

PSII-4 降雨に対する不圧地下水位の確率応答特性

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

名古屋大学大学院 学生員 高田 篤

1. はじめに

現地における不圧地下水位の多地点観測によると、降雨に対し地下水位は概して鋭敏に応答するが、その水位の変化幅は流れ場の不均質性を反映して井戸によって大きく異なることが多い。こうした観測水位の空間的ばらつきは、広域の地下水状態を考える上でしばしば厄介な問題となるため、そのランダム性を定量的に把握しておくことが必要である。本研究は、不均質場における降雨時の地下水挙動の特性を不飽和帯での雨水浸透過程を考慮しつつ、確率統計的な立場から検討したものである。

2. 現象のモデル化

不均質場での降雨に伴う地下水挙動は、不飽和土壌の長さが水位上昇量に比べて十分長い場合には、不飽和帯での雨水浸透過程とその結果生ずる地下水帯での水位変動過程を別個に扱うことにより、図-1のように考えることができる。すなわち、地表に与えられた降雨強度 $Ra(t)$ の雨水は土中に鉛直浸透し、不飽和帯において何らかの変換を受けた後、地下水涵養強度 $Re(t)$ として帯水層に供給される。このとき、流れ場が等方均質であれば $Re(t)$ は空間的に一様であるが、不均質な場合にはランダム変量 $Re(x, y, t)$ となる。ここでは、水理特性が平均値のまわりで小さく変動するような不均質場を考え、 $Re(x, y, t)$ は 平均値 $Reo(t)$ 、分散 σ^2_{Re} をもつものとする。一方、こうした水供給により地下水位は場所的にまちまちに上昇しようとするが、帯水層のもつ水平方向流れの水頭拡散効果によって水位分布のランダム性は緩和され、結果として分散 $\sigma^2_h(t)$ をもった水位応答が観測される。

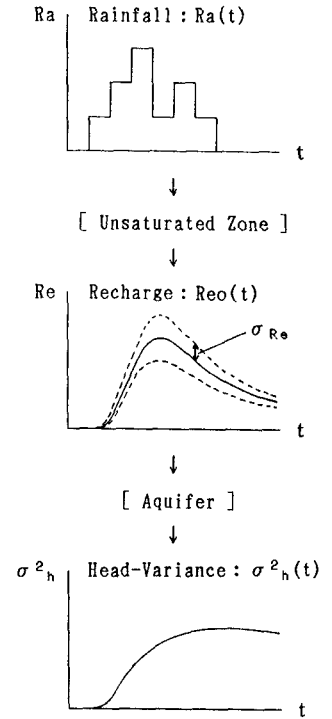


Fig. 1 Head Fluctuation Model

3. 不均質場における水位応答の統計的性質

まず、 $Re(x, y, t)$ の確率の変動に起因した水位応答の統計的性質を物理則に基づいて検討する。水平基盤上の二次元不圧地下水の基礎方程式は、代表水深 $Ho(=const.)$ を用いて線形化できる場合には、

$$S(x, y) \frac{\partial H'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[Ks(x, y) Ho \frac{\partial H'}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[Ks(x, y) Ho \frac{\partial H'}{\partial y} \right] + Re(x, y, t) \quad (1)$$

ここに、 $H'(x, y, t) = H(x, y, t) - Ho$ 、 $H(x, y, t)$: 不透水基盤上の地下水深、 $|Ho| \gg |H'(x, y, t)|$ 。
 $S(x, y)$: 有効間隙率、 $Ks(x, y)$: 飽和透水係数である。

流れ場が空間的にわずかに不均質で、 $S(x, y)$ および $Ks(x, y) Ho$ の対数変換値 $Y(x, y)$ が

$$S(x, y) = So + S'(x, y), \quad |So| \gg |S'(x, y)|$$

$$Y(x, y) = Yo + Y'(x, y), \quad |Yo| \gg |Y'(x, y)|, \quad \text{ただし, } Y(x, y) = \log_e [Ks(x, y) Ho]$$

と表すことができるとする。 H' 、 Re についても、場が均質なときの値のまわりで変動すると考え、

$$H'(x, y, t) = ho(x, y, t) + h_1(x, y, t), \quad Re(x, y, t) = Reo(t) + Re'(x, y, t) = [1 + a(x, y)] \cdot Reo(t)$$

ここに、 $a(x, y)$ は平均ゼロのランダム変数である。これらの関係を式(1)に代入し 微小項を省略する。

この式を無限領域において $h_0(x, y, 0) = \text{const.}$, $h_1(x, y, 0) = 0$ として解き、さらに $\{a(x, y) - S'(x, y)/S_0\}$ の空間相関を white noise 近似することにより、水位 $H'(x, y, t)$ の分散が次式のように求められる。

$$\sigma^2_h(t) = \frac{(\sigma^2_a - \sigma^2_{S'}) \rho_0}{4\pi K_{so} H_0 S_0} \int_0^t \int_0^t \frac{\text{Reo}(\tau') \text{Reo}(\tau'')}{2 |t - \tau' - \tau''|} d\tau' d\tau'' \quad (2)$$

ここに、 σ^2_a 、 $\sigma^2_{S'}$ はそれぞれ $a(x, y)$ 、 $S'(x, y)/S_0$ の分散、 ρ_0 は定数である。

4. 水位応答のランダム性に及ぼす地質特性の影響

地層を構成する土壌の種類が異なる場合、水位変動の分散はどのように変化するであろうか。ここでは、粒度の異なった3種類の土壌を考え、同一の降雨に対する涵養強度の平均 $\text{Reo}(t)$ および水位の分散 $\sigma^2_h(t)$ への影響について検討する。図-2に想定された土壌A・B・Cの平均的な水理特性を示す。

(1) $\text{Reo}(t)$ への影響：降雨強度 $Ra(t)$ から涵養強度 $\text{Reo}(t)$ への変換過程は、不飽和浸透理論を用いて解析される。不飽和帯での流れを鉛直一次元流とみなし、図-2に示した土壌の水理特性を用いて Richards の方程式を数値解析した結果を図-3に示す。解析は不飽和土壌の長さを2m、降雨を100mm/hr×1時間とし、計算は差分法によって行った。同図によれば、求められた $\text{Reo}(t)$ は、多少の時間遅れがあるものの、三者の間できわめて類似している。土壌の透水性は図-2のように $A > B > C$ といった差異があるにもかかわらず、 $\text{Reo}(t)$ の変化にそれが現れないのは、土壌の保水性の差異が透水性とは逆の効果をもたらし、これらが互に打ち消し合っているからにほかならない。すなわち、 $\text{Reo}(t)$ の時間的变化は、透水性と保水性のどちらの効果が卓越するかによって決まっており、土壌の粒度から涵養の早い遅いを云々することはできない。

(2) $\sigma^2_h(t)$ への影響：場の不均質性に起因した水位分散 $\sigma^2_h(t)$ は、式(2)に上記の $\text{Reo}(t)$ を代入することによって計算される。図-3に3種類の土壌に対して求めた $\sigma^2_h(t)$ を併記する。図からわかるように、水位分散の大きさは土壌によってかなり異なっており、粒度が細くなるA、B、Cの順で、つまり飽和透水係数と有効間隙率が共に小さくなるにつれて、水位は乱れ易くなることになる。言い替えれば、不飽和帯での変換によって同じパターンで雨水の供給が生じたとしても、地下水位の応答は粗粒土から成る帯水層よりも細粒土の帯水層の方が場所的に変動し易く、観測値はより不確定性をもつ傾向にある。この結果は、観測水位データの工学的判断や現地における観測井の配置密度を考慮してゆく上で有用な知見といえよう。

5. おわりに 本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 不均質場における水位応答の分散を、帯水層の平均的水理特性・涵養強度との係わりで定式化した。
- 2) 地下水帯への涵養強度は、不飽和土壌の透水性と保水性のどちらの効果が卓越するかによって定まる。
- 3) 水位応答の分散は、帯水層の構成地質が細粒土である場合の方が粗粒土の場合よりも大きい傾向にある。本報で得た水位分散値がどの程度 実現象を説明するのか、実測データによる検証が今後の課題である。

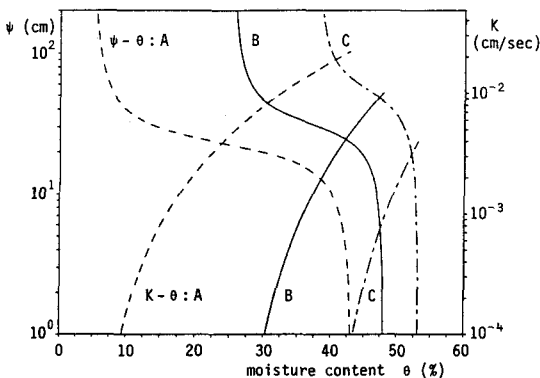


Fig. 2 Hydraulic Properties of Soils

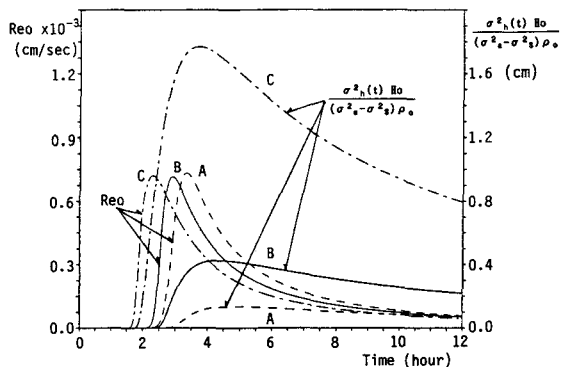


Fig. 3 $\text{Reo}(t)$ and Head-variances