

力による土の変化

須藤 清 次*

土に外力が加えられたとき土壌構造がどう反映するかということは、一軸圧縮強度の鋭敏化や突固め最適含水比などの個々の課題についてはよく知られている。土壌構造そのものは inter-particle の問題であるから、物理化学的方法で取扱われる。いま土壌構造についてはわれわれなりに一定の理解をもっている。そのとき土の塊に力が作用して応力が発生する場合の土の変化を、いわゆる土壌構造論とは異なる観点で考えてみたい。すなわち土の変化の評価を行なうための変化の基準や方向を問題にする。

I 耕地土壌

今世紀のはじめ Vernadsky は“地質時代の現時期においては、人類による地球科学的活動すなわち緑色植物の生産したものを収穫する農業はますます有勢かつ多様になった”と述べたのであるが、今日ではさらに工業および人間生活による大地と水の変化の方向はわれわれ人間をおびやかしている。

土壌を認識するにあたり、まず物質の分散状態を考えると、塩入土壌学の一稿に述べられている。地表の岩石の始原である火成岩の風化から出発すると、内層は未風化の岩石である。地中から上空へ向って、風化圏(土壌母材)・土壌化圏(土壌)・水圏・気圏へと順次に分散度が高い配列になっている。

このような視野で耕地での力学的問題の1例として水田について考えてみる。雄大な八郎潟干拓において、計画としては干陸にひきつづいてすぐに水田化が追求された(いまでは畑が取沙汰されているが、当初は全部水田をめざしたのであった)。もともと大部分のわが国の水田は、海退により——干拓と同じように——生れてきたものである。干拓の場合のように短期に水田の機能を持たせようとするときは、それなりの水田の構造が条件づけられる。農業のための最初の物理的条件は耕盤の形成であろう。

耕盤形成の機構は多くの経験や調査結果から次のようにまとめられる。植物(稲)の吸水による脱水・収縮が不可逆的に進行することがつまり耕盤形成過程といえ

る。それに加えて踏圧(機重を含む)による間隙の締固め作用が補足的な役割を果たす。その際に土壌が分散的であることが必要であり、排水・溶脱による不可逆過程が保障されなければならない。湛水条件下の分散過程については、齋藤により生物・腐植の分散作用や結合物質としての鉄の移動についてのすじ道が示された。

水田の耕作は分散をうながす。水田は土がゲルからゾルにかわり、水に分散して流れて溝に入る一步手前で利用されている農業の場であると考えられる。分散してゆく寸前で、水田という地形形態が、1年サイクルの農耕で力学的作用が加わって維持されている。そこでは耕

表-1 水田のサイクル

夏	冬
稲作	休耕または畑作
代かきによる表土の分散	根の吸水・蒸発・踏圧による耕盤の固化

耘・代かきによる〔分散〕と前述の〔固化〕とのサイクルのなかで稲作が行なわれているといえる。

II 応力による変化

地汜りや地盤沈下のような巨大な力を伴う場合も、前述の耕地と同様に考えられる。

土中の主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とする。この応力はそれによる変形特性に対応して分類すると、二つの成分に分けられる。すなわち一つは圧力(等成分)で ($\sigma_2 = \sigma_3$ の場合) $(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 、他の一つはせん断応力(偏差成分)で、後者は主軸に 45° の二つの面で ($\sigma_2 = \sigma_3$ の場合には) $(\sigma_1 - \sigma_3)/3$ のせん断応力を表わす。圧力によっては体積変化変化だけが進み、その際に土粒子または団粒の相互位置はほぼ同形態のままであるが、粒子の接近により粒子間力は強まる。一方せん断応力は体積変化には無関係でずりのみを進め、粒間力を弱める。しかしせん断応力によっても、粒子相互のかみ合いまたは回転の効果により体積変化をもたらす。この場合の体積増(減)を正(負)のダイラタンシーと呼ぶ。

次に具体的な例について考える。締固めについてみ

* 茨城大学農学部

ると、粒子間関係を変えない体積変化のみが現われる場合は静的全面一軸締めめでみられるが、棒による突固めでは土粒子は縦の配向に向う（縦方向のせん断力により）。

圧密は脱水を伴いつつ土の固化が進むが、圧密方向に垂直な配向も進む。一次元圧密の全応力を σ_1 とすると、

$$\sigma_1 = u + \bar{\sigma}_1, \quad u: \text{間隙水圧}, \quad \bar{\sigma}_1: \text{有効応力},$$

半無限地盤または圧密リング内では $\sigma_2 = \sigma_3$ あるから、横方向の歪 ϵ_3 は、

$$\epsilon_3 = -\nu(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2)/E + \bar{\sigma}_3/E, \quad \nu: \text{ポアソン比}, \quad E: \text{ヤング率}$$

ここで $\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$, $\epsilon_3 = 0$ であるから、

$$\bar{\sigma}_3 = \{\nu/(1-\nu)\}\bar{\sigma}_1,$$

$\nu = 0.4$ とすると、 $\bar{\sigma}_3 = (2/3)\bar{\sigma}_1$ となるから、土粒子に働く有効応力は偏差成分（せん断応力）を持つ。したがって圧密によって配向が進むことになる。この論理はさきに触れた静的締め固めの場合も同様であるが、歪が圧密と比して小さいために、配向が識別し難いのであろう。

非排水の場合に起こる歪の連行で配向と固化が行なわれるクリープは、フォークト一般化模型で表わすと図-1

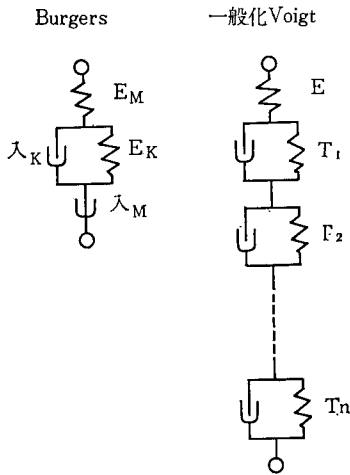


図-1 機 械 模 型

ようになる。一次元式は、

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \sigma_1 \sum_{i=1}^{\infty} J_i (1 - e^{-t/T_i})$$

$$= \frac{\sigma_1}{E} + \int_0^{\infty} \Phi(t) (1 - e^{-t/T}) dt$$

t: 経過時間

T_i : 遅延時間のシリーズ

J_i : コンプライアンス (1/E) のシリーズ

Φ : 遅延スペクトル

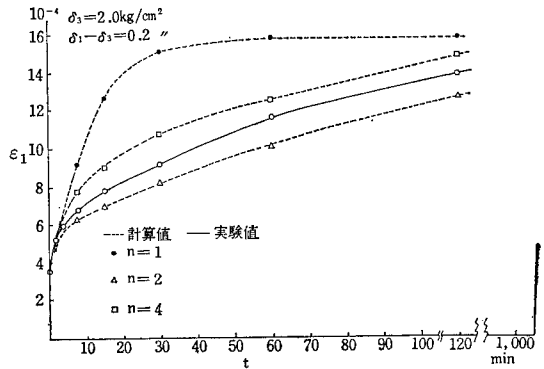


図-2 (a) クリープ

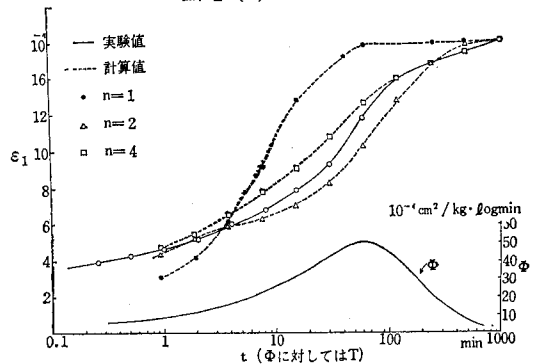


図-2 (b) 遅延スペクトル

で一般的に表わされるが、このままでは計算値が得られないから Yong・Chen の方法で第二項を書きなおすと、次式により実際のクリープを表わすことが可能になる。

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \sigma_1 \sum_{i=1}^n [\Phi(\log T_i) (1 - e^{-t/T_i}) \Delta \log T]$$

成田層砂質ロームの一例を示すと図-2 のようになる。遅延スペクトルの分割数は $n=3$ でかなり 実際値に近くなる（遅延スペクトルがベル形のとき）。

三軸試験機内で $\sigma_3 = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ の条件で、軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ のときのクリープによる体積変化をみると表-2 のようになる。体積圧縮歪 ϵ_V と縦歪 ϵ_1 との関係は、みかけ（遅延弾性）ポアソン比を ν_R とすると、 $\epsilon_V = 1 - (1 - \epsilon_1)(1 + 2\nu_R \epsilon_1)$ であるから $\nu_R = (1 - \frac{\epsilon_V}{\epsilon_1})/2$ と表わすことができる。 ν_R は負の値が現われるから、横

表-2 クリープによる体積変化

t	$\epsilon_1 (10^{-3})$	$\epsilon_V (10^{-3})$	ν_R
2 min	1.76	2.35	-0.17
1 h	4.96	6.67	-0.21
4 h	6.16	10.2	-0.31
(24 h)	(7.35)	(26.7)	(-1.31)

方向も縮小したことになる。このような横方向の縮小は圧密の場合と同様に現地では起こりえないことであるが、土の構造変化が新たに体積縮小を再起させることを意味する点は興味深い。

破壊は正のダイラタンシーのなかで起き、体積増→分散方向の進行する。破壊線では土粒子の配向をもって終了すると見えるが、この形態は一つの結果論であろう。破壊により土は水に溶けまたは空中に散じる方向に向うのであるが、水がなくまた飛散するには土が過大であれば、クリープと同様にその流動の効果は固化して次の幾何的形態で二次的安定に入る。

固い土での圧力による締固めとせん断応力による流動の方向をまとめると表-3のような図式によるサイクルを繰返して、遂にはすべては流れ去ることであろう。

表-3 固い土のサイクル

圧力に対してせん断応力	小	大	
クリープ		破壊	
時間の経過とともに固化		塑性流動	水・粉碎の条件あり
		固化	分散
二次的安定		流出	

III まとめ

土の變化の駆動力は、太陽の熱エネルギーによる水の海→空→地の循環とそれに伴う生物の作用が主であっ

て、それに加えて地下の熱エネルギー・地盤變動が補足的役割を果たすといえる。しかし地史的タイム・スケールで見れば後者の方が主になる。

いま大地は交通・土地利用の点で、その広さが実感されるほどに狭くなってきた。ついに最近までは水も無限と思われたが、水道水をみても海をみても、いまは誰もが水の有限性をひしひしと感じている。大地も土も昨日の水の位置におかれているとあってよい。

力の作用は実用的には巨大である。しかし土の流れの運命のなかでは、生産・生活のためのつかの間の地形の維持に、圧力とせん断応力の相互のかかり合いが、流れの進行を制御しているに過ぎない。

文 献

- 1) 斎藤：北海道開発局土試報，56，1，(1971)
- 2) 佐藤：土壌の物理性，10，39，(1964)
- 3) 塩入：土壌肥料講話，朝倉，261，(1933)
- 4) 須藤・東山・山崎：土と基礎，13(9)，29，(1965)
- 5) 須藤：研究の資料と記録(東大農地工学研)，14，69，(1965)
- 6) 須藤・神尾：農土誌，35，20，(1967)
- 7) 山田：土壌の物理性，10，31，(1964)
- 8) 米田：同上，10，20，(1964)
- 9) Yong・Warkentin(山崎・山内監訳)：土質工学の基礎，鹿島出版，211，(1972)
- 10) Yong・Chen：Proc. 5th. I. C. Rheology. 2，501(1970)