

III-102 シールド工事における現場透気試験について

鹿島建設技術研究所 正会員 ○木島詩郎

橋本利郎

菰田一義

1. まえがき

滞水砂層内でのシールド工事において、圧気工法で施工する際には、(1)適正な圧気圧、および、(2)空気消費量が問題となる。空気消費量については、地盤条件、トンネルからの漏気場所等、数多くの要因に関係するが、特に大きく影響を与えるのは地盤条件であり、地盤の透気性である。

空気の地盤内への流動形態については、土層および滞水条件を考慮すると次の3つのタイプに大別することができる。

Aタイプ：地表面まで透気層が続いている場合。

Bタイプ：上部に不透気層があるが、地下水位は透気層内に存在している場合。

Cタイプ：上部に不透気層があり、地下水が被圧されている場合。

本報文は、空気消費量に関する資料を得るために、B、Cタイプの条件の現場で透気試験を実施し、送気量、地盤内の空気圧、地下水位の変動を測定した結果、およびこれに基づき計算した地盤の透気係数について検討を加えたものである。

2. 現場透気試験概要

地盤条件は図-1に示した。透気層である砂質土層の粒度分布は図-2のとおりである。地盤の透水係数は現場透水試験および粒径から検討して求めた結果を図-1に併記した。測定項目は、(1)送気量、(2)送気圧、(3)地盤内の空気圧、(4)地下水位である。試験は送気パイプ内の空気圧を一定にして、空気量がほぼ一定となるまで実施した。送気パイプ、観測パイプの設置位置および試験に使用した装置を図-3に示した。

3. 測定結果および検討

送気量および送気パイプ内での水位低下量は図-4のようであり、定常状態における送気圧と水位低下量との関係を図-5、送気圧と送気量との関係を図-6に示した。

(1) Bタイプの例

送気圧は 0.28 kg/cm^2 、 0.68 kg/cm^2 で、地盤内の

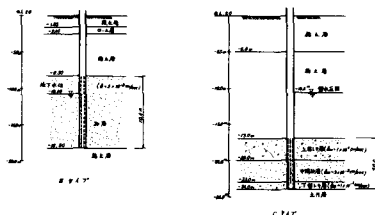


図-1 地盤条件

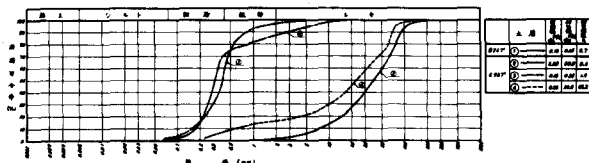


図-2 粒径加積曲線

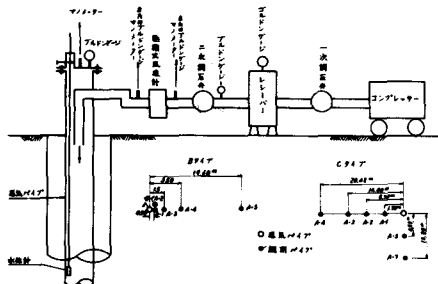


図-3 パイプ配置ならびに現場透気試験装置

水を排除しながら増大しており、それに伴って水位の低下が見られた。定常状態と見なせる時間については、ほぼ700分と200分であった。

なお、観測パイプ内の空気圧と水位の低下量は送気パイプと同様にほぼ一致した。

(2) Cタイプの例

送気圧は 0.56 kg/cm^2 , 0.78 kg/cm^2 , 0.93 kg/cm^2 , 1.08 kg/cm^2 の4段階で定常状態に至る時間は、それぞれ200分、160分、90分、50分と送気圧が増大するにしたがって短くなっている。送気パイプ内の水位は、被圧水位以下の送気圧ではほぼ送気圧に等しい水位の低下が見られるが、観測パイプでの水位および空気圧の変動が見られない。送気圧が被圧水頭より大きくなると、観測パイプ内に空気圧が伝達され、不飽和満気ゾーンが形成される。空気圧と水位の低下量は等しくなく送気量は、送気圧が被圧水位に等しくなるまで、非常に少なく、不飽和満気ゾーン形成に伴って送気量は急激に増大している。この範囲では送気圧と送気量はほぼ直線的な関係がある。

以上のようにBタイプとCタイプの地盤条件では地盤内での空気の流れが非常に異なり、Bタイプでは空気は地下水と明確に分かれて流動しているがCタイプでは、空気、空気と水の遷移ゾーン、地下水の3相になっていることが判明した。

Bタイプでは空気は地下水位より上部の不飽和ゾーンに遠散しているが、Cタイプでは図-7のようには、観測パイプ内の水位の測定結果から外挿して影響半径を求めると(水位低下量 $S - \log r$ との関係は直線とにならない)、見かけの不飽和ゾーンの範囲は、送気圧 0.78 kg/cm^2 , 0.93 kg/cm^2 , 1.08 kg/cm^2 で、それぞれ200m, 350m, 600mと広がっている。試験中に特に地表面への漏気が認められなかったので、Cタイプの条件において満気の現象として考えられるのは、(i)空気が水に溶ける、(ii)空気中の酸素が地中で酸化に消費される、(iii)空気が泡状となって水と置換しながら主に層境に沿って遠くへ漏出する。などが挙げられるが、この内送気量から考えて、(iii)が一番大きな原因となっ

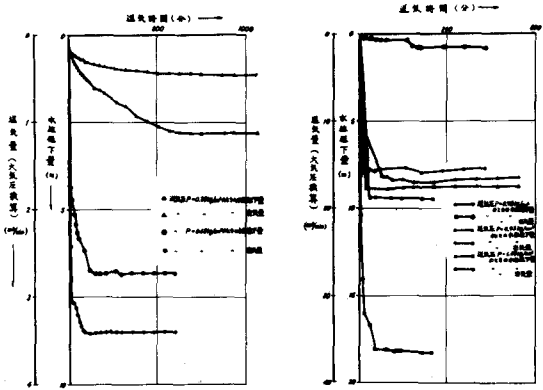


図-4 Bタイプ測定結果(送気パイプ)

Cタイプ測定結果(送気パイプ)

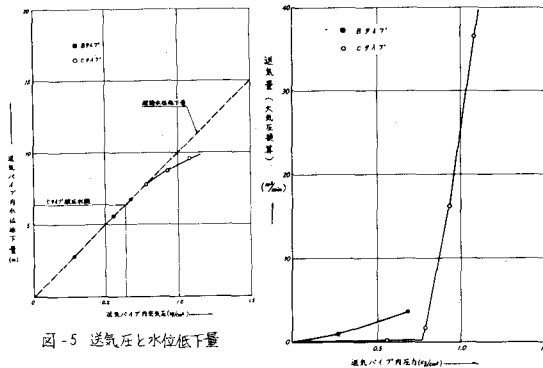


図-5 送気圧と水位低下量

図-6 定常状態における送気圧と送気量

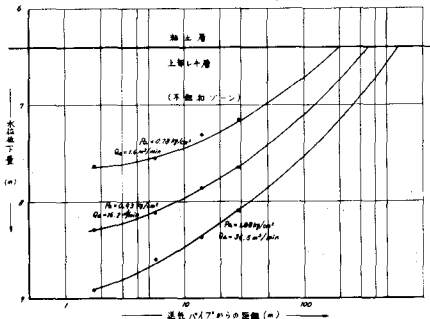


図-7 Cタイプみかけの不飽和ゾーン

ているものと推察される。

4. 地盤の透気係数の解析

一般に均等地盤内に流れる空気は層流の範囲では、圧縮性を考慮したラプラスの方程式が成り立つと云われているが、地下水が存在する場合には空気と水と云う圧縮性および粘性等の性質が異なる流体の2相問題となり、この問題に対する一般的な解析法はない。筆者らは石油とガスを同時に汲み上げる場合の解析式*を逆に地盤内に空気を圧送した場合の条件に置き換えて地盤の透気係数を求めた。

空気と地下水が明確に分離している場合、地盤内に漏えいする空気量 Q_a 、空気圧で排除される水の量を Q_w とすると、基本方程式はそれぞれ (1), (2) 式で表される。

$$Q_a = \frac{\pi k_a r (h-y)}{w} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1)$$

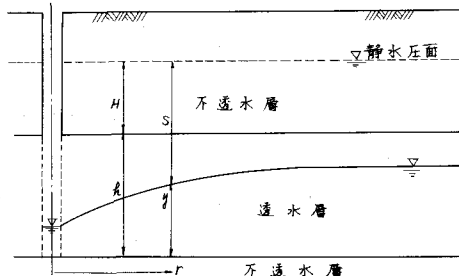
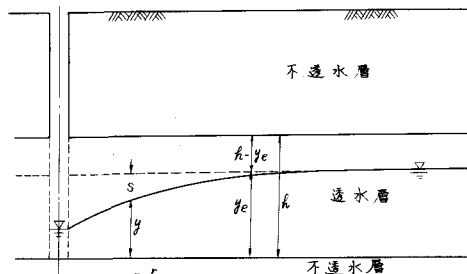
$$Q_w = \frac{2\pi k_w r y}{w} \left(\frac{\partial p}{\partial r} - w \frac{\partial y}{\partial r} \right) \quad (2)$$

k_a ; 透気係数 (cm/sec),

k_w ; 透水係数 (cm/sec)

w ; 水の単位体積重量

P ; 送気圧 (絶対圧)



定常状態においては、水は排除されなくなる。すなわち、 $Q_w = 0$ 、したがって (2) 式より

$$\frac{\partial p}{\partial r} = w \frac{\partial y}{\partial r}, \text{ 境界条件として、} P \rightarrow y,$$

$$P_0 \rightarrow y_0 \text{ を与えると,}$$

$$\frac{P-P_0}{w} = y - y_0 = S \quad S; \text{ 水位低下量}$$

すなわち、空気圧と水位低下量が等しくなる。

Bタイプにおいて境界条件として、図-8のよう
に与えると

$$k_a = \frac{6.9 w^2 Q_a}{\pi} \cdot \frac{1}{3(P_w^2 - P^2)(P_0 + wH - wy) - 2(Pw^3 - P^3)} \log_{10} \frac{r}{r_w}$$

Cタイプにおいては境界条件として、図-9のよう
に与えると(実際は空気圧と水位低下量が等しくな

	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
送気圧(P)の距離 (m)	0.6	1.0	1.50	3.50	19.60
透気圧(P ₀)の距離 (m)	0.45	0.75	1.125	2.75	14.56
0.78	545 × 10 ⁻¹	475 × 10 ⁻¹	478 × 10 ⁻¹	354 × 10 ⁻¹	271 × 10 ⁻¹
0.69	3.4	3.64 × 10 ⁻¹	3.21 × 10 ⁻¹	3.36 × 10 ⁻¹	3.72 × 10 ⁻¹

表-1 Bタイプ透気係数計算結果一覧表

	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-7
送気圧(P)の距離 (m)	1.75	5.70	14.00	28.42	4.95	15.2
透気圧(P ₀)の距離 (m)	1.6	1.53 × 10 ⁻¹	1.36 × 10 ⁻¹	1.67 × 10 ⁻¹	1.76 × 10 ⁻¹	—
0.78	1.42 × 10 ¹⁰	1.53 × 10 ¹⁰	1.36 × 10 ¹⁰	1.67 × 10 ¹⁰	1.76 × 10 ¹⁰	—
0.93	1.62	1.89 × 10 ¹	9.74 × 10 ⁰	5.71 × 10 ⁰	4.05 × 10 ⁰	9.35 × 10 ⁰
1.08	36.5	2.59 × 10 ¹	9.99 × 10 ⁰	6.61 × 10 ⁰	4.79 × 10 ⁰	1.26 × 10 ¹

表-2 Cタイプ透気係数計算結果一覧表

$$k_a = \frac{6.9 w^2 Q_a}{\pi} \cdot \frac{1}{3(P_w^2 - P^2)(P_0 + wH) - 2(Pw^3 - P^3)} \log_{10} \frac{r}{r_w}$$

r_w : 送気パイプの径, r : 送気パイプの中心から観測パイプまでの距離, P_w : 送気圧
 P : 観測パイプ内の空気圧, H : 被圧水頭

送気パイプと各観測パイプの測定結果から透気係数を計算し取りまとめると表-1, 2のようになる。なお、Cタイプは水位低下の範囲が上部レキ層にのみしか及んでいないため、上部レキ層の透気性を示していることになる。

透気係数と透水係数との比をプロットすると図-10のようになる。この結果Bタイプの場合、ほぼ一様な透気性で空気が流れている。透気係数と透水係数との差は理論的に両者の粘性係数の比によって求めることができる。

すなわち

$$k_a = k_w \frac{\eta_w}{\eta_a}$$

η_a : 空気の粘性係数
 η_w : 水の粘性係数

地下水の水温はほぼ $16^{\circ} \sim 18^{\circ} \text{C}$ であるので、そ

の比は 55 ~ 65 倍であり、実測値は理論値に割合近い値を示していた。一方、Cタイプでは計算上の透気係数は送気パイプから離れるにしたがって小さくなり、空気は一様な状態で流れていないことを示しており、透気係数と透水係数との比は理論値より小さな値を示している。特に送気パイプから離れた所、また空気圧が被圧水頭に等しい条件では透水係数に近い値となっている。したがってCタイプのような場合には、一般的な意味の透気係数を云うよりも、空気が地下水中に泡状となって流れる抵抗係数と表現するのが適切である。

5. あとがき

Bタイプ、Cタイプの地盤条件における地盤内での空気の流動状態、地盤の空気の透気係数について述べたが、両者ではかなり異なる流動現象が認められた。

シールド工事においては、施工条件および土層条件が同じであれば、**空気消費量は、Aタイプ、Bタイプ、Cタイプの順に多くなるはずである。**しかし、Cタイプのような条件でも透水係数が大きければ、空気消費量の点からシールド工事に支障をきたすことが考えられる。空気の透気係数から空気消費量を求める式としては、Hagen-Poiseuilleの式を拡張したWagner-Schenckおよびトンネルからの漏気ヶ所に注目しWagner-Schenckの式に漏気係数を導入したKraabbeの式があるがいずれも多くの問題を残している。シールド工事の消費空気量の計算には前述の式を基本に、施工現場の測定データを整理することにより、透気試験結果が適用できる実用的な式を確立して行きたいと考えている。なおAタイプの現場においても同様の試験を実施したいと考えている。

参考文献

* THE FLOW OF HOMOGENEOUS FLUIDS THROUGH POROUS MEDIA. M. MUSKAT 1946

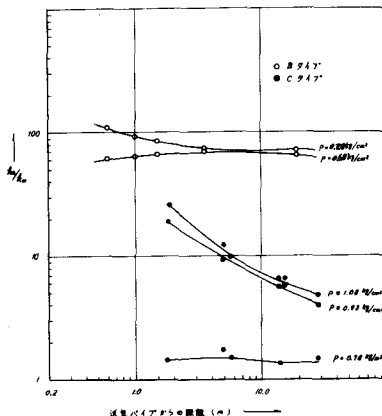


図-10 透気係数と透水係数との比