

[9]
切羽前方探査
メニューと
適用事例

前田建設工業(株)
久慈 雅栄

目次

0.切羽前方探査とは

1.前方探査技術メニュー

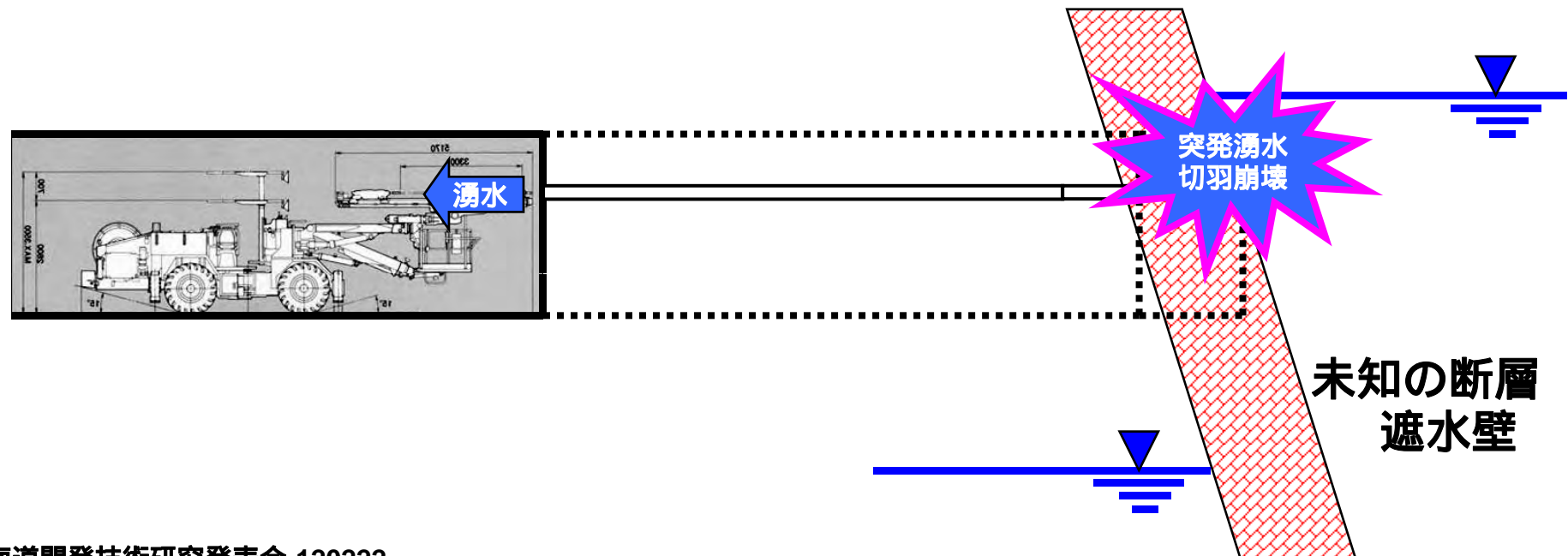
2.主な探査法の紹介

3.TSP探査を中心とした最新の探査事例

4.地形・地質3D化技術の概況

切羽前方探査とは

- 山岳トンネルにおいて、掘削面(切羽)前方の地山状況(地質、硬軟、湧水等)を探る技術
- トンネルでは事前に地質調査を行っているものの、実際には「掘って見なければ分からない」のが現状。このため、事故・トラブル等が発生



開発の目的



- 山岳トンネル、特に大深度or急峻地形のトンネルでは事前地質調査が不十分とならざるを得ないため、地質リスクが残存。これを回避(突発事象の予見、未然防止対策、事象対応事前準備、等)する技術は、事業者および現場から確実なニーズがある
- 従来技術を充実するとともに、新しい探査技術を積極的に導入・整備することにより、より確実なリスク管理を目指す
- 現場ごとに地形・地山条件(土被り、硬岩・軟岩、等)、リスク内容(地層境界、断層・破砕帯・弱層、突発湧水、等)、施工条件(工期、断面、機械、環境、等)が異なる。これらに対し、最適な探査種目を選択・組合わせて切羽前方探査を計画する
- また、施工サイクルに組込める、結果の評価の等、作業的な面も含めて現場にとって負担の少ない技術体系を提供する

前田建設工業のトンネル切羽前方探査技術メニュー

5

下記を地山条件・リスク課題に応じて適宜組み合わせ実施

探り削孔(ドリルジャンボを用いた探査) ←これをベースと考える

各種油圧データ(削孔エネルギー等)、スライム、リターン水(色・量)

コアボーリング

短尺(ロータリー)、長尺(ロータリー&ワイヤライン)、

高速・長尺(ロータリーパーカッション&ワイヤライン:アロードリル)

超高速削孔(ダウンザホールハンマ)

TSP探査技術

BTV探査技術

電磁探査(FDEM探査)

地中レーダー(電磁波探査)

各種孔内検層(弾性波検層、電気検層、他)

水理試験(湧水圧試験、ルジオン試験等)

北 地表からの調査・探査は別途考慮。また3D-CAD技術を援用。

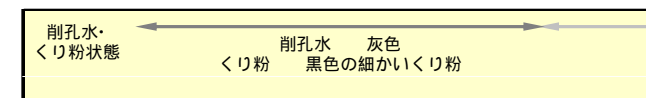
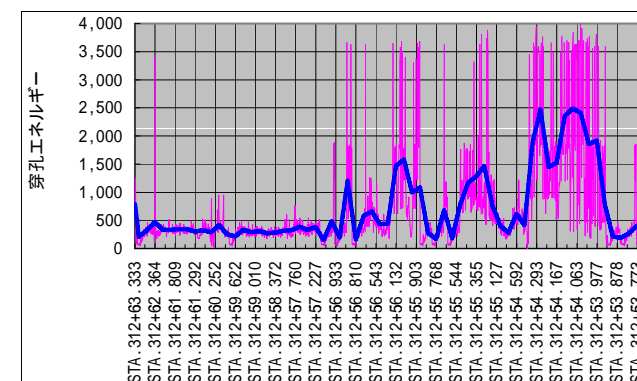


探り削孔(ドリルジャンボを用いた探査)

- トンネル掘削に用いるドリルジャンボを活用
削孔時の各種データを取得し、地山評価に活用
- 取得データ
 - ・ 削孔時の各種油圧データ(打撃圧、回転圧、フィード圧→削孔速度、削孔エネルギー)
 - ・ スライム(岩片による地質評価)
 - ・ 削孔リターン水(水量、色・濁り)
- 特別な設備は不要、最長50m程度(半～1方)
- 地山は選ばないが、崩落性が強いと効率悪し
- 当社の実績 多数の現場で適用中
- 欠点
 - ・ トンネル用のドリルジャンボを用いるためやや削孔能力が低い。通常は1週間分の掘削延長(約30～50m程度)を行うことが多い。
 - ・ スライムおよびリターン水の評価は、人間が実施する必要がある。



トンネルジャンボ(ホイールタイプ)



油圧データの評価例

高速・長尺ボーリングによるコア採取技術 (アロードリル)

- ロータリーパーカッションドリルにワイヤラインによるコア採取機能を持たせた手法
- 高速&長尺でのコア採取が可能
 - ：実績 50～150m/3方(週末4方)
- 軟岩地盤に適し、硬岩でも適用可能
- 当社の実績：4現場
- 欠点
 - ・ロータリーパーカッションのため、特に硬岩については地山を破碎しながらコア採取することになる。このため、岩片状のコアの採取となるが、地質状態の判定は可能
 - ・破碎質(緩い)地山ではコアを流すリスク有り
 - ・専用マシンが必要となる。



アロードリル(クローラタイプ)



ビット

アロードリルコア状況



凝灰質砂岩～泥岩 q_u 20N/mm² 100m/2方

アロードリルコア状況

ディスクキング



9



花崗岩(B ~ CH級) q_u 100N/mm²

100m/5方

超高速削孔技術(ダウンザホール)

- 高効率で岩盤を削孔できる先端打撃型ウォーターハンマを搭載したダウンザホールハンマをトンネル切羽にて水平方向に使用
- 超高速での削孔が可能であり、湧水に関する探り削孔と水抜きボーリングへの適用が可能

- 削孔速度:実績 168m/4方(硬岩にて)

- 軟岩～硬岩に適用可能

- 当社の適用実績:5現場

- 欠点

- ・現状では、地山の状態(硬軟等)について指標を得ることが難しいため、湧水量とスライムによる前方評価が主体

- 現在、地山の状態等を評価する取組みを試行中

- ・専用マシンが必要となる。

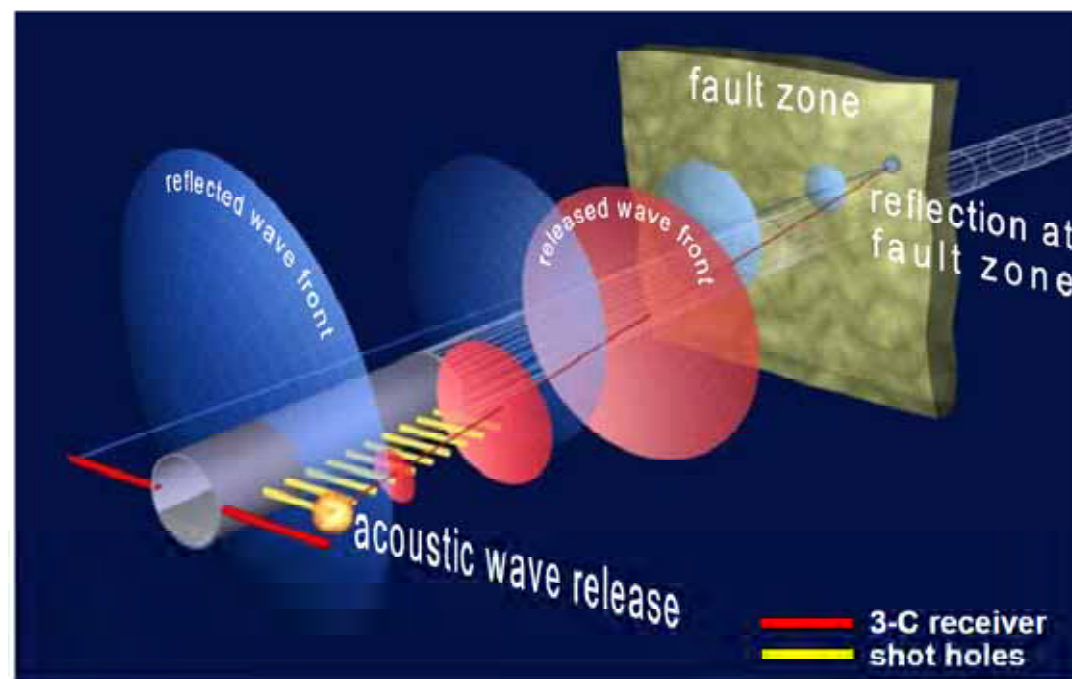
ウォーターハンマ



ベースマシン(クローラタイプ)

TSP (Tunnel Seismic Prediction) 探査技術

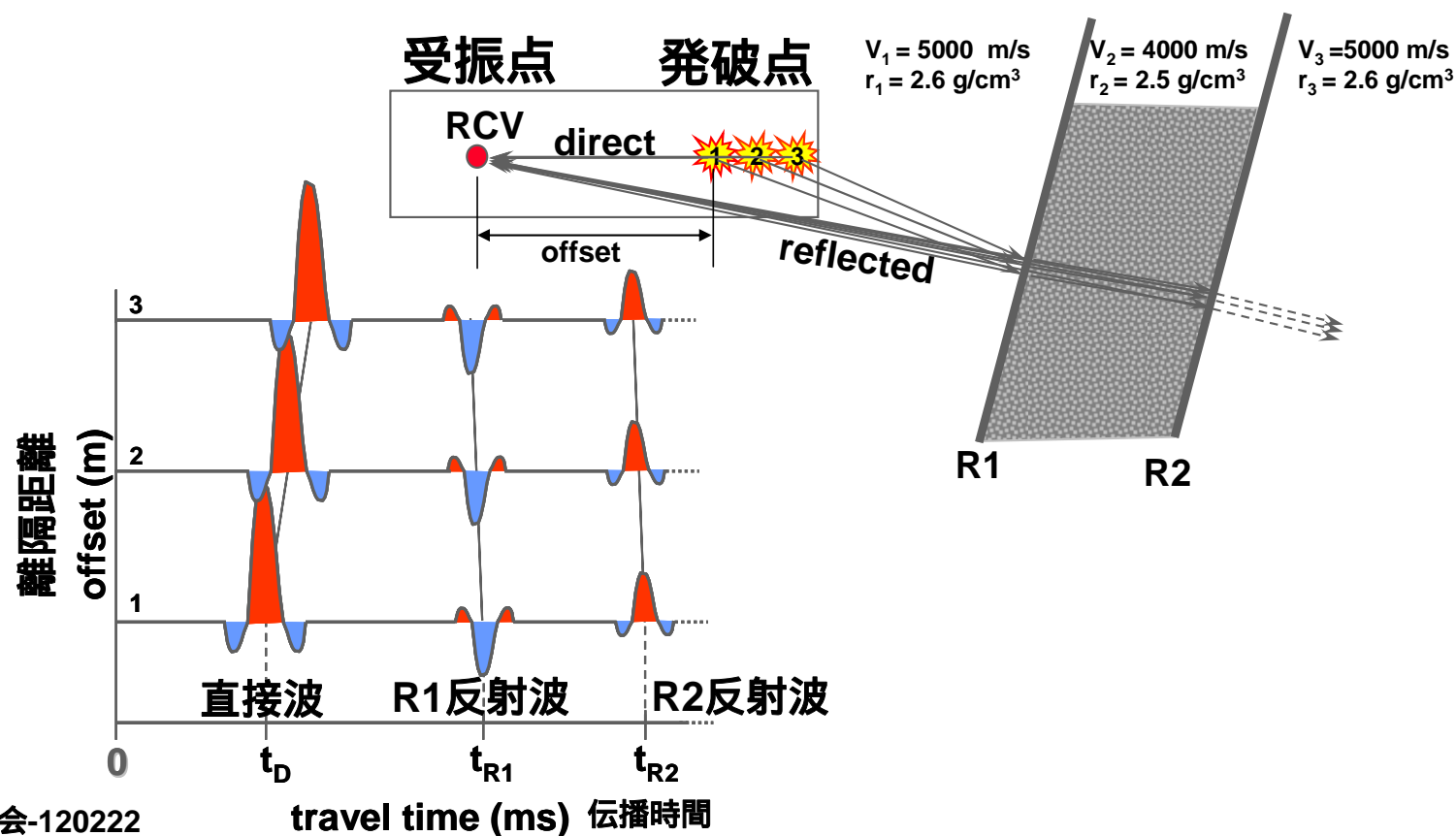
- 小規模発破で発生させた弾性波の伝播・反射に伴う波形を取得し、切羽前方100～150mの地質構造(反射面、弾性波速度構造、等)を3次元にて予測
- 10数年前より実用化、SWISS・AMBERG社が開発
- 開発当初は2次元レシーバーのため、結果の解釈に課題(TSP202)
- 近年3次元レシーバーを導入、解析精度と使い勝手が向上(TSP203)
- 当社の実績 6現場 46回
- 探査に要する時間
 - ・測定準備(1.5～2時間:前日)
 - 発破孔24孔(2m)削孔
 - 受振孔2孔(2m)削孔
 - 受振孔ケーシング設置
 - ・現場測定(1.5～2時間)
 - 発破・測定を24回繰り返し
 - ・解析(1.5～2時間、事務所)



TSP探査技術のイメージ
2受振点、24発破 [AMBERG社]

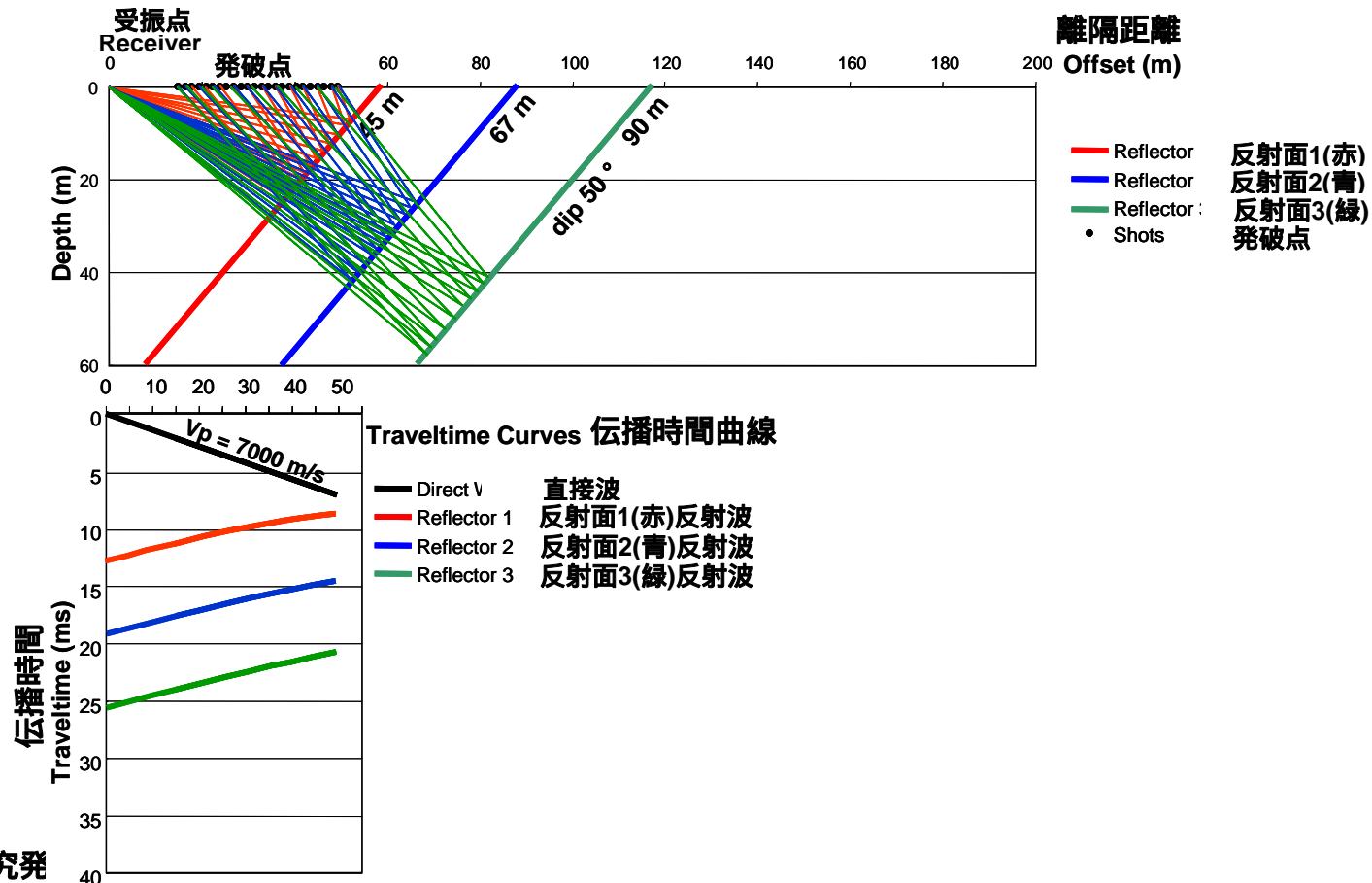
TSPの原理-1

- 弾性波(縦波、横波)が地山中の物性境界面(地質境界、断層・破砕帯、不連続面等)で伝播・反射・屈折する現象を利用
- 発破(24点)で発生した弾性波を受振点(トンネル両翼2点)で測定
- その到達(伝播)時間や受信波形等を解析
- 弾性波反射面や速度構造の3次元(空間)分布を推定

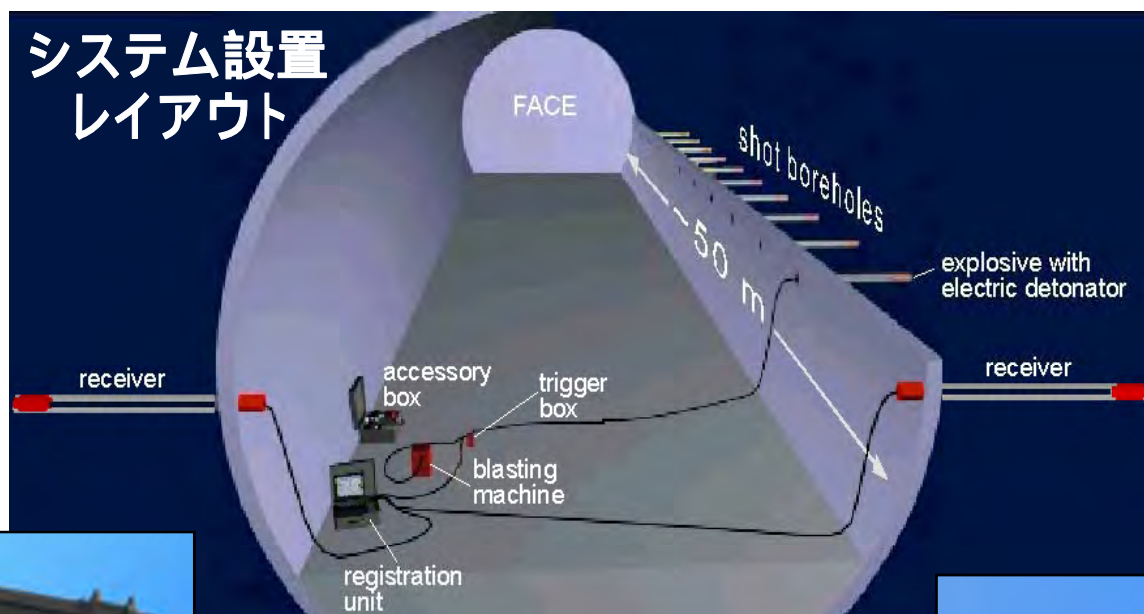


TSPの原理-2

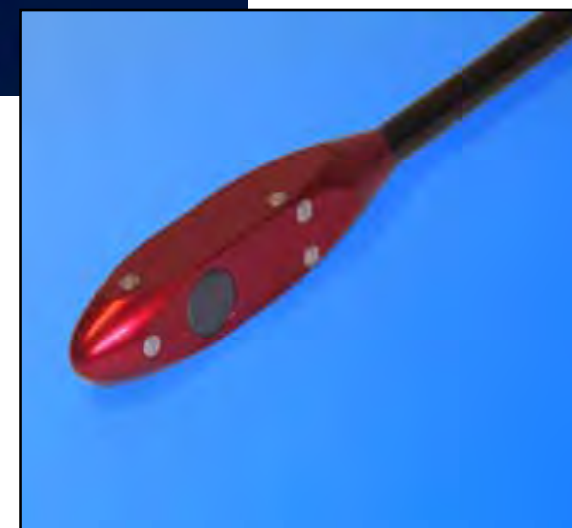
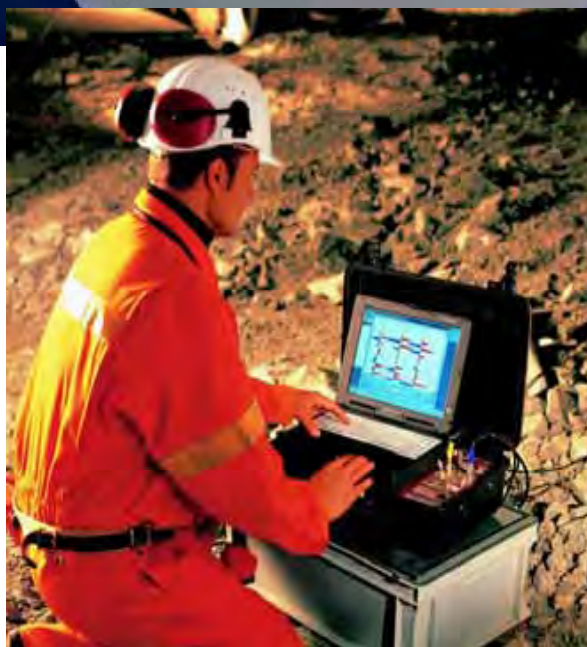
- 各発破点(24点)で順次発破を行い、その時に発生した弾性波が境界面で反射・透過し、受振点に到達する
- 反射面の位置、トンネルとの位置・傾斜関係(水平・鉛直)、連続性、地山物性(V_p & V_s)等により、受振点への伝播経路と伝播(到達)時間が異なり、到達波となる
- これらを専用ソフトにて解析し、最も合理的(誤差の少ない)な弾性波反射面や速度構造の3次元(空間)分布を推定する



TSP探査装置概要



データ収録&解析用PC



受振機本体

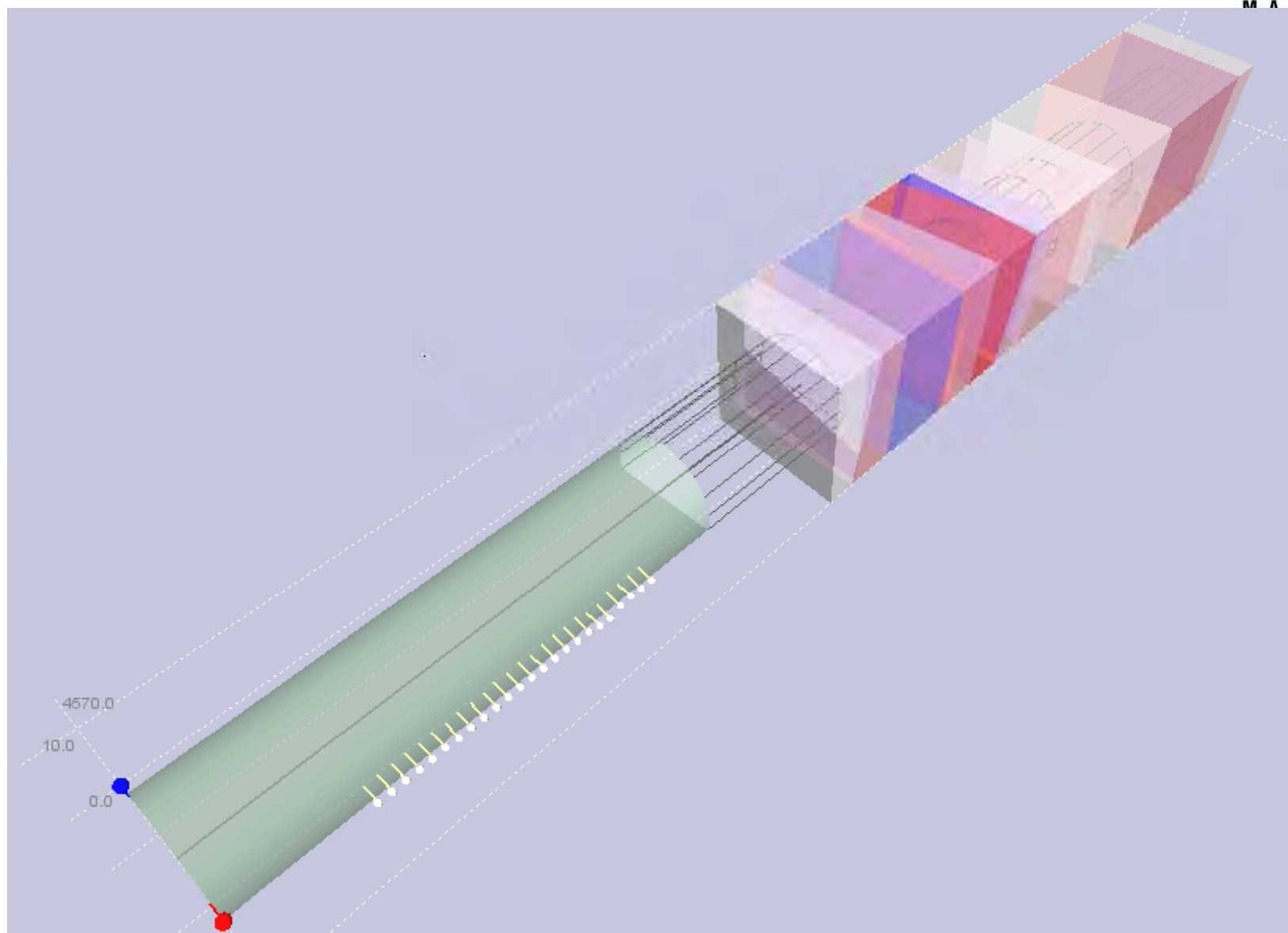
現地計測状況



実際のトンネルでの測定用発破状況(火薬量200g)

北海道開発技術研究発表会-120222

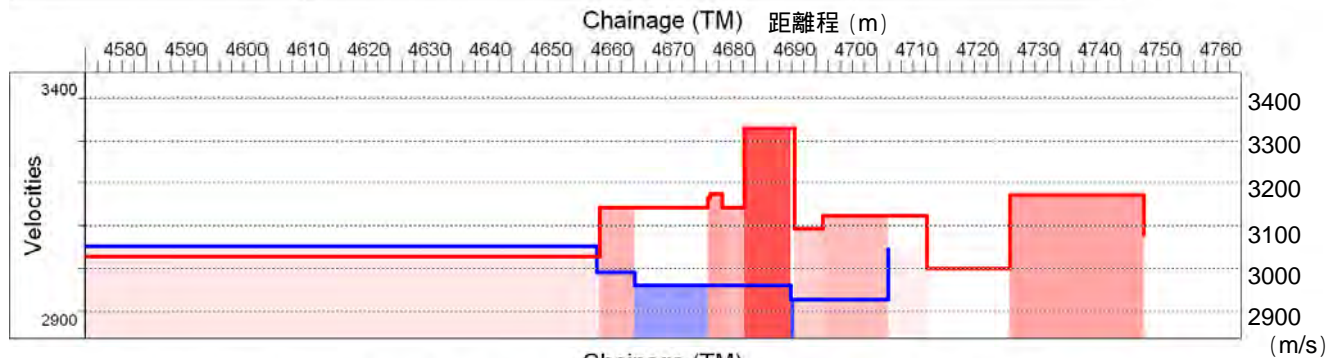
3Dイメージ図



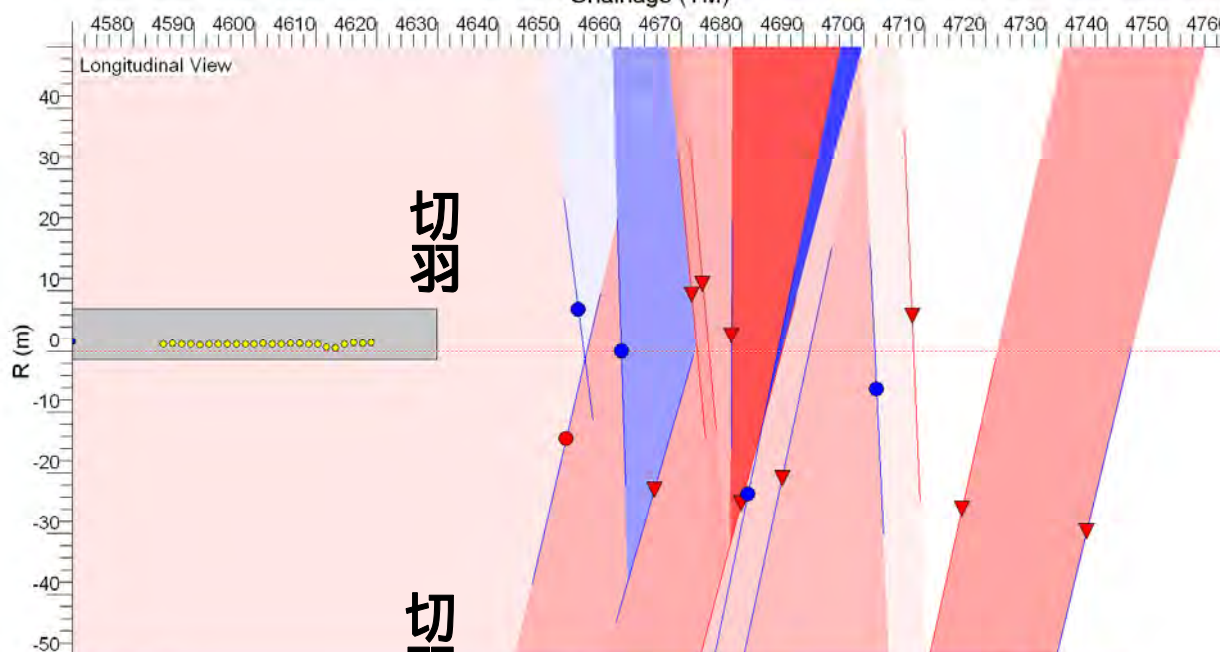
2次元断面図

Survey Name :	Rock Parameter: Velocity-P	Wave type :	TSPwin PLUS Tunnel Seismic Prediction
Survey Date :		P-wave ▾	
Face (TM) : 4630.00	Receiver	SV-wave ◻	AMBERG TECHNOLOGIES
Ref. Location (TM) : 4570.00	1 ■	SH-wave ●	
	2 ■	X Scale : 1/1250 R Scale : 1/1250	

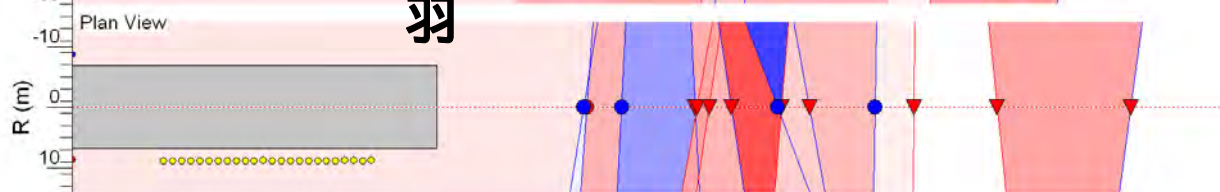
弾性波Vp 速度分布



縦断面図



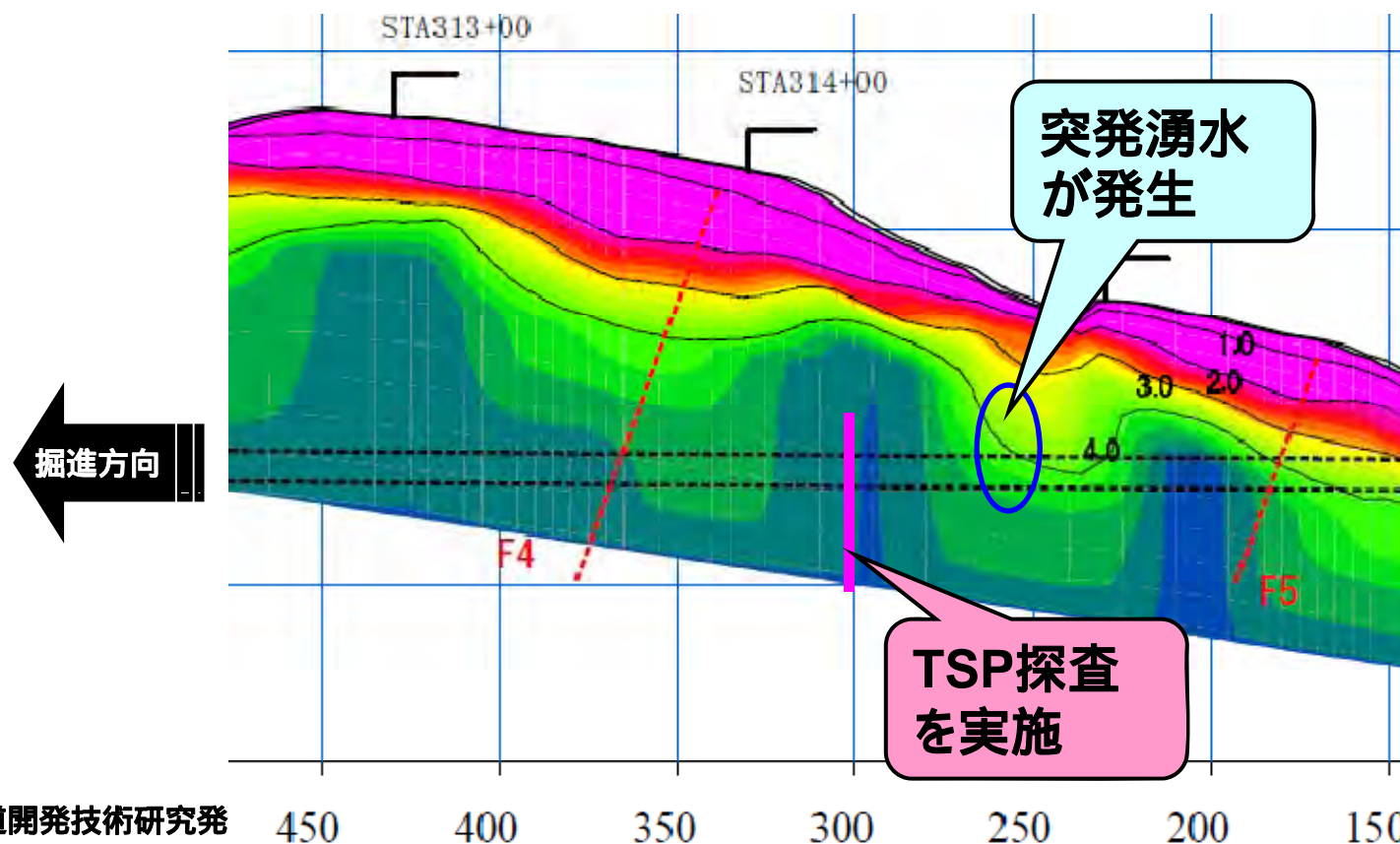
平面図



前方探査総合解析事例

Aトンネル

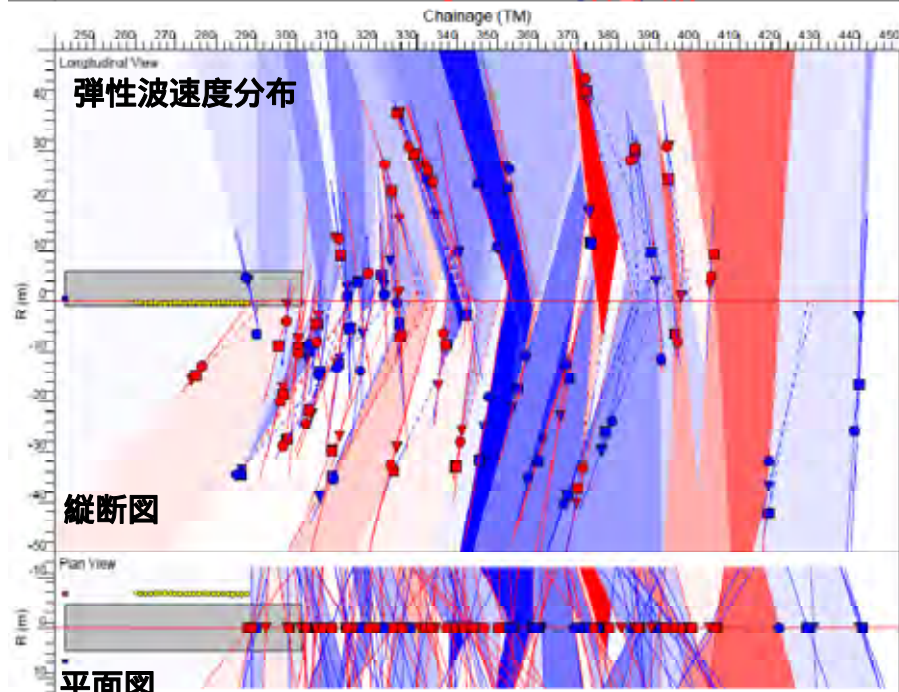
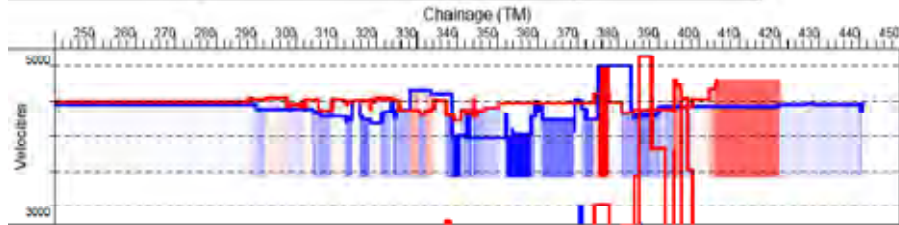
- トンネル全線の間には6本の断層が想定
- 高密度弾性波探査の結果、その他にも数箇所の弾性波速度の落ち込みを特定
- 坑口より約250mの弾性波速度の落ち込み帯で突発湧水(0.7t/min)に遭遇
- このため、当初想定したF4断層、およびその手前の弾性波速度の落ち込み帯をめぐり、TSP探査を実施



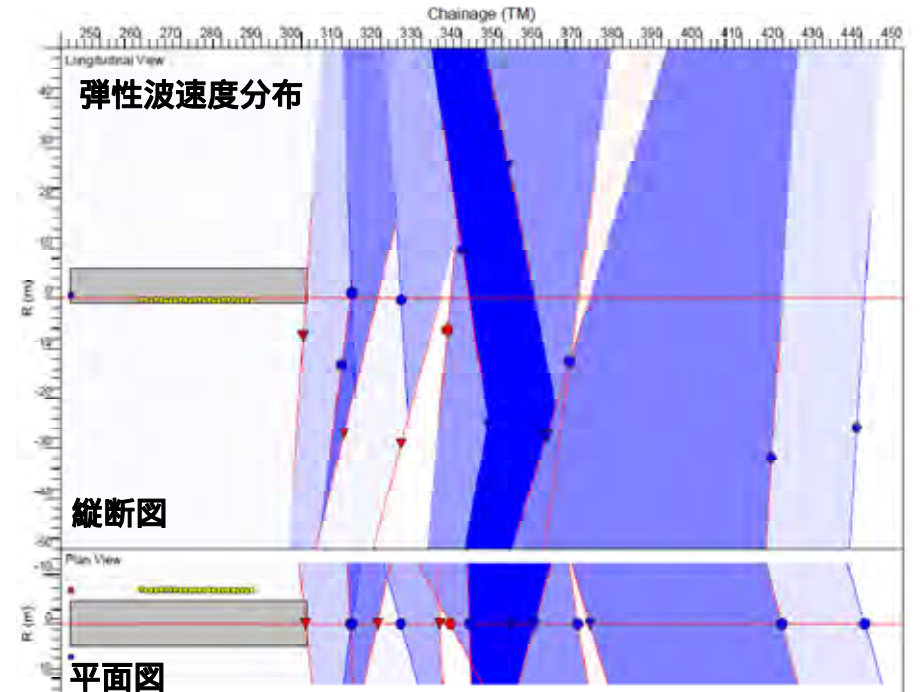
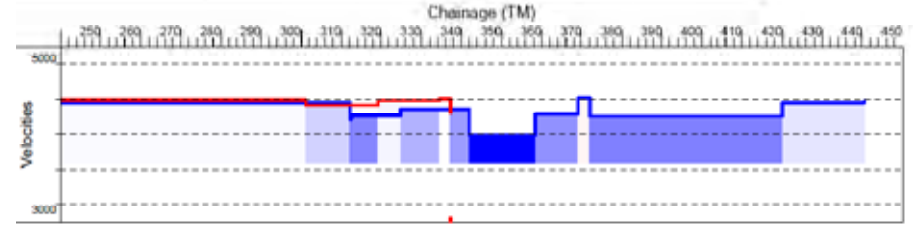
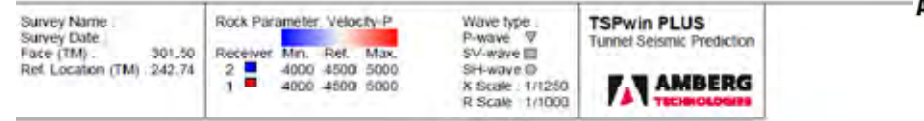
TSP探査結果



フィルタリング1



フィルタリング2



切羽前方40 ~ 60m程度でVpが低い(濃い青)領域を確認。弾性波探査における低速度部に相当。地山状況が悪い(F4断層?)可能性高し。

北 → 高速・長尺コアボーリング(アロードリル)による地質確認を実施

- 地質は付加体の砂岩・頁岩互層
- 深度30～45mのコアを表示
- ロータリーパーカッションのため、硬岩部のコアは破碎されて採取されるも、新鮮・堅硬である
- 深度42.3m付近より岩片が小さくなり、粘土の混入が認められる
- 43.7～44.7mまではほぼ粘土状の棒状コアを採取
- これらの粘土化帯は、TSPの低速度帯にほぼ相当
- そこで、粘土化帯の直前で、ジャンボによる探り削孔を実施



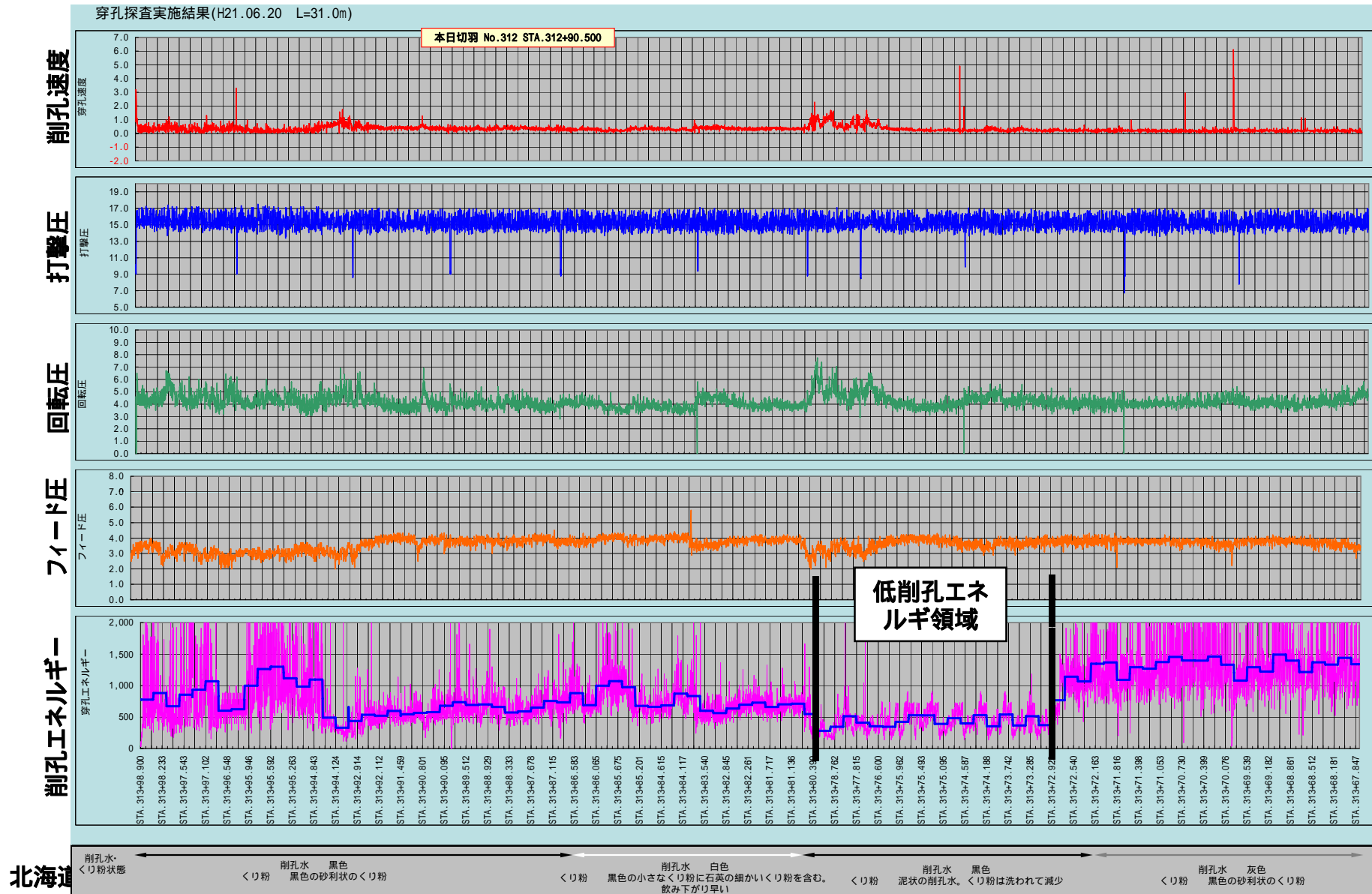
粘土化帯

アロードリルのコア状況

探り削孔探査結果

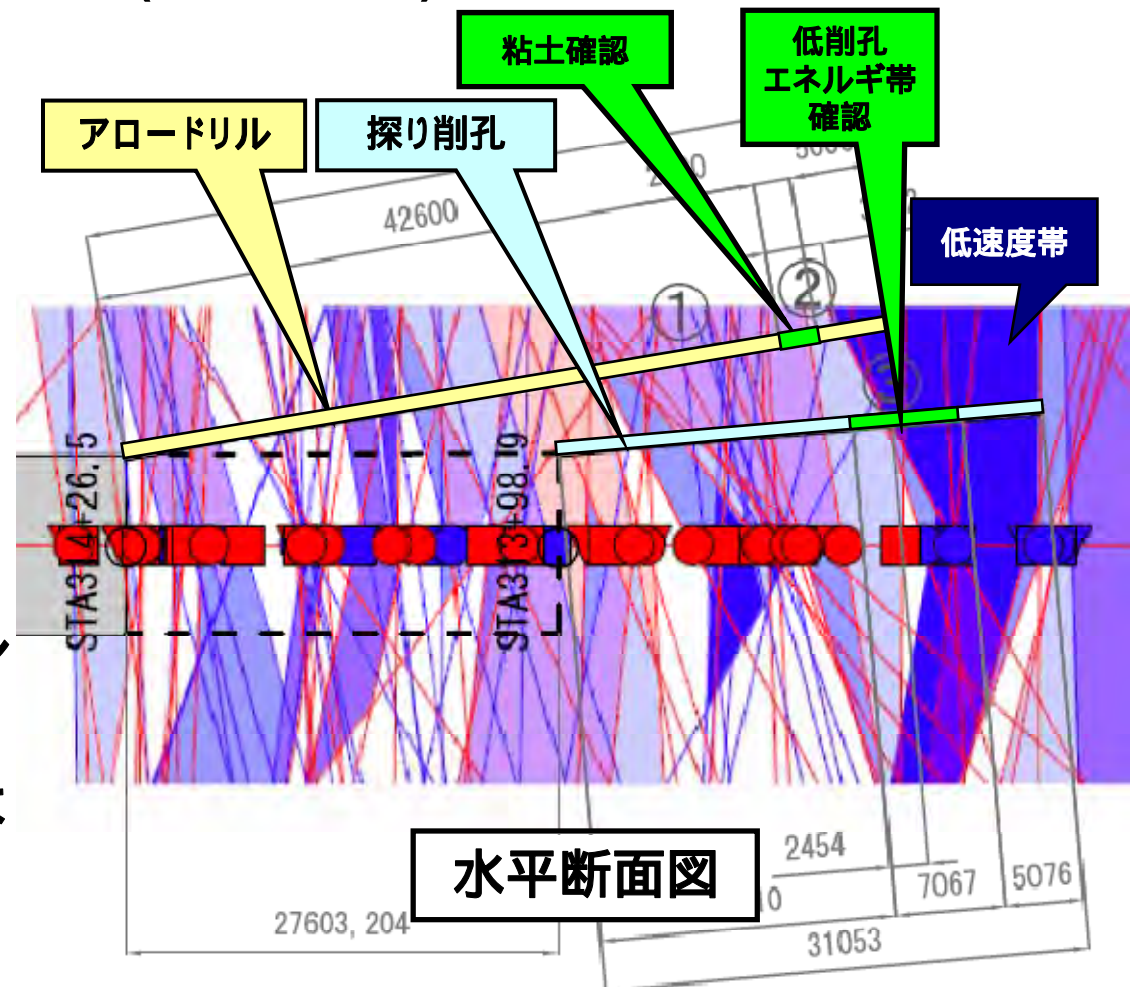


- 27.6m掘削を進めた位置で探り削孔を実施。削孔エネルギーが相対的に低い領域を前方18.4 ~ 25.4mで確認。これは、TSPの低速度帯にほぼ相当



まとめ

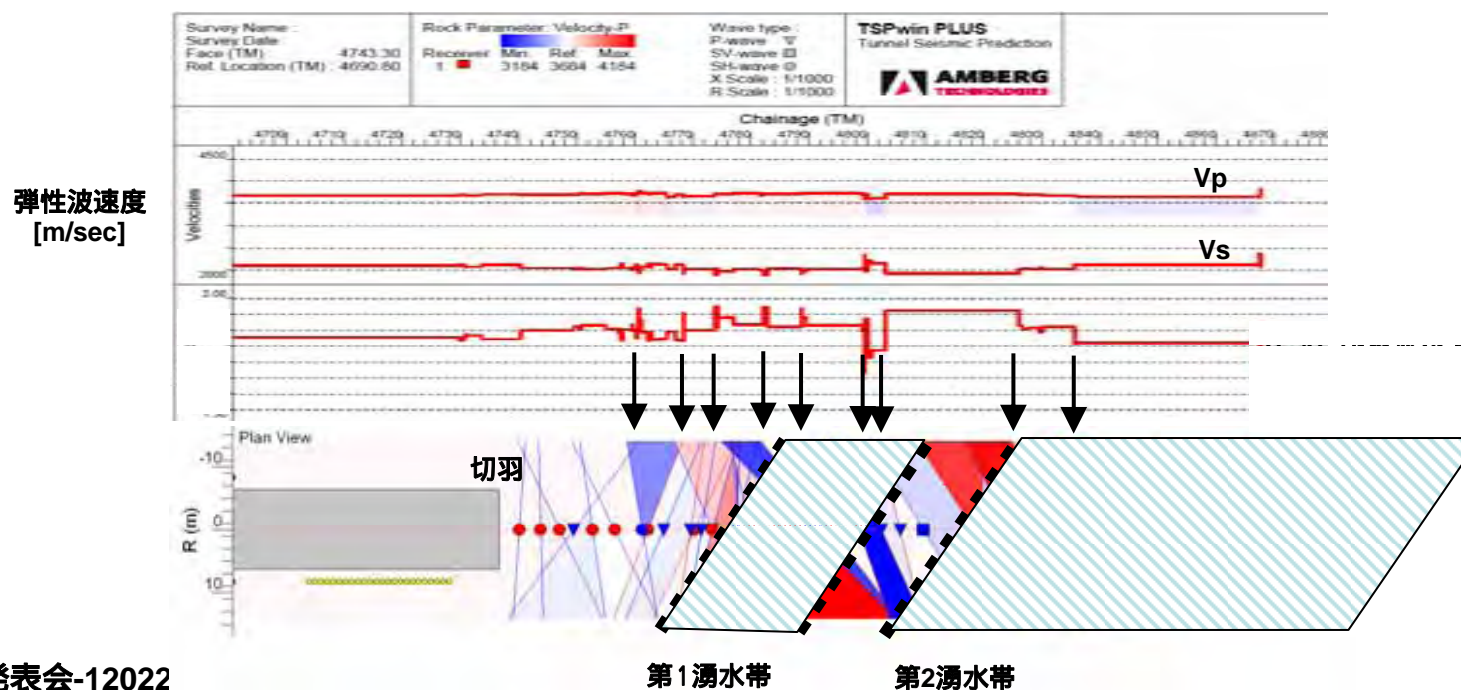
- TSP探査結果にアロードリル探査と探り削孔探査の結果を重ねて図示
- TSPによる低速度帯(濃い青の領域)に対し、アロードリルによる粘土化帯(図中緑の)は3.7m程度の誤差を持つものの、ほぼ相当する位置で確認
- 探り削孔による低削孔エネルギー領域(図中緑の)は、2.5m程度の誤差を持ち、ほぼ相当する位置で確認
- 実際の切羽でも、ほぼ相当する位置にて岩盤状況が悪い状況を確認、慎重に突破
- 今回の結果では、TSPにより約50m先の低速度帯の始まりの位置を数m程度の誤差で探査可能
- TSP探査は利便性が高く、他の探査法の採用のための1次フィルタ的な使い方は有効
- 高密度弾性波探査との組合せは特に有効



前方探査総合解析事例

Bトンネル

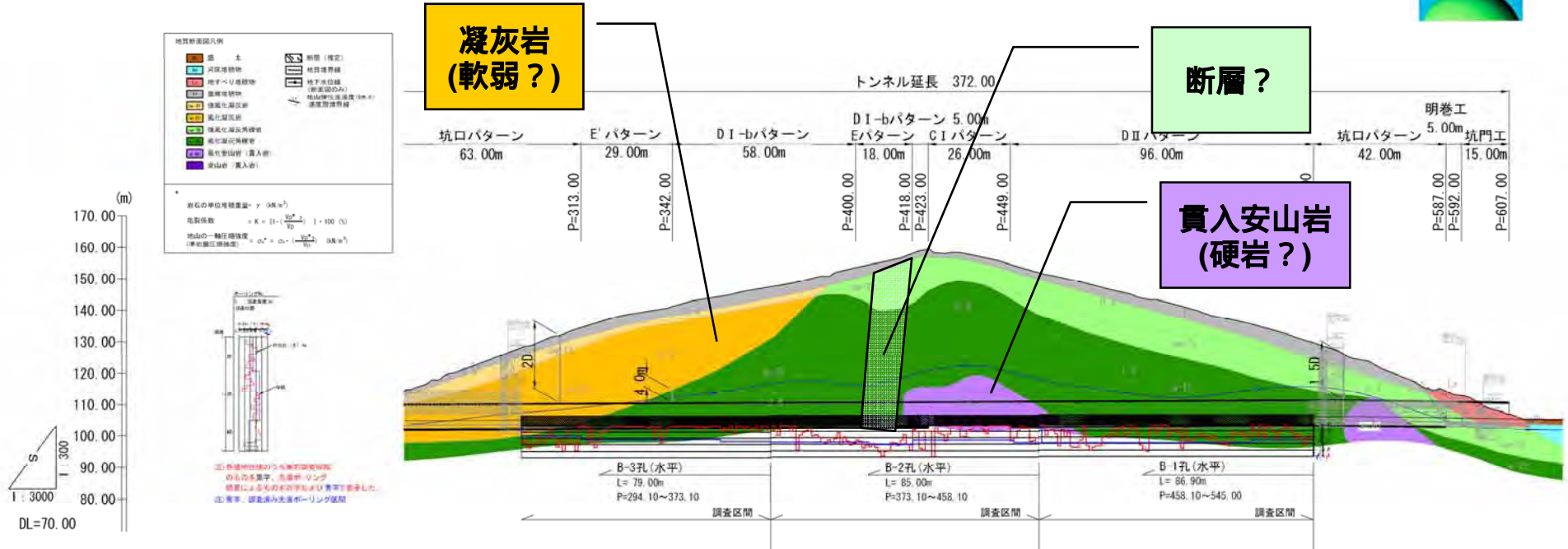
- TSP解析により湧水発生位置を推定する
- パラメータ変化が大きい点をピックアップ。図中に矢印を記した位置が該当位置
- この結果、各湧水帯の開始位置付近と変化点がほぼ整合
- 変化点と湧水位置は1:1で対応するわけではないものの、湧水発生可能性の高い位置を絞り込むことが出来る可能あり
- 本評価に従い、継続的にデータを蓄積を継続中



前方探査総合解析事例

梅川トンネル(小樽開建)

梅川トンネル前方探査 水平ボーリング×3本



地 層		新第三紀 中新世 俱知安層群 流紋岩質火砕岩・安山岩質火砕岩																			
地 質		凝灰岩		凝灰角礫岩		凝灰角礫岩・火山角礫岩		凝灰角礫岩・火山角礫岩		火山角礫岩											
土 被 り (m)		17.6	30.6	33.6	36.6	48.3	40.7			18.1											
地 山 弾 性 波 速 度	既往調査 VP [®] (km/s)	4	0.9~1.1		2.6~2.7		1.0	5.0	1.0(下半部は2.6)		1.4(下半部は2.6)	0.4 (1.4)	0.4								
	先進ボーリング VP [®] (km/s)		1.6	2.2	2.5	2.7	3.1	2.4	2.8	2.9	2.4										
孔内水平 載荷試験	既往調査 降伏圧 Py(MPa) 変形係数 D (MPa)	(sw-Tf)	Py=0.29~0.66 D=22~100		(w-Tf)		Py=6.6~14 D=570~640		(w-Tb)		Py=3.4~7.1 D=220~470		(sw-Tb)								
	先進ボーリング 降伏圧 Py(MPa) 変形係数 D (MPa)		Py=0.78~1.08 D=33~102		-		-		Py=7.30~10.6 D=674~855		-										
R. Q. D (5) (%)			0~78 (Ave. 23)	0~11 (Ave. 1)	0~26 (Ave. 8)	0~33 (Ave. 9)	8~96 (Ave. 54)	0~98 (Ave. 22)	0~84 (Ave. 34)												
室内試験	単位体積重量 γ t (kN/m ³)		γ t=15.0~16.1		-		γ t=18.0~19.1		γ t=19.2~22.5		-										
	一軸圧縮強さ σ c (MPa)		σ c=0.29~0.36		-		σ c=0.94~2.3		σ c=0.77~3.4		σ c=0.77~2.6										
掘進方向	設計		E		D I		E	C I	D II		E										
	先進ボーリング		E~B以上		D I~D II		D I~D II	C I~E	C I~D II		C I~D II										
NATM地山区分		E		D II		D I	D I	D II		D II											
測 点		SP260	SP280	SP300	SP320	SP328.601	SP340	SP460	SP470.647	SP480	SP500	SP520	SP540	SP560	SP580	SP580.647	SP585	SP595	SP600	SP605	SP620



凝灰角礫岩 (安山岩部、断層部もほぼ同様)



凝灰岩 (非常に軟質、変化位置が手前にずれる)



地形・地質の3D-CAD技術

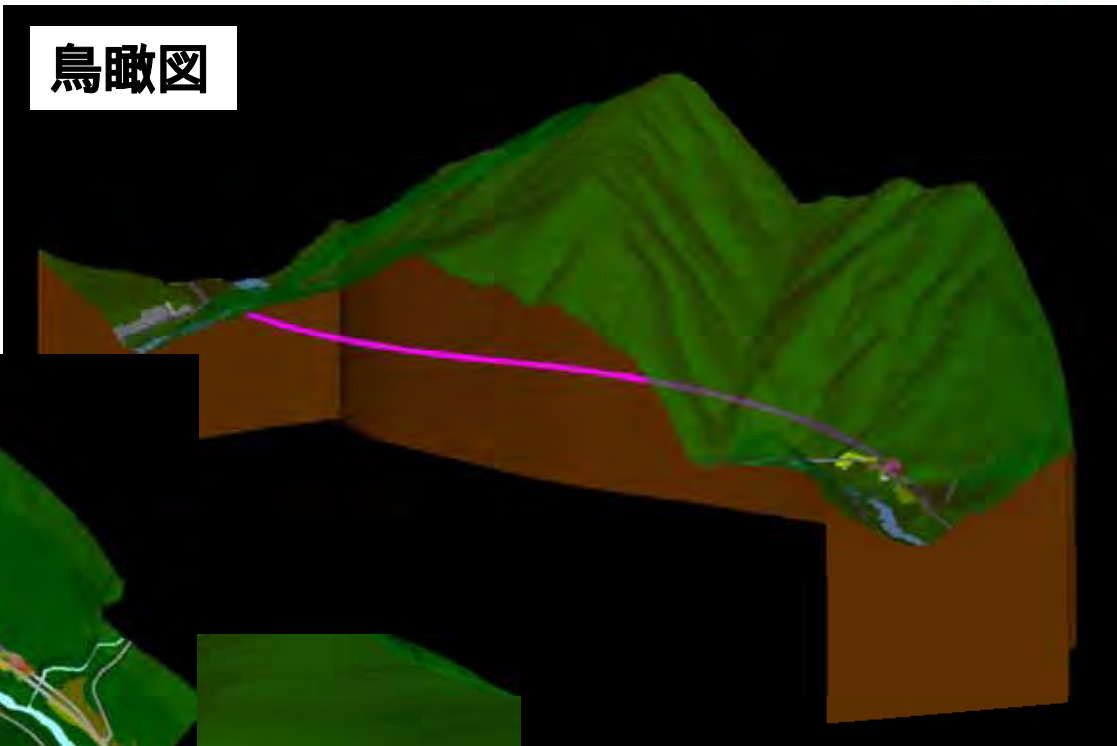


29

- 坑口部、低土被り部、および切羽前方探査において、トンネルと地形および地質との相互関係を、3次元かつビジュアルに確認し、各種の検討(地質評価、安定解析、施工計画、数量計算、等)に活かすために、3D-CAD技術を活用
- 使用ソフトは当社標準としているAutoCAD社Civil-3D
- 一度データを作成しておけば、例えば坑口付近の施工計画や、第三者へのプロジェクト説明に援用可能
- 当社の実績: 4現場

全線地形モデル 坑口施工計画に適用

鳥瞰図



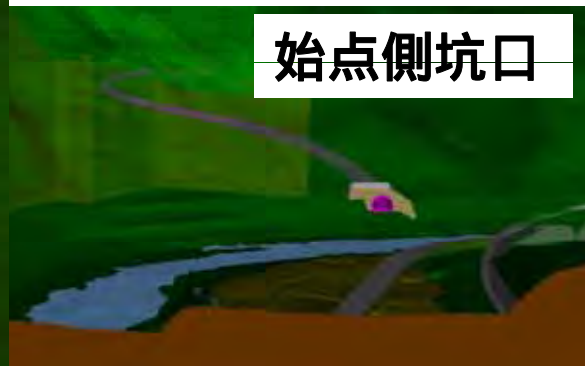
平面図



終点側坑口

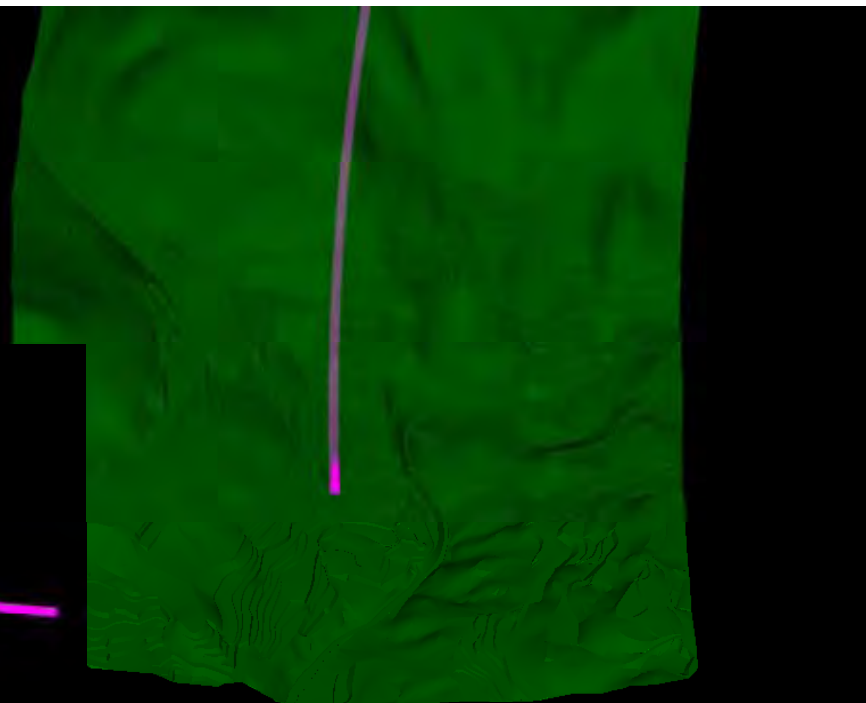


始点側坑口

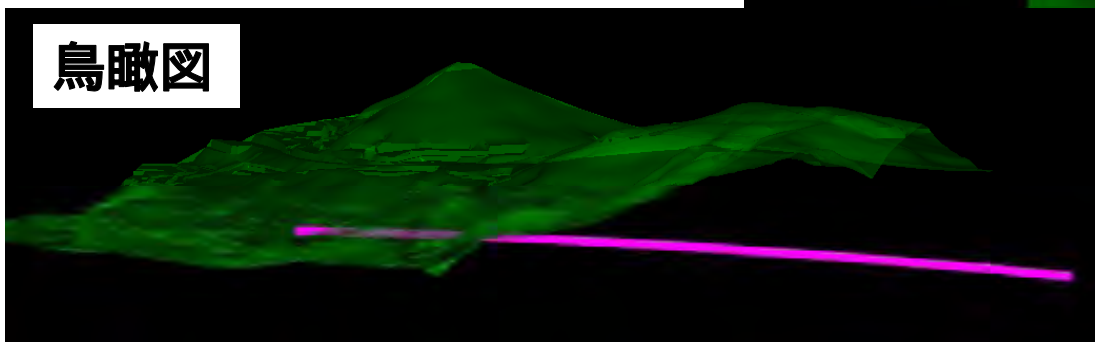


坑口部地形モデル 地すべり評価・検討に適用

平面図



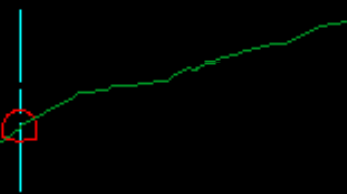
鳥瞰図



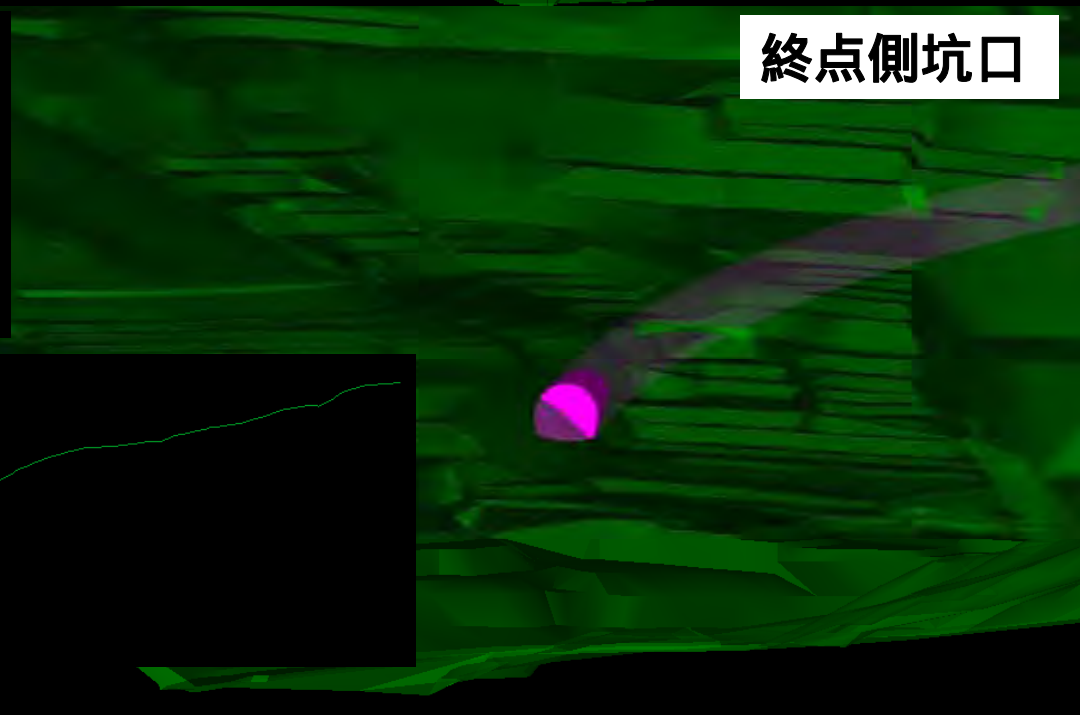
坑口直交断面

- A -

170.0
160.0
150.0
140.0
130.0
DL+120.0

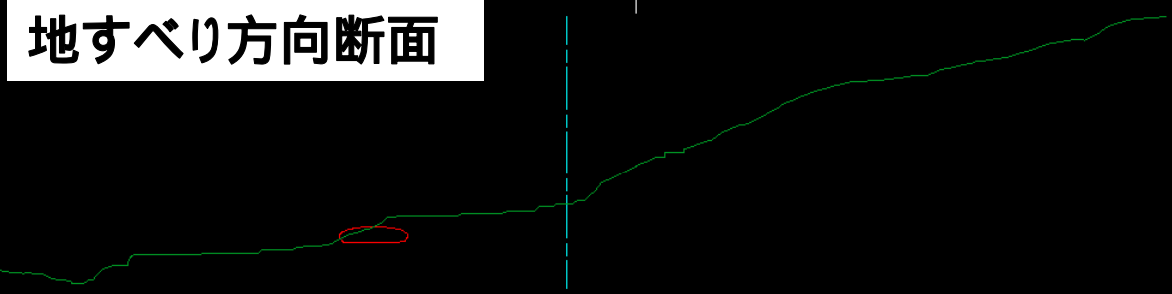


終点側坑口

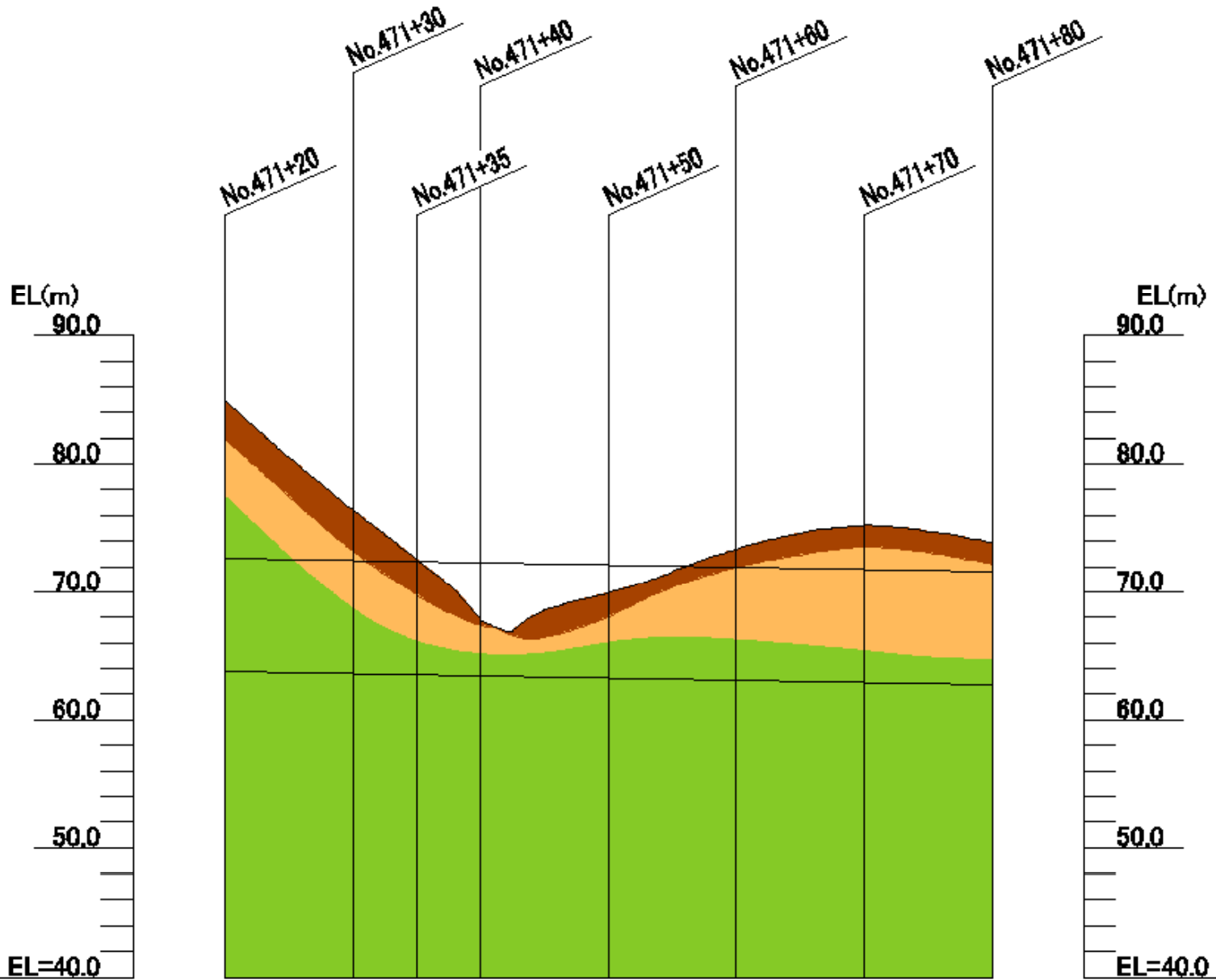


地すべり方向断面

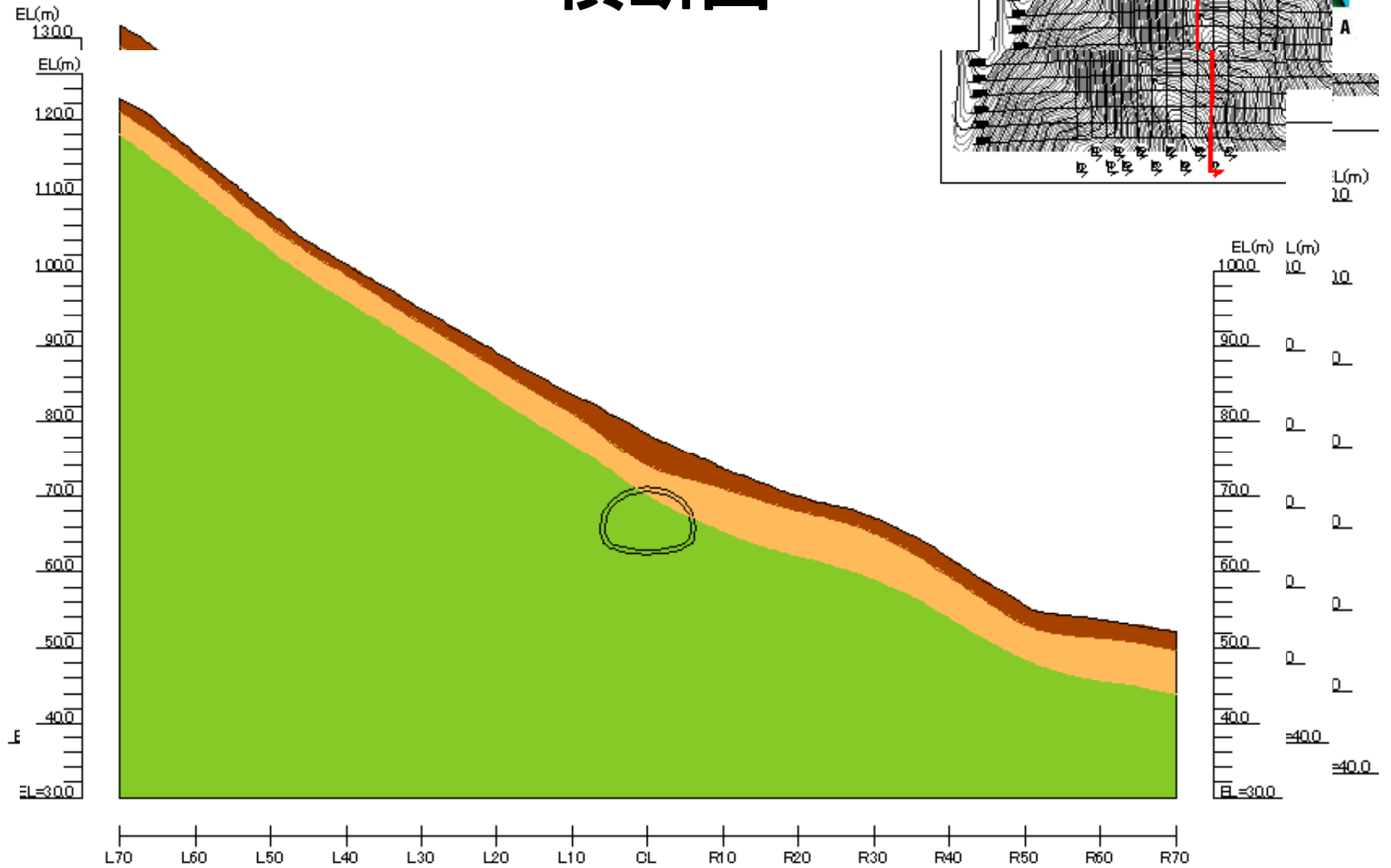
280.0
270.0
260.0
250.0
240.0
230.0
220.0
210.0
200.0
190.0
180.0
170.0
160.0
150.0
DL+10.0



縦断面図



横断図



未来から信頼される建設会社へ。



 前田建設
<http://www.maeda.co.jp>