

## 卓越した技術で難工事に挑む アルティミット工法

### ～可燃性ガスが溶存する地盤における推進工事事例～

うだ たつや  
宇田 達也

(株)久本組  
配水管八尾1工区作業所  
現場代理人



きたむら ひろぶみ  
北村 博文

(株)久本組  
配水管八尾1工区作業所  
監理技術者



いはら たけひと  
岩原 剛人

アルティミット工法協会



#### 1 はじめに

本工事は「八尾市美園町～東大阪市大蓮東四丁目区間」において、既存の老朽化した水道管を呼び径600の耐震性能を有する水道管に敷設替えるために計画されました。敷設方法は管路上部の道路諸事情に与える影響を考慮して推進工法が採用され、推進管はさや管として呼び径1000、推進延長は684.3mを2スパンに分けて計画されました。

設計段階では推進工事を計画するために必要な事前ボーリング調査が実施されました。調査の結果、管路対象区間に高濃度の可燃性ガス（メタンガス）が確認されたため、アルティミット防爆型推進工法が採用されて推進工事を計画することになりました。

本稿では、可燃性ガスが溶存する特殊な地盤における推進工事の課題と対策を中心にご報告いたします。

#### 2 アルティミット防爆型推進工法（泥水式）

アルティミット工法は長距離・急曲線を高精度に施工できる推進工法として開発され、平成3年にアルティミット工法協会が設立されました。今日に至るまで過密化する市街地での道路事情や輻輳する地下埋設物、その他、様々な顧客のニーズに対応するべく技術開発に取り組んできました。その結果、大中口径管路の累計実績推進

延長は令和2年3月末には270kmを超えました。

アルティミット防爆型推進工法は、可燃性ガスが溶存する特殊な地盤において「トンネル工事における可燃性ガス対策技術指針（大阪建設局発行、以下、指針）」の基準に則し、その中で独自の観点から安全、確実に施工できるように開発されたシステムのひとつです。そして平成14年に大阪市の現場でご採用いただいて以降、今日まで多くの現場でご採用いただき施工実績を残しています。

以下に可燃性ガスの特性から考案された、アルティミット防爆型推進工法の設計基準および防爆対策実施項目についてご説明します。

#### 2.1 可燃性ガスの特性

##### (1) 可燃性ガスの種類

可燃性ガスにはメタンガス（ $CH_4$ ）の他に、エタンやブタンを含む石油系ガス、メタンを主成分とした石炭系ガス、水溶性天然ガスなどがあり、この中でメタンガスは有機物の分解によって発生する水に対して可溶性のある可燃性ガスです。推進工事で問題になる可燃性ガスの大半が有機物や腐植土を含む層から発生するため一般的に「可燃性ガス＝メタンガス」という認識をされている方が大半です。

すなわち有機物や腐植土を含む層は日本国内には多く存在しているため、メタンガスの認識が無ければ調査をしないまま気づかずに推進工事を施工するというこ

考えられるため注意が必要です。

## (2) メタンガスの特性

メタンガスにはいくつかの厄介な特性があります。まずは爆発の性状ですが、爆発範囲は「空気中の濃度が5～15vol%」で火源があれば爆発します。最も爆発性状が高いとされているのが9.5vol%で、最大700kN/m<sup>2</sup>の衝撃波が発生し、爆発温度は2000℃に達するといわれています。したがって濃度が低い場合や高すぎる場合、そして火源がなければ爆発はしません。そのため防爆対策として重要なのが「火源対策」です。

次にメタンガスの性質ですが、稀に工事現場で大規模な爆発事故を誘発するのはメタンガスの特異な性質にあると考えます。まずメタンガスは無色、無味、無臭であり吸引しても無害なため人間の五感ではガスの存在を認識することができません。そのため「検知対策」が重要になります。また、メタンガスは空気よりも軽い点（比重：0.555）と、微量なガスが集まり濃度を高めるという性質を持ち合わせています。一般的に、このような現象は「メタンレアを形成する」という表現で呼ばれています。仮に推進管路内部で空気が動いていない状況では、ガスは上部に集まり濃度を爆発範囲まで高めてしまう恐れがあるため、メタンレアを形成させない「換気対策」が重要になります。さらにメタンガスは水溶性があり、溶解度は圧力に比例して可溶性が高まる性質も持ち合わせているため、深層位置になればより注意が必要です。そのため「管路内部で地下水を含んだ土砂等を外気に晒さない対策」が重要です（図-1）。

これらのメタンガスの特性はトンネル工事の作業環境

① 爆発の性状	爆発範囲は「空気中の濃度が、5VOL%～15VOL%」で火源があれば爆発 →「火源対策」が必要
② メタンガスの性質	無色、無味、無臭であり吸引しても無害 人の五感ではガスの存在に気が付かない →「検知対策」が必要 比重：0.555 空気より軽いため高いところに停滞してメタンレアを形成する →「換気対策」が必要 水に対して可溶性をもち、溶解度は圧力に比例している →「地下水を含んだ土砂等を管内で外気に晒さない対策」が必要
③ メタンガスの存在位置	1) 腐植土の間隙（気体ガス、水溶性ガスとして存在） 2) 不透水層の下部凸部（遊離ガス、水溶性ガスとして存在） 3) 地下水流のほとんどない透水層中（水溶性ガスとして存在）

図-1 メタンガスの特性

下に当てはめると、残念ながら爆発事故を誘発するための条件が揃っており、過去にもトンネル工事で悲惨な爆発事故が何件か伝えられています。そのため施工管理者はメタンガスの特性をよく理解して安全対策を講じなければなりません。

## 2.2 アルティミット防爆型推進工法の防爆対策

### (1) メタンガスの管理基準濃度

基本となる管理基準は、大阪市建設局が発行している指針を参考にさせていただきました。事前調査で掘進断面またはこの近傍の地山にメタンガスが検出された場合、検出されたガス濃度に応じて「管理基準濃度Ⅰ～Ⅲ」を設定します（図-2）。そして各管理基準濃度に応じて防爆対策として必要な「適用条項」に基づき、必要な防爆対策を講じます（表-1）。

アルティミット防爆型推進工法の「管理基準濃度」は、大阪市建設局発行「トンネル可燃性ガス対策技術基準」に準拠する
① 管理基準濃度（Ⅰ）・・・検出濃度5%VOL以上
② 管理基準濃度（Ⅱ）・・・検出濃度1.5%VOL以上 5%VOL未満
③ 管理基準濃度（Ⅲ）・・・検出濃度1.5%未満 0.5%VOL以上

図-2 メタンガスの管理基準濃度

表-1 メタンガスの管理基準濃度および適用条項

区分	適用条項	実施内容	備考
管理基準濃度（Ⅰ）	第5条「工法検討」 第6条「危険範囲」 第7条「換気計画」 第8条「検知計画」 第9条「防爆設備」 第10条「安全計画」	①：最適仕様を選択 ②：防爆エアーカーテン方式 ③：CH <sub>4</sub> 希釈換気 ④：定置式・携帯式検知 ⑤：防爆構造を採用 ⑥：作業規制の実施	過半の区間で検出された場合に適用し、局部的検出の場合は（Ⅱ）に準じる
管理基準濃度（Ⅱ）	第5条「工法検討」 第7条「換気計画」 第8条「検知計画」 第10条「安全計画」	①：最適仕様を選択 ③：CH <sub>4</sub> 希釈換気 ④：定置式・携帯式検知 ⑥：作業規制の実施	噴出が予測される場合には（Ⅰ）に準じる
管理基準濃度（Ⅲ）	第7条「換気計画」（呼気量換気）、第8条「検知計画」（定置式検知等）、第10条「安全計画」を必要により検討・実施		0.5%未満は原則的に除外

### (2) アルティミット防爆型推進工法の概念

アルティミット防爆型推進工法の特徴は、推進工事の専門家独自の目線で作業特性に合わせた防爆対策を提案していることです。



用性の問題や技術的な観点から「耐圧防爆構造」しか対応できない事情があります。そして耐圧防爆構造の定義は、「全閉塞構造で、機器内で爆発が生じても容器が爆圧に耐え、かつ、外部の爆発性ガスに引火しない構造」とあり、「油入防爆構造」のような引火する恐れのない構造や、「内圧防爆構造」のように引火しない構造ではありません（表-3）。すなわち、危険と定めている区域に引火の恐れがある機器を使用しているということになります。万が一にも地中で掘進機の主要機器が破損すれば、修理不可能となることも十二分に考えられます。

アルティミット防爆型推進工法は、このような矛盾を解消するために過去の実施例に拘らずに、より安全で確実に施工する方策として「爆発範囲濃度の可燃性ガスをトンネル内部に流入させない。全区間非危険区域とすべきである。」という概念で防爆対策システムを提案しました。

### (3) 具体的な防爆対策

アルティミット防爆型推進工法は、指針に則し、各管理基準濃度に応じた「適用条項」に対して必要な防爆対策を講じます（表-4）。

#### 【工法検討】

指針に「工法検討」は最適工法を選択するとありますが、メタンガスは「水溶性があり、溶解度は圧力に比例して可溶性が高まる」性質があります。そのためメタンガスが含まれている土砂や地下水を管路内部で外気に触れさすことのない工法である「泥水式推進工法」の選択を原則としています。

#### 【危険範囲】

アルティミット防爆型推進工法は全区間非危険区域と定めることを概念としているため、極力ガスの流入経路を抑制する必要があります。掘削土砂や地下水からの流入は泥水式推進工法を採用することで抑制できますが、推進管継手箇所は気密性能を持ち合わせていないため対策が必要です。そのため耐水性、気密性に優れた「TSシール」材を継手箇所に加工する対策を行います。

#### 【換気計画・検知計画】

泥水式推進工法の採用と推進管継手箇所の気密性

加工によってメタンガスの流入経路の大半を抑制することができますが、完全に遮断することは現実的に難しいと言えます。例えば推進管に取り付けられた注入孔や流体輸送管の継手部からしみ出るものなど極微量な漏水であっても、メタンガスの特性を考えれば集束してメタンレアを形成する可能性があります。したがって、施工中はメタンレアを形成させない坑内風速を確保できる換気設備（=指針に記載してある非危険区域内相当の換気設備）を選定して導入します。また僅かな可能性でもメタンガスが流入する可能性があると考えらるならば、「検知計画」は必要であると考え、「労働安全規則第382条の2および3（当該可燃性ガスが発生する恐れのあるときは講じるべき必要な措置）」に則して計画します。

#### 【防爆設備】

防爆改造機器の選定基準は、「爆発する可能性のある状況下に在る機器であるかどうか」で選定します。そのため「全区間非危険区域」を前提とすると、掘進機および付随する機器（後方設備機器）や、排気用換気設備などの機器を防爆改造する必要はありません。したがって防爆改造が必要な機器は「非常時に退避するために必要な機器」のみが対象となり（「定置式検知器」、「自動警報装置」、「非常用照明灯」、「坑内通話装置」など）、防爆改造機器に要する費用が軽減できることが見込めます。

#### 【安全計画】

安全計画は関係法令や技術指針に則って工事施工に先立ち綿密に計画を立案します。その中の「火源対策」としてアルティミット防爆型推進工法は緊急時の自動火源遮断対策として「管内電源自動遮断装置」を導入しています。具体的に説明すると、管路内部に設置している定置式検知装置と連動させて、可燃性ガス濃度が1.5vol%を上回ると発火源となりうる非常用電源を除く全ての送電を停止させるシステムです。このシステムを導入することで、可燃性ガスが爆発範囲まで濃度が上昇する前に火源を遮断し、原因究明を行うことができます。その他にも、非常用避難器具（消火器、空気呼吸器、携帯用照明器具）の設置場所なども、明確な基準を設けています。

表-4 アルティミット防爆対策設備一覧表

(参考表)

管理区分	適用項目	備考	アルティミット防爆対策	適用基準	判定 ※1)	コスト比較 ※2)
管理基準濃度 (I) 5%以上	「工法検討」	過半の区間で検出された場合に適用し、局部的検出の場合は (II) に準じる	対策②: 泥水式工法の選定	全区分非危険区域を前提とした場合 ・管内無排土方式 (流体輸送) ・掘進機遠隔操作方式により管内無人化を推奨 ・泥膜造成過程のガス抜き効果を期待	◎	同等
			対策③: 自動滑材注入システム[ULIS]	・地山と推進管の滑材膜を形成してガス侵入を抑制 (距離に応じて追加注入孔増設) ・管内作業の無人化を図る	△	
			対策④: 掘削管理 自動測量システム、液圧管理システム、 シャイロコンパス	・管内作業の無人化を図る ・高精度管理でHP目地開口を安定させる	△	
	「危険範囲」		対策①: 可とう部からの可燃性ガス遮断対策 気密性シール「TSシール」 (可とう部から可燃性ガスが管内に侵入することを遮断して全区分非危険区域とする)	・坑道内への可燃性ガス侵入の遮断 ・掘進機を含め全ての可とう箇所をシール加工	◎	危険区域の 防爆改造費 と比較して 安価
			「換気計画」	対策⑤: 必要換気設備の選定 非危険区域基準: 坑内風速0.3m/s以上 [可変風量型換気設備]	・全区分「非危険区域」を前提とする為には 「流体輸送による坑外排土」「気密性シール加工」が大前提となる	◎
	「検知計画」			対策⑥: 凹部に滞留したガスの希釈対策	・局所送風機の導入	○
			「防爆設備」	対策⑦: ガス検知 定置式防爆ガス検知システム (自動警報 機能付)、携帯式検知装置併用 (設置箇所は従来の防爆対策設備指針 に基づく)	・定置式検知及び通報装置は、24時間連続監視 を基準とする ・測定ガスは2種としメタンガス・酸素とする。 設置箇所は各現場の土質条件や機内の設備機器 の配置等を考慮して追加箇所を検討する	◎
	「安全計画」			対策⑧: 非常用防爆設備機器の設置 防爆用非常灯、防爆用坑内通話装置 坑内電話~防爆仕様で300m間隔毎 非常灯~防爆仕様で50m間隔毎 自動警報装置~防爆仕様で100m間隔毎 対策⑪: 緊急時の予備電源対策	・自動警報装置は防爆構造として、定置式検知 装置と連動させる ・防爆用坑内電話は別系統とする ・また通信ケーブルは難燃性材を使用する ・防爆用非常灯は、内蔵バッテリーとする ・非常用発電機の導入 (検知、警報、通話装置)	◎
			対策⑨: 緊急時発火源の遮断 「管内動力自動遮断盤」の設置	・自動遮断盤は定置式検知器、自動警報装置に 連動させる	◎	
			対策⑩: 非常用緊急避難器具の設置 呼吸用保護具、防爆用携帯用照明器具、 消化器	・緊急避難器具の設置基準を明確にする。 (防爆懐中電灯の適用及び呼吸保護具の使用 可能時間を明確にする)	○	管理基準の 比較困難
対策⑫: 安全計画の立案		・安全計画は防爆設備のシステムを明確にする	○			
管理基準濃度 (II) 1.5%以上 5%未満	「工法検討」 「換気計画」 「検知計画」 「安全計画」	噴出が予測される 場合には (I) に 準じる	上記適用項目と同様		-	-
管理基準濃度 (III) 1.5%未満 0.5%以上	「換気計 画」 (排 気量換	0.5%未満 は原則除 外	左記 管理基準濃度 (III) に準ずる		-	-

3 施工事例

以下に、本工事の施工内容をご報告します (図-4、5)。

3.1 工事概要

工事名: 配水管布設替工事

(八尾本管分岐・八尾市ほか) 1工区

施工場所: 八尾市美園町四丁目地内

~東大阪市大蓮東四丁目地内

発注者: 大阪広域水道企業団

請負者: 株久本組

工法: アルティミット泥水式推進工法

推進管径: 呼び径1000

管種: 下水道推進工法用

鉄筋コンクリート管 JA-51

L=2.43m (281本) L=1.20m (2本)

中押S管およびT管 各1本

推進延長: L=684.31m (2スパン)

L1=425.886m, L2=258.420m

No.2 ~ No.1 L1=425.886m

曲線: HR=800m CL=47.880m

VR=500m CL=8.564m

VR=500m CL=8.564m

HR=300m CL=109.147m

No.2 ~ No.3 L2=258.420m

曲線: HR=150m CL=30.352m

HR=150m CL=23.231m

HR=500m CL=20.100m

HR=500m CL=51.937m

3.2 課題と対策

以下に、施工前に抽出した課題と実施した対策について記載します。

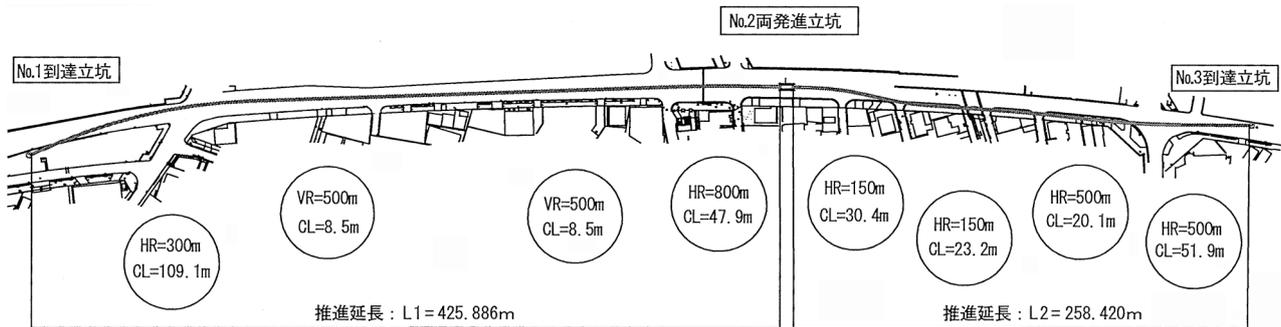


図-4 平面図

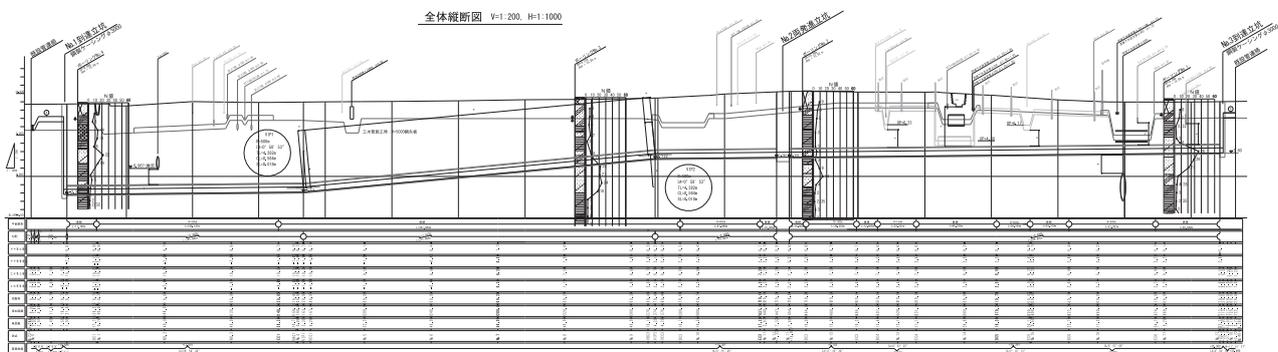


図-5 縦断面図

**【課題】**

**(1) 可燃性ガスの存在 (防爆対策)**

施工前のボーリング調査で管路対象部に高濃度の可燃性ガスが確認された。

**(2) 曲線区間掘進時の精度管理**

**(3) 推進力の上昇リスク**

推進路線全般の土質がシルト混じり砂層のため、想定外の障害物や機械の重度な故障などによる長期休止期間が発生した場合に、管路周囲の締付によって推進力の上昇が懸念された。

**【対策】**

**(1) 防爆対策の実施**

アルティミット防爆型推進工法の技術資料を参考に、現場で再度リスクアセスメントを実施して必要な防爆対策を講じた。

- ① 推進管路内部で地下水を含んだ土砂等を外気に晒さないため、循環流体輸送方式を採用している泥水式推進工法を選択した (写真-1)。

※ 適用条項「工法検討」

- ②-1 推進管継手箇所からの可燃性ガス流入対策として全ての継手箇所に気密性能を有したシール材 (TSシール) で加工処理し管内への可燃性ガスの流入防止対策を実施した (写真-2)。

※ 適用条項「危険範囲」

- ②-2 掘進機と推進管接合箇所からの可燃性ガス流入対策として掘進機と推進管の接合箇所もシール材 (TSシール) で加工処理し管内への可燃性ガスの流入防止対策を実施した

※ 適用条項「危険範囲」

- ③ 労働安全規則第382条の2および3に則し、24時間監視体制がとれる定置式自動検知器および警報機を発進立坑に1箇所、掘進機 (切羽部) に1箇所、管路部は掘進機から100m間隔に最大4箇所、一次処理機排土箇所に1箇所の合計最大7箇所に設置した。測定ガスはメタンガス濃度と酸素濃度として非常用設備も兼ねるため防爆構造のものを導入した (写真-3)。

※ 適用条項「検知計画」

④①、②の対策を実施することで全区間非危険区域と定め、メタンレアを形成させない坑内風速を確保できる換気設備を選定した。

※適用条項「換気設備」

⑤「爆発する可能性のある状況下にいる機器であるかどうか」を基準に、非常用設備に該当する「定置式検知器」、「警報装置」、「非常用照明灯（掘進機+@50m毎で合計最大9箇所）」、「坑内通話装置」は防爆構造のものを導入した（写真-4）。

※適用条項「防爆設備」

⑥定置式検知器に連動して、検出したメタンガス濃度が1.5vol%以上になれば非常用設備電源を除く全ての送電を停止できる「管内動力自動遮断盤」を導入し、非常用設備電源として停電時でも動力の供給を停止させないように自動起動発電機を導入した。さらに推進管路および発進立坑に非常用緊急避難器具（呼吸用保護具、携帯用照明器具、消火器）を員数分配置し、現場に従事するものには新規入場時に周知を徹底した（写真-5～9）。

※適用条項「安全計画」



写真-3 定置式自動検知器（防爆構造）



写真-4 非常用照明灯（防爆構造）

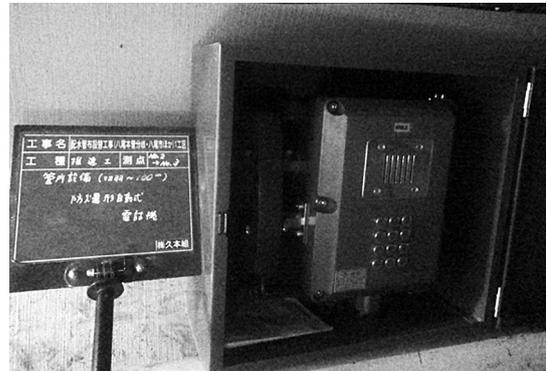


写真-5 通話装置：管内（防爆構造）



写真-1 泥水式掘進機



写真-2 掘進機継手箇所TSシール加工状況



写真-6 通話装置：管理室



写真-7 換気設備 (高圧プロア37kw)

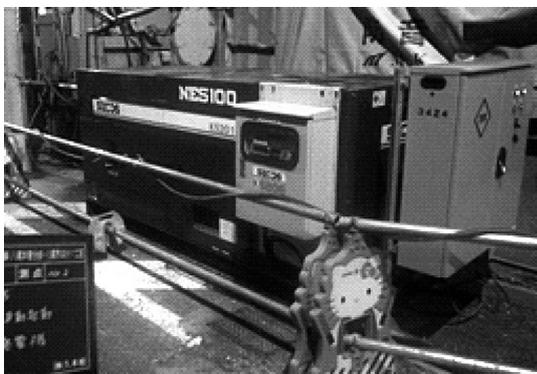


写真-8 自動起動発電機

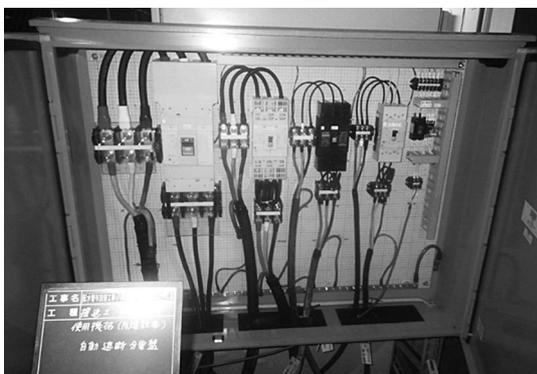


写真-9 管内動力自動遮断盤

を管内へ配置してパソコンで自動演算が可能な自動測量システムを採用した(写真-11)。自動測量を導入したことにより測量作業にかかる労力の軽減、測量にかかる時間が短縮され作業効率の向上および日進量の確保、日進量の確保により掘進停止時間が短くなり推進力の上昇防止にもつながる。また、自動測量システムの導入により管内作業が大幅に軽減されたことは安全面においても非常に重要な要素となった。本工事のように呼び径が小さく推進延長が長い施工条件ではなおさらである。



写真-10 管内動力自動遮断盤

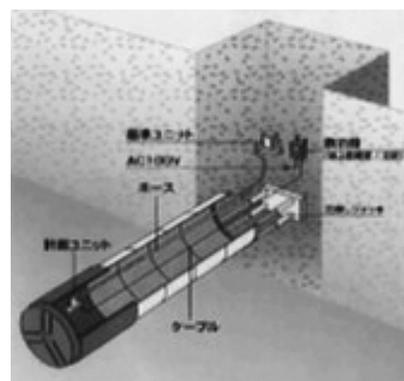


図-6 液圧差レベル計測装置

## (2) 曲線区間の精度管理の強化

曲線区間の精度管理を強化するために、下記の機器を導入した。

- ①掘進機の姿勢計測をリアルタイムに把握するため、ジャイロコンパスを導入した(写真-10)。
- ②鉛直方向(レベル)の絶対値をリアルタイムに把握するため、液圧差レベル計測装置を導入した(図-6)。
- ③狭小な推進管内で実施する光学測量の人為的ミス回避するために、自動追尾式トータルステーション



写真-11 自動測量システム

(3) 推進力の

上昇リスクの対策

推進力の上昇リスクを軽減するために、以下の対策を実施した。

- ① 推進力の上昇を極力抑えるうえで重要となるのが、掘進機カッタにより造成されたテールボイドを良質な状態で保持することである。そのため一次注入材は早期にテールボイドを安定させ、また地山への滑材の逸失抑制効果のある2液性固結滑材を選定した(図-7)。

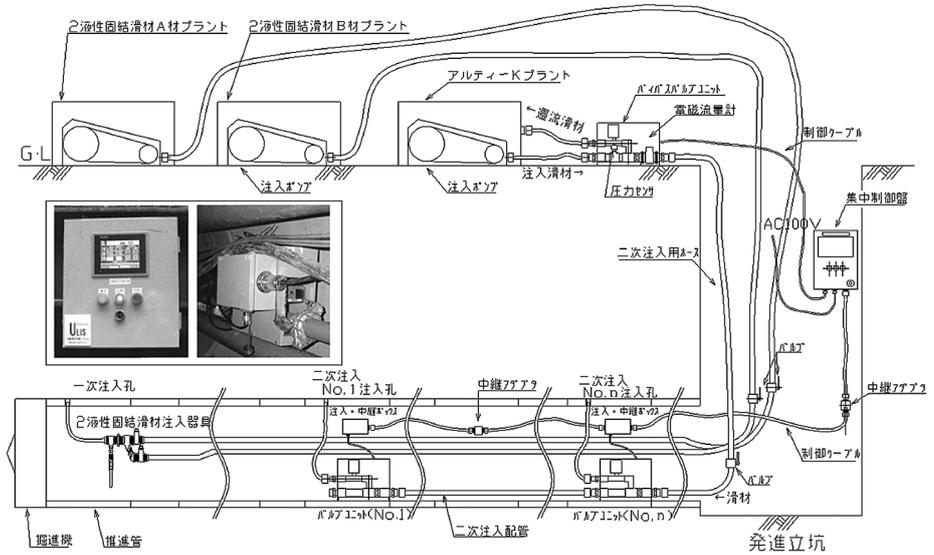


図-7 ULISアルティミット滑材注入システム(二系統配管方式)配管・配線概要図

- ② 二次注入材は一液性高粘性滑材(アルティーク)を選定した。また各グラウトホールの注入圧と注入量、注入位置を集中制御することができるアルティミット工法の自動滑材注入システム(ULIS)を導入して周面抵抗力低減を目的とした管理に活用した。ULISによる自動注入の間隔は通常50mであるが、今回は25m間隔で配置した。

4 施工の結果

呼び径1000の長距離推進工事で複数の曲線区間が設定されていたため、特に推進力の上昇には留意して施工管理を行った。事前に抽出した検討課題に対して適切な対策と徹底した管理を行なった結果、計画推進力の2,870kNを大きく下回る低推進力で到達することができた(図-8)。また可燃性ガスが溶存する地盤という特殊な条件下の施工であったが、幸い施工中にメタンガ

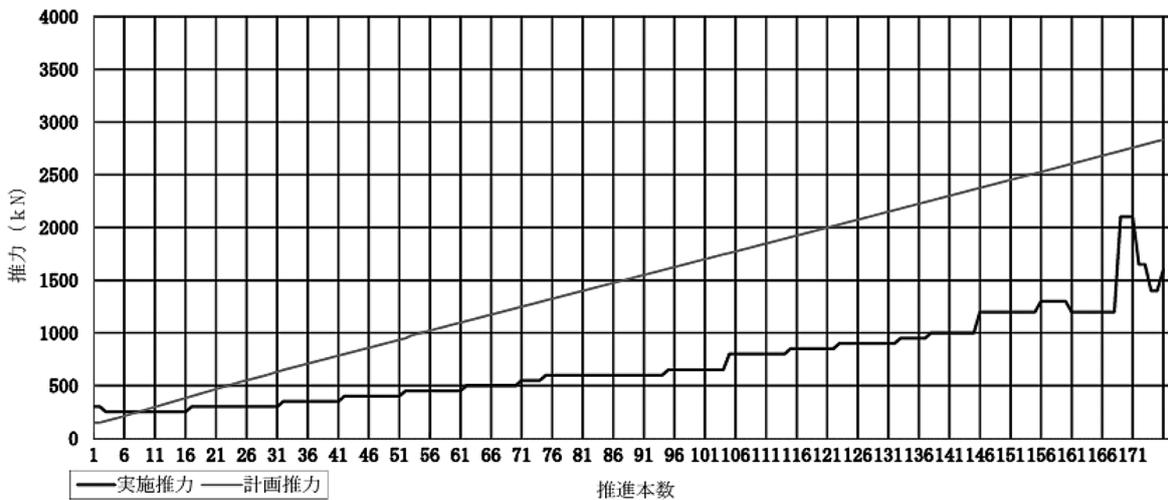


図-8 推進力管理グラフ(No.2~No.1)

スが検出されるなどの大きなトラブルも無く、無事に推進工事は完了した。

## 5 おわりに

本工事は事前のボーリング調査で可燃性ガス（メタンガス）が確認されたことや8箇所曲線の長距離推進という難しい施工条件であった。そのため計画の段階から綿密な検討を何度も繰り返した。特に可燃性ガ

ス対策では検知器を一次処理機に1箇所追加するなど、安全面に対しての管理を強化することに努めた。その結果、安全に高精度で推進工事を完成させることができた。

当工事の完成にあたり、関係者の皆様には大変お世話になった。本紙をお借りして厚く御礼を申し上げます。今後も本工事で抽出した課題や対応策を今後の施工に活用していきたいと考えている。また本報文が少しでも皆様の参考になれば幸いである。