

力学性にもとづく土壌構造の評価法 ——団粒構造を中心として——

新 恒 雅 裕*

Evaluation of Soil Structure Based on Soil Deformation Behavior (especially on Aggregated Soil)

Masahiro ARAGAKI

Faculty of Agriculture, Mie University

I まえがき

土壌は力場において種々の力学的挙動を示す。その挙動は力と変形との関係によって特徴づけられる。物体の変形はたとえば弾性変形、塑性変形および流れのような狭義の変形に類別できるが、現実測定（観察）される物体の変形は、これらが総合されたものである。このような意味において土壌の力学的挙動は、力により生起する広義の変形にかかわるものである。降伏（類似語としての強度、破壊あるいは破断）の現象は、変形過程の特殊な段階であるといえる。

土壌に変形を生ぜしめる要因には外力と内力とがある。外力（重力を含む）による変形は最も一般的なもので、圧縮、締固め、せん断（ずり）、流動などの広範囲の現象に関係する。内力は土壌内部の固相、液相、気相の相互作用によって生ずる物理化学的力で、鉄酸化物、ケイ酸化合物のほか有機物による粒子接着作用もこれにあたる。温度差や湿度差の環境要素が誘因となって土壌内で生ずる力も含めれば、内力にもとづくマクロな変形現象として凝集、収縮、膨張、相変化を伴う凍上などがある。

現象論的にみた変形には体積変形と形状変形とがあり、変形テンソル T_{def} のうち等方成分 T^0_{def} および偏差成分 D_{def} がそれぞれ前者および後者の変形を特性づける。実際の土層レベルでの土工やその他の変形の諸問題では、体積と形状の基本的変形が複合した現象となって現われる。力学的現象としての変形挙動を土壌物理性と関連づけて評価する場合、力場における土壌構造の変化を把握することが必要である。

本報告は主として外力による圧縮変形と乾燥収縮による変形挙動を扱い、これらと緩和特性、土壌構造との関係を考察したものである。圧縮と収縮は外力と内力による体積変化を伴うという点で共通性がある。主に対象とする土壌は団粒系のものであり、必要に応じて砂質土系

（単粒構造系）、粘質土系（壁状構造系）のものを比較対象の土としてとりあげる。

II 力場と土壌構造

1. 土壌の力学的構造モデル

土壌構造は概念的には各種の力に基づく固相、液相、気相の立体的組成として理解されている。骨格に基づく変形機能に視点を置いた場合の土壌構造は粒子の結合と配列による骨格形成の状態である。土壌の変形は必ず構造上の変化を伴うが、両者の関係の統一的整理はなされていない。考慮する現象によって構造モデルが異なる場合が多く、また応力、変形、時間などの関係を定める状態力学方程式¹⁾（構成方程式、レオロジー方程式）も相異なる。力学性からみた構造モデルをいくつか挙げてみる。

(1) 幾何学的組成に関するもの

1) 粘質土系 ①板状粒子のカードハウス状の空間的組成 (1957, Tan²⁾), ②有機物や粘土粒子による結合作用を考慮したもの (1959, Emerson³⁾), ③表面活性に基づく粒子接触の様式 (1963, Van Olphen⁴⁾), ④単一粒子の配向の程度に基づく粒子配列 (1966, Yong and Warkentin⁵⁾), ⑤電子顕微鏡の観察による立体的モデル (1970, Pusch⁶⁾), ⑥構造単位（ベッド、クラスター、ドメイン）内の粒子配向性モデル (1975, Yong and Warkentin⁷⁾), ⑦大きさにより区分されたベッドとポア (Pore) の段階的モデル (1976, 松尾・嘉門⁸⁾)。

これらのうち①～⑤は主として粒子による骨格系のモデル化である。比較的新しい⑥、⑦は構造単位の間隙部分も考慮されていて、突固めや圧密などの変形過程と構造変化の説明に用いられている。

2) 砂質土系 いわゆる粒状体に関する構造モデルで、主として変形特性を説明するものである。⑧粒子接触面のせん断方向に対する傾きの不均一性を考慮した微視的

*三重大学農学部

変形モデル (1957, Newland and Alleyly⁹⁾)。これはせん断時のダイレイタンスを説明し得るモデルである。

⑨剛体円形粒子間を力学的模型で連結し、変形面の法線方向、接線方向を区別して表わしたモデル (1979, Cundall¹⁰⁾)。粒状体モデルは他にも種々あるがこれらの2例を挙げるにとどめる。

3) 団粒系土壌 ⑩小団粒により大団粒が形成される団粒構造の模型 (1957, Michurin¹¹⁾) がほとんど唯一のものである。農学分野ではこれが基本的モデルである。農地土壌は本来植物生育の培地として間隙部分における物質 (水, 空気など) およびエネルギー (熱) の収容, 移動が最重要視された。本モデルは植物生育上望ましい間隙特性を定性的に説明するものとして位置づけられて来た。このほか⑪団粒構造形成の要因である腐植の存在形態を仮定した粘土・腐植複合体モデル (1976, 前田・相馬・佐々木¹²⁾) がある。これらは力学性概念は与えられていない。

(2) 変形の現象論に関するもの

土壌を含めたいろいろの物体の応力あるいは変形の状態を現象論的に記述する場合, 応力・歪の関係のような物体特有の基本式が不可欠である。これは既述のような状態力学方程式あるいは構成方程式, レオロジー方程式と呼ばれ, 一般的には次式で表わされる。

$$f(\sigma, \theta, \epsilon, \dot{\epsilon}, T, \dots) = 0$$

ここに σ : 応力, θ : 降伏値, ϵ : 歪, $\dot{\epsilon}$: 歪速度, T : 温度。対象物体が土壌の場合, その性状や扱う現象によって変数が選択され, 従って基本式が異なる場合が多い。即ち理想物体の力学性を表わす弾性, 塑性, 粘性のうち単一体か2つ以上の組合せによる複合体で土壌の挙動を近似する。たとえば粘弾性模型のバーガース (Burgers) 体は土の遅延弾性の現象¹³⁾や力学的転移点¹⁴⁾を説明し得ることが示されている。金属材料や土質材料を対象とする分野では弾塑性体としての扱いが多くなされている。

(3) 土・水系の力学的モデル

土粒子・水の相互作用を重視して土壌の工学的性と構造性を関連づけようとする考え方である。土壌水のエネルギーの取扱い¹⁵⁾に立脚して, 妹尾¹⁶⁾は熱力学的な相圧概念を加えて土粒子・水系の工学的性の理論的基礎を与えた。土壌の工学的性や保水性が土粒子・水系のエネルギー指数 (pF) によって表わされる。この場合力学的挙動はレオロジー的に説明される場合が多く, 力学性と構造, 水分保持特性の相互関連性についての成果が多く蓄積されている。たとえば須藤¹³⁾はエネルギー論的に力学的状態量を規定し, 種々の現象を統一的に整理する

試みを行った。この分野での状態モデルは $\Delta\mu = \Sigma Pi + Pe$ (μ : 土壌水の化学ポテンシャル, Pi : 内部圧, Pe : 相圧) であって, 力学的挙動の現象論と土壌物性とを結びつける努力がなされている。

2. 土壌構造の要素と相互関係

土壌の力学的構造は力場における土壌構成物質の空間的配置関係である。従って巨視的な構造要素として, 力場, 物質, 空間配置の3つが考えられる。前節1.で概観した土壌構造の種々のモデルは, 各要素に対する重点のおき方の程度が異なるように思える。

構造要素間の相対関係を整理して図-1に示す。力場

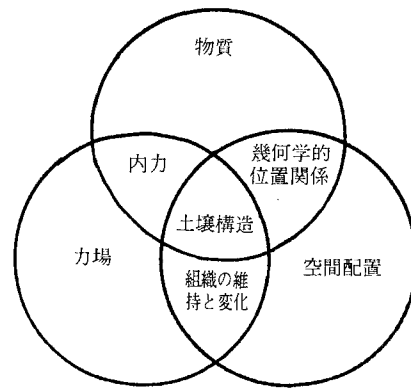


図-1 力場と土壌構造の概念

は外力 (いわゆる面力, 重力, 生物の作用等) と内力 (物理化学的作用に基づく種々の力で, 有機物質等による接着作用も含める) に分けている。構造形成は基本的に内力に基づくものとし, 外力は組織の空間的配置を変える外力要因として構造にかかわるとみなした。物質は固相, 液相, 気相がある。配置は物質の空間的位置関係を表わす。同図により土壌構造は外力・内力による土壌構成物質の可変的空間組成であることが示されている。

図-1に基づいて2, 3の検討を加える。砂質土の固相は表面活性のない鉱質粒子が大部分であって, 内力は毛管作用力が主である。従って土壌構造を本質的に粒子系のものとし, 構造単位の粒子の性質と結合性を用いて表現すれば, 砂質土は無孔性・硬質粒子の単独系とみなせる。粘土粒子は一般にファンデルワールス力や静電力的力などにより凝集しているのので, 粘質土は無孔性・硬質粒子の複合系とみなす。ここでの無孔性は粒子内部の孔隙を無視することを意味し, 硬質は粒子の硬さが集合体のそれより十分大きいことを示す。団粒系土壌は凝集した粘土粒子に有機物質等による接着作用が加わり, 非固相部分 (とくに気相) を多くもつ構造単位の粒子 (団粒) を形成する。従って団粒系土壌は多孔性・軟質粒子

の複合系である。土壤構造を土壤の機能の側面からみると、骨格を主とする変形機能とともに、既述のように間隙空間による物質、熱などの貯留・輸送機能も重要である。この意味で多孔性・軟質粒子の複合系である団粒構造の土壤は、他のものに比べて構造と力学性に関する普遍的問題を包含する対象であろう。

土壤構造は可変性であり、土壤構造の規準状態は定め難い。一般に実用的目的から初期状態が設定され、限られた変形過程あるいは状態変化の間における構造上の対応が調べられている。ここで扱う団粒構造の初期状態は、近似的に自然構造とみなされる状態のものである。また重力場の影響は無視し得るとし、土層中の土壤とその構造を乱さないで採土した後の土壤は同一の性質のものとして考える。

III 階層性からみた土壤の団粒構造

1. 団粒の土壤物理性と間隙特性

土層における土粒子は特殊な場合を除き程度の差はあるが団粒化していると考えられる。団粒系土壤である黒ボク土のような有機質土では、団粒がその基本的構造単位として位置づけられている。団粒自体が多孔性であるので黒ボク土では骨格部分と間隙部分が不可分である。従って団粒の物理性および力学性が土壤体のそれらを規定する要因となる。

特にことわらない限りここでの団粒は非アロフェン質の黒ボク土の生土から乾式篩別で分離したものとする。団粒の有機物含有量(Co)は、図-2のように団粒径(d)により異なる。Co~dは極小値を1つもつ下に凸の曲線(convex curve)で表わされる。アロフェン質の大山黒ボク土¹⁷⁾も同様である。このような関係は、自然構造をもつ試料のCoがおよそ10%以上のものについてみられる。Coが数%の試料や、団粒構造が種々の要因で変動している耕地土壤の場合は定かでない。Co~dの全体的形状は一般性をもつとみてよい。なおCoの極小値を与える粒径は、団粒分布の最大値を与える粒径に近似する¹⁷⁾¹⁸⁾。Coの極小値や最大値を示すdは試料のCoによってやや異なる。このほか含水量などの分離時の条件も変化の要因となろう。

土壤腐植は多孔質の海绵状態で保水性が高いことはよく知られている。pF・水分量やアッタベルグ限界値からみた団粒の保水性は、団粒の大きさとCoの関係に対応した変化を示す¹⁸⁾。

ここで土層を構成する団粒の集合状態を、団粒の特性を考慮した試算により検討してみる。団粒分布(後述)と間隙率(n)~dの関係¹⁹⁾から全団粒の間隙率(n_t)が算出される。n_tと現場土層のnとの差Δnが団粒間隙率

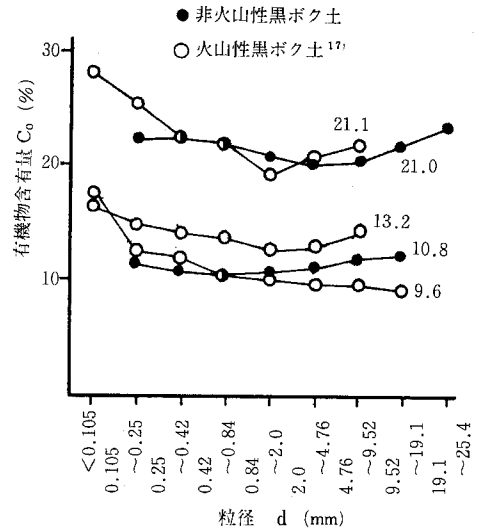


図-2 団粒の大きさ(d)と有機物含有量(Co)
(図中の数値は試料のCoを示す)

となる。団粒間隙の測定法²⁰⁾の相異にかかわらずΔn/n=0.07~0.09であり、団粒間隙の割合は約1割である。この値は試料が乾燥すると団粒が収縮するので幾分変化するであろう。

Michurinのモデル¹¹⁾によれば団粒の集合によってより大きい団粒が構成される。この場合団粒の構成上の階層数(N)とnは $n = (1 - T^N) \times 100 (\%)$ で表わされる(図-3)。ここでTは単位容積中の粒子の容積で一定としている。T<1であるのでn~Nの漸近線はn=100である。即ちNの増加とともにnは高くなる。粒子系における最密、最粗の平均的充填による間隙率(n)を仮定して、団粒についての階層数と間隙特性はすでに検討されている²¹⁾。同様の考え方を土層レベルまで拡張してみる。図-4は土壤のnがCoの増加に伴い高くなる

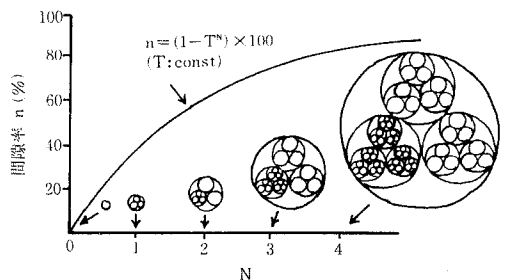


図-3 団粒の階層数(N)と間隙率(n)
(T: 粒子の容積比率)

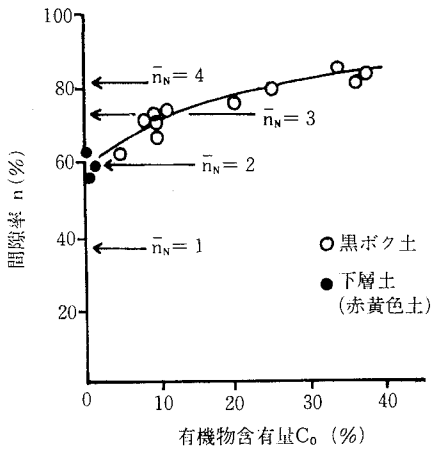


図-4 土壤の有機物含有量 C_o と間隙率 n

ことを示す。 $n \sim C_o$ は団粒についての $n \sim d^{21}$ および $n \sim N$ (図-3)と同様の形状(上に凸の増加曲線)を示す。即ち団粒が大きくなると階層数が増え、この場合より多くの腐植量が必要であることになる。図-4より C_o の段階的範囲で N は次のように区分される。i. $C_o < 5$, $N = 2$, ii. $5 \leq C_o < 10$, $2 < N \leq 3$, iii. $10 \leq C_o < 30$, $3 < N \leq 4$, iv. $30 \leq C_o$, $4 < N$ 。従来篩別された団粒の分類は、たとえば植物培地としての好適条件を考慮して微細団粒($< 0.25\text{mm}$)と粗団粒($0.25 \sim 7(10)\text{mm}$)に分け、これより大きいものを土塊($> 7(10)\text{mm}$)としている²²⁾。前述のような C_o による N の区分を用い得るとすれば、以下のような団粒の集合状態が一応考えられる。

(1次粒子) \rightarrow 微細団粒 \rightarrow 粗団粒 \rightarrow 団粒塊
 primary particle. microaggr. macroaggr. super-N
 $N = 0 \sim 1$ $N = 1 \sim 2$ $N = 2 \sim 3$ macroaggr.
 \rightarrow 土塊 $N = 3 \sim 4$
 clod
 $N = 4 \sim$

2. 団粒の分布特性

団粒分布は団粒による土壤の構成様式を表わす量的指標である。団粒分布はある粒径範囲(d)の団粒の質量%(これを W_d で表わす)で表示される。図-5に示すように $W_d \sim d$ は上に凸で極大値を一つもつ曲線(concave curve)であり、分析条件(乾式・湿式の相異, 水分量のちがい)によらない。このような $W_d \sim d$ の一般的形状は、火山性黒ボク土¹⁷⁾やそのほかの測定例²³⁾と同様であるが、最大値を与える d は分析条件によって異なる場合が多い。この点を物理的に力学的に明確にすることは、団粒の生成・崩壊の機構を解明することと本質的に同じことである。土壤を構成粒子に分離する場合、

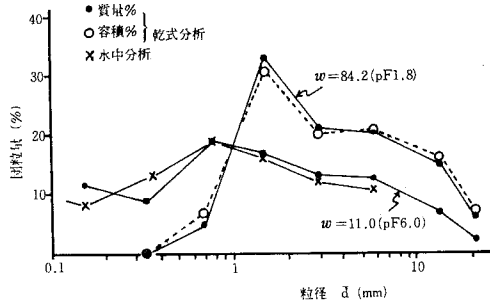


図-5 分析条件と団粒分布

分離の外力が重要である²⁴⁾。団粒分析は外力が0の土層における状態から、外力が最大の粒度分析(完全分散)までの中間的位置にある(ただし外力による鉱質粒子の破碎は除く)。

団粒分布は質量表示がなされて来た。しかし団粒の大きさにより間隙率が異なる上に構成土の真比重も異なる²¹⁾。従って団粒による土壤構成を考える場合は容積表示の方が合理的で、粒子系による空間配置の検討や間隙量の把握等における実用的意義も大きい。団粒(i)の質量%を $W_{d,i}$ とすれば、容積% $V_{d,i}$ は次式で表わされる。 $V_{d,i} = (\bar{\rho}_d / \rho_{d,i}) \cdot W_{d,i} = \{ \bar{G}_s (1 - \bar{n}) / G_{s,i} (1 - n_i) \} W_{d,i}$ 。ここで $\rho_{d,i}$, $G_{s,i}$, n_i は団粒(i)の乾燥密度, 真比重, 間隙率であって $\bar{\rho}_d$, \bar{G}_s , \bar{n} はそれぞれの全体の平均値である。本式で算出された $V_d \sim \bar{d}$ (図-5における破線)は $W_d \sim \bar{d}$ よりやや扁平となるが形状特性は変わらない。 $\bar{d} = 1 \sim 5\text{mm}$ のものでは減少し、それ以外のものでは増加する。

土壤が外力によって圧縮変形を受けると団粒分布は変化する。図-6に圧縮前の団粒量(W_d)に対する圧縮後

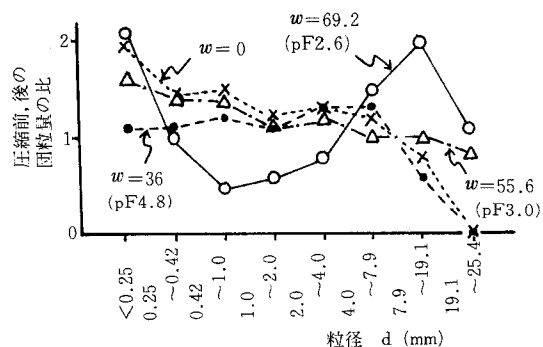


図-6 土壤の圧縮による団粒分布の変化(圧縮力は 1.5kgf/cm^2 , y軸は圧縮前に対する圧縮後の団粒量の比)

のそれの比の値を示す。同図は標準サンプラー数個についての結果であり、圧縮力 1.5kgf/cm^2 は団粒塊の圧縮強度に対応する値を越えている(後述)。 $w > pL = 62.2$ の湿潤状態では $d > 4\text{mm}$ の団粒は圧縮によって増える。これは $d = 0.42 \sim 4\text{mm}$ のものが外力によって結合し結果的に大きな団粒となるからと思われる。この場合団粒の崩壊・形成が同時に生ずると考えられる。 $w = 55.6$ で比較的 pL に近い状態では、圧縮前、後の団粒分布が最も近似する。 $w < pL$ では($w = 36, 0$ の場合)大団粒は減少か消滅し $d < 7.9\text{mm}$ のものが増加し、全体的に団粒塊の細分化が支配的になる。団粒の力学的安定・不安定は外力との相対関係で決まるが、さらに含水量も団粒分布に影響を与える。

3. 立体的団粒構造の模式化の試み

前述のような団粒の土壌物理性と間隙特性、団粒の量的分布の特徴と外力による可変性さらに個々の団粒の力学性を考慮して、力場における空間的な団粒構造の設定に関する試みを行う。

いま図-2, 5の結果を図-7に示すような模式曲線 $C_0 \sim d$, $V_d \sim d$ で近似する。 C_0 , V_d の最小値, 最大値を与える d を d_3 とし、図のように粒径の大きくなる順に $d_1 \sim d_5$ を設置する。 $C_0 \sim d$ 曲線において C_0 の同じ団粒

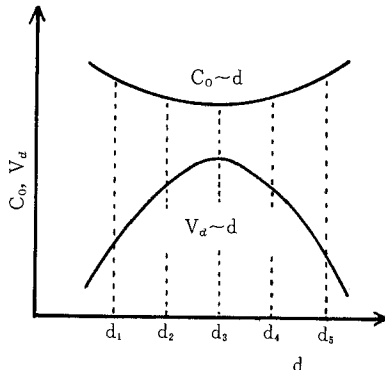


図-7 $C_0 \sim d$, $V_d \sim d$ の模式図
(V_d : 容積表示の団粒量)

は互いに接触し(たとえば d_1 と d_5 , d_2 と d_4), C_0 の差が1段階のものは近隣にあり(たとえば d_1 と d_2 , d_2 と d_5 など), 差が2段階のものは離れている(d_3 と d_1 , d_5)場合が多いと仮定する。また量的には $V_d \sim d$ 曲線から d_3 のものが最も多く d_1 , d_5 のものが少ないものとする。ここでは d_3 以上の大きさを大団粒とし、それ以下のものを小団粒として区別する。従って空間組成では d_3 の団粒が主要部分を占め、 d_5 の大団粒は点在し、 d_1 の小団粒は数多く散在するであろう。さらに d_3 以上の団粒については d_5 , d_4 , d_3 の順に硬さが増す傾向があ

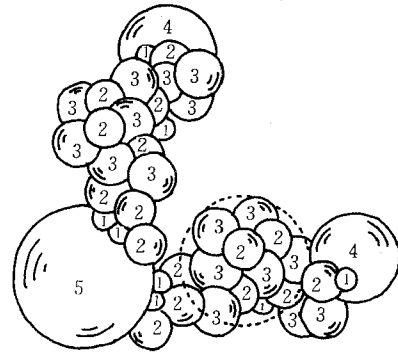


図-8 団粒の空間配置の提案

り¹⁹⁾, d_3 は力学的にも安定しているとみなす。土壌体が圧縮変形を受けると大団粒(d_4 , d_5)が崩壊して小団粒に分離し易いと同時に、小団粒群が結合して大団粒を形成する2つの方向があることは既に述べた。

以上のことから図-8のような団粒構造の空間的模式図を考えることができる。図中の破線部分は外力による可変性を示す。たとえば図-6に関して既述のように、外力により小団粒群の大団粒化あるいは大団粒の小団粒群への分離がおり得ることを示している。模式図と常識的な団粒構造の平面的概念図²⁴⁾を比較した場合、後者では大団粒が最も多い。破線部分を、団粒分析の外力より弱い結合力で団粒化しているとみれば模式図と概念図は類似する。図-8は団粒の物理性に基づく配列、大団粒の硬さおよび団粒分布の特性と外力による変化が考慮されている。従って団粒を力場における行動単位として位置づけた場合模式図の方が妥当であろう。

IV 外力による変形挙動と構造変化

1. 団粒構造における変形過程

団粒を平行2平板間で圧縮したときの測定結果をまとめると図-9のようになる。崩壊前後とも複雑な変形過程をとり、力 \sim 変位は多様な経路を辿る。団粒を粘土・腐植複合体に基づく、軟質の多孔性粒子から成る段階的構造物体とすれば、団粒の変形は粘土・腐植複合体としての粒子の結合状態と配列関係が変化する過程である。この場合図-10に示すように団粒間および団粒内部の変形機構として次のようなものが考えられる。i. 圧縮, ii. 滑動, iii. 転動, iv. 崩壊, v. 形状変化。i. は接触面の法線方向における接触変形である。ii. は接線方向のもので、iii. はいわゆる回転であるが、粒子が腐植物等を介在して接触しているため回転に伴う抵抗がある。iv. は部分的におこると考えられるが、団粒系土壌の変形ではこのような内部崩壊は比較的初期段階で生ず

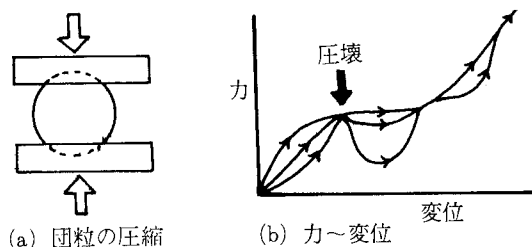


図-9 団粒の圧縮における変形様式

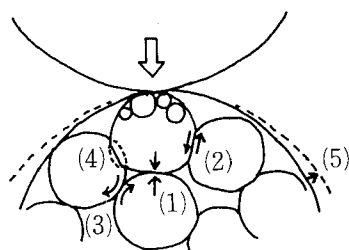


図-10 団粒間および団粒内部の変形機構の模式図(1)圧縮, (2)滑動, (3)転動(回転), (4)崩壊, (5)皮殻の曲率変化)

るであろう。v. は皮殻の曲率変化に関するもので、含水比が高く腐植・水が一体となって機能するときおこり得る。i. ~ v. は独立に生ずるのではなく相互に依存し、種々の組合せが考えられる。内部変形のおこり方が一様でないため図-9のように結果として複雑な変形経路をとるとみられる。内部変形と全体的変形との関係については確率論的アプローチが必要であろう。

次に土壌体の圧縮変形の過程における団粒の挙動を実測結果に基づいて検討する。現場土層の構造を乱さない試料について、側方拘束の圧縮過程で得られる応力・歪曲線において特異部分の現われる場合が多い(図-11)。これらの部分的特異性は2度目以降の圧縮では全く現われないことから、各土壌の初期構造の圧縮による不可逆な変化に起因すると考えられる。砂質土の場合は $\sigma = 2 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ にみられ、これは硬質粒子のかみ合いにおける不連続な変形過程である。軟質粒子系である黒ボク土では $\sigma = 1 \text{ kgf/cm}^2$ 前後でゆるやかな凹凸部分が現われる。これは構成団粒の崩壊によると考えることができる。土壌体中の個々の団粒に生ずる応力を σ_i とすれば、実験上の可測量である σ および ϵ を用いて次式で表わされる²⁶⁾。 $\sigma_i = a'(\sigma/\epsilon)$ 。ここで a' は団粒の変形と配列状態の仮定で決まる定数である。団粒を球体とし等径のものが密にかつ変形が外力の作用方向にのみ生ずるように配列していると仮定すれば $a' = \pi/\sqrt{3}$ とな

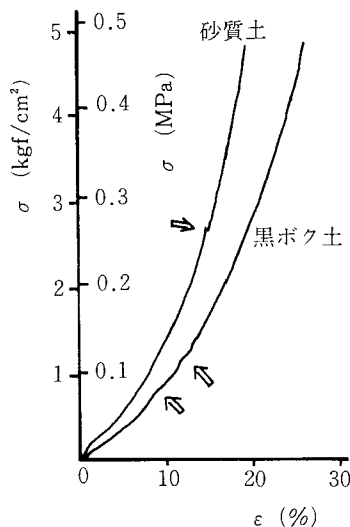


図-11 側方拘束の圧縮における応力(σ)と歪(ϵ)の関係

る。特異部分における ϵ 、 σ の値を前式に代入すれば、このときの σ_i は個々の団粒の圧壊強度¹⁹⁾と近似する。土壌体の変形に関する一つの曲線を評価することによって、内部構造の変化を推定し得る好例であると思われる。

土壌中での粒子系の配列と変形はきわめて複雑であり、ここでの試算は力学性と構造性との関係を決定できるものではない。これを可能にするにはたとえば団粒構造の空間的模式図(図-8)に、各粒子部分(i)に生ずる実応力($\sigma_{r,i}$)の考え方を導入し、図-10に示したような内部変形のおこり方と変形抵抗を量的に表現し得る知見の集積が必要であると思われる。

2. 応力の緩和特性からみた土壌の挙動

(1) 応力緩和時間

土壌の応力緩和にかかわる圃場レベルでの現象は少なくない²⁷⁾にもかかわらず、この分野での研究成果の蓄積が遅れている。ここでは一定変形下における応力の緩和過程を規定し土層の変形に直接関係する緩和時間(τ)について考察する。

図-12は $C_0 = 21.0$ の黒ボク土を自然含水比で突き固めた土柱および団粒を整形した自然構造をもつ土柱について、含水比と τ の関係を示している。両試料ともに収縮限界付近で最小値をもつ下に凸の曲線(convex curve)である。突固め土柱の $\tau \sim w$ と内部構造との関係については既報²⁸⁾のとおりである。図-12より $w < w_L$ では自然構造を有する方が突き固めたものより τ はやや小さい(後者も団粒は存在する)。

Maxwellのモデルによれば $\tau = \lambda/E$ (λ : 伸び粘性

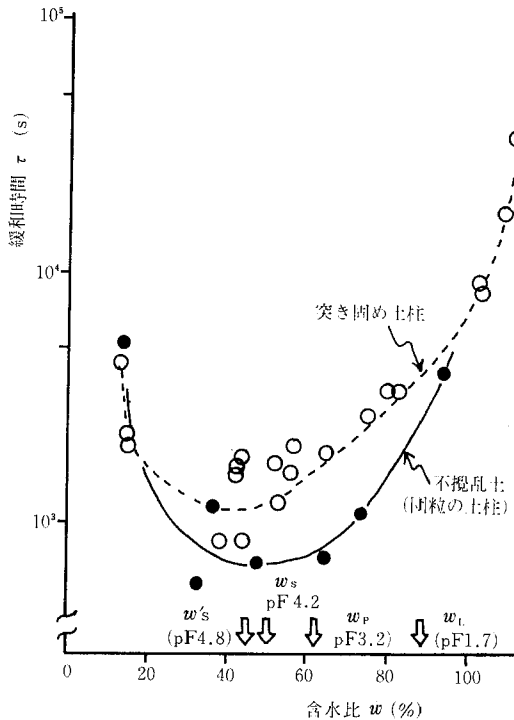


図-12 土壌構造と応力緩和時間 (w_l : 液性限界, w_p : 塑性限界, w_s : 収縮限界, w'_s : 団粒構造のある場合の収縮限界)

係数, E : 弾性係数) である。即ち τ の増減は λ と E の相対関係で決まり, τ の増加は相対的な E の減少と対応関係にある。安富²⁹⁾ は外力 (練り返えし) による軟化現象の機構を Burgers モデル (Voigt モデルと Maxwell モデルの直列模型) を用いて説明している。これによれば親水状態の不攪乱土を乱すと骨格構造が壊れて構造拘束水が自由化し, 無構造の親水状態になる。この場合 Burgers モデルのパネ部分 (E) が劣化する。さらに十分に練り返すと粒子表面の拘束水が自由化し, ダッシュポット部分 (λ) も劣化する。Voigt モデルは緩和機能をもたないので安富の結果から緩和時間の検討が可能である。第1段階の骨格構造の攪乱では E が減少するので τ は増加することになる。十分に練り返えすと λ も減少するので τ の増減は直接判定できない。モデルの物理定数の変化を量的に把握する必要がある。

以上のような力学モデルによる定性的な検討によって, 緩和時間は自然構造を乱すと増加し, 応力消散が時間的に遅れることが想定できる。これは図-12の測定結果と対応する。

実際の土層において緩和時間と関係する力学的現象の

一例として, 弾丸暗渠の施工と土壌の変形を考える。一般論としては実用上から設定される目的によって応力緩和時間を制御する方向が定まる。弾丸暗渠については施工後の削孔断面をできるだけ維持するという前提がある。 τ が小さければ削孔体通過中の一定変形下において応力消散が大きく, 断面の縮少・閉塞化の力を減ずることになる。即ちここでの土層改良の目的から設定される τ の変化は減少方向である。従って図-12に関する議論の結果から弾丸暗渠の施工に際しては, 土層の水分量を減少させ, 降雨直後の削孔をさけるのが良い。また施工速度を遅くするが削孔体を長くする (応力の消散時間を長くする) のが有利である。さらに土層を乱さない方がよいことを加えることができる。これらのことは土壌構造の改良目標を土壌の力学性から検討したものであって, 施工時間や工費, ケンリ抵抗の増加等の施工能率に関しては別の問題である。

階段工によって造成した排水不良畑において弾丸暗渠の施工を実施し, 施工速度と耕起が削孔断面の変化に与える影響を調査した。その結果は概して図-12についての内容と同様の傾向が得られた。

(2) 力学性に与える応力緩和の影響

図-13に自然含水比で突き固めて乾燥させた黒ボク土の一軸圧縮強度 σ_{max} ($=qu$) および破壊時の歪 ϵ_{max} ($=\epsilon_{qu}$) を示す。 $\sigma_{max} \sim w$ および $\epsilon_{max} \sim w$ を直線近似でき, w に対して σ_{max} は負の関係にあり, ϵ_{max} は正の関係にある²⁸⁾。

一軸圧縮試験で得られる破壊点 (ϵ_{max} , σ_{max}) の応力緩和後の変化の方向を矢印で示している (図-13)。 $\sigma_{max} \sim \epsilon_{max}$ は負の関係にあり, 変形上の脆性・延性の程度と強度上の硬・軟の程度は対応する。破壊点は緩和によって $\Delta \epsilon_{max} < 0$, $\Delta \sigma_{max} > 0$ となるように移動する。この場合 ϵ_{max} が減少するほど (w の減少方向), $|\Delta \sigma_{max} / \Delta \epsilon_{max}|$ は増加する。破壊点の軌跡を模式的に示せば図-14のようになる。

V 収縮挙動と土壌構造

1. 収縮による体積変化

土壌はいわゆる外力による体積変化とは別に, 脱水乾燥によって一般に体積を減じ間隙率が低下して密度が増加する。これらの変化の過程は内部構造により異なる。

比較的大きい団粒については, 粒径が大きくなると間隙率 (n) も高くなることはすでに述べた。しかし乾燥収縮に伴う n の減少率 $|\Delta n / \Delta w|$ は逆に低下する。また団粒の自然構造をねり返しによって十分壊したねり土球¹⁸⁾ は, 団粒に比べて n が小さいにもかかわらず特に

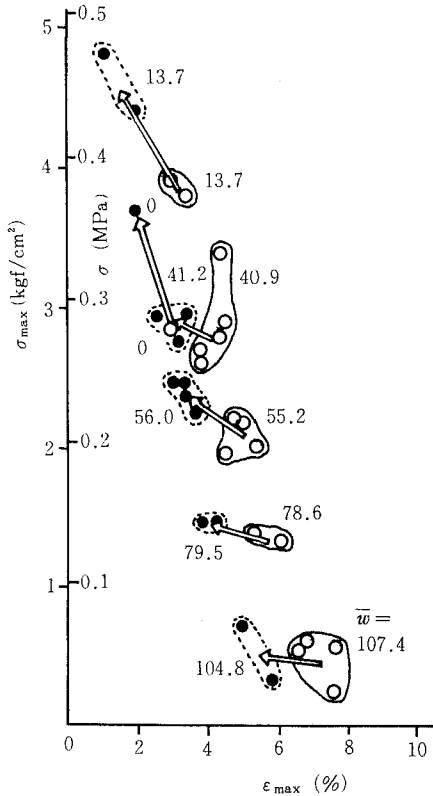


図-13 一軸圧縮の最大歪(ε_{max}.)と最大応力(σ_{max}.)
 におよぼす応力緩和の影響(O:緩和なし, ●:緩和
 後。図中の数値は平均含水比 \bar{w} を表す)

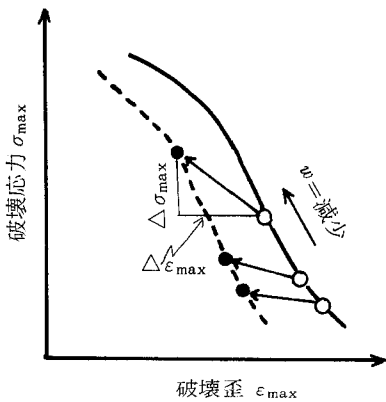


図-14 応力緩和後の破壊点(Δε_{max}, Δσ_{max})
 の軌跡(実線は緩和前, 破線は緩和後、
 Δσ_{max} > 0, Δε_{max} < 0)

低水分領域を除き |Δn/Δw| が大きい。自然団粒では組織化の指標である階層数が増えて n が高くなると同時に、内部粒子の接触数も増え乾燥によって発生する等方的な力に対して、粒子の相対移動が起り難くなるからであると考えられる。団粒構造を壊すと内部粒子の相対

移動が容易になるので、n の変化速度も大きい事実が理解できる。これらは圧縮力による団粒の変形量との対応がある。団粒が外力下で圧壊するときの最大歪¹⁹⁾は $w > pL$ では粒径の大きいものが小さく、また前述のねり土球では大きくなる。団粒構造の有無による収縮挙動の相異について竹中³⁰⁾は、構造の発達した火山灰土をねり返すと線収縮率が増大し、粘質土の場合はその増加の程度は少ないとしている。これは前述の傾向とよく対応する。

図-15は不攪乱土(大団粒を整形した団粒土柱)と突固め土柱の収縮による体積変化率を比較している。突固

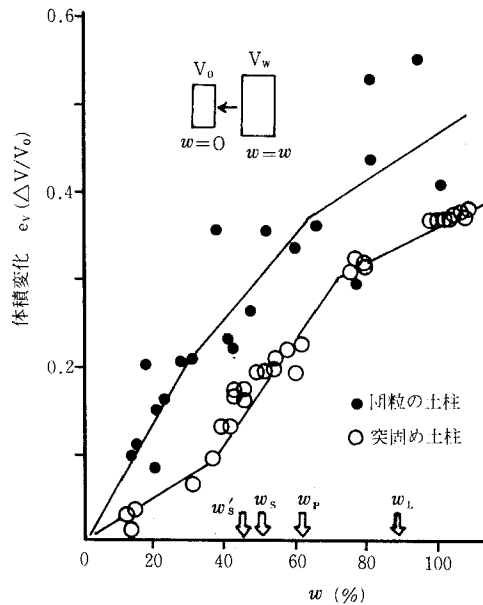


図-15 土壌構造と体積収縮

め土柱は収縮限界あたりで変曲部分のある比較的明確なS字状の関係となる。一方自然構造のある土柱ではパラッキを伴うが、収縮限界以下の低水分側では突固め土柱よりも明らかに体積減少が急である。即ち団粒の骨格構造が収縮によって最も変化するのは、乾燥によって生ずる等方的内力が大きい水分領域であるといえる。また団粒構造がある場合はそうでない状態のものに比べて、体積減少率が低水分側に位置する。同様な傾向は佐藤³¹⁾がすでに指摘している。

2. 外力と収縮による体積変化について

一般に変形テンソル Tdef は $Tdef = T^0def + Ddef$ で表わされる。T⁰def は等方成分で Ddef は偏差成分であり、応力テンソル Ts の等方成分 T⁰s と偏差成分 Ds がそれぞれ対応する。前者は体積変形に関係し、後者は形状変形に関係する。乾燥脱水による収縮はいわゆる内部

応力に基づく変形である。試料のあらゆる表面からの脱水(蒸発)を保障すれば、この場合の D_{def} は 0 で $T_{def} = T^0_{def}$ となり、収縮変形は等方的となる(ただし試料は均質で密度流の影響を無視する)。乾燥による団粒の間隙率の測定、図-12、図-13、図-15および図-16の測定はいずれも等方的体積変形になるように実験条件を考慮した。円柱形試料の乾燥による半径方向および高さ方向の変形歪はほぼ同じ値が得られている²⁸⁾。

試料の全表面から水分蒸発させないで乾燥脱水する場合は、体積変形のほかに、せん断(ずり)に類似する形状変形を伴う。収縮による変形を力学的に扱う際変形の成分を考慮する必要がある。

既述のように団粒の水分量低下による間隙率の減少勾配が小さい場合は圧縮歪も小さい。即ち収縮による変形量と外力による変形量は定性的に対応する。

図-16は外力(突固め)と収縮による黒ボク土の密度変化の相異を示している。およそ収縮限界以上の水分領

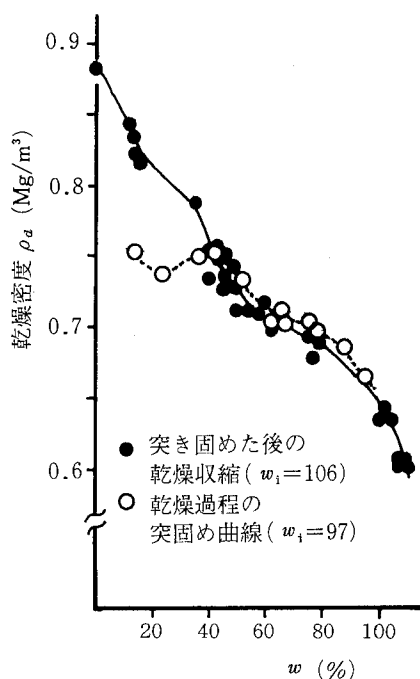


図-16 外力(突固め)と収縮による密度変化の相異

域では両者は大差はないが、それ以下の領域では収縮は進んで密度増加をもたらす、突固めの効果は低下する。このことから自然(現場)含水比で施工した後任意の含水比(収縮限界以上)まで乾燥した状態と、その含水量まで乾燥させてから施工した状態とを比較した場合、施工機械の転圧による密度増加には大差のないことが推察できる。

VI ま と め

土壌の力学的構造は、力場における土壌物質の可変的空間配置であるとみなされる。多くの研究者によって提出された幾何学的な土壌構造のモデルは、現象論的解析に用いられる構成方程式と密接に関連づけられるべきである。本報告は団粒土壌の構造と変形挙動との関係を扱っている。

団粒の物理的・力学的性質の特徴および容積表示の団粒分布に基づき、団粒構造の三次元的モデルが提案された。

団粒間および団粒内の微視的変形が示された。そして土壌体の圧縮下における巨視的な変形過程から、団粒の挙動が調べられた。

応力の緩和時間が示され、圃場の土工における適用が安定的に試みられた。応力緩和後の、歪-応力平面における破壊点の軌跡が与えられた。

外力と収縮による変形挙動が土壌構造と関連して議論された。

団粒構造の土壌を中心に土壌構造と力学性、主として変形挙動との関係を検討した。本稿で扱った対象と方法はほとんど筆者が研究中の分野の範囲内に限られている。

土層の理工学における基本的認識の指摘および問題提起はなされたと思われる。

引 用 文 献

- 1) 横掘武夫 (1969) : 材料強度学, 技報堂
- 2) Tan, T. K. (1957) : Proc. 4th Int. conf. SM & FE, 3, 87~89
- 3) Emerson, W. W. (1959) : Jour. Soil Science, 235~244
- 4) Van Olphen, H. (1963) : An Introduction to clay Colloid Chemistry, J. Wiley & Sons
- 5) Yong, R. N. and Warkentin B. P. (1966) : Introduction to soil behavior, Macmillan.
- 6) Pusch, R. (1970) : Canadian Geotechnical Jour., 7, 1
- 7) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. (1975) : Soil properties and behavior, Elsevier Scientific Pub. Comp.
- 8) 松尾新一郎・嘉門雅史 (1976) : 土と基礎, 24, 1, 54~64
- 9) Newland, P. L. and Alley, B. H. (1957) : Geotechnique, 7, 1, 17~34
- 10) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L (1979) : Geotechnique, 29, 1, 47~65
- 11) S. V. Nerpín and A. F. Chudnovskii (1970) : Phy-

- sics of the soil, Israel Program for Scientific Translations
- 12) 前田隆・相馬尅之・佐々木清一 (1976) : 農土論集, 61, 9~17
- 13) 須藤清次・安富六郎・山崎不二夫 (1968) : 材料, 17, 175, 3~6
- 14) 東山勇・須藤清次 (1965) : 農土論集, 14, 27~31
- 15) 岩田進午 (1961) : 土肥誌, 32, 572~580
- 16) 妹尾学 (1965) : 農土論集, 14, 11~15
- 17) 河野洋・吉田勲・辻本学 (1983) : 農土誌, 51, 10, 45~53
- 18) 新恒雅裕・長田昇 (1977) : 農土論集, 71, 16~20
- 19) 新恒雅裕・長田昇 (1977) : 農土論集, 71, 21~26
- 20) 新恒雅裕 (1983) : 土の理工学実験ガイド, 41~44, 農業土木学会
- 21) 長田昇・新恒雅裕 (1980) : 三重大学農学部学術報告, 60, 43~51
- 22) レポート (1964) : 土壌物理 (農業水産技術会議事務局訳), 畑地農業振興会
- 23) 横瀬広司・山田宣良 (1977) : 農土論集, 70, 1~6
- 24) 八幡敏雄 (1975) : 土壌物理, 東大出版会
- 25) 前田隆・竹中肇 (1983) : 土の理工学性実験ガイド, 5~12, 農業土木学会
- 26) 新恒雅裕・長田昇 (1983) : 農土論集, 103, 74~80
- 27) 寺沢四郎 (1982) : 農技研報, B, 33, 55~94
- 28) 新恒雅裕 (1984) : 農土論集, 113, 41~49
- 29) 安富六郎 (1969) : 土壌物理, 176~177, 養賢堂
- 30) 竹中肇 (1965) : 農土論集, 14, 32~35
- 31) 佐藤晃一 (1979) : 土の物理学, 98~120, 森北出版

質疑応答

宮内 (愛媛大) 緩和時間と含水比の関係を自然土と突固め土で求められているが、緩和試験の初期応力 ($\sigma_{t=0}$) はどのように求められたのですか。また、突固め土の構造破壊の程度はどのくらいでしたか。

新垣 (三重大) 初期応力 ($\sigma_{t=0}$) は一応いろんな含水比で一軸圧縮強度を求めておきまして、その $\frac{1}{2}$ のところに設定しました。構造破壊の程度は自然含水比で湿潤密度が生土で 0.7 gf/cm^3 であったものが、突固め土では 1.3 gf/cm^3 となります。実際の程度団粒が破壊されているかにつきましては、光学的手法による観察が必要だと思います。

須藤 (茨城大) 干拓地の弾丸暗渠は一般に縦に長い卵型になるが、これを新垣モデルではどのように説明しますか。

新垣 縦に長い型ですか。縦に長い型になるか、横に長い型になるかについては、土圧や外力の作用、土層の収縮も影響すると思います。施工直後に実は、この前観察しましたほとんどが横に長くて、さてどちらが本物かなと思いましたが、自然構造を壊した後は縦にも長かったと思います。測定結果がまとまりましたら発表させていただきます。