

III-118 エネルギー概念からみた堆積土の力学特性

東海大学 正 福江正治、正 大草重康

1. まえがき： 堆積土の力学特性は一見複雑であるが、それが法則に基づいているであろうということは経験的に想像がつく。例えば、 $e - \log p$ 関係には特定のパターンがあるし、正規圧密粘土ではその非排水せん断強度が深さにほぼ比例する。また、圧縮指数は初期（自然）間隙比に依存し、両者にはほぼ線型関係があるという事実はよく知られている。これらの経験的事実はエネルギー概念を用いて理論的に導くことができる。これについては既に部分的に発表している¹⁾²⁾³⁾。

2. 相対エネルギー概念および基本構成式： 一般に堆積地盤を特性づける要素として、(a) 間隙比、(b) 圧力および(c) 粒子間相互作用力の3つが挙げられる。したがって、例えば $e - \log p$ 関係が土の種類によって異なるのは主に粒子間相互作用力が異なるためと解釈できる。ところが、間隙比は粒子間距離を代表する値であり、圧力は間隙比に左右されるから、上記の3つの要素には特定の相互関係がなければならない。基本的には、間隙比-粒子間相互作用力の関係がわかれば、間隙比-圧力-粒子間相互作用力の関係は決定できる。そのためには、幾つかの仮定が必要となるが、1つの圧縮過程からなる全ての状態を含むエネルギー系を考えさえすればよい¹⁾。その結果、次の基本式を得ることができる。

$$\frac{\bar{M}}{\bar{M}_0} = \frac{\bar{e} - e_c}{e_0 - e_c} = \exp(-\beta Z) \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 β はパラメータ、 Z は深さ、 $\bar{e}$ は表面から深さ Z までの土要素の平均間隙比、 e_c は表面から、 $Z = \infty$ までの土要素の平均間隙比、 e_0 は表面間隙比、 $\bar{M}$ は相対エネルギー (βZ) におけるマイクロシステム（又は仮想的）な粒子の数、 $\bar{M}_0$ は相対エネルギーが0の時の仮想粒子の数である。仮想粒子の大きさはパラメータ β によって決まる¹⁾。すなわち、(1) 式は、仮想粒子のカノニカル分布を考えていることになる。換言すれば、カノニカル分布をとるようにエネルギー系を考えたことになる。平均間隙比 $\bar{e}$ と実際の間隙比 e の関係²⁾を用いると、次式を得る。

$$\frac{e - e_{\min}}{e_0 - e_{\min}} = 0.119 + 0.881 (1 - \beta Z) \exp(-\beta Z) \quad \text{--- (2)}$$

ここに、 $e_{\min}$ は考えている系の最小間隙比である。仮に $e_{\min}$ は一次元圧縮における最小間隙比としておく。言い換えれば $e_{\min}$ は圧縮指数が0となる間隙比である。ここで、(2) 式は初期間隙比 e_0 から $e_{\min}$ まで圧縮される過程 (e で表す) が (βZ) によって表され、土の種類が β で表される。以後 $E = \beta Z$ とし $\bar{E}$ を平均系における相対エネルギーと呼ぶ。ここで重要なことは、土の圧縮途中でエネルギー系が変化しなければ、 β がほぼ一定となるという経験法則（圧縮法則）²⁾が存在するということである。しかしながら、圧縮途中でエネルギー系が変化すると β は変数となる⁴⁾。

3. 自然圧縮とサンプルの人工圧縮： 強く結合した土を人工的に圧縮すると、その結合が壊れ、圧縮途中でそのエネルギー系が変化する（ボンディングエネルギーの減少）。この過程は結合を有する土系からそれを有さない土系への変化と考えることができる。すなわち、全エネルギーで考えると、人工圧縮は次の不等式で表現できよう。

$$E_{TD} < E_T < E_{TC} \quad \text{--- (3)}$$

ここに、 E_{TD} = 乱した状態での全体系の全エネルギー、 E_T = 人工圧縮下での系の全エネルギー、 E_{TC} = 結

合を壊さない状態での系の全エネルギー。ここで考えている系は e 。から e_{min} までの全ての状態から構成されるものである。もし、土が圧縮中に常に乱した状態なら $E_{TD}=E_T$ となり、状態変化によるエネルギー変化は(1)又は(2)式で表せる。同様に $E_T=E_{TC}$ ならばその系においても β は一定となるであろう。すなわち、 β が一定となるのは、系の全エネルギーを一定とする仮想粒子のカノニカルアンサンブルを考えた場合かも知れない⁵⁾。ここで、重要な疑問は自然圧縮と人工圧縮が同じかどうかということである。1つの仮説は、Fig. 1に示すように、自然地盤では人工圧縮のような顕著なボンディングエネルギーの減少は起こらないということである。すなわち、自然圧縮下でその系は一定の全エネルギー E_{TC} を有し、その圧縮過程は一定の β で表現できるというものである。もし、この仮説が正しいなら、自然地盤の評価は極めて簡単になる。ただし E_{TC} は e 。に依存する可能性が極めて強く、そのため β も e 。に依存する⁴⁾。このことは、土の初期構造依存性を示すものである。

したがって、均質地盤から採取したサンプルであっても採取深さが異なれば当然別の種類の土と考えなければならず、サンプルをもって自然地盤の評価を直接行うには無理がある⁴⁾。

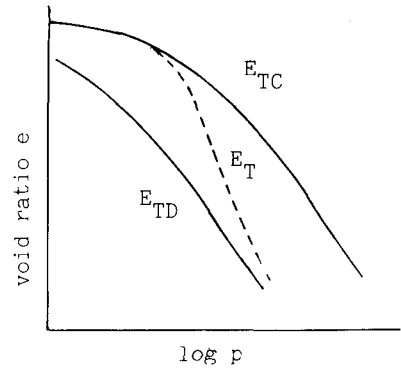


Fig.1 Hypothetical e -log p curves in natural and artificial compressions.

4、非排水せん断強度： 以上に述べたように、間隙比や有効応力を相対エネルギーで表すことは可能である。また、相対エネルギーが粒子相互作用力に基づくものであることを考えれば土の強度も相対エネルギーで表せるであろうことは想像がつく。現時点では準理論的にそれを導くのは難しいが、経験的事実からは明らかである。例えば、正規圧縮密度において S_u/p が一定となるのはよく知られている。すなわち、非排水せん断強度 S_u は有効応力 p の関数であり、さらには p は相対エネルギーの関数である。したがって、 S_u は相対エネルギーの項で表すことができる⁶⁾。

5、あとがき： 土が複雑な粒子構造を有し、その構成粒子も極めて多様であるのは事実であるが、その巨視的力学挙動はある1つの仮想的粒子で代表される粒子群とある1つの微視的構造（粒子間相互作用）のみによって表せそうである。基本的には仮想粒子のエネルギー分布を仮定することで、土の一次元圧縮が極めてうまく説明できる。この報告で述べたアプローチは、いわゆるDLVO理論に代表される物理・化学的方法や純粋に統計力学に基づくマイクロメカニクスとは異なっている。したがって、基本的に確立された理論的裏付けがあるわけではないが、他の方法に比較して現時点で工学的応用にまで結びついているという利点があることを記しておきたい。

6、参考文献

- 1) 福江, 大草, Yong, (1987) 土におけるエネルギー概念、第22回土質工学研究発表会
- 2) Fukue, Okusa, (1987) Compression law of Soils, Soils and Foundations, Vol.27, No. 1, 53-64
- 3) Fukue, Yoshimoto, Okusa, (1987) General characteristics of upper soil sediments, Marine Geotechnology, Vol.7, 15-36
- 4) 福江, 他, (1986) 一次元圧縮法則に基づく原地盤の e -log p 関係の予測、第31回土質工学シンポジウム
- 5) Reif, (1965) Fundamentals of Statistical and Thermal Physics, McGraw-Hill
- 6) Fukue et al, (1987) Evaluation of sediment profile in terramechanics, 9th Int. Conf. for Terrain-Vehicle System, Barcelona, Spain