

# 地盤材料の1次元挙動とモデル化

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 of 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( $t_{ij}$  clay model)
  - $t_{ij}$  の概念の意味
  - $t_{ij}$  の概念に基づく正規圧密土のモデル化
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
  - 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
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
7. 繰返し載荷特性のモデル化他

2

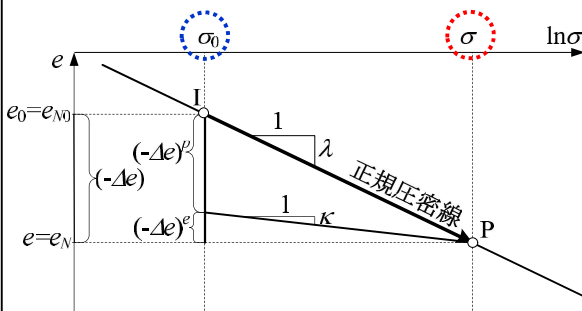
# 地盤材料の1次元挙動とモデル化

- 正規圧密土のモデリング
- 過圧密土のモデリング
- 自然堆積土のモデリング
- 下負荷面および上下負荷面モデルの説明(付録)
- 時間効果特性のモデリング
- 粘塑性モデル(関口モデルおよび超過応力モデル)の説明(付録)

3

## 弾塑性論による正規圧密土の1次元モデル

正規圧密土ではよく知られている $e-\ln\sigma$ の直線関係が成り立つとする。



正規圧密粘土(NC clay)の間隙比変化

$\lambda$ : 圧縮指数  
 $\kappa$ : 膨潤指数

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

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

$$F = H \text{ or } f = F - H = 0$$

$$\text{適応条件: } df = 0$$

$$df = dF - dH = \frac{d\sigma}{\sigma} - \frac{d(-e)^p}{\lambda - \kappa} = 0$$

(塑性成分)

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

(弾性成分)

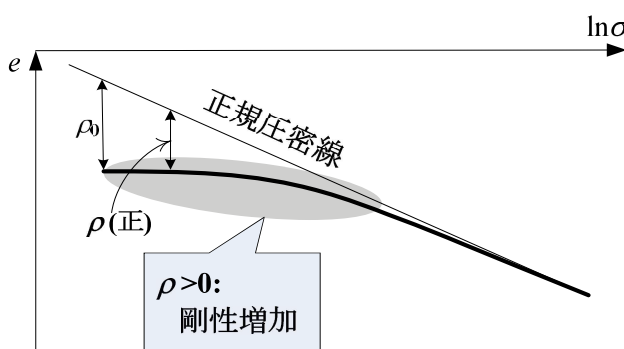
$$d(-e)^e = \kappa \frac{d\sigma}{\sigma}$$

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

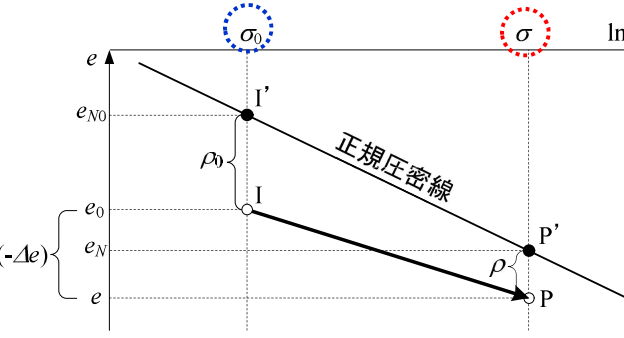
4

# 過圧密土の1次元モデル(1)

下負荷面の考え方(橋口, 1977, 1980)を1次元の $e$ - $\ln\sigma$ 関係に適用する。  
 $\rho$ の発展則 $d\rho$ を $G(0)=0$ となる正の増加関数 $G(\rho)$ を使って表すだけでよい。



過圧密土の間隙比 ( $e$ )  $\sim$   $\ln\sigma$  関係



過圧密土の間隙比変化

$$(-\Delta e)^p = (-\Delta e) - (-\Delta e)^e$$

$$= \lambda \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} - (\rho_0 - \rho) - \kappa \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

正規圧密土同様

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

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

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

$$df = dF - \left\{ dH - \frac{d\rho}{\lambda - \kappa} \right\}$$

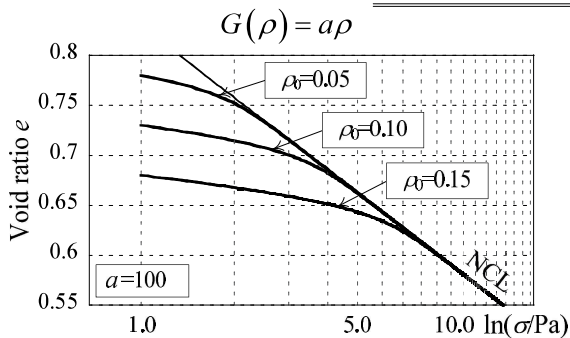
$$= \frac{d\sigma}{\sigma} - \left\{ \frac{d(-e)^p + G(\rho) \cdot d(-e)^p}{\lambda - \kappa} \right\} = 0$$

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

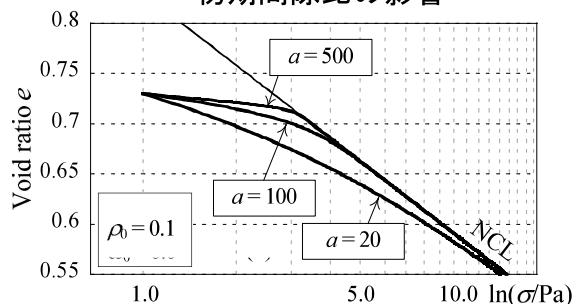
# 過圧密土の1次元モデル(2)

藤森粘土の材料パラメーター

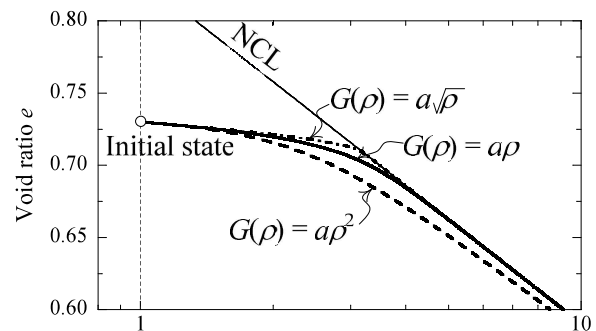
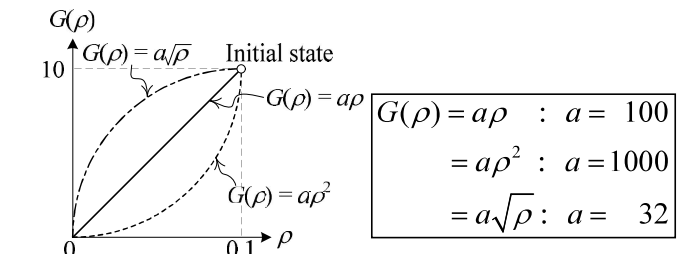
$\lambda$	0.104
$\kappa$	0.010
$N(e_N \text{ at } \sigma = 98\text{kPa})$	0.83
$a$	100



初期間隙比の影響



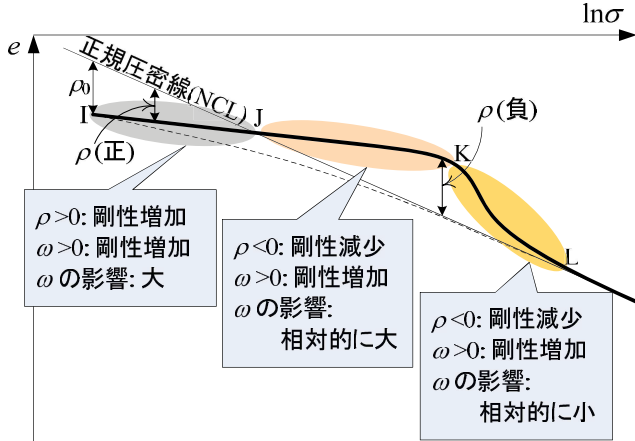
パラメータ $a$ の影響



関数 $G$ の影響

# 自然堆積土の1次元モデル(1)

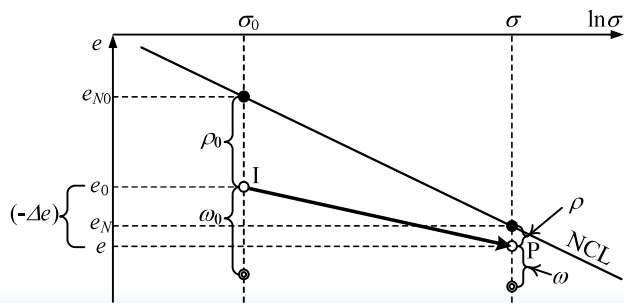
上負荷面の考え方(浅岡他, 2000a)を参考に、下負荷面だけでモデル化。  
 ボンディング効果を $\omega$ で表すと、 $\rho$ の発展則 $d\rho$ に $\omega$ を加えるだけ。  
 $\omega$ は常に剛性増加の効果を持ち、 $Q(\omega)$ も $G(\rho)$ 同様正の増加関数。



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

適応条件:  
 $df = 0$   
 $\rho$ と $\omega$ の発展則:  
 $d\rho = -\{G(\rho) + Q(\omega)\} \cdot d(-e)^p$   
 $d\omega = -Q(\omega) \cdot d(-e)^p$   
 $\omega = \omega_0 + \int d\omega$

自然堆積土の間隙比 ( $e$ ) ~  $\ln \sigma$  関係



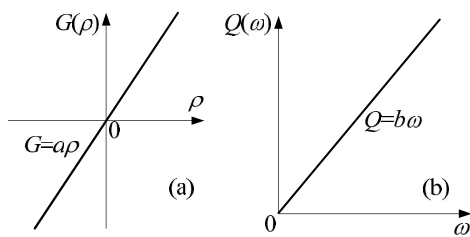
$$d(-e) = d(-e)^p + d(-e)^e = \left\{ \frac{\lambda - \kappa}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} + \kappa \right\} \frac{d\sigma}{\sigma}$$

自然堆積土の間隙比変化

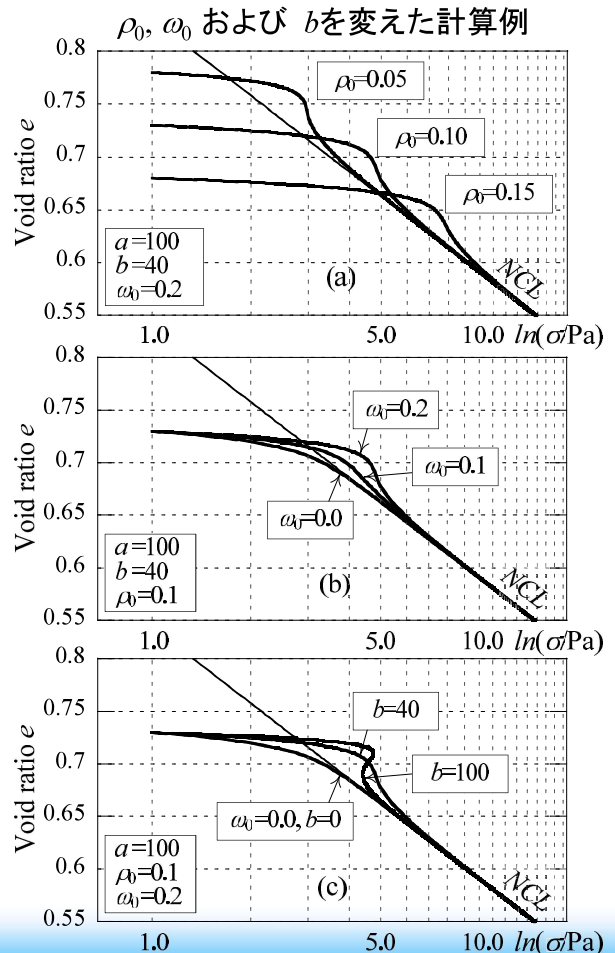
# 自然堆積土の1次元モデル(2)

材料パラメーター

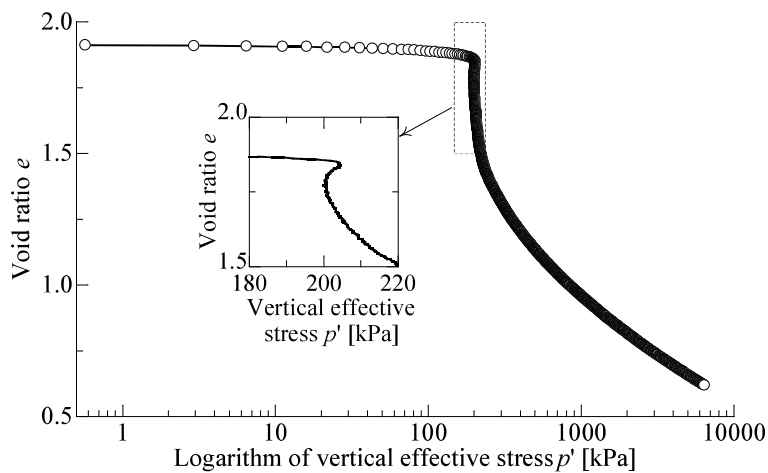
$\lambda$	0.104
$\kappa$	0.010
$N(e_N \text{ at } \sigma = 98\text{kPa})$	0.83
$a$	100
$b$	40, 100



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



# 自然堆積粘土の定ひずみ速度(CSR) 圧密試験結果



Luiseville clay (Watabe et al. 2009)

9

## Bonding効果Qの評価法

- $Q$ の発展則を仮想上の間隙比減少 $\omega$ で与える場合

$$d\omega = -Q_{(\omega)} \cdot d(-e)^p = -b\omega \cdot d(-e)^p$$

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

↓

$$Q_{(\omega)} = b\omega$$

$$= b\left(\omega_0 + \int -b\omega \cdot d(-e)^p\right)$$

$$= b\omega_0 + \int -bQ_{(\omega)} \cdot d(-e)^p$$

$$= Q_{(\omega)0} + \int -bQ_{(\omega)} \cdot d(-e)^p$$

- $Q$ の発展則を直接的に与える場合

$$dQ = -bQ \cdot d(-e)^p$$

↓

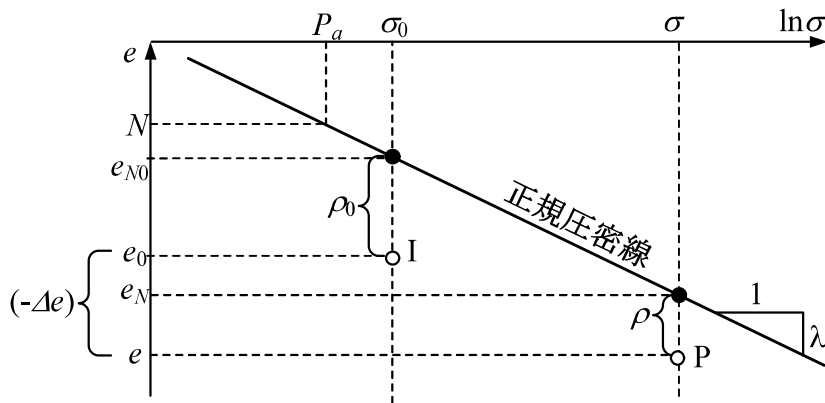
$$Q = Q_0 + \int dQ$$

$$= Q_0 + \int -bQ \cdot d(-e)^p$$

$\omega$ あるいは $Q$ の発展則を線形で与える限り、どちらの発展則でも同じになる。多次元では1次元の $d(-e)^p$ に相当する塑性ひずみ増分を決める必要がある。

10

# ρ, ω の求め方



$$e_{N0} = N - \lambda \ln \frac{\sigma_0}{P_a}$$

$$e_N = e_{N0} - \lambda \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

$$e_0 - e = (-\Delta e) = \int d(-e)$$

$$\square \rho = e_N - e$$

$$= e_{N0} - \lambda \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} - \left\{ e_0 - \int d(-e) \right\}$$

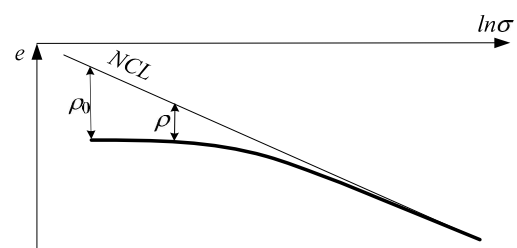
$$= \rho_0 - \lambda \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} + \int d(-e) = \rho_0 - \lambda \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} + \int d(-e)^e + \int d(-e)^p$$

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

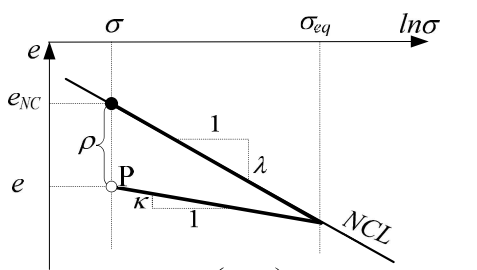
$$= \omega_0 - \int Q_{(\omega)} \cdot d(-e)^p$$

$$= \omega_0 - \int b\omega \cdot d(-e)^p \quad (\text{in case of } Q = b\omega)$$

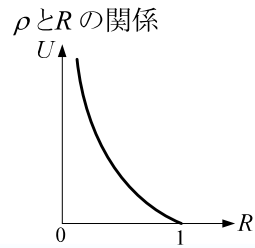
# 橋口による下負荷面モデルの1次元での表現(付録)



過圧密土の間隙比 (e) : lnσ 関係



$$\rho = -(\lambda - \kappa) \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_{eq}} \right) = -(\lambda - \kappa) \ln R$$



$R (< 1)$  が1 に近づくにつれ劣化を表す関数  $U$

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

← 適応条件:  $df = 0$

$$df = dF - \left\{ dH - \frac{d\rho}{\lambda - \kappa} \right\}$$

$$= \frac{d\sigma}{\sigma} - \frac{d(-e)^p - d\rho}{\lambda - \kappa} = 0$$

where

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

$$d\rho = -(\lambda - \kappa) \frac{1}{R} dR$$

$$\Leftarrow (dR = U \cdot d(-e)^p)$$

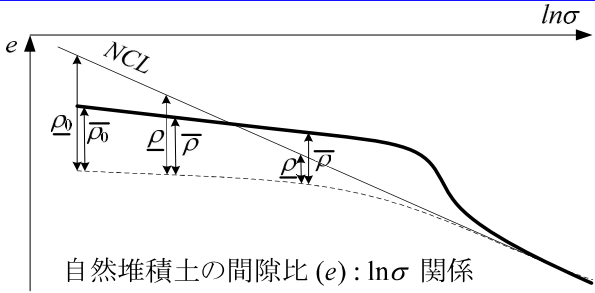
$$= -(\lambda - \kappa) \frac{1}{R} \cdot U \cdot d(-e)^p$$

$$\Leftarrow \left( U = \frac{-m}{\lambda - \kappa} \ln R \right)$$

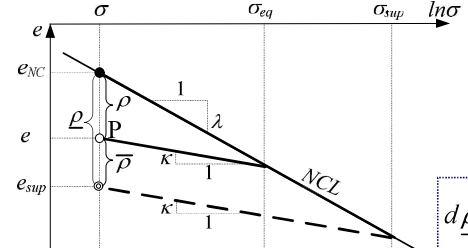
$$= - \left( \frac{-m}{R} \ln R \right) \cdot d(-e)^p$$

$$d(-e)^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + \left( \frac{-m}{R} \ln R \right)} \frac{d\sigma}{\sigma}$$

# 浅岡らによる上下荷面モデルの1次元での表現(付録)



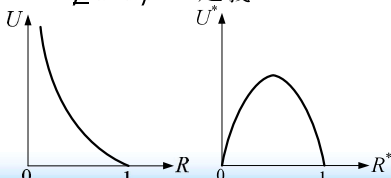
自然堆積土の間隙比 (e) : ln sigma 関係



$$\rho = -(\lambda - \kappa) \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_{sup}} \right) = -(\lambda - \kappa) \ln R$$

$$\bar{\rho} = -(\lambda - \kappa) \ln \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{sup}} \right) = -(\lambda - \kappa) \ln R^*$$

then,  $\rho = \rho - \bar{\rho}$   
 $\rho$  and  $\bar{\rho}$  の定義



(R(<1) と R\*(<1) が1に近づく時の劣化を決める関数 (U and U\*))

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

適応条件:  $df = 0$

$$df = dF - \left\{ dH - \frac{d\rho}{\lambda - \kappa} \right\}$$

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

$$= \frac{d\sigma}{\sigma} - \frac{d(-e)^p - (d\rho - d\bar{\rho})}{\lambda - \kappa} = 0$$

$$d\rho = -(\lambda - \kappa) \frac{1}{R} dR$$

$$\Leftarrow (dR = U \cdot d(-e)^p)$$

$$= -(\lambda - \kappa) \frac{1}{R} \cdot U \cdot d(-e)^p$$

$$\Leftarrow \left( U = \frac{-m}{\lambda - \kappa} \ln R \right)$$

$$= - \left( \frac{-m}{R} \ln R \right) \cdot d(-e)^p$$

$$d\bar{\rho} = -(\lambda - \kappa) \frac{1}{R^*} dR^*$$

$$\Leftarrow (dR^* = U^* \cdot d(-e)^p)$$

$$= -(\lambda - \kappa) \frac{1}{R^*} \cdot U^* \cdot d(-e)^p$$

$$\Leftarrow \left( U^* = \frac{a}{\lambda - \kappa} R^* (1 - R^*) \right)$$

$$= - (a(1 - R^*)) \cdot d(-e)^p$$

$$d(-e)^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + \left( \frac{-m}{R} \ln R \right) - (a(1 - R^*))} \frac{d\sigma}{\sigma}$$

where

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

# 時間効果特性の1次元モデル化

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

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

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

$$f = F - \left\{ H + \frac{\rho_0 - \rho}{\lambda - \kappa} + \frac{\psi_0 - \psi}{\lambda - \kappa} \right\} = 0$$

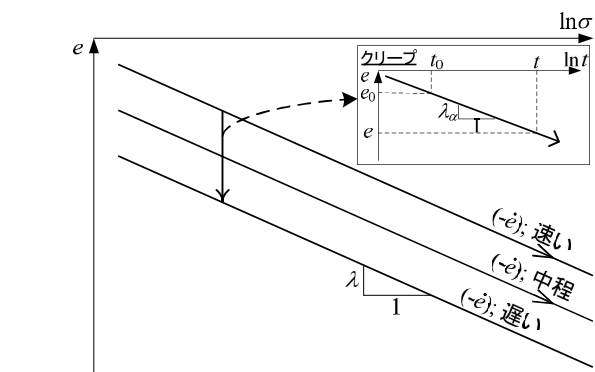
$$\psi - \psi_0 = \lambda_\alpha \ln \frac{t}{t_0} = \lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})_0^p}{(-\dot{e})^p}$$

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

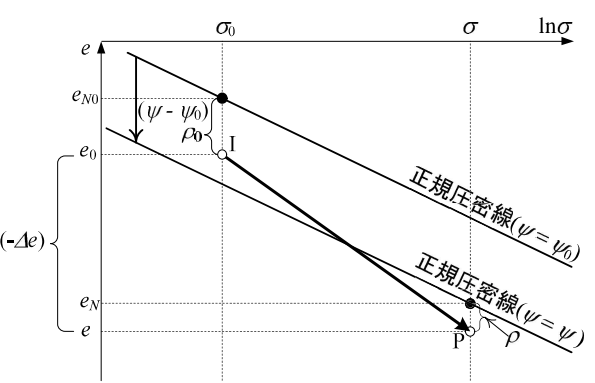
$$\therefore (-\dot{e})^p = \frac{d(-\Delta e)^p}{dt} = \frac{d(\lambda_\alpha \ln(t/t_0))}{dt} = \lambda_\alpha \frac{1}{t}$$

適応条件 ( $df = 0$ )

前のstepでの  
間隙比の変化  
速度を使う



正規圧密土の時間効果特性



初期状態(I点)と現状態(P点)

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

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

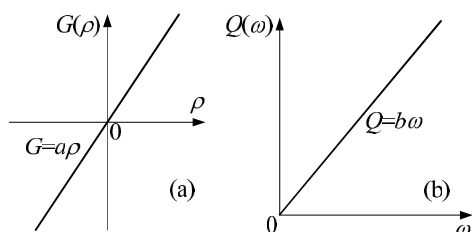
# 解析例

材料パラメーター (藤森粘土を想定)

$\lambda$	0.104
$\kappa$	0.010
$N (e_N \text{ at } \sigma = 98\text{kPa})$	0.83
$a$	100
$b$	40, 100
$\lambda_\alpha$	0.003 unless otherwise stated
$(-\dot{e})_{ref}^p$	$1 \times 10^{-7}/\text{min.}$

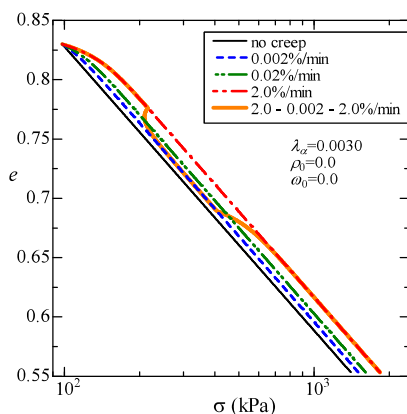
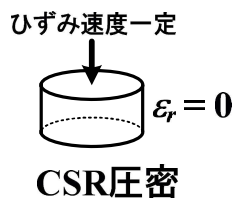
ここに、初期間隙比速度： $(-\dot{e})_0^p = (-\dot{e})_{ref}^p = 1 \times 10^{-7} / \text{min.}$

$\lambda_\alpha$ は2次圧密係数

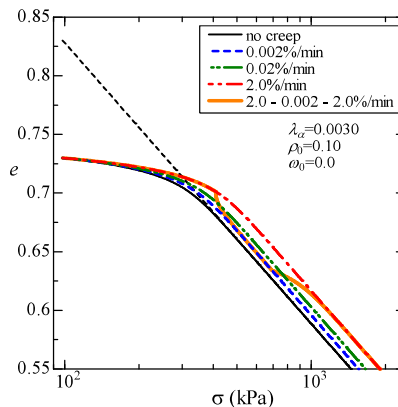


$G(\rho)$ ,  $Q(\omega)$ は線形関数で与えている

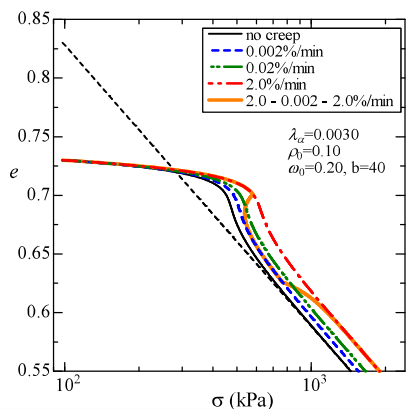
# 種々の粘土の1次元ひずみ速度効果



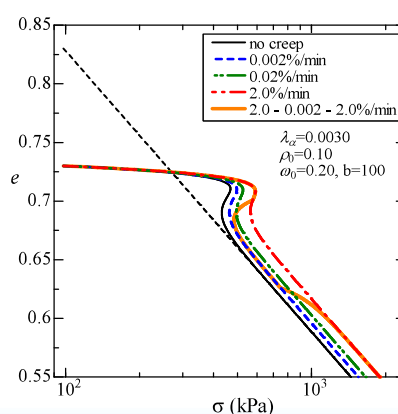
正規圧密粘土



過圧密粘土

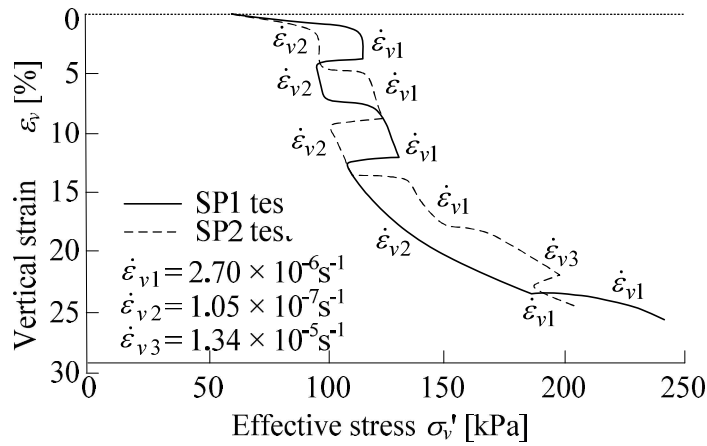
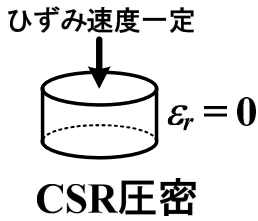


自然堆積粘土



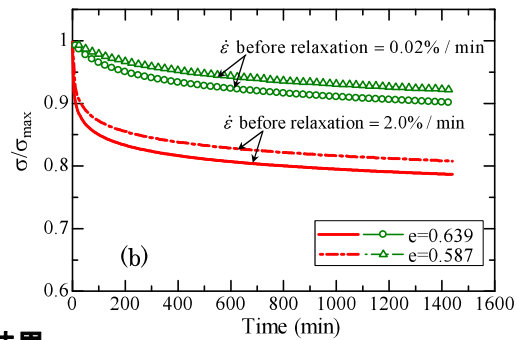
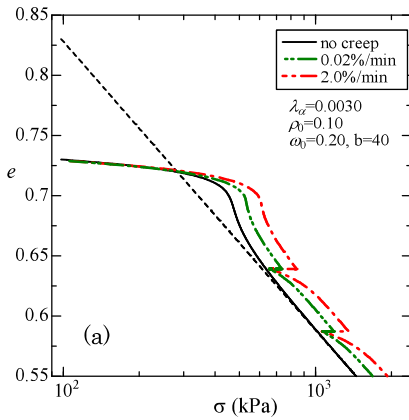


# 自然堆積粘土のCSR試験結果

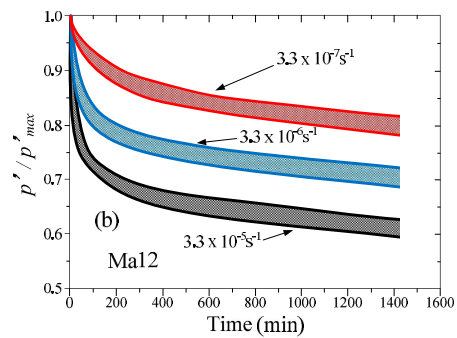
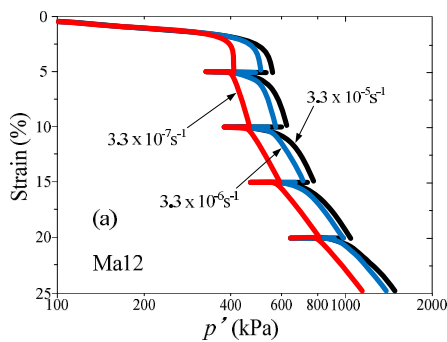


Leroueilらの実験結果(1985)

# 自然堆積粘土の1次元応力緩和特性

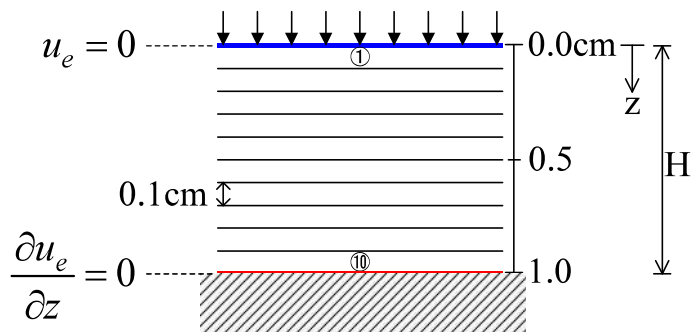


計算結果



実測値(Tanaka et al., 2006)

# 標準圧密試験の有限要素解析



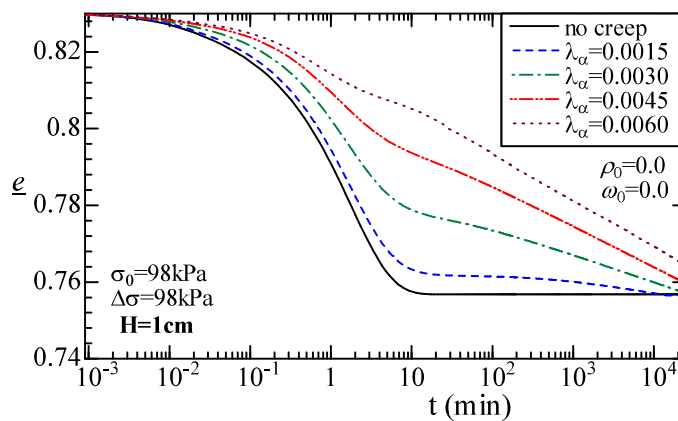
正規圧密状態で圧密係数 $c_v$ が一定となるように決めた透水係数 $k$ と間隙比 $e$ の関係

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

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

19

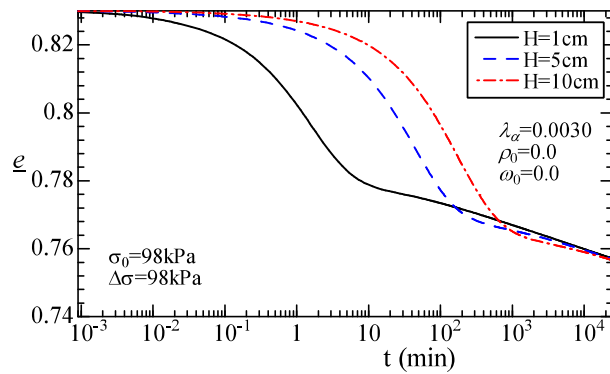
# 正規圧密粘土の標準圧密試験の解析(1)



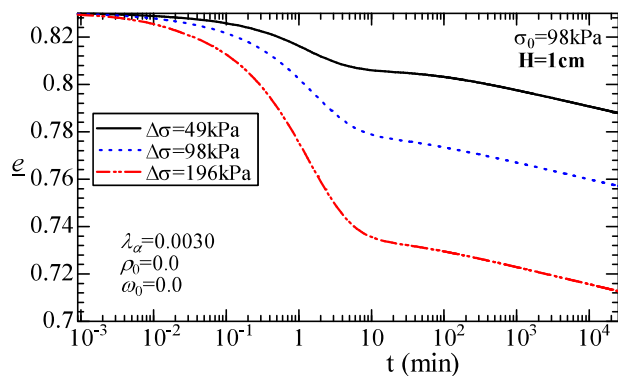
2次圧密係数の影響

20

# 正規圧密粘土の標準圧密試験の解析(2)

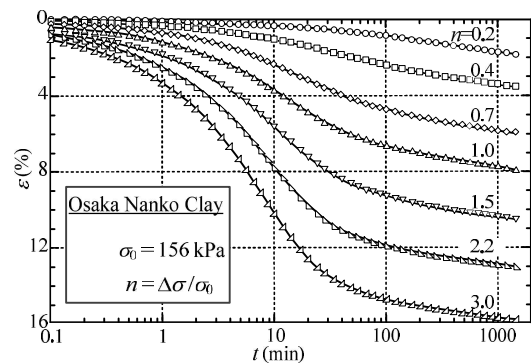


試料高さの影響



解析結果

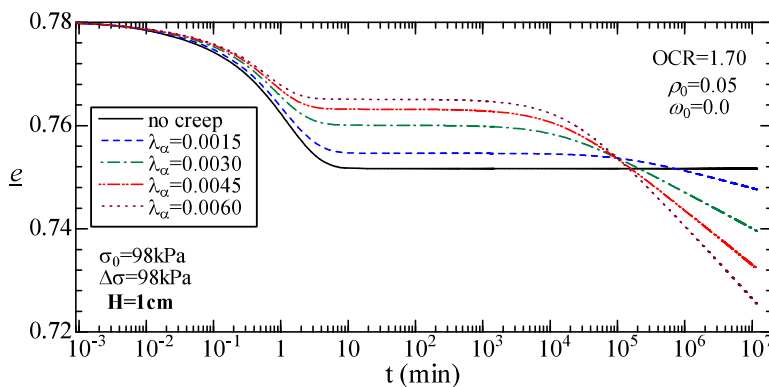
荷重増分の影響



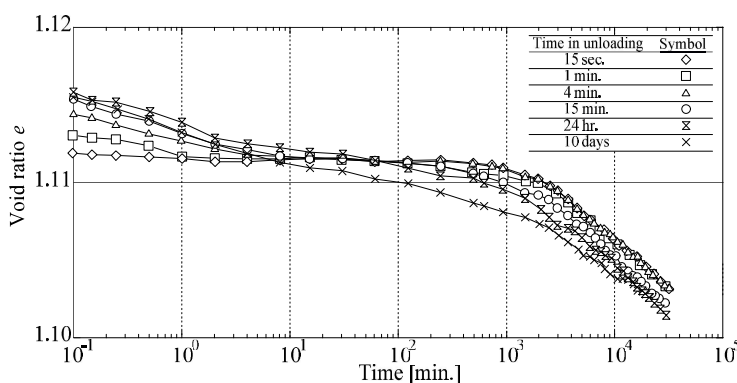
実測値 (大島他、2002)

21

# 過圧密粘土の標準圧密試験の解析



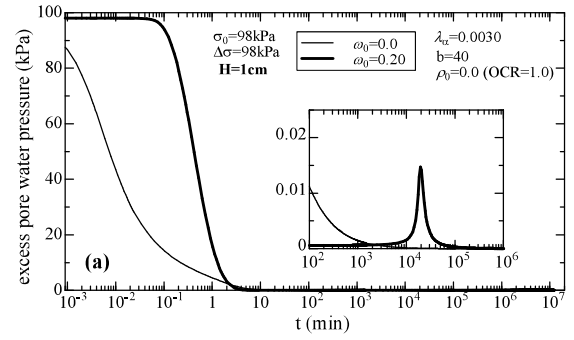
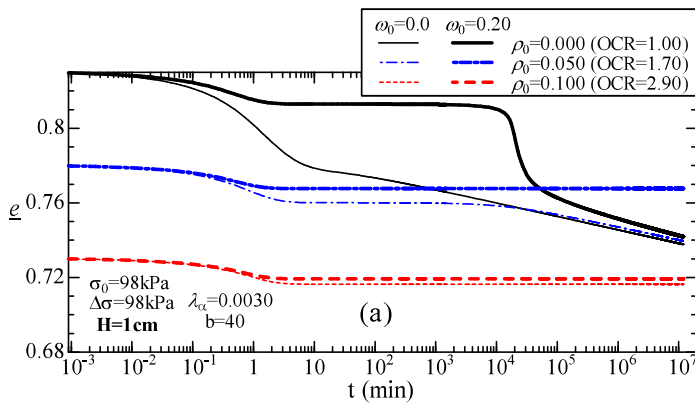
計算結果



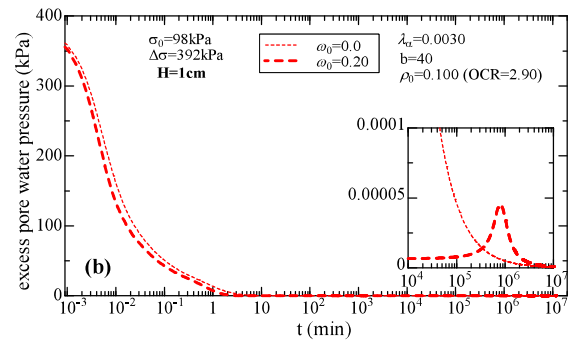
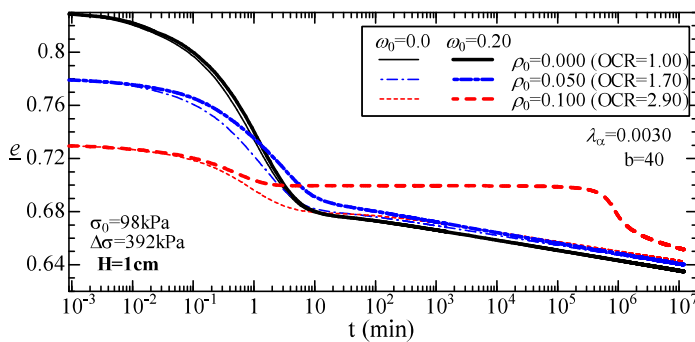
実測値 (吉国他、1990)

22

# 構造化した粘土および構造化していな粘土の標準圧密試験の解析



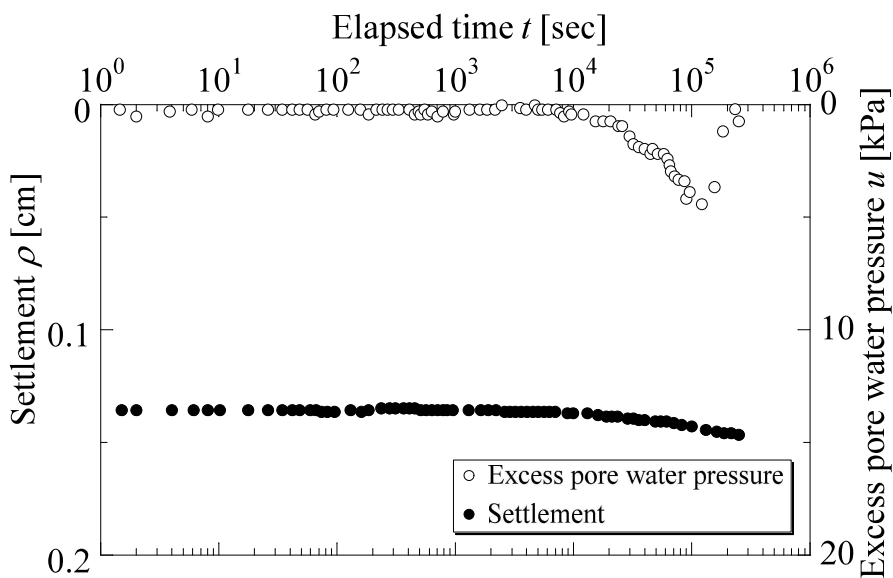
$$\Delta\sigma/\sigma_0=1$$



$$\Delta\sigma/\sigma_0=4$$

23

# 構造化した粘土の1次元圧密試験の実測値



Crushed mudstone pebbles (金田, 1999)

24

## その他の諸特性の発展型弾塑性論によるモデル化

### 温度効果:

$\psi = \psi(T)$ のように温度 $T$ によりNCLが動く関数を定義する。

### 不飽和土:

$\psi = \psi(s, S_r)$ のようにサクション $s$ や飽和度 $S_r$ によりNCLが動く関数を定義するか、 $\omega$ をこれらの関数としてボンディング効果の発展則 $d\omega$ を与える。

$\omega$ を使ってのモデル化も可能

### 粒子破碎:

$G(\omega)$ の発展則の中に粒子破碎の影響を入れる ( $G(\omega)$ を一定としたときNCLを平行に上下させることができる) か、粒子破碎に伴いCSL(NCLも同じ) が下がるという実験事実から $\psi$ を粒子破碎率の関数として定義する。

$\omega$ を使ってのモデル化も可能

### その他:

これらの特性を複合的に考慮する必要があるときには

$d\rho = -\{G(\rho) + Q_a(\omega_a) + Q_b(\omega_b) + \dots\} \cdot d(-e)^p$ ,  $d\psi = d\psi_a + d\psi_b + \dots$ ,  $\psi = \psi_a + \psi_b + \dots$   
のように考えればよい。

25

## 既往の粘塑性モデル(付録)

### 粘土の時間依存性挙動を説明するモデル

#### ➤非定常流動曲面モデル

•例えば、関口(1977), Nova(1982)

•実時間が入っている

#### ➤超過応力型モデル

•例えば、足立・岡(1982), Dafalias(1982), Katona(1984)

•負荷基準がない、ひずみ速度に応力速度が影響しない

これらのモデルの特徴については松井・阿部(1984)、関口(1985)、三村・関口(1985)、橋口(1998)、三村(2011)によって解説

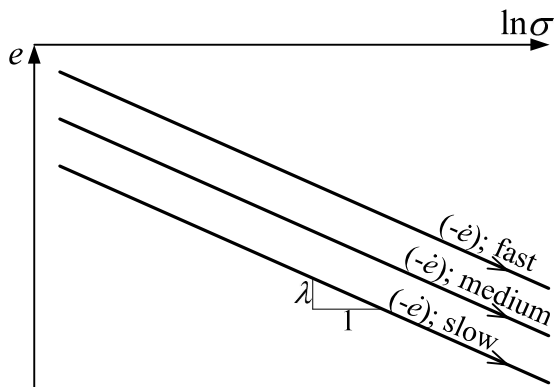
#### ➤提案モデル

これまでに解説

時間依存性モデルの考え方を1次元で分かりやすく解説

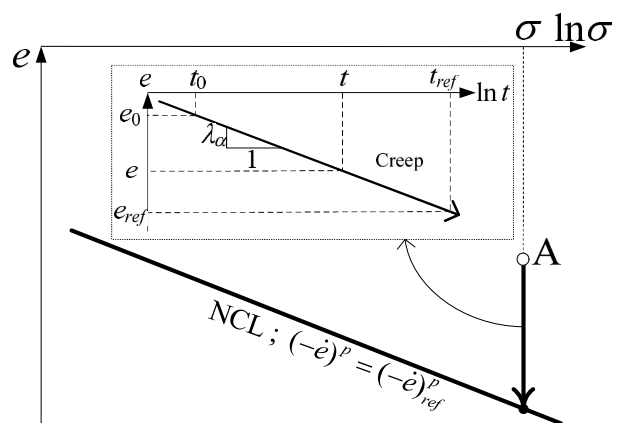
26

# 1次元における正規圧密土の時間効果特性



ここに、 $\lambda$ : 圧縮指数  
 $\kappa$ : 膨潤指数

ひずみ速度効果

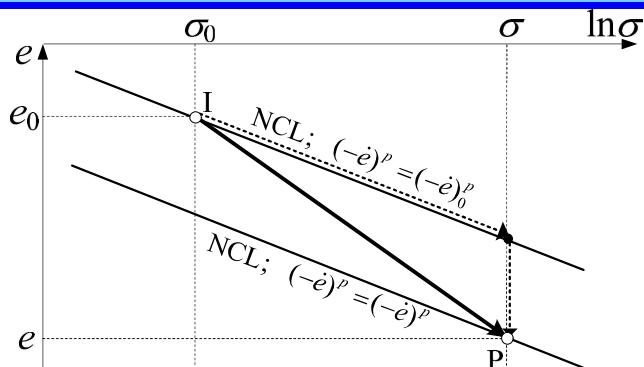


ここに、 $\lambda_\alpha$ : 2次圧密係数

クリープ(2次圧密)特性

27

# 1次元における非定常流動曲面モデル(1次元関口モデル)(付録)



応力～間隙比～(塑性)ひずみ速度間の  
一義的な関係 (Isotache)

$\lambda$ : 圧縮指数,  $\kappa$ : 膨潤指数とすると

$$\begin{aligned} (-\Delta e)^p &= e_0 - e - (-\Delta e)^e = (\lambda - \kappa) \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} + \lambda_\alpha \ln \frac{t}{t_0} = (\lambda - \kappa) \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} + \lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})_0^p}{(-\dot{e})^p} \\ &= F + \lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{e})_0^p}{(-\dot{e})^p} \quad \left( \text{where, } F = (\lambda - \kappa) \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \end{aligned}$$

塑性的な間隙比変化 $(-\Delta e)^p$ と時間 $t$ を変数とする常微分方程式  $\Rightarrow$  非定常流動曲面

$$(-\Delta e)^p = \lambda_\alpha \ln \left\{ \frac{(-\dot{e})_0^p \cdot t}{\lambda_\alpha} \exp \left( \frac{F}{\lambda_\alpha} \right) + 1 \right\} = \lambda_\alpha \ln S \quad \left( \text{where, } S = \frac{(-\dot{e})_0^p \cdot t}{\lambda_\alpha} \exp \left( \frac{F}{\lambda_\alpha} \right) + 1 \right)$$

塑性間隙比増分:

$$d(-e)^p = \frac{\partial(-\Delta e)^p}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial(-\Delta e)^p}{\partial t} dt = (\lambda - \kappa) \left( 1 - \frac{1}{S} \right) \frac{1}{\sigma} d\sigma + \lambda_\alpha \left( 1 - \frac{1}{S} \right) \frac{1}{t} dt$$

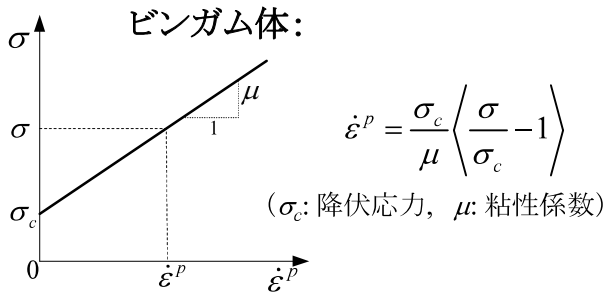
一方、弾性間隙比増分:

$$d(-e)^e = \kappa \frac{1}{\sigma} d\sigma$$

28

# 1次元における超過応力型モデル(付録)

ビンガム体:



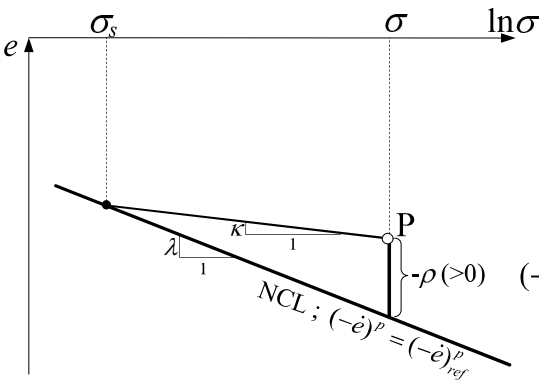
$$\dot{\epsilon}^p = \frac{\sigma_c}{\mu} \left\langle \frac{\sigma}{\sigma_c} - 1 \right\rangle$$

( $\sigma_c$ : 降伏応力,  $\mu$ : 粘性係数)

→ (一般化)

超過応力型粘塑性:

$$\dot{\epsilon}^p = \gamma \langle \Phi(\xi) \rangle \quad \left( \begin{array}{l} \text{where} \\ \langle \Phi(\xi) \rangle = \Phi(\xi) \quad \text{if } \xi > 0 \\ \langle \Phi(\xi) \rangle = 0 \quad \text{if } \xi \leq 0 \end{array} \right)$$



$$(\lambda - \kappa) \ln \frac{\sigma}{\sigma_s} = -\rho = \lambda_\alpha \ln \frac{t_{ref}}{t} = \lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{\epsilon})^p}{(-\dot{\epsilon})^p_{ref}}$$



$$(-\dot{\epsilon})^p = (-\dot{\epsilon})^p_{ref} \exp\left(\frac{-\rho}{\lambda_\alpha}\right) = (-\dot{\epsilon})^p_{ref} \exp\left(\frac{\lambda - \kappa}{\lambda_\alpha} \ln \frac{\sigma}{\sigma_s}\right) = (-\dot{\epsilon})^p_{ref} \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{\frac{\lambda - \kappa}{\lambda_\alpha}}$$



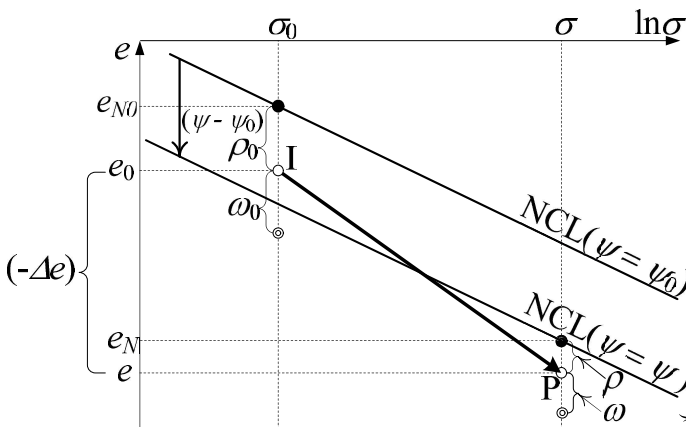
$$d(-e)^p = (-\dot{\epsilon})^p_{ref} \left\langle \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{\frac{\lambda - \kappa}{\lambda_\alpha}} \right\rangle dt \quad \left( \text{where } \xi = \frac{\sigma}{\sigma_s} - 1 \right)$$

$\sigma$  : 動的応力 (現応力)

$\sigma_s$  : 静的応力 (現間隙比に対応)

$(-\dot{\epsilon})^p_{ref}$  : 十分遅い間隙比の変化速度

# 1次元における提案時間効果モデル(まとめ)



$$\begin{aligned} (-\Delta e)^p &= \{(e_{N0} - e_N) - (\rho_0 - \rho)\} - (-\Delta e)^e \\ &= (\lambda - \kappa) \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} - (\rho_0 - \rho) - (\psi_0 - \psi) \end{aligned}$$



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

ここに、

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

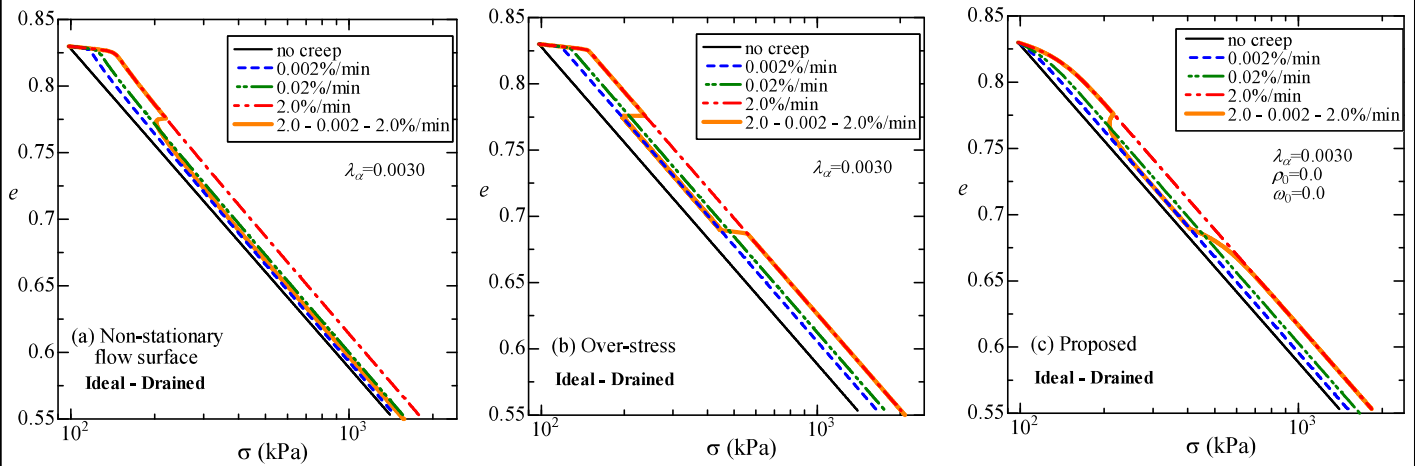
$$\begin{cases} \psi - \psi_0 = \lambda_\alpha \ln \frac{(-\dot{\epsilon})^p_0}{(-\dot{\epsilon})^p} = \{-\lambda_\alpha \ln(-\dot{\epsilon})^p\} - \{-\lambda_\alpha \ln(-\dot{\epsilon})^p_0\} \\ d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial t} dt = \lambda_\alpha \frac{1}{t} dt = (-\dot{\epsilon})^p dt \end{cases}$$

を使えば

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

上式において、 $\rho$ : 密度、 $\omega$ : ボンディング、 $\psi$ : 時間効果  $\Rightarrow \rho_0=0$  &  $\omega_0=0$ とすると正規圧密土

### 3つのモデルによる正規圧密土のひずみ速度効果特性

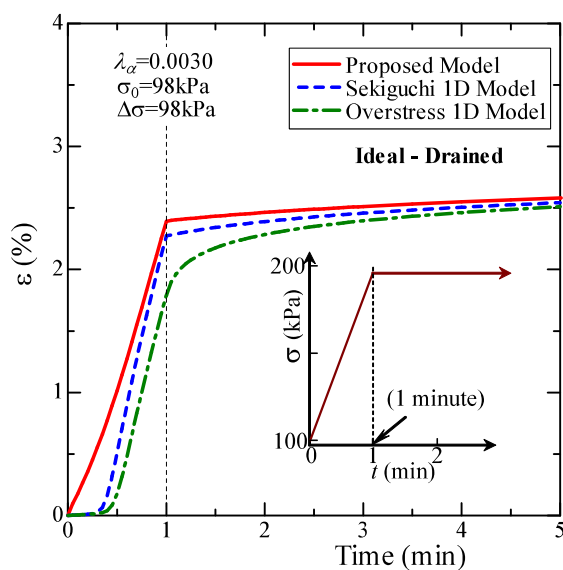


非定常流動曲面モデル  
(1次元関口モデル)

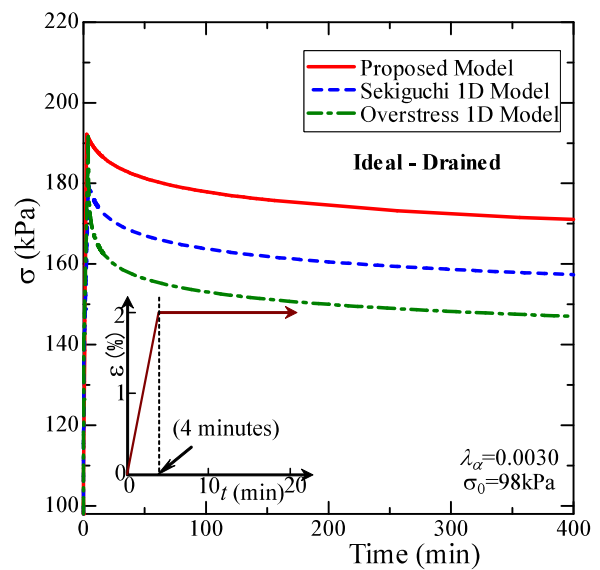
超過応力型モデル

提案モデル

### 3つのモデルによる正規圧密土のクリープ特性および応力緩和特性



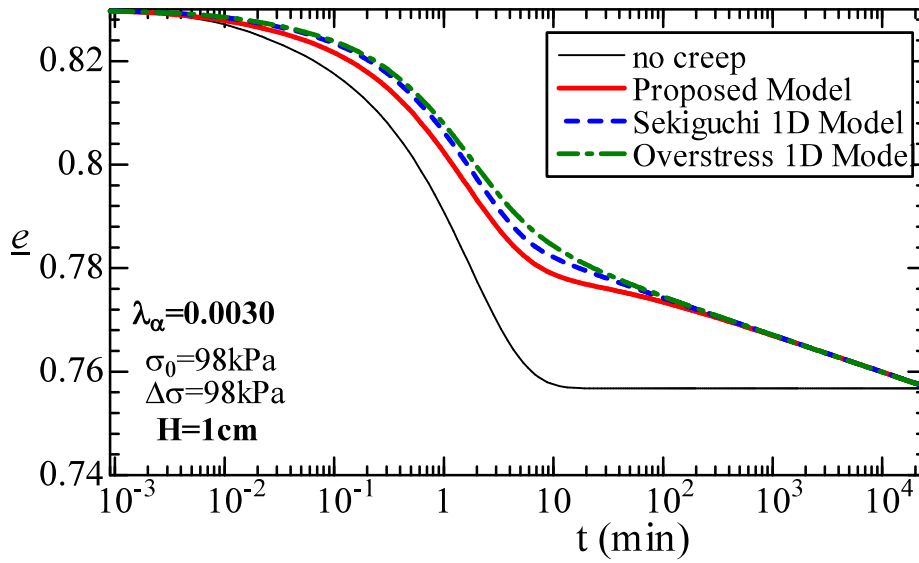
クリープ



応力緩和



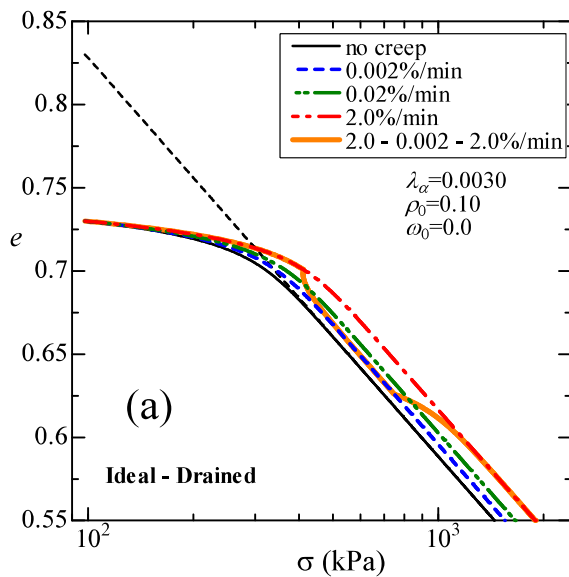
### 3つのモデルによる正規圧密土の標準圧密試験の解析



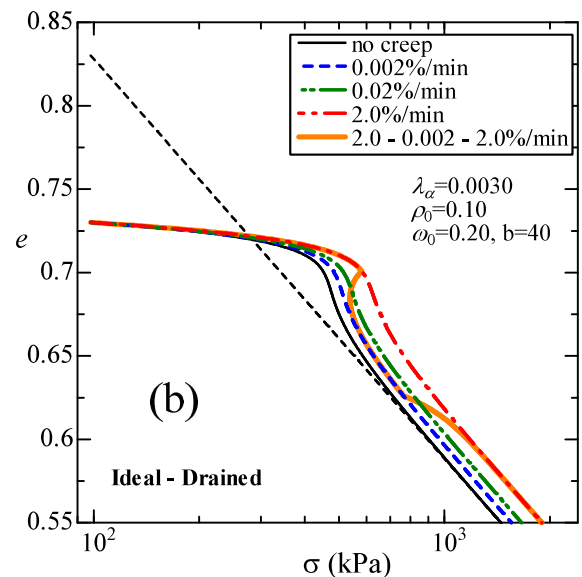
$e$ - $\log t$  関係

33

### 提案モデルによる過圧密土および自然堆積土の速度効果特性



過圧密粘土



自然堆積粘土

N.B.

非定常流動曲面モデルや超過応力型モデルは正規圧密土だけを対象

34

## 文献

- 1) Adachi T. and Oka F. (1982): Constitutive equation for normally consolidated clays based on elasto/viscoplasticity. *Soils and Foundations*, **22**(4), 57-70
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. (2000a): Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, **40**(2), 99-110.
- 3) Hashiguchi, K. (1980): Constitutive equation of elastoplastic materials with elasto-plastic transition, *Jour. of Appli. Mech., ASME*, **102**(2), 266-272.
- 4) Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. and Bouchard, R. (1985): Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, *Geotechnique*, **35**(2), 159-180.
- 5) Nakai, T. and Hinokio, T. (2004): A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *Soils and Foundations*, **44**(2), 53-70.
- 6) 中井照夫 (2011): 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 (2011): 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., 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
- 9) Nakai, T. (2012): *Constitutive Modeling of Geomaterials: Principles and Applications*, CRC Press
- 10) Nakai T., Shahin H. M. and Kyokawa H. (2013): Rational expression of time-dependent behavior from normally consolidated soil to naturally deposited soil, *Proc. of 18<sup>th</sup> ICSMGE*, Paris, 255-258.
- 11) Mimura M. and Sekiguchi H. (1985): A review of elasto-viscoplastic models with particular emphasis on stress-rate effect. *Proc of 20th Annual Meeting of JGS*, 1, 403-406 (in Japanese).
- 12) Perzyna P. (1963): The constitutive equations for rate sensitive plastic materials, *Quart. Appli. Math.*, **20**(4), 321-332
- 13) Sekiguchi H. (1977): Rheological characteristics of clays. *Proc. of 9th ICSMFE*, Tokyo, **1**, 289-292. 35