

鹿島建設技術研究所 正員 木島 詩郎
 “ “ “ “ 橋本 利郎
 鹿島建設 九州支店 “ “ 菟田 一義

I. まえがき

筆者らは、滞水砂質土層における、圧気シールド工事の圧気効果を工事着手前に判定する方法として現場透気試験に着目し、その結果を取りまとめて報告^(*)して来たが、現場透気試験結果の現場施工への適用については、種々の問題が残っている。この報文では実際の圧気施工現場での測定結果を整理することにより、現場透気試験結果の現場施工への適用について検討を加えたものを報告する。

II. 現場透気試験結果から得られる事項

圧気シールド工事の場合問題点となるのは次のようである。

- (1) 空気消費量
- (2) 適正圧気圧 (圧気圧と水位低下量との関係)
- (3) 噴発の有無

これらの事項はシールドを掘進する土層滞水条件^(*)(A, B, Cタイプ)により異なって来る。現場透気試験の結果から判定できる項目としては、次のようなものである。

- (1) 送気圧と地盤内への漏気量との関係
- (2) 送気圧と地下水位低下量との関係
- (3) 漏気影響範囲

圧気圧と漏気量との関係は図-1のように表わすことが出来るが、実際のシールドの場合には、シールド近傍(切羽, セグメントのすきま, シールドティール)などの地盤内に漏洩する条件が異なり、さらにロックの開閉等も考慮に入れなければならないために、この結果から直接的に空気消費量を求めることが出来ない。圧気圧と地下水位低下量との関係は図-2に示すように、特に地下水が被圧されているような場合には両者は直線的な関係にならず、見かけの地下水位低下効率が減少する。

この原因は地下水が被圧されている場合、地盤内に空気を圧送すると間ゲキ水圧が上昇し、これに伴って被圧地下水位が上昇するためである。もとの被圧地下水位からの水位低下量を S , 被圧地下水位の上昇量を ΔS , 圧気圧を P とすると(1)式で表わされる $(S + \Delta S)w/P = 100$ (%) ---- (1) ここで w ; 水の単位体積重量

一方、現場透気試験結果から、地下水位低下量と送気圧との関係は(2)式で表わされる。

$$S \cdot w/P = 100 - \alpha \cdot \Delta P$$
 (%) ---- (2) ここで ΔP ; 有効送気圧 (t/m^2) $\alpha = 3.0 \sim 4.0$

従って地下水位上昇量を ΔS とすれば $\Delta S \cdot w/P = 100 - S \cdot w/P = \alpha \cdot \Delta P$ (%) ---- (3)

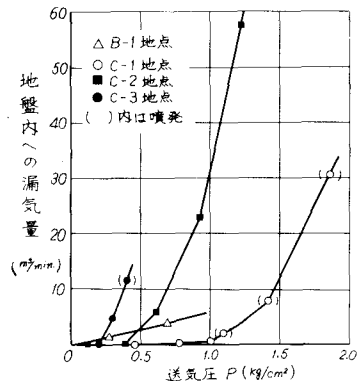


図-1 送気圧と地盤内への漏気量との関係

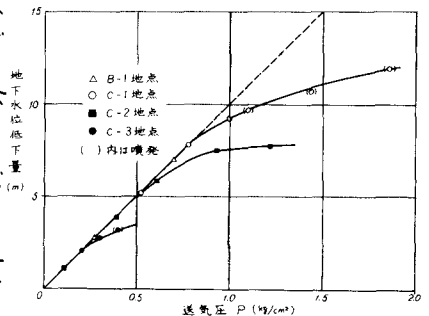


図-2 送気圧と地下水位低下量との関係

したがって、被圧水頭をHとすれば

$$0 \leq P < H \text{ のときは } \Delta S \cdot W/P = 0 ; H < P \text{ のときは } \Delta S \cdot W/P = \alpha \cdot \Delta P (\%)$$

一方、 $\Delta P = P - WH$ であるからこれを(2)式に代入して解けば(4)式のようになり、この方程式(4)を解くことにより、必要圧気圧を決定することができる。

$$\alpha' P^2 - (1 + \alpha' \cdot WH) P + S \cdot W = 0 \text{ ----- (4) ここで; } \alpha' = \alpha / 100$$

さらに噴發現象を生ずる場合には、送気圧と漏気量との関係グラフに急折点が認められる。

Ⅲ. 現場測定結果

今回現場測定を行なった地点の土層、滞水条件は図-3に示すようであり、土層滞水条件別に分類すると、Bタイプ1ヶ所、Cタイプ3ヶ所で、各現場での測定項目は(1)空気消費量、(2)圧気圧、(3)地盤内の空気圧、地下水位低下量である。各現場とも地盤条件に応じて坑内圧気圧を変化させて施工しているが、1例としてC-1現場におけるトンネル施工延長と坑内圧気圧、空気消費量との関係を図-4に、切羽漏気断面積と空気消費量との関係を図-5に示した。一方各測定現場における坑内圧気圧と空気消費量との関係を図-6に示した。これらの図からも明らかなように、空気消費量は坑内圧気圧の変化がない場合にはトンネル施工延長との関係はあまり認められなく、坑内圧気圧に大きく影響され、また切羽の漏気断面積にもある程度影響されているが、直接切羽の面積の比では表わされない。一方地盤内の空気圧と地下水位低下量との関係は、Bタイプではすでに報告(*)したように空気圧にほぼ等しい水位低下が認められたが、Cタイプでは被圧水頭以上の送気圧では、水

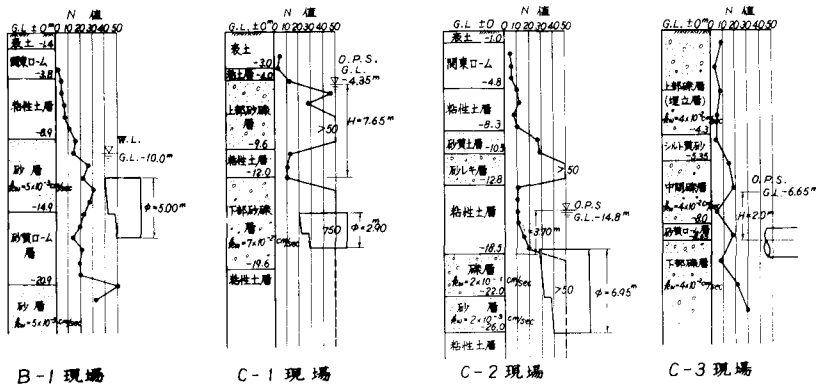


図-3 現場測定地点の土層、滞水条件

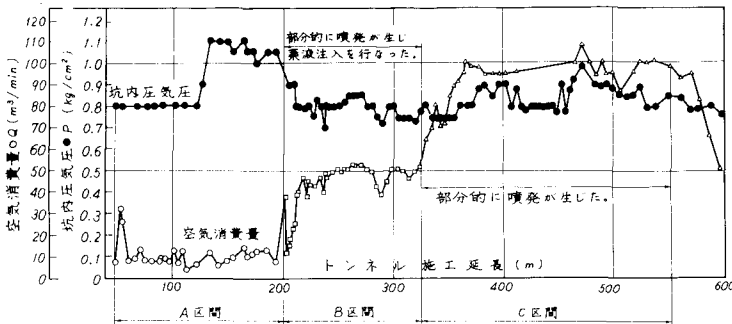


図-4 トンネル施工延長と坑内圧気圧、空気消費量 (C-1 現場)

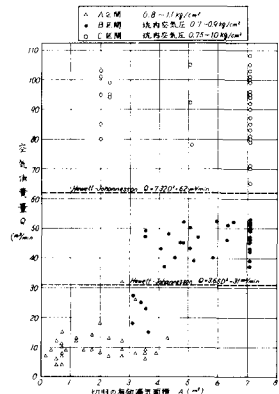


図-5 切羽の有効漏気面積と空気消費量との関係 (C-1 現場)

位低下の効率は減少する一方であった。また噴発の生じた現場(C-1, C-3現場)での限界圧気圧はおおの1.1 kg/cm²および0.4 kg/cm²であった。

IV. 現場透気試験結果と現場測定結果との関連性

(1) 空気消費量

空気消費量の問題は地盤内に直接漏洩する空気量(シールド切羽, セグメントのすき間, シールドティール等)の他に, ロックの開閉, 立坑周辺, 周辺の構造物の基礎, 古井戸などから地表面に直接漏洩する空気量も考慮に入れる必要があり, これら空気量の分類のうち前者は地盤内の空気の流動状態を把握する必要があり, これらを支配するものは地盤内を流れる空気の透過係数である。この透過係数の算定式は前述した土層滞水条件別に考慮し, すでに報告した。(2)

一方, 前述したように空気消費量はトンネル施工延長にあまり影響が認められないため, シールド近傍を換算井戸と考え, この換算井戸(γ_w)から空気が漏洩するものとして, 既に報告した空気の透過係数の算定式を用い, 境界条件を与えて解くと各々式(5), (6)のようになる。

$$B \text{タイプでは } Q_a = \frac{\pi k a w^2}{6.9 P_0 \log P/\gamma_w} \{3(P_w^2 - P_0^2)(P_a - w \cdot y_e) - 2(P_w^3 - P_0^3)\} \text{----- (5)}$$

$$C \text{タイプでは } Q_a = \frac{\pi k a w^2}{6.9 P_0 \log P/\gamma_w} \{3(P_w^2 - P_a^2)P_a - 2(P_w^3 - P_a^3)\} \text{----- (6)}$$

ここで Q_a : 地盤内に直接漏洩する空気量(大気圧換算)

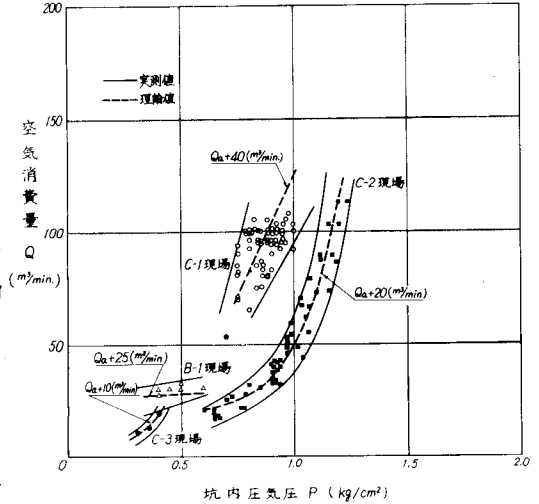


図-6 坑内圧気圧と空気消費量

	B-1現場(シールド工事)			C-1現場(シールド工事)			C-2現場(シールド工事)						C-3現場(押管工事)		
圧気工法の問題点	空気が砂層を集中して漏洩し, 圧気が水位低下に有効に働かない。			下部砂層上部の薄粘性土層のカバーロックとしての信頼性 噴発の危険性, 空気消費量が多大となる。			空気が礫層に集中して漏洩し, 圧気圧が有効に働かない。空気消費量が多大となる。						上部にカバーロックとして信頼出来得る粘性土層が存在せず噴発の危険性がある。		
施工時の現象	砂質土層の上部に粘性土層がドーム状に堆積している。圧気が有効に働き空気消費量も少なかった。			下部砂層の上部に存在している粘性土層が切れていたり圧気圧1.1 kg/cm ² 噴発が生じ圧気圧が0.8 kg/cm ² まで低下し, それ以上圧気圧を増大できなかった。			圧気圧が0.9 kg/cm ² 以上となった時点で空気消費量が増加したにもかかわらず, 空気圧の維持が困難となり, 砂層までは水位は低下しなかった。また被圧水頭は圧気圧の増大により上昇した。						圧気圧0.4 kg/cm ² で噴発が生じ, 圧気圧が急激に低下し, 切羽が崩壊した。		
シールド諸元	外径5.00m 機長5.00m			外径2.95m 機長4.40m			外径6.95m 機長6.50m						押管外径2.00m		
仮想井戸半径	$\gamma_w = 3.99 \text{ m}$			$\gamma_w = 2.85 \text{ m}$			$\gamma_w = 7.58 \text{ m}$ (単線2本)						$\gamma_w = 2.00 \text{ m}$		
影響半径	$R = 200 \text{ m}$			$R = 500 \text{ m}$			$R = 1000 \text{ m}$						$R = 500 \text{ m}$		
送気圧(kg/cm ²)	0.40	0.50	0.60	0.80	0.90	1.00	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	0.30	0.35	0.40
空気透過係数(cm/sec)	4.1×10^{-1}			1.51×10^{-1} , 1.65×10^{-1} , 1.75×10^{-1}			5.2×10^{-1} , 6.6×10^{-1} , 8.8×10^{-1} , 1.1×10^0 , 1.4×10^0 , 1.84×10^0						2.9×10^{-1} , 3.4×10^{-1} , 5.6×10^{-1}		
理論空気消費量 Q_a (m ³ /min)	2.5	3.4	3.7	43.1	64.0	85.1	3.4	7.7	15.9	29.8	52.7	92.7	1.3	3.4	10.1
実測空気消費量 Q (m ³ /min)	20.0	26.0	30.0	77.0	95.0	108.0	25.0	33.0	42.0	54.0	75.0	113.0	10.0	13.0	19.0

表-1 施工時の現象と理論空気消費量算定結果

k_a ; 空気の透過係数 (現場透気試験より求めたもの)

R ; 影響半径 r_w ; 換算井戸半径 P_w ; 坑内圧気圧 (絶対圧; ゲージ圧 + P_0)

P_0 ; 大気圧 y_e ; 滞水層厚 P_a ; ストレーナ上端までの水頭 ($P_0 + W H$)

H ; 透気層厚

シールド換算井戸半径はシールド材の外径 (D) とし、シールドの長さ (L) に等しいセグメントの範囲から空気が流出するものとするれば換算井戸半径 (r_w) は式 (7) で表わされる。

$$\pi r_w^2 = 2 L D \quad \therefore r_w = \sqrt{\frac{2}{\pi}} L D \text{ ----- (7)}$$

これらの式 (5), (6), (7) によって得られた空気量 (Q_a) は地盤内に直接漏洩する空気量を示しており、表-1 に算定結果を示し、現場で施工時に生じた現象をあわせて併記した。一方施工時の空気消費量は、 Q_a のほかに直接大気中に漏洩する空気量も考慮に入れなければならない。従って圧気シールド工事における空気消費量 (Q) は (8) 式で表わされる。

$$Q = Q_a + Q_f \text{ ----- (8)} \quad Q_a; \text{ 地盤内への漏気量 } Q_f; Q_a \text{ 以外の漏気量}$$

各現場の実測空気消費量 (Q) から (5), (6), (7) 式より求めた Q_a の値を減じて求めた Q_f の値はほぼ一定となり、空気消費量は以下のように整理できる。 B-1 現場では $Q = Q_a + 25 \text{ m}^3/\text{min}$; C-1 現場では $Q = Q_a + 30 \text{ m}^3/\text{min}$; C-2 現場では $Q = Q_a + 20 \text{ m}^3/\text{min}$; C-3 現場では $Q = Q_a + 10 \text{ m}^3/\text{min}$ となり、この結果を図-6 に併記すると両者の関係はよく一致する。

(2) 坑内圧気区と地下水位低下量との関係、および、噴発について

前述したように現場透気試験結果は圧気圧と地下水位低下量とは等しくなかったが、この傾向は実際の工事現場 (C-2) でも認められた。この地下水位上昇量の割合は単位圧気圧当りほぼ $4 \text{ m}^3/\text{kg}/\text{cm}^2$ であり、現場透気試験結果に基づく水位の上昇の値とはほぼ一致している。一方 C-1 現場では施工時に無圧気部から $3 \text{ m}^3/\text{min}$ の湧水があり、また地表面に噴発も生じたため明確な傾向は得られなかった。噴発の生じた地点は C-1, C-3 現場であるが、両現場ともに噴発の生じた圧気圧は透気試験結果と一致した。

V. あとがき

圧気シールド工事に際し、圧気効果を判定するための現場透気試験は極めて有力な方法であることが判明しその結果を整理要約すると以下のようなことが言える。

(1) B, C タイプの地盤内に直接漏洩する空気量はシールドを換算井戸とした (5), (6) 式により、現場透気試験より得られた空気透過係数を用いて算定できる。

(2) C タイプの地盤条件では間ゲキ水圧の上昇に伴ない、地下水位の上昇が起り、その上昇の割合は現場透気試験と一致する。

(3) 施工時に噴発の生じる圧気圧は、現場透気試験時でもほぼ同一圧気圧で生じる。

今後現場測定を数多く実施し、さらに明確な現象の把握、あるいは圧気効果に関する一般式の確立を計りたいと考えている。

参考文献

- 1) 木島他; 圧気シールドにおける空気消費量の現場測定について、土木学会 25 回年次講演会Ⅱの 101
- 2) " ; シールド工事における現場透気試験について、同上 III - 102