能登半島の地すべり地の土の工学的性質*

Investigation on Engineering Properties of Soil Relevant
to Landslide in Noto Peninsula

沢崎 雅之** 小川 正二***

MASAYUKI SAWAZAKI SHOJI OGAWA

Abstract

In the case of discussing on stability of slopes in landslide areas, investigations and researches from soil engineering point of view are indispensable. However, there are very few reports about those aspects.

In this paper, as a basic study of understanding soil properties at landslide areas in Hokuriku region, the accumulated data obtained at various location in Noto peninsula are analyzed, and physical and mechanical properties and in correlation between soil constants and grain size characteristics of material relevant to landslide are described.

Moreover, comparative studies on soil properties of Noto peninsula, south-western parts of Niigata Prefecture and Tokushima Prefecture are carried out.

1. まえがき

土質工学的見地から地すべり現象を捉えようとする場合、斜面安定などに関係して未解決の問題が多く残されている。例えば斜面安定解析一つにしても自然斜面ゆへの複雑な土質条件から生じてくるすべり面の適確な把握の困難性や、土質強度定数の決定方法など解決されなければならない問題が多く、相対的に土質工学的データの集積やアプローチが少ないのが現状だと思われる。

ここでは全国有数の地すべり多発地帯である北陸地方の地すべり地の土質特性把握の基礎的研究として、主に石川県で過去に行なわれた400余個の地すべり調査結果をもとに、構成土の工学的性質について若干の考察を行った結果を報告する。

能登半島の地すべり分布を大きく分けてと輪島、門前、珠洲を中心とした半島先端の部分と、富山県氷見、石動山から内陸部へ連なる部分とに区別される。地質学的にはその中でも各々特徴があると思われるが、便宜的に前者を先端部、後者を基部として集計を行った。また同時に地すべり面内と地すべり面外の区別をした新潟県南部での調査結果や、結晶片岩を母岩とする徳島県におけるデータとの比較も行った。

2. 地すべり地の土質特性

(1) 物理的性質

まず過去の調査結果に基づき地すべり地の土の比重(G_s), 湿潤密度(γ_t), 乾燥密度(γ_d), 自然間ゲキ比(e_n),

自然含水比(W_n), 飽和度(S_r), の各物理的諸量を先端部, 基部とに分けて集計したものが図-1~6であり, 各々横軸に各物理的諸量, 縦軸に頻度をとってある。これらに塑性限界(PL), 液性限界(LL)を加えて, それらの比較的頻度の多い範囲についてまとめたのが表-1であり, 同時に地すべり面内, 地すべり面外の区別を行った新潟県南部における結果¹⁾も併記してある。

表-1と以前に調査を行った福井県における地すべり地でのデータ²⁾とを加味して判断すると北陸地方の地すべり地を構成している土の比重はほぼ2.6~2.8の間に入ると考えられる。さらに新潟県南部の地すべり地に比べて能登半島の地すべり構成土の方が多少自然間ゲキ比が大きく, 湿潤密度, 乾燥密度が小さい傾向にあり, 能登半島の地すべりも相対的に過去の崩壊土が動いているか, あるいは未凝固の地層の比率が大きいと考えられる。先端部と基部との乾燥密度の差は過去の調査³⁾により指摘されているように既存の崩土内に発生する二次的, 三次的地すべりと, 昭和39年7月の胡桃地すべりに代表される岩盤型地すべりととの相違に起因するものと考えられる。また飽和度が半島先端部に比べて基部の方で, より低い

表 1 石川・新潟における地すべり地の土の物理的諸量

	石川県(能登半島)		新潟県南部	
	先端部	基部	地すべり面内	地すべり面外
G_s	2.6~2.75	2.65~2.8	2.6~2.7	2.6~2.8
γ_t	1.5~2.0	2.5~2.0	1.7~1.9	1.7~2.0
γ_d	1.0~1.5	1.2~1.6	1.3~1.4	1.4~1.5
e_n	0.7~1.7	0.7~1.7	0.7~1.3	0.8~1.0
W_n	15~70	15~60	30~60	20~60
S_r	80~100	65~100	90~100	88~97
PL	20~50	15~30	15~50	15~40
LL	40~100	30~65	60~120	40~120

* 地すべり学会第18回研究発表会(1979. 11. 30, 京都)にて発表

** 福井工業大学

*** 長岡技術科学大学

図-1 比重度数分布

図-2 湿潤密度度数分布

図-3 乾燥密度度数分布

図-4 自然間ゲキ比度数分布

図-5 自然含水比度数分布

図-6 飽和度数分布

範囲に分布しているのは、測定時期などに影響されるのはもちろんであるが、自然含水比、比重の分布にさほど差がないことから、自然間ゲキ比の大小に関係しているものと考えられる。

自然含水比、液性限界、塑性限界の分布範囲は表-1のようになるが、これを自然含水比と液性限界の関係、自然含水比と塑性限界の関係に整理すると図-7のようになり、先端部、基部とも自然含水比は液性限界と塑性限界の中間に位置している。しかし、すでに指摘⁴⁾されているように自然含水比と液性限界、塑性限界との測定粒径を考慮して補正すれば、図-7のプロットは全体的にさらに上方に移動することになり、自然含水比は液性限界に近くなると考えられる。

上記の各物理的諸量は測定時期や測定深度などに影響

図-7 自然含水比～液性限界・塑性限界関係

されんと考えられるが、概略の傾向は以上のとおりである。

次に地すべり地の土を塑性図中にプロットすると図-8のとおりである。新潟県の黒色泥岩地帯における調査結果⁵⁾によると、A線より上部でB線より右側、そして液性限界が50～90(%)、塑性指数が30～60(%)の範囲に点が密集しているが、地域によってかなり差がでていると

図-8 塑性図

いわれている。また駒村⁶⁾によると、第三紀層地すべりの土は、高塑性無機質粘土の領域に分布している。能登半島の場合も相当バラツキは大きくなっているが、先端部構成土はA線より下側にも分布が広がっており CH, OH に属し、基部構成土は主にB線より左側、つまり圧縮性が小さい範囲に分布しており CL, OL に属し、前述の先端部、基部の乾燥密度の相違によく似た相関を示している。

いずれにしても地すべりのように大変形を受ける場所での強度定数として土の残留強度に基づいた土質定数を用いるのが望ましいといわれている⁷⁾が、その残留強度

と先ほどの液性限界、塑性限界にも関係する土の塑性指数との間には相関関係があるといわれている⁸⁾ので、今後それらのことを営めて地すべり地の土のコンシステンシーについてもさらに調査してゆくつもりである。

(2) 力学的性質

図-9は少数ではあるが、能登半島全体における地すべり面の構成地質の頻度分布を示したものである。なおすべり面の決定は、主にパイプヒズミ計を利用して判定された。このように地すべり地の土は自然斜面のため、過去の調査⁴⁾や今回の場合でも地すべり面内土に関しては礫混り粘土などが多く、均一な土層はほとんどみられない。このことは地すべり面外土についても同様であるため、不攪乱

試料の採取が非常に困難であると考えられるが、ここでは力学的性質を知るために一軸圧縮試験より求められた鋭敏比の分布を図-10に示す。同図に示した新潟県南部の地すべり地の土⁴⁾は地すべり面内、地すべり面外ともその大部分が鋭敏比2以下であり、なかでも1以下の部分が相当多いのに対して、能登半島の場合は2～2.5の範囲の頻度が大きく、新潟県南部の地域に比べて相対的に鋭敏比は大きくなっているのが特徴である。この鋭敏比の相違については個々の地質構造や成因なども関係すると考えられるので、地すべり地の土の力学的性質と地質特性との相関性についても今後調査してゆくつもりである。

図-9 地すべり面付近の地質

3. 粒度特性の統計的解析

一般に土質工学においては粒径加積曲線から均等係数、有効径などを計算して粒度特性の特徴を論ずるが、比較する場合は統計的な量で粒度分布の特性を表現するのが便利であり、過去にも地すべり地の土を評価するのに用いられている⁹⁾。すなわち両側無限の正規分布で粒径をφスケールで表示する方法¹⁰⁾であり、

$$d(\phi) = -\log_2 d(\text{mm})$$

を用いて mm で表わされる粒径をφスケールに転換し、横軸に算術目盛りでφスケールの値をとり、縦軸に確率目盛りで加積百分率をとり各々のデータのプロットを行った。先端部、基部についての一例を示すと図-11のようになる。図-11からもわかるように完全に正規分布するならば直線となるが、データのバラツキで折線状になっており、またφスケールの値が正の範囲で大きい程、粒径が小さいことを示している。このように各地点の土について整理を行い、加積百分率16%, 50%, 84%の値を用いて中央粒径、平均粒径、標準偏差の各粒度特性値を次式によって求めた。

$$\text{中央粒径 } M_{d\phi} = \phi_{50}$$

図-10 鋭敏比度数分布

図-11 ϕ スケールで表示される正規確率紙上の加積百分率

$$\text{平均粒径 } M_\phi = \frac{1}{2} (\phi_{84} + \phi_{16})$$

$$\text{標準偏差 } \sigma_\phi = \frac{1}{2} (\phi_{84} - \phi_{16})$$

ここで ϕ_i は加積百分率 i の時の ϕ スケールの読みを示す。なお以下に示すデータは粒度試験結果より 74μ フルイ通過量が50%以上を細粒土、50%未満を粗粒土に分類してある。

(1) $M_\phi \sim \sigma_\phi$ 関係

各粒度特性値を求め先端部、基部に区分して構成土の平均粒径(M_ϕ)と標準偏差(σ_ϕ)の関係を示したのが図-12である。標準偏差についてはRomingerの分類¹¹⁾を付記した。well sorted とはほとんど同じような粒径の粒子からなっていることを意味し、poorになるにしたがって、つまり標準偏差の値が大きくなるにしたがって構成粒子範囲が広いことになる。図中の○印は細粒土、△印は粗粒土、●印は徳島県の結晶片岩を母岩とする地すべり地におけるデータ⁹⁾を各々示す。図

図-12 平均粒径～標準偏差関係

-12より平均粒径の範囲は2~10となり、徳島県地方の地すべり地を構成している土に比べて、先端部、基部ともに相当小さい粒径になっている。また標準偏差は全体にバラツキが大きい、 $\sigma_\phi > 2$ となり特に先端部では $\sigma_\phi > 4$ の割合も大きく、徳島県地方の地すべり構成土と同様分散分級の程度はpoorとなる。これは先ほどの塑性図より粘土あるいは粘性土に分類される土も組成粒径範囲が広いことを示している。また中央粒径と標準偏差の関係も図-12とはほぼ同様の傾向であった。

(2) 粒度特性値と土質定数の関係

i) $M_\phi \sim e_n$, $\sigma_\phi \sim e_n$ 関係

自然間ゲキ比(e_n)と平均粒径(M_ϕ)あるいは標準偏差(σ_ϕ)との関係を先端部、基部に分けてプロットしたのが図-13である。同時に示した徳島県の地すべり構成土の場合、自然間ゲキ比と標準偏差との間にはあまり相関性はみられない結果⁹⁾が報告されているが、ここに示すように自然間ゲキ比の変化は少なく平均粒径との関係も明

図-13 自然間ゲキ比～平均粒径・標準偏差関係

白でない。

能登半島の場合、 $M_\phi \sim e_n$ 関係については M_ϕ の分布範囲が広く値の分散が大きくなっているが、先端部では M_ϕ 値の増加に対して e_n は増加しないし一定の傾向を示し、基部では粗粒土、細粒土にかかわらず M_ϕ 値の増大にともない e_n も増大している傾向を示すとともに、その傾きは徳島に比べ相対的に大きくなっている。一方、 $\sigma_\phi \sim e_n$ 関係については基部の粗粒土で σ_ϕ 値の増大にともなって e_n の増加がみられる以外あまりよい相関性を示していない。

また自然間ゲキ比に関して図-4、表-1からもわかるように北陸地方の地すべり構成土の場合 $e_n \approx 1$ 前後を中心に分布しているのに対し、データ数は少ないながら徳島地方の e_n は 0.5 前後であることから、前者に比べて後者の地すべり構成土塊は相対的に e_n は小さくなっていると考えられる。

ii) $M_\phi \sim PL, LL, I_p$ 関係

塑性限界 (PL)、液性限界 (LL)、塑性指数 (I_p) の各々のコンシステンシー定数と平均粒径 (M_ϕ) との関係を図-14に示す。コンシステンシー定数を対数目盛り、平均粒径を算術目盛りでプロットしたが、このような半対数グラフ上において河口滞積土あるいは湖底滞積土のように分散分級が相当すすんでいるような土¹¹⁾は、両者の相関関係が非常によい結果を示している。しかし地すべり構成土については、値が非常に散らばりよい相関性は認められない。

能登の場合、基部構成土で M_ϕ 値の増大と共にコンシステンシー定数も増加しており、時にその相関性は細粒土より粗粒土の場合がよくなっている。また先端部構成土ではバラツキは大きいものの、細粒土では M_ϕ 値の増大とともにコンシステンシー定数は一定ないし多少増加、粗粒土では減少の傾向にある。一般に、粒径の減少 (M_ϕ 値の増大) と共にコンシステンシー定数は大きくなると考えられるが、先端部構成土の粗粒土のみ逆にコンシステンシー定数は減少する結果になっている。この原因の一つとして、 M_ϕ を算定する際に用いられた粒子の最大粒径が、相当大きい粒径の粒子は除くとしても数 mm の粒径をもつ粒子も加味されているのに対して、コンシステンシー定数を求める場合 420μ 以下の粒径を対象に行われるという測定対象粒径の相違による影響が顕著に表われているためと考えられる。また実験誤差が入っていることも考えられる。

なお、図-14における横軸の M_ϕ を σ_ϕ におきかえてコンシステンシー定数との関係を吟味したが、よい相関性は見い出せなかった。

iii) $M_\phi \sim C$ 関係

図-14 平均粒径～液性限界・塑性限界・塑性指数関係

標準一面せん断試験より求められた粘着力 (C) と平均粒径 (M_ϕ) との関係について先端部、基部のデータをまとめて図-15に示す。ただし C は、明確な地すべり面が確認されていない場合もあり、地すべり面付近の土について求められたものであるが、 M_ϕ 値の増大とともに C の値も大きくなる傾向にあることがわかる。このことは一般に土質工学的にも推測可能であるが、もし C と M_ϕ との間に一定の関係が見い出せるなら、不攪乱試料の採取が非常に困難な地すべり地の土の強度定数を決定する際、粒度特性値から逆に定数を推定する一つの目安になるのではないかと考えられる。

なお、同時に求められた内部摩擦角との間にはあまり、

図-15 平均粒径～粘着力関係

図-16 調査項目別頻度図

明瞭な関係は見い出せなかったが、それらの平均値は約 15° であった。

以上、平均粒径を中心とした粒度特性値と土質定数との相関性について吟味を行ったにすぎないが、徳島地方に比べて能登半島の地すべり構成土は平均粒径が小さく、かつ構成粒子範囲が広いこと、さらに先端部に比べて基部構成土の方が両者の相関性はよくなっていることなどが明らかになった。しかし、今回の調査ではデータ数も少なく個々の関係についての考察も十分ではないので、今後地質工学、土質工学両面からのデータを蓄積して、より合理的な説明ができるようにしていくつもりである。

4. あとがき

以上、過去に実施された蓄積データをもとに統計的処理を行い、地すべり構成土の工学的性質について考察を行った。

ところで、今回の調査資料に基づき調査項目別の頻度分布図を作成したのが図-16であり、そのうち土質試験についての内訳を集計したのが図-17である。図-16より、全調査数に対して土質試験が実施された頻度は約30%、何らかの形で間接水圧が測定されたのが3.4%であり、また図-17より、実施された土質試験の中で力学的試験が物理的試験の約半分しか行われていないことがわかる。さらにこれは、全国規模で調査を行った建設省土木研究所の地すべり実態統計¹²⁾とも一致する結果である。

このように地すべり地における土質試験の実施件数は、はなはだ少ないのが現状だと思われる。しかし、現行の防止対策工事が力学的に斜面の安定性をチェックし、それに基づいて防止対策を講じている以上、当該地すべり地の土の強度定数をはじめとする土質諸定数の決定は必要であり、そのためには土質試験の実施は不可欠であると考えられる。今回の集計結果は特定地域のものであり、さらに目的などにより一概には評価できないことはもち

図-17 土質試験項目別頻度図

ろんであるが、以上のことより、今後の地すべり調査における土質試験の重要性を痛感するしだいである。

最後に調査資料閲覧等で種々の便宜を与えられた石川県治山センターの村本文雄所長はじめ所員の方々に深謝致します。また福井工業大学学内特別研究費の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 相沢光太郎・山岸明：地すべりの土質力学的特性，昭和47年度新潟大学卒業論文（1973）
- 2) 沢崎雅之・長浜友治・小川正二：福井県の地すべり地における土質特性，土木学会，昭和54年度関西支部年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-14-1（1979）
- 3) 市川渡・細野義夫・杉浦精治・中西信弘・中野寿：能登半島における地すべりの基礎的研究，災害の地域的特異性に関する基礎的総合研究報告，pp. 83~89（1966）
- 4) 青山清道・小川正二・神立秀明・福本安正：新潟県の地すべり地における土の性質，地すべり，Vol. 13, No. 2, 通巻第46号，pp. 27~33，地すべり学会誌（1976）
- 5) 中村浩之：黒色泥岩地帯における地すべりの土質工学的特性，地すべり，Vol. 9, No. 2, 通巻第30号，p. 39，地すべり学会誌（1972）
- 6) 駒村富士弥：治山・砂防工学，森北出版，p. 119，（1978）
- 7) 小川正二・青山清道，地すべり地の土の土質試験法の問題点，土と基礎，Vol. 26, No. 6, Ser. No. 244，pp. 51~56，土質工学会誌（1978）
- 8) B. Voight: Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils, Géotechnique, Vol. 23, pp. 265~267（1973）
- 9) 横瀬広司：地すべり地の土の特性について，土と基礎，Vol. 10, No. 6, Ser. No. 54，pp. 3~9，土質工学会誌（1962）
- 10) W. C. Krumbein: Application of logarithmic movements to size frequency distributions of sediments, Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 6, No. 1, pp. 35~47（1936）
- 11) J. F. Rominger: Relationships of plasticity and grain size of Lake Agassiz sediments, Journal of Geology, Vol. 62, No. 6, pp. 537~571（1954）
- 12) 建設省土木研究所地すべり研究室：地すべり実態統計（その3），土木研究所資料第1204号，pp. 30~32（1977）

（原稿受理日 昭和55年5月6日）