

二相流理論を用いた降雨浸透解析について

〇名古屋大 上野 誠 名古屋大 服部 義巳
日本コンクリート 夜久 正範

はじめに、降雨時の地盤の破壊を誘発することは周知である。これは降雨浸透による地盤内水分状態の遷移に依存するものであり、それ故降雨と水分状態の応答を正確に把握することが重要となる。ところで、非定常かつ不飽和状態で行う降雨浸透を、複雑な境界条件、初期条件のもとで解析するのは非常に困難であるが、空気の流れを考慮した二相流理論を用い、かつ降雨量の形式で境界条件を与えることにより、この複雑な降雨と地盤内水分状態の応答解析を可能にしようと試みた。

基礎方程式；二相流（空気、水）に関する基礎方程式は、Brustern, Morel-Seytouxによ、2定式化された。⁽¹⁾ 流体の運動は、究極的には運動方程式と連続式によって記述される。二相流の場合、運動方程式としてのDarcyの式が、空気、水の相方の流れに適用され、次のように表わされる。

$$V_w = -k \cdot k_{rw} (\partial p_w / \partial z - \rho_w g) / \mu_w \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$V_a = -k \cdot k_{ra} (\partial p_a / \partial z - \rho_a g) / \mu_a \quad \cdots \cdots \textcircled{2}$$

ここに V フィックス W , a はそれぞれ水、空気を表わす。さらに、 k ; 土の固有透水性, k_r ; relative permeability, p ; 圧力, ρ ; 密度, μ ; 粘性係数, V ; 流速, z ; 鉛直座標とする。次に土の毛管圧 $p_c = p_a - p_w$ とする。 p_c , k_{ra} , k_{rw} はともに飽和度 S_r の関数であり、その理想化された関係は図-1, 2に示されておりである(1)参照)。

いま Total Velocity V を導入し、 $V = V_a + V_w$ とすると①、②式より、

$$V/k \cdot (k_{rw}/\mu_w + k_{ra}/\mu_a) = -\partial p_w / \partial z + f_w \cdot \partial p_w / \partial z + f_w \rho_w g + (1-f_w) \rho_a g \quad \cdots \cdots \textcircled{3}$$

ここに、 $f_w = 1 / (1 + k_{ra} \mu_w / k_{rw} \mu_a)$ である。

③式が二相流理論における運動方程式であり、連続式は

$$n \cdot \partial S_r / \partial t = -\partial V_w / \partial z \quad \cdots \cdots \textcircled{4}$$

n ; 土の間隙率。最終的に二相流の基礎式は②、④となり、流線の区間で積分すると、各時刻、各位置での S_r の値が得られる。

解析方法；従来の浸透解析では境界条件として表面の湛水深に対応した水頭を与えてきたが、降雨浸透では湛水の生じないケースも多く存在する。降雨強度が小さく湛水の生じない場合、降雨量が地盤の透水能力以下となるため、降雨はすべて浸透する。したがって、従来の手法ではこの種の浸透が解析できなくなるわけである。いま、湛水が生ずる瞬間に地表面から土中への浸透速度 v 、降雨強度 r 、湛水深を H 、解析に用いる時間間隔を Δt とすると、 $r + H/\Delta t < v$ のとき湛水の生じない浸透となる。この場合、境界条件 r が地表面からの浸透速度 v となるのである。逆に、 $r + H/\Delta t \geq v$ の場合には湛水が生じているため、湛水深に相当する水頭を境界条件として与え、解析的に浸透速度 v を求める。かくして、降雨浸透を2つのケースに分け、各々の場合について手法を変えることにより、降雨のような複雑な境界条件のもとでの地盤内水分状態の遷移過程が解析できるわけである。

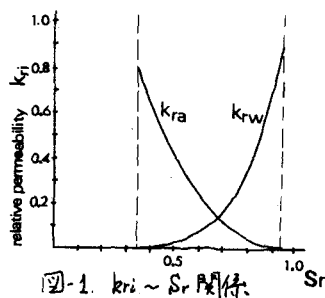


図-1. $k_{ri} \sim S_r$ 関係

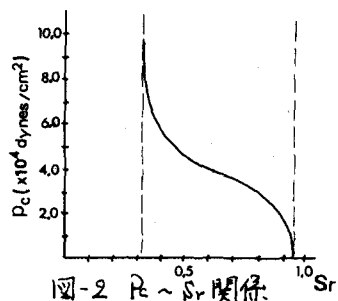


図-2. $P_c \sim S_r$ 関係

降雨と地盤内水分状態との応答: 理想化された降雨型と、実際の降雨型の両方について、解析を行なった。図-3は単純化された降雨条件に関するものであり、同じ条件で行なった鉛直浸透実験の結果も併記してある。土質条件として $m=0.49$, 初期飽和度 $S_{ri}: 60\sim70\%$, 飽和透水係数 $k_{sat}=0.2 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ とした。実線が解析結果を、破線が実験結果を表す。実験では浸透時の土中水分状態を測定するのが困難なため、実験開始時と終了時における飽和度だけが測定されている。実験終了時の実験値と、ほぼ同時刻の計算値はともに類似した分布を示しており、両者の値は総軸方向に同様の傾向を示すことが予想される。しかし、値の誤差は最大で10%程度となる。

また、両方とも浸透層内の飽和度が一様でないのは、雨量の変化と空気の乾燥によるものと考えられる。次に、図-4は実際の降雨型に関して行なった解析結果である。土質条件として $m=0.44$, $S_{ri}=50\%$, $k_{sat}=5.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ が与えられ、深さ3.0mの位置に不透水層が存在する。降雨が不連続なため、浸透時の飽和度は一様でなく、複雑な分布を示す。浸透時の飽和度が70~80%と、図-3の場合より低い。これは初期条件の差によるものと考えられる。図-4bの時刻は図4aの時刻に対応している。以上のように、鉛直浸透にのみ限定されているが、降雨型と水分状態の応答と解析する手法と適用例を示し、併せて実験データとの対比も行なった。解析では k_{ri} , $p_c \sim S_{ri}$ 関係を一般化されたものとしているため、計算値と実験値を一致させるのは難しいが、浸透特性は両者とも同様となるので、土質の特性が明確であるなら降雨浸透と解析的に取り扱うことが可能となる。

参考文献 (1) Brustkern, Motel-Seytoux "Analytical Treatment of Two-Phase Infiltration" (1970). Proc. A.S.C.E.

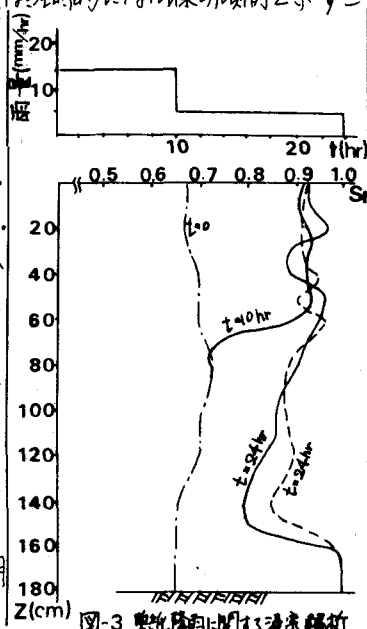


図-3 単純降雨に関する浸透解析

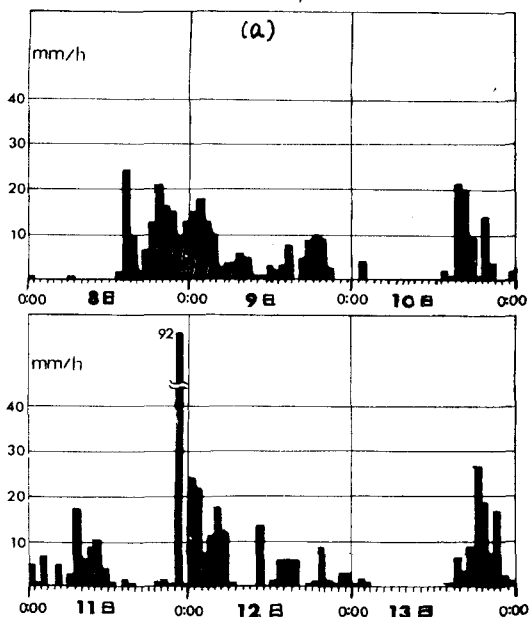
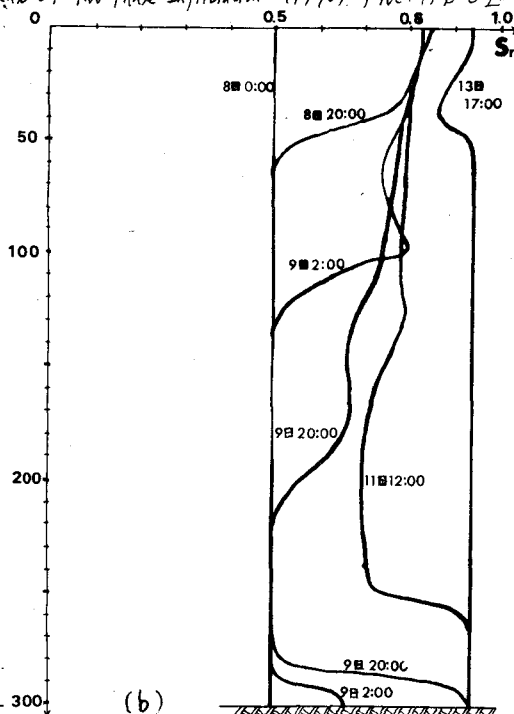


図4 実際降雨による浸透解析



(b)