

(Ⅲ-6)

SMB工法による効率的トンネル施工

EFFICIENT TUNNELLING BY SMB METHOD

佐藤工業㈱ 伊藤 伸一郎*

By Shinichiro Ito

従来のNATM工法による大断面トンネルの掘削工法は、一部の硬岩トンネルを除けば、ベンチカット工法によるものが、標準的であったが、施工性、安全性、作業環境の面で多くの問題点を抱えていた。SMB工法(SATO MICROBENCH TUNNELLING METHOD)は、従来のベンチカット工法の問題点の改善を図るために、3ブーム2チャージングケージを搭載した油圧式ホイールジャンボと、2台の吹付機を搭載した2ブームの吹付けロボットを開発することにより、切羽作業の集約化と並行作業を可能とした、全断面掘削に近いNATMの効率的掘削システムであり、抜群の施工スピードと省力化を実証している。SMB工法は、この他、坑内にテレビカメラを設置し、現場から離れた事務所内のモニターテレビで常時坑内の状態を監視する坑内監視システム、坑内の粉じんと有毒ガス濃度をセンサーで感知し、コンピュータとインバータの連動制御によって最適換気量を自動的に送風する換気制御システム、レーザ光線とコンピュータによるトンネル断面自動マーキングシステム等により、NATMの合理化施工を図っている。

【キーワード】新技術、安全管理

1. はじめに

大断面トンネルにおけるNATMの掘削工法は、一部の硬岩トンネルを除けばトンネルを上半、下半に分割して掘削するベンチカット工法が標準工法であり、施工性、安全性、作業環境の面で多くの問題点を抱えていたのが現状であった。

ここに紹介するSMB工法(SATO MICROBENCH TUNNELLING METHOD)は、これらの、問題点を解消させるため、3ブームの油圧式ホイールジャンボと2ブームの吹付けロボットを新しく導入し、ベンチ長のマイクロ化により全断面掘削に近い効率的トンネル掘削システムである。

この掘削システムは、九州横断自動車道杵島トンネルなど5件に導入され、抜群のスピード施工と省力化を実証し各方面から高い評価を受けている。ここでは、SMB工法の概要と新規に開発した機械について杵島トンネル工事を主体に報告する。



図-1 位置図

* 土木本部技術部 03-661-4794

2. 工事概要

- ① 工 事 名：九州横断自動車道杵島工事
- ② 工事場所：自) 佐賀県武雄市橘町
至) 佐賀県杵島郡北方町
- ③ 発 注 者：日本道路公団福岡建設局
- ④ 工 期：昭和61年11月18日
～平成元年 4月 5日
- ⑤ 工事概要：トンネル延長
 (上り線) 1,194.5m
 (下り線) 1,166.5m
 非常駐車帯 各1カ所
 連絡坑 1カ所

3. 地形・地質概要

杵島トンネルは、佐賀県武雄市街地から東方に約3.5kmに位置する標高370mの杵島山の北端尾根部

を通過し、縦断勾配2.5%、最大土被り約180mである。トンネル施工基面の地質は事前の地質調査、弾性波探査などの結果から、部分的に泥質な脆い部分を含むが、全般的には均質度の高い砂岩(弾性波速度3.2km/秒)に続き、岩層・層厚ともに不安定で脆弱化している砂岩・頁岩の互層(弾性波速度2.5km/秒)がある。トンネル中心部から東側坑口付近までは比較的土被りも厚く良好な安山岩質凝灰角礫岩(弾性波速度3.3km/秒)であり、トンネル中央部から西側坑口よりに分布する砂岩・頁岩の互層部分を除いては、ほぼ良好な岩盤であると推定されていたが、実際は東側坑口からトンネル中央部にかけての安山岩質凝灰角礫岩は、粘土を挟む亀裂が発達し、硬軟の移り変わりの激しい岩質であった。特にトンネル中央部の互層部分では予想以上に劣化が激しく、トンネル側壁部の押し出しを生じ、最大内空変位が82mmに達し、非常駐車帯では、CⅡ_L→DⅠ_Lのパターン変更を余儀なくされた。

(図-2、3、表-1)

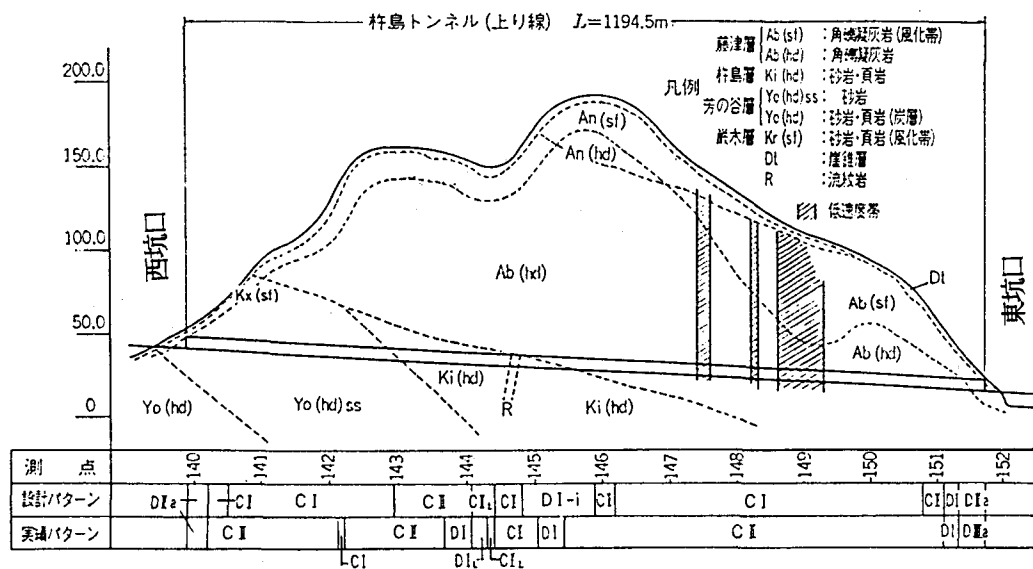


図-2 地質縦断図

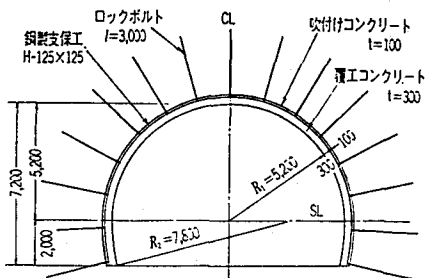


図-3 標準断面図

表-1 標準支保パターン

地山 等級	掘削工法	掘削長さ (上半) (m)	ロックボルト			鋼アーチ支保工			吹付け厚 (cm)	覆工厚(cm)	変形余裕量(cm)				
			長さ (m)	施工間隔 周方向 (m)	延長方向 (m)	上半部	下半部	達間隔 (m)			アーチ側壁部	インバーン部	上半部	下半部	インバーン部
B	上半工法	2.0	3.0	1.5 (1.5以下)	2.0	なし	なし	—	5	30	0	0	0	0	
C I	上半工法	1.5	3.0	1.5	1.5	なし	なし	—	10	30	0	0	0	0	
C II	上半工法	1.2	3.0	1.5	1.2	H-125	なし	1.2	10	30	0	0	0	0	
D I	上半工法	1.0	4.0	1.2	1.0	H-125	H-125	1.0	15	30	45	0	0	0	
D II	上半工法	1.0 以下	4.0	1.2 以下	1.0	H-150	H-150	1.0 以下	20	30	50	10	0	0	

4. 従来のNATM施工上の問題点

大断面トンネルの発破方式におけるNATMの掘削工法は、一部の硬岩トンネルを除けば硬岩部（地山等級A、B）では上下半交互並進によるロングベンチカット工法、軟岩部（地山等級C、D）では上下半同時並進によるショートベンチカット工法が一般的な工法として採用されてきたが、次のような問題点を抱えていた。

① 施工面では、上半、下半の競合作業による施工能率の低下。

② 安全性の面では、上半、下半の輻輳作業による重機車両との接触災害の発生。

③ 経済性の面では、機械や作業員増強によるコストアップ。

④ 作業環境の面では、吹き付け作業および掘り出し中の粉塵や排気ガスの発生源が2か所にまたがり坑内環境悪化の要因となる。

⑤ 地質が悪化した場合、早期断面閉合への対応がしにくい。

このように、従来のベンチカット工法は、施工性、安全性、作業環境の面で多くの問題点を抱えていた（図-4）

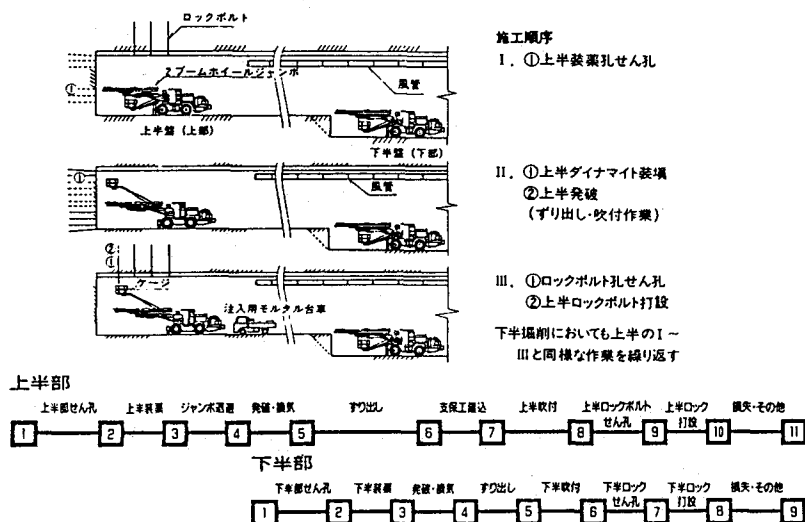


図-4 従来工法 上半先進ベンチカット工法（上下半同時並進）

5. SMB工法

SMB工法は大断面トンネルにおけるベンチカット工法の施工性、安全性、作業環境の抜本的な改善を図るために、油圧式ホイールジャンボ（3ブーム2チャージングケーシング装備）および2アーム吹付ロボットを開発することによって、切羽作業の集約化と並行作業を可能にしたNATMの効率的な掘削システムである。

5-1 SMB工法の概要

SMB工法の施工順序図を図-5に示す。

掘削断面は上半、下半の二つに分割し、ベンチ長は切羽の安定性および装薬の作業スペースを確保するために3～4mとした。

以下、この工法の特徴である並行作業の施工順序について述べる。

- (1) 上半の装薬孔とロックボルト孔の穿孔は並行作業で行う。その際、2台のチャージングケーシングはジャンボの最後部に移動しているため、穿孔用ブームとの競合がなく効率的に穿孔することができる。
- (2) 上半の穿孔作業が完了後、油圧式ホイールジャンボを4～5m後方に移動し、下半の装薬孔とロックボルト孔を並行して穿孔する。同時に2台のチャージングケーシングを上半切羽まで前進させ、上半ロックボルトのモルタル填充および定着を行う。
- (3) 下半の穿孔完了後、下半のロックボルトのモルタル填充および定着を行う。
- (4) 上半、下半のロックボルト完了後、引続いて装薬し、上下半同時に発破を行う。

以上、並行作業の施工方法及び施工順序について述べたが、実績では上半のみ支保工が入るCⅡパターンで、穿孔準備からロックボルト、発破、換気までのサイクルタイムは平均150分であった。

この新しい掘削システムの特徴をまとめると次のようになる。

- ① 上半、下半の並行作業により作業工程が短縮でき施工効率の向上を図ることができる。
- ② 穿孔から吹き付けまでの一連の作業が切羽1か所に集約できるので、作業が単純化され安全性が向上する。（並行作業の安全性については、ベンチ長が3～4mあり、直接的な上下作業とはならない。
- ③ 使用機械の台数の削減、省力化が図れる。
- ④ 換気用風管、電線等の発破による損傷、およびこれらの移設作業のムダ、ロスを解消できる。
- ⑤ 切羽を集約化することにより、ずり出し、吹付作業の回数を従来の半分に、また必要な換気量を確保することによって、粉じんや排気ガスの暴露時間が減少し、坑内作業の改善を図ることができる。
- ⑥ 地質が悪化した場合、早期に断面閉合が可能であり、硬岩から軟岩、土砂に至るまで幅広い地質条件に適用させることができる。

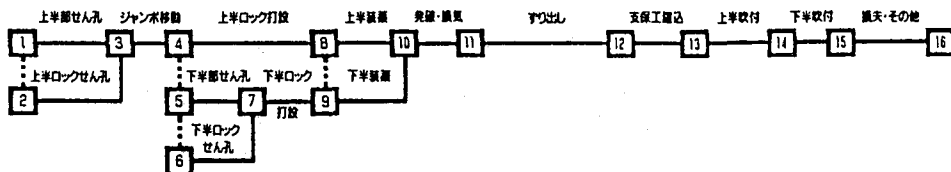
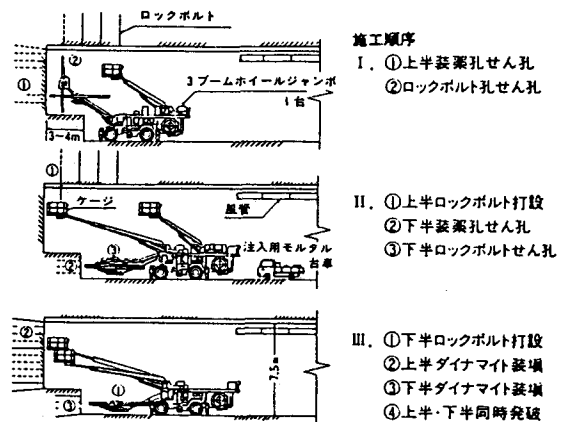


図-5 SMB工法施工順序図

5-2 新機械の開発

表-2に機械、設備の一覧表を示す。このうちSMB工法のために開発した油圧式ホイールジャンボ吹付ロボット、エレクトについて以下に述べる。

(1) 油圧式ホイールジャンボ

油圧式ホイールジャンボは3ブーム、2チャージングケージを装備したホイールジャンボで、ミニベンチからロングベンチまで、すべての工法に対応でき硬岩から軟岩に至るまで幅広い地質に適用可能である。



写真-1 装薬孔とロックボルト孔の並行作業

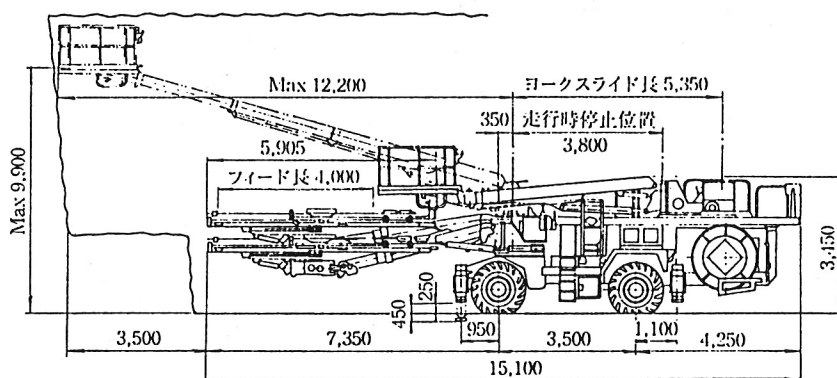


図-6 油圧式ホイールジャンボ (JTH3R-135)

表-2 機械、設備一覧表

種 別	仕 様
使 用 機 械	油圧式ホイールジャンボ (3ブーム, 2バスケット) 1台 TCM-870 1台 TCM-870 1台 8m ³ ベッセル 25面 0.7m ³ バックホウ 1台 0.45m ³ ブレーカ 1台 4t ユニーク 1台 エレクト台車 1台 2アーム吹付ロボット 1台 アリバ 280 FF 2台 4.5m ³ トラミキ 2台 ロータリポンプ 1台 トムセン NCP 810 S 1台 高所作業車 2台
配 給	エアマン 150 S 2台 タービン 2"×6 段 1台 タービン 1 1/2"×4 段 1台
排 水	水中ポンプ 2"~4" 1台
換 気	コントラファン 1400 1台 110kW×2 連 インバータ装置
備 用	吹付プラント 30m ³ /hr 1基 濁水処理設備 50 t/hr 1基 荷 役 パワーリーチ 2t 1台

表-3 JTH3R-135 主要諸元

名 称	諸 元
機 体 寸 法	高 3.45×幅 3.00×長 15.10 m
機 体 重 量	41 t 前輪荷重 25 t 後輪荷重 16 t
水平削孔範囲	高 8.0×幅 13.10 m
ドリフタ	HD 135×3
ガイドセル	GH 160-40(ZC)×3 ガイドスライド 1.6 m フィード長 4.0 m
ブ ー ム	JE 160 TR×3 ブームスライド 1.6 m
チャージングケージ	ZC 6688×2 ヨークスライド 5.35 m ブーム伸縮最大 12.2 m
エ ン ジ ン	三井ドイト BF 6 L 913 空冷 4 サイクルディーゼルエンジン 135 PS
動 力 設 備	158 kW
走 行 装 置	タイヤ前輪ダブル 後輪シングル

また、マーキング、穿孔、ロックボルト、装薬等の作業が十分に安全な環境のもとで並行作業を行うことができ、その結果、作業の効率化が図られる。

おもな開発項目と実施効果は以下の通りである。

① チャージングケー지를2台装備することによりロックボルト、装薬時間の短縮と作業効率の向上を図ることができる。

② 前後にチャージングケー지가スライドするヨークスライド機構およびケージブーム2段伸縮機構を装備する事により、チャージングケージと穿孔用ブームとの競合が防止でき、上半と下半の並行作業が可能となる。

③ 2台のチャージングケージ間の干渉防止機構を装備することにより、スイング角度が規制され安全作業が可能になる。また1台だけ使用する場合には規制が解除され、1台で全断面の作業範囲をカバーすることができる

④ チャージングケージに接近警報装置を装備しているので、天端および側壁にケージが接近すると、センサーとリミットスイッチが作動し警報ブザーを発する。(図-6、表-3)

表-4 マンティスSF-2 主要諸元

名 称	諸 元
機 体 寸 法	高 3.55×幅 2.8×長 11.3 m
機 体 重 量	33 t
吹 付 範 囲	AL-305, 最大旋回半径 4.5 m AL-305, 最小旋回半径 2.5 m AL-305, トンネル軸方向 3.0 m
吹 付 能 力	AL-280 FF (2.0~12.0 m ³ /hr) ×2 台
空 気 消 費 量	12 m ³ /min ×2 以上
動 力 設 備	15 kW ×2 台, 7.5 W ×2 台

(2) 2アーム吹付ロボット

NATMの効率化を進める上で重要な課題の一つである吹付時間の短縮を主目的として、吹付機を2台搭載した2アーム吹付ロボットを開発した。

開発目的と実施効果を以下に示す。

① 2台の吹付機(アリバ 280FF)と2基の吹付アーム(アリバ 305)をコンパクトに一体化する

事によって2系統での吹付が可能になり、吹付能力が大幅に向上し吹付時間の短縮を図ることができる。吹付能力の実績は2系統で18~20 m³/hrであり、従来方式と比較して吹付時間は、1/2~ 1/3に短縮されている。この大容量吹付によって大断面トンネルにおける地山の早期安定化が図られ、また吹付中の粉じんについては一時的に粉じんが多く発生するが、粉じん暴露時間が短くなるため、粉じん抑制材の使用、大容量換気方式の採用により坑内環境は従来方式より改善されている。

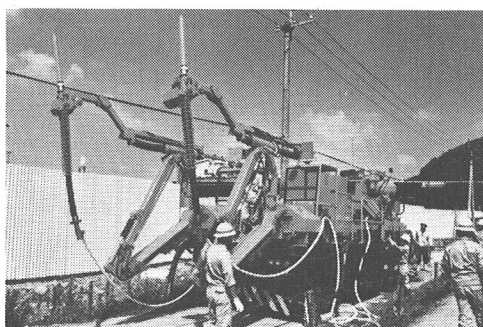


写真-2 2アーム吹付ロボット

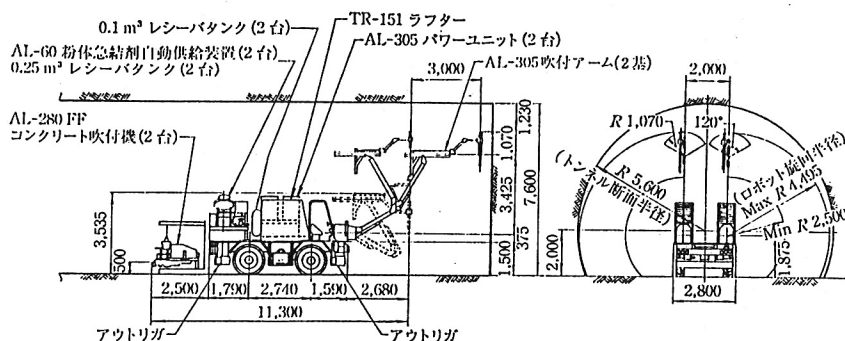


図-7 2アーム吹付ロボット(マンティスSF-2)

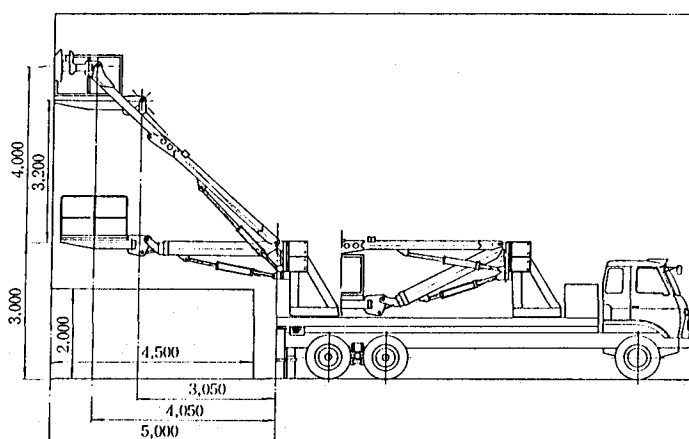
② 2基の吹付アーム間に干渉防止機構（電氣的、機械的）を装備することにより、同時に操作しても互いに干渉することなく、トンネルの左、右半分を各々のアームで安全に吹付けることができる。またどちらかのアーム、吹付機が故障した場合にも残りのアーム、吹付機を用いて全断面吹付が可能である。

③ 通常はトラックミキサーを2台並列に並べて吹付けするが、1台でもY字型バイブレータホッパー（強制供給材ホッパーシュート）を装備することによって吐出量を低下させることなく、2系統の吹付を実施することができる（図－7、表－4）

(3) エレクタ台車

今回開発したエレクタ台車（1ケージ装備）は、従来のエレクタに比べコンパクトであり、エレクタ本体が架台のレール上を前後にスライドするため、ベンチの長さに多少の相違が生じてもトラック本体を固定したままで柔軟に対応することができる。1台のケージは支保工の天端ボルト、継ぎ材、金網等を取り付けるために使用した。（図－8）

以上が本システムのために今回開発した機械であるこのほかに、次のような新技術を導入しNATMの効率化施工を図っている。



図－8 エレクタ台車

5-3 その他の技術

(1) 坑内監視システム

施工・安全管理などに有効なこのシステムは、坑内にテレビカメラを設置することにより、現場から離れた事務所内のモニターテレビで常時坑内の状態を監視することができる。本システムの特徴と効果について列記する。

- ① 職員の現場作業時間の効率化。
- ② サイクルタイムの確認とロスタイムの検討。
- ③ 不安全行動のチェックと作業手順の確認。
- ④ 夜間作業の内容および異常時の状況確認。

（図－9）

(2) 送風機の自動運転

換気システムは坑口に設置した大容量軸流ファン（ $\phi 1,300$ 110kw × 最大換気量 2,000 m^3/min ）による送気方式で、制御方法はすでに当社が開発した「全自動インバータベンチレーションシステム」を基本に、SMB工法の特徴を生かした方法を採用した。

この換気制御システムは、トンネル坑内の粉じん有毒ガス濃度をセンサが感知し、コンピュータとインバータの連動制御によって最適換気量を自動的に送風するもので、粉じんと有毒ガス濃度を設定した管理目標値まで速やかに希釈するシステムである。

このシステムにより各作業サイクルに応じた換気風量の制御が行え、省エネ化が図れる。

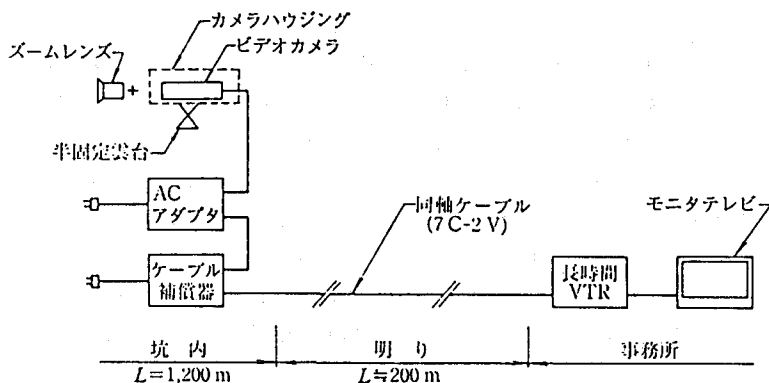


図-9 坑内監視システム

トンネル断面自動マーキングシステム

本システムは、山陽自動車道書山トンネル工事で考案され、山陽自動車道城山トンネル工事で実用化されたものである。

従来、NATM工法における無支保区間での余掘り対策としては、人によるマーキングに頼っていたが

コンピュータとレーザ光線・光波を使ったこの新システムは、一定でより正確な断面形状を切羽面に描くことができ、装薬孔の迅速な配置、当たり・余掘りのチェックに効果を発揮するもので、SMB工法によって、当システムの実用化が可能になった。

(図-10)

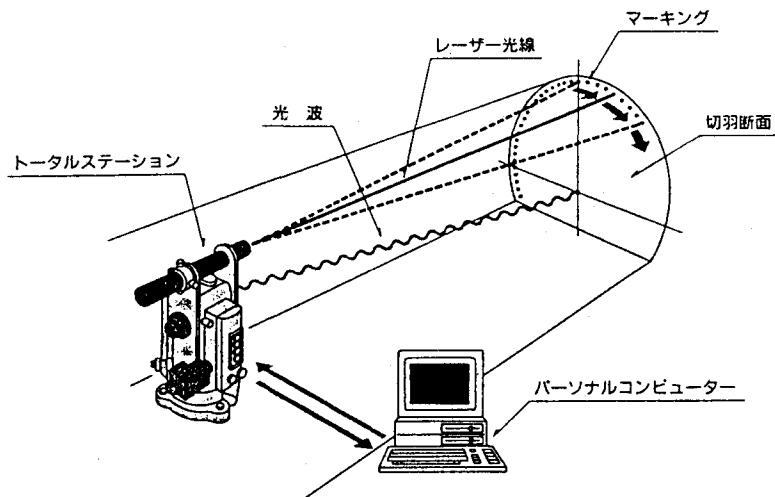


図-10 トンネル断面自動マーキングシステム

6. ずり出し方式（ベッセル工法）

ずり出し方式は、1)夜間の坑内仮置 2)排気ガス低減による坑内作業環境の改善 3)ずり運搬機械の台数低減と省力化 4)ずり出し作業の効率化とずり出し時間の短縮のためにベッセル工法を採用した。

この工法は2台のホイールローダ（TCM870 3.5 π ）によって切羽のずりを速やかに処理するために150～200m後方に仮置きした後、他の作業の合間に坑外土捨場まで搬出する方法である。坑内仮置き場まで1台が積込機、1台が運搬機となる。坑外土捨場までは2台とも運搬機となる。

図-11はベッセル工法の施工順序図であるが、この図により、ずり出し方法を説明する。

①運搬専用のホイールローダが空のベッセルを切り羽近くまで運搬し、ベッセルを切り離し後退する。

② 積込専用のホイールローダが空のベッセルを積込む。

③ すでに積み込みが完了しているベッセルに並列して2箇目の空のベッセルを切り離した後積み込まれたベッセルを後方へ運搬し仮置きする。

④ 坑内仮置き場から坑外土捨場までは2台のホイールローダが運搬機となり、他の作業の合間に搬出する。

ベッセル1函の容量は8 π で、ホイールローダのバケットとベッセルはワンタッチの脱着装置によって簡単に切換えられる構造になっている。このように、この工法のメリットは積込機的能力が最大限に発揮されること、トンネル延長に左右されずずり出し時間が一定となることである。試算では約1,500m位まで2台のホイールローダで十分対応できるずり出し時間はCⅡパターンで、コソク、アタリ取りを含めて平均70分、ずり処理能力は1函当たり、3.5分、時間当たり140 π である。

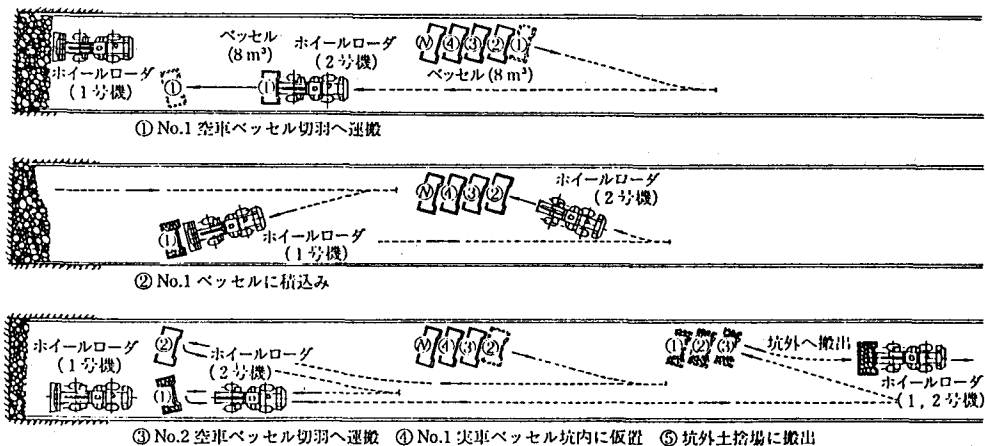


図-11 ベッセル工法施工図

7. 工事実績

昭和62年4月から坑口付近の地すべり対策として切り取り法面の長尺アンカーにより補強土工法と坑口上部の補助工法として垂直縫地ボルト工を実施し5月末に坑口付けを行った。坑口より73m区間は従来のベンチカット工法を採用し、インバート施工後8月下旬より本格的にSMB工法による掘削を開始し昭和63年7月9日に完了した。トンネルの地質

は想定よりも悪く、大半が上半のみに支保工の入るCⅡパターンで、支保工の入らないCⅠパターンはわずか9mであった。CⅡパターンの実績進行は、最大日進6m、最大月進144m、トンネル全体の平均月進は105mであった。表一にSMB工法の施工実績表を示しているが、このほかに、現在、山陽自動車道の72mのトンネル(L=1,660m)での採用が決定している。

表一5 SMB工法施工実績

	トンネル名	発注者	断面積(m ²)	延長(m)	地質	支保パターン
1	九州横断自動車道杵島トンネル	日本道路公団	75	1200	砂岩、角礫凝灰岩	C~D
2	山陽自動車道書写山トンネル西	日本道路公団	76	1431	凝灰角礫岩	B~CⅠ
3	山陽自動車道城山トンネル	日本道路公団	70	752	泥岩	CⅠ~CⅡ
4	長野自動車道会田トンネル南	日本道路公団	75	1617	第三紀砂岩、泥岩	CⅠ~CⅡ
5	奥美濃発電所導水路トンネル	中部電力	50	866	砂岩、流紋岩	CH~CL

8. おわりに

本報文では、地質条件のあまり良くないトンネルの施工においても、新しい機械の開発によって全断面に近い環境のもとで、効率的で、しかも安全性の高い施工ができる、「SMB工法」について報告した。今後とも、硬岩から軟岩、土砂へと目まぐるしく地質が変化する、わが国の大断面トンネルの施工においても、十分対応できる工法であると確信している。

9. 参考文献

- (1) トンネルと地下 1988年 8月
- (2) 電力土木 No.206
- (3) 建設の機械化 1986年 9月