

土の変形、強さ、硬さ

吉 田 昭 治*

Deformation, Strength and Hardness of Soils

Shoji YOSHIDA

Faculty of Agriculture, Niigata University

1. はじめに

日本農業をとりまく内外事情から米「過剰」がとりざたされてから、減反とともに水田の汎用耕地化が問題とされている。水田の汎用化にあたっての土壌物理的課題の一つは、耕盤の問題であろう。

耕盤は、水田においては浸透抑制層としての役割と同時に、農作業機の支持層としての役割が期待される。しかし耕盤による過度の浸透抑制は稲作にとってマイナス効果となる。また畑ではむしろ耕盤の存在は不利になり、畑を水田に還元したときは再び耕盤の造成が必要となる。岩大工法は火山灰土の透水生を制御することを可能にした。これに学んで、耕盤の透水性を自由にコントロールしつつ、所定の支持力をもつような農地基盤造成技術の開発は、困難を予想されるが、土壌物理の大きな課題の一つと思われる。この技術を確認するには、まず耕盤の形成機構が現段階よりも定量的関係にまで究明される必要がある。ここでは、この課題と関連のある土の変形、強さ、硬さについて、相互の関連性については不十分なまま、また多分に主観的に（一般にまだ認められていないことや、十分な研究結果に基づかない仮定的なことを含むという意味で）述べ、耕盤の問題へのアプローチとしたい。以下で対象とする土は粘性（時間効果）を示さない固い土とする。

2. 土の変形

2-1. 土の歪について：土を力学的連続変形体とみなしたとき、土は大変形性、非線形性、異方性をもち、さらに土は粒状体からなることからダイレイタンス（「せん断応力」による体積変化）という特性をもっている。また、金属塑性は非圧縮性として扱われるが、土

は拘束圧の影響を強く受け、圧縮性を示す。このような特性をもつ土の変形挙動の法則性をつかむには、歪の表現が適切、合理的である必要がある。土についても微小変形を扱う問題では、弾性体での微小歪（公称歪） $\bar{\varepsilon}$ で十分であろうが、長さの伸縮率が10%以上になるといくつかの問題が生ずる。土の変形を表すには次のような理由から対数歪が適切であると思われる¹⁾が、現在の土質力学では土の塑性論以外ではまだ統一的につかわれていない。(1) 弾性体では応力0に対応して歪0の状態が一義的に決まるから、長さ l の要素内の歪が一様であるとして、歪0状態の基準長 l_0 が一義的に決まる。従って微小変形では、この l_0 によって定義した公称歪 $\bar{\varepsilon} = \Delta l / l_0$ ($\Delta l = l - l_0$, 圧縮歪を正とする)が適当である。しかし土のように歪0の状態が一義的にきまらない材料については、任意の時刻 t の長さ l を基準にして、これから dt 間の増分歪 $D\varepsilon$ を

$$D\varepsilon = -Dl / l$$

で定義したほうがよい²⁾。対数歪 ε はこれを積分して

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l D\varepsilon = \int_{l_0}^l -Dl / l = \ln(l / l_0)$$

として得られる。

(2) 大変形に対しても対数歪は加算性が正確に成り立つ。即ち、長さが $l_1 \rightarrow l_2 \rightarrow l_3$ と変化するとき各過程の歪は、 $\varepsilon_{1-2} = \ln l_1 / l_2$, $\varepsilon_{2-3} = \ln l_2 / l_3$ であるから、これを加算すると $\varepsilon_{1-2} + \varepsilon_{2-3} = \ln l_1 / l_2 + \ln l_2 / l_3 = \ln l_1 / l_3$ となり、これは定義により $\varepsilon_{1-3} (= \ln l_1 / l_3)$ に等しい。公称歪では歪が10%ぐらいでも、加算性に無視できない誤差が生ずる。

(3) 等積変形は、公称歪によるとそのポアソン比 $\bar{\nu} = 0.5$ で表されるとされているが、歪が大きくなるにつれて $\bar{\nu} > 0.5$ となってしまう(例、歪10%で $\bar{\nu} = 0.54$) (図-1)。これに対し、対数歪では歪の大きさにかわらず、等積変形の時常に正確にポアソン比 $\bar{\nu} = 0.5$ となる。

* 新潟大学農学部 〒950-21 新潟市五十嵐二の町8050
土壌の物理性 第59号 P. 2~6 (1989)

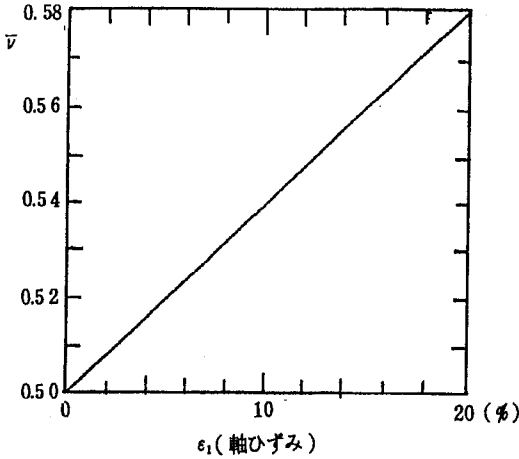


図-1 等積変形における公称ひずみによるポアソン比 \bar{v} (>0.5)

(4) もっと基本的なこととしては、応力はテルソン量として一般性をもつから、応力-歪関係もテルソン量間の関係として定式化されて始めて一般性をもつことができるが、公称歪では、歪10%程度でも実際的にもテルソン量を形成しなくなる。このような意味でも土の歪は(増分歪→)対数歪によったほうが一般性をもつ。このような扱いは、現在の土質力学では土の塑性論以外ではかならずしも一般的になっていない。

2-2. 土の応力と変形について：土は弾塑性の性質と大変形性をもつので、載荷過程と徐荷過程では不可逆性を示す。また普通の弾性体では引張り応力によって伸び歪を示すが、土の場合は引張りに対する抵抗力はほとんどないことと大変形性をもつことによって、他の方向の応力条件によって圧縮応力が働いている方向にでも大きな伸びを示す(例えば、三軸圧縮試験におけるいわゆる伸長試験は軸圧を σ_a 、側圧を σ_r として $\sigma_a < \sigma_r$ なる荷重によって、軸圧 σ_a に抗して伸びる形をとる。)このような変形挙動に対しては、塑性力学などの連続体力学で扱われる平均圧縮応力 p と偏差応力 s が適切であると考えられる。この場合、圧縮変形と伸び変形には、それぞれ偏差応力成分の正と負(圧縮側を正にとる)が対応することになり、自然である(図-2)。現在の土質力学では、土の塑性論的扱い以外では、偏差応力は一般に用いられず、せん断応力系として主応力比 σ_1 / σ_3 や主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ がとられているのが普通である。この結果、ダイレイタンスは平均圧縮応力(=平均主応力)一定下の主応力比による体積歪として定義されている³⁾。これに対してダイレイタンスを偏差応力による体積歪として定義すると、等方性変形体では偏差応力に対しては等

積変形しか生じないから、偏差応力による体積変化(ダイレイタンス)は異方変形体で生ずるものとみなされる。この考え方で応力-歪関係を構成すると、応力-ダイレイタンス関係はこれから演繹的に導くことができる⁴⁾⁵⁾。

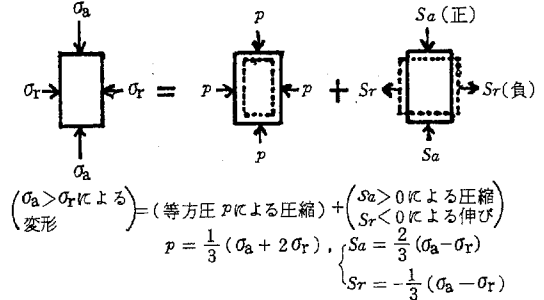


図-2 等方圧 p と偏差応力 s による変形

3. 土の強さ

一般に材料の強さは破壊に対する抵抗として定義するのが適切であろう。そうすれば、強さは破壊の概念から定義するのが論理的ということになる。破壊は土質力学ではせん断破壊を指し、降伏は一般には弾性から塑性へ移行する応力点を指すが(図-3)、土質力学ではモール・クーロンの破壊基準、モール・クーロンの降伏条件というように、しばしば破壊と降伏の概念が混用されている。この両者を区別するには、破壊failureは、fracture(破壊、破損)、rupture(破断)や一定応力下のflow(塑性的流動)のいずれによっても、元の固体的な材料特性を示さなくなる状態であると解釈すると、土を完全剛塑性体か弾完全剛塑性体と仮定した場合には、降伏状態=破壊状態となる。このことが降伏と破壊の概念の混用の理由であると思われる。

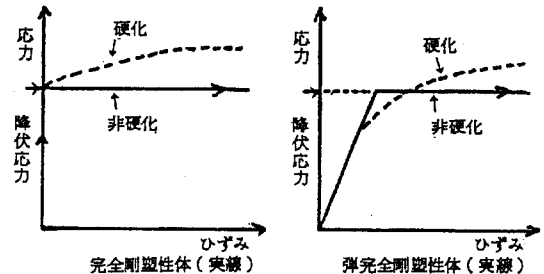


図-3 降伏応力

3-1. 土の強さと変形：土の強さは、せん断強さ τ として、固体摩擦則の形式で定義され、モール・クーロンの式 $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ などで表される。た

だし c' : 粘着力係数, ϕ' : 内部摩擦角, σ' : せん断破壊面に働く有効圧縮応力。

土質地盤などの安定・破壊問題は、土の塑性論の有限要素法解析以外では、完全剛塑性体として扱われ、破壊に至る変形は考慮されず、破壊の限界時の応力条件のみで議論される。しかし変位を大きくとれる土のリングせん断試験などの要素試験では、図-4のような応力-変位関係が得られる。最近の厳密な平面ひずみねじりせん断試験⁶⁾や歪軟化をも考慮にいたれた有限要素法解析⁷⁾を参考にして、図-4にみられる土の変形過程について、単純化し過ぎるきらいがあるかもしれないが、次のように解釈すると分かりやすいと思われる。

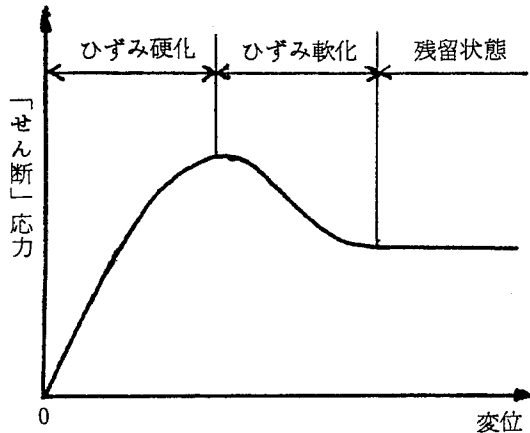


図-4 土の変形過程

1. 歪硬化過程は歪が一樣に生ずる過程、
2. 歪軟化過程は局部的にせん断帯 (shear band) ができ、これが発達する過程、
3. 残留状態は、体積一定でせん断変形が進む状態ともみなされ、先のせん断帯が発達した結果、連続した一枚のせん断破壊面または薄いせん断層が形成された状態。(これはややおもいっきった仮定であるが、体積が一定の定常なせん断変形が成り立つには、薄い一定のせん断帯の形成が必要条件になると考えた)。なお、固い土の三軸圧縮試験などでは2.の過程の初期にぜい性的な破壊が生じる。

3-2. 土の強さの微視的発現機構: 土のせん断強さの物性的な微視的機構は、砂質土では、土粒子間の固体摩擦とインターロッキング、充填密度により説明される。粘性土ではより複雑になり、粘土粒子間の物理化学的結合(端-端、端-面、面-面結合)と、この結合を強化する結合物質(非晶質のFe, Si, Alの酸化物、炭酸塩、有機物など)による膠結作用によるとされる⁸⁾。これは次

の耕盤の硬さの発現機構と共通するものと考えられるが、現在はまだ定性的解釈が主で、一部間接的な定量的データで説明が与えられている段階と考えられる。

4. 土の硬さ、その定義と測定法

様々な物質の硬さの概念を物理的に定義することは難しいようである。例えば、岩石では摩擦、反撥、押し込み、引掻き硬度などが、それぞれ実用的試験法と対応してきめられている⁹⁾。土の場合、土の硬度の測定法として山中式硬度計、SR-2型土壌測定器、コーン・ペネトロメータなどが代表的に実用されている。土質では標準貫入試験のN値などが代表的であろう。ここにもみられるように、土の硬さは物理的内容に基づき定義は難しいだけに、一般的使用を獲得した測定法によって逆に定義した方が実際的でありそうである。

土壌物理で多く用いられる山中式硬度計の硬度やコーンペネトロメータのコーン指数は、土の強度定数(c' , ϕ')と関連づけられようが、この理論、実証研究の難しさもあり、進んでいない。また両者の測定値の間に関連があるはずであるが、この実証的研究は少ないようである。畑土壌の表層について、貫入抵抗値の一種であるCBRと山中式硬度 q_r (底面積当りの抵抗値の換算値, kgf/cm^2)、コーン指数 q_c との関係を求めたもの¹⁰⁾から両者の関係を求めてみると、 $q_r \approx 1.19q_c$ となり、測定条件にもよると思われるが、両者の相関が高いことがうかがえる。

ここで両者の特性を考察してみると、山中式は、土壌断面を大気に解放して、その表面の硬度を測定するから、土壌の構造・緻密さを直接反映した硬さを測定していることになろう。これに対し、コーンペネ法は土層に直接深く貫入した時の抵抗を測定することになるから、測定対象の土自体が土かぶり圧による拘束圧を受けており、コーンは側方からこの土圧を受けるから、この硬度は拘束圧の影響を強く受けることになり、その力学的内容はやや複雑になる。しかし農作業機に対する地耐力自体も深さに応じた拘束圧を受けるから、地耐力を問題にした硬度測定にはコーンペネ法が直接的であると考えられる。

5. むすび: 耕盤の形成機構と造成技術について

作土の直下に形成される硬い、ち密な層をすき床層(盤)、盤層、硬盤、耕盤などと呼ばれ、その定義や用い方は必ずしも統一されていないようである。

すき床層という用語は、水田¹¹⁾でも畑¹²⁾にもみられ、ともに耕起作業などの家畜や農作業機の踏圧によって作土の下に形成される硬い、緻密な層ぐらいの意味で

用いられている。盤層については、明瞭な定義は見受けられないが、水田のすき床層と同様な意味か¹³⁾、この層にさらに活性鉄やマンガンが集積して一層ち密になった層を指すものとしている例¹¹⁾がある。

耕盤は、水田の場合に多く用いられているようであるが、畑にも用いられている¹⁴⁾¹⁵⁾。ここでは、耕盤は水田の作土の直下に耕起や浸透水の作用のもとに特微的に形成される硬い、緻密な層を指すことにする。

水田の耕盤は、水田の保水性を高め、農作業機の支持層としての役割を果たすが、耕盤が発達し過ぎると過度に浸透を抑制し湿田化し、作物根の伸長を阻害する。耕盤の浸透性、硬さともに適度であることが必要である。

耕盤の形成機構については、シロカキ作業や水中均平作業中の微細土粒子の沈積による緻密化、農作業機による破碎・転圧作用、溶脱による鉄やマンガンの作土下への集積などがあげられているが、理論的、実証的には十分明らかではない。岩大工法の研究¹⁶⁾で解明されたように、土の浸透性と硬さ、強さを反映する土構造の指標的性質は同じではない。浸透性を左右するのは粗孔隙の量だけでなくその連続性であり、転圧に対する抵抗は構造単位の結合の強さである。耕盤の固相率はあまり差がなくても、コーン指数では大きく違うように、耕盤の硬さ(地耐力)は、緻密さ(密度)のみでは測れず、土粒子間の結合力の強さという質的差異から明らかにされる必要があろう。また、水田の土壌型(地下水位の高低)によって鉄などの集積層の位置、発達具合が違う¹⁷⁾からこれと耕盤形成との関係の問題もある。さらに、水田の地耐力は土壌水分の影響を強く受ける¹⁸⁾ことから、この土粒子間の結合力についての理論には、耐水性微細団粒の結合様式との違いなど、水分とのかかわり方が組み込まれる必要があろう。

粘土・水系の分散・凝集機構の研究はかなり定量的に扱うところまで発展した¹⁹⁾。この延長線上に耕盤の形成機構が解明され、さらに耕盤造成技術の発展が期待される。

(以上、参考にした多くの文献を一々記さなかった点、引用も不十分、不正確なことをお詫びする)

引用文献

- 1) 吉田昭治：17回土質工学会，189-182(1982)
- 2) 吉村慶丸：塑性力学(共立)(1957)
- 3) 松岡 元：Soils and Foundations,14 (3),13 -24(1974)
- 4) 吉田昭治：農土論集,75,42-49 (1978)
- 5) -----：Soils and Foundations,20 (1),1-11 (1980)
- 6) 龍岡文夫：Soils and Foundations,26 (1),65-84
- 7) 田中忠次：分かりやすい土質力学(土質工学会),203-243 (1987)
- 8) ヤング, ワーケンチン :土質工学の基礎(鹿島出版),239-267 (1975)
- 9) 山口, 西松: 岩石力学入門(東大出版)149-169 (1967)
- 10) 吉田 力：農土論集,104,25-29 (1983)
- 11) 川口桂三郎・喜田大三：土肥誌,28 (3),11-15 (1957)
- 12) 山田 忍：土壌の物理性,10,31-38 (1964)
- 13) 米田茂男：土壌の物理性,10,20-30 (1964)
- 14) 佐藤清美：土壌の物理性,10,39-55 (1964)
- 15) 多田 敦：土壌の物理性,53,29-35 (1986)
- 16) 徳永光一：山崎不二夫編 土壌物理(養賢堂),248-260 (1969)など
- 17) 山崎不二夫：農地工学(上),(東大出版),50-58 (1971)
- 18) 滝嶋康夫：土壌の物理性,16,10-15 (1967)
- 19) 赤江剛夫：農土論集,133,37-56 (1988)

Summary

It is an important problem in soils physics to develop a technique making hard pans which have suitable permeability and sufficient bearing capacity for working machine in paddy fields. The fundamental properties (deformation, strength and hardness) of soils concerning this technique are reviewed, partially including the author's speculation.

1) On the basis of the considerations on the relation between incompressibility and poisson's ratio, logarithmic strain is reasonable to express deformation of soils.

2) It is preferable to adopt deviatoric stress tensor rather than principal stress ratio or principal stress differences in order to express shear stress for soils.

3) A process of deformation to failure of soils can be expressed by the simplified model: generation of uniform strain, deformation of shear band and formation of a continuous shear failure band.

4) It is very difficult to physically define hardness of soils, so that it is practical to define it by the methods of measurement which are widely applied.

5) To develop the technique making hard pans so that their properties can be controlled, such investigations will be required on the relation between hardness and not only density of soils but also qualitative differences of bond force among soil particles, and on the physical relation between soil moisture and bond force among soil particles.

(Soil phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 59, 2 - 6, 1989)