善徳地すべりにおける地下侵食と地すべり移動の関係

The Relationship Between Underground Erosion and Landslide Movement in a Crystalline Schist Landslide, Zentoku, Tokushima, Japan.

古 谷 元* 佐 々 恭 二**
Gen FURUYA Kyoji SASSA

福 岡 浩** 日 浦 啓 全***
Hiroshi FUKUOKA Hiromasa HIURA

Abstract

The authors have thought that one of the most effective factors on the movement of a large crystalline schist landslide "Zentoku" in Tokushima Prefecture, Japan is the underground erosion, and have monitored the sediment discharge due to the erosion and subsequent transportation by the ground water at spring point in there. This paper aims to reveal the relationship between underground erosion and landslide movement on the basis of the monitoring results by the apparatus to catch the sediment, the extensometers and the rain gauge.

Due to the results of the preceding monitorings, the sediment discharge is roughly proportional to the precipitation. However, sediment data scatter, which seems due to the factor other than the precipitation. In order to examine the condition of the sediment yield, the authors have induced two parameters, one is the displacement ratio (D/D_{Avn}) to evaluate the degree of landslide movement and the other is the sediment discharge ratio (W/W_p) to evaluate the degree of the sediment discharge affected by the factor other than the precipitation. The relationship between the discharge sediment and the landslide movement, which based on the result of the time dependent analysis of these two parameters, leads to the following conclusions;
(1) Undoubtedly the precipitation is the most effective factor on the sediment discharge. The landslide movement affects the sediment discharge as the subsequent factor, which causes the scattering of data on the sediment discharge versus precipitation diagram.

(2) According to the relationship between the landslide displacement under active period ($D/D_{Avn} > 2$) and the sediment discharge ratio (W/W_p), the sediment discharge at the spring point has two factor groups, first group is under the effect of precipitation and the second is affected by the precipitation and the landslide movement itself. The sediment discharge, which produced one month after the active period of the slide, shows good proportionality to the landslide displacement.

キーワード: 結晶片岩地すべり, 地すべり移動量, 地下侵食, 流出土砂

1. はじめに

結晶片岩地すべりは、日本をはじめとしてヨーロッパ、ニュージーランドなどの大きな地質構造線沿いに数多く分布している。このタイプの地すべりは基岩部に破碎帯が存在し^{1),2)}、岩屑質の崩土¹⁾⁻⁷⁾ですべり面付近は礫や砂の含有量が多い^{8),9)}。移動形態は大雨に起因した大きな動きのみならず、大雨に起因しない緩慢な動きも生じてい

ることが報告されている¹⁰⁾⁻¹³⁾。本研究の対象地である徳島県三好郡西祖谷山村の善徳地すべりもこれらの特徴を有する^{14),15),16)}。この地すべりでは、伸縮計による移動量とボーリング孔の孔内水位の観測結果から、ある孔内水位で浅くは地すべりの移動が急増し、それで深では緩慢な移動があることが明らかにされている¹⁶⁾。

一般に地すべりの移動は、地下水位が上昇してすべり面上の有効応力が減少し、その応力状態が破壊線に達するときに生じると言われている(例えば参考文献 17)。しかし、善徳地すべりでは上述した動きが明らかにされているために、移動の原因は単に地下水位(すべり面上の

* 京都大学大学院

** 京都大学防災研究所

*** 高知大学農学部

間隙水圧)の上昇によるためだけとはいえない。この原因について丸井ら¹⁴⁾, Sassa ら¹⁵⁾は、水平動以上の土層沈下を観測したことや土層内部に複数の水みちが推定されることから、地下水による土層内部の土砂の侵食(地下侵食)が関与していると推察した。その後、Sassa^{17),18)}はすべり面上の応力状態が破壊線に達する場合に生じる動きを“残留強度すべり”,それが破壊線に達しない場合に生じる動きを“クリープ”と称した。Hiura ら¹⁹⁾, 松永ら²⁰⁾は善徳地すべりの斜面上に存在する湧水点において、ある限界水位あるいはある限界降雨量以下で地下侵食されて湧水点から流出した土砂がクリープ的な移動に関連することを示唆した。しかしながら、これらの研究では地すべりの移動量と地下侵食土砂量の対応に関する定量的な考察が十分ではない。

本研究は、善徳地すべりにおける伸縮計の観測結果と湧水点での流出土砂の観測結果を用いて、降雨以外の因子の影響を受けた流出土砂の存在を明らかにし、地下侵食土砂量と結晶片岩地すべりの移動の関係について検討した。

2. 善徳地すべりの概要

善徳地すべり地は図1に示すように四国のほぼ中央部、吉野川の最大右支川の祖谷川の中流部に位置する。Sassa ら¹⁵⁾は善徳地すべり Z6 ブロックと呼ばれる地域

で、1972 年から調査、観測をはじめた。以後、善徳地すべり地 Z6 ブロックを単に“善徳地すべり”と呼ぶことにする。

善徳地すべりは地質的には三波川結晶片岩帯に属し泥質片岩が主体で、斜面は流れ盤構造を呈する²¹⁾。地すべりの範囲は末端が祖谷川(標高約 350 m)に達し、上端は山頂(1032.5 m)を越えると考えられ²²⁾、平均斜面傾斜角は 28°である。徳島県中西部地域において地すべりの発生頻度が高い地形および地質の特徴^{5),22),23)}は、斜面傾斜角が 25~30°で泥質片岩の流れ盤構造を呈する場所であり、善徳地すべりではこれらの条件を充足している。

地すべりの境界は、他の結晶片岩地すべりと同様に地形図の判読だけではその全容を知ることが難しいので、図1に示すように測線の切れ目なく設置した 29 台の長スパン(平均スパン長 50 m)伸縮計の連続観測のほか、三次元せん断変位計²²⁾の観測結果から推定した。移動域は、実線で示したブロック 1、ブロック 2、ブロック 3-1、ブロック 3-2 とこれらよりやや不確かなので点線で示したブロック 3-3 である。図2は図1の結果とボーリングの結果を考慮した伸縮計測線上の縦断方向での地すべりブロックを推定したものである。図中の太線は 20 m 以上の深いすべり面を有するもの、細線は 20 m 未満の浅いすべり面を有するものを示す。これらのブロックは各々が個別に移動する場合もあれば、複数のブロックや全てのブロックが一体となって移動する場合もある。

図2にボーリングの結果の一部を示すが、地すべり斜面の土層状態は岩屑状で岩に割れ目が多く、すべり面付近では他の結晶片岩地すべりと同様^{9),9)}、粘土の他に礫や砂が多く混じり、その周辺では岩の細片化と赤褐色化が進んでいる。赤褐色化した部分は、弾性波受振器を利用した地下水流速測定²⁵⁾から推定した水みちにほぼ一致する。

本研究では地すべりの移動量は図1に示すブロック 1 末端部の B2 点の動きを、地下侵食土砂量は地下侵食観測を行っている 4ヶ所の湧水点のうち、B2 点から南西約 70 m の地点にある湧水点 1 を取り上げた。これらの点を選定した理由は次の通りである。

B2 点は、深いすべり面を持つブロック 1 の末端部に位置しているので、その点での伸縮計観測値はブロック 1 の動きに対応する。また、湧水点 1 もブロック 1 の末端部にあり、ブロック内部ではすべり面周辺で水みちが推定されており、水みち周辺の土砂が侵食されて湧水点から流出すると思われる。

3. 観測方法とその結果

3.1 観測方法

これまで善徳地すべりでは、地すべりの活動によって

図1 善徳地すべり (Z6 ブロック) の平面図
Fig. 1 Plan view of the Zentoku landslide (Z6 block)

図2 伸縮計測線上のブロック断面図
Fig. 2 Block profile of extensometer line in Zentoku landslide

破壊された集水井のせん断面に沿った水みちから地下水とともに流出した土砂の観測が行われていた¹⁸⁾。しかしながら、その後水みちが閉塞したので、筆者らは前述した湧水点から流出する土砂を採取¹⁹⁾するようになった。土砂の採取方法¹⁹⁾は、図3に示すように湧水点に直径10 cmのステンレス製のパイプを水みちに沿って差し込み、パイプから湧水(地下水)とともに流出する土砂を、地表流が流入しないように設置したポリバケツの中に溜めた。流出土砂量は、バケツに溜まった土砂を観測の当初および冬期を除いて約1ヶ月(月末)に1回取り出し、その乾燥重量を測定した。湧水点1では、流出する土砂の最大粒径は10 mm程度で、50%粒径は時期によって若干異なるが0.5~1 mmの範囲である²⁰⁾。なお、土砂を採取した区間(通常約1ヶ月)を土砂採取区間と呼ぶことにし、解析の単位に用いる。

善徳地すべりでは測線内に不動点が存在しないので、B2点の移動量は、各伸縮計測点からB2点に最も近いS14測点(B2点の約20 m上方に設置)までの1週間毎の伸縮計の観測値を累積し、それらのうちで最大になる測点の値を採用した。S14測点までの累積値が最大になる測点は、全観測期間を通じて同一ではないが、大半の場合はブロック3-3末端部(S29測点)であった。降雨量の観測は、図1の△で示した斜面中腹部の標高700 m付近に転倒マス型の雨量計を設置して行った。

図3 流出土砂の採取方法
Fig. 3 System for catching discharge sediment

3.2 観測結果

伸縮計、雨量計の観測は観測開始当初(1972年)から定期的に行われているが、湧水点1における流出土砂量の定期観測は1985年4月からである。そこで、解析には、図4(a: 流出土砂量, b: B2点の移動量, c: 降雨量)に示すように1985年4月から1994年12月までの観測結果を用いた。図中の横軸は観測年で、(a)と(c)の1目盛りは1土砂採取区間(通常時は約1ヶ月が28~34日)を、(b)は1ヶ月(28~35日)を表す。また図中の棒グラフは各土砂採取区間(月)毎の結果を、折れ線グラフは

それを85年4月から累積した土砂量を表す。なお、(a)と(c)では1土砂採取区間が2ヶ月以上にわたる場合は土砂を採取した月に観測結果を載せている。なお、86年1~3月、87年8~9月の流出土砂量の観測値は不明である。

湧水点1では、流出土砂量は(a)の折れ線グラフの結果から10年間で約150 kg、94年を除いて1年間に5~10数 kgの土砂が流出し、棒グラフから各年の流出土砂量のピークは夏から秋にかけてである。94年は他の観測年に比べて流出土砂量が少ない(約2.5 kg)。この理由は後述するが、94年は記録的な渇水年で、夏の少雨の影響によって善徳地すべりの上部斜面の地下水位が低下して湧水が涸れたためである。B2点の移動は(b)の棒グラフからB2点は年間を通じて見られ、特に夏から秋にかけて大きい。また、折れ線グラフから10年間のB2点の移動量は約540 mmである。しかしながら、この間における累積移動量の傾向は図中の三つの期間、すなわち①(85年4月~86年3月)、②(86年4月~90年3月)、③(90年4月~94年12月)の順に順次減少する傾向を示している(図中の直線は各期間における平均移動量を累積したものである)。これは、1984年以降、随所で行われている集水井や杭打工などの地すべり対策工の効果が現れてきたためと考えられる。降雨量は(c)の折れ線グラフから94年を除いて毎年平均約2000 mm程度であり、94年は夏の少雨の影響で約1300 mmしかなかった。また棒グラフから、一年のうちに降雨量の多い時期は、梅雨や台風通過時の集中豪雨が生じる夏から秋で、1土砂採取区間で500 mm以上の降雨量が観測されるときもある。

ところで、流出土砂量(a)と降雨量(c)の結果を比較すると、夏から秋にかけて降雨量が多くなるときに流出土砂量も多くなる傾向があるものの、89年8月と9月のようにほぼ同じ流出土砂量が観測されているのに対して降雨量が異なる場合や、93年10月と11月のようにほぼ同じ降雨量が観測されているのに対して流出土砂量が異なる場合が認められる。土砂採取区間の降雨量と流出土砂量を両対数軸上で整理した結果が図5である。図中の矢印は、上述の89年8月と9月、93年10月と11月の結果を示している。図から、流出土砂量と降雨量の分布はばらつきながらもおよそ図中の直線で囲まれた範囲内に入るような正の相関がある。この結果からは土砂の流出に主に降雨が関係していることは言うまでもないが、それ以外の因子も関係していることを示唆していると思われる。図中のばらつきはこれに起因していると思われるが、降雨以外の因子としては以下の地すべりの移動による影響が考えられた。

1) 地すべりの移動による粒子破碎

Fukuoka²⁶⁾は善徳地すべりの試料に対して3種類の垂直応力条件(低圧($\sigma=0.1 \text{ kgf/cm}^2$), 中圧($\sigma=1.0$

図4 1985年から1994年の観測結果
Fig. 4 Observation results from 1985 to 1994

図5 土砂採取区間の降雨量と流出土砂量の関係
Fig. 5 Relation between sediment discharge and precipitation of each period

kgf/cm²), 高圧 ($\sigma = 3.0$ kgf/cm²) 下でリングせん断試験を行ったところ, 高圧条件になるほど, そしてせん断が進むにつれて試料の破砕が進むことを指摘した。善徳地すべりの深いすべり面を持つブロックでは, すべり面上の応力状態は Fukuoka の試験の高圧条件よりも高く, 地すべりの移動によってすべり面周辺の岩や礫が破砕されやすいと考えられる。そのために, すべり面付近の粘土の部分は不透水層になり, その周辺の細片化した部分が透水層 (水みち) となって, その層で土砂が侵食, 運搬されると考えられる。

2) 地下侵食による土層の不安定化

小野寺²⁷⁾, 新藤²⁸⁾, 寺嶋²⁹⁾, Onda³⁰⁾ は, 水みちに地下水が集中して土砂を侵食し, それを繰り返すことによって谷頭部斜面の地形変化 (陥没地形や小崩壊) を進行させることを指摘した。これは, 地下侵食によって土砂が流出して土層の不安定化を引き起こすと考えられる。善徳地すべりでは, 水平動を卓越するような土層沈下や土層沈下のみによる動き^{15), 31)}, そして大きな移動の他に年間を通じての緩慢な動き¹⁰⁾ が観測されている。このような移動は土層内部の水みちに地下水が集中し, 水みち周辺の土砂が侵食されて土層構造が不安定になり支持力が減少して生じると考えられる。

4. 流出土砂量と地すべり移動量の関係

4.1 地すべり移動量比と流出土砂量比

地すべりの移動と地下侵食土砂量の関係を調べる際には, 観測期間内の対策工の影響を考慮した活動の度合いを評価することが必要となる。この度合いは以下のようにして算出した。土砂の採取日と伸縮計の観測日は一致しておらず土砂採取区間の日数も一定ではないので, 土砂採取日前後の伸縮計の移動量は直線的に変化するとし, その間での移動量を比例配分して土砂採取の開始日から順に土砂採取区間毎の移動量を計算し, さらにその区間における 30 日あたりの移動量を求めた (D とする)。そして, 図 4 (b) の①から③のそれぞれの期間で土砂採取区間の 30 日あたりの平均移動量 (D_{AVn} で表す: n はそれぞれ期間①, ②, ③を表す) を求め, 各区間の 30 日あたりの移動量 D を D_{AVn} で割って地すべり移動量比 (D/D_{AVn}) と称する無次元量を導入した。

図 6 は地すべり移動量比 (D/D_{AVn}) の経時変化を示したものである。この図において, 地すべり移動量比が 1 の場合は地すべりの活動が平均的な状態であり, 1 より大きい場合は活動が活発な状態であり, 1 より小さい場合は活動が平穏な状態であることを意味する。図から夏から秋にかけては, 非常に活発な活動をする場合 (85 年 7 月, 87 年 8 月など) や活発な活動がしばらく続く場合 (90 年 9~11 月) がある。一方, 冬から春にかけては活動

図 6 D/D_{AVn} の経時変化

Fig. 6 Time series change of D/D_{AVn}

が活発ではなく, 93 年のように梅雨の時期まで続く場合がある。

図 5 において流出した土砂に降雨以外の因子の影響も含まれると思われるので, 次に流出土砂中にそれが含まれる度合いを算定した。この算定には, まず図 6 の 86 年 12 月~87 年 7 月のように, 地すべりの活発な活動が生じた後からその次の活発な活動が生じるまでの不活発な ($D/D_{AVn} < 1$) 土砂採取区間に注目した。そして, その土砂採取区間で活発な活動直後からの場合 (86 年 12 月~87 年 7 月), 活発な活動から 1 以上の土砂採取区間 (1ヶ月以上) 経過した場合 (例えば, 1ヶ月経過後では 87 年 1 月~87 年 7 月) のそれぞれについて, 30 日あたりの降雨量と流出土砂量の対数値を方眼上にプロットした。このうち, 活発な活動直後からの場合 (A), 活発な活動から 3ヶ月以上経過した場合 (B), そして活発な活動から 4ヶ月以上経過した場合 (C) の結果を図 7 に示す。図中の P は 30 日あたりの土砂採取区間の降雨量 (mm), W は土砂採取区間における 30 日あたりの流出土砂量 (g), r は相関係数を表す。図から, 活発な活動から時間が経過するほど相関が良くなっており, このことより活発な活動後に湧水点から流出する土砂は, しばらくの間は降雨以外の因子の影響 (後で議論する) を受け, 時間が経つにつれてその影響が減少している。特に, C の場合は非常によい相関関係 ($r = 0.96$) を示すが, これは流出土砂のほとんどが降雨に依存したものと考えられる。そこで, 降雨に依存した場合の 30 日あたりの流出土砂量の推定式を以下のように回帰した:

$$W_P = 10^{-1.69} \times P^{2.08}$$

ここに, W_P : 土砂採取区間における 30 日あたりの降雨依存の流出土砂量

P : 土砂採取区間における 30 日あたりの降雨量

流出土砂のうちで降雨以外の因子の影響も受けた土砂の度合いは, 土砂採取区間の 30 日あたりの流出土砂量 (W) を, 土砂採取区間における 30 日あたりの降雨依存

図7 地すべりの活動が不活発なときの降雨量と流出土砂量の関係

Fig. 7 Relation between sediment discharge and precipitation of each period
 (The period of inactive landslide movement)

図8 W/W_p の経時変化

Fig. 8 Time series change of W/W_p

の流出土砂量 (W_p) で割れば得られる (W/W_p : 流出土砂量比と呼ぶ)。

図8は各土砂採取区間毎に流出土砂量比を求め、その経時変化を表したものである。この図において、流出土砂量比が1である土砂採取区間は、その時に採取された土砂が降雨に依存し、流出土砂量比が1より大きい土砂採取区間は、その時に採取された土砂が降雨以外の因子の影響を含むことを意味する。流出土砂量比が1より小さい土砂採取区間は、何らかの原因で降雨量に対応した土砂量が流出しなかったと考えられる。その原因のひとつは、土層内部で水みちが地下侵食された土砂によって一時的

に閉塞されて地下水の流路が変わり、他の水みちへ土砂が流れるような場合であり、降雨量に対応しないボーリング孔内水位が観測されている¹⁴⁾ ことから想像できる。もうひとつは地下水によって運搬される土砂が少なかったためであると考えられる。ところで、図8では秋以降は流出土砂量比がピークを持ち、夏は秋以降に比べて流出土砂量比が小さい傾向が見られる。これは、夏に流出する土砂は降雨の影響が強く、秋以降に流出する土砂は降雨以外の因子の影響が強いことを示唆している。また、92年以降は流出土砂量比の値が91年以前と比べて小さくなっている。この理由として、92年は地すべりの斜面中腹部の広範囲にわたる大きな土層沈下¹⁶⁾ (三次元せん断変位計の観測によると、水平方向が約50 mmに対し鉛直方向が最大で約180 mmの沈下を示した) による土層内部の水みちの変化の可能性が考えられる。93年は観測開始から最大の年間降雨量(2,831 mm)を記録したために他の年に比べて流出した土砂への降雨の影響が強かったり、94年は記録的な少雨の影響で土砂が流出しなかったなどが考えられる。

4.2 地すべりの移動量と流出土砂量比の関係

前節では流出土砂には降雨の影響の他に降雨以外の因子も影響し、その影響がしばらく続くことを指摘した。そこで、この因子が移動に関連するかどうかを地すべり移動量比 (D/D_{Avn}) が2より大きい(活発な活動が生じた)時の移動量と活発な活動直後から翌々月の間で1ヶ月(1土砂採取区間)毎に流出土砂量比を比較した。その例を図9(91年および92年)に示す。なお、冬期などで土砂を2ヶ月以上溜めた時は、その間での流出土砂量比は同じであるとした。そして、90年9~11月は9月後半に台風が通過してその後約2ヶ月ほど活発な移動が続いたので、これらの区間の移動量を合算して90年11月、12月、91年1月の流出土砂量比と比較した。

図10は活発な活動が生じた($D/D_{Avn} > 2$ とした)土砂採取区間の移動量と流出土砂量比を比較した結果である。図中の横軸は30日あたりの移動量で対数表示をしたもの、縦軸は流出土砂量比 (W/W_p) である。図中の(a)は活発な活動時の流出土砂量比と比較した場合を、(b)は活発な活動時の翌月(1土砂採取区間後)の流出土砂量比と比較した場合を、(c)は活発な活動時の翌々月(2土砂採取区間後)の流出土砂量比と比較した場合を表している。これらの図において、プロットは移動量が増加するとともに流出土砂量比も増加するグループA(降雨の他に移動も起因した土砂が流出する場合)と移動量が増加しても流出土砂量比が増加しないグループB(降雨に起因した土砂が流出する場合)に分けられる。また、(a)と(c)では、グループAよりもグループBの方がプロット数が多いが、(b)ではグループAのプロット数がグループB

のプロット数よりも多い。各々の場合における移動量と流出土砂量比の関係を検討すると、(a)では多量の降雨に関連して大きな移動が生じる¹⁶⁾が、降雨の影響が強いためにグループ B のプロット数が多くなると考えられる。(b)では大きな移動から 1ヶ月 (1 土砂採取区間) 経つと多量の降雨に起因した土砂の流出が減少することによって移動の影響を受けた土砂の割合が多くなり、グループ A のプロット数が増加するのに対してグループ B のプロット数は減少する。したがって、地すべりの移動量と

移動も起因した流出土砂量比の関係が明確になると考えられる。(c)では図 7 でも指摘したように、大きな移動から時間が経過するにつれて移動の影響を受けた土砂の流出が減少し、降雨のみの影響を受けた土砂の割合が多くなる。そのために(b)に比べてグループ A のプロット数が減少し、グループ B のプロット数が増加すると考えられる。

これまでの考察から、湧水点から流出する地すべり移動に関連した土砂の流出の機構について総括すると以下のようになる。地すべりの活発な活動によって土層構造が変化し、土層内部で不安定な部分や細粒部が形成されて土砂が運搬されやすい状態になる。Fukuoka の実験結果²⁶⁾でもせん断が進むほど粒子破碎が進むことから、地すべりの活動が活発なほど土層構造の変化が進み、土砂が侵食、運搬されやすい土砂も多くなる。また、すべり面付近の岩や礫が破碎された部分では水みちが推定されるので、降雨の他に地すべりの移動も起因した土砂が、降雨に起因した土砂とともに地下侵食、運搬されて湧水点から流出する。

5. 結論

本研究では、四国の結晶片岩地すべりのひとつである善徳地すべりにおいて、地下侵食されて湧水点から流出した土砂量の観測、伸縮計の観測そして降雨量の観測結果を用いて、地すべり移動の程度を表すパラメータ：地すべり移動量比と降雨以外の因子によって流出した土砂程度を表すパラメータ：流出土砂量比を求め、地すべりの移動と地下侵食の関係について検討した。得られた結論は以下の通りである。

1) 降雨量と流出土砂量の関係から、流出土砂量と降

図 9 移動量と W/W_p の比較の例 (1990 年, 1991 年)
Fig. 9 Example of compare landslide movement with W/W_p (1990 and 1991)

図 10 移動量と W/W_p の関係 ($D/D_{Avn} > 2$)
Fig.10 Relation between landslide movement and W/W_p ($D/D_{Avn} > 2$)

雨量は全般に正の相関があるもののばらつきが生じる。その原因としては、湧水点から流出する土砂は降雨の他に地すべりの移動の影響によるものが含まれていることが考えられる。

2) 活発な活動時の移動量と流出土砂量比の関係から、湧水点から流出する土砂は降雨のみに起因したものと降雨の他に移動も起因したものがある。特に、活発な活動時の翌月では、その時の移動量と降雨の他に移動も起因した土砂が流出していることがもっとも明確に示される。この関係から、湧水点における地すべりの移動に関連した土砂の流出の機構は、活発な地すべりの移動(活動)によって土層構造が変化して土層内部の土砂が侵食、運搬されやすい状態になる。そして、降雨の他に移動も起因した土砂が地下侵食されて運搬されると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、建設省四国地方建設局吉野川砂防工事事務所の方々に多大なご協力をいただきました。また、向井金一郎、向井道文両氏には、長年にわたり現地でのデータ取得、観測計器の維持管理のお世話になりました。紙面をかりて謝意を表します。

参 考 文 献

- Gillon, M. D., Hancox, G. T. : Cromwell Gorge landslides -A general overview, Proc. of the sixth international symposium on landslides, pp. 83-102, 1992.
- 科学技術庁研究調整局: 結晶片岩地すべり発生機構に関する総合研究報告書, pp. 75-121, 1978.
- 安藤 武・大久保太治: 徳島県西部結晶片岩地域の地すべり-結晶片岩型地すべりについて-, 地質調査月報, Vol. 21, No. 7, pp. 1-42, 1970.
- 斎藤 実・横瀬広司: 徳島県祖谷川流域のいわゆる破砕帯地すべりについて, 岩井淳一教授記念論文集, pp. 627-633, 1972.
- 藤田 崇・安藤 昇・田中光治・袴田直重: 徳島県西部の結晶片岩地域の地すべりの研究, 応用地質, 第14巻, 第1, 2号, pp. 65-69, 1973.
- 甲藤次郎・波田重熙: 吉野川水系の地すべりの地質学的背景, 高知大学学術研究報告, Vol. 28, 自然科学, pp. 127-140, 1980.
- 寺戸恒夫: 四国島における大規模崩壊地形の分布と地域特性, 地質学論集, 第28号, pp. 221-232, 1986.
- 科学技術庁研究調整局: 結晶片岩地すべり発生機構に関する総合研究報告書, pp. 23-71, 1978.
- 天田高白・上村三郎・小宮利彦: 地すべり地における土質の特性について-特に新瀉・四国・箱根を例として-, 第23回地すべり学会研究発表会予稿集, pp. 194-197, 1984.
- Bonnard, C. : Determination of slow landslide activity by multidisciplinary measurement techniques, International symposium on Field Measurements in Geomechanics Zurich, pp. 619-638, 1983.
- Kronfellner-Kraus, G. : Neue Untersuchungsergebnisse in Wildbachen-Der Talzuschub in Abhängigkeit von Niederschlagen, Proc. INTERPRAEVENT 1980, Vol. 1, pp. 179-192, 1980.
- Baumer, A. : Three rock slides in the southern Swiss Alps, LANDSLIDES GLISSEMENTS DE TER-
- RAIN, Vol. 2, Proc. of the fifth international symposium on landslides, pp. 1307-1311, 1988.
- 岡 孝儀: 大野地すべりについて, 地すべり研究, No. 34, 全国地すべりがけ崩れ対策協議会, pp. 247-322, 1990.
- 丸井英明・佐々恭二・阪田大蔵・武居有恒: 結晶片岩地すべりの移動機構の研究-特に地下水流と移動の関係について-, 京都大学農学部演習林報告, No. 48, pp. 149-159, 1976.
- Sassa, K., Takei, A., Kobashi, S. : The Movement and the Mechanism of a Crystalline Schist landslide "Zentoku" in Japan, Proc. INTERPRAEVENT 1980, Vol. 1, pp. 85-106, 1980.
- Sassa, K. : Monitoring of a Crystalline Schist Landslide-Compressive Creep affected by "Underground Erosion"-, Proc. International Symposium on Landslides, Toronto, Vol. 2, pp. 179-184, 1984.
- Sassa, K. : Geotechnical classification of landslides, Proc. IV th International Workshop on Landslides, pp. 31-40, 1985.
- Sassa, K. : Geotechnical classification of landslides, International Newsletter "Landslide News" No. 3, pp. 21-24, 1989.
- Hiura, H., Sassa, K., Fukuoka, H. : On the mechanism of a crystalline schist landslide-Landslide movement and the underground erosion-, The Soviet-China-Japan Symp. and Field Workshop on Natural Disasters, pp. 21-30, 1991.
- 松永 誠・日浦啓全・佐々恭二: 善徳地すべりの移動観測結果-地下侵食土砂量の推移について-, 高知大学農学部演習林報告, No. 20, pp. 21-31, 1993.
- 守随治雄: 善徳地すべりの地形・地質とすべり面について, 結晶片岩地すべりの調査と対策-善徳地すべりを対象として-, 地すべり学会関西支部, pp. 35-97, 1994.
- 福岡 浩・佐々恭二・日浦啓全・古谷 元: 善徳地すべりZ6ブロックの移動観測, 地すべり学会関西支部現地討論会論文集, pp. 113-140, 1994.
- 藤田 崇・平野昌繁・波田重熙: 徳島県川井近傍の地すべりの地質構造規則, 地すべり, Vol. 13, No. 1, pp. 25-36, 1976.
- 古谷尊彦: 破砕帯地すべりの予察的研究, 地すべり, Vol. 2, No. 2, pp. 21-31, 1967.
- 佐々恭二・阪田大蔵: 弾性波受振器を用いた岩盤内の地下水流の測定, 第5回岩の力学国内シンポジウム, pp. 13-18, 1977.
- Fukuoka, H. : Variation of the friction angle of granular materials in the high-speed high-stress ring shear apparatus-Influence of re-orientation, alignment and crushing of grains during shear-, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol. 41, Part 4, pp. 243-279, 1991.
- 小野寺真一: 丘陵地斜面における地中水の流出プロセスとその水文地形特性について, 地形, Vol. 11, No. 4, pp. 369-385, 1990.
- 新藤静夫・小谷野多美枝: バイブ流とそれに伴う地下侵食に関する観測, 小起伏山地源流域の水文地形区分とその水循環制御機構の定量化に関する研究(研究課題番号01460266), 平成3年度科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書, pp. 117-139, 1992.
- 寺嶋智巳・佐倉保夫: 花崗岩山地谷頭部の地形変化に及ぼす斜面浸透水流の作用, 地形, Vol. 14, No. 4, pp. 365-384, 1993.
- Onda, Y. : Seepage erosion and its implication to the formation of amphitheatre valley heads : a case study at Obara, Japan, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 19, pp. 165-178, 1994.
- 佐々恭二: 結晶片岩地すべりの運動とそのメカニズム, 地すべり学会関西支部現地討論会論文集, pp. 1-26, 1994.

(原稿受理日 平成8年12月8日)

含水比による剪断層構造の変化および剪断層の透水性

「地すべり」Vol. 34, No. 2 (通巻第 130 号) pp. 1~8, 1997 年 (平成 9 年) 9 月

岸本良次郎

1. 火山灰土の最適含水比 $W_{opt}\%$ と $W_{opt}-10\%$, $W_{opt}+10\%$ の試料を用いて一面剪断試験により剪断層を作り、その側面の構造を写真により観察した。前 2 者では固体的性格で、あと 1 者では流体的性格の構造であった。
2. 火山灰土、カオリナイトに対する一面剪断試験により、突固め、垂直圧力載荷、剪断破壊時、クリープ (変位 15 mm) の諸段階の剪断層で作り、その透水係数を測定した。剪断層が形成されると、その方向の透水係数は、層と直角方向の透水係数より約 1 桁大きくなった。

善徳地すべりにおける地下浸食と地すべり移動の関係

「地すべり」Vol. 34, No. 2 (通巻第 130 号) pp. 9~16, 1997 年 (平成 9 年) 9 月

古谷 元, 佐々恭二, 福岡 浩, 日浦啓全

本研究は、結晶片岩地すべりの移動の原因のひとつに地下浸食が大きな因子として働いているという考えのもと、徳島県三好郡西祖谷山村にある善徳地すべり地の湧水点で地下浸食されて流出する土砂の観測を行い、地下浸食と地すべりの移動の関係について検討した。その結果、湧水点から降雨の他に地すべりの移動の影響も受けた土砂が流出しており、地すべりの移動が降雨量と流出土砂量の関係をばらつかせる原因であることが明らかになった。

北淡町轟木地区における斜面変動観測の解析

「地すべり」Vol. 34, No. 2 (通巻第 130 号) pp. 17~24, 1997 年 (平成 9 年) 9 月

新井場公德, 末峯 章, 坂本 哲

北淡町轟木地区の風化花崗閃緑岩斜面における連続伸縮計観測の結果を解析し、観測された斜面変動は降雨に対する反応性と移動様式の異なる 2 つの土塊移動機構からなることが明らかになった。簡易貫入試験の結果もその結果と調和的であった。

Geochemistry of Groundwaters in the Utsunomata Landslide Area, Maki Village, Higashikubiki District, Niigata Prefecture

「地すべり」Vol. 34, No. 2 (通巻第 130 号) pp. 25~34, 1997 年 (平成 9 年) 9 月

XU Huilong, Yasue ŌKI, Osamu SATO and Hideki WATANABE

宇津保地すべり地帯は新潟県南西部に位置する。地すべり地帯地下水の水温・水質調査を実施したところ、水温・水質異常地帯は伏在活断層の存在を強く支持している。塩素イオン濃度の高い地下水は活断層にそって分布していることが確認された。活動的な地すべり地域においての地下水の主要成分濃度は高い値を示している。活動している地すべり地域では地下水は高濃度の Na-Cl-HCO_3 型、 $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$ 型と Na-SO_4 型が主なものである。安定あるいは準安定な地すべり地域では地下水は低濃度の Ca-HCO_3 型、 Na-HCO_3 型と Ca-SO_4 型で特徴づけられている。

Spencer の一般分割法についての考察

「地すべり」Vol. 34, No. 2 (通巻第 130 号) pp. 35~41, 1997 年 (平成 9 年) 9 月

古谷 保

斜面安定解析法のひとつに、1973 年に発表された Spencer の一般分割法がある。1973 年の Spencer 法のモーメント平衡式について考察を行い、この式がすべり面の始点を中心として不静定内力のモーメントを積算したものであることを示した。また、1967 年及び 1973 年の Spencer 法と比較して、より一般的なモーメント平衡式を提案し、その力学的意味と式の特性、プログラミング上の優劣等について論じた。

道路建設に伴う四国の中央構造線沿いの地すべりの特性

「地すべり」Vol. 34, No. 2 (通巻第 130 号) pp. 42~49, 1997 年 (平成 9 年) 9 月

矢田部 龍一, 八木則男, 佐藤修治, 長谷川修一

本報告は四国の中央構造線に沿った道路建設に伴い発生した地すべり地の特性について検討を行ったものである。その結果、地すべりは大半が切土に伴う崩積土のすべりであり、規模は比較的小規模なものが多く、また、中央構造線の断層破砕帯の地すべり地の粘性土のせん断抵抗角は小さく、難工事となりやすいことがわかった。

台湾、中部横貫公路地すべり土の残留および回復強度特性

「地すべり」Vol. 34, No. 2 (通巻第 130 号) pp. 50~56, 1997 年 (平成 9 年) 9 月

宜保清一, 陳 信雄, 江頭和彦, 林 義隆, 周 亜明

本論文は、大規模な再活動型地すべりである台湾の中部横貫公路地すべり土の大変位せん断挙動、残留強度、および回復強度について検討したものである。地すべり域の地質は主として新第三紀中新世端芳層群の頁岩からなる。試料は、粘土含量が低く、低塑性であり、石英を主として、雲母、緑泥石、長石を含有する。強度測定は、420 μm フルイ通過スラリー試料について、リングせん断試験機を用い、所定の垂直応力 ($\sigma_v=50\sim300\text{ kPa}$) の下で正規圧密せん断を行った。排水条件下で、まず完全軟化強度を測定し、700 mm 程度の大変位を与えて残留強度を測定した。残留強度測定後は供試体を再圧密し、再びせん断して強度の回復特性を調べた。

完全軟化強度定数は $C_{sf}=4.6\text{ kPa}$, $\phi_{sf}=35.3^\circ$ であった。残留強度定数は、強度包絡線が湾曲化傾向を示したので、有効垂直応力レベル別に $C_r=0$ として ϕ_r を求めた。 $\sigma'_v=50\sim150\text{ kPa}$ に対して $\phi_{r1}=31.2^\circ$, $\sigma'_v=200\sim300\text{ kPa}$ に対して $\phi_{r2}=25.4^\circ$ となった。再圧密による強度の回復については、 $\sigma'_v=200\sim300\text{ kPa}$ では回復が認められなかったのに対して、 $\sigma'_v=50\sim150\text{ kPa}$ においては垂直応力が小さいほど回復が顕著であり、強度の回復率は増大したが、その強度は完全軟化強度のレベルに至らなかった。これらの結果は、再活動型地すべりの再発生機構を解明する上で重要である。

土の中距離剪断試験試作機の構造と性能の概要

「地すべり」Vol. 34, No. 2 (通巻第 130 号) pp. 57~61, 1997 年 (平成 9 年) 9 月

岸本良次郎, 吉田 純

クリープ領域における剪断層の構造を調べるため、剪断箱の長さ約 60 cm、与え得る剪断変位 0~60 cm の一面剪断試験機を試作した (中距離剪断試験機と仮称する)。この試験機の性能試験を行なった結果、実際に種々の変位を経たクリープを作り得、また試料中の長さ方向の変形はほぼ均等であった。これにより試作の目的を達成した。