

73 斜面管理システムの構築にむけて

パシフィックコンサルタンツ(株) ○植村昌一・平松晋也

日本道路公団試験研究所 前野宏司・成瀬隆弘・松山裕幸

1. はじめに

わが国は国土の約75%が山岳地によって占められ、また、地形が急峻なこともあり、毎年梅雨期や台風期になると土石流や地すべり及び山腹崩壊等の土砂災害が頻発する。高速道路の総延長は5000kmを超え、国土の地形特性上、山岳部を通過する区間も多く、このような区間においては、豪雨時に崩壊の危険性が高まる斜面も多く存在するのが現状である。

本報では、高速道路における土砂災害による被害を最小限にすべく、豪雨時における崩壊危険箇所を迅速かつ正確に把握し、道路の通行止め及びその解除時刻を的確に判断することが可能となる斜面管理システムを構築することの一環として、実現象の基本的な性質を考慮しつつ計算時間の短縮化を可能にする崩壊発生予測モデルを作成し、同モデルの現地斜面への適用性及びモデル自体の妥当性の検討を行うこととした。

2. モデルの構築

2.1 モデルの概要

崩壊発生予測モデルの基本構成は図-1に示すとおりである。まず、流域を平面的にメッシュ分割(メッシュ長:A)し、表土層厚(Z)を高さとする鉛直土柱を各メッシュ毎に設定し、これを解析の基本要素とする。そして、この各基本要素に与えられた雨水を入力値として、「雨水流動モデル」により、時間的に変化する各基本要素の土壌水分状態(主に飽和度(Sr))や地下水深(H)を再現する。この土壌水分状態や地下水深(H)を「斜面安定解析モデル」に適用することにより、リアルタイムで斜面の崩壊発生に対する危険度を知ることが可能となる。

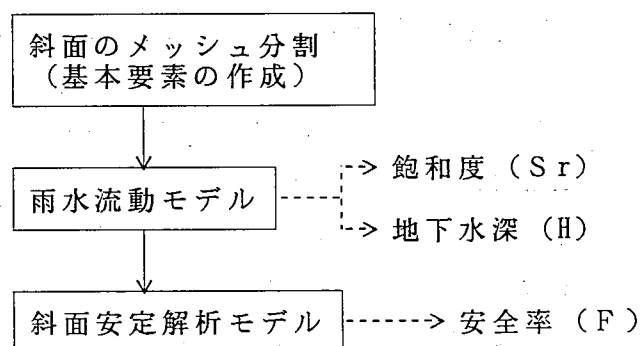


図-1 モデルの基本構成

2.2 雨水流動モデル

寺本¹⁾らは、地下水上昇実験により「飽和度(Sr)と地下水深(H)の関係」を特定し、この関係と(1式)及び(2式)を用いて、地下水深(H)の挙動を追跡し、その妥当性を確認した(雨水流動モデル)。

この手法は、不飽和領域へと拡張されたダルシー則を数值的に解く手法と比べ、計算時間が大幅に短縮されることから、表層崩壊発生予測モデルには、寺本らが提示した「雨水流動モデル」を適用することとした。

$$W \cdot \frac{\partial Sr}{\partial t} = \frac{\partial Q_x}{\partial X} + \frac{\partial Q_y}{\partial Y} + r \quad \dots\dots\dots (1式)$$

$$Q_i = H \cdot \sin \theta \cdot a \cdot K_s = f(Sr) \cdot \sin \theta \cdot a \cdot K_s \quad \dots\dots\dots (2式)$$

ここに、 H :地下水深(m), θ :斜面の傾斜角度, K_s :飽和透水係数, $f(S_r)$: $H-S_r$ 曲線により得られる飽和度(S_r)に対する地下水深(H), Q_x, Q_y : X 軸, Y 軸方向の水分移動量 (m^3/S)である。

2.3 斜面安定解析モデル

崩壊は、3次元的な土塊の移動現象であり、再現精度の高いモデルを構築するためには、単位要素に働く力を3次元的に取り扱うことが必要である。このため、本モデルでは、3次元ホブランド法²⁾を採用し、(3式)を用いて斜面の安定性の検討を行った。この斜面安定解析手法の概念を図-2に示す。

$$F_s = \frac{\sum \tau}{\sum S} = \frac{\sum \{C' \cdot A_b + (W_s \cdot \cos DIP - U) \cdot \tan \phi'\}}{\sum (W_s \cdot \sin DIP)} \quad \dots\dots\dots(3式)$$

ここに、 τ :せん断抵抗力の成分 S :斜面方向のすべり力の成分 F_s :斜面の安全率, W_s :要素柱重量, A_b :すべり面の面積, DIP :要素柱の傾斜角, U :間隙水圧, C' :すべり面における土の粘着力, ϕ' :すべり面における土の内部摩擦角である。

なお、実際の計算では、 X, Y 方向のせん断抵抗力(τ_x, τ_y), 斜面方向のすべり力(S_x, S_y)をそれぞれ算出し(図-2)、(3式)を適用した。

(3式)中の間隙水圧(U)は、雨水流動モデルから各基本要素毎に得られる地下水深(H)を基に、(4式)により与えられる。

$$U = A_s \cdot H \cdot \gamma_w \quad \dots\dots\dots(4式)$$

ここに、 A_s :すべり面の正射影の面積(m), γ_w :水の単位体積重量(t/m^3)である。

また、要素柱重量(W_s)は、飽和度によって変化するものとし、その値は、雨水流動モデルから各基本要素毎に得られる飽和度(S_r)を用いた(5式)により与えられる。

$$W_s = A_s \cdot Z \cdot (\gamma_d + \gamma_w \cdot n \cdot S_r) \quad \dots\dots\dots(5式)$$

ここに、 Z :土層厚(m), γ_d :乾燥度の単位体積重量(t/m^3), n :土の間隙率(cm^3/cm^3)である。このようにして(3式)により得られる安全率(F_s)が1.0以上の場合には崩壊の発生が見られず、1.0未満となった時点で崩壊が発生したものと見なされる。

3. モデルの再現計算

3.1 検討対象斜面の概要

ここで提示したモデルを図-3に示す中央自動車道沿線の小斜面に対して適用した。当該斜面の南西部斜面では、平成3年8月の台風12号時に表層崩壊が発生しており、この時の総雨量は408mmに達し、最大時間雨量は62mm/hrを記録し

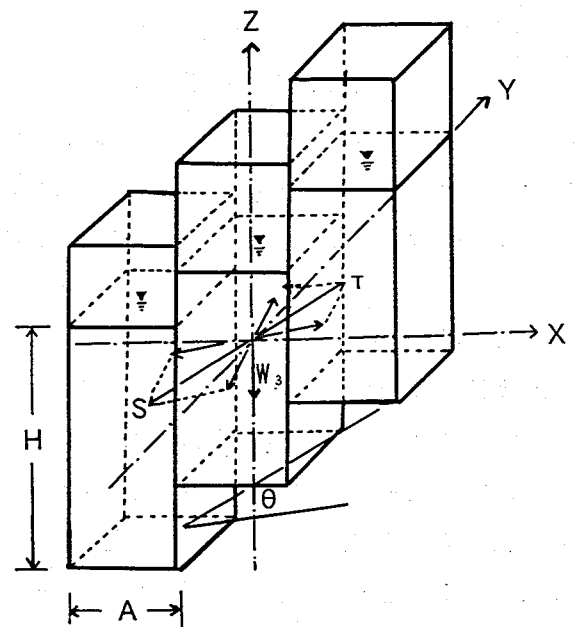


図-2 3次元ホブランドの概念

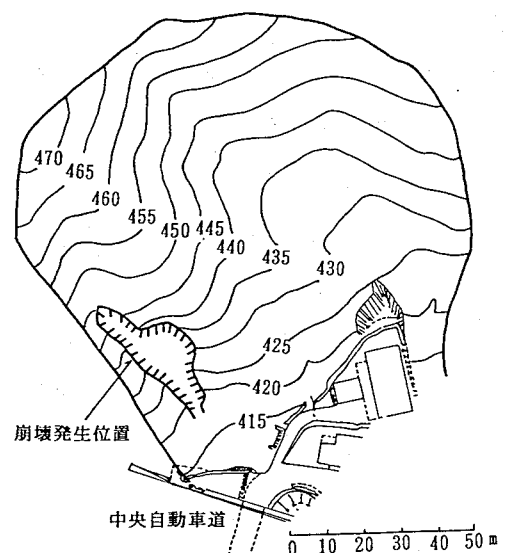


図-3 調査対象斜面

た。地質は中新世西桂層郡の泥岩を挟む礫岩層よりなっている。一方、植生は、アカマツ林が多く分布し、崩壊地源頭部付近にはクヌギ、コナラ等の広葉樹が点在している。

3.2 計算条件の設定

再現計算を行うにあたっての計算条件を表-1に示す。計算入力条件となる降雨波形としては、図-4に示す平成3年8月の台風12号時の実績降雨波形を採用した。斜面の分割幅(A)は、メッシュによる地形の再現精度並びに既往崩壊地の規模等を勘案し、5mとした。表土層厚は、土研式簡易貫入試験及びレリー波探査結果を基に0.4m～2.8mの範囲内で各基本要素毎に0.1m間隔で与えた。土質強度(C, ϕ)については、当該斜面内から得られた飽和状態時の試料に対して行った一面せん断試験結果を用いた。また、土層全体の平均飽和度(Sr)と地下水深(H)との関係式は、既往研究¹⁾において地下水深上昇実験から得られた関係式を用いた。その他の計算条件は、当該斜面内より得られた試料に対する土質試験結果を与えた。

表-1 再現計算条件

降雨波形	平成3年8月台風12号時
メッシュ幅	5 m
土質強度	C : 0.8 t/m ² ϕ : 26.5 度
乾燥土の単位堆積重量	RDM=1.49 t/m ³
土の間隙率	n=0.471
地下水深-飽和度関係	Sr < Src のとき、H=0 Src ≤ Sr ≤ 0.951 の時 $H = D \cdot (-0.02 + 34.63X - 7.61 \cdot 10^2 \cdot X^2 + 8.96 \cdot 10^3 \cdot X^3 - 5.04 \cdot 10^4 \cdot X^4 + 1.07 \cdot 10^5 \cdot X^5)$ 0.951 < Sr < 1.0 の時 $H = D \cdot (0.854 + 0.6849 \cdot Sr)$

3.3 再現計算結果

実際に崩壊が発生した斜面における地下水深(H)及び安全率(F)の挙動をそれぞれ図-5、図-6に示す。計算開始より計算開始20.0時間目までは地下水深(H)はみられない(図-5)。この範囲内においては、安全率(F)は微量ながら低下しているが(図-6)、これは雨水の山腹斜面内部への浸透に伴う自重の増加によるものである。経過時間20.5時間目以降、地下水深(H)は急激に上昇し、それに伴う間隙水圧(U)の増加により安全率(F)は大きく低下する。その後、地下水深(H)が0.49mまで上昇すると(計算開始22.0時間目)、安全率(F)は1を下回り、崩壊が発生する。豪雨の終了後(計算開始36時間目)、地下水深(H)の低下とともに、安全率(F)は回復する。これらより、安全率(F)の挙動、ひいては山腹崩壊発生の有・無には、地下水深(H)が大きな影響を及ぼしていることが判る。

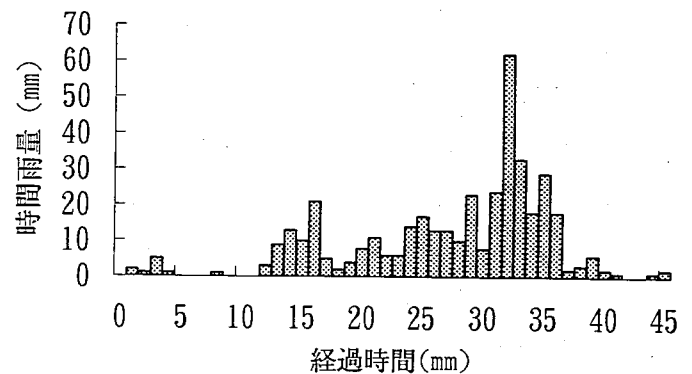


図-4 降雨波形(平成3年8月 台風12号時)

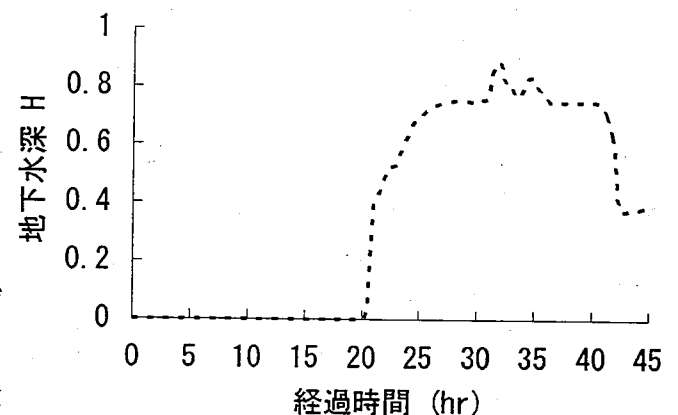


図-5 地下水深(H)の挙動

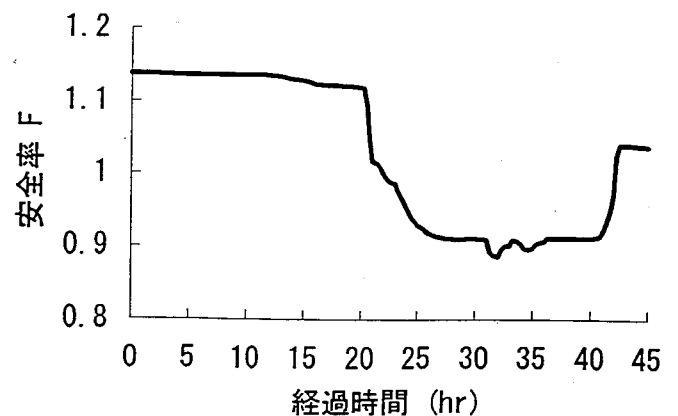


図-6 安全率(F)の挙動

図-7にシミュレーションの結果、崩壊が発生すると判断された斜面と実際に崩壊が発生した斜面との比較を示す。図中、濃色で示されたメッシュは崩壊発生斜面を表し、印は、実際に崩壊が発生した斜面を表す。北東部斜面において、安全率(F)が1を下回るにもかかわらず、実際には崩壊が発生していない斜面が多少見られたものの、斜面の南西部の実際に発生した崩壊の状況を良好に再現しており、本モデルの妥当性が伺える。

つぎに、崩壊発生斜面の累加状況を示す図-8より、計算開始31.5時間目から32.0時間目にかけて崩壊が多発する結果となり、この時刻は降雨がピークを示す時刻とほぼ一致していることが判る(図-4)。通常、「土石流や崩壊はピーク雨量の発生前後に多発する^{3) 4)}」と言われているが、これらのことから、本モデルの妥当性が確認された。しかしながら計算開始直後より安全率(F)が1を下回る斜面が若干ながら(5斜面)存在し、この点に関しては実現象とは異なる結果であった。

4. おわりに

崩壊発生位置、時間を的確にかつ迅速に予測することを目的としたモデルを構築し、その再現性を検討した結果、「崩壊発生場所」、「崩壊多発時刻」の点に関しては、再現計算結果と実現象との整合性は良好であり、本モデルの妥当性が確認された。しかしながら、計算開始直後より崩壊発生斜面(安全率が1を下回る斜面)が存在するという問題点も見られた。一般に粘着力(C)は、飽和度(S_r)の増加とともに低下すると言われている⁵⁾。すなわち、

飽和状態時の粘着力(C)が最も小さな値をとることになる。計算開始時の飽和度が低い状態時においても飽和時の粘着力(C)を用いて安全率(F)を算出しているため、安全率(F)が過小評価されることになり、実現象とは異なる再現計算結果になったものと考えられる。今後、飽和度(S_r)と粘着力(C)の関係をモデルに適用することにより、再現精度の向上を図り、モデルの実用化に取り組むことが重要である。

引用文献

- 1) 寺本・鈴木・成瀬・松山・平松: 飽和度変化に伴う地下水深の消長を考慮した雨水流動モデルの現地流域への適用について. 新砂防, 197, 1995
- 2) 建設省土木研究所砂防部地すべり研究室: Hovland法による地すべり三次元斜面安定解析手法. 土木研究所資料 第2265号 昭和60年11月
- 3) 渡辺・徳山・中山・二宮・大八木: 土石流警戒避難基準雨量設定の一手法-高知県仁淀川流域を対象として-. 新砂防, 110, 1990
- 4) 沢田・諏訪・水山・高橋: 土石流発生時刻の予測. 「土石流の発生及び規模の予測に関する研究」文部省科学研究費報告書, 1990
- 5) 丸井英明: 自然斜面における表層崩壊の研究. 京都大学学位論文, 1981

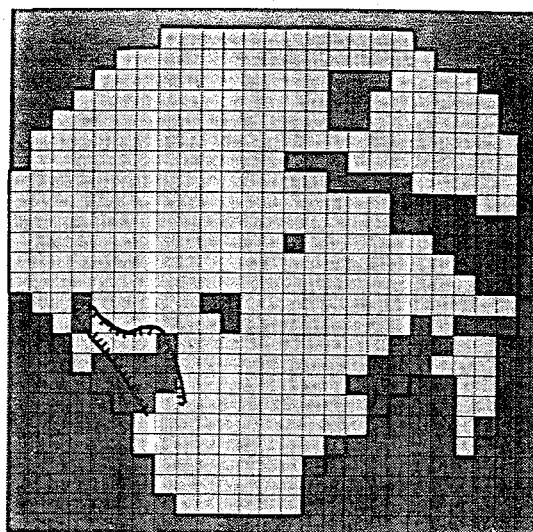


図-7 崩壊発生斜面の分布状況

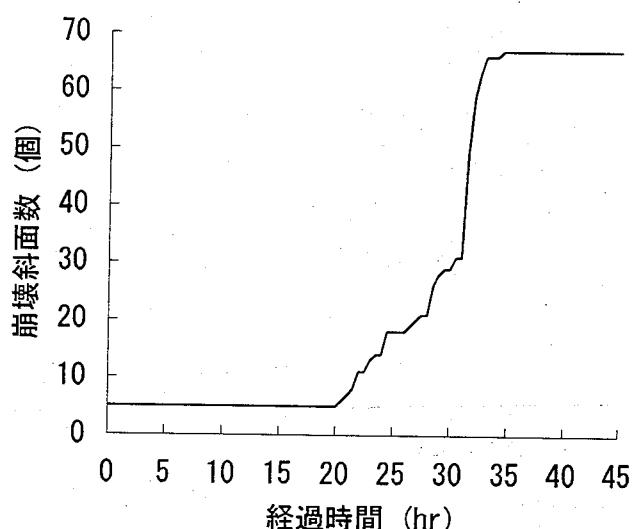


図-8 崩壊発生斜面の累加状況