

土の力学から地盤をつくる力学へ

浅 岡 顕 (あさおか あきら)

名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

1. 講演要旨

飽和土の力学は次の3原理から成り立つ。すなわち、①(土粒子の非圧縮性を前提に)土骨格の体積変化を妨げる束縛力の反力は非圧縮の水が受け持つ(有効応力原理)、②土骨格は塑性体積ひずみを硬化・軟化の履歴パラメーターにとる弾塑性材料である(限界状態理論)、③土中の水の流れはダルシー則に従い、土骨格の体積変化は水の出入りのダルシー則による計量から求まる。①～③は土骨格の体積変化を軸に有機的な連関を持ち、この連関が土質力学に、独立した材料力学としての体系を与える。さてその土質力学の最近の進歩は、幾何的非線形性が境界値問題の計算で自由に取り扱えるようになってきたことに大きく負っている¹⁾。これにより、もともと限界状態理論が示していた構成式レベルでの軟化から、境界値問題での座屈、分岐など、様々の不安定問題が一応は計算できるようになってきた。また下負荷面概念²⁾に代表される“Unconventional plasticity”によって、繰返し負荷あるいは過圧密土の挙動が、限界状態理論は無修正のままで、無理なく記述できるようになっているが、これも、非線形計算の進歩に負うところが大きい^{注1)}。以上でダルシー則が、いつも問題を初期値問題にして、計算の安定に味方していることを強調する^{注2)}。つまり、壊れると思われた地盤がしばらく止まっていたり、またその逆もあったり、土骨格の弾塑性構成式だけでは想像できない「時間軸に沿う」豊富な土挙動が、水～土連成の境界値問題を解くことによって、次々に現れてくるようになってきた³⁾。

ところが土質力学は、人工の完全繰返し土ではなく、「構造」を有する自然堆積土を取り上げているのでなければ、本当の問題に役立つことは少ないと言われる。そして、この観点からなされるとき、限界状態理論(カムクレイモデル)への批判は厳しく、現在では土質力学研究のほとんど譲ることのできない基本動機にさえなっている。実験室で作られた繰返し土では考えにくい、自然堆積土であればこそ付け加わる新しい力学的事項はおよそ以下の3点に要約される。①「原位置」と「室内」

注1) たとえ単調荷重条件でも、軟化などの不安定現象が起こると、地盤内で水は行ったり来たりして、「繰返し」負荷は土質静力学においても必須概念である。

注2) ダルシー則によれば、土骨格の体積変化に必要な間隙水移動は「空間」勾配に依存し、しかも必ず「時間」がかかる。つまり土は、行き過ぎないように、周囲の土と時間とによって絶えずブレーキが掛けられている。

を峻別し、あるいは「乱れ」などの言葉を使って説明される土骨格の構造概念、②二次圧密や tertiary creep、あるいは isotache などのいわゆる時間効果、③堆積環境に由来する土骨格の力学的異方性。さてこれら三つが、実は土エレメントに目を向けた少し偏った要約に過ぎないとするれば、これとは別に、④自然堆積地盤の深さ方向に沿う不均質性、に注目する意見もある⁴⁾。確かに自然堆積地盤はいつも層の中央部で間隙比が高く、排水端ではよく乱れている。有効応力状態も縦方向を除いては均質と言えない。

不均質性は境界値問題に属する結果概念である。自然堆積土ではどのように「構造」が作られまた壊されて、その結果自然堆積地盤はなぜ「不均質」になるのか。必ずしも因果論を求めるのではないが、この二つは二つながら併せて理解できるように土質力学研究が進むのが何よりも望ましい。構造が書けても不均質性、つまりどのような地盤を解いてよいか分からないままであるなら、依然「本当の問題に役立つことは少ない」。

ついでに述べるというのではないが、上記②や③の時間効果や異方性も、構造の変化を水～土連成の境界値問題を解いて調べるときに一緒になって算出されてくる現象なら、①～④は、実は同じことの四つの異なった現れ方として、ずいぶん理解しやすくなる。しかしこれまで、必ずしもそのようには研究は進められていない。現象が複雑なときは、問題を解いて初めて理解することも時として重要である。問題記述の中に始めから答を陽に入れておいては「予定調和」になってしまう。

2. 「構造」が卓越した粘土の一次元圧密

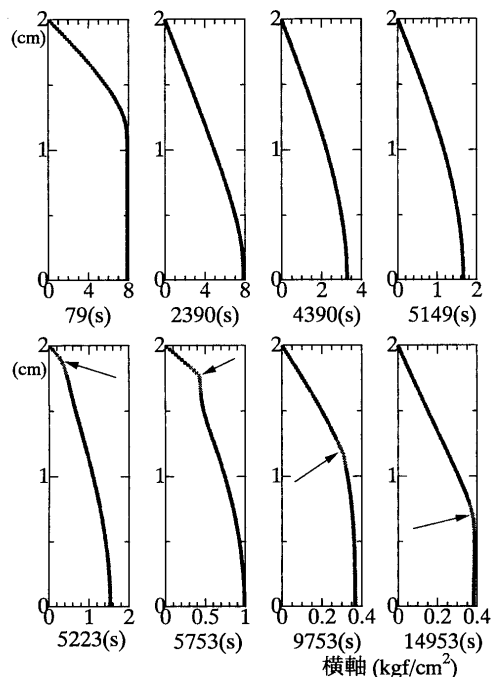
何か例を挙げなければ「展望」もお題目になってしまうので、無理にも例題を考える。

(1) 土骨格の構造と弾塑性構成式

「構造」を持った土はいつもかさ張っているが、繰返し、つまり塑性変形の極限でカムクレイに一致するというなら、最も単純な近似は、カムクレイ降伏面の上にそれと相似の上負荷面を作ればよい。“Unconventional plasticity”の教えるところであって、繰返し負荷にはこの上負荷面に相似の下負荷面を用意する。カムクレイ、上、下、三つの負荷面の相似率の発展則は、塑性変形の進展とともに非可逆だが、構造の程度も過圧密度も塑性変形とともに絶えず高位から低位へ移ってゆく。

(2) ある荷重レベルを越えてから起こる「大沈下」、 「遅れ圧密沈下」や「不均質性」

展 望



図一 1 過剰水圧の湧き出し
(図一 2 8.0 kgf/cm² に対応)

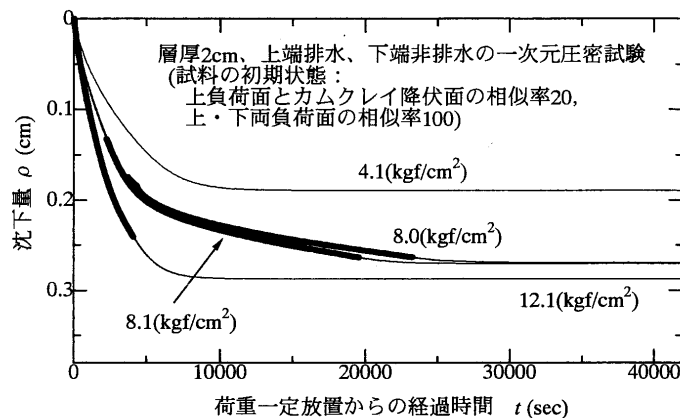
なぜこのようなことが起こるかは以下のように説明される。①一次元圧縮のような低い応力比レベルでも、「構造の破壊」のために「圧縮を伴う軟化」が起こる。②軟化は「圧密係数」が負、つまり間隙水圧の湧き出しを伴う。③間隙水圧の湧き出し域の上下の土では、水圧も引っ張り上げられて除荷が起こる。②③の計算事例を図一 1 に示す。④圧縮による構造の破壊が進展してその領域が再び硬化域に転ずるまでは、間隙水圧は下らない。この間は遅れ沈下が継続する。⑤軟化、除荷、再負荷が繰り返されるため、有効応力径路は土層の上から下まで順に異なってくる（不均質性の発生）。以上の計算事例を図一 2、図一 3 に示す。「二次圧密」のような遅れ沈下は構造の破壊がダルシー則によって時間制御されて起こると理解される。定率ひずみ速度圧密試験のシミュレーションでは、「isotache」も構成式の挙動ではなく水～土連成の効果として自ずと現れてくる（図一 4）。

3. おわりに

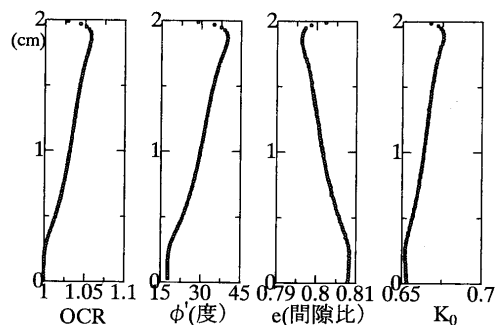
斜面安定が難しいのは、安定解析が難しいのではなく、今ある斜面の力学状態を正しく与えるのが難しいからである。しかしこれは何も斜面安定に限ることではない。どのような土からなるどのような地盤を解くのかは、ほかの誰かが与えてくれるなどというものではない。これをいくら待ち望んでも、ほかから与えられる限りその性質は自ずと限度がある。土質力学自身の研究課題として、自ら地盤を作り出すくらいの姿勢が何よりも必要である。他分野への情報発信もこのようにして可能であって、開かれた土質力学のために重要なことと考えている。

参 考 文 献

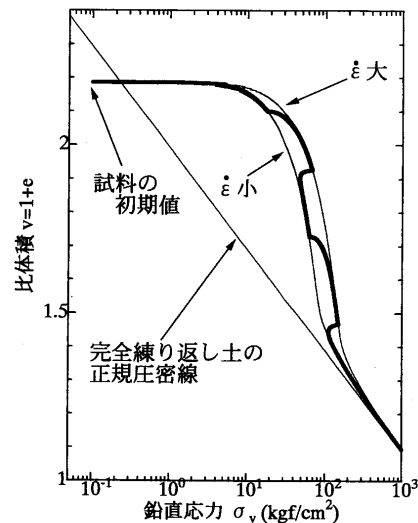
- 1) Yatomi, C. et al.: General theory of shear bands forma-



図一 2 大沈下、遅れ圧密沈下の計算
(太線域で過剰間隙水圧の湧き出しを観測)



図一 3 不均質性の生成
(層厚 2 cm, 放置荷重 8.0 kgf/cm²)



図一 4 計算された見掛けの「isotache」

tion by a non-coaxial Cam-clay model, 地盤工学会論文報告集, Vol. 29, No. 3, pp. 41~53, 1989.

- 2) Hashiguchi, K. and Ueno, M.: Elastoplastic constitutive laws of granular materials, Constitutive Equations of Soils, (Proc. Spec. Session 9th Int. Conf. SMFE, Murayama, S. and Schofield, A. N. Eds.), Tokyo, JSSMFE, pp. 73~82, 1977.
- 3) 例えば, IS-Nagoya '97 proceedings 参照.
- 4) 三笠正人・高田直俊・大島昭彦・木山正明: 不均質粘土層の圧密沈下予測と実測, 土と基礎, Vol. 45, No. 2, pp. 27~29, 1997.

(原稿受理 1998.8.21)