

# 砂から中間土や粘土までを対象に 動的・静的を問わない 地盤の変形・破壊解析を目指して

名古屋大学大学院工学研究科  
社会基盤工学専攻  
地盤力学研究グループ  
野田 利弘

## 目 次

- (1)はじめに
  - ・近代土質力学「体系」に関する現状「認識」
  - ・現代地盤力学として何を目標しているか
- (2)水～土骨格連成計算の支配方程式
  - ・弾塑性構成式(SYS Cam-clay model)の概要
  - ・速度型運動方程式など
- (3)最新の計算事例の紹介(動画)

## (1)はじめに～土質材料の特徴

天然自然材料であるがゆえに

- ・現場ごとに土が異なる
- ・不均質、非一様
- ・初期条件も境界条件も十分分からない
- ・極めて複雑な挙動

cf. 鋼, コンクリート, 機械系の人工材料

このような土材料に対し、先達は多くの努力を積み重ね、Terzaghi以来、近代土質力学を構築してきた。  
この考え方は、  
教科書、設計基準、数値解析に色濃く染み付いている。

## (1)はじめに～近代土質力学「体系」の現状認識

### 近代土質力学の特徴・・・

対象とする問題をあらかじめ設定し、問題ごとにそれぞれ独自の理論を当てはめて問題解決に当たるといふ、**細分化・単元化のアプローチ**

学問の進歩には、専門化・細分化はつきものだが・・・

### 土質力学は、

**極端に専門化・細分化しているのではないか!?**

このため、

**地盤工学に本来必要とされている諸問題にも十分対応できていないのではないか?**

行き過ぎた細分化の例を次に示してゆく

## (1)はじめに～近代土質力学「体系」の現状認識

### 教科書編

1948年のTaylorの教科書以降、目次立てはほとんど変わっていない。つまり、

透水・・・Laplace(楕円型)

圧密・・・熱伝導(放物型)

破壊・・・剛塑性つり合いのすべり線(双曲型)

お互いに参照することなく、

**問題対処的、別々の理論の「寄せ集め」!?**

動力学は現れてこない。

**静力学と動力学は別々に発展**

## (1)はじめに～近代土質力学「体系」の現状認識

### 研究現場その1～構成式編

### 砂の力学と粘土の力学は別々

#### (a)砂の力学・・・

- ・ゆるい砂と密な砂の挙動は、別々の構成式または別々の材料定数で説明
- ・ゆるい砂の構成式では、液状化は説明できても、締固めはできないし、排水時のせん断挙動もできない
- ・液状化後の圧密沈下はできなくてもよい

#### (b)粘土の力学・・・

- ・正規圧密人工粘土にしか使えない構成式を自然堆積粘土の圧密解析に使用する
- ・粘土の「2次圧密」は、はじめから(時間依存性を仕組んだ)粘塑性モデルで説明するから、与えられた粘土が2次圧密するかどうかは視野の外

#### (c)中間土の力学・・・

- ・無数の構成式を作る訳にも行かず手付かず

## (1)はじめに～近代土質力学「体系」の現状認識

### 研究現場その2～地盤解析・シミュレーション編

### 「専用プログラム」による解析がほとんど

「素焼きの中の水の流れ専用」・・・変形しない

「圧密変形専用」・・・支持力はできない

「粘土地盤支持力専用」・・・進行性破壊は「今後の課題」

「液状化専用」・・・粘土はできない

「静的専用」、「動的専用」etc, etc.

### 専用プログラム・・・

地盤に何が発生するかを教えない、  
予期した現象しか現れない。

## (1)はじめに～現代地盤力学として何を目標しているか

- ・連続体力学・弾塑性力学を基礎にした**地盤力学理論の体系化**、
- ・学術的・工学的実践のための**数値解析コードの開発**

一言で言えば・・・

All Soils All States All Round **Geo-Analysis Integration**

砂～中間土～粘土、泥岩までの**全ての土**を統一的に捉え、  
変形から破壊に至るまでの**全ての力学現象**を扱って

動的・静的を問わずあらゆる外力条件下で解析する



## (1)はじめに～何を目標しているか

もっと具体的に言うと、

動的でも静的でもある外力が

粘土、砂、中間土地盤に作用したとき、

外力形態に応じて、

壊れるか変形だけで済むか、液状化か締固めか、

地震の後にはどうなるか、つまり、

**一体何がどのように起こるかを教えてくれるプログラム**

困ったときに答えを出してくれるプログラム

(2) 支配方程式 ~ そのために何をしているか?

SYS Cam-clay model (上・下負荷面カムクレイモデル)

(「エンジン」) の開発

土骨格の骨格構造 (構造・過圧密・異方性) の働きが記述できる弾塑性構成式 (材料非線形性)  
砂 ~ 中間土 ~ 自然粘土を一貫して説明



水 ~ 土連成有限変形計算 (「シャーシ」) の開発

水 ~ 土連成有限変形理論 (慣性力対応, 幾何的非線形性) 変形が破壊か, 動的か静的か, 計算事象を特定しない



(2) 支配方程式 ~ エンジン

SYS Cam-clay model とは?

Super/subloading Yield Surface (modified) Cam-clay model  
上・下負荷面 (修正) カムクレイモデル

繰り返し正規圧密土: Cam-clay model (Cambridge)

を土台にして,

自然堆積土やゆるい砂などが有する骨格構造

- ・構造: 上負荷面 (名大)
- ・過圧密: 下負荷面 (橋口)
- ・異方性を表す \* (関口) と発展則 (橋口)

を導入することにより, 作られた弾塑性構成式

(2) 支配方程式 ~ エンジン ~ SYS Cam-clay model とは?

人工繰り返し正規圧密土と自然堆積土の違い

自然堆積土は

繰り返し正規圧密土に比べ, 骨格構造 (骨組構造) が発達している。

骨格構造とは...

「構造」, 過圧密, 異方性の総称

(2) 支配方程式 ~ エンジン ~ SYS Cam-clay model とは?

繰り返し正規圧密土の力学: Cam-clay model

近代土質力学は, 弾塑性力学に基づいてケンブリッジで創設された。 (1960年代)

しかし,

Cam-clay model は, 異方性を示さず, 正規圧密で完全に繰り返した状態にある土の負荷時の挙動だけを対象にしたモデル。

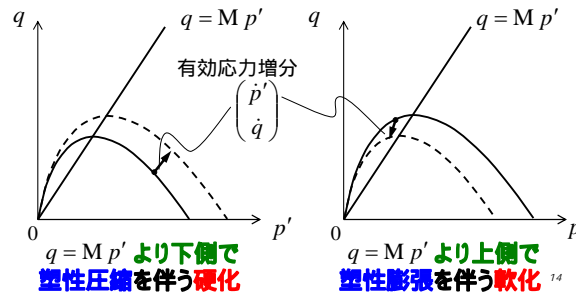
換言すれば,

骨格構造の働きとしての異方性の変化, 過圧密解消や構造喪失はケンブリッジ土質力学の研究対象外。

(2) 支配方程式 ~ エンジン ~ SYS Cam-clay model とは?

繰り返し正規圧密土の力学: Cam-clay model

エッセンス 限界状態線  $q = M p'$  は固定して, なおかつ硬化・軟化および塑性圧縮・膨張の數層線



(2) 支配方程式 ~ 弾塑性構成式 ~ SYS Cam-clay model とは?

自然堆積土

自然に堆積した粘土や砂は, ほとんどが構造が発達し, しかも, 多かれ少なかれ過圧密状態にある。

(異方性も発達しているが, 以下, 省略)

構造とは? 過圧密とは?

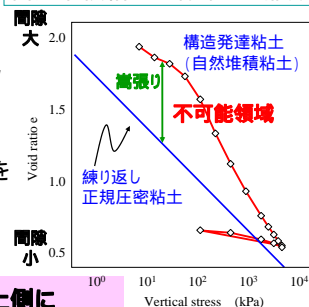
構造とは, part 1

構造が発達した粘土は, 繰り返した粘土よりも高張っていて, 「不可能領域」に状態をとることができる

Cam-clay降伏面上側に上負荷面の導入

(Asaoka, Nakano and Noda, 1997)

自然堆積粘土の標準圧密試験

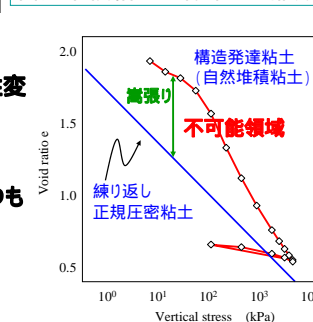


構造とは, part 2

(1) 構造劣化は塑性変形とともに生じ,

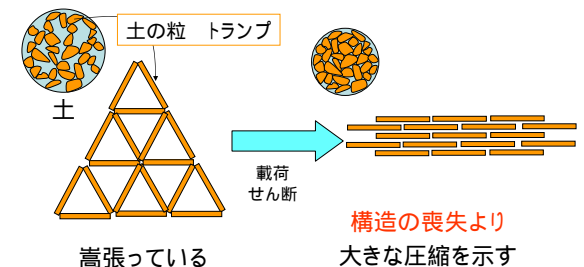
(2) 構造劣化にはいつも塑性圧縮が伴う

自然堆積粘土の標準圧密試験



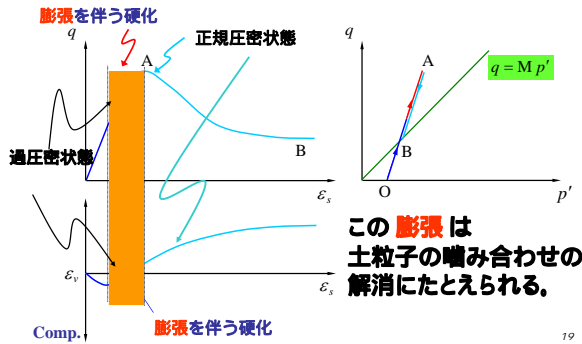
「構造」の概念のマンガ

構造: トランプのカードハウスに例えられる

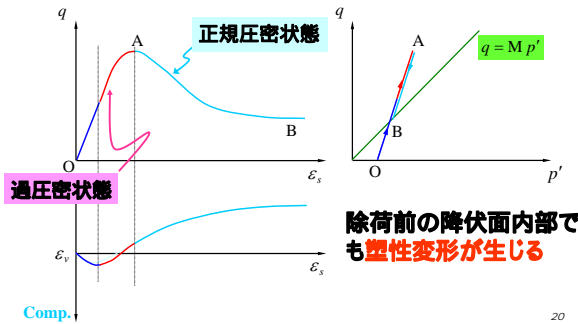


Card House-like collapse of overall structure

**過圧密解消 (過圧密状態 から正規圧密状態への遷移) には塑性膨張が伴う**



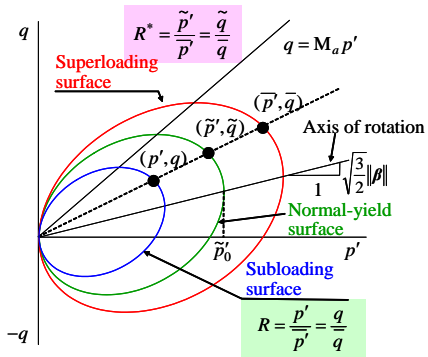
**過圧密 から 正規圧密 に移るときには 塑性変形が発生する**



**この問題は降伏面内部に Subloading yield surface (下負荷面) の導入 (Hashiguchi, 1978) により解決**

このように、**構造**が発達し**過圧密状態**にある土を記述するためには **Superloading yield surface (上負荷面)**, **Subloading yield surface (下負荷面)** が必要。

**三つの降伏面および 相似比  $R^*$  と  $R$**



下負荷面:

$$\varepsilon_v^p = f(p', q) + \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}}{1 + e_0} (\ln R^* - \ln R)$$

から、期せずして、骨格構造が発達した土の特徴である

- (1) 過圧密解消 ( $R > 0$ ) には**塑性膨張**が伴う。
- (2) 構造劣化 ( $R^* > 0$ ) には**塑性圧縮**が伴う。

$R$  と  $R^*$  は  $R$  と  $R^*$  の「発展則」として与えられる

下負荷面:

$$\varepsilon_v^p = f(p', q) + \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}}{1 + e_0} (\ln R^* - \ln R)$$

**新限界状態線 ( $q = M_s p'$ ) が 硬化・軟化の敷居線になる**

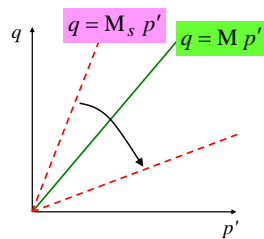
$$M_s = M_s(R^*, R)$$

Cam-Clay modelと違って、

**$M_s$  は  $R^*$  と  $R$  の変数になる。**

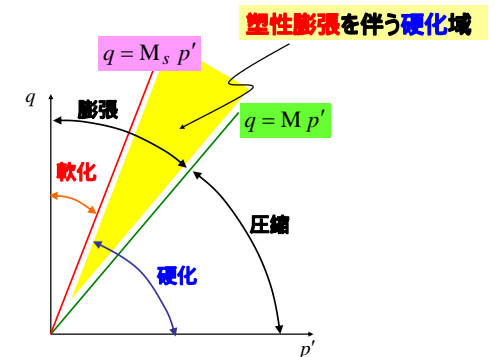
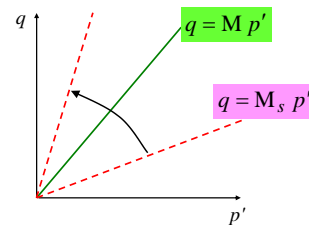
$$M_s = M_s(R^*, R)$$

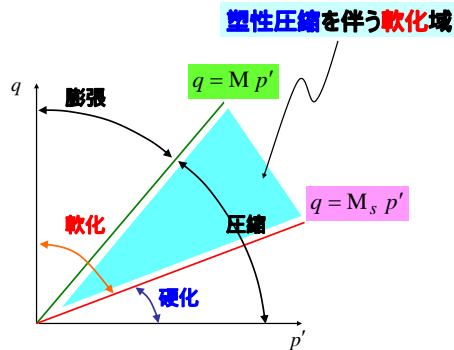
$R$  が**増加する**とき(過圧密 → 正規圧密),  $M_s$  は**減少**。



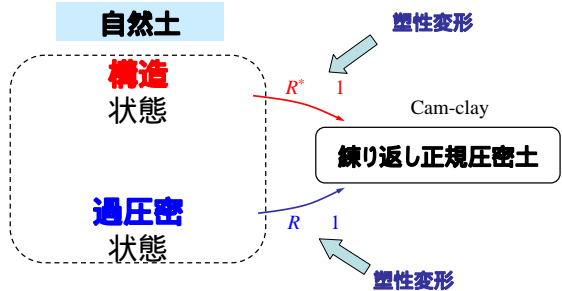
$$M_s = M_s(R^*, R)$$

$R^*$  が**増加する**(構造劣化)とき,  $M_s$  は**増加**。

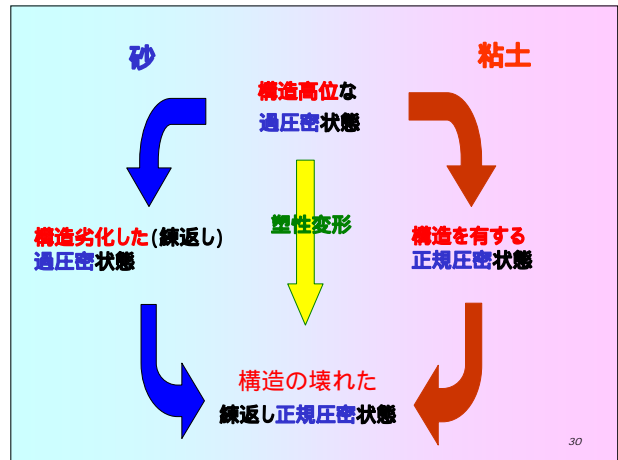




(2) 支配方程式 - エンジン - SYS Cam-clay model とは？  
**自然土 から 練り返し正規圧密土 へ**



**疑問...構造劣化と過圧密解消はどちらが速い!?**



(2) 支配方程式 - エンジン - SYS Cam-clay model とは？  
**SYS Cam-clay modelから何がわかったか？**

同じ変形・荷重を与えても、  
 砂、粘土、泥岩、中間土、有機質土、特殊土などの力学挙動が違うのは、  
 (鉱物組成など土の「種類」はもちろん違うが、)  
 「状態量」としての  
 構造・過圧密・異方性の変化の仕方が異なるから。

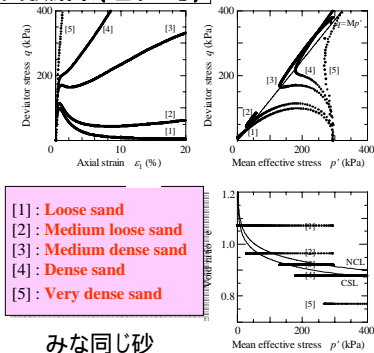
例えば、  
 砂は、構造劣化が速く、過圧密解消が遅い  
 粘土は、構造劣化が遅く、過圧密解消が早い  
 ある中間土は、構造劣化も過圧密解消も「普通」、etc.

(2) 支配方程式 - エンジン - SYS Cam-clay model とは？  
**SYS Cam-clay modelから何がわかったか？**

具体的に、  
 この構成式が記述できる  
 砂と粘土の応答例  
 を示します。

少し古い発展則を用いての  
 例示になりますが...

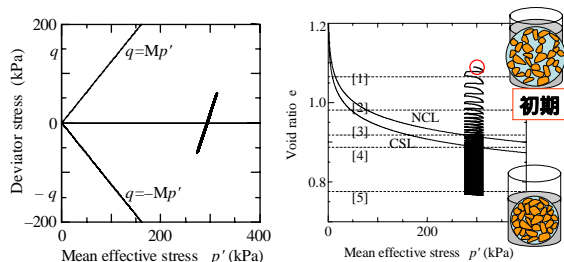
**砂は空隙比の違いで非排水せん断挙動が大きく異なる**  
**室内実験結果(珪砂6号)**



モデル材料定数を変えて  
 説明してきた。しかし、

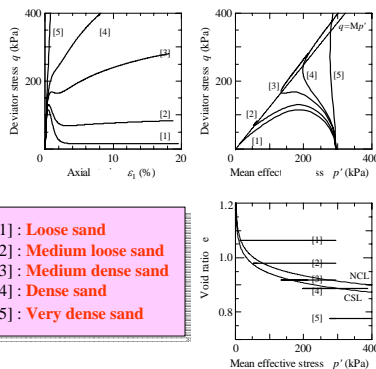
みな同じ砂

**砂の排水繰返しせん断挙動(締固め)**



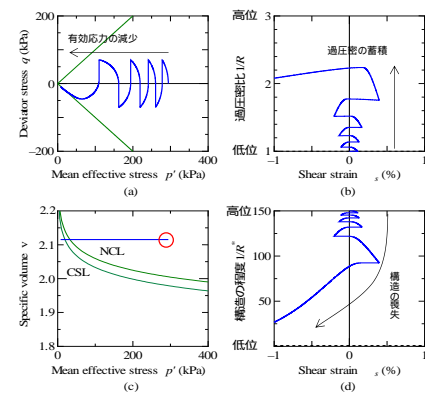
このモデルではその必要はない。ゆるい状態から  
 締固めの回数を変えて、密度が異なる砂を作れば、

**砂は空隙比の違いで非排水せん断挙動が大きく異なる**

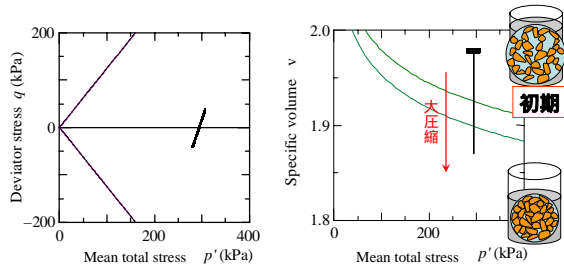


いずれも説明がつかない。

**ゆるい砂の非排水繰返しせん断(液状化)**

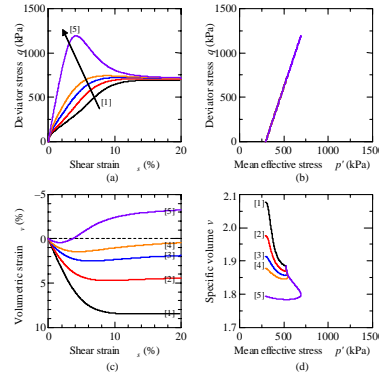


砂の液状化後の圧密(揺すり込み沈下)



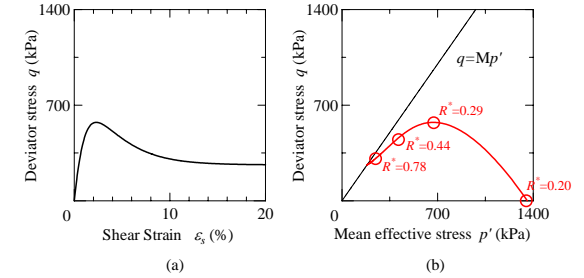
ブルブルッと揺すった後の「スーッと」という沈下もできる。(境界値問題として)

密度が異なる砂の排水せん断挙動



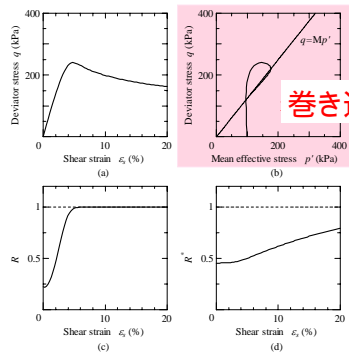
38

構造の発達した正規圧密粘土の非排水せん断挙動



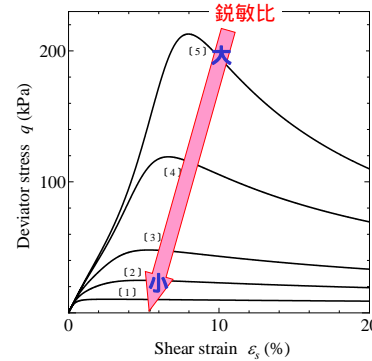
構造劣化が起因となる限界状態線下側での軟化挙動

構造の発達した過圧密粘土の非排水せん断挙動



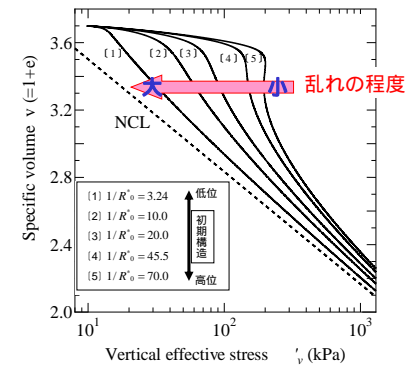
40

自然堆積粘土の鋭敏比



このあたりの試料の乱れ」とともに理論的でない...とまづ言われてきた話題。

試料の乱れ (Skemptonの図を計算したもの)



でも、歴とした理論的課題。

42

(2) 支配方程式 ~ 水 ~ 土骨格連成有限変形計算

混合体理論の飽和土への適用 (西村, 地盤工学ハンドブック)

幾何形状変化の影響 (幾何的非線形性)

... 有限変形理論

ここでは, updated Lagrangianに基づく定式化

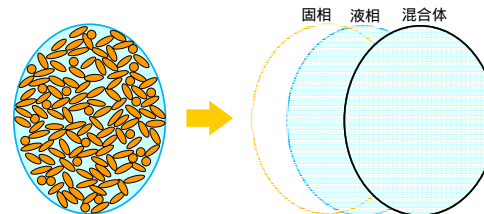
増分型構成式の使用 (材料非線形性)

... 速度型の運動方程式

躍度 (加加速度)

43

土骨格 ~ (間隙の) 水の2相混合体



土粒子も間隙の水も非圧縮

44

(2) 支配方程式 - シャーシ

(a) u-p formulationに基づく飽和土の運動方程式

$$\rho_s \dot{v}_s + \rho_f \dot{v}_f = \text{div } T + \rho b$$

$\rho_s, \rho_f$ : 固相(土骨格)と液相(間隙水)の密度  $\rho$ : 混合体(飽和土)の密度

$\dot{v}_s, \dot{v}_f$ : 固相と液相の加速度  $T$ : 全応力  $b$ : 単位質量あたりの物体力

ここで  $\dot{v}_s \gg \dot{v}_f - \dot{v}_s$  を仮定し, 次式を得る

$$\rho \dot{v}_s = \text{div } T + \rho b \quad \dots \quad u-p \text{ formulation}$$

45

(2) 支配方程式 - シャーシ

(a) u-p formulationに基づく飽和土の速度型運動方程式

増分形構成式を用いるため、この式について土骨格から見た物質時間微分をとると、次式。

$$\rho \dot{\mathbf{v}}_s + \{nD_s \rho^f + \rho^f (\text{tr} D_s)\} (\mathbf{v}_s - \mathbf{b}) = \text{div } \dot{\mathbf{S}}_t$$

$\rho^f$  : 水単体の密度  $D_s$  : 液相のストレッチング

ここに、

$$\dot{\mathbf{S}}_t = \dot{\mathbf{T}} + (\text{tr} D_s) \mathbf{T} - \mathbf{T} L_s^T \quad L_s : \text{液相の速度勾配}$$

(2) 支配方程式 - シャーシ

(b) 有効応力原理, (c) 土骨格の構成式

(b) 有効応力原理

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}' - u \mathbf{I}$$

(c) 土骨格の構成式 ... SYS Cam-clay model

$$\overset{\circ}{\mathbf{T}} = L[D_s]$$

$\overset{\circ}{\mathbf{T}} = \mathbf{T}' + \mathbf{T}' \boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\Omega} \mathbf{T}'$  : Green-Naghdiの有効応力速度

(2) 支配方程式 - シャーシ

(d) 水 ~ 土骨格連成式

(d-1) 飽和土の連続式 (土骨格と間隙水の幾何学的制約条件)

$$\text{div } \mathbf{v}_s + \text{div} \{n(\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s)\} = -\frac{n}{\rho^f} D_f \rho^f$$

(d-2) 間隙水の平均的な流速 ... 「ダルシー則」

液相の運動に等方性を仮定

$$n(\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s) = -\frac{k}{\rho^f g} (\text{grad} u - \rho^f \mathbf{g}) - \mathbf{v}_s \times \frac{k}{g}$$

(2) 支配方程式 - シャーシ

(e) 適合条件式, (d) 境界条件

(e) 適合条件式

$$L_s = \frac{\partial \mathbf{v}_s}{\partial \mathbf{x}}$$

(i) 境界条件

$$\Gamma = \Gamma_v + \Gamma_t = \Gamma_q + \Gamma_h$$

(2) 支配方程式 - シャーシ

解くべき常微分連立一次方程式

速度型運動方程式 ... 弱形式と有限要素法の適用, 水 ~ 土骨格連成式 ... 田村流の方法の適用 等

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \frac{d^2}{dt^2} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{v}\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -(\mathbf{L}^T + \mathbf{L}_c^T) \\ \mathbf{L}' & \mathbf{0} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{v}\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{L} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{v}\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\hat{\mathbf{f}}\} \\ \{\hat{f}_u\} \end{Bmatrix}$$

(2) 支配方程式 - シャーシ

解くべき連立一次方程式

陰的解法の適用

加速度に線形性を仮定する「線形加速度法」の拡張的方法であるWilsonの法に倣い、

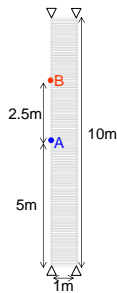
躍度に線形性を仮定  $\{\ddot{v}\}_{i+\tau} = \{\ddot{v}\}_i + \frac{\tau}{\Delta t} (\{\dot{v}\}_{i+\Delta t} - \{\dot{v}\}_i)$

これにより

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{(\Delta t)^2} \mathbf{M} + \frac{1}{6} \mathbf{K} & -2(\mathbf{L}^T + \mathbf{L}_c^T) \\ -\mathbf{L}_{o1} & \mathbf{H} \times \Delta t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{v}(\Delta t)\}_{i+\Delta t} \\ \{u\}_{i+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\hat{\mathbf{f}}(\Delta t)\}_{i+\Delta t} - \mathbf{K} \left[ \{\mathbf{v}(\Delta t)\}_i + \{\dot{\mathbf{v}}(\Delta t)\}_i^2 + \frac{1}{3} \{\ddot{\mathbf{v}}(\Delta t)\}_i^3 \right] - 2(\mathbf{L}^T + \mathbf{L}_c^T) \left[ \{u\}_i + \frac{1}{2} \{u(\Delta t)\}_i \right] \\ \{\hat{f}_u(\Delta t)\}_{i+\Delta t} + \mathbf{L} \{\mathbf{v}(\Delta t)\}_i + \mathbf{L}_{o2} \{\dot{\mathbf{v}}(\Delta t)\}_i^2 + \mathbf{L}_{o3} \{\ddot{\mathbf{v}}(\Delta t)\}_i^3 \end{Bmatrix}$$

(2) 支配方程式 - シャーシ

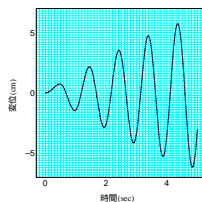
検証 (微小変形一相系弾性体)



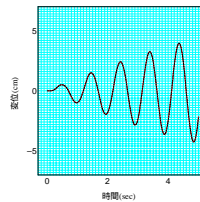
要素大きさ 1.0m x 0.1m  
要素数 1 x 100 = 100要素  
側面: xフリー, y固定  
中央部(A点)に応力境界でsin波

(2) 支配方程式 - シャーシ

検証 (微小変形一相系弾性体)



.... A点の変位 (理論解)  
A点の変位 (GeoAsia)



.... B点の変位 (理論解)  
B点の変位 (GeoAsia)

(3) 最新の計算事例から

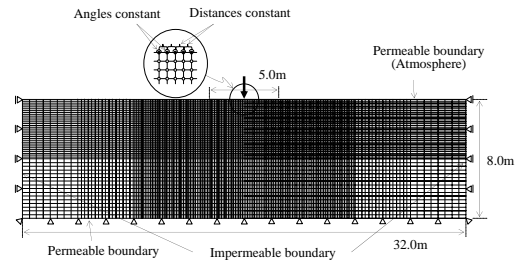
圧密、支持力、地震中 / 地震後の  
地盤挙動に関する動画 6 ~ 7本  
お時間の許す限り

~ 事例 1 ~

変形から破壊まで

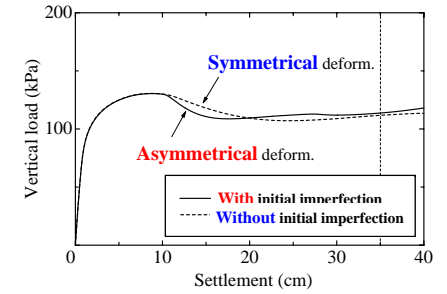
変位制御「パンチング」問題

Finite element mesh & boundary conditions

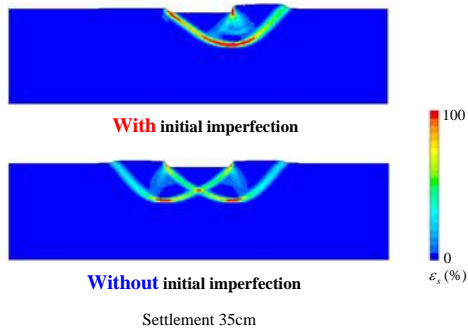


Foundation : rigid, thin, controlled in the vertical displacement

摩擦なしの場合、初期不整の影響



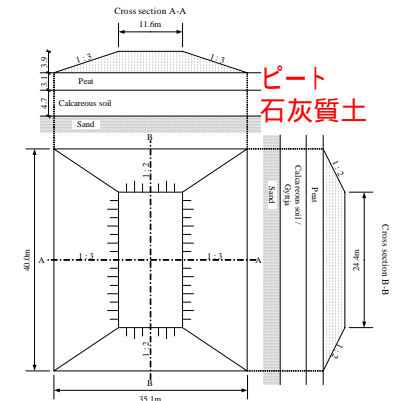
初期不整の影響 - セン断ひずみ



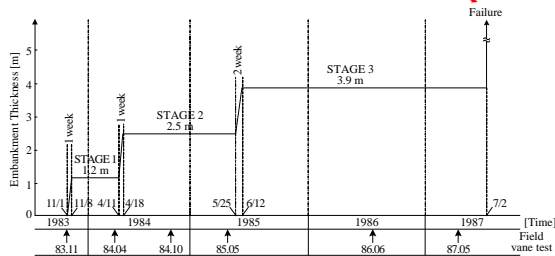
~ 事例 2 ~

限界盛土高さ

柴田フォーラム「ブラインドテスト」を例に



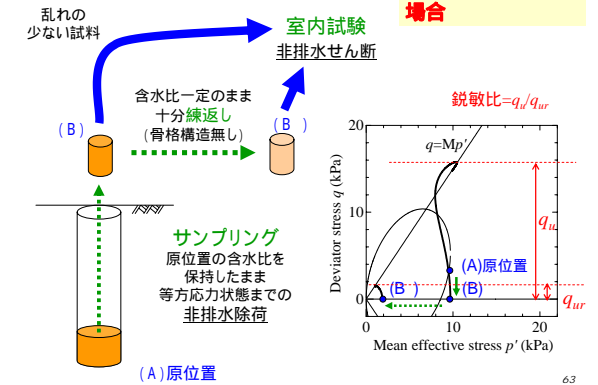
4段階荷重、4段階目で破壊させる



層	深さ (m)	$\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> )	湿潤密度 (kN/m <sup>3</sup> )	含水比 (%)	液性限界 (%)	間隙比 $e_0$
ピート	Layer1	-2.5	1.72	10.89	341	6.07
	Layer2	-3.1	2.10	11.67	277	4.77
瀾濁礫混じり粘土	Layer3	-4.5	2.24	12.85	134	3.00
	Layer4	-7.0	2.56	13.93	106	2.71
	Layer5	-7.8	2.60	13.05	148	3.85

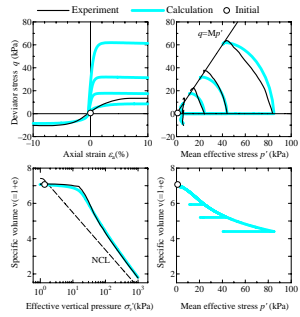
原位置の透水性係数 $k_0$ (cm/sec)	透水性係数の変化率* $c$	鋭敏比	定ひずみ速度圧密試験	非排水三軸試験
$1.7 \times 10^{-6}$	0.73	7	有り	有り
$4.0 \times 10^{-7}$	0.84	12	有り	無し
$4.0 \times 10^{-8}$	0.83	12	有り	無し
$8.3 \times 10^{-9}$	0.73	9	有り	有り
$1.6 \times 10^{-7}$	0.62	11	有り	無し

原位置 ~ 室内試験の再現

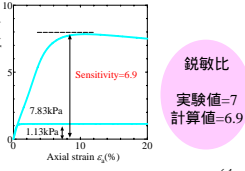


再現結果と決定したパラメータ

Layer1 (Peat)



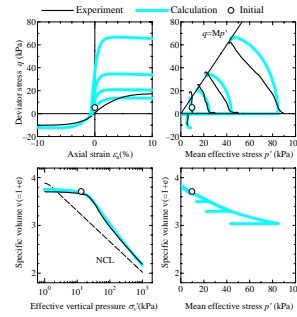
弾塑性性	圧縮指数 $\lambda$	0.92
	膨張指数 $\kappa$	0.05
発展期	限界状態定数 M	1.5
	正規圧密線の切片 N	3.2
	ポアソン比 $\nu$	0.3
	構造低下化指数 a	0.2
	構造低下化指数 b	0.7
	構造低下化指数 c	0.2
原位置の初期値	正規圧密土化指数 m	3.0
	回転硬化化指数 b <sub>r</sub>	0.0
	回転硬化化限界定数 m <sub>b</sub>	1.0
	鉛直有効応力 $\sigma'_{v0}$	1.35
	比体積 $v_0 (=1+e_0)$	7.07
	応力比 K <sub>0</sub>	0.6
	構造の程度 1/R <sub>0</sub>	8.0
	過圧密比 1/R <sub>0</sub>	10.7
	異方性の程度 $\omega$	1.0



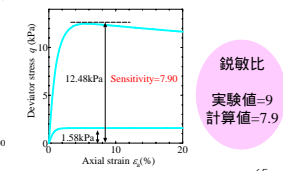
鋭敏比  
実験値=7  
計算値=6.9

再現結果と決定したパラメータ

Layer4 (Calcareous soil)

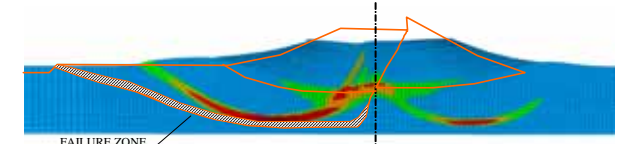


弾塑性性	圧縮指数 $\lambda$	0.36
	膨張指数 $\kappa$	0.05
発展期	限界状態定数 M	1.5
	正規圧密線の切片 N	2.6
	ポアソン比 $\nu$	0.3
	構造低下化指数 a	0.3
	構造低下化指数 b	1.0
	構造低下化指数 c	0.2
原位置の初期値	正規圧密土化指数 m	3.0
	回転硬化化指数 b <sub>r</sub>	0.0
	回転硬化化限界定数 m <sub>b</sub>	1.0
	鉛直有効応力 $\sigma'_{v0}$	13.22
	比体積 $v_0 (=1+e_0)$	3.71
	応力比 K <sub>0</sub>	0.6
	構造の程度 1/R <sub>0</sub>	13.0
	過圧密比 1/R <sub>0</sub>	1.541
	異方性の程度 $\omega$	1.0



鋭敏比  
実験値=9  
計算値=7.9

破壊時のせん断ひずみ分布 (盛土部拡大)



(3) 最新の計算事例から

~事例3~

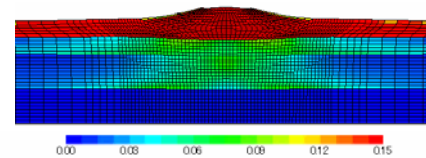
地震中 / 地震後の地盤挙動

地震は一番弱いところを探して被害を与える  
砂が固められれば、粘土がやられる。  
粘土は地震で乱され、沈下を生じる。

継続時間の長い長周期成分を含む地震

締め不良盛土では

せん断ひずみ

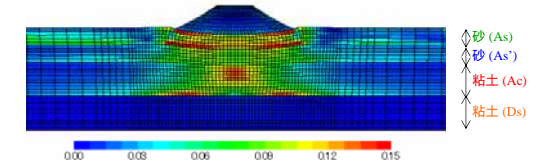


- ✓ 盛土自身が砂層 (As) とともに大きく側方へ流動し、盛土が潰れてしまう。
- ✓ 盛土および上部砂層で大きなせん断ひずみが発生。

継続時間の長い長周期成分を含む地震

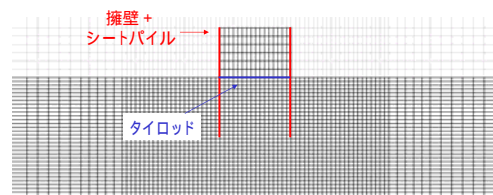
締め良好な盛土では

せん断ひずみ

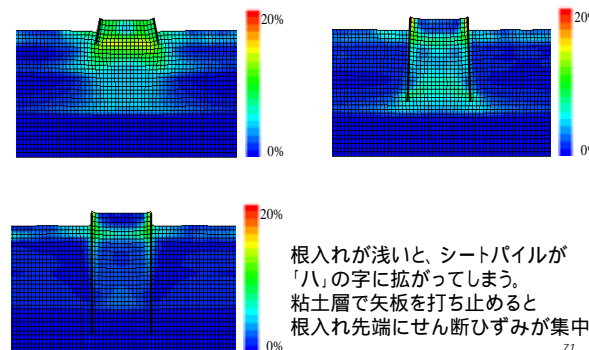


- ✓ 砂層 (As) で大きなせん断ひずみが発生するものの、盛土には大きなせん断ひずみは発生せず安定を保っている。
- ✓ 軟弱粘土層 (Ac) で地震後数日から数年に亘り大きなせん断ひずみが発生する。

擁壁・シートパイルとタイロッドによる補強

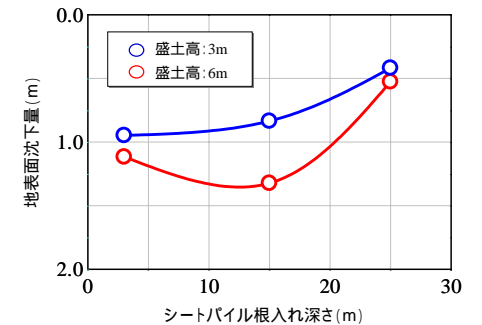


地震後最終的なせん断ひずみ分布図



根入れが浅いと、シートパイルが「ハ」の字に広がってしまう。  
粘土層で矢板を打ち止めると根入れ先端にせん断ひずみが集中

シートパイルの根入れ深さが沈下に与える影響



# 地震中 / 地震後の地盤挙動

## 盛土の側方流動

～能登半島地震の盛土災害を例に～

## 背景 その1

- ・2007年3月25日9時42分発生
- ・M 6.9
- ・震源地(北緯37度13.2分、東経136度41.1分)
- ・最大震度6強(七尾市、輪島市、穴水市)
- ・液状化・斜面崩壊等の地盤被害が多数

↓ 規模、量ともに多かった ↓

**能登有料道路の  
道路用盛土の崩壊に注目**



能登有料道路

能越自動車道

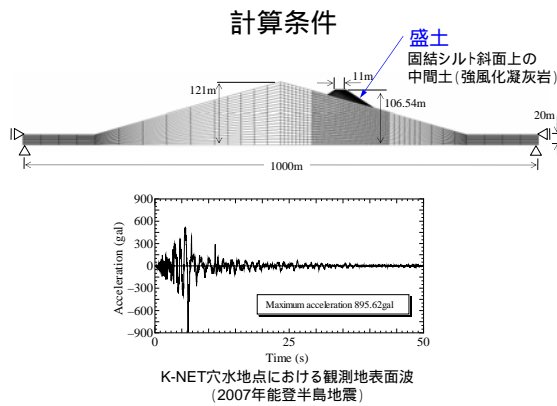
## 背景 その2

### 能登半島地震(2007)

- \* 宅地盛土や道路盛土の崩壊が数多く発生し、土構造物に甚大な被害を与えた。
- \* **崩壊のほとんどは、傾斜地盤上の盛土(片盛土)で発生。**
- \* **水平地盤上の盛土は、変形のみで崩壊には至らなかった。**



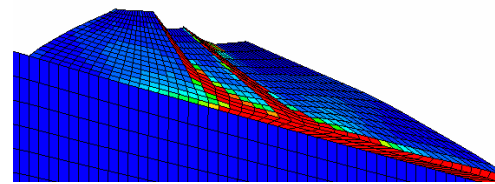
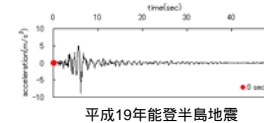
能登有料道路七尾市中島町豊田付近の盛土崩壊(国際航業(株)・バスコ, 2007)



### 継続時間の短い地震

変形から破壊: 傾斜地盤上の盛土崩壊は地震後に発生!!

せん断ひずみ分布

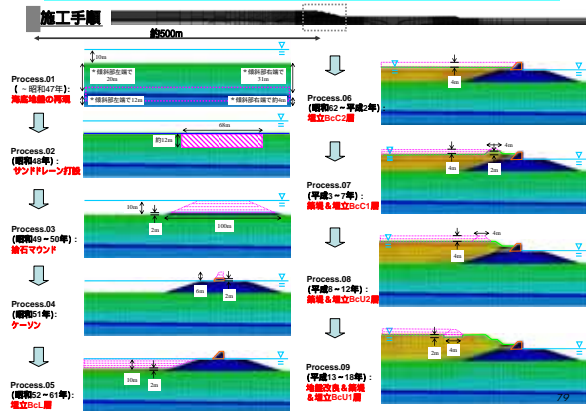


盛土部約50mを拡大(実際の計算幅は1km)

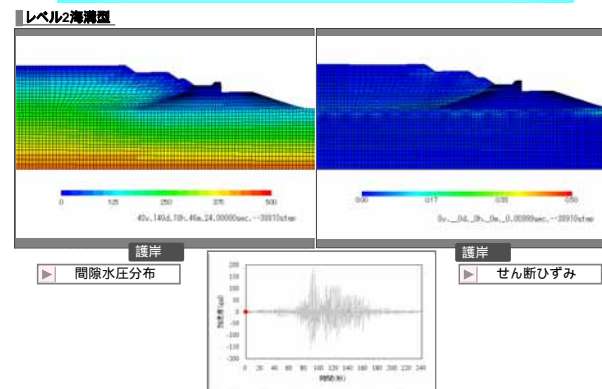
# 地震中 / 地震後の地盤挙動

## 海上埋立人工島の立体的モデル化と耐震性評価

## 海上埋立人工島の立体的モデル化



## 海上埋立人工島の耐震性評価



# 地盤強化技術の開発

## SCP(サンドコンパクションパイル)工法の有効性

## おわりに

地盤・土構造物の耐震性向上は急務だが、課題は多い

海上人工島、埋立地盤、道路・新幹線盛土

など人工土構造物

現場排出土を地盤材料としている。

ほとんどは、砂と粘土の入り混じった中間土からなる。

地震外力が最も危険

今までの液状化解析はまだ不十分では？

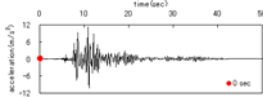
中間土に対する耐震性評価はほとんどない。

地盤との相互作用問題もほとんど未解明。

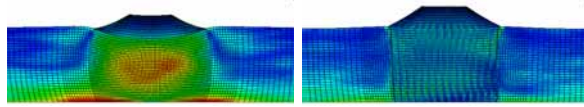
83

### 中間土からなる埋立人工地盤の改良

▶ せん断ひずみ



平成19年中越沖地震



無処理

サンドコンパクションパイル(SCP)



SCPはきわめて有効！！

82

ご清聴ありがとうございました。

84