

統合穿孔支援システム「ドリルNAVI」の開発

宮原宏史¹・若林宏彰²・中村聡磯³

¹賛助会員 マック㈱ (〒272-0832 千葉県市川市曾谷8-16-3)

E-mail:miyahara.h@mac-net.co.jp

²賛助会員 ㈱鴻池組 土木事業本部技術部 (〒136-8880 東京都江東区南砂2-7-5)

E-mail: wakabayashi_ha@konoike.co.jp

³賛助会員 ㈱カヤクジャパン (〒100-0000 東京都墨田区横網1-6-1)

E-mail: satoki.nakamura@kayakujapan.co.jp

リニア中央新幹線の2027年開業に向け、2015年度より大規模な山岳トンネル案件が順次着工予定であり、17年間という工期から見て急速施工は重要な課題である。筆者らは発破工法の急速施工には①正確な穿孔誘導、②積極的な地質探査、③施工実績、探査データの次サイクルへの即時反映、が重要であると考え、正確な穿孔誘導機能を備え、毎サイクルの穿孔探査データ取得を可能としたうえ、施工、探査データの現場、施工会社、火薬メーカー等のネットワーク共有により次サイクルへの即時反映を可能とした「ドリルNAVI」を開発した。

その結果、適用事業所における導入効果として余掘りを約50%、サイクルタイムを約15%低減した。本稿は「ドリルNAVI」(以下本システム)の開発内容および適用結果について述べる。

Key Words : 急速施工, 探査, 削岩機, 余掘り, サイクル

1. はじめに

わが国の大動脈である東海道新幹線はすでに開業後50年が経過し、大規模な補修工事が避けられない状況にある。また、大規模災害に対する抜本的な備えとして、東海道に代わるバイパスルートの必要性も論じられている。そのような背景から、超電導リニアによる中央新幹線の計画が発表され、2027年の開業に向け、2015年度より大規模な山岳トンネル案件が順次着工予定である。ルート上には最大土被り1000m超、数多くの断層帯が存在する長大トンネルが複数計画され、17年間という工期の制約から見ても急速施工は重要な課題であり、様々な地質状況に応じた各種技術開発が行われている。多数の工区に採用予定の発破工法において、正確な穿孔位置、さし角による高効率の発破(要素1)、前方地山状況の積極的な把握(要素2)と次サイクル施工への反映(要素3)は急速施工を行う上で重要であり、既に穿孔に使用する削岩機に角度、位置、油圧等の各種センサーを取り付け、穿孔位置制御及び穿孔実績、穿孔時の岩盤破壊エネルギーの記録による前方探査を行う技術^{1), 2)}が報告されている。

しかしそれら技術には、外周孔の誘導に限定されている¹⁾ことに起因する、急速施工を目的とした長孔発破に重要な芯抜き部分の誘導の困難性(課題1)、および前方探査データに穿孔位置、角度の記録が存在しないこと²⁾に起因する、前方探査データ絶対位置の不確実性(課題2)が存在した。また、穿孔および前方探査データは削岩機上の機器に記録され²⁾、メディアにコピーされたデータを事務所に持ち帰る必要があり、施工へのフィードバックに時間を要していた(課題3)。

筆者らは、芯抜き部分を含めた全断面の誘導を可能とする「ドリルNAVIGATION」(手段1)、前方探査データにも絶対位置、角度を持たせたうえ、毎日の発破穿孔においても岩盤破壊エネルギーを記録し、切羽面全体の硬軟分布を詳細に把握する「ドリルEXPLORA」(手段2)、トンネル内に独自ネットワークを構築し、削岩機、現場事務所、施工会社、削岩機メーカー、火薬メーカー、コンピュータメーカーがリアルタイムで施工情報を把握できる「ドリルNET」(手段3)を総称する「ドリルNAVI」を開発した。本稿はその内容および成果について述べる。

2. ドリルNAVI各要素技術の説明

(1) ドリルNAVIGATION (手段1)

正確な穿孔位置、さし角による高効率の発破(要素1)のためには、各種センサ測定値を合成し、トンネル断面内での削孔位置とさし角に変換する必要がある。本システムでは図-1に示す3種の座標系と図-2に示す回転角方向を定義し、各測定値に基づく数値を合成、変換する手法を採用した。

a) 削岩機座標系 Σ_J

削岩機内における系であり、削岩機本体上の原点 O_J より、基準方向を前方のX軸、平面状に直行するY軸、X,Yと直行するZ軸により設定する。

この系内における削岩機のブームの模式図を図-3に示す。回転部と伸縮部の要素をそれぞれ θ 、 d とすると、回転部は θ_1 :ブームスイング (BS), θ_2 :ブームチルト (BT), θ_3 :ガイドチルト (GT), θ_4 :ガイドスイング (GS), θ_5 :ガイドロータリー (GR), θ_6 :ガイドダンブ (GD) の6箇所、伸縮部は d_1 :ブームスライド (BSL), d_2 :ガイドスライド (GSL), d_3 :フィード (FSL) の3箇所である。なお、斜線部分は可動部を示す。よって削孔時のブームの持つ自由度は、 $6\theta + 3d$ と表すことができる。本システムではこれら可動部に、回転角を検出する回転角計 ($\theta_1, \theta_4, \theta_5, \theta_6$)、傾斜角を検出する傾斜計 (θ_2, θ_3)、シリンダ油量に応じてスライド量を検出するギアメータ (d_1, d_2, d_3) を装備し(表-1)、各部材の寸法からブーム全体をモデル化し、 θ_1 軸からの相対ビット位置、さし角を算出する機構を採用している。また、過去の研究¹⁾により、ブームの経年劣化による誤差を補正し正確な誘導を行うには、ガイドセルを直接自動追尾トータルステーションで測量し、その座標値をリアルタイムに算出値に反映することが有効であることが明らかにされている。そのためガイドセル後端には自動追尾測量用のプリズムがセットされている。

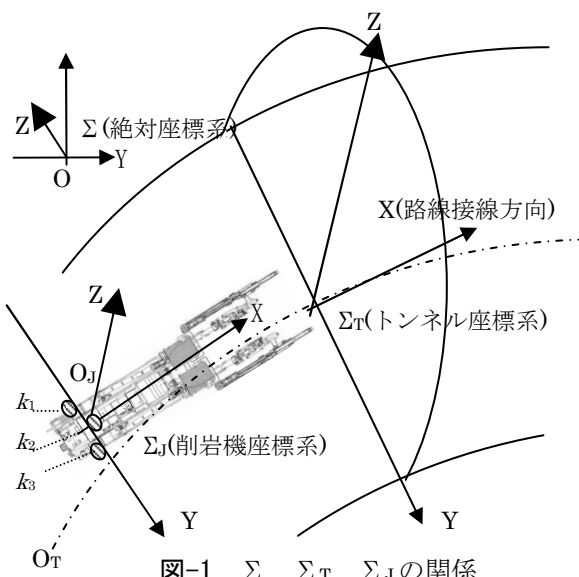


図-1 Σ , Σ_T , Σ_J の関係

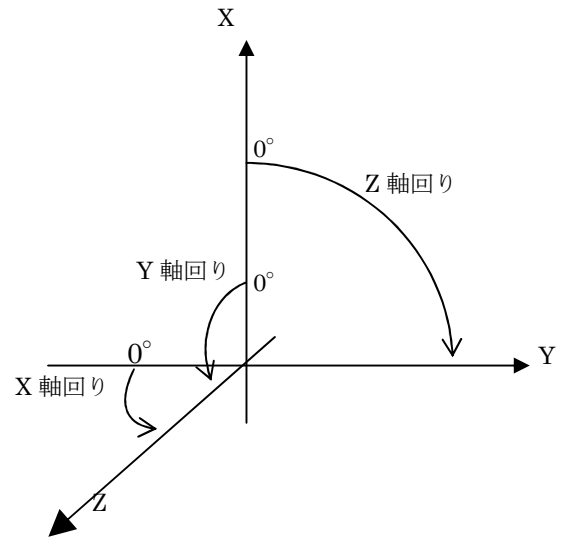


図-2 回転角の定義

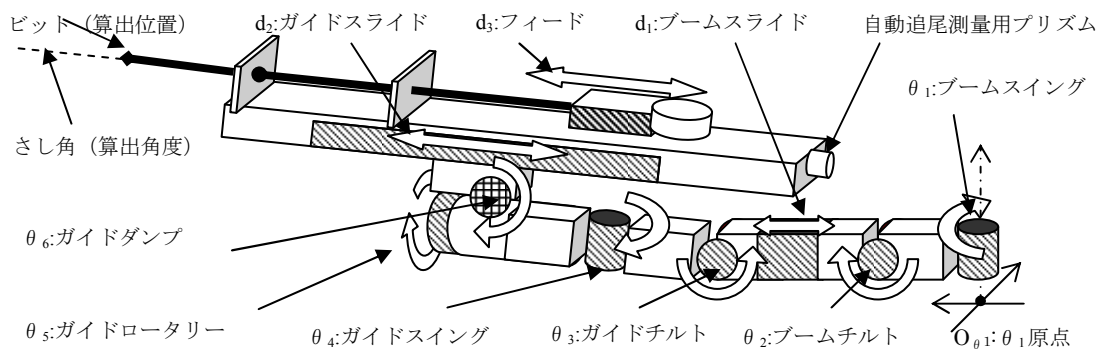


図-3 削岩機ブームの機構と検出要素

表-1 センサー一覧と主な仕様

位置	名称	検出範囲			検出精度	備考	
θ_1	ブームスイング	-45	～	45	°	単独直線性±0.1%	軸回転式センサ
θ_2	ブームチルト	-30	～	60	°	0.1°	傾斜角センサ
d_1	ブームスライド	0	～	1600	mm	0.5%	油量センサ
θ_3	ガイドチルト	-60	～	30	°	0.1°	傾斜角センサ
θ_4	ガイドスイング	-45	～	45	°	単独直線性±0.1%	軸回転式センサ
θ_5	ガイドロータリー	0	～	360	°	0.1°	傾斜角センサ
θ_6	ガイドダンブ	0	～	90	°	0.1°	非接触型回転センサ
d_2	ガイドスライド	0	～	1600	mm	0.5%	油量センサ
d_3	フィード	0	～	3340	mm	0.5%	油量センサ

また、削岩機車体後方には3箇所プリズムが取り付けられており (図-1), その削岩機座標系 Σ_J 内における k_1, k_2, k_3 および, θ_1 回転中心を Z 軸とする Σ_{θ_1} の原点 O_{θ_1} の座標値を式(1)のように定数としてシステムに記憶させておく。

$$k_1 = \begin{pmatrix} x_{k1} \\ y_{k1} \\ z_{k1} \end{pmatrix} \quad k_2 = \begin{pmatrix} x_{k2} \\ y_{k2} \\ z_{k2} \end{pmatrix} \quad k_3 = \begin{pmatrix} x_{k3} \\ y_{k3} \\ z_{k3} \end{pmatrix} \quad O_{\theta_1} = \begin{pmatrix} x_{O\theta_1} \\ y_{O\theta_1} \\ z_{O\theta_1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Σ_J 内における検出要素毎の各座標系は図-4 の関係となり, 事前測量による部材長, オフセット長 (微小値は描画せず) を考慮した計算により, ビット算出位置 q とさし角 $\bar{\mu}$ が算出される。

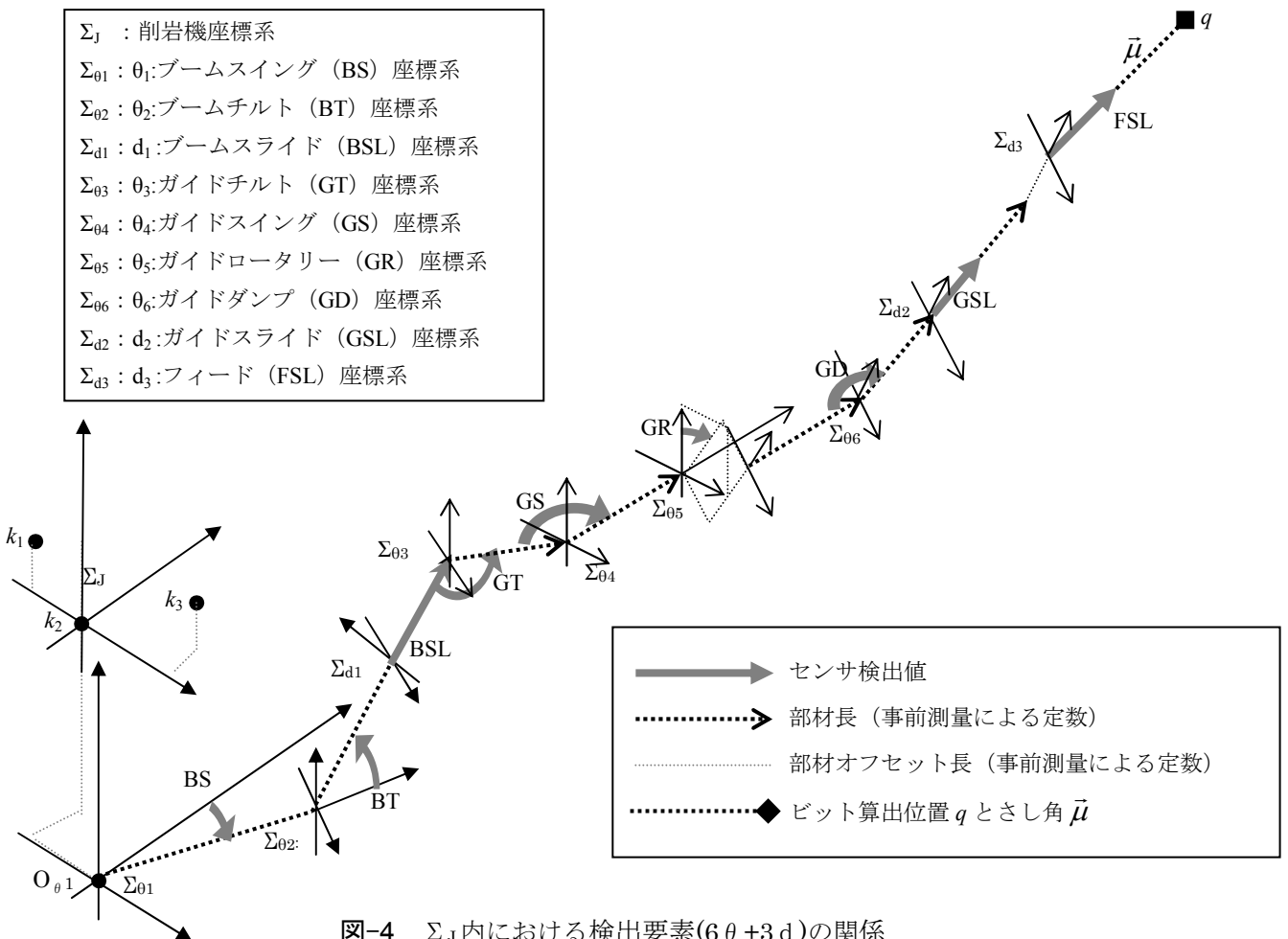


図-4 Σ_J 内における検出要素(6 θ +3d)の関係

b) 絶対座標系 Σ

工事の際の測量を行う座標系である。原点Oを各公共基準点に置き、南北をX軸、東西をY軸、鉛直方向をZ軸として設定する。この系内では式(1)に示した削岩機後部プリズムの測量による削岩機方位角の算出およびガイドセル後部プリズムの測量が行われる。

削岩機を切羽にセットしたのち、式(2)に示す各プリズムの絶対座標系 Σ 内の座標値 K_1, K_2, K_3 を後方のトータルステーションから測量する。

$$K_1 = \begin{pmatrix} X_{k1} \\ Y_{k1} \\ Z_{k1} \end{pmatrix} \quad K_2 = \begin{pmatrix} X_{k2} \\ Y_{k2} \\ Z_{k2} \end{pmatrix} \quad K_3 = \begin{pmatrix} X_{k3} \\ Y_{k3} \\ Z_{k3} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで Σ_j を Σ に移す変換を、 3×3 行列 S と定めると、 $n=1 \rightarrow 3$ において式(3)を満たす $S(a \sim i)$ を求めることにより Σ_j から Σ への変換を一義的に定めることができる。

$$\begin{pmatrix} X_{kn} \\ Y_{kn} \\ Z_{kn} \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} x_{kn} \\ y_{kn} \\ z_{kn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{kn} \\ y_{kn} \\ z_{kn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

また、ガイドセル後部のロッドの延長線上に設けたプリズムの測量もこの系で行われ、絶対座標系 Σ におけるガイドセル方向 \vec{M} およびビット先端座標 Q はそれぞれ式(4)、式(5)のように表せる。

$$\vec{M} = S \cdot \vec{\mu} \quad (4)$$

$$Q = S \cdot q \quad (5)$$

c) トンネル座標系 Σ_T

トンネル内の構造物の評価を行う座標系である。原点 O_T を路線の基点に置き、トンネル進行方向をX軸、直交するY軸、鉛直方向をZ軸として設定する。この系では、路線にカーブが存在しても、任意の切羽における路線の接線の方向をX軸方向と考える。

本システムでは目標孔尻に各孔が到達するまでのさし角を、均一な放射状に保つことを目的とし、 Σ_T 上のYZ平面に、仮想切羽面と呼ぶ基準平面を設定し、削孔位置の基準を実切羽面とビットの接点ではなく、仮想切羽面とさし角方向 \vec{M}_T の交点として管理する手法とした(図-5)。その際、実切羽面が仮想切羽面より凸な場合には Q_T が計画掘削ラインよりも内側になり、アタリが発生する。そのため、実切羽面において最も凸な地点に、仮想切羽面を設定した(図-6)。穿孔は実切羽面の凹凸に影響されることなく、目標切羽面で終了し、オートリターン機能が作動する。

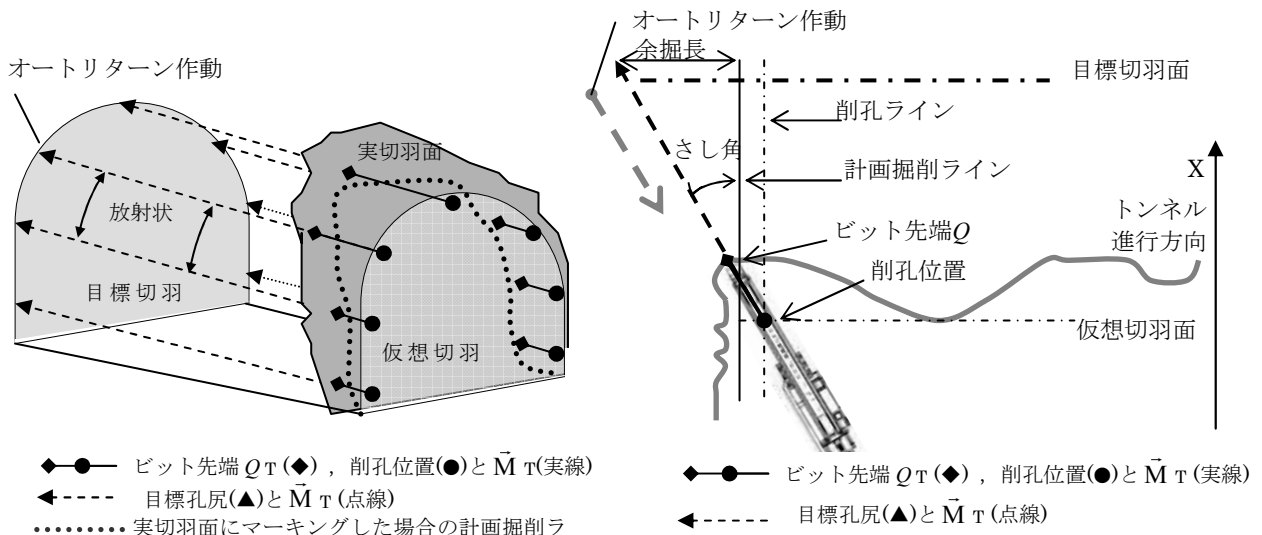


図-5 削孔位置の概念図

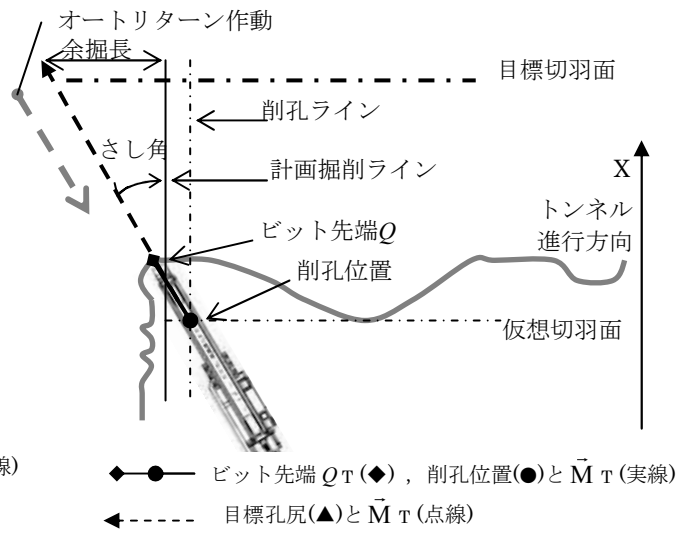


図-6 仮想切羽概念図

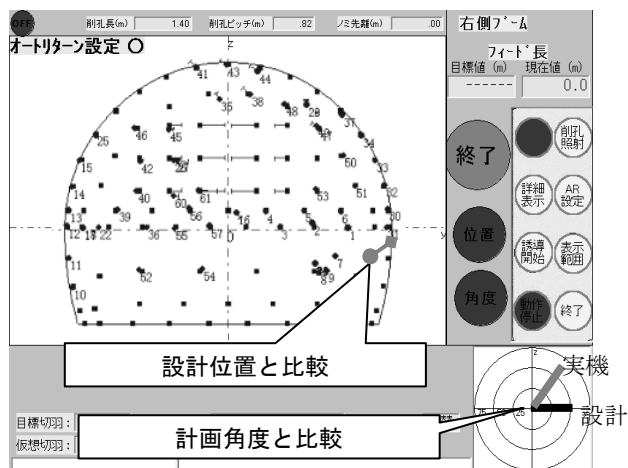


図-7 穿孔誘導画面

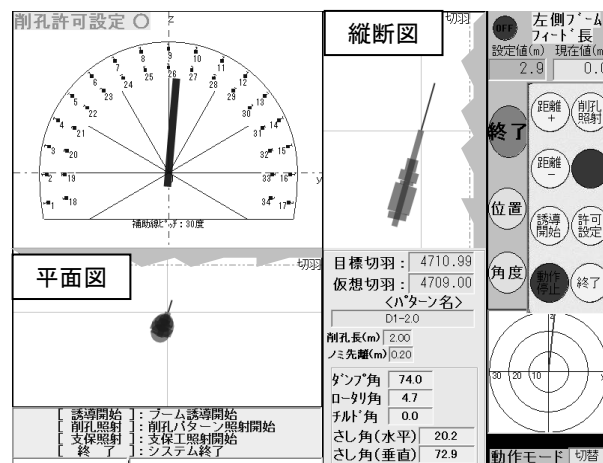


図-8 ロックボルト誘導画面

オペレータは算出された座標値と設計値を比較しながら穿孔作業を行うことにより、高精度な施工が可能となった。搭載コンピュータには各種作業に応じた設計値と実機位置の比較画面、および拡大表示機能を備えている(図-7, 図-8)

(2) ドリルEXPLORA (手段2)

トンネル工事においては、切羽前方の断層破砕帯や地下水脈など、工事の進捗に支障となる脆弱な地層の出現が避けられない。すでに穿孔に使用する削岩機に油量、油圧等のセンサを取り付け、穿孔エネルギーの記録による前方探査を行う技術²⁾が報告されているが、ドリフタが出力する打撃エネルギーとビットが岩盤を破壊するエネルギーとの間には、ビットと岩盤との接触面間および、ロッドの継ぎ目から発生する伝達ロスによる誤差が発生していた。本システムはさく岩機試験データを基にした T : 伝達効率(%)を式(6)のように定めることにより、ビット着岩面、ロッドにおけるエネルギー損失分を正確に反映した Ed : 穿孔エネルギー(J/cm^3)を式(7)にて定めることができる。

$$T = Tb \times Tr \quad (6)$$

Tb : ビット着岩面伝達効率(フィード圧力依存)(%)

Tr : ロッド伝達効率(ロッド及びスリーブ継ぎ数依存)(%)

$$Ed = \frac{Ep \times Np \times T}{Vd \times S} \quad (7)$$

Ep : 打撃エネルギー(J)

Np : 打撃数(bpm)

Vd : 穿孔速度(cm/min)

S : 孔断面積(cm^2)

そして Ed : 穿孔エネルギーには(1)c)にて定義したトンネル座標系 Σ_T における座標値がすべて関連付けられており、切羽面全体、トンネル全体の硬軟分布を詳細に把握することが可能である。(図-9, 図-10, 図-11, 図-12, 図-13, 図-14)

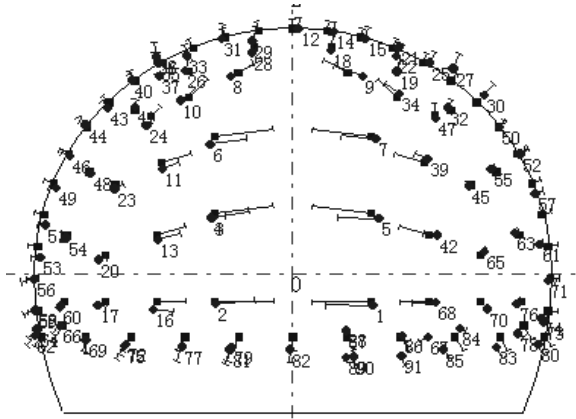


図-9 穿孔位置記録

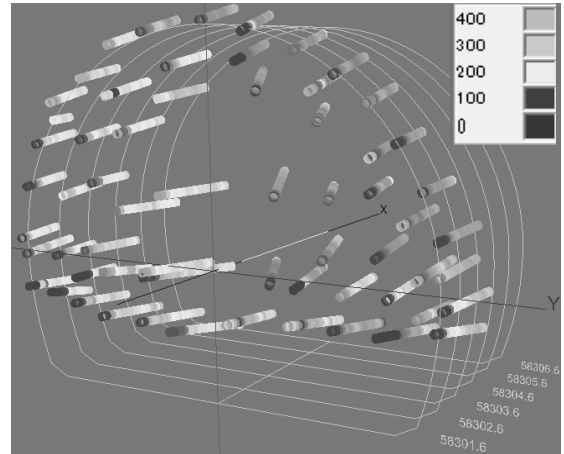


図-10 穿孔位置別穿孔エネルギー

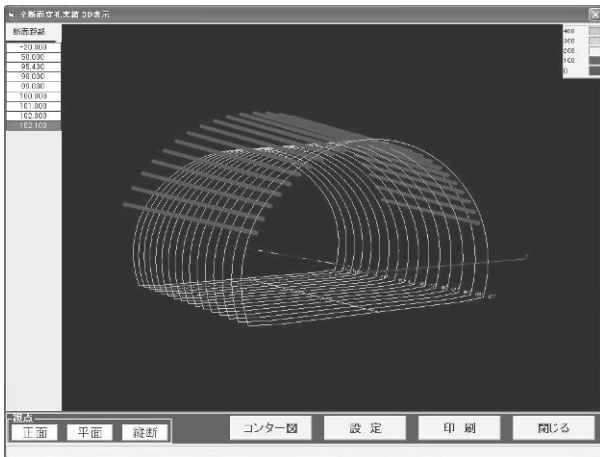


図-11 AGF 穿孔記録

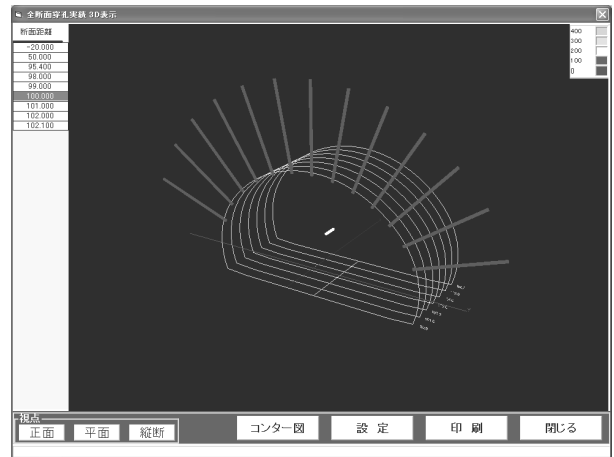


図-12 ロックボルト穿孔記録

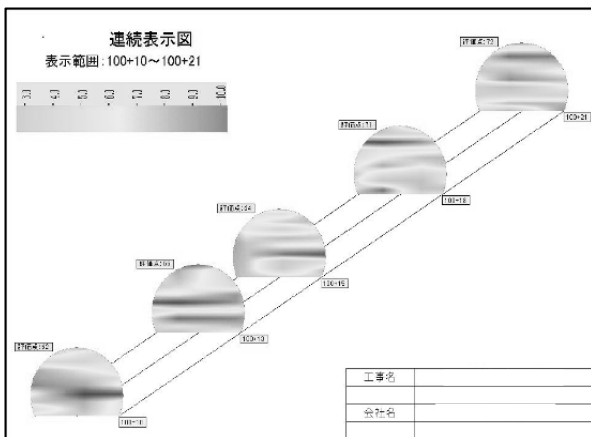


図-13 穿孔エネルギー連続図



図-14 穿孔エネルギー分布詳細図

(3) ドリルNET (手段3)

ドリルNAVIGATION及びドリルEXPLORAを稼働中の現場からは図-15中、ア)～キ)のデータを得ることができる。これらデータを次サイクルの発破に反映させ、効率的な施工を行うことが急速施工のためには重要である。従来はデータをPCやメディアにコピーしたのち事務所に戻り、処理、閲覧、検討を行っていたが、施工データフィードバックの迅速性に問題があった。本システムにおいては、削岩機-現場詰所-施工会社事務所-施工会社本社等-メーカー(削岩機, コンピュータ, 火薬)間でデータ共有が可能なネットワーク(図-16)を構築した。前サイクルのデータは自動的にネットワーク上に保存されており、データを現場以外(本社, メーカー)でも共有し、岩質, 余掘量等に応じた修正発破パターンを作成したのち、削岩機上のデータを遠隔で更新することも可能となった。

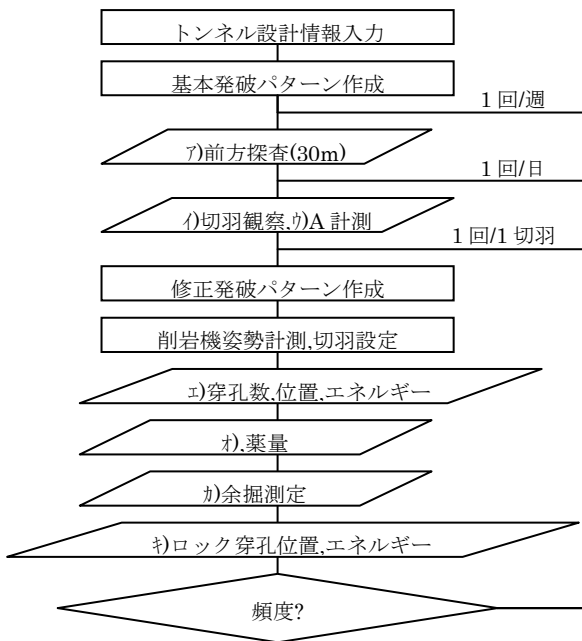


図-15 作業及びデータ取得フロー

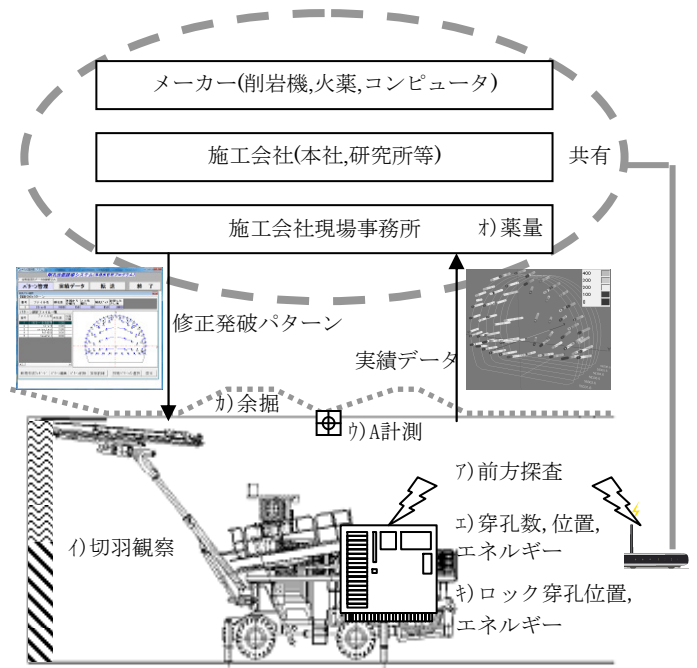


図-16 ドリルNET概要図

3. ドリルNAVI適用結果³⁾

本システムの効果を確認するため、実現場(表-2)においてシステム未使用時, 使用時における余掘り量, サイクルタイムの比較を行った。データ取得区間中, 鋼製支保工のないII Nパターン(352m)における平均余掘り量は, 未使用時: 205mm, 使用時: 103mmとなり, 約50%の低減効果を確認した(図-18)。またサイクルタイム平均値は, 未使用時: 5.2h, 使用時: 4.4hとなり, 約15%の低減効果を確認した(図-19)。ここで穿孔, 装薬, 発破時間のみを比較すると, 未使用時: 1.8h, 使用時: 1.4hと, 約22%の低減となっており, 穿孔時における穿孔パターンナビゲーションの効果が現れたものと考えられる。

また, 図-20に支保パターンと1切羽平均穿孔エネルギーの関係を示す。平均穿孔エネルギーは, I Nパターンで100未満~300J/cm³(平均159J/cm³), II Nパターンで100~400J/cm³(平均283J/cm³)の範囲に分布しており, 地山性状を反映したデータが, 特別な作業を行うことなく毎サイクルの穿孔により取得可能であった。

これらデータはドリルNET機能により, 現場-本社-メーカー間で共有され, 余掘り測定結果の発破パターンへの反映や, 穿孔エネルギーと切羽観察結果との比較等, データの有効活用が可能であった。

表-2 適用工事概要

工事名称	九州新幹線(西九州)新長崎トンネル(東)
発注者	鉄道建設・運輸施設整備支援機構
施工者	鴻池組・日本国土開発・西武建設・竹下建設共同企業体
工事場所	長崎県長崎市現川町地内
工期	2013年3月～2018年2月
概要	延長3870m×断面積66.8m ²
データ取得区間	57km850m～58km500m (650m間)
地質	変朽安山岩, 角閃石安山岩, 輝石安山岩, 凝灰角礫岩
工法	NATM, 発破掘削, 内空断面積, 補助ベンチ付き全断面工法
穿孔機械	3ブーム2バスケットドリルジャンボ 170kg級

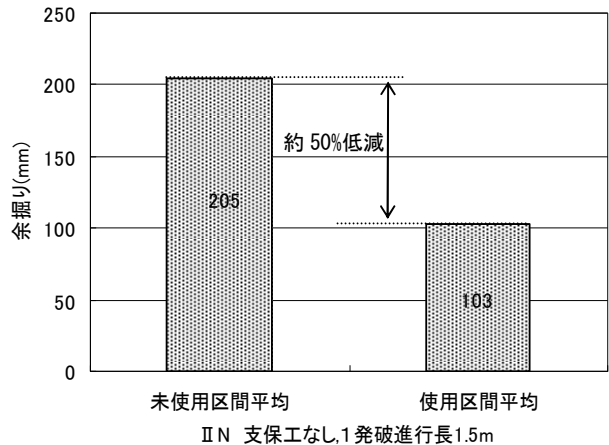


図-18 本システム使用による余掘り低減効果

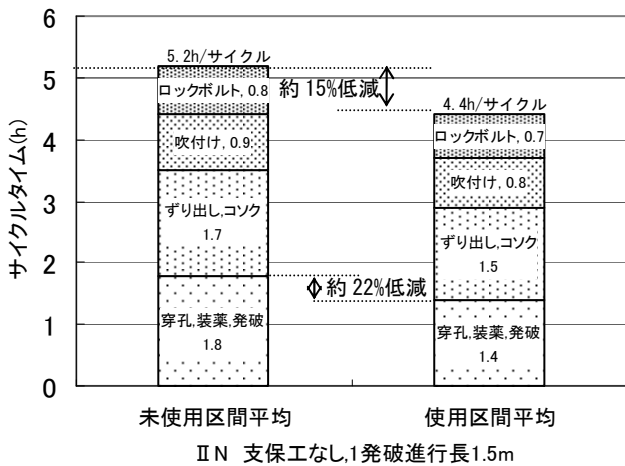


図-19 本システム使用によるサイクル低減効果

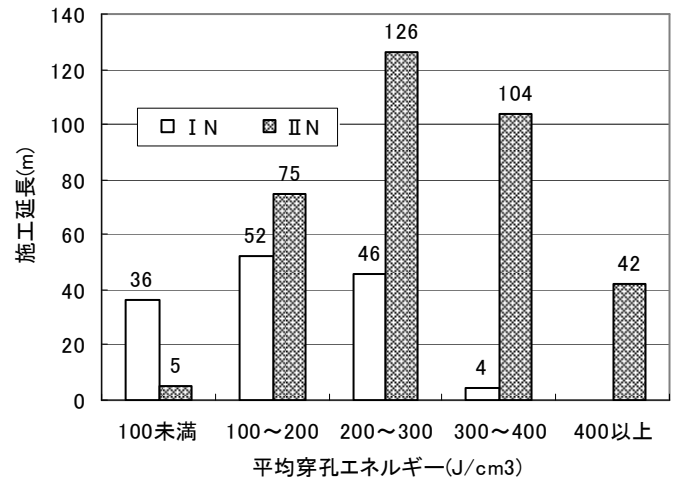


図-20 支保パターンと穿孔エネルギーの関係

4. まとめ

本稿において確認できた事項は以下の通りである。

- (1) 削岩機のブームをモデル化し, 正確な穿孔誘導機能を備え, 毎サイクルの穿孔探索データ取得を可能としたうえ, 施工, 探索データの現場, 施工会社, メーカー等のネット共有により次サイクルへの即時反映を可能とした「ドリルNAVI」を開発した。
- (2) 導入効果として余掘りを約50%, サイクルタイムを約15%低減した。

近年, 公共事業の一連の過程で, ICTツールと3次元データモデルの導入・活用により, 建設事業全体の生産性向上を図ろうとする取り組み「CIM」が図られており, 施工オペレータの経験と勘の伝承により行われてきた生産性の向上が, ICTツールの活用により大きく変わる過渡期にあると考える。山岳トンネル施工情報モデルに従来の探索, 計測で得られなかった情報が反映できるよう, さらなる開発を進める所存である。

謝辞: 本稿のデータ取得, 装置製作に際し, 共同開発者である古河ロックドリル株式会社の多大なる協力

を得た。ここに記して深く感謝する。

参考文献

- 1) 宮原宏史・坂口武・松生隆司・小笠原光雅・河野興・中川浩二：自動追尾トータルステーションの活用によるハイブリッド方式削孔誘導装置，土木学会論文集F，Vol65 No,1, pp. 32 -37, 2009.2.
- 2) 山田浩幸・原田雅也・田中英男・三木秀二：トンネル地山評価システムを用いた補助工法選定に関する一考察，土木学会第16回トンネル工学研究発表会，2006.12
- 3) 若林宏彰：全断面追尾式穿孔誘導システム「トールNAVI」の開発－山岳トンネル工事における穿孔誘導技術及び地山診断技術－，平成27年度近畿地方整備局研究発表会，新技術・新工法部門，No,13，2015.6