

Ⅲ—15 土の変形と破壊について

東京大学生産技術研究所 会員 星 整 和

土は固体的な土粒子の集合体からなる骨格を有し、その間隙は液体と気体の混合物である流体によって満ちていると考え、外力の作用によって生ずる応力は骨格に加わる有効応力と流体に加わる中立応力すなわち間隙圧に分けられ、間隙流体の流動によるこれら応力の時間的変化に着目して、土の変形と破壊の問題を取り扱うようになっては土の力学の最近における基本的でかつ重要な進歩の一つで、一般にも広く受け入れられるに至った。

固体、液体、気体の三相が共存する場合、力学的にそれぞれが独立して挙動するとは限らない。例えば圧力と温度の変化によって気体が液体に溶けこみあるいは液体から遊離することがあり、固体もまた液体にとって溶液となり、あるいはコロイド分が液体とゾルまたはゲルと形作ることもあり、固体の界面における電気化学的な現象もまた土の力学的特性に無視できない影響を与えるであろう。土とくに粘土の変形の時間的経過に関連して液体と気体の混合物、溶液またはゾルが間隙中を透過する速度すなわち透過係数は重要な因子となりうるであろう。

三相について別々にそれぞれの力学を適用し、これらを組み合せて土の力学を組み立ててはいかようなかは一応よく検討しに上で決めるべき問題であろう。砂質土の場合に乾燥試料の力学的特性は役に立つかも知れないが、粘土の場合は無意味なものかも知れない。

土粒子骨格を単に固体粒子の集合とみなして、固体力学ないしは粉体力学を適用してはいかようなか慎重に決定しなければならない。微細な粘土粒子の界面では電気化学的な力が存在し、これに液体分子が結合して半固体状の蒸膜として介在するため、骨格の変形は外力の作用しにあと時間とともに進行し、終極においてある釣合い状態に達するであろう。飽和した粘土の変形が外力を一定に保っておいても時間とともに進行する場合に、骨格自体の流動的な変形と間隙流体が移動し間隙圧と有効応力を変化させることによって生ずるいわゆる圧密による変形とを区別すべきであろう。

土粒子骨格においては固体的な性質が支配的であろうとの考えから、弾性理論を援用しようとするにはある程度容認できると思われるが、多くの実験による事実を総合すると、実際に起ると思われる応力変化の範囲内で弾性的とするには程遠く、応力の微小な変化によるヒズミも弾性的とは考えられない。圧縮と引張りによって生ずる、応力の経路によってもヒズミが異なる。ヒズミの発生が時間的に遅れることも認められ、またせん断応力が体積変化に影響を与えることも認められる。

ヒズミの発生に時間的遅れがある場合に応力の経路がまわっていれば最終の状態では応力とヒズミが1対1で対応すると考えてよいと思われ、応力変化の途中における経路が変ればヒズミの値が変ることも弾性変形ではないかより当然なことであろう。

土が破壊する時の条件を与えるクーロンの公式には中間主応力が含まれてはいないが、金属については、中間主応力が影響することは実験的にも確かめられている。初期における

土の変形が主応力によって左右されることは明らかであるのに、終極における土の破壊が中間主応力に無関係であるということは理論的に考えられにくいように思う。

圧縮応力が単調に変化し、その経路が与えられていると、応力と土ズミが1:1で対応するものとして、弾性法則が適用できるとすると、どのような法則が考えられるであろうか。

この問の答えを出すに当って、根據となる実験的裏付けは直接せん断試験によって得られる見込みは薄く、三軸圧縮試験も完全なものとはいえないが、まず信頼するに足る結果を与えるように思われる。著者の研究結果をよとめると

主応力が等しい純粋圧縮の下で起る体積変化は次式で与えられる。

$$-\log_e(1-\epsilon) = \frac{\sigma_0}{V_0} \log_e\left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \quad \text{または} \quad 1-\epsilon = \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{-\frac{\sigma_0}{V_0}}$$

ここに ϵ : 単位体積あたりの体積変化すなわち体積変化度

σ : 一様な圧縮応力

σ_0, V_0 : 初期における内部圧力と体積圧縮係数を示す定数

$\frac{\sigma_0}{V_0} = 1$ ならば $(\sigma_0 + \sigma)(1-\epsilon) = \sigma_0$ となり(圧力) $\times$ (体積) = 一定すなわち気体におけるボイルの法則に一致する。この関係は体積圧縮係数が圧縮エネルギーに比例すると仮定して導かれる。

主応力が等しくない場合は、正八面体応力の垂直成分と接面成分が同時に変化するか、まず垂直成分が不変で、接面成分のみが変る純粋せん断の場合について、ねじり変形係数がねじり変形のエネルギーに比例して減少すると仮定して、理論式を立て、さらに一般に両成分が同時に変化する場合にエネルギーの総和が応力の値のみに関係し応力の経路に無関係であるとして、変形破壊に関する一般理論式を導き出した。

その後接面応力によって生ずる体積変化の項を加えて、一般理論式を改良した。

これらの理論式を三軸試験条件に適用して実験結果と照合した結果は、ある種の土では破壊に至るまで体積変化もねじり変形もよく一致することと明かにした。しかし破壊直の近くで、かなり大きな開きが認められることがあり、その主な原因は土粒子骨格が破壊されて粒子間に大きなスベリを生じ、加えられるエネルギーが摩擦による熱損失となるためと思われる。変形の最終段階において一定応力の下で体積変化は終り、粒子間のスベリによるねじれ変形だけが進行する完全な塑性変形の領域に入る。この状態の始まる又は最大応力に達する点とは必ずしも一致せず、むしろ最大応力の点ではなお体積の変化が進行中であり、この点を越えてからあつて始まることが多い。

急速載荷条件の下で飽和に近い土の間隙流体に生ずる中立応力を求める公式を導びき、電子計算機による計算結果と実験と照合してかなりよい一致を得た。せん断応力が体積変化に及ぼす影響は飽和に近い土の初期間隙圧を左右し、破壊直附近における土粒子間のスベリによる体積変化も変形と破壊に大きな関連を有するので重視してほしい場合が多い。

参考文献

Hoshino, Kano: An Analysis of the Volume Change, Distortional Deformation and Induced Pore Pressure of Soils under Triaxial Loading. Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 1/26. (1961)