

飽和度分布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

日本道路公団試験研究所 ○成瀬隆弘
 パシフィックコンサルタンツ(株) 平松晋也

1. はじめに

森林山腹斜面上で生起する表層崩壊を「数値シミュレーションモデル」を用いて予知・予測しようとする上で、土壌内部での雨水の動き、特に地下水深の挙動をいかに実現象に忠実にモデル化するかがその解析精度を支配することになる。本研究では、前報¹⁾において現地流域内より採取された大型不攪乱試料(φ = 20cm, L = 100cm)に対する人工降雨実験結果を基に得られた地下水深と飽和度との関係を用いて雨水の浸透・流下過程のモデル化を行うとともに、現地流域への適用性の検討を行った。

2. 調査対象斜面の概要

対象斜面は、平成3年8月の台風12号時に表層崩壊の発生した中央自動車道大月インター近傍の流域面積が約1.3haの小斜面(図-1)である。この時の総雨量は408mmに達し、最大時間雨量は62mm/hrを記録した。地質は、中新世西桂層郡の泥岩を挟む礫岩層より成っている。一方、植生は、斜面内の大部分はアカマツ林によって占められ、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。

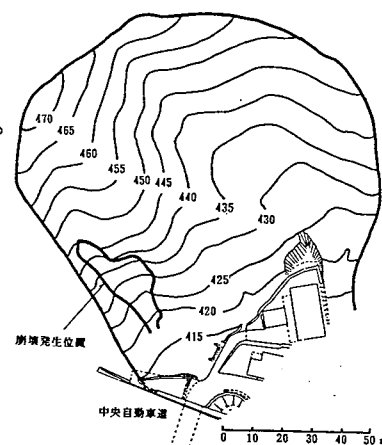


図-1 調査対象斜面

3. 雨水流動モデルの現地流域への適用性の検討

3.1 雨水流動モデルの概要

山腹斜面内部での雨水の挙動は、不飽和領域へと拡張されたダルシ一則を数値的に解くことによって追跡される²⁾のが一般的である。しかしながらこれらのモデルを広範囲にわたって適用しようとする場合、計算時間は莫大なものとなりその実用化は困難である。このためここでは、現象自体が有する基本的性質を損なうことなくモデルの簡易化をめざした【雨水流動モデル】を提示した。

3.1.1 モデルの基本構成

本モデルは、図-2に示したように、対象斜面を平面2次元的にメッシュ分割し、これによって得られた単位土柱を解析上の基本要素としている。この各基本要素に与えられた雨水は、土層中を浸透し、やがて基岩面へと到達した後に地下水面を形成しながら飽和側方流として各基本要素間を平面2次元的に移動することになる。

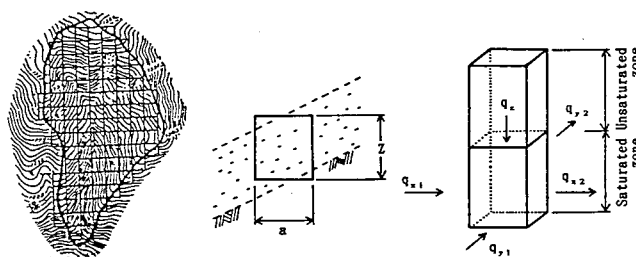


図-2 雨水流動モデルの基本構成

3.1.2 飽和側方流出過程の追跡

飽和側方流の追跡は、既往研究成果³⁾を勘案し、(1)~(2)式を用いて行った。また、各基本要素における飽和度の経時変化は、(1)式を(3)式に示したように差分展開することによって求められる。

$$W \cdot \frac{\partial S_r}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial X} + \frac{\partial q_y}{\partial Y} + r \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

$$S_r^{t+\Delta t} = S_r^t + \frac{\Delta t}{D \cdot a^2 \cdot W} (Q_{x1} + Q_{y1} - Q_{x2} - Q_{y2}) + \frac{\Delta t}{D \cdot W} \cdot r \dots\dots (3)$$

ここに、 H ：地下水深、 θ ：斜面の傾斜角度、 K_s ：飽和透水係数、 $S_r^{t+\Delta t}$ 、 S_r^t ：各基本要素における $t + \Delta t$ 時及び t 時の土層全体の平均飽和度、 D ：各基本要素における表土層厚、 a ：単位斜面の分割幅、 W ：間隙率、 r ：降雨量、 Q_{x1} 、 Q_{y1} ： X 軸及び Y 軸方向の単位斜面内への流入量、 Q_{x2} 、 Q_{y2} ： X 軸及び Y 軸方向の単位斜面内からの流出量である。

3.1.3 地下水深(H)と飽和度(S_r)との関係

(2)～(3)式を用いて飽和側方流の追跡を行おうとする場合、地下水深(H)と飽和度(S_r)との関係を予め定義しておく必要がある。ここでは、前報¹⁾において図-1の崩壊地源頭部付近より採取された大型不攪乱試料に対する人工降雨実験結果を基に得られた地下水深と飽和度との関係 ($H \sim S_r$ 曲線：図-3参照)を採用した。図-3中には、 $H \sim S_r$ 関係を直線とみなした場合の結果をも併記した。両関係ともに地下水深の発生限界飽和度を同値 ($S_c = 0.787$) と設定しているため、地下水深の発生開始時刻や土層全体が飽和状態となるのに要する時間は同時刻となるものの、その間の地下水深の挙動に着目すると、曲線関係とみなした場合の方が同一の飽和度に対する地下水深が大となる。

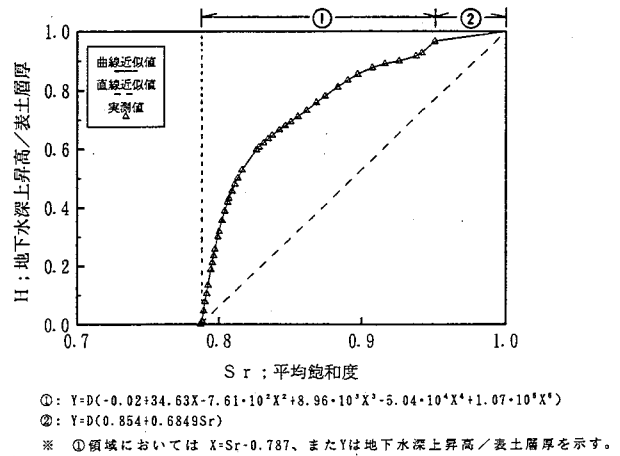


図-3 地下水深(H)と飽和度(S_r)との関係

3.2 現地流域への適用

ここで提示した【雨水流動モデル】を図-1の小斜面に対して適用した。計算条件となる降雨波形は、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。また、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。その他の計算条件は、当該斜面内に対して実施された土質試験結果を与えた。

対象斜面内より各斜面形状(谷型斜面・平行型斜面・尾根型斜面)別に代表斜面として抽出した基本要素の地下水深の挙動を図-4に示す。最大地下水深の発生時間は、周辺斜面域からの集水域となる谷型斜面部で最も早く((5,10)斜面：降雨開始20.5時間後)、次いで平行型斜面部((11,14)斜面：降雨開始26.5時間後)→尾根型斜面部((7,11)斜面：降雨開始32.0時間後)の順となっている。この谷型斜面部での最大地下水深(表面流の発生が認められた)発生時間は、ピーク雨量発生時刻の約12時間前となっていることより、この表面流の発生には鉛直方向の雨水の浸透よりも斜面の集水性によってもたらされる飽和側方流が大きく寄与しているものと判断される。一方、周辺斜面域への雨水の供給域となる尾根型斜面部では、最大地下水深の発生時間はピーク雨量発生時間とほぼ同時刻となっ

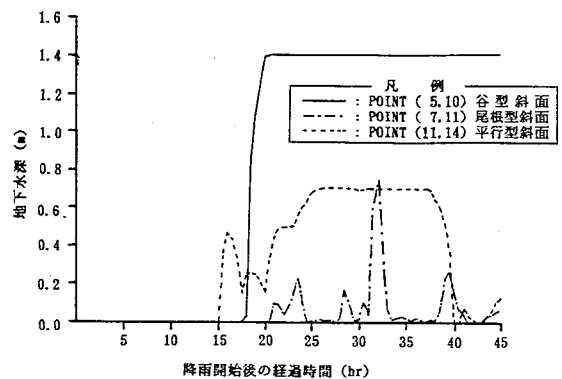


図-4 地下水深の挙動

ている。また、地下水深の上昇度合いや最大地下水深の値に関しても、谷型斜面部において最も大となり、次いで平行型斜面部→尾根型斜面部の順となっていることがわかる。こういった傾向は、ここで代表斜面として抽出した基本要素だけではなくその他の斜面部においても顕著に認められた。

以上の結果より、ここで対象とした地形条件や降雨条件を与えた場合、地下水深の挙動や最大地下水深の発生には、尾根型斜面部においては降雨の影響が大となり、谷型斜面部においては逆にその周辺斜面域からの側方流入量の影響が大となるものと判断される。

図-5は、対象斜面全域の各基本要素における飽和度の分布状況の推移（降雨開始25, 35, 45時間後）をとりまとめたものである。同図より、1)降雨開始15時間後付近より、表土層厚の浅い斜面上流尾根

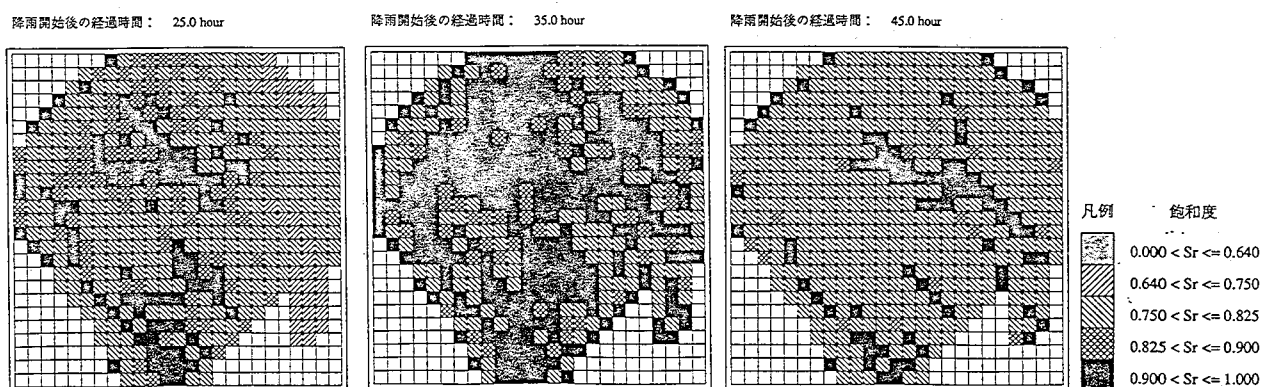


図-5 シミュレーション開始後の飽和度の分布状況の推移

部や谷型地形を呈する斜面中央中流部や下流部並びに既往崩壊部での湿潤化が他の斜面部と比較して早くなる。2)斜面の存在位置の相違に関わらず、ピーク雨量発生時刻である降雨開始32時間後付近で土層の平均飽和度も概ねピークを迎えるようになる。3)降雨の終了とともに飽和度も低下し始めるものの、その低下度合いは表土層厚の薄い当該斜面上流尾根部において最も大となり、逆に斜面中央中流部や下流部並びに既往崩壊部では周辺斜面域からの雨水の集水域となるためその低下度合いは緩慢となっている。といった事項が確認される。

4. 初期水分状態の相違が地下水深の挙動に及ぼす影響度

4.1 検討ケース並びに計算条件

降雨時に生じる山腹斜面土層内部での雨水の挙動を予知・予測し、またこれによって得られる結果を基に斜面の安定性の検討を行うことにより崩壊の発生の有・無のみならずその発生時間までをも予測しようとした場合、計算上の初期値となる初期飽和度の設定如何によってはシミュレーション結果が大きく異なったものとなることに着目し、前述の斜面を対象として、初期飽和度の相違が地下水深の挙動に及ぼす影響度評価を行った。検討ケースは、前章で実施した初期飽和度を $S_i = 0.640$ とした場合を含む、 $S_i = 0.516, 0.705$ とした場合の合計3ケースである。この初期飽和度を除くその他の計算条件は、前章で実施した場合と同様である。

4.2 初期飽和度が地下水深の挙動に及ぼす影響度評価

図-6は、前述の各代表斜面毎に初期飽和度の相違による地下水深の挙動を比較したものである。同図より、各代表斜面の当該流域内での存在位置に関わらず、地下水深の出現開始時間は検討ケース中最大の初期飽和度を示すCASE:3（初期飽和度：0.705）で最も早く、次いでCASE:1（初期飽和度：0.640）→CASE:2（初期飽和度：0.516）の順となっていることがわかる。一方、最大地下水深の出現時刻

についても地下水深の出現開始時間と同様に、初期飽和度の増加とともに早くなる傾向が認められた。これらの傾向は、周辺斜面域からの雨水の集水域となる谷型斜面部で最も顕著に現れており、その他の斜面部特に周辺斜面域への雨水の供給域となる尾根型斜面部では、初期飽和度の値如何に関わらず最大地下水深の出現時刻は、ほぼ同時刻となっている。また、最大地下水深の値は、初期飽和度の値如何に関わらず全ケースともにほぼ同値を示す結果となった。図-7は、初期飽和度と最大地下水深発生時間との関係をとりとまとめたものであり、同図からも上記傾向が顕著に認められる。

以上の結果、『1)地下水深の発生開始時間は、初期飽和度の増加とともに早くなる。2)最大地下水深の出現時刻は、初期飽和度の増加とともに早くなり、この傾向は周辺斜面域からの雨水の集水域となる谷型斜面部でより顕著に現れることになる。3)最大地下水深に及ぼす初期飽和度の影響は少ない。』といった事項が確認された。

本調査において対象としている【山腹表層崩壊現象】の主要因は、降雨の発生に伴って生起する地下水深の存在である。このため初期飽和度は、山腹表層崩壊の発生の有・無やその規模のみならず、その発生時刻までも正確に予知・予測しようとする上で大きなウェイトを占めるものと判断される。

5. おわりに

現地より不攪乱状態で採取した大型供試体に対する人工降雨実験により得られた【H~Sr曲線】を用いて【雨水流動モデル】を作成し、平成3年8月の台風12号時に表層崩壊が発生した既往崩壊斜面に対して適用したところ、その解析結果には地形形状の相違が的確に表現されており同モデルの現地流域への適用性の高さが確認された。

また、同モデルを用いて初期飽和度の相違が地下水深の挙動に及ぼす影響度評価を行ったところ、初期飽和度の増加とともに最大地下水深の発生時間は早くなるものの、最大地下水深自体に及ぼす初期飽和度の影響は小さいことが確認された。

〈参考文献〉

- 1)成瀬・寺本・平松:森林土壌を対象とした地下水上昇過程に関する一考察.平成5年度砂防学会研究発表会概要集,1993
- 2)平松・水山・石川:雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究.新砂防Vo1.43, No.1,1990
- 3)窪田・福島・鈴木:山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化.日林誌Vo1.69, No.7,1987

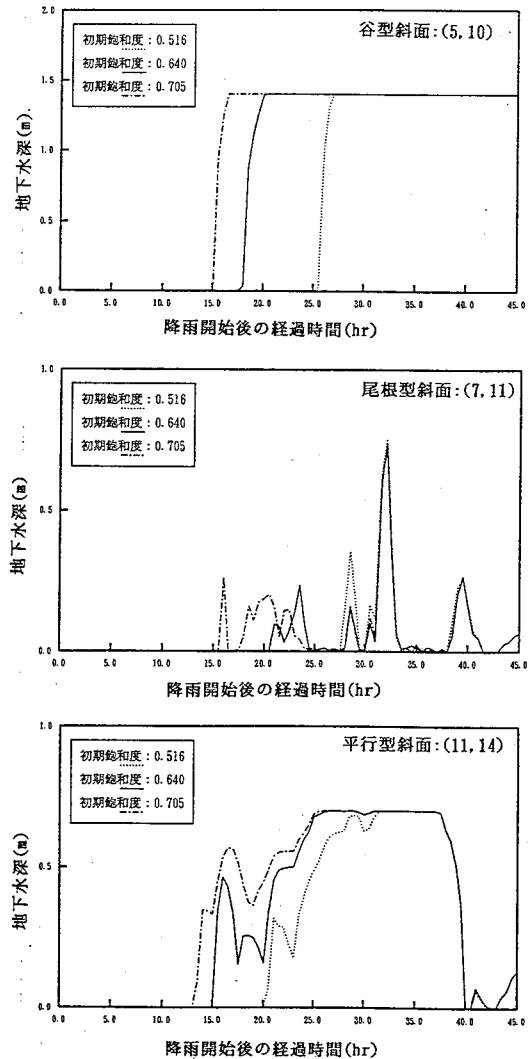


図-6 初期飽和度の相違による地下水深の挙動の変化

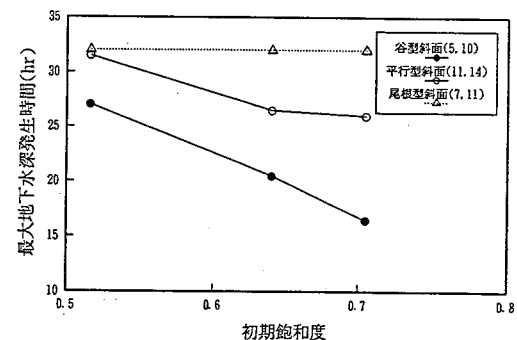


図-7 初期飽和度と最大地下水深の関係