崩壊堆積物斜面の安定について

池 田 和 彦*

On the Stability of Detritus-Slope

By Kazuhiko Ikeda

要 旨

自然斜面は地質的に岩石斜面と岩石斜面から崩壊してできた崩壊堆積物斜面とに大きく分けられる。本報告は後者の崩壊堆積物斜面について、その性状形態、生因的分類、斜面および岩盤面の傾斜角、斜面長、堆積物の厚さ、構成物質、固結度（弾性波速度）を述べ、これらの性状から安定度を判定したものである。

1. ま え が き

自然斜面および切取斜面の安定度を判定し、地すべりや斜面崩壊を未然に防止することは、災害防止あるいは建設工事における斜面の設計、施工から重要なことである。しかしながら現時点では崩壊発生後の危険度判定法はあるにしても、あらかじめ自然斜面を地形地質から定量的に分類し、かつその安定性を判定したものはない。

幸にして昭和 35 年頃から全国にわたって、防災工事や建設工事に先立って、いろいろな地質調査が総合的に実施されてきたので、これらの調査結果に基づいて斜面の性状を明らかにすると共に、調査地附近の過去の災害記録または工事中の施工状態から、斜面の安定度を判定することができた。

一般に自然斜面は地質的に岩石斜面と岩石斜面から崩壊してできた崩壊堆積物斜面とに大きく分けられる。従って斜面の性状や安定度を判定するには、これらの二つに分けて考えるべきであるが、本報告は後者の崩壊堆積物斜面について、調査結果を統計的にまとめて、その性状および崩壊の危険度を定量的に算定したものである。

今回の調査地点は 205 箇所、全国にわたっているが、調査地点を地域別に見ると、北海道地方 6、東北地方 20、北陸地方 43、関東甲信越地方 52、中部地方 38、近畿中国地方 22、四国地方 18、九州地方 6 となつている。なお崩壊堆積物は厚さ 3 m 以上のものを対象として

いる。

2. 崩壊堆積物斜面の性状

2.1 崩壊堆積物斜面の形態

崩壊堆積物とは、山体を構成する岩石が崩壊して生じた岩塊、岩片、土砂が斜面上や山ろくに堆積したり、あるいは流水によつて運搬されて、平地に移り変わる附近で堆積したちゆう積期ないしは洪積期の二次的堆積物を総称している。ただし今回の調査では厚さ 3 m 以上の崩壊堆積物を対象としている。(d₁ > 3 m)。

崩壊堆積物の形態は斜面の傾斜角(α)の変わる回数、傾斜角間の関係によつて、図—1 に示すように Ma, Mb, Na, Nb の 4 型に分類される。これらの各形態はそれぞれ、成因、性状、安定性に特徴を持っている。調査した範囲内で各型の発生件数は表—1 に示す如くで、Ma 型が最も多く全体の 60% を占め、Nb 型は非常に少く全体の 5% にすぎない。

崩壊堆積の形態はまず斜面の傾斜角(α)の変わる回数によつて、M 型と N 型とに分類される。前者は図—1 に示すように、斜面が傾斜の異つた(α_1, α_2)二つの斜面 l_1, l_2 から構成され、後者は傾斜の異つた($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)三つの斜面 l_1, l_2, l_3 から構成されている。N 型は三次ないし四次的崩壊またはすべりを起こしたか、或は岩盤面が明らかに傾斜の異つた($\beta_1, \beta_2, \beta_3$)三つの斜面から構成されている場合である。

さらに崩壊堆積物は二つの傾斜角間の関係によつて、Ma, Mb, Na, Nb の 4 型に分類される。Ma, Na 型は

* 国鉄・鉄道技術研究所

図—1 崩壊堆積物の形態

表—1 各型の発生件数

安定度	M		N		計
	Ma	Mb	Na	Nb	
S	83	15	12	3	113
U	19	16	7	5	47
D	17	22	4	2	45
計	119	53	23	10	205

注; S; 安定せるもの
 U; 不安定なもの
 D; 崩壊またはすべりの危険性の大きなもの

$\alpha_1 > \alpha_2$ なる場合で、地形は凹型を示し、Mb, Nb 型は $\alpha_1 > \alpha_2$ なる場合で、地形は凸型を示す。Ma, Na 型は多くの場合、崩壊を起こした土砂、岩片などがそのまま山ろくに堆積したものであり、Mb, Nb 型は崩壊した土砂、岩片などが岩盤面が下方に行くに従って急であるため、

さらに流動して堆積したものが多い。従つて一般に Mb, Nb 型は Ma, Na 型と比較してそれぞれ不安定な場合が多い。

成因的に見ると扇状堆積物の大部分は Ma 型を示し、地すべり崩土は 4 型のいずれにも見られる。

2.2 崩壊堆積物斜面の成因上からの分類

崩壊堆積物斜面は成因上から次の三つに分けられ、それぞれ形態、安定性に特徴を持っている。

(1) がいすい (T)

山体が風化作用を受け、岩盤の結合力が弱くなつて生じた岩塊、岩片が崩壊し、安息角をもつて山ろくに堆積した崩壊堆積物である。斜面の平均傾斜角(α)は次の(1)式で示される範囲内にある。ただし α は 2.4 項の(3)式で定義される角度である。

$$\begin{aligned} 50^\circ > \alpha > 13^\circ \quad l \leq 300 \text{ m の場合} \\ 50^\circ > \alpha > 20^\circ \quad l > 300 \text{ m の場合} \end{aligned} \quad \dots(1)$$

但し α ; がいすいの平均傾斜角(度)

l ; 全斜面長 (m)

(1) 式は 図—2 からえられた式で、斜面の平均傾角 α は 50° を超えることは殆んどなく、たまにあつても非常に不安定である。

図-2 斜面長，斜面傾斜角と安定性

(2) 地すべり崩土 (L)

山体がすべり面を形成して崩壊してできた崩壊堆積物で，その傾斜角は一般に緩く，図-2 に示すように多くの場合平均傾斜角は 25 度以下である。地すべり崩土は Ma, Mb, Na, Nb のいずれも示すが，Ma, Mb が比較的多い。

(3) 扇状地 (F)

山中の谷が平地または本流にでる個所で，上流から運搬してきた土砂の大部分を堆積するために形成された緩傾斜の扇状の地形で，その平均傾斜角 α は図-2 から，次の (2) 式によつて定義される。

$$\begin{aligned} \alpha &\leq 13.5^\circ \quad (\log l = 1) \quad l \leq 300 \text{ m の場合} \\ \alpha &\leq 20^\circ \quad l > 300 \text{ m の場合} \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 崩壊堆積物の斜面長 (l)

崩壊堆積物の斜面は二つの異つた斜面角 (α_1, α_2) を持った斜面 l_1, l_2 から構成されている場合と，三つの異

つた傾斜角 ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) を持った斜面 l_1, l_2, l_3 から構成されている場合とある。従つて全斜面長 l は， $l_1 + l_2$ または $l_1 + l_2 + l_3$ となる。全斜面長 l は図-2 よりわかるように 20~600 m 間にあるが，60~250 m 間の斜面長を持つた崩壊堆積物が 70% となつている。 l_2/l_1 は 0.5~1.5， l_2/l_3 は 1.0~3.5 にある崩壊堆積物が全体の 80% を占めている。

2.4 崩壊堆積物の斜面傾斜角 (α)

崩壊堆積物の斜面傾斜角 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ はいずれも 50° 以下である。すなわち斜面の最大傾斜角が 50° を超える場合は殆んどない。 α_1 と α_2 とを比較すると $\alpha_1 > \alpha_2$ なる場合が多く，全体の 70% を占めている。しかし $\alpha_1 < \alpha_2$ なる場合の方が不安定であることが多い。

崩壊堆積物の全斜面長 l と斜面の平均傾斜角 α との関係を図-2 に示す。ただし平均傾斜角 α とは，

$$\alpha = \frac{1}{l}(l_1 \alpha_1 + l_2 \alpha_2) \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{または } \alpha = \frac{1}{l}(l_1 \alpha_1 + l_2 \alpha_2 + l_3 \alpha_3)$$

図—2 より斜面傾斜角 α は 50° を超えることは殆んどない。すなわち 50° を超えると崩壊を起こしているわけである。地すべり崩土の平均傾斜角は 25° 以下であり、扇状堆積物の傾斜角は 20° 以下で (2) 式で示される範囲にある。またがいきい性堆積物の平均傾斜角は (1) 式に示す範囲にある。

図—2 は同時に安定性について次の如くプロットしている。

- (1) 安定せるもの (S)
- (2) 不安定なもの。すなわち集中豪雨、地震、切取などによつて崩壊や滑動の危険性が起こるもの (U)
- (3) 非常に不安定で、なんらかの対策を行なわない限り、崩壊の危険性が大きいとかは現在移動を行なっているもの (D)

斜面の安定性については、いろんな角度から論じなければならないが、図—2 からがいきいの斜面平均傾斜角 α 、全斜面長 l と崩壊に対する安定性との間には一応次の如き関係がある。

- (1) 堆積物斜面が崩壊に対して安定を保つための斜面平均傾斜角 α_s は、

$$\alpha_s < 39 - 4 \log l \quad \dots\dots(4)$$

ただし α_s ; 度 l ; m

- (2) 堆積物斜面が非常に不安定で、崩壊の危険性が大きい場合の斜面平均傾斜角 α_D は

$$50 > \alpha_D \geq 44 - 4 \log l \quad \dots\dots(5)$$

- (3) 堆積物斜面が不安定で、集中豪雨、地震、切取などによつて崩壊を起こす危険性がある場合の斜面平均傾斜角 α_u は

$$44 - 4 \log l > \alpha_u \geq 39 - 4 \log l \quad \dots\dots(6)$$

(4), (5), (6) の各式はがいきい性堆積物にあてはまる式である。

2.5 崩壊堆積物と岩盤との境界面の傾斜角 (β)

岩盤面の傾斜 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ は斜面の傾斜角と同じく 50° 以下が大部分である。 β_1 と β_2 とを比較すると、 $\beta_1 > \beta_2$ なる場合が大部分で全体の 80% 以上を占めている。

岩盤面の平均傾斜角 β も 50° を超えることは殆んどなく、地すべり崩土の岩盤面の傾斜角 β は α と同じく 25° 以下である。扇状堆積物の岩盤面の平均傾斜角 β は

(2) 式の α を β と置き換えた式の範囲にあるとは限らない。ただし多くの場合 25° 以下である。

次ががいきい性堆積物の岩盤面の平均傾斜角 β および全斜面長 l と安定性との間には (4), (5), (6) 式とほぼ同じ関係が存在する。

- (1) 崩壊堆積物が崩壊に対して安定を保つための岩盤の平均傾斜角 β_s は

$$\beta_s < 39 - 4 \log l \quad \dots\dots(4')$$

- (2) 崩壊堆積物が非常に不安定で、崩壊の危険性が大きい場合の岩盤面の平均傾斜角 β_D は

$$50 > \beta_D \geq 44 - 4 \log l \quad \dots\dots(5')$$

- (3) 崩壊堆積物が不安定で、特殊条件によつて崩壊を起こす可能性がある場合の岩盤面の平均傾斜角 β_u は

$$44 - 4 \log l > \beta_u \geq 39 - 4 \log l \quad \dots\dots(6')$$

2.6 崩壊堆積物の厚さ (d_1)

崩壊堆積物の厚さ d_1 は 3~12 m の厚さのものが最も多く、全体の 85% を含めている。厚さと個数との関係は表—2 の如くなる。

表—2 堆積物の厚さ

d_1	3~7 m	8~12 m	13~20 m	21~50 m	計
個所数	118	60	13	14	205

厚さ d_1 と斜面傾斜角 α との関係を見ると、 $\alpha \leq 10^\circ$ または $\alpha \geq 40^\circ$ の場合は、崩壊堆積物の厚さは殆んど 12 m 以下である。

崩壊堆積物の厚さと全斜面長 l との関係は図—3 から次式によつて与えられる。

$$d_1 \leq 20 (\log - 1) \quad l \leq 100 \text{ m の場合} \quad \dots\dots(7)$$

$$d_1 \leq 20 (\log - 3) \quad l \geq 100 \text{ m の場合}$$

(7) 式から全斜面長 l が 100 m 以内の場合は、崩壊堆積物の厚さは 20 m を超えることはなく、斜面長は多くの場合 1000 m 以内であるので、崩壊堆積物の厚さは 50~60 m 以内である。また斜面の傾斜角が 36° 以上の場合 (崩壊の危険性がある) は、斜面長と堆積物の厚さとの間には (8) 式に示す如き関係が存在する。この場合、厚さはおおむね 20 m 以内であるが、地すべり崩土の場合はこれより厚いことがある。

$$3 (\log - 1) \leq d_1 \leq 12.5 (\log l - 1) \quad \dots\dots(8)$$

図—3 堆積物の厚さと斜面長の関係

2.7 崩壊堆積物の構成物質

崩壊堆積物を構成する地質は、その材料の大きさから次の如く分類される。

- 1) 礫交わり粘土またはシルト
- 2) 粘土交わり砂質土
- 3) 巨礫交わり砂質粘土
- 4) 岩塊または玉石交わり砂質土

この分類と別に、崩壊堆積物のなかに泥岩、凝灰岩、蛇紋岩、変朽安山岩、片岩などから風化生成された膨潤性粘土や断層粘土が多量に含まれているかどうかが非常に重要な事項である。地すべり性崩壊土の多くは、これ

らの粘土から構成されている層が存在している。移動の活発ながいすいもまた、これらの粘土を多量に含んでおり、特に斜面の傾斜が緩やかで徐々に移動しているがよいはそうである。

崩壊堆積物中の地下水の状態もまた崩壊の危険性に対して重要な影響を持つもので、岩盤との境界付近に地下水が存在するがよい、膨潤性粘土から構成されている地層付近に地下水面が存在する場合などは崩壊や移動を起こしやすい。

崩壊堆積物の母岩の地質は表—3に示す如くであるが、これは日本における地質の分布および地質構造とも関連しているので、一概にどの種類の岩石が崩壊堆積物とな

図—4 崩壊堆積物の深度別の弾性波速度

表—3 崩壊堆積物の母岩の地質

母岩の地質 崩壊たい積物		変成岩	古生層 中生層	第三紀層	洪積層	深成岩 半深成岩	火山岩類	蛇紋岩	計
箇所数	安定せるもの	7	25	22	2	35	18	1	110
	不安定・危険性のあるもの	16	17	30	5	11	14	2	105
	計	23	42	52	7	46	32	3	205

りやすいかは言えない。またどの種類の母岩から生成された崩壊堆積物が、崩壊の危険性が大きいかは言えないが、深成岩、半深成岩、中生層の母岩から生成された崩壊堆積物は比較的安定したものが多い。

2.8 崩壊堆積物の固結度

崩壊堆積物の固結度は一般に弾性波速度によつて表わ

すことができるが、同じ固結度でも、構成する物質の種類、大きさ、地下水の状態によつて弾性波速度が異つてくる。例えば砂礫からなる固結度が中程度の崩壊堆積物の縦波の弾性波速度は一般に 1.2 km/s 程度であるが、飽和含水すれば縦波の弾性波速度は 1.6 km/s 程度になる。横波は水による影響が少ないので、崩壊堆積物などの表層地層については、横波の弾性波速度を測定する方

が、その固結度を判定する上に都合が良く、最近では表層堆積物の横波測定が研究され実施されつつある。

しかし大局的に見ると、弾性波速度（縦波）が速い程固結度は良い。このことは厚い崩壊堆積物では、下方に行く程弾性波速度が速くなることから推定できる。

調査対象の崩壊堆積物について、弾性波速度（縦波）と深度との関係を求めると図—4の如くなる。この図から崩壊堆積物の弾性波速度は 0.2~1.0 km/s が最も多く、このことは 2.6 で述べた表層堆積物の厚さが 3~12 m のものが全体の 85% を占めていることと相関連するものである。

また図—4から、堆積物の弾性波速度 v は深度 h と共にほぼ直線的に増加すると思われる。従つて次の (9) 式が成立する。

$$v = k(h - H) + V \quad \cdots \cdots (9)$$

ただし v ; 各深度における弾性波速度 (m/s)

h ; 深度 (m)

H ; 地表近くの第一層の見掛けの深度 (m)

V ; 第一層の見掛けの弾性波速度 (m/s)

k ; 地質によつて決まる係数 (sec^{-1})

図—5 から、大部分の崩壊堆積物の第1層の厚さは 2~5 m、第一層の弾性波速度は 200~1200 m/sec、 k の値は 40~100 (sec^{-1}) である。従つて

$$\left. \begin{array}{l} H = 2 \sim 5 \text{ m} \\ V = 200 \sim 1200 \text{ m/sec} \\ k = 40 \sim 100 (\text{sec}^{-1}) \end{array} \right\} \quad \cdots \cdots (10)$$

k の値は第1層の速度 V が遅い程、大きくなる傾向にあるので、第一層の見掛けの速度 V が 200~500 m/sec の場合は、 $k = 80 \sim 100 (\text{sec}^{-1})$ となる。(このような場合が最も多い)。地質的には k の値は巨礫や岩塊交わりの砂礫土の場合は小さく $k = 40 \sim 60$ である。

図—4 に示した $v = 40(h - 2) + 200$ および $v = 100(h - 4) + 1200$ は崩壊堆積物の弾性波速度の限界を示したもので、大部分の崩壊堆積物の弾性波速度はこの二つの直線で挟まれた範囲内にある。

3. 崩壊堆積物斜面のまとめ

(1) 崩壊堆積物の形態は 2.1 で述べた如く、斜面傾斜角の変わる回数、傾斜角間の関係、厚さ、岩盤の傾斜角によつて、図—1 に示すように Ma, Mb, Na, Nb の四つに分類される。

(2) 崩壊堆積物は成因的には、2.2 で述べた如く、がしやすい、地すべり崩土、扇状堆積物に分類され、それぞれ形態に特徴を持っている。がしやすいの斜面平均傾斜

角は (1) 式で示されるように $13^\circ \sim 50^\circ$ 、地すべり崩土の傾斜角は 25° 以下、扇状堆積物の傾斜角は (2) 式で決まり 20° 以下である。地すべり崩土は 4 型のいずれかの形態をとるが、扇状堆積物の多くは Ma 型に属する。

(3) 崩壊堆積物の斜面長は 20~600 m 間にわたっているが、60~250 m 間の斜面長のものが、全体の 70% を占めている。

(4) 崩壊堆積物の斜面平均傾斜角は 50° を超えることは殆んどなく、がしやすいの傾斜角は $13 \sim 50^\circ$ 、地すべり崩土の傾斜角は 25° 以下、扇状堆積物の傾斜角は 20° 以下である。

(5) 崩壊堆積物の厚さは大体 50 m 以内で、そのうち 3~12 m の厚さのものが最も多く、全体の 85% を占めている。崩壊堆積物の厚さは斜面長と関連し、その関係は (7) 式の如くである。

(6) 崩壊堆積物の構成物質は 2.7 で述べた如く、分類されるが、膨潤性粘土および地下水の状態が安定性に大いに関連する。

(7) 崩壊堆積物の固結度は一般に弾性波速度によつて示され、固結度の良い程弾性波速度が速く、また地表より下に行くに従つて速度は速くなり、地層はよく締まっている。しかし同じ固結度の場合でも、構成されている物質の種類、含有礫の大きさ、地下水の状態によつて速度が異ってくる。

崩壊堆積物の弾性波速度は 0.2~1.0 km/s のものが多い。深度と弾性波速度との関係は (9) 式で示される。

4. 崩壊堆積物斜面の安定性

以上述べた観点から、崩壊堆積物斜面の安定について、次の如く結論を導くことができる。

(1) 崩壊堆積物の形態と安定性との間には次の如き関係がある。

安定度	比較的安定なものが多い	中	危険なものが多い
形 態	Ma	Na	Mb, Nb

(2) 扇状地は一般に安定している。それは斜面の平均傾斜角が 20° 以下であり、しかも地質がシルト交わり砂礫からなり、膨潤性粘土を含むことが少ないからである。ただし固結度の悪い堆積物や地下水の状態によつては、切取などの作業を行えば崩壊の危険性がある。

(3) がしやすいはその斜面の平均傾斜角が 50° を超える場合は必ず崩壊を起こす。図—2 から斜面長 l 、斜面

の平均傾斜角 α と安定性との間には次の如き関係がある。

安 定 性	条 件
安定している	$\alpha < 39 - 4 \log l$ (4) 式
やや不安定で外的条件によつては崩壊の恐れがある	$39 - 4 \log l \leq \alpha < 44 - 4 \log l$ (6) 式
非常に不安定で崩壊の危険性が大きい	$\alpha \geq 44 - 4 \log l$ (5) 式

(4) がいすい性崩壊堆積物に対しては、岩盤面の傾斜角 β についても同様なことがいえる。

(5) 斜面の傾斜が 36 度以上の場合、すなわち崩壊

の危険性がある場合の斜面長と堆積物の厚さとの間には次の如き関係がある。

$$3(\log l - 1) \leq d_1 \leq 12.5(\log l - 1) \quad \dots\dots(8)$$

勿論この場合は (5), (5'), (6), (6') の各式が満足されていなければならない、ただし地すべり崩土の場合はこれより厚い場合がある。

(6) 崩壊堆積物の構成物質の中に膨潤性粘土を多量に含む場合は、崩壊の危険または滑動(地すべり)の危険性が大きい。また地下水の状態が崩壊または滑動に大いに関連することは言うまでもない。

(7) 崩壊を起こす可能性の堆積物の弾性波速度は、大体 1.2 km/sec 以下である。ただし 40° 以上の急傾斜の斜面や、膨潤性粘土を含んでいる場合は、1.5~1.8 km/s の速度層でも崩壊を起こす。