

実効雨量の半減期決定の試み

中部大学工学部 正会員○杉井俊夫
 中部大学工学部 正会員 山田公夫
 岐阜大学工学部 正会員 宇野尚雄
 佐藤道路(株) 石田英将 日起建設(株) 加藤幸宏

1. まえがき

降雨の指標として現在、通行規制等に使用されているものに時間雨量、連続雨量、実効雨量がある。連続雨量は降り始めからの雨量を累計したものであるが、降り始めを定義することが問題となり、また先行降雨を考慮する必要があるために最近では実効雨量の考え方が用いられるようになってきた。なお、実効雨量を用いるに当たり、半減期をいくつに設定するか常に問題となる。そこで本研究は、将来半減期を決める際に重要となる斜面の様々な要因との因果関係を明らかにする以前に、数値実験をもとに実効雨量の適切な半減期の決定方法について検討した。なお、実効雨量 (R_w) とは、時間雨量に累積していく連続雨量に、遠い過去の時間雨量ほどその効果は小さいとして低減係数を乗じて、新しい雨量を重視した時間雨量の総和として次式で与えられる。

$$R_w = \sum_{i=1}^n a_i R_i = a_1 R_1 + a_2 R_2 + \dots + a_i R_i \quad (1) \quad a_i = 0.5^{i/T} \quad (2)$$

R_i : 時間雨量, T : 半減期, i : 時間

2. 研究方法

今回は、正確な崩壊時刻が得られることや、同一斜面を異なる降雨で崩壊させることができることから数値実験により降雨により斜面を崩壊させた。また、愛知、岐阜、長野のアメダスのデータ (1975~1985年) から降雨災害の発生の可能性がある全 55 個の降雨データをピックアップし、実効雨量の特徴によるタイプ分けを行った。その中から実効雨量が長期にわたり増加していくものを 2 つ、後半にピークがくるものを 2 つ、前半から増加しているものを 1 つと、5 つのタイプを使用する降雨データとした。なお、解析では半減期を 3, 6, 9, 12, 24, 48, 96 時間とした場合について実効雨量を計算している (図-1)。

斜面を崩壊させる方法としては、図-2 に示した斜面を対象とし、差分法による飽和・不飽和浸透流の解析を用い、透水力を考慮した安定解析を行うことにより想定した斜面を崩壊させることとした。

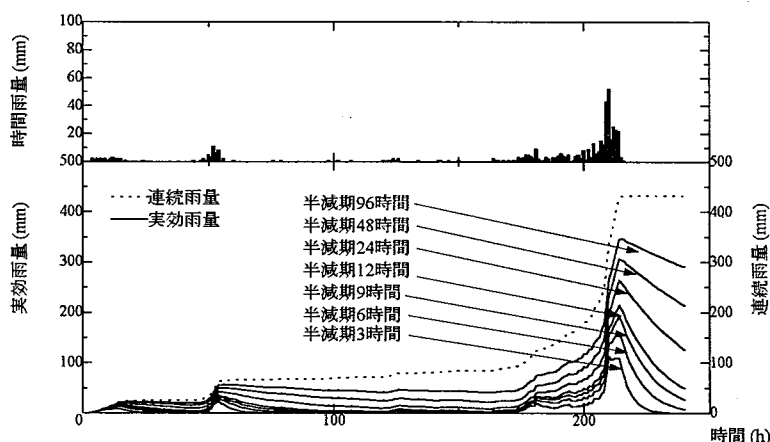


図-1 降雨指標

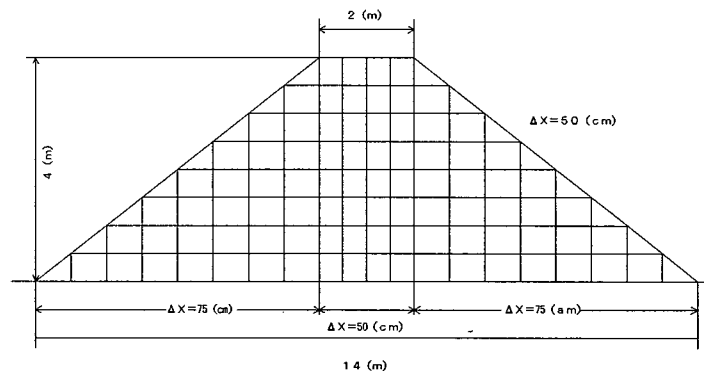


図-2 斜面モデル

飽和・不飽和浸透解析の基礎方程式を次式に示す。

$$c \cdot \frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h_p}{\partial z} + k_z \right) \quad (2)$$

ここに、 C : 比水分容量、 h : 間隙水圧

k_x 、 k_z : 水平、鉛直方向の透水係数

安定計算は透水力を考慮した Bishop 法で行った。

$$F_s = \frac{\sum \{c' + (p - u_w) \tan \phi'\}}{\sum \Delta w \cdot \sin \alpha} \quad (3)$$

$$m_\alpha = \cos \alpha (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi' / f_s) \quad (4)$$

ここに、 $P = \Delta W / \Delta X$ 、 $\Delta W = \gamma_{sat} \times \gamma_t \times Z_2$ 、 $U_w = \gamma_w \times h_p$

c' : 粘着力、 ϕ' : 内部摩擦角、 ΔW : スライス部分の自重

α : スライス底面に対する法線の鉛直角

本研究では、底面が 14m、天端幅は 2m、堤高を 4m とする法面勾配 1 割 5 分の形状の斜面を用い、粘着力 $c = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 21.8^\circ$ とし、体積含水率とサクシオン、透水係数の関係を図-3に示す、浸透による粘着力、内部摩擦角の低下は考慮せず一定とした。

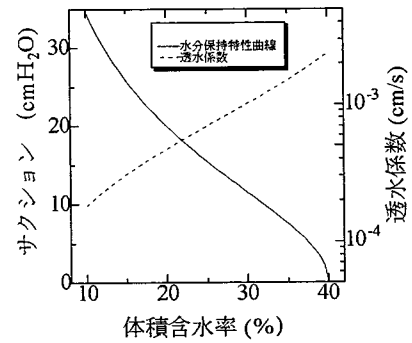


図-3 斜面の浸透特性

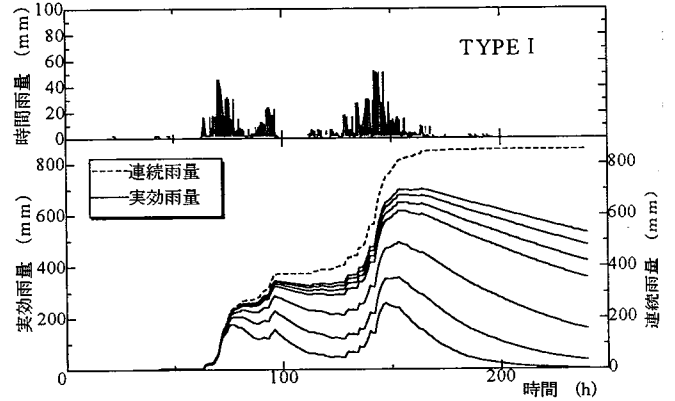


図-4.1 TYPE I

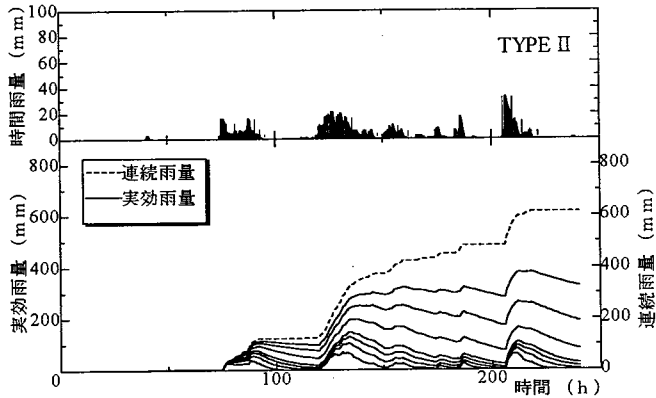


図-4.2 TYPE II

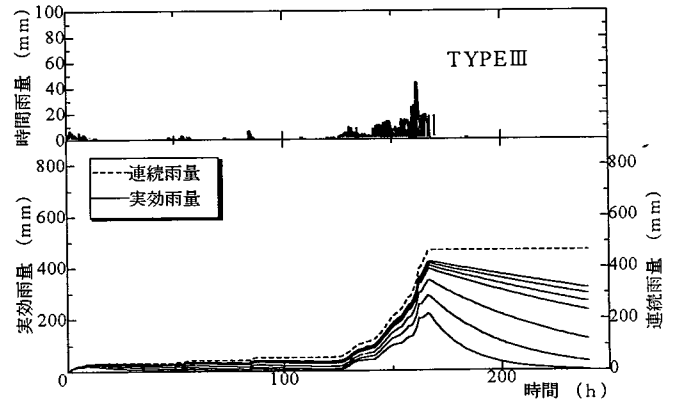


図-4.3 TYPE III

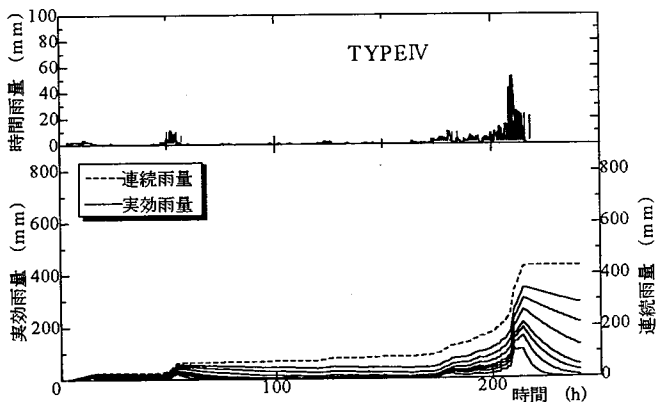


図-4.4 TYPE IV

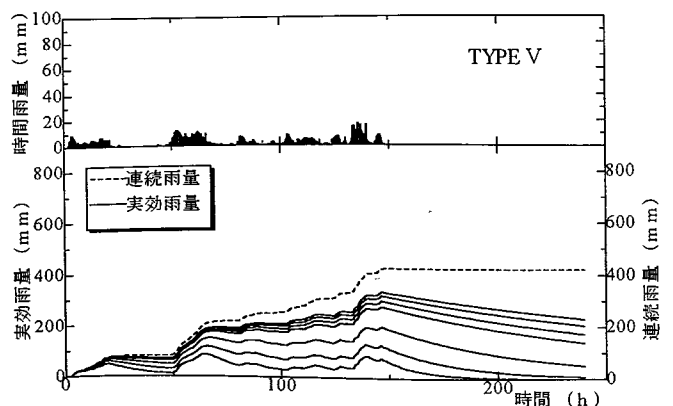


図-4.5 TYPE V

3. 降雨タイプ別の崩壊時刻と半減期の関係

図-4.1~4.5 に抽出した5タイプの降雨を示す。図-5は安定計算による最小安全率が1を割った時刻を崩壊発生時刻とみなし、崩壊時の実効雨量と半減期の関係を降雨タイプ別に示したものである。ここで、半減期3時間では殆どのパターンが120mm程度での実効雨量により崩壊を起こしており、その後も、半減期の増加とともにほぼ同じ様な割合で増加傾向にある。しかし、タイプVについては半減期9時間までは長時間連続する小規模な降雨により崩壊が起こっており、半減期12時間で他の降雨効果のグラフと並び最小の限界値の逆転が生じる。タイプVのような少量の雨量でも連続する降雨の場合には先行降雨を重視する必要があると考えられる。

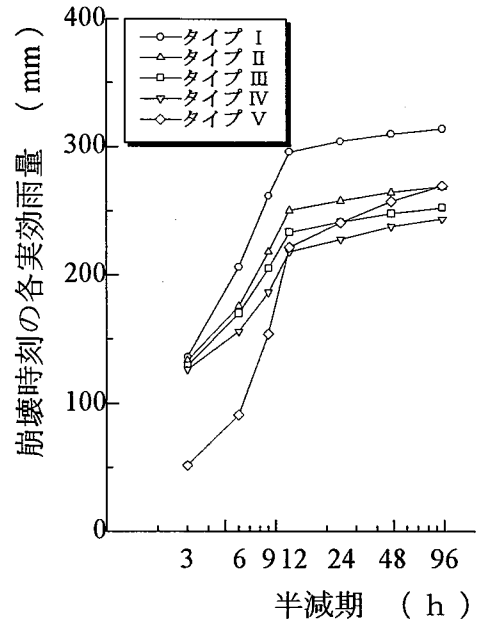


図-5 崩壊時刻の各実効雨量

4. 半減期決定のための最適化

数値実験により、同一斜面条件の崩壊時間を正確に得ることができる。この時刻の実効雨量を「限界実効雨量 (Rwc)」とし、同一半減期ごとの限界実効雨量を5つの降雨パターンについて求め、同一半減期において限界実効雨量の最小のものを「最小限界実効雨量」と呼ぶことにする。

「最小限界実効雨量」は規制基準雨量となるため、これ以下で崩壊が生じてはならない。本研究では下記のような基準を設定し最適化を測ることとし、図-6に示すA1, A2, Bの面積による式(5)、(6)の指標により検討した。

「最小限界実効雨量」は規制基準雨量となるため、これ以下で崩壊が生じてはならない。本研究では下記のような基準を設定し最適化を測ることとし、図-6に示すA1, A2, Bの面積による式(5)、(6)の指標により検討した。

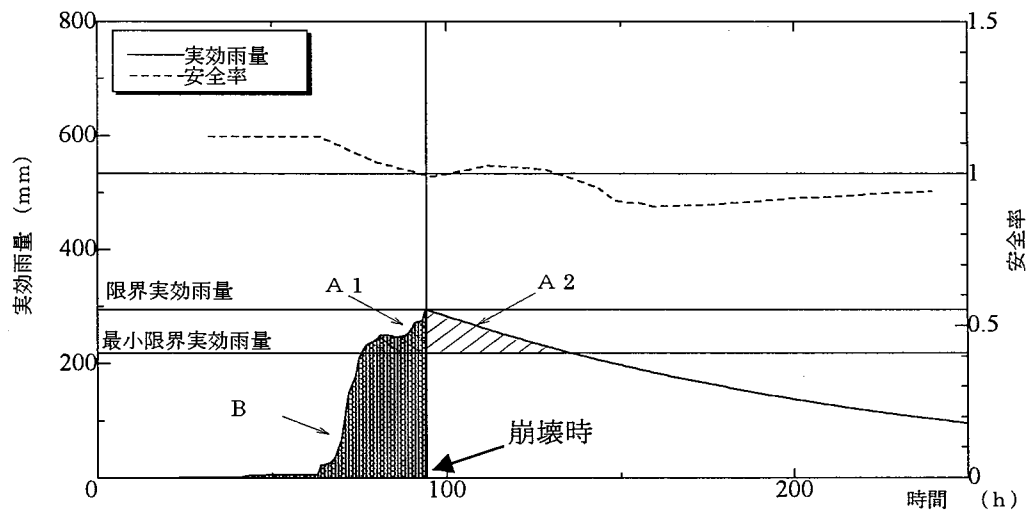


図-6 安全率と実効雨量の経時変化

- 1) 限界実効雨量に達する以前に斜面崩壊しなく、限界値を越えると必ず崩壊する場合を適中率とする。(的中率は限りなく100%に近くなければならない。)
- 2) 限界実効雨量と崩壊時の実効雨量及び時間的誤差「空振り率」は小さいほうが望ましい。
- 3) 降雨停止後の規制解除を考えた指数「崩壊後の超過率」は小さいほうが望ましい。

$$AR_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (A_{1i}/B_i)}{N} \quad (5) \quad AR_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (A_{2i}/B_i)}{N} \quad (6)$$

適中率は、崩壊が発生する危険降雨を決定することになるため大変重要な考えであり、限界実効雨量に達した後に必ず崩壊し、限界実効雨量に達しない場合は、必ず崩壊しないとすると、安全側からみた的中率はかぎもなく100%に近くならなければならない。よって今回は的中率100パーセントのみを考えることとし、まず的中率から最適化を進めていく。同一半減期ごとの最小限界実効雨量からの的中率を出したものが図-7である。グラフから半減期3時間、半減期6時間は5つの降雨パターンのうち2つが最小限界値に達しても

崩壊しなかったための的中率 60%となる。今回 100%のみを考えているため半減期 3、6 時間は不適となり、それ以降の半減期 9,12,24, 48,96 時間について検討する。限界値を低くすることにより的中率を上げることが出来るが、限界値に達してもなかなか崩壊しない場合、安全率が過大すぎることになる。最小限界実効雨量と崩壊時の実効雨量の差が小さいほど最適と考え、本研究ではこの割合を「空振り率」(AR_1)と呼ぶこととし、グラフにしたものが図-8である。グラフから単調減少の関係が見られ、半減期が長いほど最適となる。しかし、半減期が大きくなるほど先行降雨の影響が大きくなり、降雨が止んでも限界値を下回らないこととなり、規制解除という面から考察すると、最適と言い難い。そこで降雨が止んだ場合なるべく速く限界値を下回る半減期が必要となる。

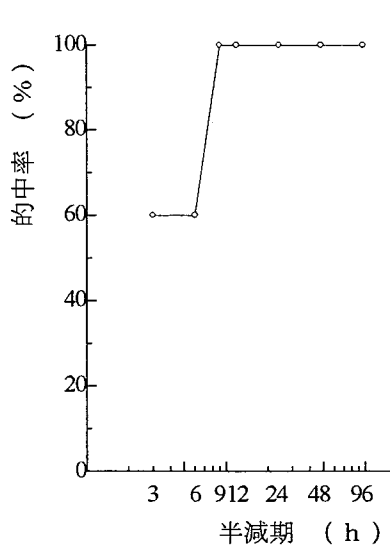


図-7 適中率

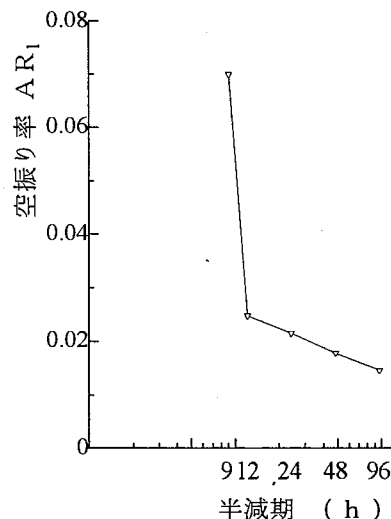


図-8 空振り率

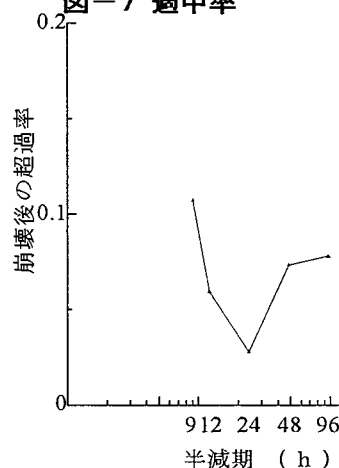


図-9 崩壊後の超過率

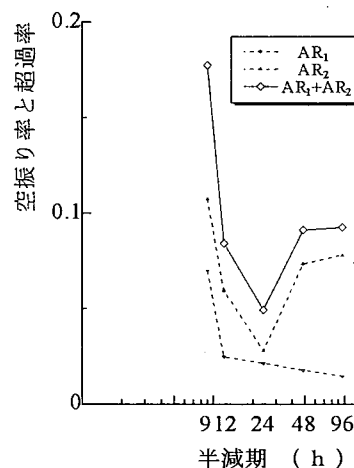


図-10 総合的な半減期の評価

本研究では「崩壊後の超過率」(AR_2)と呼ぶ規制解除を考えた指数を考え、この値は小さい方が望ましいと考えた。超過率をグラフにしたものが図-9である。崩壊後の超過率には最小値となる半減期が存在することが示されている。適中率が同じ場合、空振り率が小さく、かつ崩壊後の超過率も小さい方が望ましいことから、崩壊後の超過率と空振り率の和 (AR_1+AR_2)を示したのが図-10である。これより今回の斜面条件においては、先に示した3つの条件に対して最適値を示す半減期 24 時間が妥当であると判断された。

4. まとめ

今回、5つのパターンの降雨についてであるが、数値実験により同一斜面を崩壊させ、有意な半減期の決定法について試みた。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 半減期を決定する場合の基本的な指標(的中率、空振り率、崩壊後の超過率)を提案し、それぞれ半減期との関係を示した。
- 2) 半減期が大きくなると実効雨量は単調増加となり、的中率が上昇、小さいと逆になることが確認された。
- 3) 降雨が止んでからの超過率は規制解除に大きく関係し、半減期に対して最小値が存在する。
- 4) 今回の斜面の設定と同一斜面において、有効な半減期は 24 時間であることが得られた。

【参考文献】1) 気象協会：アメダス降雨量データ、1976-1988 2) 杉井俊夫・宇野尚雄・亀井雄介：浸透解析における降雨浸透の取り扱い方について、不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム, pp. 147-150, 1993. 3) 宇野尚雄・田中進・杉井俊夫：洪水時の堤防の安定性変化、不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム, pp. 285-292, 1987. 4) 鈴木雅一：降雨モニターによる斜面崩壊発生時の予測(レビュー)、地すべり学会関西支部シンポジウム“地すべり・崩壊斜面の予測予知”論文集 1991. 5) 杉井俊夫・山田公夫・宇野尚雄：斜面要因にみあう有効雨量の算定、地盤学会「降雨と地震から危険斜面を守る地盤工学に関するシンポジウム」1997.