

# 可燃性ガス噴出の可能性のある地盤でのシールドトンネルの安全対策

脇山 一郎

シールド工事開始前の地質調査・可燃性ガス調査により、可燃性ガス（メタンガス）が、対象深度の地層の間隙や地下水に含まれていると判定をされたため、当シールド工事の施工に際し、可燃性ガスがシールドトンネル坑内へ流入するとともに、坑内での可燃性ガス滞留による爆発災害の起こる可能性の高いことが懸念された。

今回実施した可燃性ガス対策は、「レベル2：シールド機本体および切羽部に限定した防爆化」で、①シールド切羽部の防爆化、②エアカーテン+強制排気+局所送気の換気設備、③自動ガス検知警報装置、④避難救護設備等の設備と可燃性ガス対策安全管理体制を組織し、⑤掘削土砂搬出をずり鋼車方式で一次覆工を施工した。

本報文では、シールド一次覆工で採用した可燃性ガス対策の機械電気設備の例を紹介する。

キーワード：可燃性ガス、メタンガス、防爆、エアカーテン、泥土圧式シールド

## 1. はじめに

本シールド工事は、大阪府東部にある生駒山地から大阪湾に流れる寝屋川の流域下水道事業の一環である。

工事箇所が位置する周辺は、寝屋川によって形成された東大阪平野に属し、メタンガスの噴出や湧出が、

工事以外においても報告されている場所がある地帯である。寝屋川流域下水道事業の他工区の工事においても、メタンガスの量の差はあるが、メタンガスが湧出または噴出したという地質調査結果の報告がなされている。

本工事においても、例外ではなく、地質調査・ガス調査でメタンガスが検出され（図-1）、可燃性ガス対策を施すことが施工管理での責務となり、可燃性ガスへの安全対策の法規則および技術指針を基に、社内・社外および発注者・関係諸官庁と協議を重ねて、防爆対策を実施しつつ、シールド掘進管理を遂行した。

## 2. 工事概要

### (1) 工事概要（表-1）

本工事（写真-1、表-2）は、既設大東幹線（一）の雨水レベルアップ計画による能力不足の補充と、新設される「なわて水環境保全センター」からの送泥管

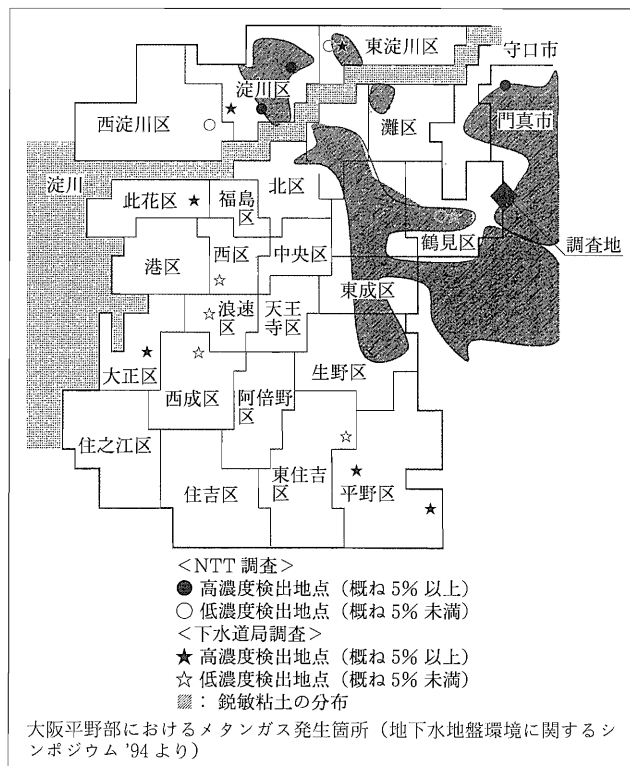


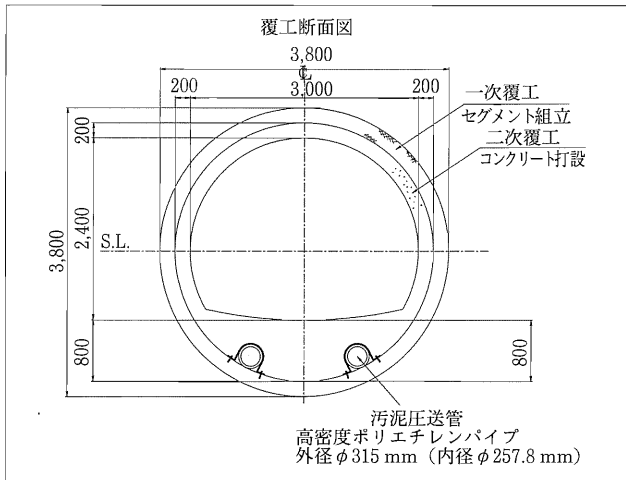
図-1 大阪平野のメタンガス発生箇所と工事位置（調査地）

表-1

|      |  |
|------|--|
| 工事名  | 寝屋川流域下水道 大東（一）増補幹線（第2工区）<br>下水管渠築造工事             |
| 場所   | 大阪市鶴見区安田2丁目～大東市新田本町                              |
| 発注者  | 大阪府東部流域下水道事務所                                    |
| 施工者  | 間組・東急建設・みらい建設工業共同企業体                             |
| 工期   | 平成14年12月18日～平成18年2月28日                           |
| 土質   | 粘土シルト層、洪積砂層                                      |
| 土被り  | 11.0～14.0m                                       |
| 線形   | 縦断線形1.0パーミリ。平面線形40mR×2箇所、<br>200mR×2箇所、480mR×1箇所 |
| 請負金額 | 2,483,346,600円（消費税含）                             |



を布設するため、大阪市鶴見区安田2丁目地先の発進立坑から府道大阪生駒線の道路下約11mの深さで縦走し、大東市新田本町地内までの区間約1.4kmを、泥土圧式シールド工法（写真—2にシールド掘進機、写真—3及び図—2に発進基地を示す）によって、仕上がり内径 $\phi 3,000$ mmの下水管渠を築造するものである（図—3に覆工断面図を示す）。



図—3 覆工標準断面図

間組・東急建設・みらい建設工業共同企業体（以下、当JV）は、別途工事で施工した発進立坑を利用して、シールド一次覆工、二次覆工、中間立坑と人孔築造、および地盤改良工を約37ヵ月の工期で実施する。

### 3. 可燃性ガスの調査

#### （1）調査概要

地質調査と共に、発注者である大阪府東部流域下水道事務所より可燃性ガス調査が12箇所実施された（平成13年8月）。

予備調査（現位置の簡易ガス測定）において、メタンガスが噴出したという現象は無いが、可燃性ガス濃度が100 LEL%を超える箇所が4箇所あり、このうちの2箇所について本調査（分析機関により、対象深度の気体と地下水の試料を、詳細に成分検査する）を実施した。

平成15年6月に、当JVは、発進立坑付近と中間立坑付近の2地点について、平成13年8月の調査位置よりも、さらに工事箇所に近い地質と可燃性ガスのデータを得るために、予備調査と本調査を実施した。予備調査の際に、メタンガスが噴出したという現象は確認されなかった。

#### （2）調査結果

2度の調査により得た分析結果によると、対象深度のメタンガス濃度は、最大で、気体中に遊離ガスとして3.0 vol%，地下水中に溶存ガスとして10.8 mg/Lであった（表—3）。

表—3 本調査結果のメタンガス濃度最大値

| 対象深度で検出したメタンガス濃度 |             |
|------------------|-------------|
| 遊離ガス             | 3.0 vol%    |
| 溶存ガス             | 10.8 (mg/L) |

また、ガスの全圧を算定したところ、対象深度での拘束圧（大気圧+間隙水圧）より低い値となった。ガスの全圧が最高値は1.51 atmでその箇所の拘束圧は1.955 atmであった。

#### （3）調査結果の考察

調査結果より、メタンガスが発生する度合いを以下のように想定した。

- ① 予備調査の際にメタンガス噴出が確認されなかったため、地層の空隙に遊離ガスとして賦存している可能性は低い。
- ② メタンガス以外の有害なガス（硫化水素、一酸化炭素）はほとんど無い。
- ③ メタンガスは、地下水の中に溶存しており、対象深度では地下水圧と大気圧によって拘束されている状態である。
- ④ メタンガスが溶込んでいる対象深度の地下水は、大気圧下に開放されると、遊離ガスになる（気化する）。

#### （4）メタンガス発生量の予測

メタンガスが一番発生する箇所は、シールド機切羽部であり、シールド機テールシールド部およびセグメント継手部の止水性能が低下した箇所、また、シールド機のスクリュコンベヤ出口部で取込んだ掘削土砂を開放した時である。個々の箇所では、メタンガス成分を溶存している地下水が、大気圧下に開放されて、気化し、遊離ガスとして発生することとなる。

よって、メタンガス発生量の予測最大値は、止水性能低下箇所の湧水量および掘削土砂量の最大値と、可燃性ガス調査で得られたメタンガス濃度の最大値を適用し算出した（表—4）。

さらに、表—4のメタンガス予測発生量から、最もメタンガスが発生する状況（シールド掘進中）に換算すると、シールド坑内1m当りの空間で、そのメタンガス発生量は $0.39105 \text{ m}^3$ となり、気中濃度で3.4

表-4 メタンガス予測発生量

| 発生項目   | メタンガス発生量                                  | 算式   |
|--------|---|--|
| ① 坑内湧水 | 0.01452 m <sup>3</sup> /min               | 発生量=湧水量×(溶存メタンガス量)×{1+(9.8×地下水圧)/101}        |
| ② 掘削土砂 | 1.12×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /min | 発生量=掘削土量×(掘削土中の水による発生量+掘削土中の気体による発生量)×(圧力補正) |

注1) 坑内湧水によるメタンガス発生量は、表-3の溶存ガス量10.8 mg/Lを持つ地下水が、坑内湧水量0.5 m<sup>3</sup>/minで発生した時に、坑内で大気圧下に開放されて、全て気化した場合の量  
 2) 掘削土砂による発生量は、表-3の溶存ガス量10.8 mg/Lを持つ地下水を含む掘削土砂を、1日あたりの掘削量が146.35 m<sup>3</sup>/24 hrで取込んだ時に、スクリュコンベヤ出口部で大気圧下に開放されて、全て気化した場合の量

vol%になるという結果に至った。

#### 4. 可燃性ガス対策レベルの判定と対策

##### (1) メタンガスの特徴(表-5)

シールド工事を含め地下工事で発生する可燃性ガスは、通常メタンガス(CH<sub>4</sub>)がほとんどであり、地下掘削の覆工版下やシールド機内など空気の還流が滞る場所で滞留する事が多い。滞留したメタンガスは、周囲の空気(酸素)と混ざりあい、ある一定の濃度・爆発下限界の濃度(5.0 vol%)に達すると、燃焼・爆発現象を起こす危険性が非常に高まる。

そしてこの時に、電源スイッチ操作時や静電気により発生する火花などの着火源の発生と共に、一瞬にして燃焼・爆発に至るもので爆発性ガスともいい、非常に危険なガスである。

表-5 メタンガス(CH<sub>4</sub>)の主な特徴

|  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>有機物や腐食土を含む層、石油・天然ガス地帯などに存在する</li> <li>無色、無臭、水に溶解する</li> <li>人体に無害</li> <li>空気の比重=1としたとき、比重0.55</li> <li>空気中の濃度が、5~15 vol%の範囲で、着火源があれば、爆発する</li> </ul> |
|--|

##### (2) 可燃性ガス対策レベルの判定と対策実施項目概要

可燃性ガス対策は、メタンガス発生量(最大3.4 vol%)の予測算出結果より、管理基準値(Ⅱ)が該当する(表-6)。

表-6 トンネル工事の可燃性ガス(メタンガス)対策基準(大阪市下水道局の技術指針より)

|                            |
|----------------------------|
| 管理基準(Ⅰ): 検出濃度5.0%以上        |
| 管理基準(Ⅱ): 検出濃度1.5%以上~5.0%未満 |
| 管理基準(Ⅲ): 検出濃度0.5%以上~1.5%未満 |

管理基準値(Ⅱ)(以下、対策レベル2という)は、エアカーテン併用によるシールド切羽部の限定的な防

爆化、送排気併用式の換気、定置式および携帯式のガス検知併用、シールド切羽部の防爆構造採用である。

##### (3) 可燃性ガス対策の項目

可燃性ガス対策の項目は、爆発災害を予見した体制と装備の十分な検討を行い、使用する機器の防爆化、強制換気設備、自動ガス検知警報、切羽坑内の湧水漏水対策としてセグメントの止水等の徹底、安全衛生管理体制・作業員への教育の徹底など、下記の6項目について計画立案した。

- ① シールド機内および防爆エリアの機器の防爆化。
- ② エアカーテンを装備することにより、防爆エリアと非防爆エリアを隔離する。
- ③ 坑内全域の風速を0.5 m/s以上確保する換気設備を設ける。
- ④ メタンガス滞留エリアにおいては、風速1.0 m/s以上を確保する換気設備を設ける。滞留エリアとは防爆エリアおよびスクリュコンベヤの掘削土砂吐出口などである。
- ⑤ 自動ガス検知警報装置  
切羽を含め、坑内の環境(酸素濃度、メタンガス濃度、硫化水素濃度)をリアルタイムで計測監視するとともに、計測値により警報を自動発信し、作業関係者全員に即時異常事態を通報する設備とする。
- ⑥ 作業基準  
メタンガスの濃度に対する作業基準を表-7のように定めた。

表-7 メタンガス濃度と作業基準

| 可燃性ガスの安全管理基準   |        |      |      |      |       |       |      |
|----------------|--------|------|------|------|-------|-------|------|
| 可燃性ガス濃度 Vol%   | 管理基準   | 警報   | 作業   | 火気制限 | 電源    | ガス測定  | 換気   |
| 0.00           | 平常作業   | なし   | 定常作業 | 作業届出 | 制限無し  | 通常測定  | 通常換気 |
| 0.25           | 一次警戒   | 警戒警報 |      | 作業制限 |       | 測定強化  | 換気改善 |
| 0.50           | 二次警戒   |      | 中断退避 | 作業中止 |       | 発生源調査 | 換気増強 |
| 1.00           | 退避基準   | 非常通報 | 作業中止 |      | 切羽遮断  | 自動測定  |      |
| 1.50 (法規制濃度)   | 入坑内禁止  |      | 全員退避 |      | 坑内全停電 |       |      |
| 5.00 (爆発下限界濃度) | 電源遮断基準 |      |      |      |       |       |      |

#### 5. 可燃性ガス対策設備

##### (1) 定置式自動ガス検知警報装置

可燃性ガス対策の中で、ガス検知は重要な設備で、日々の作業判断、安全対策を行ううえでの情報源とな

る。特にメタンガスは、無色、無臭という特徴を持つ（表—5）ことから、人間の臭覚、視覚ではその存在を判定できないので、定置式でガス検出を行う方法（定置式自動ガス検知警報）と携帯式の可燃性ガス測定器を併用した。

定置式のガス検知センサ（メタンガス、酸素、硫化水素、一酸化炭素）は、シールド機内、エアカーテン近傍、後続台車後方のほか、坑内は200m毎と、発進立坑に設置した（グラビヤ）。

ガス検知は、現場事務所設置の監視コンピュータにより、24時間リアルタイムに自動計測しデータを記録するとともに、シールド機運転席、発進立坑入坑口に設けたデジタル表示機器に計測値を表示し、常に確認ができるものとした。また、計測値が1次警報値ならびに2次警報値の値に達した場合は、即座に、坑内全域（シールド機内および坑内200m毎）と、発進立坑入坑口、現場事務所の警告警報機を動作させるシステムとした。

携帯型の検出測定器は、定置式で計測できないシールド切羽部の箇所を測定することと、作業開始前の坑内巡視の際に携帯して、可燃性ガス有無の点検に使用した。

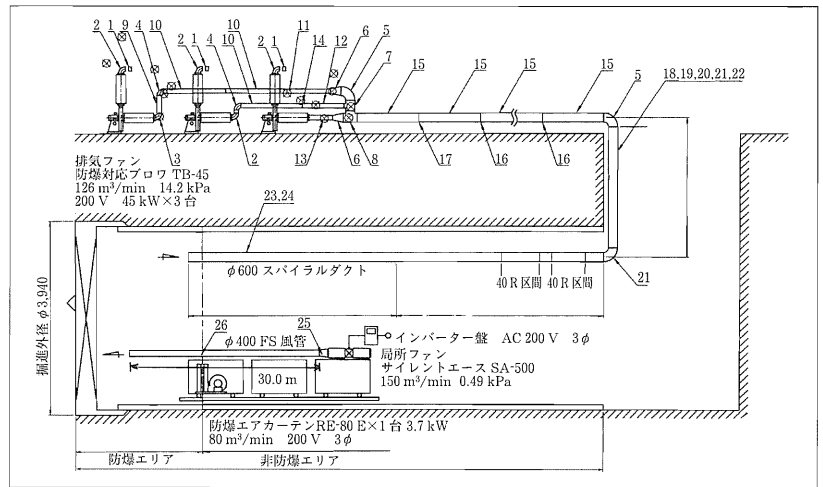
（2）換気設備（表—8）

換気設備は、強制排気ファン+局所送気ファン+エアカーテン方式とした（図—4、図—5）。

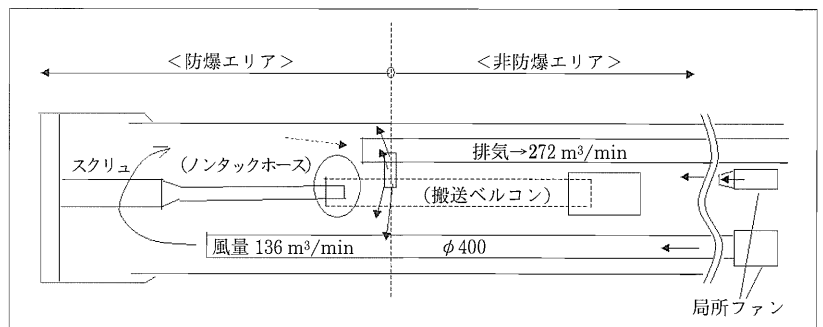
強制排気ファン+局所送気ファンは、発生した可燃性ガスをすばやく希釈して坑外へ排出する機能を持ち、エアカーテンは、防爆エリアと非防爆エリアの境界を築き、発生した可燃性ガスを非防爆エリアへ移動させない機能を持つ。防爆エリアの空気の流れは、図—5

表—8 換気設備一覧

| 項目       | 風管, 換気量                       | 仕様   | 備考   |
|----------|-------------------------------|--|--|
| ① 強制排気   | φ600, 272 m <sup>3</sup> /min | ターボプロア 45 kW/14.2 kPa×3台, インバータ制御                  | 特徴<br>・ダクト延伸時, 坑内高圧ケーブル延長時も, 排気続行可能。<br>・外気がトンネル内を流れるので, マシンの余熱の空冷化など坑内環境が快適となる。<br>・主換気プロアが坑外にあることで, 坑内の騒音源が少なく会話可能となる。 |
| ② 局所送気   | φ400, 136 m <sup>3</sup> /min | 軸流ファン 3.7 kW×1台, 0.49 kPa, インバータ制御                 |  |
| ③ 局所送気   | —, 80 m <sup>3</sup> /min     | サイレントファン 1.5 kW×1台, 風速 20 m/s                      |  |
| ④ エアカーテン | —, 80 m <sup>3</sup> /min     | 風量 80 m <sup>3</sup> /min, ノズル風速 20 m/s, 3.7 kW×1台 |  |



図—4 換気設備レイアウト



図—5 シールド切羽部・防爆エリアの換気（平面図）

に示すように、エアカーテンの吐出口を境界として、シールド機内側の平均風速1.0 m/s以上となるように、排気ダクトと、送風ダクトを左右に分け、さらに前後方向で5 m以上離れるような配置とした。

主換気量（強制排出換気量）は、その算定条件（坑内全域の平均風速0.5 m/s以上、作業員の呼気量10 m<sup>3</sup>/min・人、後続台車油圧ユニットの熱による坑内平均温度の冷却維持）より、所要換気量を算出し、送風機的能力と機体寸法、風管口径を比較検討した結果、地上設置のターボプロアにより吸出す方式とした。

① 強制排気（グラビヤ）

地上に排気ファンを設置し、φ600の風管（スパイラル鋼管）を地上よりシールド機切羽の防爆エリア内にまで延伸し、切羽部の有害な空気を強制吸出しする。

② 局所送気ファン

シールド後方台車（5号台車）上に局所送気ファンを設置し、φ400風管（ビニールダクト）をシールド機テールシールド部まで延伸し、坑口より流入する新鮮な空気を送り、防爆エリアの風速を1.0 m/s以上を確保する。

③ 局所送気ファン

メタンガス滞留エリアとして、土砂搬送ベルトコンベヤの積込み付近での風速1.0 m/s以上を確保でき

るよう、切羽用の局所送気ファンとは別の送風機を設置し、後方台車最後尾に配置して切羽方向へ送風する。

④ エアカーテン (写真-4)

シールド切羽の後方台車先頭にエアカーテン用のファンを設け、ノズル風速 20 m/s をトンネル円周方向に噴出すことで、防爆エリアと非防爆エリアを隔離する。

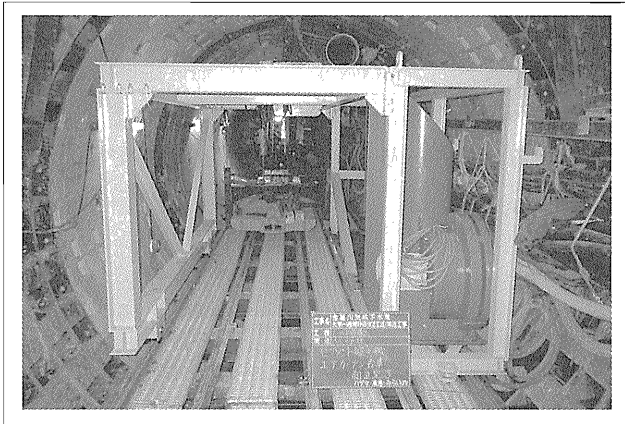


写真-4 エアカーテン

(3) シールド機の防爆化

シールド機内は、防爆仕様機器とし、エアカーテンの境界から2号台車以降の後続台車側は、通常の非防爆機器とした(図-4)。

シールド機本体の防爆仕様のうち電気機器の防爆仕様は、メタンガスの発生濃度が最大3.4 vol% であることと、強制排出の換気設備方式を取ることによって、

表-9 可燃性物質を処理または貯蔵するプラント対象の工場防爆電気設備のレベル

| 危険のレベル  | 爆発性の度合い         | 備考   |
|---------|-----------------|------|
| 0 種危険場所 | 爆発性の雰囲気が高       | 完全防爆 |
| 1 種危険場所 | 爆発性の雰囲気が高       |      |
| 2 種危険場所 | 爆発性の雰囲気が低       |      |
| 3 種危険場所 | 爆発性の雰囲気が無視するほど低 |      |

出典：労働省の技術指針「ユーザーのための工場防爆電気設備ガイド (ガス防爆 1994年) 労働省産業安全研究所技術指針」

表-10 シールド機の主な防爆機器

| 機器名                     | 防爆構造     |
|-------------------------|----------|
| 油圧電磁切換弁 (シールドジャッキ選択弁以外) | 安全増防爆構造  |
| 油圧電磁切換弁 (シールドジャッキ選択弁)   | 耐圧防爆構造   |
| 中継端子箱                   | 耐圧防爆構造   |
| エレクトラ操作箱                | 本質安全防爆構造 |
| 機内スクリュゲート操作箱            | 本質安全防爆構造 |
| 油圧ジャッキストローク計            | 本質安全防爆構造 |
| 土圧検出器                   | 本質安全防爆構造 |
| 近接スイッチ (SC 回転)          | 本質安全防爆構造 |
| ピッチング計, ローリング計          | 耐圧防爆構造   |
| 機内蛍光灯, コンセント, バトライト     | 耐圧防爆構造   |
| 運転台車の操作盤                | 本質安全防爆構造 |

爆発性の雰囲気が低い2種危険場所に相当すると判断し(表-9), その防爆仕様は、機器の種類と用途によって表-10 に示すように、本質安全防爆構造, 耐圧防爆構造, 安全増防爆構造とした。

また、シールド機内のカタヘッド駆動とスクリュコンベヤ駆動は、防爆性の高い油圧モータ駆動方式とし、非防爆エリアの後続台車に電動機駆動式油圧ポンプを配備した。

(4) 防爆エリアに装備した防爆仕様の機器

シールド機内装備の防爆機器以外で、防爆エリアに装備した防爆仕様の機器を表-11 に示す。

表-11 防爆エリアに装備した防爆仕様の機器

| 機器名      | 仕様                    | 数量 |
|----------|-----------------------|----|
| セグメント搬送機 | 揚重 エアホイスト 2.0t        | 1台 |
|          | 走行 防爆電動機駆動式           | 1台 |
| 局所照明     | 防爆水銀灯 400 W           | 2台 |
|          | 防爆蛍光灯 40 W (シールド機内以外) | 3台 |
| 通信       | 防爆インターホン              | 1台 |
| ガス検知警報機  | 定置式 防爆型検出部と警報部        | 3台 |
| ジャイロコンパス | 防爆ケース入り検出部            | 1台 |
| 自動レベル計   | 防爆ケース入り検出部            | 1台 |

緊急避難用で装備した防爆機器などを以下に示す。

- ① 坑内の非常用蛍光灯を防爆型とした (40 W, 50 m 毎設置)。
- ② 緊急避難用具の懐中電灯を、防爆型とした (200 m 毎設置)。

6. 可燃性ガス対策設備の保安維持管理

(1) 定置式自動ガス検知警報装置

管理項目は、日常点検 (作業開始前に行う携帯式可燃性ガス測定器との値の整合性の確認, 機器の外観点検) と、月次点検 (月1回行う検出センサの校正と警報装置の試運転) である。

定置式の可燃性ガス検出センサは、設置した位置の環境変化 (温度, 湿度の変化) で微妙に、検出感度に狂いが生じる場合がある。今回、シールド機内に装備したセンサにおいて、季節の変わり目で (冬から春, 春から夏) 2回ほど発生し、わずかであるが検出値が大きい値を示した現象があった。この発見は、日常作業開始前に行う携帯式可燃性ガス測定器との比較により発見したものである。

(2) 換気設備

管理項目は、日常点検 (作業開始前に行う換気装置

の作動確認・損傷異音有無点検と風管の漏風有無点検)と、半月に1回行う換気量測定、月次点検(月1回行う全負荷運転による設備の機能確認)である。

換気量の測定は、各地点の風速測定であり、シールド切羽部の防爆エリア(エアカーテン吐出口、排気ダクトの吸込み口、局所送気ダクト吐出口)と、坑口、200 m地点、トンネル中間点で実施した。管理基準は、可燃性ガス対策の項目で設定した値(防爆エリア1.0 m/s以上、坑内全域0.5 m/s以上)である。

### (3) 防爆仕様の機器

管理項目は、日常点検(機器の損傷有無、動作機能確認)である。今回、シールド機内装備品のストローク計と、搬送機の電動機が機能不全となり、6回ほど機器本体を交換した。

## 7. あとがき

本工事の一次覆工は、掘進開始から約10カ月後、平成16年8月に延長1,385 mの施工を終えた。施工期間中の可燃性ガスは、微量(0.1 vol%未満)の値が二、三度検出されたが、わずかな時間で、ガス検出センサの検出誤差とも判断できるような値であった。今回設備した換気設備が十分に機能した結果と考える。現在現場では、二次覆工、中間人孔築造を主体に施

工を進めており、平成17年9月には、発進基地の復旧工などを残して主要な工種を終える予定である。

本報文中で紹介した可燃性ガス対策とその施工設備計画は、土木工事施工の計画知識の他に、メタンガスを相手にすることから化学の知識が必要となる。可燃性ガス調査の段階から、発注者、本社支店の設計技術部門、ガス分析機関、機械設備メーカー等各方面の協力支援を頂いて、今回の可燃性ガス対策を無災害で完了することができた。

本報文が今後、高濃度ガス予測箇所の施工、保安対策等に係る会員諸兄姉の一助となれば幸いです。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) 大阪下水道局：「平成6年1月 トンネル工事における可燃性ガス対策技術指針」
- 2) 建設業災害防止協議会：「平成14年 ずい道等建設工事における換気技術指針」
- 3) 株式会社間組：「平成8年 爆発性ガス及び有害ガスに関するマニュアル(土木編)」(社内マニュアル)

### 【筆者紹介】

脇山 一郎(わきやま いちろう)  
株式会社間組  
大阪支店  
土木部  
大東シールド作業所  
機電課長



## 建設機械図鑑

本書は、日本建設機械要覧のダイジェスト版として、写真・図版を主体に最近の建設機械をわかりやすく解説したものです。建設事業に携わる方々、建設施工法を学ばれる方々、そして建設事業に関心のある一般の方々のための参考書です。

A4判 102頁 オールカラー 本体価格2,500円 送料600円

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8(機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289