

t_{ij} の概念に基づく過圧密土から自然堆積土 までのモデル化 (Subloading t_{ij} model)

tij地盤解析研究所
(株)地域 地盤 環境 研究所
中部大学
元名古屋工業大学

中井照夫



1

内容

1. 弾塑性論の基本
 - 1次元の弾性および弾塑性論
 - 多次元の弾性および弾塑性論
2. 地盤材料の1次元挙動とモデル化
 - 正規圧密土
 - 過圧密土
 - 自然堆積土
 - 正規圧密土から自然堆積土までの時間効果特性
3. 地盤材料の通常の多次元モデル
 - 正規圧密土から過圧密土までのせん断挙動
 - 弾・完全塑性モデル(Drucker-Prager model, Mohr-Coulomb model)
 - Cam clay model
4. t_{ij} の概念とそれに基づく正規圧密土のモデル化(tij clay model)
 - t_{ij} の概念に基づく正規圧密土のモデル化
 - 滑動面から t_{ij} へ(付録)
 - t_{ij} の概念の意味
5. t_{ij} の概念に基づく過圧密土から自然堆積土までのモデル化(Subloading t_{ij} model)
 - 過圧密土(正規圧密土を含む)のモデル化
 - ひずみ増分方向の応力経路依存性を考慮したモデル化
 - 自然堆積土のモデル化
 - 正規圧密土から自然堆積土までの時間効果特性の表現
6. 陰解法によるモデルの定式化
 - 引張り応力のでない弾性式
 - Return Mapping

2

過圧密土 (正規圧密土を含む)

参考：過圧密土の1次元モデル

正規圧密線

ρ_0

$\rho(\text{正})$

$\rho > 0$:
剛性増加

過圧密土の間隙比 $(e) \sim \ln \sigma$ 関係

過圧密土の間隙比変化

正規圧密線

σ_0

σ

e_{N0}

ρ_0

I'

I

P'

P

$(-\Delta e)$

e_0

e_N

e

ρ

正規圧密土同様

$$f = F - \left\{ H + \frac{\rho_0 - \rho}{\lambda - \kappa} \right\} = 0$$

適応条件:
 $df = 0$
 ρ の発展則:
 $d\rho = -G(\rho) \cdot d(-e)^p$

$$\begin{cases} F = \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} \\ H = \frac{(-\Delta e)^p}{\lambda - \kappa} \end{cases}$$

$$df = dF - \left\{ dH - \frac{d\rho}{\lambda - \kappa} \right\} = \frac{d\sigma}{\sigma} - \left\{ \frac{d(-e)^p + G(\rho) \cdot d(-e)^p}{\lambda - \kappa} \right\} = 0$$

$$d(-e)^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + G(\rho)} \frac{d\sigma}{\sigma}$$

$$d\varepsilon^p = d\varepsilon_v^p = \frac{\frac{d\sigma}{\sigma}}{\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \{1 + G(\rho)\}} = \frac{dF}{\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \{1 + G(\rho)\}}$$

$(-\Delta e)^p = (-\Delta e) - (-\Delta e)^e$
 $= \{ (e_{N0} - e_N) - (\rho_0 - \rho) \} - (-\Delta e)^e$
 $= \lambda \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} - (\rho_0 - \rho) - \kappa \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}$

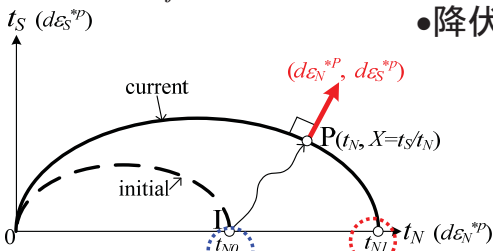
t_{ij} に基づく過圧密土の定式化(1) - iVersion=0

Subloading t_{ij} model (Nakai & Hinokio, 2004)

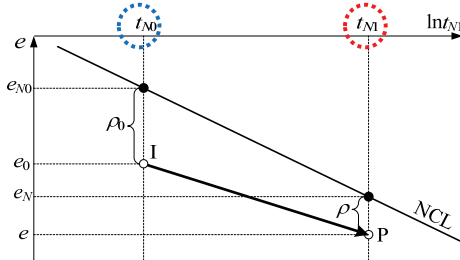
●降伏関数(塑性ポテンシャル)

$$f = F - \left\{ H + \frac{\rho_0 - \rho}{\lambda - \kappa} \right\} = 0$$

$$\begin{cases} F = \ln \frac{t_{N1}}{t_{N0}} = \ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \zeta(X) \\ \text{(where } X = t_S/t_N) \\ H = \frac{(-\Delta e)^p}{\lambda - \kappa} = \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^p \end{cases}$$



降伏曲面と流れ則



$e - \ln t_{N1}$ 関係

●流れ則

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial t_{ij}}$$

$$\Lambda = \frac{dF}{\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \bar{G} \right\}} = \frac{dF}{h^p} \quad \text{(where } dF = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij})$$

$$d\rho = -(1 + e_0) \bar{G} \cdot \Lambda$$

1D同様, $\bar{G}(\rho)$ は $\bar{G}(0)=0$ を満たす単調増加関数

t_{ij} に基づく過圧密土の定式化(2) - iVersion=0

前式から、塑性体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v^p$ は次式で与えられる

$$d\varepsilon_v^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} = \frac{dF}{\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \bar{G} \right\}} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} = \frac{dF}{\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ 1 + \bar{G} / \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \right\}}$$

$$\text{Here, } dF = \frac{\partial F}{\partial X} dX + \frac{\partial F}{\partial t_N} dt_N = \zeta'(X) dX + \frac{1}{t_N} dt_N$$

等方圧縮時の $d\varepsilon_v^p$ が1次元モデルそれと一致すると考える。ここに、等方圧縮状態 ($X=0, dX=0$)では

$$dF = \frac{dt_N}{t_N} = \frac{dp}{p} \quad \left(\because t_N = \frac{p}{1 + X^2} \right), \quad \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \Big|_{X=0} = \frac{1}{t_N} \frac{\partial t_N}{\partial t_{kk}} = \frac{a_{ij}}{t_N} = \frac{\sqrt{3}}{t_N} \quad \left(\because t_N = t_{ij} a_{ij} \right)$$

したがって、等方圧縮時の $d\varepsilon_v^p$ は次式になる

$$d\varepsilon_v^p = \frac{\frac{dt_N}{t_N}}{\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ 1 + \frac{\bar{G}}{\sqrt{3}} t_N \right\}} = \frac{\frac{dp}{p}}{\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ 1 + \frac{\bar{G}}{\sqrt{3}} t_N \right\}}$$

1次元モデルとの対応から

$$\frac{\bar{G}}{\sqrt{3}} t_N = G \quad \Rightarrow \quad \bar{G} = \frac{\sqrt{3}}{t_N} G$$

t_{ij} に基づく過圧密土の定式化(3) - iVersion=0

したがって、 ρ の発展則および塑性ひずみ増分は次式で表せる

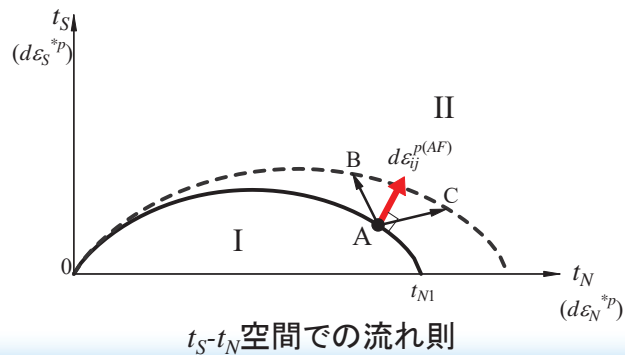
$$d\rho = -(1+e_0)\sqrt{3}\frac{G}{t_N}\Lambda$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} = \frac{dF}{\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \bar{G} \right\}} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} = \frac{dF}{\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3}\frac{G}{t_N} \right\}} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} = \frac{dF}{h^p} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{ij}}$$

$$d\varepsilon_v^p = \frac{dF}{h^p} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \quad \left(\text{where, } h^p = \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3}\frac{G}{t_N} \right\} \right)$$

負荷基準:

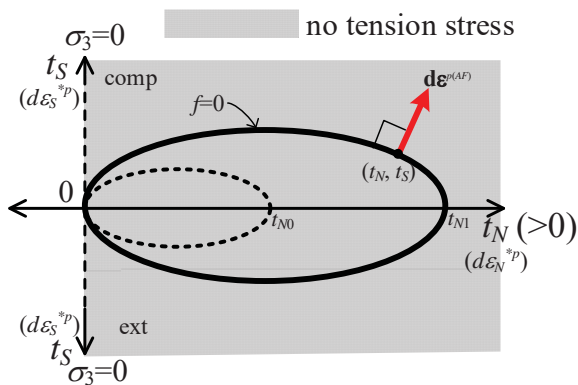
$$\begin{cases} d\varepsilon_{ij}^p = d\varepsilon_{ij}^{p(AF)} \neq 0 & \text{if } \Lambda = \frac{dF}{h^p} \geq 0 \\ d\varepsilon_{ij}^p = 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



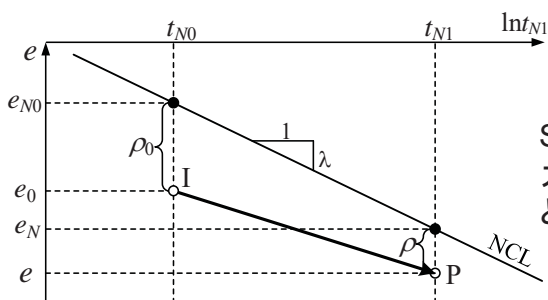
t_S - t_N 空間での流れ則

7

Subloading t_{ij} model における ρ の更新



t_{ij} modelの初期および現降伏曲面と塑性流れ則



密度を表す状態変数 ρ の定義

$$\begin{cases} e_{N0} - e_N = \lambda \ln(t_{N1}/t_{N0}) \\ e_0 - e = (-\Delta e) = (-\Delta e)^e + (-\Delta e)^p \\ \quad = \kappa \ln(t_{N1}/t_{N0}) + \varepsilon_v^p (1+e_0) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} (-\Delta e)^p &= (e_0 - e) - (-\Delta e)^e \\ &= \{ (e_{N0} - e_N) - (-\Delta e)^e \} - (\rho_0 - \rho) \\ &= (\lambda - \kappa) \ln \frac{t_{N1}}{t_{N0}} - (\rho_0 - \rho) \end{aligned}$$

$$f = F - \left\{ H + \frac{\rho_0 - \rho}{\lambda - \kappa} \right\} = 0$$

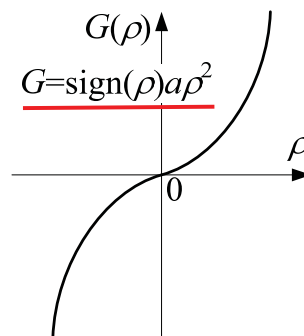
$$\begin{cases} F = \ln \frac{t_{N1}}{t_{N0}} = \ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \zeta(X), & \zeta(X) = \frac{1}{\beta} \left(\frac{X}{M^*} \right)^\beta \\ \quad \text{(where } X = t_s/t_N \text{)} \\ H = \frac{(-\Delta e)^p}{\lambda - \kappa} = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^p \end{cases}$$

Subloadingの考え方では載荷・除荷に拘わらず降伏曲面は現応力を通る曲面となるので降伏関数の中の密度を表す ρ をstepごとに次式で更新する。

$$\begin{aligned} \rho &= e_N - e \\ &= e_{N0} - \lambda \ln(t_{N1}/t_{N0}) - e_0 + \kappa \ln(t_{N1}/t_{N0}) + \varepsilon_v^p (1+e_0) \\ &= \rho_0 - (\lambda - \kappa) \ln(t_{N1}/t_{N0}) + \varepsilon_v^p (1+e_0) \end{aligned}$$

8

λ	0.090	Same parameters as Cam clay model
κ	0.020	
$N(e_N \text{ at } p = 98\text{kPa})$	0.83	
$R_{CS}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS (comp.)}$	3.5	
v_e	0.2	
β	1.5	Shape of yield surface (same as original Cam clay if $\beta=1$)
+		
a	$290 \approx 500/\sqrt{3}$	Influence of density



N.B.

密度を表すパラメータ a について論文により

Nakai & Hinokio (2004): $a=500$

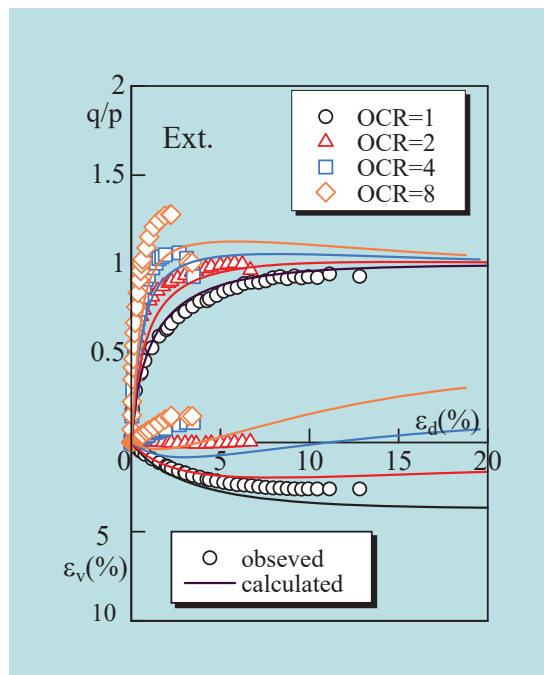
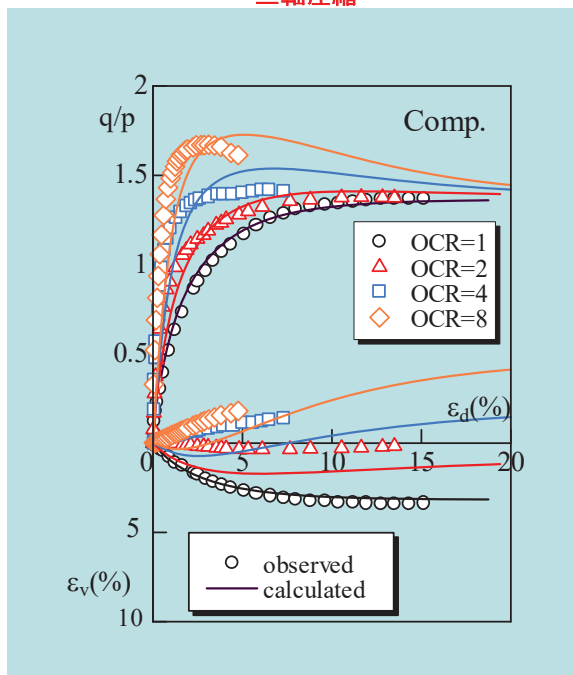
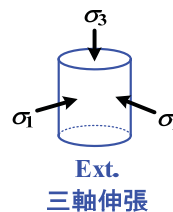
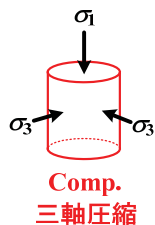
Nakai et. al., (2011b): $a/(\lambda-\kappa)=500$

Nakai (2012): $a/(\lambda-\kappa)=500$

と記しているが、降伏関数の表示の違いによるもので、モデルそのものは同じ。誘導過程から判るように、ここでの表示が一次元モデルとの対応が分かり易い。

また、正規圧密土でも密度を考慮できる過圧密土を対象としたモデルで解析する方が計算は安定する(下負荷面の自動修正機能)

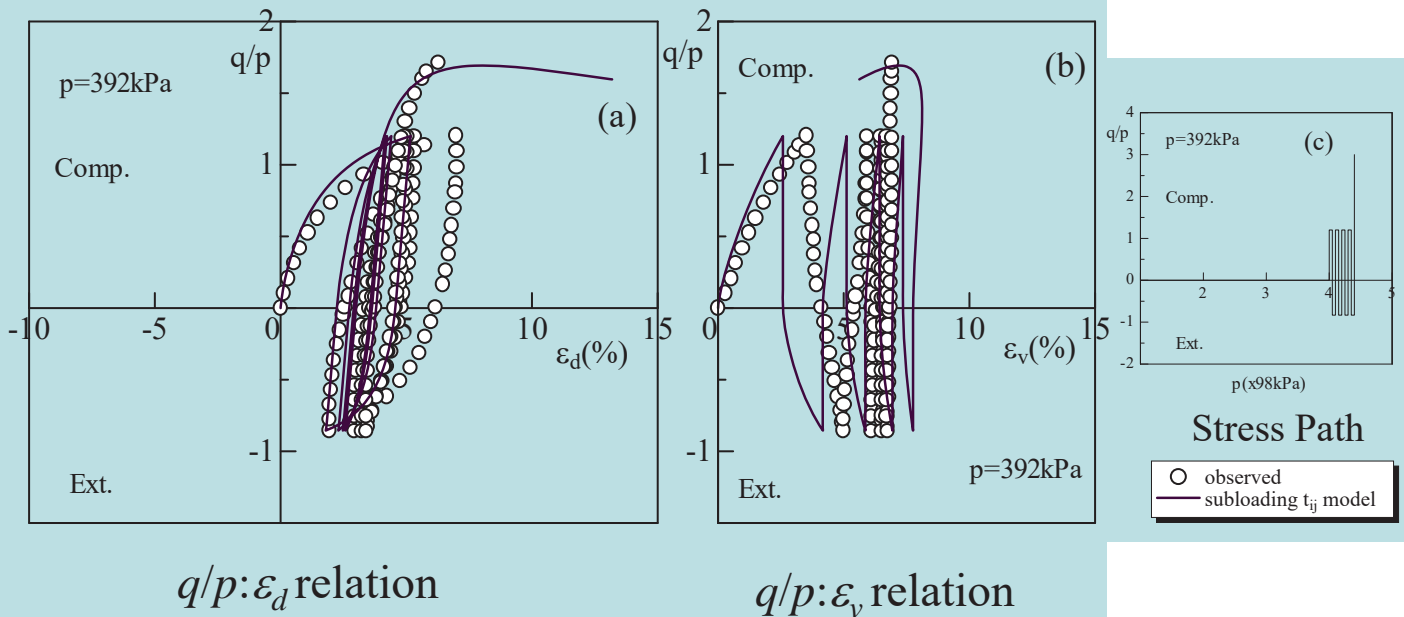
正規および過圧密粘土の三軸圧縮および伸張試験



$q/p : \epsilon_d : \epsilon_v$ relation

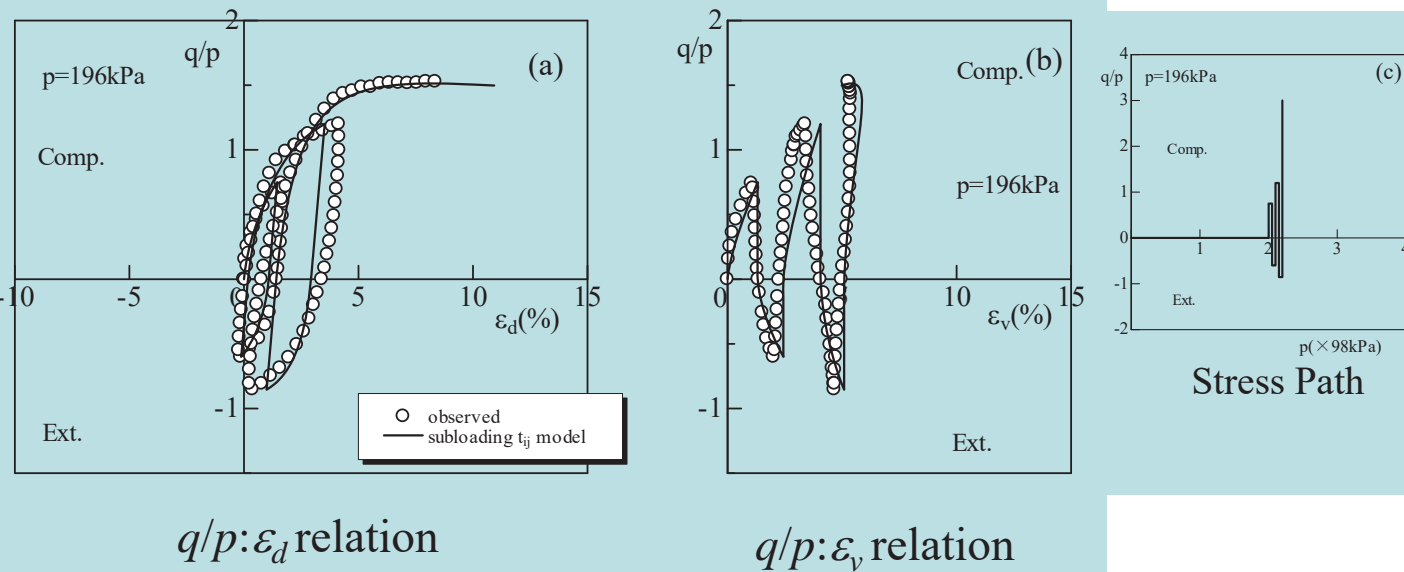
$q/p : \epsilon_d : \epsilon_v$ relation

正規圧密粘土の繰返し載荷(三軸圧縮・伸張)試験



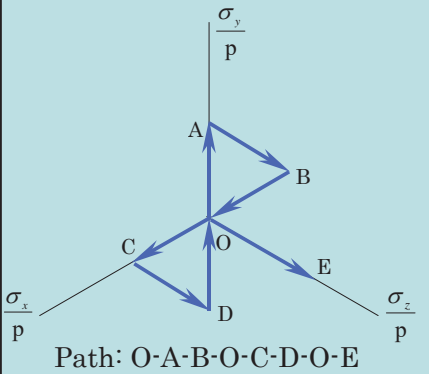
繰返し応力比を一定としたケース

正規圧密粘土の繰返し載荷(三軸圧縮・伸張)試験

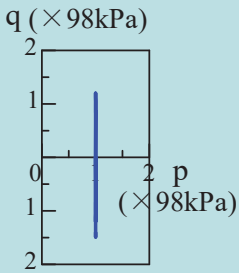


繰返し応力比を変化させたケース

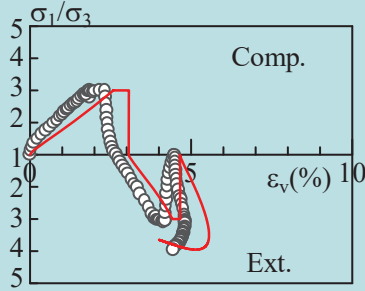
正規圧密粘土の繰返し载荷(3主応力制御)試験



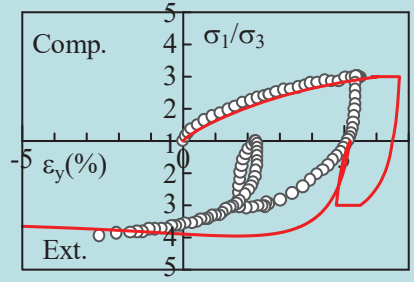
(a) Stress path on the octahedral plane



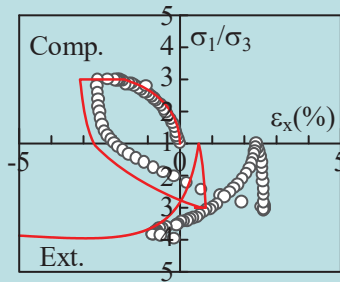
(b) Stress path in (p, q) space



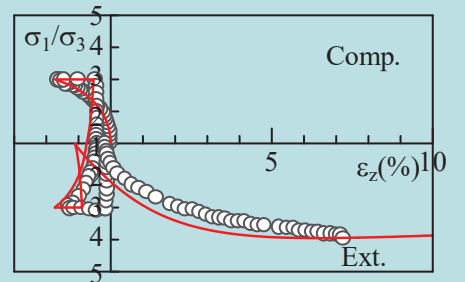
(c) $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_v$



(d) $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_y$



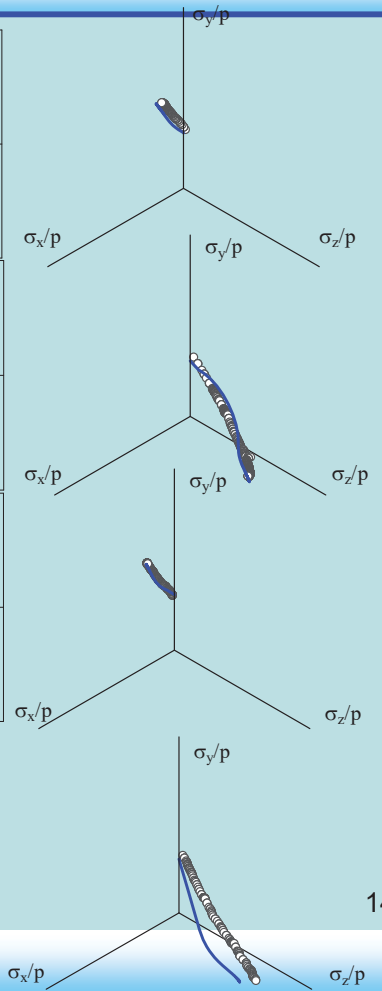
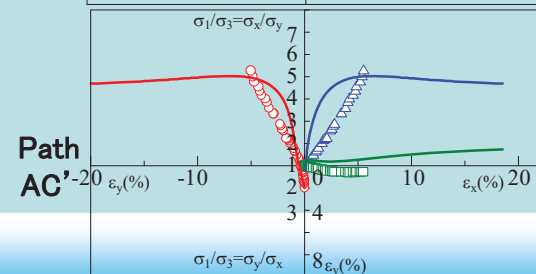
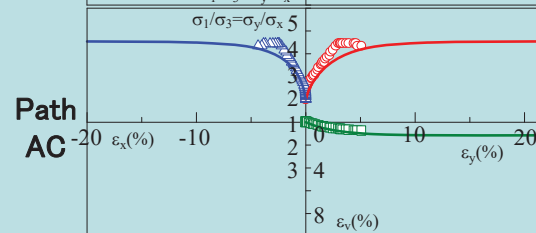
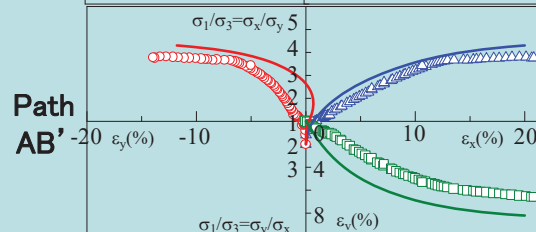
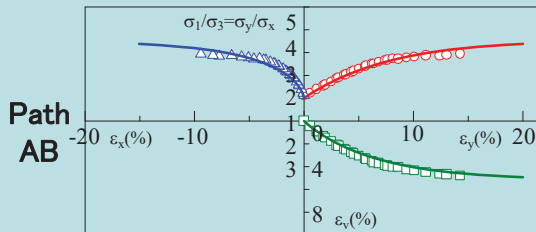
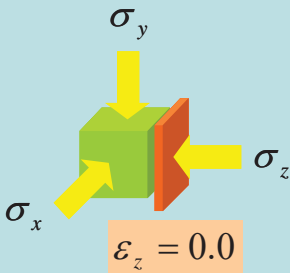
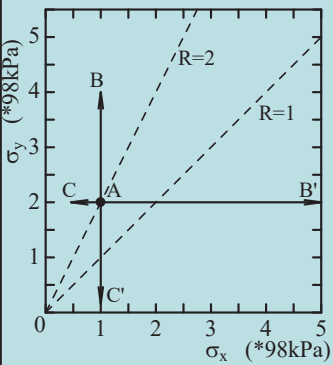
(e) $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_x$



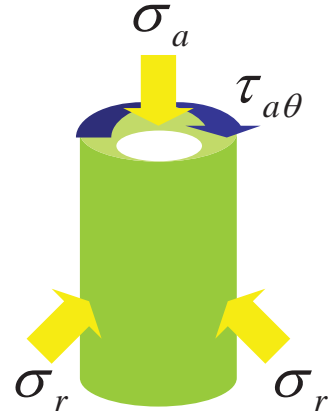
(f) $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_z$



正規圧密粘土の平面ひずみ試験

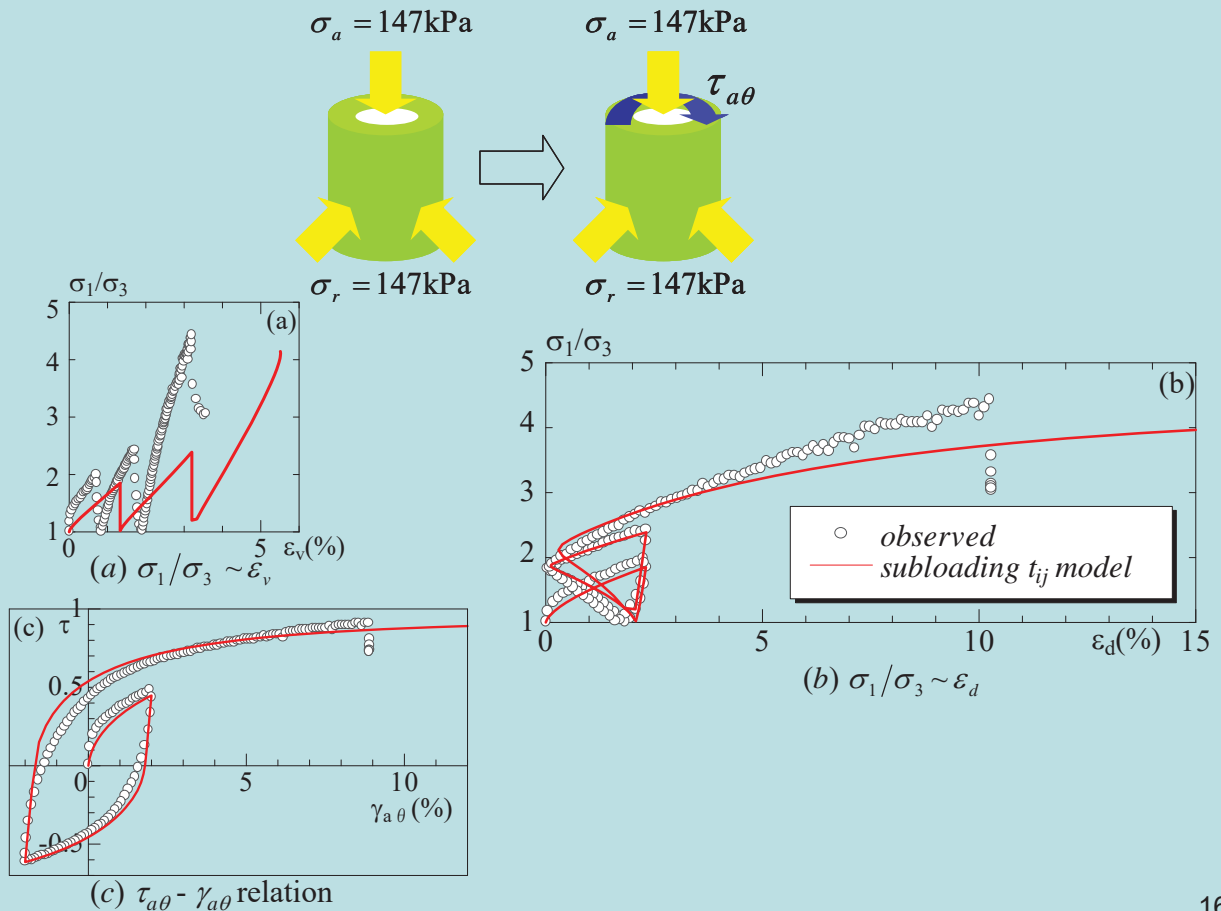


中空ねじり試験



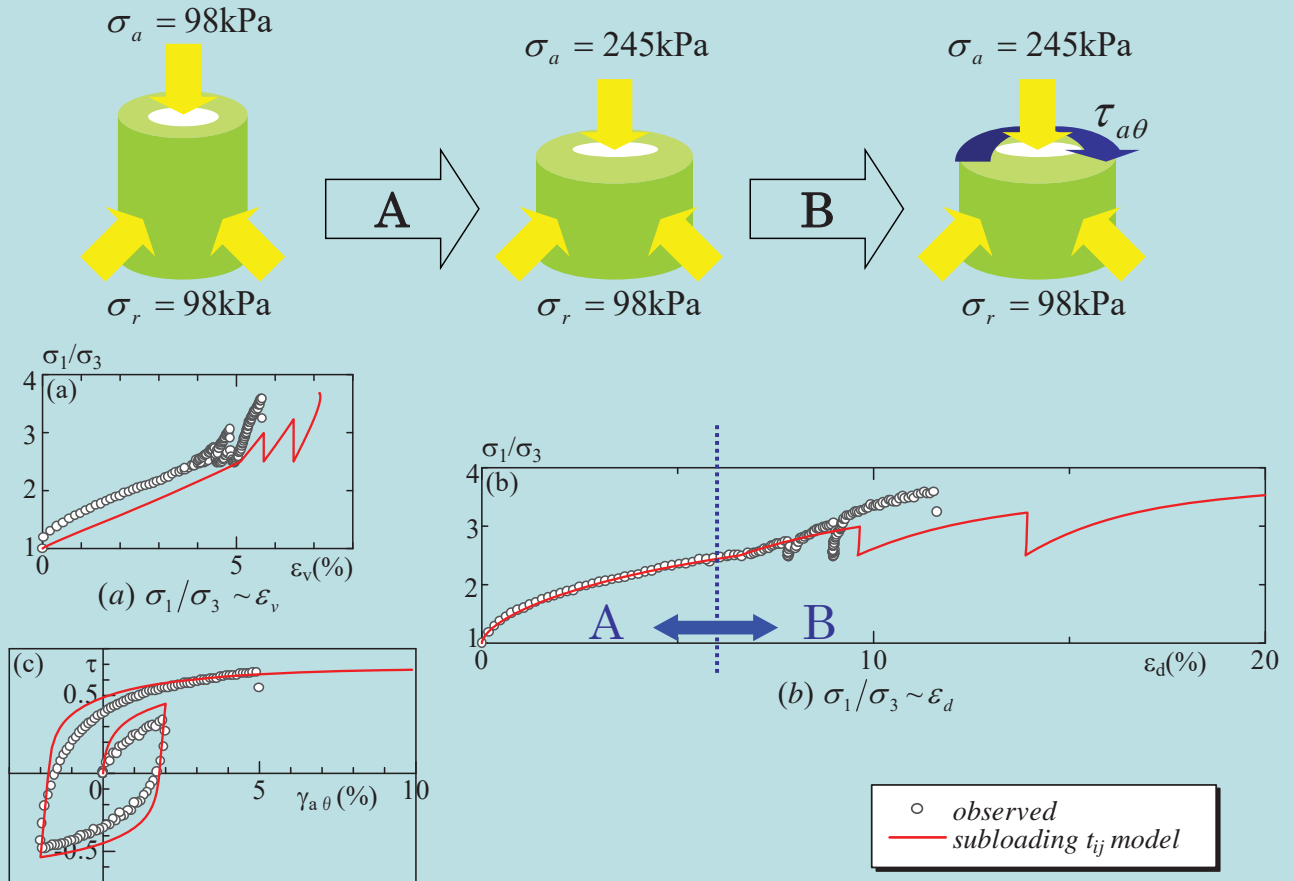
15

正規圧密粘土の中空ねじりせん断試験結果と解析



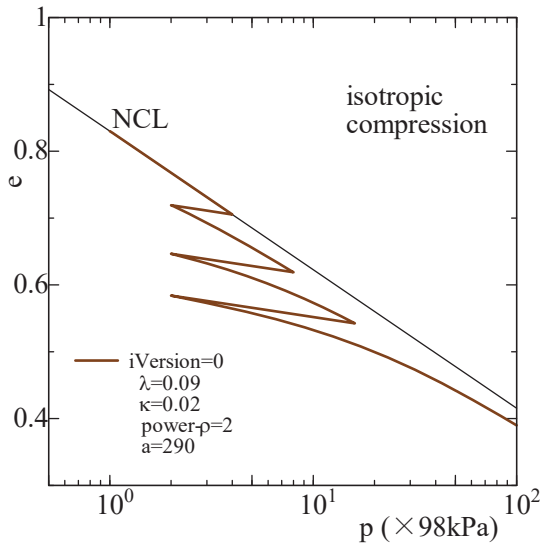
16

正規圧密粘土の中空ねじりせん断試験結果と解析

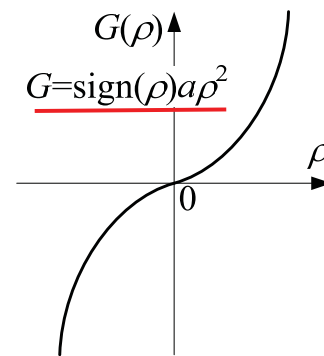


17

iVersion=0の特性



等方圧縮・除荷・再載荷の計算曲線



2次関数で与えた関数G

3次元応力条件下のせん断挙動は適切に表現できるが、(等方)圧縮挙動の定量的な評価には問題がある。

- $\lambda=0.90$ に対して $\kappa=0.20$ は相対的に大きい。
- ρ の発展則を決める関数Gを

$$G = \text{sign}(\rho) \cdot a \rho^2$$

と2次関数で与えているため、再載荷時にNCLに近づくものの一致しない。

18

iVersion=0の特性

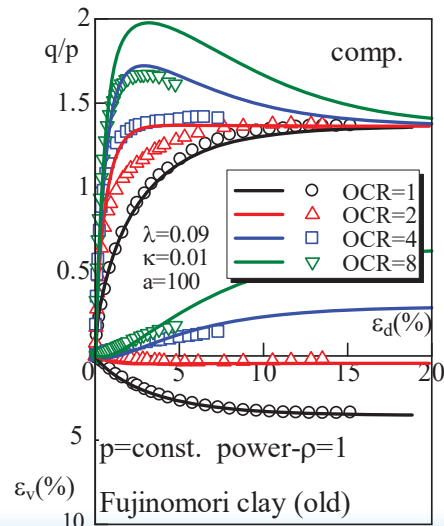
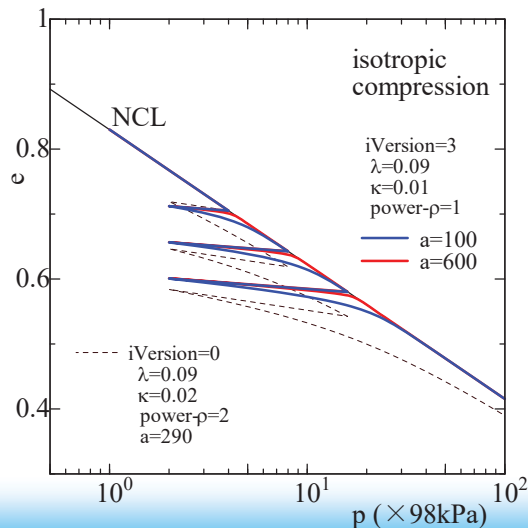
実測値に近い膨潤指数 $\kappa=0.10$ を採用し、関数 G を1次元モデルとの対応もよい線形関係で与える

$$G = a\rho$$

その結果、等方圧縮で過圧密状態からの再載荷時に拘束応力の増加に伴いNCLに漸近し、最終的にNCLに一致する。

左図は $\kappa=0.01$ とし、 $a=100$ および $a=600$ としたときの等方圧縮の計算曲線を示す(細い細線は従来のもの)。 $a=600$ では弾性挙動に近づくが、どちらのパラメータでも圧縮挙動を表現可能。

右図は初期 $a=100$ とした時のせん断試験の解析結果を示す(プロットは実測値)。圧縮挙動に合わせてパラメータを設定したときせん断挙動では過圧密土では剛性・強度を過大評価するようである。



iVersion=0の改良 ⇒ iVersion=3

せん断時の剛性・強度の過大評価を解消するため、 ρ の発展則で応力比 X の影響を考慮する。

$$d\rho = -(1+e_0)\sqrt{3} \frac{G/(1+k_a X)}{t_N} \Lambda, \quad G = a\rho$$

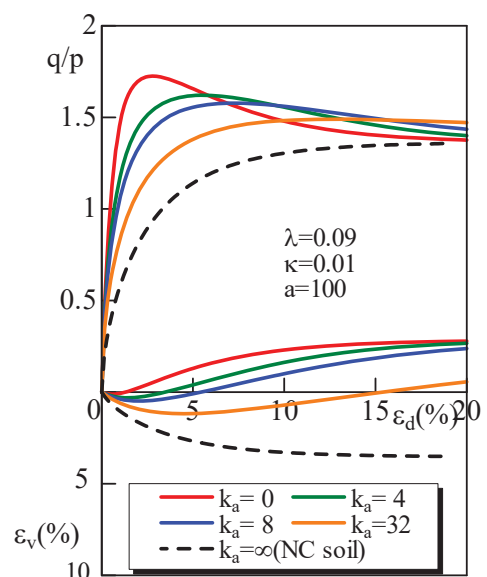
その結果、塑性ひずみ増分は次式のように破線で囲んだ項が加わるだけ。他はiVersion=0と同じ。

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial t_{ij}}$$

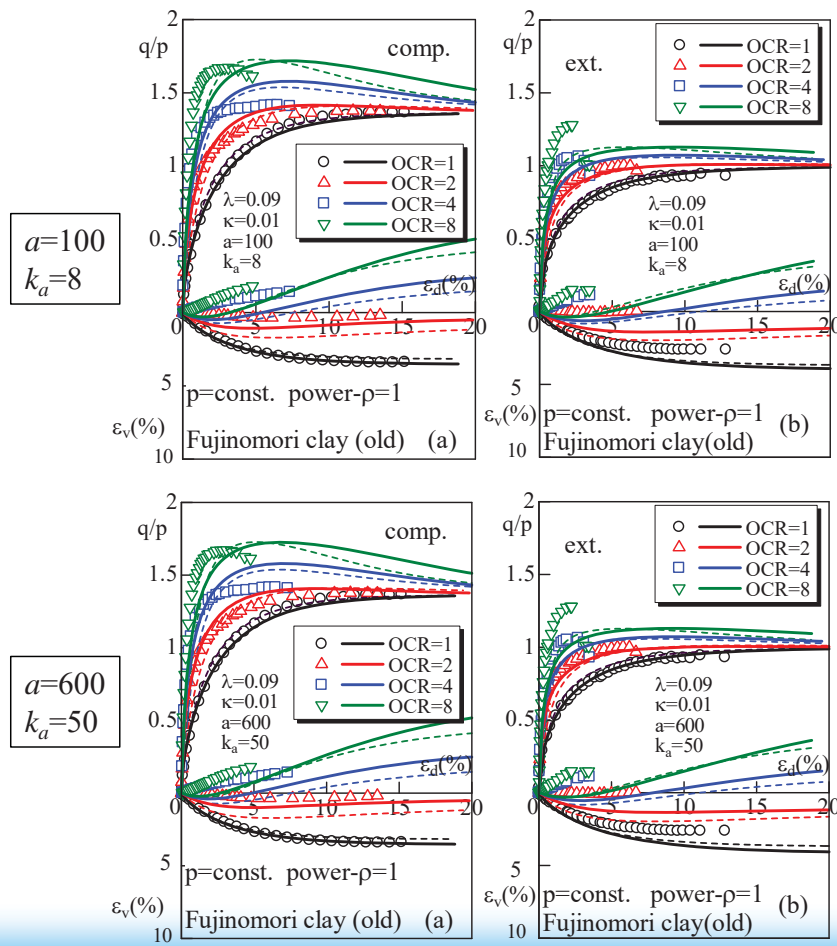
$$= \frac{dF}{\lambda - \kappa \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3} \frac{G/(1+k_a X)}{t_N} \right\}} \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} = \frac{dF}{h^p} \frac{\partial F}{\partial t_{ij}}$$

$$\left(\text{where, } h^p = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3} \frac{G/(1+k_a X)}{t_N} \right\} \right)$$

右図はOCR=4として、 k_a を変化させた時のせん断試験の計算結果を示す。 k_a を0から無限大に変化させると、剛性・強度の過大評価から正規圧密土の挙動まで表現できる。なお、等方圧縮挙動は k_a の影響を受けない。



正規および過圧密粘土の三軸圧縮および伸張試験と解析-iVersion=3



NCおよびOC clay の平均主応力一定三軸圧縮および伸張試験

- プロットが実測値、実線がiVersion=3の解析結果、破線はiVersion=0の解析結果
- 正規圧密土の応力-ひずみ曲線は、 k_a の値によらない。
- 上の図が $a=100$ & $k_a=8$, 下の図が $a=600$ & $k_a=50$ の解析結果
- a の値が異なっても、 k_a でせん断時の応力-ひずみ曲線を合わせることができる
- 従来(iVersion=0)はせん断時の応力-ひずみ曲線に合わせていたが、等方圧縮時は柔らかすぎる計算曲線となっていた。

iVersion=0 と iVersion=3の違いと材料パラメータのまとめ

iVersion=0:

$$\begin{cases} d\rho = -(1+e_0)\sqrt{3} \frac{G}{t_N} \Lambda \\ G = a\rho^2 \end{cases}$$



iVersion=3:

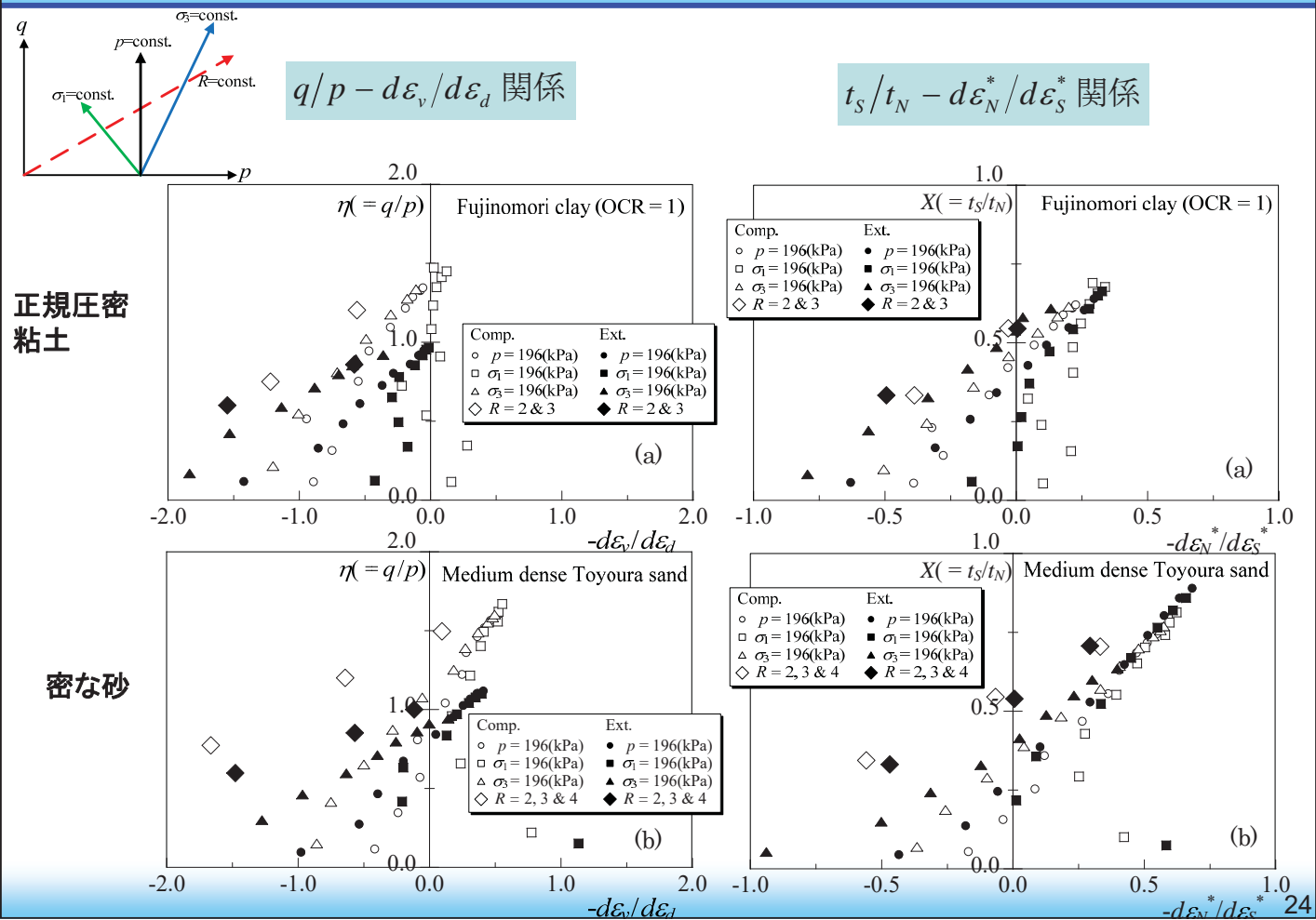
$$\begin{cases} d\rho = -(1+e_0)\sqrt{3} \frac{G / (1+k_a X)}{t_N} \Lambda \\ G = a\rho \end{cases}$$

λ	0.090 or 0.108
κ	0.020
$N=e_{NC}$ at $p=98\text{kPa}$ & $q=0\text{kPa}$	0.83
$R_{CS}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS(comp.)}$	3.5
v_e	0.2
β	1.5
a	290

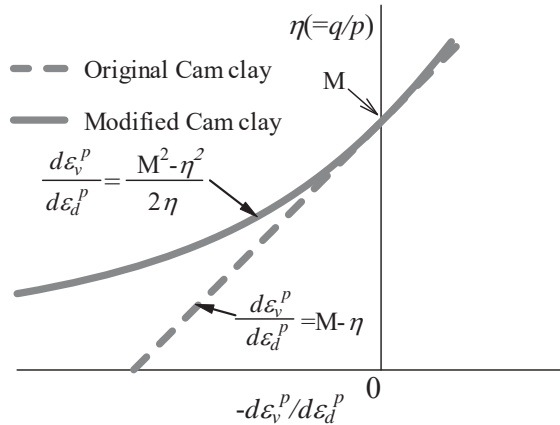
λ	0.090 or 0.108
κ	0.010
$N=e_{NC}$ at $p=98\text{kPa}$ & $q=0\text{kPa}$	0.83
$R_{CS}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS(comp.)}$	3.5
v_e	0.2
β	1.5
a	100 (600)
k_a	8 (50)

ひずみ増分方向の応力経路依存性を考慮したモデル化

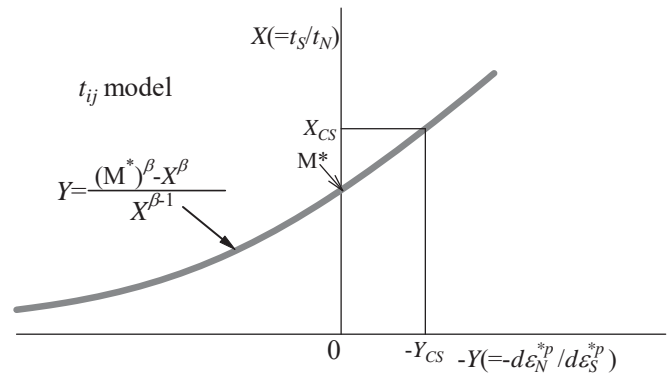
ひずみ増分方向の応力経路依存性の検討 (stress-dilatancy関係)



Cam clay およびt_{ij} (AF) model のstress-dilatancy 関係



Cam clay model のstress- dilatancy関係

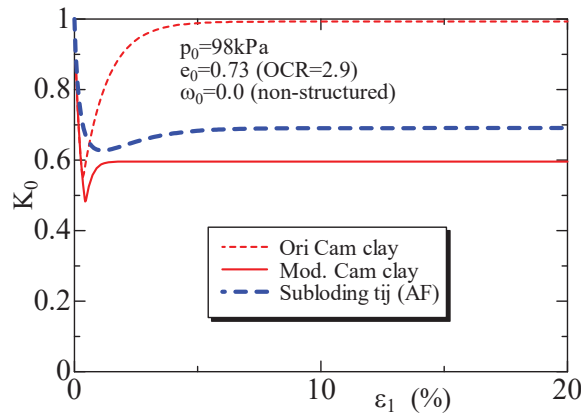


t_{ij} (AF) model のstress- dilatancy関係

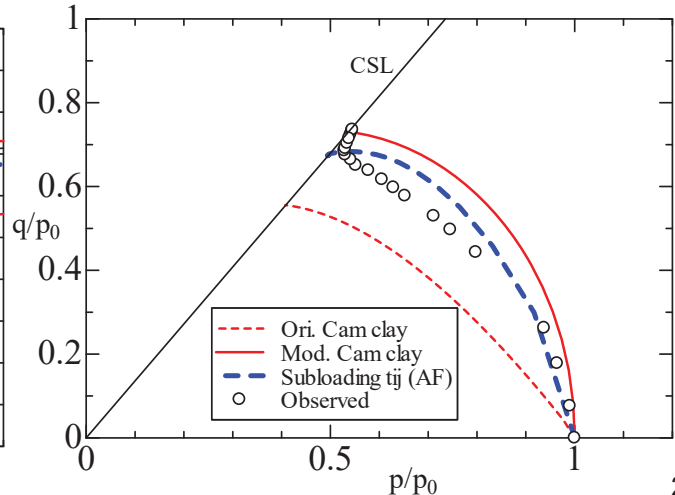
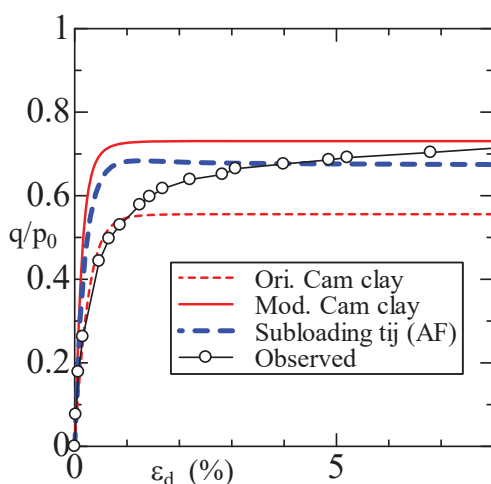
古くから知られている実験事実であるにも拘わらず、最近では注意があまり払われていないひずみ増分方向(stress-dilatancy関係)の応力経路依存性ついて議論する。

これまでに一つの降伏関数であっても、塑性ひずみ増分を関連流動則(AF)成分と等方圧縮(IC)成分に分けることで応力経路依存性を説明できることを示してきたが、ここではより合理的で安定な定式化について解説する。

Cam clay およびt_{ij} (AF) model によるK₀圧密および非排水せん断の解析

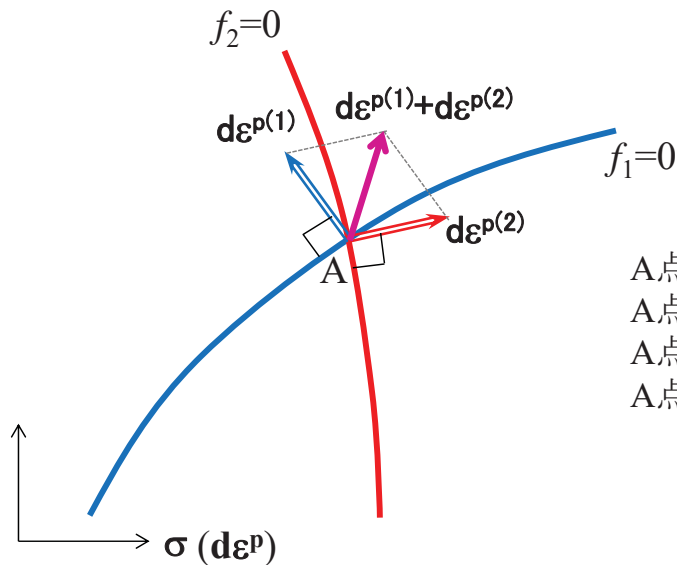


K₀圧密試験の解析結果



正規圧密粘土の非排水挙動と解析

2重硬化(Double hardening)則の概念図



A点から $df_1 > 0$ & $df_2 > 0$ の時 $d\epsilon^p = d\epsilon^{p(1)} + d\epsilon^{p(2)}$
 A点から $df_1 > 0$ & $df_2 \leq 0$ の時 $d\epsilon^p = d\epsilon^{p(1)}$
 A点から $df_1 \leq 0$ & $df_2 > 0$ の時 $d\epsilon^p = d\epsilon^{p(2)}$
 A点から $df_1 \leq 0$ & $df_2 \leq 0$ の時 $d\epsilon^p = 0$

ただし、

- ひずみ増分方向の応力経路依存性を説明できるのは $df_1 > 0$ & $df_2 > 0$ の領域だけ
- 降伏関数、ひずみ硬化パラメータ等が2セット必要。

27

等方圧縮(IC)成分を考慮した定式化(1)

塑性ひずみ増分方向の応力経路依存性を、2重硬化則を使わずに、単一の降伏曲面ではあるが塑性ひずみ増分を、 t_{ij} 空間で直交則を満足する(AF)成分と、平均応力の変化による等方的な(IC)成分に分けることにより説明してきた。

e.g., Nakai & Matsuoka (1986); Nakai(1989), Nakai & Hinokio(2004), Pedoroso et. al.(2005); Nakai et.al.(2011b); Nakai(2012)

ここでは、その後発展させた塑性ひずみ増分の分割方法について解説する。この分割法は以前の方法より合理的且つ簡潔である(中井・Shahin(2017); Nakai & Shahin (2019))

(AF)成分だけの塑性ひずみ増分式に下線で示した平均応力(t_N)の変化による項を加える。

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{dF}{h^p} \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} - L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} + L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \cdot \frac{\delta_{ij}}{3} \quad \left(\text{where, } h^p = \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3} \frac{G/(1+k_a X)}{t_N} \right\} \right)$$

$$= \left\{ \frac{dF}{h^p} - L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \right\} \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} + L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \cdot \frac{\delta_{ij}}{3}$$

この定式化では、塑性体積ひずみ増分(ひずみ硬化パラメータ)は $L^{(IC)}$ の大きさに影響されない。

$$d\epsilon_v^p = d\epsilon_{mm}^p = \frac{dF}{h^p} \frac{\partial F}{\partial t_{mm}} - L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \frac{\partial F}{\partial t_{mm}} + L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} = \frac{dF}{h^p} \frac{\partial F}{\partial t_{mm}}$$

実験の stress-dilatancy 関係より、応力比が大きくなると応力経路依存性の影響が小さくなる。したがって、正の関数 $L^{(IC)}$ は応力比が大きくなるに従い小さくなり、塑性体積ひずみ増分がゼロとなる応力比 ($\partial F / \partial t_{kk} = 0$) では、 $L^{(IC)} = 0$ となる応力比の関数で与える。また、等方圧縮時の $L^{(IC)}$ の項は等方圧縮時に計算される塑性体積ひずみに等しいとする(必要条件ではない)。

28

等方圧縮(IC)成分を考慮した定式化(2)

以上の条件を満たす関数として $L^{(IC)}$ を次式で与える。

$$L^{(IC)} = \frac{R^{(IC)}}{h^{p^{(IC)}}} = \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_N}{\sqrt{3}} \right\rangle^m}{h^{p^{(IC)}}} \quad (\text{usually } m = 2)$$

$L^{(IC)}$ の項は等方圧縮時の塑性体積ひずみに等しいとして、(AF)モデルの塑性係数から

$$h^{p^{(IC)}} = \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \{1+G/(1+k_a X)\}$$

$R^{(IC)} = \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_N}{\sqrt{3}} \right\rangle^m$ は等方応力($X=0$)で1となり、 $\partial F/\partial t_{kk} = 0$ で0となる関数だが、

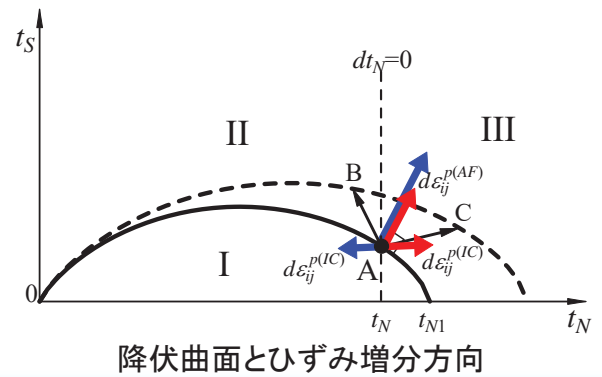
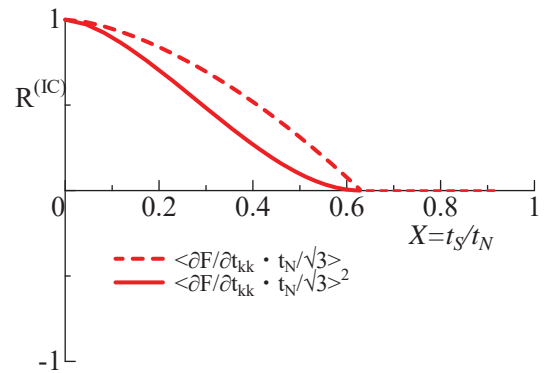
$\partial F/\partial t_{kk} = 0$ で $R^{(IC)} = 0$ となる正の関数であれば何でもよい

負荷基準:

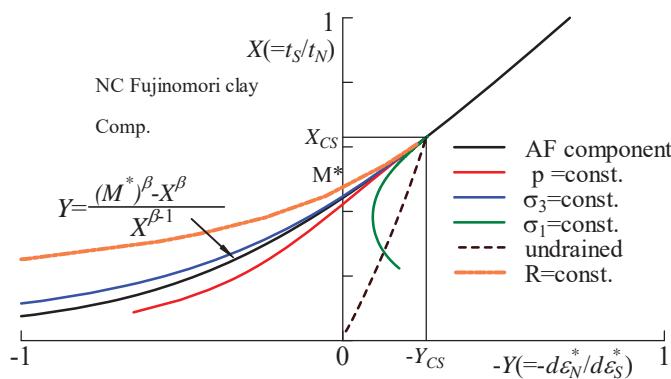
$$\begin{cases} d\varepsilon_{ij}^p = d\varepsilon_{ij}^{p(AF)} + d\varepsilon_{ij}^{p(IC)} \neq 0 & \text{if } \Lambda = \frac{dF}{h^p} \geq 0 \\ d\varepsilon_{ij}^p = 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

塑性ひずみ増分の発生の仕方:

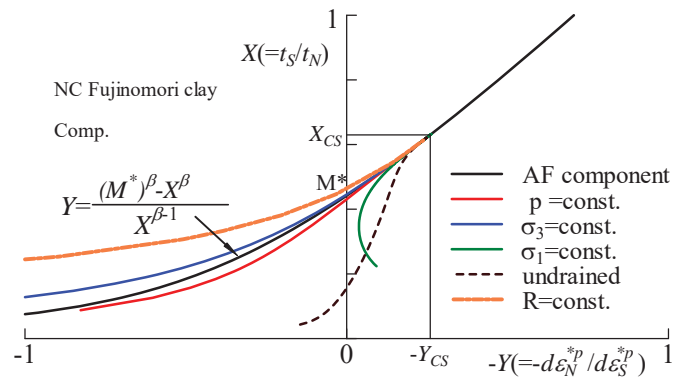
A点からC点に应力が変化する($dt_N > 0$)時は(IC)成分を考慮しない場合に比べてせん断ひずみは小さくなる。一方、A点からB点のように应力が変化する($dt_N < 0$)時は逆にせん断ひずみは大きくなる。



Subloading t_{ij} model (AF+IC)による应力比~ひずみ増分比関係の解析結果

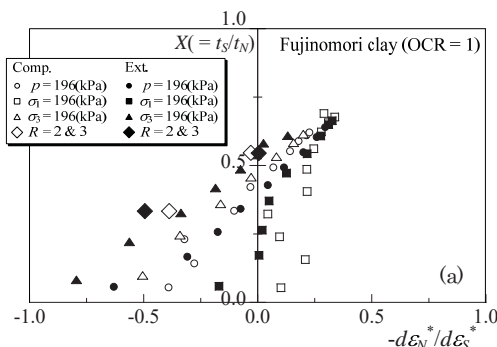


(a) 全ひずみ増分



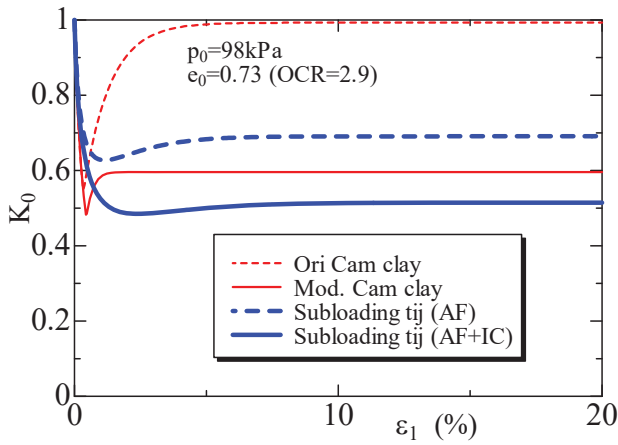
(b) 塑性ひずみ増分

应力比~ひずみ増分比関係の解析結果

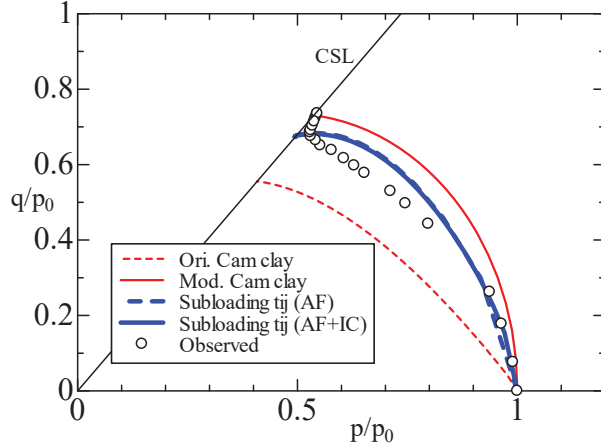
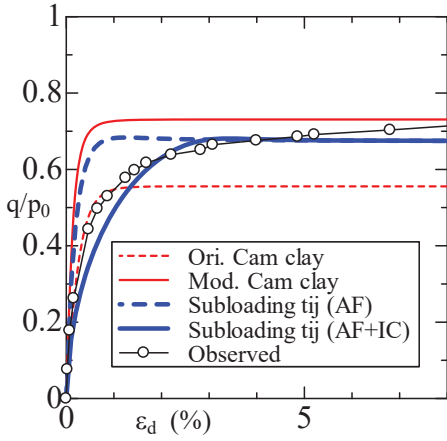


应力比~ひずみ増分比関係の実測値

種々のモデルによる K_0 圧密および非排水せん断の解析

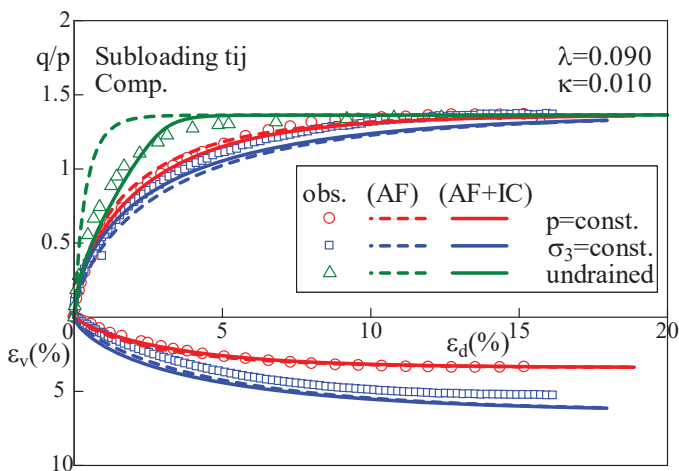


K_0 圧密試験の解析結果

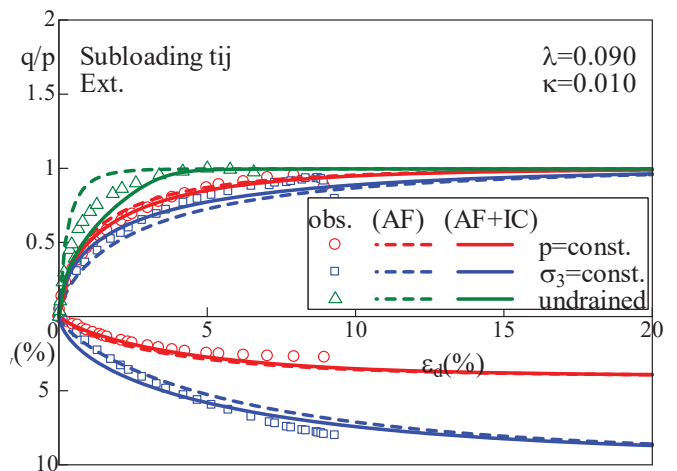


正規圧密粘土の非排水挙動と解析

正規圧密粘土の種々のせん断試験結果と解析

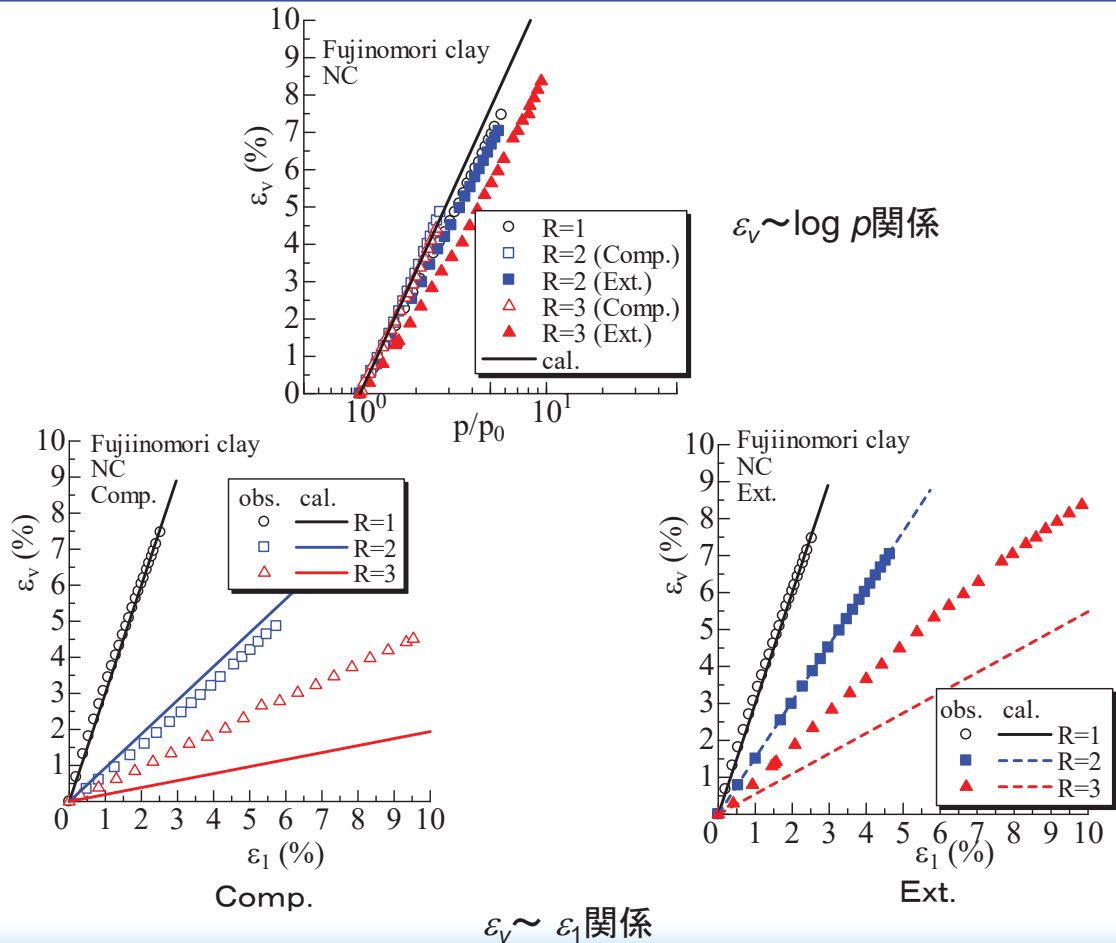


Comp.



Ext.

正規圧密粘土の主応力比(R)一定試験結果と解析

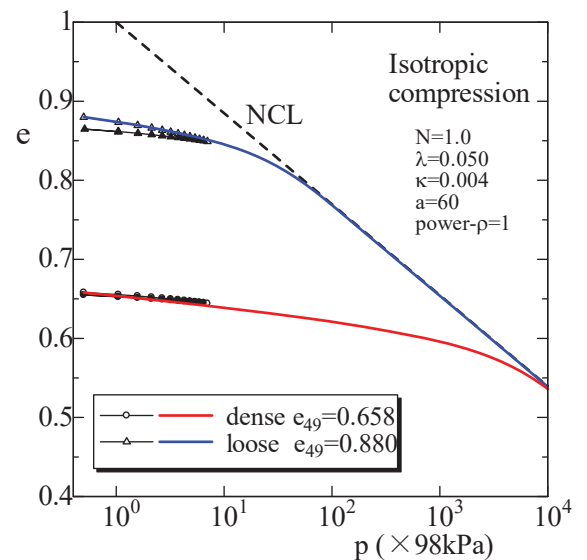


33

豊浦砂の材料パラメータと等方圧縮試験結果

材料パラメータ

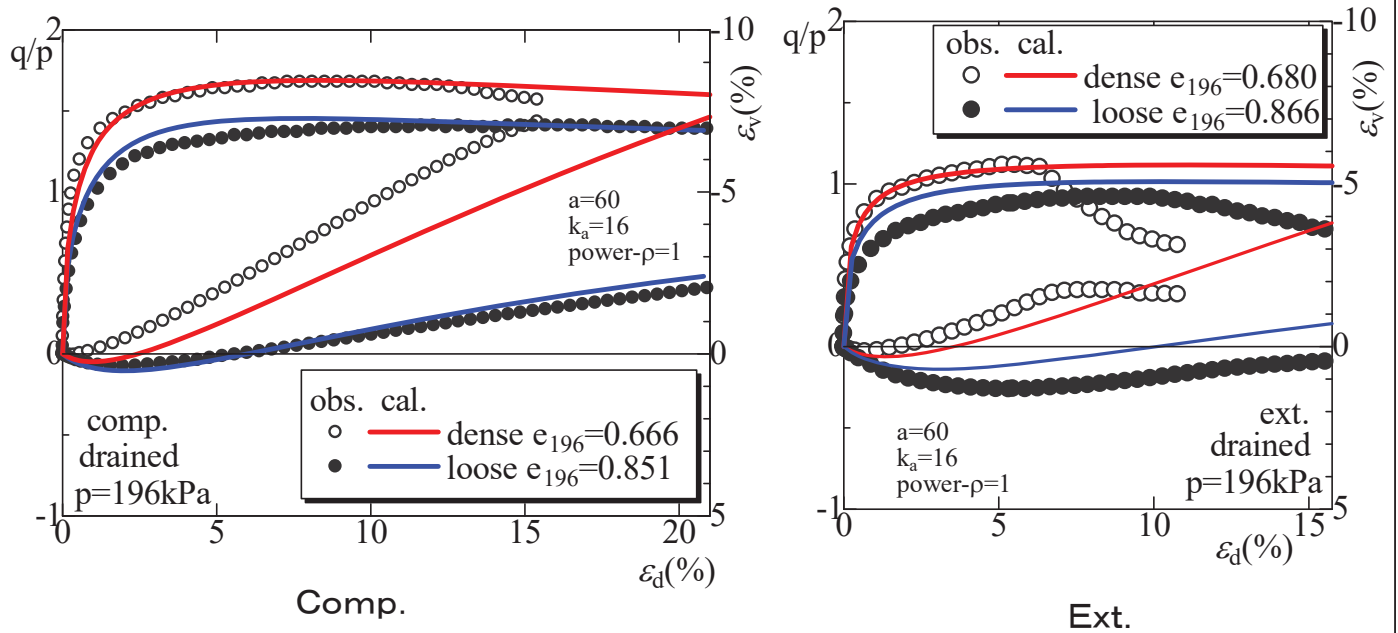
λ	0.05	Same parameters as Cam clay model
κ	0.004	
e_{NC} at $p = 98$ kPa & $q = 0$ kPa	1.0	
$R_{cs} = (\sigma_1/\sigma_3)_{cs(comp)}$	3.2	
ν_e	0.2	
β	1.6	Shape of yield surface (same as original Cam clay at $\beta = 1$)
a	60	Influence of density and confining pressure
k_a	16	



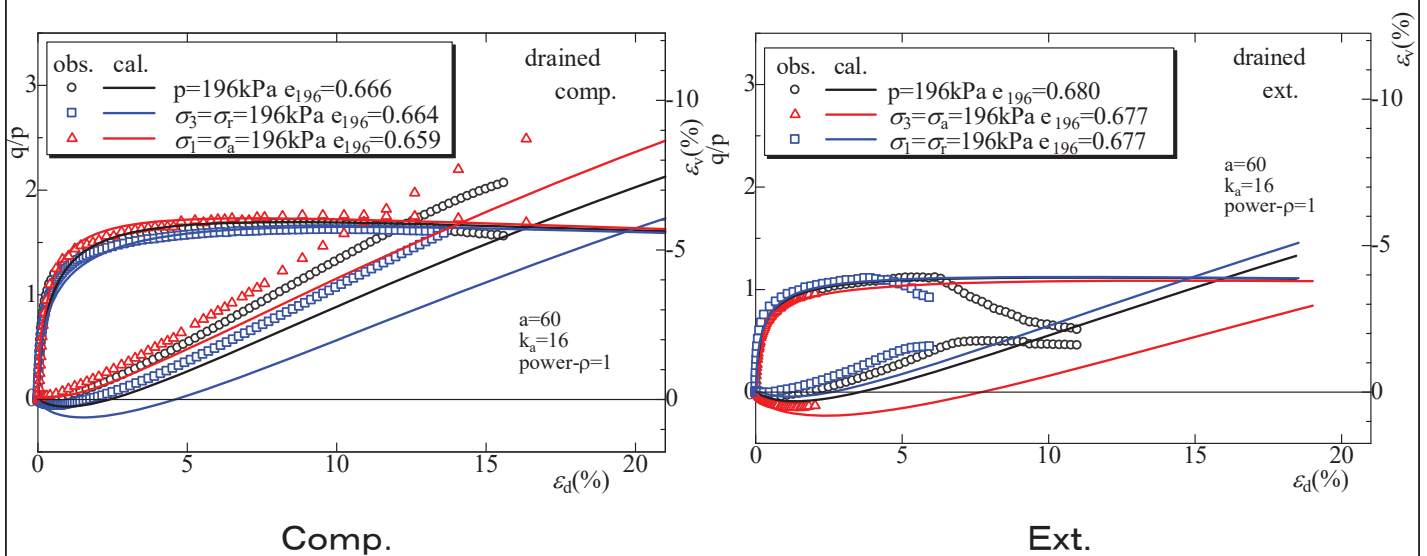
等方圧縮試験結果とシミュレーション

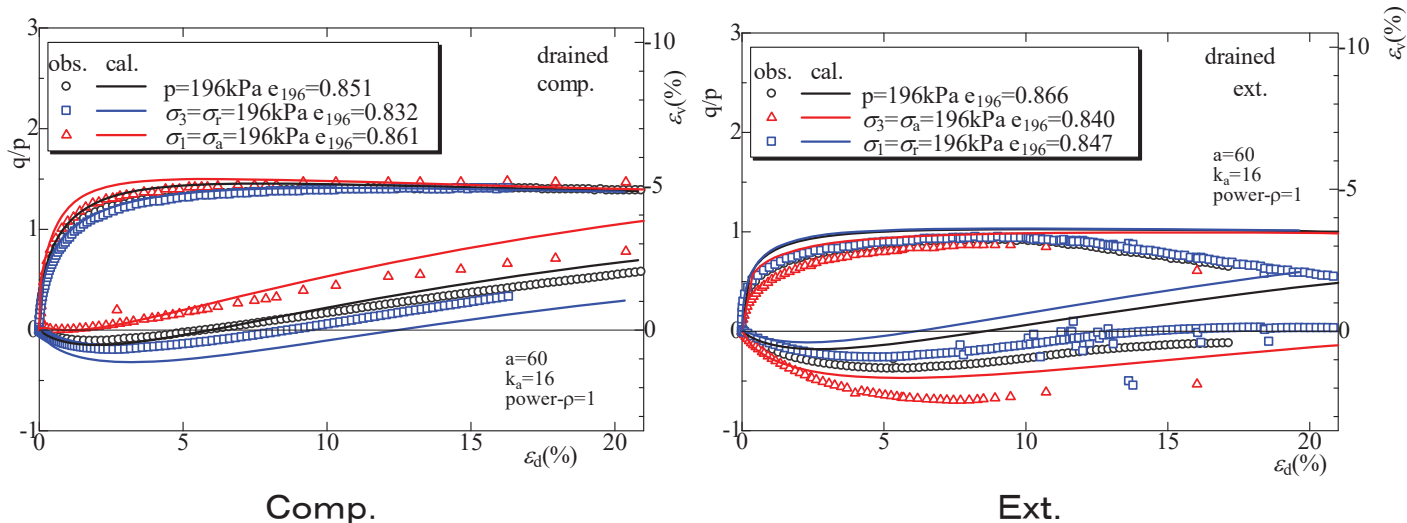
34

砂の平均主応力一定試験結果と解析



密な砂の種々のせん断試験結果と解析

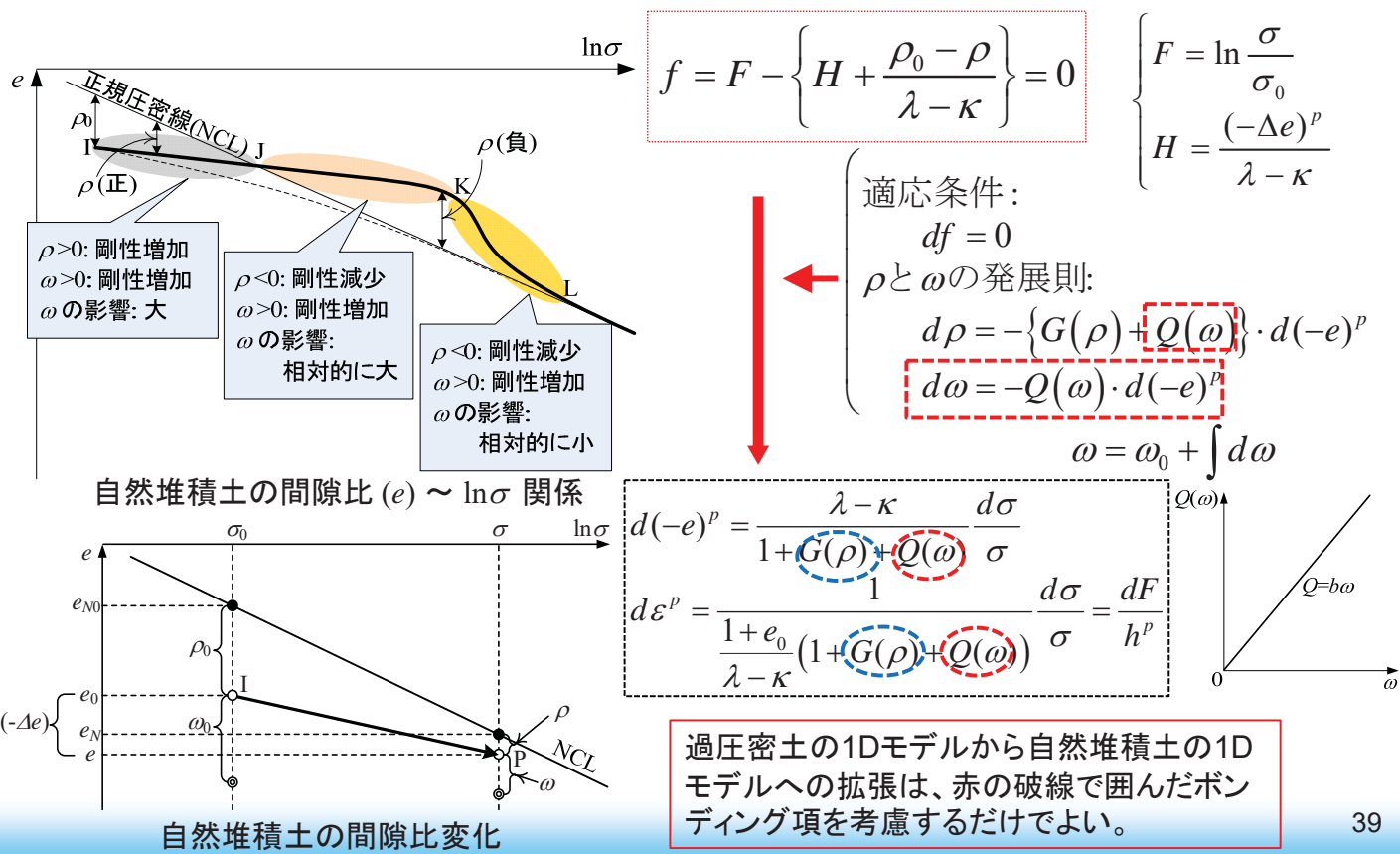




自然堆積土のモデル化

参考：自然堆積土の1次元モデル(1)

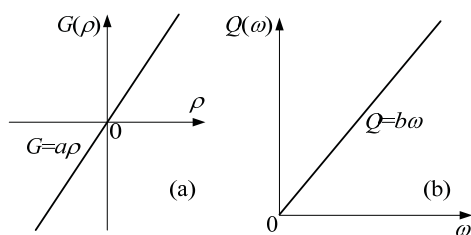
ボンディング効果を仮想上の密度増加(ω)を考え、 ρ の発展則 $d\rho$ に ω の関数 $Q(\omega)$ を加える。 ω は常に剛性増加の効果を持ち、 $Q(\omega)$ も $G(\rho)$ 同様正の増加関数。



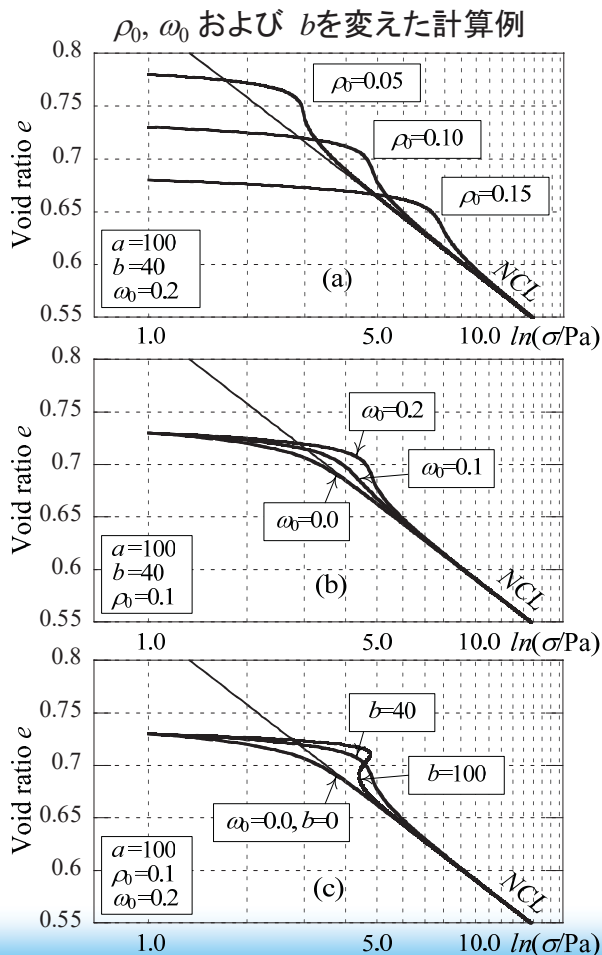
参考：自然堆積土の1次元モデル(2)

材料パラメーター

λ	0.104
κ	0.010
$N(e_N \text{ at } \sigma = 98\text{kPa})$	0.83
a	100
b	40, 100



1次式の単調増加関数で与えた $G(\rho)$ と $Q(\omega)$



3D自然堆積土モデルへの拡張(1)

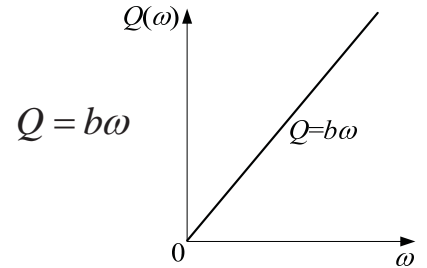
自然堆積土の3次元モデル化はNakai et. al. (2011b); Nakai(2012)で説明している。基本的な考え方はそれと同じであるが、ここでは iVersion=3の過圧密土モデルの拡張で説明する。

1Dモデルを参考に、赤枠のボンディング項を ρ の発展則に加え、また、ボンディング項の発展則を次式で与える

$$\square d\rho = -(1+e_0)\sqrt{3} \frac{G/(1+k_a X) + \boxed{Q/(1+k_b X)}}{t_N} \Lambda$$

$$\square d\omega = -(1+e_0)\sqrt{3}Q \left\| d\varepsilon_{ij}^p \right\| = -(1+e_0)\sqrt{3}Q \left\| \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} \right\| \Lambda,$$

$$\omega = \omega_0 + \int d\omega$$



ここに、 $d\omega$ は等方圧縮時に次式のように1Dモデルの発展則と一致する

$$d\omega = -(1+e_0)\sqrt{3}Q \left\| d\varepsilon_{ij}^p \right\| = -Q \cdot (1+e_0) d\varepsilon_v^p = -Q \cdot d(-e)^p$$

41

3D自然堆積土モデルへの拡張(2)

前記の $d\rho$, $d\omega$ の発展則を考えることにより、過圧密土モデルに赤枠の項を加えるだけで、負荷基準、降伏関数等は変わらない

$$\bullet f = F - H - \frac{1}{\lambda - \kappa} (\rho_0 - \rho) = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} F = \ln \frac{t_{N1}}{t_{N0}} = \ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \zeta(X), \quad \zeta(X) = \frac{1}{\beta} \left(\frac{X}{M^*} \right)^\beta \\ \text{(where } X = t_s/t_N \text{)} \\ H = \frac{(-\Delta e)^p}{\lambda - \kappa} = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^p \end{array} \right.$$

$$\bullet d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} - L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \cdot \frac{\delta_{ij}}{3} = \underbrace{\left\{ \frac{dF}{h^p} - L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \right\}}_{(AF)} + \underbrace{L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \cdot \frac{\delta_{ij}}{3}}_{(IC)}$$

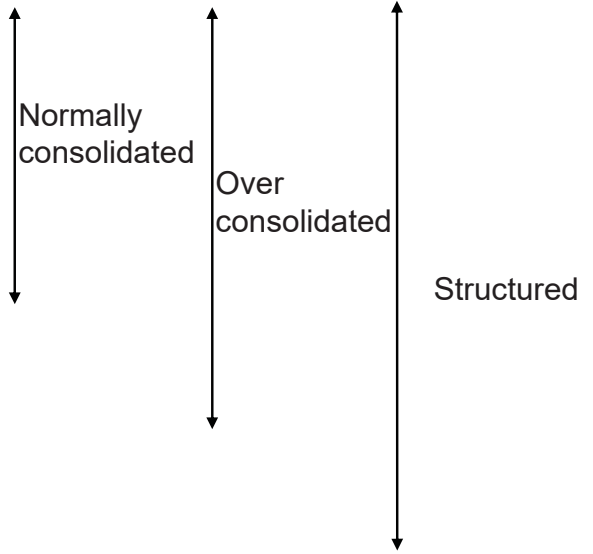
$$\left(\begin{array}{l} \text{where, } d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_m^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial t_{mm}}, \quad L^{(IC)} = \frac{R^{(IC)}}{h^{p(IC)}} = \frac{\left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_N}{\sqrt{3}} \right\rangle^2}{h^{p(IC)}} \\ h^p = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3} \frac{G/(1+k_a X) + \boxed{Q/(1+k_b X)}}{t_N} \right\}, \quad h^{p(IC)} = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ 1 + \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_N}{\sqrt{3}} \right\rangle + \left\langle \frac{G/(1+k_a X) + \boxed{Q/(1+k_b X)}}{t_N} \right\rangle \right\} \end{array} \right)$$

$$\text{負荷基準} \quad \left\{ \begin{array}{ll} d\varepsilon_{ij}^p = d\varepsilon_{ij}^{p(AF)} + d\varepsilon_{ij}^{p(IC)} \neq 0 & \text{if } \Lambda = \frac{dF}{h^p} \geq 0 \\ d\varepsilon_{ij}^p = 0 & \text{otherwise} \end{array} \right.$$

42

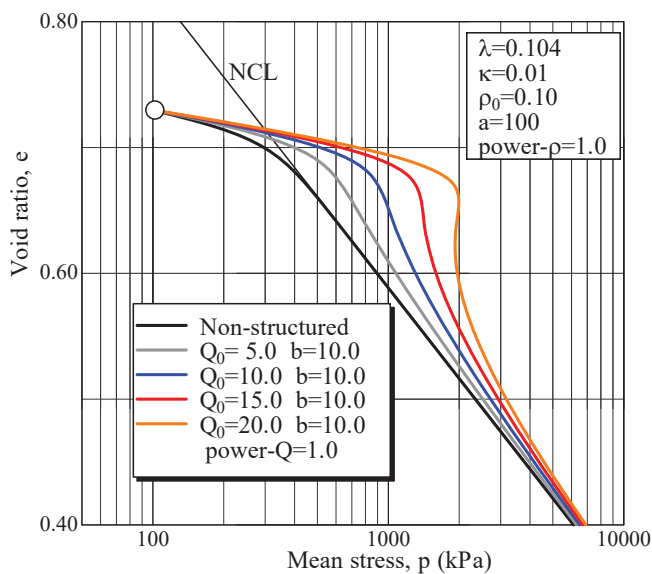
Subloadong tij model (iVersion=3)の材料パラメータ

λ	0.090 or 0.104	Same parameters as Cam clay model
κ	0.010	
$N=e_{NC}$ at $p = 98$ kPa	0.83	
$R_{cs} = (\sigma_1/\sigma_3)_{cs(comp.)}$	3.5	
v_e	0.2	
β	1.5	Shape of yield surface
a	100	Influence of density and confining pressure
k_a	8	
b	10	Influence of bonding
$Q_0 = b\omega_0$	10	
k_b	3	

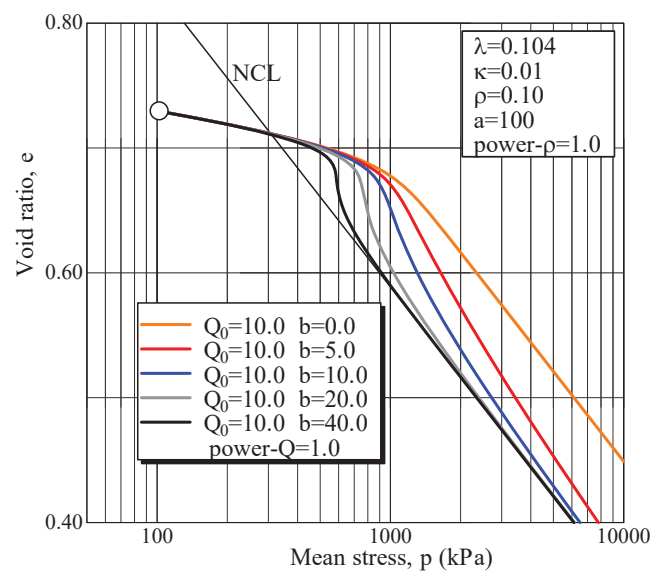


解析で用いた典型的な藤森粘土の材料パラメータを示す。

自然堆積粘土の等方圧縮試験の解析結果

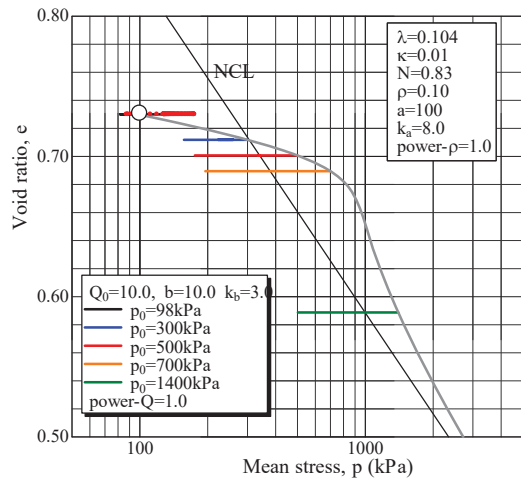


$b=10.0$ で Q_0 を変化させたときの解析結果

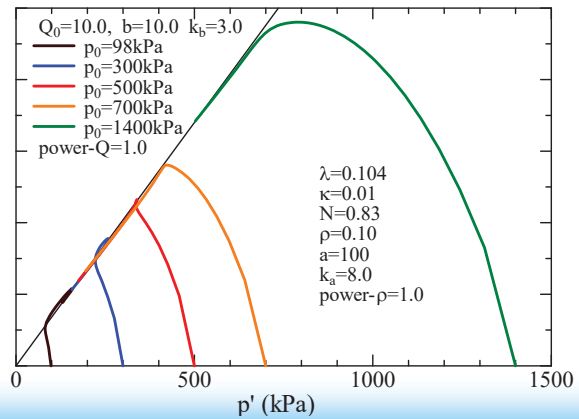
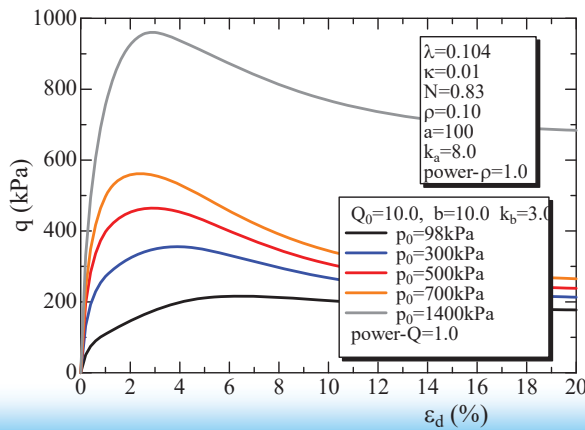


$Q_0=10.0$ で b を変化させたときの解析結果

Structured clayの非排水せん断試験の解析結果



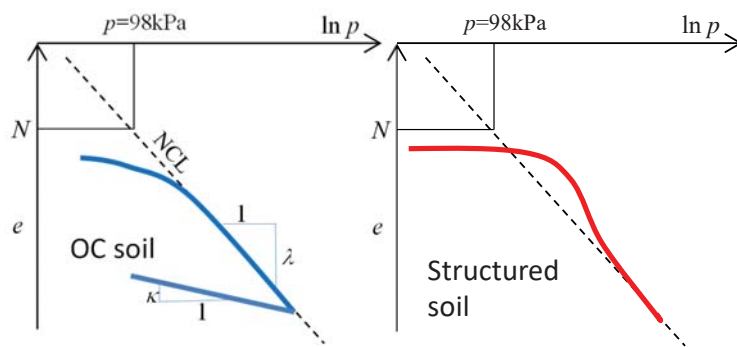
$e_0 = 0.73$, $p_0 = 98\text{kPa}$, $Q_0 = 10.0$, $b = 10$
 の初期状態から等方圧縮した後の
 非排水三軸圧縮試験の解析結果



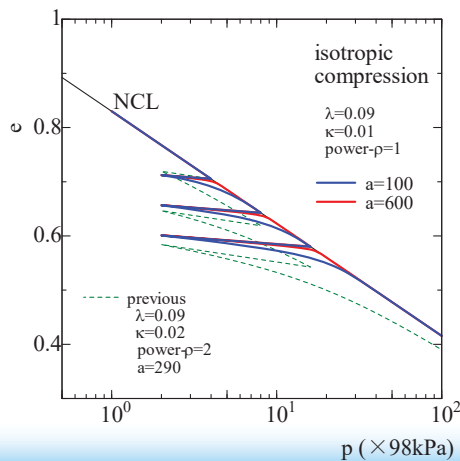
45

材料パラメータの決め方の 補足

パラメータの決定法($\lambda, \kappa, N, a, b, Q_0$)



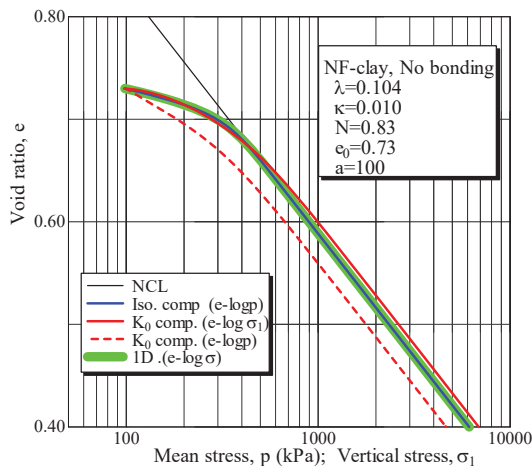
- 等方圧縮試験の $e-\ln p$ 関係で G や Q の影響がなくなったと考えられる部分の直線(NCL)の勾配と除荷時の勾配から λ および κ を決める。
- NCLの $P=98\text{kPa}$ の間隙比が N となる。
- Bondingのない試験結果から a を決める
- Bondingのある場合 Q_0 および b を決める



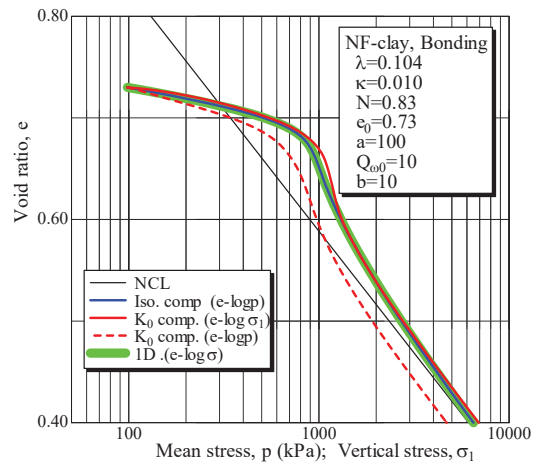
- 細い破線はiVersion=0での藤森粘土(old)の等方圧縮・除荷試験のシュミレーション結果を示す。大きめの κ と $G=a\rho^2$ の影響で柔らかい応答を示す。
- 実線はiVersion=3でのシュミレーション結果を示す。 $a=100, 600$ の結果を示すが a を大きくすると弾性的挙動に近づく。また、 $G=a\rho$ (線形関係)で与えているため a の値に拘わらず必ずNCLに戻る。

47

圧縮に関するパラメータの決め方補足



Bondingなし



Bondingあり

Bondingがある場合とない場合の等方圧縮および K_0 圧縮の解析値を示す。両図から、等方圧縮の $e-\log p$ と K_0 圧縮の $e-\log \sigma_1$ の間には大きな差はない。したがって、等方圧縮試験ではなく通常のoedometer試験で圧縮特性に関するパラメータを決めても問題はないと言える。

図には1Dモデルによる $e-\log \sigma$ 関係も示すが、必然的に等方圧縮の $e-\log p$ 関係と一致する。

48

パラメータの決定法(β の感度)

- 降伏関数(塑性ポテンシャル)

$$F = \ln \frac{t_{N1}}{t_{N0}} = \ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \zeta(X),$$

$$\zeta(X) = \frac{1}{\beta} \left(\frac{X}{M^*} \right)^\beta$$

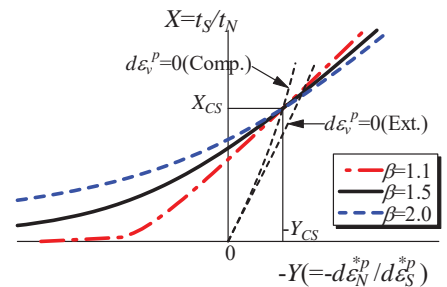
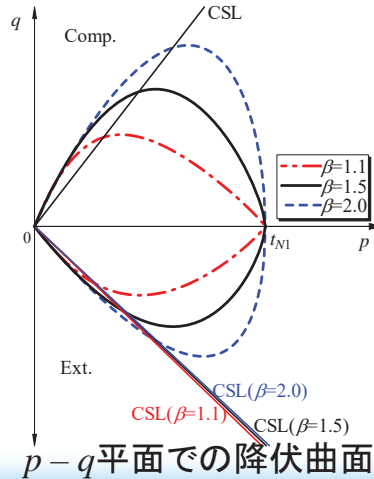
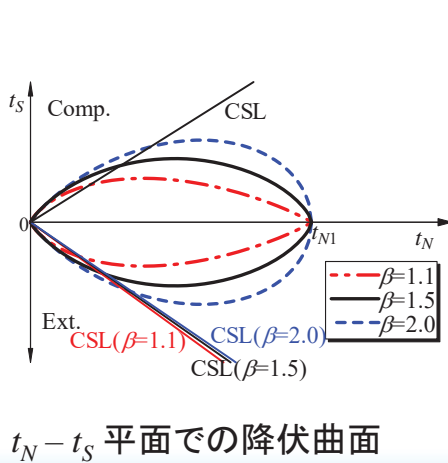
($\zeta(0) = 0$ を満たす増加関数)

Chowdhury & Nakai (1998)



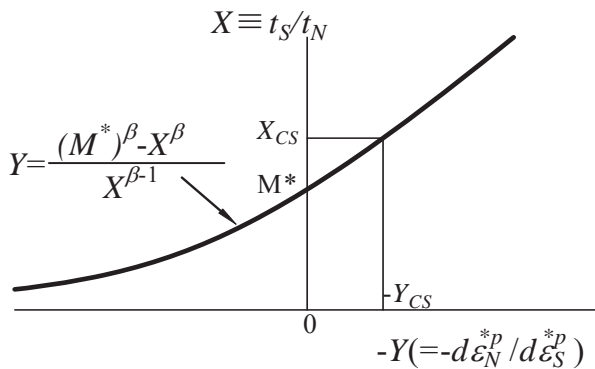
$$\frac{d\varepsilon_N^{*p}}{d\varepsilon_S^{*p}} = \frac{\frac{\partial F}{\partial t_N}}{\frac{\partial F}{\partial t_S}} = \frac{\frac{\partial F}{\partial t_N} + \frac{\partial F}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t_N}}{\frac{\partial F}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t_S}} = \frac{1 - \zeta'(X) \cdot X}{\zeta'(X)} = \frac{(M^*)^\beta - X^\beta}{X^{\beta-1}}$$

$$M^* = (X_{CS}^\beta + X_{CS}^{\beta-1} Y_{CS})^{1/\beta}$$



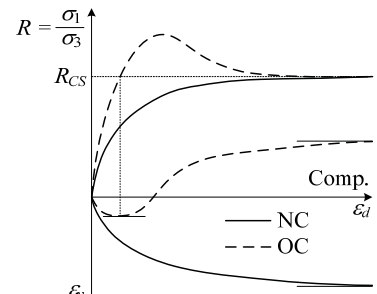
パラメータの決定法(R_{CS} および β)

- 降伏曲面の形状(R_{CS} および β)



$$M^* = (X_{CS}^\beta + X_{CS}^{\beta-1} Y_{CS})^{1/\beta}$$

3軸圧縮条件



$$X = \frac{t_S}{t_N} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left(\frac{\sqrt{\sigma_1} - \sqrt{\sigma_3}}{\sqrt{\sigma_3} - \sqrt{\sigma_1}} \right)$$

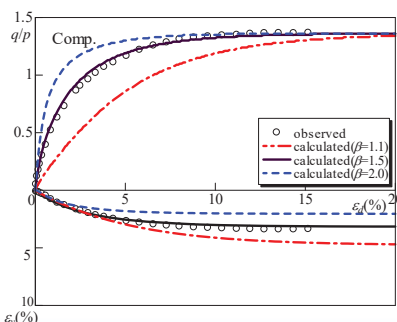
$$Y = \frac{d\varepsilon_N^{*p}}{d\varepsilon_S^{*p}} = \frac{1 + 2\sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma_3}} \frac{d\varepsilon_3^p}{d\varepsilon_1^p}}{\sqrt{2} \left(\frac{\sqrt{\sigma_1} - d\varepsilon_3^p}{\sqrt{\sigma_3} - d\varepsilon_1^p} \right)}$$



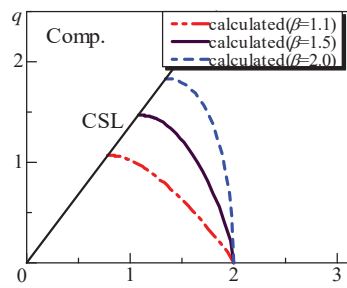
限界状態(critical state)では

$$X_{CS} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left(\frac{\sqrt{R_{CS}} - 1}{\sqrt{R_{CS}}} \right)$$

$$Y_{CS} = \frac{1 - \sqrt{R_{CS}}}{\sqrt{2} (\sqrt{R_{CS}} + 0.5)}$$

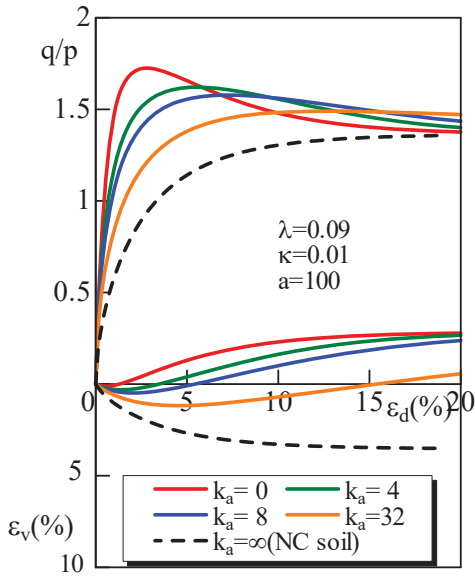


排水三軸試験



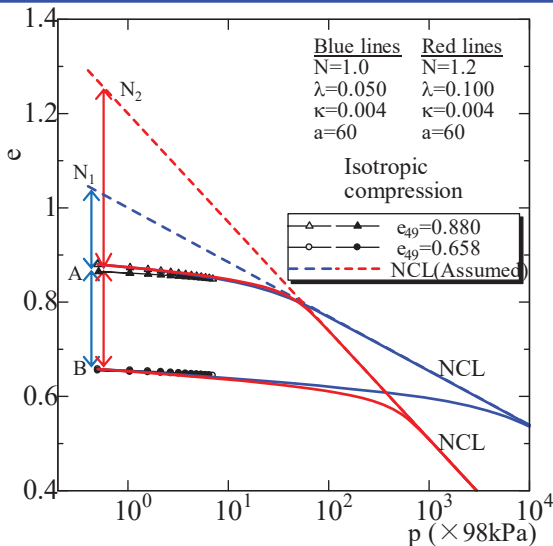
非排水三軸試験

パラメータの決定法 (k_a)



- 等方圧縮試験で (λ, κ, N) を決めた後に、せん断特性に関係するパラメータを決定する。
- 限界状態の応力比から R_{CS} を決める。
- 応力比-ひずみ増分比、排水試験の応力～ひずみ関係、非排水試験の有効応力経路(非排水強度など)から降伏曲面の形状を決めるパラメータ β を決定する。
- 密度の発展則に関するパラメータ a および bonding に関するパラメータ Q_0, b は 過圧密土や自然堆積土の圧密時の応力～間隙比(ひずみ)関係を参考に決める。
- 過圧密土や自然堆積土のせん断時のパラメータ (k_a, k_b) は左図に示すように、これらの値が大きくなるに従い、強度・剛性が小さくなることを利用して決める。

材料パラメータの性質(NCLの決めにくい砂質土)

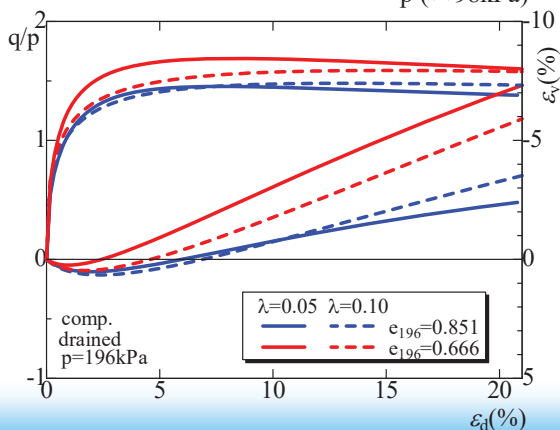


材料パラメータ

λ	0.05	0.10
κ	0.004	0.004
$N = e_{NC}$ at $p = 98 \text{ kPa}$	1.0	1.2
v_e	0.2	0.2
a	60	60
$R_{CS} = (\sigma_1 / \sigma_3)_{CS(comp)}$	3.2	3.2
β	1.6	2.0
k_a	16	30

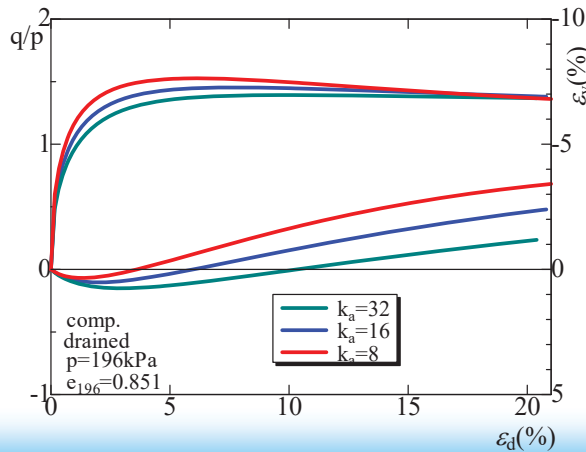
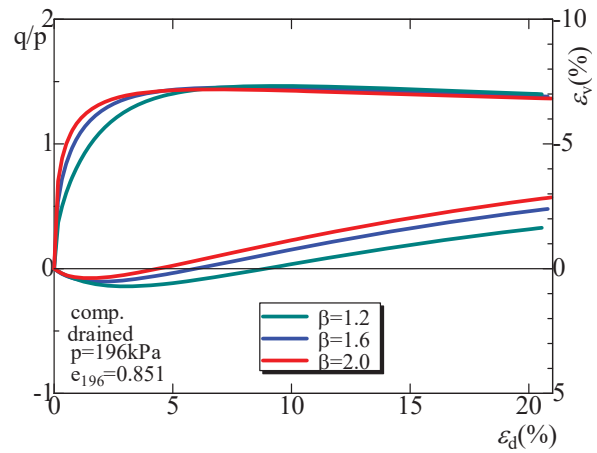
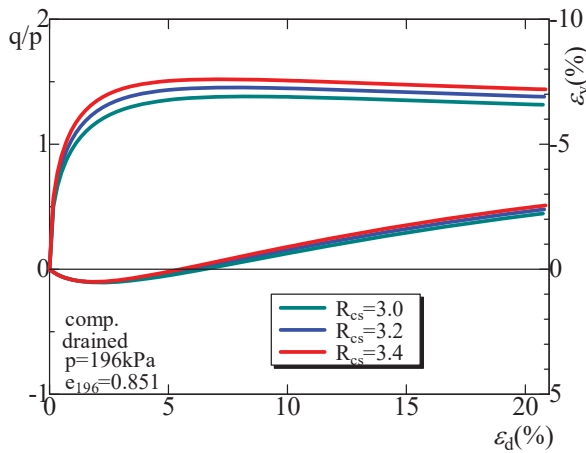
等方圧縮試験から

せん断試験から



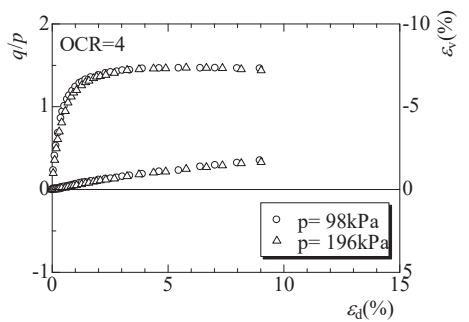
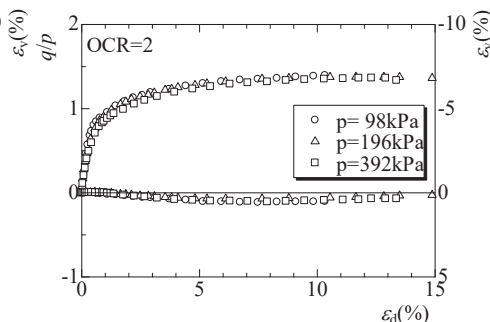
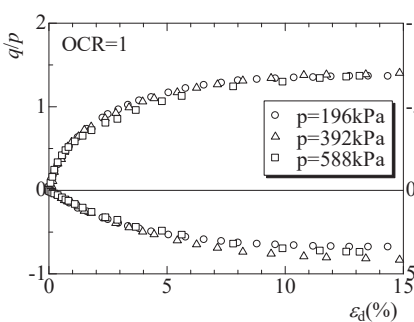
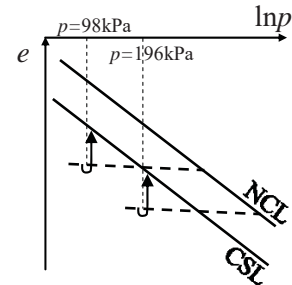
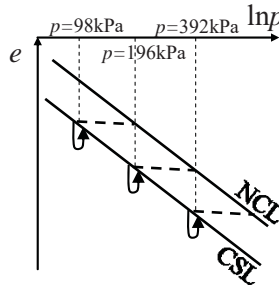
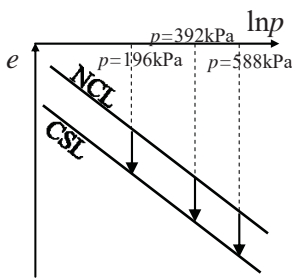
- 砂も粘土も材料パラメータの性質は同じだが、砂の場合NCLを決めるのが難しいので、以下のようにして推定する。
- $e \sim \ln p$ 関係の N_1 (or N_2)-A, N_1 (or N_2)-B は 2 種類の NCL に対する loose および dense での ρ の初期値 ρ_0 を表す。どちらのパラメータも等方圧縮試験を表現出来る。
- それぞれの材料パラメータを使ったせん断挙動の解析結果を示す。ここでは loose での両者の応力・ひずみ関係がほぼ一致するように決めている。
- loose と dense の ρ_0 の差 AB が相対的に小さくなる (AB/NA) ときは応力・ひずみ関係は密度による差が小さくなる。
- これらを参考に NCL を推定する。

R_{cs} , β , k_a の感度



53

OCR (ρ_0)と応力比～ひずみ関係



地盤材料はbondingがないときOCR(砂ではOCRは直接的に決められないので ρ_0)が決まれば、応力比～ひずみ関係は拘束応力の影響を受けない。したがって、要素試験の圧密せん断中の間隙比の変化を $e \sim \ln p$ 関係で整理し、剛性の大小を考えることでNCLを推定する。このとき、CSLとNCLは平行になることも考慮する。

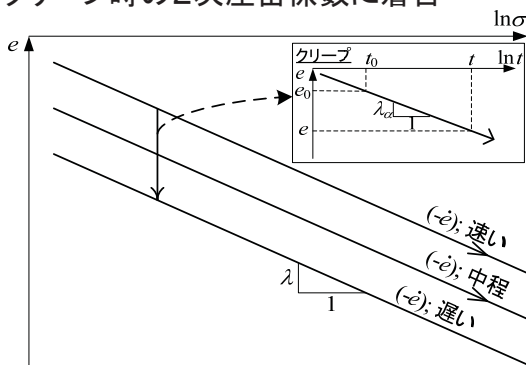
54

正規圧密土から自然堆積土までの時間効果特性の表現

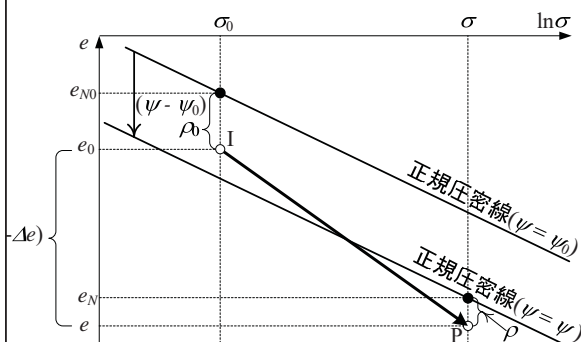
参考: 時間効果特性の1次元モデル化(original)

Nakai, Shahin, Kikumoto, Kyokawa, Zhang & Farias, (2011a)

- ・正規圧密線がひずみ速度等で平行にずれることに着目(ψ で評価)。
- ・クリープ時の2次圧密係数に着目



正規圧密土の時間効果特性



初期状態(I点)と現状態(P点)

$$(-\Delta e)^p = \lambda \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} - (\rho_0 - \rho) - (\psi_0 - \psi) - \kappa \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

σ_0 ← $F = \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}$, $H = \frac{(-\Delta e)^p}{\lambda - \kappa}$

$$f = F - H - \frac{1}{\lambda - \kappa} \{ (\rho_0 - \rho) + (\psi_0 - \psi) \} = 0$$

$$\psi - \psi_0 = \lambda_\alpha \ln \frac{t}{t_0} = \lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})_0^p}{(-\dot{e})^p}$$

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial t} dt = \lambda_\alpha \frac{1}{t} dt = (-\dot{e})^p dt$$

$$\therefore (-\dot{e})^p = \frac{d(-\Delta e)^p}{dt} = \frac{d(\lambda_\alpha \ln(t/t_0))}{dt} = \lambda_\alpha \frac{1}{t}$$

← 適応条件 ($df = 0$)

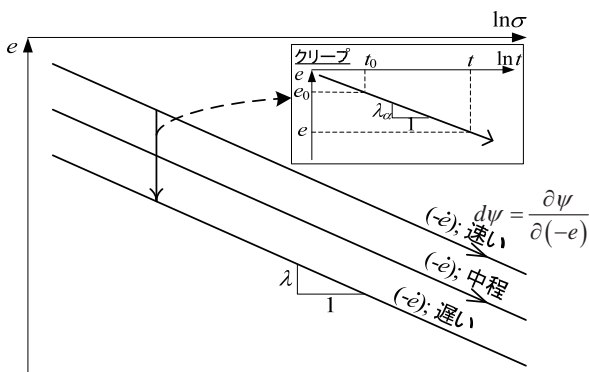
前のstepでの
間隙比の変化
速度を使う

$$d(-e)^p = \frac{(\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + d\psi}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} = \frac{(\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + (-\dot{e})^p dt}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} = \frac{(\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + (-\dot{e})^{p*} dt}{1 + G(\rho) + Q(\omega)}$$

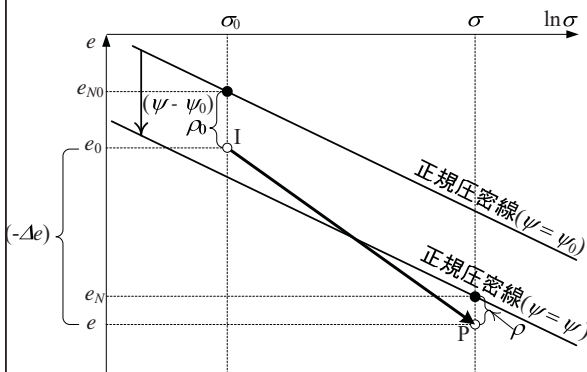
$$d(-e) = d(-e)^p + \kappa \frac{d\sigma}{\sigma}$$

時間効果特性の1次元モデル化(revised)

- ・正規圧密線がひずみ速度等で平行にずれることに着目(ψ で評価)。
- ・クリープ時の2次圧密係数に着目



正規圧密土の時間効果特性



初期状態(I点)と現状態(P点)

$$(-\Delta e)^p = \lambda \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} - (\rho_0 - \rho) - (\psi_0 - \psi) - \kappa \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

$$F = \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad H = \frac{(-\Delta e)^p}{\lambda - \kappa}$$

$$f = F - H - \frac{1}{\lambda - \kappa} \{ (\rho_0 - \rho) + (\psi_0 - \psi) \} = 0$$

$$\psi - \psi_0 = \lambda_\alpha \ln \frac{(-e)_0}{(-e)}$$

from private note by Kyokawa

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial (-\dot{e})^p} d(-\dot{e})^p = -\lambda_\alpha \frac{1}{(-\dot{e})^p} d(-\dot{e})^p$$

$$\square -\lambda_\alpha \frac{1}{(-\dot{e})^{p*}} \left\{ \frac{d(-\dot{e})^p}{dt} - (-\dot{e})^{p*} \right\}$$

$$d\rho = -\{G(\rho) + Q(\omega)\} \cdot d(-e)^p$$

適応条件 ($df = 0$)

$$d(-e)^p = \frac{(\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + d\psi}{1 + G(\rho) + Q(\omega) + V((-e)^{p*})}$$

$$d(-e) = d(-e)^p + \kappa \frac{d\sigma}{\sigma}$$

京川氏のprivate note (Dr thesis)

$$\square d(-e)^p = \frac{(\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + d\psi}{1 + G(\rho) + Q(\omega)}$$

$$\square d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial (-\dot{e})^p} d(-\dot{e})^p = -\lambda_\alpha \frac{1}{(-\dot{e})^p} d(-\dot{e})^p$$

$$\square -\lambda_\alpha \frac{1}{(-\dot{e})^{p*}} \left\{ \frac{d(-\dot{e})^p}{dt} - (-\dot{e})^{p*} \right\} \quad (\text{where } (-\dot{e})^{p*} \text{ is } (-\dot{e})^p \text{ at previous cal. step})$$

$$d(-e)^p = \frac{(\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma}}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} - \frac{\lambda_\alpha}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} \left\{ \frac{1}{(-\dot{e})^{p*}} \frac{d(-\dot{e})^p}{dt} - 1 \right\}$$

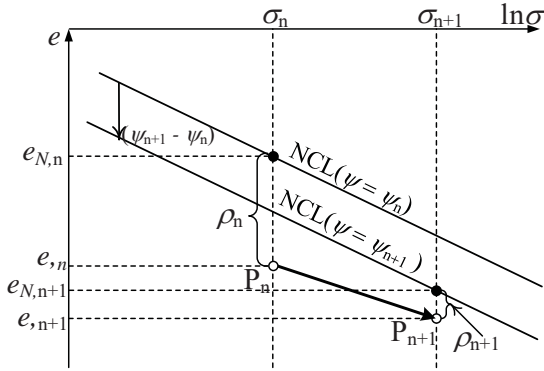
$$d(-e)^p = \frac{1}{1 + G(\rho) + Q(\omega) + \frac{\lambda_\alpha}{(-\dot{e})^{p*} dt}} \left\{ (\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + \lambda_\alpha \right\}$$

$$= \frac{1}{1 + G(\rho) + Q(\omega) + V((-e)^{p*})} \left\{ (\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + d\psi^* \right\}$$

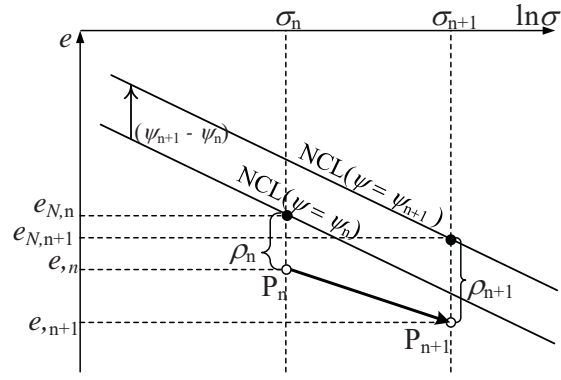
$$\left(\text{where } V((-e)^{p*}) = \frac{\lambda_\alpha}{(-\dot{e})^{p*} dt}, \quad d\psi^* = \lambda_\alpha \right)$$

$d\psi$ および V の求め方

$(\psi_{n+1} - \psi_n) > 0$: $(-\dot{e})^p$ becomes small



$(\psi_{n+1} - \psi_n) < 0$: $(-\dot{e})^p$ becomes large



$$d(-e)^p = \frac{1}{1 + G(\rho) + Q(\omega) + V((-\dot{e})^{p*})} \left\{ (\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + d\psi^* \right\}$$

$$= \frac{1}{h^p} \left\{ (\lambda - \kappa) \frac{d\sigma}{\sigma} + d\psi^* \right\}$$

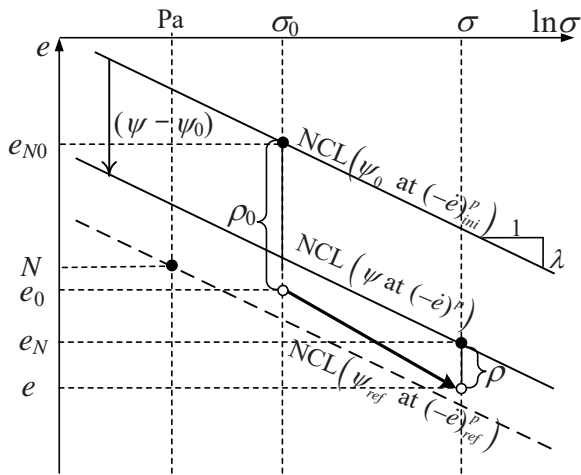
$$\left(\text{where } G(\rho) = a\rho, \quad Q(\omega) = b\omega, \quad V((-\dot{e})^{p*}) = \frac{\lambda_\alpha}{(-\dot{e})^{p*} dt}, \quad d\psi^* = \lambda_\alpha \right)$$

Loading condition:

$$\begin{cases} d(-e)^p \neq 0 & \text{if } d(-e)^p > 0 \\ d(-e)^p = 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

59

時間効果特性があるときの ρ の更新



$$(-\Delta e) = e_0 - e = (1 + e_0)\varepsilon_v$$

$$e_{N0} = N - \lambda \ln \frac{\sigma_0}{P_a} - (\psi_0 - \psi_{ref}) = N - \lambda \ln \frac{\sigma_0}{P_a} - \left\{ -\lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})_0^p}{(-\dot{e})_{ref}^p} \right\}$$

$$\rho_0 = e_{N0} - e_0$$

$$= N - \lambda \ln \frac{\sigma_0}{P_a} - \left\{ -\lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})_0^p}{(-\dot{e})_{ref}^p} \right\} - e_0$$

$$e_N = N - \lambda \ln \frac{\sigma}{P_a} - (\psi - \psi_{ref}) = N - \lambda \ln \frac{\sigma}{P_a} - \left\{ -\lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})^p}{(-\dot{e})_{ref}^p} \right\}$$

$$\rho = e_N - e$$

$$= N - \lambda \ln \frac{\sigma}{P_a} - \left\{ -\lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})^p}{(-\dot{e})_{ref}^p} \right\} - e$$

$$= N - \lambda \ln \frac{\sigma}{P_a} - \left\{ -\lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})^p}{(-\dot{e})_{ref}^p} \right\} - \{ e_0 - (1 + e_0)\varepsilon_v \}$$

$$\psi - \psi_0 = -\lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})^p}{(-\dot{e})_0^p}$$

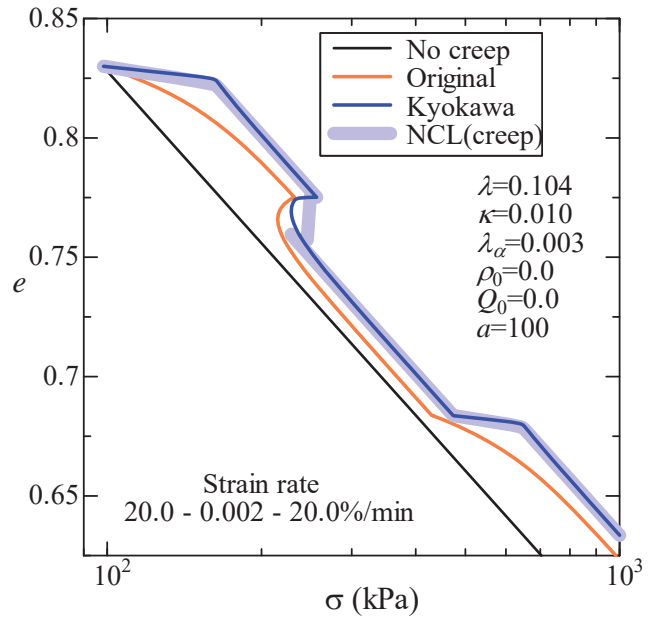
60

速度効果に関する材料パラメータと Ψ の発展則による違い

速度効果に関する材料パラメータ:
2次圧密係数: $\lambda_\alpha=0.003$

解析では、規準となる塑性間隙比速度、速度効果の下限値となる塑性間隙速度および初期間隙比速度を以下のように与えている。

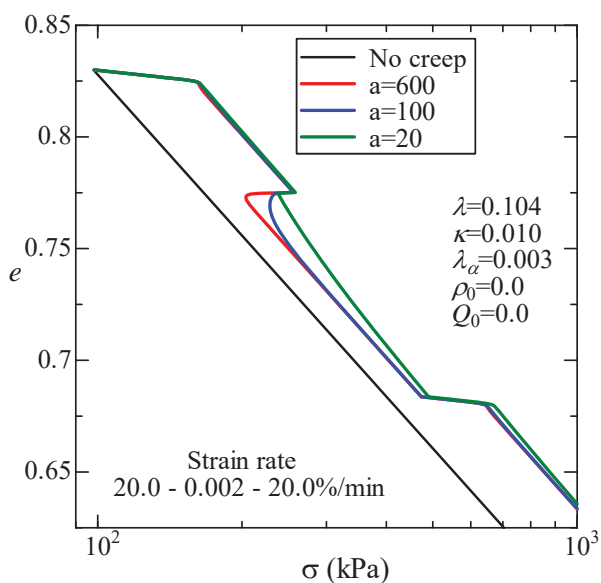
$$(-\dot{e})_{ref}^p = (-\dot{e})_{min}^p = (-\dot{e})_{ini}^p = 1 \times 10^{-7} / \text{min.}$$



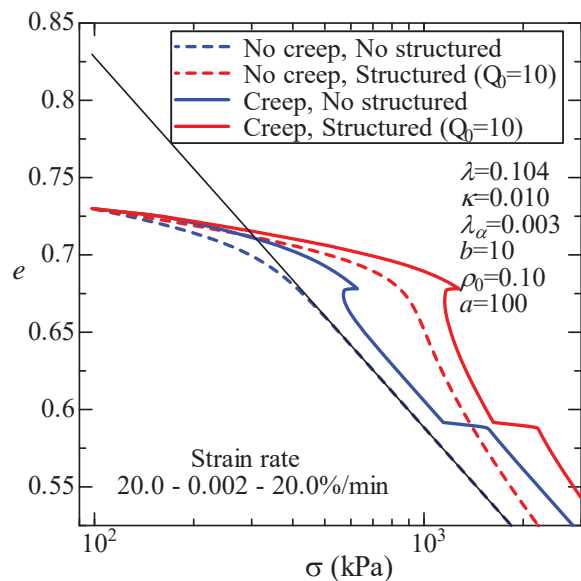
正規圧密粘土のひずみ速度効果

どちらの発展則でも isotach を含め速度効果を表現しているが、Revised (Kyokawa) では速度に応じた NCL に収れんするのにに対し、Original では常に速度に応じた NCL の下側に収れんする。

a の影響および過圧密土・自然堆積土のひずみ速度効果

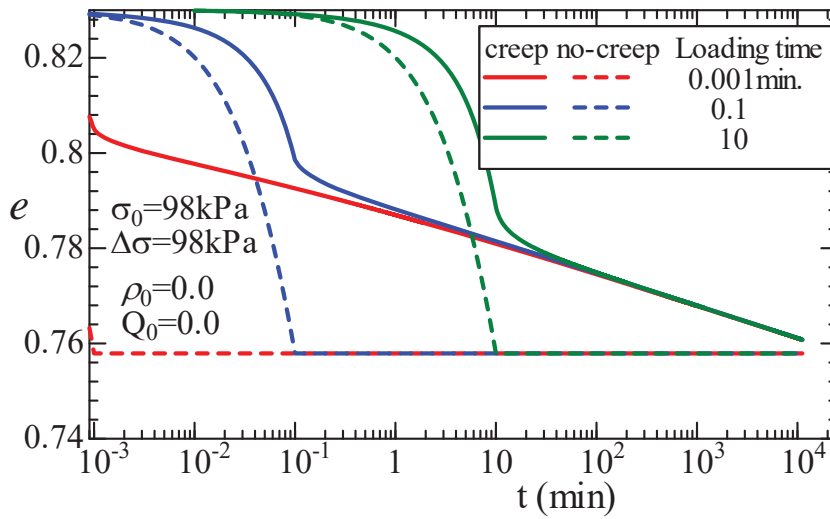


パラメータ a が時間効果特性に及ぼす影響



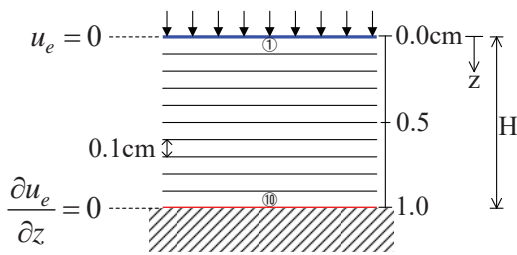
過圧密土および自然堆積土のひずみ速度効果

正規圧密土のクリープ挙動



載荷速度効果およびその後のクリープ挙動

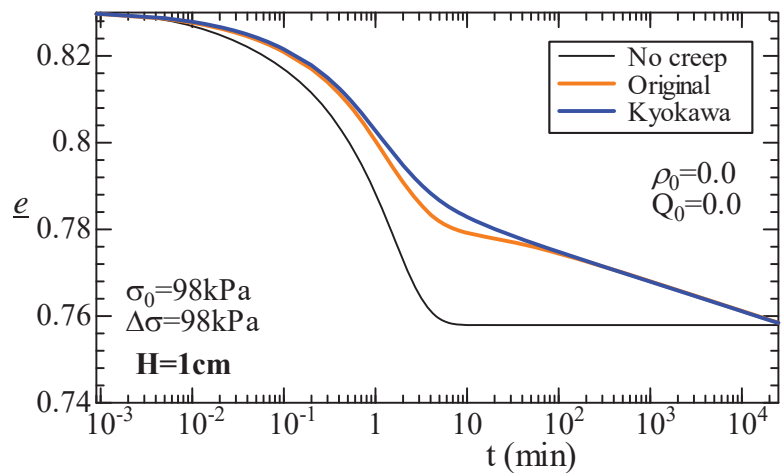
正規圧密粘土の標準圧密試験の解析



正規圧密状態で圧密係数 c_v が一定となるように決めた透水係数 k と間隙比 e の関係

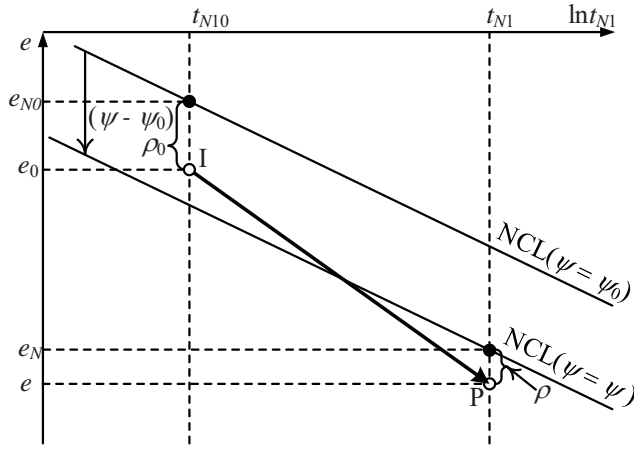
$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{e - e_0}{\lambda_k}\right)$$

$e_0=0.83, k_0=1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/min}, \lambda_k=0.104.$

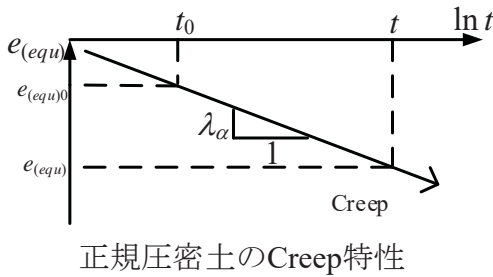


OriginalおよびRevisedの発展則を用いた e - $\log t$ 関係の解析結果

時間効果特性を考慮した3Dモデルへの拡張(1)



初期状態(I点)および現状態(P点)における
間隙比と ρ , ψ の関係



正規圧密土のCreep特性

$$\begin{aligned} (-\Delta e)^p &= (e_0 - e) - (-\Delta e)^e \\ &= \{ (e_{N0} - e_N) - (-\Delta e)^e \} - (\rho_0 - \rho) \\ &= \left\{ (\lambda - \kappa) \ln \frac{t_{N1}}{t_{N0}} - (\psi_0 - \psi) \right\} - (\rho_0 - \rho) \end{aligned}$$

$$f = F - H - \frac{1}{\lambda - \kappa} \{ (\rho_0 - \rho) + (\psi_0 - \psi) \} = 0$$

where

$$\begin{cases} F = \ln \frac{t_{N1}}{t_{N0}} = \ln \frac{t_N}{t_{N0}} + \zeta(X) \\ H = \frac{(-\Delta e)^p}{\lambda - \kappa} = \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^p \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \psi - \psi_0 &= \lambda_\alpha \ln \frac{t}{t_0} = \lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})_{(equ)0}^p}{(-\dot{e})_{(equ)}^p} \\ &= \left\{ -\lambda_\alpha \ln(-\dot{e})_{(equ)0}^p \right\} - \left\{ -\lambda_\alpha \ln(-\dot{e})_{(equ)}^p \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} (-\dot{e})_{(equ)}^p &= \sqrt{3}(1 + e_0) \left\| \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right\| = \sqrt{3}(1 + e_0) \left\| \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} \right\| \frac{\Lambda}{dt} \\ &(\text{等方圧縮時に} (-\dot{e})_{(equ)}^p = (-\dot{e})^p \text{となる}) \end{aligned}$$

65

時間効果特性を考慮した3Dモデルへの拡張(2)

$$f = F - H - \frac{1}{\lambda - \kappa} \{ (\rho_0 - \rho) + (\psi_0 - \psi) \} = 0$$

$$d\psi = d \left\{ -\lambda_\alpha \ln(-\dot{e})_{(equ)}^p \right\} = -\lambda_\alpha \frac{1}{(-\dot{e})_{(equ)}^p} d(-\dot{e})_{(equ)}^p = \frac{-\lambda_\alpha}{(-\dot{e})_{(equ)}^{p*}} \left\{ \frac{d(-\dot{e})_{(equ)}^p}{dt} - (-\dot{e})_{(equ)}^{p*} \right\}$$

$$d\rho = -(1 + e_0) \sqrt{3} \frac{G/(1 + k_a X) + Q/(1 + k_b X)}{t_N} \Lambda$$

← 適応条件: $f=0$

$$\begin{aligned} df &= dF - dH + \frac{1}{\lambda - \kappa} (d\rho + d\psi) \\ &= dF - dH + \frac{1}{\lambda - \kappa} \left[d\rho - \frac{\lambda_\alpha}{(-\dot{e})_{(equ)}^{p*}} \left\{ \frac{d(-\dot{e})_{(equ)}^p}{dt} - (-\dot{e})_{(equ)}^{p*} \right\} \right] = 0 \end{aligned}$$

$$dF - \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \Lambda \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} + \frac{1}{\lambda - \kappa} \left\{ d\rho - \sqrt{3}V(1 + e_0)\Lambda \left\| \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} \right\| - \lambda_\alpha \right\} = 0 \quad \text{where } V = \frac{\lambda_\alpha}{(-\dot{e})_{(equ)}^{p*} dt}$$

66

時間効果特性を考慮した3Dモデルへの拡張(3)

$$\Lambda = \frac{dF + \frac{\lambda_\alpha}{\lambda - \kappa}}{\frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3} \frac{G/(1+k_a X) + Q/(1+k_b X)}{t_N} + \sqrt{3V} \left\| \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} \right\| \right\}} = \frac{dF + d\psi^*}{h^p}$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{dF + d\psi^*}{h^p} \cdot \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} - L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + L^{(IC)} \frac{dt_N}{t_N} \frac{\delta_{ij}}{3}$$

where, $h^p = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \sqrt{3} \frac{G/(1+k_a X) + Q/(1+k_b X)}{t_N} + \sqrt{3V} \left\| \frac{\partial F}{\partial t_{ij}} \right\| \right\}$

$L^{(IC)} = \frac{R^{(IC)}}{h^{p(IC)}} = \left\langle \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} \frac{t_N}{\sqrt{3}} \right\rangle^m / h^{p(IC)}$ (usually $m = 2$)

$h^{p(IC)} = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \left\{ 1 + \left\langle G/(1+k_a X) + Q/(1+k_b X) + V \right\rangle \right\}$

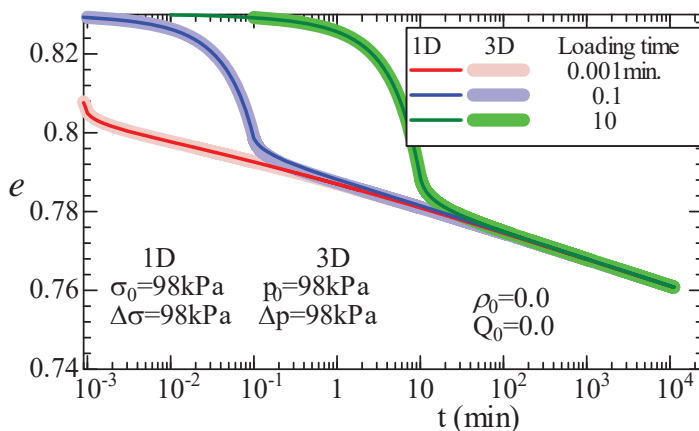
$d\psi^* = \frac{\lambda_\alpha}{\lambda - \kappa}$

Loading condition:

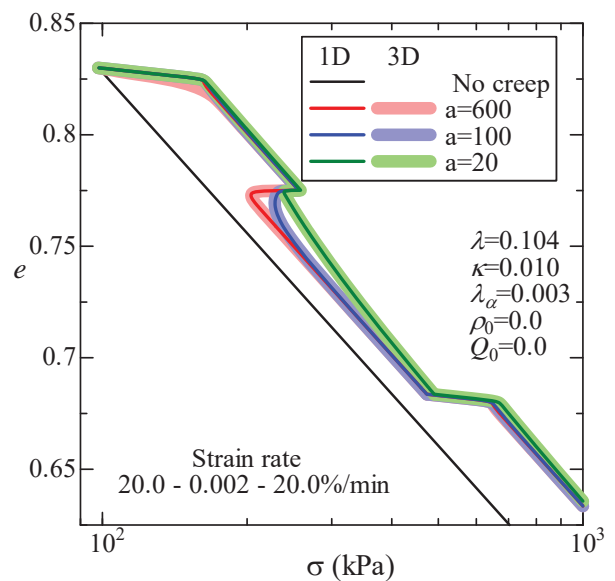
$$\begin{cases} d\varepsilon_{ij}^p \neq 0 & \text{if } \Lambda = \frac{dF + d\psi^*}{h^p} > 0 \\ d\varepsilon_{ij}^p = 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

67

1D modelおよび3D modelの圧縮試験解析



1D圧縮および3D等方圧縮条件下での荷重速度変えた荷重およびその後のクリープ挙動



1D圧縮および3D等方圧縮条件下でのひずみ速度効果

68

参考文献

- 1) Nakai T. and Matsuoka H. (1986) A generalized elastoplastic constitutive model for clay in three-dimensional stresses, *Soils and Foundations*, **26**(3), 81-98.
- 2) Nakai T. (1989): An isotropic hardening elastoplastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses, *Soils and Foundations*, **29**(1), 119-137.
- 3) Nakai T. and Hinokio M. (2004): A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *Soils and Foundations*, **44**(2), 53-70
- 4) Nakai T., Shahin H.M., Kikumoto M., Kyokawa H., Zhang F. and Farias, M.M. (2011a): A simple and unified one-dimensional model to describe various characteristics of soils, *Soils and Foundations*, **51**(6), 1129-1148
- 5) Nakai T., Shahin H.M., Kikumoto M., Kyokawa H., Zhang F. and Farias, M.M. (2011b): A simple and unified three-dimensional model to describe various characteristics of soils, *Soils and Foundations*, **51**(6), 1149-1168.
- 6) 中井照夫 (2011a): 地盤材料の構成モデル最前線 – 2.弾塑性論の解説とカムクレイモデルの適用性, *地盤工学会誌, 講座*, 59(4), 47-55.
- 7) 中井照夫 (2011b): 地盤材料の構成モデル最前線 – 7.3主応力条件下での材料特性のモデル化, *地盤工学会誌, 講座*, 59(9), 66-75.
- 8) Nakai T. (2012) *Constitutive Modeling of Geomaterials: Principles and Applications*, sole author (376pages), CRC Press, Boca Raton/London/New York
- 9) 中井照夫・Shahin H.M. (2017): 2重硬化(Double Hardening)則を用いない塑性流動方向の応力経路依存性の表現, *第52回地盤工学研究発表会*, 307-308
- 10) Nakai T. and Shahin H.M. (2019): A simple method to describe stress path dependency of plastic flow, *Proc. of 16th Asian Regional Conf. on SMGE*, Taipei
- 11) Pedoroso D.M., Farias M.M. and Nakai T. (2005): An interpretation of subloading t_{ij} model in the context of conventional elastoplasticity theory, *Soils and Foundations*, **45**(4), 61-77.