

初期含水比が土の液性、塑性限界に及ぼす影響

—土の塑性に関する研究(1)—

相 馬 尅 之*

Studies on the Relationship between Atterberg Limits and Initial Water Content of Soil

—Studies on Soil Plasticity (1)—

Katsuyuki SOMA

Faculty of Agriculture, Hokkaido University

Summary The author studied the effect of air-drying on Atterberg limits. The results obtained are summarized as follows;

(1) Liquid limit and plastic limit of soils vary with initial water content. In the first, both limits are constant in spite of initial water content of soils, then these limits decrease with initial water content (Fig. 1, 2).

(2) The decrease in liquid limit on air-drying is larger than in plastic limit. This is remarkable in volcanic ash soils, especially in organo-volcanic ash soils (Fig. 5).

(3) The decreasing point of liquid limit is higher water content than that of plastic limit (Fig. 5). The author previously defined the former as the critical point of initial water content, and in this paper defines the latter as the second critical point of initial water content.

(4) Plasticity index of soils varies with initial water content. In the first, plasticity index is constant in spite of initial water content. In the second, plasticity index decreases sharply with initial water content. In the third, plasticity index decreases again, or is constant with initial water content (Fig. 9). The turning-points changing plasticity index are the critical point of initial water content and the second critical point of initial water content respectively.

(5) The critical point of initial water content is equivalent to about pF 4.1 (Fig. 14), and the second critical point of initial water content is equivalent to about pF 4.7 (Fig. 15).

(6) The critical point of initial water content, and plastic limit of fresh samples correspond to the turning-point of shrinkage curve. And the second critical point of initial water content corresponds to the turning-point of saturation degree in the stage of residual shrinkage (Fig. 16).

1 はじめに

土の物理性とくに塑性挙動は、その土の含水量によって変化する。とくに、土の物理性測定の際の試験前含水比である初期含水比は、その土の乾燥前歴と関係し、塑性挙動に大きな影響を与える。この現象は自然含水比が高い火山灰土、とくに有機質火山灰土で著しい¹⁾²⁾³⁾。

筆者は先に⁴⁾⁵⁾、土の理工学性において重要な指数特性である液性限界をとりあげ、液性限界がその土の初期含水比により変化することを明らかにした。すなわち初期含水比が限界初期含水比⁴⁾より高い場合には、初期含水比の低下に対して液性限界は一定であるが、初期含水比が限界初期含水比より低くなると、初期含水比の低下と共に液性限界が減少していく。また、この液性限界の

減少は、液性限界に関与する土粒子としての流動単位が乾燥により粗粒化し、比表面積が減少して粒子間力が小さくなることに起因する。

液性限界が試料の初期含水比により変化するように、塑性限界もまた初期含水比によって変化する。

従来、乾燥による塑性限界の変化については、液性限界の変化と対応して同じ変曲点含水比を有すると報告されている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。しかし、筆者は有機質火山灰土およびその下層土、重粘土、沖積土を用いての液性限界と塑性限界の試験結果から、乾燥による液性限界の低下は塑性限界の低下より高い初期含水比で生じるという従来とは異なる知見が得られたのでここに報告する。

2 供試土および実験方法

(1) 供試土

実験に用いた土は、有機質火山灰土である落部上層、

* 北海道大学農学部

西舎上層, 西土幌第1層(以下西土幌Lと呼ぶ)および第2層(以下西土幌Hと呼ぶ)と火山灰下層土の落部下層と西舎下層, さらに重粘土の浜頓別第3層と沖積土の北大A層の8種類である。

供試土はすべて2mmフルイ通過部分を用いた。

供試土の特性を表一に示す。

(2) 実験方法

液性限界, 塑性限界試験……自然含水比の試料を数段階の水分状態に風乾し, 各乾燥段階(この時の含水比を初期含水比とする⁴⁾)の試料を用いてJIS法に準じて試験を行なった。

収縮試験……生土⁴⁾を液性限界状態に練り返し, その練り返し土を直径5cm, 高さ1.5cmのステンレスシャーレに充テンして恒温恒湿条件下(20℃, 相対湿度65%)で乾燥し, 各乾燥段階で体積を測定した。体積測定は遊動顕微鏡とハイトゲージにより行なった。

pF水分試験……生土を液性限界状態に練り返し, それを直径3cm, 高さ1cmのアクリルリングに充テンして加圧板法により試験を行なった。また硫酸水溶液による蒸気圧法を行ない, 両方のpF水分曲線を連続させた。試験は室温20℃の恒温室で行なった。

3 実験結果および考察

(1) 初期含水比と液性限界および塑性限界の関係

乾燥による液性限界(L.L.)の変化を図一1に, また塑性限界(P.L.)の変化を図一2に示す。

図一1, 2によると, 乾燥によるL.L.およびP.L.の変化の形態は同じで, とともに変曲点含水比を有する。筆者は先に, L.L.の場合の変曲点含水比を限界初期含水比と呼んだ⁴⁾が, ここでP.L.の場合の変曲点含水比を第2限界初期含水比と呼ぶことにする。すなわち, 初期含水比が限界初期含水比あるいは第2限界初期含水比より高い場合には, L.L.およびP.L.は一定の値を示し, 初期含水比が限界初期含水比あるいは第2限界初期含水比より低くなると, 初期含水比の低下とともにL.L.およびP.L.は低下していく。

重粘土や沖積土などの非火山灰土に比べて, 火山灰土は乾燥によるL.L.およびP.L.の低下量が大きく, とくに有機質火山灰土に著しい。またL.L.の低下量はP.L.の低下量に比べて非常に大きい。

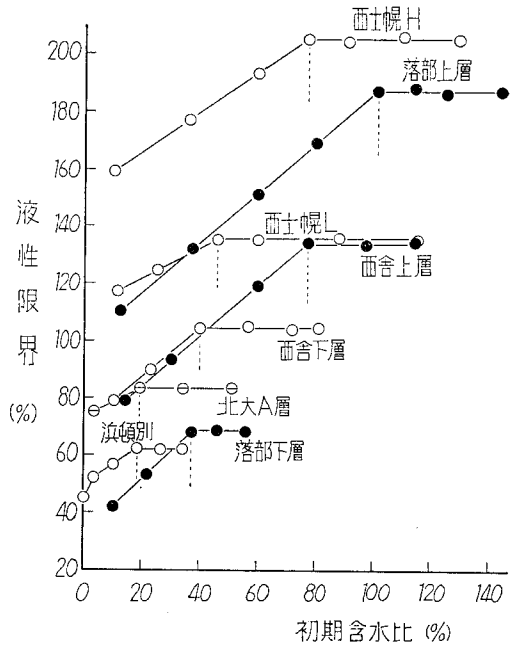
L.L.およびP.L.は土の腐植含量によっても変化するが¹⁾²⁾³⁾⁹⁾¹⁰⁾, 供試土について, 腐植含量と生土のL.L.およびP.L.の関係を示すと図一3, 4のようになる。

すなわち, 腐植含量の増加にともないL.L.およびP.L.は増加するが, L.L.の方が増加の程度は大きい。腐植は土粒子表面積を増加させる機能を有し, 腐植含量の増加に伴って土粒子表面積は増加する³⁾。これ

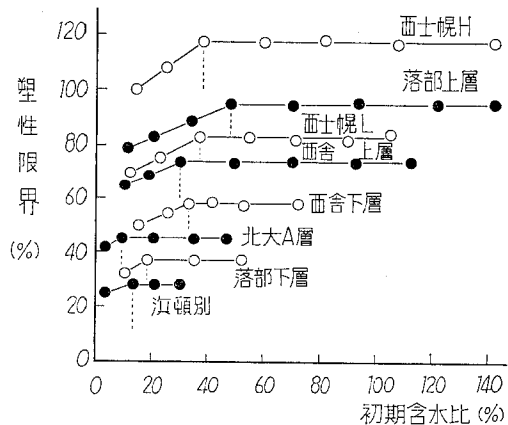
表一 供試土の特性

供試土	自然含水比(%)	自然状態の乾燥密度(g/cm ³)	真比重	腐植含量(%)	粒度組成(%)		
					砂	シルト	粘土
落部下層	147	0.39	2.23	29	49	33	18
落部下層	56	0.87	2.73	2	52	24	24
西舎上層	109	0.56	2.33	26	30	39	31
西舎下層	82	0.75	2.70	4	28	62	10
西土幌L	98	0.68	2.33	25	52	32	16
西土幌H	159	0.41	2.20	37	34	48	18
浜頓別	33	1.35	2.63	4	16	40	44
北大A層	45	1.08	2.50	11	60	25	15

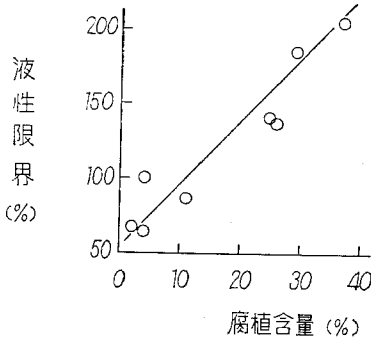
(備考) 腐植含量は重クロム酸法により測定した。



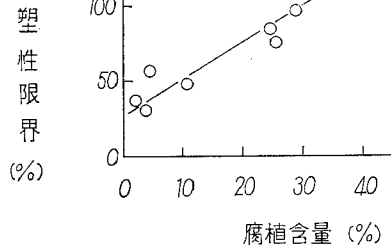
図一1 初期含水比と液性限界の関係



図一2 初期含水比と塑性限界の関係



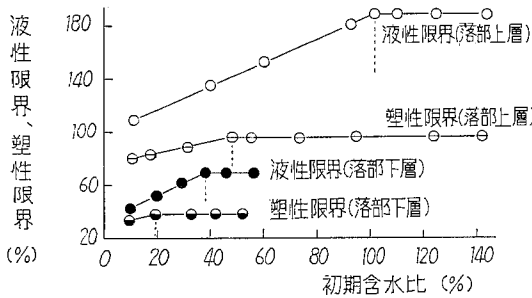
図—3 腐植含量と液性限界の関係



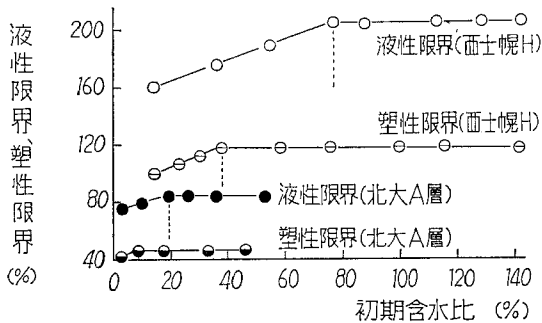
図—4 腐植含量と塑性限界の関係

から図—3, 4の結果は次のように考えられる。すなわち、土粒子表面積の増加にともなってL.L.およびP.L.は増加し、L.L.の方がP.L.よりも増加の程度は大きい。

落部上層、下層と西士幌H、北大A層について、初期含水比とL.L.およびP.L.との関係を示すと図—5(a), (b)のようになる。



図—5(a) 初期含水比と液性限界および塑性限界の関係



図—5(b) 初期含水比と液性限界および塑性限界の関係

図—5によると、落部上層、下層ではL.L.の低下の程度がP.L.の低下の程度より大きく、西士幌H、北大A層では、L.L.およびP.L.の低下の程度がほぼ等しくなっている。

これから、乾燥によるL.L.およびP.L.の変化の形態は図—6(a), (b)のように区分できる。

図—6(a)のグループには落部上層、下層、西倉上層、下層、浜頓別が入り、図—6(b)のグループには西士幌L.H.北大A層が入る。

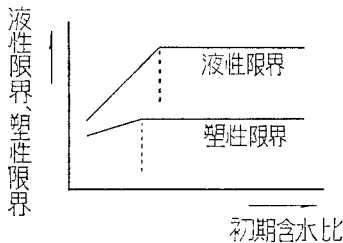
また図—5によると限界初期含水比は第2限界初期含水比よりも高含水比側にあり、限界初期含水比と第2限界初期含水比とは一致するという従来の報告⁶⁾⁷⁾⁸⁾とは異なった結果になっている。

乾燥によるL.L., P.L.の低下について、従来の研究では(1)土粒子の集合化⁶⁾(2)土壌水の不可逆的脱水による土の水分保持特性の変化²⁾⁷⁾⁸⁾¹¹⁾によるものであるとされ、また限界初期含水比と第2限界初期含水比とは一致することが報告されている。

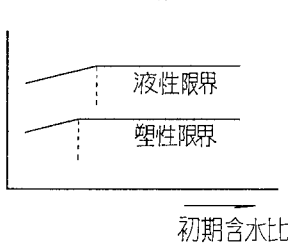
筆者は先に、乾燥によるL.L.の低下は初期含水比が限界初期含水比よりも低くなると、土粒子(流動単位)の粗粒化が生じ、比表面積が減少して粒子間力が小さくなることに起因する

と報告した⁴⁾。ここで筆者はこの考え方を押し進めて、乾燥によるP.L.の変化を次のように考えることにする。

(a) 液性限界の低下が塑性限界の低下より大きい場合



(b) 液性限界の低下と塑性限界の低下が同程度の場合



図—6 初期含水比と液性限界および塑性限界の関係についての模式図

P.L.は練り返し土が飽和度100%の状態では最大の乾燥密度を有するときの含水量である¹²⁾。すなわち、P.L.状態の練り返し土はL.L.状態に比べると、土粒子間隔は非常に接近している。このような状態では粒子間力は比表面積の小さな変化には影響されず、粗粒化による比表面積の減少が著しくなるまでは変化しないものと考えられる。またP.L.はL.L.に比べて土粒子表面積の影響が小さく(図—3, 4参照、

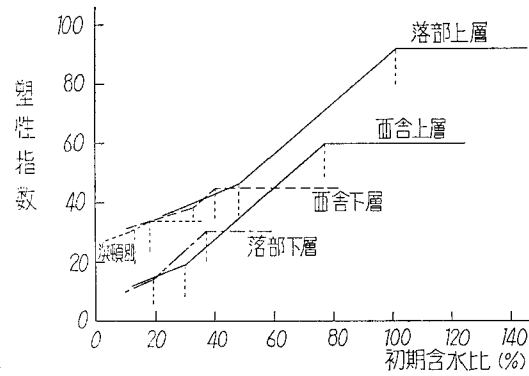
さらに粗粒化は限界初期含水比から始まるが、それが著しくなるのは限界初期含水比よりも低含水比側である⁴⁾。以上のことから、P. I. は限界初期含水比よりも低含水比側で粗粒化による比表面積の減少が著しくなると低下し始め、第2限界初期含水比は限界初期含水比よりも低くなるということが出来る。

(2) 初期含水比と塑性指数の関係

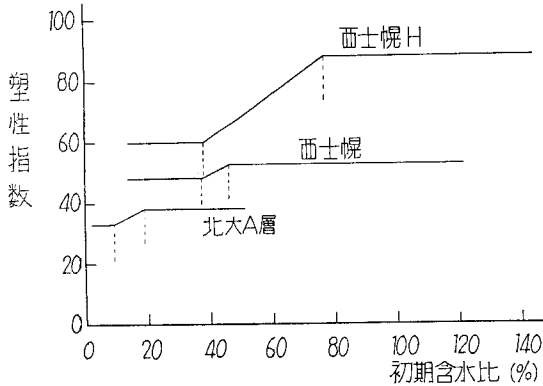
図一1, 2から乾燥による土の塑性指数 (P, I,) の変化を求めると、図一7(a), (b) のようになる。

図一7(a)は図一6(a)のグループの土の場合を示し、図一7(b)は図一6(b)のグループの土の場合である。図一7によると、乾燥によるP. I. の変化は3段階よりなることが判る。すなわち

- (1) 初期含水比が限界初期含水比より高い場合には、P. I. は一定の値を示す。
- (2) 初期含水比が限界初期含水比から第2限界初期含水比に低下すると、初期含水比の低下とともにP. I. は低下し、とくに有機質火山灰土の落部上層、西舎上層、西土幌Hで著しい。
- (3) 初期含水比が第2限界初期含水比より低くなると、図一6(a)のグループの土は初期含水比の低下とともにP. I. も低下していくが、その低下の程度は前段階より



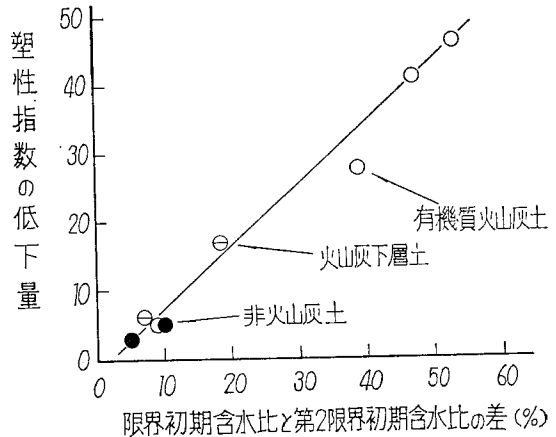
図一7(a) 初期含水比と塑性指数の関係



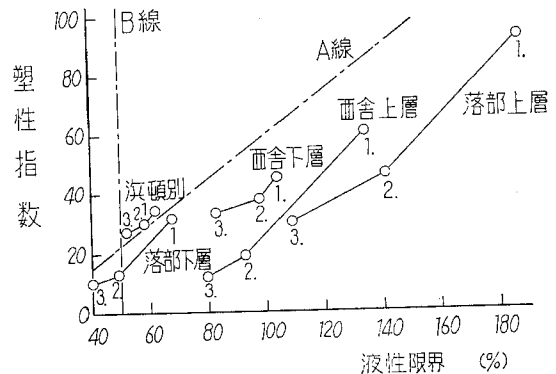
図一7(b) 初期含水比と塑性指数の関係

りも小さくなる。一方、図一6(b)のグループの土では再びP. I. が一定となる。

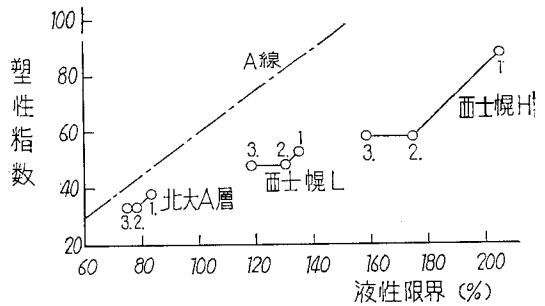
P. I. は塑性体領域の幅を意味し、図一7は乾燥により土の塑性領域の幅が縮小していくことを意味する。図一7によると、乾燥によるP, I, の低下は初期含水比が限界初期含水比から第2限界初期含水比に低下する



図一8 限界初期含水比と第2限界初期含水比との間における塑性指数の低下量



図一9(a) 供試土の塑性図 (1. 初期含水比が限界初期含水比のときおよびそれより高いとき, 2. 初期含水比が第2限界初期含水比のとき, 3. 初期含水比が第2限界初期含水比より低い風乾土のとき)



図一9(b) 供試土の塑性図 (同上)

とき（前述の第2段階）に大きく現われる。図-8にこの第2段階におけるP.L.の低下量を示す。

これによると、有機質火山灰土は西土幌Lを除くと、限界初期含水比と第2限界初期含水比の差が大きく、その間におけるP.L.の低下量も大きいことが判る。

また火山灰土は初期含水比が10%以下では練り返しができなくなり、土は塑性を失う⁴⁾。

次に乾燥による土の塑性の

変化を塑性図上における位置の変化として示すと図-9(a), (b)のようになる。

すなわち、有機質火山灰土の落部上層、西舎上層、西土幌Hは塑性図上での位置の変化が大きく、非火山灰土の浜頓例、北大A層、および有機質火山灰土の西土幌Lは位置の変化が小さい。また火山灰下層土の落部下層、西舎下層はそれらの間になる。

図-9においても、図-6で示した供試土の区分ができる。このような乾燥による土の塑性の変化形態の差違は、土粒子の表面特性や供試土の乾燥前歴（西土幌L、Hは凍結融解、北大A層は乾燥湿潤の繰返しを受けているとみなされる）などに起因するものと考えられる。

(3) 限界初期含水比および第2限界初期含水比について

図-1, 2より、生土の場合についてL.L.と限界初期含水比およびP.L.と第2限界初期含水比の関係を求めると図-10, 11のようになり、L.L.が高い土の限界初期含水比は高く、またP.L.が高い土の第2限界初期含水比は高い。

すなわち図-10, 11はL.L.あるいはP.L.が高い土では乾燥によるそれらの低下が高含水比側で始まることを示している。

また限界初期含水比と第2限界初期含水比の関係を示すと図-12のようになり、限界初期含水比が高い土は第2限界初期含水比も高い。

次に供試土の pF 水分曲線を図-13に示す。

図-13は練り返し土の pF 水分曲線であるが、練り返し土は脱水収縮による乾燥密度の増加が著しく、有機質火山灰土の落部上層、西舎上層および火山下層土の落部下層では pF 4 付近、他の試料では pF 3 付近で P.L. 状態の乾燥密度に近づく、図-13から限界初期含水比および第2限界初期含水比に対応する pF 値を求めると図-14, 15のようになる。

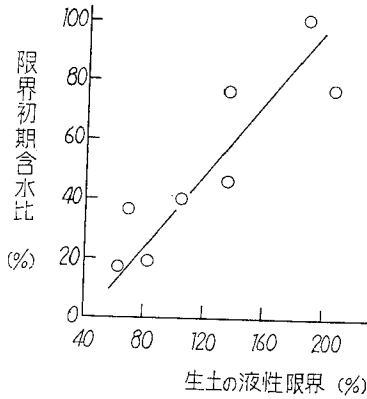


図-10 液性限界と限界初期含水比の関係

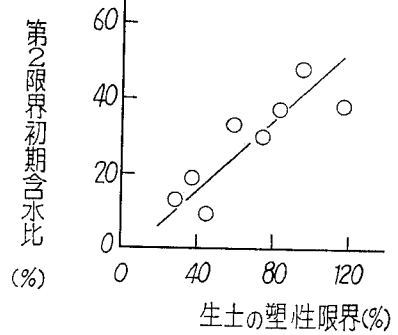


図-11 塑性限界と第2限界初期含水比の関係

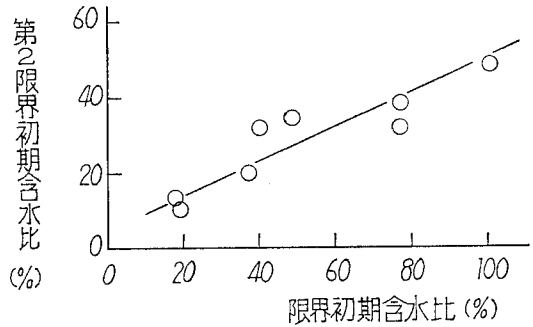


図-12 限界初期含水比と第2限界初期含水比の関係

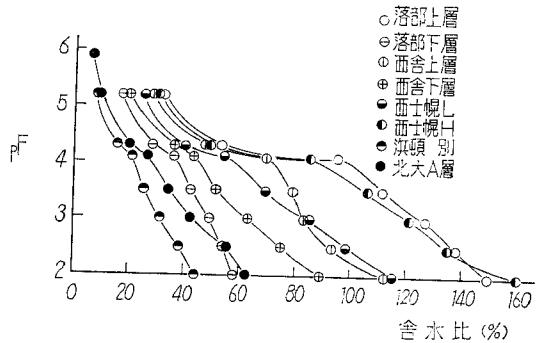


図-13 供試土の水分特性

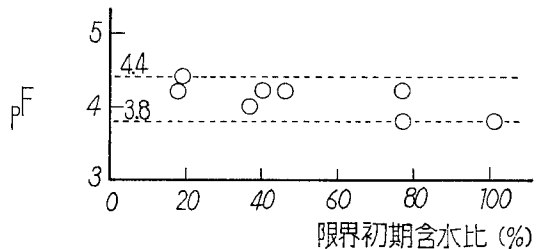
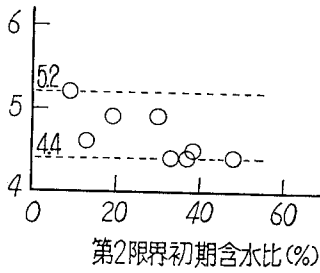


図-14 限界初期含水比に対応する pF 値



図一15 第2限界初期含水比に対応する pF 値

図一14, 15 から限界初期含水比は平均 pF 4.1, 第2限界初期含水比は平均 pF 4.7 となる。

落部上層, 西土幌Hについての生土の練り返し土(L.L.状態)の収縮挙動を 図一16(a), (b)に示す。図一16は含水比の変化による供試土の体積変化, 飽和度, 乾燥密度の変化を示したものである。

表一2 供試土の種々の変曲点含水比

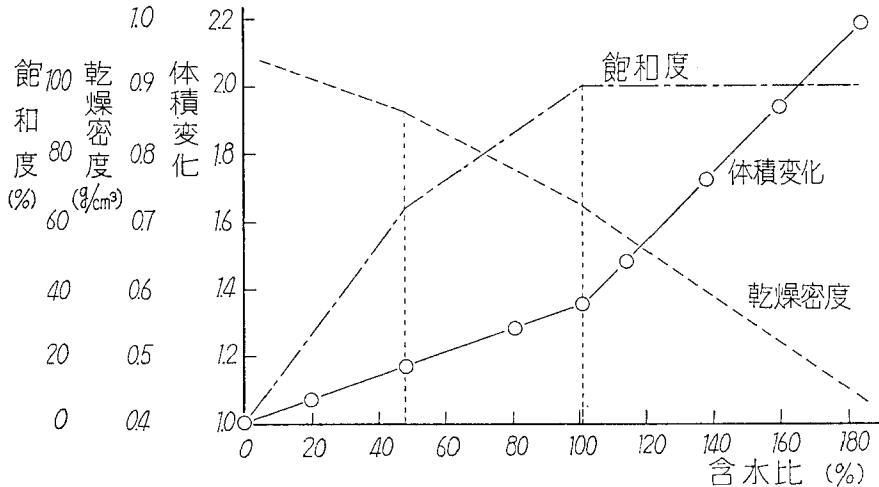
供試土	限界初期含水比	第2限界初期含水比	塑性限界	収縮曲線の变曲点	飽和度再降下点
	%	%	%	%	%
落部上層	101	48	95	101	48
落部下層	37	19	37	37	19
西舎上層	77	30	74	77	30
西舎下層	40	33	59	58	32
西土幌L	46	37	83	82	38
西土幌H	77	38	117	116	38
浜頓別	18	13	28	29	14
北大A層	19	9	45	47	9

図一16によると, 体積変化曲線の変曲点は飽和度点の低下が始まる点であり, また飽和度 100%の練り返し土の乾燥密度が最大になる点である。この変曲点は生土の P.L. に対応している (図一2 参照)。この結果は P.L.

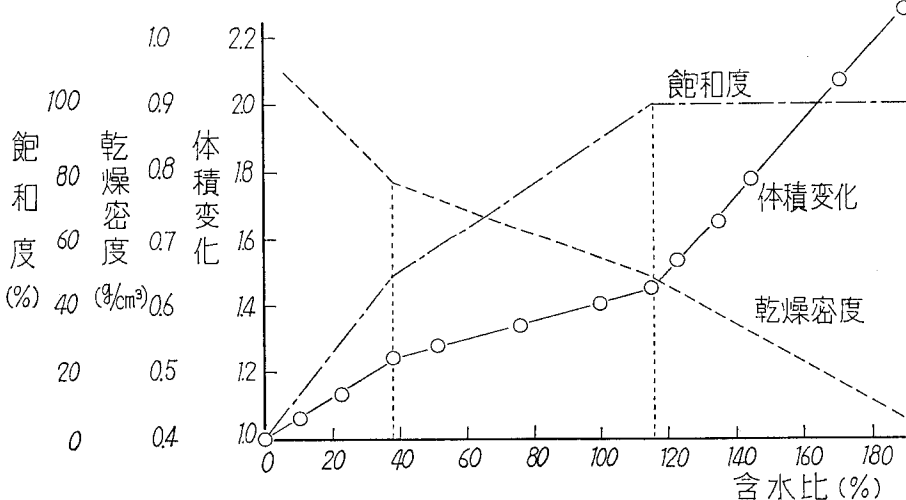
の意味について東山が飽和度 100%の状態 で最大の乾燥密度を有するときの含水量であると指摘した¹²⁾ことに合致している。

筆者は先に, この変曲点は限界初期含水比に対応することを示した⁴⁾が, 西土幌Hの場合, 限界初期含水比は変曲点よりも低含水比側にある。また飽和度曲線をみると, 変曲点で飽和度の低下が始まり, さらに低含水比側で飽和度が急激に低下する点(飽和度再降下点と呼ぶ)が存在する。このことから, 残収縮段階は次のように考えることができる。

変曲点から脱水による土の不飽和化が始まるが, 同時に粗粒化も始まる。この時の脱水は粗粒化し



図一16(a) 収縮曲線 (落部上層)



図一16(b) 収縮曲線 (西土幌H)

た流動単位（団粒）の間からの脱水であり、飽和度再降下点からは団粒内部からの脱水が始まる。

この飽和度再降下は第2限界初期含水比に対応している。第2限界初期含水比は粗粒化が著しくなる点であることを前に述べたが、この点はまた粗粒化した流動単位の脱水収縮が始まる点でもありと考えられる。

供試土について限界初期含水比、第2限界初期含水比、生土のP.L.収縮曲線の変曲点、飽和度再降下点を表一2に示す。

表一2によると、供試土のすべてについて生土のP.L.と収縮曲線の変曲点が等しく、第2限界初期含水比と飽和度再降下点とが等しいことが判る。また限界初期含水比と変曲点の関係をみると、落部上層、下層、西舎上層では両者は等しく、他の試料では変曲点の方が高くなっている。

4 まとめ

乾燥による土の塑性の変化をL.L.P.L., P.I.および収縮挙動から検討した。

(1) 乾燥による土のL.L., P.L.の変化は2段階からなり、初期含水化の低下によってもL.L., P.L.が変化せず一定となる段階と、初期含水比の低下に伴ってL.L., P.L.が低下していく段階とである。

このL.L., P.L.の低下は、乾燥による粒子の粗粒化が比表面積の減少をもたらす、粒子間力が低下したために生じるが、L.L.の方がP.L.よりも粗粒化に対して鋭敏に反応する。

乾燥によるL.L.の低下量はP.L.の低下量より非常に大きく、火山灰土とくに有機質火山灰土で著しい。

(2) 供試土は乾燥によるL.L.の低下の程度がP.L.の低下の程度より大きい土と、両者がほぼ等しい土とに区分された。

(3) L.L.の低下が始まる初期含水比（限界初期含水比）はP.L.の低下が始まる初期含水比よりも高含水比側にある。

P.L.の低下が始まる初期含水比を第2限界初期含水比と呼ぶ。

(4) 乾燥による土のP.I.の変化は3段階からなる。初期含水比が限界初期含水比より高い場合はP.I.は一定となり（第1段階）、初期含水比が限界初期含水比と

第2限界初期含水比の間の場合には、初期含水比の低下に伴ってP.I.が急激に低下していく（第2段階）。初期含水比が第2限界初期含水比より低くなると、第2段階より小さな程度でP.I.が低下していく土と、P.I.が再び一定となる土の2種類に供試土は区分される。

(5) 有機質火山灰土では、初期含水比が限界初期含水比と第2限界初期含水比の間の領域の時に、P.I.の低下量が非常に大きい。

(6) 限界初期含水比は平均pF 4.1、第2限界初期含水比は平均pF 4.7に相当する。

(7) 生土のP.L.は収縮曲線の変曲点と一致し、また第2限界初期含水比は残収縮段階において、飽和度が急激に低下する点（飽和度再降下点と呼ぶ）に一致する。

おわりに、本論文をまとめるに当たり、ご指導、ご校閲をいただいた北海道大学農学部前田隆助教授に対し、深く感謝の意を表します。また専攻生山岸由人氏（現北海道庁）には実験に協力をいただいた。なお本研究の一部は文部省科学研究費の補助を受けたものであり、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 前田隆・相馬尅之・佐々木清一：農土論集，61，9（1976）
- 2) 堤聡・足立忠司・竹中肇：農土論集，71，8（1977）
- 3) 前田隆・相馬尅之：有機質土に関するシンポジウム，1（1977）
- 4) 相馬尅之，前田隆：農土論集，49，27（1974）
- 5) 前田隆・相馬尅之：土壌の物理性，30，15（1974）
- 6) 神山光男：土と基礎，7，44（1959）
- 7) 茨木竜雄：中央大学理工学部紀要，10，32（1967）
- 8) 小谷佳人：鳥取農学会報，21，52（1969）
- 9) 小谷佳人・河野洋・内田勝利：農土論集，60，7（1975）
- 10) 竹中肇・足立忠司・堤聡・長田昇・河野洋・小谷佳人・三輪晃一：農土論集，71，1（1977）
- 11) 山崎不二夫・竹中肇：農土論集，14，46（1965）
- 12) 東山勇：土壌の物理性，30，23（1974）