

# 圧気シールド工事における地盤中の空気の流れについて

齋藤 二郎  
内藤 和章  
芳賀 孝成

## 概 要

シールド工事の計画に際し、適正圧気圧・消費空気量はこれまでの実例から経験的に定められていることが多い。理論的に解析するには土中の空気の流れに関する研究をまだまだ積み重ねる必要がある。そこで圧気シールド工事における地盤中の空気の流れの状態を求めることを目的として実際に現地調査を行ない、調査結果を電気アナログ実験結果と対比して検討した。この結果、地盤中の空気の流れの状況を左右する要因が明らかになるとともに電気アナログ解析方法の妥当性が認められた。

## 1. まえがき

圧気シールド工事において、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り掘進が困難となる。したがって圧気シールド工事の施工計画に際しては地盤の透気性を十分に把握する必要がある。地盤の透気性を合理的に判別する方法としては「漏気試験」と称する現位置試験がある。しかし、この試験は通常、シールド工事施工区間中の限定された場所で実施されるものであり、この試験結果から工事区間全域の漏気性状を正しく判断し、噴発の発生範囲、あるいは適正圧気圧や消費空気量を正確に求めるためには土中の空気の流れの性状をもっと明らかにしてゆかなければならない。

以上の観点から名古屋市における某圧気シールド工事において地盤中の空気の流れの状態を調査し、これを電気アナログ試験結果と対比して検討を行なった。

シールドからの漏気は地下水を押し上げながら上昇するが、このため地盤の含水量は低下し、間隙水圧は変動を受ける。やがて(図一1)に示すような空気領域と地下水領域が地盤中に形成されてくる。そこで本調査ではシールド通過位置にボーリング孔を削孔し、これを用いて、シールド掘進に伴う地盤の含水量、密

度、圧力、および温度の変化を測定し、この結果から地盤中の空気の流れの状況とその範囲を推定した。

## 2. 現地漏気領域の測定

### 2.1. 工事概要

本工事は地下鉄道の建設を目的とし、単線並列型シールド工法を採用している。工事では、まず2番線シールドが先に発進し、約1か月遅れて1番線シールドが発進した。シールドの外径は6.4mで一次覆工セグメントは幅90cmの鉄筋コンクリート製で、二次覆工は平均厚30cmのコンクリートライニングによるものである。また圧気圧をできるだけ下げるためにディープウェルをシールド中心線の両側に設置して地下水位の低下をはかった。

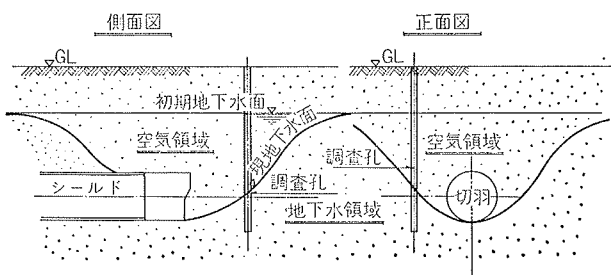
### 2.2. 測定位置

工事区間は熱田台地とよばれ、その地層は粘性土層と地層が互層をなした熱田層と呼ばれるものである。

(図一2)は測定位置の平面図である。調査孔設置点は4か所である。測定位置のシールド発進立坑からの距離は約262mである。(図一3)は測定位置付近の地質断面図である。シールドは進行方向に下り勾配となっており、測定位置における土かぶりは約17.7mである。なお測定位置付近のディープウェルのストレーナー部分はGL-13m~28mに設置されている。

### 2.3. 測定方法

2.3.1. 調査孔の設置 測定地点1か所につき地盤含水量、密度調査孔、および地中圧力・温度調査孔の2本を設けた。地盤含水量・密度調査孔は孔径100mmのボーリング孔内に鋼管を挿入し、鋼管とボーリング孔壁との間ゲキにモルタルを充填したものである。なお鋼管の継手や先端は地下水および土中の空気はい



図一1 シールド漏気領域

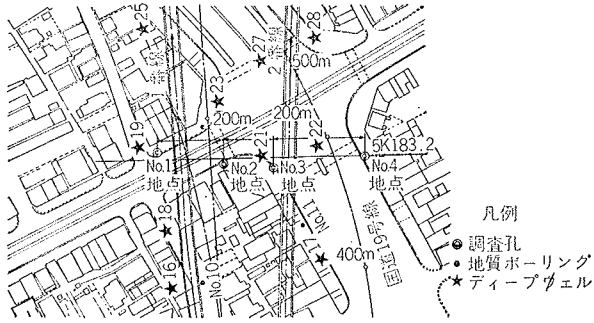


図-2 測定地点平面図

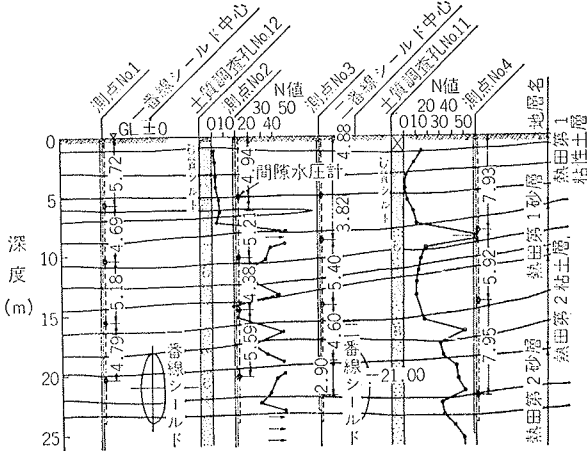


図-3 測定地点地質断面図

り込まないように十分水密性を保たせ漏気領域がボーリング孔の設置により乱されることを防止した。地中圧力・温度調査孔は孔径 100mm のボーリング孔を地盤含水量・密度調査孔に近接して削孔し、ここに間ゲキ水圧計を設置したものである。間ゲキ水圧計の周囲はベントナイトと豆砂利の混合土とし、また地表から 2m までのボーリング孔内にはモルタルを充填した。調査孔および間ゲキ水圧計とシールドの位置関係を(図-3)に併記した。

2.3.2. 測定 地盤含水量、密度の測定はラジオア

イトープ計器を用いて第1地点より順に測定した。測定はケーシング内のプローブを1m ずつ下げながらカウント数を計測してゆくもので1回の計測時間は全測定時間の短縮のために1分とした。地中圧力・温度の測定に用いた計器はカーソン型計器である。測定日時と工事進捗状況の関係を(表-1)に示す。シールドが測定位置を通過する前後は測定間隔を短くした。

2.4. 測定結果

2.4.1. 地中圧力の変化 (図-4)は第3地点における地中圧力の経時変化を示したものである。他の測定地点も同様であるが2番線シールドが発進した直後から圧力はしだいに増加している。このことからシールド圧気の影響範囲は少なくとも 200m 以上であることがわかる。シールドが測定地点の 20m 前方に接近するまでは圧力のゆるやかな増加が続くが、その後圧力は一時的に減少する。しかし再び急激な上昇が起こりシールド通過直後に最大の値となる。これはシールド切羽から20m以内の地盤中の空気の流れがかなり変化していることを示す。この傾向は特に GL-14.0m および GL-21.60m の場合に著しい。2番線シールド通過後、シールドに近い部分の圧力はゆるやかに減少するが、1番線のシールド接近によって再び増加し通過直前に小さなピークが生じる。このときの圧力変化は2番線通過時より小さい。1番線通過後の圧力は深度が大きい部分ではわずかながら減少し、地表に近い部分ではゆるやかに増加している。8月7日には圧力は比較的小さいが、これはシールド坑内を断気したためシールドトンネルが水平ドレーンパイプの役割を果たし、さらに坑口における湧水が地中圧力の大きな低下をもたらしたと考えられる。10月22日における地中圧力は1月26日における測定値付近まで回復している。

測定項目	1		2		3		3		3		3		3		3		4		4		4		4		6		8		10		10		11	
	日	26	10	25	9	12	16	21	22	23	24	25	26	27	36	9	15	21	22	23	24	27	4	7	22	25	6							
組立リング	41	41	41	86	101	109	133	138	144	150	155	161	164	179	227	254	279	285	291	297	297	466	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570		
掘進距離	36.9	36.9	36.9	77.4	90.9	93.1	119.7	124.2	129.6	135.0	139.5	114.9	147.6	161.1	204.3	228.6	251.1	256.5	261.9	267.3	267.3	419.4	513.0	513.0	513.0	513.0	513.0	513.0	513.0	513.0	513.0	513.0		
測定地点からの距離	225.1		184.6	171.1	164.9	142.3	137.1	131.7	127.0	122.5	171.1	114.4	100.9	57.7	33.4	10.9	5.5	5.5	0.1	5.3	157.4	157.4	251.0	251.0	251.0	251.0	251.0	251.0	251.0	251.0	251.0	251.0		
中心深度	-3.0	*	*	-4.4	-5.0	-5.1	-5.7	-5.8	-6.0	6.61	-6.2	-6.4	-6.5	-7.0	-8.3	-9.2	-10.0	-10.1	-10.2	-10.4	-10.3	-14.9	-16.8	-16.8	-16.8	-16.8	-16.8	-16.8	-16.8	-16.8	-16.8	-16.8		
圧気圧	0kg/cm <sup>2</sup>	0	0	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.75	0.75	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
消費空気量				30.0%			34.0%							46.0%	47.0%		50.3%				60.0%	60.0%												
組立リング	56	109	157	208	224	241	272	274	282	289	294	299	304	317	355	387	414	419	425	432	451	623	735	735	735	735	735	735	735	735	735	735		
掘進距離	50.4	98.1	141.3	187.2	201.6	216.9	244.8	246.6	253.8	260.1	264.6	269.1	273.6	285.3	319.5	348.3	372.6	377.1	382.5	388.7	405.9	560.7	661.5	661.5	661.5	661.5	661.5	661.5	661.5	661.5	661.5	661.5		
測定地点からの距離	211.6	163.9	120.9	74.8	60.4	45.1	17.2	8.2	1.9	2.6	7.1	11.6	23.3	47.5	86.3	110.6	115.1	115.1	120.5	126.7	143.9	298.7	399.5	399.5	399.5	399.5	399.5	399.5	399.5	399.5	399.5			
中心深度	-3.4	-5.0	-6.4	-7.8	-8.3	-9.0	-9.9	-10.0	-10.2	-10.3	-10.4	-10.5	10.6	-11.2	-11.9	-12.9	-13.5	-13.7	-14.0	-14.1	-14.6	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0		
圧気圧	0.2	0.2	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
消費空気量	21.0%	30.0%	46.0%	46.0%	52.5%		56.0%							63.0%	73.5%		61.0%				88.0%	88.0%												
No 19 ~ 23 移動ディープウェル					21	21	21	21	21.22	21.22	21.22	21.22	21.22	21	22	21	19.21	19.21	19.21	19.21	19.21	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23		

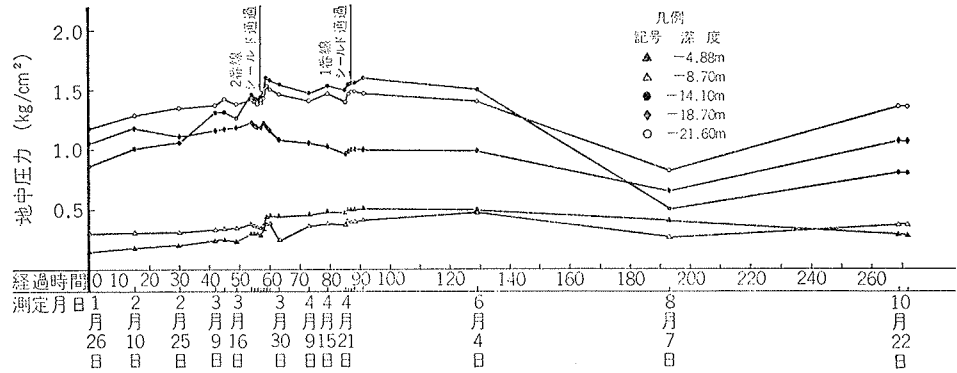
表-1 測定日時と工事進捗状況

(図一7)は2番線シールドが測定地点前方約10mから後方約10mまで通過する間の各測定地点における地中圧力の深度方向の変化を示すものである。地下水位と考えられる深度はGL-5.0mでこの深度よりGL-15m付近までの圧力分布は静水分布に近いがそれより下の圧力勾配は小さい。これはディープウェルによる地下水の揚水によって圧力が低下したものと考えられる。この傾向はシールド発進直後からすでに見られるもので測定地点よりかなり遠方のディープウェルもこの地点の地下水位を低下させるために役立っていることがわかる。

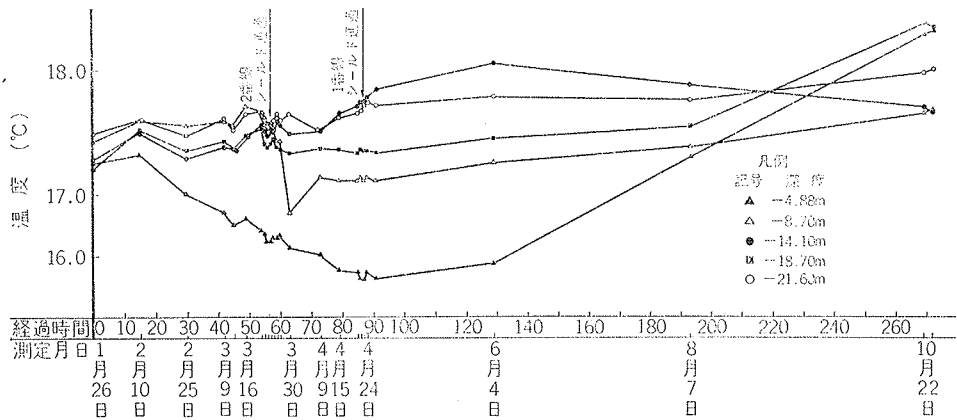
3月26日は比較的大きな圧力を示す点があるのが認められるが、この点は砂層中に位置している。

### 2.4.2. 地中温度変化

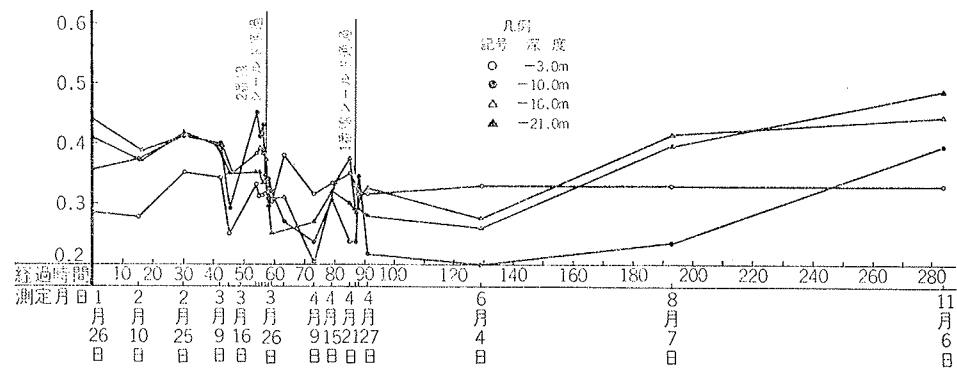
(図一5)は第3地点における地中温度の経時変化を示したものである。時間の経過とともに各深度の温度差は大きくなっている。GL-4.9mの地中温度はしだいに低下しているが他の深度における温度はシールド接近に伴い上昇しており、特にGL-14.10mの地中温度は上昇率が大きく6月4日まで上昇が続く。ただしシールドが20m付近に接近したときには、各深度の温度は一時的に低くなっている。シールド坑内温度は19℃~21℃で特に夏期においては23℃であるが、地盤中の温度は、これより2~4℃低い。シールド断気後にはそれまで3℃以上もあった温度差はまた小さくなっている。地中の温度変化が比較的大きいのはシールドに近い位置、すなわち第1地点および第3地点のGL-20m付近と各測定地点の地表に近い部分である。深い部分の温度はシールドが接近すると上昇し、地表に近い部分では温度は下降しており、このような温度変化は明らかに漏気の影響である。



図一4 地中圧力の経時変化 (第3地点)



図一5 地中温度の経時変化 (第3地点)



図一6 地盤含水量の経時変化 (第3地点)

2.4.3. 地盤含水量変化 (図一6)は第3地点において特に含水量の変動が大きいとみなされる代表的な深さ4点における含水量の経時変化を示したものである。他の地点も同様であるが3月12日に含水量は急激に低下しているがこれは測定地点付近のディープウェルの稼働開始に起因するものと考えられる。シールドが20mまで接近した3月21日、22日に含水量のピークが一度生じシールドが通過する3月24日・25日には急激な減少が認められた。測定開始後ある時期までは各測定地点の地盤含水量の値にはかなりの変動が見られた。これはシールドからの漏気やディープウェルの稼働による影響以外にボーリング孔壁とケーシングとの間にあるベントナイト混合土の含水量変化によるものと考えられる。

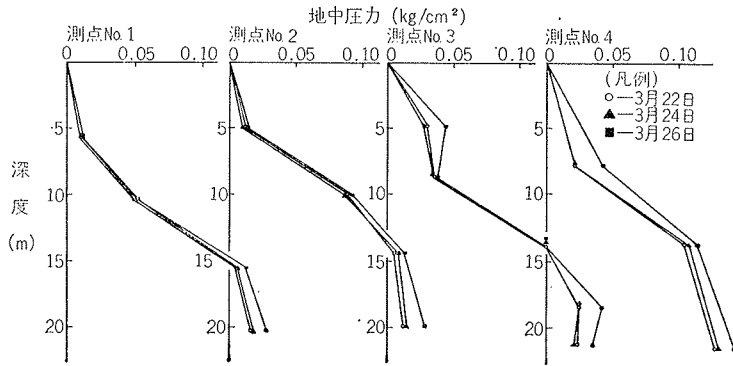


図-7 地中圧力の深度方向分布

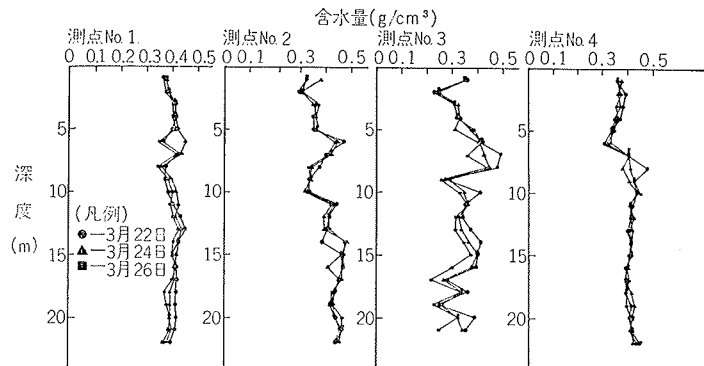


図-8 地盤含水量の深度方向分布

(図-8) は2番線シールドが測定地点前方約10mから後方約10mまで通過するときの各測定地点における地盤含水量の深度方向の変化を示すものである。測定値の変動が比較的大きいのは第3地点で、またその他の地点では、地表に近い部分または地表とシールド位置との中間部の含水量が局部的に変動しているのが認められる。各深度の含水量の変動状態を注意深く見るとシールド進行に従い含水量は不規則に増減しているがその絶対量は比較的小さい。

(図-9)における(I),(II),(III),は含水量の変動状況を数値的に示したものである。すなわち各測定地点における深度と測定値の残差平均値との関係から求めた残差平均値分布図である。なお残差の平均値は測定値を2番線シールドが60mに接近するまで(I),2番線シールドが測定地点を通過する前後(II),および1番線シールドが測定地点を通過する前後(III)の3つのグループに分けそれぞれについて次式によって求めた。

$$V(\text{残差}) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) / N \dots\dots\dots(1)$$

$x_i$ : 測定値  $\bar{x}$ : 平均値  $N$ : 測定値数

2番線シールドが60mに接近するまではシールド進行方向に向かって左側に含水量の変動が見られ空気は主としてこの部分を流れていることが推定される。またシールド直上よりやや右側にも局部的に含水量が大

きく変動している部分がある。2番線シールドが測定地点に接近したときは、シールド直上よりやや右側にあった含水量の変動領域がますます発達している。この大きな変動領域は砂層の位置に当たる。すなわち空気は粘性土層にはさまれた数多くの砂層中を流れていることがわかり、シールド上部に熱田第2粘性土層があるにもかかわらず熱田第1砂層における空気の流れもかなりあることが認められる。なお1番線シールド前方にも含水量が変動する部分が生じはじめているのがわかる。1番線シールドが通過するときの1番線付近の残差平均値は小さい。これは1番線シールドからの空気が2番線シールドの通過によって生じた漏気領域中を通り第3地点に近いディープウェル孔へ流れるためと考えられ、先行シールドの漏気領域は後続シールドの漏気領域に大きな影響を与えるものと思われる。

2.4.4. 地盤密度変化 (図-10)において

(I)は1番線シールドが測定地点に到達したときの地盤密度分布を示したもので、1番線シールド通過位置と2番線シールド通過位置との中間部にかなり密度が小さい部分があり、これは何層にも分けられている。空気が砂層中を流れるため、砂層は不飽

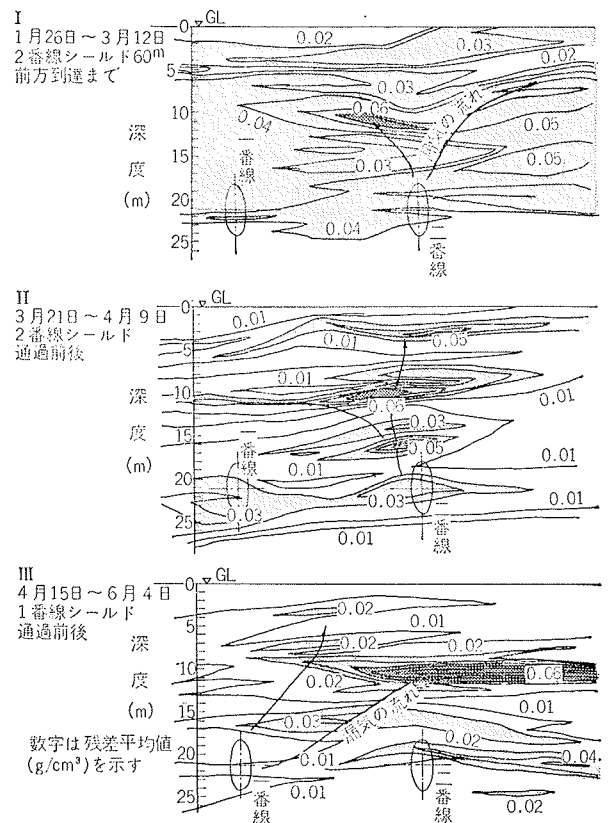


図-9 地盤含水量の残差平均値分布

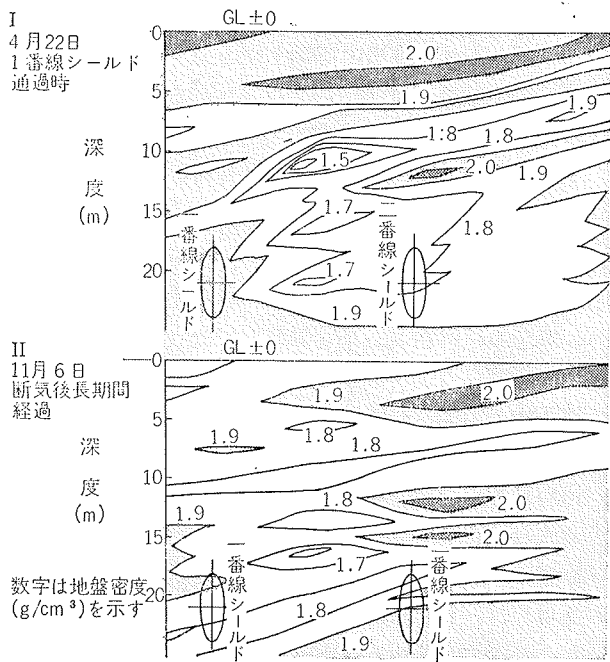


図-10 地盤密度分布

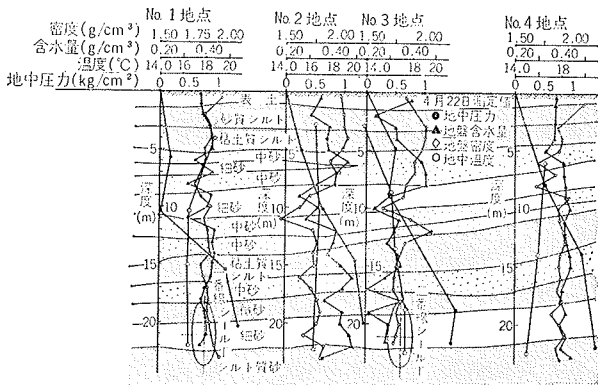


図-11 地層と各測定値

和の状態となり密度が小さくなったものであろう。

(II)は断気してから長期間経過したときの盤密度分布を示したものである。シールド通過時に減少していた地盤密度はほとんどが回復していない部分はずかに残されている。これはシールドからの漏気によって調査孔周辺の地盤が性状変化したためと考えられる。

2.4.5. 測定値と地層 (図-11)は4月22日における各測定値を一括して地層図上に示したものである。地盤は粘性土層および砂層の複雑な互層であるが含水層分布および密度分布もこれを反映して変化に富む。

### 3. 電気アナログ実験による漏気の解析

#### 3.1. 電気アナログ解析について

一般に土中の空気の流れは3次元的であり、透気性の異なる地層が互層をなす場合には、これを数学的に解析することは困難である。また地下水が存在する場

合には空気領域と地下水領域とが地盤中に生ずるがこの境界面を数学的に求めることも不可能に近い。そこでこの複雑な空気の流れの理論解を得るために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漏気状態と幾何学的に相似な模型を作り解析を行なった。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圧気圧( $P^2 - P_0^2 / P_0$ )と電圧( $E$ )、透気係数( $k_p$ )と電気伝導度( $\chi$ )および空気流量( $Q_p$ )と電流( $I$ )との対応によって得られる。この場合の相似率は次式で示される。

$$Q_p = \frac{k_p}{2\chi_m} \cdot \frac{P^2 - P_0^2}{P_0} \cdot \frac{I_m}{E_m} \cdot \alpha \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに添字  $P$  および  $m$  は実物および模型に対するもので  $\alpha$  は縮尺、 $P$  は絶対圧、 $P_0$  は大気圧である。

#### 3.2. 実験方法

電気アナログ解析のための標準地層は土質柱状図等を参考として定め、間ゲキ水圧は間ゲキ水圧計による現場測定結果を参考としてきめた。模型の縮尺は1/60で実験槽の大きさは高さ45cm、幅40cm、長さ100cmである。シールド漏気面はシールド切羽全面と裏込注入未了区間とした。(図-12)に実験装置の概略を示す。漏気面および地表面には銅板を張り付けて電極とし、導電性媒質としては寒天を用い、電気伝導度は塩の添加によって調節した。実験では地下水領域と漏気領域との境界面における地下水圧と空気圧は等しいという考え方から電圧計のプローブを寒天表面にあて、電圧を読み取り、電圧がその深度における地下水圧に相当する電圧以下のときは寒天を切断して表面の電圧を高め、これを順次トライアル法で繰り返して目的とする漏気領域を形作ってゆく手法を用いた。漏気領域が定まると次に漏気量に対応する電流を測定した。

#### 3.3. 実験結果

(図-13)は実験によって求めたシールド縦断方向の漏気領域の断面図である。同図には標準地層および間ゲキ水圧も併記したが、熱田第2粘性土層下に漏気領域が広範囲に拡大することが特徴的である。また熱田第1砂層中の漏気領域は小さく、特に圧気圧が小さい場合には、その傾向は著しい。

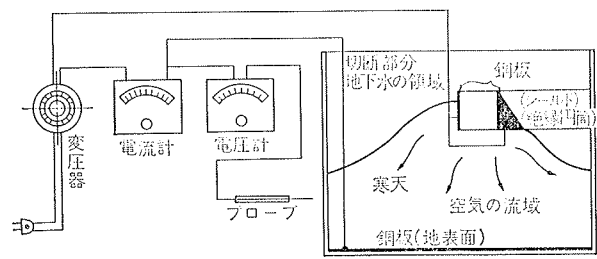


図-12 電気アナログ実験装置

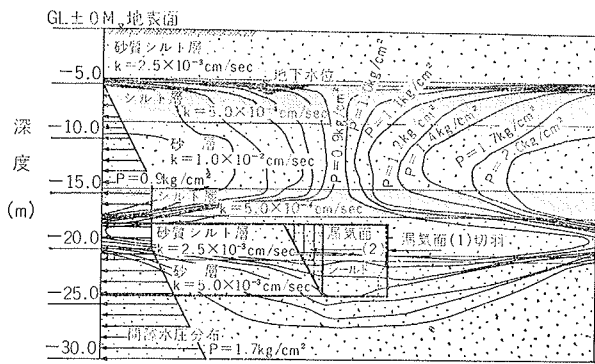


図-13 漏気領域断面図

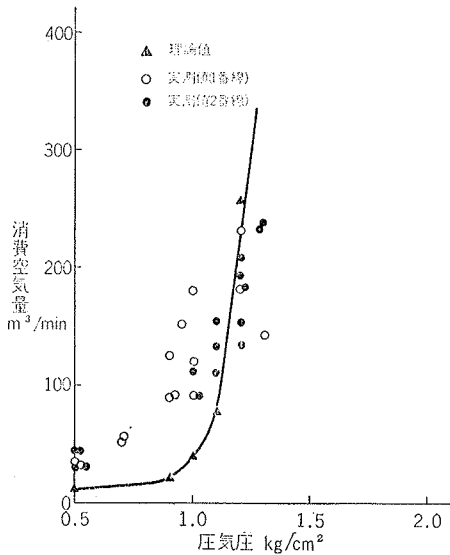


図-14 圧気圧と消費空気量

本実験の測定結果と工事着手前に実施した漏気試験によって得られた地盤透気係数( $k_p=0.55\text{m}/\text{min}$ )とを(2)式に代入して切羽および裏込注入未了区間からの漏気量を求め、これにロックの消費空気量を加算した理論消費空気量と圧気圧との関係を示したものが(図-14)である。実際の工事における消費空気量実測値を同図に併記したが圧気圧  $0.9\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 1.3\text{kg}/\text{cm}^2$  の場合の実測値はほぼ理論値に近い。圧気圧が  $0.5\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 0.7\text{kg}/\text{cm}^2$  の場合の実測値は理論値よりもいくぶん大きい、この圧気圧のときはシールド土被りが小さいので大きな値となっている。

#### 4. 考察

電気アナログ実験に用いた標準地層は現実の複雑な地層を簡略化したもので粘性土層下の砂層中に広範囲に拡大する漏気領域は1層であるが、実測結果ではこのような領域は3~4層あることが判明した。また電気アナログ実験では各層は全く均質なものとして解析しているが、実際にはさきに述べた水平方向に拡大す

る漏気領域を斜めに貫くような空気の流れが多く生じており、これは地盤の不均一性を示すものである。本測定地点付近にはディープウェルがあり、これに向かう空気の流れがその代表的なものである。さらに後続シールドの漏気領域は先行シールドにも大きな影響を受けることがわかった。これは先行シールドの漏気により地盤中には空気の通りやすい道が生じ、後続シールドの漏気がこの道を通れるからである。

水平方向に拡大した漏気領域では空気の流速は非常に小さいものと考えられる。またこの領域では地下水が領域外に排出されることもゆるやかであり空気と水とが共存する非定常の状態となっているものと思われる。長期的な含水量の低下や圧力の変動は、この広範囲な漏気領域の性状を示すものである。領域の範囲は、本工事の場合、シールドより200m以上にも及ぶものと推定される。シールドに近い地盤中にはさきにも述べた粘性土層を突き破って上昇する空気流があるが、この空気の流速はかなり大きいものである。空気の流れる道はディープウェルや地下壁あるいは地盤の脆弱部などにより誘導されて作られるが、流速の大きな空気が流れるためにますます空気の流れやすい状態となってゆく。このため、空気が流れる道の周辺地盤の含水量や圧力は大きな変動を受ける。この空気流の発生領域は比較的小さくシールドよりほぼ20m以内である。

本シールド工事では漏気量が非常に少なく定常状態の漏気領域は形成されておらず、実測結果を電気アナログ実験結果と比較することには無理がある。しかし局部的な空気の流れを除く全体的な漏気性状に関しては両者ともきわめて類似している。

#### 5. あとがき

圧気シールドからの漏気は地層中を均一に流れるものと考え、この考え方によって漏気試験と電気アナログ解析が行なわれ、適正圧気圧や消費空気量が算定されてきた。地盤中の空気の流れを解析するためにはこの考え方、すなわち地盤を巨視的に見る考え方は不可欠である。しかし実際の空気の流れは多くの要因に鋭敏に影響されることが本測定結果より確かめられた。地盤中の空気の流れの解析はこの空気の流れの特性と地盤のそれに対応した性質とを常に念頭においたうえで行なわなければならない。そのような意味で本現場測定結果は、今後シールド漏気解析を行なうときにあらかじめ検討しなければならない事項を指摘している。

本報告の最後にあたり現場測定に際し終始御協力をいただいた工事事務所の方々に対して謝意を表します。