

泥水シールドにおけるメタンガス対策

野 本 寿* 安 田 竹 次**

要 約

シールド掘進と併せて軟弱腐植土層の地質調査を行ったところメタンガスを検知した。このため付近一帯の調査を詳細に行った結果シールドルート上約 300m 区間でメタンガスが発生していることが確認された。このため掘進時メタンガスが坑内に流入し爆発事故が予想されることから危険雰囲気防止、点火源の根絶、管理体制の確立を中心としたメタンガス対策を行うことになった。

本稿は泥水加圧式シールド工事におけるメタンガス対策を中心に述べる。

目 次

- § 1. 工事概要
- § 2. 地質概要
- § 3. 調査工事
- § 4. メタンガスの性質
- § 5. メタンガス対策
- § 6. 考 察
- § 7. あとがき

薬液注入 イ) 瞬結性二重管方式注入 (LAG 工法)

2,090m³

ロ) 1.5ショットロッド注入, 溶液型水ガラス注入

ハ) 1.5ショットロッド注入, LW-1

1,110m³

ニ) 高圧ジェット混合攪拌方式 (ミニマックス工法)

$l = 4.6\text{m}$, $\phi 700\text{mm}$, 63本

§ 1. 工事概要

本工事は神戸市西神地区環境整備事業の一環として計画されたもので泥水加圧式シールド工法で $\phi 2000\text{mm}$ の汚水幹線を築造するものである。

工事名称：玉津汚水幹線布設工事（その2）

発注者：神戸市下水道局

工 期：S52. 8. 27～S54. 11. 5

施工場所：神戸市垂水区玉津町新方～高津橋

施工数量：シールド延長 1,172m

シールド機 外径 2,880mm

長さ 4,500mm

スチールセグメント 外径 2,750mm

長さ 750mm

最小半径 $R = 100\text{m}$

発進立坑 1 基 $10.4 \times 10.4 \times 10.65\text{m}$

土留壁：鋼矢板 VL 型 $l = 19\text{m}$

打設方法：オーガ削孔圧入方法 (HAS工法)

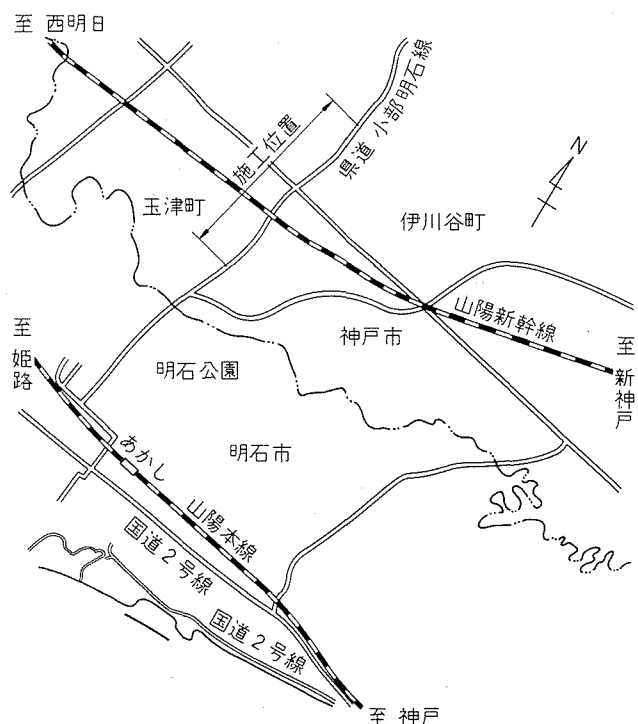


図-1 位置図

* 関西(支)玉津(出)

** 関西(支)玉津(出)主任

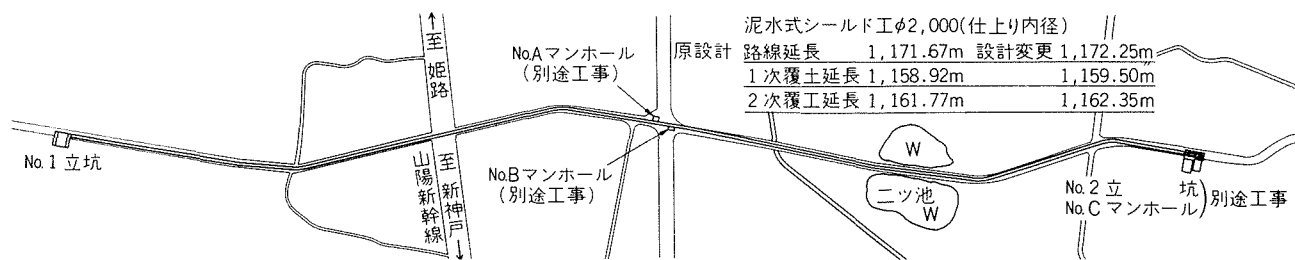


図-2 一般平面図

§2. 地質概要

現地は国鉄明石駅の北方約2.5kmのところで東播丘陵の東南部に位置し、明石川に伊川が流入する三角地帯にあり両河川の堆積により形成された沖積平地である。

メタン発生源の腐植土層は両河川の後背湿地に育成されたもので付近一帯に点在すると考えられる。

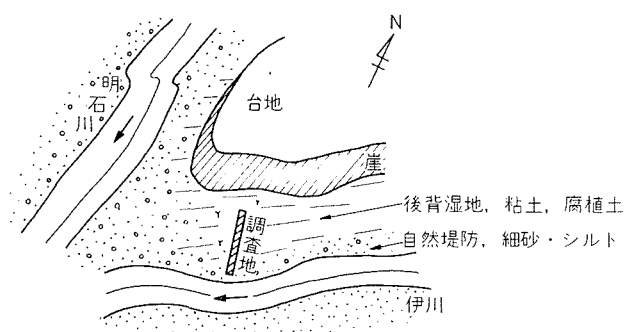


図-3 腐植土堆積模式図

シールドはかんがい池（ニツ池）下部を通過するが、この付近は特に腐植土堆積層の厚い場所であり、従ってメタンガス発生を中心部と考えられる。

シールド通過部は沖積層で腐植土と砂質土が互層を形成し腐植土層でN値0～1、砂質土でN値5～10で各層は連続性に乏しい。

また、シールド下部は大阪層群（N値30～50）が分布し表面を段丘堆積層が被っている。

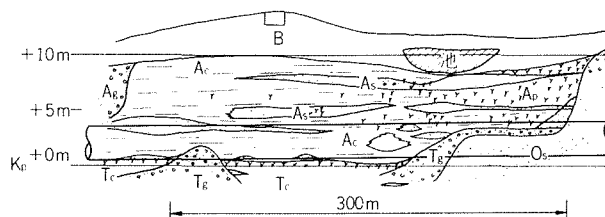


図-4 メタン発生部地質構成模式図

§3. 調査工事

調査は当初軟弱層の把握を目的として行ったが調査孔から高濃度メタンガスが検出されたため地質調査と併せて発生区間、濃度測定の確認を行った。その結果次のことが判明した。

- i) 発生区間はシールドルートに沿って約300mと推定される。
- ii) メタンガスの検出状況はかんけつ的であって回数、濃度とも腐植土層の厚さにほぼ比例している。
- iii) 腐植土層より発生したメタンガスは地下水に溶存し沖積砂層、段丘砂礫層、洪積砂礫層に分布している。

以上の結果からシールド掘進深度に腐植土層がないとしても地下水に溶存しているメタンガスが坑内に流入してガス化する可能性があるものとして対策を立てることにした。

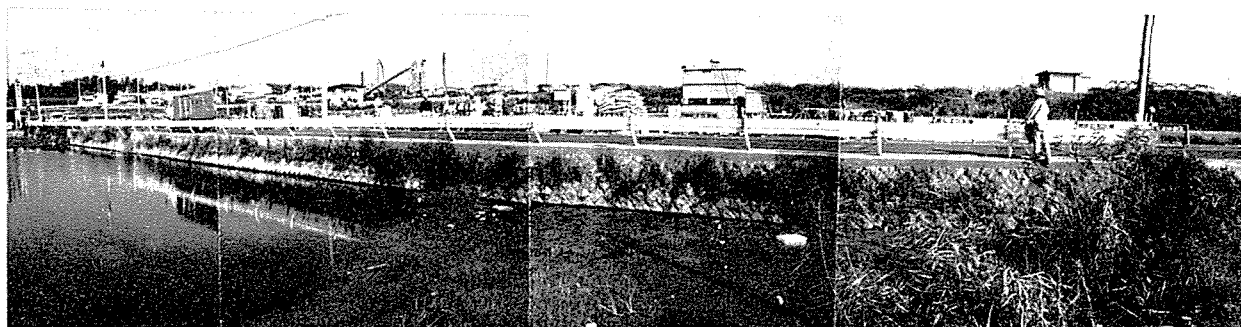


写真-1 メタン発生源ニツ池全景

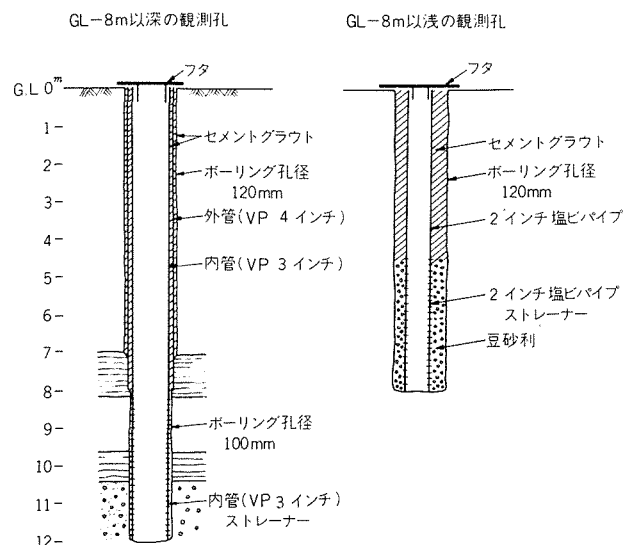


図-5 メタンガス観測孔

表-1 メタンガス測定結果

観測孔 No.	孔 種	ストレーナ区間 Kp + m ~ m	メタン濃度 %	
			最 高	最 低
G-1		9.2~4.2	0.4	0.03
G-2		9.2~4.2	13.0	0.01
G-3	揚 水	3.0~-3.0	5.0以上	0.2
G-4	揚 水	3.7~-2.3	0.65	0.0
G-5		9.4~5.4	0.05	0.0
G-6	地 質	5.3~0.3	5.0以上	1.20
G-7		8.5~4.5	0.1	0.0
G-8		4.5~0.5	0.8	0.0
G-9		8.1~4.1	0.95	0.0
G-10	地 質	4.0~0.0	0.62	0.0
G-11	地 質	4.3~0.3	0.0	0.0
G-12	地 質	6.0~-1.6	0.2	0.0
G-13	地 質	4.6~0.6	0.5	0.0
G-14	地 質	4.0~0.0	0.2	0.0

●孔種〈揚水〉メタンガス調査用揚水井

〈地質〉標準貫入試験を実施。他は素掘りによる観測孔

●メタン濃度%は混合ガスに対する容積比である。

§4. メタンガスの性質

4-1 生成場所

天然ガス中に含まれるメタンガスは次のように分類さ

表-2 孔内ガスガスクロマトグラフィー分析結果

ガス 試料No.	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂
G-3	17.5 %	72.8 %	5.3 %	4.5 %
G-4	10.8	87.5	0.12	1.6
G-5	22.1	77.9	<0.05	0.06
G-6	18.8	75.5	3.3	2.4

れる。

- (1) 油田ガス
- (2) 炭田ガス
- (3) 水溶性ガス
- (4) 古期岩層及び現世層中のガス

現在の海底、湖底、泥炭地その他地表近くで発生している可燃性ガスで当現場の場合これに当る。

- (5) 火山、温泉ガスの一部

4-2 化学的性質

化学式 CH₄ で表わし炭化水素ガス中で最も軽く、空気に対する比重は0.555で純粋なものは無色、無味、無臭である。CH₄ はそれ自体は無毒であるが、濃厚になれば酸素欠乏の危険がある。

- (1) 爆発性

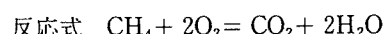
CH₄ と空気が混合し、この混合気体が点火源にふれたとき、その混合割合によって次の現象が生じる。

- イ) 0~4.8%

点火源の周囲で青炎を放って燃焼するが他の部分へ燃焼は伝ばしない。

- ロ) 4.8~14.5%

点火すると他の部分へ燃焼が伝ばし爆発性を有する。この範囲を爆発限界と称している。



発熱反応で実験上の温度上昇は最大1,800℃、圧力上昇は最大7kgf/cm² (0.686MPa) となり爆風となって現われる。

- ハ) 14.5%以上

点火源の表面では青炎を放って燃焼するが濃度が増すに従って酸素が少なくなるためついには燃えなくなる。

- (2) 着火温度

CH₄ と空気の混合気体が常温において引火する温度はCH₄ の混合割合によって異なる。

他のガス、例えばC₂H₆ のようなものと混合すると引火温度は下り極めて危険となる。

また、電気的火花は着火し易く眼に見えないような火花でも着火する。金属と金属、金属と岩石等の衝撃による火花でも比較的容易に着火する。

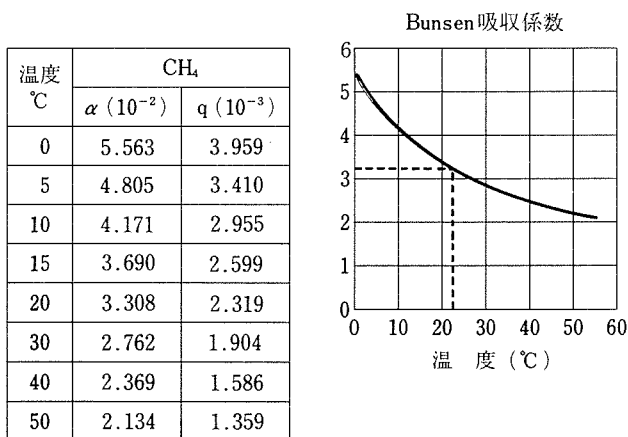
(3) 水に対する溶解性

CH₄は水溶性であり、溶解度は絶対圧力に比例し、温度、塩分に反比例する。

表-3 メタンガス引火点

CH ₄ %	2.0	3.4	6.5	7.6	8.1	9.5	11.1	14.7
引火点℃	810	665	512	510	514	525	539	565

表-4 メタンガスの溶解性



α : Bunsen 吸収係数、分圧760mmHgのとき溶媒1に溶解する気体の体積。

q : 全圧760mmHgのとき溶剤 100gramによるガスの吸収量 (gram)

§ 5. メタンガス対策

5-1 基本方針

メタンガスによる爆発災害は爆発限界濃度のガスが存在すること、着火するのに十分な点火源があること、この両者が同時に満足されるときに発生する。従って爆発災害を防止するにはこの両面から対策をたてる必要がある。以上の観点に立ち表-5のと通りの対策を実施した。

また、産業安全研究所技術指針による危険場所の分類

は2種場所*に属する。

退避限界の濃度設定はメタンガス濃度1.0%以上、酸素濃度18%以下として、以下の対策工を計画した。



写真-2 坑口全景

表-5 泥水式シールドメタンガス対策

危険雰囲気防止	1. 換気設備の採用
	2. 薬液注入工法
	3. セグメントシールド2重施工
点火源の根絶	4. 防爆型電気器具の採用
	5. 坑内での火気使用禁止
管理体制の確立	6. 専属ガス検定員
	7. ガス自動検知器の設置
	8. 停電対策
	9. 酸欠対策
	10. 安全教育
	11. 保安設備
	12. 第三者に対する対策

5-2 換気設備

メタンガス発生層の掘進にともなうガス発生量の前測は、過去のデータも少なく非常にむづかしいものであるが、ここでは

※ (工場電気設備防爆指針)

1315 2 種 場 所

2種場所とは、異常な状態において危険ふん囲気を生成するおそれがある場所で、次のような場所をいう。

- (1) 危険性料品を常時取り扱っているが、それらは密閉した容器又は設備内に封じられており、その容器又は設備が事故のため破損した場合又は操作を誤った場合にのみそれらが漏出して危険な濃度となるおそれがある場所。
- (2) 確実な機械的換気装置により、爆発性ガスが集積しないようにしてあるが、換気装置に故障を生じた場合には、爆発性ガスが集積して危険な濃度となるおそれがある場所。
- (3) 1種場所の周辺又は隣接する室内で、爆発性ガスが危険な濃度でまれに侵入するおそれがある場所。

解 説

本条で異常な状態とは、前条の通常の状態と対比してひん度を概念的に示したもので、容器又は配管などの装置の破損、故障、又は誤操作により可燃性ガス又は液体が漏出したり、停帯して危険ふん囲気を生成する場所をいう。

(イ) 坑内の漏水量から予測する方法

(ロ) 掘削部およびその周辺のメタンガス発生層の土量から予測する方法（京都大学平松教授の式による換気量推定）

の2つの方法により推測して、その大きい方をとった。

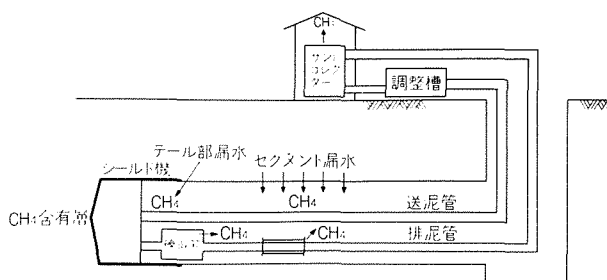


図-6 泥水式シールドにおけるメタン発生機構

(イ) 坑内漏水による換気量推定

泥水シールド坑内でのメタンガス発生はメタンガスを溶存している地下水が流入し圧力の開放と共に坑内に発生するものと考えられる。従って地下水の流入量を求めることによってメタンガスの発生量を予測し、これから必要な換気量が得られると考えた。

シールド機テール部、セグメント継手部よりの漏水量は坑口部で実測した。礫取箱開扉時、伸縮管段取替時における泥水の溢水量は計算により求めることにした。

実測の結果、漏水量は1日15m³程度であり今後距離が増えても毎時1m³(0.017m³/min)を見込めば十分と考えた。

礫取箱開扉時および伸縮管段取替時の泥水溢水量は、それぞれ、礫取箱容量0.8m³、排泥管容量2.356m³(φ100mm, l=300m)が同時に1分間で坑内に溢れるものとした。

一方、メタンガスの溶存量はシールド通過位置での地下水圧（絶対圧で1.83気圧）と水温（22℃より表-4を用いて

$$V=0.032 \times 1.83=59\text{l/m}^3 \text{ となる。}$$

以上の結果よりメタンガス発生量qは

$$q=59\text{l/m}^3 \times (0.017+0.8+2.356) \text{ m}^3/\text{min} \\ = 187.2\text{l/min}$$

となる。このメタンガスを濃度1.0%以下にするために必要な換気量Qは

$$Q=(1+\alpha) \times \frac{q}{\frac{1}{100}}=(1+0.2) \times \frac{0.187}{\frac{1}{100}}=22.5\text{m}^3/\text{min}$$

α：漏風率で0.2と仮定した。

(ロ) 京都大学平松教授の式による換気量推定*

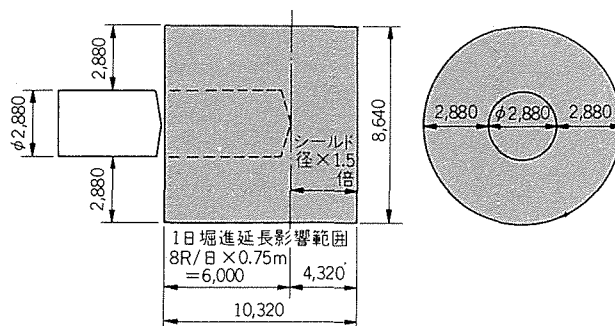


図-7 メタンガス湧出量の推定

開放型シールドにおける推定式で1日のシールド掘削土量とその影響範囲を図-7のとおり想定してその部分の土量1m³からメタンガス1m³が坑内へ湧出するものと考えたものである。

$$q'=\frac{\pi \cdot D^2}{4} \times l=\frac{\pi \times 8.64^2}{4} \times 10.32=605\text{m}^3/\text{d}$$

これを1分間当り湧出量qに換算すると、

$$q=\frac{605}{24 \times 60}=0.42\text{m}^3/\text{min}$$

となる。坑内メタンガス濃度を1%以下にするための必要換気量は

$$Q=(1+\alpha) \times \frac{q}{\frac{1}{100}}=(1+0.2) \times \frac{0.42}{\frac{1}{100}}=50.4\text{m}^3/\text{min}$$

(イ)、(ロ)の検討より換気量は安全側を考えQ=50.4m³/minを基準として換気設備を計画した。

(1) 換気方法

換気方法は排気式とし、機械は坑外に設置するものとし、設備能力から2段階の換気方法を採用した。
〔利点〕

1. 切羽付近で発生したメタンガスが坑道に拡がる前に排出される。従って坑道内の空気は清浄に保たれる。
2. 機械は坑外に定置されているから風管の延長作業が簡単である。
3. 坑内での機械移動がないため電気事故等に対する安全性が高い。

〔欠点〕

1. シールド機や後方台車の関係で吸込口を切羽迄近づけられないため切羽付近での換気が充分行なわれない恐れがある。従って局部換気を併用する必要がある。

* メタンガス湧出地層におけるシールド施工「土木施工」13巻13号（1977,10）山海堂

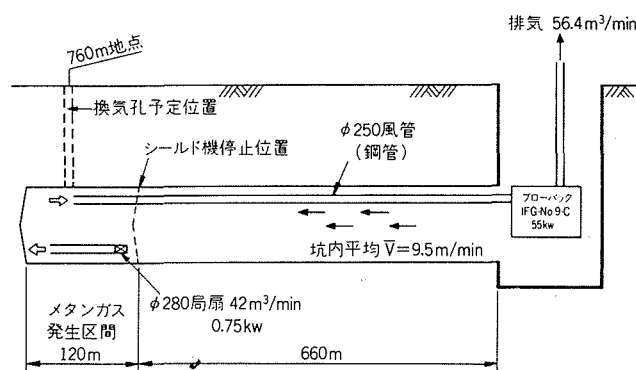


図-8 第1段階換気計画概要図

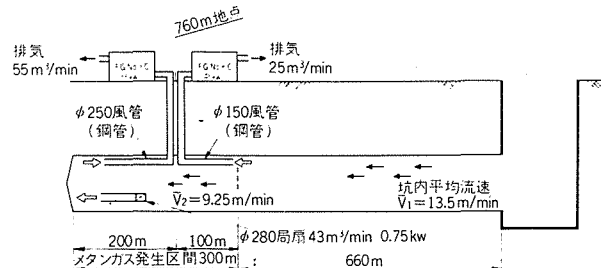


図-9 第2段階換気計画概要図

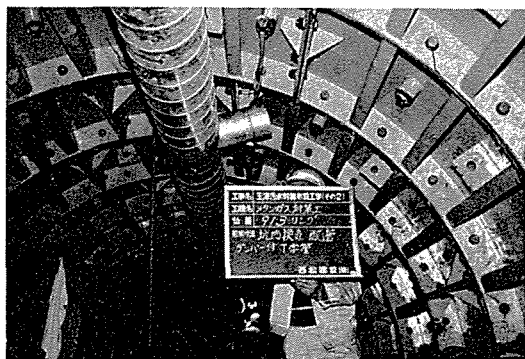


写真-3 排気用風管 φ250mm

(2) 振動篩室内換気

掘削土を泥水から分離するための振動篩（サンドコレクター）は騒音防止の関係から防音室に設置されているため掘削土中に含まれるメタンガスが流体輸送されて、室内に充満し爆発の危険性がある。換気量の推定は(1)～(ロ)を基に考え換気方法は換気扇による排気式とした。

5-3 薬液注入

1. 地盤中のメタンガス溶存地下水の排除及び間隙充填によるガスの流入防止
2. 腐植土層を含む軟弱層の地盤強化とシールド通過後地盤沈下の防止

を目的とし図-10のとおり地盤改良を行った。施工方法は瞬結型二重管注入工法（LAG工法）にて両側に壁を作り、内側には一般注入の「LW-1」及び「水ガラス系溶液型」を注入した。断面は全断面とし腐植土層厚、調査

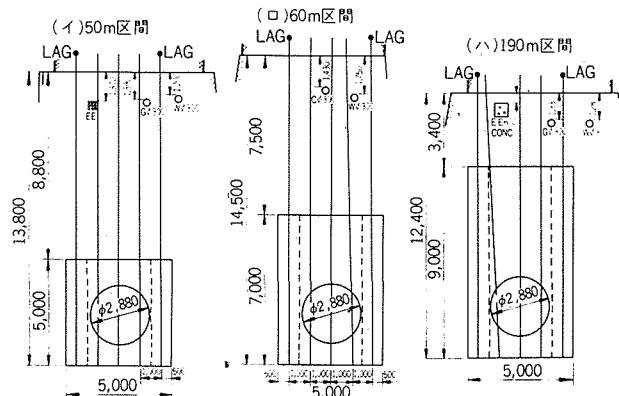


図-10 薬液注入断面図

孔のメタンガス濃度から3種類の改良断面を採用した（図-10参照）。

5-4 セグメントシール

メタンガス発生区間のセグメントはメタンガスの坑内湧出を抑止することを目的としてシールを2重施工することによりジョイント部の止水性の向上を図った。

5-5 防爆型電気器具の採用

法令、規則に基づいて防爆型電気器具を採用する必要があるが全ての電気機械器具を防爆型にすることは不経済である。当現場ではメタンガス濃度が1.0%を越えた場合は送電停止、作業中止の措置を取り危険の回避をすることを大前提としメタンガス濃度が1.0%以上となった場合でも使用しなければならない電気器具のみは防爆構造を採用した。

表-6 防爆型電気器具一覧表

品名	型式	防爆構造記号	検定合格証番号	数量	メーカー
可燃性ガス検知器	GD-A30	d ₂ G ₄	2564	17	理研計器
耐圧防爆型警報電鈴	TAB-6-BMG	D ₂ G ₄	22157	2	森電機
耐圧防爆型分岐Box	STH-8 STH-7	"	19	4	"
耐圧防爆型非常用蛍光灯	JF 21753 (灯具) JK 3258 (吊具)	"	19165	11	松下電工
耐圧防爆型懐中電灯	JL05104	"	18386	5	"

5-6 坑内での火気使用禁止

坑内では原則として火気使用禁止としマッチ、ライター類は入坑時ポデーチェックを行い保管場所に収納した。また、緊急時等にガス溶断、溶接作業を行う場合には専

属ガス検定員立会いのもと十分安全を確認したうえ許可を与えた。

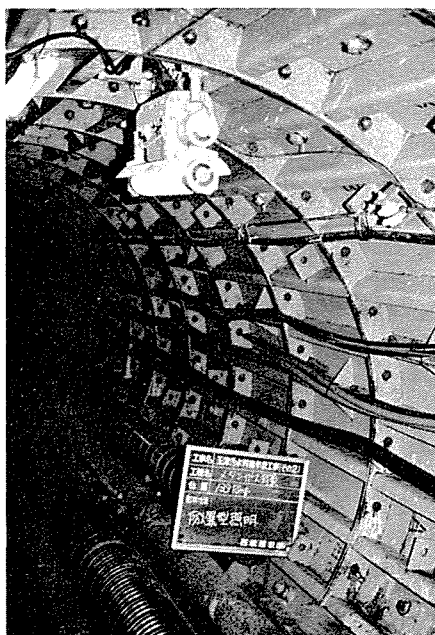


写真-4 耐圧防爆用非常用蛍光灯

常時1台設置した。設置箇所数は全部で17点となった。

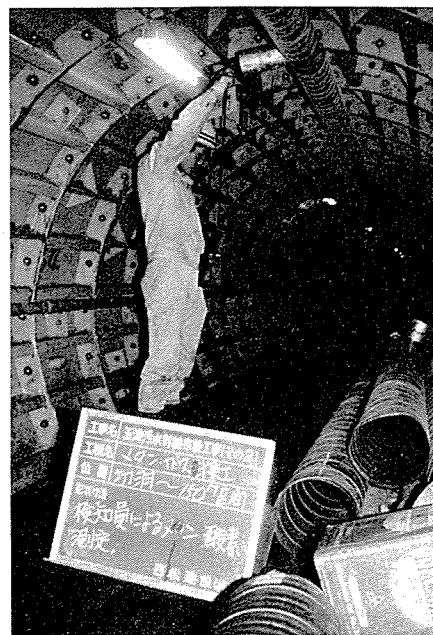


写真-5 専属ガス検定員による坑内パトロール

5-7 専属ガス検定員

昼夜各1名の専属ガス検定員を配置し管理した。仕事の内容は下記のとおりである。

- メタンガス、酸素濃度の測定（2時間毎の坑内パトロール）
- 入坑者のボデーチェック（マッチ、ライター類）
- 坑内でやむなく火気を使用する場合の許可
- 坑内作業についての就業許可
- 換気設備、ガス自動検知器の点検

5-8 ガス自動検知器の設置

(1) メタンガス濃度自動測定装置

坑内におけるメタンガス濃度を常時監視するために自動検知装置を設けた。設置方法はメタン発生区間が全長の一部分であるため設置間隔を3種類に区別した(図-11参照)。また、振動篩室、切羽部には

(2) 酸素濃度自動測定装置

メタンガス濃度の上昇と共に酸素濃度が低下するため切羽部、メタン発生区間に自動検知装置を設けた。但し、酸素濃度自動測定装置については耐圧防

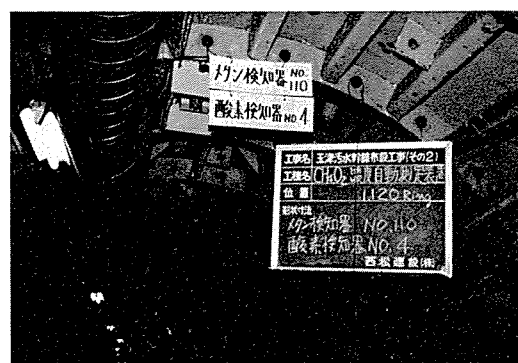


写真-6 CH₄、O₂濃度探知器

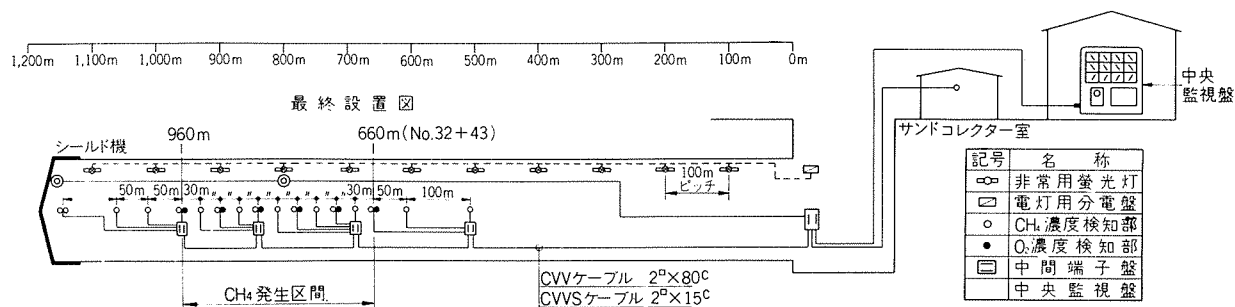


図-11 CH₄、O₂濃度測定装置及び非常用蛍光灯設置図



写真-7 ガス自動検知器中央監視盤

爆型の機器が現状ではないのでメタンガス濃度が1.0%以上になった場合は測定器電源を自動的にしゃ断した。

(3) 電気自動しゃ断装置及び警報装置

ガス自動検知器の測定により測定値が管理限界を越えた場合は測定装置中央監視盤からしゃ断装置へ記号を送り自動的に送電がしゃ断できる装置を設けた。また、同時に坑内及び事務所に設置したブザーが警報を発する様にした。

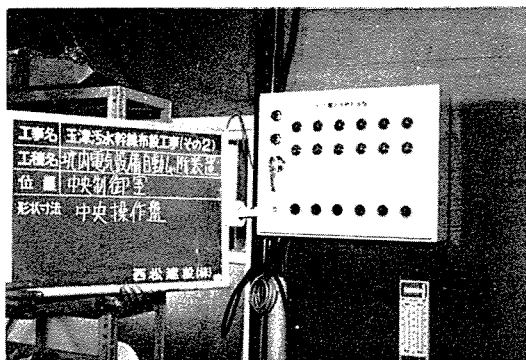


写真-8 電気自動しゃ断装置

5-9 停電対策

停電した場合は坑内作業を中止し退避することとしたが換気設備及びガス自動検知器の使用が不可能となるため発電機を常設した。

5-10 その他の管理体制

以上設備については十分と思える機器類を備えたが使用する側の問題として職員、作業員全員の安全教育を次のとおり行った。

- ① 労働基準監督署講師による保安教育
- ② メタンガスについての一般知識

- ③ 保安設備の取扱い及び位置の確認
- ④ 緊急事態発生時の処置及び退避訓練（特に重要なので毎月2回行った。）
 - 停電時想定退避訓練
 - メタン発生時想定退避訓練
 - 空気呼吸器取扱い訓練
 - 坑内ひ災者救助訓練
 - 通報連絡訓練

§6. 考 察

以上述べた対策で無事貫通をすることができたが、3の反省をまじえ考察する。

6-1 開放型と泥水式シールド

従来、泥水シールドの特色として地山と坑内が隔壁にて遮断されているため酸欠、有害ガスに対して有利とされていたが当現場に於てもメタンガスをほとんど検知することなく掘進できた。このことは開放型に比べ泥水式のガスに対する有利さを証明するものと考えられる。しかしながら前述のとおり各対策を講じて初めて可能となったことは言うまでもない。

従って今後有害ガス対策に於いては開放型と泥水式の設備に規模の違いが生じることは妥当と考える。

6-2 メタンガス湧出量算定と換気量の設定

メタンガスの坑内湧出量を算定することは非常に困難で仮定を設けて想定しているのが現状である。当現場においても坑内漏水による推定及び京都大学平松教授の式を借用し推定したが確たる自信はなかった。しかし換気設備に不足が生じた場合は直に増設する計画は立てていた。

今後このような問題が生じた場合各現場で苦慮することと思うが換気設備がメタンガス対策では最も重要な一つであり設備にはあらかじめ余裕をもち、かつ不足の場合には直ちに増設可能な計画を立てておくことが肝要と考える。

6-3 防爆型電気器具の採用

開放型シールドではメタンガス対策で坑内の電気機械器具を全て防爆型にして施工しているのが通常であるが泥水式シールドの場合工法自体が危険ふん囲気の防止に役立っていることから防爆型電気器具の採用を最小限にすることができた。一般的に防爆型電気器具の費用は数倍から10倍程度を要しかつ製作に長期間かかることを考えるとシールド工法の経済性及びメタン対策の経済性を併せた場合泥水式シールドの方が有利と考える。

6-4 今後の対策

今後可燃性ガスを含めた有害ガス対策での注意点を述べる。

- (1) ボーリング調査等で有害ガスの規模、範囲、噴出圧等を詳細に把握する。
- (2) 換気設備には十分余裕を考慮し、併せて薬液注入、シール材、ガス抜き孔等危険ふん囲気の防止に努める。
- (3) ガス自動検知器は間隔を密に設け、自動しゃ断装置を併せ2重3重の安全対策をする。
- (4) 専属ガス検定員の任務は坑内作業の可否の判断を含め重要な仕事なので責任感のある人物を選出する。
- (5) ずい道、シールド工事では工期が長いので安全教育は繰り返し行う。

§ 7, あとがき

以上、泥水シールド工事に於けるメタンガス対策について述べたが、施工にあたっては発注者である神戸市下水道局の深い御理解のもとメタンガス対策検討会を発足し、計画から実施に至るまで御指導、御援助を戴き無事貫通することができた。

最後にこの工事にあたって御指導、御助言をいただいた神戸大学谷本教授をはじめ多くの方々に本稿をお借りして心から謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 土木施工18巻13号(1977, 10)
- 2) 土木工学ハンドブック 土木学会編
- 3) 土質工学ハンドブック 土質工学会編
- 4) 日本の特殊土 土質基礎工学ライブラリー10 土質工学会編
- 5) ニツ池メタンガス対策工法調査報告書
財団法人 建設工学研究所 谷本 喜一
- 6) 労働安全衛生法
- 7) 電気事業法
- 8) 電気設備技術基準
- 9) 電気設備に関する技術基準の細目を定める告示
- 10) 石炭鉱山保安規則
- 11) 電気技術規程「内線規程」
- 12) 工場電気設備防爆指針(ガス蒸気防爆1974)

止水性柱列杭工法の紹介

〈PIP-S工法〉……無振動・無騒音のPIP工法に新たに止水性能を加えました。

杭径を地中で拡大し、隣接杭と確実にラップした杭を作ります。

方法はオーガーの先端近くに開閉自在な拡大刃を設け、削孔後地中でこれを拡大し、セメントペースト吐出、回転、引上げを同時に行うことによって、隣接杭を削りとりながら完全にラップした柱列杭を作ります。

PIP-S杭は、断面でわかるように従来のPIP杭(モルタル)の外周をMIP(ペーストと地山のソイルコンクリート)で包んだもので、いわばPIP工法とMIP工法のハイブリッドです。

【問い合わせ先】技術研究部土木技術課

