

パシフィックコンサルタンツ株式会社 ○平松 晋也
建設省 土木研究所 水山 高久
石川 芳治
福本 晃久

1. はじめに

降雨を誘因として発生する表層崩壊現象において、雨水の山腹斜面内部への浸透による

- ① 地下水の発生
- ② 飽和度の上昇による自重の増加
- ③ 含水率の増大による土質強度の低下

が崩壊発生に大きな影響を及ぼすことが知られている(1)。

本研究では、降雨浸透による地下水流出過程並びに地下水発生過程に着目し、降雨時における土層内部での水分移動特性を明らかにすることにより「崩壊発生モデル」の作成に資することを目的として室内鉛直浸透実験並びに不飽和浸透流理論を用いた数値シミュレーションを実施した。

2. 鉛直浸透実験

2.1 実験装置

実験装置は、図-1に示すように内径30cm、高さ100cmの亚克力製円筒カラムと散水装置により構成されているこの散水装置を通してカラム上端部に与えられた雨水の挙動・地下水流出量及び地下水面上昇高は、それぞれテンシオメータ、水位測定器（容量式波高計）、マノメータにより計測されるようになっている。

また、散水装置は、高架水槽と散水装置間の位置水頭差により降雨強度を種々変化させて与えられる構造になっている。この散水装置より落下した雨滴は、供試体上面に均等になるようにふるいにより分散させた。

2.2 実験条件

実験に用いた試料は豊浦標準砂であり、亚克力製円筒カラム内への充填は水締めとした。

実験ケースは、表-1に示すように不飽和帯から飽和帯（地下水面）へと供給される地下水流出量の時系列変化を定量的に把握することを目的としたCASE1、2と、地下水面上昇過程を追跡することを目的として実施したCASE3、4の計4ケースである。

なお、散水は、カラム側方に深度10cm地点より90cm地点まで20cm間隔で設置されたテンシオメータにより定常状態となったのを確認した後開始した。

2.3 実験結果

2.3.1 地下水流出過程の実験結果

地下水流出量の時系列変化を示す図-3、4より明らかなように、降雨強度18.25 mm/hrを与えた場合（CASE1）散水開始180分後より地下水流出が始まり、その後約35分でほぼ定常状態（地下水流出量÷降雨強度）を採つようになる。一方、降雨強度41.00 mm/hrを与えた場合（CASE2）には、散水開始110分後より地下水流出が始まり、約10分後には定常状態を保つようになる。また、両ケースとも散水終了後流出量は徐々に減少するようになるが、その減少速度は降雨強度の大きいCASE2で大となっている。

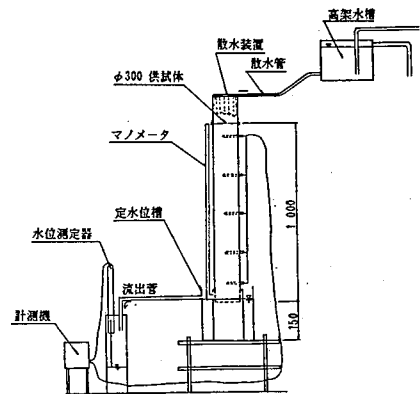


図-1 実験装置

表-1 実験ケース一覧表

CASE	降雨強度	降雨継続時間	流出状況	測定項目
1	18.25	7.0	流出有り	地下水流出量
2	41.00	5.0	〃	〃
3	20.13	7.0	流出なし	地下水面上昇高
4	38.03	4.0	〃	〃

2.3.2 地下水面上昇過程の実験結果

CASE3,4の地下水面の上昇状況を示す図-2より、各実験ケースとも地下水面高70cm付近を境としてそれ以後地下水面上昇速度は極端に早くなっていることがわかる。これは、不飽和土層厚が薄くなったため降雨の影響をほぼ直接的に受けるようになったことによるものと判断される。また同図より当然のことながら降雨強度の増大とともに地下水面上昇速度が早くなる様子がうかがえる。

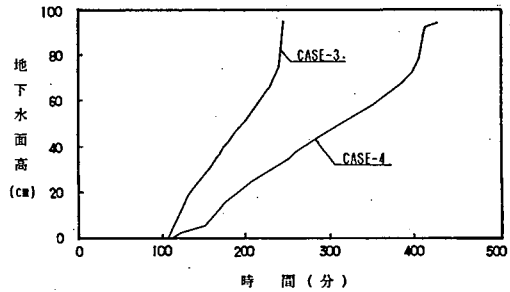


図-2 降雨強度の地下水面上昇に及ぼす影響

3. 数値シミュレーション

3.1 基本式

土層上端部から基岩上すなわち土層下端部までの不飽和帯における雨水の一次元鉛直浸透の解析には、基礎方程式が(1)式で表される不飽和浸透流理論(Richards式)を適用した。

$$C \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right\} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ψ : 土壌水分吸引水頭 (cm)、 t : 時間 (sec)、 z : 鉛直座標 (下向きに正) (cm)、 K : 透水係数 (cm/sec)、 C : 比水分容量 ; $C = d\theta / d\psi$ 、 θ : 体積含水率 である。

3.2 計算条件

3.2.1 $\psi \sim \theta$ 関係及び $k \sim \theta$ 関係

Richards式を基に数値シミュレーションを実施し、雨水の浸透・流下過程を追跡するためには、 $\psi \sim \theta$ 関係及び $k \sim \theta$ 関係を知る必要がある。本研究では、西垣ら(2)に準じ、Van Genuchten の提案した(2)式、(3)式を用いてこれらの関係式とした。

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^{1-1/n} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$K_r = S_e^{1/2} \cdot [1 - (1 - S_e^{1/n})^m]^2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_{sat} - \theta_r) \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 S_e : 有効飽和度、 ψ : 土壌水分吸引水頭 (cm)、 α 、 n : 係数、 K_r : 比透水係数 ($K_r = K / K_s$)、 K_s : 飽和透水係数 (cm/sec)、 θ_{sat} : 飽和体積含水率、 θ_r : 最小容水量、 $m = 1 - 1/n$ である。(2)~(4)式中に含まれる定数 θ_r 、 θ_{sat} 、 α 、 n は、西垣ら(2)により標準砂及び砂丘砂を対象として行われたマッチング結果を基に表-2の様に設定した。

3.2.2 境界条件及び初期条件

土層上端における境界条件としては、散水中及び散水後の蒸発は無視するものとし、散水中は散水強度の、散水終了後は0の下向きのフラックスをそれぞれ与えるものとする。また、土層下端部には、常に一定の地下水位が形成されているものとする。

初期条件としては、散水開始直前の各深度に設置されたテンシオメータによる土壌水分吸引圧を用いて採用値とした。各実験ケースにおける初期条件を表-3に示す。

3.3 数値シミュレーションによる実験結果の再現

3.3.1 地下水流出量の比較

数値シミュレーションにより得られた地下水流出量と実験結果とを比較し、シミュレーションモデルの適合性の検討を行った。CASE1,2におけるシミュレーショ

表-2 Van Genuchten法に必要なパラメータ

分類	θ_s	θ_r	K_s (cm/sec)	α	n
砂丘砂	0.403	0.042	2.864×10^{-2}	0.0356	4.7933
標準砂	0.300	0.000	2.084×10^{-2}	0.0522	5.6784
採用値	0.390	0.040	1.500×10^{-2}	0.0356	4.7933

表-3 初期条件

実験ケース	土壌吸引圧 (cm)					備考
	深度90cm	深度70cm	深度50cm	深度30cm	深度10cm	
CASE 1	-15.0	-29.8	-50.2	-65.8	-68.2	
CASE 2	-14.2	-29.8	-50.5	-66.3	-70.0	
CASE 3	-14.5	-29.5	-50.5	-66.1	-66.7	
CASE 4	-15.7	-31.8	-51.6	-57.8	-53.7	

ン結果を図-3, 4 に示す。図中には比較のため実験結果も併記した。

図-3, 4 より数値シミュレーションによる散水期間中の地下水流出量の再現性は、地下水流出開始時間と、その後の増加傾向ともに極めて高いことがわかる。一方、散水終了後においては、実験結果のほうが30~40分早く低下を開始しているが、これは、今回のシミュレーション計算において土壌水分特性曲線のヒステリシスを考慮していないことによるものと判断される。以上の検討結果より、本シミュレーションモデルは、散水終了後の地下水流出量変化に若干の遅れを生じるものの、

- ① 地下水流出開始時刻をほぼ適確に再現し得る。
- ② 崩壊発生の有・無に多大な影響を及ぼす地下水流出量の増加傾向の再現性は高い。

等の点で、『山腹崩壊発生モデル』を構築する上で有効な情報を提供し得るものと判断される。

3.3.2 地下水面上昇高の比較

土層上端部から地下水面までの不飽和帯における水分移動（地下水流出）によって生じる地下水面上昇過程のモデル化として、

- ① 雨水の基本的な浸透・流下過程を単純化して表すことにより現象の理解を容易にするとともに、計算時間の短縮化を図ることを目的とした簡易モデル（図-5）
- ② 飽和帯の上昇とともに不飽和帯を縮小させ、モデルをより実現象に近付けようとした改良モデル（図-6）

の2モデルを考えた。

ここで、簡易モデルについては、「飽和帯が形成された後も雨水はいったん基岩面まで到達する」とも考えているため土層分割は全計算時間を通じ一定として扱うことが可能であるが、改良モデルについては、不飽和帯は地下水面の上昇とともに時々刻々と変化するため各時間ステップ毎に土層分割幅及び分割個数を変化させた。

簡易モデルによるシミュレーション結果を図-7 に示す。なお、図中には比較のため人工降雨実験による実測値を併記した。この結果より明らかなようにCASE3, 4とも計算値は実測値と比較して地下水面上昇高は小となっており、特にこの傾向は降雨強度の低いCASE3で顕著である。また、実測値では散水終了直前には急激な地下水面の上昇がみられるが計算値にはこの傾向がみられない。

これは、簡易モデルでは地下水面の上昇後も雨水は飽和帯を通過して基岩面へと到達するものとしているため飽和帯の上昇後も降雨の影響は時間的遅れをもって現れ、この傾向は不飽和帯の減少とともにより顕著となることによるものである。以上の結果より、簡易モデルでは降雨による地下水面上昇特性の全体的な傾向は表現し得ても崩壊発生に最も大きな影響を及ぼすと考えられる「飽和度上昇後の急激な地下水面の上昇」に関してはその再現精度はやや劣ることが明らかになった。

改良モデルによるシミュレーション結果を図-8 に示す。

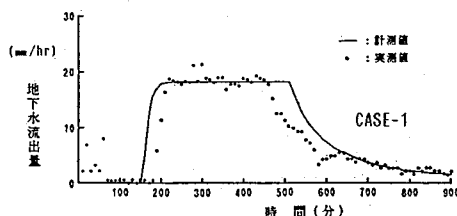


図-3 地下水流出量の実測値と計算値の比較

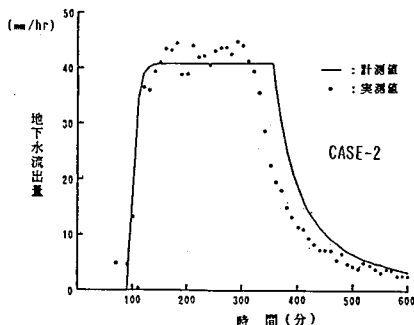


図-4 地下水流出量の実測値と計算値の比較

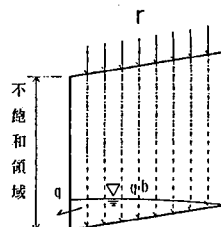


図-5 簡易モデルによる雨水流出経路の基本概念

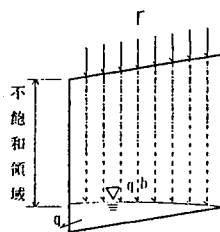


図-6 改良モデルによる雨水流出経路の基本概念

図-8 より明らかなように、簡易モデルによるシミュレーション結果とは逆にCASE3,4ともに計算値は実測値と比較して若干大きな値を示しており、時間経過とともにこの傾向は顕著となる。

これは、Van Genuchten 式による土壌水分特性の再現精度並びに不飽和帯の減少に伴う降雨の影響度の増大によるものと考えられる。

以上のシミュレーション結果より、若干実測値より大きな値を示しているものの改良モデルには簡易モデルでは表現し得なかった飽和帯上昇後の急激な地下水面の上昇特性が的確に再現されていることがわかった。

従って、降雨による地下流出過程並びに地下水発生過程に着目して山腹崩壊現象を取り扱う場合、若干計算時間を要するものの、実現象の再現精度の高い改良モデルは、より有効な情報を提供し得るものと判断される。

4. おわりに

以上のように、本研究では山腹斜面内部における降雨浸透による地下水流出並びに地下水発生過程に着目し、標準砂を用いた室内実験結果と数値シミュレーション結果との適合性の検討を行った。

本研究は、雨水の鉛直浸透過程を対象としたものであるが、今後は上記成果をふまえ、斜面土層内における平面的な雨水の流出過程を追跡する必要がある。

<参考文献>

- 1) 矢田部 龍一・八木 則夫・榎 明潔：降雨による砂質土斜面の崩壊発生時期の予知法に対する検討，土木学会論文集，第376号，pp297～305, 1986
- 2) 西垣 誠・楢見 和紀：不飽和土の浸透特性の評価に関する考察，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム，昭和62年12月

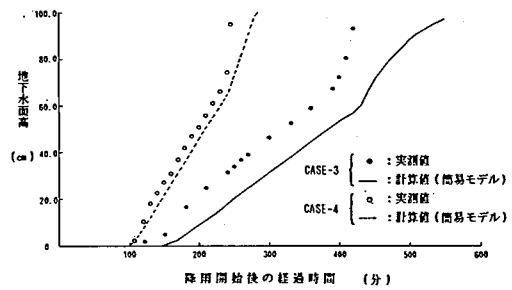


図-7 数値シミュレーションによる地下水面上昇高（簡易モデル）

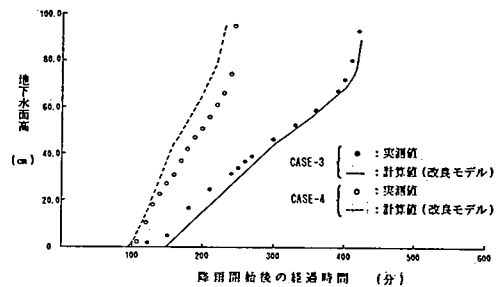


図-8 数値シミュレーションによる地下水面上昇高（改良モデル）