

東北中央自動車道栗子トンネル東避難坑の TBM 掘進

EXCAVATION OF TOHOKU CHUO EXPRESSWAY KURIKO EASTERN EVACUATION TUNNEL WITH TBM

宮沢 一雄

Kazuo MIYAZAWA

The Kuriko Tunnel is a long tunnel spanning about 9,000 m. Before excavation of the main tunnel, an evacuation tunnel was constructed. The portion about 5,500 m of the evacuation tunnel was excavated with a TBM 4.5 m in diameter. The geological structure in the TBM-driven zone is generally complex, so, the geology was assumed to be adverse in many sections. To predict geologically adverse areas, boreholes 50 m long for drill-logging were driven. In adverse areas, ground was improved before excavation, with long steel forepiling or other methods. Without serious problems in tunneling works, the monthly advance was 240 m on the average and 453 m at

Key words : mountain tunnel, TBM, drill-logging, fracture energy, auxiliary method

1. はじめに

東北中央自動車道栗子トンネルは福島県と山形県を結ぶ延長約 9,000m の長大トンネルである。本坑掘削に先立ち掘削した避難坑のうち，福島側約 5500m は $\phi 4.5$ m の TBM で施工した。TBM 区間には花崗岩類，凝灰岩や凝灰角礫岩，デイサイトの貫入岩が複雑に分布し，随所に地質不良区間が存在すると予想された。地質不良区間の出現を把握し対策工の要否を判定するために，ほぼ全線にわたって削岩機による削孔検層を実施した。削孔検層の結果より判断し，注入式長尺鋼管先受け工などの補助工法を併用して掘進を進め，TBM 掘進が中断するなどの大きなトラブルは無く，順調に掘進が完了した。平均月進は 240m であり，また最大日進 31.5m，最大月進 453m と TBM としての高速掘進を実現し，2008 年 12 月にすでに施工済みの山形側の山岳工法区間に到達貫通した。ここでは TBM 掘進の概要を報告する。

2. 事業経緯

東北中央自動車道は，図-1 に示すように，相馬市を起点として，福島市，米沢市，尾花沢市を経由して，横手市に至る延長 270km の高速自動車国道であり，福島県，山形県，秋田県の 3 県の主要都市を結ぶとともに，高規格道路網を形成し，緊急時における代替・迂回等のネットワーク機能の強化を担う路線である。平成 8 年 12 月に整備計画が策定され，平成 10 年 10 月に都市計画変更がなされ，平成 10 年 12 月に日本道路公団に施行命令（第 13 次）が出され事業に着手している。また，平成 15 年 12 月には事業主体が国土交通省に変更され，現在は国と県の負担で高速道路を整備する新直轄方式で事業を進めている。

キーワード：山岳トンネル，TBM，削孔検層，穿孔エネルギー，補助工法
正会員 東日本高速道路株式会社 東北支社 福島管理事務所

3. 福島～米沢の路線概要

福島～米沢間のルートは、図-2 に示すとおり、福島市において、供用中である東北縦貫自動車道の福島飯坂 I C～福島西 I C間でジャンクションにより分岐し、一般国道 13 号と並走し、東西栗子トンネルを一本化するような、長大トンネルで貫き、その後米沢 I C (仮称) にて一般国道 13 号にアクセスするルートとなっている。この区間は、標高 1,000m 級の山々が連なる奥羽山脈をほぼ直線で横断するため、構造物比率が 7 割を超える路線である。

4. 工事概要

栗子トンネル東避難坑工事は、掘削距離が 5,500m と長く、工事前の地質調査の結果、湧水が少なく比較的地山も硬いと想定されたため、高速掘進が可能で他工法に比べ経済性に優れた TBM 施工を導入した。平成 17 年 11 月に仮栈橋を着手、平成 18 年 8 月から TBM マシン(写真-1)を現地組立し、10 月に TBM 本体を発進坑内に引き込み設置した。その後、後続台車、ストレージカセット、ベルトコンベア等を設置し、12 月より本掘削を開始し、約 2 年後の平成 20 年 12 月 16 日に 5,473m の掘削を終え到達、貫通した。



図-1 東北中央自動車道位置図



図-2 福島～米沢間位置図

5. 地質概要

(1) 地質

栗子トンネルの地質を図-3 に示す。福島県側は花崗岩、石英安山岩、流紋岩等の硬岩地山が分布する。一方山形県側は新第三紀の火山礫凝灰岩を主として砂岩泥岩互層が分布し、比較的軟質な地山である。最大土被りは県境付近で約 620m ある。工事区間の地質は前半部(約 2,000m まで)には中生代の花崗岩類主体を成し、後半部(約 2,000m 以降)にはこれを覆

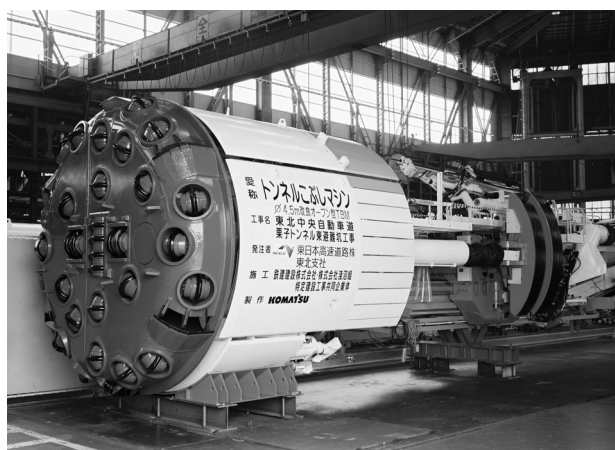


写真-1 TBM 本体

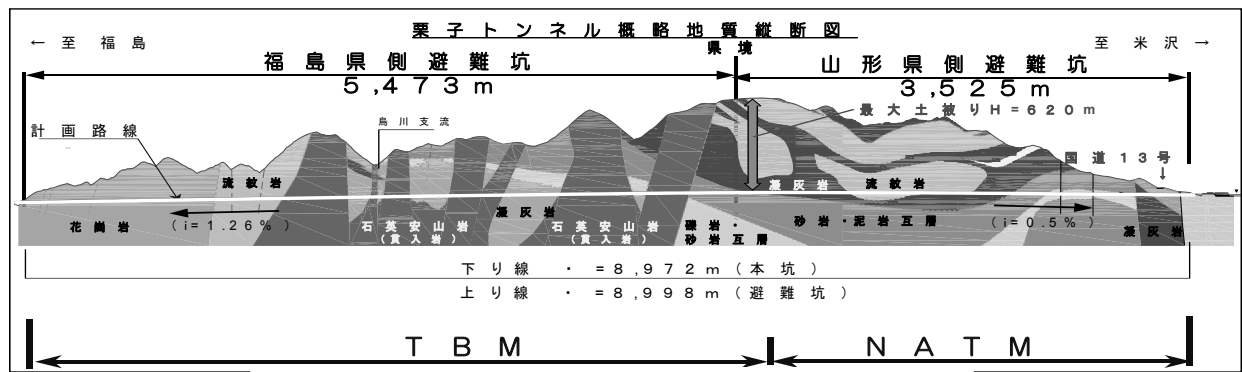


図-3 栗子トンネル地質縦断図



写真-2 崩落状況



写真-3 湧水状況

って分布する凝灰岩や凝灰角礫岩を主体とする火山碎屑物が分布し、部分的に安山岩や流紋岩の大規模な貫入岩があり、かなり複雑な地質構造ではあるが、硬岩主体の地山とされた。TBM掘削後の実績としては、前半部の花崗岩類は一部割れ目が発達した花崗岩および破碎部が温存した脆弱で脆く、湧水が多く、崩落が助長された。(写真-2) 中盤以降は、火山凝灰岩では、岩強度が低下し地山強度比も低下した、デイサイトが脈状に貫入しており、層鏡で崩落が生じた。終盤は、早期に礫岩・砂岩、砂岩泥岩互層が出現した、さらに地山強度比が低下し、層状の崩落が発生、特に泥岩砂岩互層区間では50cm～100cmにおよぶ崩落が連続し、坑壁の押し出しも発生した。

(2) 湧水

ボーリング調査結果から想定された全体湧水量は0.2～0.5t/minであったが、坑口から700m地点で5t/minの突発大量湧水が発生(写真-3)、その後1,000m、4,200m地点でも大量湧水が発生、湧水量は合計約8.3t/min(500t/hr)を記録した。貫通後湧水量は多少減少したが、年間を通じ6t/min前後の湧水が継続している。

6. 掘削状況

(1) 工事工程

計画および実績工程表を図-4に示す。当初の計画では平成21年3月で掘進を終え、その後にTBM解体、仮設備撤去であったが、おおむねTBM掘進が良好であったことから、全てを3月中に完了することができた。ただし、掘進当初から崩落性の地山、大量の湧水により約800mまでは幾度となく掘進停止を余儀なくされた。その後は、不良地山を予測して事前対策を行うことが可能となり、ほぼ順調に掘進ができた。掘進の実績として、最大日進31.5m(平成19年11月)、最大月進453m(平成19年5月)、本掘進開始から解体坑到達までの平均月進は240mとTBMとしての高速掘進を実現した。

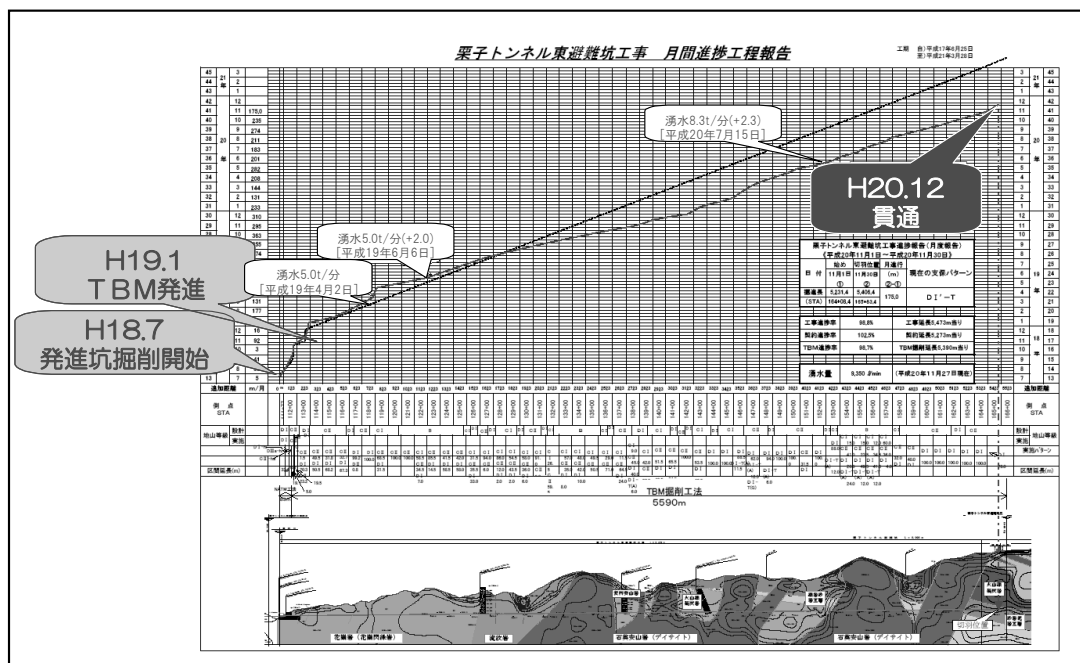


図-4 工程表

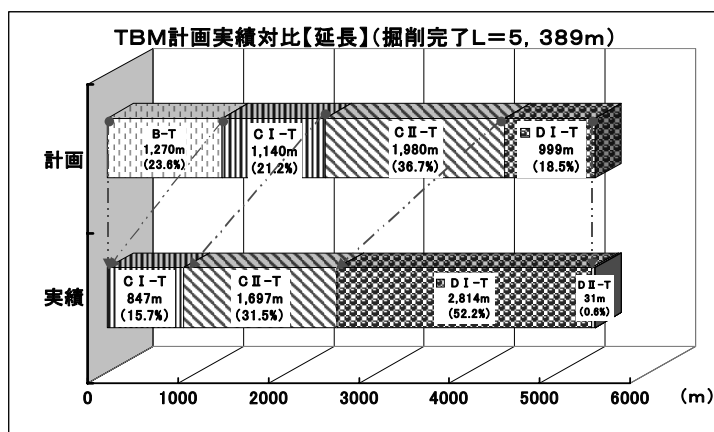


図-5 支保パターン対比図

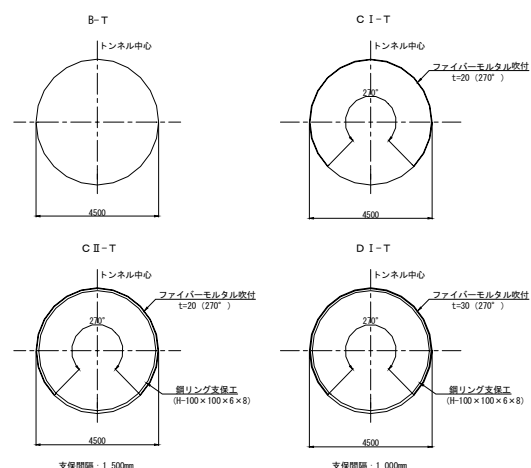


図-6 支保パターン図

(2) 支保パターン

当初設計と実績支保パターンの対比グラフを図-5に示す。また、栗子トンネル東避難坑の支保パターンを図-6に示す。当初の計画では、支保パターンBおよびCは全体の81.5%、Dは18.5%であったが、実績ではCが47.2%、Dが52.8%となり、約半数をDIパターンで掘進した。また、DIでは約40%にわたり補助工法を併用した。これは、弾性波調査等では想定できなかった、亀裂の発達した地山、自立性が低く崩落性の高い地山、多量湧水を伴った地山の出現が大きく影響した。

7. 崩落対策

数を超えたD地山では、ほぼ全域にわたり地山崩落が発生した。対策工としてTBM本体に搭載した削岩機を使用し、先進ボーリングを実施し前方探査を行い、穿孔エネルギーから掘削地山を定量的に評価・予測した(図-7)。予めTBMを拘束するような大規模崩落の対策工として注入式長尺鋼管フォアパイリングを実施した(図-8)(写真-4)。また、大小の崩落が連続する区間では、TBM掘進を停止することなく現場段取りが容易で効率的かつ経済的であった矢送り・縫い地の補助工法と機動性および性能の優れたファイバーモルタルの増し吹付けによる対策が有効であった(図-8)(写真-5)。

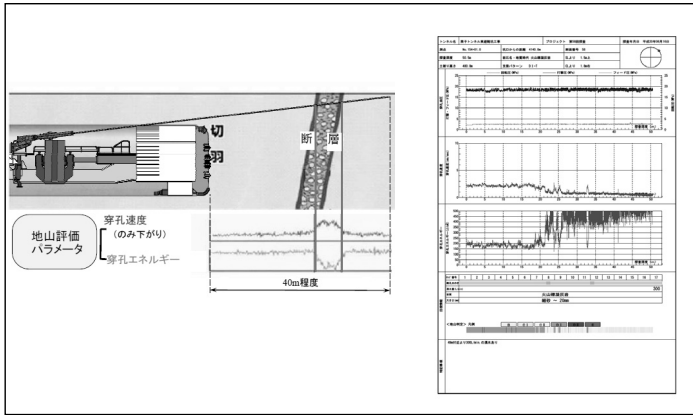


図-7 前方探査

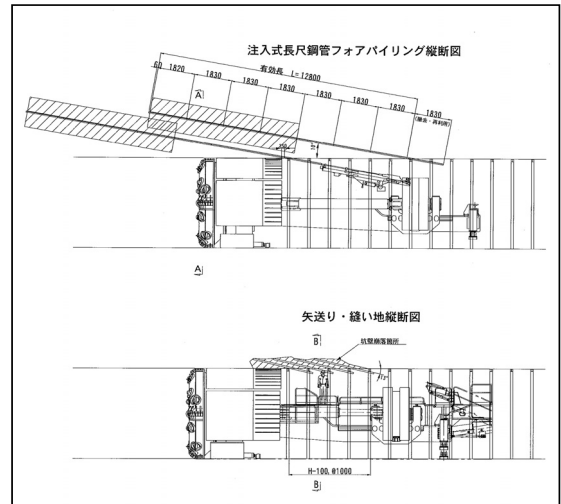


図-8 崩落地山対策

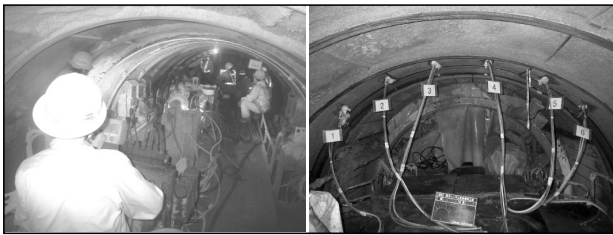


写真-4 注入式長尺フォアパイルング



写真-5 矢送り・縫い地・増し吹付け

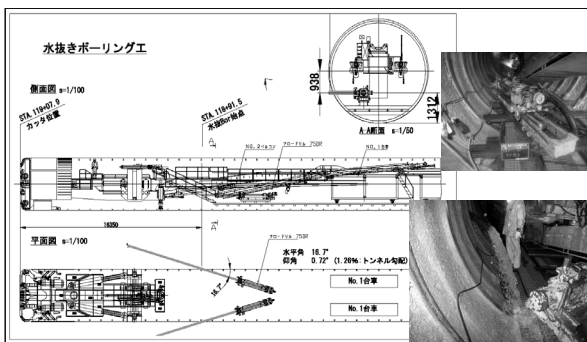


図-9 水抜き対策工

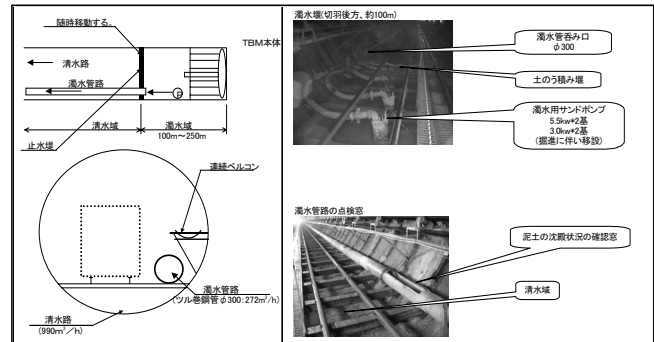


図-10 清濁分離

8. 湧水対策

坑口から700mの最初の突発大量湧水では、アロードリルφ116mm4本による水抜き対策工を行った(図-9)。その後は先進ボーリングからの前方探査を行い、湧水を伴う不良地山を把握しながらTBM本体に搭載した削岩機で水抜きを実施した。発生する湧水および掘削水は合わせて500t/hrを超えたため濁水堰、濁水管を設置し、軌道下を清水域として多量湧水を清濁分離することで濁水処理設備の低減を図った(図-10)。

9. 支保パターン選定フロー

(1) 火成岩系用

TBMの高速掘進というメリットを活かすため、地山性状に応じた支保パターンを早期に選定し施工することが非常に重要となる。しかしながら、掘削面がTBM本体に覆われているため、切羽での目視判定がで

きず、支保の施工位置が切羽から約7m後方の坑壁となることから、あらかじめ支保パターンが予測できれば、適時に適切な支保の施工が可能となる。本工事のTBM掘進開始前に飛驒トンネル等避難坑の選定フローを参考にTBM支保パターン選定フロー（火成岩系用）を作成した(図-11)。若干の微修正はあったものの、坑口から約4,000mはこの選定フローで施工した。大きな流れとしては、TBMの掘進データより得られる掘削エネルギー（スラスト推力、掘進速度、カッターヘッド回転速度、カッターヘッドトルク、掘削断面積により算出される単位体積の地山を掘削するのに要するエネルギー）やTBM本体に搭載した削岩機を使用し、先進ボーリングを実施し前方探査を行い、穿孔速度等から得られる穿孔エネルギーを目安に掘削地山を予測する。その後は、目視情報（崩落の有無、規模、亀裂の状態、湧水による影響など）から、坑壁を観察し、支保パターンを決定する。おおむね、この選定フローを用いて支保パターンの決定が可能であった。

(2) 堆積岩系用

火成岩系用選定フローでは火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩、凝灰岩などの堆積岩層に対応できない部分があった。具体的には、岩強度が低いにも関わらず、崩落が発生しないため支保パターンのランクが上がるのが懸念された。これは、岩強度が低いことや、湧水の影響により劣化や軟質化を引き起こし、TBM通過後に支保の変状を発生させる可能性が高いことを意味する。したがって、坑口から約4,000m以降は、本工事での堆積岩層掘進時の実績を考慮した掘削エネルギー、坑壁岩強度をファクターに用いた支保パターン選定フロー（堆積岩系用）を作成した(図-12)。なお、堆積岩層では可燃性ガスの発生も懸念されたため、ガス抜きを兼ねた先進ボーリングを併用しながらの掘進とした。選定フローの流れとして、本トンネルの実績を基にTBM掘削エネルギーと支保パターンの選定目安を設定した(図-13)。この目安は、坑壁状態の観察以前に知る情報とし選定のスタートとした。その後、掘進が進みルーフサポート後方に坑壁が現れた時点で崩落規模に応じた判定を行った。

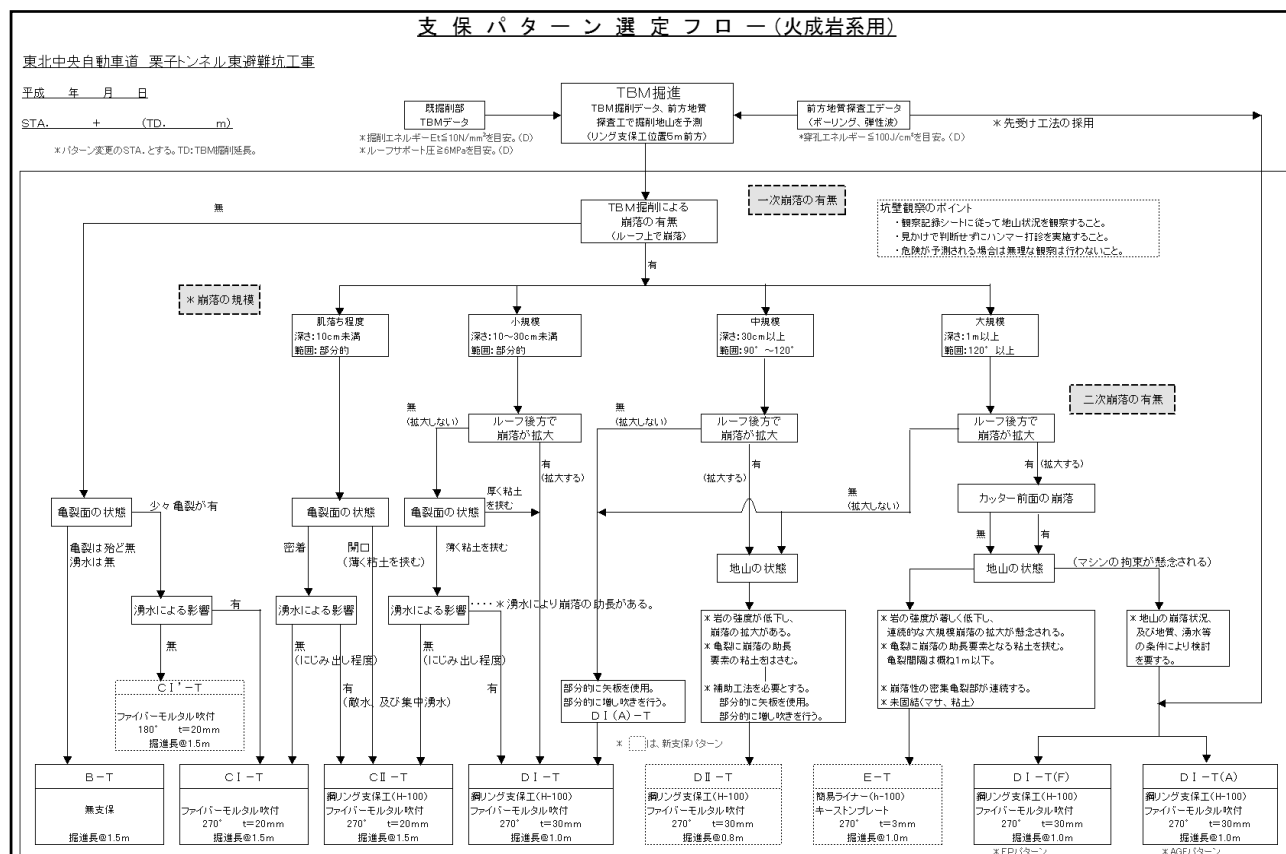


図-11 支保パターン選定フロー(火成岩系用)

支保パターン選定フロー(堆積岩用)

東北中央自動車道 栗子トンネル東避難坑工事

※堆積岩層(凝灰岩、凝灰角礫岩、泥岩、等)に適用する。

平成 年 月 日

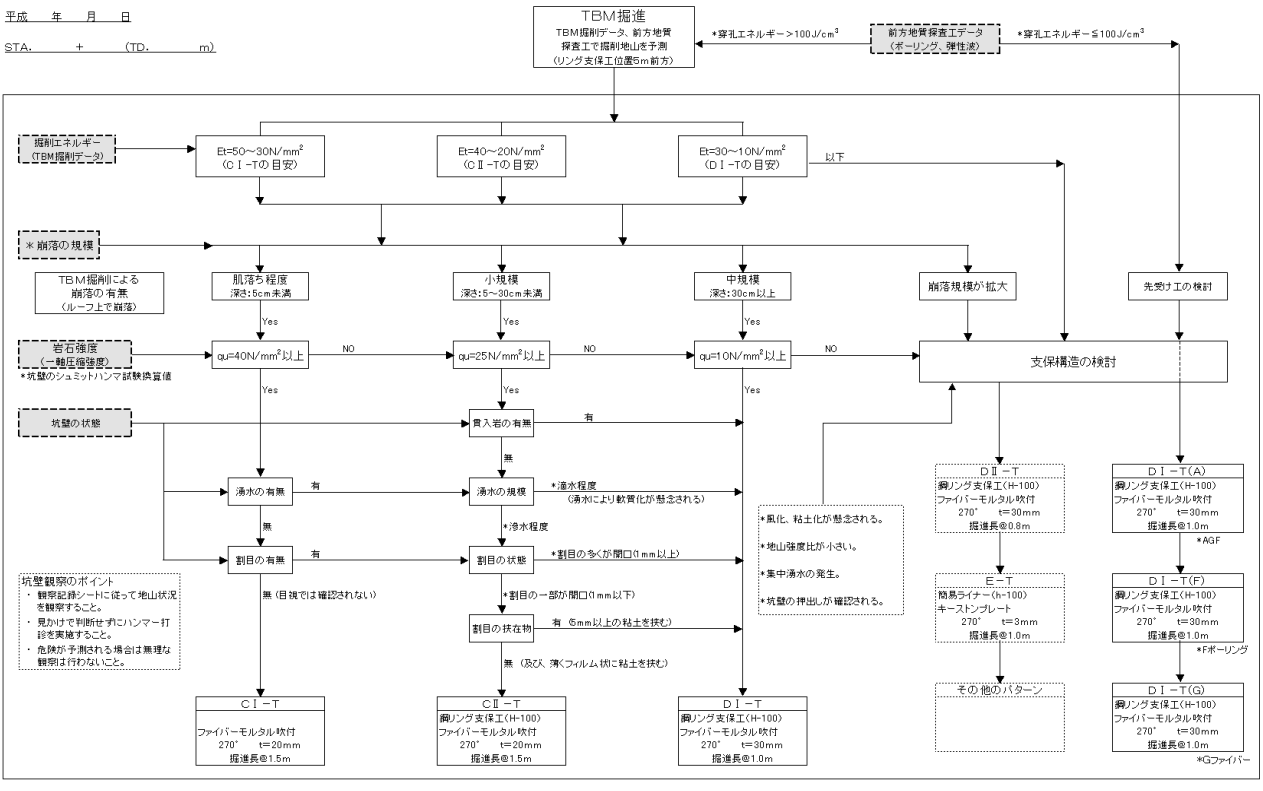
$$\text{STA.} \quad + \quad (\text{TD.} \quad \text{m})$$


図-12 支保パターン選定フロー(堆積岩系用)

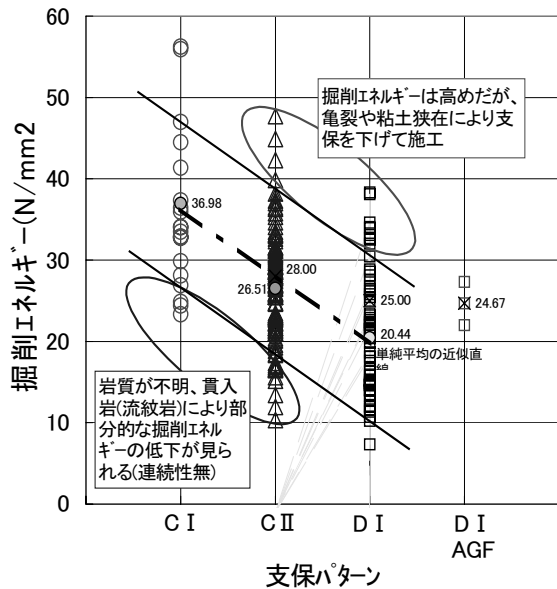


図-13 掘削エネルギーと支保パターンとの関係

10. TBM坑内解体

TBMの解体は、一般的に坑口部に到達坑を設け到達坑から坑外に引出して解体するが、TBMとNATMを併用した施工であるため、前例の少ない避難坑内での解体を実施した。NATM区間に巾7m、高さ7m、延長35mの解体坑を設け、鋼製支保に固定したチェンブロックにて解体を実施した(写真-6)。TBMの概

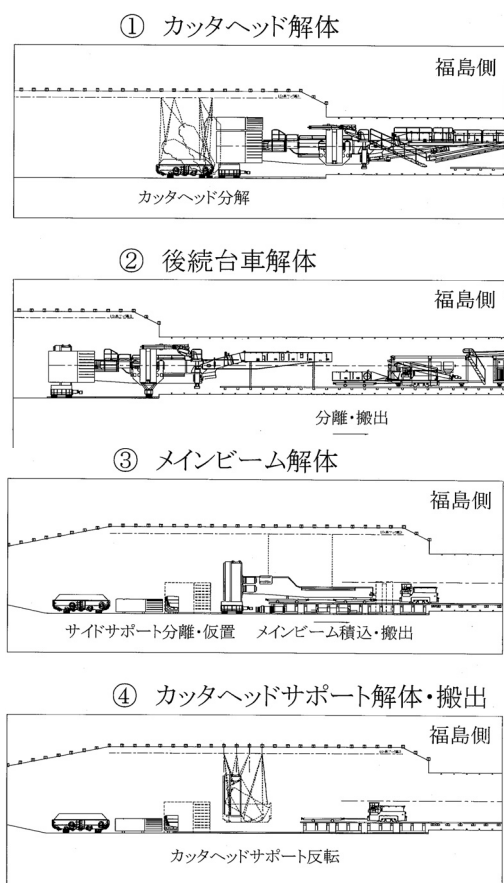


図-14 TBM 解体ステップ図

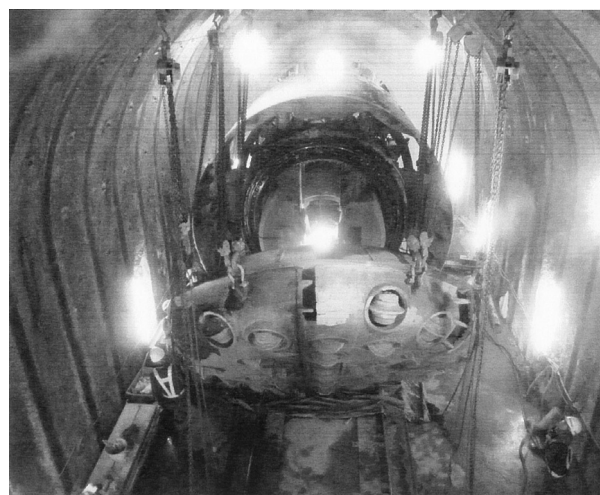


写真-6 カッターヘッド解体状況

略解体ステップ図を示す(図-14)。まず、解体坑内の所定の位置にTBMを移動、カッターヘッド、ルーフ・サイドサポートを分解・仮置きする。その後、坑内の連続ベルトコンベヤ撤去後にTBMの後続台車分離・坑外搬出を実施する。TBM本体を軌条延長しながら移動させ、メインビームの分離・坑外搬出、カッターヘッドサポート解体、搬出、仮置きしてあったルーフ・サイドサポート搬出し、最後にカッターヘッドを2分割して搬出、解体を終了した。TBM本体の総重量は約200tであり、そのうち単体での最重量物はカッターヘッドで28tである。なお、全ての部材は、延長5.5kmのレールにて福島側に搬出した。TBM解体から搬出までの工期は、平成20年12月下旬から平成21年2月中旬まで実稼働日42日で完了した。

11. おわりに

本工事では、調査・設計では予知できなかった突発大量湧水や崩落性地山に遭遇したが、延長5.5kmの掘削を一度もTBMを拘束することなく貫通することができた。先進ボーリングからの前方探査などを活用すれば、地山のより詳細な情報が得られ、地山の悪い箇所や湧水の予測が可能で予め対策が可能であり、崩落対策として旧工法の「矢送り・縫い地」と最新材料のファイバーモルタル吹付けの組み合わせが効果的であったことなど、不良地山におけるTBMの適用が拡大したと考えられる。さらに本現場で適用した支保選定フローや大量湧水の清濁分離処理等を活用することにより、経済的かつ合理的な施工が行えると考えられる。また、前例の少ないTBMの坑内解体が実現する等、本施工により、小断面TBMの施工技術が著しく向上したと言え、従来工法の小断面の施工方法は、効率性が劣るため、今後TBMのさらなる活用を期待したい。最後に工事の施工に際し、多大なるご指導とご協力を頂いた関係者の皆様に深く感謝する次第である。