

1 斜面表土層における水分移動の実態と解析

アジア航測株式会社 ○小川紀一郎

建設省土木研究所 石川芳治 原 義文 福本晃久

建設省天竜川上流工事事務所 今井一之

1. はじめに

山地流域における土砂生産現象を予測する上で、豪雨時に発生する斜面表層崩壊を把握することは重要な課題である。表層崩壊は、降雨に伴い斜面表層土層中の地下水位が上昇し、土塊の安定性が失われて表層土が滑落する物理現象である。このうち、表層土層中の水分変動状況を把握するために、筆者らはこれまでモデル流域を設定し、集中的に観測機器を設置して連続的な水文観測を行ってきた¹⁾。そして斜面表層土層に注目し、ボーリング調査ならびに簡易貫入試験を行うことにより表層土層の分布とその性状について把握した²⁾。そこで、筆者らは次のステップとして一連の調査成果をもとに土層中の水分変動状況についてモデル的考察を試みた。

2. 研究方法

2.1 調査地概況

本調査の対象地は天竜川水系の藤沢川流域における野笹地区である(図-1)。調査流域は標高 840~976m に位置し、流域面積は0.1km²、主流路長は 320m、平均河床勾配は1/2.1である。斜面傾斜は平均で30°~40°程度であり、溪床勾配は20°程度である。植生は、樹高8m~10m のスギ、アカマツ、クヌギ、コナラが優先し、林床植生は少なく、このため林内は比較的明るい。本流域では昭和36年に大量の土砂が流出して、下流の家屋に被害を与えている。このため、現在では砂防ダム1基、谷止工2基が設置されている。

本流域の基盤地質は花崗岩である。流域内の標高 900m 付近にある谷頭部斜面には、比高で約9mの急崖斜面が形成されていて、パイプフロー跡の小孔が多数見られる。一方溪床については、堆積物が少なく岩盤が露出している。本流域では、降雨時の山腹斜面の土壤水分張力、間隙水圧、地下水位や表面流、流域流出等を観測するために、各種観測機器が設置され、継続的に観測が行われている。

2.2 有限要素法による浸透流解析

従来より地下水の挙動を定量的に評価するために、有限要素法、差分法等の数値解析が電子計算機の進歩とともに有力な手段として用いられている。これまでも、本地区においては差分法による

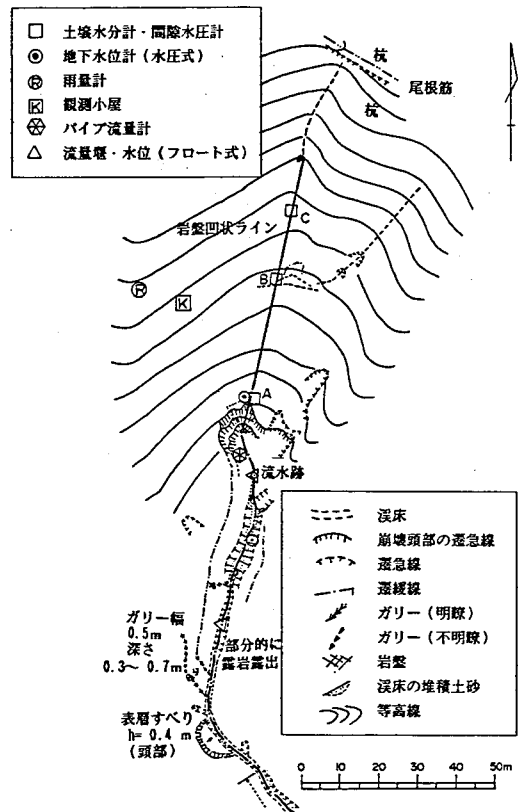


図-1 調査対象地状況と観測機器の配置

一次元飽和不飽和浸透流解析と飽和側方流解析が行われてきた³⁾。しかし、現地観測の結果表層では飽和側方流が観測されず、豪雨時のみ地下水位の上昇が見られる程度であった。したがって、浸透流解析を行う上では不飽和側方流も含めて考えることが必要となることから、本検討では有限要素法による断面2次元飽和不飽和浸透流解析を行うことにより、実際に観測された表土層中の水分変動の再現を試みるものである。

飽和・不飽和領域の浸透を支配する基礎方程式は、連続の式とDarcyの法則を不飽和領域へ拡張することにより次のような方程式で表される⁴⁾。

$$\text{div } K(\theta) \nabla (\phi + Z) = (C(\theta) + \alpha S_s) (\phi / t)$$

ここに、 $K(\theta)$ は透水係数、 θ は体積含水率、 ϕ は圧力水頭、 S_s は比貯留係数、 Z は鉛直座標、 t は時間である。また、 α は係数で不飽和領域で0、飽和領域で1であり、 $C(\theta)$ は比水分容量で、不飽和土の水分特性曲線の勾配から求められる。上式の有限要素法の定式化は重み付き残差法で行い、重み関数としてはGalerkin法を用いた。

3. 計算条件の設定

3.1 対象降雨の設定

本検討ではこれまで野笹地区において行われた水文観測成果より、比較的多量の降雨が見られ、土壌中の水分変動が把握でき、さらに地下水位の上昇が明瞭に得られたものを対象として選定するものとする。検討の結果、昭和63年6月2日～3日の降雨を対象降雨とすることとした。この降雨のハイエトグラフを示すと図-2のようになる。なお、ここで計算を行う上で森林の降雨遮断を考慮に入れている⁵⁾。

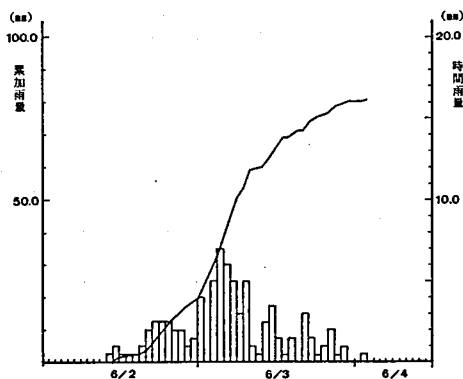


図-2 時間雨量と累加雨量

3.2 計算要素の設定

有限要素法による浸透流解析を行う際には、解析対象とする範囲を要素で分割する必要がある。本解析では、実際の地質構造を十分に考慮して要素を設定するものとし、現地で実施されたこれまでの地質調査（ボーリング調査、簡易貫入試験）の結果、

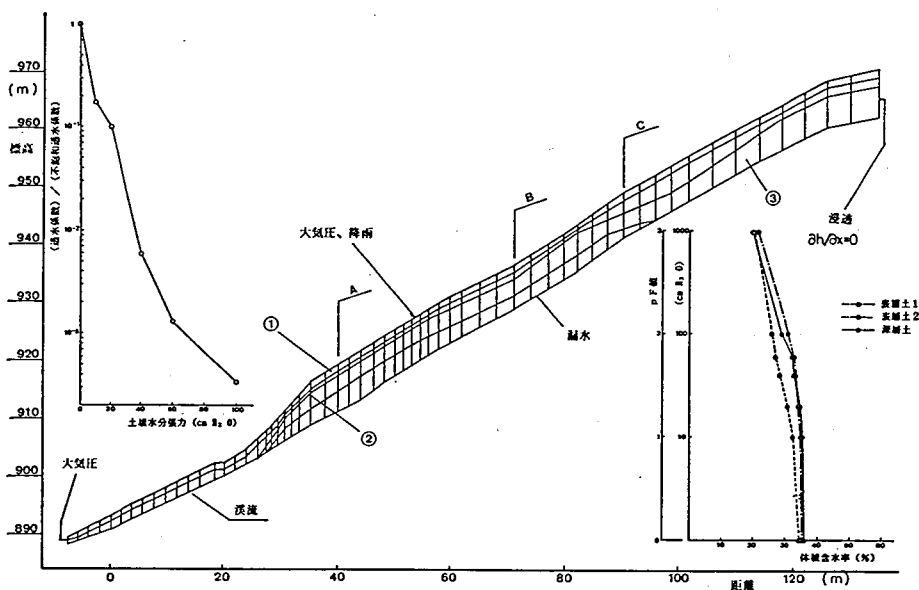


図-3 計算要素と条件の設定

ならびに土壤水分計の位置、埋設深度を考慮して各計算要素を設定した。検討の結果を示すと図-3のようになる。これによれば、本計算に必要な要素は、260節点、195要素となった。

3.3 計算条件の設定

(1) 構成物の設定

計算条件として各要素に対応した構成物の条件を設定する必要がある。本検討ではボーリング調査ならびに簡易貫入試験の結果から、①表層土1、②表層土2、③深層土の3種類に分類した(図-3)。そして、この3種類の構成物に対応した形で他の計算諸条件を設定するものとする。

(2) 圧力水頭-透水係数

これまでの野笹地区で測定された飽和透水係数は、既往資料⁶⁾によれば深度0.2m~0.9mの位置で $1.27\sim 7.92\times 10^{-4}$ (cm/sec)、ボーリング調査時に測定されたものについては深度0.3m~6.7mの位置で $10^{-4}\sim 10^{-6}$ (cm/sec)の値が得られている。また、大口径のサンプラーを用いた試験については深度0.5mと1.0mにおいて 10^{-2} (cm/sec)となった。

以上の検討結果より、本計算における飽和透水係数は表層土1で 5.0×10^{-4} (cm/sec)、表層土2で 2.5×10^{-4} (cm/sec)、深層土で 7.5×10^{-5} (cm/sec)と設定した。これは、計算結果をもとに水分変動状況を試算した結果、実際の水分変動状況をうまく再現できるように決定したものである。なお、各圧力水頭に対応した透水係数については、既往資料⁶⁾を参考に設定した。設定した結果を示すと図-3のようになる。

(3) 圧力水頭-含水量

これまで野笹地区で測定されたものをもとに、計算に使用した圧力水頭と含水量との関係を各構成物ごとに示すと図-3のようになる。

(4) 圧力水頭-比水分容量

含水量と同様にこれまで野笹地区で測定された圧力水頭と含水量との関係より圧力水頭と比水分容量の関係を各構成物ごとに設定した。

(5) 圧力水頭の初期値設定

各計算対象降雨の開始時における土壤水分張力は、実測値をもとに各要素における初期値を設定した。設定にあたっては、実際の水分ならびに地下水位状況を計算で再現できるように考慮して設定した。なお、ここで有効間隙

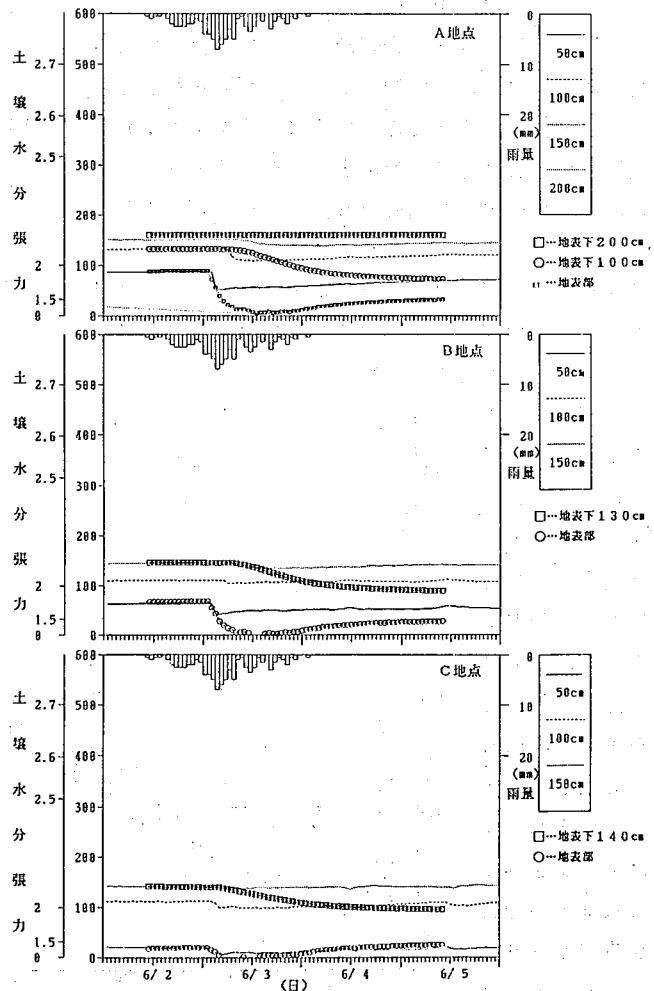


図-4 土壤水分変動状況の実績値と計算値

率は0.15と仮定した。

3. 4 境界条件の設定

本計算を行う上での境界条件を整理すると図-3のようになる。これによれば、地表については降雨/蒸発-浸透条件で、上流端については浸透条件のうちx方向の流量フラックスは0、下流端については流出条件、最下層については漏水条件で飽和透水係数を 10^{-6} (cm/sec)と仮定して設定した。

4. 計算結果の検討

計算の結果、現地に埋設してある土壌水分計より得られた表層土層中の水分の変動状況と計算結果との関係を示すと図-4のようになる。これによれば、各地点とも初期の水分張力は実測値の再現性が良く、また地表部の水分変動のうち湿潤過程の開始時期ならびに各深度のタイムラグがうまく表現されている。さらに、地表部の乾燥過程も良く再現されている。しかし、湿潤過程ピークの水分張力と地表下100cmでの水分変動状況はうまく表現されず、実際よりも湿潤傾向となっている。

一方、計算の結果、現地に設置してある地下水位計より得られた表層土層中の地下水位の変動状況と計算結果との関係を示すと図-5のようになる。これによれば、地下水位についてはなかなか現象を再現することは難しい。A地点ならびに溪流における水位上昇の開始時期、最高水位、水位の低減過程のいずれもある程度再現はされているものの、十分なものではない。

5. 今後の課題

自然斜面の土層の構造や物理的性質が必ずしも正確に把握することができず、調査方法についても確立されていない現状の技術水準において、土層中の水分変動を正確に再現することは困難な場合が多い。このため、今後とも水分変動に対して最も影響を与える因子の把握を行い、より精密なデータを多数蓄積することが必要である。また現地観測の結果、地下水位の上昇や地表流の発生に関して土壌中の水分変動状況が重要な因子であることが明らかとなったため、土砂災害の予測を行う際には、降雨観測に加えて土壌中の水分変動状況についても把握することが重要である。

6. 参考文献

- 1)小川ほか：土砂災害危険度予測のための斜面水文現象の現地観測、平成2年度砂防学会概要集 1990
- 2)小川ほか：山地流域における斜面表層土層の分布と水分変動、平成3年度砂防学会概要集 1991
- 3)平松ほか：山腹斜面に於ける雨水の挙動と数値モデルによる再現性に関する研究、新砂防 No.174、1991
- 4)赤井ほか：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析、土木学会論文集、No.264、1977
- 5)村井 宏：森林植生による降水のしゃ断についての研究、林試報告 No.232、1970
- 6)水山ほか：土砂災害危険度予測システムの開発に関する研究、土研資料、No.2745、1989

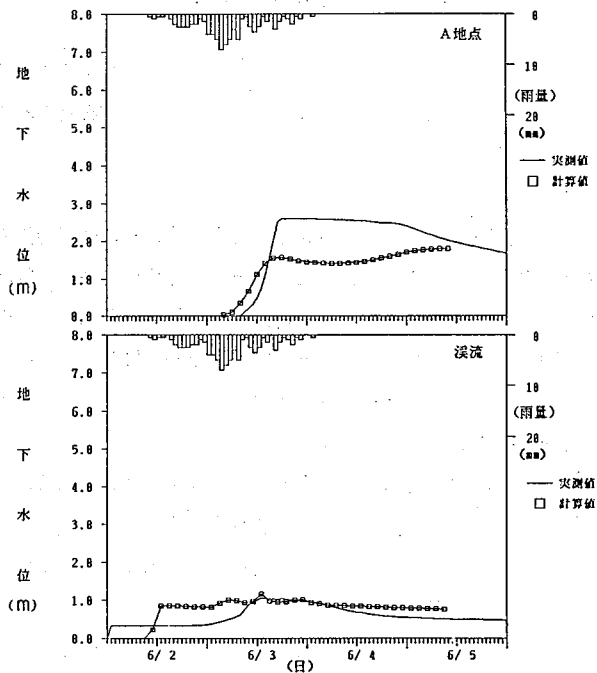


図-5 地下水位変動状況の実績値と計算値