

1. ま え が き

長崎県下の地すべりは、地すべり面が地表面を被覆する崩積土中にある場合と、第三紀のタイ横岩層中に賦存する場合とがある。このような地すべり面および地すべり粘土が地中に形成される場合、地下水の存在が必要条件の一つであり、吸水膨張が要因の一つになつてゐることは先に報告した通りである。⁽¹⁾しかしこの現象が進行して地すべり粘土化する生成機構については、まだ解明されていない部分が多く残されている。この報文は地すべり粘土の圧密試験によつて先行圧密荷重の測定を行ない、これらの数値を中心に吸水膨張現象の面から岩層中に賦存する地すべり粘土の成因の一つを検討したものである。

2. 地すべり粘土の先行圧密荷重

2.1 崩積土中の地すべり粘土

崩積土中の地すべり粘土の多くは深度がとくに浅い場合を除いては、現位置において風化生成したものでなく、運積土としてタイ横したとき分級されてすでに形成されている（これを既成粘土と言う）。この場合過飽和状態でタイ横し部分的に移動することによつて water film 面が形成されることもあるが、その後のタイ横状態はテウ積粘土と類似することが多いので、このような過程を通つて出来た地すべり粘土を採取して圧密試験を行なうと先行圧密荷重が現われ、試験結果は第1表のようになる。これによると、

(1) 過圧密粘土となつていて、これが崩積土中の地すべり粘土の特徴となつてゐる。この理由については浸食、乾燥時の収縮にともなう圧縮応力の影響、化学的な結合による影響がある。後者については集水井堀さく時、崩積土中に不整合面を見出すことによつて実証できる。

(2) 圧縮指数はあまり大きいものが見出されておらず $0.0 \leq 0.3$ が多い。たゞし小倉の岩石風化残積土においては P_0 , Q_0 に特別な数値が見出され、崩積土中の地すべり粘土とは異なつた生成であることを示すものとして注目される。また多久など同一地区で同一母岩からなる崩積土中の地すべり粘土については

$$C_c = 0.0033 W_L \dots\dots\dots (1)$$

の関係があり、海成テウ積粘土に比較して係数が小さい。同一場所の地すべり粘土でも、採取時期（たとえば一年毎に採取した試料）によつて L_L , C_c に変化がある模様である。

2.2 岩層中の地すべり粘土

岩層中の地すべり粘土の成因については、地下水による岩石の風化が原因の一つと考えられている。圧密試験の結果は第2表のようであるが、これによれば、

オ1表 崩積土中の地すべり粘土の先行圧密荷重

採取場所	小倉	多久(佐賀)	角山(山口)
採取深度 (cm)	2.0 ~ 2.3	1.4 ~ 1.5	3.5 ~ 3.6
有効応力 (γ_{sat})	0.24	0.18	0.43
先行圧密荷重 (γ_{sat})	1.90	0.50	0.84
圧縮指数	0.659	0.186	0.262
単位重量 (γ_{sat})	1.620	1.880	1.861
平均地水面 (cm)	1.1	0.5	1.2
含水比 (%)	56.18	34.36	27.60
液性限界 (%)	77.40	56.25	55.92
塑性限界 (%)	29.36	25.88	26.71
塑性指数 (%)	48.04	30.37	28.71

(1) 先行圧密荷重 P_0 は、現在の土かぶり応力（地圧）に比較して著しく小さい数値を示している。すなわち過小圧密粘土と言った現象が見出され、これが岩層内の地すべり粘土の特徴となつてゐる。

(2) この種の地すべり粘土の圧縮指数は、崩壊土中の地すべり粘土より小さく $0.0 \leq 0.2$ となつてゐる。

3. 岩層地すべり粘土の吸水膨張

岩層中に生成している地すべり粘土をこの附近（主として地すべり粘土が賦存する下盤の岩層）の岩盤の自然含水比になるまで、小孔のあいた容器中で徐々に乾燥させて岩盤の単位体積重量に近くなるようモールドに詰め、上部から注水吸水膨張させこの時の膨張圧を測定すると第1図のようになる。これらの傾向を見ると次のことが言える。

(1) 第2表に示したように先行圧密荷重と膨張圧とはほぼ等しい。膨張圧は試料の状態によつて変化するが、先行圧密荷重に等しい膨張圧を得る試料の状態と、吸水膨張をする前の岩層の状態はほぼ同じものと推定される。

(2) 吸水膨張圧の発生機構は、土粒子表面に吸着水（hygroscopic moisture）として出来る剛性水分子層および付着水（film moisture）、粘土鉱物結晶中に浸入する結合水層などによるものと考えられる（これらを以降、単に吸着水と呼称する）。吸水膨張圧 P_e は、試料を容器に入れ上方から注水して吸水させ、 y 軸方向の体積変化に対応するものを力計を使用し、これの指示力を断面積で割つた数値として表示する場合、

$$\frac{dp_e}{dt} = A_i \exp(-B_i t) \dots \dots \dots (2)$$

によつて表示される。一方膨張速度に対しても $\frac{de}{dt} = a_i \exp(-b_i t)$ の関係が認められており、これは浸透速度 $V_y = -K \frac{\partial h}{\partial y}$ に関係するので、吸着水による膨張は浸透と同時に瞬間的（弾性変形的）に行なわれるものと思う。

(3) 吸水膨張圧曲線は必ずしもスムーズな曲線ではなく、第1図は次式によつて表わされる。

$$\frac{dp_e}{dt} = A_1 \exp[-B_1(t-t_0)] + A_2 \exp[-B_2(t-t_1)] + \dots \dots \dots (3)$$

これは地すべり粘土が垂直方向に均一なものではなく透水系数が変化しており、各部分によつて浸透速度が変化するためと解される。

(4) 吸水膨張試験は吸水方法（加水方向など）、試料の厚さなどによつて膨張圧、膨張量曲線が変わつてくる。すなわち水の浸透によつて湿つた部分の粒子が転移する場合、粒子間の吸着水の一部は徐々にせん断変形に際して塑性性挙動をとる。このため、試験方法と試料の状態とによつて

$$P_e(t) = P_0 f(t) + f(P_0) \frac{de}{dt} \dots \dots \dots (4)$$

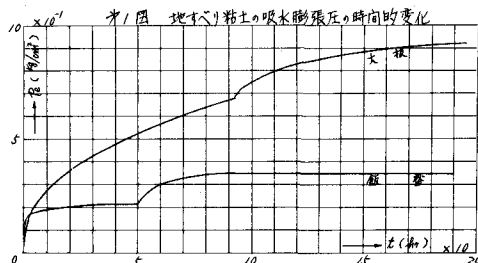


表2表 吸水膨張圧と先行圧密荷重との関係

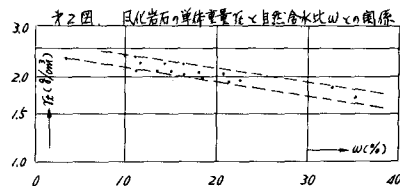
採取場所	大板(0.2津)	版盤(深平)
地すべり粘土採取深度(m)	22.00	4.0~5.0
岩質(上下盤)	砂質頁岩	頁岩(泥岩)
吸水膨張試験		
単体重量(%)	2.155	1.970
含水比(%)	6.11	6.52
乾燥密度(g/cm³)	2.030	1.954
吸水膨張圧(kg/cm²)	0.93	0.35
先行圧密荷重(kg/cm²)	0.92	0.38
自然含水比(%)	19.15	27.27
液性限界(%)	68.50	46.35
塑性限界(%)	25.00	15.24
塑性指数(%)	43.50	26.11
圧縮指数	0.151	0.21

なる線形微分方程式を解くことによつて膨張量を表示することが出来る。式(4)の特別解として先に述べた $\frac{de}{dt}$ を導くことも可能である。右辺第一項の Pe は、含水比、粒径、粘土鉱物の種類など吸着水層の生成、すなわち弾性挙動に関する係数を示し、挙動範囲は浸透速度など時間の関数として表わされる。

表3 吸水膨張圧 P_e と吸水前の含水比 w_0 の関係

先行圧密荷重 $P_0 = 0.38 \text{ kg/cm}^2$	初期含水比	2.16	6.52	8.45	13.40	自然含水比 27.32
	吸水膨張圧	0.56	0.35	0.29	0.18	0.042

試験時の含水比は吸着層の厚さに影響を与える。土粒子の最大水分子吸着量は一定条件下では大体決っているため初期含水比が吸着量に関係するとすれば $(Q_h - Q_c)$ となるので、初期含水比が小さい程膨張量、圧は大きくなる。また吸着水は粒子の比表面積に比例するので細粒土ほど大きく、水質（とくにイオンの種類）に関係してくる。勿論、含まれる粘土鉱物の種類によつて異なり montmorillonite 系が最も大きい。右辺第二項は土粒子の粘性変形挙動に関する抵抗を表示し、吸着水に起因する土のコンシステンシー（指数）、および粒子の接触圧に関係する乾燥密度などにも関係してくる。特別な場合 $f(0_e)$ は土の粘性係数と同じ意味をもつので、含水比によつても可成の影響を受けることになる。



4. 先行圧密荷重と地すべりとの関係

ある岩層地すべり粘土の先行圧密荷重は、その粘土が生成したときの吸水膨張圧にほぼ等しいが、同一地すべり粘土でも吸水膨張圧は既述の諸条件によつて可成変化してくるので、これによつて地すべり粘土生成以前の岩層の状態を推定することが出来る。たとえば、飯盛の試料について初期含水比 $w_0 = 2.16\%$ まで低下させた結果では、 $P_e = 0.56 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ となり、 $P_0 = 0.38 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ に比較して著しく大きな数値が出ている。これらから吸水前の岩層の含水比は第3表に示した如く 6.0% 前後であることが推定出来る。

第3表における吸水膨張圧 P_e と初期含水比 w_0 との間には

$$P_e = P_{e0} \exp(-Q_2 w_0) \dots \dots \dots (5)$$

なる関係がある。長崎、福岡、山口各県下の第三紀層に属する砂質ケツ岩およびケツ岩などのタイ積岩について、これの単位体積重量 γ_t と自然含水比 w との間には第2図に示す如く

$$\gamma_t = 2.6 \exp(-0.012 w) \dots \dots \dots (6)$$

の関係があつて、以上の地すべり地域に対しては可成の共通性がある。これらの関係式によつて地すべり粘土生成以前の岩石の風化程度を含水比を中心に推定出来る。

先行圧密荷重と地すべりの関係については次のようなことが言える。

(1) 岩層中では、極端に言えば γh (γ は岩石の単位体積重量, h は深度) に等しい地圧を受けており、 γh が大きい場合は吸水膨張は発生し難いが、 h が小さいときは $P_e = \gamma h$ になるはずである。しかるに P_e が γh より小さい過小圧密に似た現象を示すことはこの附近が破砕帯であり部分的に空間がみつたことを証明している。このような部分を免圧部と言う。先に地すべり粘土の生成には破砕帯が必要であることを述べたが、先行圧密荷重の面から見ても賦存が裏付けられる。室内実験によると地すべり粘土化した自然含水比の試料においても僅かの吸水膨張を示すものがあるが、空間を与え

ば加水によつて吸水膨張が可能であることを示している。

(2) $P_0 \div P_e$ の地すべり粘土は、その粒子間に P_e なる有効応力を誘発している。従来地すべり面の有効応力として $(\gamma h - \gamma_w h_w) \cos^2 \theta \tan \phi$ をしばしば用いて来た。(θ は斜面の傾斜, ϕ は内部摩擦角, γ_w は水の単位体積重量, h_w はすべり面上の地下水位) しかし岩盤中の免圧部にある吸水膨張粘土には P_0 しか作用していないので

$$(P_0 - \gamma_w h_w) \cos^2 \theta \tan \phi$$

とすべきである。しかるに今般の例では深度に比較して P_0 が小さく $P_0 \leq \gamma_w h_w$ の場合が多いので

$$(P_0 - \gamma_w h_w) \cos^2 \theta \cdot \tan \phi = -F$$

..... (7)

となつて $S = C - F$ (8)

の関係から地すべり粘土のせん断応力 S を著しく低くする。降雨などによつて地すべりが誘発される場合が多いことは周知の通りであるが、この時 P_0 が小さければ地下水位の上昇は大きくなくてもよく、容易に $P_0 \leq \gamma_w h_w$ の状態になり誘発原因の一つになる。岩層中の地下水は地表と連絡することによつて hair crack 中を上昇するが、長崎県下では basalt が連絡機構の一部となつている。

(3) 地すべり粘土の力学的性質を求めるために、従来はその機構から推定して圧密非排水による直接せん断試験によつて C, ϕ を求めて来た。しかし岩層内の地すべり粘土に対しては、先ず先行圧密荷重 $P_0 (\div P_e)$ を測定して P_0 に等しい側圧を加えた非圧密非排水の三軸圧縮試験が適当と思う。

$P_0 \leq \gamma_w h_w$ のときは $\gamma_w h_w$ に等しい back pressure を加えて行なつたものが発生時における岩層中の地すべり粘土の力学的性質を表示するものと思う。

(4) 岩層中の地すべり粘土は吸水膨張によつて生成するが、室内実験の場合の条件と対比すると、岩層中における破砕帯は次のような自然条件を持つていたと考えられる。

- (a) 破砕帯はこれらが形成されたとき空気に触れると言つた状態を持つ機会があつたと思えること。
- (b) 破砕したとき、岩石の風化はある程度進んでおり、これらが可成細かく圧砕されたこと。
- (c) 粒子間の固結度が低い岩石、又は風化が進んで土壤に近い状態を呈していること。

また吸水膨張によつて岩層と破砕帯の境界面には過剰水などが押し付けられて、極めて薄い water film 又は closed water layer を形成するが、この部分は $C = 0, \phi = 0$ となり地すべり発生の動機となる。

5. あ と が き

地すべり発生時の岩層中の地すべり粘土の先行圧密荷重 P_0 を測定すると過小圧密の状態であるが、ある条件のもとで行なう地すべり粘土の吸水膨張圧 P_e に等しいことを観測した。これらから岩層内の破砕帯の存在と、地下水位によつて地すべり粘土の有効応力が可成減少する理由を見出した。とくに有効応力の減少が地すべり粘土のせん断力を著しく低下させることは、降雨と地すべり発生とを結びつける手がかりになる。