

# 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<sup>1)</sup>には、硬岩・軟岩地山について次のような記載がある。

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>・<b>硬岩地山</b>：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・高溶結の火山碎屑岩類。<br/>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。</li><li>・<b>軟岩地山</b>：新第三紀の堆積岩（第四紀初期の堆積岩の一部）、溶結度の低い火山碎屑岩、硬岩の風化・変質岩。<br/>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。</li></ul> |
|--|

この区分に従うと、本編で述べる白亜系～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。

1) 土木学会（1987）トンネルにおける調査・計測の評価と利用

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)

		岩盤の初生的性質を反映した新鮮な状態での強度の区分		
		H (硬質岩) 80N/mm <sup>2</sup> 以上	M (中硬質岩) 20~80N/mm <sup>2</sup>	L (軟質岩) 20N/mm <sup>2</sup> 以下
劣化のしかたによる区分	塊状岩盤	はんれい岩、かんらん岩 閃緑岩 花崗閃緑岩 花崗岩 石英斑岩、輝緑岩 花崗斑岩 ホルンフェルス 角閃石岩 中・古生層砂岩 石灰岩、チャート (珪岩) 片麻岩	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
	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 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)

地山区分	剥離性に富む古生層~深成岩		剥離性に富まない古生層~深成岩、火山岩		第三紀堆積岩類		電率係数 K (%)	主な地質状況	地山定数					地山強度比 $\frac{m^*}{\gamma H}$
	Vp* (km/s)	RQD <sub>50</sub> (%)	Vp* (km/s)	RQD <sub>50</sub> (%)	Vp* (km/s)	RQD <sub>50</sub> (%)			準岩盤圧縮強度 $\sigma_c^*$ (MPa)	粘着力 C* (MPa)	内部摩擦角 $\phi^*$ (°)	変形係数 E* (MPa)	ポアソン比 $\nu$	
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 2 肌落ちほとんどない	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	
B	4.5~4.8	50~60	4.0~4.5	50~80	3.0 以上	60 以上	25 以下		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	
C I	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 以上
C II	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	
D I	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
D II				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 変質を伴った破砕帯	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) 古生層~深成岩のうち、吸水透水性を有する蛇紋岩、片岩類は別途考慮  
注 2) 地山定数欄の( )内は、従来単位 (kgf/cm<sup>2</sup>) での値  
注 3) MPa=N/mm<sup>2</sup>

表 3 岩石グループ (日本道路協会)

	H (硬質岩)	M (中硬質岩)	L (軟質岩)
塊状岩盤	斑れい岩 花崗岩 花崗閃緑岩 石英斑岩 花崗斑岩 ホルンフェルス 角閃石岩 砂岩、礫岩 (第三紀層) 石灰岩、チャート 片麻岩	安山岩 玄武岩 石英安山岩 流紋岩 ひん岩 砂岩、礫岩 (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 黒色片岩 緑色片岩 泥岩、頁岩 (第三紀層)

注) ——は、弾性波速度による区分を示す。

表 4 地山分類表 (日本道路協会)

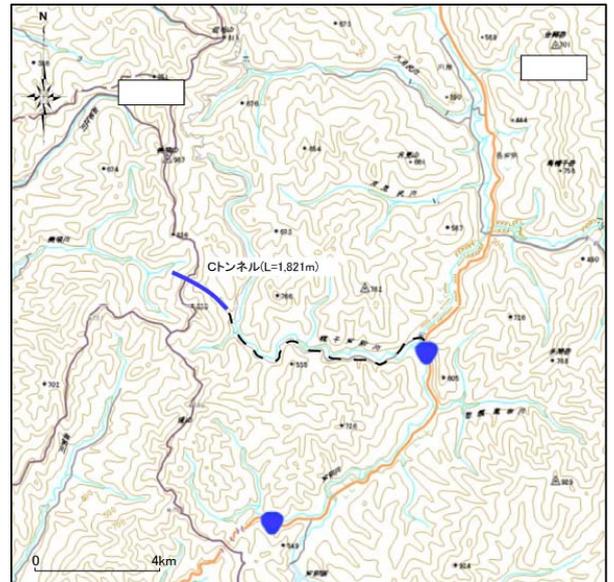
地山区分	岩石グループ	代表岩石名	弾性波速度 Vp (km/s)	地山強度 (MPa)	地質状況	地山定数	地山強度比	トンネル掘削の状況		
B	片麻状	花崗閃緑岩、花崗岩、中古生層粘板岩、中古生層頁岩、石英片岩、石英斑岩、花崗斑岩	4.5~4.8	140 以上	新鮮にて亀裂ほとんどない、肌落ちほとんどない	140 以上 (1,400 以上)	6 以上 (60 以上)	55 以上	5,000 以上 (50,000 以上)	0.25 以下
	M 塊状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	4.0~4.5	140~35 (1,400~350)			6 以上 (60 以上)	55~50	5,000 以上 (50,000 以上)	0.25 以下
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	4.0~4.5	35~15 (350~150)	1 新鮮にて亀裂少ない 2 肌落ち少ない		6~3 (60~30)	50~45	5,000~2,000 (50,000~20,000)	0.25~0.30
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	4.0~4.5	15~7 (150~70)	1 わずかに風化し亀裂やや多い 2 肌落ち多い		3~1.5 (30~15)	45~40	2,000~1,000 (20,000~10,000)	0.25~0.30
	L 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	4.0~4.5	7~3.5 (70~35)	1 風化受け亀裂多い 2 一部変質破砕帯あり		1.5~1.0 (15~10)	40~35	1,000~500 (10,000~5,000)	0.30~0.35
C I	片麻状	花崗閃緑岩、花崗岩、中古生層粘板岩、中古生層頁岩、石英片岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.5~4.0	140 以上	新鮮にて亀裂ほとんどない、肌落ちほとんどない	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
	M 塊状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.5~4.0	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
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.5~4.0	35~15 (350~150)	1 新鮮にて亀裂少ない 2 肌落ち少ない		6~3 (60~30)	50~45	5,000~2,000 (50,000~20,000)	0.25~0.30
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.5~4.0	15~7 (150~70)	1 わずかに風化し亀裂やや多い 2 肌落ち多い		3~1.5 (30~15)	45~40	2,000~1,000 (20,000~10,000)	0.25~0.30
	L 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.5~4.0	7~3.5 (70~35)	1 風化受け亀裂多い 2 一部変質破砕帯あり		1.5~1.0 (15~10)	40~35	1,000~500 (10,000~5,000)	0.30~0.35
C II	片麻状	花崗閃緑岩、花崗岩、中古生層粘板岩、中古生層頁岩、石英片岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.0~3.5	140 以上	新鮮にて亀裂ほとんどない、肌落ちほとんどない	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
	M 塊状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.0~3.5	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
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.0~3.5	35~15 (350~150)	1 新鮮にて亀裂少ない 2 肌落ち少ない		6~3 (60~30)	50~45	5,000~2,000 (50,000~20,000)	0.25~0.30
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.0~3.5	15~7 (150~70)	1 わずかに風化し亀裂やや多い 2 肌落ち多い		3~1.5 (30~15)	45~40	2,000~1,000 (20,000~10,000)	0.25~0.30
	L 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	3.0~3.5	7~3.5 (70~35)	1 風化受け亀裂多い 2 一部変質破砕帯あり		1.5~1.0 (15~10)	40~35	1,000~500 (10,000~5,000)	0.30~0.35
D I	片麻状	花崗閃緑岩、花崗岩、中古生層粘板岩、中古生層頁岩、石英片岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.5~3.0	140 以上	新鮮にて亀裂ほとんどない、肌落ちほとんどない	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
	M 塊状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.5~3.0	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
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.5~3.0	35~15 (350~150)	1 新鮮にて亀裂少ない 2 肌落ち少ない		6~3 (60~30)	50~45	5,000~2,000 (50,000~20,000)	0.25~0.30
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.5~3.0	15~7 (150~70)	1 わずかに風化し亀裂やや多い 2 肌落ち多い		3~1.5 (30~15)	45~40	2,000~1,000 (20,000~10,000)	0.25~0.30
	L 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.5~3.0	7~3.5 (70~35)	1 風化受け亀裂多い 2 一部変質破砕帯あり		1.5~1.0 (15~10)	40~35	1,000~500 (10,000~5,000)	0.30~0.35
D II	片麻状	花崗閃緑岩、花崗岩、中古生層粘板岩、中古生層頁岩、石英片岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.0~2.5	140 以上	新鮮にて亀裂ほとんどない、肌落ちほとんどない	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
	M 塊状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.0~2.5	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
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.0~2.5	35~15 (350~150)	1 新鮮にて亀裂少ない 2 肌落ち少ない		6~3 (60~30)	50~45	5,000~2,000 (50,000~20,000)	0.25~0.30
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.0~2.5	15~7 (150~70)	1 わずかに風化し亀裂やや多い 2 肌落ち多い		3~1.5 (30~15)	45~40	2,000~1,000 (20,000~10,000)	0.25~0.30
	L 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	2.0~2.5	7~3.5 (70~35)	1 風化受け亀裂多い 2 一部変質破砕帯あり		1.5~1.0 (15~10)	40~35	1,000~500 (10,000~5,000)	0.30~0.35
E	片麻状	花崗閃緑岩、花崗岩、中古生層粘板岩、中古生層頁岩、石英片岩、石英斑岩、花崗斑岩	1.5~2.0	140 以上	新鮮にて亀裂ほとんどない、肌落ちほとんどない	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
	M 塊状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	1.5~2.0	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
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	1.5~2.0	35~15 (350~150)	1 新鮮にて亀裂少ない 2 肌落ち少ない		6~3 (60~30)	50~45	5,000~2,000 (50,000~20,000)	0.25~0.30
	M 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	1.5~2.0	15~7 (150~70)	1 わずかに風化し亀裂やや多い 2 肌落ち多い		3~1.5 (30~15)	45~40	2,000~1,000 (20,000~10,000)	0.25~0.30
	L 層状	花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、花崗斑岩	1.5~2.0	7~3.5 (70~35)	1 風化受け亀裂多い 2 一部変質破砕帯あり		1.5~1.0 (15~10)	40~35	1,000~500 (10,000~5,000)	0.30~0.35

注 1) 本分類表は、弾性波速度による区分と地山強度による区分の両方を併用して地山強度を評価するものである。注 2) 地山強度 (MPa) は、トンネル掘削時の地山強度を評価するための値であり、トンネル掘削時の地山強度は、トンネル掘削時の地山強度を評価するための値であり、トンネル掘削時の地山強度は、トンネル掘削時の地山強度を評価するための値である。注 3) 地山強度 (MPa) は、トンネル掘削時の地山強度を評価するための値であり、トンネル掘削時の地山強度は、トンネル掘削時の地山強度を評価するための値である。注 4) 地山強度 (MPa) は、トンネル掘削時の地山強度を評価するための値であり、トンネル掘削時の地山強度は、トンネル掘削時の地山強度を評価するための値である。注 5) 地山強度 (MPa) は、トンネル掘削時の地山強度を評価するための値であり、トンネル掘削時の地山強度は、トンネル掘削時の地山強度を評価するための値である。

### 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・破碎帯や褶曲軸などの分布区間には補助工法（フォアボーリング）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～

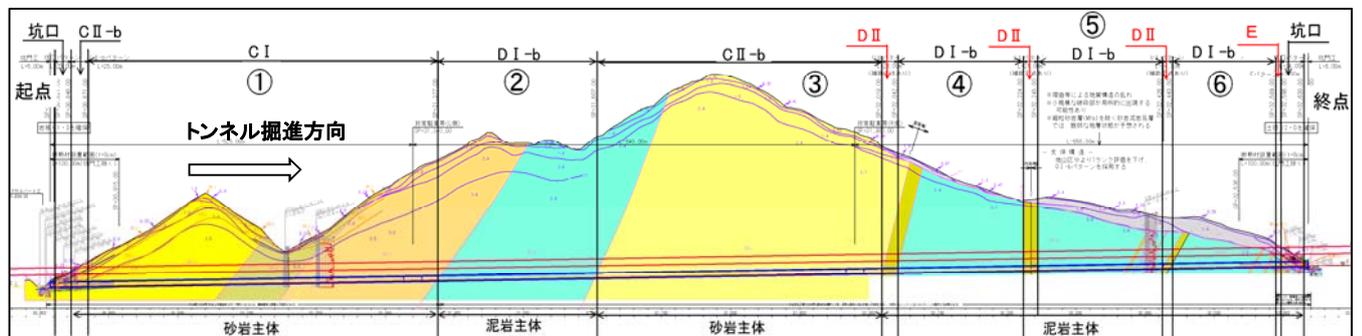
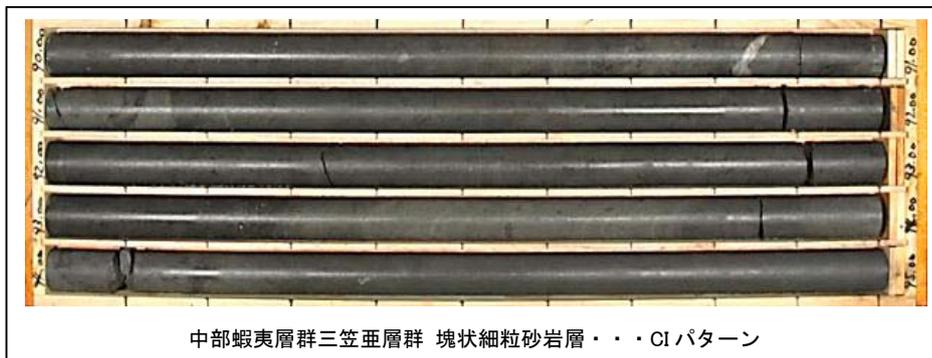


図1 Cトンネル支保パターン（当初設計）

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。



中部蝦夷層群三笠亜層群 塊状細粒砂岩層・・・CIパターン

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碎・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。

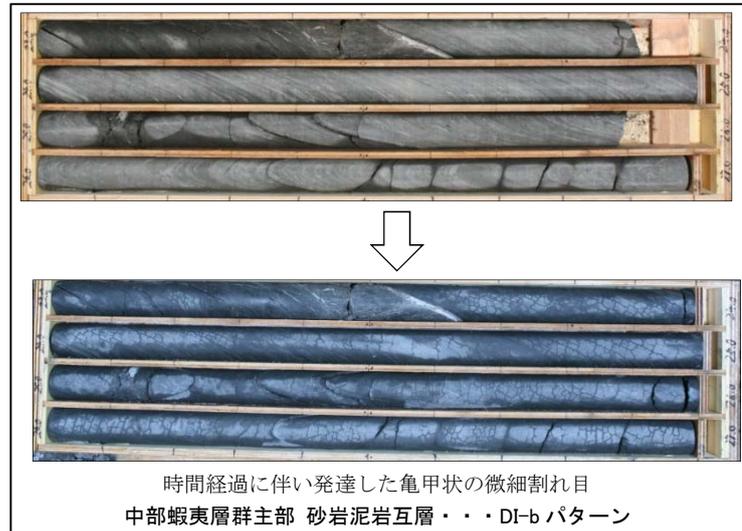


写真2 代表的コア写真

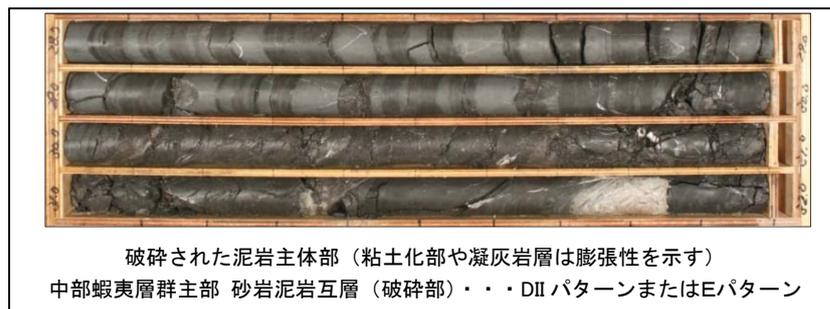


写真3 代表的コア写真

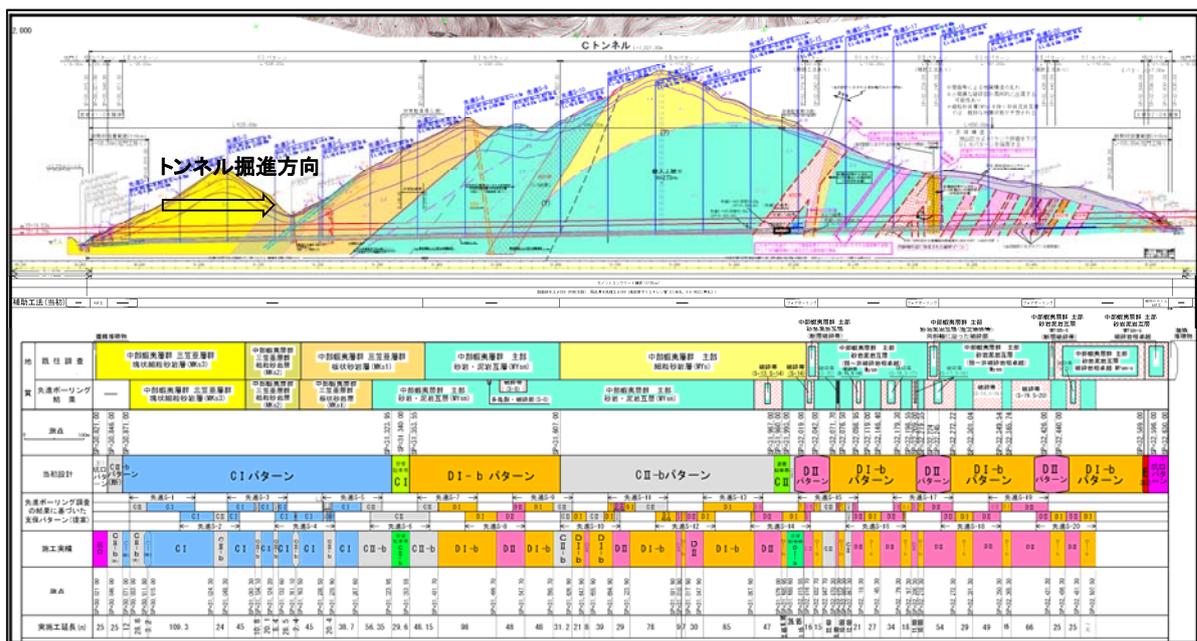
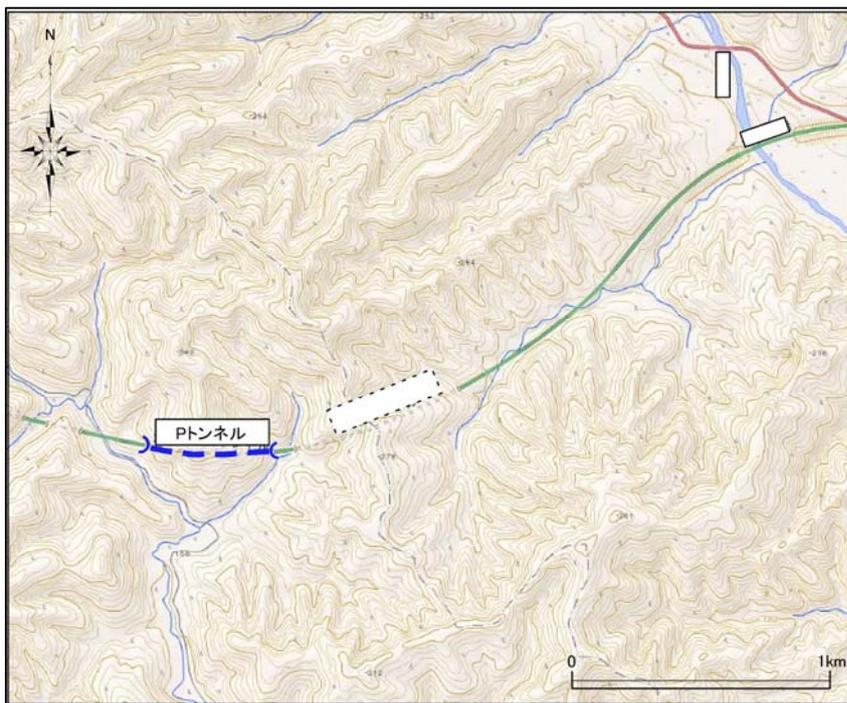


図2 Cトンネル支保パターン（施工実績）

## (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～

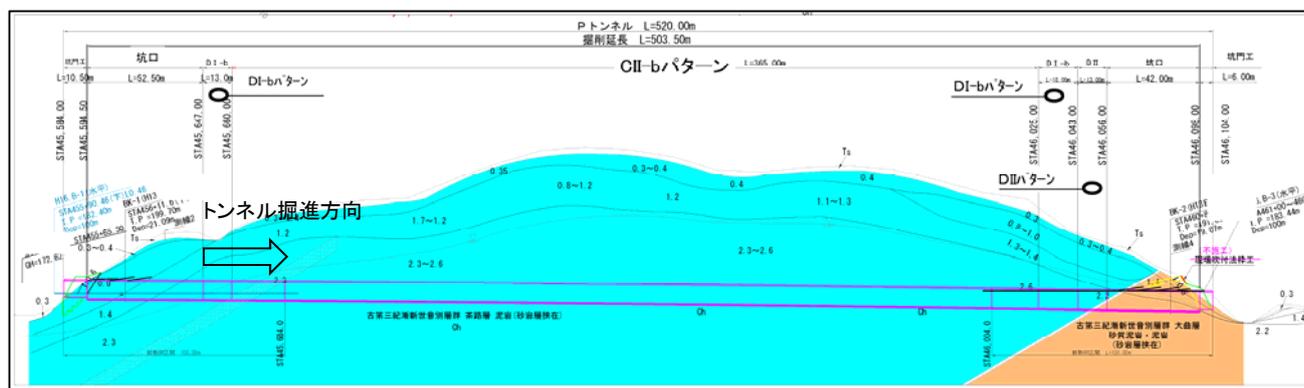


図3 Pトンネル支保パターン（当初設計）

(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。

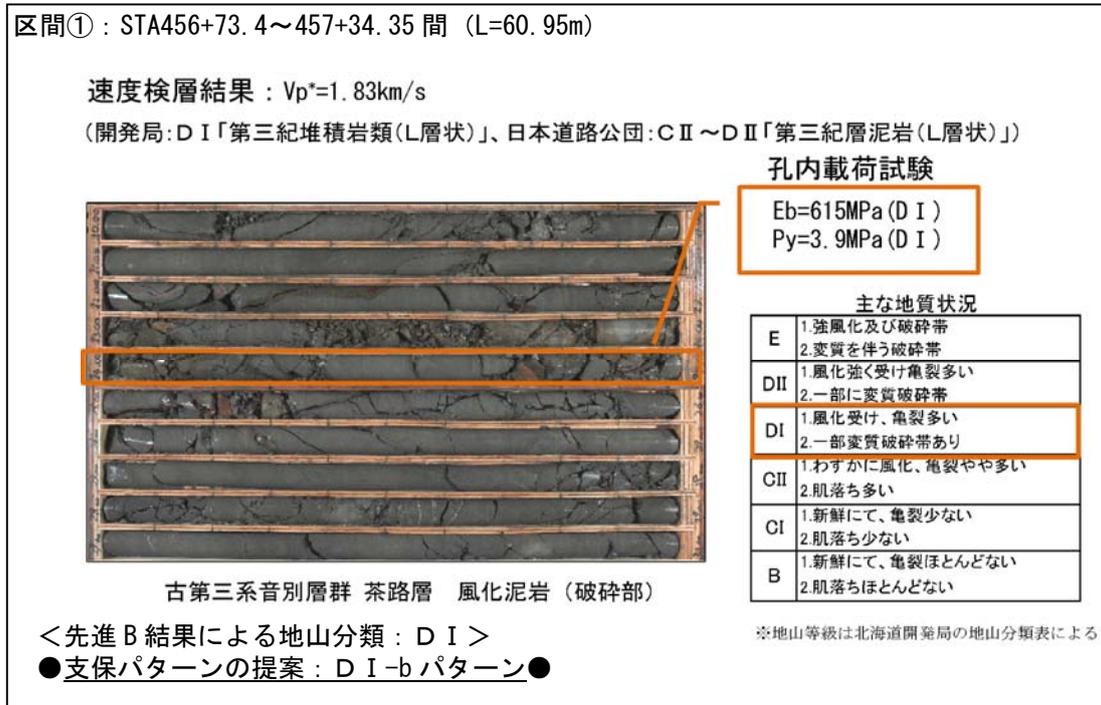


図 4 先進ボーリング調査結果 (区間①)

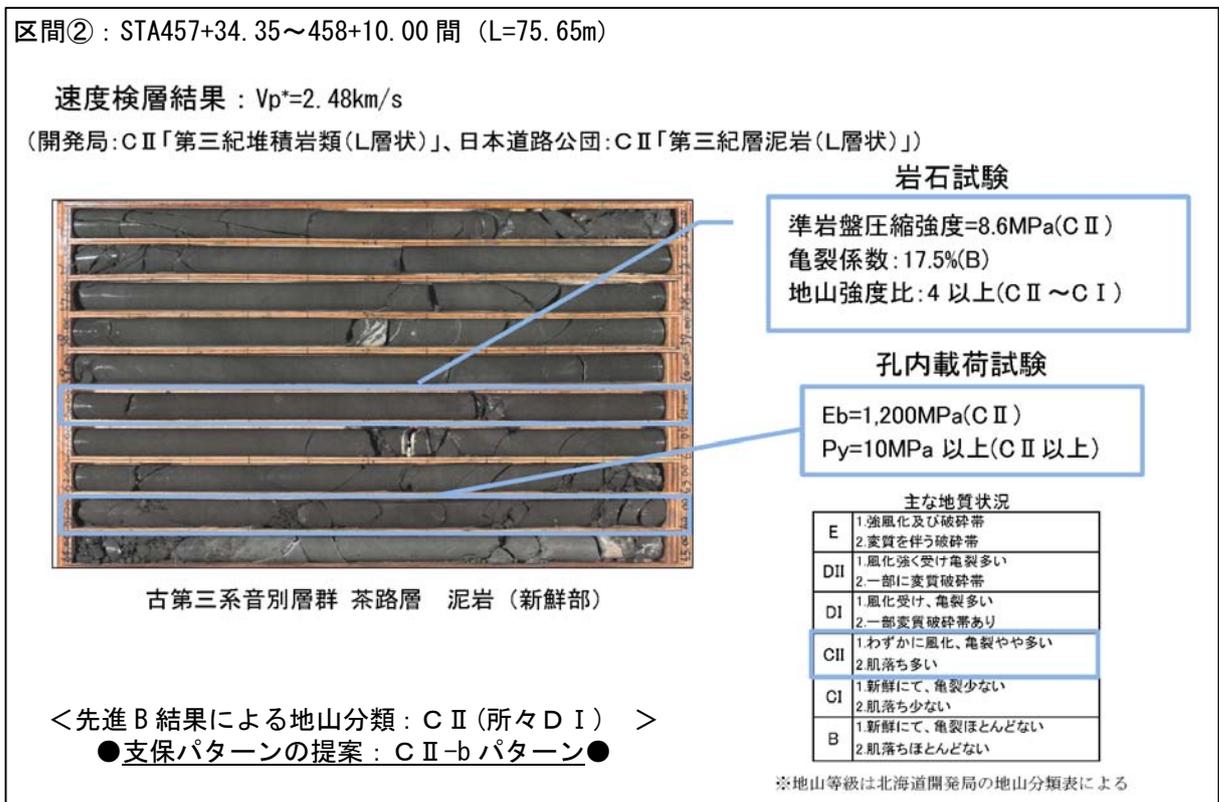


図 5 先進ボーリング調査結果 (区間②)

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。

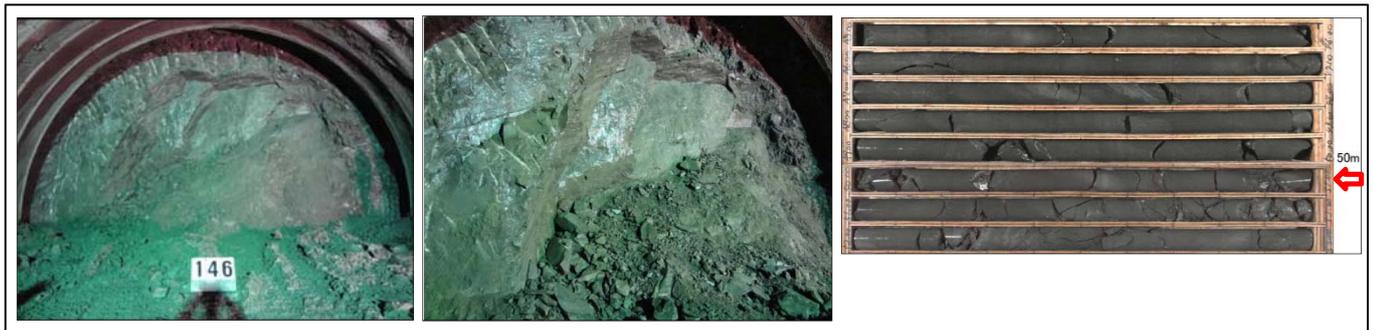


図 6 切羽状況（支保工 No. 146（STA457+41（ボーリング深度 51m））

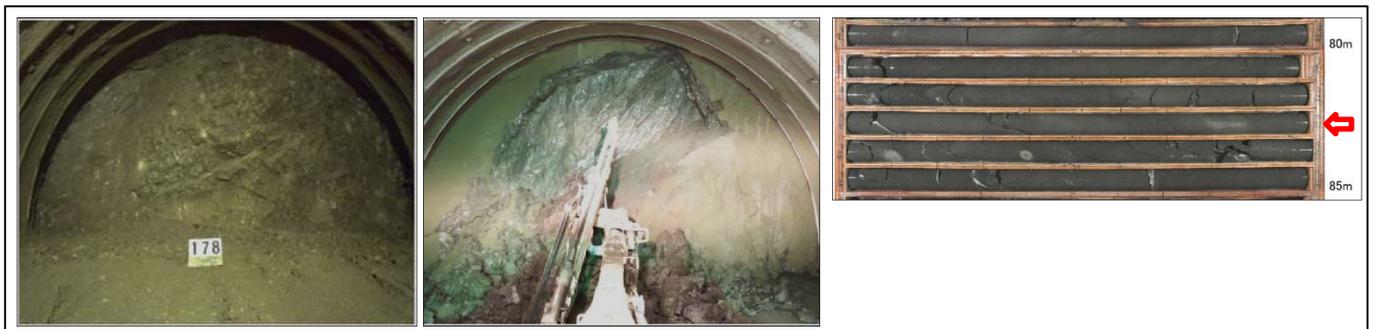


図 7 切羽状況（支保工 No. 178（STA457+73（ボーリング深度 83m））

参考図書<sup>2)</sup>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）。

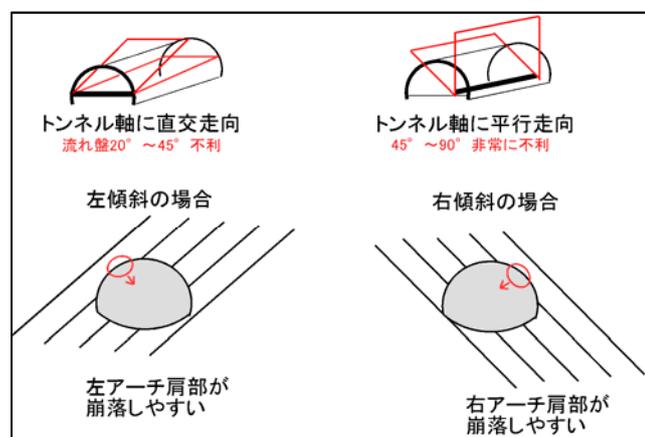


図 8 トンネル軸と不連続面の走向・傾斜関係<sup>2)</sup>

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



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。

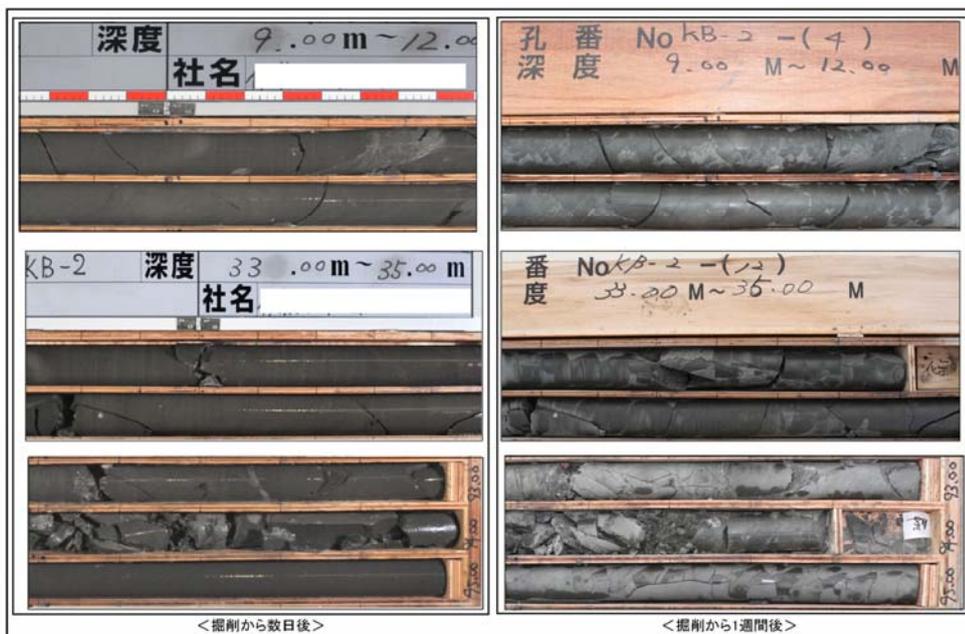


図 11 コア状態の経時変化（P トンネル）

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）。

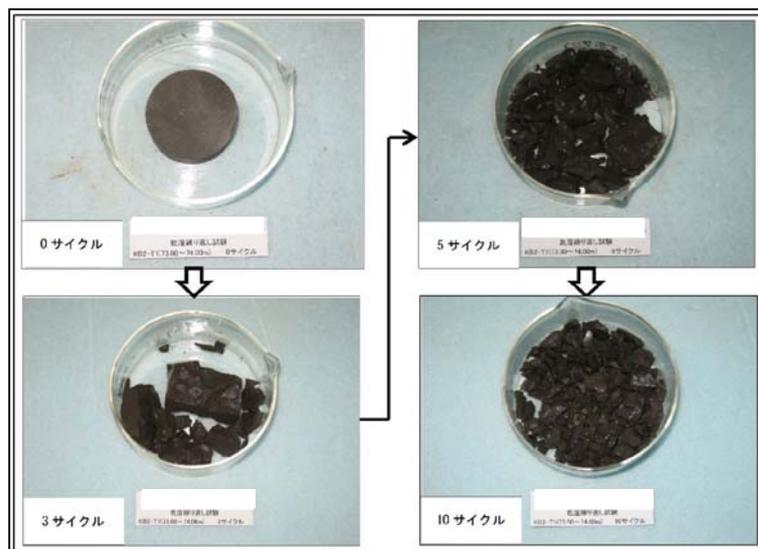


図 12 乾湿繰返し試験の結果（P トンネル）  
（第二回目先進ボーリング調査で実施）

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。

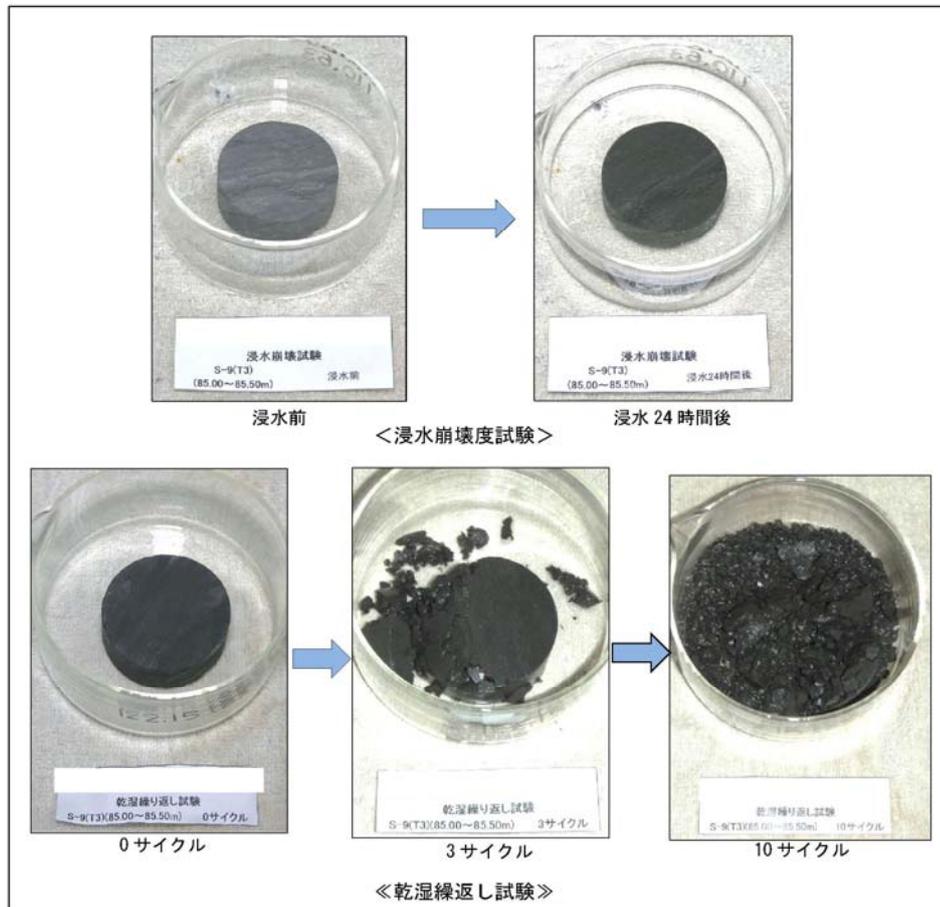


図13 浸水崩壊度試験と乾湿繰返し試験結果の比較 (Cトンネルの例)  
(同じ採取深度)

#### 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・性状のほかは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られる。

以上