

北陸新幹線、秋間トンネルの施工

(掘削・覆工併進工法の採用)

MECHANIZED CONSTRUCTION OF THE AKIMA TUNNEL IN THE HOKURIKU SHINKANSEN

— ADOPTION OF THE EXTRUDED CONCRETE LINING METHOD —

柴田 陽一*・鬼頭 誠**・斎藤 浩司***

Yoichi SHIBATA, Makoto KITO and Hiroshi SAITO

For the construction of the Akima Tunnel, the longest tunnel between Takasaki and Karuizawa of Hokuriku Shinkansen, as first trial on construction of a Shinkansen type tunnel, we adopted the Extruded Concrete Lining Method, for the sake of rapid construction, labor saving and cost reduction. For transportation of concrete materials as well as muck produced in the course of the rapid excavation, we applied the pneumatic capsule transportation system. Under this system, the transport carriers (capsules) are sent out through the box route with a low pressured air current.

Keywords: shield tunneling, extruded concrete lining, pneumatic capsule transportation system,

1. まえがき

北陸新幹線高崎・軽井沢間は、工事延長約43kmの路線であり、この間の標高差は約850mに及んでいる。路線選定における高低差の課題は、車両の技術開発による性能の向上から、30%の急勾配を連続して設定することで克服されたが、急峻な地形を貫くため、工事延長の約6割がトンネルとなっている。

このうち最長の秋間トンネル東工区では、長大山岳トンネルにおける省力機械施工の試みとして、世界最大級の施工機械を用いる掘削覆工併進工法と、高速施工に伴って発生する大量のずりと覆工コンクリート材料の運搬を効率的に行うため、運搬車両（カプセル）を低圧空気流で管路の中を走行させる空気カプセル式搬送システムをトンネル工事では初めて採用した。ここでは、その設計・施工計画の概要と現在までの施工状況について報告する。

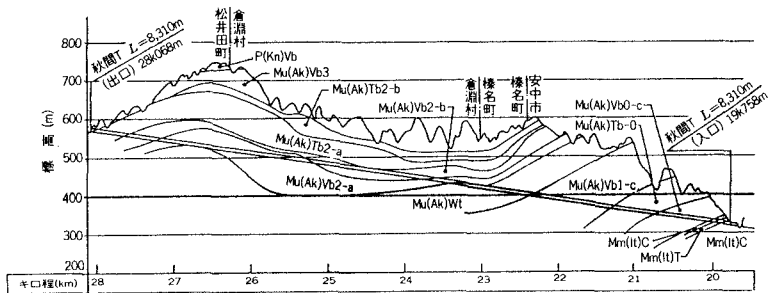
* 正会員 日本鉄道建設公団 新幹線部新幹線第二課長

** 正会員 — “ — 設計室調査役

*** 正会員 — “ — 北陸新幹線建設局安中鉄道建設所長

2. 秋間トンネルの概要

秋間トンネルは、北陸新幹線高崎・軽井沢間のほぼ中間に位置する延長約8,300mの新幹線複線型のトンネルである。平面線形は、入口より半径3,000mと4,000mの曲線が反向して連なり、全延長の約7割を占めている。縦断線形は、出口に向かって全て30‰の上り勾配で、土被りは両坑口付近を除き50～200m程度である。トンネル周辺の地質は、新第三紀中新世の板鼻層および秋間層を基盤とし、これらを覆って第四紀の浅間山の降下火山灰層が分布している。秋間層はルートのほぼ全体を占める地層であり、凝灰岩、凝灰角礫岩、火山角礫岩、溶結凝灰岩等の火山碎屑岩類からなっている。(図-1)



地質凡例			
地質年代	地層名	地層記号	層相・岩相
新第三紀	中新世	P(Kn)Vb	火山角礫岩
		Mu(Ak)Vb3	火山角礫岩(凝灰角礫岩)
		Mu(Ak)Tb2-b	凝灰岩、凝灰角礫岩、火山角礫岩
		Mu(Ak)Tb2-a(Lt, Pt)	軽石質凝灰岩、火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩(凝灰岩、火山角礫岩)
		Mu(Ak)Vb2-b	火山角礫岩(火山礫岩)
		Mu(Ak)Tb2-a	火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩、火山礫岩(火山角礫岩)
		Mu(Ak)Wt	溶結凝灰岩
		Mu(Ak)Vb1-c	凝灰角礫岩、火山礫岩(凝灰岩、火山礫凝灰岩、火山角礫岩)
		Mu(Ak)Tb0	火山礫凝灰岩(凝灰岩)
		Mu(Ak)Vb0-c	凝灰岩、凝灰角礫岩
	板鼻層	Mn(I)C	礫岩
		Mn(I)T	凝灰岩

図-1 地質縦断面図

内空断面の形状は、建築限界外に約50mmの余裕と湧水処理のための中央下水断面を確保するとともに、力学的な安定性と経済性を考慮した。

また、覆工コンクリートの巻厚は50cm、コンクリートの設計基準強度は、 $\sigma_1=100 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_2=300 \text{ kgf/cm}^2$ としているが、一日圧縮強度は型枠の転用サイクルとの関連から脱型時における所要強度として定めたものである。

施工上の蛇行に対する余裕は、地山条件、機械の方向制御機構、掘進速度、類似工事の事例等を考慮して断面の中心から上下左右に各10cmとした。(図-2)

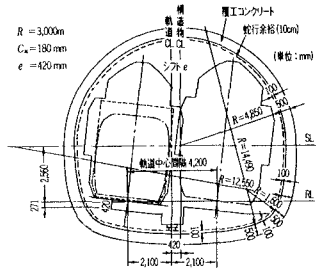


図-2 トンネル断面

3. 設計・施工計画の概要

秋間トンネルの設計・施工計画においては、①最近の熟練労働者の不足と高齢化に対応した大幅な機械化、省力化、安全性と作業環境の向上、②長い延長を高能率で施工し、施工箇所を集約することによる全体的な工期の短縮、省力化、工事費の低廉化、といった観点から検討を重ねた結果、新幹線トンネルでは初めて掘削覆工併進工法を採用することとした。

本工法による施工は、機械設備が高価なことから一般に施工延長が長いほど経済的となるので全体工期、さらには土捨場の位置と容量などの施工条件を考慮して、秋間トンネルに適用することとした。

工法の採用にあたっては、特に地山の性状とその施工法ならびに高速掘進に伴うずりの運搬方法について検討した。

(a) 適用地山の性状と施工法

施工対象地山の一軸圧縮強度は、50～600kgf/cm²程度の範囲に分布しており、一部固結度の低い部分で湧水を伴った場合に切羽の自立性が懸念されるものの、全体的には安定した地山と考えられる。

溶結凝灰岩層の一部には、一軸圧縮強度が300kgf/cm²以上の値を示す高強度の岩石層の出現が想定され、その施工性が当初からの課題であった。しかし、最近では硬岩地山に対する機械掘削能率向上のための研究と実用化が進み、高出力、低速回転のカッタが開発されて、従来よりも硬い岩盤を掘削することが可能となってきた。また、硬岩を対象としたピックの開発と実績も重ねられており、これらを活用することにより一部に硬質部を含む溶結凝灰岩層の掘削も効率的に施工できると考えている。

また、秋間層は、主として安山岩からなる大礫が頻繁に含まれていることが予想される。ボーリングのデータからは礫の長径が60cm以上と推定される巨礫の混入も多く、最大110cmのコアも採取されている。このような高強度の巨礫を含む地山の掘削では、礫部にあたる衝撃によってピックの折損が懸念される。さらに、掘削線に跨って礫が存在する場合には、掘削線の確保はもとより、シールド機が蛇行する原因ともなるので確実に切削する必要がある。このような場合には、カッタの強力な推力とトルクを利用して礫を圧砕する方法などを検討している。

(b) ずりおよび覆工コンクリート材料の運搬方法

掘削断面積が約90m²の大断面を高速で掘進するには、連続して発生する大量のずりの搬出と、掘進に追従して打設する覆工コンクリート材料の搬入が円滑に行われることが前提となるので、掘進速度とバランスのとれた高能率の運搬設備が必要となる。坑内の運搬については、一般的なダンプトラック方式やバッテリー機関車によるレール方式では、30%の急勾配の長い延長を連続して大量輸送する場合には効率と経済性のみならず安全性、作業環境上においても問題があった。

一方、坑口から直線距離にして約2km離れた土捨場までのずり運搬をダンプトラックで行うとすると、狭あい線形の悪い一般公道を1日8時間運行するとして11t車を1分30秒～2分間隔で走行させることとなり、地域住民の生活に影響が生ずるものと考えられる。

そこで、我が国では鉱石の輸送などで実用化されている空気カプセル搬送システムをトンネル施工に導入する適用性について検討を進め、その結果周辺環境に及ぼす影響も少なく、安全かつ効率的な輸送が可能で、また、経済的にも有利との結論が得られ、この方式でシールド機の後方から土捨場まで一環したシステムを構成し、ずりの搬出のみならず坑口から坑内プラントまでの覆工コンクリート材料の運搬を一元的に行う計画を採用した。

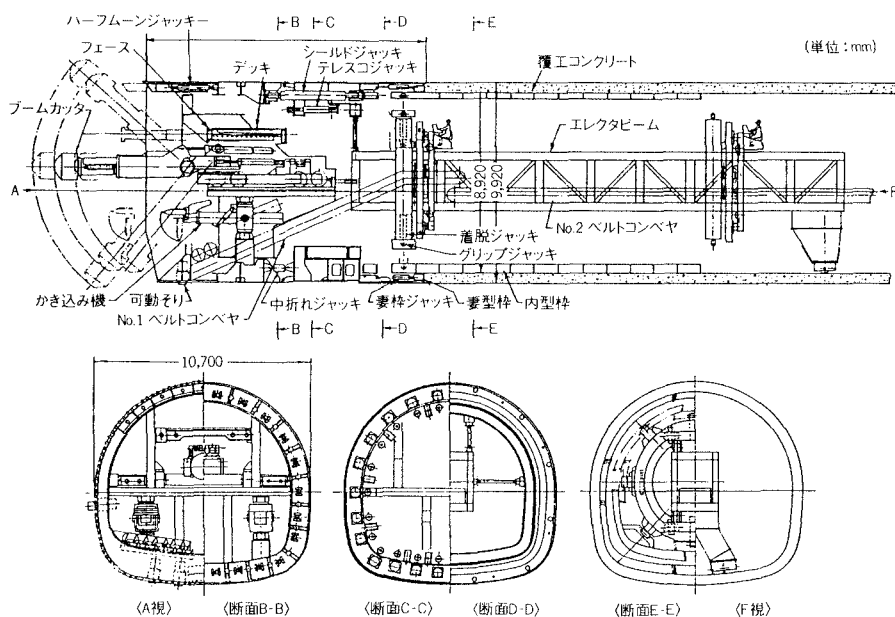
4. 掘削覆工併進工法の機械設備

シールド機は、掘削と同時並行して覆工を構築する構造で、掘削と推進機構を備えた前胴部、方向制御を円滑にするための中折れ装置が組み込まれている中胴部および伸縮装置とコンクリート打設装置を備えた後胴部から構成されている。(図-3)

掘削機構は、最大外径1.3mのカッタヘッドを備えた出力250kWのブームカッタ、バックホウタイプのずりかき込み装置、ベルトコンベアおよびムーバブルフード等の山留め装置からなっている。

シールドの推進は、スキンプレート内空側の外周に配置された24基のシールドジャッキ(総推力8,000t)で行うが、反力は内型枠から得る。

内型枠機構は、内型枠およびその脱型、移動、組立の一連の作業をおこなうエレクター装置とエレクター走行ビームからなっている。内型枠は、シールドジャッキ反力、土圧・水圧およびコンクリート打設圧に耐



図－3 掘削覆工併進工法用シールド機の概要図

えられる構造で、施工性と施工実績を考慮して1リングの幅は1.2mで8分割とした。準備基数は掘進速度、コンクリートの養生期間、推進反力をうける覆工コンクリートとの摩擦力などの検討から13基とした。内型枠はコンクリート所要強度発現後、最後部のリングからエレクターにより順次脱型され最前方に移動して組み立てられ反復使用される。

混練されたコンクリートは、シールド機械後方のコンクリートポンプにより後胴部に設備されたロータバルブを介して全断面にゆきわたるよう妻枠装置に分散配置された12の打設口から型枠内に圧入される。型枠内のコンクリートは、打設圧調整装置によって一定の圧力で加圧制御されるので、地山に密着した高品質の覆工コンクリートが期待できる。

掘削覆工併進の標準的施工手順を図－4に示す。

5. 搬送機械設備

空気カプセル輸送方式による搬送設備は、シールド機のずり搬出用ベルトコンベアの後方から坑外の土捨場までの間に設置するものとした。カプセル列車の走行路となる管路の坑外の区間は、線形規格（最小曲線半径 50m、勾配は原則として10%以下）地形、地質、周辺環境におよぼす影響等を考慮したルート選定の結果、約 3kmとなった。したがって、坑内と坑外を合わせた管路の延長は最大約10kmとなる。管路の構造は、弁設置箇所や分岐部をのぞいて1.5～2mの鉄筋コンクリート製の角型管路（縦横の内空90cm）を相互にボルトで緊結し、複線で敷設する。

カプセル車は、上方の開口部からずりやコンクリートを積み込み、排出は底蓋を開放して行う。カプセル車3両で1列車を編成し、1列車あたりの積載量は約 3.3m³で、走行間隔は最小 2分程度である。

搬送設備は、坑内、坑口、土捨場の各受送基地および坑内管路、坑外管路で構成される。（図－5）

各受送基地では、カプセル列車の制動および次のラインへの発射を行うとともに、コンクリートの排出、ずりの積込（坑内受送基地）、コンクリートの積込、カプセル車の洗浄や保守（坑口受送基地）、ずりの排出（土捨場受送基地）などを行う。

各管路内においてはカプセル列車は、坑内管路のずり搬出ラインでは30%の下り勾配を重力により走行す

- ① 1.掘削関係
 - a.掘削開始(60cm)
 - b.ずり出し準備
 2.覆工関係
 - a.No.1内型枠組立て完了
 - b.シールドジャッキ、型枠セット完了
- ② 1.掘削関係
 - a.掘削終了
 - b.ずり出し中
 2.覆工関係
 - a.コンクリート打設(30cm)
- ③ 1.掘削関係
 - a.シールド機推進(60cm)
 - b.掘削停止中
 - c.ずり出し中
 2.覆工関係
 - a.コンクリート打設(60cm まで完了)
 - b.最後方内型枠脱型
- ④ 1.掘削関係
 - a.掘削開始、終了(60cm)
 - b.ずり出し中
 2.覆工関係
 - a.コンクリート打設(90cm まで完了)
- ⑤ 1.掘削関係
 - a.シールド機推進(60cm)
 - b.掘削停止中
 - c.ずり出し中
 2.覆工関係
 - a.コンクリート打設(120cmまで完了)
 - b.No.2内型枠組立て準備

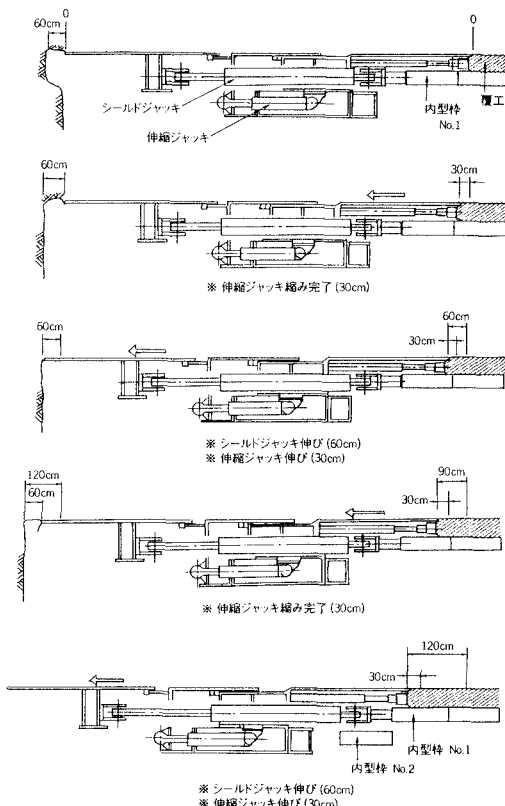


図-4 掘削覆工併進工法の標準的な施工手順

るが、それ以外のラインでは、ブローアの吐出（空車返送ラインでは吸引）気流中にカプセル列車が存在することによって生ずる列車前後の圧力差によって走行する。また、制動部では上り勾配、速度調節弁通過後の空気のクッション作用により極く低速度まで減速され、先行列車に衝突して停止する。

搬送機械設備の設計においては、管路内に列車を走行させた場合の管内の風速、圧力状態、列車速度、間隔等、走行・制動の状況を再現するシミュレーションを行って、管路の最終線形、ブローア容量（坑内搬出；450 m^3/min 、坑外搬出；520 m^3/min 、坑外返送；380 m^3/min ）、制動ゾーンの延長、速度調節弁の位置と口径などの仕様を決定した。また、このシミュレーションの結果、カプセル列車の平均速度は、坑内搬入、坑内搬出、坑外搬出、坑外返送の各ラインで、それぞれ 6.1 m/s 、7.6 m/s 、7.1 m/s および 6.3 m/s となる。列車数は、総延長10 km の場合で38編成必要となる。

6. 現在までの施工状況

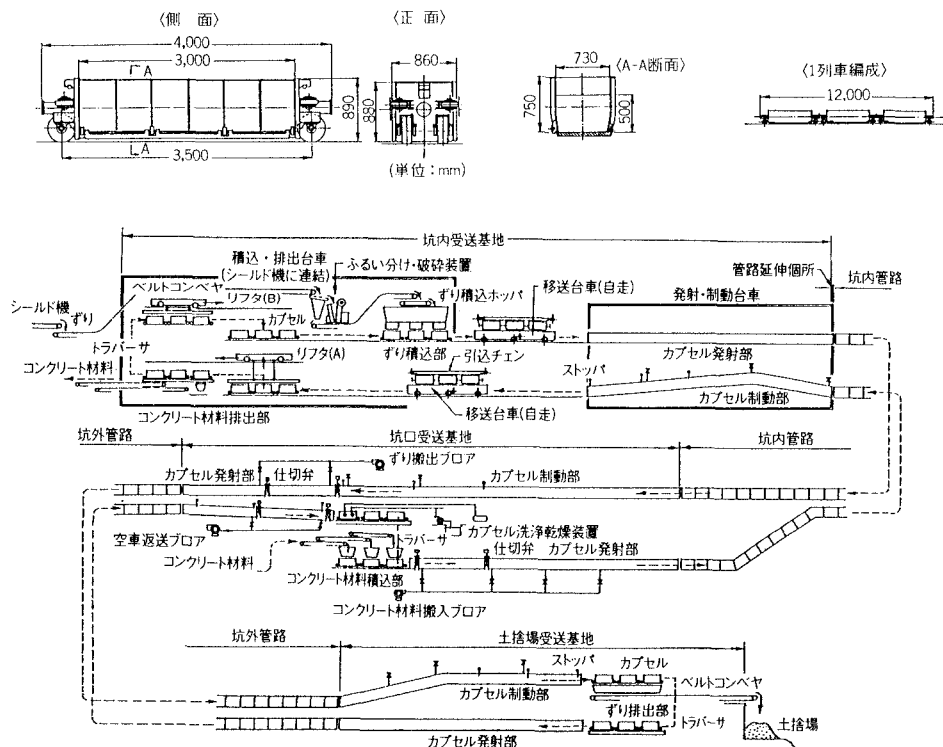
掘削覆工併進機械設備は、1990年 4月から設計・製作に入り、翌年 1月に工場における組立・試運転の後、分割し現地に搬入され、3月から 450t、200tクレーン等を使用して組み立てを開始し、5月末には本体と内型枠装置を完成した。

一方、現地においては坑口付近の地形上の制約から、坑内受送基地を含めた機械設備全体を組み立てるヤードが確保できないため、坑口から 225 m 間は、あらかじめNATMで掘削し、坑口付近で機械設備を順次組み立て、併進機械の設備により覆工コンクリートを打設しながら坑内へ送り込む方式を採った。

この区間での覆工コンクリートの施工は、機械の試運転およびコンクリート打設、内型枠の解体、移動、組立、機械の推進といった一連の作業への熟練の場として活用されたが、開始直後は、機械の初期的トラブルや作業員の不慣れから手間取ったものの、最終の段階では 8～9リング/日（9.6～10.8 $\text{m}/\text{日}$ ）の進捗が

安定して得られるようになった。また、この区間の覆工コンクリートの配合では、水和熱抑制のために、セメント量を減らす試みとして、混和材としてフライアッシュを用いた数通りの配合によるコンクリートを実際に打設した。これを今後の本格的施工の参考とすることとしている。

搬送機械設備では、10月末で受送基地および坑外管路敷設工事を終え、11月上旬現在、速度調節弁の開度調整を含む試運転を行っている。



図－5 カプセル車および搬送システム概要図

7. おわりに

本工法ならびに搬送方式は、新幹線トンネルの施工においてはともにはじめての試みである。掘削覆工併進工法については、高強度の転石の出現、多量の湧水に遭遇した場合の掘削方法およびコンクリートの打設方法、覆工コンクリートのひび割れ防止策、搬送機械設備では、より効率の良い運行システムの確立、トラブル発生時のシステムの迅速な復旧方法などの検討課題を擁している。今後の施工を通してそれらの問題点の解決策を探究するとともに、技術の発展向上を図る努力をしてゆく所存である。

今後も機会を得てその後の施工状況等を報告し、ご指導を仰ぎたいと考えている。

8. 参考文献

- 1) 長崎光男・友田 孝：ECL とカプセル搬送で長大トンネルの高速施工に挑む 北陸新幹線秋間トンネルトンネルと地下 vol.22,no.10,pp.15～23
- 2) 鬼頭 誠ほか：山岳トンネルの長距離・高速化施工 機械掘削・覆工コンクリート併進工法、トンネルと地下 vol.21,no.5,pp 7～pp13
- 3) 併進工法研究会編：掘削・覆工併進工法（山岳編），吉井書店