

(財)大阪土質試験所 正員 平山 英喜
 大阪市水道局 " 服部 岩樹
 (財)大阪土質試験所 " 川崎 敬造

1. ま え が き

都市上水道、石油パイプライン等の配管類から流体の漏洩が生じた場合の地中拡散現象に関しては、その重要性にもかかわらずまだ明らかでない点が多い。上水道に関しては最適配水設計や漏水の発見、修理に関連して、①配水管圧と漏水量の関係 ②地下漏水の地中拡散領域、などの問題点の基本的な理解が必要と考えられる。①に関しては国内各都市や米国水道協会では漏水量は管内圧力の0.5乗に比例するとしているが、末石、雄倉¹⁾が実際の都市埋設管を用いて行なった実験では1.15乗に比例した結果を得ている。②に関しては河兎ら²⁾がパイプラインの漏洩に関連して実験を行なっているが非常に高圧であるため上水道への適用は困難である。以上の観点より、本研究は地盤中の点源からの水の三次元流れのモデル実験を行ない先に述べた問題点に対して浸透流的な考察を加えたものである。

2. 実 験 方 法

地中の一点からのわき出しによる流れは、球対称流れと一様な流れの重ね合わせにより軸対称の流れになるので、対称軸を含む1つの平面について考察すればよいので、図-1に示したような表面にガラス板を持つ1/36の領域をモデル化した実験槽を用いた。これに表-1に示す4つの試料をセットし、管内圧力($P = 0.1 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$)および漏水孔の面積($a = 0.002 \sim 0.008 \text{ cm}^2$)を変化させて実験を行なった。なお配水管の上部あるいは下部から漏水が生じた時の相違を調べるために、豊浦標準砂で他の条件を同じにし漏水孔の向きを上、下に変えた実験も行ない、標準砂9ケース、A試料1ケース、B試料3ケース、C試料3ケースの計16ケースの実験を行なった。なお土中での管内圧力と漏水量の関係調べる際の基準を得るために空気中および水中(水深0.5m)でも管内圧力と漏水量の関係調べた。

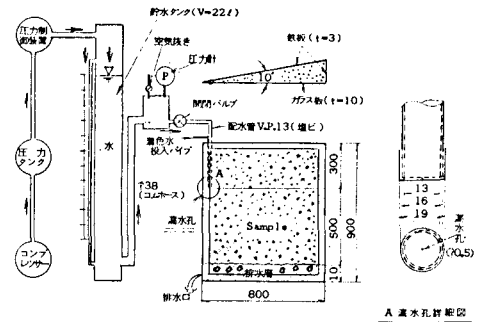


図-1 実験装置

表-1 使用した材料土の特性

	豊浦標準砂	A 試料	B 試料	C 試料
土質名	均等粒度の砂	"	細粒分混り砂	シルト質砂
均等係数	1.4	1.6	2.4	33.5
透水係数 (cm/sec)	2.1×10^{-2}	3.5×10^{-3}	7.3×10^{-4}	1.2×10^{-4}

3. 実験結果とその考察

① 管内圧力と漏水量の関係 : 実験結果をまとめると次のようである。

- (1) 漏水量 $q (\text{l/min})$ は、空気中、水中および全ての材料土の場合も実験の開始時より終了時(定常時)までほぼ一定である。
- (2) 空中、水中および標準砂中での漏水量 q は条件が同じならばほとんど同じであり、オリフィスの式 $q = ca \sqrt{2gh}$ (c :漏水孔の形状による係数)で計算される値となった。 $c = 0.87 \sim 1.0$ であった。
- (3) 透水係数の小さいA, B, C試料では試料作成時(突固めによる)の不均質性に起因していると考えられるばらつきのためさほど明確でないが、 q は P のほぼ1乗に比例し、モデル地盤の透水係数が小さくなるほど漏水量は少なくなる。(図-3 参照)

以上の(2)(3)の結果よりある透水係数を境として漏水量がオリフィス型からダルシー型に移移するものと考えられる。これについて以下に理論的に考察を加える。簡単のために重力項を無視し図-2に示したような半径 r_w の球から影響半径 r_e の球の領域の球状ダルシー流を考える³⁾。速度ポテンシャルの境界条件を次のように与える。

$$\phi = \phi_w = -kh \quad (r = r_w) \quad , \quad \phi = \phi_e = 0 \quad (r = r_e)$$

中心から r だけ離れた点での速度を $v_r (= \partial \phi / \partial r)$ とすると、連続の式より

$$4 \pi r^2 v_r = q \quad \therefore v_r = q / (4 \pi r^2)$$

したがって $\partial \phi / \partial r = q / (4 \pi r^2) \quad \therefore \phi = -\frac{q}{4 \pi} \cdot \frac{1}{r} + C_1$
 境界条件より積分定数 C_1 を定めて q について整理すると $q = \frac{4 \pi (\phi_e - \phi_w)}{1/r_w - 1/r} = \frac{4 \pi (\phi_e - \phi_w)}{1/r_w - 1/r_e}$
 今回の実験のように $r_w \ll r_e$ と見なせる場合は次式のように近似できる。

$$q \doteq 4 \pi (\phi_e - \phi_w) r_w = 4 \pi k h r_w \cdots \cdots \text{eq. (1)}$$

実験のごく当初を除いて $r_w \ll r_e$ とみなせるので、標準砂のケースを除いて eq. (1) 図-2 境界条件で先の実験結果が全て説明できる。

標準砂の場合の実験結果を理解するために、漏水孔からの流量をもとにオリフィス型とダルシー型の境界について調べる。eq. (1) が成りたつためには、漏水孔からの可能最大漏水量、すなわちオリフィスの式による流量 q_0 が eq. (1) の q より大きくなければならないので、次式を満たす必要がある。

$$q = 4 \pi k h r_w \leq q_0 = c A \sqrt{2 g h} \quad (A = 36 a)$$

r_w が漏水孔の半径に比例すると仮定し $r_w = \beta \sqrt{A / \pi}$ なる定数 β を導入して上式を整理すると

$$k \sqrt{h / A} \leq (c / \beta) \sqrt{g / 8 \pi} \cdots \cdots \text{eq. (2)}$$

すなわち今回の実験でパラメータとして変化させた k , $h (= P / \gamma_w)$, A の組み合わせが eq. (2) を満たす場合のみダルシー型となる。eq. (2) を透水係数に関して整理すると、 $k \leq (c / \beta) \cdot \sqrt{A g / 8 \pi h}$

となり、 $\beta = 10$ 程度とすれば実験結果とよく一致することがわかる。(図-3 参照)

② 地下漏水の地中拡散領域⁴⁾：標準砂の場合でも

流速から判断して漏水孔のごく周辺を除いて層流と考えられるので、流れ自体はダルシー則に従う流れであるから、重力場での点源からのわき出しに対する速度ポテンシャルの近似値として $\phi = -\frac{q}{4 \pi r} + k x$ (x : 鉛直下向きを正) が考えられるが、Nasberg は自由水面の条件に対する近似の精度を上げるために x 軸上にすくいこみ点を設け $\phi = -\frac{q}{4 \pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{x^2 + r_x^2}} - \frac{3.5}{\sqrt{(b+x)^2 + r_x^2}} \right\} + k x$ ($b = 5.1 \sqrt{q / 4 \pi k}$, $r_x^2 = y^2 + z^2$) とした。この時の流れ関数は $\psi = \frac{k r_x^2}{2} - \frac{q}{4 \pi} \left\{ \frac{x}{\sqrt{x^2 + r_x^2}} - \frac{3.5(x+b)}{\sqrt{(b+x)^2 + r_x^2}} \right\}$ となる。図-4 に 1 例として標準砂の $P = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, $a = 0.004 \text{ cm}^2$ の時の実験結果と理論値を比較したものを示すがよく一致していることがわかる。拡散領域が直上に達する距離 x_{max} は流れ関数より $x_{\text{max}} = 0.32 \sqrt{q / k}$ となるが、均質に近い標準砂のケースではほぼ一致していた。なお漏水孔の上向き、下向きの差は定常状態ではほとんど影響がなかった。本研究は大阪市水道局の漏水防止対策の一環として行なったものである。

参考文献 1) 末石・雄倉：第 17 回全国水道研究発表会講演集，1966，PP.118 - 119
 2) 河兎 他：第 29 回土木学会年講概要集，第 3 部，1974，PP.5 - 6
 3) M. Maskat : "The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media", 1946, PP.258 - 263
 4) P. Kochina : "Theory of Groundwater Movement", 1962, PP.401 - 403

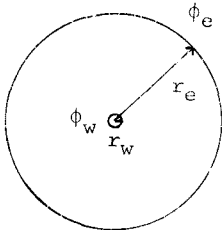


図-2 境界条件

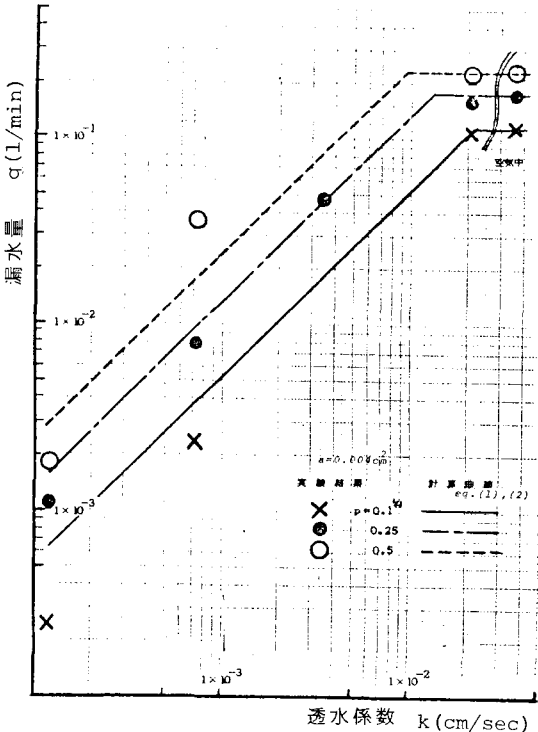


図-3 漏水量 q と透水係数 k の関係

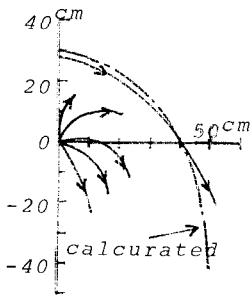


図-4 拡散領域の実験と理論の比較