

画像データを用いたトンネル切羽管理 のシステム化に関する研究

－ 山岳トンネル工事現場のシステム化に関する研究（その2）－

Study on a Development of Construction Management System on Tunnelling Project
Using Image Processing Method

立命館大学 春名 攻*
(株)奥村組 北角 哲**
(株)奥村組 五十嵐善一**

By Mamoru Haruna, Akira Kitazumi, Zenichi Igarasi

山岳トンネル工事については、今後の大断面施工、急速施工に向けて、機械化・ロボット化等が研究されているが、今のところコスト面から考えてNATMをベースとした工法に勝るものはないというのが実情と考える。この場合、切羽前方の地質予知を含めた切羽の管理をいかに合理的に行うかという問題が、工事の成否の分かれ目となると考える。

一方、建設業においては、受注競争激化の中でコストダウンを強いられ、現場管理要員の削減という問題に直面している。

そこで、マルチメディア・システムやコミュニケーション技術を援用し、トンネル切羽管理に伴う業務を省力化するとともに、切羽の岩盤の状態を合理的に判定するためのシステムを開発し、運用実験を行った。

運用実験の結果、本システムは、切羽管理関係業務の省力化に十分寄与するとともに、岩盤判定のための客観的な情報を迅速に提供し得るものであることが確認された。

【キーワード】生産性、切羽管理、品質管理、原価管理、工程管理、安全衛生管理、画像処理

1. はじめに

筆者らは、山岳トンネル工事のシステム化を目的として、現行の工事現場の業務活動について調査を実施し、問題点の明確化を経て、その問題点解決のための方策についての検討を行って来た。

この結果、我々は、前報で示したとおり、開発を優先すべきものとして5つの支援システムを提案し開発を進めてきた。¹⁾ (表—1)

これらの支援システムの開発については、他社においても同様であり、ICカードなどを用いた工事現場への入退場管理や監視カメラを用いた工事監視などが行われているほか、コンピュータへの画像入力インタフェースの充実とともに、トンネル切羽の

岩盤判定や支保工管理のための支援システムの開発がさかんに行われている。^{2)～5)}

しかし、これらの支援システムはいずれも目的とする管理業務の省力化や質の向上に寄与することが出来たが、個別の支援システムでは初期管理データの入力作業や使用機器の増加があって一時的に工事管理コストが増大する点や、データ間のリンクが不十分であるので工事管理全体の質を向上させるためにもう少し種々のデータを自由に比較したいという要求に応えられない、という点で不満がある。

そこで、今まで進めてきた省力化中心の個別の支援システムの開発で得た技術を統合化し、工事管理の過程で必要となる様々な意志決定を総合的に支援するシステムを開発することにし、NATMを対象

* 理工学部環境システム工学科 0775-61-2736

** 電算センター 06-621-1101

表－１ トンネル管理業務省力化支援システム

支援システム \ 対象となる管理要素	原価管理	工程管理	品質管理	安全管理	改善される業務
① I T Vカメラを用いた切羽監視システム		○	○	○	下請管理業務 現場巡視業務 測量関連業務 品質管理業務
② 非接触型個別認識装置を用いた入退場管理システム	○	○		○	
③ デジタルカメラを用いた切羽画像データベースシステム	○		○	○	
④ トンネル切羽マーキングシステム	○		○		
⑤ 電子黒板を用いた作業打合せ簿作成システム		○		○	

に、その一番重要な管理ポイントである切羽管理システムを開発することにした。

2. システム開発の経緯

(1) NATMにおける切羽管理上の問題点

NATMの一般的な施工は、図－1に示すとおりである。管理上の重要なポイントは、①掘削サイクルを守ることにより工程、原価を管理する、②最適な支保工を選定することにより安全な施工と経済的な品質を確保する、ことである

NATMが他の工法と異なる点は、地山の変化に合わせ柔軟に支保工変更するという特徴をもっていることである。従って、施工中の切羽を観測し地山の変状計測を続けながら、適正な支保工を決定するという手続が必要となる。一般的な手続としては、日々変化する掘削直後の切羽を詳細に観察し、そのスケッチをもとに、必要に応じ施主、施工両側からなる岩判定委員会で協議、決定を行っている。

しかしながら、トンネル切羽では、肌落ち、湧水などを伴うことが多いが、このような切羽の動的な情報については切羽のスケッチでは表現が難しい。このため岩判定の当事者らが現場に行き再調査することが多く、このことによる意志決定の時間的遅れが切羽の安定に重大な影響を及ぼすこともあった。また、切羽のスケッチでは、岩質の表現が担当者の主観に影響されるため客観的な情報とはなりにくい。

加えて、岩判定においては、過去のトンネルの類似データとの比較や、現在施工中のトンネルの坑口から現在の切羽までのデータを参照することが有効な補足手段である。

このため、切羽の状況を静的および動的に客観的にとらえ整理保存し、過去のデータとともに即時に提供できる手段や、これらの情報を任意の場所で複数の技術者が同時に共有し、打合せをすることを可能にする道具が要求される。

一方、NATMのもう1つの特徴としては、支保材料として、従来の鋼アーチ支保工にかわり、主にロックボルトと吹付け工が用いられるということである。このため切羽の掘削（さっ孔）にあたっては、従来の鋼アーチ支保鋼を断面の目安としていたときと異なり、仕上がり断面の目標が作業員に把握されにくい。

この対策としては、表－1に示したトンネル切羽マーキング支援システムが用いられているが、岩質によっては掘削仕上り面の凹凸すなわち、当たり、余掘りが生じ、再掘削が必要となったり二次巻コンクリート量の増加となり、工程・原価管理上問題となる。

(2) 施工管理業務の省力化と切羽巡視の内容から見た問題点

業務の省力化と支援システムとの関係を明確にさせるためもう1度、以前に実施したアンケート調査

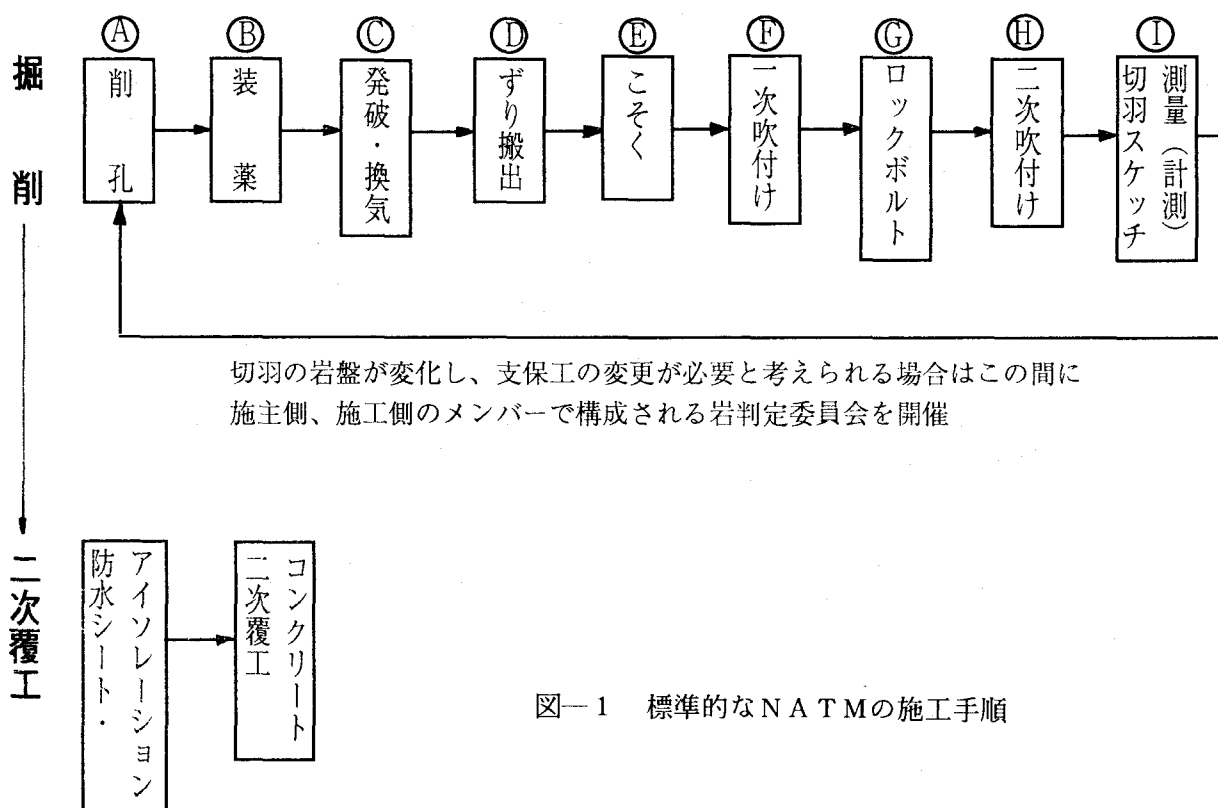


図-1 標準的なNATMの施工手順

結果（参考文献-1、の表-1）をもとに現場業務を再集計した。再集計に当たり、前回の調査では曖昧であった副所長の位置づけと担当業務を見直し、これを課長の業務として再編成し、また、土木技術者が外業として行う業務のみを取り出し再評価することにした。

表-2にその結果を示すが、施主との打合せ、現場巡視、測量・計測および品質管理などの「切羽周辺で行なわれる業務とこれに関するデータ処理、伝達、打ち合わせ」に業務が集中していること、従ってこれらの業務を効率よく処理することが管理の生産性向上に大きく寄与できることが明らかとなった。

そこで、土木系職員が切羽周辺で実施する業務を切羽巡視と表現し、これらを、チェック項目（何を見て）-作業レベルの業務-と、管理目的（何を考えるか）-管理レベルの業務-とに分類し、4大管理要素に対応させながら問題点を整理すると表-3に示すとおりとなった。

すなわち、次のような情報処理上の問題に直面している。

- ①事象がタイミングよく正確に捉えられていない。
- ②情報を次工程に渡すための迅速なデータ処理ができていない。

なお、作業レベルでの業務は、そのほとんどが「物を見る」、という作業に集約され、画像処理という手段によって代行可能であり統合的な処理が可能である。

(3) 切羽管理システムの開発の目的および構想

切羽で得られたデータは、加工、蓄積され、管理

表-2 外業の再評価

	①施主関連業務	②近隣対策業務	③下請管理業務	④現場巡視業務	⑤計測・測量業務	⑥品質管理業務	⑦支店関連業務
所 長	□	□	△	△			△
工事課長	□	△	△	□			△
工事主任	△		□	△	△	△	
工事係	△		△	□	□	□	
工務主任	□	△		△	△	△	
工務係	□		△	△	□	□	

〈凡例〉 □：業務負担の大きい業務
△：行う必要がある

表－３ 切羽巡視に関する業務内容と問題点

掘削 工程	チェック項目（何をみるか） * 1	管理目的（何を考えるか） * 2	従来の管理方法 の問題点
④	ノミ下りの時間はどれくらいか I	・火薬量の確認 ・支保工の選定 ・工程の把握 C Q T	①
③ ～ ④	ズリの大きさ飛散の程度はどうか I	・火薬量の確認 C	
③ ～ ④	穴尻りに残火薬はないか ×	・作業の安全の確認 S	
⑥、⑧	吹付けのロスはないか I	・モルタル量と配合の確認 C	①、②
⑤ ～ ①	切羽の地質はどうか (崩落etcはどうか) スカッチ D	・工程の把握 ・岩盤の判定 ・作業の安全の確認 T Q S	①、②
①	仕上り形状は満足できるものか I	・余堀りの確認 ・当りの確認 ・当り通りの指示 C Q Q	①、②
全 工 程	切羽でどんな作業をしているか I	・工程の把握 ・サイクルタイムの把握 T T	②
	不安全な行動はないか (安全用具の着用は十分か) I	・作業の安全の確認 S	②
	吹付けにクラックは発生していないか ×	・支保工の良否 ・作業の安全の確認 Q S	
	有毒ガスの噴出はないか ×	・作業の安全の確認 S	
	換気は十分か I	・作業の安全の確保 S	

〈凡例〉

* 1…画像でとらえる場合の

入力方法

I : I T Vカメラ

D : デジタルカメラ

× : 代替不可

* 2…管理要素

C : 原価管理

T : 工程管理

Q : 品質管理

S : 安全管理

・問題点

① : 事象をタイミング良く正確にとらえにくい

② : 情報を次工程に渡すための迅速な処理が出来ない

業務に利用されるが、このプロセスは、現場で見る
 ⇒スケッチあるいはメモを取る⇒資料を作成する⇒
判断をする（打合せをする）⇒作業指示をする
 と表現できる。

しかし、先記したごとく、従来のプロセスでは特に情報処理のスピードに問題があるほか、工事管理において発生する様々な意志決定において

- ④協議の段階で情報を共有しにくい（コミュニケーションの問題）
 - ⑥いままでの経験を生かしにくい（データベースがない）
 - ⑦過去の経験や同じ現場で得た知識（学習効果）が参照しにくい
- などの問題が生じている。

また、「ものを見る」という客観的行為が、複数の担当者で主観的に行われると言う無駄と矛盾が生じている。

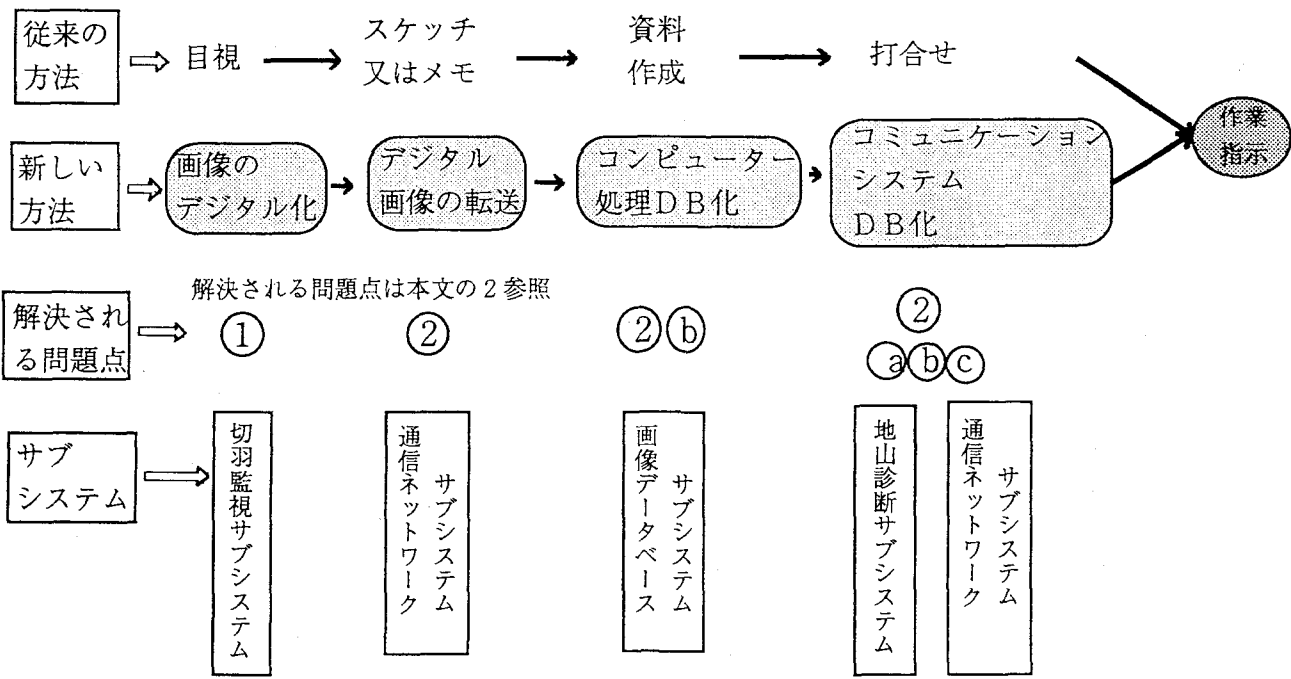
そこで筆者らは、デジタル化された画像をコンピュータで迅速かつ正確に処理できるマルチメディア機能に注目し、これと通信ネットワーク技術を応用することにより、切羽周辺で行われる業務を省力化するとともに情報処理および意志決定で障害となっていた先の諸問題を解決する目的で、表－１に示した省力化を目指した開発済みの支援システムを利用

し、①（切羽監視支援システム）にトンネル断面計測の機能を、③（画像データベース支援システム）にトンネル地山診断システムの機能を追加し、これを通信ネットワークを用いて統合化することにした。

この開発されたトンネル切羽管理システムは、４つのサブシステムで構成されているが、運用手順を従来の方法と対比させながら解決されるべき問題点と共に示すと図－２のとおりとなる。

また、システムの運用イメージは次のとおりである。すなわち、

- ①切羽の状況をデジタルカメラあるいはＩＴＶ（Industrial Television）でとらえる。
- ②ＩＴＶの情報は日常の業務監視に利用されるほか、断面計測に利用される。（切羽監視サブシステム）
- ③デジタルカメラあるいはＩＴＶで捉えられた切羽の状況はコンピュータに入力されＤＢ化される。（画像データベース・サブシステム）
- ④地山判定サブシステムが稼動し、目視データが追加されるとともに、過去の情報をデータベースから参照し日報とともに診断データを提供する。（地山診断サブシステム）
- ⑤通信ネットワーク・サブシステムを用い、現状の切羽や過去の地山の状況各種診断データを見ながら複数の技術者の知恵で切羽の岩盤を判定するという手順をとる。



図－２ トンネル切羽管理支援システムの構成

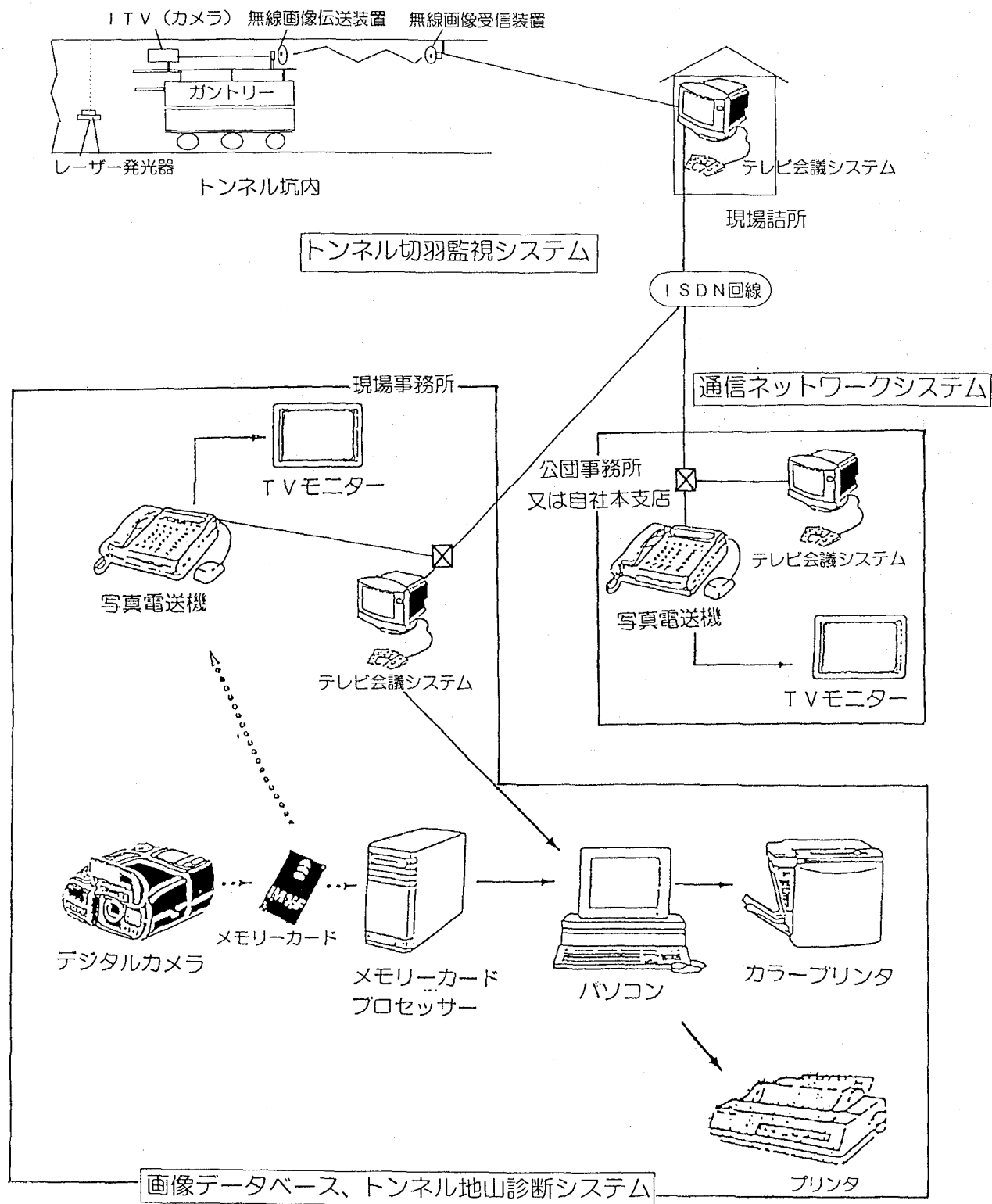


図-3 トンネル切羽管理支援システムのハードウェア構成

4. システムの概要

本システムのハードウェア構成を図-3に示す。本システムは、動画を扱うITVカメラ、画像処理と地山診断およびDBシステムのためのパソコン、画像伝送のための装置（テレビ会議装置）から成り立っている。

また、ソフトウェアから見ると、4つのサブシステムから構成されており、各々のサブシステムは以下の機能を有している。

(1) 切羽監視サブシステム

表-1で示したトンネル切羽監視支援システムに、トンネル断面形状計測の機能⁶⁾を追加した。

ハードウェア構成としては、ガントリージャンボに取りつけたＩＴＶカメラの画像を事務所に送り、コンピュータで処理する構成であるが、坑内では配線の手間を省くため無線画像送受信装置を採用し画像を伝送することにした。また、現場詰所から現場事務所への画像伝送には、ＮＴＴのＩＳＤＮ（Integrated Service Digital Network）回線を用いて行うことにした。

この理由は、現場詰所から事務所までの距離が長く、配線が不可能であったこと、切羽画像を電話回線を通じて任意の場所に伝送することを考慮したためである。これにより任意の場所で切羽の作業状況を把握できるほか動画、静止画像を収集できる。

トンネル断面形状の計測の場合は、計測地点の中央にレーザー発光器を設置し、トンネル軸と直角に照射し、側壁に映った軌跡をＩＴＶを経由して、パソコンに静止画像として取り組み処理を行っている。出力例を図－４に示す。図中のシャドウ部分が余堀りを示す。計測精度は約１～２ｃｍであるが、余堀り、当たりを１時間以内に把握できるので、掘削作業の手もどりを防止することができる。

(2) 画像データベース・サブシステム

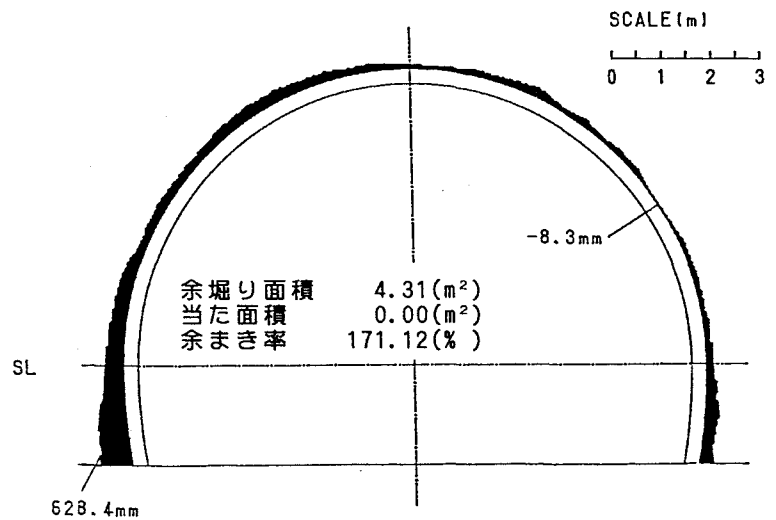
ハードウェアとしては、メモリーカードプロセッサとパソコンから構成されている。

入力方法としては、まず、坑内においてデジタルカメラで撮影した静止画像、あるいは先記した切羽監視サブシステムで撮った動画像から変換した静止画像、をメモリーカードに記録し、これをメモリーカードプロセッサを介してパソコンに取り込む。

次に、取り込まれた画像それぞれに、ラベルを付けさらにコメントを、対話形式で入力する。

このような手段で一度データを保存しておくことにより、このシステムで、各項目ごとあるいは条件ごとに、検索、ソート（並び替え）を行うことができ、簡単にほしい画像と情報を取り出すことができる。また、取り出した画像と各項目情報を任意の形式で出力することができるため、品質管理で要求される各種写真の整理が容易にできる。

また、このシステムでは、次の地山診断サブシ



図－４ トンネル断面計測結果の出力例

テムとリンクしており、保存された画像に対して、コントラストの調整、色補正、あるいはエッジの強調処理などを行い、切羽特徴を明確にするなどの画像処理機能や、画像上に引き出し線を描いて、特徴などを直接、文章として書き込むドキュメント作成機能をつけ加えることにした。

この機能を使い切羽のスケッチなどを容易に行うことができる。

(3) 地山診断サブシステム

先記した(1)、(2)のサブシステムで得られたデータをもとに地山の診断を行い、支保工や補助工法選定のための目安（第一次診断）を提供するシステムである。

本サブシステムは、提出用の坑内観察記録の作成、第一次地山診断、過去物件のデータベースおよび結果のグラフ表示を行う機能を有している。

坑内観察記録の作成に当たっては、まず、パソコン上で日付を入力する。すると(1)、(2)のシステムで入力済みの画像が呼び出され、報告用紙上に固定される。職員はこの画像を参照しながら、切羽のスケッチや必要データを対話形式で入力する。この方法により簡単にかつ自分が調査してきた切羽を確認しながら正確な観察記録を作成できる。

第一次地山診断は地山評価点をもとに実施され、支保パターンや変状の可能性および補助工法の要否を選定するほか、内空変位や天端の沈下量の予測を行う。地山評価点のつけ方については、日本トンネル技術協会⁷⁾、日本道路公団⁸⁾の方法のほか、当社

独自の重みづけも考慮している。図－5に出力例を示す。

地山評価点については、上記の3基準を使用した結果を当該トンネルの今までのデータと比較させながら重みづけを変更するという学習効果を考慮したものとなっている。図－6に出力例を示す。各方式の差は重みづけに関する考え方の差を示していることになるが、ほぼ一致した傾向を示している。

(4) 通信ネットワーク・サブシステム

このシステムは、互いに隔てられた事務所（現場事務所と施主の管理事務所、および必要により自社の本支店）それぞれに設置された写真電送機あるいはテレビ会議装置を用いて、(1)、(2)のサブシステムで記録した切羽画像を送りながら打合せをするものである。どこからでも呼出すことができ、また、互いに電話で対話をしながら動的あるいは静的画像を確認し、打合せることができ、即座に正確に岩判

定や異常時の意志決定を行うことができる。また、この画像に対して、(2)のサブシステムを用いて打合せした内容をコメントとして記録することもできるので打合せ内容の確認が容易である。

なお、動画が処理できるため静止画やメモでは表現できない切羽の湧水、肌落ちなどの状況把握ができ、特に異常時の対策に有効である。

5. システムの評価と今後の課題

(1) システムの評価

システムの評価を省力化（O A化）および管理の精度向上という観点より整理すると次のとおりである。

a) 省力化（O A化）からみたシステム開発の効果について

①作業を総合的に管理できまた記録として残すことができることから、職員の夜勤が不要となった

平成 6 年 月 日 ()

第 1 次 地 山 診 断 書

工事

本 坑 STA. 413 + 43.45

坑内観察調査		分類・評価									
1.岩盤分類	a	b	c	d1	d2	e					
2.切羽の状況	1	2	3	4							
3.暴露面の状態	1	2	3	4							
4.圧縮強度	1	2	3	4							
5.風化・変質	1	2	3	4							
6.割れ目の頻度	1	2	3	4							
7.割れ目の状態	1	2	3	4							
8.割れ目の形態	1	2	3	4							
9.湧水	1	2	3	4							
10.水による劣化	1	2	3	4							
11.地山強度比	<1	<2	<3	<4	<6	<10	10<				
12.土被り厚(m)	<20	<50	<100	<200	<400	400<					
割れ目の方向性	13.縦断方向	1	2a	2b	3	4	5a	5b	6		
	14.横断方向	1	2a	2b	3	4	5a	5b	6		
15.標準支保パターン	A	B	CI	CII	DI	DII	E	F			
16.実施支保パターン	A	B	CI	CII	DI	DII	DIIIa	DIIIb	BL	CIII	

支保パターン	評点	A	B	CI	CII	DI	DII	E	F		
1.日本トンネル技術協会	56.3										
2.日本道路公団	60.1										
3. (標準)	48.6										
4. (実施)	55.8	A	B	CI	CII	DI	DII	DIIIa	DIIIb	BL	CIII

内空変位量	推定値(mm)	20.0	40.0	60.0		
1.日本トンネル技術協会	1.8	LEVEL-1	LEVEL-2	LEVEL-3	LEVEL-4	
2.	12.3	LEVEL-1	LEVEL-2	LEVEL-3	LEVEL-4	

天端沈下量	推定値(mm)	20.0	40.0	60.0		
1.日本トンネル技術協会	1.7	LEVEL-1	LEVEL-2	LEVEL-3	LEVEL-4	
2.	2.3	LEVEL-1	LEVEL-2	LEVEL-3	LEVEL-4	

変状の可能性	切羽部	異常なし
	吹付けコンクリート	異常なし
	ロックボルト	異常なし
	鋼性支保工	異常なし
	F.L.部	異常なし

項目	重要度	対策工および注意事項
掘削条件		
鋼性支保工		
吹付けコンクリート		
ロックボルト		
補助工法		

図－5 第一次地山診断書出力例

[作業坑]

地山評価点

—— 日本トンネル技術協会
 日本道路公団
 —— 当社方式

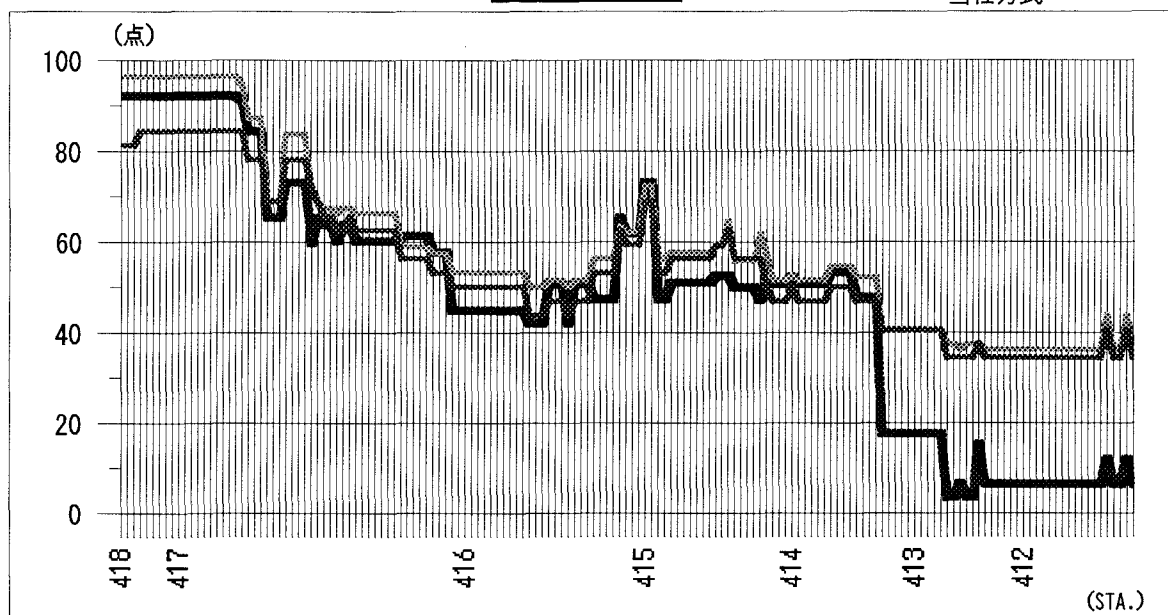


図-6 切羽進行に伴う地山評価点の変化（出力例）

②地山観察記録作成や提出用写真整理作業をはじめとする書類作成・提出業務が、データベースを利用して、また直接ネットワークを通じて実施できるので大幅な省力化となった

③岩判定における施主との協議や、出来高検収時の立会などの事前打合せが画像情報を用いて実施できるため、事務所間を往復する時間（約4時間）が不要となり、スケジューリングも容易となり施主・施工両サイドでの省力化の効果が大きかった
 b) 管理の質の向上からみたシステム開発の効果について

①切羽断面計測が切羽の進行と同時に実施できるので、余堀り、当たり、の情報をただちにつぎの掘削時に、作業員に図示しながら説明できるほか、切羽が相当量進んだ後で当たりとりのための再掘削を行うという後戻りの工程を引かなくてよいので、経済的な施工、工期の短縮が可能となった

②従来の切羽スケッチのみの方法に比べ、切羽から得られる地質情報の精度が向上したほか、これらの情報が岩盤判定の複数の当事者間で同時に共有できるため、より客観的な判定が可能となった

③現在掘削中のトンネルの坑口から現切羽までの切羽観察状況をコンピュータで統計処理、比較することにより、学習効果が得られるほか、データベースから他のトンネルで以前に得られた結果とも

対比できるため、岩判定をより客観的なものとすることができた

④ I T Vの画像をデジタル化したものをデータベースに入れることができることから、切羽の進行に伴う岩盤の変化を連続した画像としてきめ細かくとらえることができるので、岩盤の判定が容易となった

(2) 今後の課題

今回の開発については、切羽という対象をタイミングよくかつ精度よく観察、記録し、工事管理に利用するという立場からほぼ満足できるものとなった。

しかしながら、「現在切羽でどのような行為がおこなわれているか」を知るという作業状況把握については、テレビ画像を人間が常に注視しておく必要があり、効率的ではない。他のセンサーを併用するか、画像処理その他の方法によって自動的に工程あるいは不安全行動が管理できるようにすれば、一層管理の精度を上げることができる。この点についてさらに研究を続けたい。

切羽管理のもう1つの課題として、前方の地質予知という問題がある。画像処理技術からでもこれはある程度可能であると考えられるため、先に述べたとおり各種の研究が行われている。

当社では切羽前方予知のために F A C E（切羽を

意味する言葉)という技術を開発済みである。この装置は先行ボーリングを行いボアホールカメラでそのボーリング孔内を調査するものであり、小型ITVを利用してボーリング孔内を撮影して、画像処理を行うという点では装置の一部を切羽管理システムと共用することが可能である。

本システムでは先行ボーリングという作業が新たに加わるが、この作業を何とか切羽掘削のサイクルタイムの中に取り込み、この切羽管理システムに組み込みたいと考える。

今回開発されたシステムは、コンピュータや電子機器を複雑に組み合わせているため、利用者の教育に苦勞をした。また、故障時に現場の職員のみで対応することができなかった。実用化に向けてはハンドリングが容易なものにすべきと考える。

6. おわりに

従来のシステム開発では、効果が比較的に見積り易い現場管理の省力化を目ざした、個別の支援システムの開発が中心となりがちであった。

しかしながら、前回の報文でもふれたが、OA化による書類作成業務の減少など内業において程度の差こそあれ省力化が実現されつつあること、これに加え外業の省力化のための支援システムの開発についてもほぼ満足する結果が得られつつあること、さらに一連のトンネル工事現場調査を通じ、現在の現場組織および要員配置からみて省力化が限界にきていると考えられる。

以上の理由から、筆者らは、今後のシステム開発は、統合化へ向かう視点をもつべきであり、そのことによって省力化をも含めた新たな展開——工事現場のシステム化——が可能であると考ええる。

このような視点からおこなわれた今回のシステム開発は、NATMという手続きが比較的確立されたトンネル掘削工法を対象としたこと、しかも切羽という限られた空間内に作業と管理が集中している「トンネルの切羽管理のシステム化」、について行ったものであるため、比較的満足のできるシステムとなったと考える。

従って他の類似工事などへの適用については、まだまだ検討すべき課題も多く、今回の事例研究もシ

ステムの統合化への1ステップと考えている。今後も引き続き機会を捕らえいろいろな工種にチャレンジしてゆきたいと考えている。

最後に、今回事例研究の機会を与えていただいた日本道路公団上田工事事務所の方々に心より感謝の意を表するものである。

【参考文献】

- 1) 春名 攻、北角 哲、五十嵐善一；山岳トンネル工事現場のシステム化に関する研究、pp 61～70、建設マネジメント研究・論文集—Vol. 1, 1993年
- 2) 村田 均、川越 健、岩井孝幸、御手洗良夫；画像解析による岩種・岩級識別手法についての検討、pp1488～1489、土木学会第48回年次学術講演会予稿集、1994年9月
- 3) 川越 健、村田 均、岩井孝幸、御手洗良夫；画像解析によるトンネル切羽写真からの線情報の抽出、pp1490～1491、土木学会第48回年次学術講演会予稿集、1994年9月
- 4) 鈴木 誠、石井 清、黒田英高；三次元地質構造の推定と画像出力、pp79～85、清水建設研究報告、第48号、1988年10月
- 5) 和田 節、中澤重一、山本俊夫、柚木孝治、小泉重雄、篠田淳二；トンネル切羽観察に基づく未掘削部地質予測手法の研究、pp105～112、鴻池組技術研究報告—Vol. 1、1988年
- 6) 小林義美、寺田道直；画像処理による地質予知システムの開発、センサ技術—Vol. 13、No. 4, 1993年4月
- 7) 社団法人日本トンネル技術協会；地山評価のあり方に関する研究、1985年2月
- 8) 佐々木祐三、亀甲谷義高、磯野龍昭；古生層地山の地山評価と支保の選定、pp37～46、トンネルと地下—Vol. 19、No. 9, 1998年9月