

圧気シールド工事のための漏気試験 方法と実施例について

齋藤 二郎
内藤 和章
鈴木 公雄
(錦町土木工事事務所)
芳賀 孝成

概 要

シールド工事において、地下水の坑内への流入を阻止するため、あるいは、切羽を安定させるために、坑内を圧気するが、地盤の透気性が大きい場合には、漏気が激しくて所要の圧気圧を確保できなくなったり、噴発等の事故に至ることが多い。したがって、地盤の透気性を予測して、これが大きい場合には、その対策（路線変更、注入工法）等の補助工法を考慮しておかなければならない。本報告は、この地盤の透気性を正確に推定するために漏気試験と称する現位置試験を考案して、実際のシールド工事現場において実施して良好な結果を得たので、その試験結果について述べ、さらに、試験結果から、実施シールドにおける漏気の性状を推定するための電気アナログ法による解析方法について述べたものである。

1. まえがき

シールド工事における地下水処理方法として、最も有効かつ経済的な方法は、坑内を圧気する「圧気工法」の併用であるが、これには、大きな問題がある。すなわち、地盤の通気性が大きい場合には、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ったり、地表部分に弛緩ゾーンが発生し、終に噴発を起したり、近接した井戸を破損する等の事故に至る場合が多い。

したがって、あらかじめ地盤の通気性を推定して、圧気工法の併用が可能であるか否かを予測し、もし不可能であれば路線を変更するか、地盤の透気性を低減させるための地盤注入を行なうとか、あるいは圧気工法以外の止水工法による等の対策を立てなくてはならない。

従来、地盤の透気性を推定する方法に確立されたものは無いので、著者は「漏気試験」と称する現位置試験を考案して、現場試験を中心にして研究を続けてきた。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解析には「電気アナログ法」によるのがよいということがわかった。

そこで、本報告においては、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る。

2. 土中の空気の流れ

飽和した土柱の一端に空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。

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

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に存在しているので、(1)式

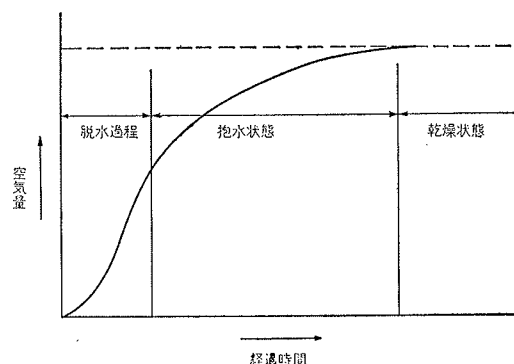
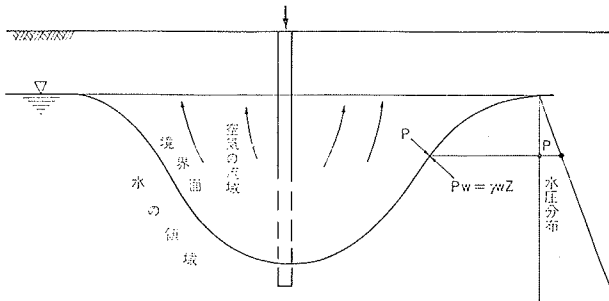


図-1 空気量の経時変化

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、地下水の領域と空気の流域の間に境界面ができて(図一2)に示すとき空気の流れとなり、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、著者は、(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。



図一2 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、シールド工事施工現場において、試験孔を設置して、対象とな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上部に蓋を設け、試験孔内をコンプレッサーにより圧気して漏気の性状を試験する現位置試験であり、きわめて信頼性の高い試験方法であるといえる。

この漏気試験結果をどのように解釈して、実際の圧気シールド工事における漏気の性状を把握するかについては、次のような方法による。まず、工事施工現場における漏気試験により、定常状態における試験孔内気圧と消費空気量の関係を求める。次に、漏気試験における試験規模、地層、地下水条件のもとで漏気の理論解を電気アナログ法により求める。この漏気試験結果と理論解から地盤の透気係数が求められる。次に実際の圧気シールド工事における漏気の理論解を電気アナログによって求め、漏気試験から求めた透気係数を代入して消費空気量を求める。

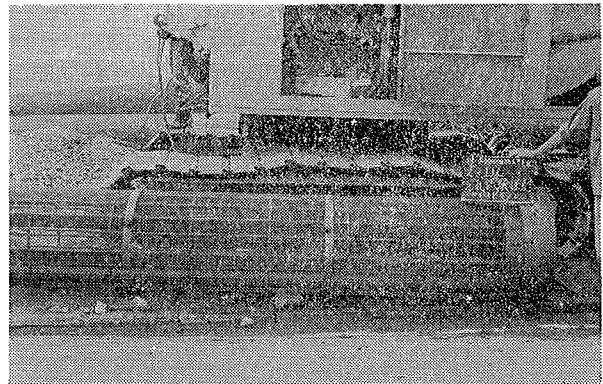
3.2. 漏気試験孔の設置方法

まず、試験位置付近に井戸等の圧気に対して有害なものが無いことを確認してから試験孔を設置する。通常、試験孔はボーリング(オーガー、ベント等)や深礎によって設置し、直径は300~1.500mmが適当である。この中に直径のやや小さいケーシングを挿入するが、このケーシングにはシールド通運深度位置にストレーナーあるいは鉄筋籠(図一3参照)を設置する。ケーシングと孔壁の空隙は、ストレーナー部には豆砂利

をてん充し、その他の部分にはグラウトする。

試験孔の設置が終わったらベントナイトやヘドロを除去するために水でよく洗滌する。

ケーシングの上端は(図一4)に示したような蓋を設置する。試験孔内には自記記録式水位計と孔内照明燈を設置し、蓋の部分に圧力計を設置する。孔内圧気用のパイプは空気流量計を通じてコンプレッサーに接続する。試験孔は(図一10)(図一15)に示すごとくである。



図一3 鉄筋籠



図一4 ケーシング上端の蓋

3.3. 測定方法

3.2. に記した試験孔内を圧気して、圧気圧と消費空気量および孔内水位の関係を測定する。

圧気圧は地下水位を十分低下させ得るだけの理論圧気圧を標準にして、前後数段階にわたって作用させる。各圧気圧のもとにおける消費空気量および地下水位の時間的変化を測定する。時間間隔は対数的に拡げてゆく。そして、消費空気量および地下水位と経過時間の関係を半対数紙上にプロットして、経時変化が無くなったら、これを定常状態とみなして、次の段階の圧気圧に対する試験に移る。なお、圧気試験中は、地表面への漏気状態の観察を行なう。

試験に用いる測定機器に次のようなものがある。

- (1) コンプレッサー
- (2) 空気流量計=オリフィス流量計がよい。オリフィス径 $\frac{1}{2}$ "、1"、 $1\frac{1}{2}$ "、4" に切替えて広範囲の

流量を高精度で測定することができる。

- (3) 調圧弁=孔内気圧を調整する。
- (4) 圧力発信器, 差圧発信器=オリフィスの圧力を電流に変換して, 流量計算する。
- (5) 高感度記録器=圧力, 差圧を自記記録させる。
- (6) 水位計=孔内水位を測定する。

以上に記した各機器の概要を(図-5)~(図-7)に示す。なお, これらの測定機器の接続方法は(図-8)に示すごとくである。

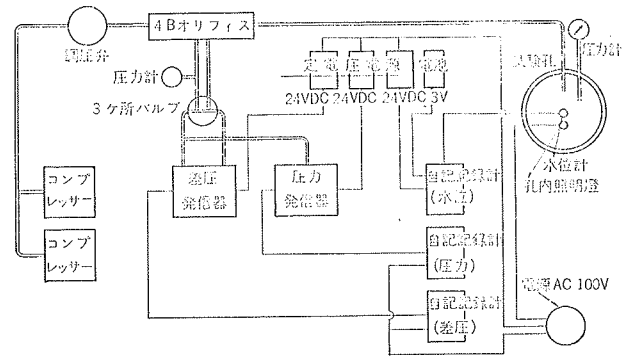


図-8 測定機器配置図

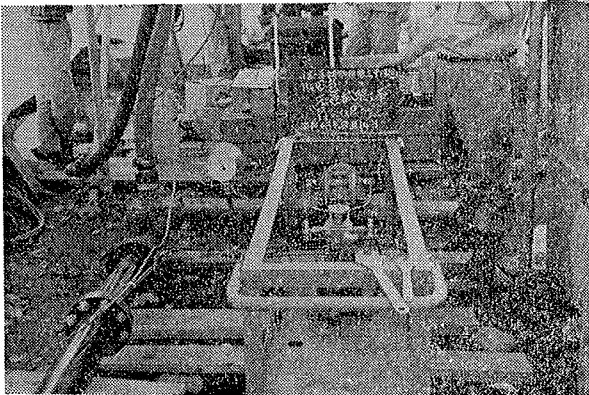


図-5 左側オリフィス, 右側差圧および圧力発信器

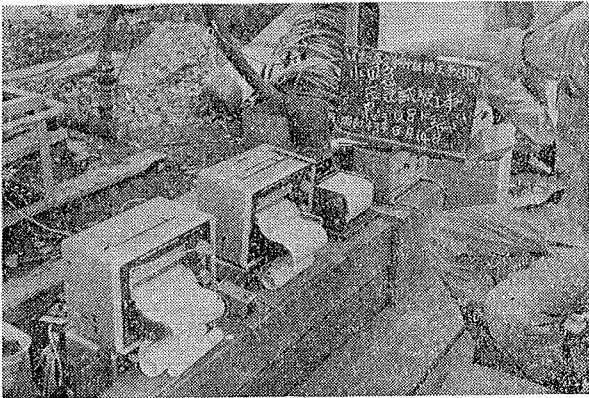


図-6 自記記録器

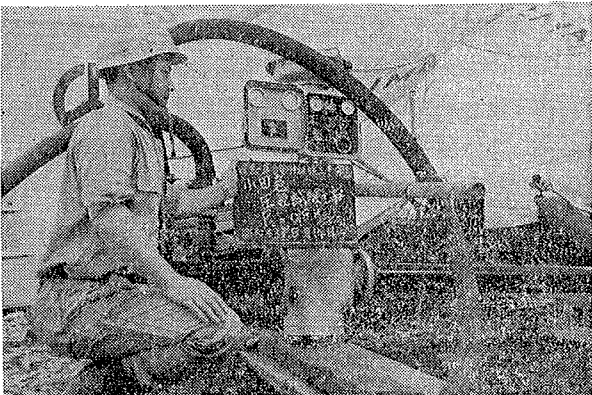


図-7 調圧弁

3.4. 測定結果の整理方法

漏気試験において測定されたものは, (1)孔内気圧 (2)消費空気量 (3)孔内水位である。(図-1)に示したごとく, 抱水状態の地盤における漏気量は, ほぼ時間の対数に比例して増大し, 乾燥状態の終期で一定になる。したがって, 各孔内気圧段階毎に消費空気量および孔内水位と時間の関係を片対数紙上にプロットし, 大略直線分布になるかどうかをチェックすると共に定常状態に達する点を決定する。

次に, 定常状態における孔内気圧と消費空気量の関係を, 両対数紙上にプロットする。これは, 電気アナログ法により理論計算によると, 孔内気圧と消費空気量は, 両対数紙上にプロットすると直線になることがわかったので, 試験結果も両対数紙上にプロットしてほぼ直線になれば, データのバラツキが少ないということを確認するために行なうものである。

次に, 定常状態における孔内水位と気圧の関係を普通目盛紙上にプロットして, 孔内水位か, 圧気圧に対応する理論水位まで低下したかどうかをチェックする。

4. 電気アナログ法による解析法⁽²⁾

電気アナログ法とは, 土中の空気の流れが, 導電性媒質中の電気の流れに相似であることを利用して, 現実の複雑な空気の流れの理論解を得るもので, その概要は次のごとくである。

土中の空気の流れと, 導電性媒質中の電気の流れの相似性は, 次の対応によって得られる。

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

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, χ 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 χ に比例させた模型を作って解析することができる。

この場合の相似律は次のごとくである。

$$Q_p = \frac{k_p}{2\lambda_m} \times \frac{P_p^2}{P_{op}} \times \frac{I_m}{E_m} \quad (3)$$

ここに、添字mには模型に対するもの、Pは実物に対するもの、 P_{op} は大気圧(1kg/cm²)である。

なお、導電性媒質としては導電紙や寒天が使われる。以上に記した模型で、境界条件となる位置に圧気圧に相当する電圧 E_m を印加して電流 I_m を測定すると(3)式から圧気圧 P_p のときの消費空気量 Q_p が求められる。さて、地下水が存在する場合は(図-2)に示したとき地下水領域と空気流域の境界面を設定しなければならないが、これは次のようにして行なう。まず(図-2)に記したごとく、現地盤の地下水圧分布 P_w を記録しておく。境界面上の任意の深度において空気圧 P と地下水圧 P_w は等しくなければならないから、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 P_w と等しい点をプロットする。同様にして、すべての深度において P と P_w の等しい点をプロットして第1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て、再び同様の操作を行ない、これをくり返して正解を得る。(図-2)は漏気試験孔におけるものであるが、圧気シ

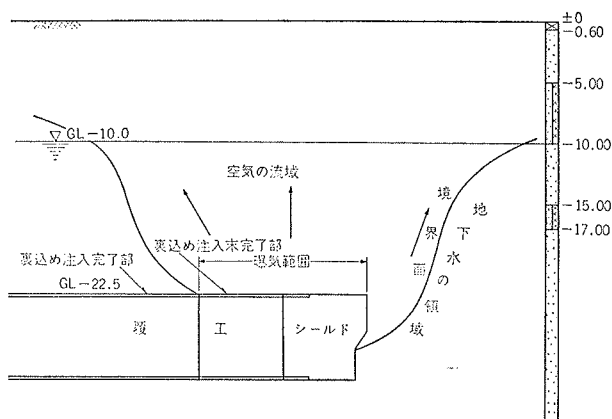


図-9 実際の圧気シールドの漏気状況

ールドの場合には(図-9)のごとくなる。

さて、漏気試験に対する電気アナログ解析より得られた P_p 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。次に、漏気試験より得られた孔内気圧と消費空気量の関係を同図に併記すると、両者は大略平行な直線分布となり、(3)式を用いると、透気係数 k_p は圧気圧の大きさに拘らず一定値として求められる。

そして、実際の圧気シールドにおける消費空気量は、ここに求めた透気係数を用いて、電気アナログ法により算定することができる。

5. 現場実験例

5.1. A-現場における例

本現場のシールド通運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。漏気試験の概要を(図-10)に示す。試験孔は $\phi 1,000$ mm ケーシングのベントによって設置し、シールド通過位置に長さ4.00mの鉄筋籠を設置した。

孔内気圧0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4kg/cm²の5段階について試験した。定常状態における圧気圧と消費空気量の関係は(図-11)に示すごとく、両対数紙上でほぼ直線になった。

次に、この漏気試験結果を解析するための電気アナログの装置を(図-12)に示す。模型は軸対象ゆえ1/4部分について作製し、縮尺は1/100とした。導電性媒質としては、0.5%の食塩を含む4%濃度の寒天を使用した。

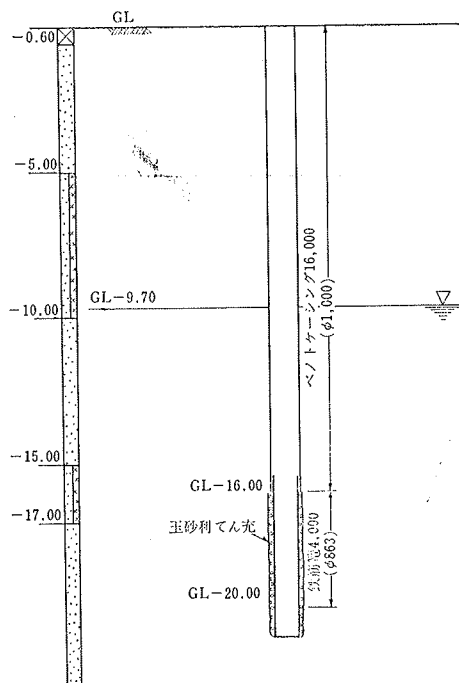


図-10 A-現場における試験孔概要図

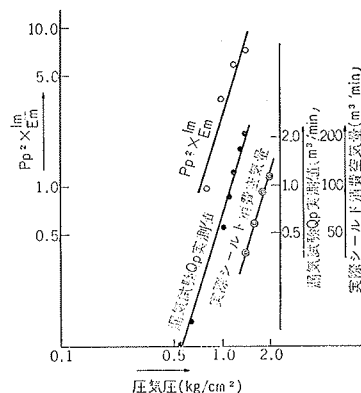


図-11 圧気圧と $P_p^2 \times I_m / E_m$, 漏気試験 Q_p 実測値, 実際シールド消費空気量の関係

鉄筋籠に相当する部分にはφ5mm銅棒を、地表面に相当する部分には銅板を設置してこの両者間に孔内気圧に対応する電圧を印加し、4.に記した方法で地下水領域と、空気域流の境界面を作って電流を測定した。孔内気圧0.8, 1.0, 1.2, 1.4kg/cm²の場合の $\frac{P_p^2}{P_{op}} \times \frac{I_m}{E_m}$ の値を(図-11)に併記した。これによると、漏気試験結果の直線にほぼ平行であり、透気係数は、孔内気圧の大きさに拘らず一定で

$$k_p = 0.92 \text{ cm/sec}$$

となった。

また、例えば、孔内気圧 1.2kg/cm² の場合の境界面は(図-13)に示すごとくであった。

次に実際の圧気シールドに対する電気アナログの装置を(図-14)に示す。同様にして境界面を作り、圧気圧 1.4, 1.6, 2.0kg/cm² のときの I_m/E_m を求め、漏気試験により得られた透気係数を用いて、実際の圧気シールドの消費空気量 Q_p を求めた結果を(図-11)に併記した。これによると、

$$Q_p = \alpha \cdot P^3 \quad \text{P: 圧気圧} \quad \alpha: \text{定数}$$

となった。

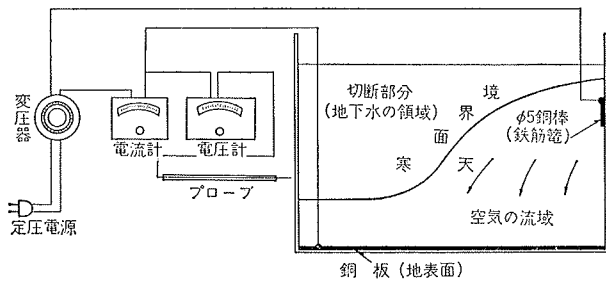


図-12 漏気試験結果解析のための電気アナログ装置

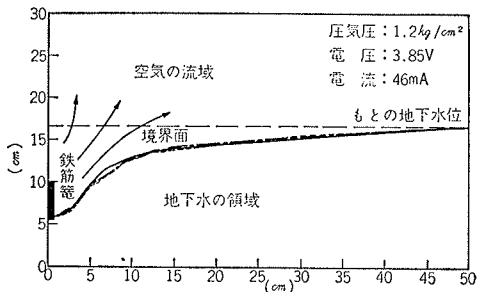


図-13 圧気圧 1.2kg/cm² の場合の空気の流域を地下水の領域の境界面

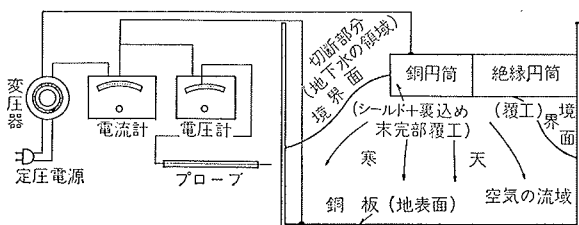


図-14 実際の圧気シールドにおける消費空気量算定の電気アナログ装置

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。

試験孔の概要を(図-15)に示す。

孔内気圧 0.8, 0.9, 1.0, 1.1kg/cm² の場合の定常状態における消費空気量の測定結果を(図-16)に示す。これによると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た。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 3~6cm/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、やや、上部にあった。

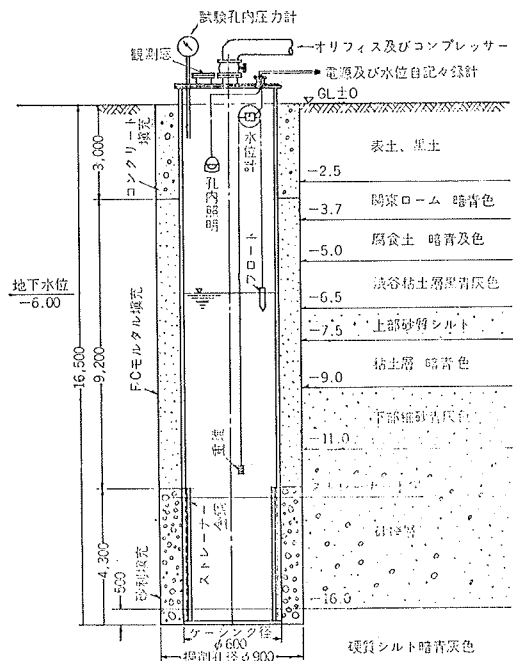


図-15 B-現場における試験孔概要図

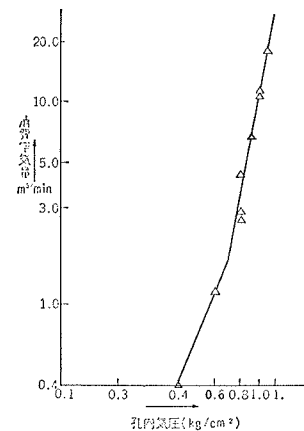


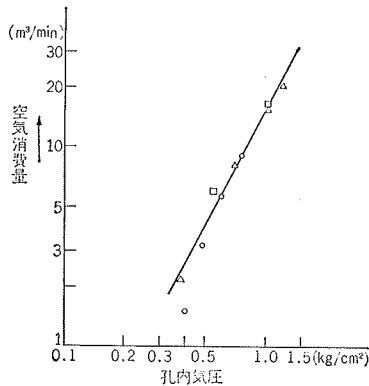
図-16 孔内気圧と消費空気量の関係

5.3. C-現場における例

本現場は、直径10,000mm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~砂レキで透気性がきわめて大きいと推定された。試験孔は、土質

調査のための $\phi 1,600\text{mm}$ 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。圧気室の長さは2.90mm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(図一17)に示したごとく、両対数紙上でほぼ直線になった。



図一17 孔内気圧と消費空気量の関係

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って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、きわめて合理的に漏気の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、きわめて信頼性の高い方法であるが、測定設備がかなり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事務所の方々に謝意を表する。

参考文献

- 1) Wolf-Rüdiger, Harald Wagner; Luft-verbrauch und Überdeckung beim Tunnelvortrieb mit Druckluft, Bautechnik, Feb. 1913
- 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)所内報昭43年9月