人工的に粉砕した第三紀層泥岩の膨潤性について

林 田 精 郎*

On the Swelling Behaviours of the Artificially Crushed Tertiary Mud-stones

Yoshiro HAYASHIDA

Abstract

In this paper the property of free swelling of artificially crushed Tertiary (Kobe, Tsuyama and Mizunami group) mudstone is discussed. The degrees of free swelling depend on the the content of active clay minerals, such as montmorillonite and vermiculite, and the water contents are decided with pF value which is determined by soil suction, i.e. The results show that the degrees of free swelling are in proportion to the content of montmorillonite minerals in a soil and the water contents at a certain soil suction except Mizunami group mud-stones.

要 旨

Soil の膨潤性や強度などの物理的性質は soil の粒度・鉱物組成・soil 粒子と結合したりまた単に soil 粒子間にある水の量と深い関係があることは従来より知られている。鉱物組成は定性的であれば比較的容易に求めることができる。また soil 中の水は単に含水比として検討されてきた。しかし、soil の物理的性質は構成鉱物の定量的な組成、粒度、soil 粒子と間隙水の結合の度合といったものに支配される。

この研究は soil の膨潤性と最も関係の深い構成鉱物、すなわち、粒度が小さく、比表面積が大きく、界面活性度が高くそしてカチオンの置換容量が大きい粘土鉱物（ここでは主としてモンモリロナイト）の含有量とその soil の膨潤性、結水量と膨潤性などについて、第三紀泥岩を粉砕して作った soil について検討したものである。

1. はじめに

日本の第三紀層の泥岩は構成物としてモンモリロナイトを含むものが多いことから、地すべりと深い関係があるといわれている。また、これらの泥岩は含水比の変化に伴って体積変化が異常に大きく、膨潤性の強い岩石であるともいわれている。実際にこれらの岩石を基礎地盤としたり、それらを切り取って盛土材料に使用した場

合、細粒化の速度が異常に速い（林田、他 1974）とか、膨潤性の強い造成地盤が作られるとかの問題があり、それらに対して多くの対策が考えられてきた。

この研究は前述のような物理的性質がどのような原因によるものかを明らかにしようとして行なわれたもので、研究に利用した試料は第三紀中新世に属する堆積岩のうちで地すべりと最も関係が深いと考えられている泥岩層から採取したもので、瑞浪層群（岐阜県）、神戸層群（兵庫県）、および津山層群（岡山県）の泥岩と比較のために、第三紀末から第四紀に堆積したいわゆる大阪層群のうちの Ma. 4 と称せられている泥層から採取したもので、Ma. 4 については自然のままではモンモリロナイトを含有していなかったもので、いろんな割合にベントナイトを混合して使用した。

泥岩についての膨潤性の研究としては、膨潤圧の測定、膨潤ポテンシャルの測定などがある。膨潤圧は原岩のまま測定する方法と、試料を粉砕してモールドした後測定する方法があり、膨潤ポテンシャルの測定は粉砕試料だけについて行なわれるもので Plasticity Index から推算されるものである。

一般に地すべりの発生しやすい場所は、特に第三紀層地すべりについては乱された泥岩と密接に関係があるといわれている（仲野、1974）。そこでこの研究も乱した試料について行なってきた。前述のように乱した試料についての研究には二つの方法があるが、ここでは活性度の高い粘土鉱物の含有量と膨潤性との関係、 $pF=5.1$,

* 大阪市立大学理学部

3.0, 0 に相当するときの含水量と膨潤性との関係, すなわち, 強くあるいは弱く soil 粒子と結合している水分量と膨潤性との関係などについて検討した。

ここで $pF=5.1$ は強い結合水を, $pF=3$ は塑性限界よりもやや高いときの含水比を, $pF=0$ は液性限界よりも高い含水比で soil が保持できる最大の含水比に相当するものである。

2. 測定方法

1) モンモリロナイト含有量の測定

試料中に活性度の高いモンモリロナイトがどれくらいの割合で含まれるかによって, その試料の物理的性質が変ることは定性的には考えられてきた。その場合, 単にその試料の鉱物組成を定性的に知るだけではなく, 定量的に鉱物組成を知らなくてはならない。現在この方法については特殊な X 線装置による分析法はあるが, より簡便な方法として, メチレンブルーによるスメクタイト系モンモリロナイトの定量法がある。この方法は精度は高くないが, 通常の X 線分析法と組合せて利用すればある程度の定量的取扱いに耐えられる。

モンモリロナイトが他の粘土鉱物よりも塩基交換能, 比表面積および分散度が大きいので他の粘土鉱物よりも多量のメチレンブルーを吸着できることを利用した方法がメチレンブルーによるモンモリロナイト定量法である。この方法の難点は, モンモリロナイト以外の鉱物でも, 塩基交換能があり, 十分に分散しているとメチレンブルーを吸着できることである。カオリナイトのように塩基交換能が比較的低く, 比表面積が小さい鉱物でも式 (1) によって求められる量にして 8.71% 程度の吸着がある。より活性度の高い粘土鉱物が試料に混入していれば多くのメチレンブルーが吸着され, そのためにモンモリロナイト含有量が実際よりも多くなる。しかし, たとえそのような誤差が生じたとしても soil の活性度は求められ(相対的に), 物理量との比較はできるものと考えている。

420 μ のフルイを通過した試料約 1.5 gr を水に溶かし 2 ml とする。これを 250 ml の三角フラスコに入れ 3% の過酸化水素水 15 ml と希硫酸 (5N) 0.5 ml を加えて酸性溶液にする。これをよく混合して 4 分間沸とうした後水を加えて 50 ml にうすめ十分に混合する。これにメチレンブルー (4.5 gr/l) 溶液を加えてメチレンブルーの吸着量を測定する。濃度 4.5 gr/l のメチレンブルー溶液 1 ml は 0.0171 gr のモンモリロナイトに相当することが知られているので, 2 ml 中に溶かされた試料では 1 l 当りのモンモリロナイトに換算した粘土鉱物含有量

A は

$$A = 0.0171 \times (\text{メチレンブルー吸着量 ml}) \times 500 \dots (1)$$

によって求めることができる (粘土ハンドブック p. 626 ~ 627)。

2) 自由膨潤量の測定

採取された試料を室内で自然乾燥した後 420 μ のフルイを全試料が通過するように磁性乳鉢で粉碎し, 50°C で熱風乾燥して含水比が, 1~3% になるように乾燥した。これを 図-1 に示す容器に入れて一般的には間隙比

図-1 自由膨潤測定器

が 0.7~0.9 になるように突き固めた (瑞浪層群の泥岩は 1.5~1.6 となった), その上面にポーラスストーンを乗せてダイヤルゲージをセットした。容器の底に設けられた孔から蒸留水を吸引させ, 試料中を上昇してきた蒸留水が試料を完全に浸して試料の上部まで飽和するように水位を調節する。このようにして 100~120 時間放置してダイヤルゲージの読みが安定した後にその目盛を読みとる。浸水終了後余分の水分を排除して $pF=0$ のときの含水比および間隙比を測定する。

3) 遠心力による含水量の測定

土粒子の間に含まれている水は結合水, 吸着水, 吸着水, 毛管水および自由水といったように, ちがったエネルギーをもっている。結合のしかたが強い程水の単位体積当りの重量は増加し結合水の一部には比重 1.4 といったものがあるといわれている。また結合エネルギーの面からは前述の順序で小さくなり自由水はそれが最も低く地球の重力場の中で自由に動くことができる。

乾いた soil が水を吸引する力は soil が乾燥している程強く, 含水量が増加するにつれてそれは弱くなる。この吸引力を表す指数が pF 値である。 pF 値は soil と水とが結合しているエネルギーに関係があり, この結合

エネルギーの大小によって soil の中の水を分類して soil の中における水の役割について研究する一つの方法が pF 値による含水量の測定である。土粒子との結合力の強い水程 pF 値が大きいので、飽和した soil ではその小さい水から大きいものまであり、飽和度が小さくなって soil が乾燥してゆくにつれて結合エネルギーの高い pF 値の大きい水が残ってゆく。一般に完全乾燥土は pF=7, 気乾状態は pF=6.0 吸着水は pF=3~4, 毛管水は pF≥3, 飽和状態では pF=0 であるとされている。

pF 値の重要な点は砂では湿润中に体積膨張がおこらないが、粘土では体積膨張がおこり、そのときの体積膨張力と pF 値と関係があり、soil の水分保持力はその soil の膨張力に等しいといわれている。pF=3 以上の吸引力で土粒子に吸着している水は 1~2 分子の厚さの固結状の水、吸着水そして土粒子間隙の毛管内にある毛管水である。一般に土粒子の粒径が小さくなると比表面積が大きくなり、毛管は小さくなるので毛管の体積は増加する。それ故、一定の pF 値のもとにおける含水量は土粒子の粒径が小さい程大きい。

遠心力による pF の測定は一般には pF=2.7~4.2 の間であるが、ここでは pF=3.0 すなわち JIS A 1207 による遠心含水当量試験によった。このとき回転数 n と pF との間には

$$pF = \log \frac{R}{g} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

g : 980 cm/sec/sec

R : ローター回転半径 (13.5 cm)

n : ローター回転数 r.p.m (2600 r.p.m)

なる関係がある。

粘土のように細粒なものは透水性が悪く、毛管力が大きいので遠心含水当量は 40~50% 以上を示し、砂質ロームでは 5~12%, 砂質土では 2~4% 程度である。

4) $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 飽和溶液による含水量測定

遠心含水当量による水分よりもより強く結合している含水量の測定には多くの方法があるが、ここではラリオノフ等の方法によった。この方法は簡単な測定法であるが、かなり信頼性が高いといわれている。

150°C で乾燥した試料 10~20 gr をとり、底に $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ の飽和水溶液を入れたデシケータの中に入れ、19°C で試料が一定の重量になるまで保存する。そのとき結合水 (pF=約 5.1) の含水量 W_e は

$$W_e (\%) = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

によって求められる。ここに P_1 は乾燥試料の重量、 P_2 はデシケータ中に保存された後の試料の重量である。

このようにして求められた W_e は試料の粒度組成と関係がある。また、 W_e は試料中のコロイド含有量 K' と次のような関係がある。

$$K' = \frac{W_e}{0.3} (\%) \dots\dots\dots (4)$$

表-1 試料の粒度組成と W_e (from ラリオノフ)

試料の粒度組成	W_e (%)
砂	0.01 ~ 1
砂 質 土	1 ~ 3
ロ ム	2.1 ~ 10
粘 土	6.0 ~ 32

Soil の自由膨張について

Soil の自由膨張の尺度に膨張ポテンシャル S_0 という値が用いられ

$$S_0 = AI_p + B \dots\dots\dots (4)$$

A : B : Soil にことなる定数

なる式が提唱されている、(Anderson, Thomson, 1969), I_p は Plasticity Index で I_p が大きい程膨張ポテンシャルが大きい。 I_p は soil の中に含まれている粘土鉱物がモンモリロナイトなどのように活性の高いものが多く含まれると大きくなる。 I_p は Atterberg limit から求められ pF 値との対応は、塑性限界は pF=3.5 前後、液性限界は pF≤1.0 で pF=0 より大きい、すなわち飽和度 100% よりも低い含水状態である。

これからみて、今回のような測定で求められた水による soil の体積膨張は pF=0 の含水比まで飽和させて測定されたもので、式 (4) で求められる膨張ポテンシャルから予想される体積膨張よりもやや大きくなる。

図-2 神戸層群泥岩の塑性指数と自由膨潤度との関係

Plasticity Index から膨張ポテンシャルを評価するとき最も大きな問題は液性限界の測定である。モンモリロナイトのように膨潤性の強い粘土鉱物を多く含む soil は液性限界が高く測定誤差も大きい。神戸層群の泥岩について I_p と膨潤量との関係について検討した結果からは両者の間にいい相関はみとめられなかった。(図-2)

3. 測定結果と考察

前述したような方法により、自由膨潤量、自由膨潤終了含水比、メチレンブルーによるモンモリロナイト含有量、pF などの測定結果について述べる。

自由膨潤終了含水比と膨潤度の関係からみると、図-3 から明らかなように大きくみて二つのグループに分けられる。一つは神戸層群の泥岩でみられるように含水比23%, 自由膨潤度0% の点から直線的に含水比の増加とともに自由膨潤度の増加してゆくものと、他は瑞浪層群の泥岩によって代表されるものとである。Ma. 4 の大阪層群の泥層にベントナイトを混入した試料は瑞浪層群の泥岩に近い分布をしているものがある。

自由膨潤終了含水比と間隙比との関係は(図-4)、モールド時の間隙比を考慮すると、含水比 23~24% がこれらの試料の収縮限界となり、含水比の増加につれて体積増加が観測される。終了含水比が大きいもの程間隙比が

大きいので、体積増加が大きくなるべきであるが、前述したように、モールド時に間隙比が大きくなった瑞浪層群の泥岩では、観測された体積増加量は終了含水比が大きい割にそれ程大きくはならなかった。

メチレンブルーの吸着量から換算されたモンモリロナイト含有量と自由膨潤度との関係(図-5)をみると、モンモリロナイトの量の多いもの程、体積増加量が大きい傾向がみられる。しかし自由膨潤終了含水比とモンモリロナイト含有量との関係(図-6)をみると瑞浪層群の泥岩のように終了含水比が大きくても、モンモリロナイト含有量の小さいものもある。これは終了含水比と体積増加量との関係でもみられることと同じである。しかしながらモールド時の間隙比に関係なく、瑞浪層群の泥岩でも、メチレンブルーによるモンモリロナイト含有量と膨潤度との関係は神戸層群の泥岩などと同じ傾向を示している。

Holtz (1969) によると体積膨張の割合と膨張の度合とは表-2 に示すような関係がある。これを Anderson, Thomson の基準と対比すると表-3 のようになる。

この二つの基準からみると、津山層群の泥岩は膨潤の度合は低い領域に、神戸層群の泥岩は中間から非常に高い領域にわたって分布し、瑞浪層群の泥岩は終了含水比が高い割に中間の領域に分布していることが解る。これ

図-3 自由膨潤終了含水比と自由膨潤度との関係

図-4 自由膨潤終了含水比と間隙比との関係

図-5 モンモリロナイト含有量と自由膨潤度との関係

図-6 自由膨潤終了含水比とモンモリロナイト含有量との関係

表-2 膨潤度 (from Holtz)

体積膨張 (%)	膨張の度合
0~10	低い
10~20	中間
20~30	高い
30~	非常に高い

表-3 膨潤度 (from Anderson, Thomson)

膨張の度合	Swelling Potential (%)	Plasticity Index (%)
低い	1.5 以下	20 以下
中間	1.5~4.0	20~31
高い	4.0~6.0	31~39
非常に高い	6.0 以上	39 以上

は神戸層群の泥岩がメチレンブルー吸着量，遠心含水当

量およびコロイド含有量などが高く活性の高い粘土鉱物の含有量が多いものがあることから理解できる。15 μ よりも小さい粒子だけについて行なったX線による分析結果からみると，神戸層群の泥岩は，特に粘土鉱物だけについてみると，モンモリロナイトを多く含み，その他にカオリナイト，イライトの廻折がみられる。これに対して，津山層群の泥岩ではカオリナイト，イライトはすべての試料に含まれている。しかしクロライトとモンモリロナイトは一部の試料のみに含まれている。そしてこのモンモリロナイトの廻折強度は弱い。また瑞浪層群の泥岩ではややブロードなピークであるがモンモリロナイトのみがみられ，イライトやカオリナイトは殆んどみられない。さらに膨潤度が 20% よりも低い神戸層群の泥岩ではモンモリロナイトの廻折ピークが弱いだがそれが 20% よりも大きいものではモンモリロナイトの廻折ピークは非常にシャープである。

pF=3 に相当する遠心力で測定した遠心含水当量と自由膨潤度およびメチレンブルー吸着によって換算したモンモリロナイト含有量との間にはかなりよい相関がみられ、遠心含水当量が高い程自由膨潤度もモンモリロナイ

ト含有量も高い (図-7, 図-8), しかし瑞浪層群の泥岩は前述したように他の試料とはやや異なり遠心含水当量が高いのに自由膨潤度もモンモリロナイト含有量も他の試料に比して低い傾向がみられる。このことは、終了含水量や遠心含水当量だけから膨潤度を推定できない場合が

図-7 遠心含水当量と自由膨潤度との関係 (関係式は Mizunami G. を除いたものである)

図-8 遠心含水当量とモンモリロナイト含有量との関係 (関係式は Mizunami G. を除いたものである)

図-9 自由膨潤度と強い結合水 W_c との関係 (関係式は Mizunami G. を除いたものである)

あることを示しているともいえる。

pF=約 5.1 に相当する含水量 W_0 と自由膨潤度の関係は、やはり瑞浪層群の泥岩を例外として、 W_0 が大きい程、すなわちコロイド分の含有量が多い程、自由膨潤度が高く (図-9)、遠心含水当量と自由膨潤度との関係と

同じ傾向がみられ、遠心含水当量の大きいもの程 W_0 も大きい傾向がある。他の例でも明らかなように瑞浪層群の泥岩は神戸層群、津山層群の泥岩とは鉱物組成も物理的性質も異なっているが、この原因については明らかでない。

表-4 膨潤度，含水量，粘土鉱物等の測定例

Sample		Swelling %	M. contents %	pF=3	pF=5.1	Clay minerals
Tsuyam	1	10.4	15.9	29.4	2.18	K. I. Ch.
	2	10.8	8.4	17.4	1.32	K. I. Ch. M.
	3	14.8	15.0	31.0	2.60	K. I.
	4	9.2	12.5	20.8	2.11	K. I. Ch.
	5	10.6	13.6	21.0	2.73	K. I. Ch. M.
	6	11.6	12.5	27.7	2.02	K. I.
	7	8.8	11.6	23.7	1.56	K. I. Ch.
	8	7.7	7.3	17.1	0.58	K. I.
	9	10.5	9.3	19.5	1.90	K. I. Ch.
	10	9.1	10.9	24.0	1.64	K. I. Ch. M.
Mizunami	1	22.2	25.4	54.8		M.
	2	22.5	23.6			M.
	3	14.7	25.5	53.0	7.07	M.
	4	22.2	14.5	46.4	6.68	M.
	5	19.2	19.4	46.9	7.68	M.
	6	18.2	22.1	57.4	8.37	M.
	7	24.3	26.8	54.8	7.90	M.
	8	19.1	18.8	48.7	7.17	M.
	9	21.5	23.6		7.98	M.
Kobe	1	31.7	17.3	35.1	6.74	M. K. I.
	2	15.8	15.5	28.6	2.52	
	3	16.4	20.6		3.88	M. I. K.
	4	15.1	17.8	25.7	2.68	M. K. I.
	5	19.4	25.6		4.06	M. K.
	6	22.0	25.6			M. K.
	7	13.2	15.5		2.52	
	8	18.7	18.9	31.7	4.64	
	9	49.3	21.7			M. K. I.
	10	17.4	17.3	31.6	3.60	M. K. I.
	11	35.5	31.7	41.6		
	12	16.7		29.0	1.89	M.
	13	23.2	18.4	32.3	3.93	M. K. I.
	14	41.9	37.5	48.3	9.02	M. K. I.
	15	46.2	38.2	55.4	8.72	M. K.
	16	23.0	29.8	40.3		M. K. I.
	17	21.4	25.0	28.0	4.07	M. K.
	18	30.1	20.0	47.7	6.96	M. K.
	19	22.1	29.1	36.5	5.01	M.
	20	34.6	25.7	81.6 ?	7.45	
	21	19.3	19.4	33.6		
	22	33.4	39.5	103.0 ?	8.36	M. K.
	23	29.2	31.7		7.31	M. K. I.

K; Kaolinite, I; Illite, Ch; Chlorite, M; Montmorillonite, pF=3; Water content (%) at pF=3, pF=5.1; Water content (%) at pF=5.1.

このような結果からみて、モンモリロナイトのように粒子が小さくて活性度の高い鉱物の含有量と泥岩の膨潤性とは強い関係がある。メチレンブルーの吸着量、遠心含水当量や W_0 の測定は簡単であるが精度の高い分析法ではないので、それに伴う問題はあるが、soil の膨潤性を調べる方法としてはかなり利用価値の高い方法であると認めている。さらに pF 値から soil の含水量の変化による膨潤圧も知ることができる。

参 考 文 献

- ANDERSON K. O. and THOMSON S. (1969): Modification of Expansive Soils of Western Canada with Lime, Proceeding of the 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soil, Texas A & M Press, pp. 175~181
- GRIM R. E. (1962): Applied Clay Mineralogy, McGraw Hill, pp. 224~225
- 林田精郎・山田 健 (1974): 神戸層 (中新世) 泥岩の鉱物組成と物理的性質について, 応用地質 Vol. 15, No. 3, pp. 1~6
- HOLTZ W. G. (1969): Volume Change in Expansive Clay Soils and Control by Lime Treatment, Proceeding of the 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas A & M Press, pp. 157~174
- 仲野良紀 (1969): 粘性土岩における押し出し性膨潤性 トンネル地圧のメカニズムと実測例, 応用地質 Vol. 15, No. 3, pp. 27~43
- ラリオノフ・アー・カー (松尾新一郎訳) (1973): 土の構造, 山海堂
- YONG R. N. and WARKENTIN B. P. (山崎不二夫, 他訳) (1974): 土質工学の基礎, 鹿島出版会

(昭和 50 年 9 月 4 日受理)