落石粒度分布の簡易推定法に関する検討*

— 最大落石径の推定に関する基礎的研究 (第2報) —

氏平増之¹ 小川健太²
高貝暢浩³ 水島照悦⁴

Investigation of the Suitability of Simple Method for the Evaluation of Size Distribution of Fallen Rocks

— Fundamental study on the evaluation of the largest rock size in a rock fall (2nd Report) —

by Masuyuki UJIHARA¹, Kenta OGAWA¹, Nobuhiro TAKAGAI² and Shoetsu MIZUSHIMA³

1. Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060

2. Nippon-koei Co. Ltd., Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 102

3. Japan Oil Engineering Co. Ltd., Kita-otsuka Toyoshima-ku, Tokyo 170

Evaluation of size distribution equation was carried out by eliminating some data that were obtained from a heap created along artificial and practical slopes, which has given the following results. (1) Simple sampling method from a heap becomes suitable when parameters of distribution equation are calibrated. (2) Deviation of rock size of 0.01 % oversize estimated from calibrated distribution equation is 1.3~1.4 times larger than those estimated from distribution equation of feed. (3) This simple method is suitable to a practical heap in the field. (4) Size distribution equation can be used to estimate the maximum size of rocks under small probability by extending the distribution line.

KEY WORDS : Surface Mining, Rock Fall, The Largest Size of Fallen Rock, Size Distribution, Weibull Distribution

1. はじめに

長大な斜面を持つ露天掘り鉱山や碎石場で起こる落石の最大の大きさを推定しておくことは保安上重要である。しかし、現在のところ合理的な評価方法が確立されていない。斜面脚部に過去の落石による堆積物がある場合には、堆積物の粒度分布直線を延長して確率 $1/10^6$ 等での最大落石径を推定する方法が考えられる。落石の最終段階では底面との衝突による再破壊が起きるため、落石径が過小評価されるおそれがあるが有用な推定値を与えると考えられる。上の方法を採用する場合、斜面底部における堆積物の粒度分布を求めなければならない。落石堆積物は、堆積物の量が多すぎて全量をふるい分ける、あるいは縮分してふるい分けることが困難である場合が多い。このため、第1報では半円錐形の堆積物を水平な面で5~6層のブロックに分割、さらに各ブロックを三角柱に分割して全体の粒度分布を求める方法を提案した¹⁾。しかし、堆積物を上部から1ブロックずつ除去しながら最下底まで一様にサンプリングする方法ではまだ多くの労力を要し、利用が困難な場合がある。このため、本研究では、堆積物上部では堆積物を部分的に除去して内部からサンプリングするが堆積物下部

では主に堆積物表面からサンプリングし全体の粒度分布を求めることができるかどうかを調べようとした。すなわち、前報で述べた実験のサンプリング数を減らして堆積物全体の粒度分布を求め、供給した試料が持つ真の粒度分布との相等性に関する検定と補正を行った。本報ではその検定と補正結果および野外における本方法の適用性に関する実験結果を示す。

2. 実験方法および粒度分布推定法

室内実験における落石の模擬堆積物の生成法、堆積物内の偏析特性をつかむための試料サンプリング法、粒度分布計算法の詳細については前報で述べたので本文ではその概略を述べる¹⁾。

実験では、模擬斜面に岩石試料を自然落下させ、Fig. 1に示すような堆積物を形成させた。このとき、岩石試料(以下試料と書く)の形状と斜面傾斜角の2つをパラメータとしている。試料の形状は塊状と板状の2種類とした。斜面傾斜角は塊状試料の場合 50° , 57.5° , 65° , 72.5° の4段階とし、板状試料の場合には 50° , 57.5° , 65° , 72.5° , 80° の5段階とした。実験の手順は以下の通りである。実験の結果、Fig. 2のようなほぼ左右対称な堆積物が形成された。堆積物の堆積後は、堆積物の外形寸法の測定、サンプリング位置の座標測定、試料のサンプリング、サンプリングした試料のふるい分けの順で実験を進めた。堆積物内のサンプリング位置は頂点を原点とした x , y , z 座標で表す。原点を通り、斜面に沿う水平軸を x 軸、 x 軸と直交する水平軸を y 軸、鉛直軸を z 軸としている。Fig. 2に示すように、堆積物を水平面で5~7ブロックに等分し、順次上のブロックを取り除き

* 1995年4月19日受付 9月27日受理

1. 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部資源開発工学科

2. 正会員 北海道大学大学院学生

3. 正会員 日本工営(株)防災部(元 北海道大学大学院学生)

4. 日本オイルエンジニアリング(株)生産部

〔著者連絡先〕 FAX 011-716-6175 (北大・工・資源)

キーワード: 露天掘り, 落石, 最大落石径, 粒度分布, Weibull 分布

Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus.

Fig. 2 Sliced blocks and arrangement of sampling points (original points of x, y, z coordinate is set on the top of a heap).

ながら、露出したブロックの上面へサンプリング容器を圧入してサンプリングした。ふり分けには、目開き 1.0~12.7 mm のふり 9 種類を組み合わせ用いた。

実験 1 回当たり、100 点前後の試料が得られ、各々の試料をふり分けして粒度分布を下の Weibull 分布式で示す²⁾。以後、サンプリング試料と堆積物内の任意の点（正確にはその点を中心とした $dx dy dz$ の微小要素）の試料の形状母数と尺度母数を m_s, η_s で表し、堆積物全体の形状母数と尺度母数は単に m, η で表すこととする。

$$R(d) = \exp\{-d^m/d_0\} \\ = \exp\{-(d/\eta)^m\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $R(d)$: 網上産物の割合

d : 粒子径

m : 形状母数

η : 尺度母数

$d_0 : d_0 = \eta^m$

サンプリング試料が持つ形状母数 m_s 、尺度母数 η_s を x, y, z 座標上にプロットすると、 m_s, η_s は x, y, z の 3 つの方向に対しいずれも指数関数的な増加傾向を示すため、実験式として(2)、(3)式を当てはめることとした。ただし、(2)、(3)式における x, y, z は単位長さ (1 cm) で割られている無次元長さとする。

$$m_s(x, y, z) = \exp(a_0 + a_1|x| + a_2|y| + a_3|z|) \quad \dots\dots (2)$$

$$\eta_s(x, y, z) = \exp(b_0 + b_1|x| + b_2|y| + b_3|z|) \quad \dots\dots (3)$$

堆積物全体の粒度分布は、水平に分割したブロックを Fig. 3 に示す任意の形状の三角柱に分割して求める。この研究では分割した三角柱両端の三角形の頂点とサンプリング点は一致させている。分割された三角柱のそれぞれについて粒度 $0 \sim d_1, d_1 \sim d_2, \dots, d_{r-1} \sim d_r, \dots, d_n \sim \infty$ の範囲の各重量を求め、これを 1 ブロック内の全三角柱について加え合わせ、さらに全ブロックについて

Fig. 3 Divided triangular columns and coordinates of apices of optional triangle between top and bottom faces of a column.

加え合わせる。

三角柱を水平に n 等分し、 $dz = (z_2 - z_1)/n$ とすると、厚さ dz 、面積 s の三角要素が n 個つくられる。三角要素の体積は $s \cdot dz$ であり、その中の各粒度範囲の重量は、重心の位置の形状母数を m_s 、かさ比重を $\rho_{b0} \sim \rho_{bn}$ とすると、

$$dW_{0,d1} = \rho_{b0} [1 - \exp\{-(d_1/\eta)^{m_s}\}] s \cdot dz \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$dW_{dr-1,dr} = \rho_{br-1} [\exp\{-(d_{r-1}/\eta)^{m_s}\} \\ - \exp\{-(d_r/\eta)^{m_s}\}] s \cdot dz \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$dW_{dn,\infty} = \rho_{bn} [\exp\{-(d_n/\eta)^{m_s}\}] s \cdot dz \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。

(4)~(6)式を粒度別に n 要素分加え合わせ、さらに全ブロックにわたり加え合わせ堆積物全体の粒度別重量 $\Sigma W_{0,d1}, \dots, \Sigma W_{dr-1,dr}, \dots, \Sigma W_{dn,\infty}$ を求める。この粒度別重量を用いて回帰式を決定する。

3. サンプリング点の配置に関する検討

本研究の実験では、堆積物の各レベルからの試料サンプリングを Fig. 4 の Case 1 に示す配置で行っている。すなわち、標準的には、Fig. 4 における Case 1 の A 面は 13 点、B~D 面は各 22 点ずつサンプリングしている。各試料をふり分けし(1)式の母数 m_s, η_s を求め、堆積物内の任意の点の m_s と η_s に関する実験式 $m_s = m_s(x, y, z), \eta_s = \eta_s(x, y, z)$ を求める。堆積物の規模が、高さ 2~3 m を超える規模の場合には、D, E 面からのサンプリングをするのに、まだかなりの労力が必要である。Fig. 4 の C 面より下部の堆積物の体積は、堆積面を水平面で 6 等分しており、また C 面より上部の堆積物と堆積物全体の形状が相似形であるとみなすと、C 面より上部の体積の約 7 倍である。このため、D, E 面については、堆積物の表面からのサンプリング試料のみを用いて満足できる精度の粒度分布式が得られれば、本方法は実用性を増す。

試行錯誤的に種々のパターンで一部のデータを除外して粒度分布式を計算した結果、Fig. 4 中の Case 2~4 のデータ配置で求めた粒度分布が実際の粒度分布に比較的良好一致し、実用的であると考えられるため、この 3 例について検討を行うこととした。Case 2~4 のデータ配置で m_s, η_s の実験式を求め、実験式として(2)、(3)式の指数関数を使うことが妥当であるか、重相関係数

Fig. 4 Four cases of data arrangement for the calculation of size distribution of a heap.

Table 1 Shapes of experimental equations on m_s calculated in each case of data elimination in laboratory experiment and the results of statistical test of significance.

Test No.		Slope angle (°)	Shapes of experimental equation on m_s				Variance ratio F	F_0 in F-distribution Table	Multiple correlation coefficient R
			$a_0(x10^{-1})$	$a_1(x10^{-2})$	$a_2(x10^{-2})$	$a_3(x10^{-3})$			
Massive shape	No. 1(Case 1)	50	-2.555	0.771	3.399	-23.980	28.23	4.08	0.740
	" (2)	"	-2.367	1.130	3.576	-27.582	10.30	4.35	0.670
	" (3)	"	-0.662	0.858	2.639	-17.278	9.32	4.62	0.713
	" (4)	"	-0.696	0.859	2.599	-16.749	10.72	4.55	0.725
	No. 2(Case 1)	57.5	-5.407	0.756	2.512	-2.962	193.00	3.99	0.926
	" (2)	"	-4.983	1.020	2.687	-8.518	85.14	4.13	0.900
	" (3)	"	-4.394	0.924	2.567	-6.344	50.69	4.47	0.909
	" (4)	"	-4.253	0.927	2.660	-8.042	50.41	4.43	0.904
	No. 3(Case 1)	65	-4.608	1.106	1.922	1.566	107.80	3.99	0.878
	" (2)	"	-3.949	1.178	1.724	0.297	38.27	4.13	0.810
	" (3)	"	-3.338	1.038	1.647	3.142	29.36	4.47	0.857
	" (4)	"	-3.227	1.035	1.717	1.800	30.09	4.43	0.852
	No. 4(Case 1)	72.5	-1.753	1.377	2.036	-5.766	74.32	4.01	0.843
	" (2)	"	-2.290	1.625	2.204	-7.275	39.07	4.18	0.825
	" (3)	"	-1.783	1.506	2.122	-5.063	23.94	4.51	0.840
	" (4)	"	-1.662	1.518	2.192	-6.337	24.79	4.47	0.836
Plate shape	No. 1(Case 1)	50	4.776	0.885	3.911	-34.451	21.19	4.04	0.663
	" (2)	"	1.670	1.211	5.280	-44.213	31.74	4.23	0.813
	" (3)	"	5.541	1.138	3.997	-35.832	18.38	4.61	0.814
	" (4)	"	5.965	1.142	4.302	-40.514	17.55	4.51	0.798
	No. 2(Case 1)	57.5	0.241	0.858	4.234	-24.704	38.61	4.06	0.777
	" (2)	"	-1.998	1.238	5.791	-36.349	34.76	4.26	0.839
	" (3)	"	1.744	1.103	4.813	-33.159	15.40	4.64	0.800
	" (4)	"	1.746	1.103	4.812	-33.153	16.82	4.57	0.802
	No. 3(Case 1)	65	3.485	1.489	3.143	-19.340	21.89	4.01	0.647
	" (2)	"	-0.793	1.936	4.972	-24.641	45.79	4.14	0.836
	" (3)	"	2.197	1.886	4.376	-25.594	17.90	4.47	0.792
	" (4)	"	2.620	1.872	4.527	-28.600	17.85	4.42	0.782
	No. 4(Case 1)	72.5	5.322	1.640	3.721	-23.501	24.15	4.01	0.670
	" (2)	"	1.629	2.389	4.539	-20.883	31.32	4.14	0.784
	" (3)	"	7.327	1.914	3.496	-21.395	12.31	4.46	0.732
	" (4)	"	8.048	1.908	3.865	-28.105	12.21	4.42	0.720
	No. 5(Case 1)	80	0.765	2.205	2.860	-5.089	80.51	4.01	0.852
	" (2)	"	-2.418	2.882	3.697	-2.695	110.09	4.14	0.921
	" (3)	"	1.505	2.491	3.083	-4.731	60.00	4.47	0.922
	" (4)	"	2.001	2.502	3.313	-9.004	43.86	4.43	0.891

はどう変化するかを統計的に検討する。

Fig. 4 の Case 2 は、堆積物の A 面では 13 点、B、C 面ではそれぞれ 22 点、D、E 面では各 4 点のデータを用いて m_s 、 η_s の実験式を決定する方法である。Case 3 は A 面の外周 7 点と斜面沿い中央 1 点、B、C 面の外周 9 点と斜面沿い中央 1 点、D、E 面の外周 3 点と斜面沿い中央 1 点のデータを用いる配置である。Case 4 は、Case 3 に E 面の両側から斜面沿い水平にある程度入った 2 点のデータを追加する配置である。Case 2~4 で、C 面以下の堆積物を除去しないときは Fig. 4 の Case 2~4 における ■ 位置の試料はサンプリングできない。したがって図中の斜面沿い低部の ■ 印の点の m_s 、 η_s のデータとしては A、B、C 面の斜面沿い中心箇所のデータの平均値を用いることとした。他に適切な方法がないこと、第 1 報の Fig. 6、7 で示したように、堆積物内部の斜面沿い中心線上 (z 方向) の m_s 、 η_s 、特に m_s の変動が小さいことがその理由である¹⁾。

Case 1~4 における 37~100 組の (x , y , z , m_s) と (x , y , z , η_s) を用い、多変量解析を行い(2)式の係数 $a_0 \sim a_3$ および(3)式の係数 $b_0 \sim b_3$ を決定した³⁾。また指数関数を当てはめてよいかについての適合性の検定を行った³⁾。 m_s 、 η_s に関する計算結果をそれぞれ Table 1 および Table 2 に示している。両表には、9 回の実験の Case ごとの実験式の係数 $a_0 \sim a_3$ 、 $b_0 \sim b_3$ 、 F 比、 F 分布表における自由度対 (p , $N-p-1$) の場合の $F_0(p, N-p-1; 0.01)$ 、重相関係数 R を示している。ただし、 p は回帰による変動に関する自由度で、 N はデータ数、0.01 は有意水準である。 F 比 $> F_0$ の場合(2)、(3)式の当てはめは有意と判定される³⁾⁴⁾。Table 1 によると、形状母数 m_s についての F 比は、サンプリング数が少なくなると値が小さくなる傾向がある。しかし、

Table 2 Shapes of experimental equations on η_s calculated in each case of data elimination in laboratory experiment and the results of statistical test of significance.

Test No.		Slope angle ($^{\circ}$)	Shapes of experimental equation on η_s				Variance ratio F	F_0 in F-distribution Table	Multiple correlation coefficient R
			$b_0(\times 10^{-1})$	$b_1(\times 10^{-2})$	$b_2(\times 10^{-2})$	$-b_3(\times 10^{-3})$			
Massive shape	No. 1(Case 1)	50	10.219	6.422	3.070	-2.126	16.65	4.08	0.645
	" (2)	"	10.951	12.021	4.352	-3.822	9.46	4.35	0.654
	" (3)	"	13.358	8.518	2.789	-2.175	9.25	4.62	0.712
	" (4)	"	13.264	8.485	2.667	-2.012	10.48	4.55	0.721
	No. 2(Case 1)	57.5	4.667	8.670	2.328	0.004	92.03	3.99	0.861
	" (2)	"	4.795	15.168	3.433	-1.703	47.64	4.13	0.839
	" (3)	"	8.127	11.724	2.557	-1.006	30.09	4.47	0.859
	" (4)	"	7.950	11.657	2.432	-0.782	31.48	4.43	0.858
	No. 3(Case 1)	65	3.861	9.388	1.903	1.050	82.90	3.99	0.849
	" (2)	"	4.666	17.318	3.042	-0.816	33.89	4.13	0.793
	" (3)	"	8.555	13.263	2.369	-0.506	23.18	4.47	0.828
	" (4)	"	8.041	13.319	2.134	-0.055	23.78	4.43	0.823
	No. 4(Case 1)	72.5	6.080	10.955	2.311	0.449	72.82	4.01	0.840
	" (2)	"	6.703	14.883	2.893	-0.519	27.31	4.18	0.774
	" (3)	"	8.916	12.376	2.345	-0.145	14.35	4.51	0.768
	" (4)	"	8.666	12.172	2.206	0.111	15.39	4.77	0.769
Plate shape	No. 1(Case 1)	50	19.058	3.177	1.464	-0.962	24.79	4.04	0.692
	" (2)	"	18.977	4.836	1.986	-1.621	10.51	4.23	0.626
	" (3)	"	20.637	3.633	1.172	-0.850	4.80	4.61	0.583
	" (4)	"	20.566	3.658	1.125	-0.778	5.31	4.51	0.588
	No. 2(Case 1)	57.5	16.485	3.289	1.542	-0.289	31.17	4.06	0.743
	" (2)	"	16.587	5.513	2.091	-1.054	11.27	4.26	0.659
	" (3)	"	19.834	4.181	1.270	-0.727	5.55	4.64	0.623
	" (4)	"	19.670	4.163	1.130	-0.501	5.59	4.57	0.612
	No. 3(Case 1)	65	16.613	4.120	1.371	0.196	56.07	4.01	0.806
	" (2)	"	16.342	7.076	1.908	-0.377	23.21	4.14	0.736
	" (3)	"	17.548	5.868	1.319	0.021	17.23	4.47	0.786
	" (4)	"	17.495	5.864	1.304	0.057	19.68	4.42	0.797
	No. 4(Case 1)	72.5	17.252	5.478	1.023	0.531	48.83	4.01	0.789
	" (2)	"	17.020	7.547	1.387	0.171	23.41	4.14	0.737
	" (3)	"	19.303	5.284	0.927	0.267	9.87	4.46	0.693
	" (4)	"	19.196	5.325	0.877	0.358	11.09	4.42	0.703
	No. 5(Case 1)	80	17.364	5.835	0.697	0.792	65.42	4.01	0.827
	" (2)	"	17.048	7.232	0.972	0.622	24.02	4.14	0.741
	" (3)	"	20.142	3.489	0.377	0.593	12.88	4.47	0.740
	" (4)	"	20.054	3.456	0.334	0.673	15.81	4.43	0.763

同表のすべての場合とも F 比は F_0 より大きい値を示しており、実験式に対する指数関数の当てはめは危険率 1% 未満で極めて有意であると判定された。Table 2 によると、尺度母数 η_s についても塊状試料の斜面傾斜角 50° の場合の Case 2, 3, 板状試料の斜面傾斜角 57.5° の場合の Case 3, 4 の場合のように F 比が Case 1 に比べてかなり小さい値になるケースがみられるが m_s の場合と同様指数関数の当てはめは危険率 1% 未満で極めて有意という結果になった。重相関係数については m_s , η_s の場合とも、Case 2~4 における使用データ数が Case 1 の場合より少なくなっても重相関係数の変化は少ない。

以上、Case 1~4 間で、使用するデータ数が変わっても m_s , η_s の重相関係数が大きい変動を示さないので Table 1, 2 の係数を持つ実験式を用い 2. で述べた計算法により Case 別の粒度分布式を求めることとした。

4. 粒度分布計算結果

2. で述べた計算法により、9 回の実験における Case 1~4 のサンプリング点のデータを用い堆積物全体の粒度分布式を求めた。Table 3 は、供給した試料の m , η と $9 \times 4 = 36$ 通りの堆積物粒度の回帰式の m , η を示している。計算した 36 通りの m の値は、供給した試料の m の値の 1.02~1.45 倍で、すべての場合供給した試料の m より大きい値を示す。9 回の実験における Case ごとの m の変化には明瞭な規則性は認められない。計算された 36 通りの η の値は、供給した試料の η の 0.74~1.04 倍でありほとんどの場合供給した試料の η より小さい値を示している。 η の場合も Case ごとの変化に明瞭な規則性は認められない。

計算で求めた粒度分布式と供給された試料の粒度分布式との間に有意差があるかどうかについて F 検定を行った。検定方法は次の通りである。まず、2 本の粒度分布式を求めるために使った全データを併合した総回帰方程式をつくりその残差平方和 S_0 を求める。次に、2 個の回帰方程式に対する残差平方和を別々に求めて加え合わせこれを S_1 とおく。この差を $S_2 = S_0 - S_1$ とおき、(7)式の F 比を求める⁵⁾。

$$F = \{S_2 / (\nu - 1)(k + 1)\} / \{S_1 / (N - \nu(k + 1))\} \cdots \cdots (7)$$

ただし、 N : データ数

ν : 方程式の数

k : 方程式の変数の数

この検定では、3. での検定と異なり(7)式の F 比が、 F 分布表の $F_0((\nu - 1)(k + 1), (N - \nu(k + 1)) : \alpha)$ より小さければ危険率が α 以上で 2 本の直線は異なるといえない、すなわち有意差がないと判定される⁵⁾。9 回の実験の Case 1~4 の各場合についての F 比を Table 3 に示している。また、同表の右端に有意差がない場合を○印、有意差があると判定されるが F 比が F_0 の 1.5 倍未満である場合を△印、 F 比が F_0 の 1.5 倍以上で明らかに有意差がある場合を×印で示している。表によると、試料形状が塊状である場合、Case 2 では有意差がない事例は認められず、Case 3 では 4 例中 1 例が、Case 4 では 4 例中 3 例が供給した試料の粒度分布式との間に有意差がないと判定された。一方、板状試料の場合には、Case 2 のデータ配置で求めた粒度分布式の 5 例中 4 例が、Case 3, Case 4 ではそれぞれ 5 例中 2 例が供給した試料の粒度分布式との間に有意差がないと判定された。検定結果からは、簡易推定法のサンプリング点の配置として Case

Table 3 Evaluated parameters m and η of size distribution of a heap, ratio of calculated m and η against those of feed (r_m , r_η), $\ln(\eta^m)$, and F ratio.

	Test No.	Slope angle (°)	Shape parameter		Scale parameter		$\ln(\eta^m)$	F ratio in statistical test	Significance
			m	r_m	η	r_η			
Massive shape	Feed	—	1.303	—	7.394	—	2.607	—	—
	No. 1 (Case 1)	50	1.539	1.181	7.008	0.948	2.997	9.469	△
	" (2)	"	1.518	1.165	6.646	0.899	2.875	7.791	△
	" (3)	"	1.781	1.367	7.155	0.967	3.505	53.675	×
	" (4)	"	1.802	1.383	7.270	0.983	3.575	59.492	×
	No. 2 (Case 1)	57.5	1.446	1.110	6.469	0.875	2.700	4.144	○
	" (2)	"	1.351	1.037	5.498	0.744	2.303	31.489	×
	" (3)	"	1.539	1.181	6.134	0.830	2.792	9.326	△
	" (4)	"	1.512	1.161	6.337	0.857	2.792	6.614	○
	No. 3 (Case 1)	65	1.396	1.073	7.203	0.974	2.756	1.337	○
	" (2)	"	1.327	1.018	5.805	0.785	2.334	27.997	×
	" (3)	"	1.550	1.190	6.381	0.863	2.873	6.403	○
	" (4)	"	1.512	1.160	6.334	0.857	2.791	6.626	○
	No. 4 (Case 1)	72.5	1.389	1.066	6.474	0.876	2.594	5.887	○
	" (2)	"	1.386	1.063	5.615	0.759	2.391	30.013	×
	" (3)	"	1.481	1.137	6.492	0.878	2.770	8.287	△
" (4)	"	1.468	1.127	6.653	0.900	2.782	4.855	○	
Plate shape	Feed	—	2.033	—	12.01	—	5.054	—	—
	No. 1 (Case 1)	50	2.670	1.313	10.93	0.910	6.385	11.616	△
	" (2)	"	2.609	1.283	10.70	0.891	6.184	7.424	×
	" (3)	"	2.857	1.405	11.33	0.943	6.935	24.603	×
	" (4)	"	2.762	1.359	11.41	0.950	6.724	20.246	×
	No. 2 (Case 1)	57.5	2.385	1.173	10.85	0.903	5.686	4.222	○
	" (2)	"	2.362	1.162	10.46	0.871	5.545	6.184	○
	" (3)	"	2.665	1.311	10.71	0.892	6.319	8.517	○
	" (4)	"	2.641	1.299	10.98	0.914	6.328	8.552	○
	No. 3 (Case 1)	65	2.232	1.140	11.28	0.939	5.408	1.591	○
	" (2)	"	2.168	1.066	11.44	0.953	5.284	0.718	○
	" (3)	"	2.311	1.136	11.77	0.980	5.698	3.368	○
	" (4)	"	2.259	1.111	11.79	0.982	5.574	2.166	○
	No. 4 (Case 1)	72.5	2.464	1.212	11.62	0.968	6.044	8.196	○
	" (2)	"	2.437	1.199	12.27	1.022	6.110	13.441	×
	" (3)	"	2.954	1.453	12.40	1.032	7.437	66.442	×
	" (4)	"	2.796	1.375	12.51	1.042	7.064	52.156	×
	No. 5 (Case 1)	80	2.367	1.164	11.37	0.947	5.754	3.068	○
	" (2)	"	2.336	1.149	11.86	0.988	5.777	3.726	○
	" (3)	"	2.758	1.357	12.07	1.005	6.869	25.325	×
	" (4)	"	2.673	1.315	12.17	1.013	6.680	24.094	×

Massive shape: $Fo(2.10;0.01)=7.56$
Plate shape: $Fo(2.8;0.01)=8.56$

2~4のどれが適するかを判定できない。また、Case 2~4の27例中15例が有意差があると判定されているため、簡易推定法で求めた粒度分布式をそのまま用いることには問題があり補正を加える必要がある。以下に、補正に当たっての考え方、補正方法、補正結果を述べる。

5. 粒度分布式の補正

本論文における粒度分布直線は、(1)式を変形した(8)式の左辺の $\ln \ln(1/R(d))$ を縦軸、右辺の $\ln(d)$ を横軸にとった Weibull 確率紙に描かれる。したがって、 m は粒度分布直線の勾配であり、 $-\ln(\eta^m)$ が $d=1$ における切片である。

$$\ln \ln(1/R(d)) = m \ln d - \ln(\eta^m) \quad \dots\dots\dots (8)$$

Table 3 をみると、先述のように有意差の有無にかかわらずすべての斜面傾斜角の Case 2~4 において、粒度分布直線の勾配 m が、供給した試料の粒度分布直線の m より大きくなっている。このことは、Weibull 確率紙上で簡易推定法による粒度分布直線が、供給した試料の粒度分布直線と交差し、粒径 d が大きくなると前者が後者の上に位置することを意味する。Fig. 5 は、板状試料を用いた斜面傾斜角 72.5°, Case 3 の場合の粒度分布直線であり、全 Case の中で有意差 (F 比) が最も大きくなっている事例である。Fig. 5 から、たとえば網上産物の割合が縦軸の上端の値 0.01% (網下 99.99%) となるとき粒子径を求めてみると、簡易推定法による粒度分布式から求められる粒子径 d_c ($=26.3$ mm) のほうが、実際に供給した試料の粒度分布式から求められる粒子径 d_f ($=35.8$ mm) より小さく算出されている。安全性を重視した場合、簡易推定法による粒度分布式から求められる粒子径 d_c が、実際に供給した試料の粒度分布式から求められる粒子径 d_f より小さく評価されることは、検定の結果有意差

Fig. 5 Size distribution lines of feed and calculated, which have the largest deviation among all cases and slope angles.

がないと判定されている場合であっても好ましくない。簡易推定法による粒度分布式の m , η については、 $d_c \geq d_f$ を満足するような補正を行う必要がある。

Table 3 には、供給した試料の m , η を基準値とし、各 Case の m , η の基準値に対する比率 r_m , r_η も示している。Fig. 6 は、Case 1~4 の場合について試料の形状別 r_m , r_η とその平均値をプロットしたものである。同図(A)によると、 r_m は 1.018~1.453 である。Case 2~4 間の比較では、Case 2 の場合の r_m が最も 1.0 に近い範囲に分布している。これは、Case 2 の粒度分布直線の勾配が、供給した試料の粒度分布直線の勾配に最も近いことを示している。一方、同図(B)に示している Case 2~4 の r_η をみると、 r_η は 0.744~1.042 である。Case 別にみると、Case 2 の塊状試料の場合の r_η が 1.0 から最もかけ離れているが他の Case の r_η は 0.830~1.042 で、平均値に大きな差異はない。Case 2~4 のうちのどの Case がより良いかの判断におい

Fig. 6 Distribution of r_m and r_η in four sampling cases.

ては、第一に粒度分布直線の勾配 m の補正量が最も少ない Case を選択するべきと考えられる。この観点から Case 2 を簡易推定法として選定すべきと判断した。

次に簡易推定法として選定した Case 2 の場合の粒度分布式の m , η の補正法について述べる。 m の補正に当たっては、塊状試料の場合、Fig. 6(A) にプロットされている r_m の平均値ではなく最大値を用いることとした。実際には r_m の最大値 1.165 の小数点以下 2 桁目を繰り上げた値 1.2 の逆数を Case 2 で得られた m に乗ずる。これにより、簡易推定法で得られた m の値は少なくとも供給された試料の粒度分布直線の勾配より小さい値となり、 $d_c > d_f$ になる安全側の値を与えられることになる。もちろんここで与えられた $r_m = 1.2$ は、限られた回数の実験で得られた値であり、もう少し大きい値を取る可能性があるが、現時点では最も信憑性の高い値と考えられる。同様に板状試料の場合の m の補正には最大値 1.283 の小数点以下 2 桁目を繰り上げた $r_m = 1.3$ を用いるべきである。

m の補正を行った後 η の補正を行う。 η の補正に当たっても r_η の平均値ではなく r_η の最小値を用いる。すなわち、塊状試料の場合 Fig. 6(B) にプロットされている r_η の最小値 0.744 の小数点以下 2 桁目を切り捨てた $r_\eta = 0.7$ の逆数を Case 2 で得られた η に乗ずることとする。これにより簡易推定法で得られた η の値は、少なくとも供給された試料の粒度分布式の η より大きい値となる。 m の既補正值として一定値が与えられた後は、 η が大きくなると、Weibull 確率紙上における(8)式の切片が下にさがり、より安全側の粒径推定値 ($d_c > d_f$ となる d) を与えることになる。 r_η についても限られた回数の実験で得られた値であるが現状では妥当な値と考えられる。同様に板状試料の場合の η の補正には、Fig. 6(B) の r_η の最小値 0.871 の小数点以下 2 桁目を切り捨てた $r_\eta = 0.8$ を用いるべきと考えられる。

Fig. 7(A), (B) は、Case 2 でかつ塊状試料の場合の F 比が最小の場合と最大の場合の粒度分布直線を示している (Table 3)。

Fig. 7 Size distribution of feed (full line), calculated distribution (dot line) and calibrated distribution (chain line) of massive shape rocks in Case 2.

両図の実線は供給した試料の粒度分布直線、破線は Case 2 の粒度分布直線、一点鎖線は Case 2 の粒度分布式の m , η を補正して描いた粒度分布直線である。両図によると補正された粒度分布直線は、供給された試料の粒度分布直線と近接した位置にあり、しかも図の右端付近で下に位置している。Fig. 7(A) で網上産物の割合が縦軸上端の値 0.01 % となる 3 種類の粒度分布直線の粒径 d を見てみると、補正前の粒度分布直線では $d_c = 28.7$ mm, 供給した試料の粒度分布直線では $d_f = 40.6$ mm, 補正後の粒度分布直線では $d_b = 54.9$ mm である。このように、Case 2 で計算された無補正の粒度分布直線から求めた粒径 d_c は、 d_f より 0.7 倍小さく推定され、補正後の粒度分布式から求めた粒径 d_b は、1.35 倍大きく計算されている。

Fig. 8 Size distribution of feed (full line), calculated distribution (dot line) and calibrated distribution (chain line) of plate shape rocks in Case 2.

同様に同図(B)の場合において、網上産物が同じく 0.01 % となる 3 種類の粒度分布直線の粒径 d をみると、 $d_c = 28.4 \text{ mm}$ 、 d_f は同図(A)と同じ値で $d_f = 40.6 \text{ mm}$ 、 $d_b = 56.4 \text{ mm}$ である。補正後の d_b は、 d_f に比べ、1.39 倍大きく評価されている。

Fig. 8(A), (B) は、Case 2 でかつ板状試料の場合の F 比が最小の場合と最大の場合の粒度分布直線を示している (Table 3)。両図の 3 種類の直線の区別は、Fig. 7 の場合と同様である。板状試料の場合、補正された粒度分布直線と供給した試料の粒度分布直線との偏差が少し大きくなるが、補正された粒度分布直線は図の右端付近で供給した試料の粒度分布直線の下に位置している。Fig. 8(A) の場合について網上産物が、0.01 % となる 3 種類の粒度分布直線の粒径 d をみると、 $d_c = 31.9 \text{ mm}$ 、 $d_f = 35.8 \text{ mm}$ 、 $d_b = 51.0 \text{ mm}$ であり、 d_b が d_f より 1.42 倍大きく評価されている。また同図(B)の場合についても同様に網上産物が、0.01 % になる 3 種類の粒度分布直線の粒径 d をみると、 $d_c = 30.5 \text{ mm}$ 、 $d_f = 35.8 \text{ mm}$ 、 $d_b = 47.2 \text{ mm}$ であり d_b が d_f より 1.32 倍大きく評価されている。

Fig. 7, 8 でみたように Case 2 で求めた粒度分布式の m , η を補正すると、例えば網上産物が 0.01 % である粒径の場合であれば推定粒径 d_b が d_f に比べ 1.3~1.4 倍大きく推定される。この偏差を大きくとみるか、小さいとみるかは解釈が分かれると

Fig. 9 Cross section of a heap used for field experiment.

Fig. 10 Changes of shape parameter m_s and scale parameter η_s with the changes of horizontal and vertical distances from original point in a field experiment.
(A), (B): x-direction, (C), (D): y-direction, (E), (F): z-direction

Table 4 Shapes of experimental equations calculated in each case of field experiment and the results of statistical test of significance.

Test No.	Slope angle (°)	Shapes of experimental equation on m_s				Variance ratio F	F_0 in F-distribution Table	Multiple correlation coefficient R
		$a_0(x10^{-1})$	$a_1(x10^{-3})$	$a_2(x10^{-2})$	$a_3(x10^{-2})$			
No. 1 (Case 1)	53-60	0.896	-0.132	0.490	-1.571	15.00	3.99	0.563
" (2)	"	1.382	-0.009	0.824	-5.752	6.81	4.17	0.527
" (3)	"	2.257	-0.054	0.793	-6.065	6.31	4.48	0.616
" (4)	"	1.994	0.070	0.676	-4.470	4.82	4.43	0.552

Test No.	Slope angle (°)	Shapes of experimental equation on η_s				Variance ratio F	F_0 in F-distribution Table	Multiple correlation coefficient R
		$b_0(x10^{-1})$	$b_1(x10^{-3})$	$b_2(x10^{-2})$	$b_3(x10^{-2})$			
No. 1 (Case 1)	53-60	12.180	7.673	0.350	0.005	11.99	3.99	0.520
" (2)	"	11.240	6.689	0.383	0.181	6.82	4.17	0.529
" (3)	"	12.483	5.592	0.049	0.508	5.97	4.48	0.605
" (4)	"	12.529	5.568	0.065	0.486	6.69	4.53	0.615

Table 5 Evaluated parameters m and η of size distribution of a heap and results of statistical test of significance.

<Distribution in weight ratio>

Test No.	Slope angle ($^{\circ}$)	Shape parameter m	Scale parameter η	F ratio in statistical test	Significance
Sieved	—	1.304	5.862	—	—
No.1(Case 1)	53-60	1.370	5.694	0.593	○
" (2)	"	1.327	5.707	0.185	○
" (3)	"	1.362	6.396	3.562	○
" (4)	"	1.379	6.378	4.059	○

 $F_0(2,8;0.01)=8.65$

Fig. 11 Size distributions drawn by wholly sieved data (full lines) and calculated distributions (dot lines) in four cases.

補正すべきである。補正した結果例えば網上産物の割合が0.01% ($1/10^4$)になる粒径が、供給した試料の粒度分布式から推定した粒径の1.3~1.4倍大きく推定され小さく推定されることはない、と述べた。

6. 実斜面の落石堆積物への適用例

室内実験と同様の実験を小規模な小粒からなる落石堆積物について行い、堆積物の粒度分布を上記のCase 1~4のデータ配置で計算した。実験箇所は北海道静内郡静内川上流の高見沢ダム右岸である。堆積物の断面図はFig. 9に示す通りであった。斜面傾斜角が53~60°、堆積物の垂直な高さは1.8 m、安息角は48°、岩種は軟質の輝緑岩で試料の形状は塊状であった。室内実験と同様堆積物を水平な面で6ブロックに分割しFig. 4のCase 1のサンプリング配置で試料サンプリングを行った。各試料をふるい分けし、(1)式で求めた m_s , η_s のx, y, z方向の変化の状態を示したのがFig. 10である。同図によると m_s のxとz方向の変化が小さくばらつきが大きい。 η_s の変化の傾向はx, y, z方向とも指数関数的変動を示している。これらの測定値に(2),(3)式を適用して3.と同様Case 1~4について m_s と η_s のF比と重相関係数を求めて示したのがTable 4である。 m_s , η_s ともF比は値が小さいがF分布表から求めた F_0 よりは大きく実験式に指数関数を当てはめること自体は危険率1%未満で有意であるという結果が得られた。また、 m_s についての重相関係数は0.527~0.616である。 η_s についての重相関係数は0.520~0.615

である。両者とも室内実験の場合より値が小さい。

重相関係数は小さいが、(4)~(6)式を用い、Case 1~4について(1)式の形を持つ堆積物全体の粒度分布式を計算した。4種類のデータ配置で計算された粒度分布式の m と η およびF比をTable 5に示す。また、同表の右端に有意差がない場合を○印で示している。また、Case 1~4の各場合の粒度分布直線をFig.

Fig. 12 Size distributions drawn by wholly sieved data (full lines), calculated distributions (dot lines) and calibrated distributions (chain lines) in Case 2. (I): Distribution in weight ratio, (II): Distribution in count ratio.

Table 6 Size of the largest rock evaluated under small probability.

Proba- bility	Wholly sieved (cm)	Case 2	
		Calculated (cm)	Calculated and corrected (cm)
1/10 ⁵	1.9	2.0	2.4
1/10 ⁶	2.4	2.5	3.1
1/(3.12×10 ⁶)	2.6	2.6	3.3
1/10 ⁷	2.8	3.0	3.7
1/10 ⁸	3.3	3.5	4.4

11に示す。表と図によると、Table 4の m_s , η_s の実験式の重相関係数は小さいが4例とも計算によって求めた粒度分布式は堆積物全量をふるい分けて求めた粒度分布式との間に有意差がないという結果となった。Fig. 10で m_s の測定データのばらつきが大きく重相関係数が小さいわりには、4つの場合とも真の粒度分布直線とよく一致している。堆積物内での m_s の変化する範囲がx方向については0.8~1.75, y方向については1.0~2.0, z方向については1.0~1.5の間の値で狭い範囲に収まっていたことが良い推定値をもたらした理由と考えられる。

上の野外実験では、室内実験と同様の実験を行っている。5.で述べたCase 2のサンプリングのみを実施した場合には、粒度分布式の m と η を補正する必要がある。岩石が塊状であることから、Case 2の $m = 1.327$ と $\eta = 5.707$ をそれぞれ室内実験で求められている $r_m = 1.2$, $r_\eta = 0.7$ で割ると $m = 1.106$, $\eta = 8.153$ となる。Fig. 11に示されているCase 2の粒度分布図を、補正後の粒度分布直線も加えて描き直すとFig. 12のように描かれる。一点鎖線で示された補正後の粒度分布直線は、図の右端付近で全量をふるい分けて求めた粒度分布直線の下に位置している。偏差の程度は7.で述べる。

以上は一つの測定事例であるが、実際の堆積物に対し粒度分布の簡易推定法を適用できる可能性があることを示しているといえる。

7. 最大落石径の推定

ここでは6.で述べた野外実験で得られたFig. 12の(I)の粒度分布直線を個数分布式に変換して、ある確率で生ずる最大の落石径の推定を行ってみる。個数分布式への変換は、粒子を球形と仮定し、2つのふるい目間の粒子はふるい目間の中間径 d_a を持つと仮定して行った。密度を ρ とすると、 $4/3\rho\pi(d_a/2)^3$ がその球1個の重量である。個数変換すると実験対象とした堆積物330 kgの総粒子数は 3.12×10^6 個となる。この方法によりFig. 12(I)の重量割合の粒度分布直線を個数割合の粒度分布直線に変換したのがFig. 12の(II)の3つの粒度分布直線である。全量をふるい分けて求めた粒度分布直線(実線)、Case 2のデータ配置で求めた粒度分布直線(破線)、後者を補正して求めた粒度分布直線(一点鎖線)の m , η の値を(1)式に代入して1/10⁵~1/10⁸の確率で存在する最大の粒径を求めて示したのがTable 6である。この計算ではFig. 12に示した m , η の値を用いている。表によると、実験箇所での小粒子からなる堆積物の 3.12×10^6 個(330 kg)の落石のうち最大径は、全量をふるい分けて求めた粒度分布式を用いると $d_f = 2.6$ cm, Case 2のデータ配置で求めた粒度分布式を用いると $d_c = 2.6$ cm, Case 2を補正して求めた粒度分布直線を用いると $d_b = 3.3$ cmとなる。実験箇所での堆積物内の最大の岩石寸法は $8.0 \times 3.8 \times 2.3$ cmで、重量と比重から換算した等価な球の直径は4.3 cmであった。この値は、上の推定値 d_b よりも1.3倍大きい。堆積物の粒度分布式は、ある程度ばらつきのある累積重量割合のデータから算出された回帰式であることから、実際の落石径が推定値より大きい場合があることは十分に予想される。また、岩質によっては底面との衝突による2次破壊を起こす可能性があり、低面へ衝突する直前の落石

は堆積物の径より大きい可能性がある。したがって、落石堆積物の粒度分布式から最大落石径を推定する際には、最大落石径が少なくとも計算値以上になるという理解のもとで用いる必要がある。

上記のように、粒度分布式から求められる最大落石径の推定値は絶対的な規準ではない。しかし、斜面の諸特性と落石径の関係を示す実用式が存在しない現在では、堆積物粒度分布式の上のような推定値は有用であり、利用をはかるべきであると考えている。

8. ま と め

本論文では、落石堆積物の粒度分布を、簡易的に求める方法とこの方法の適用性について検討した結果を述べた。また、得られた粒度分布式から最大落石径を推定した事例を示した。本文で述べた内容をまとめると次の通りである。

(1) 人工的な落石堆積物の粒度分布式を、一部のデータを除外した3つのCaseについて計算した。計算した27例中15例が全量をふるい分けて求めた真の粒度分布式との間に有意差があると判明したため、粒度分布式を補正することとした。

(2) 堆積物全量をふるい分けて求めた真の粒度分布式の m , η と簡易推定法により求めた粒度分布式の m , η の比 r_m , r_η の分布について検討した。 m については、 r_m の最大値の逆数を簡易推定法で計算した m に乗ずることで、 η については r_η の最小値の逆数を η に乗ずることで粒度分布式の補正を行う必要がある。

(3) 補正された粒度分布式から網上産物が例えば0.01%になる粒径を推定したところ、推定粒径は全量をふるい分けて求めた真の粒度分布式から算出される粒径より1.3~1.4倍大きく推定された。この偏差は許容範囲内にあると考えられる。

(4) 本文で述べた粒度分布の簡易推定法は、野外における落石堆積物の粒度分布の推定に適用できる可能性がある。

(5) 重量割合で表した粒度分布式を個数割合の粒度分布式に変換し、ある確率で起きる最大落石径を推定する方法を示した。この方法は、少なくともこの推定値以上の直径の落石が生ずるという理解のもとで利用すべき方法である。

引 用 文 献

- 1) 氏平増之・高貝暢浩・小川健太・水島照悦：資源と素材，Vol. 111, p. 155-161, (1995)
- 2) 塩見 弘：信頼性工学入門，p. 51-58, 丸善書店，(1972)
- 3) 河口至商：多変量解析入門，p. 3-34, 森北出版，(1974)
- 4) 朝香鉄一：応用統計学，p. 164-183, 朝倉書店，(1974)
- 5) B. ボルチ，C. ファンク：応用多変量解析，森北出版，p. 122-127, (1982)