

36 森林土壌を対象とした地下水上昇過程に関する一考察

日本道路公団試験研究所 ○成瀬隆弘 寺本和子
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の主要因は降雨である。このため、崩壊モデルを構築し、その予知・予測を行おうとする上で土壌内での雨水の挙動、特に地下水位の消長をいかに実現象に忠実にモデル化していくかということが、その解析結果に多大な影響を及ぼすことになる。本研究では、実際に崩壊の発生した現地斜面内より不攪乱状態で大型試料 ($\phi=20\text{cm}$, $l=100\text{cm}$) の採取を行い、これに対して人工降雨実験を行うことにより地下水の発生状況を定量的に把握した。

2. 試料採取地点の概要

試料採取地点は、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沿線の小斜面(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。当該斜面の地質は中新世西桂層部の泥岩を挟む礫岩層より成っており、礫径は概ね3cm程度である。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スギ・コナラ等の広葉樹が点在している。また、斜面勾配は $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ の急斜面を形成しており、表土層厚は崩壊の発生した南西斜面部では1m程度であり、一方、北東斜面部では1~2mと厚くなっている。

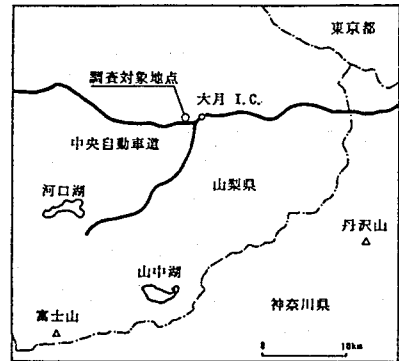


図-1 調査対象斜面

3. 大型不攪乱試料による地下水上昇実験

3.1 実験装置

実験装置は、図-2に示すように内径20cm、高さ100cmのアクリル製カラムの供試体、降雨装置及びデータ記録装置により構成されている。この散水装置を通して供試体上端部に与えられた雨水の土層内部での挙動並びに地下水の上昇状況は、土層上端部よりそれぞれ15cm間隔で設置された合計6本のデンスイオメータ及び土層底面に設置されたマンノメータにより計測されるようになっている。

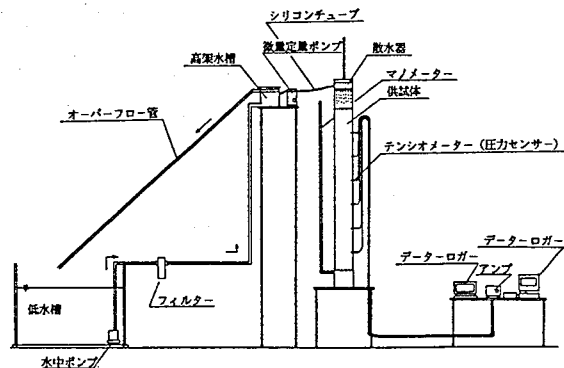


図-2 実験装置の概要

表-1 地下水上昇実験ケース

ケース	表土層厚 (cm)	降雨強度 (mm/hr)
1	100	約2
2	100	"5
3	100	"10
4	100	"20
5	100	"30

3.2 実験条件

地下水上昇実験は、次章において地下水上昇過程のモデル化 ($H\sim S$, 関係の特定) を行う上で必要となる

① 地下水発生限界飽和度: S 。

② 地下水深と飽和度との関係: $H\sim S$, 関係の設定根拠を得ることをその主目的として実施した。

実験ケースは表-1に示すように降雨強度を2~30mm/hrと種々変化した場合の計5ケースである。ここで、各実験開始時の初期水分状態を可能な限り同一とすべく供試体側面に

設置されたテンシオメータによる土壌水分吸引圧をモニタリングし、ほぼ同一の水分状態に回復したのを確認した後には散水を開始した。

3.3 実験結果

地下水深の時系列変化をとりまとめたものを図-3に示す。同図より、土層上端部にその境界条件として与えられた降雨強度の増加とともに地下水深の発生開始時刻は早くなり、その後の地下水深の増加度合も大となることが明らかである。また、各ケースともに、地下水深が概ね50cm付近へと達した時点を経に地下水深の上昇度合は低下する傾向が顕著に認められる。当然のことながら、土層全体が飽和状態へと至るのに要する時間は降雨強度の増加とともに短縮されるようになる。

地下水深発生時点から地下水深が地表面へと達する時点までの平均的な地下水深の増加度合と降雨強度との関係をとりとまとめた図-4より、降雨強度と地下水深の増加度合とは比例関係(1:1)にあることがわかる。また、降雨継続期間内における累加雨量と地下水深との関係を示す図-5より、累加雨量の増加に伴う地下水深の挙動は各実験ケースともかなり類似したものとなっているものの、若干異った動きをする(地下水深の上昇が緩やかとなる)ケース(CASE-5)も認められる。これは、実験開始時の初期水分状態の相違によるものと判断される。

4. 地下水深(H)と飽和度(S_r)との関係

実験結果として得られた地下水上昇特性の一般化を図る(実験ケース相互間での初期水分状態による影響を無くす)ため、地下水深と飽和度との関係の特定を行った。

4.1 土壌水分吸引圧(φ)の飽和度(S_r)への変換

地下水上昇実験によりその結果として計測されるのは、①地下水深の挙動と、②土層各深度(i深度)における土壌水分吸引圧の経時変化及び実験条件である散水量(降雨強度)である。このように、地下水上昇実験で得られるのは地下水発生限界飽和度(S_r)や各土層深度部における飽和度(S_r)の経時変化ではなく、S_rに対応した土壌水分吸引圧の限界値(φ_i)や土壌水分吸引圧(φ)の経時変化である。一般に、飽和度(S_r)は、体積含水率(θ)と間隙率(n)を用いて(1)式により表される。

$$S_r = \theta / n \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、地下水上昇実験継続時間内に土層上端部に与えられる散水強度(mm/hr)が既知であるため、土層全体の飽和度(S_r)の経時変化は(2)式により得られることになる。

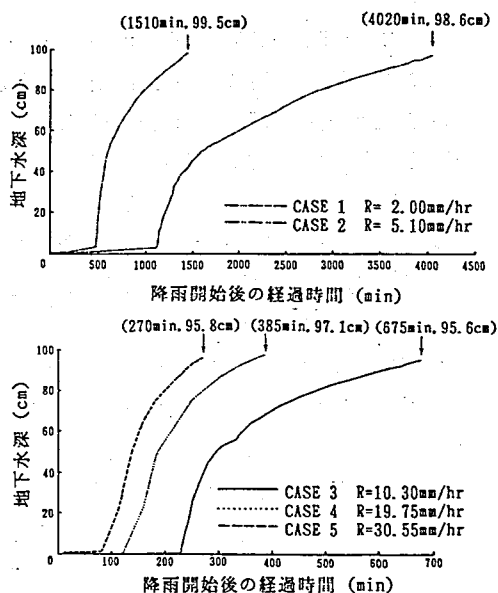


図-3 地下水深の経時変化

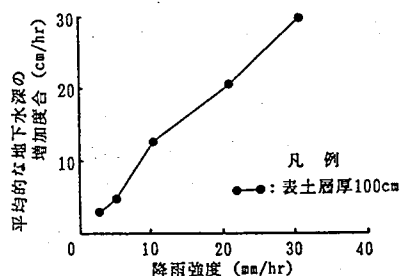


図-4 地下水深の増加度合と降雨強度との関係

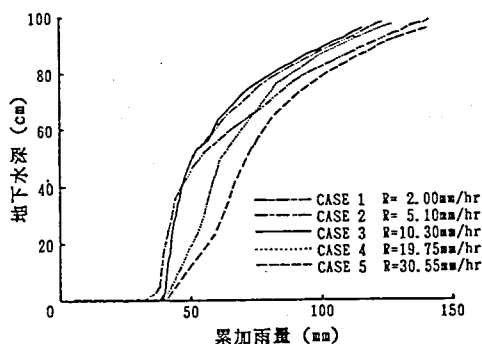


図-5 累加雨量と地下水深との関係

$$S_t = S_0 + \Sigma R' / D \cdot n \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S_t : t 時における土層全体の飽和度、 S_0 : 土層全体の初期飽和度、 $\Sigma R'$: t 時における単位面積当りの累加雨量、 D : 供試体の土層厚 ($D=100\text{cm}$)、 n : 土層全体の間隙率 (実測値; $n=0.37\sim0.52$) である。したがって、実験開始直前の初期水分状態すなわち土壌水分吸引圧に対応した体積含水率 (初期体積含水率; θ^0) を知ることで土層全体の飽和度の経時変化を求めることが可能となる。

本研究においては、当該斜面内の深度25cm, 55cm, 85cmの3深度部より採取された土壌に対してpF試験を実施した。これによって得られたpF曲線は、図-6に示すとおりである。そして、図-7に示すpF試験結果の支配領域(3領域)とテンシオメータによる支配領域(6領域)によってさらに細分化された各領域(8領域)毎に、各々の領域に対応したpF曲線並びに土壌水分吸引圧の初期値を用いて初期体積含水率を算定し、さらにこれらの値を(1)式に代入することにより初期飽和度を求めた。そして、各々の土層分割領域における加重平均値として得られた土層全体の初期飽和度を(2)式に代入することにより実験開始後の土層全体の飽和度の経時変化を求めた。

4.2 地下水深(H)と飽和度(S_r)との関係

地下水上昇実験時に計測された土壌水分吸引圧(ϕ)をpF試験結果及び(1)~(2)式を用いて飽和度(S_r)に変換することによって得られた『地下水深(H)と土層全体の飽和度(S_r)との関係』を図-8に示す。

図-8より各実験ケースを通じ、地下水発生限界飽和度(S_0)は概ね0.78~0.79の範囲内にあることがわかる。このことより、当該斜面内において採取された土壌に対しては、土層全体の飽和度が少なくとも0.78を上回らない限り地下水の発生は見られず、それまでに供給された雨水は全て降雨強度の値如何にかかわらず土湿不足を補うべく土壌中に保水されてしまうものと判断される。

また、地下水深(H)と飽和度(S_r)との関係は降雨強度の相違にかかわらず凸型の曲線関係を示し、各ケースともほぼ相似型となっていることがわかる。

このH~ S_r 曲線を眺めると、土層全体の飽和度が地下水発生限界飽和度(S_0)を上回った時点より地下水深は急激な上昇を示すものの、その値が50cm付近に到達した時点を超えて境を上昇度合いが低下していることがわかる。このことより、供試体上部より概ね深度50cm地点迄に位置する上位土層部は、基岩の風化土層である下位土層部と比較して落葉・落枝や有機物を多量に含むA_o層やA層により構成されているため、孔隙に富み、

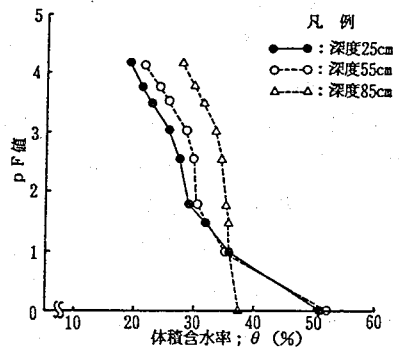


図-6 pF 曲線

(A) テンシオメータの支配領域

(B) pF試験結果の支配領域

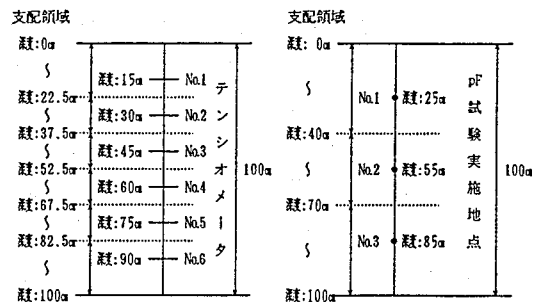


図-7 テンシオメータ及び

pF試験結果の支配領域

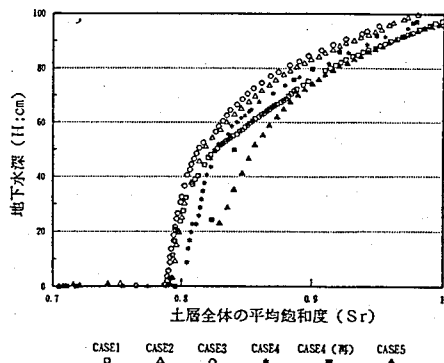


図-8 地下水深と土層全体の飽和度との関係

水分を含み得る空間すなわち有効間隙率が大となっている¹⁾ことがわかる。

図-9は、以上の結果を基に曲線回帰により得られた近似式によるH～S_r、曲線を示したものである。なお、図中には、既往研究²⁾に基づきH～S_r、関係を直線と考えた場合の結果及び実験により得られた実測値を併記した。図-9よりH～S_r、関係を曲線とみなした場合及び直線とみなした場合ともに地下水発生限界飽和度を同値(S_r=0.787)と設定しているため地下水深の出現開始時並びに最大地下水深(H=1.0m)到達時における土層全体の飽和度は同値となっているものの、地下水深発生後の地下水深の挙動は大きく異なったものとなっていることが明らかである。すなわち、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り、飽和度増加に伴う地下水深の上昇度合は大となっている。

以上の結果より、H～S_r、関係の与え方如何によっては地下水深の挙動は大きく異なったものとなり、本研究において提示した曲線関係とみなした場合の方が降雨に対してより鋭敏に(特に、地下水発生初期段階において)反応することが明らかとなった。

5. まとめと今後の課題

本研究において提示したH～S_r、関係を曲線とみなした近似式は、現地より不攪乱状態で採取された大型土壌に対する実験結果を基に得られたものである。このため、豪雨時の崩壊に対する斜面の危険度の増加や減少を予測するとともに、『豪雨時における斜面管理システム』を構築し、これを運用していこうとする上で、ここで得られた(森林山腹斜面を構成する土壌の特性を精度よく再現することが可能となる)曲線近似式は有効な情報を提供してくれるものと判断される。

しかしながら、ここで得られた結果はある特定の斜面に対してのみ得られたものである。このため、今後は地形・地質状況の異なった他の斜面に対しても同様の調査を実施し、その汎用性を確認する必要がある。

参考文献

- 1) 平松・石川・原・福本：森林土壌特性を考慮した崩壊発生モデルの適用性について。平成4年度砂防学会研究発表会概要集。pp.6～9, 1992
- 2) 窪田・福嶋・鈴木：山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化(Ⅱ) 水収支及び地下水発生域の検討。日林誌70(9), pp.381～389, 1988

$$\textcircled{1}: Y = -2.045 + 3453x - 7.61 \cdot 10^4 x^2 + 8.96 \cdot 10^5 x^3 - 5.04 \cdot 10^6 x^4 + 1.07 \cdot 10^7 x^5$$

$$\textcircled{2}: Y = 55.4 + 68.49X$$

※①領域においては $x = S_r - 0.787$ 、またYは地下水深を示す

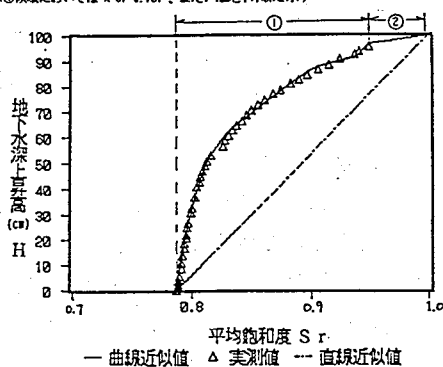


図-9 H～S_r、関係を曲線とみなした場合と直線とみなした場合の比較