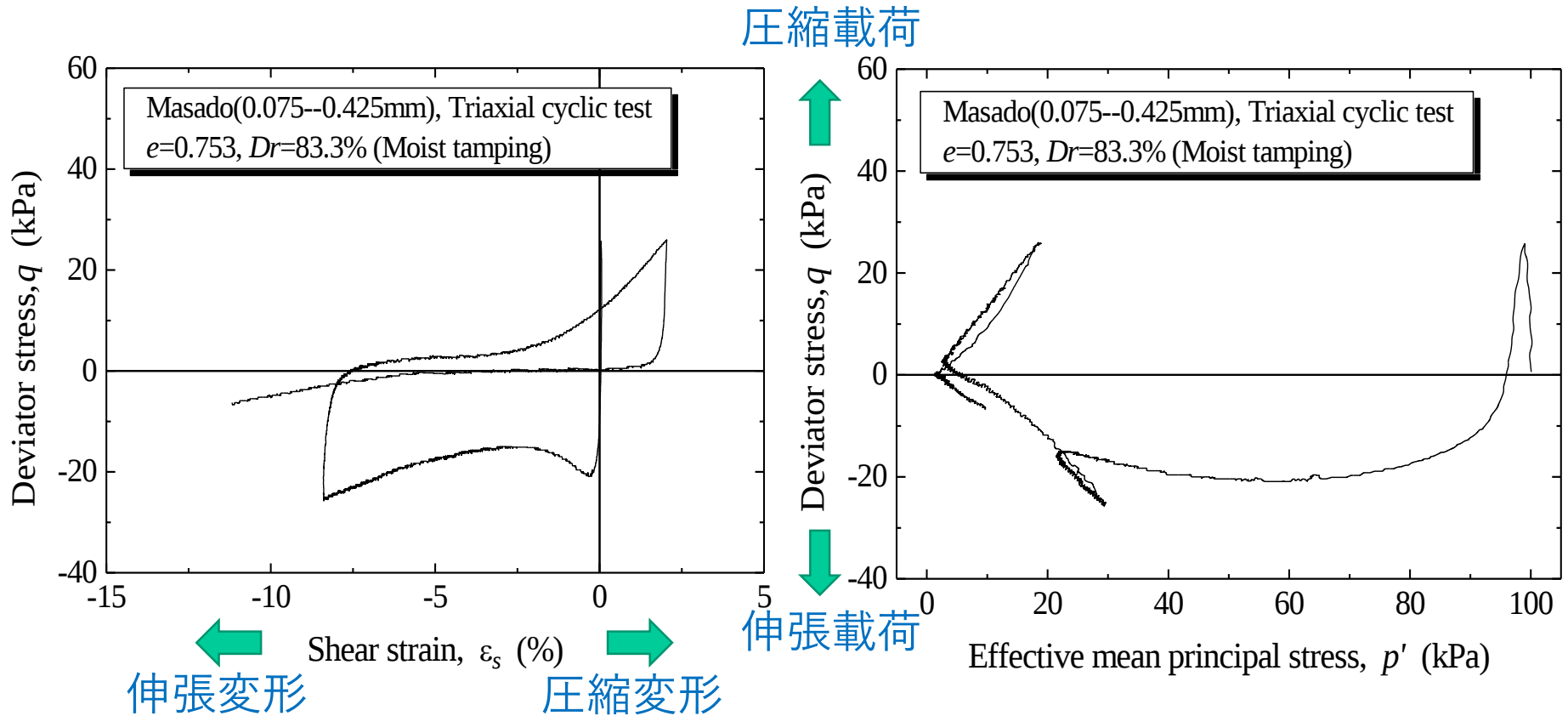
せん断前後のまさ土の粒径加積曲線

粒子破碎は起こっている



せん断前後のまさ土の粒径加積曲線

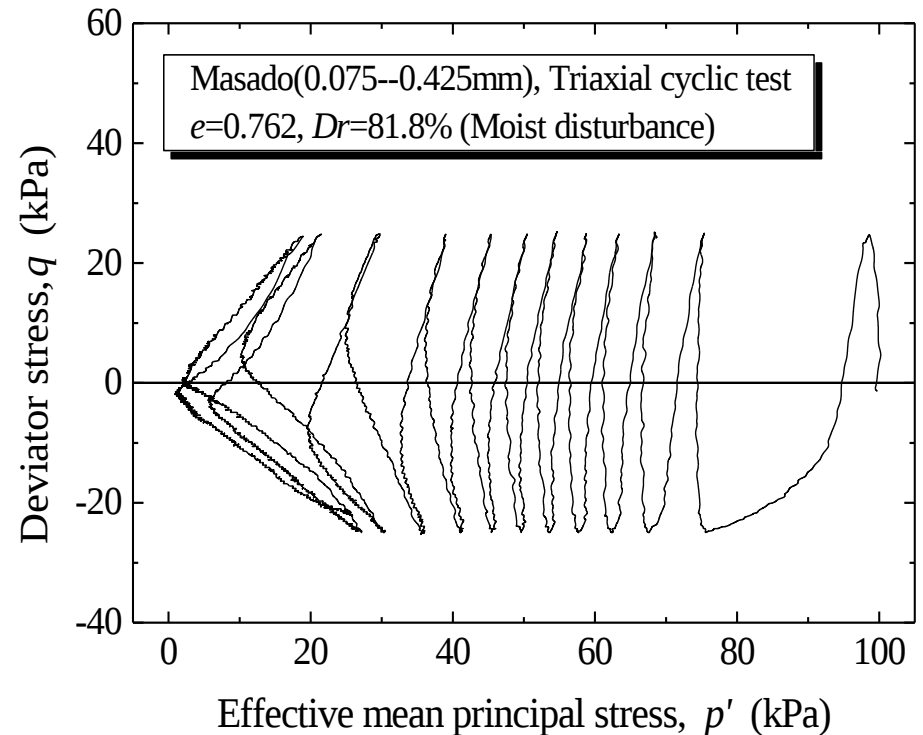
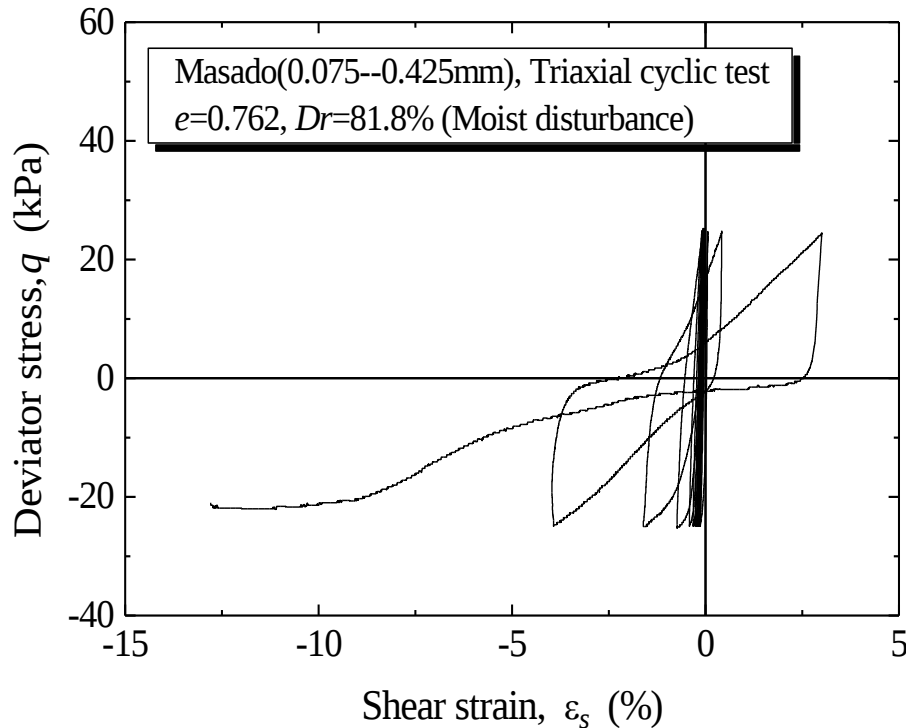
まさ土（均等粒径）：締固め



均等粒径まさ土の固有異方性
湿潤締固めで強い異方性が発生

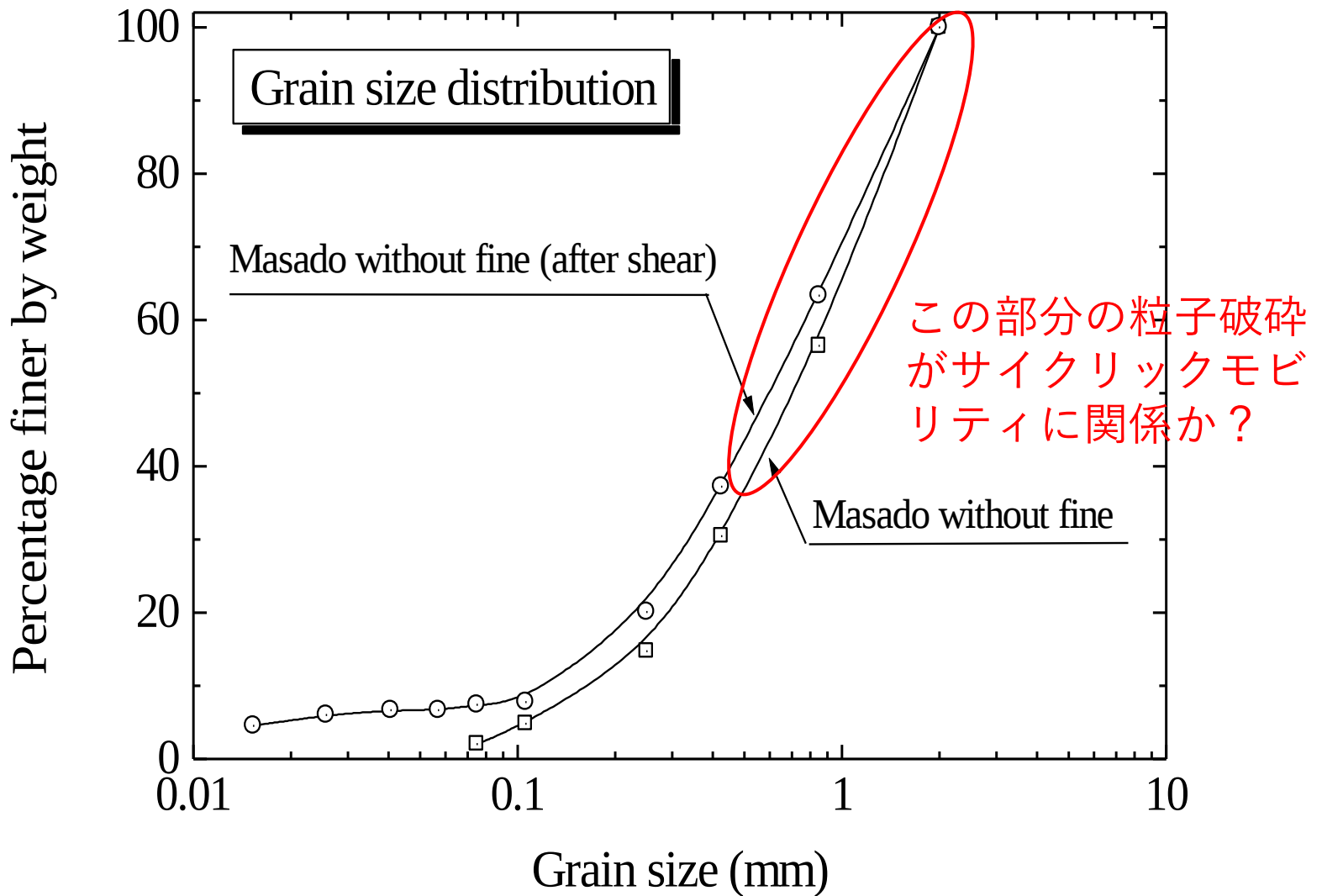
伸張側で極端に弱くなる！サイクリックモビリティは現れる。
長距離流動の可能性はなくなった？

まさ土（均等粒径）：配向性無し



均等粒径まさ土の非排水繰返しせん断試験
粒子配向性を乱すと異方性は消失

密度管理のみでなく、締固め法にも考慮が必要か？
サイクリックモビリティは現れる。



せん断前後のまさ土の粒径加積曲線

ご静聴
ありがとうございました