

掘削ずりのコンクリート骨材への有効利用

Utilization of Muck as Concrete Aggregate

福井勝則¹⁾・大久保誠介¹⁾・吉野隆之²⁾・小崎一郎³⁾

Katsunori FUKUI, Seisuke OKUBO, Takayuki YOSHINO, Ichiro KOSAKI

Effective utilization of tunnel muck was discussed. In the system proposed by the authors, the muck is reused as concrete aggregate and the muck waste is considerably reduced. This muck utilization system was examined from economical and technical viewpoint. As the results of carefully investigation of tunnel muck, it was found that relatively small particle was short and the shape was not appropriate to concrete aggregate. Therefore the tunnel muck cannot be used directly as concrete aggregate and, at least, a simple crushing plant with an impact crusher and screens is necessary. The muck was gathered in a tunnel and several experiments and testing including crushing, sieving and quality verification were conducted to obtain the data required to discuss the feasibility of this system. Finally, it was found that utilization of tunnel muck as concrete aggregate is possible with reasonable benefit.

Key words: tunnel, concrete, muck, aggregate, crusher

1. はじめに

トンネル掘削で発生するずりは路盤材などに利用されているものの、その多くは谷や海岸に処分されている。近年、処分場が環境問題から制約され、ずりの運搬距離が50kmにも及ぶ例もあり、ずりの処分は難しくなっている。そのため発生したずりを有効利用し、なるべく処分量を低減する必要性が高まってきた。

掘削ずりの利用価値に比べ輸送費が比較的高いため、外部にその利用を求めるのは難しい。そこで、トンネル壁面の吹付および覆工コンクリート用骨材として利用できるかどうかについて技術的・経済的観点から検討することとした。この場合、通常の砕石業と異なる点は次の2つである。第一は骨材の購入費とずりの処分費の合計に対して、骨材として利用した場合の経費の方が安価であれば経済的に成立するため、砕石業での採算に比べ、ずりの処分費の分だけ有利である。第二は砕石業に比べ処理する量が少ないため、プラントなどの設備費をおさえる必要があり、安価なプラントでずりから骨材へと改良する必要がある。

本研究ではまず想定される条件を整理し、簡易的な砕石プラントを提言し、プラントで生成される骨材量と粒度分布を数値計算で検討する。次に事例としてトンネルで採取したずりの破碎を行い、実績率など骨材として使用できるかどうかを調べた結果について述べる。

1) 正会員 工学博士 東京大学 工学系研究科 地球システム工学専攻

2) 正会員 佐藤工業株式会社 土木本部 技術部門 地下空間グループ

3) (株)大同機械製作所 新事業開発部 企画室

2. 有効利用のための条件

(1) 骨材

コンクリート用骨材となるためには、吸水率、絶乾比重、実績率、強度特性などの条件を満たす必要がある。このうち、吸水率、絶乾比重や強度は岩盤固有の特性であるため、必要な条件を満たしていることを前提とする。条件を満たさない場合でも、他の骨材とブレンドすることによって利用できる可能性もあるが、条件が複雑となるため、今後の課題とする。

トンネルにおける吹付および覆工用コンクリートの配合例（八甲田トンネル）を表-1に示す。覆工コンクリートとしては標準的な配合¹⁾である。吹付コンクリートの配合は明確な規格がなくトンネルによって多少異なり、表-1に示した吹付コンクリートの配合は比較的高品質な配合であるが、本研究では表-1に基づくことにする。

骨材は表-2の粒度分布を想定する。覆工コンクリートの粗骨材は4005とし、吹付コンクリートの粗骨材は八甲田トンネルで使用した骨材の粒度を用いることにする。細骨材はJASS5に従うとした。

5つのトンネルにおける支保分類CⅡ（日本道路公団式）相当の覆工および吹付コンクリートの使用状況を表-3に示す。図-1にトンネル1mあたりのずり発生量と骨材使用量の関係を示す。図-1に示した例ではトンネル断面積は23～171m²と小断面から大断面のトンネルを包含しており、概略的にはずりの発生と骨材使用量とは直線関係があり、骨材使用量とずり発生量との関係は次式で表される。

覆工コンクリート 骨材使用量=0.16×ずりの発生量

吹付コンクリート 骨材使用量=0.08×ずりの発生量

骨材の種類ごとに分けると次のようになる。

表-1 コンクリートの配合（八甲田トンネル）

種別	水セメント比	細骨材率	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
			1m ³ あたりの質量 kg				
覆工	60%	45%	270	162	812	1,056	3
吹付	48%	63%	453*	216	1,080	640	1.8

* シリカフューム 18kg, 石灰石微粉末 93kgを含む。

表-2 想定した骨材の粒度分布

粒径(mm)	粗骨材(覆工)		粗骨材(吹付)	細骨材	
	max	min		max	min
50	1				
40	1	0.95			
20	0.7	0.35			
10	0.3	0.1	1	1	
5	0.05	0	0.48	1	0.9
2.5			0.05	1	0.8
1.2				0.9	0.5
0.6				0.65	0.25
0.3				0.35	0.1
0.15				0.1	0.02

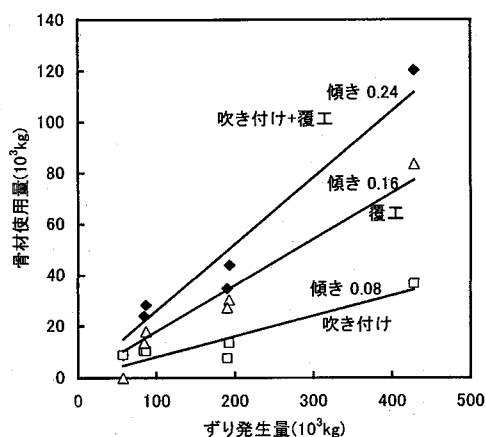


図-1 トンネル1mあたりのずり発生量と骨材使用量(CⅡ断面)

表-3 覆工および吹付コンクリートの使用状況の例（岩盤分類CⅡ）

用途		2車線道路	3車線道路	鉄道単線	新幹線複線	水路	作業横坑
断面積(m ²)		77.1	171.2	33.7	76.1	34.6	22.9
発生ずり重量(t/m)		193	428	84	190	87	57
覆工用 コンクリート	厚さ(cm)	30	60	30	30	40	なし
	インパート厚さ(cm)	50	80	30	30	40	
	コンクリート体積(m ³ /m)* ¹	16.3	44.7	8.3	14.6	9.6	
	粗骨材(t/m)	17.2	47.2	7.7	15.4	10.2	
	細骨材(t/m)	13.2	36.3	5.9	11.9	7.8	
吹付用 コンクリート	厚さ(cm)	20	35	10	10	20	20
	コンクリート体積(m ³ /m)* ²	7.9	21.4	6.1	4.4	6.0	5.1
	粗骨材(t/m)	5.0	13.7	3.9	2.8	3.8	3.3
	細骨材(t/m)	8.5	23.1	6.5	3.8	6.5	5.5

*1 余巻率 1.3 とした単位長さあたり

*2 余吹率 2.0 とした単位長さあたり

覆工用粗骨材=0.09×ずりの発生量

吹付用粗骨材=0.03×ずりの発生量

細骨材=0.12×ずりの発生量 (1)

吹付と覆工コンクリート用骨材を併せると、ずり発生量の24%である。

(2) ずりの粒度分布

掘削ずりの粒度分布は Rosin-Rammler 分布で近似されることが多い²⁾。

$$CDF = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{D}{L} \right)^n \right\} \quad (2)$$

CDF は粒径 D 以下の累積質量確率、 L は粒度特性数、 n は均等数である。

発破で掘削したトンネルのずりの粒度分布²⁾を図-2に示す。式(2)に当てはめると、 $L=500\text{mm}$ 、 $n=0.7$ である。

破碎効率や機械の小型化を考えた場合、破碎に利用するずりはなるべく小さい方が経済的に有利であるため、粒径の小さいずりを骨材に利用することを考える。破碎により得られたものがすべて利用できるわけではないため、掘削ずりの粒度分布が図-2の近似曲線に従うとし、骨材への利用率（＝骨材量／破碎に利用するずり量）が60%、70%、80%、90%と変化した場合に、破碎に利用する最大粒径と、ずりに対する骨材の比率を図-3に示す。例えば、(1)に示したずりに対する骨材の比率が24%の設定であれば、利用率90%で75mm、60%で140mm以下のずりの利用をすることで必要なずりが得られる。図-2は比較的強固で亀裂の少ない花崗岩での結果であり、亀裂が多数存在した場合や軟弱岩盤であっ

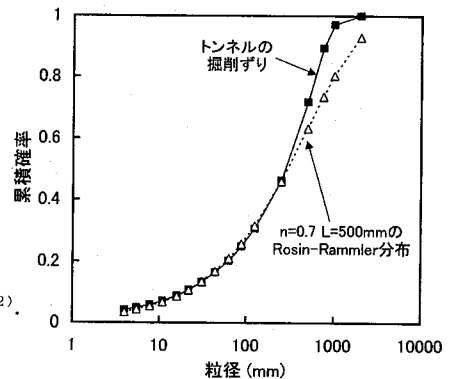


図-2 トンネルの掘削ずりの粒度分布。
実線は実際、破線は式(2)で近似。

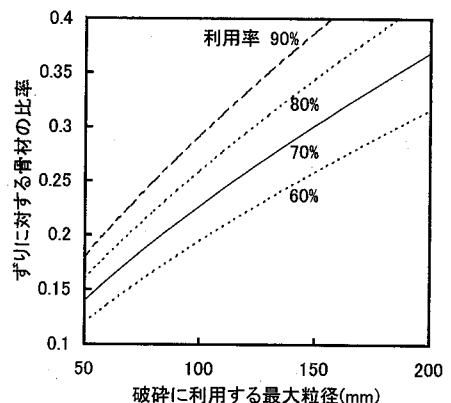


図-3 ずりに対する骨材の比率と最大粒径の関係。図-2の粒度分布を仮定した場合。

た場合に粒度が小さくなる（ L は小さくなる）が、図-3 に示した結果から、より小さい粒径のずりを利用することで必要の骨材が得られる。なお、支保分類が変化すれば、ずりの発生量に対する骨材使用量も変化するが、図-3 をもとにすれば対応は可能となる。

(3) 破碎装置

(1) で述べたように、骨材の割合は、覆工用粗骨材：吹付用粗骨材：細骨材＝0.375：0.125：0.5 となる。これと表-2 の粒度分布を組み合わせ求めて求めた全骨材の粒度分布を、図-4 の破線に示す。表-2 の覆工用粗骨材と細骨材は粒度分布に幅があるため、それぞれ最大、最小の組み合わせで図-4 は求めた。この破線に近い特性であれば1つの破碎機ですべての骨材を得ることができるため、経済性が高い。図には、式(2)で $n=0.7$, $L=6\text{mm}$ の粒度分布を示したが、この付近の特性が望ましい。

図-5 に各種破碎機の破碎特性を示す。図は日本建設機械要覧³⁾ に示された破碎物の粒度分布を式(2)に当てはめた結果である。図-5 から L を満足する破碎機としては、インパクトクラッシャあるいはコーンクラッシャが比較的、近い特性を有することがわかる。両者の n を比べると、インパクトクラッシャの n の方が小さく、図-4 に近いことからインパクトクラッシャが今回の条件では最も適合している。また、(2)より百数十 mm 以下の利用に限られるため、大型のジョークラッシャを用いる必要がなく、インパクトクラッシャだけで破碎が可能である。例えば、比較的小型のインパクトクラッシャであるバルボマチッククラッシャ 975HD, 1145（大同機械製作所製）では最大供給径はそれぞれ 127, 165mm であり十分破碎が可能である。インパクトクラッシャは、通常、二次、三次破碎だけでなく、整粒用クラッシャにも用いられているため、骨材の実績率の改善にも役立つ。機械の大きさにより、最大供給径がある程度規定され、それ以下の粒径のものを給鉱する。粒径の大きなものが破碎されやすく、小さいものは破碎されにくいので、得られる粒度分布に供給物の粒度分布はあまり依存しない。ただし打撃によって破碎するため、供給物の力学的特性（強度など）によって破碎物の粒度分布は多少変化するので、処理プラントでは供給物の力学的特性の変化した場合に対処が必要となる。

3. 処理プラント

図-6 のような処理プラントを想定した。

- 1) 傾斜式の金網①で所定の粒径以下のずりを収集し、所定の粒径以上のずりは従来通り処分する。
- 2) 所定の粒径以下のずりをインパクトクラッシャ②に投入し、破碎する。

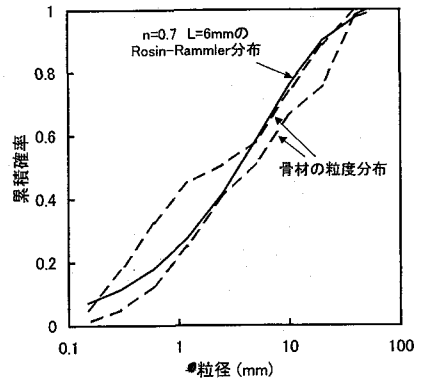


図-4 骨材の粒度分布。破線は最大値と最小値を表し、実線は式(2)で近似。

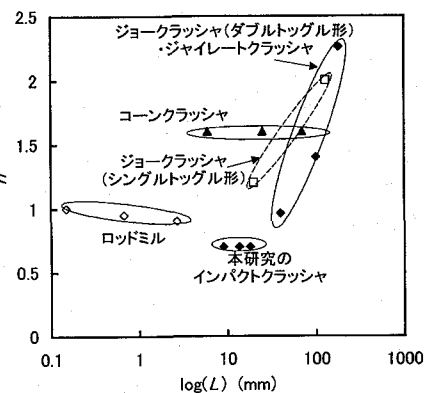


図-5 各種破碎機の破碎特性

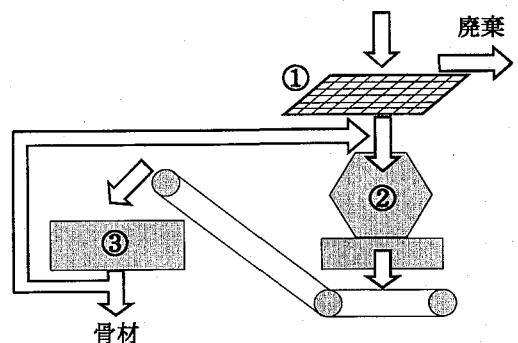


図-6 処理プラントの概要

3) 振動式ふるい③でふるいわけを行う。

4) 50mm 以上の破砕物は再度、2)へ。10mm～50mm の破砕物のうち、一部を 2)へ。

5) 細骨材、吹付および覆工用粗骨材の3種類の骨材を生成する。

細骨材が不足ぎみとなることから10mm～50mmの一部を再度、破砕する回路とした。このとき、10mm～50mmの破砕物のうち、再度破砕する確率（再投入率）を r とする。クラッシャで破砕物の粒度分布は Rosin-Rammler 分布であるとする、変数は n と L の2つとなる。3つの変数 n 、 L 、 r を変化させ、処理プラントで得られる破砕物の粒度分布を計算し、投入したずりに対して必要な骨材がどの程度有効に利用できるかを計算した。具体的には、利用率と表-2に基づき、吹付用粗骨材を取り除き、覆工用粗骨材および細骨材が必要な量を確保しながら、表-2の粒度分布を満たすかどうかを吟味した。

計算の結果、 n が同じである場合、 L が大きくなると細骨材の量が不足するか、あるいは細骨材の粒度分布の条件を満たさなくなる。逆に L が小さくなると、覆工用粗骨材の量あるいは粒度分布の条件を満たさなくなる。そのため、 n および L には最適値が存在することがわかった。

図-7(a)に $r=0$ （再投入なし）の場合の計算結果を示す。実線で示した右下がりの曲線は細骨材の量あるいは粒度分布を満足する条件であり、破線で示した右上がりの曲線は粗骨材の量あるいは粒度分布を満足する条件である。図には利用率を変化させた場合も記述した。例えば、利用率90%であれば、斜線で囲まれた範囲に n および L が存在する必要がある。利用率を低下させると、満足する n 、 L の範囲は広くなる傾向がある。図では n が小さいほど（粒度分布が広がっているほど）、 L の適用範囲が広がっている。図-7(b)に $r=0.5$ の場合の計算結果を示す。 r を0から0.5に変化させると全体的に図は右側（ L が大きくなる方向）にシフトする結果となった。

インパクトクラッシャの場合、供給物が同じであれば n はさほど変化せず、周速を変化させることによって L はある程度の調整は可能である。そこで、 $n=0.7$ の場合の再投入率と L を変化させた場合の結果を図-8に示す。 L が比較的大きくても再投入率を調整することにより、骨材の生成は可能となることがわかる。例えば、利用率60%を想定した場合には、再投入率0の場合、 L は5～16mmであるが、再投入率0.4では L は7～27mmであり、 L が大きい方へ許容されていることがわかる。

4. 実証試験

新幹線トンネルの工事現場である長野県高社山トンネルから安山岩のずりを約300kg取得し、ふるい分けを行い、図-2の粒度分布（100mm以下）と同じものを3つ（1つあたり30kg強）作製した。

インパクトクラッシャは打撃板の回転速度によって破砕物の L が変化するため、打撃板の周速を41.4m/s、36.0m/s、30.6m/sの3通りで破砕試験を行った。また投入原料の粒度分布への影響を調べるため、40mm～80mm

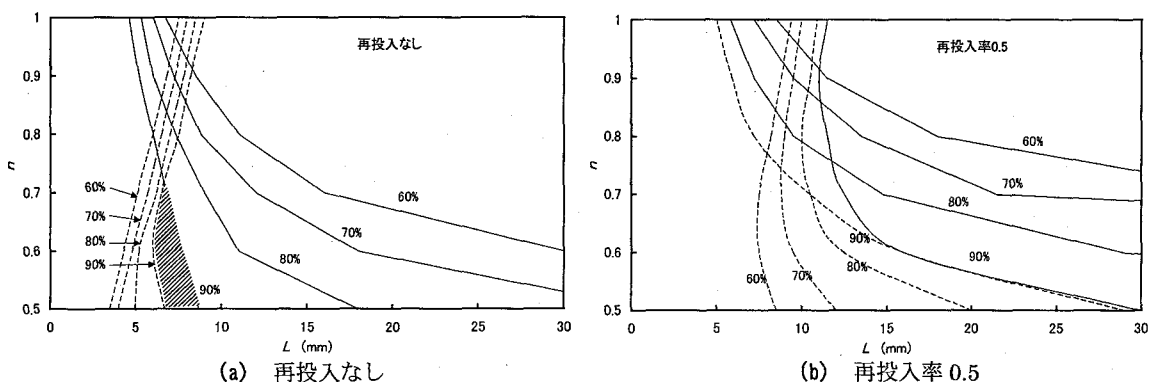


図-7 利用率ごとの n 、 L の範囲。実線は粗骨材、破線は細骨材の粒度分布を満足する条件

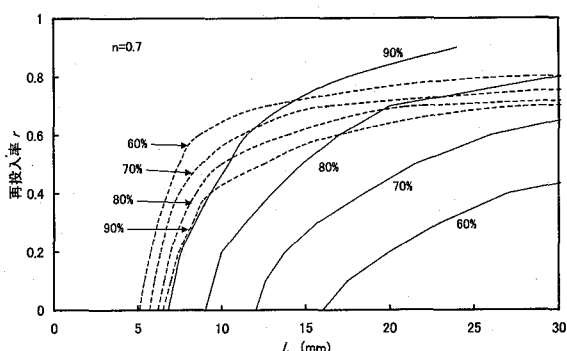


図-8 利用率ごとの r , L の範囲($n=0.7$)

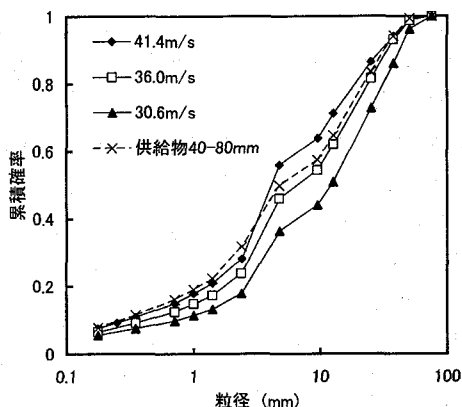


図-9 破碎物の粒度分布

の粒径で原料を1つ作製し、周速 38.0m/s で破碎試験を行った。粉碎試験後の4つのすりについて 0.177~76.2mm の13種類のふるいを用い、ふるい分けを行った結果を図-9に示す。実線が上から順に周速 41.4m/s, 36.0m/s, 30.6m/s で破碎したずりの粒度分布である。図では等間隔に曲線が位置しており、周速によって粒度分布が変化していることがわかる。式(2)に当てはめると、周速 41.4m/s, 36.0m/s, 30.6m/s とも $n=0.7$, L はそれぞれ 9mm, 13.5mm, 18mm となった。図-7の結果から再投入率が0の場合、周速 41.4m/s が最も高い利用率 80%であることがわかる。

破線は 40mm~80mm のものを周速 38.0m/s で破碎したものであるが、さほど実線の結果と変化しておらず、供給物の粒度分布の影響は少ないと考えられる。

上記で得られた生成物を骨材の規格に合致するように組み直して実績率の測定を行った。実績率の規格はそれぞれ粗骨材が 55%以上、細骨材が 53%以上であるが生成骨材はそれぞれ 61.8%, 66.4%と良好な結果であった。

5. まとめ

本研究では、簡易的なプラントでずりを骨材に有効利用できるかどうかについて検討を行った。発破で得られたずりの粒度分布から粗骨材は十分得られるが、細骨材が不足するため、粗骨材の整粒および細骨材の生成を兼ねた破碎を行うこととした。破碎は経済性を考え、小型のインパクトクラッシャー1台のみとするため、粒径百数十 mm 以下を利用することとした。実績率に関しては問題なく条件をクリアしており、吸水率、絶対比重などずりの物理的特性が骨材に利用可能であるならば、ずりの骨材への利用は可能であることがわかった。

ずりの廃棄費は地域によりかなり異なるため、経済性は個々の地域によって変化するものと思われるが、骨材 1t 当たり約 1,500 円、ずりの廃棄費 1t 当たりを仮に 1,000 円とすると、トンネル断面積 80m² で 1/4 を骨材に利用すると、トンネル 1m 当たりで削減できるずり廃棄、骨材購入にかかる費用は 125,000 円となる。トンネル延長を 1km とすると 1.25 億円の削減となり、経済性は成立するものと考ええる。

ずりの廃棄および骨材搬入用のトラックの台数の削減により騒音や CO₂ の削減にもつながることから、今後は実場への利用を促したいと考える。今回は硬質な岩盤発破のずりを対象としたが、TBM のずりも比較的硬質で利用しやすいと考えられ、この点も検討していきたい。

参考文献

- 1) 河野清, 田澤栄一, 門司唱: 新しいコンクリート工学, 朝倉書店, p.98, 1994
- 2) 福井勝則, 陳文莉, 大久保誠介, 皿田滋: トンネル掘削におけるずりの粒度分布, 資源・素材学会誌投稿中
- 3) 日本建設機械化協会編: 日本建設機械要覧, 技報堂, p.778-811, 1983