

物理探査手法による深部岩盤における 掘削損傷領域の評価に関する調査・研究

Investigation and study on excavation damage zone using geophysical prospecting methods in deep rock-mass

田中達也¹⁾・松井裕哉²⁾・玉井昭雄³⁾・杉原弘造²⁾・河村秀紀¹⁾

Tatsuya TANAKA, Hiroya MATSUI, Akio TAMAI, Kozo SUGIHARA and Hideki KAWAMURA

Excavation of underground opening causes a disturbance to the rock around the opening. The damage and re-distributed stress caused by excavation work are supposed to be mainly the fracturing in the vicinity of opening. The damage probably changes the mechanical and hydrogeological properties in the surrounding rock. The degree and extent of the damaged zone is important for the reasonable and safe design, excavation and support of the opening. Seismic refraction survey, P-wave well-logging, Radar reflection survey and ultrasonic well-logging have been carried out to estimate the degree and extent of damaged zone and examine the applicability of these techniques in the newly excavated drifts in the Kamaishi mine. The extent and physical property changes of the damaged zone in the drift excavated by two different methods have been clearly detected by seismic refraction survey.

Key Words : deep underground, geophysical prospecting methods

1. はじめに

地下深部の岩盤内に空洞を構築する際、掘削の衝撃や再配分応力による岩盤の破壊、既存亀裂の開口、新規亀裂の発生などにより、空洞周辺岩盤には物理的な損傷を受けた領域（以下、掘削損傷領域）が形成される。この掘削損傷領域は岩盤の水理・力学的特性の変化等をもたらすことが予想され、その物性変化の範囲・程度の把握および評価は、合理的かつ安全な空洞の設計・施工における重要な要件となると考えられる。

動力炉・核燃料開発事業団（現：核燃料サイクル開発機構）は、岩手県釜石鉱山内の坑道を利用し、平成5年度から平成9年度の5年間にわたり「掘削影響領域の評価に関する研究」などの原位置試験を実施した¹⁾。掘削損傷領域の評価に関する調査・試験は、その研究の一環として、以下の3つの目的から実施された²⁾。

- ①掘削損傷領域の範囲と物性変化の程度の把握
- ②掘削損傷の工法依存性の把握
- ③掘削損傷領域の発生メカニズムの理解

本報告は、上記の3つの目的の主に①、②を対象とし、新たに掘削した坑道周辺で実施した各種物理探査の結果と、各種調査手法の掘削損傷領域評価に対する適用性について示すものである。

2. 研究サイトの地質特性と研究坑道のレイアウト

本調査・研究は、釜石鉱山内の海拔250mレベルの坑道（土被り約730m）を利用して実施した。250mレベル坑道の配置と周辺の地質概要を図-1に示す。研究サイトは、栗橋花崗閃緑岩体内に位置し、既存の

1) 正会員 (株)大林組 土木技術本部設計第2部
2) 正会員 動力炉・核燃料開発事業団 (現：核燃料サイクル開発機構)
3) 正会員 (株)大林組 土木技術本部技術第2部

坑道から掘削された計測坑道と試験坑道の2本の坑道からなる。研究サイト内で実施されたボーリングから採取した岩石の室内試験により求めた、平均的な岩石物性値を表-1に示す。坑道周辺での割れ目観察結果より、研究サイト内には、N25° E系、N85° W系、N20° W系のいずれも75~85度の高傾斜の割れ目系が卓越している。特にN85° W系の割れ目は、数十m以上の連続性があり、5mm以上の方解石等の充填及び熱水変質を伴い、本研究サイトの岩盤の力学・水理学的特性に大きな影響を及ぼすことが予想された。研究サイトの初期応力の評価結果は図-2に示すとおりである³⁾。

表-1 岩石物性値(平均値)

単位体積重量 (gf/cm ³)	有効間隙率 (%)	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	一軸圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
2.76	0.51	5.81	3.25	151.85	64.28	0.24



図-1 研究サイトの地質概要

坑道のレイアウトを
図-3に示す。計測坑道は、幅3.0m×高さ2.5mの矩形断面で全長30mである。計測坑道は試験坑道掘削時の調査のために掘削されたものである。合わ

図-2 初期応力結果(下半球投影)

せて、計測坑道掘削時には、後に行われた試験坑道掘削時の各種調査・試験手法の予備的検討を行った⁴⁾。試験坑道は幅3.5m・高さ3.5mの馬蹄形断面で全長約38mである。坑口部から19m地点までを普通発破工法、19m地点から奥をスムーズプラスティング工法で掘削した。両発破工法の発破データを表-2に示す。

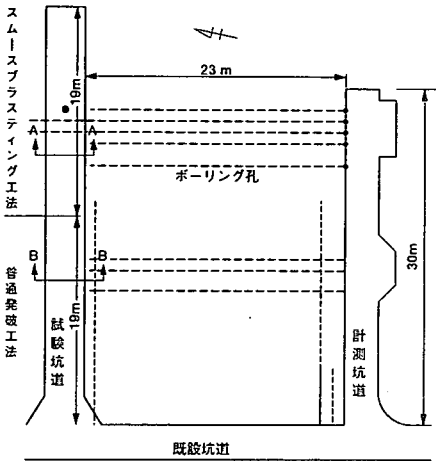
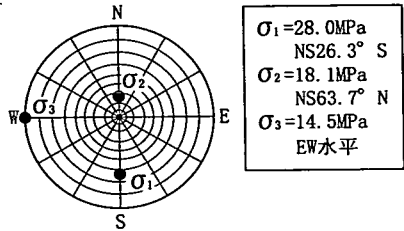


図-3 研究坑道のレイアウト

表-2 発破データ

	普通発破	スムーズプラスティング
周辺孔間隔(m)	0.8	0.4
周辺孔装薬量(kg/m)	1.00	0.35
装薬総量(kg)	37 (3.4kg/m ³)	45 (4.4kg/m ³)

3. 適用した物理探査手法

試験坑道を対象とした掘削損傷領域の調査に適用した手法は、試験坑道壁面での弾性波屈折法とレーダ反射法、および試験坑道壁面から掘削したボーリング孔を利用して実施したP波検層と超音波検層である。各種手法の調査内容について以下に示す。

(1)弾性波屈折法

試験坑道周辺の掘削損傷領域の3次元的な把握を目的として、試験坑道軸方向に6測線(天盤,右アーチ,左右側部,底盤)を展開した(図-4)。測線長は試験坑道坑口部の拡幅区間(約5m)を除き、坑口から5.6mの地点から切羽近傍の37.6mの地点までの32mである。起振点間隔および受振器の配置を図-5に示す。計測坑道で実施した予備調査では、起振点間隔を6m、受振器の間隔を50cmとしたが、試験坑道においては、より詳細な調査のため起振点間隔を3m、受振器の間隔を25cm(起振点前後1m)とした。なお、受

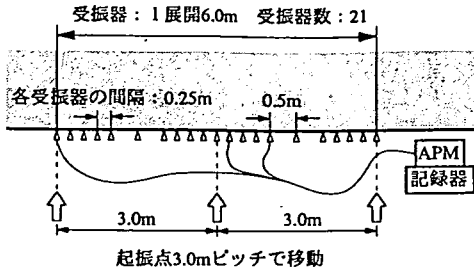


図-5 測定方法と配置

振器（固有振動数 28Hz）、増幅器は全ての測定に同一のシステムを用いた。また、測定結果の解析はハギトリ法により行った。

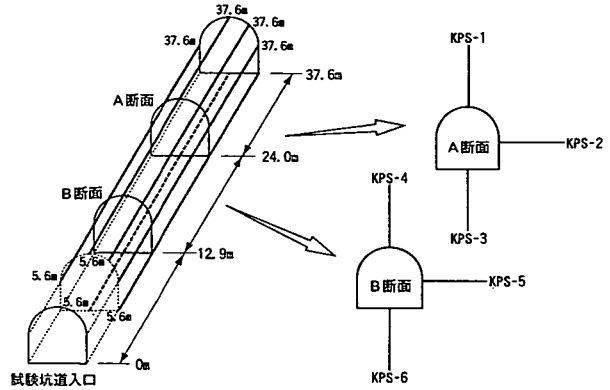


図-4 弾性波屈折法の測線

図-6 P波検層実施孔配置

(2) P波検層

本手法は、異なる発破工法で掘削した坑道部分に配置された2断面において、試験坑道から放射状に掘削された3方向(鉛直上下、水平)のボーリング孔(孔長 3.5m)を利用して実施した(図-6)。起振はシュミットハンマーによる壁面強打により行い、受振はボアホール・アーム式圧着方式の圧電型加速度センサー(固有周波数 40kHz)を用いた。

表-3 計測システム等の改良点(P波検層)

項目/段階	予備調査(I)	予備調査(II)	試験坑道調査
受振機器	ボアホール・アーム式 動コイル型 (固有周波数 28Hz)	3軸圧電型加速度センサ- (固有周波数 20kHz)	3軸圧電型加速度センサ- (固有周波数 20kHz)
発振方法	小ハンマー-起振	シュミットハンマー-起振	シュミットハンマー-起振
波形記録器	50 μ sec (20kHz) のサンプリング	40 μ sec (25kHz) のサンプリング	10 μ sec (100kHz) のサンプリング
ジオメトリ	20~25cm 間隔のビックアップ配置	25cm 間隔のビックアップ配置	20cm 間隔のビックアップ配置

計測は孔口から 0.2m ピッチで実施した。本手法においても計測坑道で予備調査が行われ、表-3に示すような測定システム、ジオメトリ等の段階的な改良、変更が加えられている。

(3) レーダ反射法

レーダ反射法は、弾性波屈折法を展開した測線のうち試験坑道右側側部(32m 区間)と、P波検層を実施したA、Bの2断面の坑道全周を測線として実施した。レーダ探査システムの概念図を図-7に示す。レーダ反射法が、弾性波を利用した手法と異なる点は、高周波数の波(1GHz 対応アンテナを使用)を信号源として利用していることから、軽微な計測システムで反射波の情報が取得でき、短時間で計測・評価が可能なことである。

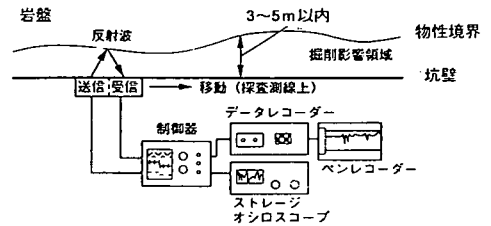


図-7 レーダ反射法測定概念図

(4) 超音波検層

本手法は、ボーリング孔内に挿入したソナードから超音波を発振し、孔壁沿いに岩盤中を走行した超音波を同一のソナードで捉え、得られた波形を分析することにより、各測定区間毎の割れ目の発達や風化の程度などの地質的解釈を行うものである⁵⁾。測定に用いた超音波パルス測定ソナードは開発段階であり、本調査は今後の改良点等の課題抽出を目的として実施した。センサーの概念図を

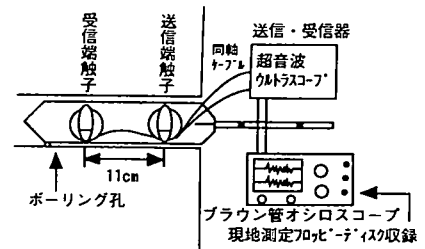


図-8 超音波検層測定概念図

図-8に示す。発振および受振探触子の間隔は11cmである。測定はP波検層を行ったKPS-2孔で、10cm間隔で実施した。

4. 調査結果と手法の適用性

(1) 弾性波屈折法

結果の一例として試験坑道右側側部の解析結果を図-9に示す。図中の横軸は試験坑道坑口からの距離を、縦軸は坑道壁面からの深度を示している。解析は3層構造を仮定して算出されており、母岩となる第3層(Vp=6.0km)までの速度低下領域が2層の小割構造で評価されている。

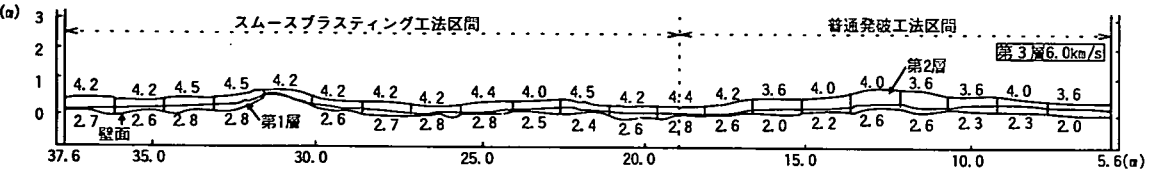


図-9 弾性波屈折法調査結果（右側側部）

スムーズブラスティング工法区間（以下SB区間）であるA断面、普通発破工法区間（以下CB区間）であるB断面での6測線の解析結果を図-10に示す。図中の数字は、速度低下領域となる2層の幅(cm)と弾性波速度(カッコ内表示 km/s)を示している。表-4に両区間の各測線の弾性波速度および速度低下領域の範囲の平均値を示す。図表より、SB区間はCB区間と比較して、弾性波速度の低下の程度、速度低下領域の範囲とも小さい結果となっていることがわかる。本調査結果により、掘削損傷領域の程度・範囲やその工法依存性が定量的に把握された。また、同時に同手法の掘削損傷領域調査に対する有効性も示されたと考え

る。坑道天盤測線での測定区間13.6m～19.6mの走時曲線と解析結果を図-11に示す。図中右側には同一区間の波形記録を予備調査時のジオメトリ(受振点間隔:50cm,起振点間隔:6.0m)で解析した結果を示している。予備調査ケースでは速度低下領域が1層構造で評価されており、本調査でのジオメトリの改良(受振点間隔:25cm,起振点間隔:3.0m)が調査精度の向上に貢献することが確認された。

表-4 両工法区間の調査結果の概略比較

	SB区間	CB区間
第一層速度 (km/s)	2.6	2.5
第二層速度 (km/s)	4.3	4.0
速度低下領域範囲 (cm)	36	48

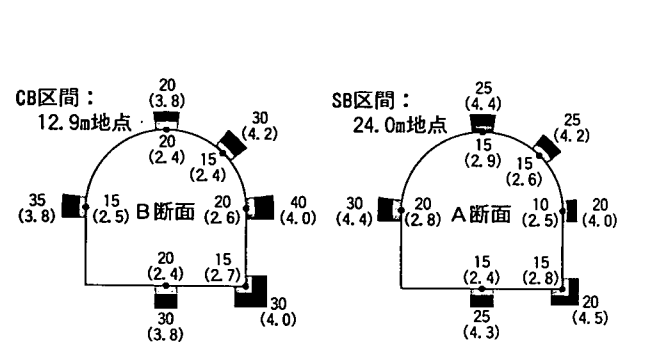


図-10 CB区間とSB区間の解析結果の比較
(図中の数字は低速度帯の幅(cm)とVp(カッコ内, km/s))

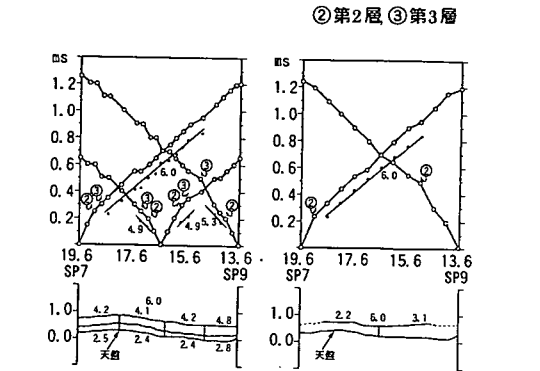


図-11 ジオメトリ変更と解析結果（天盤測線）
(左：本調査, 右：予備調査)

(2) P波検層

本調査では、初動読みとりの精度向上を目的として、シュミットハンマーによる起振の適用、加速度セ

ンサータイプの受振器の適用およびサンプリング密度の向上を計った。得られた P 波波形の卓越周波数は、0.2~0.6 kHz（予備調査 I）から 0.5~3.0kHz（試験坑道調査）となり、より高周波の波が起振されたことが確認できた。P 波検層の結果を表-5 に示す。表より、弾性波速度の低下領域の範囲、低下の程度とも SB 区間および CB 区間の明瞭な違いはなく、前述の弾性波屈折法の調査結果と異なる地点も認められる。特に B 断面にあたる KPS-4~6 孔では、弾性波屈折法と比較して低速度部の範囲が 20cm 以上も小さい。KPS-4~6 孔の P 波検層で得られた走時曲線を、弾性波屈折法の結果とともに図-12 に示す。図中には BTV 観察により各ボーリング孔で確認された全ての割れ目の分布も示している。走時曲線は各深度の走時を最小二乗法により近似して作成しており、深度 20cm 程度の地点までの走時が第一層と第二層の速度および層厚の分岐点となっている。しかし、KPS-4 および 5 孔は 40cm 深度の走時ポイントが走時曲線より上方に位置しており、第二層として算出された 6.0km/s と比較して 40cm 区間までの速度がやや遅いことがわかる。坑道壁面付近に割れ目が分布しない KPS-4 孔では弾性波屈折法での速度低下領域の範囲は 40cm であり、屈折法の結果との相異は計測・解析方法の違いによると考えられる。一方、両結果の相異が最も顕著となる KPS-6 孔の場合は、孔口から 0.05, 0.07, 0.11m の地点に掘削に伴う衝撃が成因と考えられる開口割れ目（すべてボーリング孔軸にほぼ直交する）が存在しており、割れ目の存在が両結果の相異の原因の一つとして考えられる。

表-5 P 波検層結果

孔名と配置	第 1 層		第 2 層	
	深度 (m)	速度 (km/s)	深度 (m)	速度 (km/s)
KPS-1 A: 上	0~0.23	2.1	0.23~3.5	6.0
KPS-2 A: 横	0~0.22	2.2	0.22~3.5	5.9
KPS-3 A: 下	0~0.46	2.8	0.46~3.5	5.9
KPS-4 B: 上	0~0.23	2.6	0.23~3.5	6.0
KPS-5 B: 横	0~0.22	2.2	0.22~3.5	6.0
KPS-6 B: 下	0~0.27	2.3	0.27~3.5	6.0

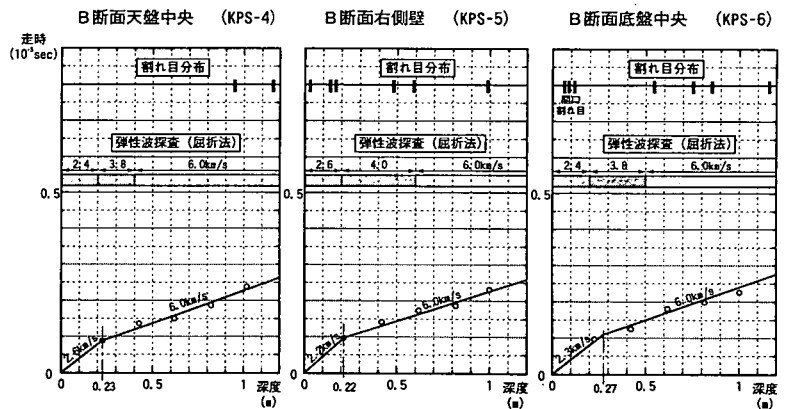


図-12 P 波検層と弾性波屈折法の結果比較

(3) レーダ反射法

試験坑道右側側部での本手法の適用結果を図-13 に示す。図の上半部には同調査により鮮明に確認された反射面を、図の下半部には試験坑道底盤での割れ目スケッチ結果を示している。図中の反射面 A,B,C は N85° W 系の割れ目系に、反射面 D,E,F は N25° E 系の割れ目系に対応している。坑道壁面近傍には 50~80cm の深度で連続的な反射面（図中点線）が確認されているが、反射波形には強振幅の成分が多く、坑道壁

面から直接反射した波のノイズの影響が考えられるため、掘削損傷による反射面とは断定できない結果となった。しかしながら、A, B 断面の坑道全周測線での調査でも、先の卓越割れ目系が確認されており、数

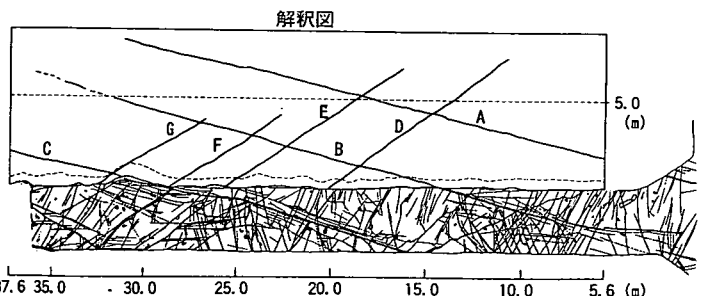


図-13 レーダ反射法適用結果

十 m 程度の連続性を示す比較的規模の大きい割れ目を対象とした調査に対する同手法の有効性が示された。

(4) 超音波探査

調査により得られた 10cm 区間毎の波形記録 (合計 35 区間) は、その振幅値が各区間で大きくばらつき、うち 4 区間で波形記録が得られない結果となった。また、各区間の振幅・周期特性と、P 波検層および弾性波屈折法で得られる速度低下領域、および BTV・コア観察結果から得られた各深度の地質特性との間に明瞭な相関は認められなかった。しかしながら、波形が得られない 4 つの区間のうち 3 つの区間は BTV 観察による割れ目の存在が確認されている区間であり、区間毎の割れ目分布特性の違いが、本手法により把握できる可能性が示された。

5. まとめと今後の課題

掘削損傷領域の範囲と物性の変化の把握および掘削損傷の工法依存性の把握を目的として、各種物理探査手法を用いて試験坑道において調査・研究を行った。本研究により得られた成果を以下にまとめる。

- ①試験坑道における弾性波屈折法の結果より、掘削損傷領域の範囲は、スムーズプラスティング工法区間で 40cm、普通発破工法区間で 50cm 程度、弾性波速度は、母岩部の 6.0km に対して第一層でそれぞれ 2.6km/s、2.5km/s と 50%程度の低下となる。これらの結果から、掘削損傷の工法依存性が確認されるとともに、同手法の掘削損傷領域の調査に対する有効性が示された。
- ②試験坑道におけるレーダ反射法の結果より、確認された反射面と坑道での割れ目スケッチによる割れ目分布が良く一致し、少なくとも十数 m の連続性を伴う割れ目探査への本手法の高い適用性が確認された。
- ③同一地点における弾性波屈折法と P 波検層の結果が異なる地点が確認され、両手法の計測・解析方法の違いがその原因と考えられる。ただし、坑道壁面付近に開口割れ目が分布する場合には、両手法の結果の異なりが相対的に大きくなる。

調査結果から、弾性波速度の低下は平均 50%程度となり、岩盤の剛性が、弾性波速度比の二乗に比例すると仮定すると、掘削損傷領域の岩盤は 75%程度の剛性低下となる。しかしながら、本研究サイトで実施された孔内載荷試験から、速度低下領域の変形係数は最大 50%程度の低下となる。弾性波速度から換算される剛性は現実的でなく、今後弾性波速度と力学的特性との関連性について、より詳細な検討が必要と考えられる。

謝辞

本研究の調査実施に協力頂きました (株) 川崎地質の野口静雄殿に感謝致します。

参考文献

- 1) 山崎(1996): 釜石原位置試験の概要と今後の方針, 平成 7 年度地層科学研究成果報告会 - 要旨集 -, PNC TN7410, pp.1-5, 1996.
- 2) T.Sato, K.Sugihara, H.Matsui (1995): Geoscientific studies at the Tono and Kamaishi mine in Japan, the proceeding of 8th ISRM, pp.47-51, Tokyo, Japan
- 3) H.Matsui, T.Sato, K.Sugihara, N.Nakamura (1997): Comparison of the results of stress measurements determined by various methods at Kamaishi mine, the proceeding if the International Symposium on Rock Stress, pp.95-100, Japan
- 4) 土原・松井・三上・杉原(1997): 深部岩盤における掘削損傷領域の工法依存性に関する予備調査, 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp308-312
- 5) 小林・杉本(1980): 回転探触子型岩盤割れ目探知計による現場試験, 日本鉱業会誌 96-1107, pp.307-312