

III-14 土の力学における構造の概念の意義について¹⁾

大阪市立大学工学部 正員 三笠 正人

1. まえがき

土の力学的性質は非常に複雑であるが、Terzaghi 以来の実験的研究の積み重ねにより、多くの事実、あるいは法則が明らかになってきた。しかしこれらを一貫して解釈するための基本的な考え方、むづかしく言えば指導原理というようなものが無いため、それらの成果もいくらか断片的な知識の集合というに止まり、これが土質力学の学習をいちじるしく妨げているように思われる。筆者はかねがね土の力学的性質を統一的に理解するために、「構造」の概念²⁾をとり入れるべきことを痛感していたが、こゝにその考え方のあらましを述べて各位の御検討をお預けしたい。なほレオロギー的な面の考慮を省くなど、ほんの骨組だけのプリミチブな構想であることをお断りしておく。

2. 土の構造について

土の力学的性質はその種類と状態によつて定まる。²⁾ 状態としては密度、含水量、骨組構造の様式、応力状態、温度が考へられる。温度はレオロギー的な性質に影響するが、いまは簡単のため考へない。次に応力状態は、はじめの3要素と独立でなく、その関数として定まるものである。なぜならその3つは土の空間的、あるいは可視的な状態を決定するが、土粒子は剛体でなく弾性体であるから、同じ土が全く同じ可視的な状態であれば応力状態もまた同じでなければならぬからである。そこで結局

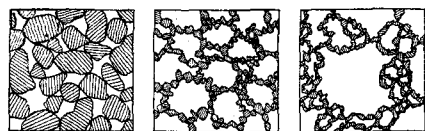
$$\text{応力状態 (たとえば 断面積の有効直圧 } \bar{\sigma}) = F_1(\text{土の種類; 密度, 含水量, 骨組構造}) \cdots (1)$$

$$\text{力学的性質 (たとえば 断面積強度 } s) = F_2(\text{土の種類; 密度, 含水量, 骨組構造}) \cdots (2)$$

という関係が成立する。¹⁾²⁾ ところが骨組構造の内容は非常に複雑で到底ひとつやふたつの変数で表わすことはできないようである。最上教授がかつて提唱された岡ゲキの不等性³⁾は確かにその重要な一指数であろう。また鋭敏比も実

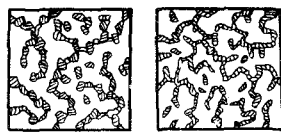
用的に構造の度合を示す一指数と言へる(2)式により)。しかし強度以外の性質についてもまたそれぞれの鋭敏比が考へられるわけであり、またたとえば異方性はこれらの指数では表わされたり構造の様式⁴⁾のひとつである。このような複雑な骨組構造を包含した(1), (2)のような関係が、そのまゝいろいろ力

学的性質についての定量的な法則となり得ないことは当然であるが、しかしこれらの式は少なくとも土の性質に関する定性的な考え方の基準としては欠くことのできないものであり、この関係を無視して一足とびにキレイな定量的な原理内包は一般法則を見出そうとする所に今までの多くの研究の無理があったこ



(a) 単粒構造 (b) 群集状構造 (c) 網目構造

図-1 乱さない土の構造 (Terzaghi & Peck)



(b') (c')
図-2 ねかえり土の構造 (想像図)

とき、筆者は主として粘土のセメントと圧密に関するこれまでの研究を通じて確信するに至った。以下小つうの力学的現象に関して具体的に説明するが、先ず便宜上図-1(b), (c)のような密結した構造を高位の構造、図-1(a), 図-2(b)', (c)' (図-1(b), (c) を重ねたもの、想像図) のような均一に近い構造を低位の構造と呼ぶこととする。もちろん不完全な定義であるが、ある程度役に立つのである。

3. 圧縮について

- a) 弾性圧縮と塑性圧縮：(1)式において骨組構造一定のまゝ $\bar{\sigma}$ を増して密度を高めるのが弾性圧縮、逆に骨組構造を変化(低位化)することによって同じ $\bar{\sigma}$ に対しても高い密度が対応するようになるのが塑性圧縮である。(これはむしろ骨組構造の定義の一部で見られる)
- b) 締め固め：ふつうこれは高密度化という観念だけから見られてゐるが、実は土の構造を人為的に乱して低位化することによって密度と強度(cf. 4. c))を増すという点が大切なポイントである。(構造を壊さぬ弾性圧縮は一時的なもので土質改良にならない。)振動、衝撃、繰返し圧縮、何れもそのための手段である。
- c) 圧密：粘土は圧密特性に関して正規圧密粘土(図-3, 10a)と、先行圧密粘土(10b)に区別され、これを分けろのが先行荷重(10)ということになつてゐる。ところが現象そのものに則して考えれば前二者は構造の変化(低位化)をともなう非可逆的な圧縮が否かに相違点があるから、その意味でこれらをそれぞれ塑性圧密粘土、弾性圧密粘土、その境界の荷重を圧密降伏荷重と呼ぶのが自然である。この圧密降伏荷重が必ずしも実際に受けた先行荷重と一致しないことが最近注目されてきたので、内容に合致した名称に変えて混乱を避けることが必要である。

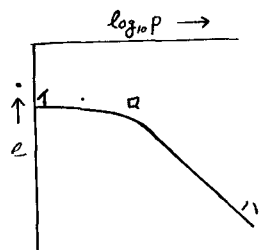


図-3

4. セメントについて的一般法則

- a) 限界間ゲキ比と限界圧力：定常セメント(状態が平均的に変化しないまゝで進行するセメント)においては、構造は少なくとも $\bar{\sigma}$, あるいは密度の関数として定まるから、(1)式から密度(含水量)と $\bar{\sigma}$ とは一定に対応する。これが与えられた $\bar{\sigma}$ に対する限界間ゲキ比 e_{cr} を、また与えられた間ゲキ比 e に対する限界圧力 $\bar{\sigma}_c$ を定めるものである。(理想化された定義なので、砂では問題が残る)
- b) ダイレタシー：土がセメントを受け、初期の状態から最終の定常セメントの状態まで進む間に、一般に構造は変化を受けるので、(1)式により $\bar{\sigma}$ 一定なら(等圧セメント; ふつうの言う排水セメント)密度(含水量)が増減する。密度(含水量)が一定なら(等体積セメント; ふつうの言う非排水セメント) $\bar{\sigma}$ が増減する。これがダイレタシーの本質的な内容である。⁶⁾⁷⁾(三次元的に考えれば $\bar{\sigma}$ の代りに平均有効圧力 $\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ を用いた方がよい。いずれにせよこのことから粘土の間ゲキ永圧に関する Skempton の入-理論の誤りが明らかである。⁶⁾)
- c) 強度の大小(その一)：同じ応力状態、下では、よく締った低位の構造のものほど強

い。それはせん断するとせん断構造を高めねばならないからである(ダイレタンシーが正)。(ふつうこれを土粒子の噛み合せとして説明している。) 力学的な土質改良はすべてこの原理にもとづくものである。(cf. 3.のb), c)

- d) 強度の大小(その二): 逆に同じ密度, 含水量の下では高位の構造のものほど強い。それは土粒子間の詰むつき、あるいは有効圧力 $\bar{\sigma}$ が大きいためである。構造の発達したダイレタンシー質の土は鋭敏比が1以上で、同じ密度のまろ軟土と弱くなる。

5. 強度理論について

- a) 強度論の困難: ダイレタンシー正の土が等圧せん断をするとき、およびダイレタンシー質の土が等体積せん断をするときは、定常せん断に到る以前に強度のピークが出る。このときはその過渡的な状態における潜在的なせん断強度をフルに發揮しているかどうかは疑問があり、そのため本質的な強度論を定量的に展開することは困難である。
- b) Hvorslevの説: せん断強度が密度(含水量)によって定まる真の粘着力 C_e と、有効圧力 $\bar{\sigma}$ によって定まる真の摩擦力 $\bar{\sigma} \tan \phi_e$ との和であるとする Hvorslevの説は

$$\text{せん断強度 } S = f(\text{土の種類; 密度(含水量), 有効圧力 } \bar{\sigma}) \dots \dots \dots (3)$$

という形で4. c), d)の内容を定量化したものであるが、この式は(1), (2)式から「骨組構造」を消去した形になっている。(あるいは(2)式の骨組構造を代表する量として $\bar{\sigma}$ を持ってきた、と考えてもよい。)⁸⁾ もし骨組構造がひとつの変数で表わされるような単純なものならばこれは許されるが、実際はそうでない。各種の応力履歴による複雑な構造の変化過程における $\bar{\sigma}$ と S との対応関係を唯一ひとつの(3)式で表わすのは原理的に無理で、実験データもまたそのことを示している。⁸⁾

- c) Geotechnique 学派の方法: 最近 Geotechnique 学派によって開発された「有効応力に関する見かけの強度係数 C', ϕ' を用いる安定解析法」^{9) 10)}はもっと簡単に

$$\text{せん断強度 } S = f'(\text{土の種類; 有効圧力 } \bar{\sigma}) \dots \dots \dots (4)$$

と表わそうとするものであるから、原理的には到底無理な感じで、実際に詳しく検討してみると多くの弱點が目につくのである。

- d) 強度の求め方: 構造を考える立場からは、上の(3), (4)のようなクーロン式の形で強度 S を一義的に表現することは原理的に望めない。結局実際と同一の応力履歴と排水条件を与えたせん断試験によって、それぞれの場合に対する強度係数 C, ϕ を求めるという以前から行なわれてきた方法によるほかはない。もっとも試料の乱れなど、せん断試験にともなう諸困難のため、むしろ実用的な意味で(4)式の意義が認められる場合があるかもしれない。⁹⁾

6. あとがき

他の連続物質に見られない土の力学的性質のいちじるしい特徴として、塑性的な圧縮とせん断時のダイレタンシーを挙げる事ができるが、いずれもふつうの応力によって容易に変化を受けるという骨組構造の性格にもとづくものである。この考えを導入することに

より、土のいろいろの性質を統一的に眺めることができ、その挙動はより理解しやすいものとなる。必然的に各種の定義は明確にされ、残された問題もハッキリ浮き上ってくる。

筆者は実は「土の構造そのもの」については全く無知であることを告白せねばならないが、「構造の働き」を認めるだけの方法で導かれた以上の結論はそのことと関係なく成立するものと考えている。力学的な目的のためには、構造の本質に関するミクロ的な研究よりも、このような「構造の働き」を更に具体的、定量的に追求することが必要であらう。

参考文献

- 1) 三笠正人：土の力学的性質とその試験法，昭和36年度講習会「道路のための土質工学」テキスト，土質工学会関西支部（1962）
- 2) 三笠正人：土の工学的性質の分類表とその応用，第14回土木学会年次講演会講演概要（1959）
- 3) 最上武雄：土質力学体系への一試案，土木学会誌，第36巻，第6号（1951）
- 4) 森 麟：圧密完了後に生じた粘着力が先行圧力に及ぼす影響，土と基礎 第4巻，第1号（1962，2）
- 5) 竹中平之介：大阪地盤について，未発表
- 6) 三笠正人：不等方応力による粘土の過剰水圧について，第9回土木学会年次講演会講演概要（1953）
- 7) 三笠正人：「石井靖丸：現場におけるせん断抵抗の決定方法」についての討論，土と基礎特集号 No. 2（軟弱地盤の力学的性質とその対策）（1960）
- 8) 三笠正人：粘土の真の粘着力と真の摩擦力について，第13回土木学会年次講演会講演概要（1958）
- 9) Bishop & Henkel：The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test（1957）
- 10) 赤井浩一：有効応力に基づく斜面安定の解析，土木学会論文集，第74号（1961）