

解説

岩盤掘進に挑む CMT工法の特徴と施工事例

たなか もとき
田中 基紀
CMT工法協会
会長



おかむら みちお
岡村 道夫
CMT工法協会
広報部長



1 はじめに

推進工事は、大口径化、長距離化、急曲線施工等の高い技術力が要求され、改築推進工法や既設構造物への直接到達工法も実績をあげている。約40年前の推進業界は過酷な環境下における手掘り推進から機械推進への変換期であり、岩盤推進には課題が多く掘進機の開発が進展しない状況だった。以来、CMT工法協会はさまざまな課題に対する研究開発に取り組み岩盤掘進機を開発した。

しかし、推進路線の岩盤はすべて均質なものではなく、それを構成する物質とその集合状態、さらに諸作用や運動によってさまざまな不連続面や割れ目を持ち特異な構造を形造っている。破碎帯や断層、地下水、風化度合等を検証する必要がある。一方、掘進機の性能は路線下の岩石のうち、最も力学的強度を有するものに対応しなければならないが、ボーリング調査箇所等が少ないことが多くデータから最大値を予測してのぞまなければならない。また、近年では岩盤推進においても、長距離、急曲線のニーズが増している。岩盤全体と構成岩石の特徴を確実に検証して計画・設計・積算しなければならない。

本稿では、岩盤の据え方、判定方法および岩盤対応複合掘進機のカッターヘッド、本体性能、ローラビットの

考え方、岩盤推進施工事例などを紹介する。

2 岩盤掘削の概要

2.1 岩盤と岩石

岩盤に関する問題が、土砂地盤以上に難解なのは、土砂地盤に比べて岩盤の地質年代は比較できないほどに古く、理解するために必要な知識が非常に広範囲にわたるためである。

日本列島の岩盤の特徴は固結度は高いが大小さまざまな割れ目が多く、異方性も顕著で力学的にも複雑なものが多い。また岩石が複雑に変形変質して存在している。

岩石と岩盤の最大の違いは、強度を表す値が不均一で部位によって大きく異なることである。これは岩盤の多くには不連続面や亀裂が含まれるのに起因する。岩盤は不連続面・割れ目と岩石の複合材料であり、健全な岩盤の力学特性は、岩石試験により詳しく知ることができるが、不連続面の力学特性を知るための計測技術は未だ不十分な点が多い。地質学的な不連続面とは層理・節理・断層・破碎帯・亀裂・ひび割れ等である。

岩石は、生成過程により、火成岩、堆積岩、変成岩の3つに大別される。

(1) 火成岩

マグマの上昇かん入、それに引き続く冷却固結という

過程でできた岩石の総称。花崗岩、班レイ岩、流紋岩、安山岩、玄武岩等。

(2) 堆積岩

主に礫・砂・泥・生物の遺骸で構成される。また、火山活動に関連して生成される火山性堆積岩がある。中・古生代の堆積岩が硬岩と呼ばれ、第三期が軟岩といわれている。礫岩、砂岩、泥岩、頁岩、石灰岩、チャート等。

(3) 変成岩

既存の岩石が、地下深部で強い加熱、圧縮、変形などの諸作用を受けた結果、鉱物組織や配列状態が変化したもの。熱変成岩、広域変成岩、動力変成岩、片岩、片麻岩、ホモンフェルス等。

2.2 調査・試験

岩盤の判定の指標は、岩質、地下水の影響、不連続面の状態・間隙、ボーリングコアの状態、RQD、弾性波速度等が挙げられる。

(1) 広域調査

数kmの範囲で基盤構造、基盤岩名称、構造線、褶曲基盤の形を推定するために等高線の入った地形図をもとに検証する。

(2) 局地調査

地形、河川と山の相対的位置関係、天然の池、河川の玉石、露頭の岩質・傾斜、節理の方向の観察が重要になる。岩山の谷には巨礫がある場合が多く、天然の池が散在しているところは断層があることが多いといわれている。

(3) 岩石の物理的・力学的特性試験

および弾性波速度の測定

物理的特性としては、比重・空隙率・吸水率がある。岩石の単位体積重量は、およそ1.4～2.9程度の範囲に分布するが、固結度の低いものほど小さな値を示すことになり、堆積岩では地質年代が新しいものほど値が小さい。したがって、単位体積重量が小さいと強度が低くなる傾向を示す。固体粒子成分（鉱物）の比重は、2.6～3.4の範囲にあり、単位体積重量ほどの変化はない。単位体積重量の変化は、岩石の間隙の多少が大きく関係する。空隙率は新鮮な火成岩で0.5～1%、堆積岩で3～20%で地質時代の新しいものほど空隙率は大きく

なる。

岩石の力学的特性を考える場合は、3つの応力を考える。

圧縮応力：岩石の体積を縮ませるように作用する力

せん断応力：岩石の内部に生じる、平行方向にすべらせるように作用する力

引張応力：岩石に割れ目や裂け目を作るように作用する力

一般的にボーリングコアによる一軸圧縮強度試験、圧裂引張試験が行われ、超音波試験やRQDが評価の指標とされる（表－1～4）。

表－1 ボーリング方法と調査内容

方法	調査内容
ボーリング位置	岩線傾斜と方向
ボーリング深さ	岩線傾斜と方向、基盤判定
調査内容の選定	岩石名、一軸圧縮強度、圧裂引張強度、超音波速度、RQD

表－2 ボーリングの目的と調査内容

目的	調査内容
岩盤推進区間の決定	岩線調査、半岩半土区間調査、風化帯の厚さ
先端抵抗の算定	一軸圧縮強度、圧裂引張強度、RQD
推進抵抗の算定	一軸圧縮強度、圧裂引張強度、RQD
支圧壁の耐荷力の算定	風化度、RQD
切羽防護の検討	断層、破岩帯、半岩半土区間、RQD
掘進速度の算定	一軸圧縮強度、圧裂引張強度、RQD、節理方向

表－3 ボーリング等調査内容

一軸圧縮強度 2～30MN/m ²	切削・圧壊方式による日進量の算定
圧裂引張強度 5～26MN/m ²	圧壊方式による日進量の算定
RQD 0～100%	圧壊方式による日進量の算定と支圧壁算定
超音波速度試験 3～6km/sec	岩の硬さ、RQDもあわせて判定
弾性波速度試験 2～6km/sec	100m単位の岩盤の硬さの判定

表-4 岩石種類別比重表

火成岩		堆積岩		変成岩	
岩種	比重	岩種	比重	岩種	比重
花崗岩	2.5～2.8	砂岩	1.2～2.7	片麻岩	2.5～2.9
斑レイ岩	2.8～3.2	頁岩	2.5～2.7	結晶片岩	2.6～3.0
安山岩	2.2～2.9	石灰岩	2.5～2.7	大理石	2.5～2.9
玄武岩	2.7～3.2	礫岩	2.1～2.7		
流紋岩	2.5～2.7	凝灰岩	1.8～2.6		

【一軸圧縮強度試験】

整形された供試体の軸方向にのみ圧縮力を加えて行う試験。岩石が硬くなると弾性も大きくなることが多いが、硬くなる過程で潜在的な割れ目が増加するため一軸圧縮強度のバラツキが大きくなる。また、加圧方向と不連続面の方向（直角・水平・傾斜）により計測値がバラツキ、前記の順に強度は小さくなる。

【圧裂引張試験】

岩石供試体を上下に圧縮し左右に離れようとする引張応力を計測する。その異方性の構造方向と引張り力の作用方向の関係が引張強度に著しいバラツキをもたらす。一軸引張強度とほぼ等しい。

圧縮強度 σ_c と引張強度 σ_t との比 $Br = \sigma_c / \sigma_t$ を脆性度として、岩石の「もろさ」の尺度に使われる。岩石の破壊現象は潜在するクラックからはじまって次々とそれが伝搬しクラックが拡大し破断が起こる。脆性破壊とは引張破壊によって生ずるクラック拡大の破壊現象をいう。

【超音波試験】

岩石中を伝播する超音波速度を測定することにより、岩石の弾性波性質を知る試験方法である。岩石が硬く良質になるほど伝播速度は速くなる。しかし、同じ一軸圧縮強度を示す岩石でも、内部構造の違いが伝播速度に差異を生ずる。一般的に、変成岩・火成岩・堆積岩の順で伝搬速度が速い（表-5～6）。

表-5 圧縮強度・圧裂引張強度・超音波伝播速度一例（火成岩）

岩種	圧縮強度	引張強度	超音波速度
	MN/m ²	MN/m ²	km/sec
花崗岩	164	11	4.8
安山岩	250	19.5	5.6
玄武岩	95	5.4	3.6
流紋岩	124	3.7	3.1

表-6 圧縮強度・圧裂引張強度・超音波伝播速度一例（堆積岩）

岩種	圧縮強度	引張強度	超音波速度
	MN/m ²	MN/m ²	km/sec
砂岩	223	17.3	5.5
泥岩	26.3	2	2.3
角礫凝灰岩	181	17.9	4
頁岩	224	11.3	5

【RQD】

ボーリングによって採取したコア1m当りに含まれる10cm以上のコアの積算値が占める割合を百分率で表し、ボーリングコアの破断状態を数量化したもの。岩盤中の割れ目や軟化、変質の程度をコアの状況から間接的に評価する指標。ボーリング設備と技術の良否に影響されることがある（表-7）。

表-7

分類版号	RQD (%)	一軸圧縮強度 (MN/m ²)
A	90～100	500以上
B		
CH	75～90	
CM	50～75	500以下
CL	25～50	
D	0～25	

【弾性波速度試験】

弾性波探査は、ボーリング調査を補完し地山全体の地山性状を簡便に評価する指標として重要視されるが、探査から得られる弾性波速度分布図の評価においては、岩石・岩盤の不連続面の状態・含水比・一軸圧縮強度・拘束圧などの正しい評価を得られなければ誤差が生じる（表-8）。

表-8 地山の地質と弾性波速度 (km/sec)

火成岩		堆積岩		変成岩	
岩種	速度	岩種	速度	岩種	速度
花崗岩	3～5	砂岩	2～5.5	片麻岩	3～6
斑レイ岩	3～6	珪質頁岩	2.5～3.5	石英片岩	3～6.5
安山岩	2.8～4.5	石灰岩	3～6	蛇紋岩	1.5～4
玄武岩	2.5～5	凝灰角礫岩	2.2～3.5		
流紋岩	2～4	珪岩	3～6		

3 岩盤掘進機の概要

CMT複合掘進機の開発コンセプトは①切羽の確保ができること②ビット交換ができることだった。1号機は開放型であったが、2号機より密閉型とし隔壁に切羽点検用バルクヘッド扉を設けた。また、外周駆動を採用し掘進機中央部に空間を設け、作業スペースを確保してビット交換を可能にした。この構造が複合掘進機の最大の特徴で現在に引き継がれ、長距離推進・玉石砂礫・障害物撤去工法に発展した。

岩盤推進は、常にビットの耐久性が取り上げられるが、カッタヘッドの摩耗対策・強度・トルク・回転速度・開口率、掘進機本体およびベアリング強度、押付力の制御・管理方法・安全装置が重要なファクターにあげられる。岩盤が硬いほど強くビット（掘進機）を押し付けなければ破碎できない。

【昭和56年（1981）】

呼び径1350開放型セミシールド1号機（切削型）を開発（写真-1）



写真-1 開放型セミシールド掘進機の1号機

【平成4年（1992）】

呼び径800ローラビット装着型機を開発（写真-2）

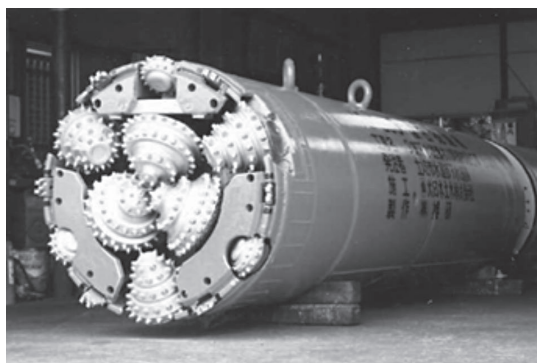


写真-2 ローラビット型掘進機の第1号機

【平成5年（1993）】

現在型の掘進機を開発（写真-3）

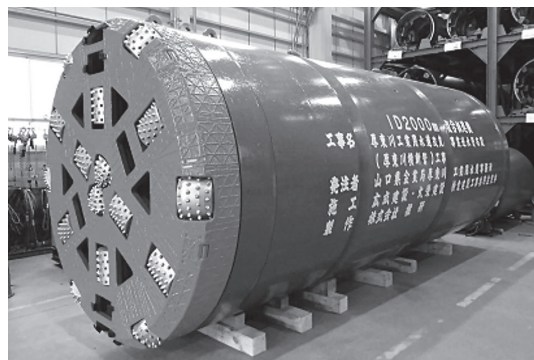


写真-3 現在のローラビット型掘進機

3.1 カッタヘッド

(1) カッタヘッド

複合掘進機は、ローラビットによる圧壊方式を採用しているのでビットを切羽に強く押し付けるために、ローラビットの取付強度が必要になる。センタツーコンを除きローラビットはすべて両端で軸を支持するので取付台座（特殊鋼）の固定が重要になる。取付強度を優先して面板仕様になっている。ただし、岩砕は、ローラの後面からもチャンバに取り込まれ、また、緩み土圧抑制材の効果も相乗して摩耗の進行度合いは少ない。カッタヘッドの摩耗対策として、面板・外板共に超鋼チップを埋め込み、チップの間は硬化肉盛溶接を基盤目状に厚さ3～4mmで行っている。

(2) カッタトルク

掘削必要回転トルクは、ビット形式によって異なるが、

- ・ビットの切削抵抗 — 切込み深さ
- ・岩石の強度 — 圧縮引張強度、RQD等
- ・押付力
- ・岩砕のかき上げ抵抗
- ・摩擦抵抗 — 前方、側面、ベアリング、シール等
等によって決定する。

中口径の掘進機に搭載される原動機にはおのずから大きさに制限があり、中央の空間を確保するために小形化された特殊モータを開発した。カッタトルクは、トルク係数によって評価される。

$$a = T/D^3$$

a : トルク係数

T : 装備トルク (KN/m)

D : 掘進機外径 (m)

トルク係数は、掘進機外径や土質によって異なるが、

土圧式 $a = 10 \sim 25$ 程度

泥水式 $a = 8 \sim 20$ 程度

とされている。岩盤掘進には、上記以上の a 値が望まれる。 a 値だけで掘削能力を評価できないが、複合掘進機は $a = 25$ 以上を標準仕様としているので巨礫地盤等にも対応可能である (表-9)。

表-9 複合掘進機掘削諸元

呼び径 mm	カット用原動機				外周速度 m/min
	電動機 kW×台	回転数 rpm	トルク kN・m	トルク係数 a 値	
800	7.5×4	4.9	50	50.0	15.39
900	7.5×4	4.4	58	41.3	15.48
1000	11×4	4.6	80	42.0	17.92
1100	11×4	4.3	86	35.0	18.24
1200	11×4	3.9	92	29.0	18.01
1350	11×4	3.5	108	24.5	18.03
1500	11×6	3.1	183	30.4	17.72
1650	11×6	2.9	194	24.6	18.13
1800	11×10	3.1	300	29.8	21.04
2000	11×10	2.7	335	24.5	20.27

(3) 回転速度

カット回転速度は、カットヘッドの最外周速度を基準に設定される。一般的には、 $V = 15 \sim 25 \text{m/min}$ の範囲で設定される。

ローラビットを使用した石油井掘削ボーリングマシンのように岩盤掘削は高速回転が有効であるが、カットトルクは回転数に反比例するので回転数は制限される。また、掘進機 (呼び径 800 ~ 2000) のローリングにも注意が必要になり $V = 15 \sim 20 \text{m/min}$ としている。

(4) 開口率

開口率は、カット開口面積をカットヘッド総面積で除したものである。基本的に岩盤推進は切羽の防護を必要としないので開口率を大きくとる。岩砕岩粉の回収率が

悪ければ、ローラビットのチップ・母材・カットヘッドの摩耗につながり、また、岩砕岩粉がテールボイドに残留すると推進抵抗が増大し推進管にひび割れを起こす原因となる。

複合掘進機は、ローラビット取付強度を優先するために面板仕様になっているが、固定スリットの他に脱着可能な開口を設けている。半岩半土部対応など開口率を調整できる機構になっている。岩盤に節理や割れ目がある場合に岩盤が大割れすることがあるが、機内に $\phi 150 \text{mm}$ 程度の岩塊を処理できるクラッシュフィーダを標準装備している。

3.2 カットビット

開発当初は、切削方式 (スリットカッタ) でスタートしたが、必要回転トルク、ビット形状、チップの硬さ等を模索する中で、切削試験機を製作して様々な岩石に対して掘削効率を上げる実験を繰り返し、必要回転トルク・ビット形状を試作した (写真-4)。

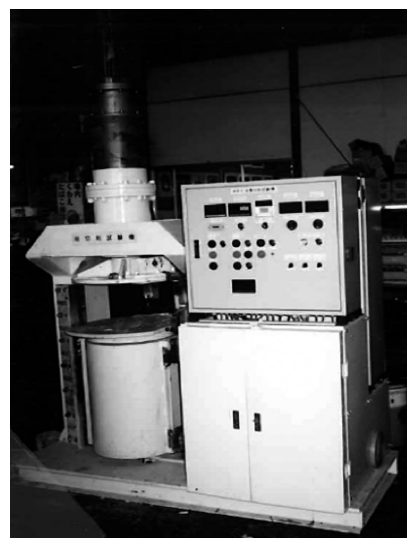


写真-4 切削試験機

(1) 種類

複合掘進機は、一軸圧縮強度 20MN/m^2 以下を切削方式 (スリットカッタ)、それ以上をローラビットによる圧壊方式を採用している (表-10 ~ 12)。

岩強度が増せば、掘削機構は切削方式から効率にまさる圧壊方式に移行し、中口径ではカットヘッドの低速回転にあわせたローラビットによる低速回転型の静的集中荷重による圧壊方式となる。圧壊方式は、静的集中荷

表-10 掘削方式とビット形式

掘削機構	ビット形式	岩強度 (MN/m ²)	押付力 (kN/m ²)	
			ビット	カット全体
切削方式	スクレーパカット	圧縮10以下	60～180	120～350
	スリットカット	圧縮30以下	20～60	70～200
圧壊方式	ディスクカット	引張15以下	400～900	550～1,200
	ローラカット	引張30以下	150～300	300～600

表-11 ローラビット仕様

呼び径1000	列数	列数
	チップ径	チップ径
ゲージカット	2列×2	3列×2
	φ25mm	φ20mm
パス	両サイド4パス 中2パス	
軌跡中心距離	20mm	
フェースローラ	4列×4+補助	—
	φ20mm	—
パス	1パス	
軌跡中心距離	20mm	
呼び径1800	列数	列数
	チップ径	チップ径
ゲージカット	4列×3	5列×3
	φ25mm	φ25mm
パス	両サイド6パス 中3パス	
軌跡中心距離	25mm	
フェースローラ	4列×8	—
	φ25mm	—
パス	1パス	
軌跡中心距離	25mm	

表-12 掘進速度 (mm/min)

一軸圧縮強度 (MN/m ²)	50 未満	50～100 未満	100～150 未満	150～200 未満
呼び径				
1000	14.9	11.8	7.6	5.0
1500	11.6	9.2	5.7	3.1
1800	10.8	7.9	5.0	2.8

重によって岩盤表面に圧縮強度の約10分の1と小さい引張強度によりひび割れ破断を起こさせ破碎していく方式である。各チップにより岩を圧壊し、その周辺も徐々に割裂破碎が進行し切羽全体が破碎される（図-1、2）。

(2) 材質

切削ビット・ローラビットのチップ材質は、鉱山工具用超鋼焼結合金（JIS M 3916）が一般的に採用される。

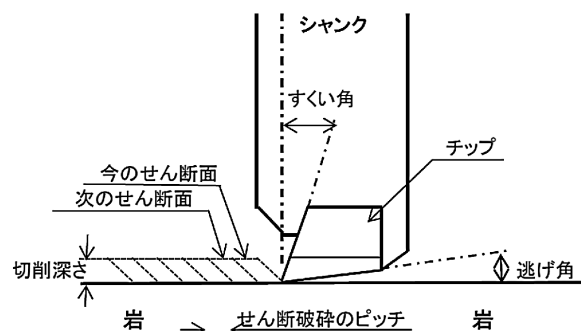


図-1 切削ビット

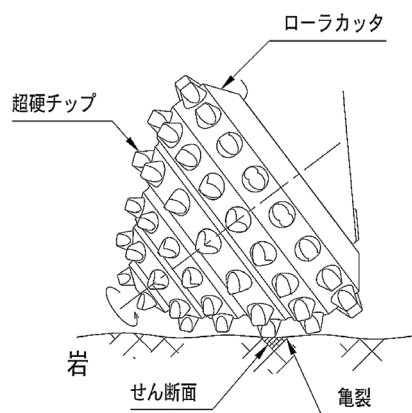


図-2 ローラビット

チップは、抗折力が比較的高く耐衝撃性に優れる「E5種」が用いられる（表-13、14）。圧壊された切羽面は、凹凸面であり「E3種」以上を選定すると衝撃により割れ・折れによるチップの破損が生じる。

表-13 超硬チップ 硬さと抗折力 JIS M 3916

分類記号	(硬さ) ロックウェル Aスケール	抗折力 kgf/mm ² (MN/m ²)
E1	90 以上	120 以上 (1177)
E2	89 以上	140 以上 (1373)
E3	88 以上	160 以上 (1569)
E4	87 以上	170 以上 (1667)
E5	86 以上	200 以上 (1961)

表-14 岩質別 HRAと一軸圧縮強度

岩質区分	(硬さ) ロックウェル Aスケール	一軸圧縮強度 kgf/mm ² (MN/m ²)
軟岩	63 以下	500 以下 (49 以下)
中硬岩	63～77	500～1200 (49～117)
硬岩	77～85	1200～1700 (117～166)
最硬岩	85 以上	1700 以上 (166 以上)

--	--

チップを圧入固定する母材の材質も重要で母材の摩耗進行が速ければ、歯槽膿漏のような状態になりチップが抜け落ちるので、母材の材質には特殊鋼（SNCM等）が用いられる。

(3) 摩耗

ビットの摩耗に伴い掘削抵抗は増し掘進速度が低下するだけでなく、外周ビットの摩耗によって断面の仕上がり寸法に重大な誤差が発生し、推進抵抗が著しく増加し推進管の破損につながる。

摩耗量の予測算定式の一例としては、下記で算定される。

$$\delta(\text{最外周摩耗量}) = K \cdot \text{入} = K \cdot D \cdot N \cdot L / V$$

K：摩耗係数（mm/km）

入：摺動距離（km）

D：掘進機外径（m）

N：カット回転速度（rpm）

L：掘進距離（km）

V：掘進速度（m/min）

しかし、岩盤掘削において、この摩耗係数の決定が難しい。基盤岩の岩種・生成年代・造岩鉱物・岩強度・RQDなどを検証して決定しなければならない。また、ボーリングコアサンプルが対象岩盤の最大値である保証もない。岩石は、粒子構造的にも不均質であり、チップがあたる岩石表面は圧壊された凹凸面なのでチップの岩石接触面は部分的で偏心荷重になりやすく、位置・面積・方向が毎回変わりチップの摩耗や損傷を増加させる原因となる。

切削条数を増やすと、切込み深さが少なくなりビットへの負荷が軽減されたり、ビット周囲の岩碎の流れと取り込みをよくすることが摩耗に対する有効な対策になることは知られているが、限られた中口径機においてはすべてを網羅することは難しい。

CMT工法協会では、積算参考値として標準交換延長を岩盤の圧縮・引張強度により決めている。標準交換延長とは、耐用延長ではなく推進能率低下の要因となる限界推定延長と据えている。さらに、RQD40%については最大コア長により低減率を定めている（表－15、16）。

表－15 岩盤におけるローラビット（A）標準交換延長（参考値）

RQD	ローラ種別	岩盤強度 (MN/m ²) 上段圧縮／下段引張			
		50未満	50～100未満	100～150未満	150～200未満
		4.0未満	4.0未満	4.0～8.0未満	8.0～13.0未満
20%未満	センタローラ	660	550	420	290
	フェースローラ	550	380	290	200
	ゲージカッタ	440	320	220	125
20～40%未満	センタローラ	600	500	380	260
	フェースローラ	500	340	250	170
	ゲージカッタ	400	260	160	65
40%以上	センタローラ	540	450	340	230
	フェースローラ	450	300	220	140
	ゲージカッタ	360	200	120	45

表－16 岩盤におけるローラビット（B）標準交換延長（参考値）

RQD	ローラ種別	岩盤強度 (MN/m ²) 上段圧縮／下段引張			
		50未満	50～100未満	100～150未満	150～200未満
		4.0未満	4.0未満	4.0～8.0未満	8.0～13.0未満
20%未満	センタローラ	770	640	490	340
	フェースローラ	690	480	360	250
	ゲージカッタ	590	430	290	170
20～40%未満	センタローラ	700	580	440	300
	フェースローラ	630	430	310	210
	ゲージカッタ	540	350	210	120
40%以上	センタローラ	630	520	390	270
	フェースローラ	570	380	270	180
	ゲージカッタ	480	270	160	70

(4) ビット交換

開発コンセプトの「ビット交換」は、切削型・ローラビット型において、切削ビットやローラカッタの台座の固定方法やビットの取付方法は長年改良を加えた結果、現在のほぼ完成形となった。工場では簡単に脱着できてもカッタヘッド・タレット・本体胴がつながった状態の狭隘な空間での取り換え作業は困難を極めた歴史がある。油圧機器を使用しての交換作業は大幅に時間の短縮化が図られた（写真－5）。

岩盤推進では、切羽に地下水が出ないと思われる方が多いが、岩盤には破碎帯や割れ目が多々ある。湧水はどこでもあると考えなければならない。水圧はあるが水量は少ないので強制排水することは可能であるが、管

周に注入した抑制材や滑材が流れてしまうので、坑内圧気をかけてビット交換をすることが望ましい。



写真-5 機内の点検扉

(5) 圧気設備

地下水位下での「切羽の点検」「ビット交換」はCMT圧気システムを使用する。(株)推研の前進である推進研究所時代に開発実用化された圧気システムの改良を重ね設計採用されている。圧気といえば平成2年(1990)に東京で大噴発事故があり一般的に知るところとなったが、すでに事故原因は解明されている。圧気工法は、開放型刃口式推進全盛の初期のころから圧気推進として採用されていたが、密閉型機械推進工法の開発が進み圧気工法の採用が少なくなった。CMT工法では、自社開発の圧気システムを利用して呼び径800から「切羽の点検」「ビット交換」を実現し、岩盤推進だけでなく長距離推進等や障害物撤去に活用している。

①圧気工法の特徴

- 地下水を排水することなく、地下水面下において切羽の安定を図る。
- 周辺に地盤沈下を起さず、近接する構造物や道路に影響を与えない。
- 土圧、水圧による土砂の崩壊や流入を防ぐ効果が理論的に把握できる。
- 設備が比較的簡単である。

②圧気の効果

- 圧気圧により切羽からの湧水を阻止し、切羽の崩壊を防止する。
- 圧気圧自体が山留め作用になり切羽が安定する。
- 圧気で地山が脱水され、土固有の強度を取戻し

切羽が安定する。

③地盤条件

- 粒径が小さいほど圧気効果は大きく、大きくなると効果は減少する。
- 透水係数が小さいほど ($K=10^{-3}\text{cm/s}$) 効果的である。
- 土被り・地下水位・粒度構成・透水係数等により圧気圧・空気消費量が大きく異なる。

④CMT圧気システム

- 給気プロアは1.6×4.0mのユニット型である。
- ユニット内各機器に防振対策を施し、ユニット内側は二重の防音対策により低振動・低騒音を実現した。
- コンプレッサを使用せずに、無給油式ルーツ型プロアを採用して清浄な空気を供給する。
- プロアユニットとロックユニットを搬入設置すると迅速に圧気作業にかかれる(写真-6、7)。



写真-6 プロアユニット



写真-7 ロックユニット

⑤安全対策

周辺・地盤の事前調査を十分行い、施工計画を立て、高圧室内作業主任者（労働安全衛生法に基づく国家資格）のもとに指揮・命令系統を確立し、作業内容などを全作業員に周知徹底させる。

CMT圧気工法の能力は圧気圧0.08MPa以下であるので、（安衛法第88）建設工事計画届（圧気工法）は施工を開始する14日前までに、所轄労働基準監督所長に届ける。圧気圧0.08MPa以上の圧気が必要な場合は、薬液注入等により止水・山留めを行い圧気は補助とする。

ビット交換・障害物撤去等、圧気下の作業においてトラブル・事故等は皆無の実績を誇り、安全な工法であると自負するところである。

3.3 まとめ

以上のように、岩盤推進は対象路線の岩盤の状態、岩石の力学的特性、掘進機のトルク性能、ベアリング強度、カットヘッドの強度、ローラビットの強度・対磨耗耐久性等を総合的に判断して計画しなければならない。CMT工法は点検扉を有することで、地山状況の確認やビット交換が随時に対応できることで不確かな岩盤推進に適応している。

4 岩盤推進施工事例

本稿では、近年施工した大口径管の岩盤推進施工事例を2件紹介する。

4.1 施工事例-1

(1) 工事概要

工 事 名：木屋川工業用水道二条化事業送水管布設（木屋川横断管）工事

発 注 者：山口県企業局西部利水事務所

請 負 者：洋林・関門港湾建設特定建設工事共同企業体

施工場所：山口県下関市菊川町大字上保木字中野から同市菊川町大字上大野字羽室までの間

施工方法：大中口径管岩盤推進工法（CMT工法）
推進管呼び径：2000（HP）

推進延長：L=186m

鋼管敷設工：φ1,800mm（SP）

敷設延長：L=213m

土 被 り：H=8.49～8.93m

土 質：風化石英斑岩（一軸圧縮強度50MN/m²未満）～頁岩（一軸圧縮強度128MN/m²）

線 形：直線

補助工法：圧気工法（ビット交換用）

(2) 工事の特異性と事前検討

本工事は、漏水事故等による非常時にも木屋川工業用水道の安定供給が可能となるように水路の二条化を進める事業で、山口県内の二級河川である木屋川を直線で横断する岩盤推進工事である。推進位置の地盤構成は、発進立坑から68.5mまでは岩盤の一軸圧縮強度が50MN/m²未満の風化石英斑岩で、68.5mから到達立坑までの117.5mが一軸圧縮強度128.7MN/m²と硬質の頁岩となっていた。

本工事においては、頁岩の一軸圧縮強度最大128.7MN/m²、RQD40%以上（最大コア長50～75cm未満）などに対応するために、掘進機の掘削機構は圧壊方式のローラビットを採用した。CMT工法協会の掘進機は、呼び径800からすべての機種に機内からのビット交換が可能な点検扉が装備されており、耐用延長ではなく推進効率低下の要因となる限界推進延長（標準交換延長）でビットの交換を行う方法が採用されている。本工事の岩盤条件をもとに、事前に詳細な検討が行われ、ゲージカットのみの1回交換が計画された。

また、大口径管の岩盤推進であることから、岩盤の切削粉が推進管の外周に回り込まないように、発進当初から塑性流動体である緩み土圧抑制材を充填注入するフローティングシステムを採用した。

さらに、本工事においては、切羽面から湧水があることから、圧気システム（ロックユニット、プロアユニット）を併用してビット交換を行う方法を採用した。

(3) 施工結果

本推進工事は、計画段階から岩盤強度に対応できる掘進機の最適な選定と、緩み土圧抑制材によるフローティングシステムなどの採用により、その課題を解決してト

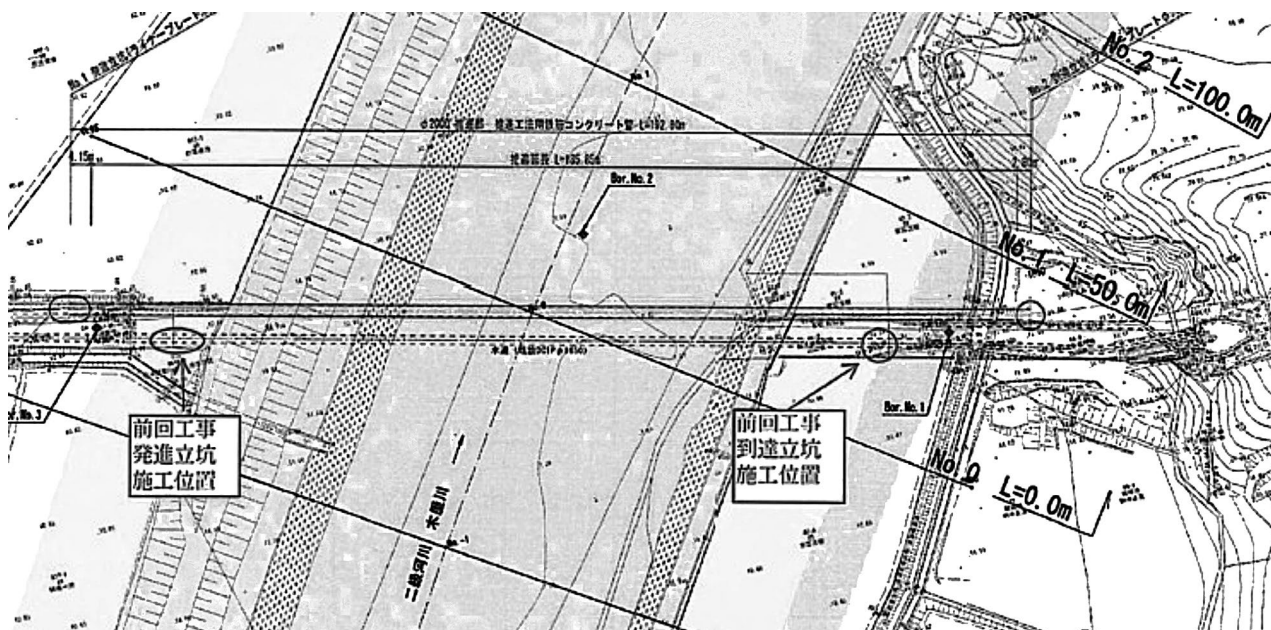


図-3 推進路線平面図

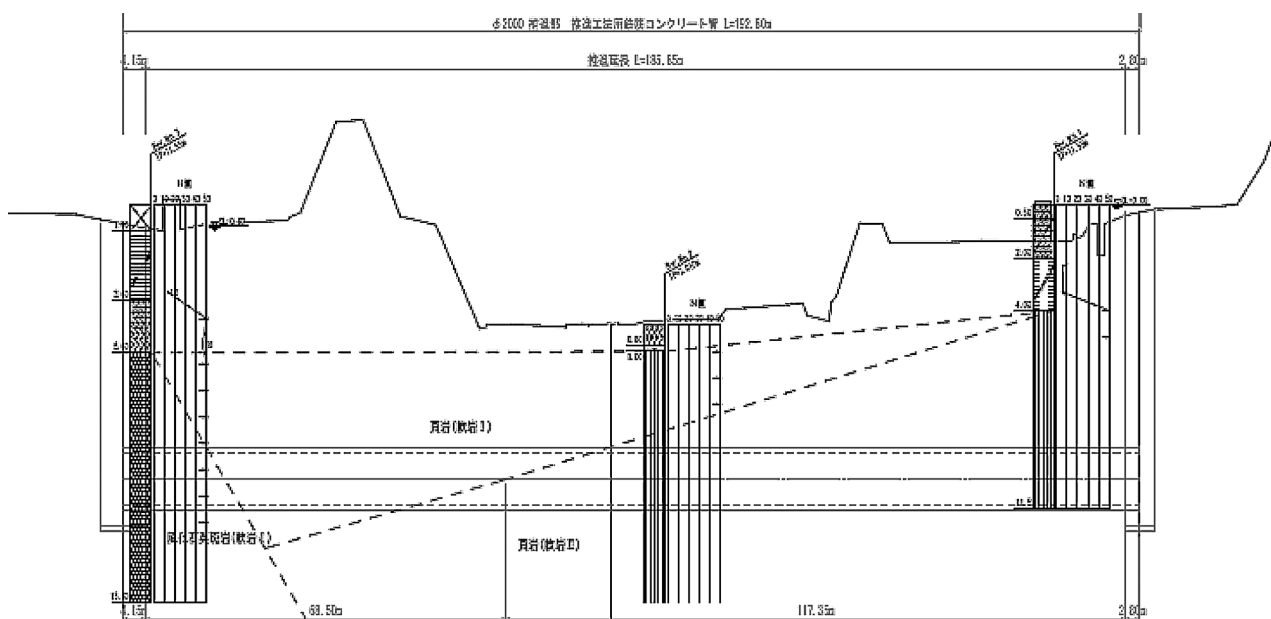


図-4 推進路線縦断縦断面図

ラブルもなく予定した計画工期内で無事岩盤推進を完成した(写真8～11)。

ローラビットは、当初計画のとおり頁岩内切削中に推進効率が低下してきたことから、掘進機内の点検扉から各種ビットの摩耗状況を目視で確認し、消耗が著しかった外周のゲージカッタの交換を行い、以後も効率のよい

岩盤推進で到達できた(写真-12、13)。

また、初期発進時からテールボイドに連続注入した緩み土圧抑制材により、岩盤の切削粉などが推進管外周に回り込むことも少なく、最終推進力も計画推進力に沿った値で推移し、推進工事を完了した(写真-14、15)。

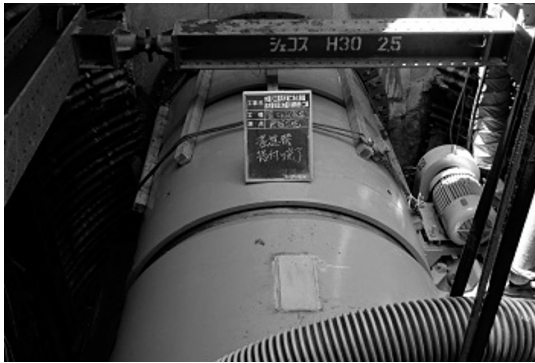


写真-8 CMT掘進機据付



写真-12 ゲージカッタ交換状況

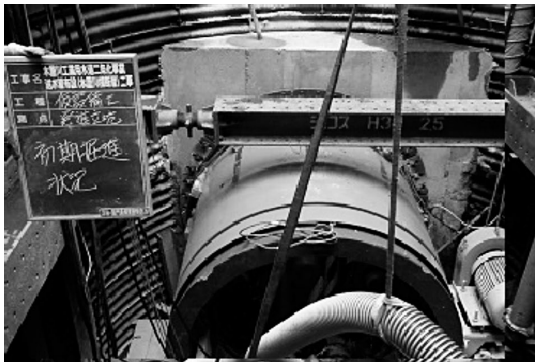


写真-9 初期発進状況



写真-13 切羽部頁岩状況



写真-10 搬出された風化石英斑岩



写真-14 推進施工状況



写真-11 排出された頁岩片

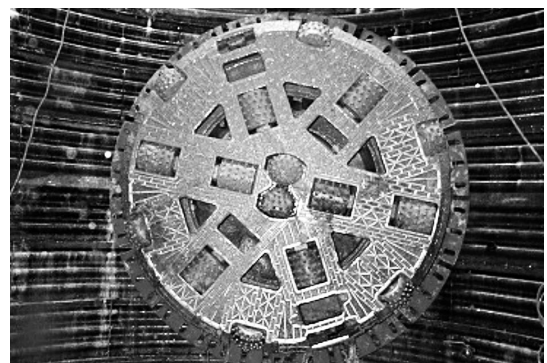


写真-15 掘進機到達状況

5.2 施工事例-2

(1) 工事概要

工 事 名：厚東川工業用水道改良事業送水管布設
(厚東川横断管) 工事

発 注 者：山口県企業局厚東川工業用水道事務所

請 負 者：広成建設・大栄建設特定建設工事共同
企業体

施工場所：宇部市大字吉見字地主平から同市大字
車地字添附までの間

施工方法：大口径管岩盤推進工法 (CMT 工法)

推進管呼び径：2000 (HP)

推進延長：L=116m

鋼管敷設工：φ1,800mm (SP)

敷設延長：L=119m

土 被 り：国道下土被りH=19.4m

軌道下土被りH=18.0m

河床下土被りH=9.3m

土 質：花崗岩 (一軸圧縮強度207MN/m²)

線 形：直線

補助工法：圧気工法

(2) 工事の特異性と事前検討

本工事は、建築後60年以上を経過し、老朽化の著しい厚東川水路橋に代わる新たな送水管を整備するための事業で、山口県宇部市内を流れる二級河川である厚東川、JR山陽本線および国道2号線を直線で横断する岩盤推進工事である。推進位置の地盤構

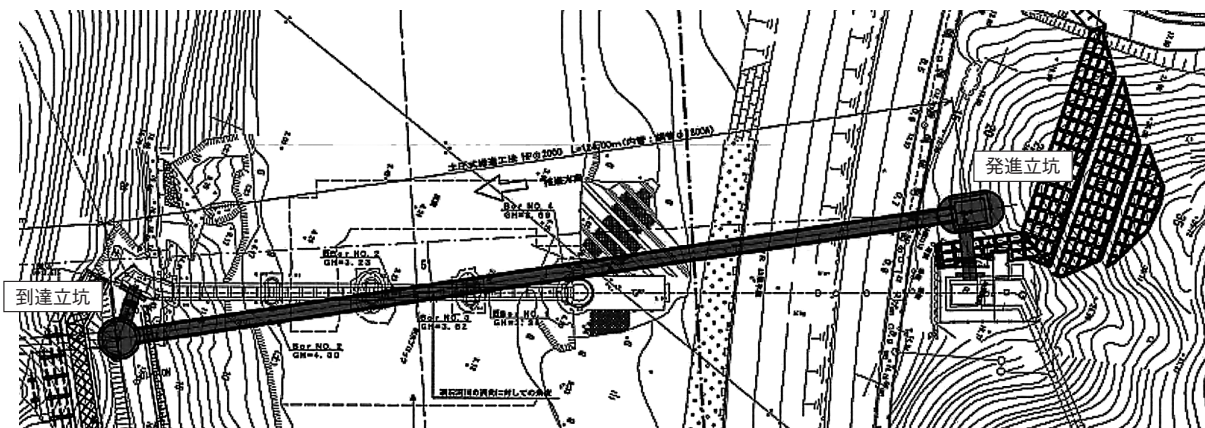


図-5 推進路線平面図

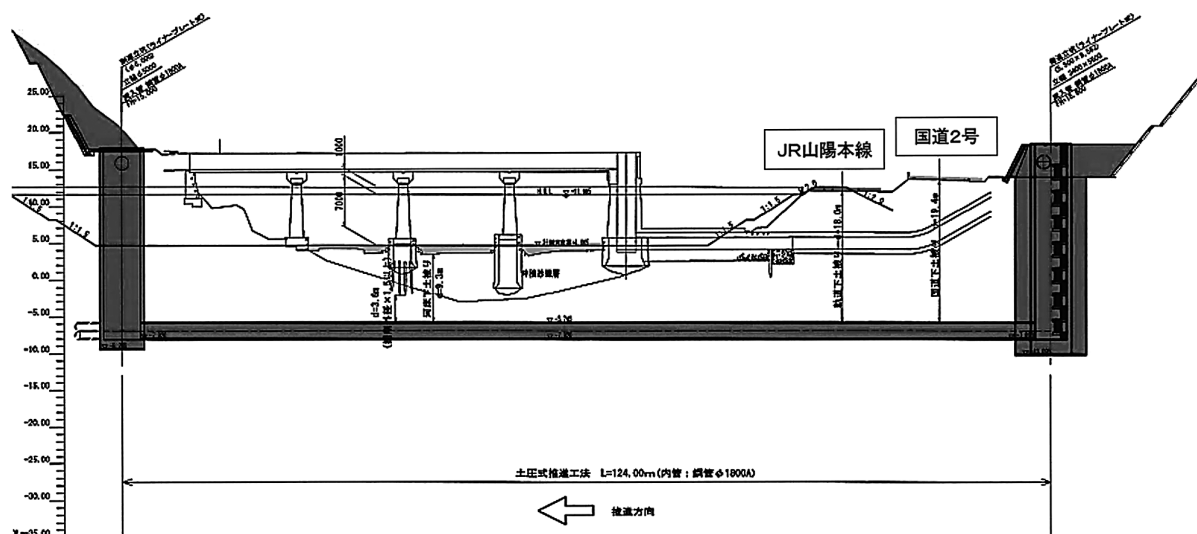


図-6 推進路線縦断面図

成は広島型花崗岩で、一軸圧縮強度は、発進立坑～60.0mまでは 37.8MN/m^2 、60.0～80.4mまでは 173.4MN/m^2 、80.4～101.8mまでは 207.7MN/m^2 、101.8～127.0mまでは 179.8MN/m^2 となっている（写真－16）。



写真－16 立坑部掘削岩片（花崗岩）

本工事においては、花崗岩の一軸圧縮強度最大 207.7MN/m^2 に対応するために、CMT掘進機の掘削機構は、前記した木屋川工事同様に圧壊方式のローラビットを採用した。CMT工法協会の掘進機は、呼び径800からすべての機種に機内からのビット交換が可能な点検扉が装備されており、耐用延長ではなく推進効率低下の要因となる限界推進延長（標準交換延長）でビットの交換を行う方法が採用される。本工事の岩盤条件をもとに、事前に詳細な検討が行われ、ゲージカッタのみの1回交換が計画された。

また、本工事では「施工時期の制限」として、JR山陽新幹線またはJR山陽本線の軌道等の鉄道施設に影響を及ぼす恐れのある工種（立坑工（発進立坑）、管きょ工（推進））は、非酷暑期（10月1日～4月30日）に施工することと、特記仕様書に定められていた。ちなみに酷暑期とは、5月1日～9月30日を指す。

さらに、前記した木屋川工事と同様に、大口径管の岩盤推進工事であることから岩盤の切削粉が推進管の外周に回り込まないように、発進当初から塑性流動体である緩み土圧抑制材を充填注入するフローティングシステムを採用した。

そして、本工事においても、切羽面からの湧水があることから、圧気システム（ロックユニット、プロアユニット）

を併用してビット交換を行う方法を採用した。

（3）施工結果

本推進工事は、計画段階から岩盤強度に対応できる掘進機の選定・効率のよいビット交換と、緩み土圧抑制材によるフローティングシステムの採用によって、その課題を解決してトラブルもなく非酷暑期間内で無事推進施工を完成させた（写真－17、18）。



写真－17 CMT掘進機据付



写真－18 推進施工状況

ローラビットは、当初計画のとおり発進から80m経過した付近から推進効率が低下してきたため、いったん推進を停止して掘進機内の点検扉から各種ビットの摩耗状況を目視で確認して、消耗が著しかったゲージカッタの交換を行い、以後も効率のよい岩盤推進を行って到達させた。

また、初期発進時からテールボイドに連続注入した緩み土圧抑制材により、岩盤の切削粉などが推進管外周に回り込むことも少なく、最終推進力も計画推進力にほぼ同じ値で推移し、推進工事を完了した（写真19～22）。

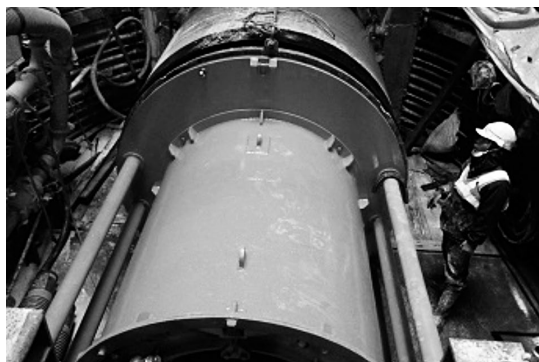


写真-19 ロックマスター設置状況

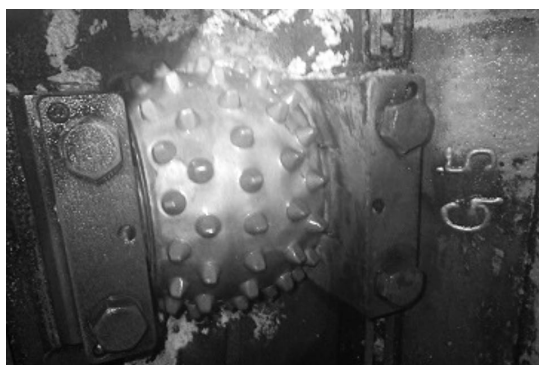


写真-20 摩耗したゲージカッタ



写真-21 ゲージカッタの交換作業状況



写真-22 掘進機到達状況

6 おわりに

CMT工法は、昭和56年（1981）に推進分野において未だ岩盤に対して全断面掘削方式がない時代に、開放型セミシールドのCMT岩盤掘進機を開発し、兵庫県三田市において日本住宅都市整備公団（現（独）都市再生機構）ご発注の第1号工事として、呼び径1350、推進延長218mの2スパンを無事完成させた。以来約40年間、本工法は岩盤・巨礫推進工事の研究開発に取り組み、平成30年（2018）4月末現在までに岩盤推進延長は、80,231mに達している。

当工法協会は、永年にわたって培ってきた知識・経験を活かし、今後も要望される厳しい条件下での岩盤推進に対して挑戦していきたいと考えている。さらに、困難な岩盤推進に挑戦した施工事例の情報についても積極的に提供していくとともに、発注者や施工者の皆様からのご指導をいただきながら、岩盤掘進機メーカーとしてさらなる開発改善に努め、推進工法の発展に微力ながら貢献していきたいと考えている。

執筆者紹介

田中 基紀（たなか もとき）

（株）推研代表取締役社長

岡村 道夫（おかむら みちお）

（株）推研営業部長

【参考文献】

- 1) 「特別寄稿 岩盤に挑む 岩盤・巨礫に挑み続けて30年 岩盤・巨礫推進の基本的考え方と対処方法-本間良治先生の講演論文より-」 野田彰、月刊推進技術 Vol.24 No.5（2010年5月号）
- 2) 「超高強度安山岩転石との遭遇」 木山英郎
- 3) 「わかりやすい岩石と岩盤の知識」 三木幸蔵
- 4) 「岩の調査と試験」 土質工学会
- 5) 「試験資料」 土木試験所
- 6) CMT工法カタログ
- 7) 「CMT工法平成30年度技術・積算資料」