

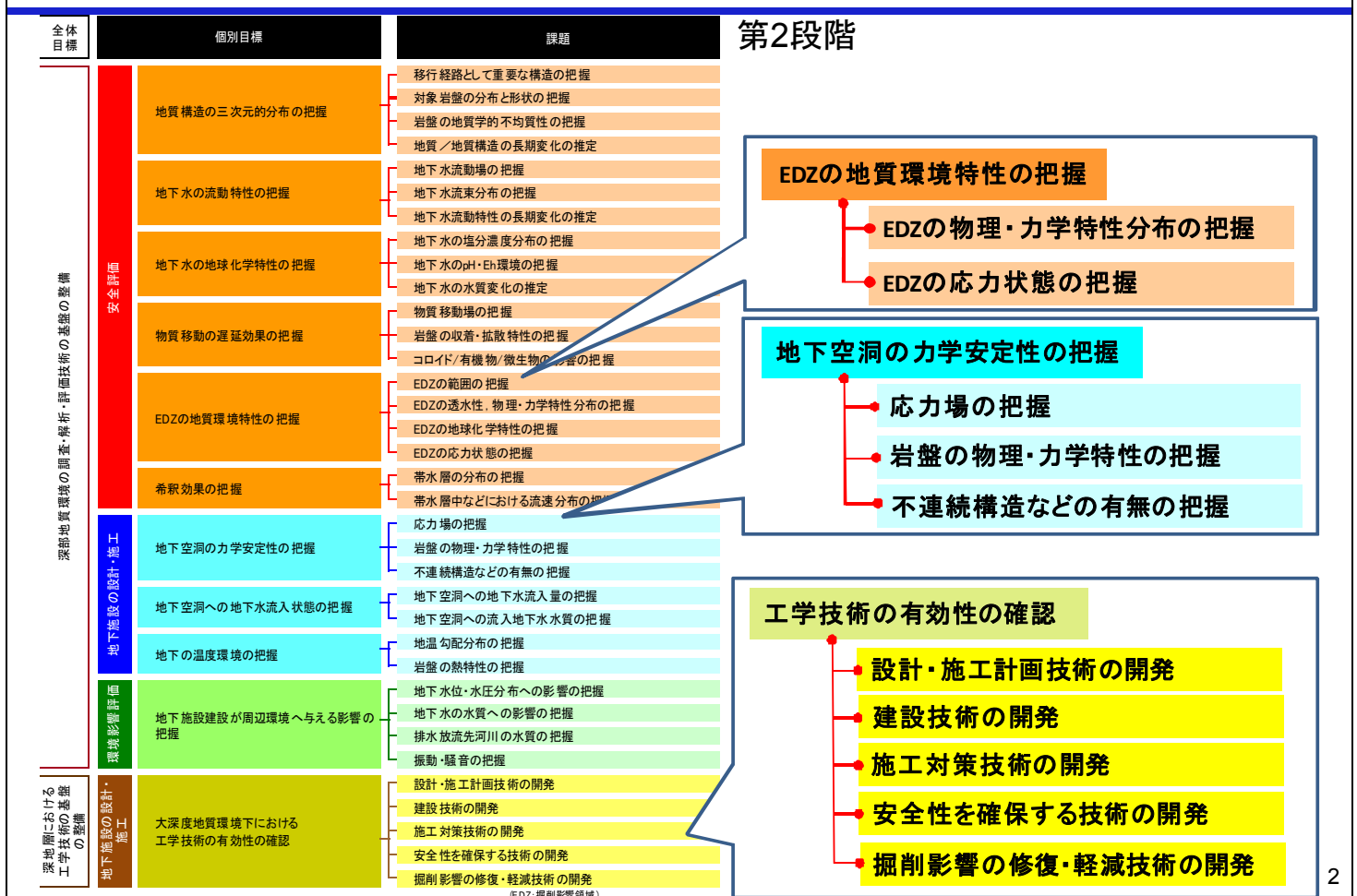
超深地層研究所計画の 第1段階の評価および第2段階の成果

4) 岩盤力学・工学技術

東濃地科学研究ユニット 結晶質岩地質環境研究グループ

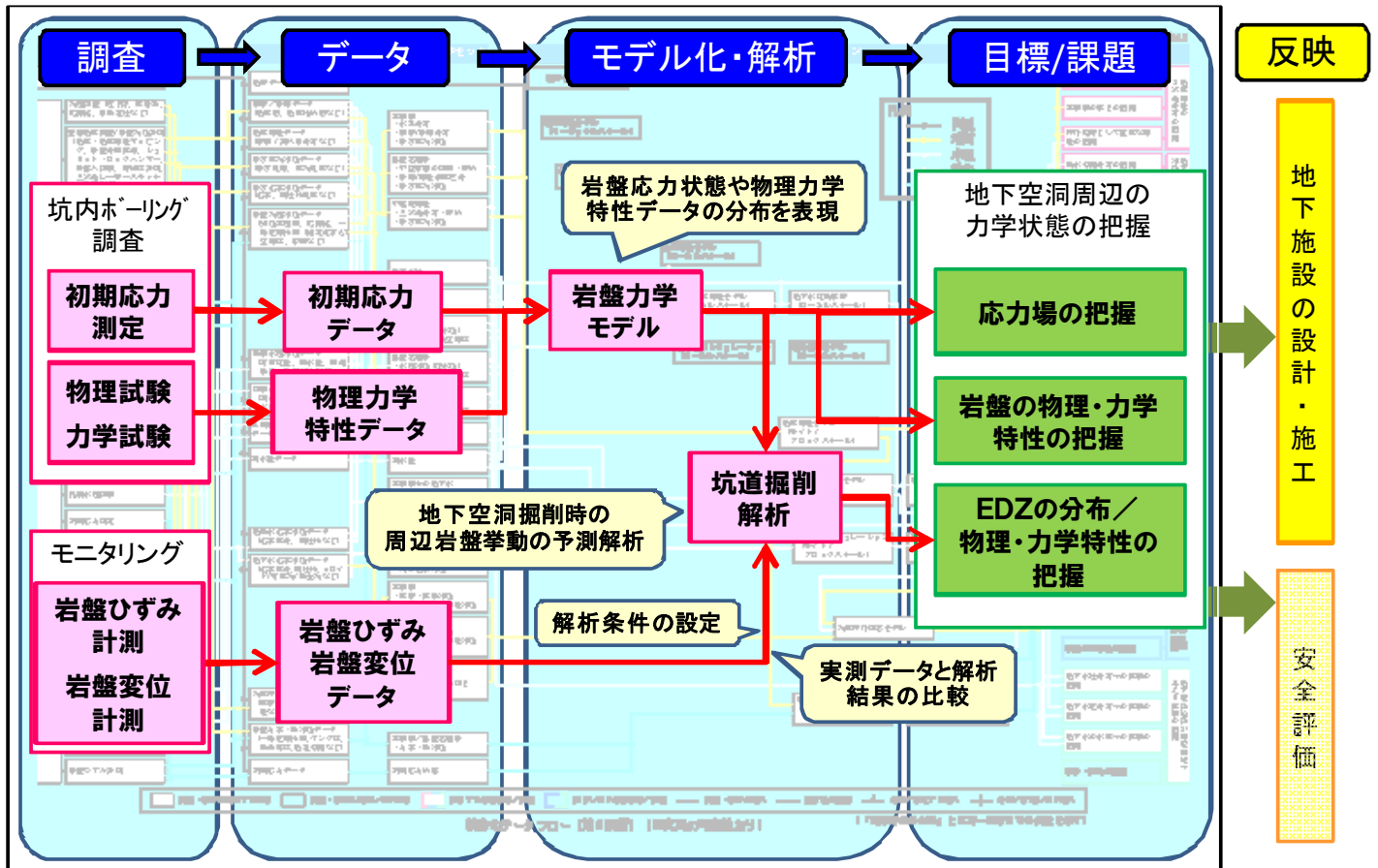
1

岩盤力学・工学技術に関わる「個別目標と課題」



2

調査・モデル化・解析の流れ（第2段階：岩盤力学）



3

第2段階の段階目標と実施内容

● 段階目標：

- 研究坑道の掘削を伴う調査・研究による岩盤力学モデルの構築（**岩盤力学**）
- 研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握（**岩盤力学**）
- 地下施設の設計・建設、操業に係る技術の有効性の評価、技術体系の整備（**工学技術**）

● 実施内容：

- 室内物理力学試験および初期応力測定
- 立坑掘削中の周辺岩盤のひずみ計測（埋設型ひずみ計・連続式挿入型傾斜計・光ファイバ式ひずみ計）
- 第1段階の調査結果に基づく等価連続体によるモデル化の妥当性の確認、第2段階の調査結果を反映した等価連続体によるモデル化と解析
- 坑道掘削中に取得された各種施工データ（岩盤等級区分、覆工・支保工や岩盤の応力、変形計測、サイクルタイム、地震動）と設計時の比較
- 適用した施工対策技術（湧水抑制対策：グラウト、地山補強）の有効性の確認

4

第1段階での初期応力測定結果

水圧破砕法

亀裂モデルシミュレーションにより、剛性の低いシステムで測定されたPrはPsとほぼ同じ値になる傾向がある (Ito and Hayashi, 1993)

世界各地で測定された結果:

亀裂再開口圧Pr≒亀裂閉口圧Ps
のケースが多い(例えば佐野, 2005)

➡ 測定システムの改良が必要

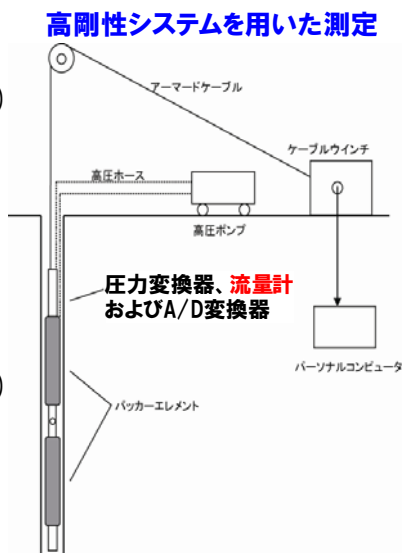
正馬様用地⇒ 従来法
(流量計を地上に設置)

- AN-1号孔
- MIU-2号孔
- MIU-3号孔

高剛性システムの適用

研究所周地
(流量計を孔内に設置)

- MIZ-1号孔



- Prの測定精度の向上
- 地圧を算出する式の見直し(数値解析により)

Pr/Psの比較

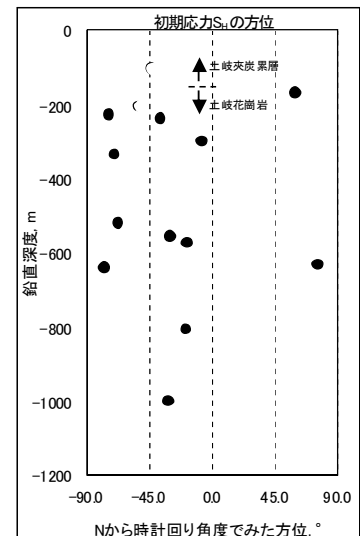
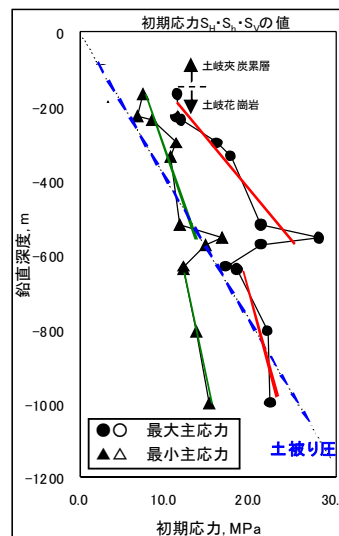
方法	孔名	Pr/Ps
従来法	AN-1	0.82
	MIU-2	0.80
	MIU-3	0.80
高剛性法	MIZ-1	0.71

SHの計算例

方法	Ps	Pr	SH
従来法	1	0.81	1.38
高剛性法	1	0.71	1.58

約14%の差

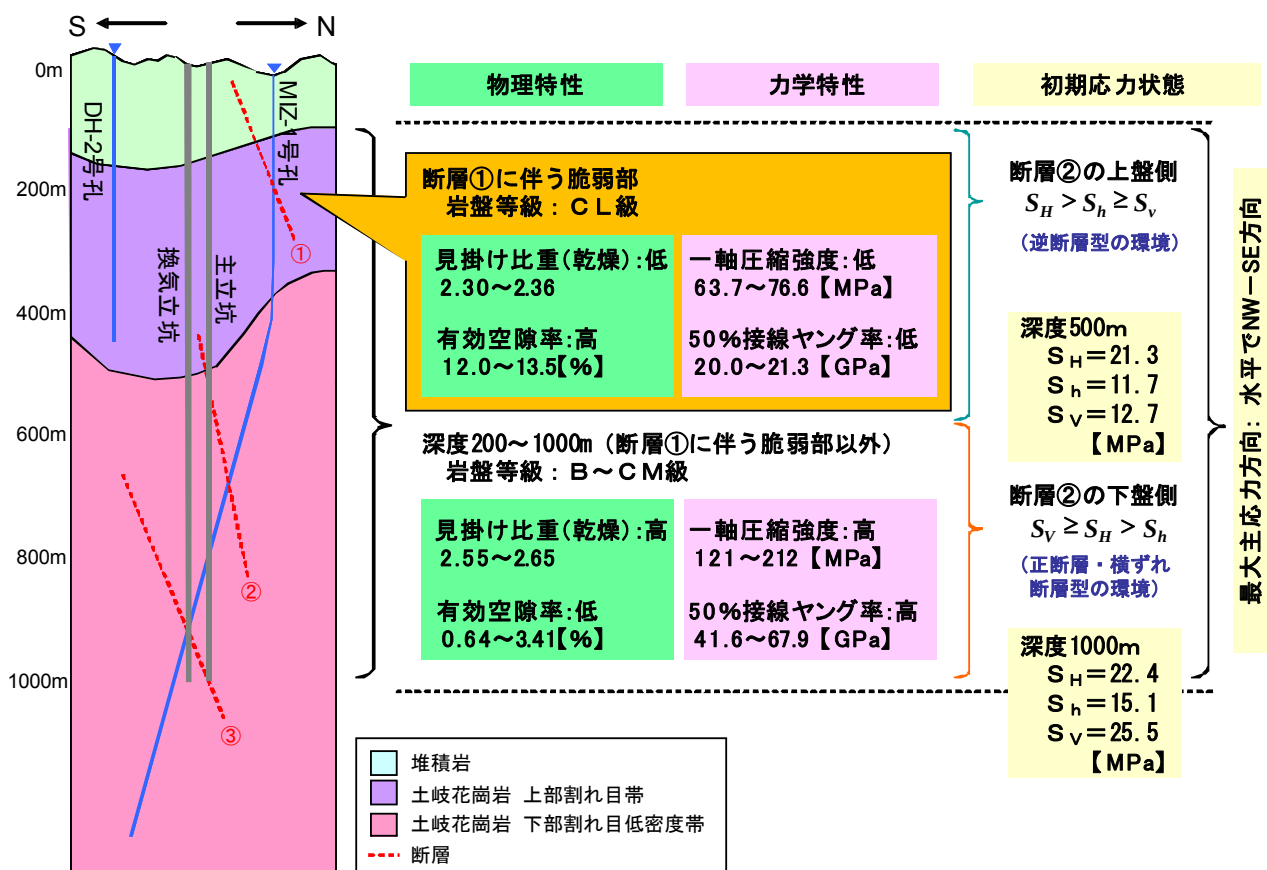
測定結果(MIZ-1号孔)



➤ 断層の上下で応力状態が変化していることを確認
(stress decoupling)

5

第1段階の岩盤力学概念モデル



※上図は概念図であり、実際の坑道はN-S断面上で本図のようには並ばない

6

第1段階での調査に基づく広域応力場の評価

広域応力場の評価

地層処分場の力学的安定性評価では構造物を含む広い領域（数kmオーダー）に対する応力状態の評価が必要

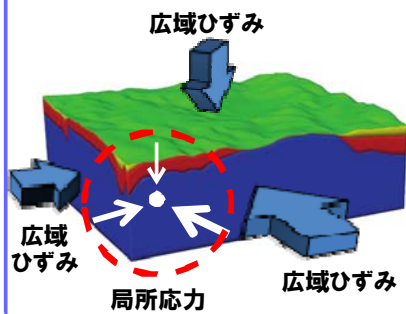
限られた測定データから広域の応力状態を解析的に評価

●評価の手順

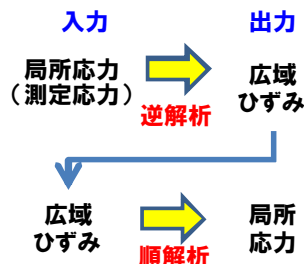
①広域応力に**水平地殻応力**を考慮する（従来は土被り圧のみを考慮）

→ 広域応力 = 重力に起因する応力 + 水平地殻応力

②広域ひずみを**境界条件**とし、局所応力を、境界に変位を与えた時に発生するある点の応力とする



③局所応力(測定応力)から**逆解析**にて広域ひずみを算出
広域ひずみから**順解析**で任意の点の応力(局所応力)を算出



●広域ひずみの算出

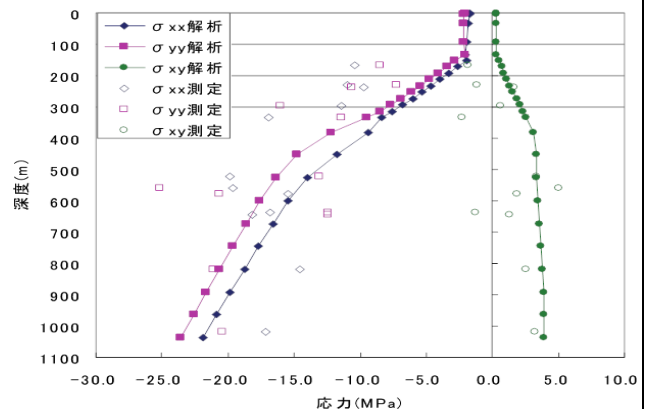
測定値を入力値として**逆解析**で**広域ひずみ**を算出

$\varepsilon_{xx}^G (\mu)$	$\varepsilon_{yy}^G (\mu)$	$\varepsilon_{xy}^G (\mu)$
351	437	546

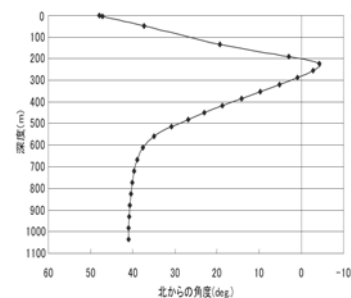
→ 境界条件としてモデルの境界に変位を与える

●局所応力の算出

広域ひずみを入力値として**順解析**で**局所応力**を算出



・主応力値: 実際の応力場に近い状態を推定



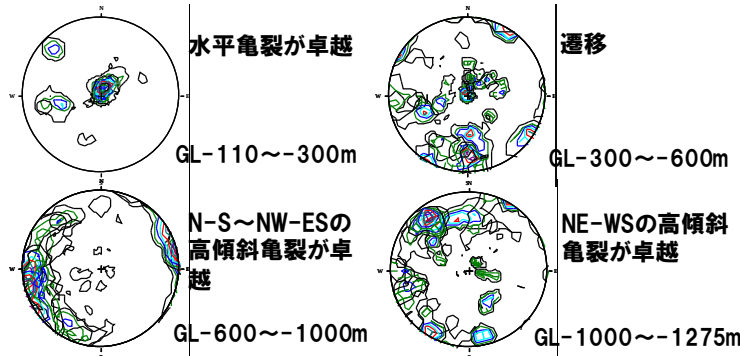
・主応力の方向: 水平面内の主応力の回転を推定

第1段階での調査結果に基づく等価連続体解析

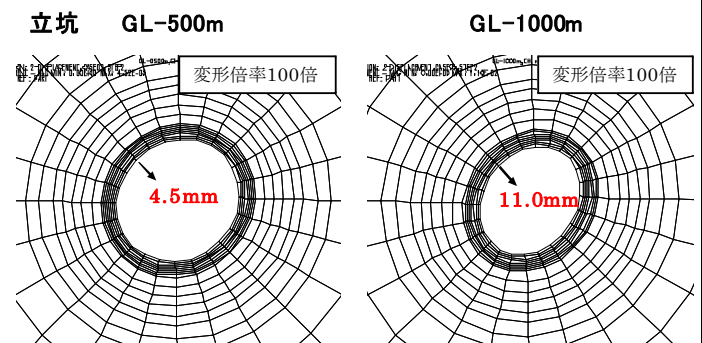
クラックテンソルモデルを用いた掘削解析

（不連続性岩盤を等価な連続体に置き換え、異方弾性体として扱うモデル）

● 割れ目の方向: BTV観察結果より4つのゾーンに区分(MIZ-1号孔)



● 変形解析結果



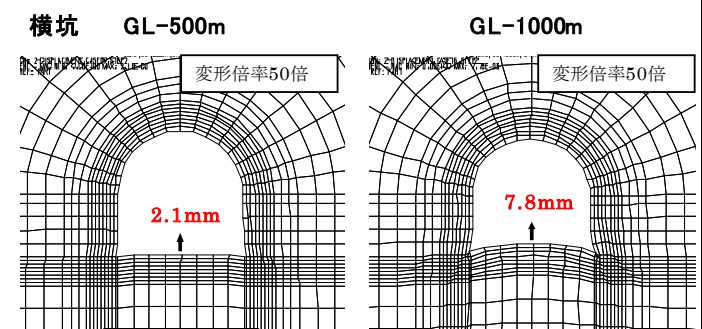
● 解析条件(基本設定)

物性値	岩盤等級	ヤング係数(GPa)	ポアソン比
	CH	55.8	0.27

初期地圧	坑道	深度	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)
立坑		GL-500m	16.5	16.5	-4.80
		GL-1000m	18.8	18.8	-3.65
横坑		GL-500m	11.7	12.7	0
		GL-1000m	15.1	25.5	0

・掘削損傷領域: 考慮する 考慮しない

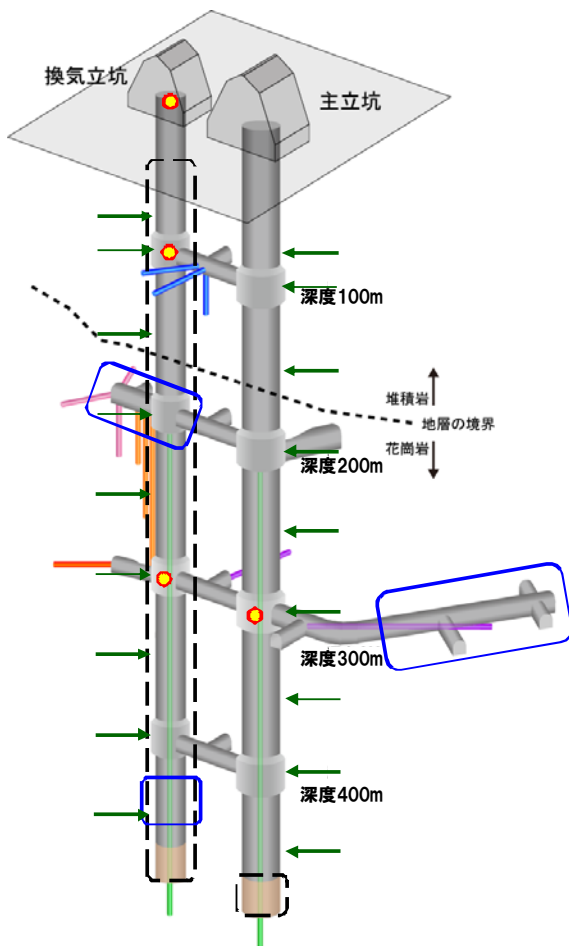
・応力解放率: 立坑: 80%、横坑: 60%



➢ GL-1000mの変位はGL-500mの2倍以上

➢ 主に亀裂特性および初期応力の違いを反映

第2段階での調査試験レイアウトと調査試験項目



- 初期応力測定、物理・力学試験
— コア法(AE/DRA法)
— 応力解放法(円錐孔底ひずみ法、孔壁ひずみ法)
— 水圧破碎法
- 初期応力測定、物理・力学試験
— コア法(DSCA法)
— 応力解放法(円錐孔底ひずみ法)
- 先行変位・ひずみ計測
— ひずみ計
— 傾斜計
- パイロットボーリング
- コアを用いた応力測定(H22実施)
— DSCA法
— 多面体供試体を用いた弾性波測定
- 初期応力測定(H23実施予定)
— 応力解放法(円錐孔底ひずみ法)
- 掘削スリを用いた物理・力学試験
- プレグラウト
- 地震計
- 地中変位・支保工応力測定
- 平成21年度までの掘削範囲
- 平成22年度の掘削予定範囲

9

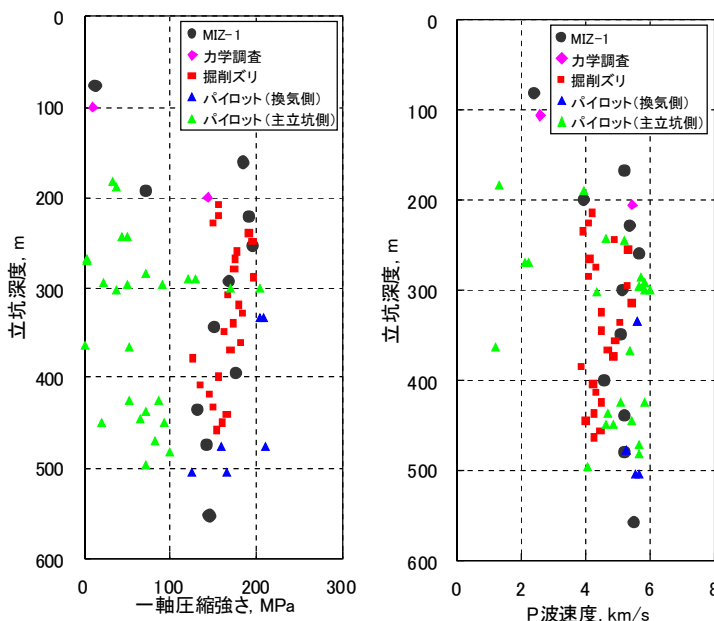
第2段階での岩盤物性試験

○第1段階と第2段階の調査結果の比較

第1段階: MIZ-1号孔における岩盤力学調査

第2段階: 100m、200m岩盤力学ボーリング調査

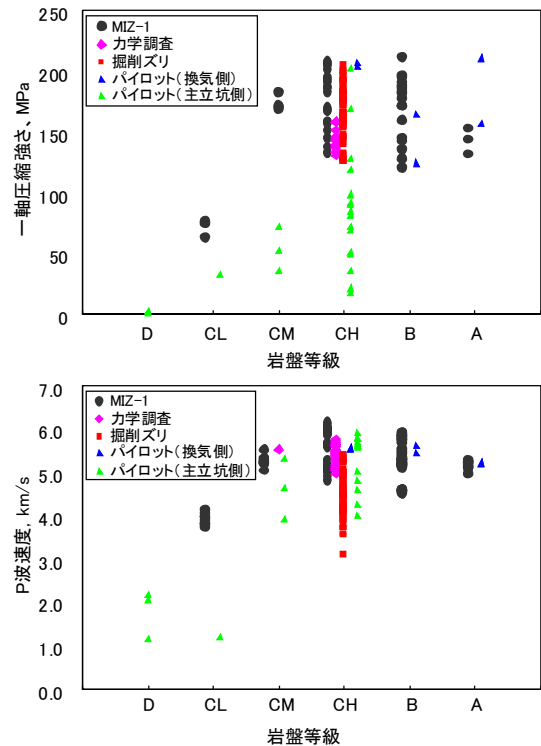
パイロットボーリング(換気立坑、主立坑)、掘削スリ(換気立坑)



深度ごとの岩盤物性値

- ✓換気立坑側: 深度方向の岩盤物性値は概ね一致
- ✓主立坑側: 第1段階では断層による影響を捉えていない

○岩盤物性値と岩盤等級の比較



岩盤等級ごとの岩盤物性値(花崗岩)

- ✓D~CH級までは岩級に応じて物性値が増加
- ✓CH~A級の物性値はほぼ同等

10

第2段階での初期応力測定

応力解放法(円錐孔底ひずみ法)

湧水に対応した装置の改良

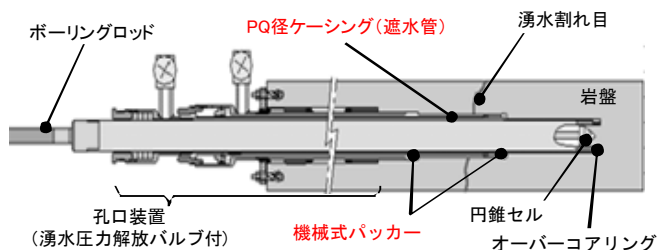
従来の方法

- ・ひずみゲージと岩盤面との接着が不良となる
- ・ひずみ計の貼り付け治具を挿入する作業が困難
- ・何度もロッドの出し入れを行う必要があり、測定に時間を要す



上記の課題を克服するために使用した装置

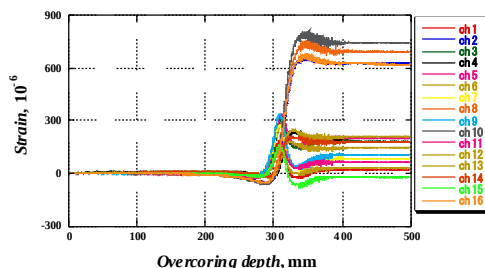
遮水管(PQケーシング)およびワイヤーラインを併用した測定
⇒大量湧水対策および掘削作業の軽減



円錐孔底ひずみ法による地圧測定の適用の拡大

- ・多量の湧水地点
- ・深部岩盤

● 測定結果

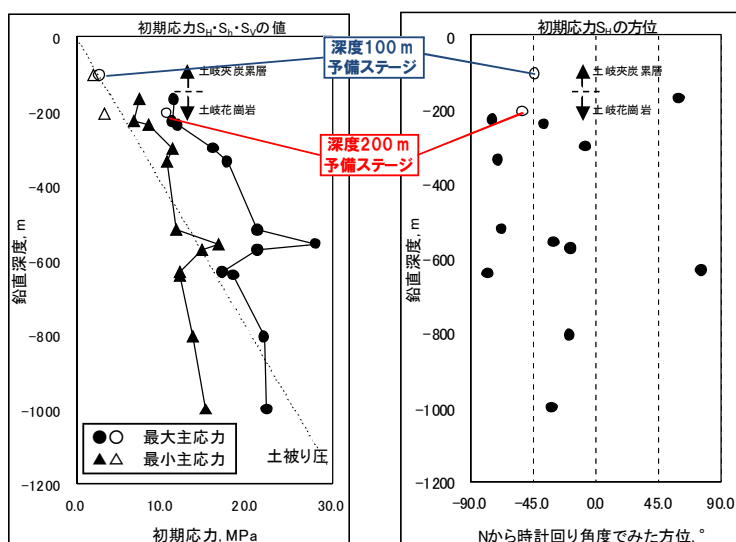


理論解で示されている挙動



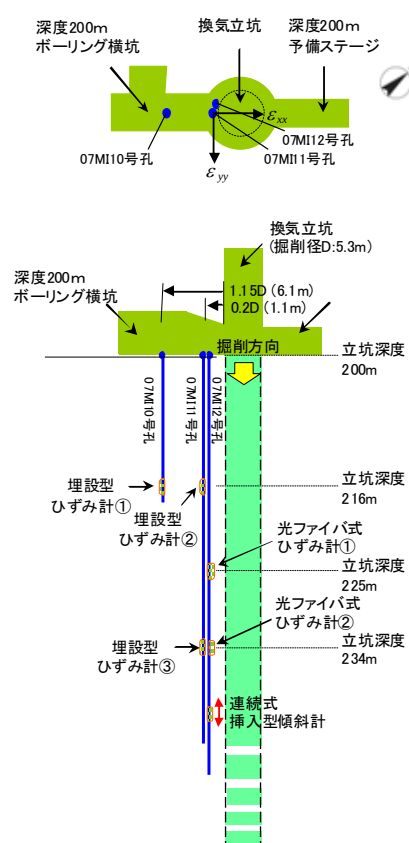
測定が精度よく行われている

● 第1段階との比較

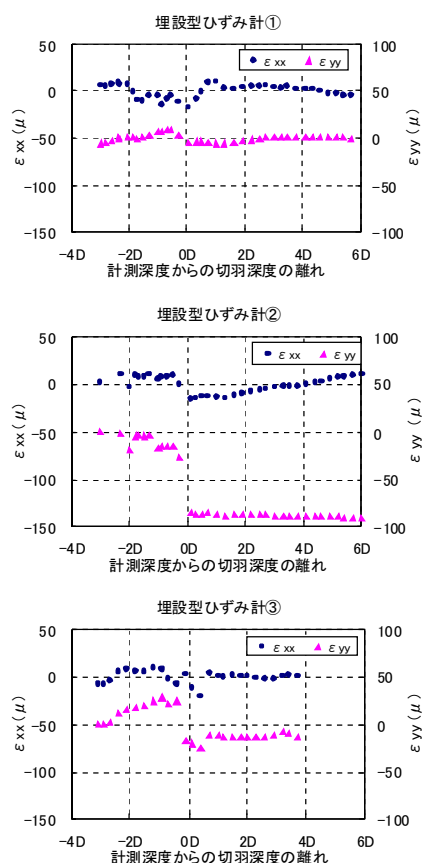


11

立坑掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動の把握



立坑ひずみ計測レイアウト



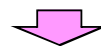
埋設型ひずみ計計測結果

弾性理論値と計測値の比較

立坑壁面との水平距離		埋設型	
		ひずみ計① 1.2D	ひずみ計②③ 0.2D
測定深度 (GL.-m)			
216	理論値	$\epsilon_{xx} = 7 \mu$ $\epsilon_{yy} = -15 \mu$	$\epsilon_{xx} = 68 \mu$ $\epsilon_{yy} = -117 \mu$
	計測値	$\epsilon_{xx} = -26 \mu$ $\epsilon_{yy} = -10 \mu$	$\epsilon_{xx} = -18 \mu$ $\epsilon_{yy} = -68 \mu$
234	理論値		$\epsilon_{xx} = 73 \mu$ $\epsilon_{yy} = -127 \mu$
	計測値		$\epsilon_{xx} = -23 \mu$ $\epsilon_{yy} = -39 \mu$

(D:換気立坑掘削径 5.3m)

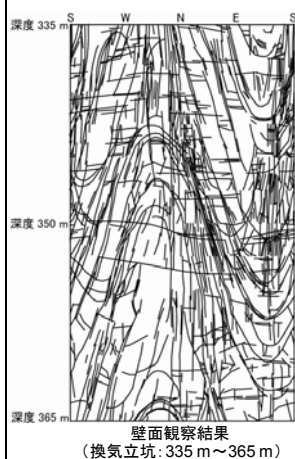
- 立坑側壁から0.2Dの位置(水平断面内)では
- ・弾性的な挙動を確認
 - ・ひずみ量が限界ひずみより十分小さい



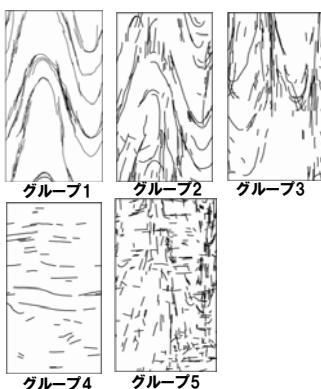
- ✓ 発破や応力集中による掘削損傷は0.2Dより狭い範囲
- ✓ 覆工直前の応力解放率は8~10割
- ✓ 立坑設計時の応力解放率の設定は概ね妥当(過小評価はしていない)

12

第2段階での調査結果に基づく等価連続体解析

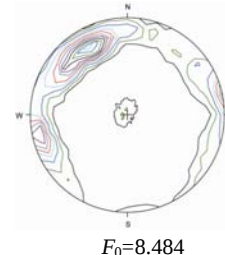


割れ目をグループ分けし、クラックテンソルを算定

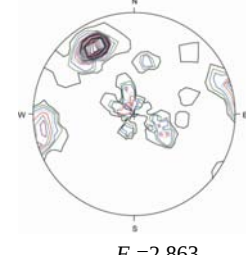


第1段階で得られたクラックテンソルと第2段階の比較

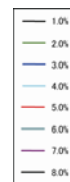
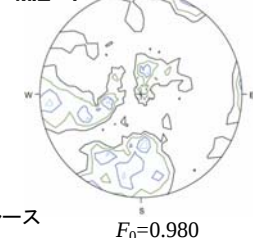
壁面観察



パイロットボーリング



MIZ-1



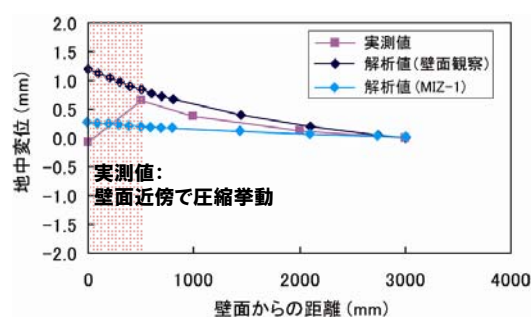
F₀:クラックテンソルのトレース

クラックテンソルのトレース:

MIZ-1 < パイロットボーリング < 壁面観察

✓各グループで解析結果を比較

⇒NE走向の高角な割れ目(グループ1)の影響が大きい



解析結果の比較

- ✓ 第1段階の調査では、不連続面の影響を過小に評価してしまう可能性
- ✓ 覆工のモデリングに課題
- ✓ パイロットボーリングの実施がベター

✓第2段階のモデルは、第1段階のモデルより実測値に近い

✓第1,2段階ともに壁面近傍の圧縮挙動を表現できていない

13

第1段階/第2段階における岩盤力学モデルの比較

比較項目	比較結果		相違点の主な要因	実際に適用した調査解析項目		相違点の解決が必要な場合に有効と考えられる調査解析項目*	
				第1段階	第2段階	第1段階	第2,3段階
岩盤の物理・力学特性の把握	共通点	・B～CM級岩盤の物性値	—	・コアを用いた室内物理力学試験	・コア、掘削ズリを用いた室内物理力学試験	—	—
	相違点	・D級岩盤(主立坑断層)の物性値	・断層部のコアの未採取	—	・断層部のコアを用いた室内物理力学試験	【調査プログラムの工夫】 ・立坑掘削位置での岩盤等級に対応した物性値の取得(パイロットボーリング調査) ・幅広い岩盤等級に対応した物性値の取得 ・検層データ(P波速度)からの物性値の推定(供試体が作成できない場合)	【調査プログラムの工夫】 ・壁面観察結果を用いた定量的岩盤分類評価(現在実施中)
応力場の把握	共通点	・主応力値と方位	—	・ボーリング孔を利用した水圧破碎試験(補完情報としてコア法も実施)	・坑道内からのボーリング孔を利用した応力解放法による応力評価(補完情報としてコア法も実施)	—	—

*相違点の重要度を、「性能評価」と「地下施設の設計・施工」の観点から評価し、その重要度に応じて「やらなければならないこと」、「やる必要のないこと」を分類していく方針

14

第1段階/第2段階における岩盤力学モデルの比較

比較項目	比較結果	相違点の 主な要因	実際に適用した調査解析項目		相違点の解決が必要な場合に有効と考えられる 調査解析項目*	
			第1段階	第2段階	第1段階	第2,3段階
EDZの分布／物理・力学特性の把握	共通点	・周辺岩盤の弾性挙動	・等価連続体解析(クラックテンソル・仮想割れ目モデル, MBC)	・周辺岩盤におけるひずみ計測	—	—
	相違点	・地中変位 ・クラックテンソル量(き裂長) ・評価対象スケールの相違?(現在検討中)		・地中変位計測 ・壁面観察結果を用い算出したクラックテンソルを用いた等価連続体解析	【調査プログラムの工夫】 ・評価対象スケールを考慮したき裂長さの適切な推定	【調査プログラムの工夫】 ・REV(代表要素体積)の算定?(現在検討中)

*相違点の重要度を、「性能評価」と「地下施設の設計・施工」の観点から評価し、その重要度に応じて「やらなければならないこと」、「やる必要のないこと」を分類していく方針

15

工学技術（施工対策技術：地山安定化対策）

主立坑の掘削領域

- ・粘土変質を伴った脆弱な花崗岩
- ・坑道掘削面の**自立性が低い領域**に対しては安定性の向上が必要

⇒掘削サイクルの中で**ボルトによる補強**と**地山改良(シリカレジン注入)**により安定性を向上

(深度152m～318m、394m～416mの掘削領域における変質部を対象に実施)



花崗岩礫の抜け落ち箇所
(深度147m付近、奥行き最大約1.2m)

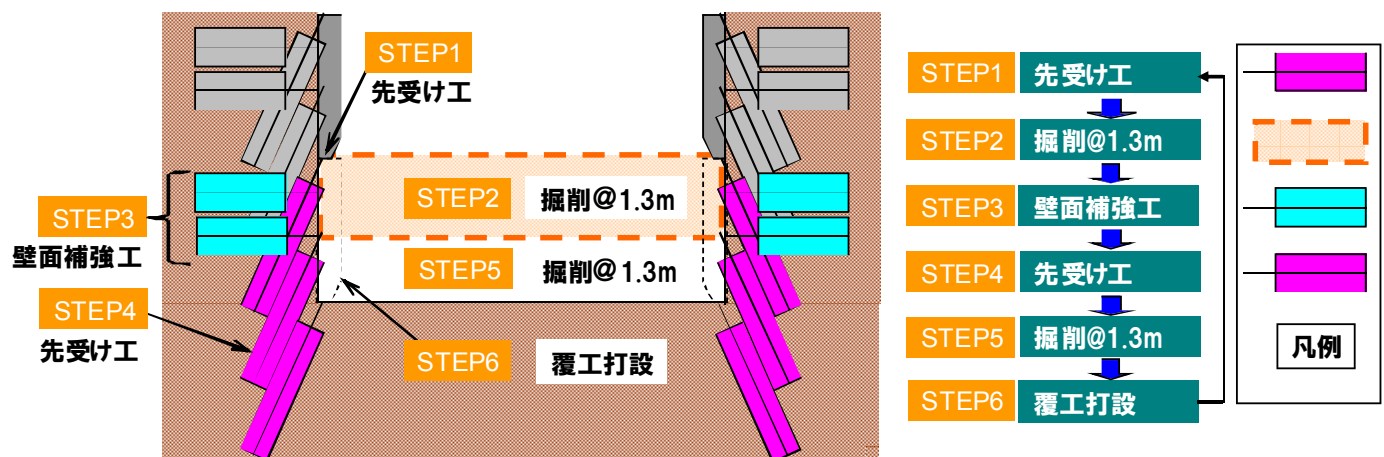
対策工	案1「覆工スパン長の低減」	案2「NATM支保」	案3「地山補強注入工」	案4「止水&地山補強注入工」
概要図				
長所	素掘り時間が短い分だけ崩落発生時間を遅延できる	掘削後速やかに施工するため崩落の進行を抑制できる	事前地山改良により崩落を抑制できる(先受け工)	・事前地山改良により崩落を抑制できる ・同時に止水効果も期待できる
短所	崩落の直接的な抑制効果は小さい	事前の実施が困難	注入材のリークが懸念	・注入材のリークが懸念 ・湧水量が少ない場合は過大となる

地山補強注入工(シリカレジン注入:ウレタン系材料)

- ・**先受け工**(まだ掘削していない領域に対する補強)と**壁面補強工**の組合せ
- ・地山改良:注入材の短時間での固結
- ・ボルトによる補強と注入材の発泡による**周辺地山の締付け、縫付け効果**

16

工学技術（施工対策技術：地山安定化対策）



先受け工
(FRPボルト)



- ・断層、変質部付近の小規模な肌落ち以外に大きな崩落は無く、自立性が改善
- ・ボルト補強とシリカレジン発泡による周辺地山の締付け効果、縫付け効果
- ・ボルト補強(以下のパターンを標準として、断層、変質部を対象に実施)
先受け工: FRPボルト (L=3m@0.6m×22本)
壁面補強工: IFボルト (L=2m@1m×35本)

17

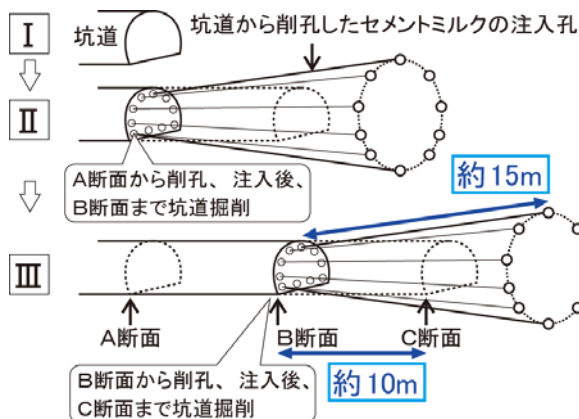
工学技術（湧水抑制対策）: 深度300m研究アクセス坑道

【湧水状況】

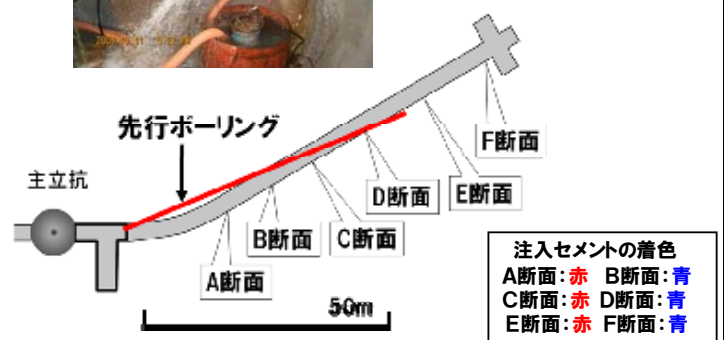
- ・湧水量: 1000ℓ/min 以上(先行ボーリング時)
- ・透水性: 10~100ルジオン= $10^{-6} \sim 10^{-5}$ m/secオーダー

【グラウト施工計画】

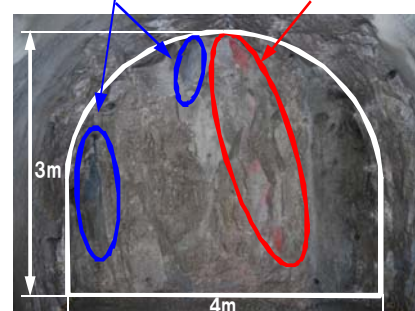
- ・改良範囲: 3m
- ・改良透水係数: 2ルジオン= 2.5×10^{-7} m/sec
- ・注入材: 普通セメント



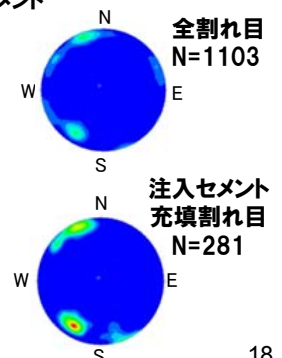
先行ボーリング時の湧水
(約1000ℓ/min)



B断面から注入したセメント A断面から注入したセメント



坑道切羽(B断面とC断面の間)



【対策の結果】

- ・坑道掘削後の総湧水量: 100ℓ/分

18

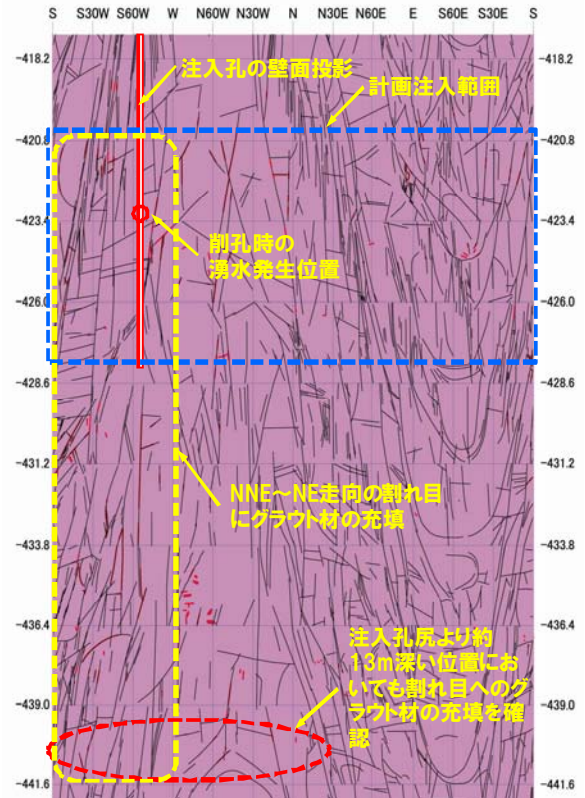
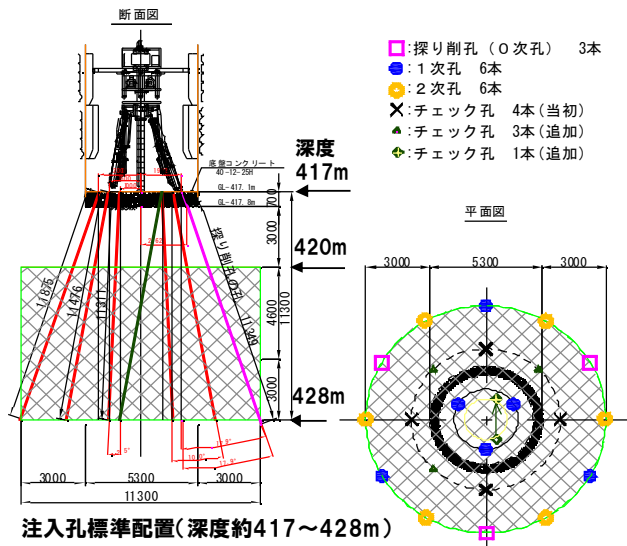
工学技術（湧水抑制対策）：換気立坑420m

【湧水状況】

- ・湧水量：最大54ℓ/min
- ・透水性：1～10ルジオン=10⁻⁷～10⁻⁶m/secオーダー

【グラウト施工計画】

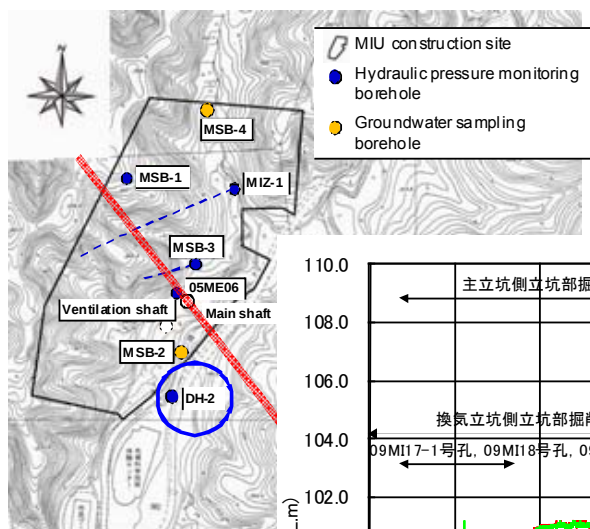
- ・改良範囲：3 m
- ・改良透水系数：0.2ルジオン=2.5 × 10⁻⁸ m/sec
- ・注入材：超微粒子セメント
 - 浸透性に優れた超微粒子セメントを使用
 - 探り孔・注入孔に傾斜角を持たせて、割れ目遭遇率を向上



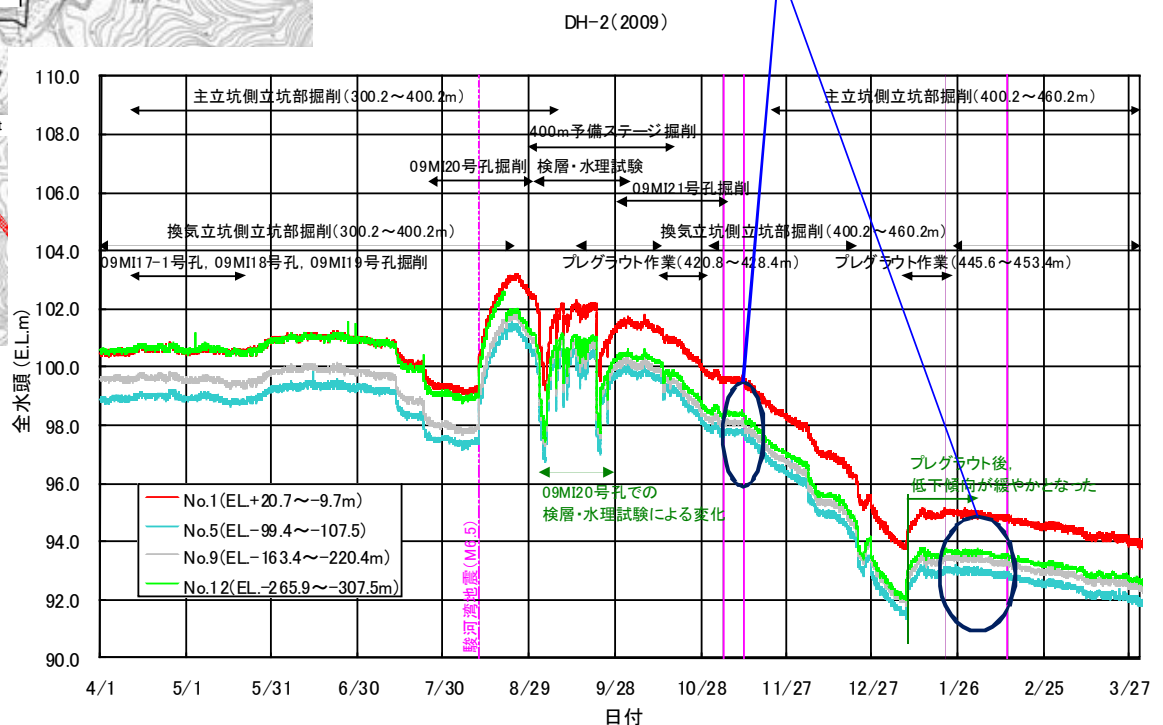
グラウト注入範囲の立坑壁面観察結果

19

工学技術（湧水抑制対策）：グラウトの効果



プレグラウト区間の掘削中に、
周辺観測孔で大きな水圧変動は生じていない



20

工学技術（山はねに関する事例調査）

【調査対象】

- ✓国内立坑19本 立坑深度396～1222m
(鉱山立坑17本、トンネル立坑2本)

【崩壊・変状事例】

- ✓一般部:7立坑8事例 深度365～766m
- ✓接続部:4立坑4事例 深度550～920m
- ※鉱山立坑では接続位置を地山良好部に変更することが多いため事例が少ない

【事例内容】

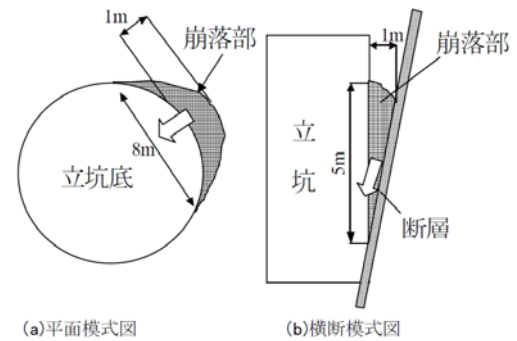
一般部

- ✓高抜け 4件
- ✓覆工コンクリートのひび割れや破損 4件

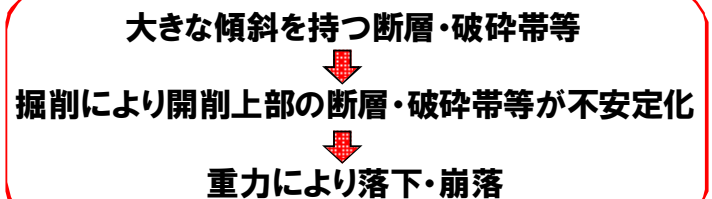
接続部

- ✓高抜け 1件
- ✓覆工コンクリートのひび割れや破損 1件
- ✓支保工の変状 1件
- ✓吸水による岩の劣化 1件

【高抜けのメカニズム】



高抜け事例模式図



文献: 櫻井春輔, 清水則一, 芥川真一, 吉田秀典, 佐藤稔紀, 山地宏志(2006): “国内超大深度立坑工事の地山崩壊形態から見た崩壊発生機構に関する考察”, 土木学会論文集F, Vol.62, No.4, 662-673

21

まとめ（工学技術）

- 主立坑断層部(岩盤等級:D級)の掘削において、地山安定化対策を実施。ボルト補強とレジン注入により自立性を改善
- 湧水抑制対策として、超微粒子セメントにより、普通ポルトランドセメントで止水が困難な1Lu程度までの低透水性岩盤を改良できることを確認
- 山はねに関する文献調査を実施し、山はね(高抜け)のメカニズムを検討

22