

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

Preliminary monitoring on dependency of excavation damage zone on excavation methods in deep rock mass

土原 久哉*・松井 裕哉**・三上 哲司**・杉原 弘造**

Hisaya TSUCHIHARA, Hiroya MATSUI, Tetsuji MIKAMI, Kozo SUGIHARA

The rock mass around a cavern in deep underground is mechanically and hydrologically influenced by the cavern construction. PNC has been carried out an experiment to evaluate the excavation disturbed zone(EDZ) around drifts at the Kamaishi Mine. One of the purpose of this study is to evaluate the dependency of excavation damage on excavation method.

The test site is in fractured granodiorite. A new drift has been excavated with two kinds of blasting methods which are the conventional and smooth blasting methods. Acoustic emission(AE) monitoring, PS well-logging and seismic refraction survey have been performed to estimate the extent of the EDZ. The extent of the EDZ due to the blasting methods have been clearly detected by the seismic refraction survey.

1. はじめに

地下深部の岩盤内に空洞などを構築する際、掘削によって空洞周辺岩盤は物理的な損傷を受け、水理・力学的特性の変化など、様々な現象をもたらすことがある。この損傷を受けた岩盤領域（以下損傷域）の特性と広がり、掘削方式（機械、発破、人力）によって異なると考えられる。発破工法の場合、制御発破により岩盤損傷の低減が可能であるが¹⁾、深部岩盤における損傷域の物性、広がり、及びその評価は未だ不明な点が多く、その定量的な評価が深部岩盤内空洞の設計・施工を行うためにも重要であると考えられる。動力炉・核燃料開発事業団は、掘削影響の評価に関する研究を岩手県釜石鉱山において実施している²⁾。その研究の一環として釜石鉱山の深部岩盤内に計測坑道と呼ばれる坑道を普通発破とスムーズブラस्टィング発破により掘削した。本論文は、計測坑道の周辺岩盤で行った調査・試験（原位置 AE 計測、坑内弾性波探査）結果と、それに基づき発破工法が与える損傷域の評価について報告するものである。

2. 計測坑道の掘削

計測坑道の掘削、予備的調査・試験の実施位置は釜石鉱山内の土被り約 730m に位置する 250m レベル坑道である。実施位置周辺の岩盤は栗橋花崗閃緑岩であり、その岩石物性値を表 2.1 に示す。計測坑道周辺で観察される割れ目の卓越方

表 2.1 岩石物性値（サンプル数 14 の平均）

単位体積重量 (g/cm ³)	有効 間隙率 (%)	Vp (km/s)	Vs	一軸圧縮 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	ポア ソン 比
2.78	0.70	5.81	3.25	46.4	64.1	0.29

* 正会員 (株)大林組 土木技術本部 設計第二部

** 正会員 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター

向は WNW-ESE から W-E 方向にあり、最大主応力は最小主応力の約 2.3 倍で、43.8MPa である^{3) 4)}。計測坑道は図 2.1 に示すように 250m レベル坑道と直交するように掘削した。断面は縦 2.5m × 横 3.0m の矩形とし、延長を 30m とした。また、計測坑道掘削の目的は、(1) 試験坑道 (図 2.1) 掘削時の調査・試験用ボーリングの設置、(2) 試験坑道掘削時の調査・試験手法の適用性の予備的検討、および (3) 調査・試験の対象とする岩盤の特性の把握と発破パターン設計のための基礎データ取得である。掘削は発破工法により行い、区間長 0 ~ 15m は普通発破工法 (以下 CB 工法) を、15 ~ 30m はスムーズプラスティング工法 (以下 SB 工法) を適用した。発破工法の概要を表 2.2 に示す。掘削完了後に断面形状測定を行った (図 2.2)。また、その結果に基づき算定した余堀率 (余堀面積 / 掘削計画断面積) の変化を図 2.3 に、図 2.4 にのみ跡率 (のみ跡長 / 穿孔長) の実測度数分布を示す。CB 工法区間の平均余堀率は約 30%、SB 工法区間は約 10% であり、SB 工法区間ののみ跡率は 45% 以上カウントされるものが多く存在する。なお、CB 区間の余堀は掘削終了後の坑壁の剥離・山はねにより掘削断面が拡大したものが多かった。以上の結果から SB 工法によって計画掘削断面に近い余堀の少ない起砕が行われたといえる。

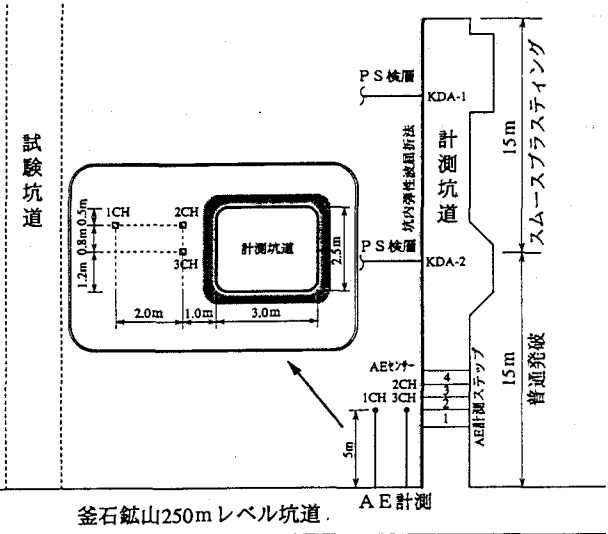


図 2.1 坑道、調査・試験レイアウト

表 2.2 発破諸元

(含水爆薬、電気雷管)	CB 工法	SB 工法
周辺孔間隔 (m)	0.8	0.4
周辺孔装薬量 (kg/ 孔 / m)	0.62	0.27
周辺孔間隔/最小抵抗線長	1.50 ~ 1.88	0.75 ~ 1.43

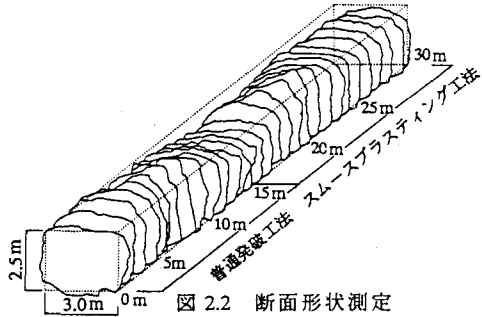


図 2.2 断面形状測定

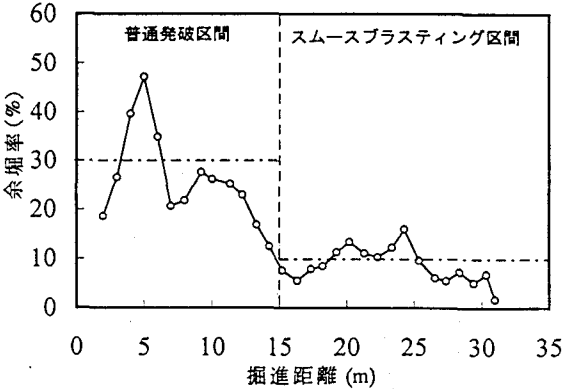


図 2.3 余堀率の変化

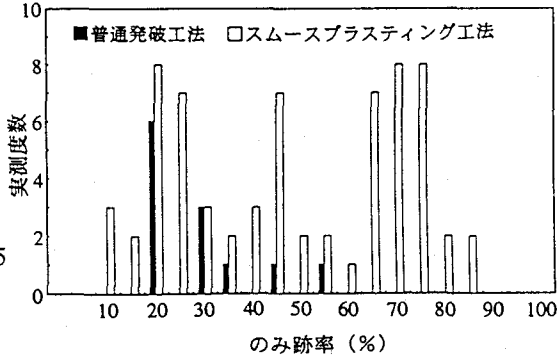


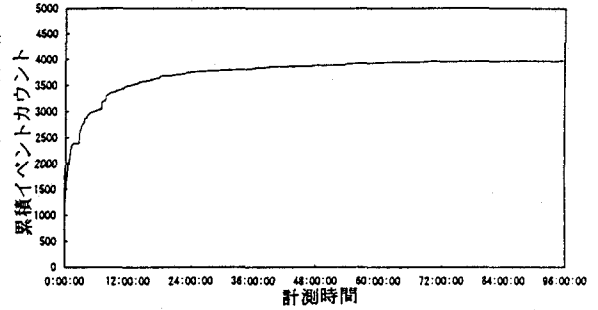
図 2.4 のみ跡率の変化

3.AE 計測⁵⁾

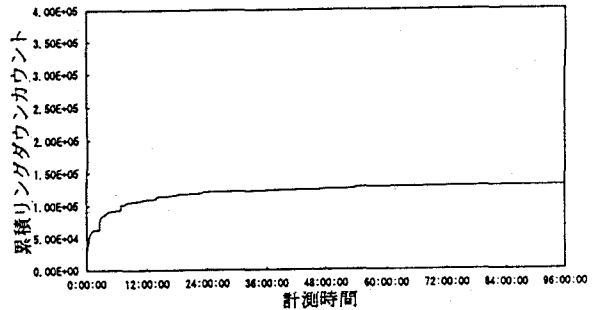
近年、トンネル、坑道掘削時のき裂の発生・進展を観測し、岩盤の損傷を評価する手法として原位置 AE 計測の適用が試みられている⁵⁾。本試験においても CB 工法区間で原位置 AE 計測を試みた。計測坑道と平行するボアホール 3 本に 3 個の AE センサーを設置し（図 2.1）、切羽が AE センサー付近を通過する際の 4 回の発破（平均装薬量 30kg）を対象に坑道側壁付近で発生する AE 波を捕らえた（第 1～4 回計測）。計測は発破直前に開始し、最大で 92 時間のモニタリングを行った（第 3 回計測）。AE センサーは現地で実施したシャープペン圧折音を利用した減衰特性試験を参考に PAC 社製 60kHz 共振型センサーを用いた。AE センサーの設置は AE センサーとプリアンプを格納した容器をボアホール孔底にロッドを介して取付けることにより行った。計測における AE 信号処理は以下のパラメータについて行った。

- 1) イベントカウント：しきい値を越えた AE 信号波ひとかたまりを 1 事象とし、計数した AE の個数。
- 2) リングダウンカウント：しきい値を越えた AE 信号波の振動回数を全て計数した AE の個数。
- 3) 最大振幅値：AE 信号波 1 事象における振幅値の最大値。

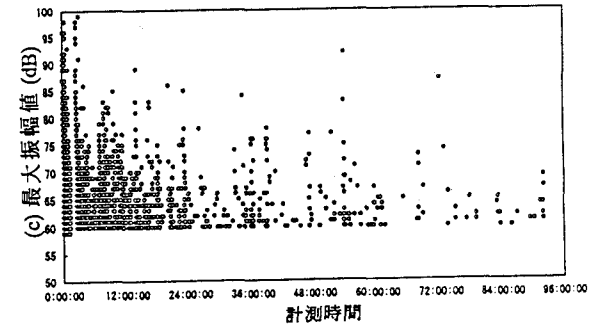
図 3.1(a),(b) に例として第 3 回の長期計測の累積イベントカウントと累積リングダウンカウントを示す。なお、結果は発破終了直後からの計測を示している（0:00:00 は点火時）。図 3.1 から、発破直後に多くの AE がカウントされていることがわかる。また、累積イベントカウント、累積リングダウンカウントとともに約 1 日で平衡状態に近くなる。これは掘削直後から約 1 日間に坑道周辺岩盤中で応力再配分に伴う微小き裂の発生、進展がほぼ終了することを示していると推定される。その後、AE の発生は少ないことから坑道周辺岩盤は安定なものへと移行していると考えられる。図 3.1(c) に第 3 回計測の最大振幅値の発破直前からの経時変化を示す。最初の連続した大きい振幅値は発破によるものである。振幅値の全体的な傾向として発破終了後から長時間経過後も 80dB を越える比較的大きい振幅値をもつ AE が発生している。これは、高地圧下にある深部岩盤において局所的な岩盤の破壊が経時的に進行してい



(a) 累積イベントカウント



(b) 累積リングダウンカウント



(c) 最大振幅値

図 3.1 第 3 回 AE 計測結果

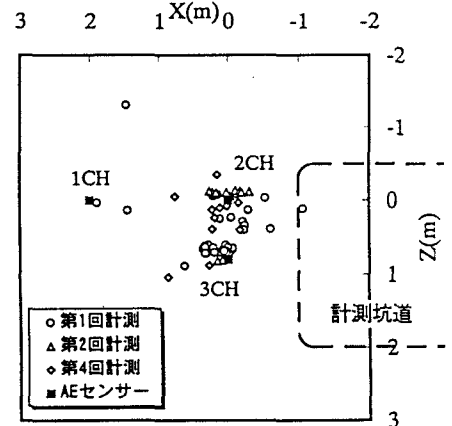


図 3.2 AE 平面位置評定結果

るものと考えられる⁹⁾。この現象は現場で観測された山なり、坑壁の剥離、山はねの発生と関連深いものと思われるが、詳細は今後の検討課題である。図 3.2 は第 1～4 回計測の AE 発生源の平面位置評定結果である。計測坑道側壁から約 1.5m 付近まで発生源が集中している。以上の結果から掘削終了後、約 1 日経過後の AE 活動は次第に低下しているが、突発的に大きい振幅値をもつ AE 波が発生しており、その発生源の分布から損傷域は側壁から約 1.5m 付近まで及んでいると考えられる。

4. 弾性波探査

計測坑道掘削完了後に計測坑道内において CB、SB 工法による損傷を評価する目的として PS 検層、坑内弾性波探査屈折法を実施した。その結果について以下に報告する。

4.1 PS 検層

各々 CB、SB 区間に掘削された KDA-1,2（図 2.1）において PS 検層を実施した。起振は板たたき法により行った。受振装置はボアホールピックアップ式受振器（固有周波数 28Hz）を用い、孔口から 5m までは 0.2m ピッチ、5m 以深は 0.5m ピッチで受振器を設置した。図 4.1 は KDA-1 孔（SB 区間）と KDA-2 孔（CB 区間）の走時曲線である。これから、KDA-1 は孔口から 0.7m 付近に変曲点があると考えられ、KDA-2 の変曲点は孔口から 0.5m のところにあると考えられる。この曲線の直線回帰から P 波、S 波速度を求めると表 4.1 のようになる。KDA-1 孔の深度 0～0.7m、KDA-2 孔の深度 0～0.5m の弾性波速度が低下している層が損傷域、それ以深（0.7m～、0.5m～）は健岩部と考えられ、損傷域の速度は健岩部の約半分となっていることがわかった。CB 工法と SB 工法の損傷域の速度値と深度に明確な差は認められなかった。PS 検層は受振器の設置間隔の限界（0.2m ピッチ）と坑道側壁近傍の短い測線区間における波形の初動読みとりが困難であることから、CB 工法、SB 工法における損傷域の深度と速度値の差を詳細に把握できなかったと考えられる。

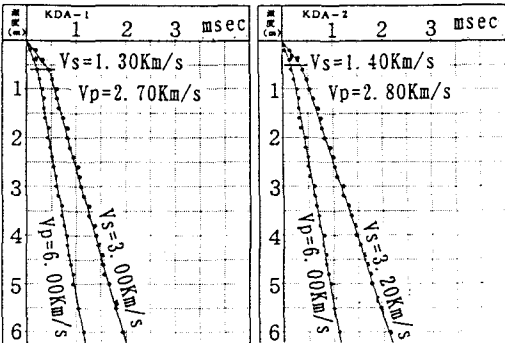


図 4.1 PS 検層走時曲線

表 4.1 PS 検層結果

孔 No. 発破工法	深度 (m)	P 波速度 (km/s)	S 波速度 (km/s)
KDA-1 SB 工法	0～0.7	2.7	1.3
	0.7～10.0	6.0	3.0
KDA-2 CB 工法	0～0.5	2.8	1.4
	0.5～10.0	6.0	3.2

4.2 坑内弾性波探査屈折法

計測坑道の損傷域の全体的な広がりや定量的に捉えるために図 2.1 に示すように計測坑道の側壁部で弾性波屈折法を実施した。測線は計測坑道の掘進方向に向って左側壁とし、延長 30m の領域とした。ハンマーによるスタッキング方式により起振（起振点間隔

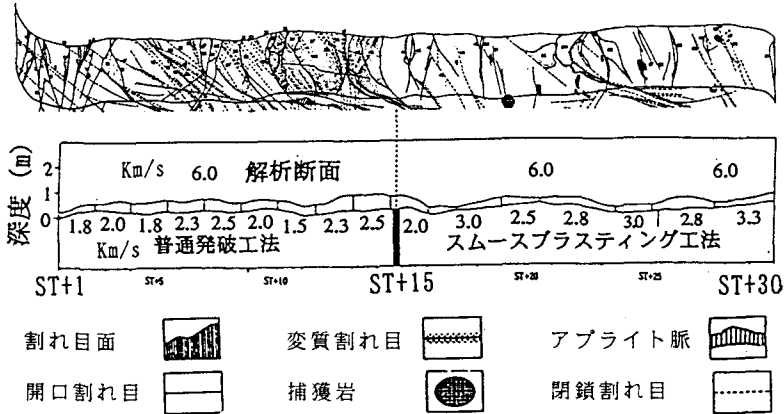


図 4.2 割れ目マップと屈折法解析結果

を 3m）し、0.5m ピッチで取り付けた 24 個の受振器（固有振動数 28Hz）で弾性波を測定した。測定結果の解析はハギトリ法により行った。図 4.2 は測定を実施した側壁の割れ目状態、および解析断面図を示し、表 4.2 にその結果のまとめを示す。この結果から弾性波速度の低下した層を損傷域とすれば CB 工法区間 (ST.1

～15)における損傷域は、CB工法区間に比べ損傷域の幅が若干小さくなるとともに、損傷域の速度値で約1km/sという明確な差が現れている。また、図4.2の割れ目マップに基づいた割れ目頻度(表4.2)から、CB工法区間はSB工法区間に比べ割れ目が発達し、CB工法区間の割れ目頻度はSB工法区間の約2倍である。

表4.2 弾性波屈折法結果

発破工法	深度(m)	弾性波速度(km/s)	割れ目頻度(本/m)
CB工法	0.18～0.65	1.5～2.5	4.21
	0.65～	6.0	スキャンライン
SB工法	0.11～0.51	2.0～3.3	2.19
	0.51～	6.0	スキャンライン

以上の結果から弾性波屈折法調査は掘削工法の違いによる損傷域の広がりや、その結果を捉えるために有効な手法の一つであること、発破工法の違いにより弾性波速度で1km/s程度の損傷度の違いが生じ、弾性波屈折法の結果は割れ目頻度に対応していることがわかった。また、図4.3に既往研究で得られている装薬量と損傷域の関係を今回の予備調査結果(AE計測、PS検層、弾性波屈折法)と合わせて示す。今回の予備調査結果は既往データとほぼ同様な傾向を示していることがわかった。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 普通発破区間でAE計測を実施した結果、掘削後約1日で岩盤内AEの発生は沈静化するが、80dBを越える比較的大きい振幅値が1日以上経過後も発生し、平面位置評定の結果からAE発生源は坑道側壁から約1.5mの範囲に集中していることがわかった。また、普通発破区間において深部岩盤の破壊現象である岩盤剥離、山なり、山はねとAE特性との関連が示唆された。

(2) 計測坑道の普通発破区間とスムーズプラスティング区間において、PS検層、弾性波探査屈折法を実施した結果、損傷域の弾性波速度は健岩部の1/4～1/2に低下しており、弾性波探査屈折法の結果からスムーズプラスティング工法区間と普通発破工法区間の損傷域の速度値の差は約1km/sであった。一方、PS検層は受振器設置の物理的限界と測定精度の問題により、損傷域の深度と速度値の詳細な把握は困難であった。

(3) 計測坑道の周辺岩盤における割れ目頻度は普通発破区間ではスムーズプラスティング工法区間の2倍となり、弾性波速度分布と相関していると考えられる。深部岩盤における普通発破工法とスムーズプラスティング工法の損傷域に差が現れたことから、深部岩盤における損傷域の工法依存性があることが示唆された。

参考文献)

- 1) 玉井・永久・白旗：制御発破工法と岩盤への影響度、トンネルと地下、第24巻4号、pp.29-36,1993.
- 2) 山崎：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 95-037),pp.1-5,1996.
- 3) 松井・佐藤・杉原：弾性波を利用した結晶質岩における既存坑道周りの掘削影響調査、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.336-340,1995.
- 4) 松井・木梨・三上・杉原：釜石鉱山における試験坑道及び計測坑道掘削を対象とした変形挙動予備解析、第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集投稿予定、1996.
- 5) 畑・吉岡・木梨・藤原：AE計測に基づいた空洞掘削時のき裂進展解析、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 ,pp.306-310,1995.
- 6) 畑・吉岡・藤原：原位置AE計測の振幅値に関する一考察、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第3部(A)、pp.798-799,1996.

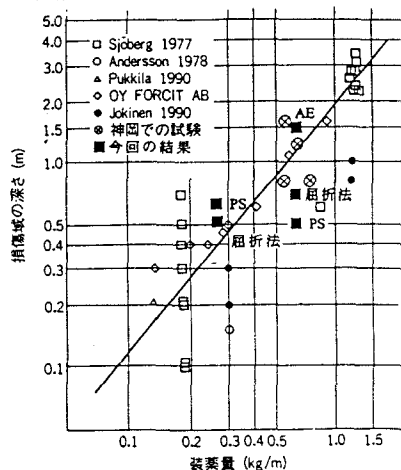


図4.3 装薬量と損傷域の関係

(参考文献1)に加筆)