北海道における白亜系~古第三系泥質岩のトンネル地山評価(案)について

株式会社エーティック 技術第二部 防災保全室 松岡 俊秀

はじめに

トンネルは地下深部に建設される線状構造物であるため、トンネルルート全体の地山性状を精度よく把握する ことは困難であり、当初設計の支保パターンは地表弾性波探査で得られた P 波速度から設定される場合が多い.

新第三紀中新世〜鮮新世の堆積岩類(泥岩,凝灰岩)に代表される堆積軟岩地山の場合,不連続面が少なくト ンネル挙動は岩石自体の強度や膨潤性粘土鉱物の有無に支配される.一方,中・古生代や古第三紀の堆積岩類, 火成岩,変成岩などの硬岩地山の場合,インタクト部は高い岩石強度を示すがトンネル挙動は不連続面に大きく 左右される.

北海道の中・古生代~古第三紀の堆積岩類は造構運動に伴う大小規模の破砕部や粘土状物質を挟んだ剪断面が 形成されている.このため、トンネル挙動は不連続面の状態に大きく支配され、応力解放に伴う潜在割れ目の発 達、地下水湧出による脆弱化により支保構造の剛性化(ランクアップ)や補助工法採用を余儀なくされ大幅な工 事費の増大や工期遅延に至るケースがしばしば見受けられる.

本報告は、白亜系~古第三系泥質岩地山に施工される新設道路トンネルの施工例を挙げ、トンネル地山評価の 留意点について述べるものである.

1) 硬岩地山および軟岩地山の区分

参考図書¹⁾には,硬岩・軟岩地山について次のような記載がある.

- ・硬岩地山:古生代・中生代・古第三紀の堆積岩類,火成岩,変成岩,新第三紀の珪化・高溶結の火山砕屑岩類. 一軸圧縮強度は20MPa以上で,地山挙動は不連続面に影響される.
- ・軟岩地山:新第三紀の堆積岩(第四紀初期の堆積岩の一部),溶結度の低い火山砕屑岩,硬岩の風化・変質岩. 一軸圧縮強度は0.5~20MPa程度で不連続面が少なく,地山挙動は岩石の物性に影響される.

この区分に従うと、本編で述べる白亜紀~古第三紀の堆積岩類は「硬岩地山」に該当し、地山挙動 は不連続面に支配されることになる.

2) 地山分類

企業者等および各機関において、トンネル地山分類の基準は定量的因子と経験的な指標に基づき設 定されている.北海道では,北海道開発局や日本道路協会によるトンネル地山分類がある(表1~表4). 前述のように、当初設計では弾性波速度や地山強度比を主な指標として地山を分類し、支保パターン を設定している.しかしながら、弾性波探査の解析手法である屈折法(層構造解析法)は、①.深度方 向に弾性波速度が速くなること ②.測線と平行または鋭角に交わる高速度帯がない などの仮定があり、 高速度帯より下の低速度帯は検出不能である.また、探査深度は測線長の5倍程度とされ、土被りは 100m 位が限界といわれている.特に古い時代の泥質岩(頁岩や粘板岩,泥質片岩)は、固結度は高い が潜在的な割れ目が多いためトンネル掘削に伴って緩みやすく、事前調査段階の想定と施工時の地山 状態が大幅に乖離する場合が多い.

		H (硬質岩) 80N/mm ² 以上	M(中硬質岩) 20~80N/mm ²	L(軟質岩) 20N/mm ² 以下
劣化のしかたによる区	塊状岩盤	はんれい岩,かんらん岩 関縁岩 花崗内緑岩 花崗境 花崗境 花崗境 花崗境 花崗 花崗 花 岡 城 岩 花	安山岩 玄武岩,輝緑凝灰岩 石英安山岩 流紋岩 ひん岩 第三紀層砂岩,礫岩	蛇紋岩 凝灰岩 凝灰角礫岩
分	層状岩盤		粘板岩 中・古生層頁岩	千枚岩 黒色片岩,石墨片岩 緑色片岩 第三紀層泥岩

表1 岩石グループ(北海道開発局道路設計要領 第4集 トンネル)

表 2 地山分類表(北海道開発局道路設計要領 第4集 トンネル)

地山	剥離(古生層	生に富む 「~深成岩	剥離性(古名 深成岩	こ富まない 生層~ 1. 火山岩	第三紀	堆積岩類	亀裂係数			地山強度比 _{oc} *				
区分	Vp* (km/s)	RQD ₍₅₎ (%)	Vp* (km/s)	RQD ₍₅₎ (%)	Vp* (km/s)	RQD ₍₅₎ (%)	(%)	主な地員状況	準岩盤圧縮 強度 σc* (MPa)	粘着力 C [*] (MPa)	内部摩擦角	変形係数 Es [*] (MPa)	ポアソン比 <i>ν</i>	γH
A	4.8 以上	60 以上	4.5 以上	60 以上				1.新鮮にて亀裂ほとんどない	140 以上 (1,400 以上)	6以上 (60以上)	55 以上	5,000 以上 (50,000 以上)	0.25 以下	
в	4.5~4.8	50~60	4.0~4.5	50~80	3.0 以上	60 以上	25 以下	2.肌落ちほとんどない	140~35 (1,400~350)	6以上 (60以上)	55~50	5,000 以上 (50,000 以上)	0.25 以下	
CI	4.0~4.5	30~50	3.5~4.0	30~70	2.5~3.0	40~60	25~50	 1.新鮮にて亀裂少ない 2.肌落ち少ない 	35∼15 (350∼150)	6~3 (60~30)	50~45	5,000~2,000 (50,000~ 20,000)	0.25~0.30	4.11.1
СШ	3.5~4.0	20~30	3.0~3.5	20~50	2.0~2.5	30~40	50~70	1.わずかに風化し亀裂やや多い 2.肌落ち多い	15~7 (150~70)	3~1.5 (30~15)	45~40	2,000~1,000 (20,000~ 10,000)	0.25~0.30	4 U.L
DI	3.0~3.5	20 以下	2.5~3.0	40 以下	1.5~2.0	20~30	70~80	1.風化受け亀裂多い 2.一部変質破砕帯あり	7~3.5 (70~35)	1.5~1.0 (15~10)	40~35	1,000 [~] 500 (10,000~5,000)	0.30~0.35	4~2
DI				30 以下	1.0~1.5	20 以下	80以上	1.風化強く受け亀裂多い 2.一部に変質破砕帯	3.5~1.5 (35~15)	1~0.5 (10~5)	35~30	500~150 (5,000~1,500)	0.30~0.35	2~1
E								1.強風化及び破砕帯 2.変質を伴う破砕帯	1.5~0.5 (15~5)	0.5~0.1 (5~1)	30~15	150~30 (1,500~300)	0.35~0.40	1以下
注1)古: 注2)地 注3)MP	主層~深成岩 山定数欄の(a=N/mm ²	のうち、吸水膳)内は、従来単	シ張性を有す ≜位(kgf/cm²	る蛇紋岩、片岩)での値	岩類は別途考	手慮								

衣 3 石石 フルーノ (日本道路協会	表 3	岩石グル-	-プ	日本道路協会
---------------------	-----	-------	----	--------

	H (硬質岩)	M (中硬質岩)	L (軟質岩)
塊状岩盤	 野れい:岩 花崗閃線岩 石英雄岩 石英雄岩 花崗斑岩 ホルンフェルス 角閃石岩 砂岩、柔岩(第三紀屬) 石灰岩,チャート 片紫岩 	 安山岩 文武岩 石美安山岩 流紋岩 ひん岩 砂岩, 課者(中古生層) 	蛇紋岩 凝灰岩 凝灰角礫岩
層状岩盤		粘板岩 頁岩(中古生層)	千枚岩 馬色片岩 緑色片岩 泥岩 百岩 (第三纪章)

表 4 地山分類表 (日本道路協会)

池山	電石	代表岩石名	例注法連度 Vp(km/s)	9	山の秋り		370888.800(19	相違	トンネル掲載の状況
98.02	210-2	石崩氣花過熱躁氣、石英肉素	10 10 10 10	石戸、ホによる町谷 (創作で整要またはみ少)	小連続面の留稿 一箇理の留籍は干均的	小連続面の状態	コアの刑状は避片状~	AKPG	岩石の強度は、トンネル指揮によって作用する消重に比べて
	日現代	ホルンフェルス 由表を解析研 チャット	2030	の悪化実質の傾向があ	にSim 程度。 - Mill Hill へん Million	投稿粘土がほとん	現住以~様以を示す。 コアの長々ら振り 10~		非現に大きい。 お店は売っけ使うたけのいったの間前のよこはたみけまたよ
		要山北东武武武校署	-000	「水による病化はない」	められるがトンネル層	-TIMINDU (0.0 0	20m 7.8-5.5 8m#88		ど生じない。 暗秘語をから部分的に取落ちずる場合もある。 切羽
В	MR状	石英省山地 第二后開谷田・晴田	- Alcaby	-	朝日かずる影響は小さ	あしている.	のものもみられる。 RCD ほ 70 およ。	-	は目立する。 国際1個10m程度以下の操小の制作変形にとど来る。
	し掲訳	第 股制从同时和基定角膜岩	43	1					
	M層状	43年发中古生界屋面岩		-					
	上層状	第三級憲法出		1					
	12.00.00	花樹岩花園時緑岩、石英造岩	1000	・比較的影響で整要また は、各点の影響で整要また。	一般連の間隔は平均的	一不通時間に調見や	コアの長さが優な 5~		岩谷の珪度は、トンネル指領によって作用する荷重に比べて まあい。
	0.000	中吉生層時北チャート	1007	m555.	一般建設建た際幕でよ	<-勝みられる。	05052510.	-	不連携面の状態も比較的典評でトンネル指導によるゆるみは
	1.000	假山岩玄武道流校岩	127	一環境所の比較的良い数	ンネル都県に主要を与 えるもの。	に開口しているが	HCD IX 40~96.		部分生成2000にどどまる。2000月7つりやすい子連続期に沿っ て、局部的に指げ落ちずる場合もある。573社自立する。
CI	MARK	第三紀暦時光・陳岩	100F	 ・米による劣化は少な 		開口をは小さい。			- 踊り帰 10m 程度のトンネルでは、開催にともなう内空実位は 15~20mm 程度以下の小さな保険またにとどまえ。
	1.817	影波宏凝反宏凝沉角硬音	4000	1					
	M層状	私族省、中古生界屋首省	within the	1				4 kit.E	
	LARC	黑色芹菜,绿色芹岩	∠ाग्र						
		95-1077/5E	133						W York Haller A. M. W. Walter M or 2010 P. M. Martin Martin
		市ルンフェルス	19	は、多少の最化実質の様	12 20 m 12 m.	常い没有私生が部	17の数25010mit17 のものが多くJon 12下		あての 強度は、 トンマル 油原によって 日月 する 可能に にって あまり 大きくはないが、 概ね弾性実態をとどめる程度である。
	n aux	中古生層砂岩、チャート	4000	血がある。 ・良た・実質の目により	·規律」に建ち読載で、 トンネル福祉に変要な	分的にみられる。 - 不満れた面が開口し	の経たが多重に取れる 状態のもの。	-	岩石の珪度は大きくても不連続面の状態が悪く、描明により すべりやすい不連続面に沿って岩塊が落下しようとしてゆるみ
	M激状	第11名本共電法校告 石英的山街	4309	岩質は多少数化してい	キえるもの。	ているものが多く	RQD 12 10~40.		が大きくなる。
CT		第三紀暦時老・陳宏	/107	一部結果の比較的良い軟		的たきくなる。			運転にともなう内証実証は、岩石の強度が作用する消費に比
	1.0014	652世界区世界区会研究		着。 ・水により出会でゆるみ		一個の良い小観智を 目記もの。			べて小さい場合には、1回9幅 10m 程度のトンネルで保健化決界 である 30mm 程度発生するが、20割れるまでにほぼ従来する。
	い現状	私振業中古生界層質者	2000	を整分的に生じる。				4146	
		重色片岩,绿色片岩	ANTIN	1				*****	
	LARK	第三局層高岩	100 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1					
		石的岩石的白绿岩、石英均岩	「変質は多手張い部分もあるが、全体的に強い温定・			コアは進んれとなる。時		第石の抹煮は、トンネル(酒味によって作用する消重に比べて	
	日現状	ホルシフォルス 収力を履行出チャット	ATTRIBUTE .	一般連合理論のない。			るいは私土材となるも		大きくなく、特徴も応じとした一部設住も知を主じる。 岩石の保護は弾性変形をとどめるに足りるほど大きくても、
	140010	要山光玄武岩流校岩	Prevent and the	 ・干損き防め留藤は千均的 開口している。 	に 20m に下で,その多くは		O. BOD IS 20 (EM2)/T.		不連続面の状態が非常に悪く、指約により多くのすべりやすい 不連続面に沿って独自のゆるみが結大する。切詰の食力が悪く、
	mate.	11英語に岩 第三位置特別・理問		一干油を飲け除口も大きく	調肌や粘土を挟むことが多	HUN .			地山条件によってはリングカットや鏡吹きを必要とする。
DI	し現状	NUMBER OF STREET	- education : :	小規模な経営を決むもの。 利容を多く進じえた土谷 産業など。				4~2	「なて小さい場合には、インバートで早期に開合しないならば、舞
		90次名/保護者/保護者	0101010101010	*による朱化やゆるみが	催しい。				前端10m 程度のトンネルで30~60mm 程度死生し、57年072D 間 れても程度しないことが多い。
	困難状	ROUTE, TO ZONE ALS	10.0.0.0.0						
	し層状	2016-00-00 2016-00 2016-0	LLLLP	-					
		200002200200000220000		-				<u> </u>	第四のは使け、トレスを認識によって代明する時間に持べて」
	日掲伏	ホルンフェルス							小さく、確定実現とともに大きな歴世実用を生じる。
		中省3月19年,74~1							第4の法律がからいことに加えて、不確認的の状態も非常に 悪く、国際により多くのすべりやすい不連続期に沿って地口の
	M液状	石英的山岩	1000100						ゆるみが拡大し実位も大きくなる。切詰の自立が悪く、地山条件 によってはリングセットや健康を必要とする。
DI		第三統層行老・後老	(2:2:2:2:2	1			2~1	昭和にともなう内容変量は、インバートで早期に開会しない	
	し現状	委政犯规反犯规反角要犯	COLUMN ROP .]					ならは、5回79年10日 私はの555400で60~200日日 私はのにたし、 5080520 副わたても利用しない。
	M層状	利用市中市生産層質岩	(10000)(10000))						
	し現代	#C//6,#C//6		4					
18.0			and the second s		18-00				
12-0 # 12-0 H	ほう まかあれにあてはまない ほどね上がおけならのなね上があん、火気ならの 小弦文化 かかか した 物出が発音 とする。 ほう 小弦文化 はい トンゴル 後年 中に大規定に対応する ひろう ノゴル 急速 (1) しん いん しん いん								
18-50 18	u, Buthiza	H : qui contan' M : 200han's qu	Souther, F. decourter,		14-0 8464	いっよいほうしようとす いん聞とは、おけい日のほう	ったとないう。 第11日でし、単純の強度の3	と思いう。	
	1	#11:第四面かざ近的な不過時面となる(d.		(g-3) RQD	は RQD(30)とする。			

3) 事例紹介

(1) 白亜系堆積岩類のトンネル地山

トンネル地山は中生代白亜紀の中部蝦夷層群 (起点側:砂岩主体,終点側:砂岩泥岩互層)か らなる.事前地質調査の結果,本層は起点側に傾 斜した単斜構造と推定され,主に地山弾性波速度 や地山定数から、砂岩区間に CII-b パターン、泥 岩主体の区間に DI-b パターンを設定し, 断層・ 破砕帯や褶曲軸などの分布区間には補助工法(フ オアポーリング)付きの DII パターンが設定され ていた (図1).



~ Cトンネル位置図~





トンネル施工は起点側からの片押しであり、切羽が計画位置に到達するのと同時に先進ボーリング 調査が実施された.先進ボーリング調査の結果,起点坑口から区間②までの間は主に硬質砂岩(写真1) が出現し、ほぼ当初設計通りの支保パターンでトンネル掘削および施工が実施された.



写真1 代表的コア写真

しかし、区間③から終点方向に向かった区間には造構運動により破砕・脆弱化した泥岩が主に出現 し、切羽からの岩塊崩落ならびにトンネル変状(側壁変位、沈下等)が生じたため、補助工法ならび に支保構造のランクアップが必要となった.

先進ボーリングコアの写真を写真2,3に示し、施工実績を踏まえた総括図を図2に示す.





破砕された泥岩主体部(粘土化部や凝灰岩層は膨張性を示す) 中部蝦夷層群主部 砂岩泥岩互層(破砕部)・・・DIIパターンまたはEパターン

写真3 代表的コア写真



図2 Cトンネル支保パターン(施工実績)

(2) 古第三系堆積岩類のトンネル地山

トンネル地山は新生代古第三紀漸新世の音別層群(起点側:茶路層(硬質頁岩主体),終点側:大曲 層(砂質泥岩・泥岩主体)からなり,事前調査では起点側に傾斜した単斜構造が推定され,当初設計 支保パターンは地山弾性波速度や地山強度比から図3のように設定されていた.



~ P トンネル位置図~



図3 Pトンネル支保パターン(当初設計)

(2) -1 先進ボーリング調査結果

先進ボーリング調査の結果,凡そ次の2区間に地山等級区分された.各区間のコア状況と地山物性 値等を記載した図を次に示す.



図4 先進ボーリング調査結果(区間①)



図5 先進ボーリング調査結果(区間②)

原位置試験(速度検層,孔内載荷試験),室内岩石試験の結果から求めた区間ごとの地山定数,コア 状況から区間①を「DI地山」,区間②を「CII地山」に総合評価し,それぞれ「DI-bパターン」,「CII-b パターン」の提案をして採用された.

(2) -2 切羽の崩壊および天端・脚部沈下

(1) 切羽の崩壊(崩落)

この先進ボーリング調査の結果に基づいてトンネル掘削が再開されたが、切羽の崩壊や肌落ちが頻 発した.崩落個所の切羽写真とその深度に対応するコア写真を図 6,図7に示す.



図 6 切羽状況 (支保工 No. 146 (STA457+41 (ボーリング深度 51m))



図7 切羽状況(支保工 No. 178 (STA457+73 (ボーリング深度 83m))

参考図書²⁾によると、トンネル軸と不連続面の走向・傾斜には、次のような関係があるとされている(図 8).



²⁾ 木谷日出男 編著 (2014) トンネル技術者のための地相入門, 土木工学社出版

崩落位置に相当するコア状態は比較的良好であるが、その周りには鏡肌を伴い粘土状物質を挟んだ 不連続面がみられる.また、切羽にはトンネル軸にやや斜交した走向をもつ急傾斜の流れ盤が形成さ れている.

空中写真判読の結果を図9に示す. 調査地周辺にはトンネル起点側に傾斜した NE-SW 系, NNE-SSW 系, NW-SE 系のリニアメントが分布しており,このたび発生した切羽の崩壊はこれらの割れ目と「トンネル切羽面」によって画された良好な岩塊が崩落したものと考えられる.



図9 切羽写真にみられる不連続面と空中写真判読の結果

(2) 天端・脚部の沈下

本トンネルでは切羽崩落のほか、天端やアーチ脚部の沈下が各所で発生した(図10).



図 10 D I-b 断面区間 (STA457+43, ボーリング深度 53m)

先進ボーリング調査では、切羽前方の支保パターンを早急に決定する必要があるため、圧縮強度な どの室内試験はボーリングで採取してから数日後に試験室に持ち込んでいる.しかし、スレーキング 特性をもつ新第三紀の泥岩や凝灰岩などは、採取直後の新鮮状態と数か月後(または数年後)でコア 岩質劣化が生じる場合があり、トンネル地山評価を誤ることが多い.

Pトンネルで実施した先進ボーリングコアの岩質比較図を図11に示す.

深度 900m~12.00 社名	孔 番 No kB-2 -(4) 深度 9.00 M~12.00 M
KB-2 深度 33 .00m~35.∞m 社名	番 Noたター 2 - (ノ2) 度 33.20 M~35.00 M
< 探創から数日後 >	

図11 コア状態の経時変化(Pトンネル)

図 11 に示すように時間経過に伴って棒状コア部分にも微細割れ目が発達しており,掘削直後の岩質 とは明らかに異なりをみせる.乾湿繰返し試験では,凡そ数サイクルで供試体が分離しはじめ,5サイ クル目には細片化している(図 12).



図 12 乾湿繰返し試験の結果(Pトンネル) (第二回目先進ボーリング調査で実施)

一般に浸水に対する抵抗力を簡易的に評価する場合は浸水崩壊度試験が適用されるが、白亜系~古 第三系の岩石は固結度が高く、全く変化しないことが多い(図13).このことを踏まえると、白亜系~ 古第三系の長期的な岩質劣化を評価する場合は乾湿繰返し試験が有効と考えられる.



図 13 浸水崩壊度試験と乾湿繰返し試験結果の比較(Cトンネルの例) (同じ採取深度)

4) まとめ

今回の事例から、白亜系~古第三系泥質岩類のトンネル地山評価では次のような留意点が挙げられる.

- (1) トンネル地山は「硬岩地山」と「軟岩地山」の挙動をとり、不連続面の状態が支保パターンや補助工法に大きな影響を与える
- (2) 粘土状物質や鏡肌を伴った不良な割れ目がある場合,一見良好な部分が切羽の不安定化に支配的 挙動を示す
- (3) 固結度が高いため、長期的な岩質劣化を考慮する場合は乾湿繰返し試験で評価する

また、トンネル計画地に卓越する不連続面の規模・性状のほかにその走向とトンネル軸の交差関係 に配慮してルートを選定する必要があるものと考える.