

大林組技術研究所 正員 齋藤 二郎

同 上 同 内藤 和章

同 上 同 芳賀 孝成

1 まえがき

シールド工事において、地盤の透気性が大きい場合は、漏気が激しくて地下水圧に対抗して止水するだけの坑内気圧を確保できなくなり、やがては噴発に至る場合も多い。したがって、あらかじめ地盤の透気性を把握して圧気工法の併用が可能であるか否かを予測し、不可能ならば工事に対して何らかの対策を講じなければならない。

これまで、地盤の透気性を推定する方法には確立されたものが無いので、筆者らは「漏気試験」と称する現位試験を考案して、現場試験を中心に研究を続けてきた。また試験結果の解釈と、これを実際のシールド工事に適用するための方法として「電気アナログ法」を導入した。

本報告は、将来の漏気試験の活用のために、土中の空気の流れの理論、漏気試験方法、電気アナログによる解析法、現場実験例について述べたものである。

2 土中の空気の流れ

飽和した土柱の一端に気圧を作用させると、空気は他端に向かって流れ、空気量は(図-1)に示すごとく次第に増加して、定常状態に達して一定となる。¹⁾ この定常状態における土中の空気の流れは、多孔媒質中の圧縮性流体の流れであるから、基礎方程式は次式で与えられる。

$$k_x \frac{\partial^2 (P^2)}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 (P^2)}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 (P^2)}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

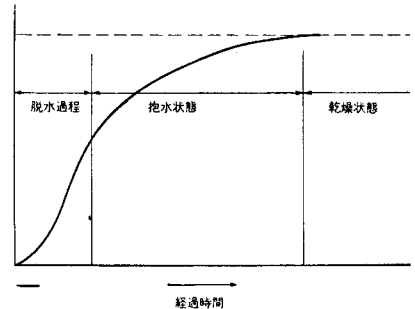


図-1 空気量の経時変化

ここに、Pは空気圧(絶対圧)、 k_x, k_y, k_z はそれぞれx、y、z方向の透気係数である。一般には、土中の空気の流れは三次元的であり、かつ透気性の異なる地層が複雑であるので、(1)式を数学的に解くことは不可能である。また、地下水が存在する場合には(図-2)に示すように空気は流れ、この境界面を数学的に算出することは容易ではない。そこで筆者らは(1)式を複雑な地層、地下水の存在のもとに、三次元的に解析するために、電気アナログ法を採用した。

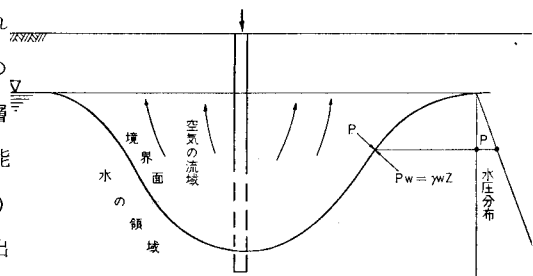


図-2 地下水中の空気の流れ

3 漏気試験方法

3・1 基本的な考え方

漏気試験とは対象とする地層位置にストレーナーを有したケーシングを挿入して蓋を取り付け、こ

の相似性は次の対応によって得られる。

$$\left. \begin{array}{l} P^2 \longleftrightarrow E \\ k \longleftrightarrow X \\ Q \longleftrightarrow I \end{array} \right\} \quad (2)$$

ここに、Pは空気圧(絶対圧)、kは透気係数、Qは空気流量、Eは電圧、Xは電気伝導度、I

は電流である。そこで、現実の漏気状態と幾何学的に相似で、かつ各地層の透気係数kを導電性媒質の電気伝導度Xに比例させた模型を作って解析することができる。この場合の相似率は次のごとくである。

$$Q_p = \frac{k_p}{2 X m} \cdot \frac{P_p^2}{P_{op}} \cdot \frac{I_m}{E_m} \cdot \alpha \quad (3)$$

ここに添字mは模型に対するもの、pは実物に対するもの、Ppは大気圧(1kg/cm²)、αは縮尺である。なお導電性媒質として導電紙や寒天が使われる。(図-5)は漏気試験結果を解析するための電気アナログ装置の一例で、境界条件となる位置に気圧に相当する電圧Emを印加して、電流Imを測定する。なお、地下水が存在する場合は(図-2)に示したような地下水領域と空気領域の境界面をあらかじめ設定しなければならない。これには境界面上の任意の深度における空気圧Pと地下水圧Pwは等しいという考えから、任意の境界面を仮定してある深度の空気圧Pを測定し、その深度における地下水圧Pwと等しい点を求める。同様に、すべての深度においてPとPwの等しい点を求めこれから第一次近似解を得る。そして地下水の領域に相当する部分を切断し再び同様の操作を繰り返して正解を得る。以上の実験により得られたPpと $\frac{P_p^2}{P_{op}} \times \frac{I_m}{E_m}$ の関係を両対数紙上にプロットすると直線関係が得られる。また漏気試験より得られたPpとQpとの関係を同図に併記すると前者に大略平行な直線分布となり(3)式より透気係数は気圧の大きさに拘らず一定値として求められる。次に実際の圧気シールドにおける消費空気量は(図-6)に示すような電気アナログ装置によって各々の気圧に対する $\frac{P_p^2}{P_{op}} \times \frac{I_m}{E_m}$ を求め、これと先に求められた透気係数kpとによって算定することができる。

5 現場実施例

5・1 A-現場における例

本現場のシールド通過位置の土質は砂質土で、かなり透気性が大きいと推定された。試験孔はベノトによって削孔してそこに1000ケーシングを挿入したもので、ケーシングのシールド通過位置(GL-1.60~2.0.0)には長さ4.0mの鉄筋籠を設置した。孔内気圧0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 kg/cm²の5段階について試験した。定常状態における気圧と消費空気量の関係は(図-7)に示すごとく、両対数紙上でほぼ直線になった。電気アナログ解析は、導電性媒質として寒天を使用し、縮尺1/100

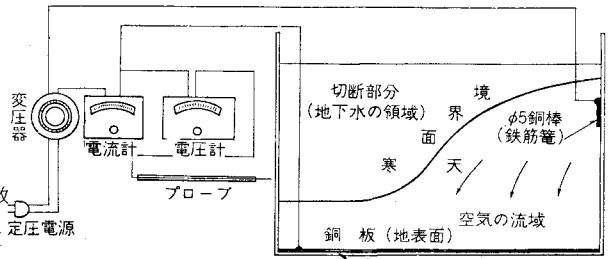


図-5 漏気試験結果解析のための電気アナログ装置

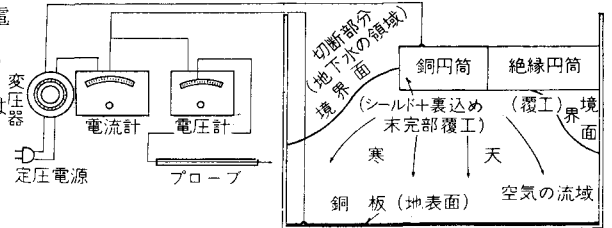


図-6 圧気シールド消費空気量算定のための電気アナログ装置

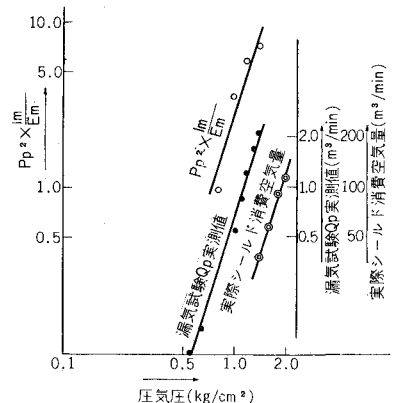


図-7 孔内気圧と消費空気量(A現場)

の模型によって行なった。各々の孔内気圧に対する $P_p^2 / P_{Op} \times I_m / E_m$ の値を(図-7)に併記したが、これらより透気係数 k_p は 0.92 cm/sec となった。また実際の消費空気量 Q_p を求めた結果も同図に併記したが、これによると $Q_p = a p^{3.3}$ (P : 気圧、 a : 定数) となった。

5・2 B-現場における例

本現場はシールド通過位置の土質が砂レキで、極めて透気性が大きいと推定された。試験孔は先に(図-3)に示したものである。孔内気圧 $0.8, 0.9, 1.0, 1.1 \text{ kg/cm}^2$ の場合の定常状態における消費空気量の測定結果を(図-8)に示す。孔内気圧と消費空気量の関係は両対数紙上でほぼ直線になっている。この結果と、電気アナログ解析により地盤の透気係数を求めると $3 \sim 6 \text{ cm/sec}$ となった。また孔内水位は気圧に対応する低下量に至らず、やゝ上部にあった。

5・3 C-現場における例

本現場は、直径 10000 の複線地下鉄シールド工事であり、シールド通過位置の土質は砂～砂レキで透気性が極めて大きいと推定された。試験孔は、土質調査のための $\phi 1600$ の深礎を利用した。対象地層に相当する部分の上端位置にコンクリートの蓋を設け、その上部は気圧反力をとるために埋戻した。圧気室の上端は $GL-2.70$ で、長さは 2.9 m である。定常状態における孔内気圧と消費空気量の関係は(図-9)に示したごとく両対数紙上でほぼ直線になった。

6 結び

以上、漏気試験の意義、試験方法、試験結果の解析と実際の圧気シールドへの適用法、現場実施例について述べた。この漏気試験は現位置における試験であり本文に記した試験方法によれば、試験結果のバラツキは非常に少なく、電気アナログによる理論解析に極めて近い状態であり、信頼性の高いものであるといえる。この漏気試験により地盤の透気係数が求められ、これを用いて、実際のシールドにおける漏気の性状を電気アナログ法により解析することができる。すなわち現場漏気試験と電気アナログ解析法の組合せにより極めて合理的に漏気性状を把握することができる。ここに述べた漏気試験方法は極めて信頼性の高い方法であるが測定設備がやゝ大がかりであるので将来もっと簡便な試験方法に改良していく予定である。

最後であるが、本試験に協力していただいた工事現場の方々の方々に謝意を表す。

参考文献

- 1) Wolf-Rüdiger, Harald Wagner; Luftverbrauch und Überdeckung beim Tunnelvortrieb mit Druckluft, Bautechnik, Feb. 1963
- 2) 内藤; 電気アナログ法による土中の流体の流れの解法(その3)

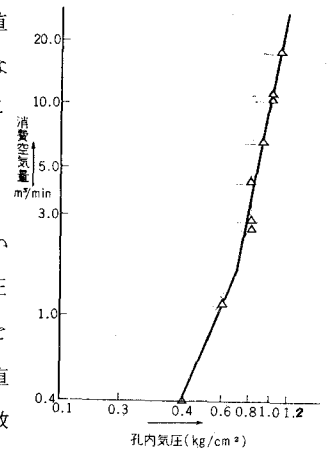


図-8 孔内気圧と消費空気量 (B現場)

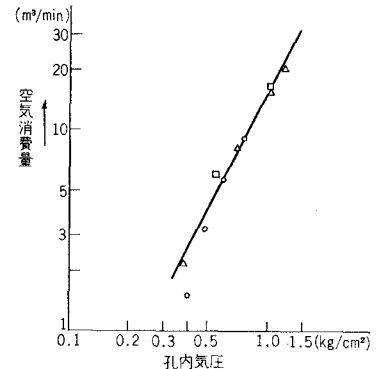


図-9 孔内気圧と消費空気量(C現場)