

# SYS Cam-clay Model

## Super/subloading Yield Surface Modified Cam-clay Model

土の骨格構造の働きを記述する弾塑性モデル

### はじめに

SYS カムクレイモデルは、カムクレイモデルを土台に、土の骨格構造の働きを記述する弾塑性モデルで、名古屋大学地盤力学研究グループにより開発されました。

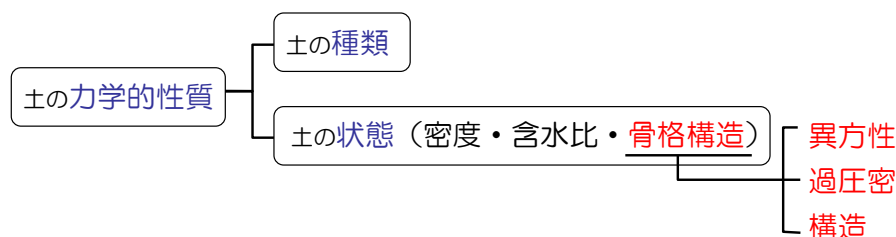
カムクレイモデルは、イギリス・ケンブリッジ大学の土質力学研究グループにより 1960 年代に開発された土の構成モデルです。限界状態理論に基づき、土の圧密特性とせん断特性を統一的に表現する有名なモデルですが、よく練り返して正規圧密状態にした土（言うならば「死んだ土」）のデータから作られたものですから、自然の土（「生きた土」）には十分適用できませんでした。

SYS カムクレイモデルでは、「死んだ土」と「生きた土」の違いを、土の骨格構造の働きとして説明し、カムクレイモデルの上に骨格構造として異方性・過圧密・構造の3項目を付け加えることで、あらゆる種類・あらゆる状態の土の力学挙動を、同一理論的枠組で表現しています。

### 骨格構造とは

「骨格構造」とは 1960 年代に三笠正人先生が述べられた言葉です。土の力学的性質は、土の「種類」と「状態」から決まり、さらに「状態」を規定する3つの因子の中で、密度・含水比以外のものを一括して「骨格構造」と定義されました（飽和土を対象とすれば、密度と含水比は同義）。

名古屋大学地盤力学研究グループは、「骨格構造」として、①関口秀雄先生による「異方性」、②橋口公一先生による「過圧密」の土の再負荷時に塑性変形が生じること、さらに③名古屋大学地盤力学研究グループによる「構造」の概念を取り入れています。

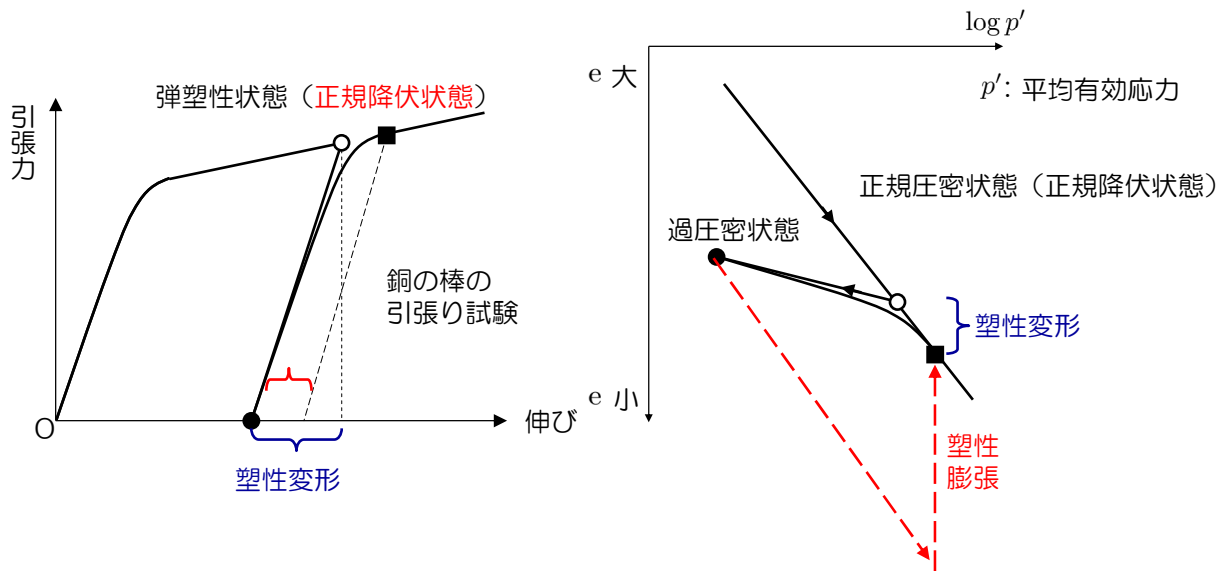


# 構造・過圧密とは

自然の土は、いずれも過圧密状態にあり構造が発達した状態にあります。ここではまず、「構造」「過圧密」とは何かを紹介します。

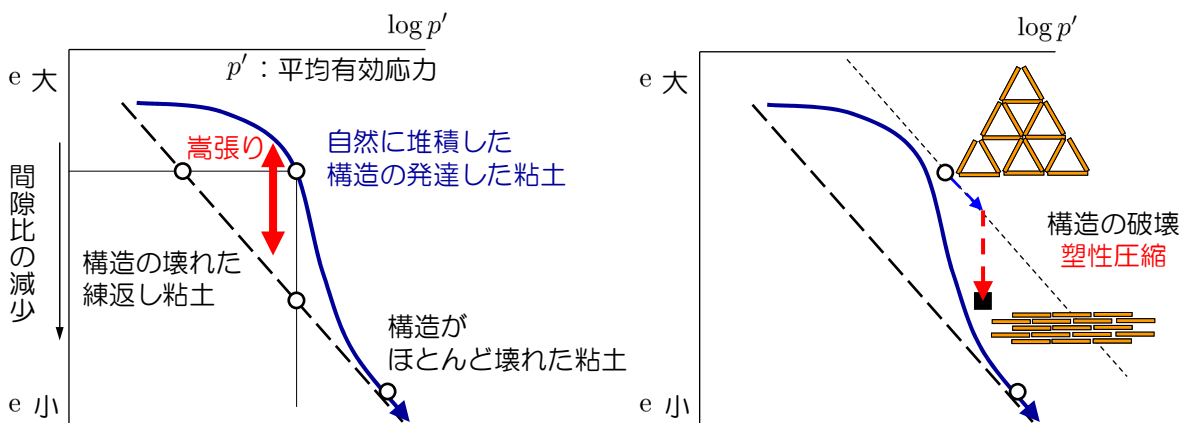
まずは「過圧密」について、下の図で説明しましょう。銅の棒を引張りで降伏状態に入ってから（○）、いったん荷重をゼロにして（●）再び载荷すると、○にはもどらず「塑性変形」を伴い■の状態になります。粘土についても同じように考えると、正規圧密から過圧密にもどして、再度正規圧密にかえすと、必ず塑性変形が生じます。除荷後の再負荷では、土も弾塑性挙動するわけです。

また、過圧密とは、土粒子がインターロッキング・ボンドでぐっと絡み合っているイメージですが、これがせん断したり圧縮したりすることで、土の強いかみ合わせがはずれていき、土は必ず塑性的に膨張します。過圧密状態の喪失（過圧密から正規圧密へもどる）では、土が塑性膨張する方向に働くわけです。



つぎに「構造」についてです。十分に練り返した土に比べ、自然に堆積した土は嵩張った状態にあります。つまり、間隙比が同じなら自然の土はより大きな力に耐え、また力が同じなら大きな間隙比のままです。「構造」とはこの嵩張りの度合いを表します。

土の構造というのは、トランプで作ったカードハウスのようなものですから、構造の破壊は、土が塑性圧縮する方向に働くわけです。



# SYS カムクレイモデル

「死んだ土」のモデル（カムクレイモデル）に、上記の「過圧密」「構造」の概念を取り入れることで、「生きた土」のモデル（SYS カムクレイモデル）となります。具体的な定式化は、参考文献を見ていただくことにして、ここでは概略だけを示します。

## ■3つの負荷面で表現

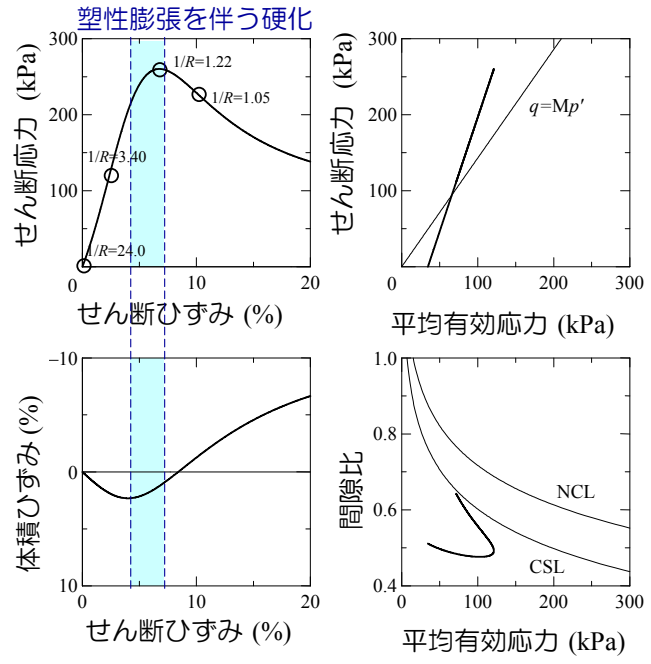
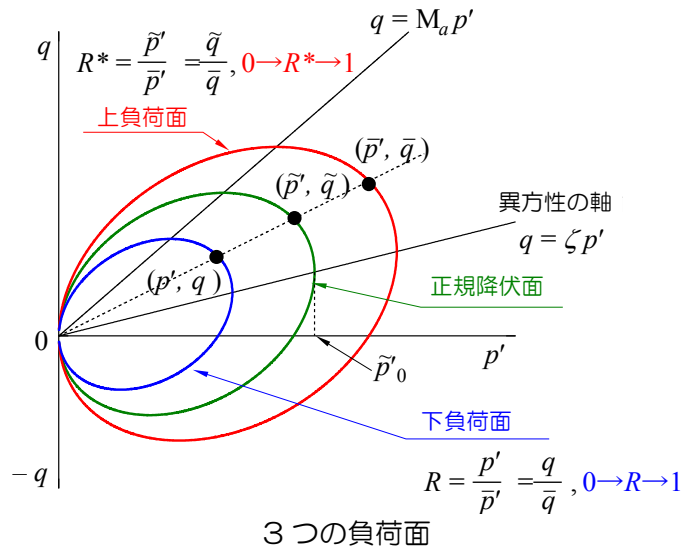
SYS カムクレイモデルでは、3つの降伏面と  $R^*$  と  $R$  という2つの相似比を導入しています。 $R^*$  は構造の攪乱度を表わし、0~1 の間で変化して、 $R^*=1.0$  は完全攪乱を意味します。一方  $R$  のほうは  $1/R$  がいわゆる過圧密比で 0~1 の間を変化します。過圧密が解消すると ( $R=1$ ) 下負荷面は上負荷面に重なります。また、構造が変化する ( $R^* \rightarrow 1$ ) と上負荷面が正規降伏面に重なります。モデル名の“SYS”とは、上・下の負荷面 (Super/subloading yield surface) を指しています。

## ■発展則

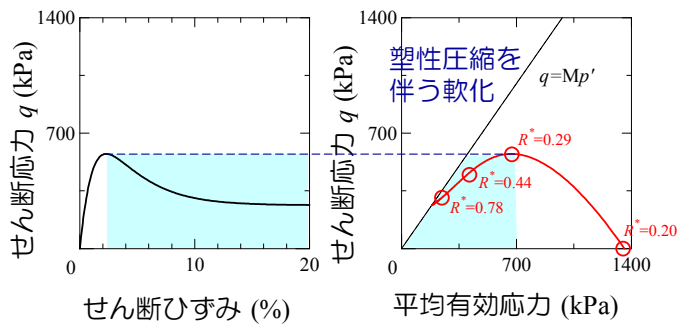
「構造」も「過圧密」も元の状態には戻らない、すなわち塑性変形と共に状態が変化していきます。これを支配するのが**発展則**です。ここでは具体式は省略しますが、その良否が構成則の良否を決定するといっても過言ではありません。あとで述べるように、その土が砂的であるか、粘土的であるかも、発展則が与えます。まさに「生きた土」の構成式研究の中心とも言えます。

## ■動く限界状態線

右の図は、SYS カムクレイモデルで計算した (1) 超過圧密粘土の排水せん断挙動、(2) 構造の発達した正規圧密粘土の非排水せん断挙動です。(1)では、水色で示した部分において限界状態線の上側での硬化、すなわち「塑性膨張を伴う硬化」を、また(2)では限界状態の



(1) 超過圧密粘土の排水せん断挙動

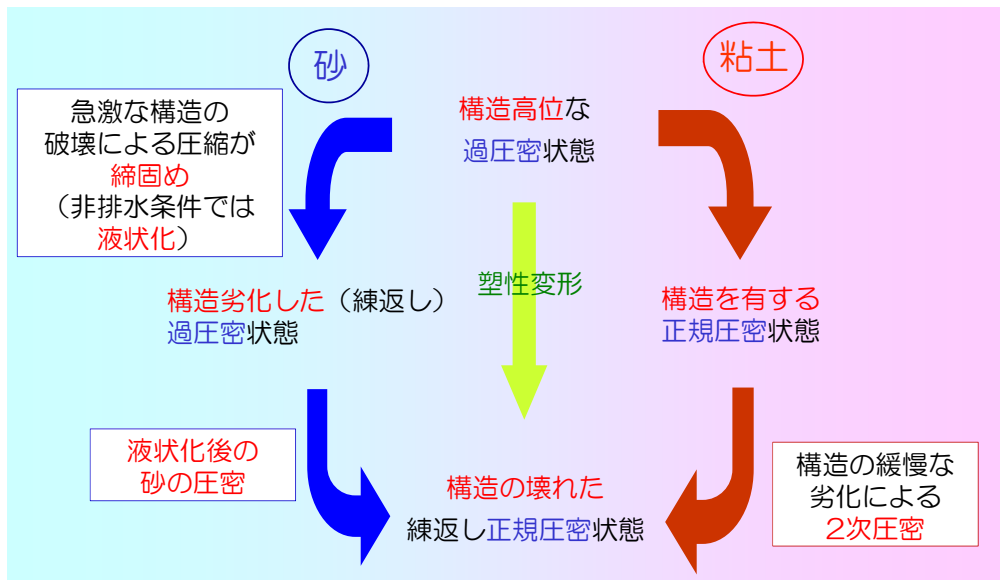


(2) 構造の発達した正規圧密粘土の非排水せん断挙動

下側での軟化、すなわち「塑性圧縮を伴う軟化」を示していることが分かります。カムクレイモデルでは、塑性圧縮/膨張と硬化/軟化の境界（限界状態線）は常に一定のため、このような「生きた土」の挙動を表現することができませんでした。限界状態線の傾きからイメージされる土の定数は内部摩擦角  $\phi'$  ですが、これが、構造が劣化する時には大きく、また逆に過圧密が解消すると小さくなっていくことは、実験的にも確認されています。

## 砂と粘土の違い

土を大きく分類する両極端に砂と粘土があって、その間に粘土の含有量の多寡によって砂質土から粘性土までいろいろあります。いわゆる中間土です。自然界に存在する砂も粘土も過圧密の状態にあるし、また構造をもっています。これに塑性変形を与えていくと、構造が壊れ過圧密がなくなっていくますが、その土が砂的であるか、粘土的であるかは、構造が壊れる方が早いか、過圧密が壊れて正規状態にいくのが早いかでわかります。



粘土ではわずかな塑性変形で過圧密が先に消えて正規圧密状態になりますが、構造を壊そうとすると大変な力で練り返さなければなりません。構造が壊れるときには圧縮側に働きますので、排水のためにとっても時間がかかります。これがいわゆる「二次圧密」と呼ばれるものです。

砂では逆に、わずかな塑性変形で構造はたやすく壊れ、しかし過圧密の解消には大塑性変形が必要となります。急激な構造の破壊による圧縮が「締固め」です。また、締固めが非排水条件で起こると、それは「液状化」となります。さらに、砂の緩慢な過圧密の解消は大変形を起こし、「液状化後の砂の圧密」が起こります。

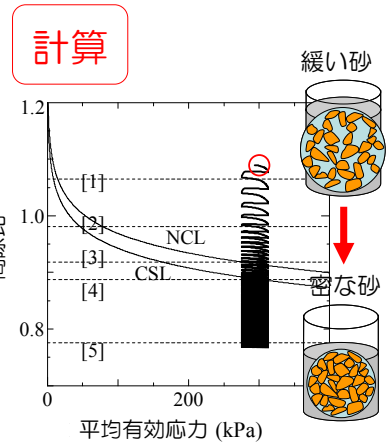
このように、構造の劣化と過圧密の解消のどちらが早いかを発展則で与えることにより、典型的な砂、粘土の挙動を表現することができます。もちろん、構造の劣化と過圧密の解消が同じような速度で進行していく土も想像でき、これらが Clayey sand や Sandy clay などの中間土に当たるでしょう。粘土と砂を明確な 1 つの線で区別することは難しいし、その必要もないのです。

# SYS カムクレイモデルができること

最後に構造や過圧密の発展則の導入によって、SYS カムクレイモデルが「生きた土」の挙動をどのように記述することができるのか、例を紹介しましょう。

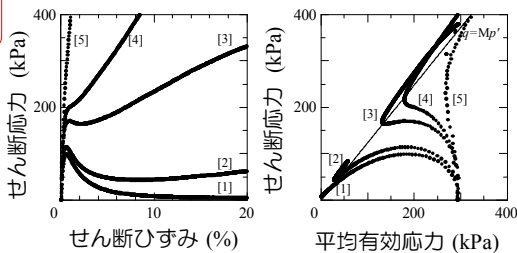
## ■砂の締固め 高密度化

砂は、空隙比の違いで非排水せん断挙動が大きく異なります。緩い砂は軟化して強度も小さく、一方密な砂は硬化をして大きな強度を発揮します。既存の研究では、砂の密度に応じてモデル・材料定数を変えて説明してきました。しかし、SYS カムクレイモデルでは、緩い状態から締固め（繰返し排水せん断）の回数を変えて、密度が異なる砂を作ることで、緩い砂から密な砂までを同じモデル・同じパラメータで説明することができます。下には、実験と計算の比較を示します。



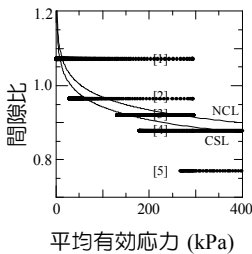
緩い砂の排水せん断（締固め）  
回数が多いほど密になる

実験

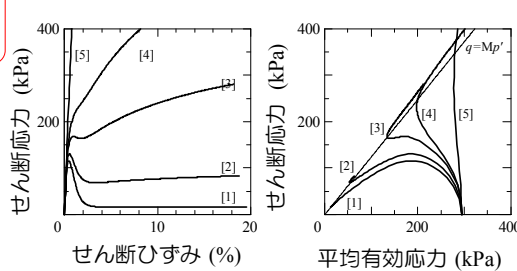


- [1]: 緩い砂
- [2]: 中くらいに緩い砂
- [3]: 中くらいに密な砂
- [4]: 密な砂
- [5]: とても密な砂

すべて同じ砂

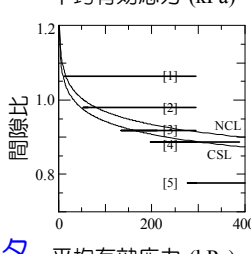


計算



- [1]: 緩い砂
- [2]: 中くらいに緩い砂
- [3]: 中くらいに密な砂
- [4]: 密な砂
- [5]: とても密な砂

同じモデル・パラメータ

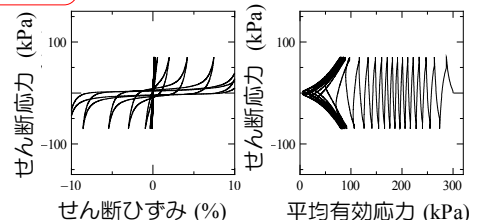


## ■砂の液状化と揺すりこみ沈下

緩い砂を「非排水」条件で繰返しせん断すると「液状化」が起こります。また、液状後に再び「排水条件」に変えると、ブルブルと揺すった後のスーッとという圧密沈下（揺すりこみ沈下）を計算することができます。

砂の締固めと液状化は、排水条件の違いだけで、どちらも「構造の劣化」と「過圧密の蓄積」で表現できるのです。

計算

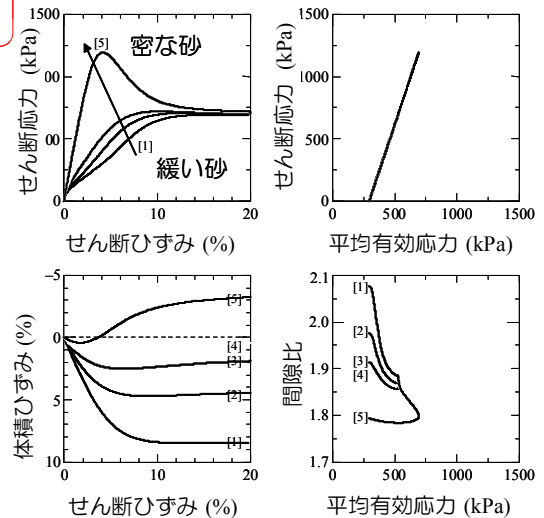


砂の液状化とサイクリックモビリティ

## ■砂の排水せん断

密度が変わると別のモデル・別のパラメータを用意する研究では、共通して砂の「排水せん断」については扱わない傾向が見られますが、SYSカムクレイモデルでは、もちろん同じパラメータであらゆる密度の砂の排水せん断挙動を表すことができます。例として、右の図は側圧一定三軸排水せん断での計算例を示します。

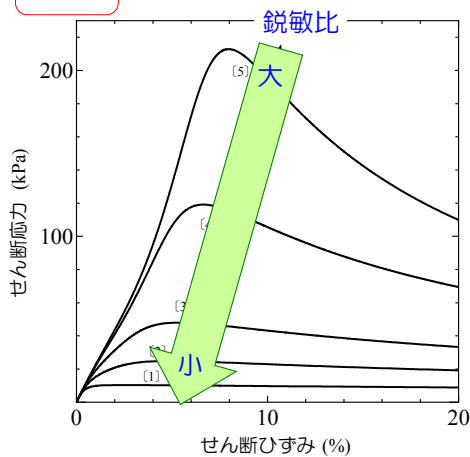
計算



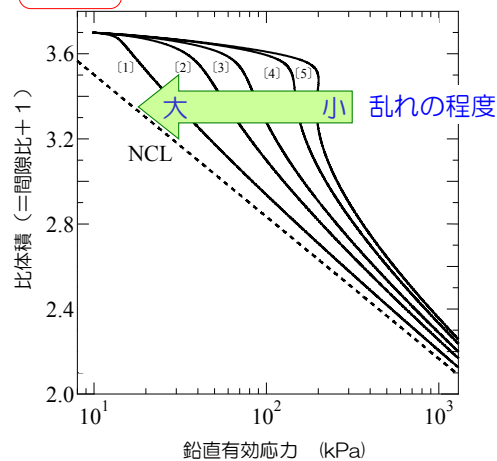
## ■自然堆積粘土の乱れ・鋭敏比

「鋭敏比」は、土の構造の本質にかかわる重要な要素です。試料の乱れというのは、理論と計算があわなくなる最大の原因とされてきましたが、理論的な研究の対象として取り上げられてきませんでした。わが国では、鋭敏比に関する学会の基準もなく、いまだに計る必要がないとさえ言う人が多いのが現状です。SYSカムクレイモデルは、鋭敏比も「乱れ」も理論上大切な話題で、計算にも載ることを明らかにしています。

計算



計算



## 参考文献

### ■骨格構造概念

- 三笠正人(1962):土の力学における構造の概念の定義について, 第17回土木学会年次学術講演会, pp.35-38.
- 三笠正人(1964):土の工学的分類表とその意義, 土と基礎, Vol.12, No.4, pp.17-24.

### ■異方性

- Sekiguchi, H. and Ohta, H. (1977): Induced anisotropy and time dependency in clays, Constitutive Equations of Soils (Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Spec. Session9), Tokyo, p.229-238.
- Hashiguchi, K. and Chen, Z. P. (1998): Elastoplastic constitutive equations of soils with the subloading surface and the rotational hardening, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol.22, pp.197-227.

### ■過圧密

- Hashiguchi, K. and Chen, Z. P. (1989): Subloading surface model in unconventional plasticity, Int. J. of Solids and Structures, Vol.25, pp.917-945.

### ■構造

- Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. (2000): Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp.99-110.
- Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T. and Kaneda, K. (2000): Delayed compression/consolidation of naturally clay due to degradation of soil structure, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.3, pp.75-85.

### ■SYSカムクレイモデル

- Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57.
- Asaoka A. (2003): Consolidation of Clay and Compaction of Sand -An elasto-plastic description-, Keynote lecture, Proc. of 12th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Leung et al. Singapore, Aug., Vol.2, pp.1157-1195.

## おわりに

本誌では、「構造」「過圧密」の働きを中心に、SYS カムクレイモデルの概略をご紹介しました。もうひとつの骨格構造である「異方性」については一寸ややこしくなるので、今回は説明をはぶきましたが、ご興味のある方はぜひ参考文献をご覧ください。

SYS カムクレイモデルを Engine (エンジン) として、慣性力対応の水～土骨格連成の有限変形解析からなる Chassis(シャーシ)に搭載すれば、新しい地盤解析技術 **GEOASIA**<sup>®</sup>(ALL SOILS ALL STATES ALL ROUND GEOANALYSIS INTEGRATION) が動き始めます。こちらについては、別紙でご紹介いたしますので、あわせてご覧いただけますと幸いです。

平成 23 年 10 月 1 日 発行

編集：一般社団法人 **GEOASIA** 研究会 事務局



〒464-8603 名古屋市千種区不老町

名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤工学講座内

TEL: 052-789-3834 FAX: 052-789-3736 E-mail: office@geoasia.jp

URL: <http://www.geoasia.jp>