

土の連続型粒度式

福本武明*

先に提案した粒度式は、まさ土のような風化残積土をはじめ種々の粒状土に適用可能なことが分かっているが、離散型の粒度式である。そこで本論文では、まず離散型から利用上望ましい連続型への変換を試み、新たな連続型粒度式を提示している。そして得られた連続型粒度式が、各分野で現在使われている多くの粒度式との比較検討の結果、既存の主要な粒度式のほとんどを包括するような一般性の高い式であることを明らかにしている。最後に確率紙を作成し、連続型粒度式の利用の便をはかっている。

Key Words: continuous distribution type, discrete distribution type, grading equation, granular soil

1. 緒言

‘まさ土の粒度には規則性がある’との経験に基づく認識から出発し、岩から土への風化過程を公比 r で等比数列的に細粒化すると仮定して、次のような粒度式を誘導した¹⁾。すなわち、

$$p_n = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} \binom{m+i-1}{m-1} \cdot (1-r)^m \cdot r^i \dots \dots \dots (1a)$$

$$n = \frac{\log\left(\frac{D_{max}}{D_n}\right)}{\log\lambda} \dots \dots \dots (1b)$$

式中、 p_n は最大粒径 D_{max} から数えて n 番目のふるい目開き D_n を通過する通過質量百分率、 λ はふるい比 ($\lambda > 1$)、 m は地質学的年代にかかわる係数である。この式は、まさ土のような風化残積土をはじめとする各種粒状土に対し適用可能であり^{2)~6)}、かつ式の特徴や分布特性値も理論的に明確になっている⁷⁾。

しかしながら、式(1)は確率統計学上の分類に照らせば離散型の粒度式ということになる。この点、土の粒度を扱う場合、変数である粒径 D_n そのものが連続量であるから、当然、連続型の粒度式の方が利用上望ましい。現在、各分野で使われている粒度式の大部分は、連続型の粒度式である。

そこで本論文では、離散型の式(1)を連続型へ変換することを試みるとともに、得られた粒度式(連続型)と各分野における主要な粒度式との相互関係を明確にする。そして最後に、得られた連続型粒度式の利用の便をはかるため確率紙の作成を試みる。

2. 離散型から連続型へ

まず離散型の式(1)において、 $m=1$ とおけば、次

のような連続型の粒度式が得られる。

$$\begin{cases} p_n = \left(\frac{D_n}{D_{max}}\right)^\xi \\ \xi = -\frac{\log r}{\log \lambda} \end{cases} \dots \dots \dots (2)$$

この式は、土木工学の分野において、Talbot 式⁸⁾と呼ばれるものに相当する。また、 $\xi=1/2$ とおけば、古くからコンクリート骨材分野等で、いわゆる Fuller 曲線⁹⁾ と呼ばれる周知の式、すなわち

$$p_n = \sqrt{\frac{D_n}{D_{max}}} \dots \dots \dots (3)$$

となる。本論文では、 $m=1$ の場合に限らず m の全範囲にわたって成り立つような連続型の一般式を求めたい。

そこで、 $m=1$ のときに得られる連続型の式(2)に着目し、それを基礎にして新たな変数、すなわち

$$\left[1 - \left(\frac{D_n}{D_{max}}\right)^\xi\right]$$

を考え、これに対応する $(1-p_n)$ 値の変化を追跡する⁵⁾。表-1 は、これら諸量の計算過程を、粒度パラメータ $r=0.8$ 、 $m=2$ の場合について示したものである。なお以後の数式展開のために、文中では粒度式中の記号を、これまでの D_{max} 、 D_n 、 p_n に代わってそれぞれ D 、 d 、 p と改めることにする。

さて、表-1 中の X と Y 、すなわち

$$X = -\log_{10} \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^\xi\right]$$

$$Y = -\log_{10}(1-p)$$

の関係を図対数紙上にプロットすれば、図-1 のような直線関係が得られる。同様に、 m と r の値を変えて計算を行い図化したものが図-2 と図-3 である。これらの図からわかるように、広範な m と r の値に対して、いずれもきれいな直線関係が認められる。

* 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525 滋賀県草津市野路町 1916)

表-1 計算過程 ($r=0.8, m=2, \lambda=\sqrt[4]{2}\approx 1.189$ の場合)

n	$\log_{10}\left(\frac{D_n}{D_{max}}\right)$	$\left(\frac{D_n}{D_{max}}\right)$	$\left(\frac{D_n}{D_{max}}\right)^{\frac{1}{2}}$	$1-\left(\frac{D_n}{D_{max}}\right)^{\frac{1}{2}}$	$\log_{10}\left\{1-\left(\frac{D_n}{D_{max}}\right)^{\frac{1}{2}}\right\}$	p_n	$1-p_n$	$\log_{10}(1-p_n)$
0	0	1	1	0	—	1	0	—
1	-0.07526	0.84090	0.80000	0.20000	-0.69897	0.95997	0.04003	-1.39765
2	-0.15052	0.70711	0.64000	0.36000	-0.44370	0.89597	0.10403	-0.98285
3	-0.22577	0.59460	0.51200	0.48800	-0.31158	0.81917	0.18083	-0.74274
4	-0.30103	0.50000	0.40960	0.59040	-0.22885	0.73725	0.26275	-0.58046
5	-0.37629	0.42045	0.32768	0.67232	-0.17242	0.65533	0.34467	-0.46260
6	-0.45155	0.35355	0.26214	0.73786	-0.13203	0.57669	0.42331	-0.37334
7	-0.52680	0.29730	0.20972	0.79029	-0.10222	0.50329	0.49671	-0.30390
8	-0.60206	0.25000	0.16777	0.83223	-0.07976	0.43618	0.56382	-0.24886
9	-0.67732	0.21022	0.13422	0.86578	-0.06259	0.37578	0.62422	-0.20466
10	-0.75258	0.17678	0.10737	0.89263	-0.04933	0.32210	0.67790	-0.16883
11	-0.82783	0.14865	0.08590	0.91410	-0.03901	0.27485	0.72515	-0.13957
12	-0.90309	0.12500	0.06872	0.93128	-0.03092	0.23362	0.76638	-0.11556
13	-0.97835	0.10511	0.05498	0.94502	-0.02456	0.19789	0.80211	-0.09576
14	-1.05361	0.08839	0.04398	0.95602	-0.01953	0.16710	0.83290	-0.07941
15	-1.12886	0.07433	0.03518	0.96482	-0.01555	0.14071	0.85929	-0.06586
16	-1.20412	0.06250	0.02815	0.97185	-0.01240	0.11819	0.88181	-0.05463
17	-1.27938	0.05256	0.02252	0.97748	-0.00989	0.09905	0.90095	-0.04530
18	-1.35464	0.04419	0.01801	0.98199	-0.00789	0.08284	0.91716	-0.03756
19	-1.42989	0.03716	0.01441	0.98559	-0.00630	0.06915	0.93085	-0.03112
20	-1.50515	0.03125	0.01153	0.98847	-0.00504	0.05765	0.94235	-0.02579
21	-1.58041	0.02628	0.00922	0.99078	-0.00402	0.04796	0.95204	-0.02135
22	-1.65567	0.02210	0.00738	0.99262	-0.00322	0.03985	0.96016	-0.01766
23	-1.73092	0.01858	0.00590	0.99410	-0.00257	0.03306	0.96694	-0.01460
24	-1.80618	0.01563	0.00472	0.99528	-0.00206	0.02739	0.97261	-0.01206
25	-1.88144	0.01314	0.00378	0.99622	-0.00164	0.02267	0.97733	-0.00996
26	-1.95670	0.01105	0.00302	0.99698	-0.00131	0.01874	0.98126	-0.00822
27	-2.03195	0.00929	0.00242	0.99758	-0.00105	0.01547	0.98453	-0.00677
28	-2.10721	0.00781	0.00193	0.99807	-0.00084	0.01277	0.98723	-0.00558
29	-2.18247	0.00657	0.00155	0.99845	-0.00067	0.01052	0.98948	-0.00459
30	-2.25773	0.00552	0.00124	0.99876	-0.00054	0.00867	0.99134	-0.00378

3. 連続型粒度式

前節で述べた図上での直線関係を根拠に、 p と (d/D) の関係を式化すれば、次式が得られる。

$$p = 1 - e^{-\alpha \left[-\log_e \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^\beta \right\} \right]^{1-\beta}} \dots\dots\dots (4)$$

式中、 α と $(1-\beta)$ は図上の直線の切片と勾配に関する係数である。特に β については、 $\beta=0$ のとき図上で 45° 勾配 ($m=1$ の場合に相当)、 $\beta>0$ のとき緩勾配 ($m>1$ の領域)、そして $\beta<0$ のとき急勾配 ($m<1$ の領域) を意味する。この式 (4) を、連続型の粒度基本式と呼ぶことにする。この式は、次のように変形できる。

$$p = 1 - \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^\beta \right\}^{\alpha \left[-\log_e \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^\beta \right\} \right]^{1-\beta}} \dots\dots\dots (5)$$

式 (5) において、指数項を級数展開し、その第 1 項のみをとり簡略化して示せば、次式のような連続型粒度式 (簡略式) が得られる。

$$p = 1 - \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^\beta \right\}^{\alpha \left(\frac{d}{D} \right)^\beta} \dots\dots\dots (6)$$

式中の係数 α と β の値については、図-1~図-3 中の直線位置から求めた数値を表-2 に示しておく。

4. 係数間の関係

離散型から連続型への変換という以上は、連続型粒度式中の係数 (α, β) と離散型の式 (1) 中の係数 (m, r) との間の関係を明確しておかなければならない。

そこで、まず連続型粒度式を導く根拠となった図-1~図-3 中の直線関係に戻り、この直線式 $Y=A \cdot X^B$ の

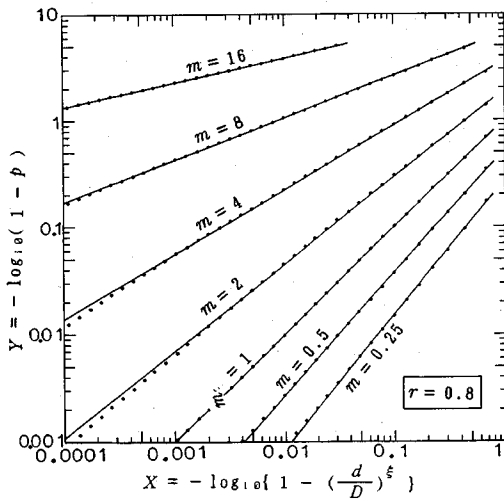


図-1 XとYの関係 (r=0.8の場合)

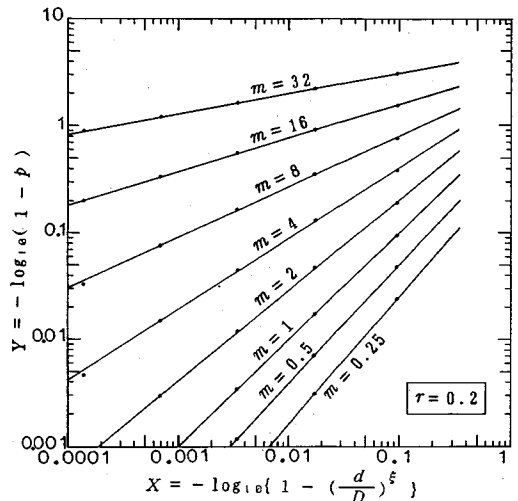


図-3 XとYの関係 (r=0.2の場合)

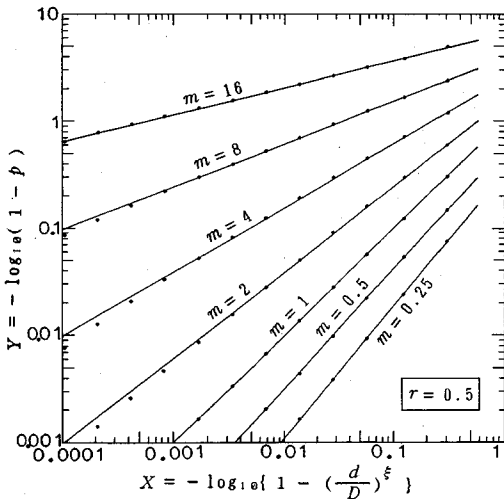


図-2 XとYの関係 (r=0.5の場合)

表-2 α, βの値

m	r=0.8		r=0.5		r=0.2	
	α	β	α	β	α	β
16	21.17	0.769	12.31	0.747	5.81	0.689
8	10.99	0.602	6.36	0.602	3.72	0.526
4	5.08	0.395	3.48	0.398	2.51	0.335
2	2.22	0.189	1.86	0.193	1.63	0.152
1	1	0	1	0	1	0
0.5	0.46	-0.138	0.51	-0.120	0.59	-0.112
0.25	0.22	-0.247	0.27	-0.232	0.33	-0.191

表-3 α, βの値 (計算値)

m	r=0.8		r=0.5		r=0.2	
	α	β	α	β	α	β
16	23.01	0.763	12.16	0.749	5.62	0.697
8	10.79	0.628	6.40	0.610	3.51	0.549
4	4.94	0.445	3.42	0.426	2.31	0.367
2	2.23	0.225	1.85	0.212	1.54	0.175
1	1	0	1	0	1	0
0.5	0.46	-0.192	0.53	-0.174	0.61	-0.134
0.25	0.21	-0.328	0.28	-0.295	0.35	-0.222

係数 A, B を図上の最初の 2 点, つまり $n=1$ と $n=2$ に相当する点の座標値 ($\log X_1$ と $\log Y_1$, $\log X_2$ と $\log Y_2$) を用いて式表示する. A, B と α, β との間には, 式 (4) の誘導過程をたどれば, $\beta=1-B, \alpha=A(\log_{10}e)^{B-1}$ の関係がある.

一方, 離散型の式 (1) から, 同じ図上の最初の 2 点 ($n=1$ と $n=2$ に相当する点) に対し, 次の関係式が成り立つ (付録参照).

$$\begin{cases} X_1 = -\log_{10}(1-r) \\ Y_1 = -m \log_{10}(1-r) \\ X_2 = -\log_{10}(1-r^2) \\ Y_2 = -m \log_{10}(1-r) - \log_{10}(1+mr) \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

それ故, 式 (7) を用い係数間の関係を整理して示せば, 結局, 次式のような関係が得られる.

$$\begin{cases} \alpha = m(-\log_e(1-r))^\beta \\ \beta = 1 - \frac{\log_{10}\left\{1 + \frac{\log_{10}(1+mr)}{m \log_{10}(1-r)}\right\}}{\log_{10}\left\{1 + \frac{\log_{10}(1+r)}{\log_{10}(1-r)}\right\}} \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

この式から, 従来方法^{1)~4)}で m, r の値が求まっているとき α, β の値を概略推定することができる. なお参考までに, 式 (8) から計算した α, β 値を表-3 に示しておく. 表-2 中の値と比較対照されたい.

表—4 各分野における粒度式

提 案 者	粒 度 式*	摘 要
Fuller-Thompson (1907)	$p = \sqrt{\frac{d}{D}}$	最大密度を与える理想粒度として、コンクリート骨材分野で提案された実験式。文献：9), 10)
Talbot (1923)	$p = \left(\frac{d}{D}\right)^a$	上記実験式の拡張型。コンクリートの配合設計に関して提案されたが、土質材料などの配合にも使われている。文献：8), 11), 12)
Rosin-Rammler (1933)	$p = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{d}{b}\right)^a \right\}$	石炭などの各種粉砕産物の粒度分布について提唱された式で、粉粒体を扱う分野で広く使われている。最初、経験的に求められたが、その後、理論的基礎づけが成された。式中のbは粒度特性数(≒D)。文献：13) ~19), 20), 21)
Roller (1937)	$p = a\sqrt{d} \exp \left\{ - \left(\frac{b}{d}\right) \right\}$	同様な式をGriffith (1943) も提案している。数学的根拠が割合ははっきりしているので一時注目されたが、粉砕産物にはあまり合わないで殆ど使われていない。文献：13), 15), 16), 18)
Gaudin-Schuhmann (1940)	$p = \left(\frac{d}{b}\right)^a$	碎片の粒径分布式。式中のbは、Schuhmann size modulusと呼ばれる一種の特性値(≒D)である。文献：13) ~15), 20), 21)
Bolomey (1947)	$p = a + (1-a) \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$	Fuller parabolaの修正式。式中のaは、コンクリートのworkabilityに関係する経験定数(0.15前後)である。文献：10)
Meloy (1960)	$p = 1 - \left(1 - \frac{d}{D}\right)^a$	粉砕産物に対する式。等方で均一な固体の単一破壊モデルを考え、大きさDの粒子が任意の大きさdに破壊する確率から導かれた。文献：13), 20)
Gilvarry (1961)	$p = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{d}{a}\right) - \left(\frac{d}{b}\right)^2 - \left(\frac{d}{c}\right)^3 \right\}$	粉砕産物に対する式。脆い固体の単一破壊に関する理論的・実験的研究から提唱された。指数項中の第1～第3項は、それぞれ固体内部に存在するマイクロ欠陥(flaw)の線状、面状、体積状欠陥に関係している。文献：20), 21)
井上-野村 (1985)	$p = \left\{ 1 + a \left(1_n \frac{2}{d}\right)^b \right\}^{-c}$	農業分野。鳥取地方の砂地圃場の土壌を対象に提案された実験式。文献：22)

* 式中、dは粒径、Dは最大粒径、そしてa, b, cは係数(正の値)である。

5. 既存の粒度式との関係

粉粒体を扱う化学工学分野や骨材・砕石・土などを扱う土木工学分野をはじめとする各分野で現在用いられている粒度式には、大別して①正規分布や対数正規分布など確率統計学上の式を援用しようとする立場のものと、②取扱う現象に合わせて最も確に粒度を式化して使おうとする立場のもの、とがある。

ここでは、後者の立場から提案された粒度式を対象に検討する。表—4は、それらを身近にある文献類^{21)~22)}か

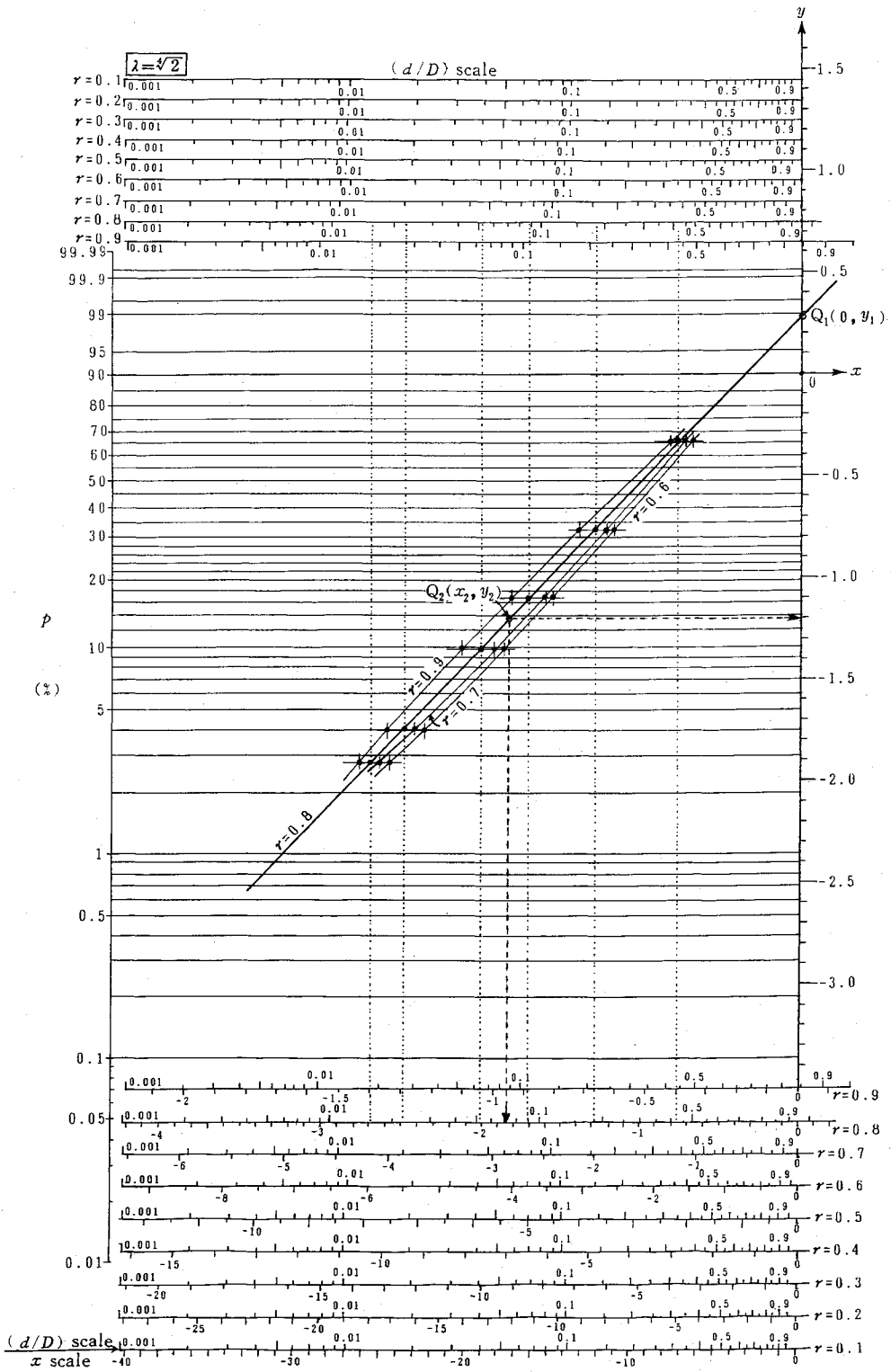
ら拾い、年代順に整理して示したものである。表中より主要な粒度式を取り上げ、それらが3節で得られた連続型の粒度式(簡略式)、つまり式(6)とどのような関係にあるかを調べることにする。

Meloy式:

式(6)において、 $\beta=0$ とおき、

$$p = 1 - \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^\xi \right]^\alpha \dots\dots\dots (9)$$

となる。式(9)において、 $\xi=1$ とおけば、Meloyの式



図—4 確率紙

$$p = 1 - \left(1 - \frac{d}{D}\right)^\alpha \dots\dots\dots(10)$$

が得られる。

Gilvarry 式：

式 (9) 式において、

$$\left\{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^\xi\right\}^\alpha = \exp\left[-\alpha\left\{\left(\frac{d}{D}\right)^\xi + \frac{1}{2}\left(\frac{d}{D}\right)^{2\xi} + \frac{1}{3}\left(\frac{d}{D}\right)^{3\xi} + \dots\right\}\right] \dots\dots\dots(11)$$

と書けるから、この第3項までを採用し、 $\xi=1$ とおき、

かつ $k = \frac{D}{\alpha}$, $j = D\sqrt{\frac{2}{\alpha}}$, $i = D\sqrt{\frac{3}{\alpha}}$ において整理すれば、Gilvarry の式

$$p = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{d}{k}\right) - \left(\frac{d}{j}\right)^2 - \left(\frac{d}{i}\right)^3\right\} \dots\dots\dots(12)$$

となる。

Rosin-Rammler 式：

式 (11) における右辺指数項の第2項以降を無視し、 $k = D/\alpha^\xi$ において整理すれば、Rosin-Rammler の式

$$p = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{d}{k}\right)^\xi\right\} \dots\dots\dots(13)$$

が得られる。

Gaudin-Schuhmann 式：

これは、式 (13) を級数展開し、第1項のみをとったもの、すなわち

$$p = \left(\frac{d}{k}\right)^\xi \dots\dots\dots(14)$$

である。

以上のことから、3節で得られた連続型粒度式は、従来の主要な粒度式のほとんどを包含するような一般性の高い式であることが分かる。

6. 確率紙とその利用

対数正規分布には対数正規確率紙があるように、本報で扱う連続型粒度式 (基本式) にもそれ相応の確率紙があれば、粒度試験から求まる質量通過百分率 p と粒径 d との関係を直接確率紙上にプロットすることによって、即座に式 (4) に従う分布であるか否かの判別ができて便利である。

そこで、確率紙の作成に当たり、まず横軸を x 、縦軸を y と記号する。 x と y はそれぞれ (d/D) 、 p と次の対応関係にある (2節参照)。

$$\left\{x = \log_{10} X = \log_{10}\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^\xi\right]\right\} \dots\dots\dots(15a)$$

$$\left\{y = \log_{10} Y = \log_{10}\{-\log_{10}(1-p)\}\right\} \dots\dots\dots(15b)$$

これらの関係式を基礎に、算術目盛を付した x 軸上と y 軸上にそれぞれ (d/D) 値と p 値を抱き合わせて目盛る

表-5 具体例

粒 径 d (mm)	粒径比 $\frac{d}{D}$	残留率 q (%)	質 量 通 過 百分率 p (%)
4.75	1		100
		34.47	
2.00	0.421		65.53
		33.32	
0.85	0.179		32.21
		15.50	
0.425	0.089		16.71
		6.80	
0.250	0.053		9.91
		5.92	
0.106	0.022		3.99
		1.25	
0.075	0.016		2.74
		2.74	

ことにより、図-4 に示すような確率紙が得られる。ここで注意すべきことは、式 (15a) から知れるように、 $\xi (= -\log r / \log \lambda)$ の値の如何によって横軸の目盛が変化することであり、そのために本確率紙では $\lambda = \sqrt[4]{2} \approx 1.189$ とし $r=0.1$ から $r=0.9$ まで9通りに変えて横軸が描かれている。

次に、上記の手順で作成された確率紙の具体的な使い方について説明する。いま、表-5のような粒度試験結果が与えられた場合を考える。表中の p と (d/D) 欄の値を直接確率紙上にプロットすれば、図-4中に示したような複数本の曲線 (実線) が描ける。このうち、 $r=0.8$ 相当の横軸に準拠して描いた線は、ほぼ一直線と見なし得る。このことから、与えられた粒径加積曲線は式 (4) に従うことが確認できる。さらに、この確率紙を利用して式中の係数 α 、 β の値を求めることができる。先程の直線上に2点を定め (うち1点は y 軸上がよい)、それらの座標値 (x, y) を読み取る。図-4では点 $Q_1(0, y_1)$ と点 $Q_2(x_2, y_2)$ を採っている。あとは下記の例に習って行えばよい。

例 図-4 において、 $y_1 = 0.27$, $x_2 = -1.85$, $y_2 = -1.20$ であるから、

$$\left\{ \begin{aligned} \beta &= 1 - \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = 1 - \frac{0.27 - (-1.20)}{0 - (-1.85)} = 0.2054 \\ \alpha &= 10^{y_1} \cdot (\log_{10} e)^{-\beta} = 10^{0.27} \times (0.4343)^{-0.2054} = 2.210 \end{aligned} \right.$$

7. 結 言

本報では、先に提案した離散型粒度式の連続分布式化

を試みるとともに、得られた連続型粒度式と各分野における既存の粒度式との関係と比較検討している。主な成果は次のとおりである。

(1) 離散型から連続型への変換を一種の図解的な方法で成し遂げ、式(4)に示すような連続型粒度式(基本式)を得ている。

(2) この連続型粒度式は、各分野で現在用いられている主要な粒度式の大部分を包含するような一般性の高い式である、ということを経験比較によって明らかにしている。

(3) 確率紙を作成し、この連続型粒度式の利用の便をはかっている。

付録 式(7)の説明

式(1a)において、 $n=1$ のとき $p_1=1-(1-r)^m$ 、 $n=2$ のとき $p_2=1-(1-r)^m \cdot (1+mr)$ であるから、

$$\begin{cases} Y_1 = -\log_{10}(1-p_1) = -m \log_{10}(1-r) \\ Y_2 = -\log_{10}(1-p_2) = -m \log_{10}(1-r) - \log_{10}(1+mr) \end{cases}$$

一方、式(1b)において、 $n=1$ のとき $d_1=D/\lambda$ 、 $n=2$ のとき $d_2=D/\lambda^2$ であり、また $\xi = -\log r / \log \lambda$ であるから、

$$\begin{cases} X_1 = -\log_{10} \left\{ 1 - \left(\frac{d_1}{D} \right)^\xi \right\} = -\log_{10}(1-r) \\ X_2 = -\log_{10} \left\{ 1 - \left(\frac{d_2}{D} \right)^\xi \right\} = -\log_{10}(1-r^2) \end{cases}$$

となる。

参考文献

- 福本武明：まさ土の粒径分布に関する一考察，第22回土質工学研究発表会，pp.165~166，1987。
- 福本武明：まさ土の粒度式について，第23回土質工学研究発表会，pp.197~198，1988。
- 福本武明・三好力也：花崗岩質風化残積土の粒度特性，立命館大学理工学研究所紀要，第48号，pp.55~68，1989。
- Fukumoto, T.: A Grading Equation for Decomposed Granite Soil, *Soils and Foundations*, Vol.30, No.1, pp.27~34, 1990。
- 福本武明：離散型粒度式の連続分布式化への試み，土木学会第45回年次学術講演会講演集，Ⅲ，pp.1094~1095，1990。
- 福本武明：土の粒径分布に関する検討，土木学会論文集，No.475/Ⅲ-24，pp.11~18，1993。
- 福本武明：土の粒度式の特性，土木学会論文集，No.469/Ⅲ-23，pp.103~110，1993。
- 例えば，福岡正己：河川堤防堤体材料の理想的粒度曲線について，土木研究所報告，No.86，pp.1~12，1953；Agg. T.R.: *The Construction of Roads and Pavements*, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1940。
- 例えば，内田一郎：道路舗装の設計法，森北出版，P.54，1962；Road Research Laboratory: *Soil Mechanics for Road Engineers*, p.222, 1951。
- Powers, T.C.: *The Properties of Fresh Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., pp.246~256, 1968。
- Lee, C.H.: Selection of Materials for Rolled-Fill Earth Dams, *Transactions of ASCE*, Vol.103, pp.1~61, 1938。
- Spangler, M.G.: *Soil Engineering*, International Textbook Company, p.64, 1951。
- 原 真：碎石，技術書院，pp.219~220，1971。
- 通産省資源エネルギー庁長官官房鉱業課監修：碎石ハンドブック，技報堂，pp.651~660，1976。
- 日刊工業新聞社編：粉粒体の貯槽と供給装置，pp.9~11，1964。
- 久保・水渡・中川・早川共編：粉体一理論と応用，丸善，pp.81~83，1962。
- 三輪茂雄：粉粒体工学，朝倉書店，pp.85~120，1972。
- 川北公夫・小石真純・種谷真一：粉体工学（基礎編），槇書店，1974。
- Stanley-Wood, N.G., et al: Enlargement and Compaction of Particulate Solids, *Bullerworths Monographs in Chemical Engineering*, pp.15~18, 1983。
- Bergstram, B.H.: Energy and Size Distribution Aspects of Single Particle Crushing, *Proc. of 5th Symposium on Rock Mechanics*, pp.155~172, 1963。
- 水谷仁：岩石の破壊による粒子のサイズ分布，地学雑誌，Vol.98, No.6, pp.2~8, 1989。
- 井上光弘・野村安治：砂土の粒径加積曲線に関する実験式とその特徴，鳥取大学砂丘研報，No.24, pp.41~50, 1985。

(1993.8.30 受付)

A CONTINUOUS TYPE GRADING EQUATION FOR SOIL

Takeaki FUKUMOTO

The grading equation is applicable to other granular soils of various types, including of course weathered residual soil like decomposed granite soil. However, the proposed equation is the grading equation of discrete distribution type. Therefore, in this study, an attempt was made to transform the equation from the discrete type to the continuous distribution type, and a grading equation of continuous type was derived. By comparing the continuous type equation with the main grading equations, it was found that this equation had a greater scope of application.