

名古屋大学工学部 正員 ○原田守博

名古屋大学工学部 正員 高木不折

北海道開発庁 正員 星野 淳

1. はじめに

近年,多くの現地観測により,不圧地下水位の降雨に対する早い応答現象が報告されている。筆者らも丘陵地において,地表下5m深の地下水面が降雨後数時間で上昇する状況を観測している。このような早い水位応答の一つの要因として,不飽和毛管帯における水压伝播性が指摘されている。本研究では,そうした降雨に対する水位の早い上昇現象が,従来からの不飽和浸透モデルでどの程度説明しうるかを検討する目的で,砂柱を用いた雨水浸透実験を行い,不飽和浸透理論の適用性について考察を加えたものである。

2. 雨水の鉛直浸透実験

実験に使用した砂柱および降雨発生装置を図-1に示す。砂柱は内径30cm 高さ250cmの鉛直カラムに豊浦標準砂を水締めしたもので,下端に飽和地下水面が設定されている。砂柱内部には6深度にテンシオメーターが埋設され,土中の圧力水頭が圧力変換器を経て計測される。また,砂柱下部には飽和水面の位置を測るための水压計が取り付けられている。降雨発生装置は,186本の注射針に所定の湛水深を与えることで時間雨量20~100mm程度の雨水を供給することができる。今回の実験では,降雨強度44mm/hrの雨を4時間継続して与え,砂柱下端を閉じて飽和水面を上昇させる実験を行った。

3. 不飽和浸透理論による解析

毛管ポテンシャルの概念に基づきダルシー則を不飽和流に拡張することにより,Richards方程式が導かれる。さらに現象を鉛直次元とみなし,体積含水率 θ と圧力水頭 ψ の間に一価関係を仮定すると, ψ に関する方程式は,

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial Z} + 1 \right) \right\}$$

ここに, $K(\theta)$:不飽和透水係数, $C(\psi)$:比水分容量($=d\theta/d\psi$), Z :上向きを正とする鉛直座標, t :時間座標である。上式を解くには,土壌物理特性として ψ , θ , K の三者の相互関係を与える必要があり,今回の解析では図-2のように与えた。図中の破線は,筆者らが土柱法・加圧板法によって求めた排水過程の $\psi \sim \theta$ 関係であるが,現象を吸水過程とし,封入空気の影響を考慮して,解析には幾分小さめの値を用いている。 $K \sim \theta$ 関係については,次のBrooks・Coreyの式に従った。

$$K/K_s = [(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)]^\beta$$

ここに, K_s :飽和透水係数($=1.5 \times 10^{-2}$ cm/sec), θ_s :飽和含水率($=39\%$), θ_r :重力排水下における最小含水率($=11\%$), β :定数($=2.5$)である。

解析の初期条件は,一般に平衡水分状態として $\psi(Z,0)=-Z$ を与えることが多いが,実際には排水後数日を経ても $\psi=-Z$ とはならない。そこで実測値より, $Z < 52.5$ cm : $\psi = -Z$, $Z > 52.5$ cm : $\psi = -52.5$ cmとした。尚,数値解析には,大西・西垣によるFEMプログラムを使用した。

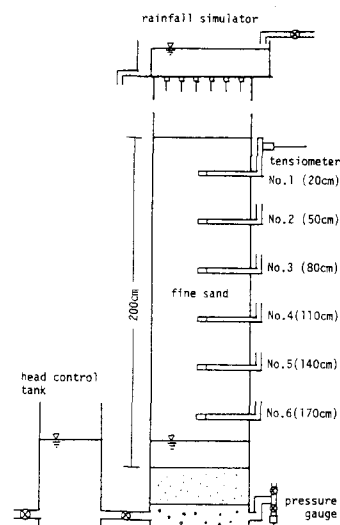


Fig.1 Schematic illustration of experimental apparatus

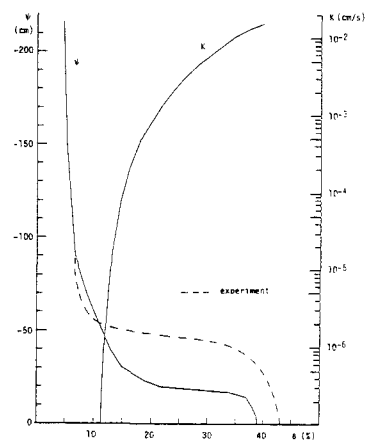


Fig.2 Unsaturated properties of soil

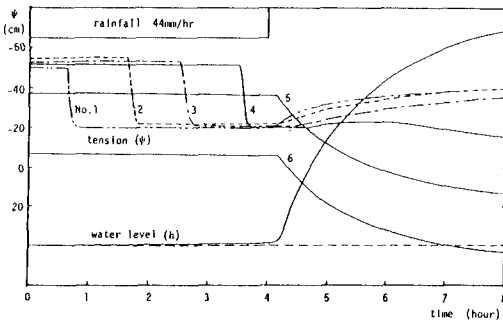


Fig.3 Experimental results

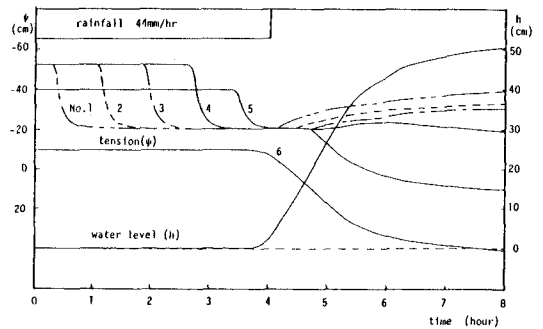


Fig.4 Numerical results

4. 実験結果と解析結果の比較

図-3は 前述の実験条件下で測定された土中の圧力水頭ならびに飽和水面の時間的变化である。6箇所のテンシオメーターのうち No. 1～4のものは、上方からの降雨浸透に伴い、50分程の遅れ時間差をもって順次反応している。しかし No. 5と6は、降雨開始後 4.2時間にほぼ同時に低下を始め、それと同じ時刻に地下水面上昇が始まっている。これは、No. 5, 6が水面上の毛管水帯に位置するために浸透水による早い水分伝達現象が現れたものと考えられる。一方、図-4は 実験と同じ降雨に対して求められた不飽和浸透モデルの数値解である。図から分かるように、No. 1～4の圧力水頭の変化は 実験値に比べ若干早く緩やかなものとなっているが、順次遅れて反応する様子は良く再現されている。また、同図における No. 5地点の圧力水頭は、図-3のように No. 6と同時に反応していない。これは、 $\psi \sim \theta$ 関係を図-2のように与えたことに起因している。懸垂水帯だけでなく毛管水帯での水分挙動をも再現するためには、排水過程の $\psi \sim \theta$ 関係も考慮することによって、現象のヒステリシスをモデルに組み入れる必要があると考えられる。

5. 現地観測データへの適用

小牧東部丘陵地における水文観測により、降雨に対する地下水位の早い応答が観測されている。上述したように、不飽和浸透モデルは完全なものとはいえないが、現象の概略は評価できるとして、ここでは実測データの再現を試みよう。解析では、土壌を均質と仮定し、浅層部における水分損失および側方流動は無視する。図-5はモデルに与えたパラメータである。図中のハッチングした領域は、現地の土壌試料から求めた $\psi \sim \theta$ 関係の存在範囲を示している。K $\sim \theta$ 関係は、現地土壌が平均粒径 0.1mm前後のシルト混じり細砂であることから飽和透水係数を 1.0×10^{-2} (cm/sec)とした。図-6は、降雨前に地表面下6.6mに位置していた地下水面の上昇過程を示している。図から分かるように実測値と計算値はよく一致しており、不飽和浸透モデルによる実測データの一応の再現が可能であることが示された。

6. おわりに

実験条件に対応した数値解析を行う過程で、土壌物理特性の設定が解析結果に鋭敏に影響することを経験した。こうしたモデルを実現象に適用する際には、ヒステリシスの考慮も含めてパラメータを客観的に評価することが重要であり、また大きな課題といえる。

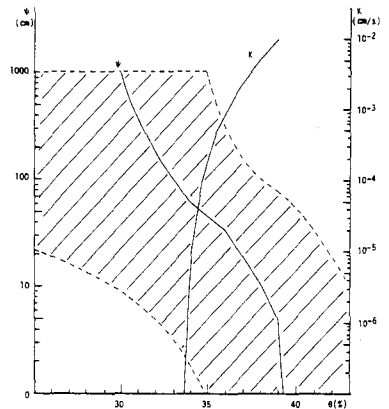


Fig.5 Unsaturated properties of soil

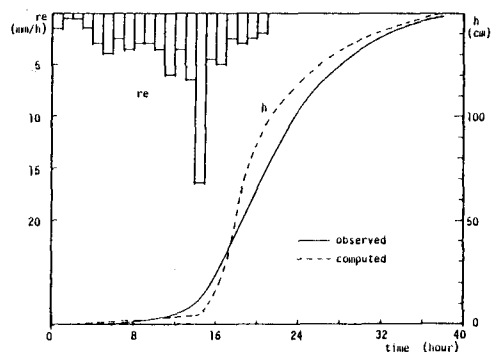


Fig.6 Water-table rising process