

火山角礫岩の三次元粒径分布特性

Three-dimensional clast-size distribution of volcanic breccia

長田昌彦*・吉中龍之進**・五月女 敦***・杉山弘泰***

Masahiko OSADA, Ryunoshin YOSHINAKA, Atsushi SAOTOME, and Hiroyasu SUGIYAMA

As a preliminary study for determining mechanical properties of volcanic breccia in laboratory and field experiments, three-dimensional clast-size distribution was estimated for the study site using the theory of stereology. Using this distribution determined, a numerical simulation was performed to investigate the relationship between the volumetric proportion of clasts in a sample and the areal proportion and maximum length of clasts on a lateral surface of the sample. The following results important for the practical evaluation of the volumetric proportion were obtained: 1) the coefficients of variation for volumetric proportion became large when the size of the sample was small; 2) the samples with a small coefficient of variation could be selected at any size if a restriction was placed on the ratio, D_{max}/D_0 , of the maximum length of clasts to the size of the sample; 3) the volumetric proportion of clasts in each sample could be estimated from the observed areal proportions within an error range that depended on the whole volumetric proportion.

Key Words: volcanic breccia, clast-size distribution, stereology, scale effect

1. はじめに

火山角礫岩は不均質な岩石の代表的なものである。東北日本には火山岩や火山砕屑岩が広く分布しており、特に中新世初期～中期の岩石は変質により淡い緑色を呈することが多いので、グリーンタフ地域と呼ばれている。グリーンタフ地域の地層は、火山角礫岩からなる層を多く含む。この火山角礫岩は硬い礫と軟らかいマトリクスからなるので、力学的にも、また構成材料的にも不均質な岩石である。近年、このような火山角礫岩上への構造物の建設が増えてきている。不均質な地盤材料を構造物の基礎として利用する場合、その力学的な物性を室内実験および原位試験によって得る必要がある。

全体としての礫岩の強度変形特性に大きな影響を与える要因としては、マトリクスの物性と礫の体積礫含有率であることがメランジュの研究や人工礫岩の研究¹⁾から明らかとなっている。しかし実際には、体積礫含有率を決めることも難しい。一つには、礫を完全に分離することが難しいために、篩い分けによつての決定が困難であること、もう一つはいろいろなスケールで礫が現われるためにどこから礫として、あるいはマトリクスとして評価するべきなのかがはっきりしないためである。また室内試験を実施する場合、礫の大きさに対してどの程度の大きさの供試体を用いれば、原位置の物性値を代表する試験結果が得られるかについてもよくわかっていない。

そこで本研究では、試掘坑壁面における2次元的な粒径分布から3次元的な分布を推定し、その特性を議論する。またこれをもとに適正な供試体寸法をどのように定めるべきかについて議論する。

* 正会員 博士(工学) 埼玉大学 工学部 建設工学科

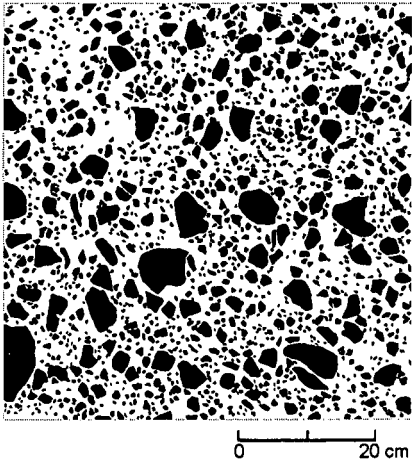
** 正会員 工学博士 埼玉大学 工学部 建設工学科

*** 正会員 工学修士 電源開発(株) 建設部

2. 礫径分布特性

対象とした地層は、新第三系中新統の浅海性の安山岩質火山活動によって形成されたと考えられている火山角礫岩であり、ほとんどの礫は、主に円形または楕円形状でランダムに配列した発泡構造をもつ安山岩片である²⁾。

対象領域に対する粒度分布を評価するために、試掘坑の壁面に現われる礫の個数分布から粒度分布を推定する。しかし試験面積を十分に広く取った場合、断面に現われる礫率と3次元空間内の礫率は一致するものの、2次元断面における粒径分布と3次元中における粒度分布は必ずしも一致しない。ここでは礫を球形と仮定して、古くから行われているステレオロジーを用いて2次元的な礫径分布から3次元的な礫径分布を推定する。



図—1 壁面スケッチ(二値化画像)

(1) 2次元分布

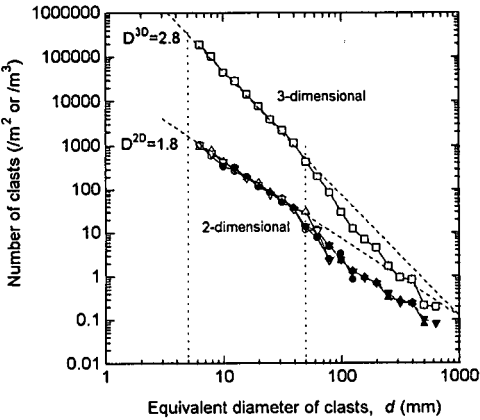
計測方法は、まず表—1 に示した異なる4つの面積領域をもつ6つの領域で、礫をトレースする。このとき個々の領域は領域中の礫の最大長径が領域面積の平方根の1/5となるように選んだ。同表に示すような長径の計測限界値を定めて、1m²以下の領域では平滑にした壁面上に現われた礫をOHPを用いてトレースし、それ以上の領域では合成写真を作成して、礫をトレースした。トレース図は図—1 に示すような二値化画像に変換され、各礫の長径・短径・面積を画像解析により求めた。図—1 から、礫の長径に顕著な異方性は認められないことがわかる。また礫の長径と短径の比を計算すると、ほとんど2以下となる。

このようにして求められた断面積の測定値をクラスに分割する。クラスの分割方法は、Saltykovの方法³⁾に従い、断面礫径を対数で0.1刻みとした。断面礫径には各礫の断面積と等価な円の直径を用いた。各クラスの最大礫径に対する礫の個数分布を1m²当りの個数分布を換算したものが図—2 である。これより、領域面積を変えて計測した結果であるが、ほぼ一つの曲線上にのっていることがわかる。50mm以下の礫については、両対数グラフ上でほぼ直線関係が成り立っているが、それ以上の大きさの礫では礫の個数が減少する傾向にあり、バラツキが大きくなっている。

堆積岩や破碎岩の粒径分布については、しばしば対数正規分布やフラクタル性があることが認められている。このような性質をもつ場合、図上では直線的な関係となるが、この火山角礫岩については50mm以下の直線的な部分での傾き、すなわちこの区間でのフラクタル次元(相当)は1.8程度となるが、それ以上の礫についてはこの直線よりも下側に位置しており、大きい礫の個数がフラクタル的な分布よりも少ないことがわかる。

表—1 観察領域

No.	領域寸法 m × m	面積 A, m ²	計測限界 mm	最大礫径 D _{max} , mm	礫個数, N
1	0.6×0.6	0.36	5	114	1,611
2	0.6×0.6	0.36	5	98	1,616
3	0.6×0.6	0.36	5	80	1,396
4	1.0×1.0	1.00	10	146	1,498
5	2.5×10.0	25.0	50	650	360
6	3.5×14.0	49.0	50	877	792



図—2 1m²及び1m³当りの個数分布

(2) 3次元分布

図—2 に示した 2 次元断面における個数分布について各クラスでの平均値を求め、この平均値に対する 3 次元的な礫径分布を Johnson-Saltykov の方法に基づいて次のように計算した。

まず各クラスの平均断面面積としてクラス上下端の直径の平均値を用いて計算した値を用い、 1 m^2 当りに占める各クラスの礫の割合を求める。次にこれを Johnson-Saltykov 法の一般式³⁾、

$$V_V(i) = \frac{A_A(i) - 0.13109A_A(i-1) - 0.04377A_A(i-2) - \dots - C_K A_A(K)}{0.79916} \quad (1)$$

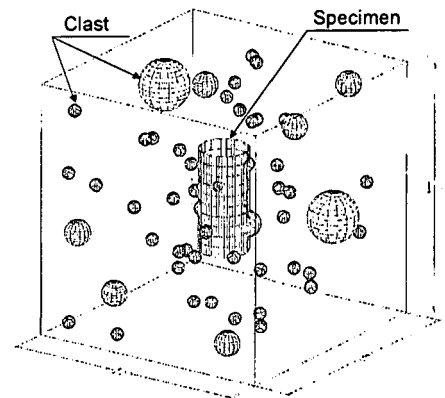
ここで、 d は最大礫径、 i はクラス、 $N_A(i)$ はあるクラスに含まれる単位面積当たりの礫個数、 $A_A(i)$ はあるクラスの代表断面面積、 $A_A(i)$ はあるクラスの面積礫含有率、 $N_V(i)$ はあるクラスに含まれる単位体積当たりの礫個数、 $V(i)$ はあるクラスの代表体積、 $V_V(i)$ はあるクラスの体積礫含有率、 A_A は全体としての面積礫含有率、 V_V は全体としての体積礫含有率である。

に代入して、各クラスごとの体積礫含有率を計算した。この式の意味するところは、あるクラスの大きさの粒子はそのクラスの円形断面を形成する確率が最も高いが、それより大きいクラスの粒子が切られてそのクラスの円形断面となって現われるため、その寄与分を順次確率的に削除して対象とするクラスの粒子だけの寄与分を求めようとするものである。ここで C_K は単一の粒子径からなる場合の円形断面の交差確率であり、粒子の大きさに依存しない。また () 内が 0 以下の場合 $A_A(i)$ の値は 0 とする。

このように計算して求めた面積礫含有率 (A_A) と体積礫含有率 (V_V) はほぼ等しくなっている。 1 m^3 中の礫の個数を得るためには各クラスを代表する粒子体積が必要であるが、ここでは各クラスの断面礫径の最大値を各クラスの球を表わす代表直径として計算すると、各クラスにおける球の直径の個数分布は図—2 のようになる。 50 mm 以下の直線部分の傾きはおよそ -2.8 であり、2 次元でのフラクタル次元に 1 を足したものとなっている。 50 mm 以上の礫の個数が少ないことは 2 次元の場合と同じである。

3. 礫含有率の評価と最大礫径との関係

既往の試験方法に従えば粒径が供試体直径の $1/10$ 以下になることが望ましいが、上記のように礫径が変化に富む場合には実質不可能である。そこでこのような粒径分布であった場合、室内試験において物性を求めるにはどの程度の大きさの供試体を準備すればよいかについて検討しておく必要がある。ここではその目安を求めるために、推定した三次元的な礫径分布を用いて、数値シミュレーションによる検討を試みた。



図—3 モデル図

(1) 計算方法

解析モデルは図—3 に示した概念図のように、一辺 1 m の立方体中に、先の礫粒度分布から得られた各クラスの礫の個数を整数値にまらめて、一様乱数により重複しないように発生させたものである。このとき図—3 の中で礫の存在確率が 0.5 以下のクラスの礫は含まれていないものとした。モデル中の体積礫含有率は 47.4% である。

このモデル地盤を径の異なるボーリングビットでサンプリングする場合を想定して、直径 $5, 10, 20, 30\text{ cm}$ で直径：高さ比が $1:2$ となる円柱 (図—4 参照) をモデル内にランダムに発生させ、その側面に現われる面積礫含有率と内部に含まれる体積礫含有率、および側面に現われる最大礫径の値を算出する。サンプリング本数は、各供試体直径における体積礫含有率の平均値をほぼ一定にするために、サンプリングする全体積が同じになるように定

めた(表—2).

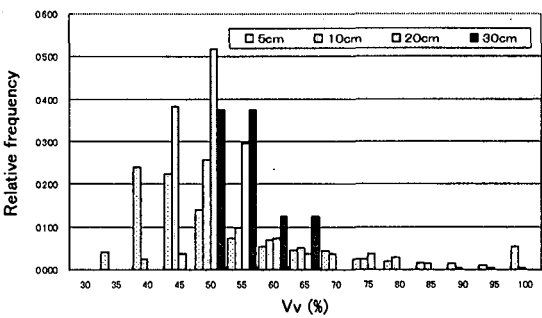
(2) 計算結果

解析結果を表—2 に示す. 各供試体直径に対する体積礫含有率の平均値は $50.61(\pm \sigma=1.43)\%$ となっており, 確かに供試体直径によらずほぼ一定の値となっている. ただしモデルの設定により, 解析モデルの体積礫含有率よりも大きな値となっていることに注意が必要である. 各供試体径ごとの解析結果を体積礫含有率の頻度分布で表わすと図—4 のようになる. 全体的な分布の特徴は, 非対称であること, また供試体径が大きくなると尖度が大きくなっていくことである.

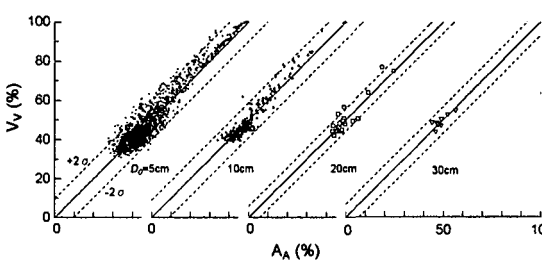
ところで実際に計測できる量は, 体積礫含有率ではなく, 面積礫含有率である. そこで面積礫含有率でどの程度体積礫含有率を推定できるかを確認するために, シミュレーション結果から図—5 の関係を求めた. 図より礫率が 60% を超える場合には, 面積礫含有率では体積礫含有率を過小に見積もる可能性が高いが, 全体としては面積礫含有率により体積礫含有率を約 $\pm 10\%$ の精度で推定できていることがわかる. ただし小林ら¹⁾は礫含有率が小さくなると変動係数が大きくなることを報告しており, 礫率が小さい場合にはこの精度は保証されないであろう. 結局, 粒度分布は個々の岩石の種類に依存するので, 上記のような方法により個別に検討することが望ましい. 精度については礫率と粒度分布により変化すると考えられるが, その精度の範囲内で面積礫含有率により体積礫含有率を推定できると考えられる.

供試体径が小さくなると分布のバラツキが大きくなる原因は, 礫径と供試体径の比 (D_{max}/D_0) に関係している. D_{max}/D_0 と面積礫含有率の関係を調べたものが, 図—6 である. D_{max}/D_0 が大きくなると, 面積礫含有率も大きくなっており, これは小さい径の供試体で顕著であることがわかる. またこのような礫率と粒度分布を有する礫岩では, D_{max}/D_0 が 0.5 以下のものはほとんど計測されないことにも注意する必要がある. つまり一般的に用いられている供試体中の最大礫径として, 供試体径の 1/10 以下にすべきというような基準は適用できない. 礫岩の力学試験を実施する場合には, この基準をゆるめて用いるほかないであろう.

供試体径が小さくなると分布のバラツキが大きくなる原因は, 礫径と供試体径の比 (D_{max}/D_0) に関係している. D_{max}/D_0 と面積礫含有率の関係を調べたものが, 図—6 である. D_{max}/D_0 が大きくなると, 面積礫含有率も大きくなっており, これは小さい径の供試体で顕著であることがわかる. またこのような礫率と粒度分布を有する礫岩では, D_{max}/D_0 が 0.5 以下のものはほとんど計測されないことにも注意する必要がある. つまり一般的に用いられている供試体中の最大礫径として, 供試体径の 1/10 以下にすべきというような基準は適用できない. 礫岩の力学試験を実施する場合には, この基準をゆるめて用いるほかないであろう.



図—4 体積礫含有率の頻度分布



図—5 面礫含有率と体積礫含有率の関係

表—2 解析結果

	D_0 cm	N	A_A			V_v			$A_A - V_v$
			average (%)	S.D.	Cv (%)	average (%)	S.D.	Cv (%)	S.D. of residuals σ (%)
All data	5	1728	51.10	16.07	31.4	51.24	17.17	33.5	4.88
	10	216	50.41	9.64	19.1	50.55	11.07	21.9	4.46
	20	27	50.55	5.64	11.2	51.07	6.36	12.5	2.83
	30	8	50.92	3.59	7.1	51.51	5.75	11.2	3.40
Selected data	5	518	39.72	4.11	10.3	38.82	3.44	8.9	
	10	103	43.90	3.31	7.5	43.45	2.49	5.7	
	20	17	47.79	3.59	7.5	47.89	2.17	4.5	
	30	5	49.27	2.94	6.0	48.30	2.47	5.1	

我々が試料を選定する場合、意識的に大きな礫が側面に現われる供試体はこれを取り除く。これと同じように、 D_{max}/D_0 にある基準を設けて室内試験用供試体を選定した方が礫率の変動幅の小さい供試体が得られ、その分力学的な試験結果の解釈が容易となると考えられる。ここでは D_{max}/D_0 が1以下のもののみを対象とするように設定すると、表—2 および図—7 に示すように変動係数が10%以下となるような供試体得られることがわかる。

4. まとめ

本論文は、室内および原位置において火山角礫岩の力学的性質を決定するために、その予備的な研究として火山角礫岩の礫径分布特性を調べたものである。フィールドスケールでの三次元的礫径分布をステレオロジーにより見積もった。この分布を用いて、体積礫含有率、面積礫含有率、最大礫径の関係を数値解析的に求めた。得られた知見は次のようである。

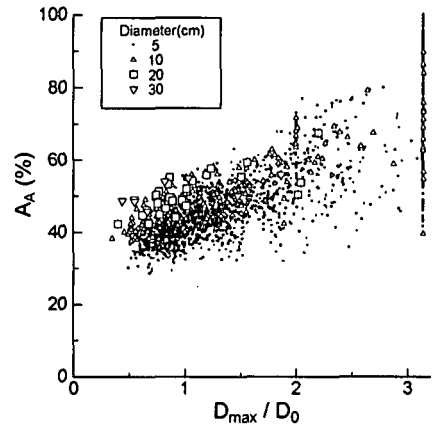
1) 採取する供試体の全体積を一定にする条件をつけると、礫率の平均値はどの大きさの供試体においてもほぼ同じ値となる。しかし礫率の変動係数は供試体寸法に依存し、供試体径が小さくなると変動係数が大きくなる。この例では直径5cmの供試体において30%程度であり、直径30cmでは11%程度となる。

2) 礫率と最大長径の間には正の相関がある。したがって供試体に現われる最大礫径に制限をつけて供試体を選定すれば、小さい供試体でも礫率の変動係数の小さい供試体得られるが、このとき選定された供試体から求めた礫率は全体の礫率よりも小さくなることに注意が必要である。この知見は、実際に力学試験結果を解釈するとき非常に重要である。

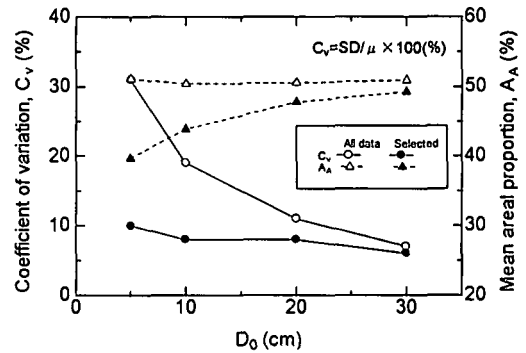
今後はこの礫径分布特性を踏まえて、火山角礫岩の力学的性質との関係を調べていく必要がある。またここで検討したのは限られた粒度分布に対する性質であり、礫岩の一般的な性質を導くにはさらなる研究が必要である。

参考文献

- 1) 小林隆志・吉中龍之進：礫混じり軟岩の強度・変形特性に関する研究。土木学会論文集, No.487/III-26, pp. 31—40, 1994.
- 2) Saotome, A., Yoshinaka, R., Osada, M., Sugiyama, H. : Clast size distribution and constituent material properties of volcanic breccia. Engng. Geol., submitted.
- 3) DeHoff, R. T. and Rhines, F. N.: Quantitative microscopy, McGraw-Hill Publishing, 1968. (牧島邦夫・篠原靖忠・小森尚志共訳「計量形態学」, 内田老鶴圃, 470pp).



図—6 最大礫径/供試体直径比と面積含有率の関係



図—7 供試体径と礫率の変動係数の関係