

土壌の突固め充填過程のレオロジー的考察

安 富 六 郎*

Rheology of compaction curve

Rokuro YASUTOMI*

Faculty of Agriculture, Ibaraki University

1. はじめに

土壌の突固め特性は、土工計画のみならずアースダム、農道路床施工、水田の透水性制御など施工管理上にも欠かすことができない。土壌に適合した施工を行うためには土壌の理工学的性質を十分に把握しなければならない。

土壌の体積密度は一定の突固めエネルギー条件では土壌含水比によって変化する。突固めによる土壌の挙動は土性、粘土鉱物、土壌構造や試料の風乾や力学的履歴によっても大きく変わる。このために挙動を解析的に扱うことは困難と考えられている。この報文は土壌構造を形成している土粒子が充填構造を変える場合に、土壌水分が潤滑にどのように寄与するかを想定し、土粒子のレオロジーモデルから総括的な手法によって突固め曲線の特徴をとらえようとしたものである。

2. ρ_d 曲線の極大はどうして現われるか

土壌粒子は相互に結合力および摩擦力によって力学的に平衡し、一定の土壌構造を形成する。これに外力を加えて突固める場合、土壌構造強度以下の力では、土壌は弾性的変形を受けるのみで、突固めの効果は現われない。外力仕事は弾性復元する過程で熱となって消散する。強度以上の外力では土壌は構造を変える。このとき外力仕事の一部は粒子充填を密にするために使用され、乾燥密度 (ρ_d) は増大する。構造の変化をおこす外力の限界値は土壌の降伏値 (θ) であり、この θ 以上の外力が ρ_d を変化させる 1 つのパラメータとなっている。 θ は土壌水分の有するエネルギー状態、および粒子相互の摩擦力によって決まる。毛管水分不飽和領域 ($pF < 3$) では降伏値 θ は水分エネルギー状態に支配されるが、低水分状態 ($pF > 3$) では粒子形状、粒子間摩擦力も降伏値 θ を決める要因となる¹⁾。

充填の状態を示す乾燥密度 (ρ_d) は一定範囲の水分領域では大きい値をとり得る。水分飽和した領域では水が

粒子間の充填を妨げ、 ρ_d は小さな値を示すであろう。土粒子間に不飽和の空隙が発達し、かつ粒子間潤滑が大きい土ほど明瞭な最大乾燥密度が期待できる。これは塑性変形 (= 構造変化) が最大に達した場合に相当すると理解できる。この最大値は突固め条件が同じならば、水分による粒子間の潤滑と乾燥摩擦力の競合によって生ずる。

試料の含水比を w 、土粒子密度を G とする。粒子空隙なしの状態 (ゼロ空隙) では、土の乾燥密度 ρ_d は

$$\rho_d = G\gamma_w / (1 + G \cdot w) \quad \dots\dots (1)$$

但し、 γ_w : 水の密度 G : 土粒子密度、

w : 含水比

突固め曲線のゼロ空隙の曲線からのずれは、外力に対する粒子間の潤滑が少ないほど大きい。粒子間の粒子潤滑性は水分によって高まるが、水分の粒子表面への毛管水の量が多いほど、また附着皮膜が厚いほど潤滑性はよいであろう。

3. レオロジーモデル

(1) レオロジーモデルの外力仕事と構造変化について

土壌の突固めに対する力学モデルを偽ビンガム体 (Pseud Bingham 体)²⁾ とし、Fig. 1 のように示す。Fig. 1 の H はスプリング (弾性率 E)、 N はダッシュポット (粘性率 η)、 Y は降伏値を示すホック (降伏値 θ) である。スプリングに蓄えられるエネルギー W_E は、外力 P が

i) $P < \theta$ ならば、歪 ϵ によって、 $W_E = E\epsilon^2/2$ となる。外力を除くと再び ϵ は 0 にもどる。系に与えられたエネルギーはスプリング H を通じて消散する。

ii) $P \geq \theta$ ホック (Y) ははずれ $P = \eta\dot{\epsilon}$ が生ずる。

$\eta/E = T_M$ とし、 $T_M \gg t$ ならば、蓄積エネルギー W_E は

$$W_E = E\epsilon^2/2 \quad \dots\dots (2)$$

充分大きい観測時間 ($T_M \ll t$) では、この間に試料に加えられたエネルギー W はスプリングに蓄えられる

* 茨城大学農学部

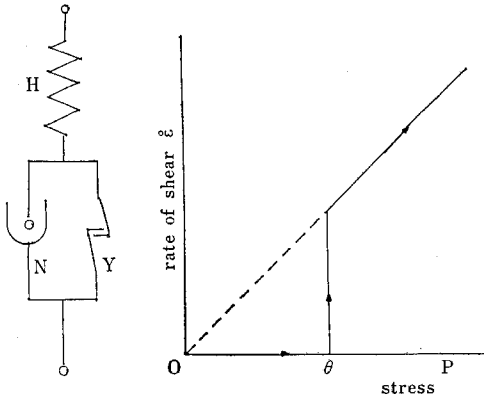


Fig. 1 A model for pseud-plastic flow
 Y : hock (yield value θ)
 N : dash pot (viscosity η)
 H : spring (elasticity E)

ものもあるが、結局はダッシュポットで消費される ($W\eta$)。

$$W\eta = \int_0^t \eta(\dot{\epsilon})^2 dt \quad \dots\dots(3)$$

消散エネルギー ($W\eta$) が一定ならば η が大きいほど $\int_0^t (\dot{\epsilon})^2 dt$ は小さくなり、観測時間 t における歪は小さい。

単位質量当たり、外力仕事によるエネルギー W は蓄積エネルギー W_E と消散エネルギー $W\eta$ の和である。

$$W = W_E + W\eta \quad \dots\dots(4)$$

ここで蓄積エネルギー (W_E) の一部が構造変化のエネルギー W_E' に用いられるものとするれば、 $W_E = W_E' + W_E''$ である。 W_E'' は外力によって与えられた蓄積エネルギーであるが、応力緩和過程で時間を充分大きくとれば、 $W_E'' \approx 0$ となる。すなわち $W_E \approx W_E'$ である。

$$W_E' = W - W\eta \quad \dots\dots(4)'$$

粒子充填過程ではモデルの力学定数は変化する。粒子が最密充填に近づくにつれて構造内に蓄えられるエネルギーよりも消散エネルギーが増大する。この構造内に蓄えられるエネルギーは粒子系が有する一種のポテンシャルとして考えられる。

(2) 粒子の充填と粒子間潤滑について

土粒子間の水膜が厚いほど粒子相互の移動は容易であろう。**Fig. 2** のような粒子配列があり、外力により2粒子に流速 v, v' の流動が生じたものとする。粒子の半径 r 、その比表面積 S 、その表面に $\delta/2$ の厚さの水膜が存在する。外力 $P > \theta$ であれば、粒子間の流動はニュートン流動をする。各粒子の移動速度 v, v' の差 Δv は $v' - v = \Delta v$ であるから粒子間の剪断力 τ と水膜の粘性 η_0 および粒子によるみかけの粘性 η の間には次式が成立つ。

$$\tau = \eta_0 \Delta v / (2 \cdot \delta/2)$$

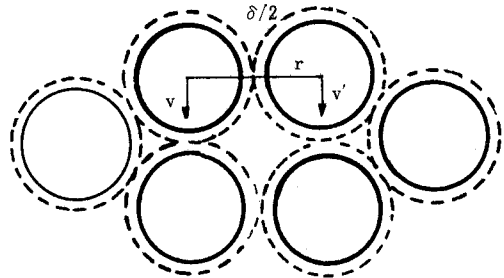


Fig. 2 A model for lubrication by water film around particles
 r : radius of particle, $\delta/2$: thickness of the film, v, v' : rate of particle moving by compaction

$$= \eta \cdot \Delta v / (2r + \delta) \quad \dots\dots(5)$$

D : 粒径

$$\eta / \eta_0 = 1 + D / \delta \quad \dots\dots(6)$$

さらに粒子の比表面積 S 、試料の含水比 w とすれば

$$S \cdot \frac{\delta}{2} \approx w \quad \dots\dots(7)$$

$$S = 6 / D \cdot G \quad \dots\dots(8)$$

比粘性 η_{sp} (specific viscosity) は

$$\eta_{sp} = (\eta - \eta_0) / \eta_0 = D / \delta = 3 / w \cdot G \quad \dots\dots(9)$$

粒子間の潤滑性は水粘性に対するみかけ粘性の増加によって減少する。したがって突固めによる充填抵抗は比粘性が大きいほど大きいと考えられる。パラメータとして K を定数にとれば、 $K \cdot \eta_{sp}$ は突固めの消散エネルギーを決める項である。

粒子充填状態がその充填系のエネルギー状態に対応すると仮定し、突固め初期のエネルギー状態を e_2 、突固め後の充填密度 ρ_d のとき e_1 、最密充填 ρ_d' のとき e_0 とする。外から充填系に与えられるエネルギー e が e_0 に等しいとき ($e = e_0$)、 $(e_0 - e_2)$ と $(e_1 - e_2)$ のエネルギー差 Δe は系外への散逸エネルギーと考えられる。

$$\Delta e = (e_0 - e_2) - (e_1 - e_2) \quad \dots\dots(10)$$

$$e_1 = e_0 - \Delta e \quad \dots\dots(10)'$$

この式は式 (4') に等しい。

粒子系のもつ充填エネルギー状態は単位体積当りのエネルギーと充填密度によって決まるから、式 (11)' は乾燥密度 ρ_d がゼロ空隙乾燥密度 ρ_d' および消散エネルギーに関係する項によって表わすことができることを示唆するものである。ここで次のような一つの経験式が提示できるであろう。

$$\rho_d = G \cdot \gamma_w / (1 + G \cdot w) - K \cdot \eta_{sp} \quad \dots\dots(11)$$

式(9)から

$$\rho_d = G \cdot \gamma_w / (1 + G \cdot w) - 3K / G \cdot w \quad \dots\dots(11)'$$

K は実験によって決められる定数である。 ρ_d は含水比 w とパラメータ K から求められる。

4. 突固め実測値との対応 および式の補正

式(1)の K をパラメータとして、含水比 w と乾燥密度 ρ_d の曲線を Fig. 3 に示す。実測値曲線の Fig. 5 と比べ式(1)は適合すると言えない。粒子充填は粒子相互依存的な構造変化で進むから、粒子間潤滑も完全ニュートン流動に従わないであろう。低含水比領域ではダイラタント的な粒子挙動もあろう。式(1)を Fig. 5 の実測値にあわせるため、粒子充填の潤滑を妨げる第 2 項に $(K \cdot \eta_{sp})^n$ を代入し、次のように補正する。

$$\rho_d = G\gamma_w / (1 + G \cdot w) - (3K/G \cdot w)^n \quad \dots\dots(12)$$

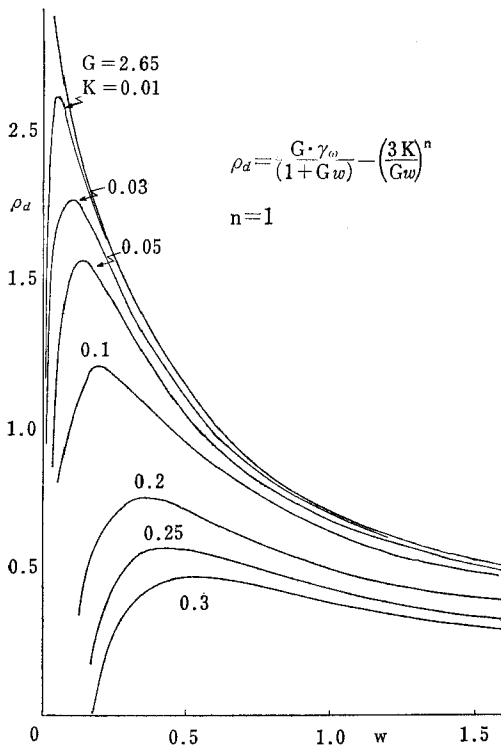


Fig. 3 Dry density curves using eq. (11)
 w : moisture content of the soil
 $n=1$

n を 1 から次第に大きくする。 $n=3.5$ とした例を Fig. 4 に示す。 Fig. 5 の曲線と比べ、式(12)は数例を除き高い相関を示す。 Table 1 に式(12)の n , K , および試料の常数などを示した。

5. 考察

(1) 式の適合性について

式(12)の K をパラメータとして、含水比 w と乾燥密度 ρ_d の関係を Fig. 4 に示す。

実験値曲線 Fig. 5 に対する式(12)の適合性について考える。突固め曲線は Wetting Process と Drying Process では異なるが、非火山灰土壌では共に、式(12)の n , K を適当に選ぶことによって実験値を式にのせることが

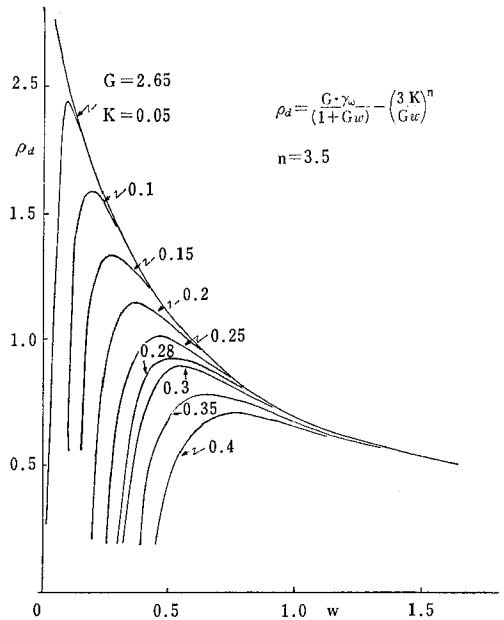


Fig. 4 Dry density curves using eq. (11)
 w : moisture content of the soil
 $n=3.5$

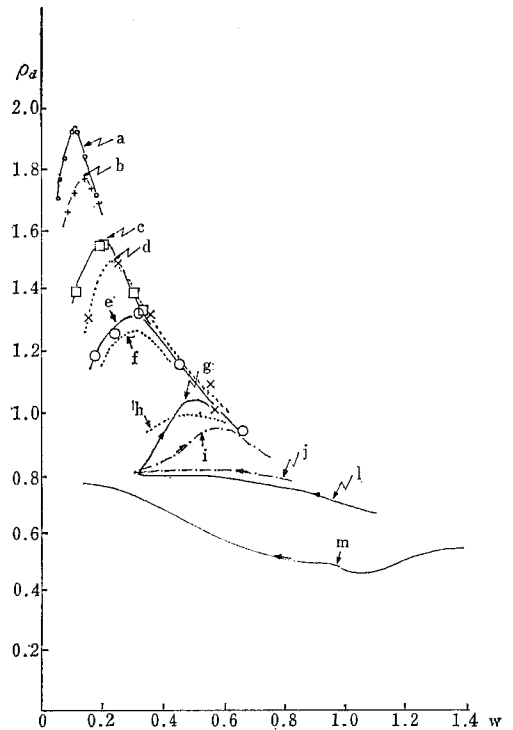


Fig. 5 Dry density curves by experimental data.
 w : moisture content of the soil

できる。多くの場合、 $n=3.5$ が最もよい曲線を示す。しかし関東ローム生土の適合性は悪く、 $n=2$ として実

Table 1. Characteristic constants of several samples experimented

試料	土粒子密度 G	K	n	実測値と(11)式との相関*	試料土壌	引用文献
a	2.61	0.05	3.5	0.92	砂質マサ土	宮内 ⁶⁾
b	2.76	0.07	3.5	0.97	平塚の土	渡辺・久野 ²⁾
c	2.7	0.10	3.5	0.99	粘質マサ土	宮内 ⁶⁾
d	2.58	0.12	3.5	0.98	盤田原粘土	須藤・安富 ⁹⁾
e	2.58	0.15	3.5	0.94	第三紀層粘土	須藤・安富 ⁹⁾
f	2.55	0.17	3.5	0.94	洪積粘土	荒川 ⁷⁾
g	2.7	0.25	3.5	0.95	北関東ローム (風乾)	須藤・安富 ⁹⁾
h	2.77	0.24	3.5	0.95	沖積粘土	荒川 ⁷⁾
i	2.58	0.28	3.5	0.74	関東ローム表層 (風乾)	多田 ⁸⁾
j	2.58	0.35	2.0	0.42	○関東ローム表層土(生)	多田 ⁸⁾
l	2.7	0.35	2.0	0.00	○北関東ローム(生)	須藤・安富 ⁹⁾
m	2.78	—	? <2.0	—	○関東ローム下層土(生)	多田 ⁸⁾

* 実験値と(11)式で算出される値との相関係数 ($w > w_{opt} \pm 15\%$)
 ○ Drying Process, これ以外は Wetting Process またはこれに準じたものとみなす。

測値を式(12)に合わせることができ精度は悪い。とくに関東ローム生土の Drying Process では曲線に明瞭なピークがない。このとき式(12)は必ずしも適合性があるとはいえない。

風乾によって土壌粒子の物理化学的特性、とくに水和現象の著しい変化が見られる火山灰生土の突固め曲線の式(12)への適用はむずかしい。一般にアロフェンを含む土壌では、風乾作用によって粒子が親水の性質から疎水的に変化し、乾燥摩擦が発生し易くなる。風乾された土壌は、多くの例について非火山灰土と同じ挙動をする。

沖積土、他の非火山灰土に対し、式(12)は有効であり、K がわかれば含水比の変化による乾燥密度をある範囲内で推定できる。関東ローム生土以外は実測値と式(12)の適合性は相関係数 R を用いると最適含水比 w_{opt} の±15%の領域内では $R=0.92\sim 0.74$ と高い値が得られた (Table 1)。

(2) K について

突固めによる乾燥密度曲線は土壌の乾燥履歴や実験条件によって変わる。突固めエネルギーの変化は乾燥密度の最大値 ρ_{max} にも影響を与える。関東ローム生土は一般に ρ_{max} が明瞭に現われない。これは基準の突固めエネルギーでは構造が強く、変化しないためであろう。

風乾土と生土の乾燥密度曲線の異なりは外力仕事に対する土壌構造変化のしかたが異なるためであろう。風乾が進むと粒子相互の結合力は低下し、外力によって充填され易くなる。Table 1 からみると関東ロームの K の

値は他に比べ高い。これは土壌が充填しにくい高い降伏値、または粒子が大きい充填抵抗を示すからである (g, h, i, j, l)。一般に非火山灰土の K は低く、突固めの容易さを示す (a, b, c, d, e, f)。

K は土壌構造の強さを示す指標とみなすことができる。K が大きいものほど突固めによる粒子充填は困難となる。関東ロームのような比表面積の大きい火山灰土では非自由水分量も多く、水分減少によって粒子間の潤滑は減少し、充填抵抗は増大する。K の大きいものは突固め曲線も平坦化する傾向がある (Fig. 5 の m)。

(3) n について

Table 1 からわかるように、関東ローム生土以外の試料ではすべて、式(12)の n は 3.5 となる。しかし関東ローム生土は n は 2.0 になり同時に K も増大する。n は実験値であるが、潤滑層の非ニュートンの挙動またはその非線型性を示す指標である。この非ニュートンの挙動は粒子表面の界面特性の変化、または粒子の幾何学的形状によって支配されると考えられる。n が 1 に近づくほど粒子表面は厚い水和層に覆われていると予想できる。

関東ローム生土は n は 2 付近の値をとる。土壌構造の発達がよく、降伏値も高いものほど突固め曲線は平坦化すると考えられる。

(4) 式(12)の実用性について

式(12)が $n=3.5$ の時、K が定まれば最大乾燥密度 ρ_{max} と突固め最適含水比 w_{opt} が推定できる。n が既知の土壌について任意の w に対する ρ_d が実験値として得られ

ると、K が定まるから式(12)を用いて ρ_{\max} , w_{opt} が計算できる。但し、 $w < w_{\text{opt}} \pm 15\%$ の範囲にあるものとする。

計算例

問. 沖積土壌の含水比 $w=0.15$ (15%) のとき突固め乾燥密度 $\rho=1.5$ (g/cc), 1.55, 1.3 であった。このときの ρ_{\max} , w_{opt} を求めよ。但し、土壌の $n=3.5$, および $w < w_{\text{opt}} \pm 15\%$ とする。

解. 平均乾燥密度 $\bar{\rho}_d$ とすれば

$$\bar{\rho}_d = \frac{1}{3}(1.5 + 1.55 + 1.3) = 1.45$$

式(12)より $K=0.10$ が求まり、Fig. 4 から

$$w_{\text{opt}} = 0.2(20\%), \rho_{\max} = 1.59(\text{g/cc})$$

5. まとめ

以上の考察および計算結果から次のようにまとめられる。

1. 突固めによる乾燥密度 ρ_d 曲線を土粒子間に生ずる水膜に発生する見掛け粘性から説明し、粒子間潤滑層の比粘性の大きいものほど粒子充填が密になりにくいことを示した。

2. ρ_d と含水比 w は次式で表わせる。

$$\rho_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + w \cdot G} - \left(\frac{3K}{w \cdot G} \right)^n$$

但し、G: 土粒子密度, w : 含水比, K, n: 定数, γ_w : 水の密度

3. 充填の抵抗は土壌のもつ降伏値が大きいほど大きく、外力に対し粒子間の潤滑の大きく現われる土ほど充填が密になる。このための補正值を実験的に K および

n の定数を設け実験値と適合させることができる。

4. $n=3.5$ のとき式から求められる ρ_d は含水比 $w < w_{\text{opt}} \pm 15\%$ で実測値との相関係数 R は 0.92~0.74 を示した。

5. 関東ロームはここで示した非火山灰土と比べ K の値が大きく、n が小さいことは、火山灰土の力学的構造の発達を示すものと理解できる。

参考文献

- 1) Marshall, T.J.: Relation between Water and Soil, p. 70, (1959). Technical Communication, No. 50 Commonwealth Bureau of Soil Harpenden, England
- 2) 渡辺 隆・久野悟郎: 土木学会誌 38, 5, 5~10 (1953)
- 3) Pryce-Jones, J.: Study in Thixotropy, Kolloid Z, 129, 96 (1952)
- 4) Proctor, R.R.: Fundamental Principles of Soil Compaction, Eng. News Record 3, 286~289 (1933)
- 5) 森 芳郎・乙竹 直: 化学工学, 20, 9, 488 (1956)
- 6) 宮内定基: 農地工学へのエンジニアリングペドロジ-の適用, 文部省試験研究報告課題番号57306030, 33~39, (1982)
- 7) 荒川 稔: 同上, 62~66
- 8) 多田 敦: 農土研別冊 No. 14, 36~40 (1965)
- 9) 須藤清次・安富六郎: 農土研別冊 No. 7, 98~104 (1963)
- 10) 中垣正幸編: 水の構造と物性 (化学の領域増刊号 南江堂 (1974)) (1983.10.26受理)

Summary

The compaction curve is not drawn on the basis of theoretical deductions, but from experimental results. In this report several compaction curves were deduced from soil properties based on a rheological model. The soil structure associated with packing varies depending on the force applied to the sample that is being compacted. The soil structure becomes looser with the increase in the packing density, when the force applied exceeds the yield value of the soil.

A rheological model for soil response to compaction was designed as follows

$$P = E \cdot e \quad \text{when } P \leq \theta$$

$$P = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad \text{when } P > \theta$$

where e: strain, η : viscosity, E: rigidity, P: force, θ : yield value

This model corresponds to a pseudo-newtonian flow having the yield value. The specific dry density (ρ_d) of the compacted soil is well correlated to the moisture content ratio (w).

$$\rho_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + G \cdot w} - \left(\frac{3K}{G \cdot w} \right)^n$$

where G is the density of soil particles, K is a parametric constant related to the yield value and the structure of compacted soil. n is an experimental constant, γ_w is the density of water.

The compaction curves of volcanic ash soil showed a considerable difference between the process of drying and wetting of soil. No distinct peak was observed in the dry density curve of soil during the drying process of Kanto loam volcanic ash soil. The density curve after soil compaction except in the case of Kanto loam during the drying process can be adjusted using K and n. A reasonable degree of fitness was observed in several experimental curves when $n=3.5$ in the equation.