

土壌物理特性が雨水浸透施設の浸透特性に及ぼす影響 Effects of Soil Properties upon Infiltration Characteristics of Storm-water Infiltration Facilities

東京大学生産技術研究所 正員 虫 明 功 臣
東京大学生産技術研究所 正員 岡 泰 道
東京大学大学院 学生員 ○内 田 滋
東京大学生産技術研究所 正員 田 村 浩 啓

1. はじめに

第28回水理講演会において、現地で採取した小試料の室内試験により定めた土壌物理特性（ θ （含水率）と ϕ （吸引圧）の関係、および k （不飽和透水係数）と ϕ の関係）を用いた数値シミュレーションにより、浸透トレンチからの浸透特性の再現性について議論した。その結果、浸透量の時間的変化や吸引圧分布の時間変化などの定性的傾向はよく再現されるが、浸透量が過少に評価されることが明らかになった。本報では、要素分割や境界条件の設定の仕方など、数値計算上の問題点を吟味するとともに、土壌の乾湿および $\theta - \phi$ 関係、 $k - \phi$ 関係が含むパラメータが数値シミュレーション結果に及ぼす影響、および地下水面の高低が浸透量に及ぼす影響を数値実験的に検討し、浸透施設からの浸透現象の評価に対する基礎的知見を得ることを目的とする。なお、本報でも前報と同形の浸透トレンチを対象としている。

2. 浸透方程式と土壌物理特性に含まれるパラメータ

浸透方程式としてはRichardsの式を用い、直交座標系 x, y, z に対して連続方程式とダルシー形の運動方程式より吸引圧 ϕ で表現すると次式となる。

$$f(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_z \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 $f(\phi) = d\theta/d\phi$ ：比水分容量、 k_i ： i 方向の透水係数。

ここでは、トレンチの軸に垂直な断面内での2次元流を考え、また透水係数は等方性として次式を用いる。

$$f(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (2)$$

上式に基づいて数値解析を行なう場合、対象土層の $\theta - \phi$ 関係、 $k - \phi$ 関係が必要である。 $\theta - \phi$ 関係については室内試験により比較的容易に求めることができるが、 $k - \phi$ 関係を実験的に定めることはこの試験にいくつかの難点が伴うために容易ではない。そこで、前報において、 $\theta - \phi$ 関係から $k - \phi$ 関係を導びくG. S. Campbellの理論を導入し、関東ローム土層に対するその適用性を検討した。その後の検討においても関東ローム層に対するその適合性はよいので、本報でもこれを踏襲する。すなわち、

$$\theta - \phi \text{ 関係 ; } \phi = \phi_{cr} (\theta / \theta_0)^{-b} \quad (3)$$

で表現できれば、

$$k - \phi \text{ 関係 ; } k = k_0 (\theta / \theta_0)^{2b+2} \text{ あるいは } k = k_0 (\phi_{cr} / \phi)^{2+2/b} \quad (4)$$

ここに、 ϕ_{cr} ：エア－エントリーポテンシャル、 θ_0 ：飽和含水率、 b ：定数、 k_0 ：飽和透水係数。

したがって、浸透に係わる土壌物理特性に含まれるパラメータは、 ϕ_{cr} 、 θ_0 、 b および k_0 の4つである。このうち、 ϕ_{cr} 、 θ_0 、 b は $\theta - \phi$ 関係から定まるが、 k_0 は別途透水試験等によって定めなければならない。4節ではこれらのパラメータの変化が浸透特性に及ぼす影響について議論する。

3. 数値シミュレーションの方法

3.1 有限要素法による離散化

Galerkin法を用いて(2)式を離散化すれば、次の連立1次方程式を得る。

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + [K] \right) \{ \psi \}_{i+1} = \frac{[C]}{\Delta t} \{ \psi \}_i + [F]_{i+1} \quad (5)$$

ここに、

$$[C] = \sum_{e=1}^E \left\{ f(\psi^{(e)}) \int_{s(e)} \frac{N_i^{(e)}}{N_k^{(e)}} \{ N_i^{(e)} N_j^{(e)} N_k^{(e)} \} dS^{(e)} \right\}$$

$$[F] = \sum_{e=1}^E \left\{ - \int_{s(e)} \left\{ \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial N_j^{(e)}} \frac{\partial z}{\partial z} \right\} k^{(e)} dS^{(e)} \right\}$$

$$[K] = \sum_{e=1}^E \left\{ \int_{s(e)} [B^{(e)}]^T \begin{bmatrix} k^{(e)} & 0 \\ 0 & k^{(e)} \end{bmatrix} [B^{(e)}] dS^{(e)} \right\}$$

$$\text{ただし, } [B^{(e)}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial N_j^{(e)}} \frac{\partial x}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial N_j^{(e)}} \frac{\partial x}{\partial z} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial N_k^{(e)}} \frac{\partial x}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial N_j^{(e)}} \frac{\partial x}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial N_j^{(e)}} \frac{\partial z}{\partial z} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial N_k^{(e)}} \frac{\partial z}{\partial z} \end{bmatrix}$$

E: 全要素数, e: 要素番号, N: 形状関数, i, j, k: 要素番号eの要素の節点番号。

なお, $\psi^{(e)} = (\phi_i^{(e)} + \phi_j^{(e)} + \phi_k^{(e)}) / 3$, $k = (k_i^{(e)} + k_j^{(e)} + k_k^{(e)}) / 3$ を用いた。

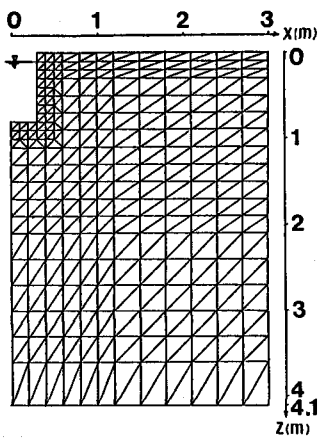
3.2 計算方法の吟味

(1) 要素分割 計算領域は水平方向はトレンチ中心から3m、深度方向は地表面から4.1mとし、図1(a), (b)に示すように異なる要素分割を行ない、計算結果を比較した。浸透量の時間変化および飽和域の拡大状況をそれぞれ図2と図3に示す。両図中には、住宅都市整備公団昭島つつじヶ丘ハイツに試験施工された浸透トレンチに対する現地注水実験(1982年4月9日)時の実測値が併記されており、計算に用いた $\theta - \psi$ 関係はそのトレンチ周辺の深度90cmのもの($\theta_0 = 0.7$, $\psi_{cr} = -20\text{cm}$, $b = 8.93$), k_0 は同深度における4小試料に対する変水頭透水試験のうち最大の $1.6 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ であり、初期条件としてその実験開始時の吸引圧を与えている。図2によると、要素分割Aと要素分割Bでは計算浸透量にかなりの相違が見られ、細かい分割Aではほぼ実験値と適合している。また、図3によると、粗い分割Bでは細かい分割Aより飽和域の拡りが大きく、これは分割Bで分割Aより浸透量が小さいことと符合している。以下の数値シミュレーションでは、浸透量、飽和域の拡りとも実測値に近い要素分割Aを採用する。

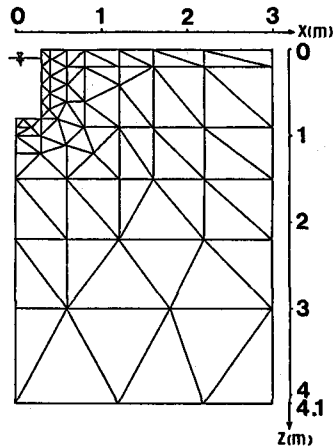
(2) 計算時間間隔 計算時間間隔 Δt を20 secと120 secに変えて計算結果を比較したが、初期の浸透量に4%程度の差が生じたにすぎず、時間経過とともに計算値がほぼ一致した。したがって、 $\Delta t = 120 \text{ sec}$ を用いる。

(3) 収束判定 収束判定は $|\phi_{k+1} - \phi_k| \leq \epsilon$ (k は反復回数) によって行なう。 $\epsilon = 0.1 \text{ cm}$ と $\epsilon = 0.01 \text{ cm}$ で計算結果を比較したところ、浸透量に全く差が表われなかったため、 $\epsilon = 0.1 \text{ cm}$ とした。

(4) 境界条件 i) トレンチ中心軸($x = 0^m$)では対称流と考え不透水境界とする。ii) 今回は無降雨のみを対象とし、かつ比較的短期間の水分変動を対象としているので、地表面($Z = 0^m$)でも不透水境界とする。iii) 昭島つつじヶ丘団地の浸透トレンチ周辺に埋設したテンシオメータの観測記録によれば、豪雨時にも地中深部の吸引圧変化は小さい。したがって、計算領域底部($Z = 4.1 \text{ m}$)では、観測データより判断して $\psi = -20 \text{ cm}$ の一定吸引圧を与える。なお、これを -200 cm (現実にはあり得ないほど乾燥)として、計算結果への影響を調べたが、4~5時間の計算時間の範囲内では、浸透量の計算結果に影響が表われないことがわかった。iv) 計算領域の側端($x = 3 \text{ m}$)では、実験前のテンシオメータの読みを基に深度方向に異なる吸引圧を与え、計算期間中それが変化しないとする。こうした境界条件の妥当性を調べるために、全深度 $\psi = -20 \text{ cm}$ と $\psi = -200 \text{ cm}$ の2種の吸引圧を側端の境界条件として計算結果を比較したところ、浸透



(a) 要素分割 A



(b) 要素分割 B

図1 計算領域と要素分割

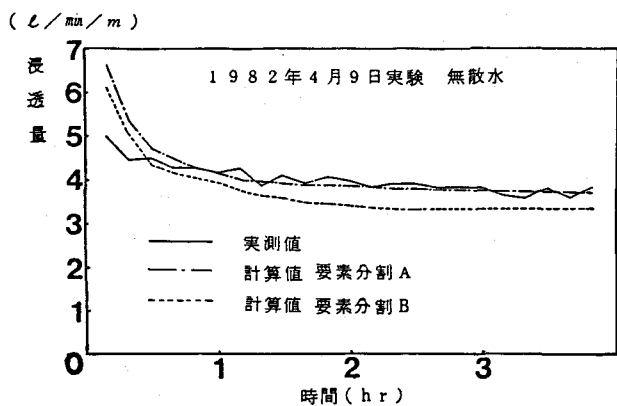


図2 要素分割の違いによる計算浸透量の相違

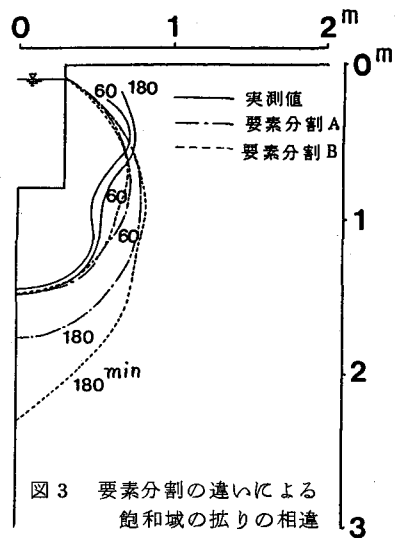


図3 要素分割の違いによる飽和域の拡りの相違

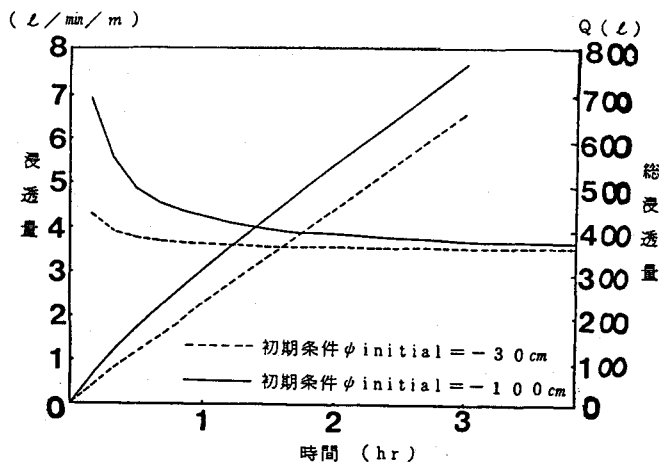


図4 初期条件による浸透量の相違

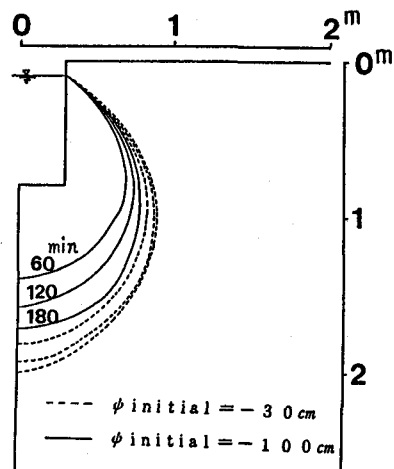


図5 初期条件による飽和域の拡りの相違

量には差が表われなかった。したがって、底部および側端の境界条件の相違が浸透量の計算値に及ぼす影響は少ないと考えられる。

4. 初期条件および土壌特性パラメータが浸透特性に及ぼす影響

4.1 初期条件の影響

初期条件として全層 $\psi = -30\text{ cm}$ 、および $\psi = -100\text{ cm}$ を与えた時の浸透量の時間変化および飽和域の拡りの相違を図4および図5に示す。図4に着目すると、浸透の初期の段階において土壌の乾湿の影響が特に大きく表われる。時間の経過とともに両者の差は縮まるが、現実的な時間の範囲内ではこの差は無視できない値であろう。図中には、浸透開始からの総浸透量を併記してあるが、総浸透量を考慮する場合には初期条件がかなり大きな効果を持つことがわかる。図5に着目すると、土層が湿潤状態にある($\psi = -30\text{ cm}$)ほど、飽和域の拡りが速やかにかつその範囲が広い。飽和域の範囲が広いことはその内部でのポテンシャル勾配が緩やかであることを示しており、浸透量が少さいことと符合している。また、湿潤しているほど定常状態に近い飽和域の形へより速く漸近することがわかる。

4.2 パラメータ b 、 ψ_{cr} および k_o の効果

当研究室では、多摩丘陵、昭島、筑波、東大生研千葉実験所構内などいろいろな場所で各深度より採取した試料に対して室内試験により $\theta - \psi$ 関係を求めているが、それらの中から林地のA層を除いた試験結果を調べると、 b は $5.1 \sim 6.25$ 、 ψ_{cr} は $-10 \sim -50\text{ cm}$ の範囲である。また、 k_o は小試料の室内試験結果では $1.0^{-3} \sim 1.0^{-5}\text{ cm/sec}$ の範囲である。ここでは、従来のこうした試験結果を参考にして、表1に示すケースを設定し、各パラメータの変化が浸透特性に及ぼす効果について検討する。

表1. 数値実験のケース

パラメータ ケース	b	ψ_{cr} (cm)	k_o (cm/sec)
Case - 1	5.1 0	-20	1.6×10^{-3}
2	18.2 0	-20	1.6×10^{-3}
3	6.25 0	-20	1.6×10^{-3}
Case - 4	8.9 3	-10	1.6×10^{-3}
5	8.9 3	-20	1.6×10^{-3}
6	8.9 3	-30	1.6×10^{-3}
7	8.9 3	-50	1.6×10^{-3}
Case - 8	8.9 3	-20	1.0×10^{-3}
9	8.9 3	-20	3.0×10^{-3}
1982. 4. 9 昭島・実験	8.9 3	-20	1.6×10^{-3}

1) b の効果

Case 1~3の3種の b に対する pF -水分曲線を図6に示す。図7に浸透量の計算結果を挙げる。 b が小さいほど全般的に浸透量が大きい、特に初期の段階での浸透量の差が顕著であり、 $b = 18.20$ と 6.250 では3時間後にはほぼ一致している。 b の大小は図6でわかるように自由水として移動可能な間隙範囲の拡大と対応しているので、このパラメータの効果は、初期条件すなわち土層の乾湿により、水分が移動できる間隙が増減する効果と類似している。図8には、飽和域の拡がりの相違を示すが、これと図5が、また図7と図4の傾向が類似しているのは上述の理由による。

2) ψ_{cr} の効果

Case 4~7の浸透量の時間変化に関する計算結果を図9に示す。これによれば $|\psi_{cr}|$ が大きいほど終期浸透量は大きい。また、飽和域は小さくなっている(図は省略)。これは、 $\psi \geq \psi_{cr}$ の範囲で透水係数は飽和透水係数となり、浸透量が大きくなるためである。室内試験で得た pF -水分曲線から ψ_{cr} を決定する際には 10 cm 程度の評価の違いが生じる可能性があり、その場合には終期浸透量に約1割程度の相違が表われることがわかる。

3) k_o の効果

飽和透水係数 k_o を変えたCase 8, 9、および昭島つつじヶ丘団地の浸透トレンチの数値シミュレーションに適用した $k_o = 1.6 \times 10^{-3}\text{ cm/sec}$ に対する計算結果を図10に示す。Case 8に対する5時間目の浸透量

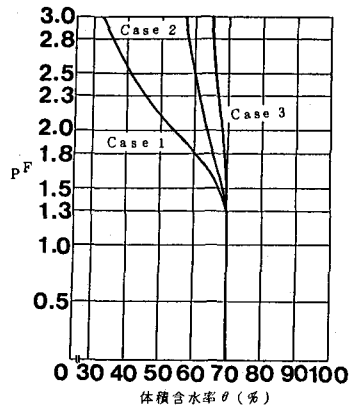


図6 パラメータ b と pF —水分曲線

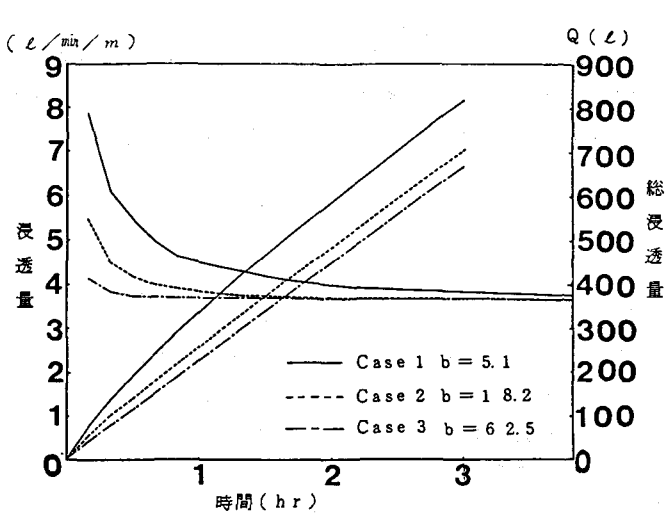


図7 b が浸透量に及ぼす効果

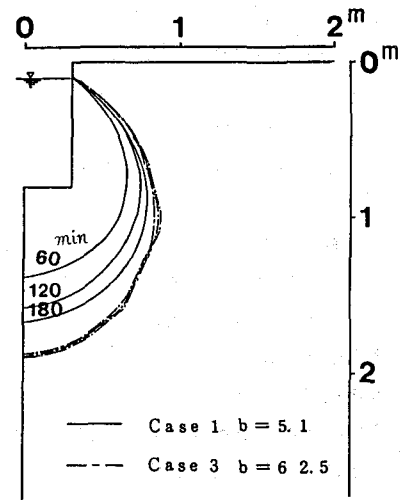


図8 b が飽和域の拡りに及ぼす効果

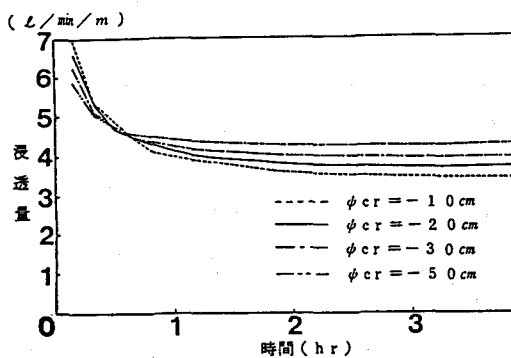


図9 ϕ_{cr} が浸透量に及ぼす効果

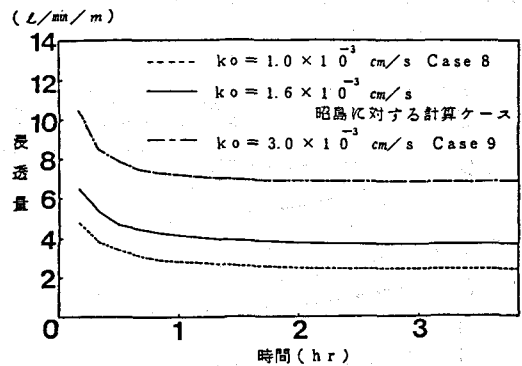


図10 k_o が浸透量に及ぼす効果

は、 2.32 l/min/m である。これに対する昭島のケースの同時点での浸透量の比率は1.59, Case 9の比率は2.96であり, 他の条件が同じなら終期浸透量は飽和透水係数に比例すると見なしてよいと判断される。Campbell の理論では飽和透水係数は独立に評価することになっており, その評価は, 浸透量の評価に最も大きな効果をもつ。

5. 地下水面の位置の効果

地下水面がトレンチ底面から10, 50, 110, 220および330 cmにあるとした時のシミュレーション結果を図11に示す。初期条件としては, 地下水面上1 mまでは吸引圧が直線的に減少するとし, その上部では $\psi = -100 \text{ cm}$ の一定吸引圧を与える。境界条件としては, 計算領域底部は不透水境界とし, 側端部では初期条件を固定する。地下水面がトレンチ底面から330 cmの場合にはトレンチからの浸透水による飽和域が地下水面とはつながらず, 前に示した底部が一定吸引圧という境界条件の場合と同じ浸透量の時間変化を示している。220 cmの場合には, 初期の段階では330 cmの場合と一致しているが, 飽和域が地下水面に達する頃からその曲線からはずれ浸透量が低下する。地下水面がトレンチ底面から110 cm以浅では, 初期の段階から地下水面上の毛管上昇の影響を受けており, ポテンシャル勾配が小さいことと空隙が少ない効果が相俟って浸透量が少さくなっている。なお, ここでの $\theta - \psi$ 関係, $k - \psi$ 関係のパラメータとしては, 昭島つじヶ丘団地のトレンチに適用したものをを用いている。地下水面の効果は, 当然土壌特性によって異なるので, ここで得られた結果を一般化することはできないが, 4節の検討結果から判断してbが小さい土壌ほど地下水面の影響を受け難いと考えられる。

6. おわりに

以上の検討によって, 初期条件(土層の乾湿), $\theta - \psi$ 関係を含むパラメータおよび飽和透水係数が浸透トレンチからの浸透現象に及ぼす効果がかなり明らかになったと考えられる。パラメータの中では, k_0 が浸透量の評価に対して最も大きな効果をもち重要であるが, ψ_{cr} の効果および総浸透量との関係ではbの効果も無視できないことがわかる。今後は, 現地土壌に対すこうしたパラメータ値の適確な評価法と合せて, 降雨の影響や注水停止後の浸透能の回復や浸透水の挙動に関する解析を進める予定である。

〔謝辞〕 pF-水分曲線については当研究室の小池雅洋氏が中心になって作成したものを利用した。また, 本研究は文部省科研費(自然災害特別研究(1)), 代表者早稲田大学吉川秀夫教授)の援助を受けている。記して, 深謝の意を表します。

〔参考文献〕 1) 虫明, 山田, 桑原, 田村: 現地土壌特性の評価に基づく雨水浸透施設の浸透解析, 第28回水講, 1984.2, 2) 岡 太郎: 自然丘陵地における土壌水流动, 京大防災研年報 第26号B-2, 1983.4 (計算法に関連して)

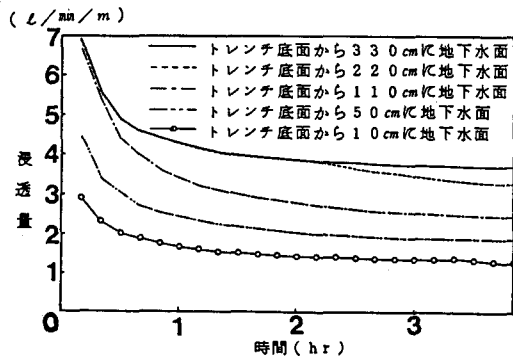


図11 地下水面の位置が浸透量に及ぼす効果

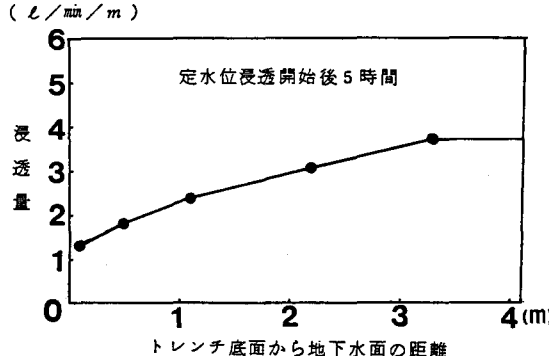


図12 初期地下水面の位置と3時間後の浸透量の関係