

発破振動計測と引張強度試験に基づく掘削損傷領域の評価

EVALUATION OF EXCAVATION DAMAGED ZONE BY BLAST VIBRATION MEASUREMENT AND TENSILE STRENGTH TEST

木下直人*, 堀田政國**, 松井裕哉***, 杉原弘造***

Naoto KINOSHITA, Masakuni HORITA, Hiroya MATSUI and Kozo SUGIHARA

Evaluation of the excavation damaged zone induced by blasting around a drift has been conducted as part of the excavation disturbance experiment at the Kamaishi mine. The damaged zone is determined in this paper to be the region in which the induced stress around a drift during blasting is larger than the tensile strength of the rock. The induced stress during blasting in the rock is assumed to be the stress superimposing the stress increment due to blasting on the redistributed initial stress due to excavation.

The results indicate that strain rate dependence of tensile strength should be taken into consideration in order to evaluate the extent of the damaged zone. It is shown that the proposed method is applicable to evaluate excavation damaged zone by comparing the evaluated damage zone with the region where many cracks formed by blasting were observed in the vicinity of the drift floor.

1. はじめに

トンネルや地下空洞の掘削において、発破による周辺地山の損傷を極力抑えて施工することは、地下構造物の安全確保やその設計・施工の最適化の観点から非常に重要である。このため、釜石鉱山内で実施している掘削影響試験¹⁾の一環として、発破による損傷領域の発生に関する研究を実施した。試験用の坑道は土被り約730 mの深さに位置し、幅3.5 m、高さ3.5 mの馬蹄形断面である。試験坑道の掘削には、普通発破工法とSB(スームズプラスティング)工法の2つの方法を用いている。試験対象岩盤は栗橋花崗閃緑岩であり、長さ3 m以上のき裂密度は約2本/mである。試験坑道掘削時の発破振動特性の計測結果については既に報告している²⁾が、今回は、発破時の振動に対応する周辺岩盤の引張強度を求めるための室内試験を実施し、その結果と既に報告した発破振動の計測結果から、坑道掘削に伴う岩盤の損傷領域の評価を行った。

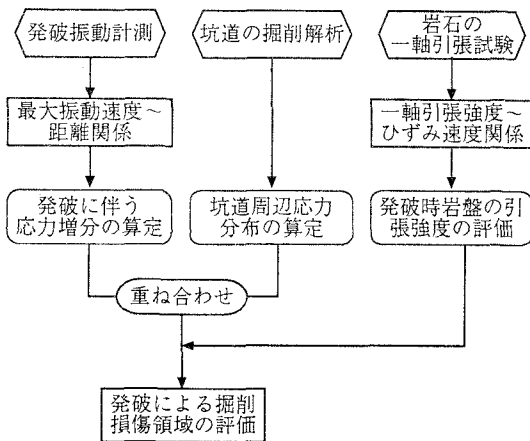
2. 発破による損傷領域の評価法

地下深部において坑道を掘削する際の発破による岩盤の損傷について検討を行う場合には、発破振動による動的応力だけでなく、坑道周辺岩盤に作用している初期応力の再配分に基づく静的応力の影響についても考慮することが重要であると考えられる。また、発破振動のようなひずみ速度が非常に速い場合の岩石の強度は、通常のひずみ速度で試験を行うことによって求められた岩石の強度とはかなり異なることが予想されるので、このような検討を行う場合には、岩石の強度のひずみ速度依存性についても考慮する必要がある。従来、発破による岩盤の損傷の評価を、発破振動の計測データに基づいて定量的に行った例自体が非常に少ないこともあって、これらの影響を考慮した検討はほとんど行われてこなかった。そこで、本研究では、発破

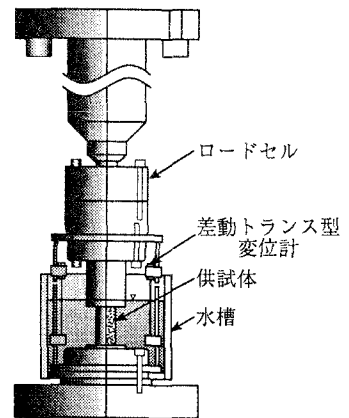
* 正会員 清水建設株式会社 技術研究所

** 正会員 清水建設株式会社 電力・エネルギー本部

*** 正会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター



図－１ 発破による損傷領域の評価フロー



図－２ 含水飽和状態における一軸引張試験

時において坑道周辺岩盤に作用する応力は、坑道掘削時の初期応力の再配分に基づく静的応力と、発破による動的応力増分を重ねあわせたものであり、その値が発破振動に対する岩盤の引張強度を超えると引張破壊が生じると仮定して、図－１に示すフローにしたがって発破による損傷領域の定量的な評価を試みた。その手順の概略は以下のとおりである。

- 1) 一軸引張試験により岩石の一軸引張強度とひずみ速度の関係を求め、その結果に基づいて発破時における岩盤の一軸引張強度を決定する。発破時のひずみ速度は、原位置での発破振動測定結果より求める。
- 2) 発破振動計測結果から最大振動速度と発破孔からの距離の関係を求める。
- 3) 2)で求めた最大振動速度と距離の関係に基づいて、発破による坑道周辺の動的応力増分を求める。
- 4) 坑道の掘削解析を実施し、初期応力の再配分に基づく坑道周辺の静的応力分布を求める。
- 5) 上記3)と4)の応力を重ね合わせる。
- 6) 5)で求めた応力の値が1)で求めた引張強度を超えている領域を掘削損傷領域と評価する。

3. 発破時の振動に対応する岩盤の強度の検討

岩石の引張強度のひずみ速度依存性を求めるために、一軸引張試験を実施した。試料は、釜石鉱山内の、発破振動計測を行った試験坑道の壁面から、ボーリングにより採取した。供試体の寸法は、直径30mm、高さ60mmとした。

岩石の引張強度には異方性があり、また、含水状態の影響も受ける。これらの影響についても明らかにすることができるよう試験条件を設定した。ボーリング孔軸方向（以下A方向と記す）については、含水飽和状態(72時間以上減圧水浸)および乾燥状態（デシケータ内で2週間乾燥）のそれぞれについて、 10^{-7} 、 10^{-6} 、 10^{-5} 、 10^{-3} 、 10^{-1} /sの各ひずみ速度で試験を実施した。ひずみ速度を最高 10^{-1} /sとしたのは、今回用いた装置で試験可能な最高ひずみ速度が約 1×10^{-1} /sであるためである。A方向に直交するそれ以外の直交2方向（以下B方向、C方向と記す）については、一軸引張強度の異方性を調べることを目的として、ひずみ速度 10^{-6} /sでのみ試験を行った。試験個数は、各条件毎に3個とした。

一軸引張試験は、福井ら³⁾が開発した、試験機のプラテンと供試体とを直接接着する方法により行った。試験中に含水状態が変化しないようにするため、乾燥状態の場合には、供試体の側面をラップで覆った状態で、

また、含水飽和状態の場合には、図-2に示すように、試験機に取り付けた水槽中に供試体を設置した状態で試験を行った。

A方向の供試体について求めた一軸引張強度 σ_t とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係は、図-3に示すように、乾燥状態でも、含水飽和状態でも、片対数軸上で直線関係を示している。乾燥状態および含水飽和状態のそれぞれについて、回帰直線を求めた結果を以下に示す。

$$\text{乾燥状態} \quad \sigma_t = 19.30 + 1.150 \log(\dot{\epsilon}) \quad \text{--- (1)}$$

$$\text{含水飽和状態} \quad \sigma_t = 19.22 + 1.551 \log(\dot{\epsilon}) \quad \text{--- (2)}$$

この結果は、ひずみ速度が1桁大きくなる毎に、乾燥状態では約1.15MPa、含水飽和状態では約1.55MPa引張強度が増加することを示しており、全体的に引張強度は顕著なひずみ速度依存性を示している。

乾燥状態と含水飽和状態の試験結果を比較することにより、ひずみ速度が遅い場合には、含水することによって引張強度が低下しているが、ひずみ速度が速くなると、両者の強度差はなくなっていることがわかる。大久保ら⁴⁾も同様に、気乾状態と湿潤状態とを比較すると、後者の方が引張強度のひずみ速度依存性が大いという結果を得ている。

試験坑道掘削時の発破振動計測結果²⁾から、発破振動時のひずみ速度は、4.8～12.0/s程度であると推定される。このひずみ速度は、今回実施した最大のひずみ速度と比較しても約2桁大きい。そこで、一軸引張試験結果から求められた引張強度～ひずみ速度関係を外挿することにより発破時の振動に対応する岩盤の引張強度を求めた。発破振動に対する岩盤の引張強度としては、安全サイドの評価として、最も強度の小さいB方向の含水飽和状態における値を用いるのが適当であると考えられるので、B方向とA方向の引張強度比は一定であるとして、発破振動時におけるB方向の引張強度を求めた。その結果、発破振動に対応するひずみ速度におけるB方向の引張強度は、図-3に示すように、約19.1～19.7MPaであると推定された。この値は、通常の試験時のひずみ速度における引張強度の約2倍となった。

4. 発破時における坑道周辺岩盤内応力の検討

次に、発破時に坑道周辺岩盤に作用する応力について検討を行った。発破時に坑道周辺岩盤に作用する応力は、前に述べたように、坑道掘削時の初期応力の再配分に基づく応力と、発破による応力増分を重ね合わせたものであると考えられる。

坑道掘削時の初期応力の再配分に基づく応力は、平面ひずみ状態の2次元弾性FEM掘削解析を行うことにより求めた。初期応力は、試験坑道近傍で実施した円錐孔底ひずみ法および水圧破砕法による測定結果に基づいて、最大主応力 $\sigma_1 = 26.0$ MPaおよび最小主応力 $\sigma_3 = 18.6$ MPaとした。

次に、発破振動計測により得られた最大振動速度と発破孔からの距離の関係を用いて、発破に伴う動的応力増分 σ を以下の式⁵⁾で算定した。

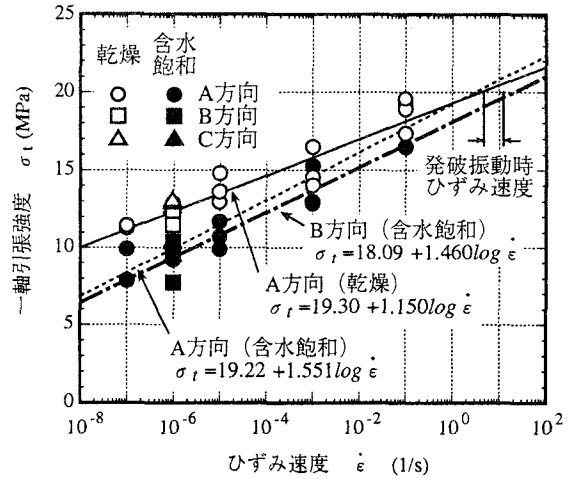


図-3 一軸引張強度とひずみ速度の関係および発破振動時における引張強度の推定

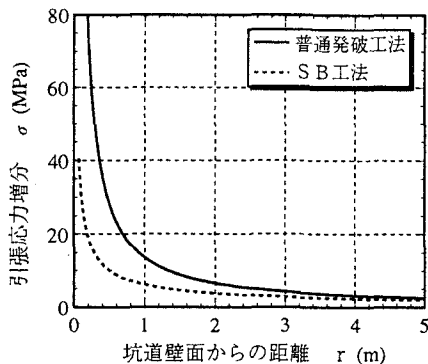
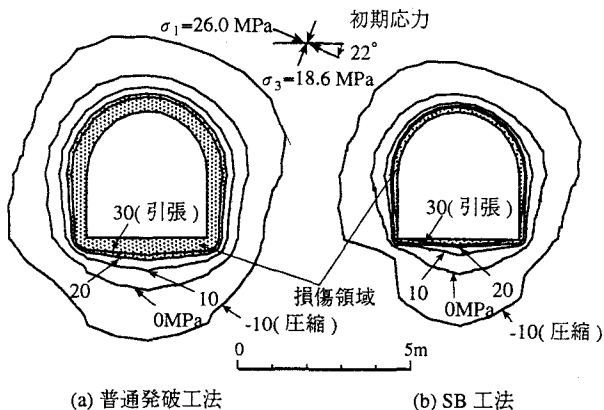


図-4 発破による応力増分



(a) 普通発破工法

(b) SB 工法

図-5 発破による損傷領域

$$\sigma = \frac{\rho}{g} \times V_{\max} \times V_p \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 g は重力加速度、 ρ は岩盤の密度、 $V_{\max}$ は最大振動速度、 V_p は岩盤のP波速度である。

試験坑道掘削時の発破振動の計測結果²⁾によれば、発破振動の進行方向(発破点と振動計とを結ぶ方向)では、全体的にP波が卓越し、P波の振幅が最大になっているのに対して、それと直交する方向では、全体的にS波が卓越し、S波の振幅が最大になっている。今回の検討では、引張応力による岩盤の破壊が重要であり、岩盤は、P波の部分で引張応力により破壊すると考えているので、最大振動速度と距離の関係としては、普通発破工法とSB(スムーズプラスティング)工法のそれぞれについて、振動の進行方向についての発破振動の計測により求められた以下の式²⁾を用いた。

$$\text{普通発破工法} \quad V_{\max} = 80.22 + r^{-1.067} \quad \text{----- (4)}$$

$$\text{SB 工法} \quad V_{\max} = 36.62 + r^{-0.7077} \quad \text{----- (5)}$$

$V_{\max}$ および r (発破孔からの距離) はそれぞれ [cm/s] および [m] の単位で表している。以後の解析では、坑道壁面に最も近い発破孔の位置が坑道壁面の位置に等しいと考え、 r はそのまま坑道壁面からの距離を表しているものとした。

(4)式および(5)式を(3)式に代入することにより、発破振動による引張応力増分と坑道壁面からの距離の関係を求めた結果を図-4に示す。岩盤の引張強度を19.6MPa(200kgf/cm²)とすれば、坑道掘削後の地山応力の影響を無視した場合の発破による損傷領域の広がり、普通発破工法では約70cm、SB工法では約20cmとなる。

5. 発破による損傷領域の評価およびその妥当性の検討

坑道掘削時の静的応力分布に、発破に伴う動的引張応力増分を重ね合わせたものを図-5に示す。a)は普通発破工法の場合の主応力分布図を、b)はSB工法の場合のそれを示している。原位置岩盤の引張強度が19.6MPaであるとすれば、図の20MPaコンターがほぼそのまま掘削損傷領域の境界となる。図から、普通発破工法の掘削損傷領域の範囲は坑壁から約50cm～60cmであるのに対して、SB工法では約20cmとなっ

ており、両者の間には顕著な差がみられる。また、これらの図からわかるように、両工法ともに底盤中央部の損傷領域の範囲の方が天端の損傷領域の範囲より大きくなっている。

隣接した坑道で実施した床盤透水試験の結果⁶⁾によれば、底盤は普通発破工法によって掘削されており、それによって新たに生じた多数のき裂が、発破孔の位置から約50cmまでの範囲内に分布している。これらのき裂は、その方向が坑道底盤とほぼ平行であるため、発破時の引張応力によって発生したと推定される。したがって、普通発破工法の場合の今回の評価結果は、き裂が引張応力によって発生していることに関しても、損傷領域の広がりが約50cm～60cmであることに関しても、床盤透水試験の結果と対応しており、今回提案した方法が妥当であることを示している。

6. まとめ

発破振動に対する岩盤の引張強度を求めるための試験を実施し、その結果と既に報告した発破振動の計測結果から、坑道掘削に伴う岩盤の損傷領域の評価を行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1)一軸引張試験を実施し、その結果を外挿することにより求められた発破振動に対する岩盤の引張強度は、通常の試験時のひずみ速度における引張強度の約2倍であった。したがって、発破振動による岩盤の損傷の範囲や程度について検討する場合には、引張強度のひずみ速度依存性を考慮する必要がある。
- (2)発破時において坑道周辺岩盤に作用する応力は、坑道掘削時の初期応力の再配分に基づく静的応力と、発破による動的応力増分を重ねあわせたものであり、その値が発破時の振動に対応する岩盤の引張強度を超えると引張破壊が生じるとして掘削損傷領域を求めた。その結果、普通発破工法とスムーズブラスティング工法では損傷領域の広がりに顕著な差が見られることがわかった。
- (3)今回提案した方法によって求められた損傷領域の広がりは、坑道の底盤にピットを設けて観察したそれと一致しており、その方法が妥当であることが示された。今後発破損傷領域の定量的な評価を行う上で有効な一手法となり得ると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、東京大学大久保誠介教授より多くの有益な助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山崎真一：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) 木下直人，松井裕哉，菊地 正，堀田政國：坑道近傍における発破振動特性の計測，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.755-760，1998.
- 3) 福井勝則，金 豊年，大久保誠介：一軸引張荷重下での岩石の完全応力-歪曲線，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.271-276，1994.
- 4) 大久保誠介，金 豊年，秋山政雄：一軸引張強度と圧裂引張強度の載荷速度依存性，資源と素材，Vol.109，pp.865-869，1993.
- 5) チャールズ H. ダウディン著：発破振動の測定と対策（佐々宏一監訳），山海堂，1995.
- 6) 堀田政國，木下直人，松井裕哉，杉原弘造：坑道底盤の坑軸方向透水性の計測，第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，1999.