【報文・論文】

口之津地すべりのすべり面形成過程について(Ⅱ)

玉 田 文 吾*

On the Process of Formation of the Slide Planes at Kuchinotsu Landslide Area (II)

by Bungo TAMADA

3. 地すべり面の形成過程について

テストピットによって検出されたすべり面が地層中においてどのような経過をたどって形成されるかについては、地すべりの発生原因にもつながるので重要な問題である。しかし多くの要因が重なり合っており、口之津地区の地すべり面は最近になって突然形成されたものではないと思われる点も多く、地質学的な時間要素も入ってくるので解明は容易なことではないが、既述の観察結果をもとに形成過程を検討してみたい。

3.1 富士山地区の地質構造

1. 概 要

本地区は島原鉄道口之津駅の北約 2 km、県道口之津雲仙線の左側に位置している。地区のほぼ中央に標高 173.7 m の富士山があるが、現在その南側に地すべりが発生している。この間の距離は山頂からの投影距離にして 200 m にすぎない。富士山は図-13の推定断面図に示すごとく、現在は一種の Tholoid 型を呈する凝灰質集塊岩 (agglomerate) および熔岩質集塊岩によって構成されている。これらの岩石中には柱状節理に似た亀裂が無数に発達しており、岩質は多孔質熔岩を含むもので全体的には空隙率が多い (一般には口之津層火山礫岩ともいわれる)。これらは数回の玄武岩活動の最上部にあたる両輝石安山岩熔岩に由来する火山碎屑物といわれており、口之津層群よりやや新しい時代のものとされている⁹⁾。富士山の周辺は既述の口之津層群が発達しており、全体的にはしゅう曲性の構造で侵食地形であるが、地すべり面が検出された地区だけを見ると、ほぼ東西の走向と 17° の傾斜をもつ単斜構造をしている。

層厚などは全般的な傾向を示すために誇張表示してある

図-13 富士山地区の断面図

2. 運積性既成粘土

すでに述べたように地すべり地区の最上部は薄い崩積土によって被覆されており、図-5 に模式断面図としてこの状態を表示した。このように基盤上に滞積した崩積土は口之津地区に限らず各地に見いだすことができる。ここでは富士山地区における崩積土の特徴について述べてみたい。

(1) 崩積土中にはこの付近にある火山岩などの転石を多く含んでいるが、これらが不規則に混入しているのではなく、層状になり、分級されて粒径、形状の揃った転石層または転石帯を形成している (写真-8 参照)。また転石層は水平に滞積しておらず、凹地に流れこんだ状態を呈するために膨縮が大きいものになっている。これらの転石層 (普通 2~3 層) の間には礫を含む細粒土層がはさまれているが、透水係数 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec の不透水層である。崩積土全体の垂直方向の粒度と含水比とを測定すると、いたる所、淘汰分級されて滞積した跡と、乱された跡とが残っている。

(2) 分級がとくに良好な場合は図-14 の模式断面に示したように薄い粘土層が形成されている。写真-9 は富士山地区に隣接した大抜地すべり地区の崩積土の中に見いだされた粘土層である。これらの層は有限のひろがりをもっており、膨縮が極端で不定な形状をなし、方向性を有し、流路性の滞積相をもつと同時に異方性がいちじるしい。とくに重要なことは欠層が見られることで水平、垂直方向に不連続であることも特徴の一つである。都いまで、このような崩積土中の粘土層は、崩積土中

写真-9 口之津地域の崩積土中の粘土層 (茶褐色の带状層)

の地下水のためにこれらが風化の結果生成するかのように思われてきたが、口之津地区ではこれらの粘土層が地中において岩石の風化によって直接生成したものではないから、これらを“運積性既成粘土”という。

(3) 運積性既成粘土の傾斜は一般に小さく、水平に近い状態を呈する。粘土層の層面が比較的是っきりしている場合には water film が存在するが、この成因についてはすでに発表したことがある⁵⁾。その後の考察によって water film には成因、水膜の厚さ、面の平滑度によって差違のあることが判明しているが、運積性既成粘土層に見られるものを“擦過性 water film”と呼称する。この種の water film は主として崩積土中にだけ見られるが、かなり制約された状態のもとで生成される⁶⁾。

図-14 運積性既成粘土の賦存状況

(4) 運積性既成粘土は長期間にわたる間に圧密が完了しており、これのせん断強度定数は表-1 のようになり大きい。またこれらの先行圧密荷重は過圧密状態であることを示す⁷⁾。

一般に層面が漸移的であり、上下層との区別が判然としない運積性既成粘土には water film 面も見られない。このために運積性既成粘土をさかいにすべることは少ないが、water film 面があるところの面を中心に滑動する場合が多い。このような型の地すべりを“再発型地すべり”と定義している。

3. 残積性既成粘土

テストピットにおいて、風化頁岩と擾乱帯の界面付近（すなわち崩積土と風化岩盤との界面付近、写真-2 ではスタッフ 50~60 cm の位置）をくわしく観察すると薄い（厚さ 0.2~0.5 cm）の粘土層を見いだすことができる。この付近の地層を観察した結果を要約するとつぎのようになる。

(1) 風化頁岩の層面はかなり侵食されており、やや顕著な凹凸状を呈すると同時に酸化鉄のために橙褐色に変色している。図-15 はこれらの状態を模式的に示した。

崩積土は風化頁岩の表面を削り、その一部を巻きこむようにして滞積している。薄層粘土は崩積土と風化頁岩との層界面付近に見いだされる。

(2) 頁岩が長時間大気に露出されたり、水浸されたりするとその表面は風化されて軟化する。このような時期

表-6 富士山地区残積性既成粘土の C_{cu} , ϕ_{cu}

採取深度	単位体積重量 (g/cm ³)	含水比 (%)	粘着力 (kg/cm ²)	内部摩擦角
2.10 m	1.708	42.22	0.20	23°40'

図-15 残積性既成粘土の模式図

に風化岩盤の表面に崩積土が流れてくると加水擦過されて、この部分に薄い粘土層ができる。これらの粘土層は崩積土が滞積した後、地下水によって岩石から粘土へ変わったものではなく、また運積によって滞積生成したものではないから、これらを“残積性既成粘土”という。

(3) これらの粘土の存在状態は図-15 のようになっており、風化頁岩面表部に沿って部分的にでき、連続したものは見あたらない。また、きわめて薄いことも特徴である。急傾斜部には生成せず 10° 内外の面を形成する。

不連続であることはもちろんであるが、膨縮は見られず一方に厚いクサビ状を呈しており、薄い方から厚い方へと擦過された条痕がある。粘土層に多数の小礫を含んでいることも一つの特色であるが、この種の既成粘土は風化玄武岩と崩積土との層界面にも見いだされる。

(4) 富士山地区における残積性既成粘土の直接せん断試験結果は表-6 のようであり、強度定数はかなり大きく、これらの数値を使用して安定を計算すると本地区では一応安定を保つことになる。

従来、崩積土と風化岩盤との層界面が粘土化してすべるといわれてきたが、このような面には残積性既成粘土が生成しやすいことにも起因がある。しかし、このような面がすべる場合、その大部分はつぎのような機構になっている。

富士山地区における残積性既成粘土中には water film 面は検出できなかったが、運積性と同じく“擦過性 water film”が形成される可能性はある。この場合自然条件が揃うと滑動を開始するが、water film 面が地下水面下にあり、かつ地表面から浅い所にあれば、この面が滑動することによって加水攪拌され、吸水膨張によって粘土層がだんだんと厚くなり、本格的な地すべり粘土に生長してくる。

このような既成粘土を仮りに“第一次地すべり粘土”と呼称するならば、これが一般に地すべり粘土といわれている“第二次地すべり粘土”に変化する可能性をそなえていることに既成粘土の重要性がある。

3.2 富士山地区の地すべり面形成過程

1. 破壊性 water film 面の形成

テストピット掘削の結果、富士山地区の地すべり面は図-5 に示したように、崩積土の下位にあるとくに風化した頁岩中にあることが判明した。この位置をさきに述べた既成粘土との関係において対比すると表-7 のようになる。ここで破壊性 water film 面というのは写真-2 に示した白線および写真-6 に示したような光沢をもつ平滑面である。このような面が、どのような機構によって形成されるかは重要な問題であるが、現在までに判明していることはつぎのような事項である。

(1) これらの面は磨いた大理石のように全く条痕がなく、面にはわずかな粘土も付着していない。写真-7 に示すごとく鋭利なナイフで切ったように分離する。これらの面を人工的につくるためナイフで切っても条痕がで

きたり、乱れて光沢がなくなったりするために普通の状態では実験室で再現することがむずかしいが、つぎの方法によって現地のものほとんど変化のない面を人工的につくるのが可能である。

崩積土および既成粘土では生成しないが、とくに風化して粘土化した頁岩の非圧密非排水三軸圧縮試験において生成する。この場合、試料は飽和しており、封圧された試料内部に発生する間隙水圧 u と側圧 σ_3 との間には $u \geq \sigma_3$ となる必要がある。

これ以外の試験方法および試料の状態では、一応破壊面はできるが破壊面に粘土をはさむ条痕面が形成される。

以上の方法で室内でつくった面および現地に見られる面は、やや厚い水膜が形成されているのでこれを“破壊性 water film”という。写真-10, 11 は室内でつくった破壊性 water film 面である。

(2) 富士山地区に見られる破壊性 water film はつぎのような過程によって形成されたものと思う。

同じような試料について非圧密非排水の状態直接せん断試験を行なっても破壊性 water film は生成されない。このような事実から推定すると図-16(a)のように、粘土化した風化岩盤が斜方分力によってある面から拘束状態において強制破壊したものでなく、図-16(b)のように横方向の圧力 p_h によって生成した破壊面と思える。この場合、破壊性 water film 面生成の条件として

$$\sigma_3 = \gamma_s h \leq u = \gamma_w h_w \dots \dots (1)$$

が必要であるが、このような状態に置かれるのは、地表面から深さ h にあり、 $\sigma_3 = \gamma_s h$ (γ_s は粘土化した風化頁岩の飽和単位体積重量) なる土かぶり応力を受けている風化岩石上に水深 h_w なる水が覆って $\gamma_w h_w$ (γ_w は水の単位体積重量) なる間隙水圧を発生している場合などが該当するが、この状態は後述するように粘土化した風化岩盤がかなり制限された特殊な条件下になければならぬことを暗示している。

(3) この状態に置かれた粘土化した風化頁岩のせん断

表-7 富士山地区の地すべり面付近の構造

崩 積 土	water film (?) 運 積 性 既 成 粘 土 water film (?) 残 積 性 既 成 粘 土
粘土化した 風化頁岩	破 壊 性 water film 地すべり面 破 壊 性 water film
風 化 頁 岩	鏡 肌 状 す べ り 面

写真-10 富士山地区の試料に生成した破壊性 water film 面

写真-11 富士山地区の試料に生成した破壊性 water film 面(写真-6の面と類似している)

図-16 破壊性 water film 面の生成機構

図-17 破壊性 water film 面の直接せん断試験
強度定数は

$$\left. \begin{aligned} \tau_f &= C_u = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} \\ \phi_u &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

となり、富士山地区の場合は表-8のようにわずかの横圧力 $p_h (= \sigma_1)$ にて破壊し、破壊性 water film 面が生成する。

2. 鏡肌状すべり面の形成

現在のすべり面の下位にある鏡肌状すべり面を含む風化頁岩は表-1に示すように、かなりの力学的強度を保持しているために、この内部にこのような破壊面ができることは、自重による斜方分力のみによって形成されたとは思えない点がある。さきにも述べたように富士山付近は、かなりの地かく変動（しゅう曲作用など）を受けた形跡があり、近在には玄武岩の貫入体なども見られる。この場合、滞積岩は一種の横圧力を受けるが、頁岩が風化によって軟化した時点においては、横圧力によって図-16と全く同じ機構により鏡肌状すべり面を発生する⁹⁾。

(1) 横圧力による破壊は弾性的なものでなく、時間的要素をもって作用する横圧力のために塑性的な破壊をおこす。破壊面がさらに変位によって擦過されると写真-12のように擦過条痕と薄い粘土が生成する。これらは岩石の風化程度によってことなり、風化が進行して含水比が大きいほどはっきりした条痕と粘土ができる⁹⁾。

写真-12 富士山地区に見られる鏡肌状すべり面の条痕と粘土

(2) このような鏡肌状すべり面は、口之津、北松地すべり地区では例外なく見いだすことができる。このために鏡肌面の形状と相まって、これが地すべり面であるような印象を与えるが、これらの面は現在滑動しておらず、地すべり現象とは直接に関係がないことも鏡肌の特徴である。しかし、さきに述べたようにこれらの風化頁岩の非圧密非排水三軸圧縮試験を行なうと、鏡肌状破壊面ができることからみて、この付近の風化岩層がなにかの形で横圧力を受けたことはほぼ間違いないことを示すものである。

(3) 鏡肌状すべり面と地すべりとの関連性は、口之津地区では横圧力との関係になる。すなわち地表面から漸移的に風化した頁岩が横方向の応力を受けて破壊し、上部には破壊性 water film、下部には鏡肌状すべり面を形成し、これらが地中に残存していることに問題がある。

なお富士山地区における鏡肌は、地区全般にわたって形成されているのではなく部分的に存在しており、地域的な横圧力を受けた形跡がある。

3. 地すべり面の形成過程

すでに述べたように富士山地区の地すべり面は、破壊性 water film 面帯の中にあることが判明している。このようなすべり面がいかんして形成されたかを検討してみたい。

(1) 地すべり面はその位置からみて、破壊性 water film 面と関係がある模様である。さきにも述べたように破壊性 water film 面は、わずかな横方向の応力によって生成したもので、これらがそのままの状態で粘土化した風化頁岩中に保存されていたものである。この付近の粘土化した風化頁岩は崩積土の重量によって圧密されたが、表-8に示したように過圧密粘土の特性を現わす。破壊性 water film 面がちょうどせん断面になるよ

表-8 富士山地区破壊性 water film 面付近風化頁岩の物理、力学的性質

単位体積重量	1.740 g/cm ³
含水比	44.9%
乾燥密度	1.200 g/cm ³
土粒子比重	2.618
間隙比	1.184
飽和度	99.2%
液性限界	81.6%
塑性限界	27.87%
塑性指数	53.73%
流動指数	22.1
粘着力 C_u	0.06 kg/cm ²
内部摩擦角 ϕ_u	0
圧縮指数	0.315
先行圧密荷重	0.6 kg/cm ²
土かぶり応力	0.38 kg/cm ²

写真-13 万詰地すべり地区全景

表-9 破壊性 water film 面付近のせん断強度定数と地すべり粘土の強度定数

種 類	粘着力 (kg/cm ²)	内 部 摩擦角	試 験 条 件
粘土化した風化頁岩	0.060	0	VV 三軸圧縮
破壊性 water film	0.059	11°05'	CV 一面せん断
地 す べ り 粘 土	0.215	9°00'	CV 一面せん断

うに圧密非排水による一面せん断試験を行なうと¹⁰⁾、図-17 および表-9 の関係をうる。これからみても地中に残存する water film 面が最弱面ということになる。

(2) このような弱面はせん断抵抗がいちじるしく低いが、不連続であるためにただちに滑動するにはいたらない。図-18 の ab, cd, ef は破壊性 water film を示す。bc, ed 部分が崩積土を含む自重による斜方分力、または地かく変動に起因する徐々な横方向の応力によって集中応力を受けて破壊すると、af なる一連のすべり面へと転化する¹¹⁾。これが地すべり面形成の一過程である。

図-18 破壊性 water film 面のすべり面への転化機構

(3) このような機構によって破壊性 water film がすべり始めると、擾乱作用と加水作用、吸水膨張作用（富士山地区の場合にはすべり面が浅いので、この作用が容易に進行する）によってこの面が地すべり粘土に変わってくる。すなわち写真-6 の面が写真-4 に示す面へと転化する。地すべり粘土ができると、すべり面のせん断抵抗は破壊性 water film 面のそれと比較するとかなり大

きくなる。表-9 はこの状態を示したものである。

(4) 地すべり粘土の生成にともなって、この付近のせん断抵抗が増加するということは、従来の考え方とは違うが、地すべり発生機構は、破壊性 water film 面という“一次地すべり面”が素因として既存し、これに誘因が加わって地すべり粘土をとまなう“二次地すべり面”に変化すると解釈すればよい。

岩石が風化することで地すべり粘土ができ、これが誘因となって地すべりを誘発するのではなく、弱線があり、これが動くことによって地すべり粘土ができるといった考え方が、富士山地区のすべり面の形成過程である。

参 考 文 献

- 4) 松本達郎：日本地方地質誌，九州地方
- 5) 玉田文吾：地すべり地区の斜面崩壊におよぼす water film の影響について，土木学会第24回年次学術講演会講演集
- 6) 玉田文吾：長崎県北松地区における地すべり発生機構の特性（その3），地すべり Vol 7, No 1.
- 7) 玉田文吾：岩層中の地すべり粘土と先行圧密荷重との関係 土木学会第25回年次学術講演会講演集
- 8) 玉田文吾：岩層内に形成される地すべり面の発生機構について，第3回岩の力学国内シンポジウム講演集
- 9), 11) 玉田文吾：第3回岩の力学国内シンポジウム講演集
- 10) 玉田文吾：地表面の移動速度から見た地すべり現象とその解析 第4回土質工学研究発表会