

浸透型流出抑制施設の浸透特性に関する実験的検討

Experimental Study on Infiltration Characteristic

of Storm water Infiltration Facilities.

建設省土木研究所○学生員 齊 藤 松 美

建設省土木研究所 正 員 山 本 晃 一

1. はじめに

流域の都市化により増大した雨水流出量に対処するため、従来より鋭意行われている河川改修をさらに進めると同時に、流域が持つ保水・遊水機能の維持・確保、適正な土地利用の誘導等からなる流域も含めた総合治水対策が行われている。この総合治水対策としての流出抑制対策の一手法に浸透型流出抑制施設が挙げられ、現在、各地で試験施工され、流出抑制効果がかかなり期待できることが分っている。

しかし、この浸透型施設は、浸透量に及ぼす影響因子の量的評価という技術的問題が解明されないままに施設の設置が進んでいるのが実状である。このような状況に鑑み、筆者らはこの技術的問題を解明する目的で、長期間に亘り現地実験を行って調査・検討を続けてきた。しかし、現地実験により、本施設の浸透能力を把握することは、同一条件で実験を行っても実験地点の多少の違いによって浸透量が異なること、また、実験条件として狭い範囲での検討しか行うことができないこと等により、満足する結果を得るまでには至らなかった。そこで、浸透型施設の浸透能力等に及ぼす影響因子の量的評価を行うために水理模型実験を行った。

本報告では、関東ローム層地盤を対象として行った現地実験と砂質土を対象として行った水理模型実験について、その概要と結果を述べるとともに両者を比較し、水理模型実験結果の現地適用性について検討した結果を述べるものである。

2. 現地実験による浸透型施設の浸透特性把握

2.1 実験概要

土木研究所構内にある水文観測場及び東京都東久留米市にある滝山団地に、図1、2に示す浸透型施設を設置して実験を行った。円筒型施設は、塩化ビニール管を用い管の底部から浸透する構造である。トレンチ型施設は、塩化ビニール管と透水管を用い透水管の周囲に碎石を正方形に敷設したところから全方向に浸透する構造である。

土研構内の浸透層の土質は、関東ロームで層厚約4m、このローム層の透水係数は、乱した試料を基に室内透水試験を行った結果、 10^{-6}

cm/sのオーダーであるが、乱さない試料を基に求めた透水係数は 10^{-2} cm/sのオーダーである。

地下水位（宙水）は、冬期において地表面下2m付近である。一方、東久留米市の関東ローム層の厚さは、地表面より7mであり、地下水位（宙水）は地表面下約5mである。

実験は、施設毎に設定した初期湛水深を常時一定に保つよう

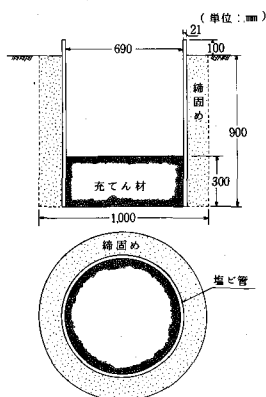


図1 円筒型施設の構造

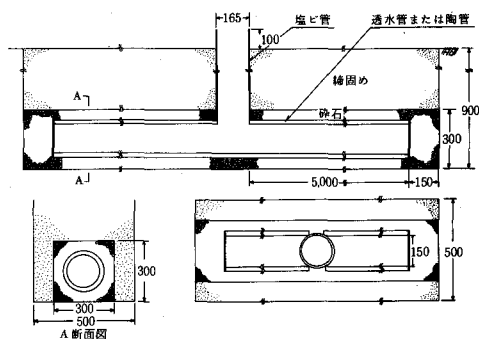


図2 トレンチ型施設の構造

2.2 実験結果

(1) 湛水深 H と浸透量 Q の関係

(2) 浸透底面積 A と浸透量 Q の関係

浸透底面積と浸透量の関係を整理したものが図4,5である。
実験データの数が少ないうえに、調査地点の多少の違いによっ
て浸透量がバラツいて

Figure 1 is a graph showing the relationship between the permeability coefficient (Q) and the bottom area (A) of a cylindrical type facility. The Y-axis represents the permeability coefficient (Q) in $\ell/hr.$, ranging from 0 to 600. The X-axis represents the bottom area (A) in m^2 , ranging from 0 to 0.4. A curve is plotted, showing that Q increases with A . A line segment on the curve is labeled $Q=7A$. Data points are labeled B9, B10, B13, B14, and B12. An inset box titled '凡 例' (Legend) provides details for the data points:

Point	Details
B, B1, B12	(D: 690 mm, H: 80 cm, 充てん材: 6号砕石)
B9	(D: 500 mm, 〃)
B10, B13	(D: 300 mm, 〃)
B14	(D: 150 mm, 〃)

凡 例

- ; 円筒型施設 ($D = 690\text{mm}$)
充てん材 : 4号砕石
- ; トレンチ型施設 ($\ell = 40\text{cm}$)
 $L_p = 4\text{m}$, $h = 40\text{cm}$
充てん材 : 4号砕石

但し、浸透量は実験の終了前1時間の平均値である。

浸透量 $Q (\text{cm}^3/\text{hr})$

円筒型施設 (cm)

溝 水 深 $H (\text{cm})$

Figure 1 is a line graph showing the relationship between the average value of the final amount of water per unit area (Q) and the time (t) for the water to reach the bottom of the soil (T). The Y-axis is labeled "浸透量(実験の終了前1時間の平均値; Q (ℓ/hr))" and ranges from 0 to 4000. The X-axis is labeled "浸透底面積 A (m^2)" and ranges from 0 to 10. Two data series are plotted: H (top series) and G (bottom series). Both series show a positive correlation between A and Q . A legend box at the bottom right lists the parameters for each series: H (b: 90cm, ℓ : 10m, H: 50cm, 充てん材: 6号砕石), G (b: 60cm, ℓ : 10m, H: 50cm, 充てん材: 6号砕石), F (b: 30cm, ℓ : 10m, H: 50cm, 充てん材: 6号砕石), L (b: 90cm, ℓ : 4m, H: 50cm, 充てん材: 6号砕石), K (b: 60cm, ℓ : 4m, H: 50cm, 充てん材: 6号砕石), and J (b: 30cm, ℓ : 4m, H: 50cm, 充てん材: 6号砕石). The legend also includes a note: "凡 例".

—74—

施設を設置して、定水頭実験を行っている。大穂地区ではトレンチ型施設の底面幅が異なるにもかかわらず、浸透量がほぼ等しいという結果が得られており、土研構内での実験と同様な結果となっている。

(3) 地下水位Lと浸透量 Q_{15} の関係

地下水位が浸透量に及ぼす影響を把握するために、円筒型施設2基、トレンチ型施設1基を設置し、春期から冬期にかけて定水頭実験を行った。

浸透型施設の浸透底面と地下水位の差 L と浸透量 Q_{15} との関係を整理したものが図6である。トレンチ型施設では、地下水位の下降とともに浸透量は増加するが、円筒型施設では地下水位の影響をあまり受けないことが分る。この原因としては、円筒型施設の浸透面下における土壌水帯で、既に透水性の良くない層が形成されていたか、又は、施設設置後の実験等により不透水層が形成されたためと思われる。なお、図中に(1)、(2)と記した浸透量の多いデータは、一連の実験

の第1回目、第2回目に相当するものであり、多くの現地実験結果によると第1回目は、その後行った実験結果に比べて浸透量が多いのが普通である。

(4) 土中水分量と浸透量の関係

トレンチ型施設に水を長時間に亘り注入した場合、施設周辺の土中水分量がどのように変化するか。また、降雨がある時とない時、あるいは降雨強度を変えた場

合に土中水分量がどのように変化するかを、トレンチ型施設の縁から80cm離れた地点に設置したテンシオメーターにより、深度毎のPF値を測定し、土中水分量が浸透量に及ぼす影響を調べた結果を図7、8に示す。図8より降雨開始後4時間目には、表層の水理水頭が重力水頭にはほぼ一致し、飽和状態に達していることが分かる。また、深度120cm以下ではトレンチからの水圧を受けているのが分かる。なお、降雨の有無によらず実験開始後6時間目の浸透量はほぼ同じであり、降雨量が浸透量に及ぼす影響はそれほど大きくないと思われる。

3. 水理模型実験による浸透型施設の浸透特性把握

3.1 実験概要

実験施設は、図9に示す直方体の形状をなす浸透水槽からなり、浸透水槽の中に砂を敷き詰め、そこに模型の浸透型施設を設置した。なお、円筒型施設の場合は浸透流が3次元的に拡がることから、実際の浸透現

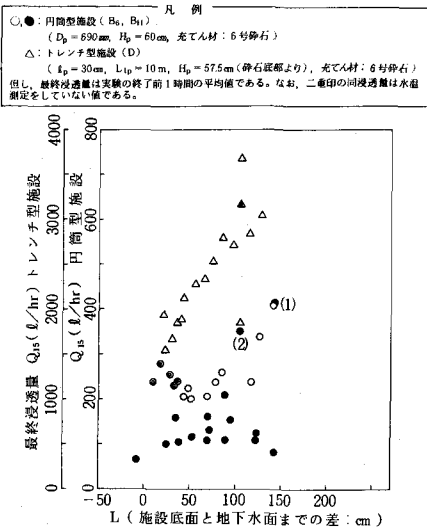


図6 施設底面と地下水面までの差 L と最終浸透量 Q_{15} との関係

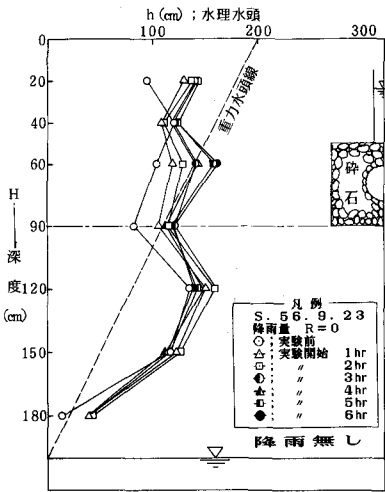


図7 水理水頭のプロファイル

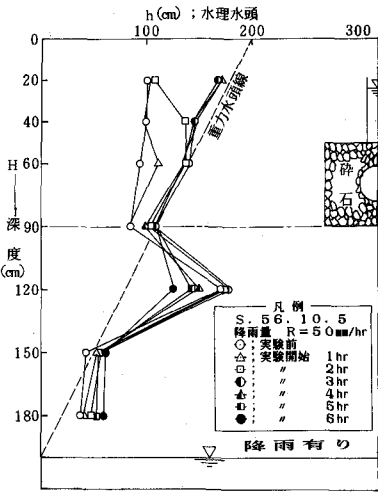


図8 水理水頭のプロファイル

象が起っている場に近づけるために、浸透水槽内に半円形の大きな穴の多数あいた外壁を設置した。

円筒型施設の形状は、塩化ビニール管の半円筒断面であり、それを合成樹脂板に接着して、管底から浸透する構造である。トレンチ型施設の形状は、直方体で有孔塩化ビニール管の周囲(30×30mm)に小砂利を正方形に敷き詰めたトレンチを合成樹脂板に接着して、碎石部分から全方向に浸透する構造である。

実験の測定内容は、浸透型施設の浸透量、浸透水の拡がり状況、地下水位の変化状況等である。実験はまず、地下水位を設定した後に、浸透型施設の湛水深が所定の値になるように、浸透量に見合う注水量を水道の蛇口により調節した(定水頭実験)。浸透量は、浸透水槽の地下水側溝に付けてあるバルブより排出する水をメスシリンダーにより5～10分間隔で測定した。実験はこの浸透量が安定するまで継続して行った(2～3時間)。浸透水の拡がり状況は、水にフローレセンを混入して、合成樹脂板を通して観察した。

3.2 相似律

模型の浸透型施設からの浸透は、飽和浸透理論に従う現象であると仮定する。今、自然地盤の浸透層の透水係数は、非等方性を示すことから、この各方向の成分を表わした運動方程式を連続方程式に代入し、得られた式について座標のスケールを変換すれば、ラプラスの方程式となり、非等方性の場合から等方性の場合へ帰着させることができる。したがって、ピエゾ水頭は、境界値だけによって決まることになる。

図10に示す円筒型及びトレンチ型施設の浸透量に影響を与えると考えられる境界値は、円筒型では H_m 、 D_m 、 L_m 、トレンチ型では H_m 、 ℓ_m 、 h_m 、 L_m 、 L_{1m} である。したがって、浸透型施設からの浸透量 Q_m は、次の無次元量で表わせることになる。

$$\text{円筒型では} \quad Q_m/K_{zm}/\lambda^2/A_m = f(H_m/\lambda/D_m, L_m/\lambda/D_m) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{トレンチ型では} \quad Q_m/K_{zm}/\lambda^2/A_m = f(H_m/\lambda/\ell_m, L_m/\lambda/\ell_m, h_m/\lambda/\ell_m, L_{1m}/\ell_m) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $A_m = \pi \cdot D_m^2/4$ (円筒型)、 $A_m = \ell_m \cdot L_{1m}$ (トレンチ型) である。

本実験施設では、均一砂を対象に実験を行ったので $K_{zm}/K_{hm} \div 1$ となり、(1)、(2)式における λ^2 は、1として実験結果が整理しえることになる。なお、前述した相似性が模型上で成立するかを検証するために、円筒型施設の直径 D_m を2、6.5cmと変えて実験を行った。その結果、円筒型施設の浸透面の直径が変わっても、ほぼ同一の関係式線上にデータがプロットされることから、力学的に相似であることが確認された。なお、砂の透水係数の測定を行ったところ、砂の締め固め方によって透水係数がかなり大幅に変わることが分った。ここでは、浸透水槽に砂を詰めたのと同様な詰め方で測定した透水係数を使って実験資料を整理したが、実際の透水係数はこの倍ぐらいいずれている可能性がある。

3.3 実験結果

(1) 湛水深 H_m と浸透量 Q_m の関係

浸透型施設の底面高と地下水位との差 L_m が一定で施設形状も変わらない場合に、湛水深を変えると浸透量がどのように変化するかをみたものが図11である。円筒型施設では、 $H_m/\lambda/D_m = 0.2 \sim 3.0$ の範囲で浸透量は

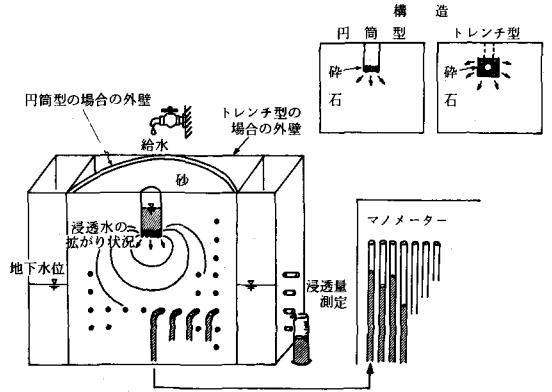


図9 水理模型実験施設概要

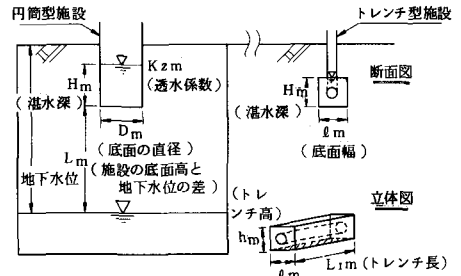


図10 浸透型施設の浸透量に影響を与え
ると考えられる因子

湛水深に対して直線関係があり、次式で表わすことができる。

$$Q_m/K_{zm}/\lambda^2/A_m = C_1 \cdot H_m/\lambda/D_m + C_2 \tag{3}$$

ここに、 C_1 、 C_2 は $L_m/\lambda/D_m$ により変化する値である。

また、トレンチ型施設においても円筒型と同様な結果が得られたが、 $H_m/\lambda/\ell_m$ が1以下になると浸透量と湛水深との間に直線関係が成立しなくなる結果となった。これは、トレンチ上面及び側面の一部からの浸透が無くなるためである。

(2) 浸透底面幅 D_m あるいは ℓ_m と浸透量 Q_m の関係

円筒型及びトレンチ型施設の浸透量 Q_m が、浸透底面幅 D_m あるいは ℓ_m の影響を受けるかどうかをみたのが図12、13である。図より無次元浸透量 $Q_m/K_{zm}/\lambda^2/A_m$ と無次元総ヘッド $(H_m + L_m)/\lambda/D_m$ 、あるいは $(H_m + L_m)/\lambda/\ell_m$ との間に、ほぼ比例関係が成立することから次式で表わされ、

$$\text{円筒型施設では} \quad Q_m/K_{zm}/\lambda^2/A_m \div C_D \cdot (H_m + L_m)/\lambda/D_m \tag{4}$$

$$\text{トレンチ型施設では} \quad Q_m/K_{zm}/\lambda^2/A_m \div C_\ell \cdot (H_m + L_m)/\lambda/\ell_m \tag{5}$$

これを浸透量 Q_m の形で表わすと(4)、(5)式は

$$Q_m \div \pi/4 \cdot K_{zm} \cdot \lambda \cdot C_D \cdot (H_m + L_m) \cdot D_m \tag{6}$$

$$Q_m \div K_{zm} \cdot \lambda \cdot C_\ell \cdot (H_m + L_m) \cdot L_{im} \tag{7}$$

ここに、 C_D 、 C_ℓ は $L_m/\lambda/D_m$ により変化する値であり、 L_{im} はトレンチ長である。となる。

したがって、浸透型施設からの浸透量 Q_m は、湛水深及び地下水位がほぼ同じであるような場合には、円筒型では浸透底面幅 D_m に比例して増加するが、トレンチ型では単位トレンチ長当りの浸透量は浸透底面幅 ℓ_m によらずほぼ一定値となることが分った。なお、トレンチの底面幅を2、6 cmと変化させて行った実験結果より、単位トレンチ長当りの浸透量は、浸透底面幅 ℓ_m の影響を受けないことを確認している。

4. 現地実験結果と水理模型実験結果の比較

現地実験で得た浸透量とそれに及ぼす影響因子の関係を水理模型実験結果と比較し、模型実験で得られた関係の適用性について検討する。しかし、浸透型施設からの浸透は、不飽和浸透現象の場により行われていることから、模型実験での飽和浸透現象の場とは異なっていることが予想され、本実験結果をそのまま現地に適用しえないのは明らかである。本検討では、模型実験で得られた浸透量とそれに及ぼす影響因子の関係を現地実験と比較して、模型実験で得られた種々の関係の利用の可能性を判断して、そこで得られた関係を浸透量評価式に応用することを意図した。

(1) 浸透底面幅 D_p あるいは ℓ_p と浸透量 Q_p の関係

水理模型実験より、円筒型施設では浸透底面の直径と浸透量との間に比例関係が成立したが、トレンチ型施設では浸透量は浸透底面幅によって変化しないことが分った。現地実験においても、図4、5に示すように円筒型施設では浸透量は、 $\sqrt{A_p}$ つまり D_p に比例し、トレンチ型施設ではトレンチの底面幅 ℓ_p にあまり影響を受けず、模型実験結果と同様な結果となっている。

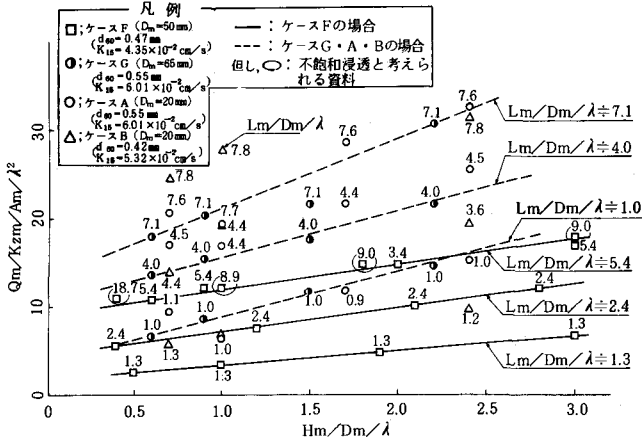


図11 湛水深 H_m と浸透量 Q_m の関係 (円筒型施設)

(2) 施設の底面高と地下水位の差 L_p と

浸透量 Q_p の関係

水理模型実験より、円筒型及びトレンチ型施設とも施設の底面高と地下水位の差 L_m と浸透量 Q_m との間に、直線関係が成立することが分った。現地実験においては、トレンチ型施設では Q_p は L_p の増加に伴い増加しているが、円筒型施設では L_p の影響をあまり受けていない。これは、施設の浸透面付近の目づまりの発生、施設底面下の土壌そのものの水の通りにくい層があり、浸透量が地下水位の影響を受けなかったのではないかと考えられる。これを検証するために、模型の円筒型の底面部に厚さ 5 mm に浸透水槽内の砂より

も透水係数が 1 オーダー小さな砂 ($d_{50} = 0.47$ mm) を敷設し、地下水位と浸透量の関係を調べてみた。その結果、浸透量は地下水位の影響をあまり受けていないことから、現地実験においても同様な現象が起っている可能性がある。

5. おわりに

水理模型実験によって求めた浸透量とそれに及ぼす影響因子

の関係は、現地実験の結果と合うところもあり、合わないところもあった。この原因は、現地では不飽和浸透に近い浸透機構をもっているためである。なお、現地の浸透土壌は均一な透水性を持つ土壌と言えず、深度方向に透水性が異なる。関東ローム層は、A 層である黒ボク土の下は、スコリアなどが堆積した透水性の良い層もあるが、一般に下層の方が堆積物質が古いため、より粘土化が進み、また土粒子の団粒化も深い層ほど進んでいない。浸透型流出抑制施設のように無理やり雨水を浸透させると、多少でも下層の方が透水性が悪いと、そこを難透水層として宙水が生じ、そこが実質的な地下水面となり、実質的な L_p が案外浅い所 (1 m 以内) にあるのかも知れない。もし浅い所に実質的な地下水面があると仮定すると模型実験の結果は現地の実験結果をよく説明している。

本調査より、今まで現地実験だけでは把握し得なかった部分が、模型実験によって分かるようになり、不十分ではあるが、現地における浸透量評価手法を確立しえる見通しがでてきた。

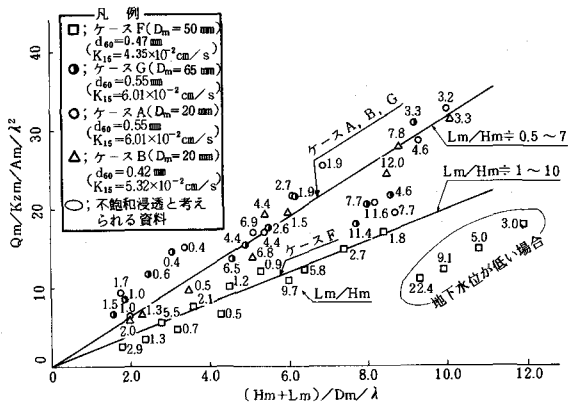


図12 浸透底面の直径 D_m と浸透量 Q_m の関係 (円筒型施設)

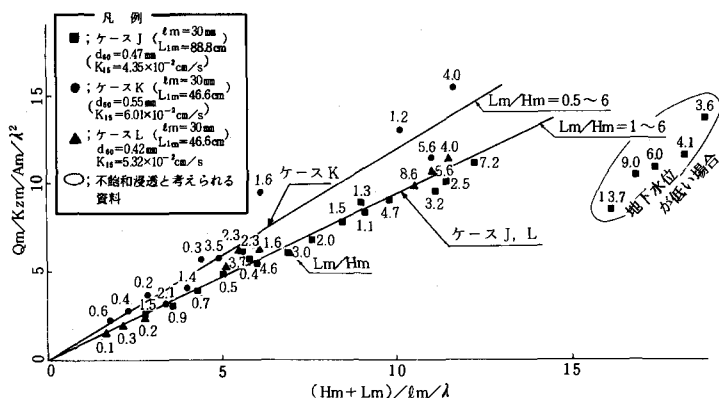


図13 浸透底面幅 l_m と浸透量 Q_m の関係 (トレンチ型施設)