

浸透トレンチの浸透特性に関する実験的研究
Experimental Study on Infiltration Characteristics of Permeable Trench

早稲田大学理工学部 正 員 鮎 川 登
早稲田大学大学院 学生員 ○下 村 博 史
清 水 建 設 正 員 坪 田 恵 介

1. はじめに

昭和30年代後半以降の経済の高度成長に伴う人口の都市集中により都市周辺の河川の流域の市街化が急激に進行した。その結果、洪水ピーク流量が増大し、洪水氾濫の危険性が増大した。このような都市河川の水害に対する対策の一つとして流域からの流出を抑制することが考えられている。ここでは、流出抑制法の一つである浸透トレンチの浸透特性に関して実験により検討した結果について述べる。

2. 実験装置および実験方法

実験は図1に示すような幅120cm、高さ150cm、奥行16cmの片面ガラス張りの鋼製の箱の底部に厚さ10cmに粗砂を敷き、その上に図2に示すような粒度分布の砂(平均粒径0.16mm、間隙率0.42、飽和透水係数0.0022cm/s)を入れ、右上部に深さ30cm、幅40cmの浸透トレンチを設置して行なった。実験に使用した砂の毛管圧水頭と飽和度の関係(pF曲線)は図3に示すようである。

実験では、砂層の初期湿潤状態、初期地下水位およびトレンチ内の水深を条件として与え、トレンチ内の水深が一定になるようにトレンチに給水し、トレンチからの浸透量、砂層内の毛管圧水頭および地下水位の時間変化を測定した。なお、実験装置の左端の地下水位は変化しないようにした。トレンチからの浸透量はトレンチへの給水量を測定することにより

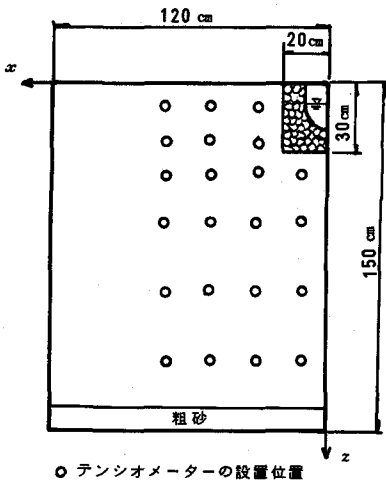


図1 実験装置

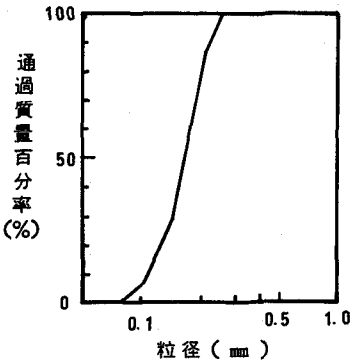


図2 粒度分布

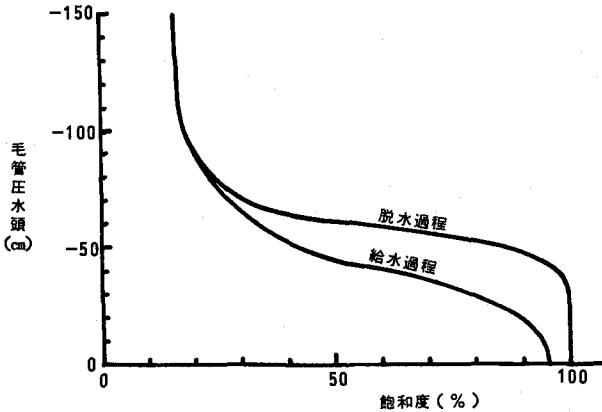


図3 水分保留曲線(pF曲線)

求めた。砂層内の毛管圧水頭は図1に示した地点に設置したテンシオメーターにより測定した。地下水位は実験装置の底面に孔をあけ、ビニール管をつなぎ、マノメータにより測定した。また、降雨がトレンチからの浸透量におよぼす影響を検討するために、降雨発生装置により降雨を発生させた場合についても同様の実験を行なった。

3. 浸透過程

地下水位を $z=135\text{cm}$ に保ち、毛管作用により砂層に湿潤を与え、平衡状態に達したのちに、浸透トレンチ内の水深を 20cm に保つようにして行なった実験の結果に基づいてトレンチからの浸透過程について考察する。

トレンチからの浸透量の時間変化を示すと、図4のようになる。図4によると、浸透量は時間の経過とともに減少していき、一定の値に達することがわかる。トレンチの真下($x=10\text{cm}$)に設置されたテンシオメーターにより測定された毛管圧水頭を用いてポテンシャル(=毛管圧水頭+高度水頭)の時間変化を示すと、図5のようになり、時間とともに一定の分布に漸近していくことがわかる。

トレンチの真下($x=10\text{cm}$)および横($x=30\text{cm}$)における毛管圧水頭の分布の時間変化を図6および図7に示す。これらの図によると、トレンチからの浸透の影響を受け、上方から下方へ毛管圧の上昇(負圧の減少)が伝播し、約30分後に $z=120\text{cm}$ まで達し、その後も浸透により毛管圧の上昇が続くが、次第に一定の分布に漸近していくこと、および毛管圧の変化は上方ほど大きいことがわかる。

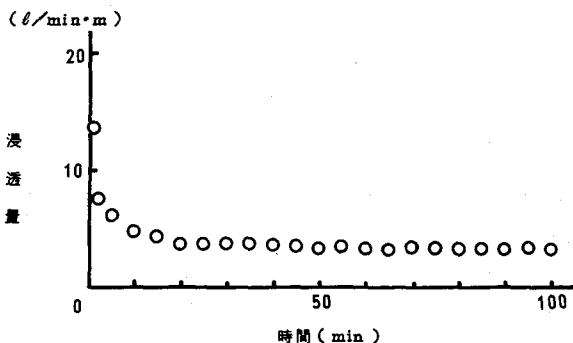


図4 浸透トレンチからの浸透量の時間変化

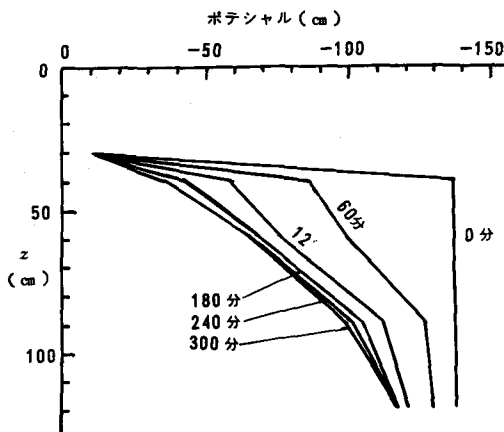


図5 ポテンシャルの時間変化($x=10\text{cm}$)

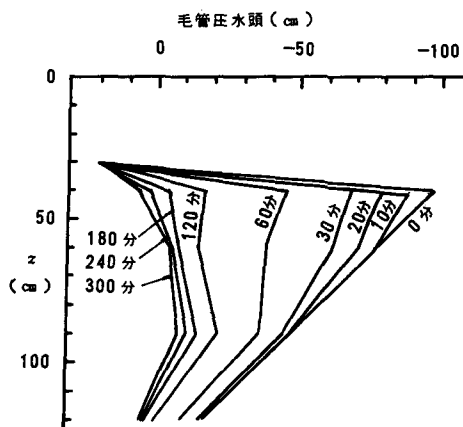


図6 毛管圧水頭分布の時間変化($x=10\text{cm}$)

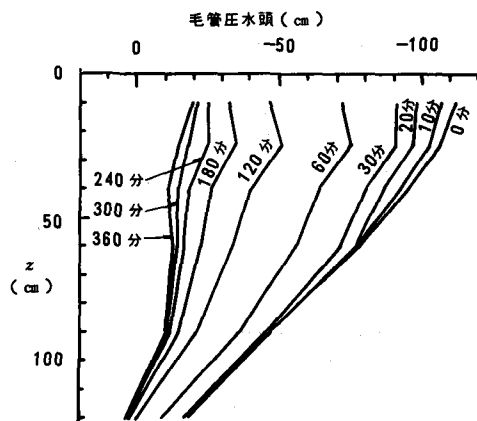


図7 毛管圧水頭分布の時間変化($x=30\text{cm}$)

図5によると、初期の状態ではポテンシャルが深さ方向に変化せずに、一様な分布をしており、毛管圧と重力が釣合って平衡状態にあり、水は移動しないが、時間とともにトレンチからの浸透の影響を受け、トレンチに近いところから次第に毛管圧が上昇し(図6および図7)、毛管圧と重力のバランスがくずれ、深さ方向のポテンシャルに勾配がつき、下方へ水が移動するようになり、最終的には、図6および図7に示すように、深さ方向の毛管圧は一様な分布に近くなるので、重力の影響が卓越するようになり、水はほぼ重力によって移動するような状態になることがわかる。

トレンチの真下に設置されたテンシオメーターにより測定された毛管圧水頭の時間変化を図8に示す。図8によると、トレンチからの浸透の影響は次第に下方へ伝わり、各点における毛管圧水頭は次第に増加し、それぞれ一定の値に漸近すること、およびトレンチに近い $z=40\text{ cm}$ では毛管圧水頭は正となり、飽和するが、トレンチから離れた $z=60\text{ cm}$ と 90 cm では毛管圧水頭は負のままで、飽和しないこと、しかし、浸透水は地下水面に達し、地下水位が上昇し、その影響で $z=120\text{ cm}$ では毛管圧が正となり、飽和することがわかる。浸透流がほぼ定常状態に達した時点における等ポテンシャル線図を図9に示す。図9では斜線を施した部分は飽和領域(毛管圧が正となる領域)を示すが、この図によると、トレンチからの浸透流はトレンチの近辺では飽和流となるが、大部分の領域は不飽和の状態で浸透していくことがわかる。

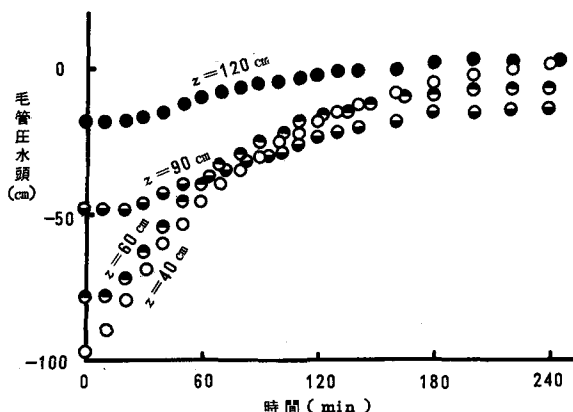


図8. 毛管圧水頭の時間変化 ($x=10\text{ cm}$)

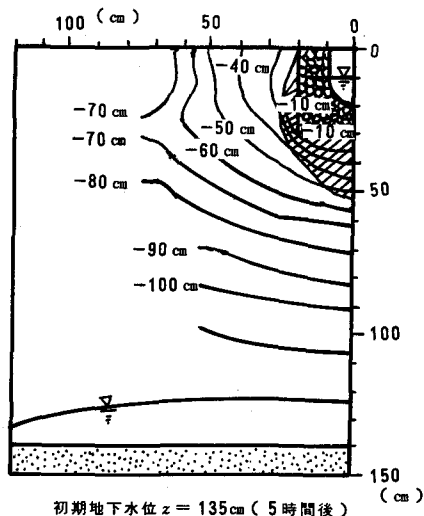


図9 等ポテンシャル線図

4. 浸透特性

浸透トレンチからの浸透量はトレンチの長さ、幅、トレンチ内の水深、地層の初期湿潤状態、間隙率、透水係数、水分保留特性、地下水位、降雨などの影響を受けるものと考えられるが、ここでは、地層の初期湿潤状態、地下水位、浸透トレンチ内の水深および降雨がトレンチからの浸透量におよぼす影響に関して実験により検討した結果について述べる。

(1) 初期湿潤状態の影響

初期地下水位を $z=135\text{ cm}$ 、トレンチ内の水深を 20 cm とし、図10に示すような2通りの初期湿潤状態について行なった実験におけるトレンチからの浸透量の時間変化を比較して示すと、図11のようになる。砂層の初期状態が乾燥している場合(ケースA)は湿潤している場合(ケースB)と比較して、

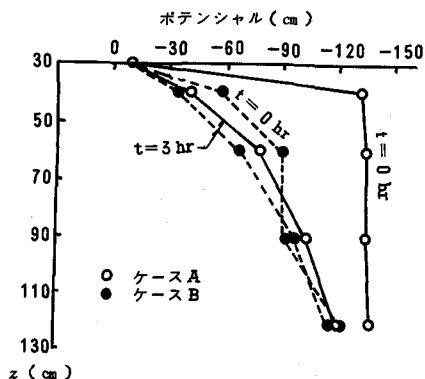


図10 ポテンシャルの鉛直分布

浸透初期においては浸透量が大きくなるが、時間の経過とともに浸透量の差は小さくなり、最終浸透量には殆んど差がなくなることがわかる。この2つの実験の定常状態に達した時点における浸透トレンチ真下のポテンシャル分布も比較して図10に示してあるが、これによると定常状態においては2つの実験のポテンシャル分布はほぼ同じようになることがわかる。

(2) 地下水位の影響

トレンチ内の水深を20 cm、初期湿潤状態を図10のケース A の状態として、初期地下水位を $z = 75 \text{ cm}$ 、105 cm および 135 cm の3通りに変えて行なった実験の結果に基づいてトレンチからの最終浸透量と地下水位の関係を示すと、図12のようになり、地下水位が高くなると、浸透量が減少することがわかる。

初期地下水位が $z = 75 \text{ cm}$ の場合の実験開始2.5時間後および $z = 135 \text{ cm}$ の場合の実験開始5時間後の等ポテンシャル線図を比較して示すと、図13のようになる。図13によると、初期地下水位が $z = 75 \text{ cm}$ の場合の方が $z = 135 \text{ cm}$ の場合より砂層内のポテンシャルが高いこと、および等ポテンシャル線の間隔が広いことがわかる。すなわち、地下水位が高くなると、全体的にポテンシャルが高くなるが、ポテンシャルが高いことは毛管圧が大きい（負圧が小さい）ことで、砂層内の水分量が多くなり、透水係数が大きくなる。しかし、等ポテンシャル線の間隔が広がるため、ポテンシャルの勾配が小さくなる。透水係数が大きくなる影響より、ポテンシャルの勾配が小さくなることの影響が大きいため、地下水位が高くなると、トレンチからの浸透量が小さくなるものと思われる。

地下水位がある程度低くなると、浸透トレンチからの浸透量は地下水位の影響を受けなくなるものと考えられるが、実験装置の底部に10 cmの厚さに敷かれた粗砂内に地下水位を落とし、トレンチ内の水深を20 cmとして行なった実験によると、浸透量は $4.14 \ell / \text{min} \cdot \text{m}$ となった。この実験における $x = 30 \text{ cm}$ の毛管圧水頭分布の時間変化を示すと、図14のようになり、毛管圧水頭分布は時間とともに一様分布に近づき、水は毛管圧の影響をほとんど受けなくなり、重力の作用によって浸透するようになるこ

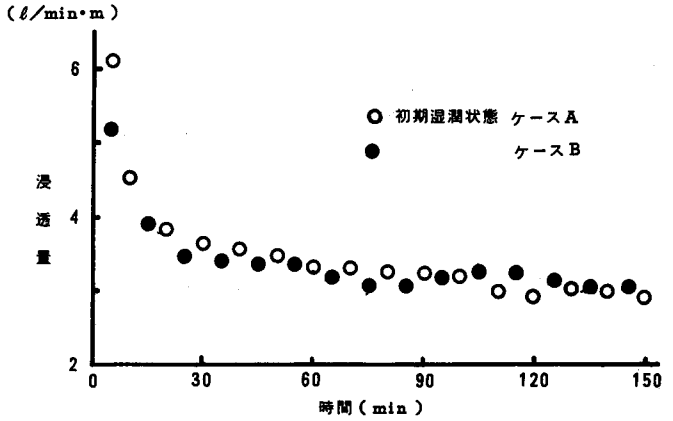


図11 浸透トレンチからの浸透量の時間変化におよぼす初期湿潤状態の影響

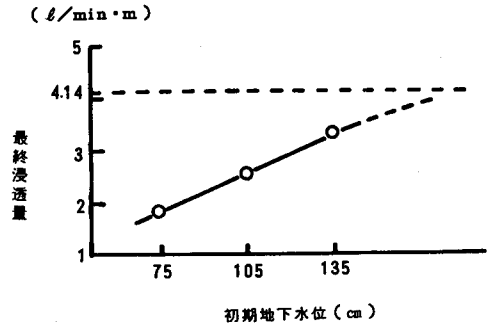


図12 最終浸透量と初期地下水位の関係

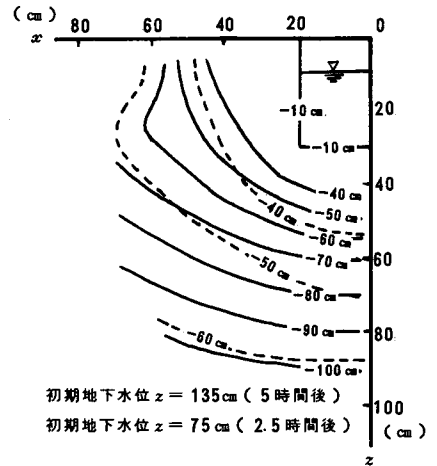


図13 初期地下水位 $z = 75 \text{ cm}$ と $z = 135 \text{ cm}$ の場合の等ポテンシャル線図の比較

と、および毛管圧は負であり、不飽和の状態で浸透することがわかる。

(3) 浸透トレンチ内の水深の影響

初期地下水位を $z = 135\text{ cm}$ 、初期湿潤状態を図10のケース A の状態として、トレンチ内の水深を 10 cm 、 20 cm および 30 cm の3通りに変えて行なった実験の結果に基づいてトレンチからの最終浸透量とトレンチ内の水深の関係を示すと、図15のようになり、トレンチ内の水深が大きくなると、浸透量が増加することがわかる。

トレンチ内の水深が 10 cm の場合と 30 cm の場合について実験開始3時間後の等ポテンシャル線図を比較して示すと、図16のようになる。図16によると、トレンチからの浸透の影響を受ける領域では、トレンチ内の水深が 10 cm の場合と 30 cm の場合では、等ポテンシャル線は同じような形状になるが、水深が 30 cm の場合の方が 10 cm の場合よりポテンシャルの値が約 10 cm 大きくなっていることがわかる。トレンチ外縁のポテンシャルの値は水深が 30 cm の場合は 0 、 10 cm の場合は -20 cm となるので、トレンチ近傍のポテンシャル勾配は水深が 30 cm の場合の方が大きくなる。また、水深が 30 cm の場合の方がポテンシャルが大きく、したがって、毛管圧が大きく（負圧が小さく）、砂層内の水分が多く、透水係数が大きくなっていることがわかる。トレンチ内の水深が大きくなると、トレンチの側方からの浸透面積が大きくなるとともに、トレンチの近傍のポテンシャル勾配が大きくなることによりトレンチからの浸透量が増加するものと思われる。

(4) 降雨の影響

トレンチ内の水深を 20 cm 、初期地下水位を $z = 135\text{ cm}$ 、初期湿潤状態を図10のケース A に近い状態とし、降雨強度を 0 、 50 および 100 mm/hr の3通りに変化させて行なった実験の結果に基づいて、降雨のない場合のトレンチからの浸透量を基準として、降雨強度が 50 mm/hr および 100 mm/hr の場合のトレンチからの浸透量の時間変化を示すと、図17のようになる。図17によると、実験開始後50分ぐらいまでは降雨の影響はあまりないが、降雨強度

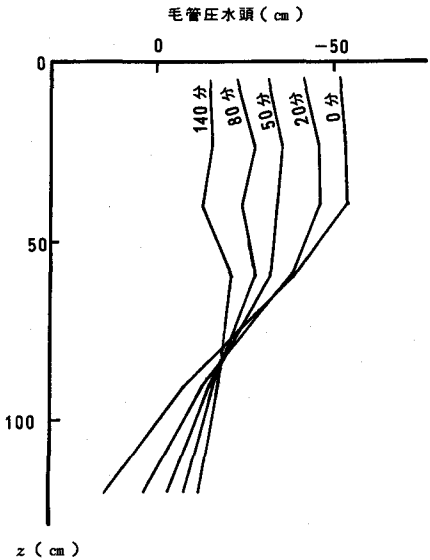


図14. 毛管圧水頭分布の時間変化 ($x = 30\text{ cm}$)

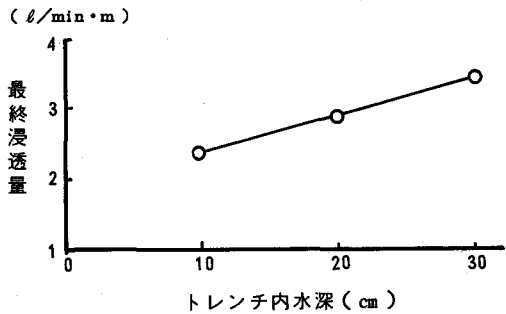


図15. 最終浸透量とトレンチ内水深の関係

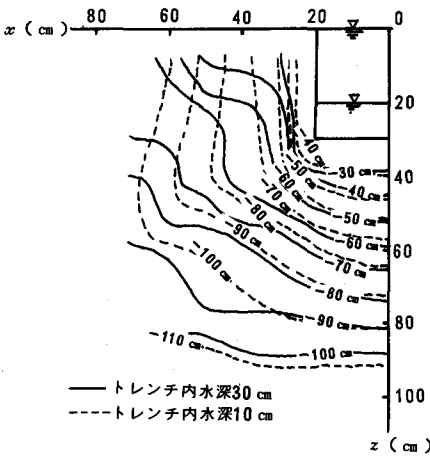


図16. トレンチ内水深が 30 cm と 10 cm の場合の3時間後の等ポテンシャル線図の比較

が50mm/hrの場合は約80分後、100mm/hrの場合は約60分後から影響がはじめ、トレンチからの浸透量は、降雨のない場合に比べて、次第に減少していき、150～200分後には降雨の影響は定常状態に達することがわかる。

降雨がある場合には、雨水の浸透により砂層内の水分量が増加し、トレンチ周辺のポテンシャル勾配が減少することによりトレンチからの浸透量が減少する。

トレンチ内の水深を0（トレンチからの浸透量を0）、初期地下水位を $z = 135\text{cm}$ とし、強度100mm/hrの降雨を与えた場合の $x = 50\text{cm}$ における6点の毛管圧水頭の時間変化を図18に示す。図18によると、降雨の影響は実験開始50分後には $z = 40\text{cm}$ （トレンチ底面より10cm下）、約100分後には $z = 120\text{cm}$ まで達し、約200分後には各点の毛管圧水頭はほぼ一定の値に達することがわかる。 $x = 50\text{cm}$ における毛管圧水頭分布の時間変化を図19に示す。図19によると、 $z = 120\text{cm}$ は地下水位の影響を受けるが、 $z \leq 90\text{cm}$ では雨水の浸透を受け、毛管圧水頭が上昇しながら（負圧が減少しながら）、毛管圧水頭分布が一様になり、雨水は重力の作用により不飽和の状態で見え透していくことがわかる。

5. おわりに

本論文では都市河川の流出抑制法の一つである浸透トレンチの浸透特性に関して実験的に検討した結果について述べた。実験を容易にすることを考えて、実験は砂を使用して行なったので、実験結果を現地にそのままあてはめることはできない。今後は浸透トレンチからの浸透現象の数値シミュレーションの方法について検討し、本実験の結果を用いて数値シミュレーション法の妥当性を検証し、現地の現象に関しては数値シミュレーションにより解析する積りである。

本実験の遂行および実験結果の整理にあたって、市川雅明、内田滋、釜井英行、竹本光宏および中尾幸久、野崎啓太、松本秀司の各氏の協力を得たことを記し、感謝の意を表します。また、本研究は文部省科学研究補助金（自然災害特別研究(I)：研究代表者早稲田大学理工学部吉川秀夫教授）の補助を得たことを記し、謝意を表します。

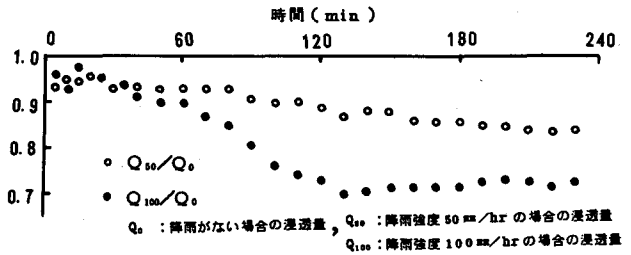


図17 トレンチからの浸透量におよぼす降雨の影響

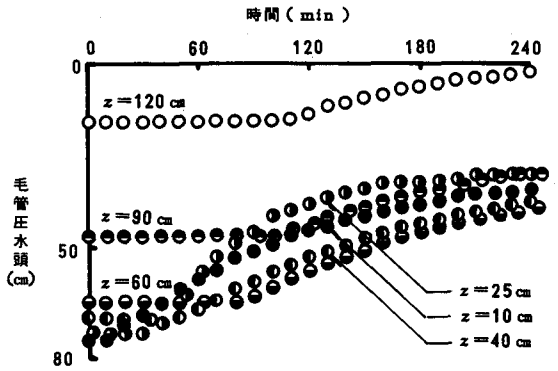


図18 雨水浸透による毛管圧水頭の時間変化

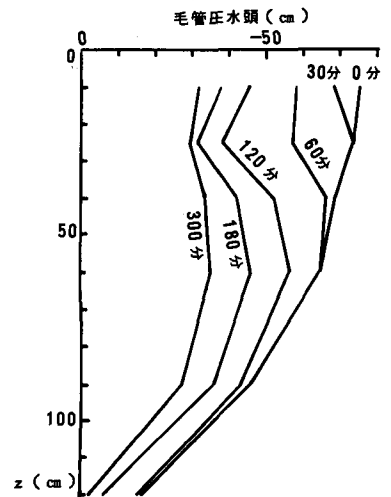


図19 雨水浸透による毛管圧水頭分布の時間変化