表層崩壊発生危険雨量の予測

Estimation of Critical Volume of Rain to Surface Failure Occurrence

駒村 富士 弥*
Fujiya KOMAMURA

Abstract

The condition of slope failure occurrence depend not only on rainfall but on the states of slope. The discussions from both sides of rainfall and slope may be necessary to elucidate the condition of slope failure.

In this paper, an equation of safety factor including the degree of saturation as a parameter, in addition to the another parameters such as slope inclination, depth of soil layer, cohesion of soil, void ratio, etc. is introduced to estimate the volume of water in the soil layer at the time of occurrence of slope failure.

The critical volume of rainfall which induce the slope failure is converted from the volume of water in the soil layer which is calculated by using the equation of the safety factor.

The time to slope failure can be forecasted by knowing the time when the accumulated volume of precipitation reaches the critical volume estimated by the presented method in this paper.

1. はじめに

斜面崩壊, 土石流などによる土砂災害には多量の降雨が関係している場合が多い。しかし, このような土砂災害の発生は降雨のみに依存するものではなく, 発生場所の地形や土質条件にも関係するもので, 降雨時の土砂災害の発生について検討する場合には, 降雨条件と発生場所の安定条件の両方を考慮し, 両者の複合問題として取り扱う必要があろう。

表層崩壊の発生に関して行われた従来の研究の多くは, 降雨条件か斜面条件のいずれか一方に着目して崩壊の発生を検討していたのであるが^{1,2,3,4,5,6)}, 最近になって, 両者, すなわち誘因と素因を組み合わせる総合的に解析し, 崩壊発生危険雨量や発生時刻を予測しようとする研究も行われるようになってきた^{7,8,9)}。

そこで, 本論文では, はじめに斜面の傾斜, 土層の厚さ, 土の C , ϕ などのほかに, 土の飽和度をパラメータとした安全率の計算式を導き, $F=1$ になるときの飽和度を求めて崩壊発生危険水分量 (崩壊発生危険雨量) を算定する方法を提示する。つぎに, 土層がその水分量に達するまでの時間は, 降雨の量と継続時間および土の浸透能によってきまるので, それらの関係についても考察し, 崩壊発生の場合と降雨のタイプの両者を複合した斜面崩壊発生予知の方法について検討する。

2. 安全率の飽和度による変化

山地に豪雨が降ると, その一部は地表面を流れ, 一部は地中に浸透して崩壊の発生に関係するようになる。雨水の地中への浸透量は浸透がはじまった当初は大きい, その後徐々に減少し, 土が飽和すると浸透しなくなって表面流があらわれる。これを模式的に示すと, 図-1 の点線のようになる。さらに, この図に実線で示したような累加雨量曲線をえがくと, この二つの曲線の交点Bまでは浸透量の方が多いため, 雨の降りはじめからこのB点の時刻までは, 表面流が生じないが, それ以降は土が飽和して表面流が生ずるようになることが示される。その後, 表面流量が増加し, ある量以上になったとき崩壊が発生する場合が多いといわれている¹⁾。

しかし, 現実にはそのような例ばかりではなく, 累加浸透量曲線と累加雨量曲線が交叉する時点より以前, すなわち土層が完全に飽和していないと思われる状態にお

図-1 雨量, 浸透量の時間的变化 (模式図)

* 東京大学農学部

いても、崩壊が発生する場合がある。

そこで、そのような不飽和な状態での崩壊発生について検討してみる。

降雨による表層崩壊の発生経過をたどってみると、一般的に次のようになる。

降雨→斜面への雨水の浸透→土質の変化→安全率の低下→ $F \leq 1$ →崩壊発生

このような崩壊発生の経過を考えると、雨水の浸透による土質の変化を考慮した安全率の式を導いて、崩壊の発生を検討することが可能になる。

いま、図-2 のような傾斜角 θ 、土層厚 H 、浸透水深 H_1 の半無限斜面を想定すると、単位土体 $aa' b' b$ のすべり面に直角に働く分力は

$$\begin{aligned}\sigma_v &= \{\gamma_s(H-H_1) + (\gamma_t - \gamma_w)H_1\} \cos^2 \theta \\ &= \{\gamma_s H - (\gamma_s - \gamma_b)H_1\} \cos^2 \theta \quad \dots\dots\dots(1)\end{aligned}$$

ここに、 γ_s ：土の単位体積重量

γ_t ：飽和土の単位体積重量

γ_w ：水の単位体積重量

$(\gamma_t - \gamma_w) = \gamma_b$ ：浮力を考慮したときの土の水中重量

となり、斜面が粘着力 C のある土からなる場合は、すべりに抵抗する力は

$$\begin{aligned}\tau_r &= C + \sigma_v \tan \phi \\ &= C + \{\gamma_s H - (\gamma_s - \gamma_b)H_1\} \cos^2 \theta \cdot \tan \phi \quad \dots\dots\dots(2)\end{aligned}$$

となる。この力 τ_r とすべり面に沿って下方に働く分力、 $\tau = \gamma_s H \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$ との比を求めると安全率 F が得られ、それが 1 以下の場合に崩壊が発生する。

$$F = \frac{C + \{\gamma_s H - (\gamma_s - \gamma_b)H_1\} \cos^2 \theta \cdot \tan \phi}{\gamma_s H \cos \theta \cdot \sin \theta} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ところで、浸透水深 H_1 であるが、現実には土壌水分は図-2(b) に示したように、土壌の間隙中に分散して存在しており、土層内で H_1 の部分と $(H-H_1)$ の部分とが

図-2(a) のようにはっきりと分離して存在していることは稀であろう。そこで、 H_1 は通常分散して存在している土壌水分を、もし土層の下部に集めたとしたらこの深さになるであろう、とみなしたときの値であると考え、 H_1/H は飽和度に相当するファクターとして取り扱うことができるので $(H_1/H) \times 100 = S_r$ とし、それと $\gamma_s = (G_s + eS_r) \cdot \gamma_w / (1+e)$ および $\gamma_b = (G_s - 1) \gamma_s / (1+e)$ とを用いて (3) 式の一部、 $\{\gamma_s H - (\gamma_s - \gamma_b)H_1\}$ を書き改めると

$$\begin{aligned}&\{\gamma_s H - (\gamma_s - \gamma_b)H_1\} \\ &= \frac{(G_s + eS_r - eS_r^2 - S_r) \gamma_w H}{(1+e)} \quad \dots\dots\dots(4)\end{aligned}$$

ここに、 G_s ：土の比重、 e ：間隙比となる。なお、計算にあたっては、 S_r は飽和度を 100 でわった値を用いる。これを (3) 式に代入して整理すると、土層の飽和度をパラメーターとした安全率の計算式が次のように導かれる。

$$\begin{aligned}F &= [\{(1+e)C + (G_s + eS_r - eS_r^2 - S_r) \gamma_w H \cos^2 \theta \cdot \tan \phi\} \\ &\quad / \{(G_s + eS_r) \gamma_w H \cos \theta \cdot \sin \theta\}] \quad \dots\dots\dots(5)\end{aligned}$$

さらに、粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ も飽和度によって変化することを考慮する必要がある。

飽和度が増加すると土の粘着力 C および内部摩擦角 ϕ のいずれも減少することが多くの実験によって示されている。これらの C 、 ϕ のうち飽和度による ϕ の変化はあまり大きくなく、特に表層崩壊の場合には土被り荷重が小さいために ϕ 成分がせん断抵抗に与える影響は比較的小さく、 C 成分の方が支配的であるといわれている⁸⁾。そこで、本報では、 ϕ は測定時の値のままほぼ一定であり、粘着力 C は飽和度の増加によって指数関数的に減少すると仮定し

$$C = C_d \cdot \exp(-\alpha \cdot S_r) \quad \dots\dots\dots(6)$$

とする。ただし、 α は減少係数、 C_d は乾燥時の粘着力。

これを (5) 式に代入すると安全率は

$$\begin{aligned}F &= [\{(1+e)C_d \cdot \exp(-\alpha \cdot S_r) + (G_s + eS_r - eS_r^2 - S_r) \gamma_w H \cos^2 \theta \cdot \tan \phi\} \\ &\quad / \{(G_s + eS_r) \gamma_w H \cos \theta \cdot \sin \theta\}] \quad \dots\dots\dots(7)\end{aligned}$$

とあらわされる。

これによって、飽和度が 0 から 100% まで変化する間の飽和度と安全率との関係を計算することができ、崩壊発生時 ($F=1$) の飽和度と含水比 ($w = eS_r/G_s$) を推定できる。

また、この考え方によれば、土層が飽和しない場合でも崩壊発生の可能性があることを説明できるわけで、従来提唱されていた考え方、すなわち飽和してから崩壊が発生するという考え方よりも一層現実的な説明ができることになろう。なお、計算上は飽和度が 100% 以上 (飽和時) でも F が 1 以下にならず、斜面は安定であると

図-2 斜面の模式図

判断される場合もできるが、このように飽和度が100%以上の場合には、前述のような斜面内応力のつり合い関係によってではなく、パイピング等のメカニズムによって崩壊が発生すると考えれば、計算上は $F > 1$ となっても現実に崩壊が発生するという点は説明できよう。

3. 崩壊発生危険雨量と発生時刻の予知

前述のようにして、降雨により表層崩壊が発生する時点 ($F=1$ の時点) での飽和度が推定されると、 $w=eS_r/G_s$ によってそのときの含水比が求められ、その含水比と現時点 (降雨前) の含水比との差 (w') を計算すると、それが崩壊の発生をもたらす含水比の増加分となる。さらに、この含水比をもとに 図-2(b) のモデル土柱 ($V(m^3) = 1 \times 1 \times \cos \theta \times H$) の水分量を

$$W_w = W_s \times w' = \{G_s \cdot V / (1+e)\} \times w'$$

ここに、 W_w : 水分の重量

W_s : 土粒子分の重量

として重量で計算したあと容積に換算し ($V_w = W_w / \gamma_w$)、それを崩壊発生水分量とするとその量が降雨によって満たされたとき崩壊が発生することになる。

地表に降った雨は一たん土層中に浸透したあとその一部は再び地表に流出するであろうから、崩壊発生水分量と等量の雨量がそのまま崩壊の発生をもたらす雨量 (崩壊発生危険雨量) になるとは限らないが、土層が飽和するまでは地表流出がなく、浸透した雨がすべて土層内に貯留されると仮定すれば、崩壊発生水分量と等量の雨量が崩壊発生危険雨量 R となる。この R は崩壊発生水分量を地表面における水高に換算して得られる値、 $R = V_w / \cos \theta$ であり、これによって、どの程度の雨量で崩壊が発生するか予測できることになる。

ここに、一例として三重県海山町のある山腹斜面を対象にして実施した測定および計算の結果を示す。

土質調査の結果、

$$G_s = 2.7, e = 1.58, S_r = 55\%, w = 32.2\%,$$

$$C = 0.6 \text{ ton/m}^2, \phi = 33^\circ$$

の各値が得られた。粘着力は飽和度によって $C = C_a \cdot \exp(-\alpha \cdot S_r)$ と変化するものと仮定したので、実際には実測資料によって、 α をきめる必要がある。しかし、現在この調査地での $C \sim S_r$ 関係の実測資料が無いため、ここでは飽和度が100%のよきの C は飽和度が0のときの C の3分の2に減少すると仮定して $\alpha = 0.406$ とする。さらに、乾燥土の粘着力 C_a は、(6) 式を変形した式 $C_a = C / \exp(-0.406 S_r)$ により計算して 0.75 ton/m^2 とする。このような土質からなる傾斜角 $\theta = 32^\circ$ 、土層厚 $H = 1.8 \text{ m}$ の斜面の安全率の飽和度による変化を計算して図示すると、図-3のようになり、飽和度が80%すなわち含水比が $w = eS_r/G_s = 46.8\%$ になると $F=1$ となって崩壊が発生することがよみとれる。これは、測

図-3 安全率の飽和度による変化 (海山町)

定時点での含水比が32%であったから、その時点より14.6%含水比が増加すると崩壊が発生することを示している。

これをもとに、 $1 \text{ m} \times \cos 32^\circ \times 1.8 \text{ m}$ (1.8m は土層厚) の土体中における14.6%の水分量を計算すると、 0.233 m^3 となり、これを単位面積の面における水高になおすと275mmとなる。すなわち、ここで対象とした斜面に $R=275 \text{ mm}$ の雨水が浸透すると崩壊が発生することになり、これが崩壊発生危険雨量となる。

以上の計算は初期飽和度が55%のときのものであるが、長雨の後などで飽和度が55%より高い場合を基準に崩壊発生危険雨量を計算すれば、それは前述の値より低い値になるし、乾燥していて飽和度が低い時点を基準にすれば、崩壊発生危険雨量は大きく算定される。従って、梅雨期や台風期には正確を期するため対象となる斜面の飽和度をたびたび測定し、それをもとに崩壊発生危険雨量を常に設定し直しておく必要がある。

次に、土壌含水比が前述の量だけ増加するのにどの位の時間がかかるかを考えてみると、それは土の透水性によってきまるであろう。

すなわち、前述のようにして求めた崩壊発生危険雨量に相当する水分量が浸透するのに要する浸透時間 t は浸透能 (浸透速度) を f とすると、次のように計算される。

$$t = R/f \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 R は崩壊発生危険雨量で単位は mm

f の単位は mm/hr

土中への雨水の浸透能 f は、土中の水分量の関数であり、降雨の初期には高い値を示すが、降雨時間の経過とともに急速に低下し、60分以上経過した後一定の浸透能すなわち最終浸透能に達する¹⁾。

この関係は Horton によって

$$f = (f_0 - f_c) e^{-kt} + f_c \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 f_0 : 初期浸透能

f_c : 最終浸透能

と与えられているもので、最終浸透能については、いろ

いゝな土壌に対する測定結果が得られており^{11,12)}、裸地斜面では10~15 mm/hr 程度となっている。

そこで、浸透時間の計算にあたっては最終浸透能の値を用いることにし、この調査斜面の最終浸透能を $f_c=12$ mm/hr と仮定すると、 $R=275$ mm であるから、浸透時間は約23時間と計算される。

以上は、崩壊が発生する斜面に着目して考察した結果であるが、さらに水分の供給され方、すなわち雨の降り方に着目して検討してみる。

雨の強さが前述の浸透能と同じく、12 mm/hr であり、それが23時間以上続くならば(図-4の降雨タイプII)、雨が降り始めてからちょうど23時間後に崩壊が発生することになり、それより強度の強い雨(タイプI)が降ったとしても、それが浸透するのに時間がかかるから、やはり崩壊が発生するまでには23時間程度の時間を要するものと思われる。

また、 $r=12$ mm/hr より弱い雨が長い時間続いた場合(タイプIII)には、23時間以上たっても累加雨量が275 mm に達するまでは崩壊が発生せず、275 mm を超えた時点で崩壊が発生することが予想される。さらに、雨量強度の弱い雨が長時間続いても、累加雨量が崩壊発生危険雨量に達しない場合(図-4のタイプIV)は崩壊が発生しないと判断される。

4. 崩壊の発生および非発生の事例

昭和59年7月12日から14日にかけて、三重県海山町で累加雨量166 mmの降雨があったが、その時は崩壊の発生がみられなかった。これは、雨の降りかたが図-4の降雨タイプIVに相当し降雨量が前述の崩壊発生危険雨量に達しなかったためであると思われる(図-5)。

つづいて、同年7月22日から24日にかけて累加雨量314 mmの豪雨があり、7月24日午前8時頃前記斜面の近くで崩壊が発生し、民家一棟が全壊すると

図-4 降雨タイプによる崩壊発生時刻のちがい(模式図)

図-5 崩壊非発生の事例(海山町)

図-6 豪雨による崩壊発生の事例(海山町)

いう被害があった。この時の雨量～時間関係と、前述のようにして計算した崩壊発生危険雨量とを図示すると、図-6のようになり、この図から累加雨量がちょうど崩壊発生危険雨量の計算値に達した頃に崩壊が発生したことが読み取れる。これは、図-4の降雨タイプⅢを示しているとみなされる。

つぎに、昭和57年8月の台風10号による災害の事例をとりあげ、崩壊発生危険雨量について考察してみよう。

昭和57年8月1日20～22時頃、台風10号による豪雨で、三重県美杉村の各地に崩壊・土石流が多数発生し、鉄道や道路に大きな被害が生じた。このとき、村当局は降雨の状況を判断しながら、第一次から第三次までの避難命令を発令し、住民の避難をスムーズに行ったため死者行方不明など人的被害は一人もなかった。

この豪雨により、美杉村で約470箇所の崩壊が発生した。それらのほとんどは谷頭部に発生した比較的小規模の表層崩壊であったが、崩壊土砂は小溪流を土石流となって流下し、鉄道や道路を寸断して物的被害を大きくした。

前述の崩壊発生危険雨量を求める際に用いる土質パラメーターは美杉村内の一斜面のものを代表して用いることとし、土の試料は、同村内に在る三重大学付属演習林の一斜面から採取した。土質試験の結果は次のとおりであった。

$$G_s=2.65, e=1.15, S_r=49\%, w=21.3\%, \\ C=0.63 \text{ t/m}^2, \phi=34^\circ$$

浸透能は前述の場合と同じで $f_c=12 \text{ mm/hr}$ とする。粘着力 C は前述のように、ここでも飽和度が100%のときには、0%のときの3分の2に減少すると仮定し $C_a=C/\exp(-0.406 \cdot S_r)$ より乾燥時の粘着力 C_a を求めて、 0.77 t/m^2 とする。

傾斜角 θ 、土層厚 H は崩壊地の平均的な値を採用し、 $\theta=35^\circ$ 、 $H=1.2 \text{ m}$ とする。

これらの数値を用いて、斜面の安全率の飽和

図-7 安全率の飽和度による変化 (美杉村)

度による変化を計算して図示すると、図-7のようになり、 $F=1$ となるときの飽和度は93%と推定される。さらに、崩壊発生危険雨量と土層飽和時の雨量を計算すると、それぞれ282 mmと、327 mmとなる。

7月31日から8月1日までの降雨の状況は図-8に示すとおりであった。この図に、前述のようにして計算した崩壊発生危険雨量を記入すると、降雨量が崩壊発生危険雨量に達した時点で避難命令が発令され、それより少しおくれて崩壊・土石流が多数発生したと判断される結果が示される。これは図-4の降雨タイプⅠを示しているものといえよう。

さらに、同じ台風10号による豪雨で発生した静岡市北西山間部の赤沢地区の斜面崩壊の例をあげてみよう。この崩壊が発生した近傍の斜面における土質調査の結果は次のとおりであった。

$$G_s=2.69, e=1.36, S_r=59\%, w=29.8\%, \\ C=0.65 \text{ t/m}^2, \phi=43^\circ$$

この地区の土の粘着力 C も前述のように、飽和度が

図-8 豪雨による崩壊・土石流の発生事例 (美杉村)

図-9 安全率の飽和度による変化 (赤沢)

100% のときには、0% のときの3分の2に減少すると仮定し、乾燥時の粘着力 C_d を 0.83 t/m^2 とする。

このような土質からなる傾斜角40度、土層厚1.5mの斜面の安全率の飽和度による変化を計算して、図示すると図-9のようになり、 $F=1$ となるとき飽和度は90%と推定される。これらの値をもとに、前述の方法によって崩壊発生危険雨量と土層飽和時の雨量を計算すると、それぞれ 268 mm と 354 mm となり、これを図示すると図-10のようになる。

さらに、この図に7月31日から8月3日までの降雨状況を記入すると、図-4の降雨タイプIIに類似した降雨型を示し、累加雨量(=浸透量)が先に計算した崩壊発生危険降雨量に一致した時点で崩壊が発生したことが読み取れる。

図-10 豪雨による崩壊発生事例(赤沢)

5. あとがき

以上のように、本論文では土層の飽和度をパラメータとした安全率の計算式を導き、 $F=1$ となるとき飽和度から崩壊発生に要する土層水分量を計算して崩壊発生危険降雨量を算定するとともに、さらに雨水の浸透量との関係を考慮して、雨の降りかた(累加雨量のふえ方)を4つのタイプに分類し、それと崩壊発生危険降雨量との関係から警戒避難雨量の設定および避難時刻の決定のための手がかりを得ようと試みた。なお、ここで試みた表層崩壊発生予測の手法は、比較的簡単に実施できることを目標にしたため、斜面のモデルを単純化していること、浸透能を一定にしていることなど、前提条件に多少の問題点を含んでいるといえる。

また、この方法を実地に適用するにあたっての問題点は、第一に安全率の値が、土質パラメーター、特に測定方法によって異なった値を示す C 、 ϕ によって大きく左右されることであり、第二に雨量や浸透量の流出による損失量を考慮していないことであろう。

今後、これらの問題点について検討を重ね、一層適切な表層崩壊発生予測の手法を確立したいと思っている。

なお、本研究を行うにあたっては、三重大学農学部林抽郎助教授および(財)林業土木コンサルタンツから有益な示唆をいただき、また同コンサルタンツからは降雨資料など各種資料を提供していただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 田中 茂：豪雨による崖崩れの問題点，地すべり，Vol. 10, No. 3, pp. 15~20, 1974.
- 2) 鈴木雅一，小橋澄治，がけ崩れ発生と降雨の関係について，新砂防，No. 121, pp. 16~26, 1981.
- 3) 丸井英明：自然斜面における表層崩壊の研究，京大学位論文，1981.
- 4) 沖村 孝：潜在崩土層分布を利用した表層崩壊発生位置に関する研究，新砂防，No. 124, pp. 9~18, 1982.
- 5) 沖村 孝：山腹表層崩壊発生位置の予知に関する一研究，土木学会論文報告集，331号，pp. 113~120, 1983.
- 6) 沖村 孝：地形要因を利用した豪雨による山腹崩壊発生位置の予知システムについて，土木学会論文報告集，338号，pp. 131~138, 1983.
- 7) 道上正規，小島英司：豪雨によるがけ崩れの発生予知について，第17回自然災害科学総合シンポジウム論文集，pp. 131~134, 1980.
- 8) 風間秀彦：土質工学的な短期のゆらみと崩壊に対する降雨条件，文部省科学研究費自然災害特別研究「地盤の劣化とその地域特性を考慮した崩壊危険度の評価に関する研究」(代表 芥川真知) 成果報告書，pp. 162~186, 1985.
- 9) 矢田部龍一，榎 明潔，八木則男：危険降雨量にもとづく斜面崩壊発生時期の予知に関する検討，地すべり，Vol. 23, No. 2, pp. 1~7, 1986.
- 10) 駒村富士弥：雨水の浸透による表層崩壊の発生，地すべり学会シンポジウム「土砂災害の実態と予知・予防上の問題点」論文・資料集，pp. 51~52, 1987.
- 11) 日野幹雄，塚本良則 他訳：カークビー新しい水文学，朝倉書店，pp. 41~61, 1983.
- 12) 中野秀章：森林水文学，共立出版，1976.
- 13) 瀬尾克美，船崎昌継：土砂災害(主に土石流的被害)と降雨量について，新砂防 89, pp. 22~28, 1974.

(原稿受理日 昭和62年9月24日)