

# 圧気シールド工事における RI を利用した漏気範囲の調査

木村 薫 吉岡 尚也  
藤原 紀夫 児玉 大三郎  
(飄箆山工事事務所)

## Field Measurements of Air Leakage Areas around Shield Tunnel Using Neutron Moisture Gauge

Kaoru Kimura Hisaya Yoshioka  
Toshio Fujiwara Daisaburo Kodama

### Abstract

This report describes field measurements made on air leakage areas around a shield tunnel. The strata along the tunnel route contain much methane gas, and therefore, it is feared that third-party facilities might be exposed to trouble due to blowout of methane gas or oxygen-deficient air. The object of the measurements is to prevent such trouble. Utilizing the fact that moisture content at any depth in the ground can be measured by a neutron moisture gauge, leakage areas, times and distances at which influence of compressed air begins to be felt, and differences according to type of stratum are examined. Other measurements such as temperatures at various points in the ground, air temperature, weather, etc., also serve as aids in investigating leakage areas.

### 概 要

本報告は、多量のメタンガス発生が予想された圧気シールド工事において、エアブローに伴う第三者設備（井戸、地下室など）へ、メタンガスあるいは酸素欠乏空気が噴出する事故を未然に防止する目的で実施された、RI による漏気範囲の調査結果について述べたものである。

中性子水分計を用いれば、任意深さの地中の含水量が測定できる事を利用して、シールド周辺の漏気領域、圧気の影響が生じ始める時間および距離、地層の種類による相異点などについて検討している。また、地中各点の温度、気温、天候なども合わせて測定・記録し、この漏気範囲の調査を助けている。

### 1. まえがき

シールド工法の主流は、今や泥水シールド工法に変わりつつあるとはいえ、まだ圧気シールド工法が採用される場合も多い。したがって、圧気工法による問題点については、今後とも研究を重ねなければならない。

これから報告しようとするのは、大阪市において施工された圧気シールドの漏気調査に関するものである。

このシールドは、水道用送水管のためのトンネルで、外径 3.5 m、土被り 15 m、総延長 917 m である。

このシールド工事の特徴は、シールド通過地盤内にメタンガスが多量に含有されていることが確認されており、ガス災害の防止が安全施工上の第 1 の目標に掲げられていたことである。

地盤は主として沖積粘土層（N 値 5 前後）からなり、透気性の低いものであるが、一部に砂質層やレキ混りの層があり、この透気性の高い層を通して漏気が広がった場合に、地中のメタンガスを移動させ、井戸・地下室等の第三者設備に漏出する恐れがあった。

### 2. 調査方法

#### 2.1. 測定項目と配置

調査の目的を具体的に述べれば、シールド掘進に伴う圧気の影響範囲を調査することである。そのため、RI 水分計により地盤内含水量を、サーミスタ温度計により地中温度を測定し、これらの経時変化を追跡した。

調査期間は、昭和 51 年 9 月 20 日から昭和 51 年 12 月 1 日までであった。

調査の内容および数量は下記の通りである。

- (1) 水分計校正試験, 12供試体
- (2) 含水量測定, 6地点 (1地点あたり14点)
- (3) 温度測定, 2地点 (1地点あたり5点)

図一に各々の測定孔の平面配置図を示す。W, C, E孔は含水量の測定孔であり, それぞれトンネルの西, 中央, 東側を意味する。またサフィックスの1と2はI横断面, II横断面をさしている。T孔は温度測定孔を意味している。

使用機器は下記の通りである。

- (1) 挿入型中性子水子計 (Model SRM-1D) 1式
- (2) サーミスタ温度計; センサー10個, インジケータ-1個, 切替ボックス1個
- (3) 校正試験用具1式
- (4) 測定車1台

中性子水分計はソイルアンドロックエンジニアリング社製で, プロブの寸法は40φ×800Lで, 線源は<sup>252</sup>Cf (50μCi 密封) である。

2.2. ボーリングおよび測定孔の設置

含水量の測定孔は, 外径53mm, 肉厚3mmのケーシング削孔を行い, このケーシングパイプを埋殺して測定管としたものである。これは, 測定管周辺の地盤の乱れをできるだけ少なくすることを考えたためである。孔の底部は, ロッドを通してセメントミルクを注入し, 下端を盲封じにして, ブロー対策をした。また, 地表面から約1mの区間は, 削孔時に100mmのガイドケーシングを設置したため, これを取除いた部分にもセメントミルクを充填した。

一方, 温度の測定孔は, 86mmの素掘りボーリングを行って設置したが, その詳細については後述する。

削孔時に得られた土質柱状図は, 測定結果を理解する上で重要である。これらは, 測定結果と一しよに後掲するが, GL-10mを境にして上部シルト層と下部粘性土層に大別することができ, シールド中心線から東側にレンズ状の砂層が多くみられ, また西側にはレキ混りの層がある。シールドの通過断面は粘土あるいはシルト層であり, 時々うすい砂層をかんでいる。

2.3. RI水分計の校正試験

RI測定は間接測定法であり, あらかじめ, 含水量が既知である土質材料と実測計数率とを対照するための校正をしておかなければならない。

校正試験は, 円筒の鋼製容器 (φ700, 高さ1.0m) 内の中央に測定パイプをセットし, いくつかの既知の含水量に調整した土質材料を締め固めてつめ, 中央の測定パイプで計数比を測定して行う。供試体の含水量と水分計の応答 (計数率比) との相関データをもとに, 最小二乗法

を用いた分散分析を行って, 校正曲線を得ることができた。供試体の土質材料としては, 切羽で掘削された土砂を用いた。

図一に, 校正試験から得た校正曲線を示す。これを校正式にすると次のごとくなる。

$$R_w = 1.250 - 1.233 \exp(-2.268\omega_F) \dots\dots\dots(1)$$

ここに,  $R_w$  は計数率比,  $\omega_F$  は含水量を示す。

2.4. RI水分計による含水量の測定

含水量の測定は, 毎日午前9時に開始し, E2孔→E1孔→C2孔→C1孔→W2孔→W1孔の順序で行った。これらの測定に要する時間は6時間であり, 測定を終えるのは毎日午後3時頃であった。

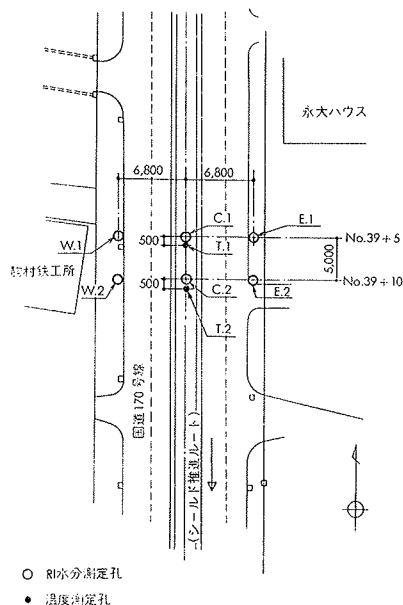
測定頻度は, 現場全休日を除いて, 切羽が約65mの位置に接近するまでは2日に1回の割合であり, その後は測定完了まで1日1回の割合であった。

2.5. 地中温度の測定

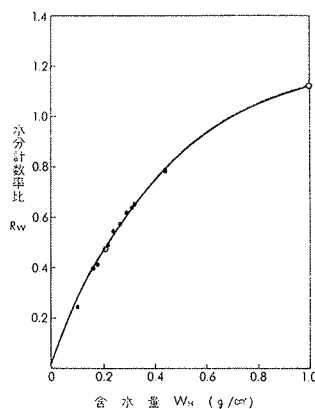
地中温度の測定は, サーミスタを使用した温度センサーを地中に埋設して行った。埋設場所は, T1孔とT2孔の2孔 (図一参照) で, 各孔とも深さ方向に, 4m間隔で5個のセンサーを埋設した。

埋設の順序は次の通りである。

- (1) φ86mmのボーリングをベントナイト泥水を用いて21mまで行なう。
- (2) 孔内の泥水をセメントミルクで置換える。
- (3) 4mピッチでサーミスタセンサーを取付けたケーブル束を孔内に下げる。
- (4)セメントミルクの



図一 測定孔の平面配置図



図二 水分計の校正曲線

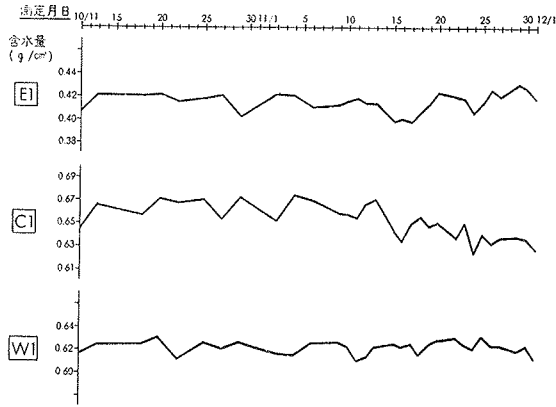


図-3 含水量の経時変化曲線 (GL-11.0 m)

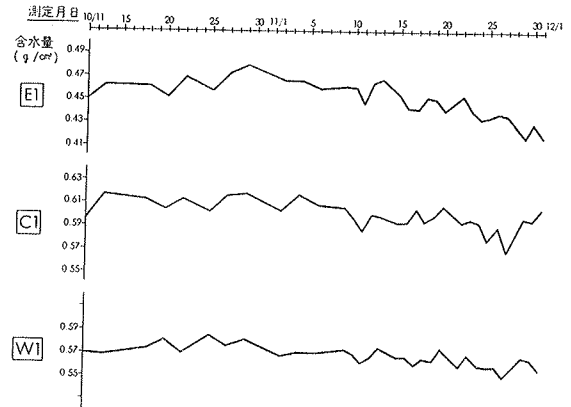


図-4 含水量の経時変化曲線 (GL-14.0 m)

硬化後、頭部の養生を行って、特製の鉄板蓋を設置する。

センサーの型式はサーミスタ WP 特型である。

測定時期と頻度は含水量の測定と合わせて実施し、測定時刻は正午～1時であった。

### 3. 測定結果および考察

#### 3.1. 含水量の経時変化

含水量等の測定期間中の坑内圧気圧は、多少の変動はあるものの  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  であった。これは当初予定していた理論圧気圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  に比べてかなり小さいが、メタンガス対策のためこの程度に抑えて施工したためである。

図-3、図-4 にそれぞれ GL-11 m と GL-14 m の第 I 断面の E1 孔、C1 孔、W1 孔の含水量の経時変化曲線を示す。切羽の第 I 断面への到達は11月22日である。圧気圧が  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  と低かったこともあって、シールドの接近に伴う含水量の変化は小さな値にとどまっている。しかし、注意深くみると、11月5日頃まではあまり変化がないが、それ以降、シールドが接近するにつれてその変化量が大きくなっている。

もちろん、各深度ごとに同じ経時変化曲線が得られているわけで、ここでは紙面の都合で示すことができないが、GL-7 m より上のは、シールドの接近によってほとんど影響をうけていない。

#### 3.2. 含水量の初期値

圧気の影響による含水量の変動を適確に評価するためには、地盤含水量の初期値を把握しておく必要がある。測定データの中には、含水量の自然変動をはじめ、不確定誤差等によるバラツキが伴うため、圧気の影響を受けていないと判断できる比較的初期の測定値から、その平均値および分散を求めることにする。初期測定区間として、切羽が 80 m に接近するまでの区間を考えることにする。

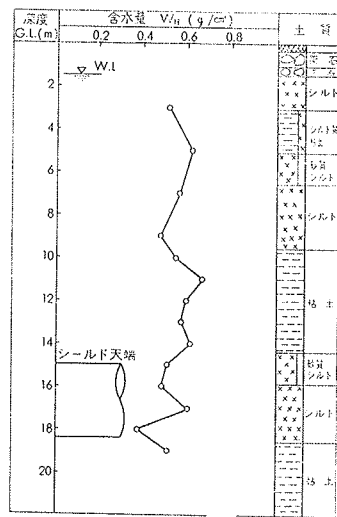


図-5 含水量の初期値 (C1孔)

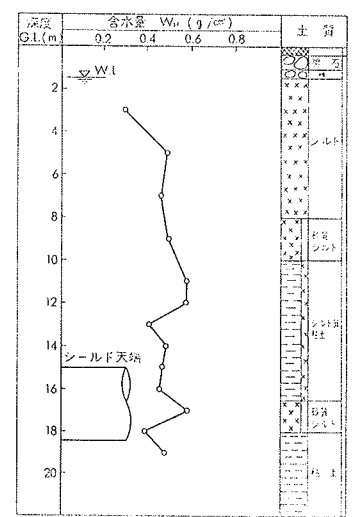


図-6 含水量の初期値 (C2孔)

図-5、図-6 は、それぞれ C1 孔と C2 孔の初期含水量（平均値）の分布図である。図中の右側には測定孔の削孔時に得たボーリング柱状図を示してある。

もちろん、他の測定孔についても初期値を得ているわけであるが、同時に計算した標準偏差の値は、比較的安定した  $\sigma_w^{\min}=0.0021 \text{ (g/cm}^3)$  から、 $\sigma_w^{\max}=0.0119 \text{ (g/cm}^3)$  とかなり大きな変動を示すものもあった。

#### 3.3. シールドの接近と含水量の変化

含水量の経時的測定値はいわゆる時系列とみることができる<sup>2)</sup>。

前節で述べたように、含水量の経時挙動の変動はかなり小さく、概略  $0.05 \text{ (g/cm}^3)$  以下である。そのため、この時系列の中から調査目的要因である圧気による変動をより明瞭に取り出すためには、種々のノイズ的な変動を取り除く必要がある。

このノイズを取る方法には、単純な算術平均を用いるか、各項に適当な重みをつける加重平均を用いるかして時系列を再構成する方法がある。

ここでは、後者の方法を用いることにし、3項移動平均で、各項に 1:2:1 の重みをつける方法によることに

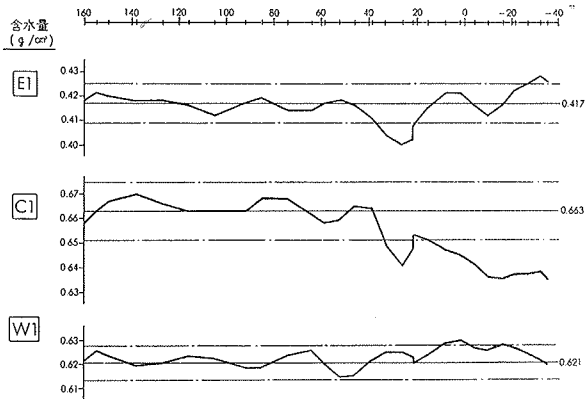


図-7 切羽の接近距離と含水量の推移 (GL-11 m)

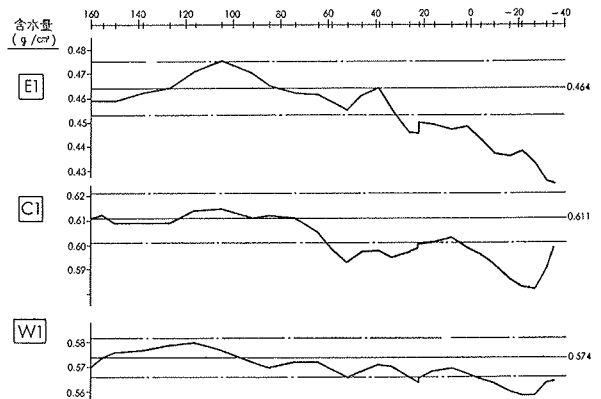


図-8 切羽の接近距離と含水量の推移 (GL-14 m)

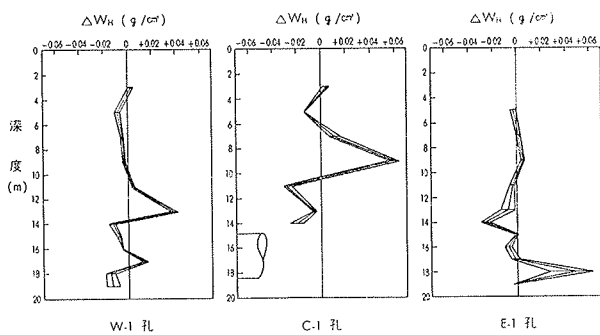


図-9 深さ方向の含水量の変動 (I断面, L=0~-20m)

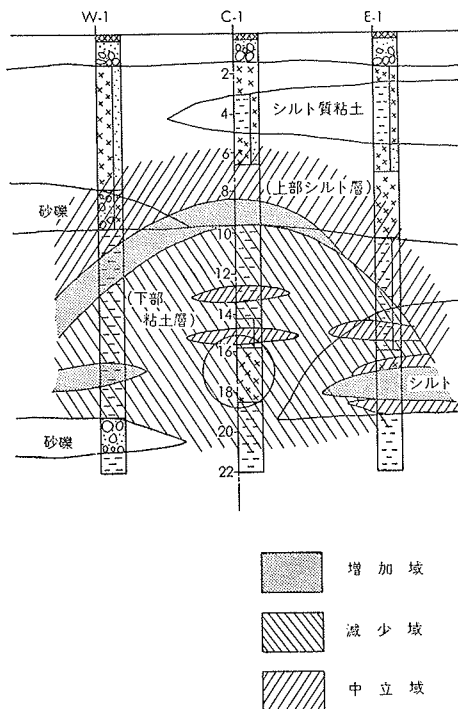


図-10 含水量の変動と漏気範囲(第I断面)

する。

$$\hat{x}_i = 1/4 \cdot (x_{i-1} + 2x_i + x_{i+1}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $i = 2 \sim 30$

このようにして求めた時系列の分散 ( $\hat{\sigma}_w^2$ ) は、 $X_1$  の分

散を  $\sigma_w^2$  とすれば、上式から次式で示される。

$$\hat{\sigma}_w^2 = 3/8 \cdot \sigma_w^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

再構成した時系列を、切羽の接近距離を新たに独立変数(横軸)にして示すことにする。

図-7、図-8は、それぞれ GL-11 m と GL-14 m の第 I 断面の E1, C1, W1 孔の再構成した時系列である。図中には、初期含水量の平均値  $\bar{W}_H$  とともに、 $\bar{W}_H \pm 1.96 \hat{\sigma}_w$  の幅 (95%信頼幅) を示している。95%の信頼幅をこえた変動が現われているのは、圧気の影響を受けたと考えることができよう。これらの図と、図-3、図-4とを比較すると圧気の影響が明瞭になっているのがよくわかる。

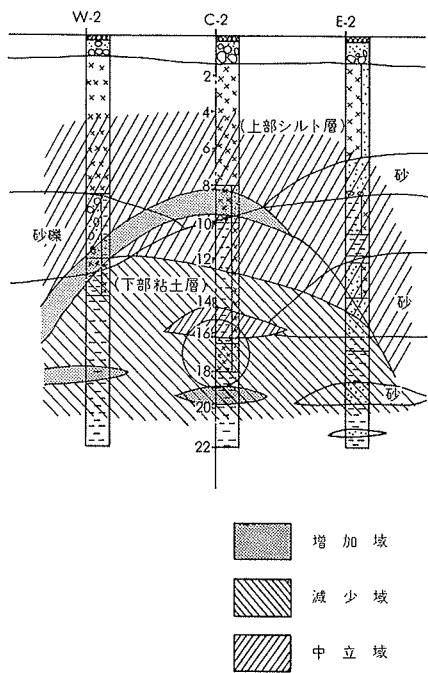
### 3.4. 漏気の領域

シールド掘進方向に垂直な断面における圧気の影響範囲を詳細にとらえるために、各測定孔における深さ方向の含水量の変動量をシールドの接近距離 20 m 区間ごとにみてることにする。

図-9は第 I 断面における切羽接近距離 0~-20 m の区間の W1, C1, E1 孔の含水量の変動量を示したものである。図中には各深度における  $\pm 1.96 \hat{\sigma}_w$  の幅も合せて示してある。図から見られるように、各測定孔でシールドの掘進に伴う含水量の増加域と減少域およびほとんど変化を示さない中立域に、明瞭に区分することができる。

図-10と図-11は上記の方法で求めた各測定孔の増加、減少、中立域をもとに、それぞれ、第 I 断面と第 II 断面について描いた漏気の領域図である。図中には合せてボーリング柱状図から推定した地層も示してある。増加領域の面積は、減少域のそれに比べてかなり小さい。最も顕著な増加域は、上部シルト層と下部粘土層の境界部分にみられ、その上ではほとんど含水量の変動は認められない。

全体的にみて、シールド通過断面の下端を中心にして扇形に漏気の流れが広がり、その影響半径は約 10 m である。



図一11 含水量の変動と漏気範囲(第II断面)

### 3.5. 地中温度の変化

図一12に T2 孔の地中温度の経時変化図を示す。切羽が通過したのは11月23日である。図にみられるように、圧気による温度の変化は少ない。これは圧気圧が 0.3 kg/cm<sup>3</sup> と小さかったためであろう。しかし、注意してみると、切羽到達の直前ではわずかであるが、圧気の影響と思われる温度の上昇がみられる。いずれにしても、変動が非常に小さいことから、地中温度に変化を生ずる程の空気の動きは認められない。

T1 孔の測定値はまったく T2 孔と同じであり、地表面に近い GL-3 m 地点では 22℃ とかなり高いが GL-5 m 以深では 17~18℃ と安定した温度である。

参考のために、図一13に気温と GL-3 m の地中温度との相関図を示す。かなりの相関性が認められる。

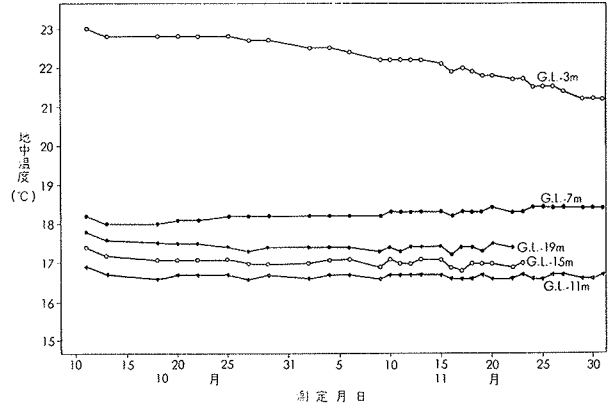
### 4. むすび

以上に示してきた測定データおよびその解析データはほんの一部であり、紙面の都合で紹介できないのが残念である。示すことのできなかつたものも含めて、今回の調査結果をまとめると次のごとくである。

(1)シールドの接近に伴う圧気の影響は、切羽が 80m 接近した時点から始まり、50 m に接近するとその影響はかなり明瞭になる。

(2)シールド横断面内における圧気の影響範囲は、シールドの下端を中心とした半径約 10 m の半円状の領域内で顕著である。

(3)シールドの接近につれて、含水量が減少する所と逆



図一12 地中温度の経時変化(T-1孔)

に増加する所があり、増加域は不飽和と思われるレキ、砂などの地層で顕著である。

(4)地盤内の含水量の変動はまた局所的な偏りがみられ、これは地盤の地層構成に関係している。

(5)温度の測定結果からは、地中温度に影響が現われる程の漏気の流れは生じていないと推定される。

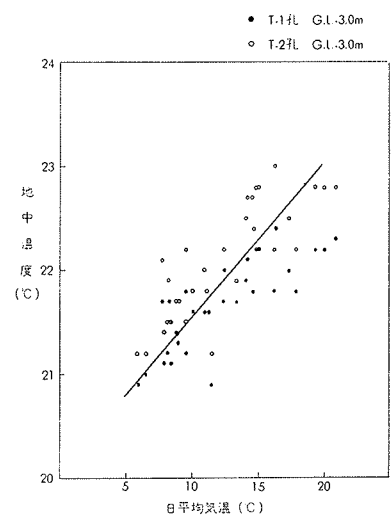
当初心配したメタンガスによる第三者施設への圧気による悪影響もなく、無事、測定を終えることができたのは幸いであった。

しかし、メタンガスによる抗内作業への影響は大きく、種々のメタンガス対策を実施したにもかかわらず、半月間にわたり作業をストップしたこともあるし、一時的に作業員が退避したケースは幾度もあった。

最後に、この調査工事は、大阪府水道部の御指導のもとに実施したものである。また、測定にあたってはソイルアンドロックエンジニアリング社の援助を得た。ここに記して深く感謝致します。

### 参考文献

- 1) 斎藤, 内藤, 芳賀: 圧気シールド工事における地盤内の空気の流れについて, 大林組技術研究所報, No. 5, (1971)
- 2) 都 淳一: 土木計測, 鹿島出版会



図一13 気温と地中温度の相関 (GL-3.0m)