

III-31 過圧密粘土の強度について

神戸大学工学部 正員 輕部大蔵

一面せん断試験機によって、過圧密粘土のせん断強さをしらべる一連の実験をおこなった結果を報告する。

I 試料および試験機

試料は、大阪湾付近の地表面下10m~20mからシンウオールサンフラーで採取された乱さないちゅう種層粘土で、物理的性質は、 G_s 2.65~2.70, LL 80~89%, PL 20~31%である。これは直径6cm厚さ1.2cmの円板に成形して、せん断箱に入れる。試験機は、いわゆる在来型であるが、上部ポーラスストーンは載荷板にとりつけられており、載荷板はガイドによって傾斜を防いでいる。また、垂直荷重は、従来の重錘によるほか、アルーベックリングとハンドルによっても載荷できるように改造されているので、等体積試験が容易に行なえる。

II 過圧密粘土のせん断強さを与える一般式について

飽和粘土のせん断強さは、周知のように実用上Hvorslevの式であらわされる；

$$\tau = c_e + \sigma' \tan \phi_e \quad (1)$$

ここに $c_e = \mu \sigma_e + c_0$ (σ_e : 等価圧密応力, c_0 はたいていゼロである。)

すなわち、せん断抵抗力はせん断面に垂直な応力 σ' に比例する成分と、同じゲキ比によって決定される粘着成分の和としてあらわされるのであるが、後者の粘着成分の本質が何かを知ることは、粘土の破壊基準がMohr-Coulomb系かVonMises系かをきめる上で重要である。

ここでは、過圧密粘土の強度成分を次のように考えた。図-1において、正規圧密状態にある粘土(N点)の圧密圧力を σ_0 まで低下させると、同じゲキ比が e_0 だけ増加して過圧密状態となる。この状態をO点であらわすと、O点と同じゲキ比を示す正規圧密状態N'点が存在する。Hvorslevは、OとN'の間の構造の相違は問題にせず、せん断中の σ' がことなっているためにせん断強さの差があらわれるものと考えているようである。しかし、両者は相異なる圧密応力 $\sigma_N > \sigma_0$ のもとで同一の含水比を有していることからして当然構造上のちがいをもち、このちがいがせん断過程を通じて解消されるからこそ、破壊時の σ' が接近するのである。

ところで、粘土粒子相互間に働く力は、図-1のようであるといわれている。このため、比較的小さい圧密応力 σ_N をうけている正規圧密粘土の粒子間隔分布は、図-1bの曲線N'のようであるが、圧密圧力が増加するにつれて、分布は左に移行し、かたまりの部分が粒子が引力の状態になって団粒を形成するものと考えられる。この団粒は、圧密応力が減少しても粒子相互の強い引力によって保持され、したがって粒子間隔の分布の分散は曲線Oに近きようになるとなる。このような構造の粘土にせん断応力が加えられると、団粒同

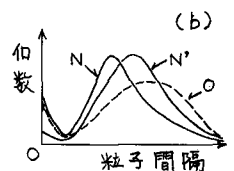
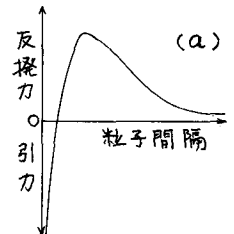
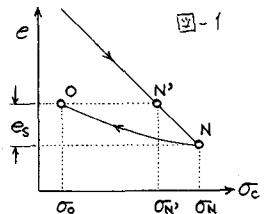


図-2

土がインターロッキングなどの干渉をおこすので、せん断面は平滑とならず、したがって同じ含水比の正規圧密粘土N'に比べてむしろ大きいせん断抵抗角を示すであろう。

すなわち、

$$\text{正規圧密粘土: } \tau = \sigma' \tan \phi' \text{ ----- (2a)}$$

$$\text{過圧密粘土 } \tau = \sigma' \left[\tan \phi' + \frac{(\sigma_0 \text{の団粒体積} - N \text{の団粒体積})}{e} \right] \text{ ----- (2b)}$$

ここに 0 の団粒体積 = N の団粒体積。

団粒化は圧密応力によっておこるが、両者の関数関係を導くには電気化学的な考察が必要である。ここでは便宜的に、団粒化は間ケキ比の変化と一定の関係を保って起ると考え、式(2a)を次のようにあらためる；

$$\tau = \left[\tan \phi' + f\left(\frac{e_s}{e}\right) \right] \sigma' \text{ (2c)}$$

$$\therefore \tau/\sigma' = \tan \phi' + f\left(\frac{e_s}{e}\right) \text{ (2d)}$$

図-3は、表-1に示した種々の圧密等体積試験の結果を τ/σ' と e_s/e の関係にまとめたものである。表-1に用いられている記号は図-1と同じであり、 σ_N は先行圧密応力、 σ_0 は膨潤応力、 e_s は膨潤量、 e は0の間ケキ比である。図-3のプロットはかなりのばらつきを示しているが、もともと $e_s/e = 0$ に対応する正規粘土の値が中を持っていること、+印であらわした試料は、小さな試料を圧密降伏応力より小さい応力のもとでせん断した結果を、 σ_N

= P_0 と仮定して計算したものであることなどを考え合わせると、式(2d)が

$$\tau/\sigma' = 0.57 + 0.2(e_s/e) \text{ (2e)}$$

のかたちで求められたとみてよいであろう。

このような考察を正規圧密の領域にまで拡張することは可能であるか。そのためには、式(2e)と Hvorslev の式の関係を吟味する必要がある。

Ⅲ 圧密時間がせん断強度に与える影響について

圧密荷重と圧密量の関係 ($e \sim \log p$ 関係) は、圧密時間の長さに影響される。たとえば、図-4のま

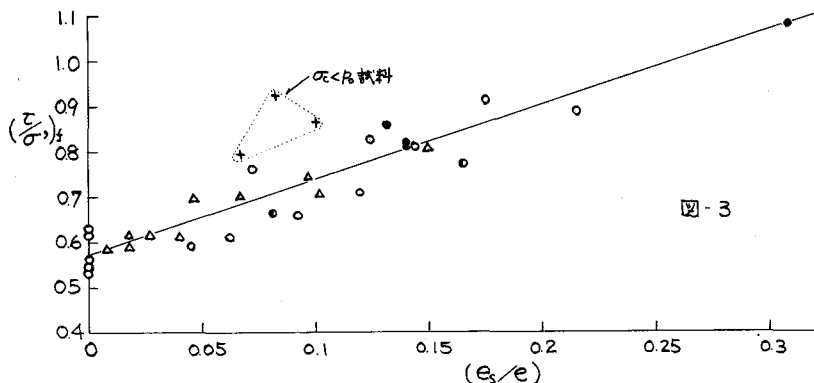


図-3

表-1. セン断試験結果

No	kg/cm ² σ _N	kg/cm ² σ ₀	cm d _s *	e _s %	kg/cm ² τ _f	kg/cm ² σ _f	τ _f /σ _f	備考
04	P ₀ 1.6	0.3	0.55	0.100	0.289	0.335	0.863	σ ₀ < P ₀
05		0.4	0.48	0.082	0.338	0.365	0.926	
06		0.5	0.41	0.067	0.340	0.340	0.791	
07	4	0.45	0.43	0.092	0.695	1.060	0.656	σ ₀ = 3 kg/cm ²
08	48	0.45	0.65	0.140	0.645	0.790	0.816	
09	48	0.75	0.72	0.215	0.581	0.650	0.894	
10	64	0.75	1.03	0.308	0.538	0.500	1.076	
11	32	0.3	0.61	0.131	0.468	0.545	0.859	σ ₀ = 2
12	64	0.6	0.66	0.140	0.846	1.050	0.806	σ ₀ = 4
1	6	0.07	0.97	0.175	0.590	0.650	0.908	σ ₀ ≈ 3 kg/cm ²
2	5.5	0.12	0.40	0.072	0.441	0.575	0.767	
2A	55	0.2	0.79	0.140	0.660	0.820	0.805	
3	5	0.26	0.67	0.120	0.736	0.998	0.708	
4	5	0.13	0.67	0.122	0.605	0.735	0.824	
5	4	0.4	0.35	0.062	0.800	1.315	0.608	
6	3.5	0.7	0.26	0.045	0.750	1.275	0.588	σ ₀ = 2
8A	4	0.07	1.02	0.165	0.315	0.410	0.768	
9A	3	0.33	0.51	0.081	0.585	0.885	0.661	σ ₀ = 2
1P	4	3	0.04	0.008	1.222	2.09	0.583	σ ₀ = 4 kg/cm ²
2'		2	0.09	0.018	1.105	1.80	0.614	
3'		1.5	0.14	0.027	1.052	1.71	0.616	
4'		1	0.21	0.040	1.006	1.65	0.610	
5'		0.5	0.36	0.067	0.743	1.06	0.701	
6'		0.25	0.54	0.097	0.609	0.82	0.74	
7'	5	0.125	0.88	0.150	0.514	0.64	0.80	σ ₀ = 5
8'		2	0.09	0.018	1.323	2.25	0.588	
9'		1	0.24	0.047	1.037	1.49	0.696	
10'		0.25	0.55	0.102	0.669	0.95	0.704	

No.の記号は図3と対応,* d_s 膨潤量

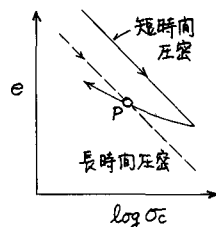


図-4

Pは、実線のような応力履歴をうければ過圧密状態であり、破線の履歴ならば正規圧密状態である。このような履歴を持つ粘土の力学的特性の研究の一環として、筆者らは、三笠らと同様に、正規圧密時間を種々に与えた場合の等体積セン断強さの測定をおこなった。圧密時間は16分～16日おのほに設定し、圧密圧力は主として 3 kg/cm^2 とした。図-5は、圧密中の含水比～時間関係を示している。供試体ごとに初期間けき比にかなりの差があり、それが最後まで保持されている。しかし、圧密の終期には、各曲線は平行となるので、以後の圧密の評価は、圧密時間1時間を標準として、そのときの含水比からの変化量でおこなうこととした(図-5b)。

圧密を所定時間おこなった後、セン断速さ 0.56 mm/min で等体積セン断をおこなった。セン断中の応力経路は図-6のようである。破壊をセン断応力最大の点で定義すると、圧密時間とセン断強さ τ 、そのときの垂直応力 σ_v' 、水平変位 du の関係は図-7のようになる。

試験結果を全応力の立場から整理すれば、圧密時間の増加による τ の増分は、含水比の減少にそとなく成分と、それ以外の成分に分けられる。図-8の○印は、含水比とセン断強さの関係を求めるために、 $\sigma_e = 2.5 \sim 4 \text{ kg/cm}^2$ で圧密時間を1時間として行なった試験結果をあらわしている。同じ座標に図-7の τ (実測値)をプロットすると●印のようになり、圧密時間を長くすることにより増加したセン断強さは、圧密応力を増加させたために生じる強度増より小さいことがわかる。これは、正規圧密状態でのセン断であるので、

セン断当初の垂直応力が、「圧密荷重増大」の場合の方が大きいためであると考えられる。したがって両者の差は、正規圧密粘土と過圧密粘土のセン断強さの差に似ているといえよう。

つぎに、セン断強さをHvorslevの式(式(1))であらわされるとすると、

$$\frac{\tau_s}{\sigma_e} = \alpha + \frac{\sigma_v'}{\sigma_e} \tan \phi_e$$

となる。図-9は、 $\sigma_e = 2 \text{ kg/cm}^2$ および 3 kg/cm^2 で種々の過圧密比を持つ供試体の試験結果を $\tau_s/\sigma_e \sim \sigma_v'/\sigma_e$ 関係にプロットしたものであり、外挿直線より α および ϕ_e が求められている。一方図-8の○印のもとになったセン断試験に先立つ圧密過程(1時間圧密)から含水比と圧密応力の関係を求めておきこれを $w \sim \sigma_e$ 関係とみなすと、圧密

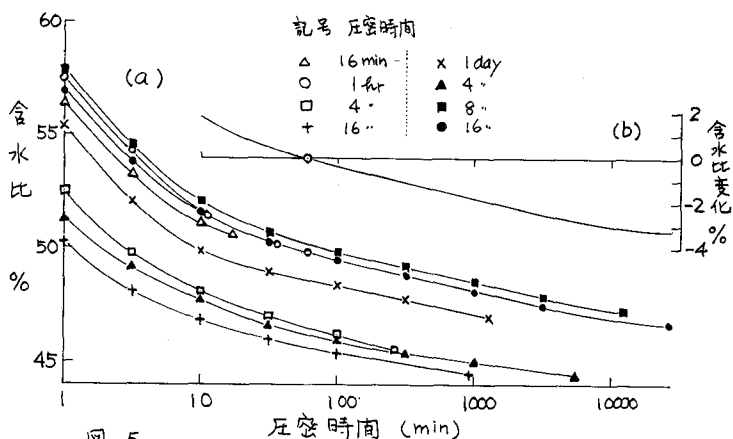


図-5

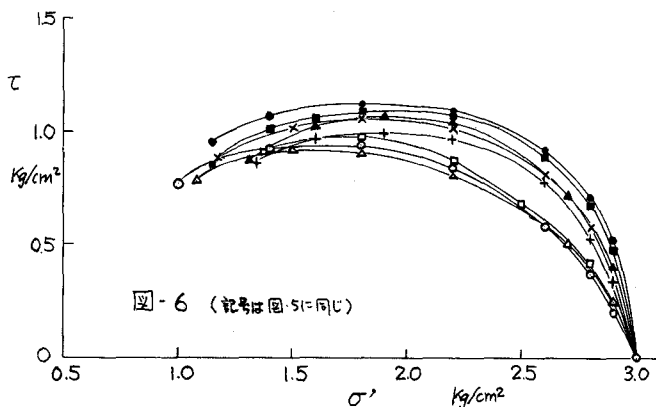


図-6 (記号は図-5に同じ)

時間を16分～16日の範囲に設定した供試体の σ_e を求めることができる。図-7の破線は、このようにして求めた σ_e と、図7の $\sigma_f' (= \sigma_{max})$ および図-9の α, ϕ_e を用いて式(1)によって計算した τ の理論値である。図から明らかなように、実測値は理論値より小さいが、その差が圧密時間の増加とともに大きくなるのかどうかは、はっきりしない。

もしも、この報告のように、 τ_f の理論値と実測値が圧密時間の差によってちがうというのが一般的な事実ならば、Hvorslevの強度定数 C_e, ϕ_e は土に固有の定数とはいえないことになる。しかし、これをまともに議論するためには、Hvorslevの強度定数測定精度を向上させること、一面セリ断につまみのの局部セリ断をさけるために三軸試験を行なうこと、およびHvorslevの強度定数の本質について、他の側面から研究を進めることなどが必要である。

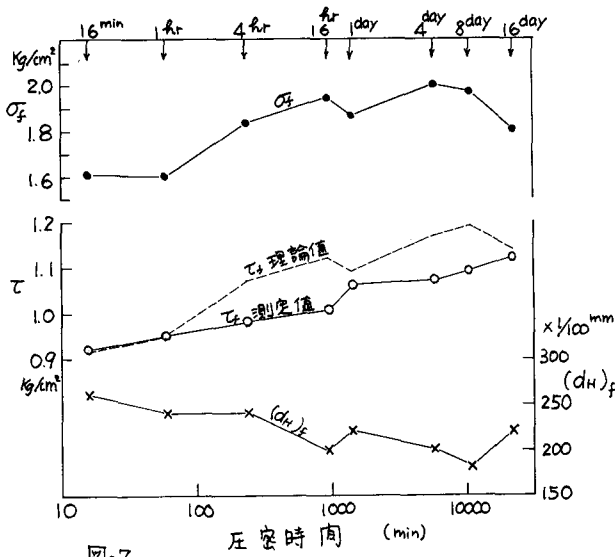


図-7

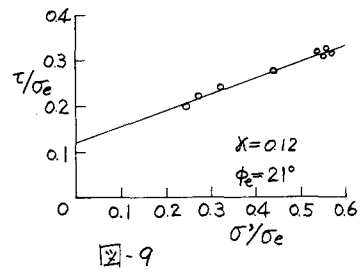


図-9

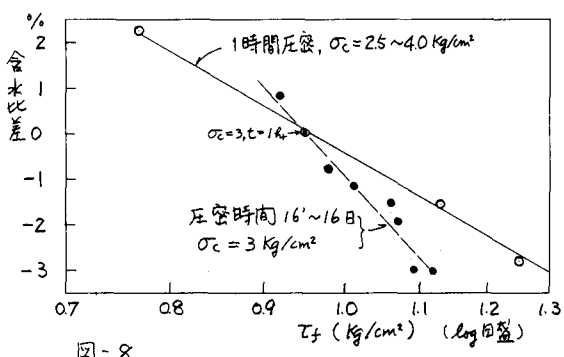


図-8