

### 7. 3 粘土のせん断強度 (続き)

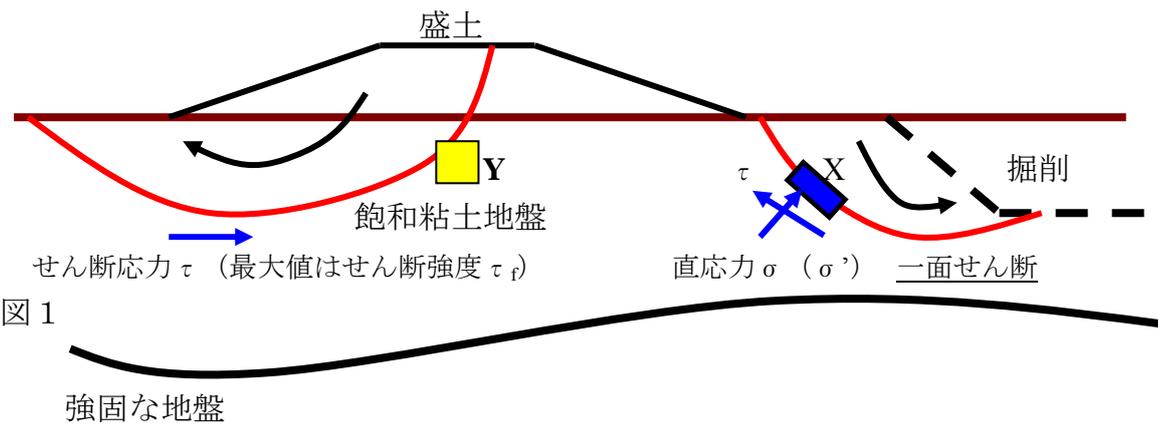


図 1

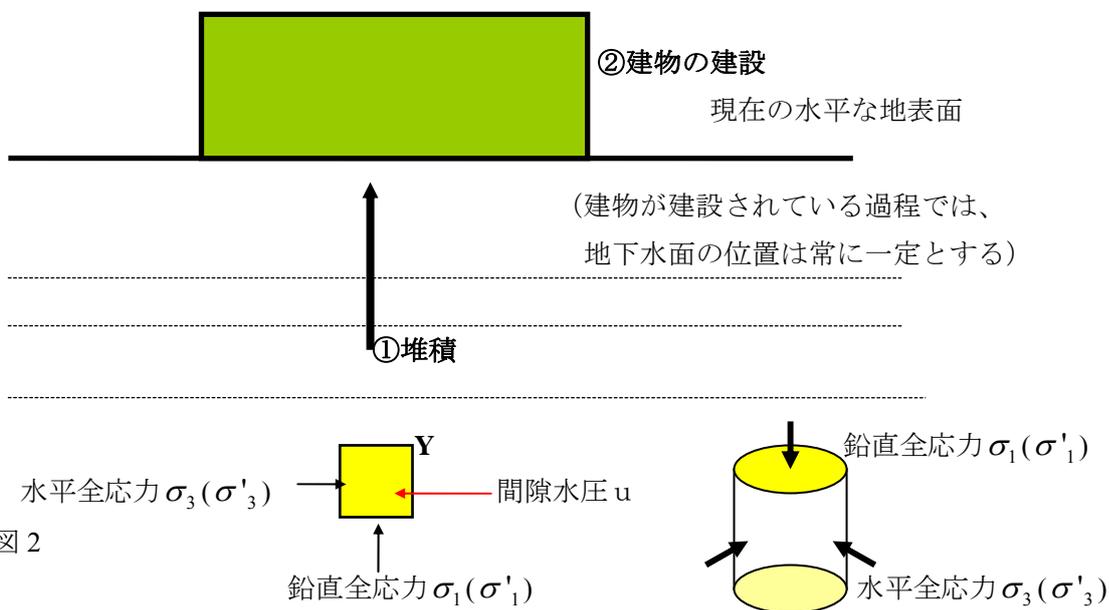


図 2

例えば、図 1、図 2 の要素 Y の変形・強度特性を求めるために、三軸圧縮試験を実施するとする。

1) 地盤内と同一の**応力経路**、**排水条件**を、室内試験でも辿る必要がある。

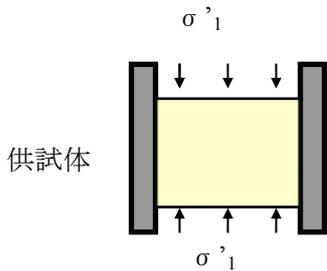
- **全応力経路 (total stress path)** :  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  の変化の仕方を  $(\sigma_1, \sigma_3)$  面に表示したもの。
- **有効応力経路 (effective stress path)** :  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_3$  の変化の仕方を  $(\sigma'_1, \sigma'_3)$  面に表示したもの。
- **排水条件(draind conditions)** :
  - a) 排水状態 : 間隙水が土の要素から自由に入出力できて、土の要素が自由に体積変化できる状態。
  - b) 非排水状態 : 間隙水が土の要素から自由に入出力できない状態。飽和土の非排水状態では、要素の体積は一定に保たれる。非排水せん断時では、間隙水圧の変化とその影響を考慮を必要がある。これは、「土の変形・強度特性は有効応力に支配される」からである。すなわち、

$$\text{有効応力 } \sigma' = \text{全応力 } \sigma - \text{間隙水圧 } u$$

であり、同一の載荷荷重に対しても、異なる排水条件 (完全排水条件、不完全排水条件、非排水条件等) では間隙水圧は異なる変化をする (過剰間隙水圧が異なる)。

●原位置の地盤での挙動の室内試験（三軸圧縮試験）による再現

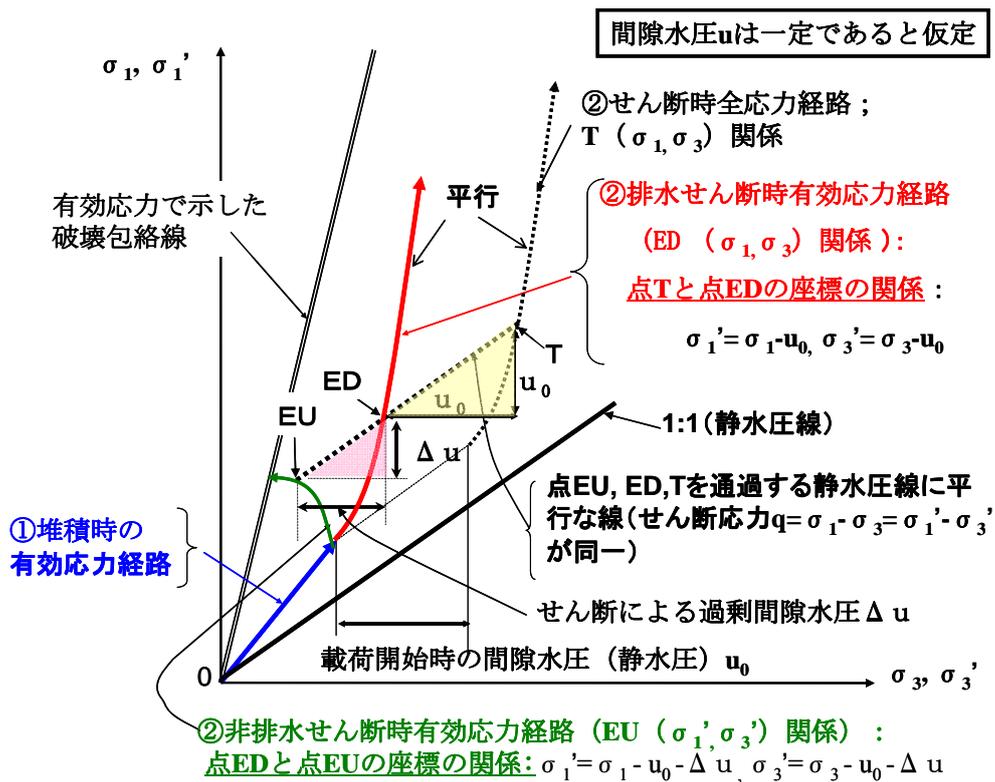
① のプロセス： 一次元圧縮（水平ひずみは常にゼロで、圧縮が鉛直方向にだけ生じる）



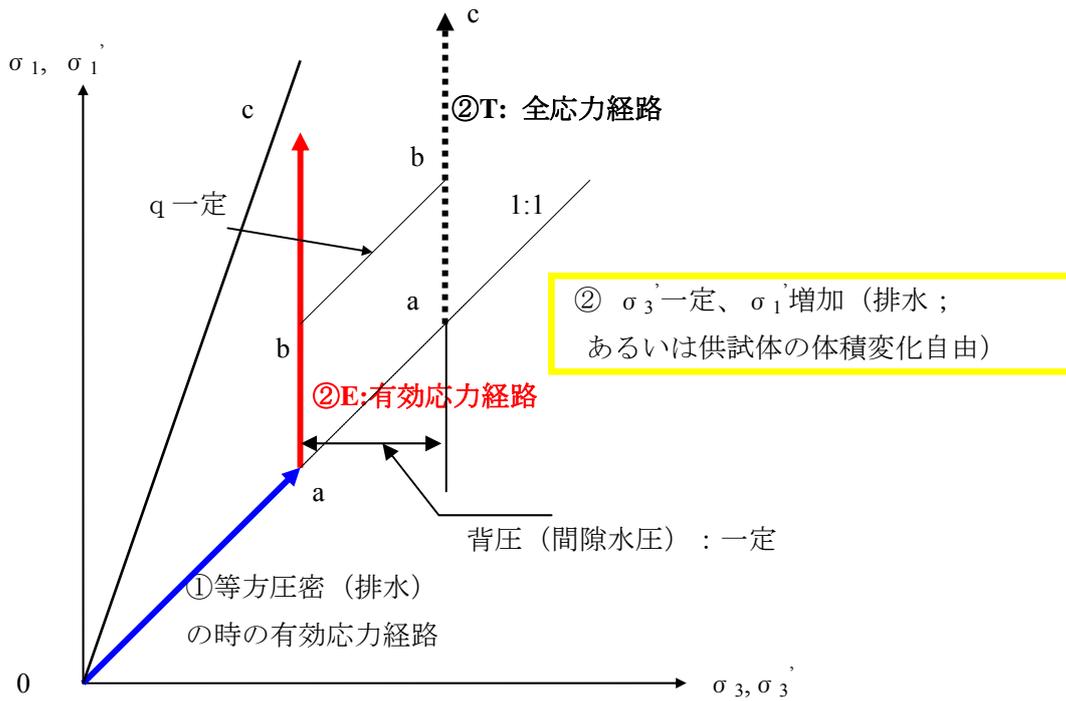
- ・標準圧密試験と同じ载荷条件。
- ・この時、水平応力  $\sigma'_3$  は、 $\sigma'_1$  の増加に従って増加する。一次元圧縮が生じるが、いくら圧縮しても破壊に至らない。
- ・有効応力で表現して、応力比  $K_0 = \sigma'_3 / \sigma'_1$  は、大略 0.5。  
Jaky の式：  $K_0 = 1 - \sin \phi$ （強い土ほど、 $K_0$  は小さい）。  
 $K_0$  は、静止土圧係数（the earth pressure coefficient at rest）と呼ばれている。

② のプロセス： せん断（排水、非排水）

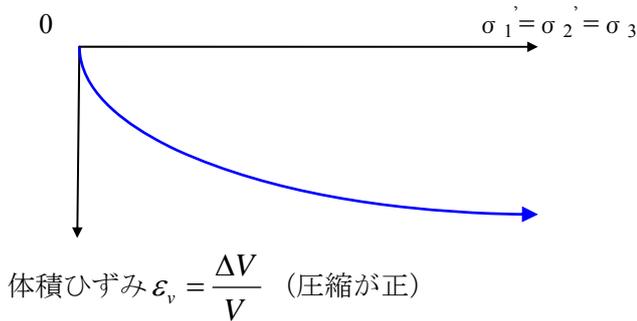
この場合も  $\sigma'_1$  の増加に伴って  $\sigma'_3$  も増加するが、破壊に至る可能性がある圧縮過程である。



三軸圧縮試験での排水条件の下での荷重の近似的 simulation



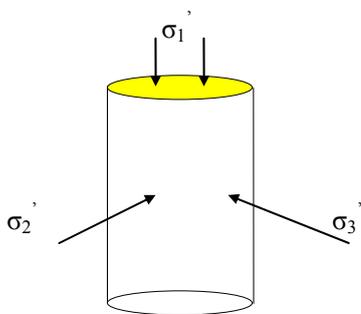
①等方圧密（排水）



②三軸圧縮試験： $\sigma_3'$ 一定、 $\sigma_1'$ 増加（排水）

原位置地盤内は、通常三次元応力状態で  $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$  である。

しかし、三軸圧縮試験では、 $\sigma_1' > \sigma_2' = \sigma_3'$  である。

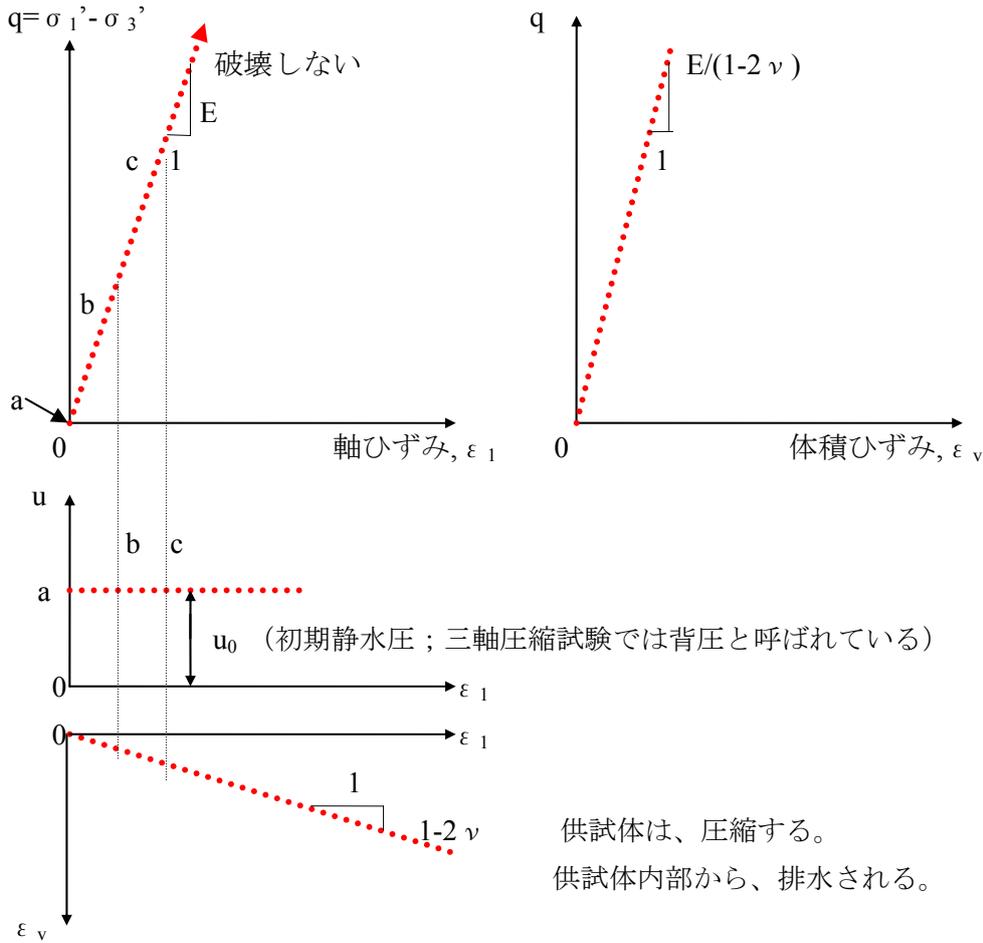


・  $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$  の試験は難しい。

●排水せん断②

- \*線形等方弾性体の三軸圧縮試験
- \*正規圧密粘土の三軸圧縮試験
- \*緩い砂の三軸圧縮試験
- \*密な砂の三軸圧縮試験
- \*過圧密粘土の三軸圧縮試験

線形等方弾性体の三軸圧縮試験



一般に、等方弾性体ならば、

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E}(\Delta\sigma_1' - 2\nu \cdot \Delta\sigma_3'); \quad (1a)$$

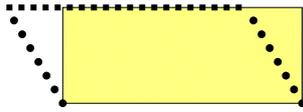
$$\epsilon_3 = \frac{1}{E}(\Delta\sigma_3' - \nu \cdot \Delta\sigma_1' - \nu \cdot \Delta\sigma_3'); \quad (1b)$$

$$\text{体積ひずみ } \epsilon_v = \epsilon_1 + 2 \cdot \epsilon_3 = \frac{1-2\nu}{E}(\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3') = \frac{3(1-2\nu)}{E} \cdot \frac{(\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3')}{3} = \frac{\Delta p'}{K} \quad (2a)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} : \text{体積剛性率 Bulk modulus}, \quad p' = \frac{\sigma_1' + 2\sigma_3'}{3}; \text{平均主応力}$$

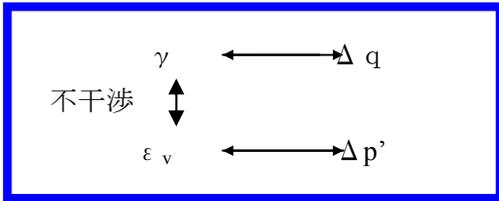
すなわち、体積ひずみは、平均主応力の変化によって生じるのであって、せん断応力  $q$  (あるいはせん断ひずみ  $\gamma$ ) によって生じるのではない。

等方弾性体ならば、幾らせん断変形をしても、体積変化しない。



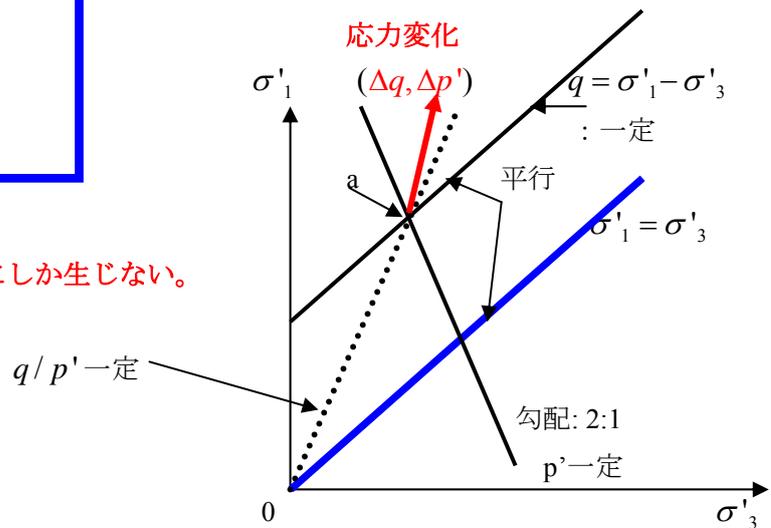
また、せん断ひずみ  $\gamma_{13} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = \frac{2(1+\nu)}{E} \cdot \frac{(\Delta\sigma'_1 - \Delta\sigma'_3)}{2} = \frac{1}{G} \cdot \frac{\Delta q}{2}$  は  $q$  が変化した時にだけ生じる。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}: \text{せん断剛性率 (Shear modulus)} \quad (3)$$



二つの1対1の**独立**な対応がある。

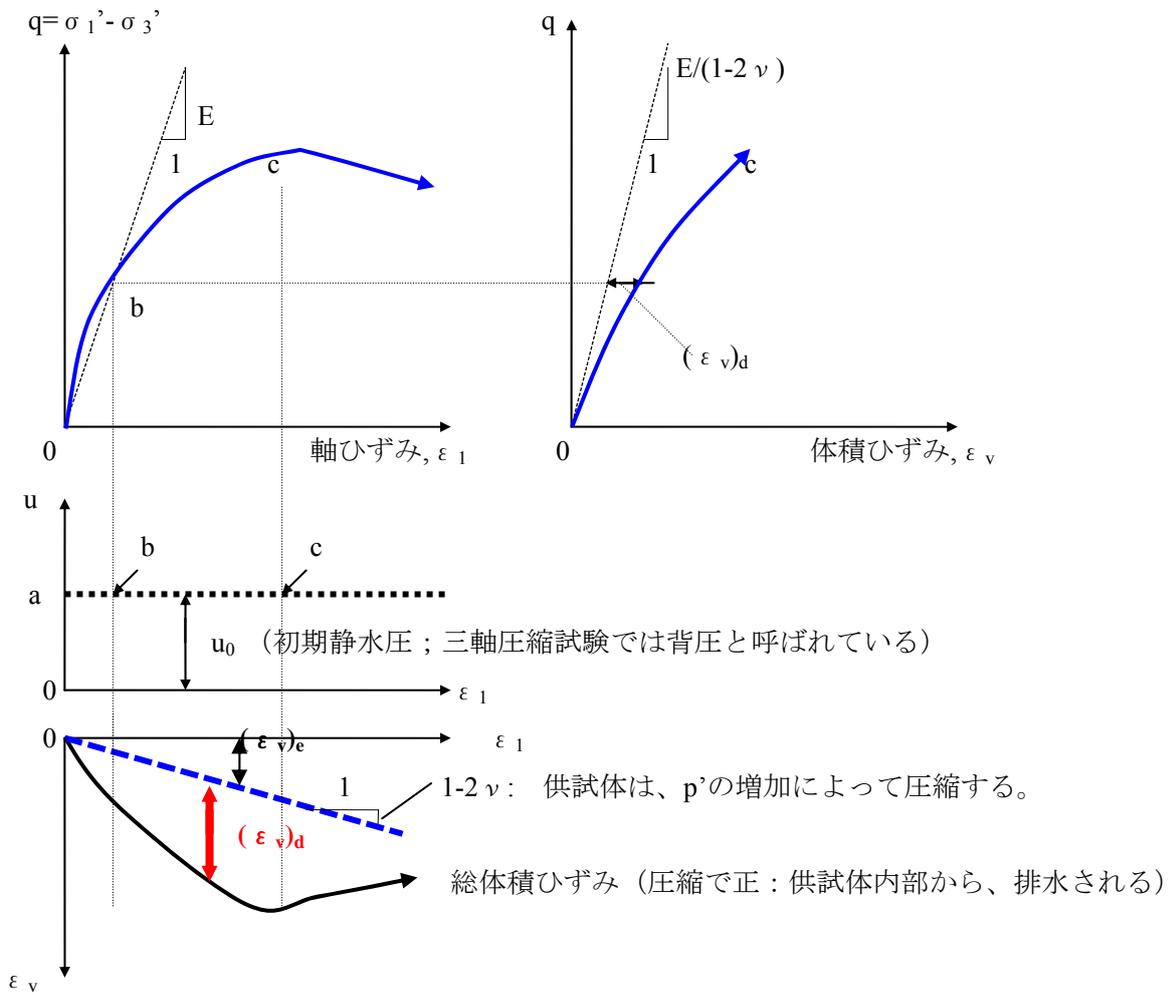
・体積変化は、 $p'$ が変化するときにしか生じない。



今、\*点 a を原点 ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 0$ ) として、**三軸圧縮試験**で生じるひずみは、  
 $\Delta\sigma'_3 = 0, \Delta\sigma'_1 = q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ なので、

$$\varepsilon_v = \frac{3(1-2\nu)}{E} \cdot \frac{\Delta\sigma'_1}{3} = (1-2\nu) \cdot \frac{\Delta\sigma'_1}{E} \quad \text{。従って、} \varepsilon_v = (1-2\nu) \cdot \varepsilon_1 \quad (3)$$

正規圧密粘土と緩い砂の排水三軸圧縮試験



\* この場合、平均有効主応力の増加による体積収縮  $(\epsilon_v)_e$  (正の体積ひずみの増加) に加えて、せん断により粒子間の噛み合わせがはずれることによる体積収縮  $(\epsilon_v)_d$  (正) が生じるので、線形等方弾性体の場合よりも体積収縮が大きい。

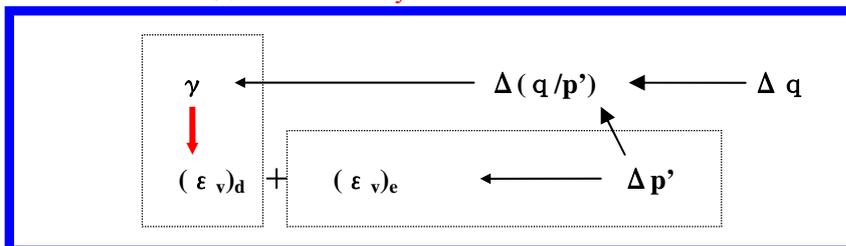
○ 体積ひずみ  $\epsilon_v = (\epsilon_v)_e + (\epsilon_v)_d$

$$(\epsilon_v)_e = \frac{3(1-2\nu)}{E} \cdot \frac{(\Delta\sigma'_1 + 2\Delta\sigma'_3)}{3} = \frac{\Delta p'}{K}$$

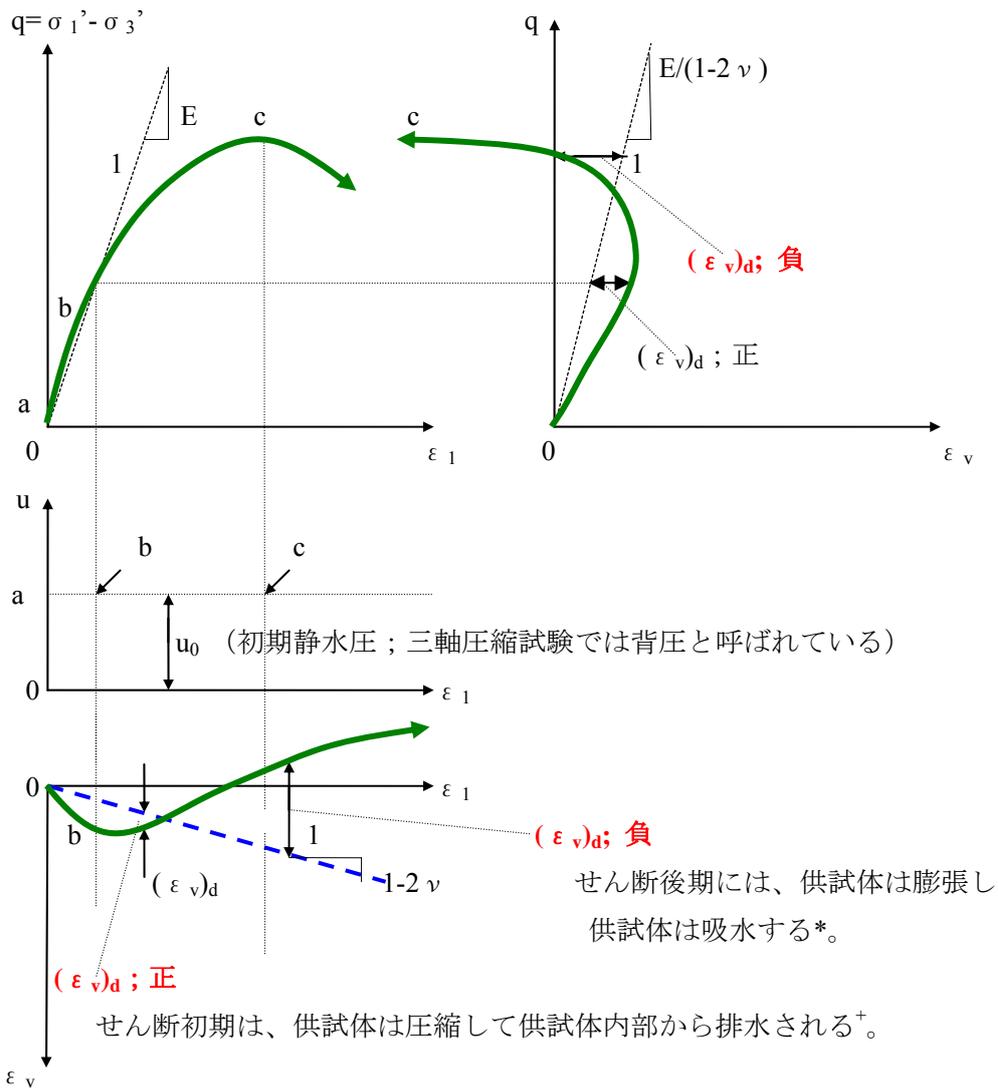
$(\epsilon_v)_d$  = せん断ひずみによる体積変化

体積収縮: contractancy

体積膨張: dilatancy

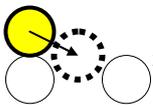


過圧密粘土と密な砂の排水三軸圧縮試験



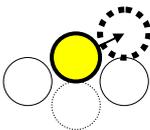
+ Contractancy

せん断の方向



緩い土: せん断変形による粒子の粒子間への落ち込み

\* Dilatancy: この場合、せん断後期には、平均有効主応力の増加による体積収縮 $(\epsilon_v)_e$  (正)に加えて、せん断により粒子相互間の乗り上がりによる体積膨張 $(\epsilon_v)_d$ ; 負が生じ、これが卓越するので、軸方向に圧縮されているにも拘わらず、体積膨張が生じる。



密な土: せん断変形による粒子の粒子間からの乗り上げる。

## 7. 4 粘土の非排水せん断強度

\* 飽和粘土地盤の破壊は、通常の荷重期間は粘土地盤が排水性を保つのに必要な時間と比較すると遙かに短いから、非排水に近い条件の下で生じる場合が多い。

\* 「飽和した土の非排水せん断」 = 「等体積条件でのせん断」

### ●非排水排水せん断②

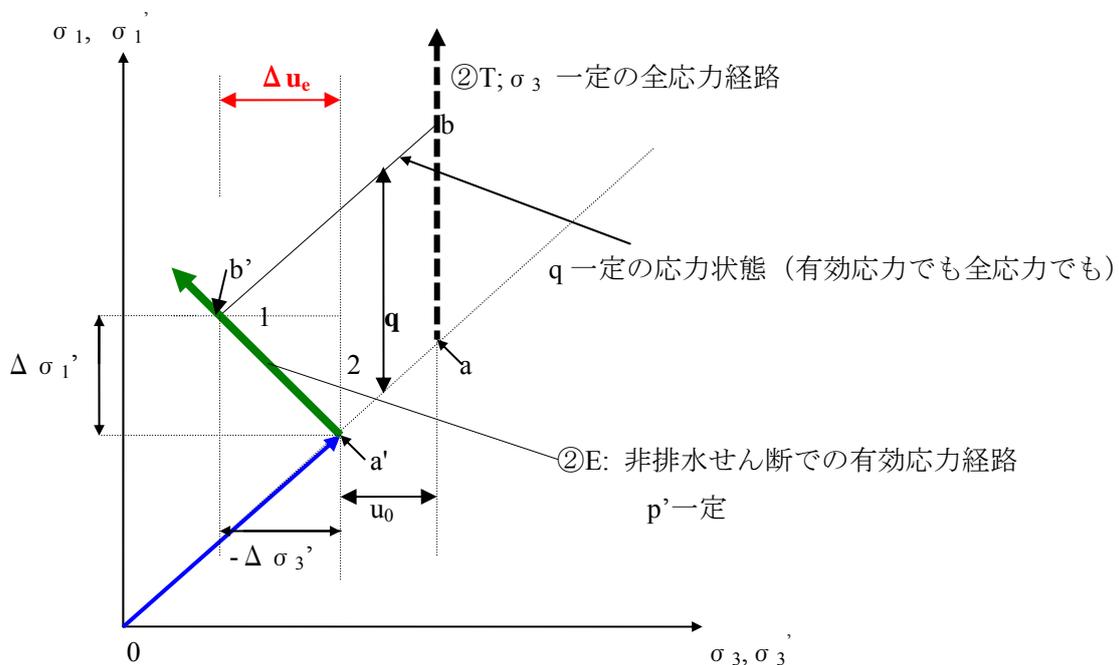
- \* 線形等方弾性体の三軸圧縮試験
- \* 正規圧密粘土の三軸圧縮試験
- \* 緩い砂の三軸圧縮試験
- \* 密な砂の三軸圧縮試験
- \* 過圧密粘土の三軸圧縮試験

### 線形等方弾性体の非排水三軸圧縮試験

(3a)式で、

$$\text{体積ひずみ } \varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2 \cdot \varepsilon_3 = \frac{1-2\nu}{E} (\Delta\sigma'_1 + 2\Delta\sigma'_3) = \frac{3(1-2\nu)}{E} \cdot \frac{(\Delta\sigma'_1 + 2\Delta\sigma'_3)}{3} = \frac{\Delta p'}{K} = 0 \quad \text{から、}$$

$$\frac{(\Delta\sigma'_1 + 2\Delta\sigma'_3)}{3} = \Delta p' = 0$$



\* 有効応力経路 E 上の点 b' で、間隙水圧  $u = u_0$  (静水圧) +  $\Delta u_e$  (過剰間隙水圧; 正)

\* 「排水試験での供試体からの排水」が生じる替わりに、間隙水圧が  $\Delta u_e$  だけ上昇して平均有効応力  $p'$  が一定に保たれることにより、体積が一定に保たれる。ここで、

$$\Delta \sigma_3 = \Delta \sigma_3' + \Delta u_e = 0 \quad (\text{試験条件から})$$

また、 $(\Delta \sigma_1' + 2\Delta \sigma_3')/3 = \Delta p' = 0$  から、 $\Delta \sigma_1' = -2\Delta \sigma_3'$  (a)

$$q = \Delta \sigma_1' - \Delta \sigma_3' = -3\Delta \sigma_3' = (3/2)\Delta \sigma_1' \quad (b)$$

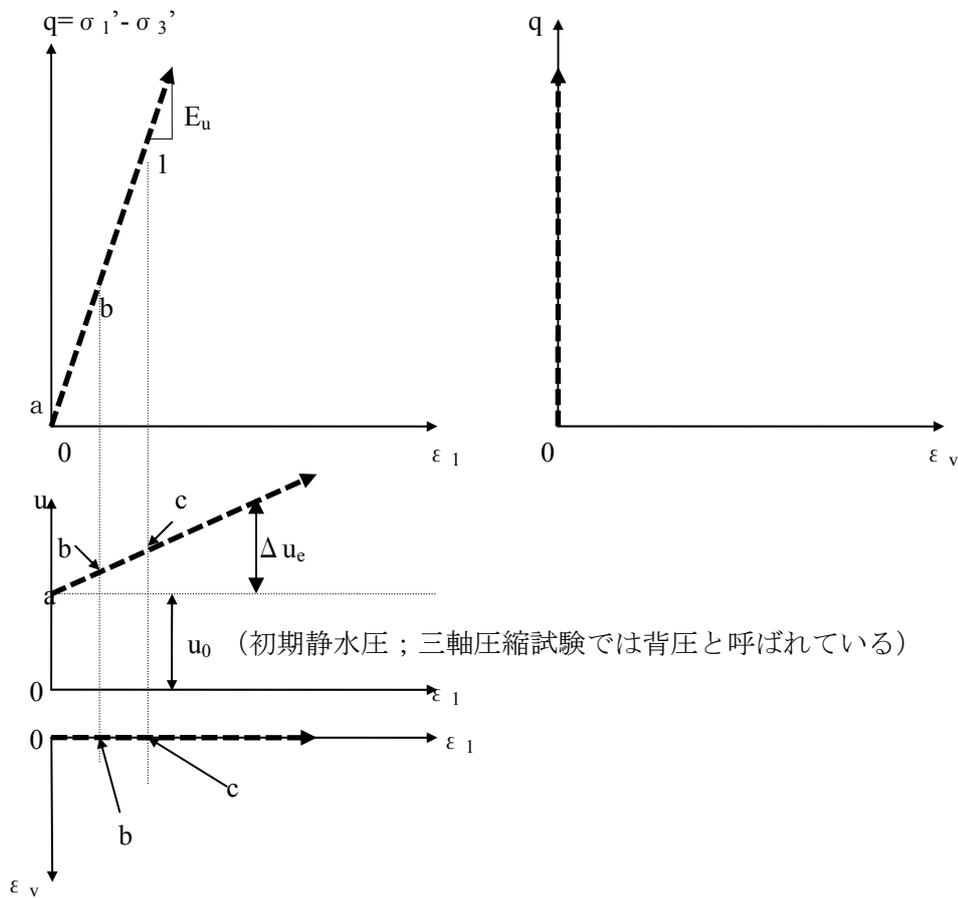
$$(a) \text{と} (b) \text{から、} \Delta \sigma_3' = -\frac{1}{3} \cdot q \quad (c)$$

また、ポアソン比  $\nu$  が 0.5 よりも小さければ、非排水時ヤング率  $E_u$  は、排水時のヤング率  $E$  よりも大きくなる。

$$E_u = \frac{q}{(\varepsilon_1)_u} = \frac{q}{\frac{\Delta \sigma_1'}{E} - 2\nu \frac{\Delta \sigma_3'}{E}} \quad (d)$$

式(b), (d)より、

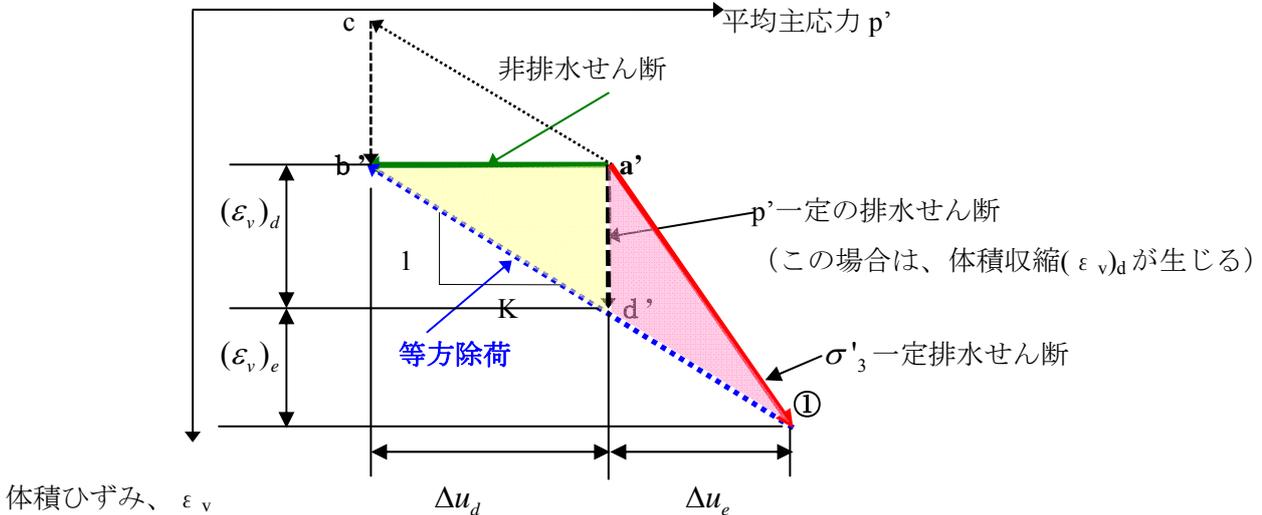
$$E_u = \frac{\frac{3}{2}\Delta \sigma_1'}{\frac{\Delta \sigma_1'}{E} + \nu \frac{\Delta \sigma_1'}{E}} = \frac{\frac{3}{2}E}{1+\nu} \quad (\nu < 0.5 \rightarrow E_u > E)$$



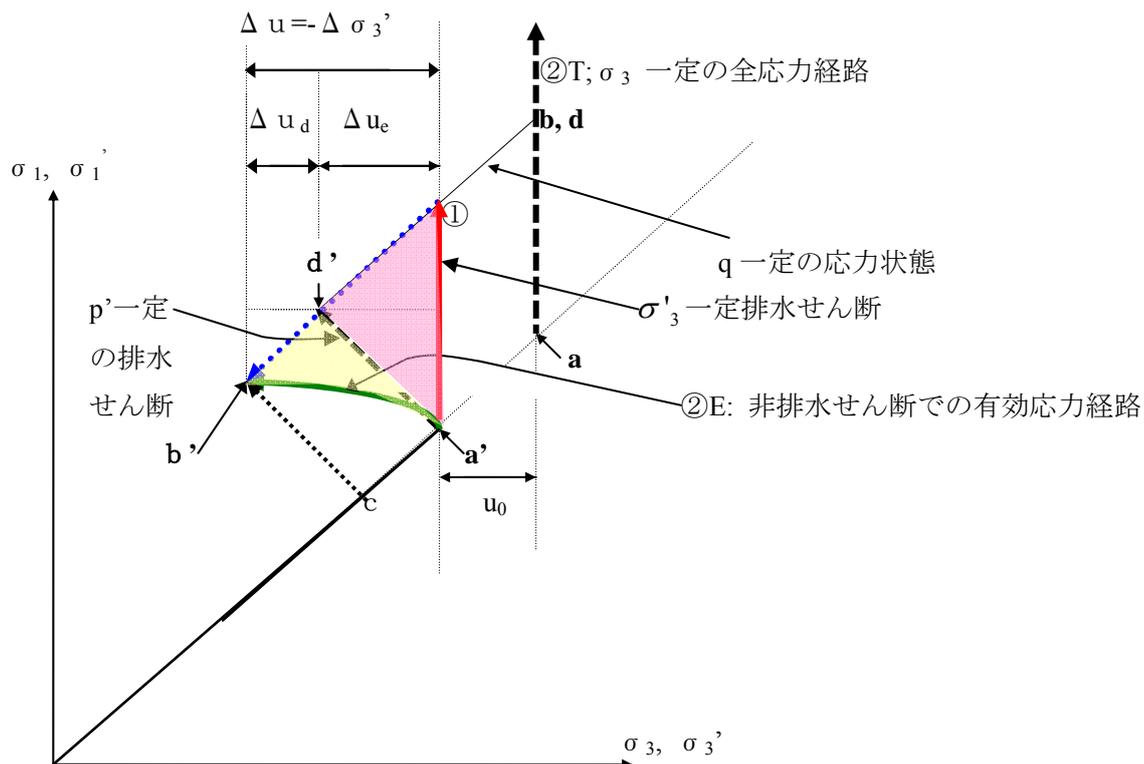
**正規圧密粘土と緩い砂の非排水三軸圧縮試験（正の dilatancy が無い土の場合）**

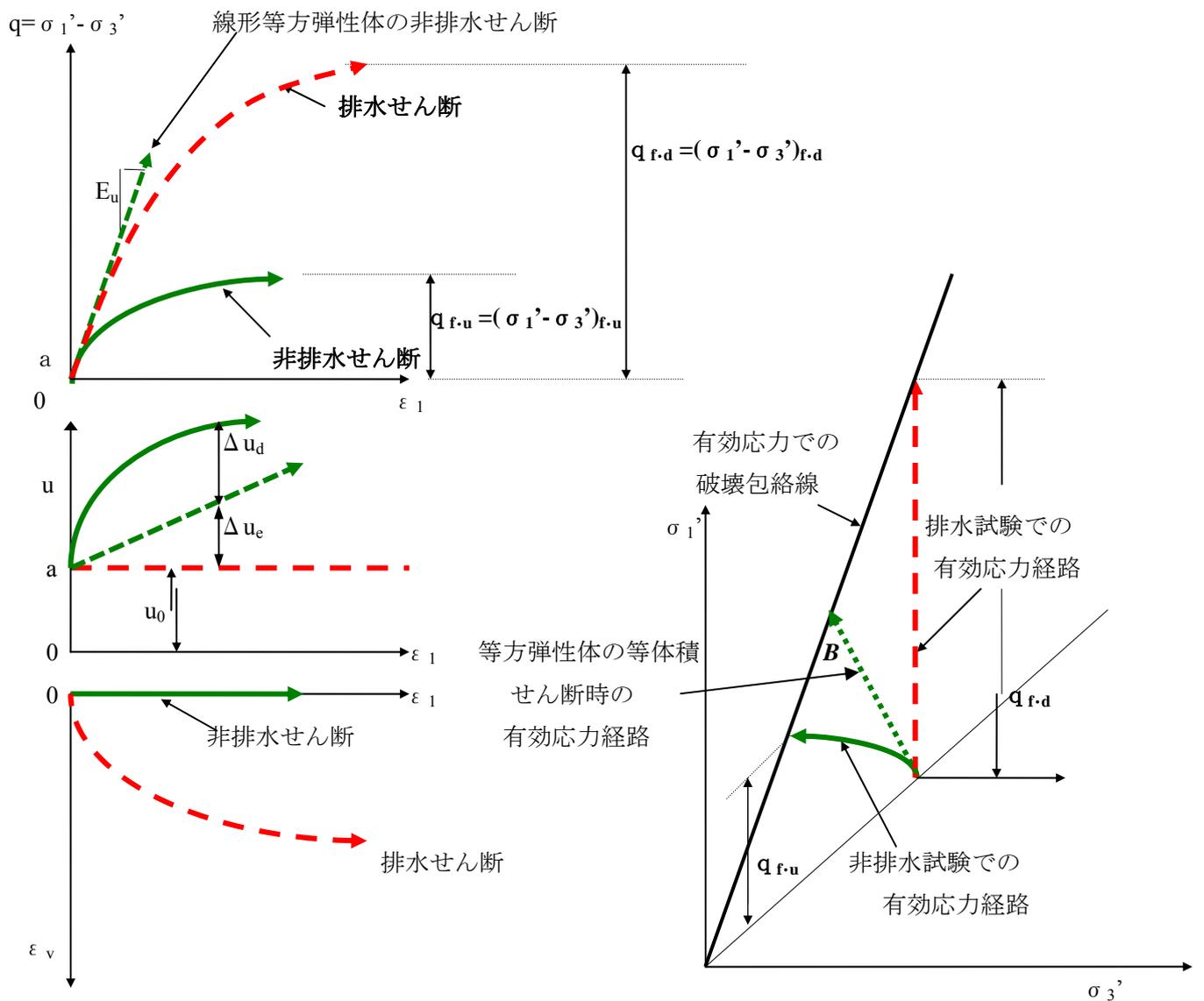
等体積条件から、 $\varepsilon_v = (\varepsilon_v)_e + (\varepsilon_v)_d = 0$  で、かつ 負の dilatancy (contractancy)により  $(\varepsilon_v)_d$  は正であるので、等方弾性体の場合よりも大きな正の過剰間隙水圧が発生する。

[証明] 間隙水圧  $u = u_0 + \Delta u_e + \Delta u_d$        $u_0$  : 静水圧;  $\Delta u$  (過剰間隙水圧) =  $\Delta u_e + \Delta u_d$   
 $\Delta u_e$  (平均主応力の増加による過剰間隙水圧) =  $(\varepsilon_v)_e \cdot K = q/3$  (  $K$  : 体積剛性率)  
 $\Delta u_d$  (負の dilatancy による過剰間隙水圧) =  $(\varepsilon_v)_d \cdot K$



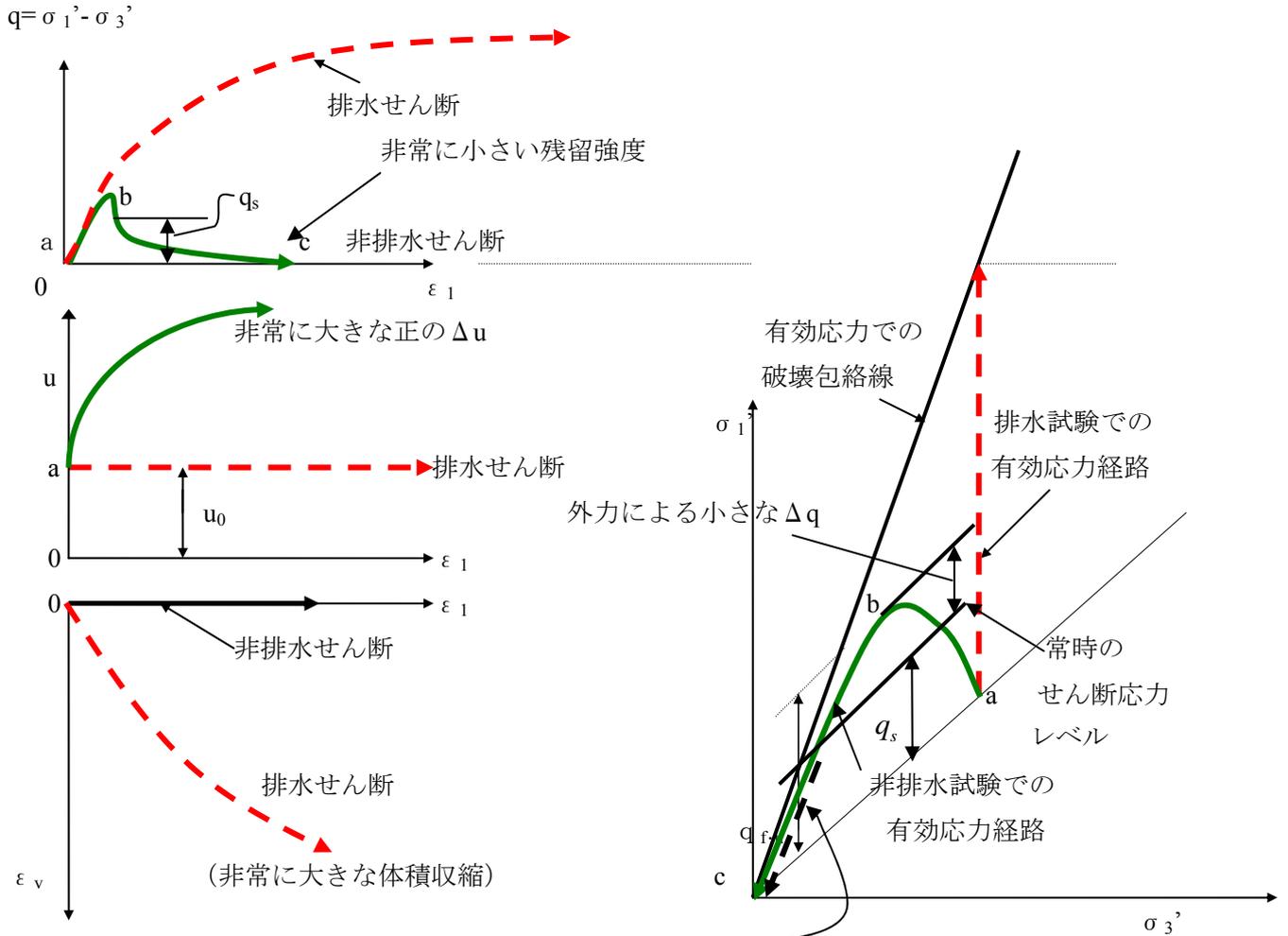
- 非排水せん断 (a→b) = 非排水等方除荷 (a→a') (有効応力は変化しない) + 非排水せん断(a'→①) = 非排水せん断(a'→①)
- = p'一定の非排水せん断 (a'→d') + 非排水等方載荷 (d'→ ①) \*)
- = p'一定の非排水せん断 (a'→d')      \*) 有効応力は変化しない, Δueが生じる
- = p'一定の排水せん断 (a'→d') + 排水等方除荷 (d'→b')





- 土が等方弾性体の場合は、非排水せん断挙動は **B** のようになる。この時のせん断強度は、 $\sigma_3'$  一定の排水せん断時の時のせん断強度よりも小さい。
- 正規圧密粘土、緩い砂では、正の  $\Delta u_d$  が発生して正の過剰間隙水圧  $\Delta u$  が更に大きくなるので、非排水せん断強度  $q_{f.u} = (\sigma_1' - \sigma_3')_{f.u}$  は、 $\sigma_3'$  が一定の排水せん断試験での強度  $q_{f.d} = (\sigma_1' - \sigma_3')_{f.d}$  よりもかなり小さくなる。

では、非常に軟弱な粘性土、非常に緩い砂の非排水せん断は、どうなるか？



この状態に至ると、外乱  $\Delta q=0$  になっても、 $q_s$  は残留強度よりも大きいから、変形は止まらない。

力のつ合い式：
$$M \cdot \ddot{u} = \frac{(q_s - q)}{2} \cdot L$$
 (Mは崩壊土塊の質量、Lはすべり面の長さ)。

時間とともに、 $(q_s - q)$  は増加するから、加速度は時間とともに増加する。→流動破壊(flow failure)

□このような残留強度が極端に小さい地盤は、非常に不安定である。

\*オランダ、北海沿いの海岸

\*米国、開拓時代に建設したミシシッピー川堤防、ダム。

一度ピーク状態 b を越したら、あとは液体になるだけ。

作用せん断応力よりも残留強度は小さくなるので、液体状のすべり (Flow slide) が生じる。

