山腹崩壊の発生・消滅よりみた崩壊地特性の解析

緒 方 正 虔*

Quantitative Analysis of Landslides in Respect to Terrestrial Features

By Seiken Ogata

Abstract

As the movement of failed detritus of land slump in the steeper mountain slope is more rapid than in the gentle one, land slumps have distinguished between landslides and landcreeps. Analysis of terrestrial properties in respect to landslides is made in this paper.

A process of landsliding begins with the grow out of failure, develops with expansion of failed area and ceases with diminution of unstable portion and recovering of the vegetation. In a certain terrain, it contains some landslides of various age in the sequence of a process and numbers of landslides $n(t)$ successively changes as following function

$$n(t) = \frac{\bar{U}}{\bar{K}} + \left(n_0 - \frac{\bar{U}}{\bar{K}} \right) \exp \{ -\bar{K}t \}$$

where $\bar{U}$ is a increment numbers of landslides a year and $\bar{K}$ is a decrement ratio of landslides a year.

The ultimate numbes of landslides in a certain terrain leads to $\bar{U}/\bar{K}$, as equilibrium numbers which is defined in this paper.

The average length of the landslide life τ is given, using $\bar{K}$, as follows

$$\tau = 0.693 \cdot 1/\bar{K}$$

Terrestrial features involving stability against landsliding and volume estimation of failed detritus can be evaluated using $\bar{U}$, $\bar{K}$ and τ , for they are constant in a certain terrain which depend on multiple factors of geological, topographical and climatic conditions.

The variation of constant concerning different geological factors in two terrains in which granite and volcanic rocks underlain, is discussed.

1. ま え が き

山岳地域の道路、鉄道、ダム、発電所あるいは送電鉄塔などのある山腹斜面の崩壊により施設に被害を受けることは高場山トンネル、ヴァイオント貯水池などの例をみても明らかであり、また、近年居住地域が丘陵地に拡大しつつあるため丘陵斜面の崩壊による直接の災害が増加している。このように、山腹の崩壊は山腹が示す諸現象の一つであって、山腹の有する特性としてとらえ、これに対処する方策をたてることが必要と考えられる。

山腹の崩壊に対する対策は各関係部門で検討されてい

るようであり、電力各社でも既設の電力施設ばかりでなく、新しい計画地点についても崩壊に対する防護対策のみならず、原因究明による積極的対策を推し進めようとしている。崩壊の研究の動きには、例えば集中豪雨とか地震動といった誘因と崩壊との相関性、あるいは、地形、地質、植生などの素因との相関性を解明し、これらの諸要因を組合せて総合解析を行なう方向（1～7 など）と、崩壊の機構（8～9 など）と山腹斜面の平衡条件の解析を進める方向とに大別されよう。

各地で崩壊による災害が多発している最近の実状から、このような勢で次々と発生するとそのうち全国の山腹が崩壊地で占められるのではないと思われる程である。しかし、一方では崩壊地は元の山腹に回復している

* 電力中央研究所 技術第二研究所

という山腹のもう一つの特性がある。そこでここでは回復という特性を加味した崩壊現象に対する解析および、これらの特性と地質構造的条件の対応性に関する考察を行なうことにする。なお、この報文のうち崩壊現象の解析理論は電力中央研究所技術第二研究所報告⁽¹⁰⁾で発表したものが骨子となっている。

2. 崩壊地の時間的個数変化

山腹斜面がある原因によって平衡を失い下方に移動する現象は一般に山崩れと呼ばれており、この中には土石の移動が急激に開始し、移動速度が比較的速く、かつ一回の移動継続時間の短いものから、移動が徐々におこり、その速度は緩慢で継続的なものが含まれており、とくに後者は山崩れから分けて地すべりと呼ばれている。ここでとり扱う崩壊は地すべりを除いた山崩れを指すことにする。

地すべりは第三系の軟質地盤あるいは片岩地域のような特徴的岩質を有する地域に集中的に分布し、多くの調査・研究が行なわれ、また、建設者土木研究所による全国の地すべり分布図*が作成され実態が明らかにされている。これに対し、崩壊は上記のことから山腹斜面が移動しつつある状態を観察できる機会は少なく、また移動の測定が困難な場合が多いので崩壊の発達の過程には不明な点が多い。

ところが、ある地域に発生している崩壊地を観察すると様々な状態の崩壊が存在しており、これを崩壊発生の初期と考えられるものから、崩壊活動が停止し、植生が回復したものまでを系列化すると、崩壊は発生から消滅に至る一過程を有していることがわかる。そこで、崩壊地を地形発達史的にみると、崩壊発生の初期における形態的分化が十分行なわれていない幼年期、崩壊地面積が拡大し崩壊地に特有の形態**を形成する壮年期、および、形態的発達が止まり植生が回復する老年期に分けることができる。この場合、崩壊活動による土石の生成は幼年期より壮年期にかけて活発であって、老年期ではほとんど活動力を失っていると考えられるので、崩壊現象としては幼年期～壮年期を活動期、老年期を衰退期と呼ぶこととする。

ある地域には新しく発生する崩壊地および消滅する崩壊地があるため、崩壊地個数は時間とともに変化してい

る。そこで、単位時間に発生する崩壊地個数および、単位時間に消滅する既存の崩壊地の割合をそれぞれ U 、 K とすると、 U および K は地域の地質構造条件、地形条件、植生条件あるいは気象条件などの因子に支配されるある変動幅をもつ地域に固有の定数と考えられる。

そこで、地域における崩壊地個数を $n(t)$ とすると、 $n(t)$ の変化速度 $dn(t)/dt$ は U 、 K による次の微分方程式によって表わされる。

$$\frac{dn(t)}{dt} = U - n(t)K \quad \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式の解は

$$n(t) = \frac{U}{K} + \left(n_0 - \frac{U}{K} \right) \exp\{-Kt\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 n_0 は $t=0$ の崩壊地個数である。

ここで、単位時間を一年として考え、この間に発生する崩壊地個数を U (年間増加数)、消滅する割合を K (年間消滅率) とすると、年次をへだてて撮影した航空写真による崩壊地の判読、あるいは、現地調査の記録を調べることで、資料期間中の U 、 K の平均値 $\bar{U}$ 、 $\bar{K}$ を知ることができるのでこの値を (2) 式に用いて任意の時間における崩壊地個数を求めることができる。

山腹斜面は各種の岩石および未固結堆積物により構成されており、崩壊特性は構成岩石および堆積物の種類、あるいは斜面の発生個所によって異なった性質をもっている。図-1は我が国の山岳地域における崩壊の発生個所の代表的な例を示したもので、A型は河成砂礫個所ある

図-1 発生個所による崩壊地分類

いは火山灰層個所、B型は崖錐個所、C型は岩盤個所、D型は氷堆石あるいは雪蝕堆積物個所、E型は稜線付近の岩海個所に発生しているものである。

これらの崩壊はそれぞれの $\bar{U}$ 、 $\bar{K}$ を有していると考えられるので地域における崩壊地個数は各型の崩壊地個数の総和

$$\sum n_i(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

* 地すべり学会誌、地すべり、Vol. 4, No. 1 より掲載されている。

** たとえば建設省河川局発行、土砂調査要綱によると、カール状、半円筒状、半角筒状、杓子状、ドーム状、樹枝状、線状などに分類されている。

となる。

地域内の崩壊地が今後どのような消長をたどるであろうか。いま、(2) 式において $t \rightarrow \infty$ における $n(t)$ の極限値は $\bar{U}/\bar{K}$ となる。すなわち

$$\lim_{t \rightarrow \infty} n(t) = \frac{\bar{U}}{\bar{K}} \quad (4)$$

となり $\bar{U}/\bar{K}$ に収れんとする。収れん値、 $\bar{U}/\bar{K}$ は崩壊地の増加数と減少数が等しくなった場合の地域の崩壊地個数を示すものでこれを平衡崩壊地個数と定義する。そうすると、(平衡崩壊地個数)/(地域の面積は) 地域の崩壊地個数の多少を示す数であるのでこれを地域の崩壊性と呼ぶこととする。

$n(t)$ は図-2 に示すように指数的に増加あるいは減少し

図-2 $n(t) - (\bar{U}/\bar{K})$ の変化図

$\bar{U}/\bar{K}$ に収れんする。そして、 $n_0 > \bar{U}/\bar{K}$ ならば地域の崩壊地個数は減少状態、 $n_0 < \bar{U}/\bar{K}$ ならば増加状態、 $n_0 = \bar{U}/\bar{K}$ ならば平衡状態であることを示している。 $n_0 \neq \bar{U}/\bar{K}$ の場合、その地域の崩壊地個数が平衡状態に到達するに要する時間 T は、 $\bar{U}/\bar{K} \pm 0.1 \bar{U}/\bar{K}$ をその到達レベルとすると

$$T = -\frac{1}{\bar{K}} \ln \left(\frac{\pm 0.1 \bar{U}/\bar{K}}{n_0 - \bar{U}/\bar{K}} \right) \quad (5)$$

によりえられる。ここで、正記号は減少時、負記号は増加時にとる。

3. 崩壊地の平均的寿命

崩壊は発生から消滅に至る一過程があり、これが崩壊地の寿命である。個々の崩壊地の発生時と消滅時を観測できる機会は、崩壊地の寿命が数年～数十年にも及ぶものがある* ため非常にまれである。そこで、地域における既存の崩壊地が半減する時間 τ によって寿命を表わすことを検討する。

既存の N 個の崩壊地の減少速度は

$$-\frac{dN}{dt} = KN \quad (6)$$

であり、(6) 式は

$$-\ln \left(\frac{N}{N_0} \right) = Kt \quad (7)$$

したがって、 $N/N_0 = 1/2$ に相当する $t = \tau$ は

$$\tau = 0.693 \frac{1}{K} \quad (8)$$

となる。したがって、 $\bar{K}$ が得られれば地域における崩壊地の平均的寿命を知ることができる。

4. 崩壊土石量の推定

崩壊が発生した場合、一回に崩壊する土石の量は異なり、また、逐次的に崩壊が重なりある形態に達した崩壊地が観察されている場合が多いことなどを考察すると、崩壊地内の欠損土石は必ずしも一度に崩壊した量をあらわしていない。そこで、崩壊地の寿命を用いた新しい崩壊土石量の推定方法を述べることにする。

ある時点で撮影した写真による測量、あるいは実測によってわかる崩壊地の形態より求められた欠損崩壊土石量 V_i は、崩壊が発生した時から測定時まで崩壊した総量を示している。地域には幼年期より老年期までの各年齢の崩壊地が含まれているので、崩壊土石量を平均値的にとり扱うこととし、また、崩壊土石の供給は主として活動期に行なわれると考えると、年間に地域における総崩壊土石量は

$$V = n\bar{V} = \sum \frac{V_i}{T_{\text{act}}} \quad (9)$$

である。ここで、 T_{act} は活動期、 V_i は地域における個々の崩壊土石量、 n は崩壊地個数、 V は崩壊地一個当たり一年間に生成する。平均崩壊土石量を示す。

また、 $t=0$ から $t=T$ にいたる T 年間に供給される崩壊土石量の積算量 $Q(T)$ は、平均崩壊土石量 $\bar{V}$ が当該期間中変らないものと仮定して

$$\begin{aligned} Q(T) &= \bar{V} \int_0^T n(t) dt \\ \bar{V} &= \bar{V} \int_0^T \left[\frac{\bar{U}}{\bar{K}} + \left(n_0 - \frac{\bar{U}}{\bar{K}} \right) \exp\{-\bar{K}t\} \right] dt \\ &= \frac{\bar{V}}{\bar{K}} \left[\bar{U}t + \left(\frac{\bar{U}}{\bar{K}} - n_0 \right) \exp\{-\bar{K}t\} \right]_0^T \\ &= \frac{\bar{U}\bar{V}}{\bar{K}} T + \frac{\bar{V}}{\bar{K}} \left(\frac{\bar{U}}{\bar{K}} - n_0 \right) (e^{-\bar{K}T} - 1) \quad (10) \end{aligned}$$

により推定される。(10) 式の第一項は (4) 式の平衡崩壊地個数による経常的な土石量、等二項は平衡数に達していないことによる補正量を意味する。

5. 山岳地域の崩壊に対する適用例

1. ～ 5. において山腹斜面の崩壊に関する特性を $\bar{U}, \bar{K}$

* 例えば現在黒部ダム上流左岸の花崗岩中にある崩壊地は大正元年測図、昭和 5 年修正の 1/50000 地形図、地理調査所発行、に記載されている。

図-3 岩石種が異なる地域の崩壊地分布

および τ を用いて表わすことを述べた。ここでは地質構造的に異なる地域の山腹斜面の崩壊について適用した二つの例を示すこととする。

岩石種が異なる山腹斜面の場合

図-3 は新しい火山噴出物と 第三系の 緑色凝灰岩および石英粗面岩が分布している A ダムの集水地域であって、図示したように両岩石地域に崩壊地が存在する。

緑色凝灰岩および石英粗面岩は当地域の基盤であって、岩石組織は固結し、石英粗面岩は柱状～不規則な節理が発達している。一方火山噴出物のうち最も広範囲に分布しているのは火山礫凝灰岩で、この層の上部は火山

礫層となり未固結～半固結である。

このような岩石種が異なっている地域に発達している崩壊地は形態を異にし、緑色凝灰岩および石英粗面岩地域では杓子型が多く、火山噴出物地域では櫛型が多い。そこで各々の地域の崩壊地の特性を検討したのが表-1 である。表に示すように火山噴出物地域の崩壊性は固結した岩石地域に比べ約 15 倍高く、崩壊地の寿命は約 3 倍長く、また 1 個当り年間崩壊土石量 $\bar{V}$ は活動期を $T_{act} = \tau/2$ とすると火山噴出物地域では $60 \text{ m}^3/\text{年}$ 、緑色凝灰岩および石英粗面岩地域では $50 \text{ m}^3/\text{年}$ となる。

同種岩石で岩質が異なる山腹斜面の場合

図-4 は花崗岩が分布している B ダムの集水地域であって崩壊地が多数存在する。この花崗岩は図示したように熱水変質を受けた地域と破碎組織をもつ地域とがあって、これらの地域の花崗岩の強度は新鮮なものの約 1 割程度に低下している。

このような岩質の異なった地域に発達する崩壊地の形態は杓子型と櫛型が並存し、杓子型の割合は新鮮な花崗岩では 69% に対し、熱水変質を受けた花崗岩では 55%、破碎組織をもつ花崗岩では 62% となっている。そこで各々の地域の崩壊について特性を検討したのが表-2 である。

表-2 に示すように、破碎組織をもつ花崗岩の崩壊性は最も高く、新鮮な花崗岩に対し約 3.5 倍、熱水変質を受けた花崗岩は約 1.4 倍となっており、崩壊地の寿命は熱

表-1 Aダム集水地域の崩壊に関する特性

岩石種特性	分布面積 (km^2)	崩壊地 個数	崩壊地 個数 (/ km^2)	年間発生 個数 $\bar{U}$	年間消 滅率 $\bar{K}$	平衡崩壊 地個数 $\bar{U}/\bar{K}$	崩壊性 $\bar{U}/\bar{K}$ (/ km^2)	崩壊規模 $\bar{V} \cdot \frac{\bar{U}}{\bar{K}}$ (m^3/km^2)	寿命 τ (年)	平衡到達時 T (年)	増・減 の傾向
火山噴出物地域	14.2	40	2.8	0.96	0.011	87	6.1	4×10^2	60	140	増加
緑色凝灰岩と石英粗面岩地域	33.7	13	0.4	0.40	0.032	13	0.4	2×10	22	0	平衡

表-2 Bダム集水地域の崩壊に関する特性

岩質的特性	分布面積 (km^2)	崩壊地 個数	崩壊地 個数 (/ km^2)	$\bar{U}$	$\bar{K}$	$\bar{U}/\bar{K}$	$\bar{U}/\bar{K}$ (/ km^2)	$\bar{V} \cdot \frac{\bar{U}}{\bar{K}}$ (m^3/km^2)	τ (年)	T (年)	増・減 の傾向
普通の花崗岩地域	53.9	109	2.0	5.9	0.068	87	1.6	4×10^3	10	15	減少
熱水変質を受けた花崗岩地域	32.4	199	6.1	2.2	0.032	70	2.2	4×10^3	22	85	減少
破碎組織をもつ花崗岩地域	12.5	116	9.3	3.7	0.056	66	5.3	17×10^3	12	40	減少

図-4 岩質が異なる地域の崩壊地分布

水変質を受けた花崗岩が最も長く新鮮なものに対し約 2 倍、破碎組織をもつ花崗岩が 1.2 倍となっている。

また崩壊地 1 個当たりの年間に崩壊する土石量は、新鮮な花崗岩地域で $2400 \text{ m}^3/\text{年}$ 、熱水変質地域が $1600 \text{ m}^3/\text{年}$ 、破碎組織をもつ地域が $3300 \text{ m}^3/\text{年}$ となる。

6. むすびと今後の問題

以上を要約すると、山腹斜面の崩壊の特性は

① 地域における崩壊地の年間発生個数 $\bar{U}$ と年間消滅率 $\bar{K}$ を得ると崩壊地は指数的に増加あるいは減少する状態として示すことができる。

② 崩壊地個数は増加、あるいは、減少の場合いずれも $\bar{U}/\bar{K}$ に収れんする。すなわち、 $\bar{U}/\bar{K}$ は年間発生個数と年間消滅個数が等しくなった場合の地域の崩壊地個数を示すことになる。したがって $(\bar{U}/\bar{K})/(\text{地域の面積})$ は地域の崩壊地個数のレベルであり、地域の崩壊性を示

すものとみることができる。また $(\bar{U}/\bar{K})/(\text{地域の面積}) \times \bar{V}$ は地域の崩壊規模を示す。

③ 崩壊地の寿命を年間消滅率 $\bar{K}$ による既往の崩壊地の半減期によってあらわすことができる。

④ これらの諸示数を用いて年間崩壊土石量の推定が可能である。

⑤ 岩石種が異なる地域、および、同一岩石種において岩質が異なる地域に発生している崩壊地における諸示数を検討した結果、未固結岩石および変質あるいは破碎した低岩質地域では崩壊性が高く、寿命が長いことがわかった。これは崩壊現象に対する地質学的背景から妥当な傾向を示していると考えられる。

⑥ 以上の結果から、山腹斜面の崩壊の性状に関する地質構造的条件の対応性を数量的にあらわし得る見通しが得られ、各種施設の設計、防災計画に適用できるめどがある。また一方、 $n(t)$ が増加あるいは減少の場合の地

質学的意味, $\bar{U}$, $\bar{K}$ の変動幅, あるいは活動期の長さなど今後に残された問題点に関する解明が必要である,

なお, 本文で述べた崩壊地調査については地質第一研究室斎藤和氏, 地質第二研究室堀義直氏および物理地質研究室本荘静光氏の御協力があり, 数値の解析について本荘静光氏の助言があったことを記し謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 大滝俊夫(1964): 崖崩れの水文学的研究(第一報) 東京管区气象台研究報告
- (2) 丸安隆和(1965): 写真判読による地すべり, 崩壊の統計的研究 土木学会論文集第 116 号
- (3) 村野義郎(1965): 豪雨型山くずれの研究—天竜川上流流域について—新砂防, 56
- (4) 横田知昭(1965): 崩壊調査資料の地質別集計に基づく一考察 新砂防, 57
- (5) 村野義郎(1966): 崩壊地調査データの分類, 集計, 分散分析のプログラム 新砂防, 63
- (6) 渡辺正幸, 瀬尾克義(1968): 豪雨による山くずれ一六甲山における昭和 36 年と 42 年豪雨—新砂防, 68
- (7) 打萩珠男(1968): ひと雨による山腹崩壊土量の実用計算法試案 新砂防, 69
- (8) 武居有恒(1964): 山くずれの平衡条件に対する地下水流の影響について 新砂防, 55
- (9) 田中 茂(1965): 山腹斜面の安定に関する研究 第 2 回災害科学総合講演論文集 文部省特定研究
- (10) 緒方正虔(1970): 山腹崩壊の発生・消滅よりみた崩壊地特性の解析 電力中研 技術第二研究所報告 研究報告: 70001