

土の締固めと透水性について

多 田 敦

(東京大学農学部)

I ま え が き

農業工学的手段を用いて水田基盤を造成または改良する場合の基礎となる問題として、火山灰土の圧縮（突固め）とその透水性におよぼす影響について述べる。第5回シンポジウムの際に 分野を異にする研究者の間に用語の点で互いに理解しにくい個所があったように思われるので、できるだけ用語の説明を入れながら記してみたい。

題名の「締固め」とは、土を密にすることで、著者が行なった締固めは JIS 規格に準じて土を突固めたものである。

II 供試土の一般的な性質

表 1. 供試関東ロームの一般的な性質

採 土 地； 東京世田谷 東京農大用賀農場
 採 土 深； 0~10 cm, 80~90 cm (立川ローム層)
 土 壤 型； 玄武岩質火山灰に由来する火山灰土
 主要粘土鉱物； アロフェン

粒 度 表土	0.002 mm 以下	0.002~0.02	0.02~0.2	2.0~0.2
心土	0.002 mm 以下	0.002~0.02	0.02~0.2	2.0~0.2
供試土塊 心土 (炉乾土)	0.25 mm 以下	0.25~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0

腐植含量 表土 15.66% 心土 2.77%
 真比重 表土 2.56 心土 2.77

不攪乱土の性質 (心土)

仮比重 0.45 間ゲキ率 83%

飽和透水係数 $10^{-2} \text{cm} / \text{sec}$ のオーダー

構造 カベ状構造 (顕微鏡観察) 表土は団粒状構造

間ゲキの性質	表土	固 相	PF 4.2~ ~7.0 水分	PF 4.2 ~2.5 水分	0.1 mm 以上の間 ゲキ量
	心土	固 相	PF 4.2~7.0 水分	PF 4.2~2.5 水分	

供試した土は、いわゆる関東ロームで、本テーマに関連するおもな性質は表1のとおりである。(表1は関東ローム水分系研究グループの成果を引用したものである。¹⁾)

自然構造の土(不攪乱土)では透水性が大きく、間ゲキ率も心土で83%と非常に大きい。一方、高pFの水分を多量に含み、自然含水比は心土で140%をこえ、また粘土含量はよく分散させると40%をこえる。

II 突固め曲線のあらわれ方とその原因について

火山灰土のように自然含水比の高い土では突固め曲線〔JIS A1210に定められた方法²⁾すなわち内径約10cm、高さ約12.7cm、体積1000cm³の金属製円筒形モールド中に土を入れ、重量2.5Kg、直径5cmの円形金属突棒を規定落下距離、規定回数落下させて突固めた土の乾燥密度 γ_d (土壌学でいう仮比重)と突固め時の土の含水比の関係曲線〕は、乾燥過程(土の含水比をだんだんにへらしながら突固める場合)ではピークをあらわさないことが久野氏により明らかにされた。³⁾ その原因について、われわれの研究グループでは火山灰土の土塊の収縮特性を主要因子の一つとしてあげた。⁴⁾ 久野氏もまた最近拘束水と自由水の仮説を用いて説明せんとところみている。⁵⁾

ここではこれらの原因に加えて、土塊の破断(粒径分布の変化)、水分、収縮・膨張の非可逆性の要素などを重ね合せて曲線のあらわれ方を説明したいと思う。

本実験の供試土は、生土の状態では4mmフルイでふるいわけた土塊である。突固めはJIS規格の用具を用い、JISに準じて行なったが、ただJISでは3層を重ねて1000cm³とするが、本実験では層の積み重なりの影響を除去するため1層のみにした。したがって全体積はJISの1/3である。供試土はJISのように同じ土をくり返して使用せず1回ごとに新しい試料を用いた。なお乾燥過程の突固めはJISに規定されていない。

図1のように、普通の土では乾燥過程、湿潤過程(土の含水比をだんだんに上げながら突固める)ともにピークがあらわれ(γ_d の最大値がある)、両者の形はほぼ等しい。一方関東ロームでは特殊で、図2の上の図のようになる。この特異な様相を発現させる要素は下の図のように分けられる。要素は γ_d の増加に作用するものを(+)に、減少に作用するものを(-)に図示した。これらのグラフは突固めの力と関係してくると思われるが、詳細については今後発表したい。

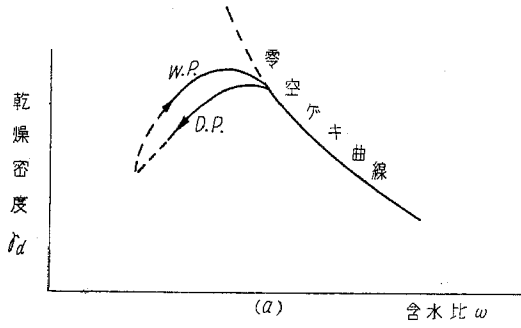
まず乾燥過程から述べると、土の含水比が高いときには、過剰水分が残ったり、封入空気が抜けにくいので γ_d は小である。水がしみ出る状態の含水比は150%付近以上であった。

含水比がへるにしたがって過剰水分はなくなり、水による潤滑作用で γ_d は上昇する。この含水比の範囲は、水が土塊の表面に偏在するために、また潤滑作用が持続されるためには多分子層が必要であることなどのためにかなり広い。

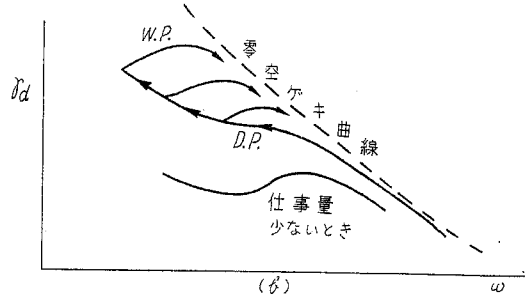
この範囲以下に含水比がへると潤滑作用がへり、土塊間の摩擦が増加して γ_d は低下する。これらの潤滑作用のあらわれる水分範囲は、突固めの力によってかわることが予想される。

さらに乾燥したところで影響をあらわすのは土塊の収縮である。乾燥するにしたがい土塊は収縮し、見かけの γ_d は上昇するから、その突固められたものの γ_d も上昇する。その数値を表2に示した。土塊の収縮量および膨張量と含水比(pF値であらわしたもの)の関係は、 $8 \times 2 \times 2$ cmの整形土塊について竹中氏がもとめている。⁶⁾ 一方突固めに供試した4mm以下の土塊の収縮量を顕微鏡下で測定すると、

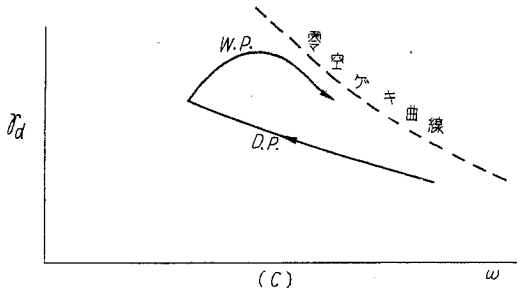
D.P. 乾燥過程
 W.P. 湿潤



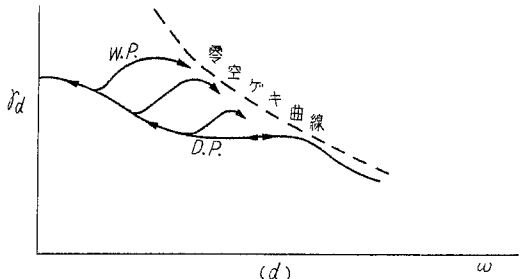
(a) 非火山灰土
 関東ローム水分系グループ
 (ピークあり)



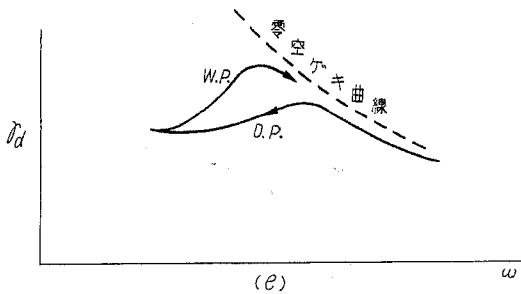
(b) 関東ローム心土
 久野倍郎「土の締固め」
 (D.P.ピーク不明瞭)



(c) 関東ローム心土
 関東ローム水分系グループ
 (D.P.ピークなし)

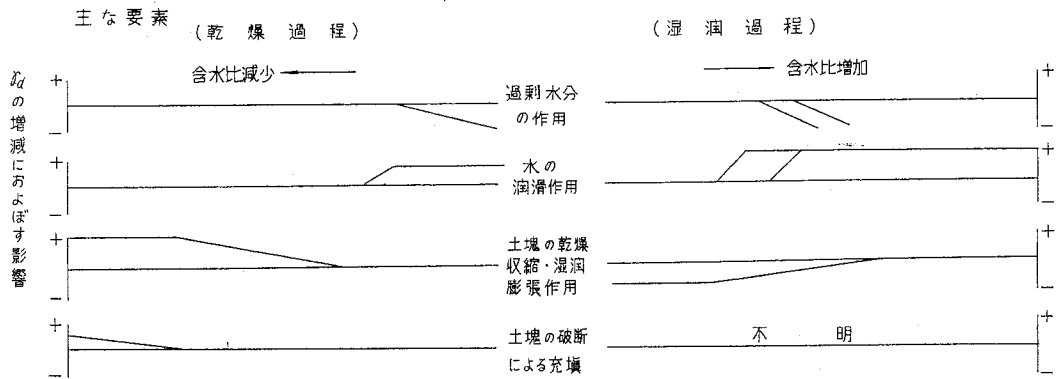
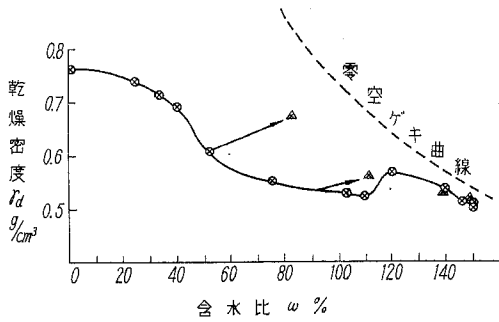


(d) 関東ローム心土
 (D.P.ピークわずかにあり)



(e) 関東ローム表土
 (D.P.ピークわずかにあり)

図1 突固め曲線 ($r_d \sim w$) のあらわれ方



主な要素は、ほかに土粒子間の摩擦力による(-)に作用するものがある。これは突固め曲線の含水比120%から110%における r_d の低下にあらわれている。

図2 関東ローム心土の $r_d \sim \omega$ 曲線とその要素

最終収縮率は整形試料の最終収縮率と平均的には等しいことがわかった。したがって整形試料で求められた収縮量を用いて土塊の収縮が r_d におよぼす影響を計算した。すなわち0%収縮(自然含水比付近)のときの突固め実測値 $r_d = 0.51$ を基準にし、土塊が収縮しただけその体積はへり、見かけの r_d は上昇するとして計算した。

収縮がおこりはじめてから含水比40%前後までは実測値と計算値はよく一致する。それ以下の含水比では、突固めの r_d の上昇は収縮量による上昇量を上まわってくる。この含水比40%以下の領域では土塊の破断の影響が顕著になる。突固め前後の土塊の粒径分布を団粒分析によって求め、0.25mm以下の土塊量を比較すると表2の最下欄のようになり、炉乾土の破断が大きい。つまりこの領域では土は土塊の破断によりつまってゆく割合が大きい。

乾燥過程では以上のような要素が組合わさって図2の上の曲線があらわれている。図1の(c)では突固めの力が大きいために、水が潤滑作用を行なう水分範囲が収縮のあらわれる含水比にまでおよぶため

ークがでないものと思われる。

表2 土塊の収縮が突固め r_d におよぼす影響

含水比 %	15.0 自然含水比	14.4	14.3	10.6	7.5	5.1	4.1	2.4	0
pF	< 2.5	2.7	3.0	4.2			5.5		7.0
収縮量 線収縮率	% 0	% 0	収縮 はじまる	% 1			8 % ~ 12	% 10	% 10
突固実測 r_d	0.51	0.51	0.51	0.52	0.55	0.60	0.69	0.73	0.76
計算値 r_d *	—	0.51	0.51	0.525			10 % 0.70	0.70	0.70
土塊の破断 ** 倍	—	—	—	—	1.5	1.4	—	—	3.5

- * 収縮量 0% のときの実測 $r_d = 0.51$ をもとに線収縮量から体積の減少を計算して求めたもの
突固め後の 0.25 mm 以下の土塊量 %
- ** 突固め前の 0.25 mm 以下の土塊量 %

湿潤過程においては、土塊の乾燥収縮。湿潤膨張がヒステリシスをえがく含水比 (pF 4.2 付近, 含水比 10.6% 付近⁶⁾) をこえて土塊を乾燥させると、土塊は再び湿潤させても完全には膨張して体積を回復しないで収縮の効果を残したまま突固まる。一方、添加した水は大部分は潤滑剤としてはたらし、水分が過剰にならぬ限り r_d は上昇する。さらに水分が増し過剰になると r_d は低下する。すなわちピークを生ずる。

なお火山灰土心土の pF 4.2~5.5 あるいは 4.5 付近の水が乾燥に対して非可逆的であることは美園氏⁷⁾、水分系グループなど⁸⁾ が明らかにしている。

ここまで乾燥させない場合には、湿潤過程の曲線はほとんど乾燥過程の曲線の上をもどってくる。なお、この他の要素も条件によっては大きな影響をもってくるであろう。

非火山灰土は収縮量少なく⁹⁾、水分の非可逆性も少なく¹⁰⁾、また土塊の構造性が関東ロームのように発達していないために¹¹⁾ 土塊の破断の影響もちがってきて、水の潤滑作用と過剰水の作用との要素のみが大きく働く。このため、乾燥過程、湿潤過程はともに明瞭なピークができる。乾燥、湿潤過程両曲線のピークの水分軸上でのずれは、等量の水分量に対して添加水がなす潤滑作用の方がはじめから持っていた水の潤滑作用より大であることを示している。

関東ローム表土については、心土の突固め曲線とにているが、特徴が心土ほど顕著にあらわれないので省略する。

IV 突固めと透水係数の関係

図3に示すように飽和透水係数 K_{sat} (真空中に減圧し間ゲキから空気を完全に追いだしてから脱気水で飽和したときの透水係数 cm/sec) は自然含水比近くで締固めたとき最小になり、突固め時の含水比が減少するにしたがって大きくなる。この現象については徳永氏¹²⁾ も見出している。

このことは γ_d が増大するにしたがって、すなわち図3の下に示すように固相容積百分率の増加にしたがって透水係数が増大することになる。従来の γ_d が最大の付近（間ゲキ量最小の付近）で透水係数が最小になるという常識とはちがう現象である。

これは次のように説明される。

(1)風乾土では、大間ゲキが多く残るような構造に締固められる。生土では、間ゲキ径が小さいように締固められる。

これは限界負圧の比較、吸引法による間ゲキ分布の測定、土壤薄片顕鏡法などでたしかめられる。

限界負圧とは、土柱へ毛管水のメニスカスをやぶって空気が浸入する負圧である。限界負圧が小さいものは間ゲキ径が大であり、大きければ間ゲキ径が小さいことがわかる。吸引法では吸引圧と土柱から脱水される水の量によって間ゲキの大きさとその量の関係を知ることができる。

(2)生土突固め土は、V.で述べる現象を呈するような水分を多量にもっている。生土突固め土の方が、間ゲキ率の小さい風乾土突固め土よりも透水係数が小さいという現象には、これらの水分と土の結びつきの関係も原因の一つになっていることが考えられるが詳しくは別に発表したい。

ただしこれらの現象は図3のような乾燥過程の突固めの場合であり、湿潤過程の場合には突固め時の含水比や乾燥密度と透水係数との関係は条件によつてちがってくる。

V 透水係数にあらわれる関東ローム生土、炉乾土の相違

図4のように、生土突固め土においては、透水係数が 10^{-5} cm/sec 近辺にまで突固まれば、動水勾配を大にすると透水係数は大になる。すなわちダルシー法則 $v = kJ$ の $k = \text{一定}$ が成立せず、 k は J の増加とともに増大する。

一方、炉乾土突固め土（透水係数を下げるために炉乾土をすりつぶして粒径を小さくし、突固め土の間ゲキ径を小さくしたもの）は、 k のオーダーについては生土突固め土と同じであり、間ゲキ径は限界負圧によると生土突固め土の径より小さいにもかかわらず、 k は J によつてかわらずに $v = kJ$ が成立する。

原因については火山灰土に特徴的である水の保持形態が関係しているものと思われるが、詳細は別に発表したい。

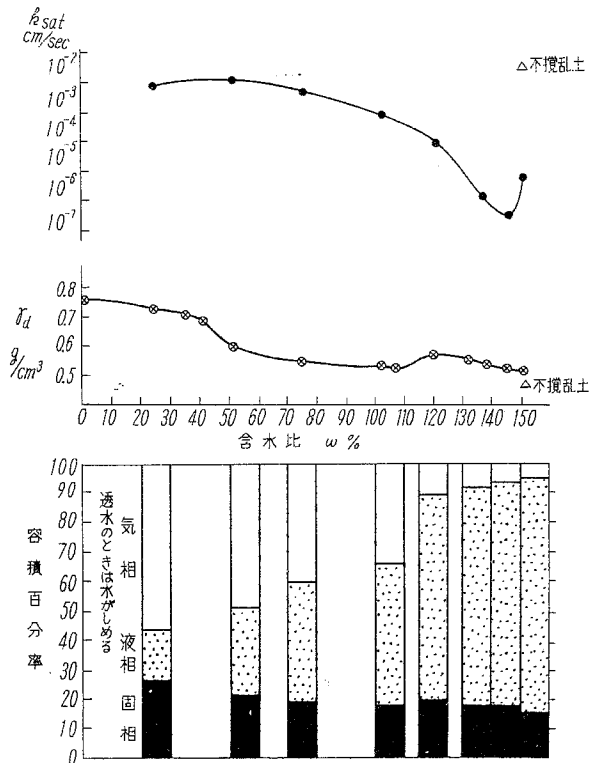


図3 k_{sat} , $\gamma_d \sim \omega$, 3相分布の関係
〔乾燥過程突固め〕

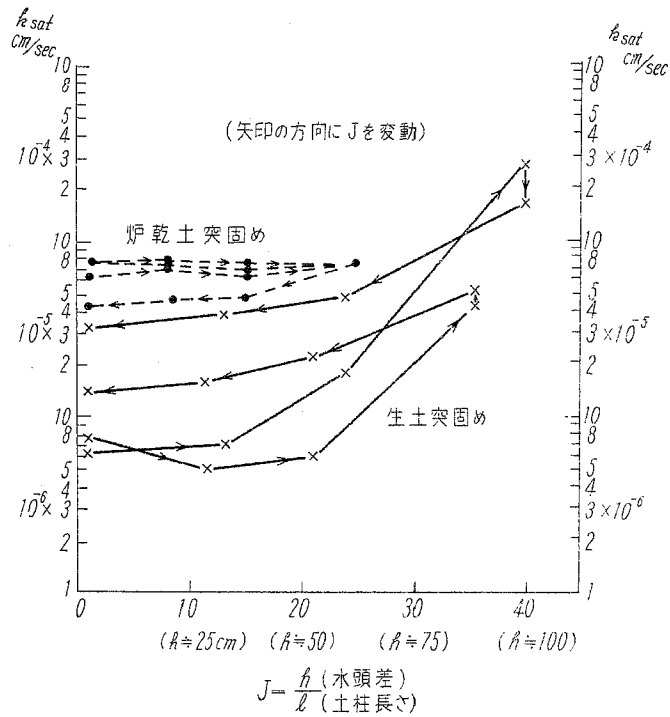


図4 透水係数にあらわれる生土・
炉乾土の相異

VI あとがき

関東ロームの物理的な性質が工学的性質に大きな影響を与えている一つの例として、突固め曲線のあらわれ方とその透水性との関係をとらえてみた。

この研究はまだ未完成で、今後突固め曲線のあらわれ方と強度との関係、突固め曲線とその他の工学的な挙動との関係、突固め曲線と突固めの力、透水性と動水の力の関係などを土壌物理の側面から検討、整理する方向へ研究をすすめてゆくつもりである。

この研究は総合研究「関東ロームの水分系の研究」それから発展した「関東ロームの土道の研究」の中で行なわれたものであり、考察にあたってはこれらの研究グループの成果をおおいに使用した。

講演にあたっては 山崎不二夫教授はじめ研究グループの方々から御助言をえた。厚く感謝する次第である。

引用文献

- 1) 関東ローム水分系研究グループ；農土研別冊7号 pp. 1~109 (1963), 同5号 pp. 17~23 (1963)
- 2) 土質工学会土質試験法解説編集委員会編；土質試験法解説第一集 pp. 93~94 (1960)
- 3) 久野悟郎；東京大学理工研報告4 (5, 6) pp. 144~150 (1950)
- 4) 1) に同じ p. 102
- 5) 久野悟郎；「土の締固め」技報堂全書57 pp. 89~93, 技報堂(1963)
- 6) 竹中肇；研究の資料と記録12, pp. 23~27 東京大学農学部土地改良研究室(1962)
- 7) 美園繁ほか；農技研報告B(2) pp. 103~104, pp. 120~121 (1953)
- 8) 1) に同じ p. 71
- 9) 1) に同じ p. 97
- 10) 1) に同じ p. 71
- 11) 1) に同じ p. 20
- 12) 徳永光一ほか；「機械開墾の研究」岩手県農地林務部農地開拓課 (1962)