

トンネル掘削における発破ずりの粒度分布

Particle Size Distribution of Rock Fragmentation by the Blasting in Tunnel Excavation

廣島隆¹, 大久保誠介², 福井勝則³, 簗橋広文⁴, 西崎晶士⁵

Takashi Hiroshima, Seisuke Okubo, Katsunori Fukui, Hirofumi Kagohashi and Shoushi Nishizaki

¹ 国土交通省北陸地方整備局利賀ダム工事事務所(〒939-1363 富山県砺波市太郎丸1丁目5番10号)

² 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³ 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁴ 正会員 清水建設株式会社北陸支店土木部(〒920-0863 金沢市玉川町5番15号)

⁵ 正会員 清水建設株式会社土木事業本部技術第二部(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーパンスS館)

nishizaki@shimz.co.jp

The properties of blasted muck from tunnel face are essential for effective utilization of muck, however, they have little been studied up to date. For example, the particle distribution of blasted muck has been numerous reported for the open pit mine of limestone or macadam, which has two free faces, but is little known for the tunnel with only one free face. This paper especially focused on the particle distribution of blasted muck from No. 4 Tunnel in the construction of Toga Dam. The careful investigation revealed that the particle distribution of blasted muck was closely correlated with blasting pattern (the amount of powder and the number of drill holes). The results of this study are considered to be important for effective utilization/recycling of blasted muck from tunnel.

Key Words: tunnel excavation, muck, particle size, blasting, Toga Dam

1. はじめに

採鉱の分野, 特に石灰石や砕石などの露天掘りの場合は, 破碎過程の粒度分布が管理上重要なデータとなるため, これらに関する研究が数多く報告されている。

一方, トンネルの分野では, 掘削ずりは最終土捨て場に処分される場合が多いため, ずりの粒径に対する関心は, 現場でのずりの積み込み, 運搬過程における施工性に関連するものが主体である。

したがって, 特に掘削ずりの粒度分布を把握する必要性も少なかったといえる。

そのため, 2自由面発破の露天掘りの場合とは対照的に, 1自由面発破のトンネル掘削ずりの粒度分布に関する定量的調査データはほとんどなかった。

ところが, 循環型社会形成に向けて環境負荷を低減す取り組みが建設工事に求められるようになったことから, トンネル工事においても掘削ずりの有効利用が課題となり, そのために粒度分布等の特性把握が重要となってきた。

利賀ダム事業では, 原石山の規模を出来るだけ縮小するために, トンネル掘削ずりをダム関連事業の骨材として転用する方策をとっている。

そのために, 掘削ずりは極力大塊の状態でストックすることを課題としている。

本報文は, トンネル発破掘削において, 薬量やさく孔数がずりの大塊比率に与える影響を把握するために, 複数の発破パターンを試行し, ずりの粒度状況を測定した結果を報告するものである。

2. トンネルの概要

(1) 工事概要

利賀ダムは、庄川水系の洪水調節、流水の正常な機能維持および工業用水の確保を目的とした、多目的のダムとして建設が進められている。

本トンネルは、利賀ダム建設において、工事用道路として機能するものである。

発注者：国土交通省 北陸地方整備局

工事名：工事用道路4号トンネル工事

工事場所：富山県東砺波郡利賀村

工期：平成15年3月～平成17年3月

工事内容：延長938m, 内空断面積44.95m²

NATM工法, 発破掘削, タイヤ方式
上半先進ショートベンチカット工法
および補助ベンチ付全断面掘削工法

図-1 に支保パターン図を示す。

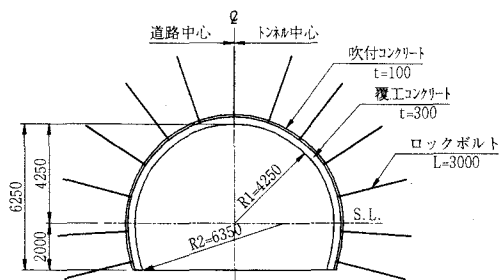


図-1 支保パターン図(C II)

(2) 地質概要

当該地域には、中生代三畳紀～ジュラ紀に生成された船津花崗岩が分布している。

当工区に分布する船津花崗岩は、花崗閃緑岩を主体とした、比較的細粒で片状構造をもつ庄川花崗岩とよばれるものである。

図-2 に地山区分図を示す。

(3) RQD の結果

地山等級C級区間において、坑内から水平調査ボーリング(L=40m)を実施している。

図-3 に水平ボーリングによって得られたRQD値の分布を示す。

一般的に、C等級地山のRQD値は20～70%に区別されるが、当該地山では20%以下となる部分も多く含んでいる。

すなわち、当該地山は一般的なC等級地山よりも、亀裂が発達した地山であるといえる。

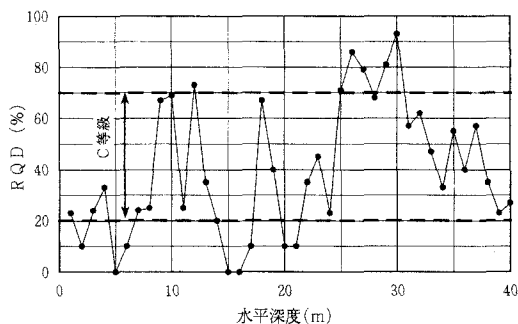


図-3 水平ボーリングのRQD

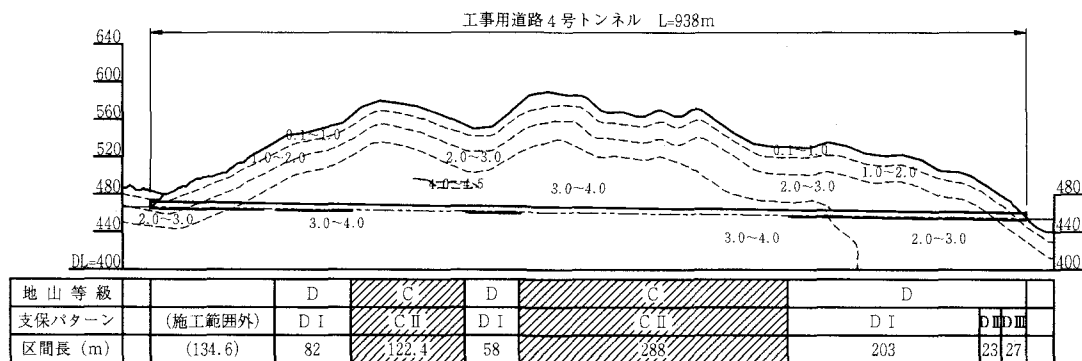
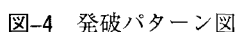


図-2 地山区分図

※1) 網掛け部分は、骨材転用対象区間を示す。
※2) 図中の数字は、換算弾性波速度(km/s)を示す。

試行発破パターンは、以下の6パターンとした。



ケース	概 要	総薬量 (kg)	火薬原単位 (kg/m³)	さく孔数 (孔)	さく孔原単位 (孔/m²)
Case 1	・太物含水爆薬（φ40）により、孔間隔と抵抗線を拡大（標準的な薬量は確保） ・最外周には、IC 雷管を用いた高精度スモースプラスチックを実施	41.6	0.67	52	1.00
Case 2	・Case 1 と同様に、太物含水爆薬（φ40）を使用するが、総薬量を標準的な使用量の 70% 程度に低減	29.8	0.48	46	0.88
Case 3	・装薬孔を狭い間隔で連続配置したラインカット手法を採用 ・通常含水爆薬（φ30）を使用	20.2	0.32	71	1.37
Case 4	・当該地山の亀裂性を考慮して、薬量およびさく孔数を低減 ・通常含水爆薬（φ30）を使用	27.2	0.44	65	1.25
Case 5	・平行孔心抜きを採用 ・起砕可能な限界までさく孔数を低減 ・通常含水爆薬（φ30）を使用	21.0	0.34	43	0.83
Case 6	・標準的な施工方法における粒径 40mm 超過率を検証	47.0	0.75	85	1.63

4. 粒度分布

(1) 粒度分布の代表値

掘削ずりの粒度分布を把握するために、粒径 40mm 以上の超過率を代表値として測定した。

各発破パターンにおける、粒径 40mm 超過率(T) は、(1) 式により算定した。

$$T = \frac{(V' \div \alpha)}{V} \quad (1)$$

ここに、

V' : 粒径40mm以上の山積み土量

α : 土量変化率 (=山積み土量/地山土量)

V : 地山土量 (=掘削支払断面積×延長)

の掘削分を対象とした。

土量変化率(α)については、(2) 式により算定した。

$$\alpha = \frac{(V_{40大} + V_{40小})}{V''} \quad (2)$$

ここに、

$V_{40大}$: 粒径40mm以上の山積み土量

$V_{40小}$: 粒径40mm未満の山積み土量

V'' : 転用率の検収対象地山土量
(=掘削支払断面積×延長)

(2) 検収結果

各発破パターンにおける、粒径 40mm 超過率の検収結果を表-2 に示す。

表-2 骨材転用率の検収結果

ケース	発破ずりの目視観察結果	粒径 40mm 超過率 T (%)	土量変化率 α	検収延長 (m)
Case 1	・孔間隔を広げた効果により大塊も多くなったが、細粒分もいくらか目立った ・大塊比率向上には、火薬量が過多と考えられる ・発破後のノミ跡がほとんど残らず、IC 雷管によるスムーズプラスティングの効果が見られない	67.3	1.390	7.2
Case 2	・Case 1 よりも大塊が多く見受けられたが、細粒分も目に付いた ・太物含水爆薬により広範囲へのクラック発生を期待できるが、装薬部近傍の岩盤は圧縮破碎されて粉々になり、その範囲は通常の $\phi 30\text{mm}$ の含水爆薬より広いと考えられる ・亀裂性の当該地山に対して、太物含水爆薬の使用は、大塊比率向上のためには不適と判断される	70.9	1.460	6.0
Case 3	・粒径 30cm 程度のものが多く見られ、全体的にそろった粒度のものが得られた ・孔当たりの火薬量を少なくしてさく孔数を増やした結果、孔間隔・抵抗線が縮まったことによると考えられる	72.1	1.387	7.2
Case 4	・火薬量およびさく孔数の低減により、破碎不良が心配されたが、当該地山においては、特に破碎不良は見られなかった ・亀裂性の当該地山において大塊比率向上のためには、装薬量およびさく孔数の低減が有効と考えられる	72.6	1.413	15.6
Case 5	・試行パターンの中で最も高い超過率となった ・亀裂が非常に発達した当該地山では、平行孔心抜きでも起砕可能であった ・当該地山においては、装薬量およびさく孔数の低減が大塊比率向上に有効であると判断される	79.1	1.450	33.6
Case 6	・標準的な施工方法における粒径 40mm 超過率を検収した結果、試行パターンの中で最も低い超過率となった	63.1	1.356	14.4

図-5 に、各発破パターンの総薬量と粒径 40mm 超過率の関係を示す。

この図より、粒径 40mm の超過率は 60～80% の範囲に分布しており、薬量が少ないほど掘削ずりの大塊比率が大きくなっていることがわかる。

図-6 に、さく孔数と粒径 40mm 超過率の関係を示す。

さく孔数が少ない、すなわち孔間隔が大きいほど大塊比率が高くなっていることがわかる。

図-7 は、各発破パターンの総薬量と 1 孔当たりの薬量の関係を示したものに、それぞれの粒径 40mm の超過率を併記したものである。

今回試行した発破パターンでは、薬量の増減を単にさく孔数だけの増減で加減したのではなく、1 孔当たりの装薬の増減でも調整している。

同図では、総薬量を全さく孔数で除しているため、厳密に 1 孔当たりの薬量とはいえないが、概略的には 1 孔当たりの薬量が少なくなると、粒径 40mm の超過率が大きくなる傾向を示している。

以上より、薬量およびさく孔数を低減することによって、掘削ずりの大塊比率が高くなることがわかった。

すなわち、トンネルの発破掘削によるずりの粒度が、薬量およびさく孔数によりある程度制御が可能であると判断される。

5. 考察

発破による岩盤の破碎は、さく孔部付近では、大きな応力により圧縮破壊が起こりやすく、それより離れると引張破壊が卓越するようになる。

そのため、さく孔部付近では粒度が小さくなり、さく孔部より離れると粒度が大きくなりやすい。

また、火薬量が減れば、さく孔部近傍の圧縮破壊領域が小さくなることと、さく孔部から離れたところでの引張応力も低減するため、全体として発生する亀裂数が小さくなる。

さらに、さく孔数が少ないと、さく孔部近傍の圧縮破壊領域が全体として少なくなることも容易に理解できる。

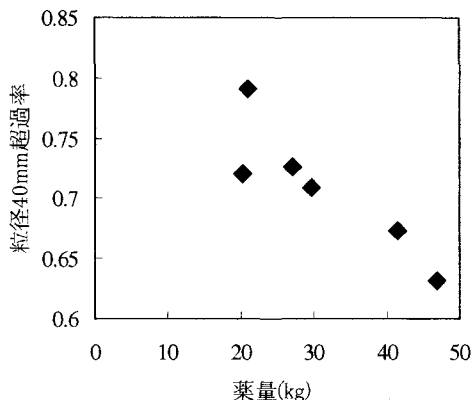


図-5 薬量と粒度の関係

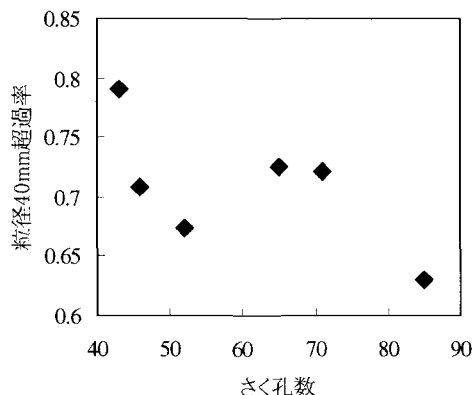


図-6 さく孔数と粒度の関係

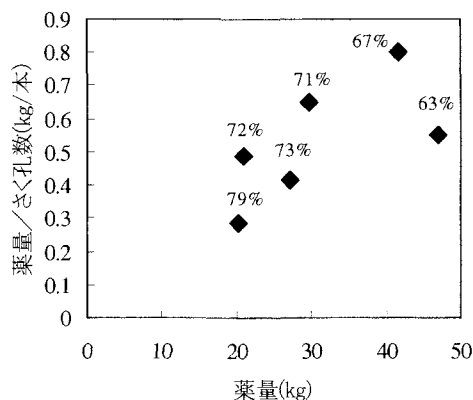


図-7 総薬量と孔当たり薬量の関係

これらの知見と本研究の測定結果は、定性的に一致している。

次に、図-8に他現場で計測した発破ずりの粒度分布²⁾に、今回計測した40mm超過率の結果を合わせて示した。

図中に示す青海トンネルは、亀裂の発達が顕著な石灰岩地山であり、ねざめトンネルは、亀裂が少なく一軸圧縮強度が120N/mm²と強固な花崗岩地山であった。また、発破諸元の比較を表-3に示す。

図-8によれば、利賀ダム工事用道路4号トンネルにおける粒径40mm超過率の測定結果は、青海トンネルとねざめトンネルの間に分布している。

すなわち、掘削ずりの大塊比率は、青海トンネルよりも大きく、ねざめトンネルよりも小さいことが分かる。

工事用道路4号トンネルにおいては、火薬量およびさく孔数の低減によって、大塊比率が向上する結果となった。

しかし、表-3から分かるように、ねざめトンネルの火薬原単位およびさく孔原単位は、比較3現場の中で最も大きい値となっている。

これらより、発破掘削ずりの粒度分布は、火薬量およびさく孔数のみに依存するわけではなく、地山特性や亀裂性状にも依存することが理解できる。

6. まとめ

利賀ダム工事用道路4号トンネルという固有の地山条件ではあるが、トンネル掘削における発破ずりの粒度分布に関して、以下の結果が得られた。

- ①トンネルの発破掘削によるずりの定量的な粒度データを得ることができた。
- ②発破パターンとしての薬量やさく孔数と発破掘削ずりの粒度の関係が把握できた。
- ③発破パターンによるトンネル掘削ずりの粒度制御がある程度可能であることが分かった。

なお、発破掘削ずりの粒度には地山の亀裂特性が大きく影響すると考えられるが、今回の粒度測定区間においては、岩盤等級および割れ目性状がトンネル延長方向で大きな変化のない地山であったため、地山の亀裂特性との関係は検証できなかった。

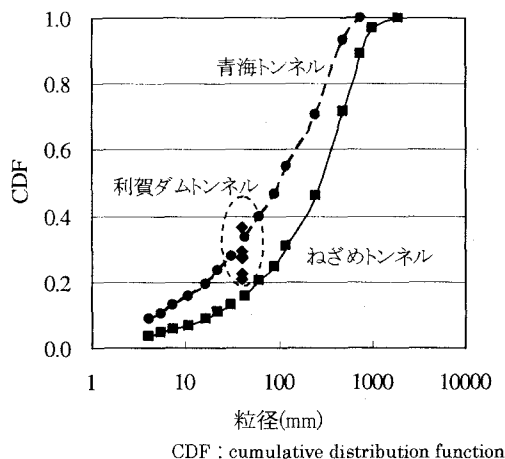


図-8 他現場の粒度分布との比較

表-3 発破諸元の比較

トンネル名	火薬原単位 (kg/m ³)	さく孔原単位 (孔/m ²)
青海トンネル	0.4	1.37
ねざめトンネル	1.8	2.60
工事用道路4号トンネル	0.3~0.8	0.83~1.63

今後は、トンネル掘削ずりを有効利用するために、多様な地山での粒度測定を行って、データを整備していくことが重要と考える。

また、今回は粒度分布の代表値として粒径40mm超過率を用いたが、既報²⁾でも利用した画像処理による粒度分布測定等も活用して、情報量の多いデータとして蓄積していくことも今後の課題である。

参考文献

- 1) 金子，趙：発破における岩盤破碎プロセス，資源・素材学会秋季大会講演要旨集(A)(B)，pp.113-116，2002
- 2) 福井，陳，大久保，皿田：トンネル掘削における粒度分布，資源と素材，Vol.119，pp.640-646，2003