

京都大学工学部 正会員 足立紀尚

1. 土質力学と構成式

“土質力学とは土質材料(地盤)の力学的挙動の理論ならびに応用科学であり、その物理的環境のもとで力学的場に対する土質材料(地盤)の反応に關する力学の一分野である”¹⁾という定義を認めるから土質力学が土質工学において果た役割の重要性が理解できる。なお土質力学から土質工学の一連の流れは以下の各項目の有機的結合から成っていると考えよう。すなわち、^{2), 3)}

(i) 土質材料の構成式の確立

(ii) 初期値・境界値問題の解析手法の確立と解析

(iii) 現場計測手法の確立と計測

(iv) 設計、工法に対する指針の確立

であり、これらは互いに独立したものではなく密接な関係にあって同じ *feed back* 系を構成するものである。

まず構成式であるが、これは同一形状、同一寸法にある粘土と鉄が同一の外作用を受けることと異なる反応を示す事実にもとづき、その材料の作用-反応の熱力学挙動を規制する材料の力学特性式と考へたらしい。土質力学が他の材料力学と異なる由縁はその構成式の差異にあると云っても過言ではなく、土質力学の主柱でもある。

ついで必要なのは対象とする土構造物の境界ならびに初期条件の設定である。とくに境界条件の設定は地質力学(土質、岩盤力学)における今一つの重要な問題であり、等価領域の設定なども含んでいる。したがって、ボーリングや物理探査などによる情報の総合とこれに判断に依存する。対象とする問題において、構成式が求まり境界値問題として設定されれば残るは数学的解析となる。しかし、いかなる問題でも数学的に厳密に解析されるだけでなく、複雑な境界条件に用いる構成式によっては有限要素法など近似解法によらざるを得ない。とくにここを留意すべきことは得られぬ解析解の値は用いる構成式や設定した境界条件の値以上のものであるといふことである。

さらに以上の構成式ならびに境界値問題は実際の現象と数式的場で論ずるものであって、逮捕すべき犯人を捜す者ではなくモンタージュ写真に例えるべくカワビという認識である。将来より良いモンタージュ写真をつくる技術を開くために犯人を捜す者、すなわち実際の土構造物の挙動を計測することの重要性を強調したい。ここに現場計測手法の確立により、構成式と境界条件の設定へ *feed back* 系を構成する意義がある。

以上の基本項目にもとづいて、対象構造物の挙動を推定し、最も適した設計、施工ならびに施工管理を行うことが土質力学が土質工学において果た役割であろう。

構成式という述語が次に土質力学でも定着し、2年後の東京で行われる国際会議では *speciality session* 一つに決定している。しかし、前述した通り構成式はモンタージュ写真であって、あくまで虚像であることを充分認識して、主要項目の一つとしてバランスとれぬものが要求されるということである。我々は近年、粘弾-粘塑性何と後述した正規圧縮、逆圧縮粘土と軟岩の構成式を提来している。^{4), 5), 6)} その諸事においてかなり類例の後述のものとで行い、三次元テンソル表示を行っている。これはむしろ境界値問題への適用を常に念頭においているためであって、モンタージュ写真が本来、本来はあっても方向は正しいものと考へている。なお今一つ常に強調しているのは時間依存性挙動の重要性である。通常土質力学で扱う時間の入った問題は左側の現象である。前述の問題は右側の問題では時間まで含めてどれだけの値があるかの議論が多いことであろう。しかし、この時間依存性挙動をこれら地質材料が呈することこそ、有意な施工管理を行うための根拠である。軟岩でも明らか⁷⁾に、栗田が粘土で見出した破壊に直結する時間依存性挙動を示し、そのずれの速度を計測することによって構造物の破壊

が予測されれば直ちにその対策が行いうることになる。この時間的余裕は材料が時間的依存性をもつからであって合理的設計、施工の一つ大いに留意すべき事象である。これが粘弾塑性係と仮定した構成式・確立の意義であり、他方この時間依存性挙動の主眼は計測機器の用途、使用にも力を入れている由縁でもある。

2. 弾-粘塑性係とそれによる粘土の構成式・概念

Perzyna⁷⁾の粘弾塑性理論のもとに、正規圧密粘土の構成式とその静的挙動がRoscoe⁸⁾の critical state energy theory⁹⁾によるものと仮定して誘導した。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\alpha \sigma_m' \dot{\epsilon}_{ij}}{3(1+\nu)\sigma_m'} + \frac{\dot{\sigma}_{ij}}{2G(e)} + \gamma(\theta) \Phi(F) \left\{ \frac{\dot{\sigma}_{ij}}{M^2 \sqrt{J_2}} + \left(1 - \left(\frac{\sqrt{J_2}}{M^2 \sigma_m'}\right)\right) \frac{\dot{\sigma}_{ij}}{3} \right\} \left(\frac{\sigma_m'}{\sigma_m'}\right) \quad (1)$$

式の詳細は文献に示すが、右辺第三項が時間依存性挙動を記述し、その $(1 - (\sqrt{J_2}/M^2 \sigma_m'))$ がグレイゲン-効果を表わしている。Perzynaは静的降伏関数と動的降伏関数があり、その差は超過応力関数 F で次のように定義している。

$$F = f_d/f_s - 1, \quad \text{すなわち } f_d \text{ 動的降伏関数, } f_s \text{ 静的降伏関数} \quad (2)$$

この式の基本概念は図-1のレオロギカルモデルと同一である、すなわちその数学表示は次式となって(1)式と相関は明らかである。

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{(\sigma - K)}{\eta} \quad (3)$$

すなわち粘弾性挙動は超過応力 $(\sigma - K)$ によるが、一般に塑性抵抗は必ず硬化による変化を受ケユに粘弾性ひずみ速度と超過応力との関係は非線形である。Perzynaはその双方を加味して超過応力関数 F と $\Phi(F)$ の二項関数で与えた。図-2は静的ひずみ-動的応力関数と図示し、その差はひずみ速度の效果に及ぼすことを示している。

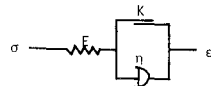


図-1

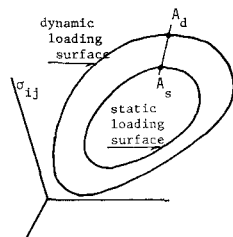


図-2

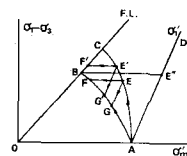


図-3

さて、この方程式の意味するところを定性的に説明してゆこう。図-3には粘土の有効応力経路を軸圧縮三軸圧縮試験結果に対して示している。まず供試体は A から等方圧縮され、排水せん断されたとすれば AD の経路をとる。他方、非排水条件では AB がひずみ速度 0 に相当する静的応力経路、 AC が定ひずみ速度せん断に対する動的応力経路とする。クリープ試験では、例えば AC から E まで前荷すると時間とともに σ_m 軸に平行に移動して F で平衡状態となるが、 E から土質すると critical state 線上の F に達しクリープ破壊をすることになる。他方、応力緩和試験では E から土質して σ_m 軸に平行に変化して AB 上の G 、 G' に達することになる。

参考文献

- 1) (C.G.) Rock Mechanics in Engineering Practice, Edited by K. Stagg & O. Z. Zienkiewicz, P.1, 1968
- 2) 池田, 足立, 岩崎, "粘弾塑性による岩盤工学へのアプローチ", 第9回国土工学研究発表会, 1969/1974
- 3) 池田, 足立, 岩崎, "岩盤の時間依存性挙動による岩盤工学へのアプローチ", 土木学会論文報告集掲載中
- 4) 足立, 岡野, "A constitutive Equation for normally Consolidated Clays, Soil and Foundations, Vol. 44, 2, 1974
- 5) 赤井, 足立, 西, "軟岩のクリープ特性", 第10回国土工学研究発表会, 1975
- 6) 赤井, 足立, 西, "完全粘弾塑性係と粘土の構成式について", 土木学会年次学術講演会, 1975
- 7) Perzyna, "The Constitutive Equations for work-hardening and rate sensitive Plastic materials," Proc. Vibrational Problems, Vol. 4, 3, 1963
- 8) Roscoe, Burland "On generalized stress-strain behavior of wet clay," Eng. Plasticity, 1968.