

自由断面掘削機とガントリージャンボによる軟岩地山のミニベンチ工法

Mini-Bench Method in Soft Rock using Roadheader and Gantry-Jumbo

河田孝志*・服部一夫**・梅澤 一***・市橋 学****・斉藤浩司*****

Takashi KAWATA, Kazuo HATTORI, Hajime UMEZAWA, Manabu ICHIHASHI and Hiroshi SAITO

Satomi Tunnel is one of the long tunnels with the 2,493m length for the Hokuriku Shin-kansen project under construction by Japan Railway Construction Public Corporation (JRCC). The construction of Satomi Tunnel introduces the roadheader for the full-face excavation and multi-functional gantry-jumbo for the improvements in the safety and working condition by the centralization of the working spots using the mini-bench method in the soft rock.

The paper reports about the construction data of the mechanical excavation and deformation patterns of the tunnel based upon the observation.

Keywords: mini-bench method, soft rock, full-face excavation, multi-functional gantry-jumbo

1. はじめに

里見トンネルは、日本鉄道建設公団が建設を進めている北陸新幹線の長大トンネルの1つで、全長2,493mの新幹線複線断面のトンネルである。

本トンネルでは、作業箇所の集約化による安全性と作業環境の改善、上・下半の同時施工による作業の効率化を目的として、全断面对応型自由断面掘削機と多機能型ガントリージャンボ（写真-1）を導入し、軟岩地山を機械掘削によるミニベンチ工法で施工している。

支保パターンは、日本鉄道建設公団の「NATM設計施工指針（案）」における指針値を、同様な地質における施工実績を基に見直した「北陸新幹線高崎・軽井沢間に適応するローカル

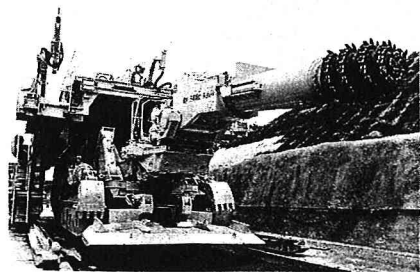


写真-1 全断面对応型自由断面掘削機
とガントリージャンボ

-
- | | | | |
|-------|-----|------------------|---------------|
| * | 正会員 | 清水・日本国土・井上共同企業体 | 里見トンネル作業所工事主任 |
| ** | 正会員 | 清水・日本国土・井上共同企業体 | 里見トンネル作業所長 |
| *** | 正会員 | 清水・日本国土・井上共同企業体 | 里見トンネル作業所工事課長 |
| **** | 正会員 | 日本鉄道建設公団北陸新幹線建設局 | 工事第一課長 |
| ***** | 正会員 | 日本鉄道建設公団北陸新幹線建設局 | 安中鉄道建設所長 |

支保パターン」により設計されている¹⁾。

代表的支保パターンを図-1に示す。

本報告では、ショートベンチとの比較検討結果、施工実績ならびに、計測結果に基づく変形、支保特性について述べる。

2. 地形、地質概要

本トンネルは、烏川右岸から秋間丘陵の北東端部まで、標高300m~400mの秋間丘陵を最大土被り180mで貫く。

地質は新第三紀中新世後期~鮮新世の秋間層と、新第三紀中新世中期の板鼻層からなっている。秋間層は主として、礫岩、火山角礫岩、凝灰角礫岩、凝灰岩の互層からなる(図-2)。

切羽で観察された地質状況の特徴を以下に示す。

高崎側坑口付近の礫岩は、安山岩の円礫~亜円礫を多く含み、マトリックスは未固結の砂からなる。礫径はφ10cm大のものからφ200cmの巨礫も混在しており、礫の含有率は60~80%である。

坑口部の礫岩を抜けてからは、安山岩の礫(角礫~亜円礫)を主体として、マトリックスが未固結の砂~凝灰岩からなる火山噴出物の地層を掘削している。この地層は連続性に乏しく、レンズ状に分布するなど層相の変化が激しく、20m~50mの地層幅で大きく変化している。礫の大きさは数10cm~200cmまで幅が大きく、形状も角礫~円礫まで混在する。

地山試料試験結果ならびに、坑内弾性波試験結果(表-1)

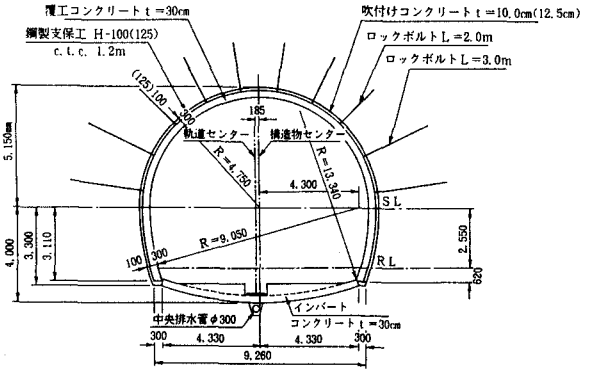
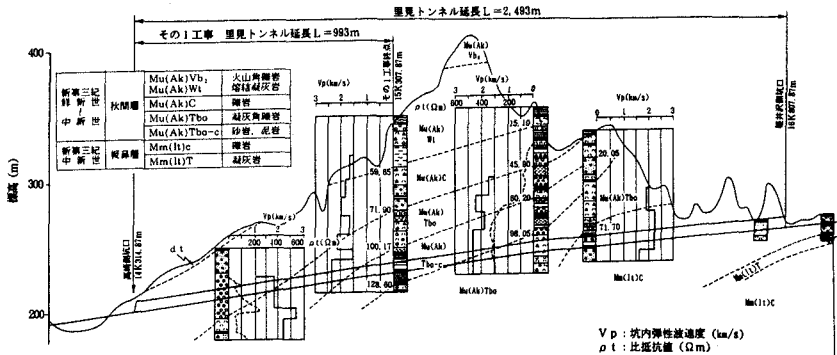


図-1 標準支保パターン(パターンB)

表-1 地山試料試験結果

項目	14k461m	14k645m	14k844m
	秋間層	秋間層	秋間層
地質	礫岩	凝灰角礫岩	凝灰岩
坑内弾性波速度試験	地山速度 km/s 1.8	---	---
弾性波速度試験	速度 km/s 1.5	---	---
弾性波速度試験	弾性波速度 m 1.4~3.0	---	---
孔内水平載荷試験	ヤング率 kgf/cm ² 1,805	---	---
孔内水平載荷試験	降伏圧 kgf/cm ² 100以上	---	---
岩石試験	単体重量 tf/m ³ 採取不能	1.4~1.7	1.9 2.1 2.0
岩石試験	圧縮強度 kgf/cm ² 採取不能	20~40	9.0 34.2 101
岩石試験	P波速度 採取不能	1.25~1.71	---
岩石試験	せん断強度 kgf/cm ² 採取不能	---	6.27
岩石試験	内部摩擦角(°) 採取不能	---	35.7



距離 (km)	14	15	16	17
断面勾配 (%)	30	30	30	20
地質	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩
地層名	Mu(Ak)C	Mu(Ak)Tbo-c	Mu(Ak)Tbo	Mm(L)c
弾性波速度 km/s	1.10	1.90~2.80	1.6~2.2	1.5~2.3
透水係数 cm/s	8.6 × 10 ⁻⁴	1.10~1.15m 1.5~1.20m 1.8 × 10 ⁻⁴ 2.1 × 10 ⁻⁴	1.5~2.5m 3.77 × 10 ⁻⁴	1.5~2.5m 3.77 × 10 ⁻⁴ 5.5 × 10 ⁻⁴

図-2 地質縦断図(事前調査)

から判るように地層の変化に伴い地山強度、力学特性にばらつきが大きい。

湧水は坑口付近はにじみ出る程度であったが、坑口5 4 0 m 付近から突発湧水(2t/min)が生じ、坑内総湧水量は1000~2000 ℓ/minである。

3. ミニベンチとショートベンチの比較検討²⁾

D、E岩種の地山等級Ⅰ_Nの地山に対してミニベンチを採用するにあたり、トンネルの力学的安定性の検討を行い、採用の可否の判断を行った。

まず、地山の变形特性について考察を加える。ショートベンチとミニベンチの变形特性は図-3に示すようにモデル化できる。

ショートベンチの变形特性は、上半掘削時に一度変位は収束するが、下半の切羽の接近に伴い、変位は再び増加する。さらに、インバート切羽の接近に伴い、再度変位が生じることになる。このように、3段階の変位カーブが得られるのに対して、ミニベンチで施工した場合は、上半と下半の切羽が近接しているため、2段階の変位カーブしか得られない。

上半切羽からインバート切羽までの距離が同じだとすると、ショートベンチとミニベンチの最終値のどちらが大きいかは、支保剛性、地質特性によって異なるものと考えられる。特に、脚部地山の安定性に大きく左右されるであろう。したがって、弾性地山とすると現時点においてショートベンチとミニベンチの地山の変位は、上半切羽からインバート閉合までの距離が同じであれば、同程度と考えられる。

变形特性の他に、切羽の安定については村山の方法³⁾により、トンネルの力学的安定についてはFEM解析により検討した。

この結果から、ミニベンチはトンネルの力学的安定性においてショートベンチと比較して特に問題はないと判断された。また、施工性、安全性および工程を考慮した総合判断において、当該地山においてミニベンチは適切な計測管理に基づき施工を行うことによって十分採用可能であると考えられた。

比較検討結果を表-2に示す。

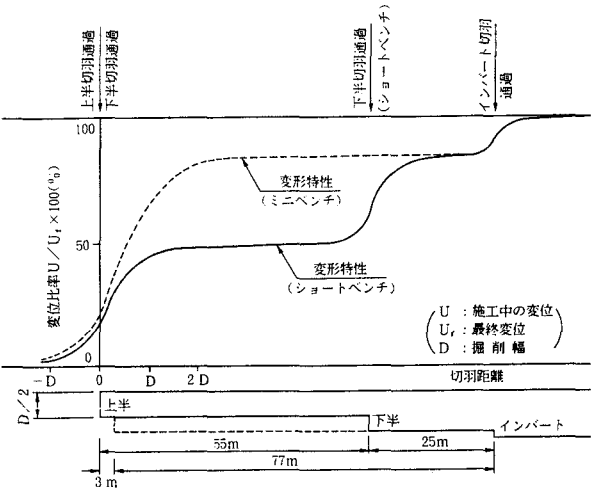


図-3 変形特性のモデル化

表-2 ミニベンチとショートベンチの比較検討

項目	ミニベンチ	ショートベンチ
施工概要	上半 下半 ベンチ長さ3m 下半に大型機械を配置し上半と下半をベンチ長さ3mで掘削する工法	上半 下半 ベンチ長さL=55m 上半と下半に別々な機械配置を行いベンチ長さ55mで施工する工法
切羽の安定	上下断面で考えなければならないが、3mのベンチによる切羽抑止効果は大きい。	上下半独立した断面で考えられる。
力学的安定性	トンネルの沈下 インバート閉合までの距離、時間が早いと沈下が小さくなる。早期に力学的に安定した断面になる。	トンネルの沈下 上半断面で長期間放置するので上半脚部が応力集中し沈下の恐れがある。
トンネルの変形	インバート閉合までの距離、時間が早いと変形が小さくなる。地質が悪化した場合は吹付けコンクリートによる全断面早期閉合により変形を抑止できる。	トンネルの変形 地質が悪化した場合は吹付けコンクリートによる上半断面早期閉合により変形を抑止できる。
施工性	施工効率の高い施工機械が配置できる。	上下半の競合作業により施工効率が低下する。上半路盤の泥ない化の恐れがある。
安全性	作業箇所が1箇所のため危険が少ない。作業範囲が集約されるため機械の移動距離が短くなり重機の接触災害が防止できる。	安全性 上半断面における重機車両のふくそう作業に問題がある。ショベルによる上半ずりへの搬出に危険が伴う。
作業環境	内燃機関が少なくなるため、排気ガスが減少でき、作業環境がよくなる。	作業環境 ショベル稼働による排気ガスにより作業環境が悪くなる。
経済性	設備費、機械費は高くなる。作業の効率化をはかることができる。	経済性 汎用機械で施工できるが作業効率はミニベンチに比べて低い。

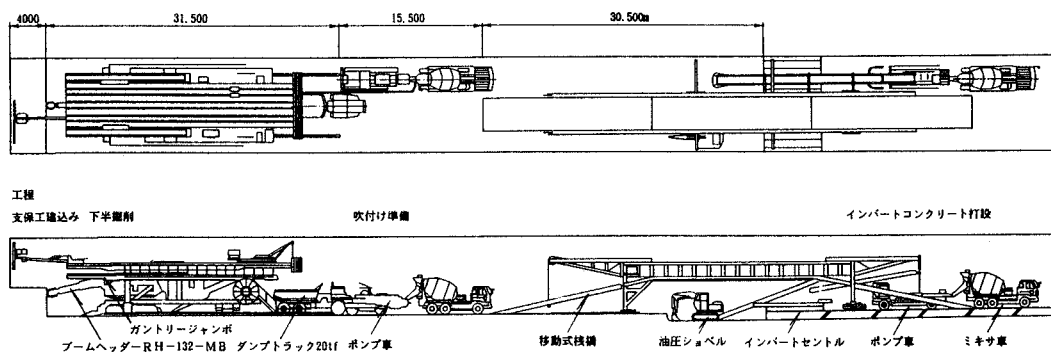


図-4 ミニベンチの施工順序図

4. 施工⁴⁾

4・1 施工計画

本計画におけるミニベンチの施工順序を図-4に、
施工フローを図-5に示す。

また、本計画におけるミニベンチ工法の機械特徴を
以下に示す。

- ①全断面对応型の自由断面掘削機を配置することにより、下半盤から上・下半の掘削が可能となる。
- ②自由断面掘削機のブームの両サイドに0.3m³の容量を持つバケットを搭載し、掘削ずり処理の効率化をはかる。
- ③各種機械を搭載したガントリージャンボを配置することにより、機械を集約化し、作業の効率化をはかる。
- ④ガントリージャンボにより下半掘削と上半の支保工建込み、吹付けコンクリートの同時作業が可能となる。

4・2 施工実績

機械掘削に適した地山であるとの予測に反して、湧水と転石の出現により、機械掘削だけでは効率的な掘削が不可能となった。そのため、計画していた掘削工法を、図-6に示す様に適宜地山に応じた掘削工法に変更して現在に至っている。

上半発破、下半機械掘削の工法は作業効率、地山の力学的安定性の観点から有効な施工方法であり、平成4年3月度～6月度までは月進100m以上を確保することができた。

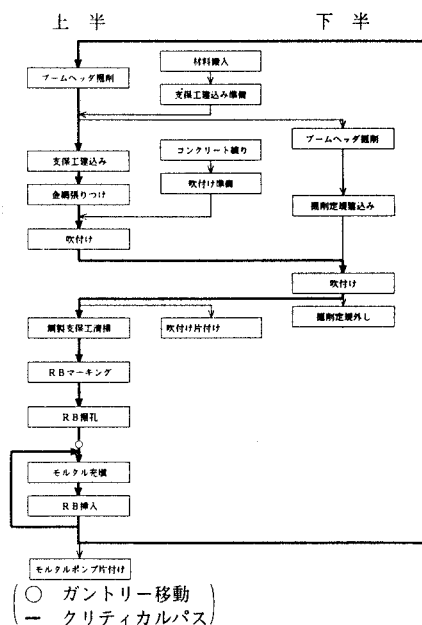


図-5 施工フロー（パターンB）

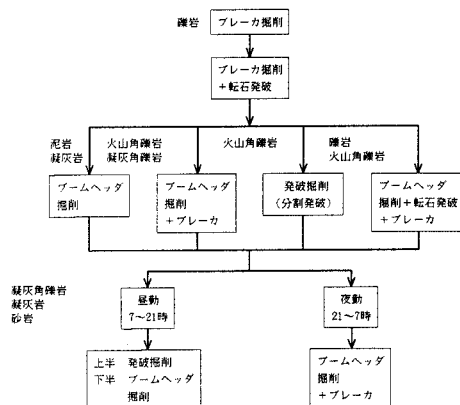


図-6 掘削工法変更の推移

5. 計測結果

5・1 変形特性

ショートベンチとミニベンチの変形特性を比較するために、最終変位量が同程度の計測断面の経時変化図を図-7に示した。

図-3で示した変形特性のモデル化と同様に、ミニベンチの変位特性は下半切羽通過前に最大変位勾配を示す。そのため、上半切羽到達直後～下半切羽通過までの3

～4 m間、切羽進行日数にして約1日の間に支保パターンの妥当性の判定を行う必要がある。本トンネルでは、初期値測定直後の1間後の変位勾配に基づき管理を行っている。

現在までの地質状況下において、内空変位の下半水平線が一部の断面で80 mmを越える変位を示し、下半への増しボルトで対処した区間を除き、概ね20 mm以内で収束している。このような地質状況下ならびに支保パターンにおいて、20 mm以内の変位は小さい値であり、機械掘削でのミニベンチの施工が力学的安定性に対して効果的であったと考えられる。

5・2 支保特性

図-8にミニベンチにおける吹付けコンクリート応力の経時変化図を、図-9に支保工軸力の経時変化図を示す。

最大応力は天端(S1)で発生しており、吹付けコンクリート応力が28 kgf/cm²、支保工軸力が56 tonである。

上半脚部の吹付けコンクリート応力ならびに支保工軸力は、下半切羽の1 m手前から下半掘削に伴う応力解放の影響により応力が減少をはじめ下半切羽通過時に急減するが、下半の吹付けコンクリートの施工に伴い再び応力は増加している。

表-3にショートベンチとミニベンチの支保部材力の計測結果を示す。

ミニベンチの応力変化は、内空変位と同様に初期変化勾配が大きく

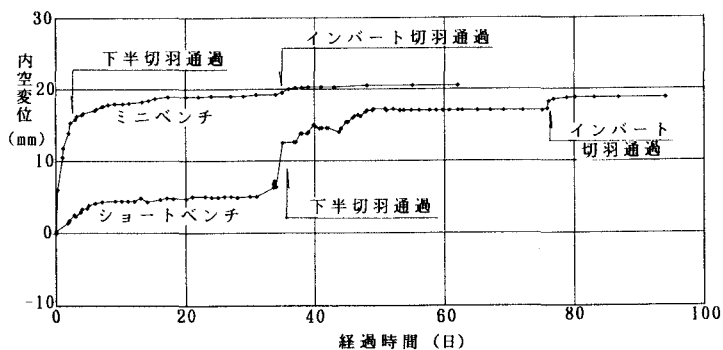


図-7 内空変位の経時変化図

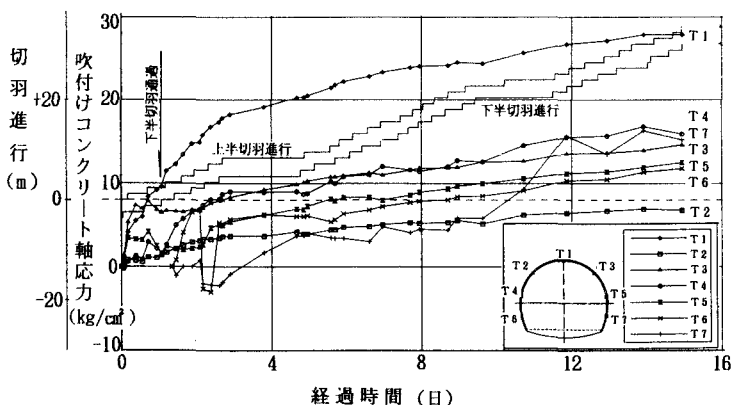


図-8 吹付けコンクリート応力の経時変化図

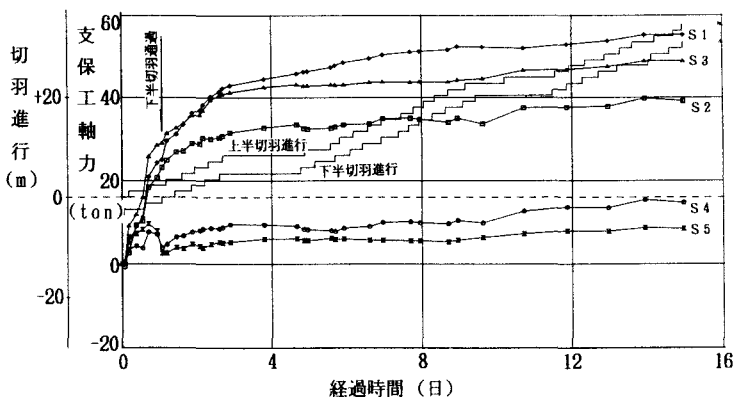


図-9 支保工軸力の経時変化図

い。また、下半の支保部材に上半の掘削解放力が加わるため、下半の支保部材力がショートベンチに比べて大きくなっている。そのため、支保パターンの決定にあたっては、下半の支保剛性に留意する必要があると考えられる。

6. おわりに

平成2年1月に着工以来、8カ月の工事一時中止期間を含め、平成4年7月末現在、その1工事L=993mの施工が完了し、その2工事の施工を進めている。

対象地山が当初想定していた機械掘削に適した地山とは異なり、転石と湧水との戦いで平成3年度は平均月進50mと、予定の進行を確保することができなかったが、平成4年になり、

- ①切羽での湧水量が比較的少なくなったこと
- ②大転石が少なくなり、地質状況も比較的安定してきたこと
- ③地質状況に応じた掘削工法を適宜採用してきたこと

により、平成4年3月～6月までは月進100mを確保しつつ順調に工事を進めていた。7月に入り土被りが深い（140m以上）区間において、断層を挟む強度の低い凝灰岩の出現により、内空変位が大きくなると共に切羽が不安定な状態が続いている。そのため、支保剛性を高め、切羽対策を実施しながら施工を進めている。

現在までの施工実績ならびに計測結果から得られた知見をまとめると以下の通りである。

- ①自由断面掘削機とガントリージャンボの組合わせによるミニベンチの施工は、上・下半の同時作業を可能にし、作業サイクルの短縮ならびに省力化につながっている。
- ②施工箇所が1カ所に集約化できるため、安全管理、品質管理の重点管理が行えるとともに、作業環境の改善につながっている。
- ③ミニベンチの力学的安定性は、下半ベンチの確保が重要であり、機械掘削によるミニベンチの施工は有効である。
- ④切羽観察に基づく地質と計測結果の迅速な評価と、設計へのフィードバックが重要である。
- ⑤下半の支保部材に上半の掘削解放応力が加わるため、下半の支保剛性に留意する必要がある。

7. 参考文献

- 1) 田代美樹男, 平岡慎雄, 村田一夫: 長大トンネル群の設計, 施工計画—北陸新幹線高崎・軽井沢間—, トンネルと地下, 第22巻1号, 1991年1月
- 2) 市橋学, 斉藤浩司, 戸出正義, 服部一夫: 大型自由断面掘削機でミニベンチ掘削, 北陸新幹線里見トンネル, トンネルと地下, 第23巻7号, 1992年7月
- 3) 土質工学会: シールド工法と土質, pp. 24～25, 1982年11月
- 4) 河田孝志: 全断面对応形自由断面掘削機とガントリージャンボによるトンネルの施工, 清水建設(株) 土木クォーターリー, 1992年9月, pp. 51～76

表-3 支保部材力計測結果

測 点		14K461M	14K844M
施 工 方 法		ショートベンチ	ミニベンチ
地 質		礫岩	凝灰岩 火山角礫岩
項 目		単位	計測値
吹付けコンクリート応力	上	T1 (天 端)	kgf/ cm ²
		T2 (左 肩)	kgf/ cm ²
		T3 (右 肩)	kgf/ cm ²
	半	T4 (左脚部)	kgf/ cm ²
		T5 (右脚部)	kgf/ cm ²
	下	T6 (左側壁)	kgf/ cm ²
	半	T7 (右側壁)	kgf/ cm ²
鋼製支保工軸力	上	S1 (天 端)	t f
		S2 (左 肩)	t f
		S3 (右 肩)	t f
	半	S4 (左脚部)	t f
		S5 (右脚部)	t f