

土の工学的性質の分類表とその意義

み 笠 まさ と
三 笠 正 人*

1. ま え が き

土の工学的性質は非常に複雑であるが、これまでこれを統一的に分類整理した表がなかったため、いろいろ土の問題を考えるのに不便が多かった。筆者は以前からその必要を感じていたので、試みにひとつの表¹⁾をつくって講義²⁾や講習会³⁾で用いながら内容を練ってきたが、たまたま本号の座談会“問題点をめぐって”に出席した際にこの表を引用して意見を述べる必要があったので、大いそぎで稿をまとめ、報文として同じ号に載せていただくことにした。時間の余裕がなく、内容表現ともに不完全な一文となることをおそれるが、各位のご批判をまわって他日に補足することにした。

2. この表をつくった理由といきさつ

土の力学のむずかしい理由は次の二つに帰せられる。

- (i) 土の種類の多種多様なこと
- (ii) 土の性質の複雑なこと

土の種類についてはいくつかの分類法があり、実用に供されている。粒度組成にもとづく三角座標分類だけでも数種あるが、さらにコンシステンシー特性 (LL, PI など) をも考慮したカサグラント法、改訂 PR 法、前者を改訂した統一分類法などが広く用いられていることはご承知のとおりである。

ところが土の性質の分類となると、試みられた度数も少なく、一般の関心もあまりなかったようである。(試験法の分類はよく見かけるが)

テルツァギ・ベック⁴⁾は土の性質を指數的性質 (Index Properties) と力学的ならびに水理学的性質 (Mechanical and Hydraulic Properties) の二つに分けた。前者をまた物理的性質とも言い、とくにそのうち図-1 の三つの構成要素と全体の重量と体積の間の各種の比で表わされるものを基本的性質と呼ぶこともある。

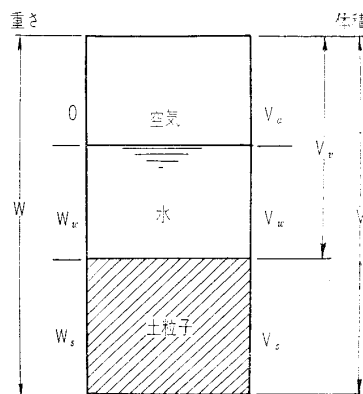


図-1

力学的ならびに水理学的性質は、実際問題に直接必要な性質であり、指數的性質はそれを決定するより基本的な因子——土の種類と状態——を表わすものである。このようなはっきりした根拠にもとづいたこの分類法は実用上たしかに有用なものである。

しかし、土質力学のいろいろの問題を考える場合のよりどころとしては、これではいささか物足りないのである。たとえば土のセン断強さが何と何で定まるか。というような問題を考えるのに、この分類は何らはっきりした指針を与えてくれない。土質力学がまだ若い学問で、土の性質や各種の計算法に関する断片的な知識の集積という段階にあり、その体系化ができ上がっていない現状ではそれも当然と言えようが、このような土の性質の相互関係についての指導原理の欠如が、しばしば研究者に土質調査のデータから関係のありそうな各種の量の間の相関関係をまねんと求めてみるというようなことをやらせるのである。たとえば、粘土分含有量と塑性指数、液性限界と自然含水比、自然含水比とセン断強さ、自然間ゲキ比と圧縮指数というように、関係のありそうな二つの量をグラフにプロットしてみるなどはしょっちゅう行なわれることである。

土の性質の種類はずいぶん多いので、このような直観と経験だけを頼りとした、いわば手さぐりの方法で各種の土のいろいろな性質の間に存在する法則を見出そうと努めても、非常に多くの組合わせができる上に、それぞれの関係がどれだけの一般性を持つものかを判断する基準がないので、たいへんな労力をかけてもなかなか土の力学の全容は明らかにならないであろうと思われる。

全体的な見透しを得るためにまず為すべきことは、土の性質を分類、整理し、ある体系づけた一覧表にまとめることである。もし、その表から諸性質の間の関係の基本的なルールが読みとれるようなものをつくることのできれば、これは土の性質の展望に役立つにとどまらず、土の力学の体系を確立する基礎となるであろう。

筆者がここに紹介する分類表は、はじめはただ教材として土質力学の教科書に出てくる諸性質の一覧表をつくるというだけのささやかなねらいのものであった。それが基本的構想としてまず R. Spronck の論文⁵⁾の変わらない性質 (permanent character) と変わり得る性質 (non-permanent character) の分け方に従ったこと、それからまたそのころ筆者の最大の関心事であった「土

* 工博 大阪市立大学助教授

報 文—372

のせん断強さ、あるいは一般的に土の力学的性質は何で
きまるか」という問題の答として、これに影響する因子
を土の種類と状態に分け、さらにその状態を密度、含水
量、骨組構造という独立な三つの因子に分けるという考
え^{3), 6), 7)}に到達したことがこの表の大綱をさめ、結果的
には土の力学の体系に関する筆者の考え方を端的に表現

するものとなった。以下この表の内容とその見方につい
て説明しよう。

3. 表 の 構 成

3.1 一次性質と二次性質

まず、工学的に問題となる土の性質のすべてを、比重

表—1 土 の 主 な 工 学 的 性 質

性質の区分	性	質	量	試 験 方 法
一 次 性 質 (その土に固有な性質) α	その一 (基本的要素) α_1	土 粒 子 の 材 質	{ 鉍 物 組 成	{ 肉眼, ルーペ, 顕微鏡 電子顕微鏡による観察 (色, 形, 組織) X 線 分 析 示 差 熱 分 析 赤 外 線 分 析
		土 粒 子 の 粒 度 組 成	{ 有 機 物 含 有 量 比 重 G_s 最 大 粒 径 D_{max} 有 効 粒 径 D_{10} 均 等 係 数 $U_c = D_{60}/D_{10}$ 粘 土 分 含 有 量	{ 臭, 色, 形 過酸化水素, 重クロム酸カリ処理による測定 燃焼物の 元素 分析 ピクノメーター法 (JIS) フ ル イ 分 析 (JIS) 沈降分析 {比重計法 (JIS) ビベット法
		土 粒 子 の 形 表 面 の 粗 さ 吸着イオンの質と量	{ 球 形 率 丸 味 率 pH 値 各種イオン含有量	視 察 { pH 試験紙または標準液による比色 計測定, pH メーター 浸出液の分析 電気伝導度測定
α	その二 (基本的特性) α_2	コンシステンシー特性 (粘性土) 密 度 特 性 (砂質土) 塑 性 特 性 含 水 当 量	アッターベルグ限界 { 液 性 限 界 w_L 塑 性 限 界 w_p 収 縮 限 界 w_s { 最 大 間 ゲ キ 比 e_{max} 最 小 間 ゲ キ 比 e_{min} { 塑 性 指 数 I_p 活 性 性 { 遠 心 含 水 当 量 w_c 現 場 含 水 当 量 w_f	{ (JIS) (JIS) (JIS) } 未決定 $= w_L - w_p$ $= \frac{I_p}{\text{粘土分含有量 (2}\mu\text{ 以下) (\%)}}$ (JIS) (JIS)
	その三 (力学的・工学的特性) α_3	突 固 め 特 性 一定の条件における強さ 路床土としての適性 大体の傾向としての { 透水性, 排水性, 圧縮性, 膨張性, 塑性, デン(靱)性 乾燥強さ	{ 最 適 含 水 比 w_{opt} (%) 最 大 乾 燥 密 度 γ_{dmax} (g/cm ³) C B R (一定の条件における) 群 指 数 GI おおよその変動範囲, あるいは形容 詞で表わす { 良い, 悪い, 大きい, 小さい 粘りの多い, 少ないの程度	突 固 め 試 験 (JIS) C B R 試 験 (JIS) (乱した土; 室内試験) { 粒 度 分 析 (JIS) コンシステンシー限界試験 (JIS) { 各 種 試 験 法 視 察 現 場 経 験

や粒度組成のようなその土に固有な性質と、含水比やセン断強さのような状態によって変わる性質の二つに大別し、それぞれ一次性質、二次性質と名づけた。これらはまた土質材料としての性質、および土塊としての性質とも表現できる。土の分類は一次性質によって行なわれる。

R. Spronck は先に述べたように、permanent character, non-permanent characterという言葉を用いたが、液性限界 LL, 塑性限界 PL などイオンを吸着させたり、取り去ったりすることによって容易に変えられる注)ので、permanent という表現は適切でない。もちろん LL, PL など non-permanent のほうに入れるという

お よ び 試 験 法 の 分 類 表

性質の区分		性 質	量	試 験 方 法
二 次 性 質 (与えられた状態における土の性質) β	その一 (状態) β_1	密 度 含 水 量 骨 組 構 造	$\left\{ \begin{array}{l} \text{単位体積重量 } \gamma \text{ (g/cm}^3\text{)} \\ \text{乾燥単位重量 } \gamma_d \text{ (g/cm}^3\text{)} \\ \text{間ゲキ比 } e \\ \text{体積比 } f (=1+e) \\ \text{相対密度 } D_r \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{含水比 } w \text{ (\%)} \\ \text{飽和度 } S_r \text{ (\%)} \\ \text{液性指数 } I_L \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{(間ゲキの不平等性)} \\ \text{(粒子配列の方向性)} \\ \text{鋭敏比 } S_e \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{重量, 体積測定} \\ \text{砂のおきかえによる現場測定 (JIS)} \\ \gamma, w \text{ から計算} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \gamma, w, G_s \text{ から計算} \\ = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \end{array} \right.$ 炉 乾 燥 (JIS) G_s, w, e から計算 $= \frac{w - w_p}{I_p}$
	その二 (力学的性質) β_2	コンシステンシー (強さ, 変形性, 塑性, 粘性) 強 さ 変 形 性 圧 縮 性 膨 張 性 ダイレイタンシー 透 水 性	$\left\{ \begin{array}{l} \text{セン断強さ } \tau_f \text{ (kg/cm}^2\text{)} \\ \text{内部摩擦角 } \phi^\circ \\ \text{粘着力 } c \text{ (kg/cm}^2\text{)} \\ \text{標準貫入打撃数 } N \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{弾性係数 } E \text{ (kg/cm}^2\text{)} \\ \text{最大強さにおけるヒズミ } \epsilon \text{ (\%)} \\ \text{ポアソン比 } \mu \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{体積圧縮係数 } m_v \text{ (cm}^2\text{/kg)} \\ \text{圧縮指数 } C_c \\ \text{圧密降伏荷重 } p_c \text{ (kg/cm}^2\text{)} \\ \text{(いわゆる先行荷重)} \\ \text{体積膨張係数 } m_{v_s} \text{ (cm}^2\text{/kg)} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\text{限界圧力}}{\text{現在の有効圧力}} - 1 \right) \\ \text{ポアソン比 } \mu \\ \text{間ゲキ圧係数 } A \end{array} \right.$ 標準温度 15°C における 透水係数 k_{15} (cm/sec)	$\left\{ \begin{array}{l} \text{直接セン断試験 (JIS)} \\ \text{一軸圧縮試験} \\ \text{三軸圧縮試験} \\ \text{ベーンセン断試験} \\ \text{コーン貫入試験} \\ \text{標準貫入試験} \\ \text{ブルサウンディグン試験} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{一軸圧縮試験 (JIS)} \\ \text{三軸圧縮試験} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{圧密試験 (JIS)} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{直接セン断試験} \\ \text{三軸圧縮試験} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{定水位透水試験 (JIS)} \\ \text{変水位透水試験 (JIS)} \\ \text{現場透水試験} \\ \text{圧密試験 (JIS)} \end{array} \right.$
	その三 (工学的性質) β_3	主 働 土 圧 受 働 土 圧 圧 密 特 性 地 盤 の 沈 下 特 性 路 床 土 の 強 さ 斜 面 の 安 定 性 振 動 特 性	主働土圧係数 K_a 受働土圧係数 K_p 圧密係数 c_v (cm ² /sec) 地盤係数 K (kg/cm ³) C B R (与えられた条件における) $\left\{ \begin{array}{l} \text{臨界面の安全率 } F_s \\ \text{安定係数 } N_s \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{共振周波数 } v_p, v_s, v_R \\ \text{弾性波速度} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{土圧計による測定} \\ \text{または強さから計算} \end{array} \right.$ 圧密試験 (JIS) 平板載荷試験 (JIS) C B R 試験 (乱さない土; 室内, 現場試験) $\left\{ \begin{array}{l} \text{強さから計算} \\ \text{振動試験} \\ \text{弾性波探査} \end{array} \right.$

分け方もあろうが、これらを材料としての性質とみて土の分類に用いる一般常識に従って一次性質に入れたわけである。

注) たとえば、海成粘土を水で洗ったり、食塩を混ぜたりすれば簡単にこれが実験できる。

さて上の例にかんがみ、一次性質、二次性質の区別にもう少し厳密な定義を与えておくほうがよからう。それは次のようなものになる。

“圧縮、セン断、振動、こねかえし、吸水、乾燥（気乾）などの、ふつうの外的作用によって変わらない性質を一次性質、変わる性質を二次性質と呼ぶ”。

土の力学が他の材料力学に比べてとくに複雑なのは、その力学的性質がふつうの外的作用によって容易に変化するという事情によるのである。したがって、この分け方は偶然的な思いつき以上の意味を持っていると言わねばならない。

3.2 性質群；性質と量と試験法

一次性質と二次性質をさらに基本的なものから応用的なものへとそれぞれ三つに分け、表に示すように名づけた。これらの性質群を便宜上 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ の記号で表わす。

ひとつの性質、たとえば密度をとってみると、これについて定義される量には単位体積重量、乾燥単位重量、間ゲキ比などいろいろのものがある。これらの量と、これを一括して論ずるときに用いる“密度”という定性的な概念とは区別しておくほうが便利である。そこでこの表では“性質”と“量”の欄を分けることにした。またこれらと並んでその量を測り、性質を調べるための試験法を併記した。これは単に性質や量を求める手段というに止まらず、試験法がその量の定義そのものである場合も多い。液性限界、塑性限界は明らかにそうであり、粒度組成すら土粒子の形がいろいろであるから、分析の方法によって定義されるひとつの約束と考えたほうがよいのである。（“問題点をめぐって”参照）

ひとつの性質群に属する各性質（量ではない）は、それぞれ重複せず、互いに独立なものであることを原則としている。とくに α_1, β_1 の性質群は、それぞれ土の種類および状態を規定する因子として必要かつ十分な“性質”をもうらするよう定めたつもりである。この表の——とくに β_1 の——内容がそのようなものであるということとは、経験から帰納した筆者の見解であり主張であるが、それぞれの性質の定義がはっきりしていないと無用の議論をひき起こすおそれがある。この点はあとで検討することにし、今は一応上のことを仮説として認めていただきたい。

$\alpha_2, \alpha_3, \beta_2, \beta_3$ の性質群は、実用上用いられている性質を並べただけであるから、 α_1, β_1 と異なり、ここに挙

げたものだけでこの表が完結しているというような意味あいのものではない。必要に応じ、くふうに応じ、多少の改変は当然予想されるのである。

3.3 性質の相互関係の基本的ルール

上に述べてきたことを前提とすると、各性質の間には次のような関係がなりたつ。

$$\alpha_2 = f(\alpha_1) \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha_3 = f'(\alpha_1) \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta_2 = F(\alpha, \beta_1) \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta_3 = F'(\beta_2) = F''(\alpha, \beta_1) \dots\dots\dots (4)$$

ただし左辺は、あるひとつの性質、右辺のカッコの中はその性質群全体を含むものとする。

この関係は、土のある性質が何と何によって決定されるかという土質力学の基本的なルールを構成するものである。そしてその中心となるのは式(3)、つまり

$$\text{土の力学的性質} = F(\text{土の種類, 土の状態}) \dots\dots\dots (3)$$

の関係である。

4. 各性質群の内容

4.1 力学的性質 β_2 と状態 β_1 について

土の力学的性質 β_2 としては、強さ、圧縮性、膨張性、変形性のほか、水理学的性質である透水性、およびそれ自体定性的な意味しか持たないコンシステンシーも入れておいた。ダイレイタンスは変形性に含めてもよいが一応別にした。これを表わす量として広く認められたものはまだ無いが、筆者の判断で二、三の量を選んで挙げておいた。

さて式(3)の内容、つまり、“土の力学的性質はその種類と状態できまる”ということには別に問題はないであろう。問題があるとすれば、土の種類、状態がそれぞれ表の α, β_1 で完全に表わされるかどうかにある。 α については多少の不備はあるかもしれないが、別に筆者の主観を入れたわけではないので、どっちみちたいした問題は生じまい。しかし β_1 の内容はひとつのはっきりした主張を含んでいるので十分説明しておく必要がある。

（説明不十分のため“問題点をめぐって”の座談会では多少議論のすれ違いが起こってご迷惑をかけた。）

この表は“土の状態は密度、含水量、骨組構造できまる”という表現になっている。これを式(3)と組み合わせると次の関係^{3), 6), 7)} が得られる。

$$\text{土の力学的性質} = F(\text{土の種類; 密度, 含水量, 骨組構造}) \dots\dots\dots (5)$$

これまで土の状態を規定する基本的性質と考えられてきた諸量はすべて 図—1 の土粒子、水、空気、および全体の体積と重量に関する各種の比の値であった。これは土の状態の量的な面を示しており、表の中では α_1 に属する比重と、 β_1 に属する密度、含水量の各種の量とな

っている。

これらが土の力学的性質を決定する最も重要な要素であるとして“基本的性質”の名が与えられたのであるが、実際には土の力学的性質は上の量的な因子だけでは決定されず、たとえば自然の滞積粘土をこねかえすと、密度、含水量に変化がなくてもその強さが著しく弱まるというようなことは、よく知られた事実である。とすれば密度、含水量のほかにこれらと同様に重要な土の状態を規定する他の因子が存在するわけで、これを“骨組構造”と名づけたのである。粒子の配列の仕方がその主な内容である場合が多いが、古い滞積土ではセメント物質の沈積による土粒子間の結合力がその重要な内容となる場合もまた多い。(この点は“問題点をめぐって”で山中氏によって強調されている。)しかしこの表では本質的、ミクロ的な観点からその内容を細かく分けることをしないで、土の状態を決定する因子のうち、密度、含水量以外のすべてのものを“骨組構造”の名のもとに一括して取り扱うことにしたのである。

その第1の理由は、力学的、実用的な立場においてこれを細分する必要を感じなかったからである。というよりはむしろ土の力学の基本的なルールを考えていく上にこれらを区別しない方がかえって便利であり、考えやすいからである。

第2の理由はセメント物質や各種イオンまでも含めてすべての分子の空間的な配列が全く同じであれば、土の状態は完全に同一で区別できないのであるから、結局土質材料のうち、自由水以外のすべてのものの空間的、幾何学的配列によって土の骨組の状態が完全に決定されるからである。その中で土粒子の疎密度度合、つまり量的な面だけをとり出して“密度”とし、残り、つまり質的な面を骨組構造と名づけるのであるから、セメンテーションの作用をこの名でカバーしてしまうことも、決して無理ではないのである。

さて、土の状態としては、上の3要素のほかに、有効応力状態、温度、電位(それらのコウ配も含めて)を挙げることができるが、あとの二つは一応副次的なものと見て(必ずしも常に無視してよいという意味ではない)この表では省いた。また有効応力状態は、骨組構造を先の包括的な意味のものと定義すれば

有効応力状態

$$=F_1(\text{土の種類; 密度, 含水量, 骨組構造}) \cdots (6)$$

という関係がなりたち、 β_1 の三要素の関数となるので、これらと並べて β_1 の欄に入れる必要がないのである。

式(5)と式(6)は、土の力学のいろいろの問題を考えるよりどころとなるものである。これらに基づいて土の圧縮やセン断など、その一般的な力学的挙動の特質

をうまく説明することができる。これらの式は、もともと定性的なものであるから、その説明ももちろん定性的な範囲を出ないが、それによって土の性質の体系がかなりはっきりと浮かび上がってくるのである。この点についてはすでに二、三報告したものがあ^{3), 6), 7)}、いずれ総括的にまとめる機会を持ちたいと思っている。

なお土の力学的性質には、時間の要素を無視することができない。たとえば土を粘弾性体と見たときの粘性係数とか、応力緩和時間とか、クリープ強さとか、二次圧密とかいろいろのものがあるが、これらをそのまま表の β_2 のところにならべるよりも、表に挙げた τ_f , E , m_v などの量が一般的には時間の関数であると考えた方がすっきりするので、この表では表面に出さなかったのである。レオロジー的な問題に関しては、その観点から見ていただきたい。

4.2 工学的性質 β_3 について

工学的、实际的に直接問題となる量、たとえば擁壁に働く土圧力や、基礎の限界支持力、あるいは沈下量やその着く時間などは、もともと土の性質の範チウに入れるべきものでなく、擁壁や基礎の形状や寸法、および地層の状態(どういう性質の土がどう配列されているか)などの諸条件に左右される量であることは、いわゆる理論土質力学の教えるところで、いまさらあらためて説明するまでもないが、もしそれらの条件を一定にしておけば当然土の力学的性質の関数として定まってくる。たとえば一様な地盤に対して JIS 規格によって平板載荷試験や乱さない土についての CBR 試験(現場あるいは室内)を行なうときは、その結果はその土の圧縮性、セン断強さなどの力学的性質だけで定まってくるので、これを土の工学的性質 β_3 として二次性質に含めることができるわけである。

しかしこの表の β_3 の内容は、必ずしもそのようにすっきりしたものばかりではない。たとえば主働および受働土圧係数は土の強さ常数 c , ϕ だけでなく、擁壁を考えないランキン土圧の場合でも地表面の傾きによって変わるので、“地表面水平の場合のランキン公式による土圧係数”とでも限定しないと本当の意味での土の工学的性質とは言えない。斜面の安定性などに至っては斜面の形も寸法も影響するので、この表からむしろ削りたいくらいである。しかしこの欄はそういう点にはこだわらないことにして作ってみたのである。

圧密特性として挙げた c_v は $c_v = k/m_v \cdot r_w$ で力学的量 k , m_v を組合わせたものであるが、各性質の独立性を重んずる意味で β_2 でなく β_3 に入れた。

4.3 基本的特性 α_2 について

一次性質のその2、基本的特性の欄には、土の Index property として、きわめて便利に活用されている LL,

報 文—372

PL などの諸性質を収めた。これらは土の種類だけによってその値がきまるように試験法が定められている。このことは直観的に理解できることであるが、式(5)の基本的関係から論理的に導いてみよう。

LL, PL の定義はその試験法自体に示されている。すなわち飽和した試料を完全にこねかえし、これが一定のコンシステンシー堅さを持つように含水量を調節し、そのときの含水比をもって LL, PL などとするのである。そこで式(5)を

コンシステンシー

$$= \varphi (\text{土の種類; 密度, 含水量, 骨組構造}) \cdots \cdots (7)$$

と書いてみると、まず、試料が飽和しているので密度は含水量の関数になり消してよい。つぎに完全にこね返すので、骨組構造は変数でなく常数として扱える。そこで

$$\text{コンシステンシー} = \varphi_1 (\text{土の種類; 含水量}) \cdots \cdots (8)$$

となってしまう。ところで経験によれば土は含水量の増減によって単調に柔らかくまた堅くなっていく。そこで式(8)を次のように書きかえることができる。

$$\text{含水量} = \varphi' (\text{土の種類; コンシステンシー}) \cdots \cdots (9)$$

したがって、右辺のコンシステンシーを一定にするときの含水比は土の種類のみで決まる一義的にきまり、一次性質として扱うことができる。これが LL, PL を土の分類に利用できる理由である。

収縮限界 SL については少し事情が異なっている。これは LL 程度の含水量でこねかえした土をそのまま乾燥していくので、当然所期の含水量のあたりでは骨組構造はこねかえし状態と異なるのである。注) SL くらいの含水比の土をこねかえすことは無理だから、これはやむを得ない。その代わりに初期の含水量をだいたい LL くらいにきめておくことによって乾燥収縮する際の構造のつき方を一定にし、骨組構造のファクターが一定か、少なくとも土の種類のみで決まるように試験の操作を定めているわけである。

注) こねかえし粘土を圧密していくと、骨組構造ができてくる。つまり鋭敏比は1より大となるのである。

粘着性を持たない砂の場合には LL, PL に代わるものとして最大および最小間ゲキ比が定義されているが、試験法自体ははっきりきまっていなかったことでもあるし、説明は省略する。

つぎに塑性指数 PI はもちろん α_2 に入れられるが、これが粒径 2μ 以下の粘土分含有量 (α_1) と粘土の表面活性によって決まってくるものとしてスケンプトンは $I_p/(\text{粘土分含有量})$ を活性度と名づけたのである。これは PI とパラレルに並ぶものではないが、やはり鉱物組成、有機物含有量、吸着イオンなど α_1 の諸因子の総作用であるから α_2 に入れるのが妥当である。

いったい複雑な土の基本的因子 (α_1) を細かくミクロ

的に見ていく代わりに、それらの因子の総作用として表われてくるそれぞれの土の個性を、ある一定の試験法で調べて土を分類していくという α_2 の諸性質は、実際的な立場で土を扱うために先人が経験によって見出した大きな智慧である。決して偶然的ないい加減のものでなく“土の性質”の性格から必然的に導かれねばならなかったものである。この表がその点を明らかにするのに役立てば幸いである。

4.4 力学的、工学的特性 α_3 について

土質材料を一定の方法で処理して供試体をつくり、その強さなどの力学的性質を調べれば、その結果は当然それぞれの土に固有のものとなる。すなわち式(3), (5)において状態 (β_1) を一定、あるいはその土に固有な値とするならば (たとえば砂の場合含水比ゼロ、または w_{opt} , 構造は完全に乱した状態, $e=e_{min}$ とするなど)

$$\text{力学的性質} = \psi (\text{土の種類}) \cdots \cdots (10)$$

となる。乱した土についての室内 CBR 試験はこの意味で材料としての土の特性を調べ、路床土としての適否を見る目的に用いられる。

標準突固め試験で求める最適含水比と最大乾燥密度は、締固め方法が定められているのでその土に固有の値となり α_3 に入るが、この関係を式(5), (6)から導くのは困難で、外的作用を入れた

土の状態

$$= F (\text{土の種類, 初期状態, 外的作用}) \cdots \cdots (11)$$

のような関係から導かねばならない。しかしこれについては今回は説明を省くことにする。

つぎにいろいろな力学的性質が土の種類だけでなく、状態にも左右されるとしても、その変動範囲はだいたい土の種類によって決まってくる。とくに透水性は密度や構造の影響よりも粒度の影響がずっと大きいので、土質によってそのだいたいの見当をつけることができる。したがって実用上は、これを一次性質に準ずるものとして α_3 に入れることができる。その他の力学的性質もだいたいの傾向という意味では同様にその土の特性として採用できる。そういうものも α_3 のところに並べてみたわけである。

5. 各性質および量の間の関係

ここでいろいろな性質や量の間の関係を、三つのグループに分けて考察しよう。

5.1 同じ性質に属する異なった量の間の関係

(1) ふつう基本的性質と呼ばれる単純な性質については、実用上の便宜さからいくつかの量が定義されている。それらは互いに独立でなく、たとえば次のような関係式によって関連づけられている: $r_d = G_s \cdot r_w / f$, $S_r = w \cdot G_s / e$, $r = (G_s + S_r \cdot e) r_w / f$ ($f = 1 + e$, 体積比)

(2) ある種の複雑な性質についてはその内容を互いに独立ないくつかの因子に分解してそれぞれを代表する量が定義されている。たとえば

- 粒度組成： D_{10} と U_c (α_1)
- コンシステンシー特性注)：LL と PL と SL (α_2)
- 骨組構造：鋭敏比と異方性 (β_1)
- 変形性：弾性係数とポアソン比 (β_2)

注)ただし LL と PL などは同じ系統の土では互いに関連がある。LL と PI を両軸とした塑性図上の点の位置がそのことを物語る。

(3) 試験法、計算法などの実用上の理由から同じ性質を異なった量で表わすことがある。たとえば

- 強さ：砂の ϕ と N 値, 粘土の c と N 値 (β_2)……試験法に関して
- 圧縮性： m_v と C_c (β_2)……計算法に関して
- 粒度組成： D_{10} と U_c による表示と, 砂, シルト, 粘土の 3 成分のパーセンテージによる表示 (α_1)……表示法に関して

5.2 同じ性質群に属する異なった性質の間の関係

これらは本来内容的に互いに独立なように選んだものであるが, ある種の関係を持つものも多い。すなわち

○土粒子の材質と粒度組成：たとえば粘土鉱物は粒径が細かいし, また細粒土はふつう粘土鉱物を多く含んでいる。($\alpha_1-\alpha_1$)

○土粒子の材質と形：たとえば粘土鉱物は薄片状, 針状などの独特の形をとることが多い。($\alpha_1-\alpha_1$)

○密度と含水量：飽和した土では量的に $e=G_s \cdot w$ のはっきりした関係がある。($\beta_1-\beta_1$)

○含水量と構造：一定の滞積条件の下では粘土の鋭敏比はその液性指数に応じて大きくなる。($\beta_1-\beta_1$)

○強さと圧縮性：粘土の圧密降伏荷重 p_c は, その骨組が構造の変化を生ぜずに支え得る圧力の最大値であるから, セン断強さあるいは降伏応力と関係があるものと見られる。($\beta_2-\beta_2$)

5.3 異なった性質群に属する性質の間の一般的な関係

式 (1)~(4) がこれで, 文章で書くと,

- (1) 基本的特性は基本的要素によって決定される。
- (2) 力学的, 工学的特性も基本的要素によって決定される。
- (3) 力学的性質は土の種類と状態によって決定される。
- (4) 工学的性質は力学的性質によって決定される。

5.4 異なった性質群に属する性質の間の特定の関係

ある性質, たとえばセン断強さを考えると, 表—1 の α_1, β_1 の性質が全部これに影響すると一応は考えねばならないので, セン断強さに関する完全な知識を得るためにはそれらの影響をしらみつぶしに調べていかねばならないことになるが, たとえば粘土の場合, α_1 の諸因子の働きを総合した LL, PI の二つによって土を分類できることが経験上わかっているのだから, α_1 に挙げた五つの性質をこの二つで代行することができる。ときには LL か PI どちらか一方で間に合わせることもある。

このようなぐあいに, ある性質を他の特定の性質の関数として表現することが実際上の要求からしばしば試みられるが, その適用範囲を誤らないために, その関係がどれだけの一般性を持つものかをこの表にてらして確かめることが常に望ましいのである。

つぎにいくつかの例によってその関係を示そう。(表—2)

ここに挙げた例は, 必ずしもその提唱者が一般的な対応関係があると主張しているものではなく, たとえばハーゼンはロ (戸) 過砂について $k=(100\sim150)D_{10}^2$ の式を求めたのであり, スケンプトンの $C_c=0.009(w_L-10)$ の関係はとくに敏感な粘土や乱した粘土には使えないことになっている。しかしスケンプトンの式が適用可能とされるふつうの粘土といえども, その構造の度合いは必ずしも等しくないのだから, たとえば C_c を w_L と鋭敏比 S_r 両方の関数として求めるというような努力も当然なされてよいであろう。

表—2を見ると, 一般に構造の因子を考慮していないものが多い。構造を鋭敏比あるいはこれに代わる適当な係数で量的に定義し, マクロ的な立場で土質力学の中に

表—2

所要の量			主要な因子とされたもの	提 唱 者	他の一義的因子	他の二義的因子
$(\alpha_2-\alpha_1)$	PI	—	粘土含有量	(ニイチョリス)	吸着イオン, 有機コロイド	土粒子の材質, 形
$(\beta_2-\alpha_1)$	k	—	粒度組成	(ハーゼン)	密度, 含水比, 構造	土粒子の材質, 形, イオン
$(\beta_2-\alpha_2)$	$\left\{ \begin{array}{l} c_c \\ c_c \\ c_c \end{array} \right.$	—	LL	(スケンプトン)	構造	PI, 密度 (または圧力)
$(\beta_2-\beta_1)$		—	e_0	(西田, 渡辺, 井本)	LL, p_c , 構造	PI, 密度 (または圧力)
$(\beta_2-\beta_1)$		—	e	(植下)	LL, 構造	PI
$(\beta_2-\alpha_2)$	$\left\{ \begin{array}{l} c_v \\ c_v \end{array} \right.$	—	LL	(テルツアギ・ペック)	密度 (または圧力)	PI, 構造
$(\beta_2-\beta_1)$		—	f	(三笠)	LL, p_c	PI, 構造
$(\beta_2-\beta_1)$	$\left\{ \begin{array}{l} c \\ c/p \end{array} \right.$	—	e	(ラットレッヂ)	LL, PI, 構造	
$(\beta_2-\alpha_2)$		—	PI	(スケンプトン, ペーラム)	構造, セン断様式	LL
$(\beta_1-\alpha_2)$		—	LL	(石井他)	圧力, 構造	PI

報 文—372

正当な位置を与えることが何よりも緊急な課題であるように思えるのである。

6. 土質力学の文法—この表の効用と限界—

土質力学におけるこの表の役割は、その効用、限界ともに、言語における文法のそれとよく似ているように思う。

第1にひとつの言語は必ずしも文法を学ばなくても、適当な環境の中では自然に覚えられ、日常不便を感じないが、外国語を正確にマスターしようとするれば、やはり文法書が第一の道案内である。同様に土質の感覚が肌にしみ込んでいるような練達の士にとってはこの表など蛇足であろうが、大部分の人には土の問題を考えるひとつの指針として役立つことと思う。

また一面、単語や慣用語を知らない人が文法書をひもといてもサッパリおもしろくないように、土質に関する程度の知識がなければ、この表は少しもおもしろくないのではないかと思う。

第2に文法に例外があるように、この表にも例外があり、すっきりしないところもある。またこれが唯一のもの一つまり真理であるというような意味のものではない。ある考え方、ある主張を含んではいるが、この表自体はあくまで実用的、便宜的に定めたひとつの整理案にすぎない。もっと便利な案が出てくれば、いつでもとって代わられるべき性格のものである。たとえば植下協氏は、種類を一次性質、状態を二次性質、力学的、工学的性質を三次性質というような分け方を考えておられるそうであるが、あるいはそのほうが便利かもしれない。

また骨組構造に関する知識や測定法が今後充実してくれば、そのミクロ的な面を二次性質その1、マクロ的なものをその2とする分け方のほうが好ましいとも考えられる。

いずれにせよ、この表は土質力学の進歩とともに書き変えられていくであろうし、またこの表をさらに精密化

し、充実させていく努力は、直ちに土質力学の進歩にむすびつくものと考えられる。そのようないわばダイナミックな可能性をはらんでいること——これこそがこの表の最大の効用であると言えるのではなからうか。

7. あとがき

土質力学はテルツァギ以来すでに40年の歴史を持っており、現代のテンポから見ると、これは決して短い期間ではない。にもかかわらず土の性質があまりに複雑であり、また現実の工事からの要求があまりに切実、かつしばしば短兵急であるため、土質力学の研究者はもっぱら事実の収集と現場の対策に寧日なく、立ちどまってゆっくり土の性質の全体を見わたすという試みがあまりなされなかったようである。筆者は万事スローモーで、各方面にご迷惑のかけ通しであるが、そのお詫び（とくに本号の編集者に）のしるしにこの分類表を提供させていただき、マッハのいわゆる“思考の経済”という点で多少の償いができようかと虫のいいことを考えている次第である。

参 考 文 献

- 1) 三笠正人：土の工学的性質の分類表とその応用，昭和34年度土木学会年次講演会，1959
- 2) 三笠正人：土質力学概論，教材プリント，1956
- 3) 三笠正人：土の力学的性質とその試験法，「道路のための土質工学」土質工学会関西支部，1962
- 4) Terzaghi, K. & Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley, 1948
- 5) Spronck, R.: For a Systematic Study of the Properties of Soils as related to their Permanent Characters and to their Non-permanent Characters (Structure and Moisture Content), Proc. 2nd Int. Conf. on S.M. & F.E. Vol. 3 pp. 15~18
- 6) 三笠正人：土の力学における構造の概念の意義について，昭和37年度土木学会年次講演会，1962
- 7) 三笠正人：土の圧縮とセン断における問題点の考察，「土質材料の力学と試験法における最近の問題点」，日本材料試験協会関西支部，1962

(原稿受付 1964.4.23)

×

×

×