

解説

アルティミット工法の 長距離推進と曲線推進を 支える技術

こもり きょうじ
小森 恭司

アルティミット工法協会
大阪事務局技術担当
(機動建設工業術土木本部・次長)



1 はじめに

アルティミット工法は、長距離・急曲線を高精度に推進できる工法として開発され、1991年に施工を開始して以来、2024年3月末での累計推進延長が290kmを超えました。近年は、過密化する市街地での道路事情に対応した長距離推進や急曲線推進、輻輳した地下埋設物を避けるための大深度推進、水平および鉛直方向の曲線を含む3次元曲線推進など多岐にわたる要望に応えてきました。

本稿では、アルティミット工法の長距離推進と曲線推進について、施工事例を交えて紹介します。

2 アルティミット工法の概要

2.1 長距離推進

長距離推進とは、(公社)日本推進技術協会の「推進工法体系I推進工法技術編」において、「1区間の掘進延長が呼び径の250倍を超えた場合、または500mを超えた場合」と定義されています。また、呼び径2000未満の施工については、同工法体系Iでは施工効率の低下、坑内(推進工法用管内)作業環境の悪化、緊急時の避難行動の制約等を考慮して、推進工法用管呼び径の500倍(500D)までとすることが望ましいとあ

わせて規定されています。このような長距離推進施工においては、通常の条件下に比した推進抵抗力の低減方法、推進精度確保のための測量方法、推進工法用管内作業の制限等を検討し、考慮する必要があります。

アルティミット工法は、特殊装備による周面抵抗力の低減や管内作業の自動化システム等を付加することにより、長距離推進を可能としています。

(1) アルティミット滑材注入システム ULIS

掘進機直後の推進工法用管から拡幅掘削量の全量を一次注入によりクリアランスを充填し、さらに二次注入で、推進工法用管外周全域に万遍なく高粘性滑材アルティー K を充填する2段階の滑材注入システムによって、周面抵抗力の低減を図るとともに、地山の緩みを防止します。これらの滑材注入は、アルティミット滑材注入システム(Ultimate Lubricant Injection System、以下、ULIS)により注入量、注入圧力および注入位置を集中制御し、完全に自動化されています(図-1、写真-1)。

二次注入は、周辺地盤への逸失および希釈により滑材効果が低下するのを防ぐ目的でアルティー K 使用の場合、一次注入孔設置個所より後方50m毎に注入孔を設置し、一次注入量の20%を各注入孔へ均等に注入することを原則としています。アルティミット工法では、このULISを使用することを条件として、独自の推進力算定式を提案しています。

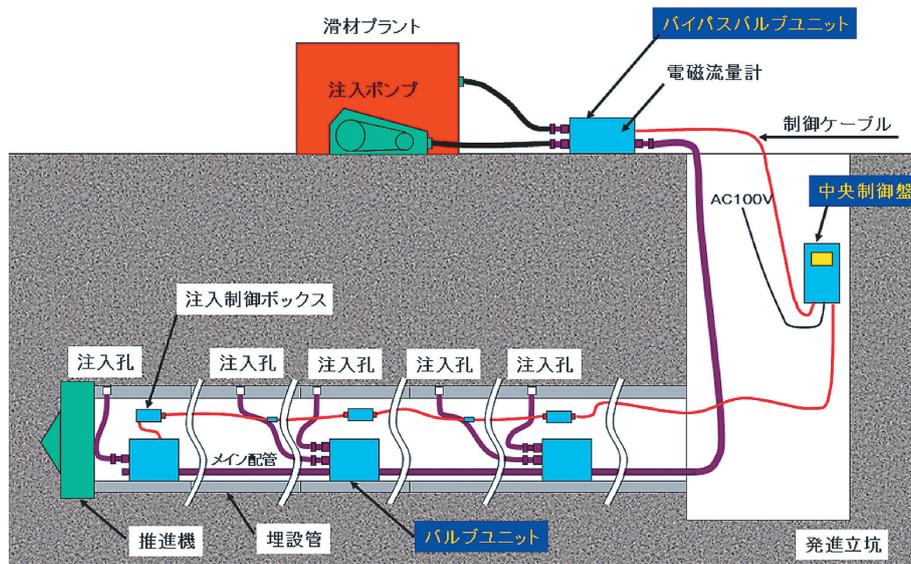


図-1 ULIS概要

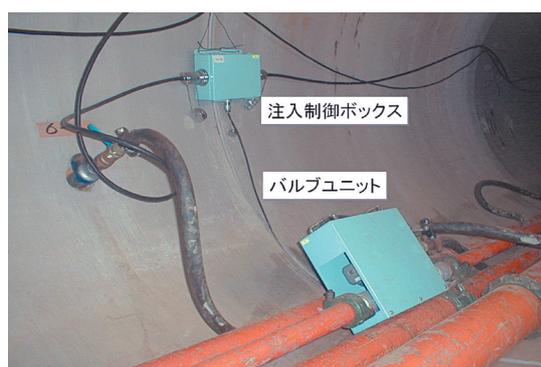


写真-1 ULIS管内設備

(2) 特殊拡幅リング

アルティミット工法に使用する掘進機は、カット直後の胴殻に溝を切った特殊拡幅リングを装備しており、特殊拡幅リングで地山と推進工法用管にクリアランスを造成し

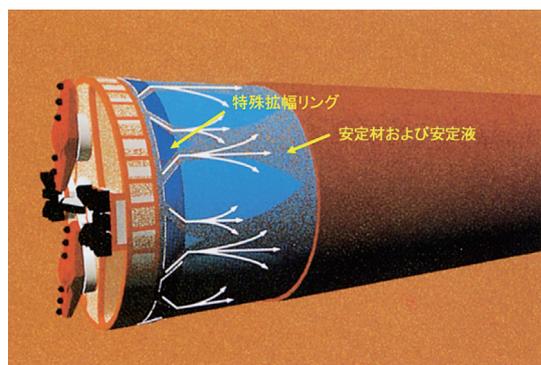


図-2 特殊拡幅リング

ます。泥水式では、掘進機前面から泥水安定液の一部が特殊拡幅リングの溝を通して推進工法用管周辺のクリアランスに充填されます。土圧式では、掘進機前面に注入した添加材の一部が特殊拡幅リングの溝を通して推進工法用管周辺のクリアランスに充填されます。このように泥水式・土圧式ともに、特殊拡幅リングと泥水(安定液)や添加材の働きにより第一段階の周面抵抗力の低減を行います(図-2)。

2.2 曲線推進

曲線推進を安全にかつ高い精度で推進するためには掘進機による曲線造成および、管列の追従性確保、継手の端面の破損防止を管理することが必要です。曲線対応掘進機やセンブラカーブシステム等により曲線推進に対応しています。

(1) アルティミット急曲線掘進機

アルティミット工法の急曲線推進では、推進工法用管呼び径の50倍未満の曲線半径を含む施工を可能としており、掘進機の曲線造成性能・曲線精度保持および推進工法用管の追従性などを考慮し、急曲線の造成には、従来の方向制御ジャッキに加え、曲線造成補助ジャッキを設置した多段方向制御方式を採用しています(写真-2)。



写真-2 多段方向制御方式を採用した急曲線対応掘進機の一例

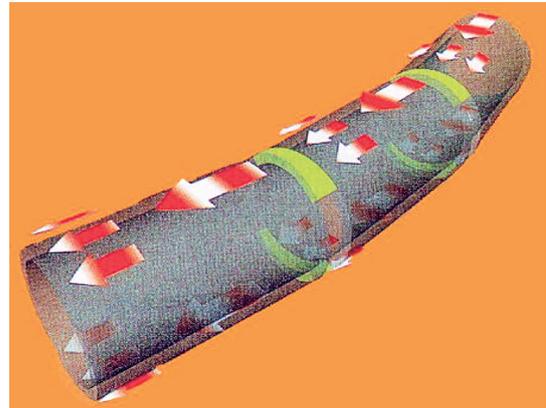


図-3 センプラカーブシステムのイメージ

(2) センプラカーブシステム

推進工法用管列の追従性確保と管端面の破損防止には、センプラカーブシステムを採用しています。センプラカーブシステムは、管の継手部に低発泡ポリエチレンによる推進力伝達材（FJリング、センプラリング等）を上下に設置することにより、広い範囲で推進力を伝達し曲線区間でも伝達推進力の作用点を管中央へ近づけることにより、掘進機の造成した曲線に正確に推進工法用管を追従させるものです。このシステムは、曲線推進における汎用的な推進力伝達システムとして現在の曲線施工を支える基本技術となっています。センプラカーブシステムは、目地開口保持の特別な作業が不要なため、曲線部の施工速度が向上します（図-3）。

(3) センプラシミュレーション

センプラカーブシステムにおいては、継手に設置する推進力伝達材と曲線部の推進工法用管の継手および管種等を、すべての箇所の最適な組み合わせを自動的に設定するシミュレーションソフトにより検証しています。計画段階においては、安全で経済的な管と推進力伝達材の組み合わせを短時間にかつ自動的に選定することができます。

また、推進力伝達材に発生している応力の分布と推進力伝達合力位置を図示することにより、推進力伝達材の本来の適用目的である応力分散および推進力の作用点を管中央へ近づけるということがなされているか判断することができるように工夫されています（図-4）。

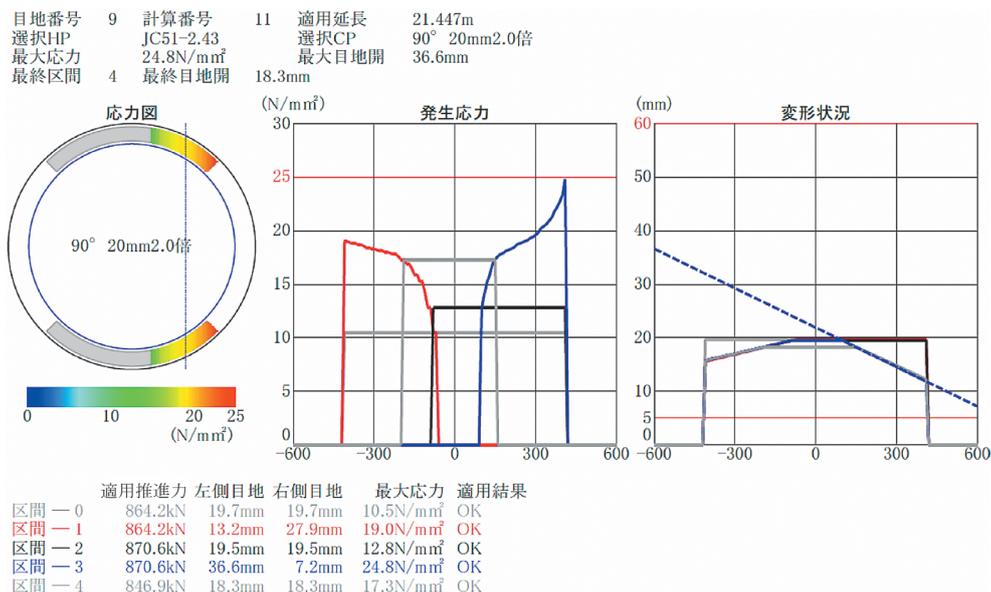


図-4 センプラシミュレーションの選定結果

(4) 急曲線用特殊継手

特殊継手とは、推進工法用管の有効長が管継手部分と同程度の推進工法用管で、推進工法用管列に急曲線推進用特殊継手を推進工法用管と交互に配置することで、継手1箇所当りの折れ角を小さくすることができるため、同一の有効長の推進工法用鉄筋コンクリート管でも、さらに小さな曲線施工が可能となり、高価な合成鋼管（鋼・コンクリート合成管）の短尺管を使用しなくても、通常の推進工法用鉄筋コンクリート管と急曲線推進用特殊継手の組み合わせで経済的な施工が可能になります（図-5、写真-3）。

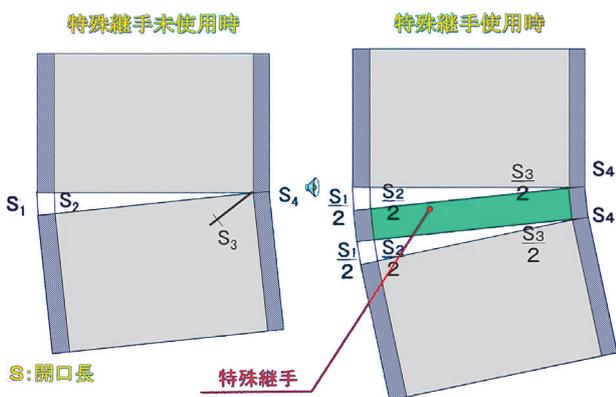


図-5 急曲線用の特殊継手



写真-3 特殊継手使用時の管内状況

2.3 中央集中管理システム

掘進機の遠隔操作方式とリアルタイム計測システム（ジャイロコンパス等の計測装置）により、随時に掘進機の位置・姿勢制御が可能となり、掘進機が集中管理できます。また、ULIS、自動測量システムの選択により、管内作業を軽減できます。

(1) リアルタイム計測システム

ジャイロコンパスを掘進機先端に搭載して、その出力を常時観察することにより、掘進中の掘進機の向きを把握し施工管理を容易にします。また、縦断方向の監視としては液圧差レベル計を掘進機に搭載することで掘進機の高さを常時把握することができます。これらの計測システムを使用し常時監視するのがリアルタイム計測システムです（写真-4、5）。

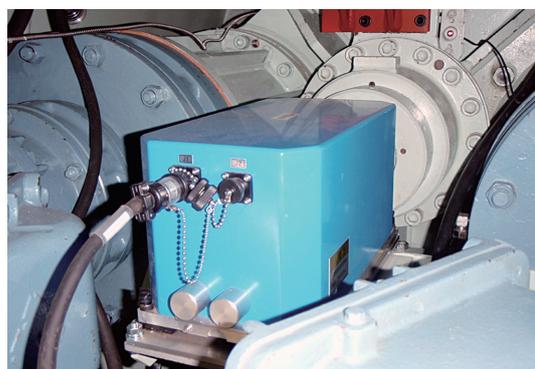


写真-4 ジャイロセンサ設置の機内



写真-5 リアルタイム測定結果を示すジャイロモニタ

(2) 自動測量システム

自動測量システムとは、推進工法用管内に自動追尾式トータルステーションを複数配置しての自動計測により計測時間を短縮し、より精度の高い曲線施工管理を行うことを目的としたものです。推進工法では管列の位置が常に移動するため、1本推進ごとに測量する場合常に発進立坑から掘進機までを測量する必要があります。曲線施工では、測量時間による日進量低下と狭い中での測量作業のため発生する誤差の問題を解消するものとして自動測量を導入しています。現在使用されている

ものは「ICT推進工法研究会」の自動測量システムです（写真-6）。

推進工法の曲線測量は開放トラバース測量になりますので、発進立坑からの方向誤差は推進延長が長くなるにつれて増大していきます。この自動測量システムでは発進立坑の親測量機はできるだけ読み取り精度がよいものを使用しています（写真-7）。

自動測量の結果は立坑のオペレータに表示され、測量結果やジャイロ等のデータも確認できるようになってお



写真-6 推進管内に設置した自動測量管内機



写真-7 発進立坑に設置した自動測量立坑機



写真-8 立坑オペレータに計測結果を示す自動測量モニター

り、将来に向けての方向制御の自動化や遠隔管理への取り組みがなされています（写真-8）。

3 推進力検証と新しい曲線施工への取り組み

アルティミット工法として施工した推進工事の事例において、アルティミット工法協会の設定した計算式による推進力と実際の推進力を検証して紹介します。また新しい取り組みとして、水平方向の曲線と縦断方向の曲線を両方ある線形（3次元推進）へ対応するため、縦断曲線と水平曲線に対応した新しい推進力伝達材のシミュレーション計算のモデルについて紹介します。

3.1 推進力の検証

アルティミット工法における周面抵抗力は、今までの施工実績に基づいた計算式により周面抵抗を算定しています。施工例において、計画時の周面抵抗力と実際の推進力を確認します。

(1) 施工事例1

呼び径：1000

推進延長：612m

掘進土質：一部礫を含む砂質土

計画 F_0 ：193kN

計画 f ：5.41kN/m

計画推進力3,501kNに対して、最大の推進力は1,500kN程度とかなり計画値よりも少ない推進力でしたが、先端抵抗力（発進して間もない推進力から想定）や推進開始から200m程度間の推進力は計画推進力とほぼ同じでした（図-6）。

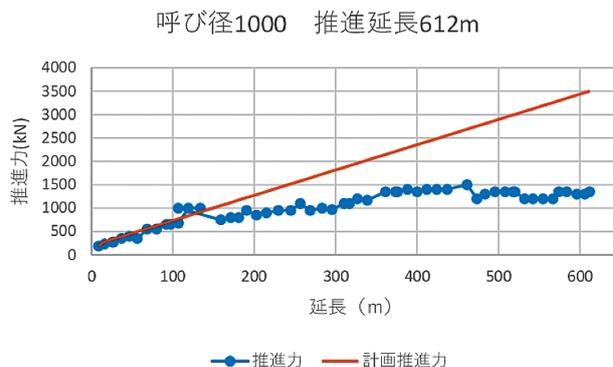


図-6 呼び径1000 推進延長612mの計画推進力と実際の推進力

(2) 施工事例2

呼び径：1200

推進延長：464m

掘進土質：砂質シルト

計画 F_0 ：705kN

計画 f ：9.34kN/m

計画推進力4,939kNに対して最大の推進力は2,300kN程度の計画より、低推進力施工が終わりました。推進力図によると先端抵抗力は計画と実施の差はなく、周面抵抗は全体として計画値の50%程度になりました(図-7)。

過去の施工事例より推進延長が長くなった場合、計画推進抵抗より低い値で施工ができています。しかし、現状では推進中断時等の推進力増大のリスクがあるため、計算上の推進力を小さく算定する計算式を用いるのではなく、現在の算定方法を継続していきます。

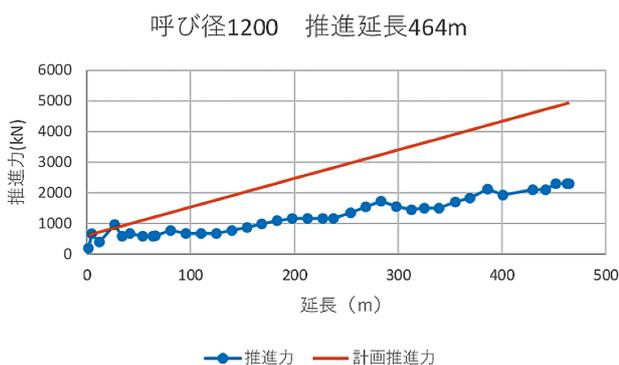


図-7 呼び径1200 推進延長464mの計画推進力と実際の推進力

3.2 推進力伝達材計算

曲線施工時の推進工法用管端面には推進力伝達材が設置され、その推進力伝達材が推進力によって圧縮される圧縮応力度を管の軸方向圧縮応力度として管理しています。

(1) 計算モデル

曲線区間では、推進力伝達材に発生する応力はそ

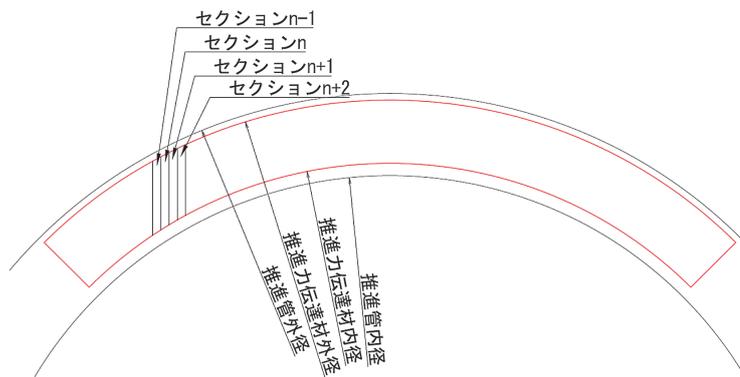


図-8 平面計算モデル(従来)

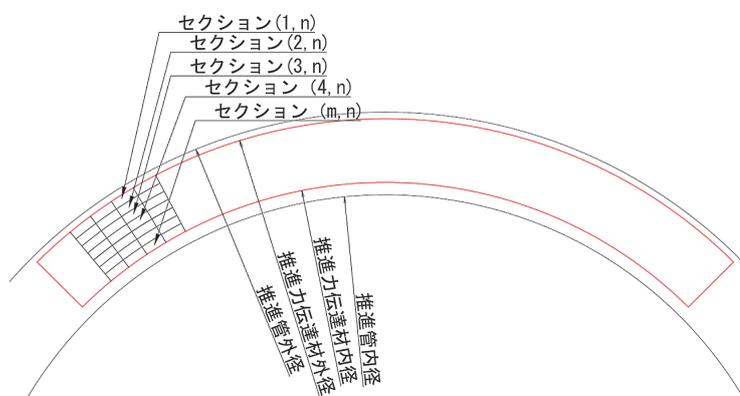


図-9 縦断平面計算モデル

の変形具合により変化します。そのため「推進工法体系Ⅱ計画設計・施工管理基礎知識編 2023年度版」((公社)日本推進技術協会) P126～131で示されているように、推進力伝達材を短冊状に切断したモデルにおいて各セクションの応力が計算されてきました(図-8)。

縦断曲線を含んだ曲線推進においては上記計算モデルでは対応できないため、アルティミット工法協会では縦方向に短冊状に切断するモデルから推進力伝達材を小さな扇型のセクションに切断するモデルに変え、縦断曲線および水平曲線、さらに縦断と水平が同一位置での複合した曲線に対応できるようにしました(図-9)。

(2) 計算結果

図-10は呼び径1000において、縦断曲線 $R=400\text{m}$ と $R=300\text{m}$ および水平曲線 $R=300\text{m}$ と $R=400\text{m}$ の線形の計算例を示します。先頭から35本目の推進力伝達材が各BCやEC通過時にかかる応力を示しています。推進力伝達材のどの位置にどれくらいの応力が発生しているかを色により図示しています。

目地番号	35	計算番号	35	適用延長	85.145m
選択HP	JA51-2.43	選択CP		選択CP	90° 20mm2.0倍
最大応力	24.0N/mm ²	最大目地開	14.4mm	最大目地開	21.1mm
最終区間	6	最終目地開	14.4mm		

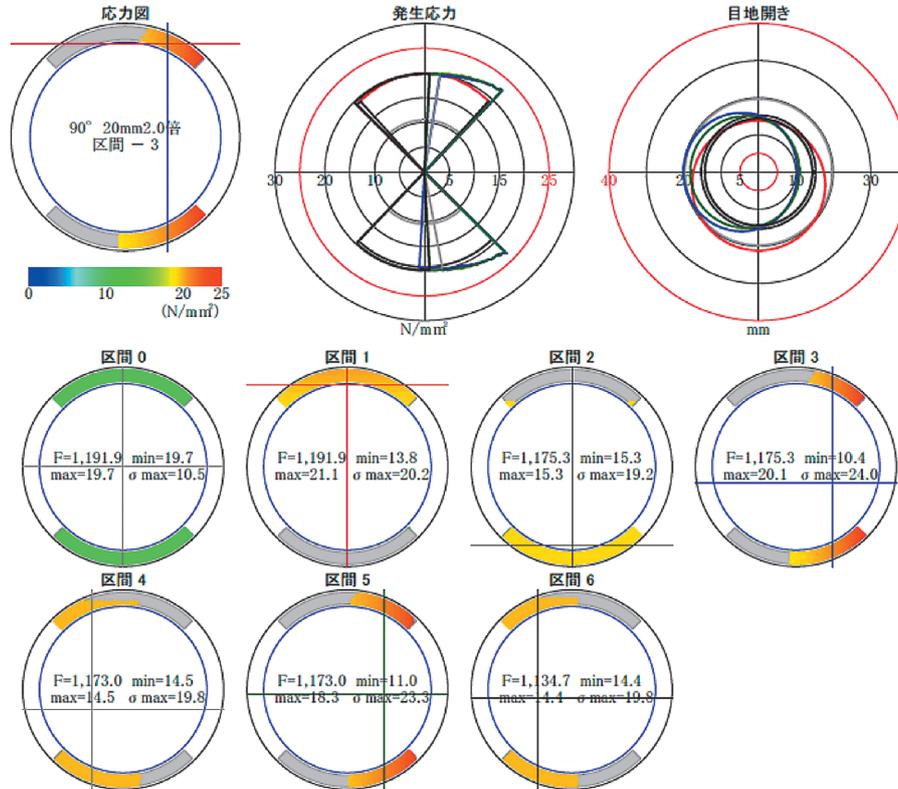


図-10 縦断を含む計算結果

4 おわりに

本稿では、推進工法の適用分野の拡大として、長距離推進と曲線推進に対するアルティミット工法の取り組みと事例を紹介しました。長距離推進と曲線推進では、測量や施工管理について坑内にての作業が発生します。坑内作業をさらに軽減できる工法となるように、今後の技術開発に努めていきます。本稿が、推進工法の適用分野拡大の一助になれば幸いです。

○お問い合わせ先

アルティミット工法協会

[東京事務局]

〒101-0035 東京都千代田区神田紺屋町 38

(エスポワールビル6F)

Tel : 03-5289-4774 Fax : 03-5294-1281

[大阪事務局]

〒553-0003 大阪市福島区福島4-6-31 機動ビル

Tel : 06-6458-7087 Fax : 06-6454-0274

E-mail : info.ult@ultimate-method.jp

https://www.ultimate-method.jp

