

ステレオ画像解析を用いた トンネル掘削ずりの粒度分布計測技術

横田 泰宏^{1*}・伊達 健介²・山本 拓治¹・阿子島 学³・高橋 裕信⁴・水口 祐司⁴

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²鹿島建設株式会社 北海道支店 (〒060-0003 北海道札幌市中央区北3条西3丁目札幌北三条ビル)

³鹿島建設株式会社 ITソリューション部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

⁴株式会社アプライド・ビジョン・システムズ (〒305-0031 茨城県つくば市吾妻2-5-1)

*E-mail: yokotaya@kajima.com

近年、トンネル掘削における発破ずりの二次利用が積極的に進められるようになってきた。しかし、発破ずりを盛土材やコンクリート骨材に利用するためには、その粒度分布を把握することが重要となる。これまで、発破ずりの粒度分布を求めるためには、現場ふるい分け試験やデジタルカメラを用いた画像解析が用いられてきたが、労力や時間の問題、安全や精度の問題などそれぞれ課題が指摘されている。

筆者らは、これらの課題を解決することを目的として、ステレオ画像解析を用いた発破ずりの粒度分布計測技術を開発し、岩石ずりを用いた室内試験から粒度分布を精度よく算出できることを検証した。

Key Words : particle sizedistribution, rock fragmentation, blasting, stereo camera

1. はじめに

近年、トンネル掘削における発破ずりの二次利用が積極的に進められるようになってきた。発破ずりを盛土材やコンクリート骨材に利用するためには、その粒度分布を把握することが非常に重要となる。しかしながら、発破直後は、照明もほとんどなく非常に暗い環境であることに加え、発破による後ガスと粉塵が切羽周辺に充満していることや、ガスの霧消後すぐにずり出し作業が開始されるため、計測にかけられる時間はほとんどないと言える。また、発破直後は切羽近傍に不安定な岩盤が分布している可能性が高く、堆積した発破ずりも不安定な状態で積み重なっているため、近寄って何らかのスケールを設置して粒度分布を計測することは安全の観点から問題がある。

従来技術を見てみると、一般的には発破ずりを事務所等へ持ち帰り、格子を用いたふるい分け試験が行われてきたが、この手法では多大な時間と労力が必要となることが明らかである(写真-1)。また、海外を中心としてデジタルカメラで撮影された画像から画像解析によって粒度分布を求める手法が提案されているが、発破直後の岩石ずりにスケールを設置する必要があること(写真-2)や、その解析原理から3次的に堆積した発破ずりの評価には限界があることなど、安全や計測精度の観点からいく

つかの問題点を指摘することができる。

そこで、筆者らはステレオカメラ(写真-3)で発破ずりを撮影し、ステレオ画像解析から対象物の3次元座標を算出して粒度分布を求める新しい計測手法を開発した。

本手法を用いることで、発破直後の岩石にスケールを設置する必要がなくなり、3次的に発破ずりが堆積していても精度よく粒度分布を算出することが可能となる。

本論文では、まず初めに新しい計測手法の原理を示す。次に、粒度分布が既知である岩石ずりを用いた室内試験によって計測精度を検証した。



写真-1 現場ふるい分け試験

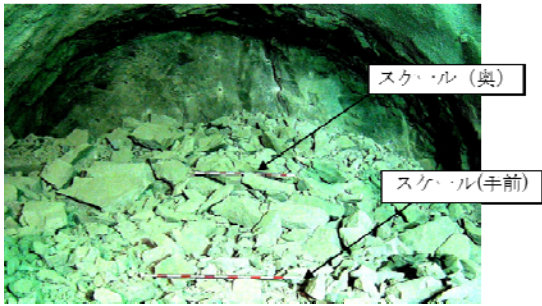
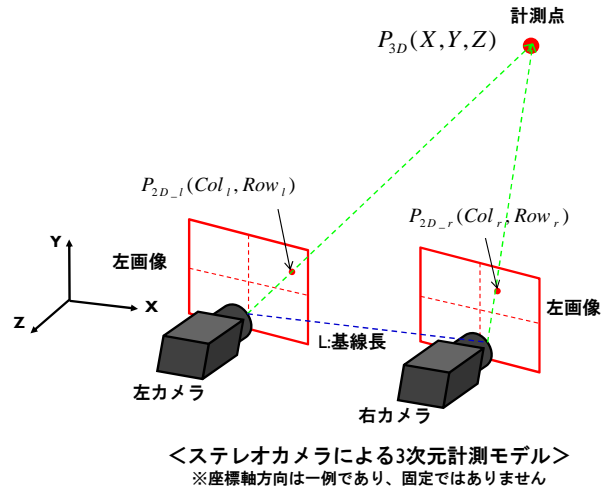


写真-2 デジタルカメラを用いた画像解析 (従来)



写真-3 ステレオカメラ

より三角形の内角・辺長を用いて位置関係を求め、計測点を算出する。ステレオカメラ計測の場合、2つのカメラの位置・姿勢と、各カメラの画像との関係(あらかじめカメラキャリブレーションによって情報を作成する必要があり)、各画像中の計測したい点の位置が分かれば、距離を求めることができる。



＜ステレオカメラによる3次元計測モデル＞
※座標軸方向は一例であり、固定ではありません

図-1 ステレオカメラによる三次元計測原理

2. ステレオ画像解析を用いたトンネル掘削ずりの粒度分布計測技術の概要

(1) 従来技術の問題点と新手法の概要

本手法は、ステレオカメラによる発破ずり撮影とステレオ画像を用いて対象物の三次元計測を行い、その位置座標を元に岩石径を算出および粒度分布の計測を行う技術である。従来のデジタルカメラとスケールによる粒度分布評価手法と比較して、スケールを設置する必要がないため迅速であり、かつ発破直後の危険な切羽やずりに近づく必要がないため安全性も向上する。また、計測精度の面でも、従来のスケールを設置する手法では、スケールを設置した地点におけるピクセルのスケール換算を行い換算値を奥行き方向に内挿および外挿することで対象物の岩石径を算出し、粒度分布を評価しているため、対象物が二次元平面に堆積している場合は良いが、発破ずりのように三次元的に堆積している場合は、最終的に求められる粒度分布の精度を確保することは難しいと考えられる。一方、新手法では、ステレオ画像解析により、対象物の三次元座標を求めることができる。そのため、三次元的に堆積した発破ずりであっても、精度良く発破ずりの粒度分布を算出することが可能となる。

(2) ステレオ画像解析原理

ステレオ画像解析の基本原理は、三角測量の原理と同様である(図-1)。つまり、図-1中の計測点と左右のカメラを結んで測量区域を三角形の組合せで示し、三角法に

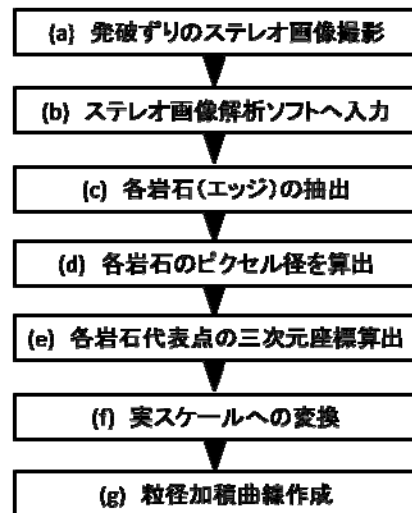


図-2 ステレオ画像解析を用いたトンネル掘削ずりの粒度分布計測フロー

(3) 新手法による粒度分布計測フロー

図-2は、ステレオ画像解析を用いたトンネル掘削ずりの粒度分布計測フローである。

a) 発破ずりのステレオ画像撮影

発破による後ガスと粉塵が収まった後に、ステレオカメラを用いて発破ずりのステレオ画像撮影を行う。従来技術のようにスケールを設置する必要がないため、安全かつ迅速な撮影が可能となる。

b) ステレオ画像解析ソフトへの入力

c) 各岩石(エッジ)の抽出

次に、撮影したステレオ画像をステレオ画像解析ソフト

トへ取り込み、各岩石のエッジを抽出する。抽出するエッジは岩石径を算出するためのものである。岩石の模様などをエッジとして誤抽出すると、本来の岩石径と異なる径（岩石が分割される）を求める可能性があるため、本手法では、様々なエッジ抽出方法がある中でも変化量が極端に大きい部分を抽出するラプラシアンフィルタを採用することにした。岩石同士の境界と岩石内の模様では岩石同士の境界の方が明らかに強い変化量を持つことが想定されるが、変化の弱い部分に関しては、輪郭線が切れ岩石のエッジが不連続な状態となってしまうことが懸念される。そこで、本手法では、求めたエッジ情報に対して連続性を持つエッジへの変換処理を加えることでそれらの問題点を解決した。

d) 各岩石のピクセル径を算出

次に、エッジを抽出した各岩石のピクセル径を算出する。本手法では各岩石のエッジに内接する最大円を求めて、その円の直径が対象とした岩石の粒径（ふるい分け試験において、ふるいを通過する粒径）とほぼ同等であると考える、各岩石のピクセル径とした。

e) 各岩石代表点の三次元座標算出

次に、各岩石のピクセル径を実スケールへ変換する際に必要となるステレオカメラから岩石までの実距離を算出するため、各岩石の三次元座標を算出する。理想的には全ての岩石において左右両カメラから対応点を取得し、岩石の三次元座標を求めることが望ましいが、発破ずりを対象とした場合、隣りあう岩石が重なり、影となる場合があるため、左右両方のカメラで同じ対応点を特定できないことが懸念される。これより、通常のステレオカメラを用いた三次元計測では計測が困難と考え、本手法では、まず初めに堆積物表面の三次元曲面モデルを作成し、その三次元曲面から、各岩石の三次元座標を求める手法を考えた(図-3)。三次元曲面モデルは任意に選択した複数点の三次元座標をステレオ画像解析により算出して作成される。各岩石の位置は手順c)で求めた岩石エッジで囲まれた領域の重心位置を採用する。重心位置は画像上の情報であるため、二次元画像上での位置であるが、三次元曲面が岩石画像と同じステレオ構成の情報より作

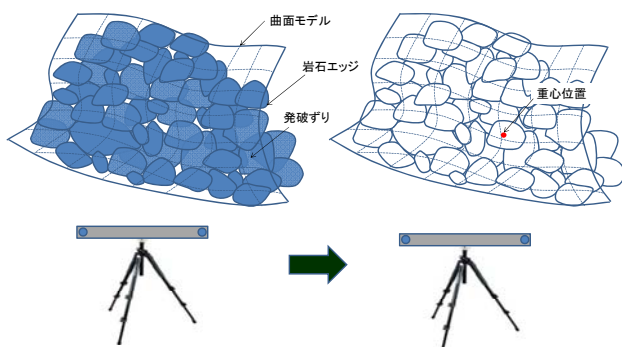


図-3 各岩石の三次元座標算出イメージ

成された上であれば、二次元画像位置より同三次元曲面への投影（二次元座標から三次元座標への変換）は可能であり、三次元座標を求めることができる。

f) ピクセル径から実スケールへの変換

手順e)で算出した岩石のカメラからの実距離(正確には三次元位置)と画像上のピクセル数の情報により式-1を用いて実スケールへ変換する。

$$R_m : R_p = \text{Distance} : \text{FocalLength} \quad (\text{式-1})$$

ここで、

R_m : 実スケールの岩石径

R_p : ピクセル単位の岩石径

Distance : 実距離

FocalLength : 焦点距離(ピクセル)

g) 粒径加積曲線の作成

最後に、実スケールで得られた岩石径から粒径加積曲線に相当する粒径ごとの堆積量加積率を算出する。粒径ごとの堆積量は式-2で表される。

$$V_{all} = V_{sr} \times N \quad (\text{式-2})$$

ここで、

V_{all} : 粒径ごとの堆積量

V_{sr} : 画像上で表面に見える岩石の体積

N : 推定岩石数

奥行きを L 、岩石径を R とし、全ての岩石が同じ奥行き L に均一かつ密に堆積していると仮定すると、推定岩石数 $N=L/R$ で表せる。式-2に代入すると、堆積量 V_{all} は画像中から算出される岩石の表面積と相関関係にあると考えることができる。

3. 室内試験による計測精度の検証

本章では、前章で説明したステレオ画像解析による粒度分布計測手法を用いて、事前にふるい分け試験を行って粒度分布が既知である岩石ずりを計測した。岩石ずりは写真-4に示すように発破ずりを模擬して三次元的に堆積させた。

図-4は、各岩石のエッジ抽出状況である。図-5は、得られた堆積量加積率とふるい分け試験から得られた岩石ずりの粒度分布を比較した結果である。これらの結果を見ると両者には最大で8%程度の誤差が生じているものの、類似した傾向の粒度分布曲線が得られていることが確認できた。本手法では、堆積量を考慮することで、画面上では見えない範囲の岩石を補正することを試みているが、今回用いた岩石ずり試料においては、重なった領域の岩

石ずりを上手く補正することができたものと考えられる。今後は、異なった粒度分布を持つ岩石ずりを用いて同様な室内試験を実施し、本手法の信頼性を向上させたい。



写真-4 発破ずりを模擬した岩石ずり



ラプラス処理後 エッジ抽出線の重ね合わせ

図-4 各岩石のエッジ抽出状況

4. おわりに

筆者らは、発破掘削ずりの粒度分布を安全かつ迅速に、そして高精度に算出する技術を開発した。粒度分布が既知な岩石ずりを用いた室内試験では、検証データが少ないものの高精度に粒径加積曲線を算出することができた。写真-5は、本手法を現場で使用した状況写真である。発破直後の切羽や発破ずりに近づく必要がなく、安全かつ迅速に計測ができることを確認した。今後は粒度分布が既知である室内試験を実施していくとともに、現場での適用事例も重ねていく所存である。



写真-5 現場でのステレオカメラ撮影状況

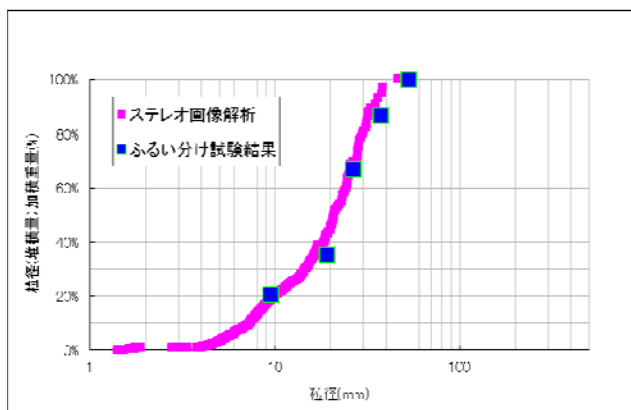


図-5 画像解析結果とふるい分け試験結果

参考文献

- 1) 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粒度分布, 資源と素材, Vol.119, pp.640-646, 2003.
- 2) 廣島隆, 大久保誠介, 福井勝則, 籠橋広文, 西崎晶士: トンネル掘削における発破ずりの粒度分布, トンネル工学報告集, 第14巻, pp.181-186, 2004.

MESUREMENT TECHNIQUE OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF ROCK FRAGMENTATION BY THE BLASTING USING STEREO IMAGE PROCESSING

Yasuhiro YOKOTA, Kensuke DATE, Takuji YAMAMOTO, Manabu AKOSHIMA, Hironobu TAKAHASHI and Yuji MIZUGUCHI

Recently, more attention has been paid to secondary use of rock fragmentation by the blasting in tunnel excavation. However, it is important to evaluate that the particle size distribution to utilize the fill material or concrete aggregate. Until now, in order to determine the particle size distribution, sieve analysis and image analysis using a digital camera have been used. But the problems about measurement time, accuracy and safety have been pointed out. So we have developed the measurement technique of particle size distribution using stereo image processing. According to the laboratory test, we found that this newly-developed measurement system could evaluate the particle size distribution accurately.