

土のチクソトロピに関する土性論的研究

小 橋 英 夫

A Soil-Textural Study on the Thixotropy in soil

Hideo KOBASHI

Many investigations have been being done on the thixotropy in soil, but it is very difficult to make clear the thixotropic phenomenon correctly, because the different results are given by the different measuring methods, even if the conditions are the same. The author tried to find out the reality of thixotropy indirectly on the basis of the orientation of clay particles.

There are two types of clay soil structure; flocculated structure and dispersed structure. The term of flocculated structure refers to a structure in which clay particles are arranged in a more or less random array, while the term of dispersed structure refers to a structure in which clay particles are arranged in a more or less parallel array. Particles in the random array are linked each other forming somewhat a rigid structure. Therefore, it seems that the thixotropy exists when the parallel array changes into the random array by the energy balance.

If the clay is compacted on the drier side than the optimum water content, the flocculated structure will be built. On the other hand, if the clay compacted on the wet side, the dispersed structure will develop. Therefore, the thixotropic behavior in the compacted clay is stronger in the dispersed structure than in the flocculated structure.

Two kinds of clay were tested; bentonite and Hachihama clay. They were compacted in various water contents. After aging, those specimens were tested by the unconfined compression test.

The results were:

- 1) The increase in strength is found in both of clays in which the water content is larger than the plastic limit, whereas if the water content is less than the plastic limit, the less increase in strength is found.
- 2) The maximum ratio of increase in strength is found in bentonite with 68% water content and in Hachihama clay with 47% water content.
- 3) Ratio of increase in strength of Hachihama clay is larger than that of bentonite.
- 4) The increase in strength of bentonite occurs mostly during 1 day after compaction, while that in Hachihama clay occurs between 1 and 7 days later.
- 5) Ca has a greater effect on the increase in strength than Na.

I. 緒

言

ある種のコロイド系、特に懸濁液が攪拌によって液状となり、静置によってゲル状を呈することは、古くから多くのコロイド学者によって観察されたところである。PATERFI は 1927 年、この現象に対してチクソトロピなる名称を与えたが、それ以来このような現象を呈する物質に

についての研究は急速に進歩し、この挙動を示す物質が多く見出され報告されている。もともとチクソトロピなる現象は、等温可逆的なゲルとゾルの変換を意味するが、今日ではその意味が拡張されて考えられるようになって来ている。たとえば粘土ペーストは外力によって一時的にそのコンシステンシの大きさが低下するが、静置することによってある強さまで、あるいはもとの強さまで回復する。このようにある系が外力によって軟化し、静置によって、可逆的と否とを問わず、回復する場合も含めている。

チクソトロピは分散粒子や分散媒の物性によって種々異なる上、測定の方法や測定の速さによっても左右されるため、その実態を把握し解明することは非常に困難である。しかしその原因として、分散粒子と分散媒との間に形作られる連続的構造の破壊と再生にもとづくものであると考えることによって推論し易くなるし、また一般にそのような考え方がとられている。土のチクソトロピも同様に考えることは最近の研究に多く見られるところである。筆者はさきに、土の粘着力が粘土粒子と間隙液体との間の分子的結合構造によって生ずるものであることを述べた¹⁾が、土のチクソトロピにもこの考え方を導入し、実験によって実態を一部解明したのでここに報告する。

II. 土のチクソトロピ的挙動についての推論

FREUNDLICH はチクソトロピ的挙動が懸濁液内の粒子間に存在する分子力のバランスによって生ずるものであると指摘しているが、その研究結果によれば、分散粒子間に作用する吸引力を有しない懸濁液は液体として挙動するのに対し、吸引力が存在するときには固体として挙動し、振とうする時に始めて流動する。しかも吸引力が強い懸濁液は振とうをやめると直ちに固化するが、弱いものは徐々にしか回復しない。この挙動の差異は分子的吸引力と反撥力のバランスの仕方にもとづくものであると述べている。この考え方は MARSHALL とか VERWEY および OVERBEEK などによって支持され確認されている。

このような考え方を土のチクソトロピに適用してみると、粘土粒子はその形状が平板状であり、結晶の特性から表面に荷電し、さらに電気二重層の形成などによって、分子的な力の場を有している。従って懸濁液中の粒子間や粒子と分散媒の間には分子的な吸引力と反撥力が存在している。しかしながら希薄な懸濁液のように粒子間の距離が遠ざかれば、分子力が互に作用し難くなり固化しないか、あるいは固化に時間を要する。一方濃度が高い懸濁液においては吸引力が作用して粒子を引きつけるが、粒子が接近するにつれて反撥力が作用し、吸引力と反撥力がバランスをとった位置で、粒子相互間及び粒子と間隙液体との間からみ合った構造が形成され、塑性的、あるいは粘性的挙動を呈することになるのである。

一方土壌物理や土質力学においては、更に濃度が高い土壌ペーストないしは土塊のチクソトロピ、すなわち外力によって軟化し静置によって硬化する特性が問題となる。このような場合においても、粒子間に作用する吸引力と反撥力とのバランスによって生ずる粒子の結合構造の生成および破壊によって考えることができる。

ある粘土はそれが存在しているところにおいて土粒子の粒径、形、間隙液体の質、外的条件の履歴などによって作られたある構造を持っているが、その構造は平板状の粒子が分子力のバランスによって、任意の組み合わせで成り立った複合構造である。この構造はある程度の外力に対しては抵抗を示すものである。この粘土にせん断力あるいは突き固めのように大きい外力が作用した場合、外力は粒子間の吸引力を助長し、そのため粒子は互に平行的な組み合わせに

変化させられるが、平行配列を作った土の強度は、LAMBE²⁾ やSEED および CHAN³⁾ が指摘しているように相対的に小さいものである。外力が取り除かれると、土塊内に生じた応力は0となり、外力が助長していた吸引力は減少し、吸引力と反撥力はバランスをとろうとして粒子を任意な組み合わせに変化させ、強度を増加させるのである。このような変化は粒子それ自体や粒子間液体によっても異なるが、エネルギーのバランスにもとづく自然的変化であって、時間的な状態変動である。ただ希薄な懸濁液とは異なって、間隙液体の量の不足により、軟化－硬化の過程にはかなりの時間を要するものと考えられる。

以上の推論をもとにして、濃度が高い懸濁液、すなわち突き固め粘土の硬化過程について行なった実験を報告する。

Ⅲ. 実験材料および実験方法

1. 実験材料

実験には最もチクソトロピ的挙動を持つものと言われているモンモリヨナイト系の代表的粘土鉱物であるベントナイトを用い、さらに比較対照のため岡山県児島湾干拓地の岡山大学附属八浜農場から採取した粘土を用いた。両者の主な物理性は表－1に示す通りである。

第1表 ベントナイトおよび八浜粘土の物理性

試料	真比重	粒 度			塑 性 限 界	液 性 限 界	最 適 含水比	最大乾 燥密度	備 考
		1μ以下	5μ以下	10μ以下					
ベントナイト	2.495	% 65	% 90	% 95	49	380	% 47.5	g/cm ³ 1.028	300メッシュ 以下
八 浜 粘 土	2.698	8	39	71	32	81	37.0	1.265	0.59mm 以下

(注) 八浜粘土には0.1%のNaClを含有している。

2. 実験方法

実験は攪乱され成形された粘土の強度が時間とともにどのような変化をするかを中心に行なった。攪乱され成形された試料としてはすべて JIS に規定された標準突き固め試験方法によって作成した。その方法は先ず一定量の試料をとり、所要含水比になるように蒸留水を加え、よくかきまぜて万遍なく水を行き渡らせた後、更に水を十分粒子間に入り込ませるため24時間養生を行なった。この試料を標準突き固め試験法によって突き固めた後、高さが10cmになるように成形して、保存容器に密閉して保存した。保存期間は試料調整後、1, 7, 21, 49, 91, 126日とし、該当期間を経過した試料から直径3.5cm、高さ8cmのテストピースを切り出して一軸圧縮試験により強度を求めた。また間隙のイオンの影響を知るために、蒸留水の代りにNaCl、およびCaCl₂の各々0.5および0.25規定液を用いて突き固めた試料を作り、同様な経過期間をおいて一軸圧縮強度を求めた。ただし薬品を用いたものについては、図－1, 2に示す最適含水比よりやや湿潤側で突き固めたもののみについて行なった。

Ⅳ. 実験結果および考察

1. ベントナイトの強度変化

ベントナイトの供試体は、最適含水比より乾燥側で突き固めたもの2個、湿潤側で突き固め

Fig. 1. Compaction Curve of Bentonite

(a) Standard Compaction Curve

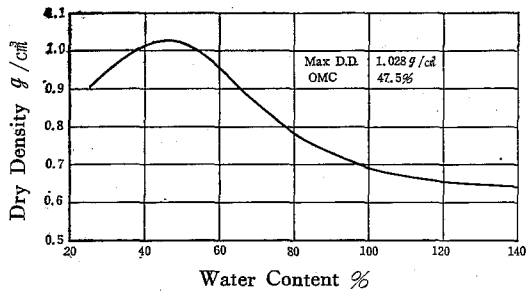
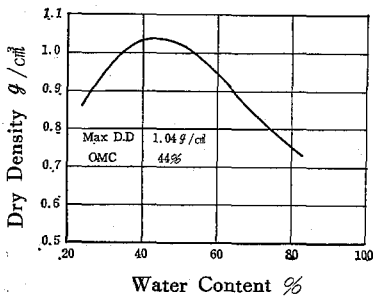
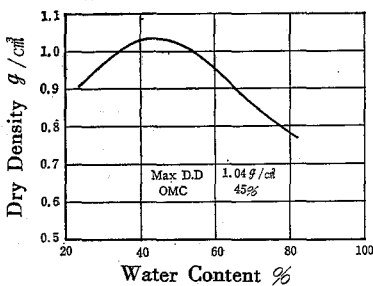
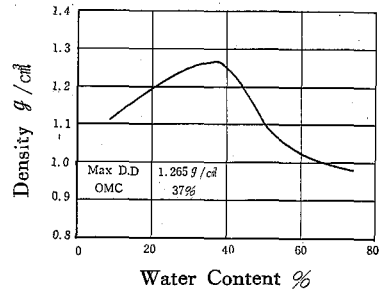
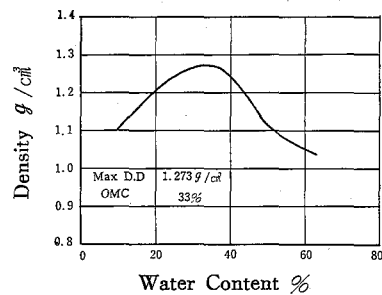
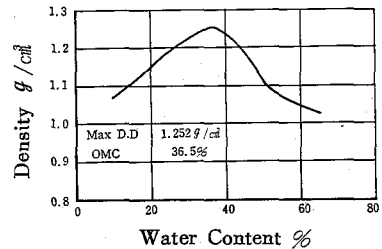
(b) Compaction Curve with $\frac{1}{2}$ N NaCl(c) Compaction Curve with $\frac{1}{2}$ N CaCl_2 

Fig. 2. Compaction Curve of Hachihama Clay

(a) Standard Compaction Curve

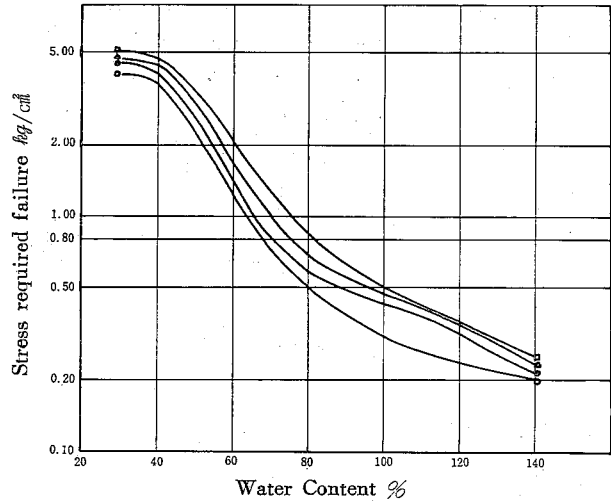
(b) Compaction Curve with $\frac{1}{2}$ N NaCl(c) Compaction Curve with $\frac{1}{2}$ CaCl_2 

たもの8個の計10個で、それぞれの静置時間を経過した後の一軸圧縮強度を測定した。破壊に至る最大の一軸圧縮強度を示せば表-2の通りである。また静置期間0, 1, 21, 126日の変化状況を示せば図-3の通りとなる。

この結果によれば、含水比の差による強度増加についての一般的傾向は明瞭ではないが、1日目における強度増加が著しいのは、含水比89%, 115%, 127%であって、大きい増加率は日数の経過に伴って含水比の小さい方に移動して含水比68%が最も大きくなっている。含水比が更に少ないものでも大きい増加率を示しているものもあるが、126日目の増加率を比較すれば68%が最大であって、次いで89%, 115%となっている。このことは平行的配列に置かれていた平板状粘土粒子が、自然的にエネルギーのバランスをとろうとして時間の経過につれて任意的に組み合わせられた構造に移行するためには、最適含水比よりも湿潤側でなければならないことと、ある程度含水比が大きいところでは強度増加の大部分が1日目に生じることを示している。すなわち最適含水比以下や塑性限界以下ではテクトロピ的挙動の程度が低いことを示し

Fig. 3. Changes of Strength for Compacted Bentonite as a Function of molding Water Content (Maximum Stress)

□—□ 126 days after Compaction
 △—△ 21 days after Compaction
 ●—● 1 day after Compaction
 ○—○ immediately test after compaction



第2表 ベントナイトの圧縮強度

突き固め 含水比		突き固め 直 後	静 置 日 数 (日)					
			1	7	21	49	91	126
32%	強度 (kg/cm ²)	3.79	4.44	4.56	4.72	4.76	4.84	5.02
	増加率 A	1.00	1.17	1.20	1.25	1.26	1.28	1.32
	増加率 B		1.17	1.03	1.04	1.01	1.02	1.04
42%	強度 (kg/cm ²)	3.63	3.86	4.02	4.52	4.59	4.63	5.64
	増加率 A	1.00	1.06	1.11	1.25	1.26	1.28	1.28
	増加率 B		1.06	1.04	1.12	1.02	1.01	1.00
45%	強度 (kg/cm ²)	2.92	3.42	3.54	3.85	4.00	4.07	4.15
	増加率 A	1.00	1.17	1.21	1.32	1.37	1.39	1.42
	増加率 B		1.17	1.04	1.09	1.04	1.02	1.02
49%	強度 (kg/cm ²)	2.30	2.42	2.84	3.10	3.25	3.41	3.38
	増加率 A	1.00	1.05	1.23	1.35	1.41	1.48	1.47
	増加率 B		1.05	1.17	1.09	1.05	1.05	0.99
68%	強度 (kg/cm ²)	0.82	0.98	1.01	1.11	1.24	1.34	1.41
	増加率 A	1.00	1.20	1.23	1.35	1.51	1.63	1.72
	増加率 B		1.20	1.03	1.10	1.12	1.08	1.05
73%	強度 (kg/cm ²)	0.717	0.784	0.897	0.911	0.974	1.04	1.07
	増加率 A	1.00	1.09	1.25	1.27	1.36	1.43	1.49
	増加率 B		1.09	1.14	1.02	1.07	1.07	1.03
89%	強度 (kg/cm ²)	0.388	0.510	0.523	0.564	0.629	0.644	0.644
	増加率 A	1.00	1.31	1.35	1.45	1.62	1.66	1.66
	増加率 B		1.31	1.04	1.07	1.12	1.02	1.00
115%	強度 (kg/cm ²)	0.256	0.375	0.371	0.339	0.392	0.403	0.402
	増加率 A	1.00	1.46	1.45	1.52	1.53	1.58	1.57
	増加率 B		1.46	0.99	1.05	1.01	1.03	0.99
127%	強度 (kg/cm ²)	0.215	0.270	0.280	0.298	0.299	0.307	0.308
	増加率 A	1.00	1.26	1.30	1.39	1.39	1.43	1.43
	増加率 B		1.26	1.04	1.06	1.00	1.03	1.00
138%	強度 (kg/cm ²)	0.208	0.215	0.222	0.230	0.233	0.241	0.259
	増加率 A	1.00	1.03	1.03	1.11	1.12	1.16	1.25
	増加率 B		1.03	1.05	1.02	1.01	1.03	1.07

(注) 増加率Aは突き固め直後の値に対する増加率, 増加率Bはそれぞれの左欄の値に対する増加率.

ている。このことは筆者がさきに報告したように¹⁾、乾燥側で突き固めたものでは、すでに任意的な粒子配列ができていいることとも符合する。一方138%の含水比においては、一軸圧縮強度としての増加率を見るには弱いため、他の含水比と比較してチクソトロピ性が小さいものと思われ、従ってこれ以上の含水比でチクソトロピ的挙動を把握するためには粘性のような他の測定要素を考えるべきであろう。

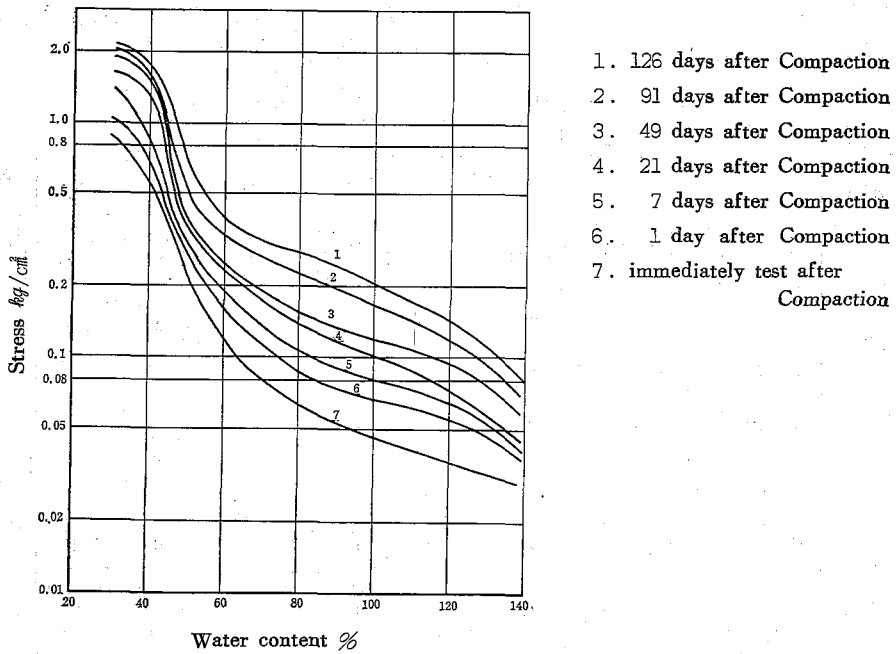
次に1%のひずみを与えるに必要な応力をとってプロットすると、表-3、図-4の通りとなる。これを見ると含水比が68, 73, 89, 115, 127%の試料について第1日目にかかなり大きい応力の増加が現われており、また68, 73, 89%においては7日目にも著しい応力増加が見られる。これに反してこれらより少ない含水比においては、1日目も7日目にもそれほど大きい応力の増加はない。また49日目から91日目に至る応力の増加は、含水比が49%から115%の間において大きい、含水比127%においては21日目から49日目に大きい増加があり、また126日目においては含水比68%以上127%までの間に大きい増加率を見ることができる。すなわち1%

第3表 ベントナイトの1%のひずみを与えるに必要な応力

突き固め 含水比		突き固め 直 後	静 置 日 数 (日)					
			1	7	21	49	91	126
32%	応力 (kg/cm ²)	0.85	1.05	1.43	1.57	1.85	2.01	2.10
	増 加 率 A	1.00	1.23	1.68	1.85	2.18	2.36	2.47
	増 加 率 B		1.23	1.36	1.10	1.18	1.09	1.04
42	応力 (kg/cm ²)	0.48	0.62	0.94	1.12	1.34	1.43	1.65
	増 加 率 A	1.00	1.29	1.96	2.33	2.79	2.98	3.44
	増 加 率 B		1.29	1.52	1.19	1.20	1.07	1.15
45	応力 (kg/cm ²)	0.34	0.42	0.54	0.70	1.06	1.13	1.25
	増 加 率 A	1.00	1.24	1.59	2.03	3.12	3.32	3.68
	増 加 率 B		1.24	1.29	1.30	1.51	1.07	1.11
49	応力 (kg/cm ²)	0.24	0.28	0.31	0.39	0.42	0.62	0.84
	増 加 率 A	1.00	1.17	1.29	1.62	1.75	2.58	3.50
	増 加 率 B		1.17	1.11	1.26	1.08	1.45	1.35
68	応力 (kg/cm ²)	0.088	0.120	0.158	0.180	0.200	0.270	0.320
	増 加 率 A	1.00	1.36	1.80	2.05	2.27	3.07	3.64
	増 加 率 B		1.36	1.32	1.14	1.11	1.35	1.19
73	応力 (kg/cm ²)	0.078	0.108	0.142	0.160	0.192	0.255	0.291
	増 加 率 A	1.00	1.38	1.82	2.05	2.46	3.27	3.73
	増 加 率 B		1.38	1.31	1.13	1.20	1.33	1.14
89	応力 (kg/cm ²)	0.052	0.075	0.093	0.118	0.130	0.178	0.205
	増 加 率 A	1.00	1.44	1.88	2.27	2.50	3.42	3.94
	増 加 率 B		1.44	1.31	1.20	1.10	1.37	1.15
115	応力 (kg/cm ²)	0.040	0.058	0.068	0.082	0.102	0.133	0.155
	増 加 率 A	1.00	1.45	1.70	2.05	2.55	3.32	3.88
	増 加 率 B		1.45	1.17	1.21	1.24	1.30	1.17
127	応力 (kg/cm ²)	0.034	0.051	0.057	0.062	0.083	0.098	0.124
	増 加 率 A	1.00	1.50	1.68	1.82	2.44	2.88	3.65
	増 加 率 B		1.50	1.12	1.09	1.34	1.18	1.27
138	応力 (kg/cm ²)	0.030	0.038	0.042	0.049	0.058	0.071	0.082
	増 加 率 A	1.00	1.27	1.40	1.63	1.93	2.37	2.73
	増 加 率 B		1.27	1.11	1.17	1.18	1.24	1.15

(注) 増加率Aは突き固め直後の値に対する増加率、増加率Bはそれぞれの左欄の値に対する増加率。

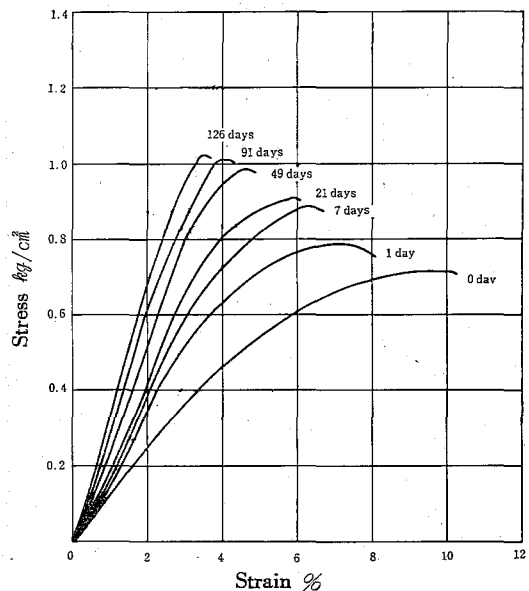
Fig. 4. Changes of Strength for Compacted Bentonite
as a Function of Molding Water Content
(Stress required to cause 1% Strain)



のひずみを与えるに必要な応力の場合でも、塑性限界以上の含水比でチクソトロピ的挙動が顕著であり、しかも成形した時からかなり早い時間においてかなりの強度増加があることがわかる。

一方応力-ひずみ曲線の代表例として、突き固め含水比73%のベントナイト試料で示すと図-5の通りである。他の含水比の場合も同様な傾向を持っているが、図からわかるように、静置日数が長いものほど曲線の勾配は急になり、しかも直線部分が多くなってくる。また含水比が少ないものでは、応力-ひずみ曲線は勾配が急で直線的である。このことは供試体が粘弾性体であり、応力-ひずみ曲線の直線部は弾性体の挙動を示し、曲線部は粘塑性体の挙動を示していると考えられ、弾性体としての挙動は粒子が任意配列によって生ずるものと見ると、含水比が小さ

Fig. 5. Stress-Strain Curve of Bentonite with 73% water Content by unconfined test



いものは任意配列であり、また含水比が大きいものでも静置日数が長くなるにつれて任意配列に変化し弾性体に近づくものと考えられる。

2 八浜粘土の強度変化

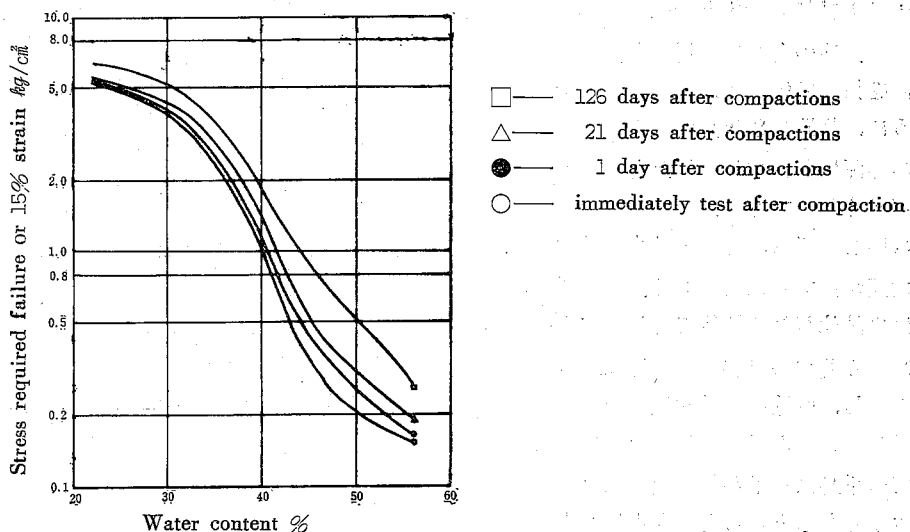
八浜粘土は、最適含水比より乾燥側で突き固めたもの2個、最適含水比で1個、湿潤側で3個の合計6個の試料を用い、それぞれの静置期間を経過した後の一軸圧縮強度を求めた。破壊

第4表 八浜粘土の一軸圧縮強度

突き固め 含水比		突き固め 直後	経過日数(日)						備考
			1	7	21	49	91	126	
22%	強度 (kg/cm^2)	5.391	5.420	5.510	5.640	5.725	6.021	6.420	最大応力
	増加率 A	1.00	1.01	1.02	1.05	1.06	1.12	1.20	
	増加率 B		1.01	1.02	1.02	1.02	1.05	1.07	
33	強度 (kg/cm^2)	2.949	3.374	3.462	3.740	3.789	3.901	4.032	最大応力
	増加率 A	1.00	1.14	1.17	1.27	1.28	1.32	1.38	
	増加率 B		1.14	1.03	1.08	1.01	1.03	1.05	
37	強度 (kg/cm^2)	1.921	2.101	2.300	2.520	2.782	2.894	3.050	15%ひずみ応力
	増加率 A	1.00	1.09	1.20	1.31	1.45	1.51	1.59	
	増加率 B		1.09	1.09	1.10	1.10	1.04	1.05	
47	強度 (kg/cm^2)	0.245	0.295	0.312	0.352	0.425	0.545	0.628	15%ひずみ応力
	増加率 A	1.00	1.20	1.27	1.44	1.73	2.22	2.56	
	増加率 B		1.20	1.06	1.13	1.21	1.28	1.15	
53	強度 (kg/cm^2)	0.180	0.210	0.221	0.251	0.288	0.321	0.370	15%ひずみ応力
	増加率 A	1.00	1.17	1.23	1.39	1.60	1.78	2.06	
	増加率 B		1.17	1.05	1.14	1.15	1.11	1.15	
56	強度 (kg/cm^2)	0.152	0.168	0.172	0.195	0.222	0.252	0.260	15%ひずみ応力
	増加率 A	1.00	1.11	1.13	1.28	1.46	1.66	1.71	
	増加率 B		1.11	1.02	1.13	1.14	1.14	1.03	

(注) 増加率Aは突き固め直後の値に対する増加率、増加率Bはそれぞれの左欄の値に対する増加率。

Fig. 6. Changes of Strength for Compacted Hachihama clay as a Function of molding Water content (maximum Stress or 15% Strain-Stress)

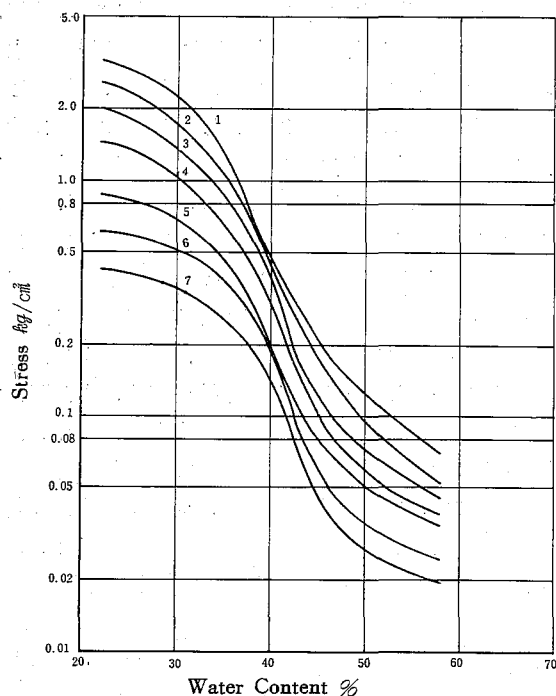


第5表 八浜粘土の1%のひずみを生ずるに要する応力

突き固め 含水比		突き固め 直 後	静 置 日 数 (日)					
			1	7	21	49	91	126
22%	応力 (kg/cm^2)	0.42	0.62	1.25	1.37	2.05	2.56	3.09
	増 加 率 A	1.00	1.47	2.98	3.26	4.88	6.09	7.36
	増 加 率 B		1.47	2.02	1.10	1.50	1.25	1.21
33	応力 (kg/cm^2)	0.28	0.42	0.58	0.79	0.99	1.27	1.72
	増 加 率 A	1.00	1.50	2.07	2.82	3.54	4.54	6.14
	増 加 率 B		1.50	1.38	1.36	1.25	1.28	1.35
37	応力 (kg/cm^2)	0.22	0.32	0.40	0.50	0.65	0.85	0.90
	増 加 率 A	1.00	1.05	1.82	2.27	2.95	3.85	4.09
	増 加 率 B		1.05	1.25	1.25	1.30	1.31	1.06
47	応力 (kg/cm^2)	0.035	0.043	0.061	0.076	0.097	0.125	0.177
	増 加 率 A	1.00	1.23	1.74	2.17	2.77	3.57	5.06
	増 加 率 B		1.23	1.42	1.25	1.21	1.29	1.42
53	応力 (kg/cm^2)	0.022	0.029	0.042	0.048	0.058	0.076	0.099
	増 加 率 A	1.00	1.32	1.91	2.18	2.64	3.45	4.50
	増 加 率 B		1.32	1.45	1.14	1.27	1.31	1.30
56	応力 (kg/cm^2)	0.020	0.025	0.034	0.038	0.045	0.054	0.069
	増 加 率 A	1.00	1.25	1.70	1.90	2.25	2.70	3.45
	増 加 率 B		1.25	1.60	1.12	1.18	1.20	1.28

(注) 増加率Aは突き固め直後の値に対する増加率, 増加率Bはそれぞれの左欄の値に対する増加率.

Fig. 7. Changes of Strength for Compacted Hachihama clay as a Function of Molding Water Content
(Stress required to cause 1% strain)



1. 126 days after compaction
2. 91 days after compaction
3. 49 days after compaction
4. 21 days after compaction
5. 7 days after compaction
6. 1 day after compaction
7. immediately test after compaction

に至る最大一軸圧縮強度または15%のひずみを与える応力を示せば表-4の通りであり、静置期間0, 1, 21, 126日の変化状況を示せば図-6の通りとなる。

この結果から見れば、塑性限界よりも大きい含水比における強度増加は、ベントナイトの場合よりも顕著に現われている。すなわち含水比47%における強度増加は他のものに比して非常に大きく、126日目において突き固め直後の強度の2.56倍にも達し、特に1日目、49日目、91日目の増加が著しい。次いで含水比53%の試料が大きく、126日目において突き固め直後の2.06倍の強度を示している。八浜粘土は平板状、針状をなした粘土であり、塑性限界より大きい含水比における粒子配向の容易さが強度増加を大きくしたものであると言ってよい。なお八浜粘土のチクソトロピ的挙動の特徴としては、たとえば含水比47%の試料でわかるように1日目の強度増加があった後に、さらに49日目、91日目に大きい強度増加が生じていることである。これは含水比56, 53%の試料でも見られるが、その原因については今後更に検討しなければならない。

次に1%のひずみを生ずるに要する応力を見ると、表-5、図-7に示す通りであり、含水比が小さいものに大きい応力増加が見られる。これは含水比が小さいものは弾性体として挙動し、塑性限界以上の含水比では塑性体として挙動し、粒子配向以外にも何らかの影響を受けているものと思われるが、この点についても更に多くの実験を行なって検討を進める予定である。

3 NaCl, CaCl₂ 添加の影響

間隙液体に陽イオンが添加された場合の影響を見るために、突き固めの際蒸溜水の代りにNaCl, CaCl₂のそれぞれ0.5および0.25規定液を使用して供試体を作成して試験を行なった。その結果を示せば表-6の通りである。

これによるとベントナイトについては、126日目の強度増加率はNaClの0.5Nで1.45倍、0.25Nで1.23倍であり、これを同程度の含水比を持った水の水のみの強度増加率1.42倍(含水比45%)、1.47倍(49%)と比較すると、0.5Nでは同様な増加率を示すのに対し、0.25Nでは低い。またCaCl₂の場合には、水の水のみの試験の増加率1.28倍(42%)、1.47倍(49%)に比して、0.5Nでは大きく0.25Nでは小さい。一方八浜粘土においては水の水のみの供試体の強度増加率1.59倍(37%)に比していずれも大きく、NaClの0.5Nで1.74倍、0.25Nで1.60倍、CaCl₂の0.5Nで1.72倍、0.25Nで1.81倍となっている。また各静置期間毎の増加率を見れば、両粘土ともNaClは1日ないし7日の間に強度増加が生じた後は徐々に増加があるに過ぎないが、CaCl₂の場合には1~21日と、91~126日の2回にわたって大きい増加がみられる。

以上の結果は実験数が少ないので明瞭な結論を下すことはできないが、電解液を加えた場合でも水の場合と同様に八浜粘土の方がベントナイトよりチクソドロピ性が高く、また明瞭ではないがNaよりもCaの方が強度増加率がやや大きい。一般に水和度の大きいカチオンほど粒子のまわりへの置換浸入力が小さい。従ってCa⁺⁺はNa⁺よりも粒子面に接近し易く強い力で吸着される。Ca⁺⁺とNa⁺の半径の比は1.06対0.98であるのに対し、荷電量の比は2対1であるからCa⁺⁺の方が水分子を多く吸着している。このことは吸湿水量を置換性イオンの種類別に測定した結果⁴⁾からも明らかである。すなわちCa⁺⁺の方が吸着水を多く含むがために、粒子配向の容易さが助長され、強度増加率が大きくなるものと思われる。このことは0.5Nと0.25Nとの間の増加率の差にもあてはめることができ、0.5Nの方が吸着水膜を厚くするため増加率を大きくすると考えられる。

第6表 NaCl, CaCl₂ を添加した粘土の一軸圧縮強度

粘 土	薬 品	規定液	含水比		突き固め 直 後	静 置 日 数 (日)					
						1	7	21	49	91	126
ベント ナイト	NaCl	0.5	46	強度 (kg/cm ²)	2.86	3.18	3.36	3.67	3.79	3.96	4.14
				増加率 A	1.00	1.11	1.17	1.28	1.33	1.38	1.45
		0.25	49	増加率 B		1.11	1.06	1.09	1.03	1.04	1.05
				強度 (kg/cm ²)	3.05	3.26	3.41	3.54	3.57	3.57	3.76
		0.25	49	増加率 A	1.00	1.07	1.12	1.16	1.17	1.17	1.23
				増加率 B		1.07	1.05	1.04	1.01	1.00	1.05
	CaCl ₂	0.5	43	強度 (kg/cm ²)	3.00	3.35	3.41	3.68	3.83	4.14	4.39
				増加率 A	1.00	1.12	1.14	1.23	1.28	1.38	1.46
		0.25	48	増加率 B		1.12	1.02	1.08	1.04	1.08	1.06
				強度 (kg/cm ²)	2.67	2.72	2.73	2.92	3.02	3.12	3.42
		0.25	48	増加率 A	1.00	1.02	1.02	1.09	1.13	1.17	1.28
				増加率 B		1.02	1.00	1.07	1.03	1.03	1.10
八浜粘土	NaCl	0.5	40	強度 (kg/cm ²)	1.17	1.45	1.60	1.67	1.75	2.03	2.04
				増加率 A	1.00	1.24	1.37	1.43	1.50	1.74	1.74
		0.25	35	増加率 B		1.24	1.10	1.04	1.05	1.16	1.00
				強度 (kg/cm ²)	2.73	3.02	3.39	3.61	4.00	4.07	4.37
		0.25	35	増加率 A	1.00	1.11	1.24	1.32	1.47	1.49	1.60
				増加率 B		1.11	1.12	1.06	1.11	1.02	1.07
	CaCl ₂	0.5	36	強度 (kg/cm ²)	2.29	2.75	3.19	3.30	3.39	3.59	3.91
				増加率 A	1.00	1.20	1.39	1.44	1.48	1.57	1.72
		0.25	38	増加率 B		1.20	1.16	1.03	1.03	1.06	1.09
				強度 (kg/cm ²)	1.99	2.08	2.12	2.87	3.20	3.25	3.61
		0.25	38	増加率 A	1.00	1.05	1.07	1.44	1.61	1.63	1.81
				増加率 B		1.05	1.02	1.27	1.11	1.02	1.11

(注) 増加率Aは突き固め直後の値に対する増加率, 増加率Bはそれぞれの左欄の値に対する増加率.

V. 要 約

土のチクソトロピ現象についての研究は多く行なわれているが, 測定の方法によっても, また測定 of 速さによっても得られる結果に差異が生じ, チクソトロピの実態を把握し解明することは非常に困難である. 筆者は含水比が液性限界以下の粘土のチクソトロピを考える場合, 粒子の配向を基本とすることに着目し, 間接的な実態把握を試みた.

先ず粘土粒子の配向にはさきに発表した報文¹⁾の中で述べたように, 任意配列と平行配列とがあり, チクソトロピ現象は平行配列をなした分散構造が, 自然的エネルギーのバランスをとるために, 分子的吸引力と反撥力の相互作用によって, 任意に組み合わせられた構造に移行することによって生ずると推論できる. そして最適含水比よりも湿潤側で突き固められた粘土は分散構造であるから, それが任意配列に移行するときに強度増加が生ずると考え, ベントナイトおよび八浜粘土を各種の含水比で突き固め, 蒸発を防いで一定期間放置した後の一軸圧縮強度を求めた. さらに間隙液体として NaCl, CaCl₂ の溶液を用いて同様な試験を行なった. その結果をまとめれば次の通りである.

- (1) ベントナイト, 八浜粘土とも塑性限界以上の含水比で突き固めた試料においてはかなりの強度増加があるが, それよりも少ない含水比で突き固めたものはあまり強度が増加しない. これは粘土の弾性的挙動と粘弾性的挙動の相違のためである.

- (2) 強度増加率の最大はベントナイトで含水比68%のものであり、八浜粘土では含水比47%のものであった。
- (3) 強度増加率はベントナイトよりも八浜粘土の方が大きい。
- (4) ベントナイトの強度増加の大部分は突き固め後1日目までに生じているのに対し、八浜粘土では含水比が大きいもので1~7日および49~91日に顕著な増加がある。しかし含水比が低いものでは、強度増加は遅い時期にあり、しかもその率は小さい。
- (5) NaCl, CaCl₂ の添加による強度増加の程度は、濃度が高い方が大きく、また CaCl₂ の方がやや大きいようである。

なお本研究は昭和42年度科学研究費補助金によって行なったものである。

参 考 文 献

- 1) 小橋英夫 (1961) ; 土の粘着力に関する土性論的研究, 岡山大学農学部農業工学教室報告 第2号: 1—111
- 2) T. W. LAMBE (1958) : The Structure of Compacted Clay, Proceedings, ASCE., 84, No. SM 2, 1654.
- 3) H. B. SEED and C. K. CHAN (1957) : Thixotropic Characteristics of Compacted Clay. Proceedings, ASCE., 83, No. SM 4, 1427.
- 4) 土質工学ハンドブック (1966) 41—48. 技報堂, 東京.