

図-3 馬追トンネル地質縦断面図

3. トンネル設計について

土地改良事業計画設計基準 設計「水路トンネル」技術書¹⁾(以降、技術書)によると『トンネル工事の特殊性として、着工前の調査を入念に行っても、地質のその他の諸条件を的確に予測することは困難である。このため、施工現場では直接観察された地質状況等から設計トンネルタイプの妥当性の可否を判断し、その状況に応じた施工トンネルタイプの判定を日常的に求められる。』とされている。これより、効率的かつ安全性の高い施工のためには切羽掘削に先行して地質・湧水情報を把握し、タイプと施工の妥当性を検討することが望ましい。

4. NATMトンネルタイプ判定

図-4にNATM区間の各支保タイプの標準断面を示す

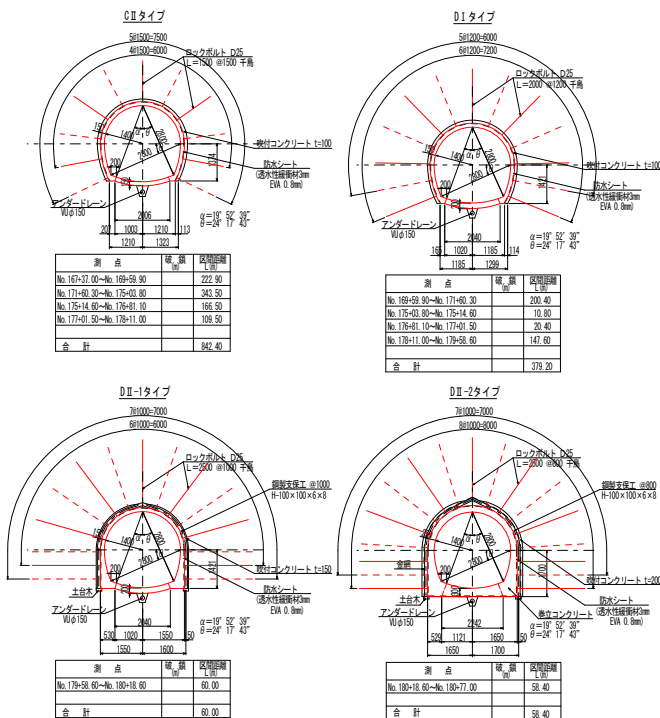


図-4 トンネル標準断面図 (NATM工区)

NATM工区の馬追山層は変質が進み軟質化した地山膨張も想定される地質不良区間である。また、川端層はそのほとんどが非変質な砂岩で構成されているが、部分的に変質が進んだ泥岩を挟んでいることが想定される。

そこで、馬追山層区間ではトンネル坑内からの水平ボーリング調査等により地質の分布・亀裂の状態・変質の程度を確認し、その結果をから設計で採用されている支保タイプの妥当性を検討した。また、川端層区間では前方探査 (Drilling Survey System、以下DRISS) と地山弾性波速度調査により軟質化した地層の範囲を特定し、支保タイプの妥当性を検討した。

(1) 水平ボーリングによる判定 (馬追山層)

a) 調査方法

地山不良区間であることが想定される馬追山層については、切羽掘削が到達する前に詳細な力学情報に基づく判定を行う必要があると判断し、切羽からの水平ボーリング (写真-1) を実施した。



写真-1 水平ボーリング削孔状況

この調査により得ることができる評価指標を表-1に示す。表中の指標値①、②、③、⑤から支保タイプを、②、④、⑤、⑥、⑦から膨張性地山の判定を行う。

表-1 評価指標値一覧

指標値	算出方法
①RQD	ボーリングコア観察
②一軸圧縮強度	ボーリングコアによる試験
③地山弾性波速度	ボーリング孔での速度検層試験
④単位体積重量	ボーリングコアによる試験
⑤地山強度比	②、③、④結果と土被りより
⑥浸水崩壊度	ボーリングコアによる試験
⑦スメクタイト含有量	ボーリングコアによる試験

b)判定基準

支保タイプ判定は技術書に基づいて行った。判定基準は以下の4つに区分される。

- ①切羽状態（亀裂間隔・亀裂開口、風化程度・肌落ちの有無、湧水の有無）
- ②一軸圧縮強度
- ③地山弾性波速度
- ④地山強度比

これらの関係を取りまとめたものを表-2に示す。表中で、新第三期層である馬追山層及び川端層はγ～δ群に相当する。

表-2 支保タイプ判定基準
(出所：基準書より作成)

トンネルタイプ	支保タイプ	地質状態	弾性波速度 (km/s)	見かけ地山強度比 Fc
A	C II	亀裂状態 α: マツブなもののから、かなり多いものまでの範囲 β: 少ないものから多少ある程度のものでγ: ほとんどない 岩石試料圧縮強度 α: 1,200kgf/cm2以上 β: 800kgf/cm2以上 γ: 500kgf/cm2以上 地山ポアソン比 0.16~0.23 地圧 作用しない	α群: 4.5以上 β群: 4.0以上 γ群: 3.0以上	10以上
		亀裂の少ない新鮮な岩		
B1	C II	亀裂状態 α: 亀裂が多く所々小断層を挟み、場所によっては破砕帯 β: 亀裂が多く所々小断層を挟む γ: 亀裂が多少ある軟岩 δ: 軟岩 岩石試料圧縮強度 α: 600~1,200kgf/cm2 β: 400~1,000kgf/cm2 γ: 200~500kgf/cm2 δ: 50~200kgf/cm2 地山ポアソン比 0.18~0.35 地圧 一般には作用しないが、破砕帯や湧水で作用することあり	α群: 3.0~4.5 β群: 2.5~4.0 γ群: 2.0~3.0 δ群: 2.0以上	6~10
B2		亀裂のあるやや風化した岩または軟岩 軟岩及び時間の経過とともに肌落ちが生じる		
C	D I	亀裂、破砕、軟質状況 α: 破砕帯 β: 破砕帯もしくは亀裂や小断層が多い γ: 亀裂が多く破砕帯または軟岩 δ: 軟岩または固結度のないもの(よく締まった硬土砂も含む)一般に切羽全面または一部が崩壊してくるような場合に適用する 岩石試料圧縮強度 50kgf/cm2以下 地圧 作用する	α群: 1.8~3.0 β群: 1.5~2.5 γ群: 1.0~2.0 δ群: 0.8~2.0	2~6
D1	D II-1	風化岩、破砕帯、硬土		
D	D II-1	亀裂、破砕、軟質状況 α: β: γ: 破砕帯または軟岩で固結度が低い δ: 破砕帯または固結度が非常に悪い 一般に未固結の堆積土層で、切羽全面が湧水により自立せず流動化するような場合や、湧水が著しく多い破砕帯に適用 岩石試料圧縮強度 50kgf/cm2以下 地圧 作用する	α群: 1.8以下 β群: 1.5以下 γ群: 1.0以下 δ群: 0.8以下	2以下
	D2			

c)支保タイプ判定

支保タイプの判定は各種調査、試験結果や類似地質の実績を十分に分析したうえで、経験のある技術者の総合的な判断に基づいて行うことがほとんどであるため、判定者の裁量による部分が大きく、定量的とは言

い難い面がある。そこで、本工事では定量的にトンネルタイプを判定することを目的とし、4つの判定指標ごとに評価点区分を設け、評価点の合計から支保タイプを判定する方式（地山評価表による判定）を導入した。ボーリング調査は坑口（馬追山層区間）から川端層区間に入って約100mまでの約500mを行い、一回当たり最大100mを計画した。ただし切羽断面及び掘削孔が自立しなければ掘削を行うことができないため、全区間を調査することはできなかった。図-5にボーリング調査箇所及びその結果を、また表-3に結果事例（第7回区間）を示す。この表中の地山評価表より、水平ボーリング第7回区間における地山評価点は8点となり、支保タイプはDII-1と判定された。

表-3 支保タイプ判定表（第7回区間結果）

測点(No.)	176+97.6~176+39.0
支保番号	432~490
坑口からの距離(m)	416.3~474.9

項目	測定値
RQD	RQD(%) 22.5(平均)
一軸圧縮強度	σ_c (N/mm ²) 4.1(平均)
地山弾性波速度	Vp*(km/sec) 2.6(平均)
地山強度比	GN 3.5(平均)
単位体積重量	kN(kN/m ³) 22.6(平均)
浸水崩壊度	A~B
スメクタイト含有量	Sm(%) 22(平均)

※Vpは前層を採用

地山強度比GNの算出方法

$$GN = \sigma_c' / (\gamma \cdot H)$$

$$\text{ここに、} \sigma_c \times (V_p' / V_p)^2$$

H: 土被り(m)

Vp: 超音波伝搬速度(km/sec)

①地山評価表(地山評価点の算出)

評価指標	評価点区分				評価点	
	4	3	2	1		
A	RQD ¹⁾	70以上	40以上 70未満	10以上 40未満	10未満	2
	亀裂状態 ¹⁾	亀裂間隔が50cm程度以上	亀裂間隔が30cm程度で部分的に開口している	亀裂間隔が20cm程度で幅の狭い断層を含む	亀裂間隔が10cm以下で破砕帯が厚く分布する	
B	一軸圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	50以上	20以上 50未満	5以上 20未満	5未満	1
C	地山弾性波速度 Vp* (km/sec)	3.0以上	2.0以上 3.0未満	1.0以上 2.0未満	1.0未満	3
D	地山強度比 GN	10以上	6以上 10未満	2以上 6未満	2未満	2
1)A項のうち、先進ボーリングはRQDを、切羽観察では亀裂状態を適用する。					地山評価点 (A~Dの合計)	8

②支保タイプの判定

支保タイプ	C II	D I	D II-1	D II-2	判定
地山評価点	13以上	12~10	9~7	6~4	D II-1

また、馬追山層については膨張性地山である可能性も事前調査で示唆されているため、地山評価表による判定と併せて膨張性判定表（表-4）による判定も追加した。判定表はトンネル標準示方書の地山の膨張性を示す指標の例を参照し、調査結果データを表にプロットし、膨張性地山判定指標値との面積比較で判定を行う。但し、地山強度比、スメクタイト含有量、浸水崩壊度の3項目がすべて判定指標値を超過した場合は、面積比によらず膨張性地山と判定し、その際の支保タイプは地山評価表の判定に関わらずDII-2とする。水平ボーリング第7回区間においては表-4の通りスメクタイト含有量は地山膨張性判定数値であるものの、地

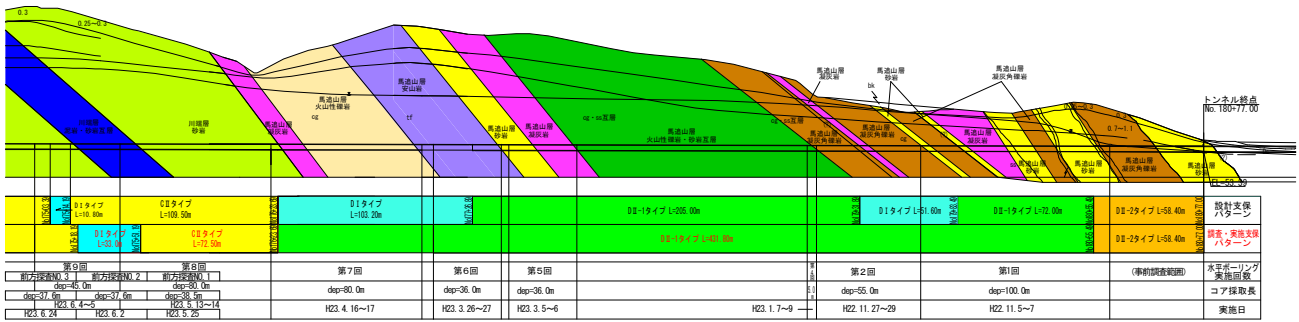
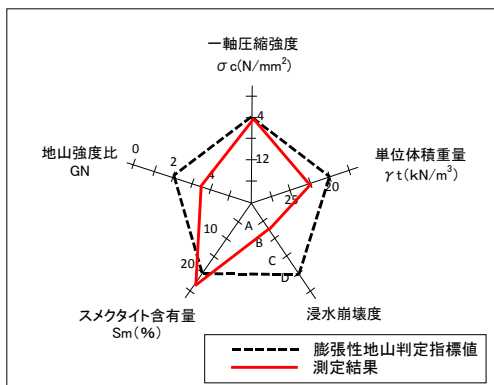


図-5 水平ボーリング調査箇所及び支保タイプ判定結果

山強度比と浸水崩壊度は同数値未満であるため、支保タイプは支保タイプ判定表の通り DII-1 となる。

表-4 膨張性地山判定表



(2) 前方探査 (DRISS) による判定 (川端層)

a) 調査方法

川端層は非変質な砂岩が分布し、部分的に軟質化した泥岩を挟んでいると想定される。そこで、支保タイプの判定方法は軟質化した部分の範囲特定を主目的とし、掘進約 40m ごと (調査延長約 850m) に DRISS 及び速度検層 (地山弾性波速度測定) により行った。

DRISS とは、写真-2 のようにドリルジャンボにより切羽で穿孔 (φ64 mm) を行い、穿孔速度、打撃圧、回転圧の測定から地山の硬さを表す穿孔エネルギーを算出する手法である。また、地山弾性波速度測定は亀裂状態や風化変質などを判断する指標である。



写真-2 ドリルジャンボによる穿孔

b) 判定基準

支保タイプ判定は DRISS による穿孔エネルギーと地山弾性波速度を用いる。穿孔エネルギーについては水平ボーリングを施工し支保タイプを地山評価表より判定した区間とのラップ部分を設けることで、既判定区間とのデータ対比を行いトンネル (支保) タイプ毎の適用範囲を決定する (図-5 中の水平ボーリング実施回数枠中における前方探査枠がラップ部分)。

図-6 に地山評価表による判定から支保タイプが CII と判定された区間、図-7 に支保タイプが DI と判定された区間の穿孔エネルギーデータを示す。図-6 において、CII タイプ区間の穿孔エネルギーは概ね 90 J/cm³ 以上、また DI タイプ区間の穿孔エネルギーは概ね 60~90 J/cm³ の範囲であることより、穿孔エネルギーによる支保タイプの判定基準を表-5 とした。

表-5 支保タイプ判定基準 (DRISS)

支保タイプ	穿孔エネルギー
C II	90 J/cm ³ 以上
D I	60~90 J/cm ³
D II-1	60 J/cm ³ 以下
D II-2	

この際、穿孔エネルギーは主に地山の硬さを表す指標であるため、判定は地山弾性波速度を併用し、DRISS による支保タイプ判定の妥当性を確認した。表-6 に地山弾性波速度によるトンネルタイプの判定基準を示す。ただし、速度検層は DRISS 掘孔穴から 100 l/s を超える湧水がある場合には測定することができない。

表-6 支保タイプ判定基準（地山弾性波速度）
（出所：基準書より作成）

支保タイプ	地山弾性波速度
C II	2.0km/s以上
D I	1.0~2.0km/s
D II-1	1.0km/s以下
D II-2	

c)判定結果事例

前述の判定基準をもとに実施工で行った判定結果事例を図-8 に示す。また穿孔エネルギーの数値判別を容易にするため、図中下部に数値範囲毎に色分けを行った結果を示す。図より、穿孔エネルギーによる判定結果は支保タイプCIIが大部分を占めている。また、当該区間の地山弾性波速度は1m毎に測定し、全区間において2.1 km/sであった。これら両者の結果より、本区間の支保タイプをCIIと判定した。

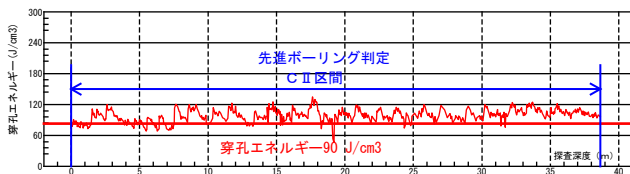


図-6 C II 区間 DR ISS キャリブレーション

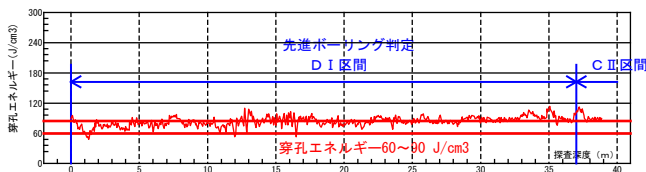


図-7 D I 区間 DR ISS キャリブレーション

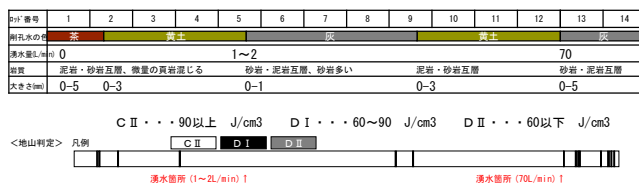
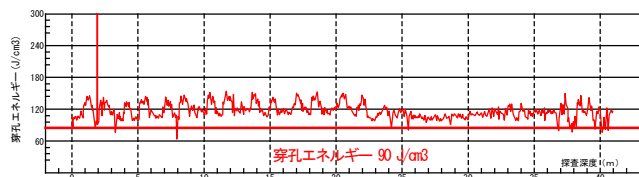


図-8 前方探査 (DR ISS) 実施結果

行に伴い湧水箇所の水量は次第に減少するが、常時1,000m³/日以上以上の坑内湧水が見られる。

下記に本工事で実施した湧水対策事例を示す。

(1) ロックボルト

湧水が多量に発生する地山で通常のもルタル定着式ロックボルトを施工する場合、削孔穴からの湧水(写真-4)があると以下の不具合を生じる恐れがある。

- ①湧水での定着材 (モルタル) の品質低下による定着力不足
- ②モルタル自体の流出 (施工不可)

そこで、湧水が見られる孔については多量湧水でも適用可能な鋼管膨張型ロックボルト (摩擦定着式) に変更し施工を行った。



写真-4 ロックボルト孔からの湧水

鋼管膨張型ロックボルトは図-9のように円形の鋼管を折り曲げて外径を小さくしたロックボルトであり、高圧水をボルトの口元から注入することで鋼管自体を膨張させ、岩盤との摩擦抵抗により地山と定着させるロックボルトである。

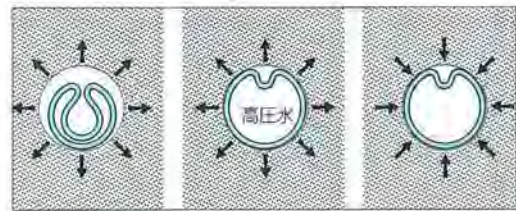


図-9 鋼管膨張型ロックボルト概要

5. NATMトンネル湧水対策

馬追トンネルは地質層境や砂岩層での突発湧水があり、切羽で最大700L/分の湧水が確認される。切羽の進

(2) 裏面排水材

ロックボルト孔より湧水が確認される箇所について、設計の防水シートに付随する透水性緩衝材の排水能力を超える湧水に対しては、覆工コンクリート完了後のコンクリートへの被圧やコンクリート背面での凍結膨

張が懸念されるため、別途排水材設置が必要となる。そこで透水性緩衝材の排水能力を透水係数と敷設面積から算出し(1.0(L/分))、これを上回る湧水が確認された場合、片面集水で排水能力の高いパイプ系排水材(モノドレーン MK-3、排水能力:最大 240L/分)を吹付けコンクリート表面に縦排水材として設置し、トンネル河床下に設ける排水溝へと導水するよう施工した。



写真-5 裏面排水材設置(モノドレーン)

6. おわりに

平成23年12月時点で、NATM工区のトンネル掘削は1376.89mの内、1100m完了している。坑口から500m区間の馬追山層では部分的に破砕帯が存在し、先進ボーリングによるトンネルタイプ判定結果から154.8mの範囲でD I からD II-1へのタイプ変更を行い(図-5)、また、500m~1376.89m区間の川端層ではDRISSによる支保タイプ判定結果から200.4mの範囲でD I からC IIへのタイプ変更を行った。掘削完了区間での内空変位、沈下計測については管理基準値内で収束し、支保の変状等も見られていない。

このことより、本工事においては本報で紹介した調査方法により、切羽掘進に先行して支保タイプを決定することができたことから、直接切羽を観察し、ある程度の地質状況の連続性を確認した後に支保タイプの変更を行う方法と比較して、より高い精度の範囲で土質性状に適応した支保タイプの施工が行えたといえる。

また、地山評価結果を得点に換算した支保タイプ判定や、DRISSで測定される穿孔エネルギーによる支保タイプ判定といった定量的判定手法は、支保タイプ判定を客観的観点からサポートし、発注者と受注者間の協議を円滑に進行させるために有効な手段であった。

本報が今後の土木工事における施工性向上の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 社団法人農業土木学会：土地改良事業計画設計基準 設計「水路トンネル」技術書