コンクリート用砕砂の粒度分布の表示方法に関する検討

STUDY ON EXPRESSION METHOD FOR GRADING OF CRUSHED SAND FOR CONCRETE

阿部道彦 ——— * 1

Michihiko ABE ——— * 1

キーワード：

砕砂, 粒度, 表示方法, 三村式, 修正ロジック - ラムラー式

Keywords:

Crushed sand, Grading, Expression method, Mimura's equation, Modified Rosin-Rammler's equation

Grading of crushed sand is different from that of natural sand. In this report, in order to simplify the expression method of grading of crushed sand, modified Rosin-Rammler's equation was studied instead of Mimura's one with five experimental constants. It was found that the grading of crushed sand can be expressed with modified Rosin-Rammler's equation using two experimental constants and introduction of fineness modulus to the equation was considered. Based on the existing data and the provided equation in this study, it is suggested that one of the stipulations on crushed sand of JIS A 5005 may be reconsidered.

1. はじめに

わが国は、以前良質な河川産骨材に恵まれていたが、地域により次第に良質なものが採取されなくなり、細骨材は川砂から他の天然砂に移行し、天然砂と砕砂の混合使用や最近では砕砂の単独での使用もみられるようになってきている。砕砂が JIS A 5004 (コンクリート用砕砂) ^{注1)}として規格化されたのは1980年であるが、すでにそれ以前からレディーミクストコンクリート工場やコンクリート製品工場で砕砂が使用されており、ダムでは1955年竣工の上樫葉ダムをはじめ、多くのダムに使用されてきている ²⁾。

天然砂の粒度分布は、図1に例示 ³⁾するように一般に対数正規分布に近い分布を示すため、その数学的な取扱いが容易であり、D. A. Abrams が1918年に提唱した粗粒率は粒度分布の平均値に相当する。それに対し、岩石を破碎して製造する砕砂は、図2に例示 ⁴⁾するようにそれとはやや異なる下に凸の粒度分布を示し、筆者もそれを確認している ⁵⁾。なお、図1および図2で用いた標準偏差 σ は、文献6)と同様の方法で求めている。

砕砂の粒度分布を示す式として、三村らと山岡がそれぞれ式(以下、三村式、山岡式という)を提示している ^{7), 8)} が、それらは複雑な式のため本稿では簡略化した式として Rosin-Rammler の式 ⁹⁾を修正した式(以下、修正 Rosin-Rammler 式という)について検討を行うこととし、かつ、粗粒率を式に取り込むこととした。また、今回文献で調べた砕砂の粒度分布の実態および修正 Rosin-Rammler 式に基づき、連続するふるいの間にとどまるものの質量分率を45%未満とする JIS A 5005 (コンクリート用砕砂及び砕砂)の規定(以下、45%未満規定という)の必要性を検討した。

2. 検討の方法

2.1 砕砂の粒度分布を表示する既往の式

前述したように砕砂の粒度分布を示す式としては三村式と山岡式がある。ここではまず両者の式を紹介し、次いで本検討で用いた修正 Rosin-Rammler 式について説明することとする。

図1 天然砂の粒度分布と対数正規分布への適合性

図2 砕砂の粒度分布と対数正規分布への適合性

*1 工学院大学 名誉教授・工博 / 国立研究開発法人建築研究所 客員研究員
(〒305-0051 茨城県つくば市二の宮1-4-18)

*1 Prof. Emeritus, Kogakuin Univ. / Visiting Researcher, Building Research Institute, Dr.Eng.

(1) 三村式

ロッドミルを用いた実験に基づく三村式を式(1)に示す。この式は、10を底とし、べき指数に4次の多項式の逆数を含み、そのため実験定数がaからeまで5つある複雑な式となっている。

$$R=10^{(2-1/D)} \cdot \dots \cdot (1)$$

ここに

R：累加残留率（%）^{注2)}

D： $a+b(\log(x/x_0))+c(\log(x/x_0))^2+d(\log(x/x_0))^3+e(\log(x/x_0))^4$

x：ふるいの寸法^{注2)}（mm）

x_0 ：砕砂の細かさを表す定数で、本稿では粒度曲線上における通過率50%のときのふるいの寸法の推定値 P_{50} （mm）をいう。

（以下、50%通過寸法または P_{50} と略記）

a, b, c, d, e：実験定数(a=3.215, b=-7.713, c=8.622, d=-4.326, e=0.504)

(2) 山岡式

山岡は大野ダムにおける輝緑凝灰岩を用いたロッドミルによる実験より、式(2)を提示している。この式は、べき指数の4次の多項式を逆数としていない点が三村式と異なっている。また、 $x/x_0=1$ のときは $S=50$ となることから、 $a=\log 50=1.699$ としている。ただし、この式は1.2mmから5mmまでの通過率の適合性が三村式より良くないため、本稿では検討の対象としないこととしている。

$$S=10^D \cdot \dots \cdot (2)$$

ここに

S：通過率（%）

D： $a+b(\log(x/x_0))+c(\log(x/x_0))^2+d(\log(x/x_0))^3+e(\log(x/x_0))^4$

a：定数（1.699）、b, c, d, e：実験定数

（b=0.770, c=-0.831, d=-0.015, e=0.696）

2.2 本検討で用いた修正 Rosin-Rammler 式

三村らは、論文の中でミル破砕物の粒度分布の関数の形として Rosin-Rammler の式が有名で、また、それよりさらに簡単な Bond の式もあるが、これらの式が適用できないことは、試験の結果から明らかであるとしている。後者の式については一見して適用困難と思われたが、前者については検討の余地があると考え、本稿では前者の式について検討することとした。

Rosin-Rammler の式の表示方法はいくつか提案されているが、ここでは三村式に準じて x_0 を式に用いることとし、式(3)に示すように元の式の2つの実験定数 B, C に A を加えて3つの実験定数を設定してこの式を修正 Rosin-Rammler 式（図中では R-R 式と略記）と呼ぶこととした。そして、実験定数をソルバー解析で求めた。

$$R=A \cdot \exp(-B \cdot (x/x_0)^C) \cdot \dots \cdot (3)$$

ここに

A, B, C：実験定数

A は元の Rosin-Rammler の式では100としているが、対象とする

図3 P_{50} を求めるときの目盛の相違の影響

表1 三村式と本検討における P_{50} の比較

試料の種類	50%通過寸法 P_{50} （mm）				残差平方和	
	三村	普通目盛	対数目盛	左2つの平均	三村式	本検討
A1	1.75	1.77	1.67	1.72	23.9	14.7
A2	1.25	1.24	1.22	1.23	11.2	2.9
A3	0.74	0.75	0.71	0.73	10.5	2.0
A4	0.52	0.51	0.49	0.50	5.9	5.6
A5	0.32	0.33	0.32	0.33	26.5	48.2
残差平方和の平均					15.6	14.7

本検討で用いた三村式の係数は以下のとおり

a=3.31, b=-7.37, c=7.31, d=-4.63, e=1.46

粒度範囲（0.15mm以上）における実験結果との適合性を考慮して本稿では実験定数として設定したものである。

x_0 については文献7)および文献8)には数値は記載されているが、求め方はいずれの文献にも記載がない。このため、数値の記載のない試料の P_{50} については、本稿では、横軸を普通目盛とした場合と対数目盛とした場合について、それぞれ直線補間により50%通過寸法を求め、両者の平均値（以下、精算値という）を用いることにした。その理由は、図3に示すように、普通目盛で粒度曲線を表示すると、通過率50%の前後ではやや上に凸の曲線となるため、直線補間すると50%通過寸法を実際の値より大きく推定することになるのに対して、対数目盛で表示すると、これとは逆の結果になるためである。表1に三村らの実験結果を用いて、 P_{50} について三村らの求めた値を用いた場合と上述の本検討で求めた精算値を用いた場合の残差平方和を比較して示しているが、試料A5以外は本検討のほうが小さくなり、残差平方和の平均でもわずかに小さくなっている。

3. 検討の結果

3.1 各種実験結果等への修正 Rosin-Rammler 式の適合性

(1) 三村らの実験結果への適合性

表2および図4は表1における5種類の試料を用いて三村式と修正 Rosin-Rammler 式の適合性を比較したもので、これらによると、修正 Rosin-Rammler 式を用いて実験定数を3個にした場合と2個にした場合は、残差平方和の平均が三村式と同等かそれ以下の結果となった。実験定数を1個にした場合は細粒の部分で2~3%実験値を下回った。

表2 三村式と修正 Rosin-Rammler 式の適合性

式の種類	実験定数の数	A	B	C	残差平方和の平均
三村式	5	—	—	—	15.6
修正 Rosin-Rammler 式	3	95.0	0.662	1.09	12.8
	2	98.0	0.704	1	15.8
	1	100	0.728	1	19.5

なお、三村らの文献では、縦軸は累加残留率で表示されているが、煩雑さを避けるため、本稿ではすべて通過率で表示している。

(2) 上椎葉ダムに使用された砕砂への適合性

図5は、上椎葉ダムにおけるロッドミルを用いた製砂の実績10試料¹⁰⁾について、上記と同様の検討を行ったもので、三村式では細粒部分で実験値をやや上回った。このため、残差平方和が最小になるように実験定数を変更したところ、実験定数を3個にした場合の修正 Rosin-Rammler 式とほぼ同様の結果となった。ただし、実験定数を変更した三村式では、図5から分るように、 x/P_{50} が5を超えると通過率が減少し、実験値から乖離していくため、注意が必要である。

(3) 奥只見ダムで行われた実験への適合性

奥只見ダムの骨材生産計画のために花崗閃緑岩を用いて行われたロッドミルによる実験31試料¹¹⁾について上記と同様の検討を行った(図6参照)。これによると、三村式は粗粒の部分でやや実験値より小さくなっているものの良い適合性を示している。修正 Rosin-Rammler 式では、実験定数を適切に設定することにより粗粒の部分でも適合性が良くなっており、残差平方和の平均は、三村式38.5に対し、修正 Rosin-Rammler 式では24.6となった。

3.2 修正 Rosin-Rammler 式における各実験定数等の関係

これまでの検討により、三村式と修正 Rosin-Rammler 式のいずれにおいても、実験定数を適切に設定すれば、実験値をかなり良く推定できることが確認された。修正 Rosin-Rammler 式は実験定数が3個で三村式の5個に比べて少ないが、さらに簡略化することを検討した。検討に用いた砕砂の試料の件数は、表3に示すように1970年以降の152件である。1970年代の研究論文には粒度分布を示していたものが多かったが、最近の研究論文等では、砕砂の粗粒率のみ示し、粒度分布まで示したものが少ないため、データはやや古い時期のものが多い。なお、3.4までの検討では、実用性を考慮して粗粒率4以上のもの3件と極端なギャップグレードのもの1件を除いた148件の試料を対象としている。

図7は、実験定数BとAおよびCの関係、粗粒率および0.15mm以下と実験定数BおよびCの関係を示したものである。0.15mm以下についても検討したのは、式(3)の関数の形から、0.15mm以下が増加すると、実験定数BとCも大きくなると推測されたためである。これらの関係のうち、実験定数BとAの間には高い相関が認められ、BをAで表示することが可能といえる。回帰式の係数49.7と0.988は、実

図4 三村式と修正 Rosin-Rammler 式の比較

図5 上椎葉ダムに使用された砕砂への適合性

図6 奥只見ダムの実験結果への適合性

表3 実験定数の間の関係の検討に用いた試料

掲載誌	期間	件数
セメント技術年報	1970-1978	12
セメント・コンクリート	1973-1976	6
セメント協会F-28	1976	12
骨材資源	1971-2011	39
土木学会年次学術講演会講演概要集	1974	1
日本建築学会大会梗概集・支部研究報告集	1976-1983	30
月刊生コン・コンクリートテクノ	1991-2004	19
コンクリート工学論文集・年次論文集	1995-2012	33
合計		152

図7 各実験定数、粗粒率および0.15mm以下の関係

用上それぞれ 50 と 1.0 とみなしても差し支えないと考えられ、これを式(3)に代入すると、累加残留率 R は次式となる。

$$R = 50 \cdot \exp[B \{1 - (x/x_0)^e\}] \cdot \dots \cdot (4)$$

このほか、0.15mm 以下と実験定数 B の間にもやや相関が認められるが、JIS A 5005 の砕砂の粒度規定の上限である 15% 以下では相関が明確でなく、これについては今後の課題としたい。

なお、全試料 148 件から求めた実験定数の平均値は、A=99.7、B=0.700、C=1.20 となった。

3.3 粗粒率の式への取込み

コンクリートの割合計算を行うときには、細骨材の粗粒率の設定が重要である。そしてそのためには、粗粒率 f.m.^{注3)} と 50% 通過寸法の関係が明確になっていると便利である。図 8 は試料数(n)が 10 件以上の文献を用いて両者の関係を示したもので、両者の間には高い相関が認められた。文献ごとに求めた回帰式の係数を平均すること考えたが、表 4 に示すように、粗粒率のデータの範囲が文献によりかなり異なるため、全データを一括して回帰式を求めることとした。求めた回帰式から、式(3)の x_0 には $0.0957 \exp(0.783 \times \text{粗粒率})$ を代入すればよいこととなる（以下、 P_{50} の略算値という）。なお、得られた回帰式の係数は、粗粒率の範囲の広い文献 11) と文献 7) の係数の平均 (0.0957, 0.786) にきわめて近い値となっている。

3.4 修正 Rosin-Rammler 式の適合性の検討

以上の検討により、砕砂の粒度を三村式の代わりに修正 Rosin-Rammler 式により表示できる可能性が示された。これまでの検討はロッドミルを用いたダム用の砕砂に関する実験に基づいているが、ダム以外を対象に行われた表 3 に示す実験に用いられた砕砂

図8 粗粒率と 50%通過寸法の関係

表 4 P_{50} の算定に用いた粗粒率のデータの範囲

文献	発表年	試料数 n	粗粒率				粗粒率のxとした P_{50} の回帰式
			最小	最大	範囲	平均	
10	1954	10	2.68	3.27	0.59	2.92	$0.0666 \exp(0.896x)$
11	1959	31	1.12	4.00	2.88	2.31	$0.0987 \exp(0.782x)$
7	1959	24	1.14	4.24	3.10	2.77	$0.0927 \exp(0.790x)$
8	1963	27	2.01	3.46	1.45	2.64	$0.0780 \exp(0.852x)$
1	1976	12	2.56	4.81	2.25	3.20	$0.1219 \exp(0.692x)$
12	1983	11	2.39	2.57	0.18	2.50	$0.0601 \exp(0.946x)$
4	1991	12	2.57	3.24	0.67	2.85	$0.0638 \exp(0.950x)$
13	2000	14	2.29	4.26	1.97	2.98	$0.1023 \exp(0.782x)$
全体		141	1.12	4.81	3.69	2.70	$0.0957 \exp(0.783x)$

図9 修正 Rosin-Rammler 式の適合性

152 件のうち 3.2 で述べた理由で 4 件を除いた 148 件の粒度について修正 Rosin-Rammler 式の適合性を検討した。これらのデータには、製砂機や製造条件の明示されていないものも多かったが、式の適合性の全般的な傾向を把握するため、データを一括して扱うこととした。なお、適合性については 148 件の各粒度の実験値と推定値の残差平方和を求め、その平均で比較することとした。

図 9 に示す 5 枚の図は、通過率の実験値と推定値の関係を様々な条件で比較したものである。また、5mm ふるいを通過するものはほとんど 100% またはそれにきわめて近い値のため、2.5mm 以下のふるいの通過率について示している。

図 9(1) は、3 つの実験定数 A、B、C を使い、50% 通過寸法 P₅₀ を精算で求めたものである。これによると、修正 Rosin-Rammler 式によりかなり精度よく碎砂の粒度が推定できることがわかる。

図 9(2) は、実験定数を B と C の二つにして、50% 通過寸法 P₅₀ を精算値とした場合である。これによると、実験定数を 3 個にした場合と 2 個にした場合でほとんど差のないことが分かった。

図 9(3) は、P₅₀ を精算値ではなく略算値を用いた場合である。精算値を用いた場合に比べて、全体にやや精度が悪くなっており、特に通過率 50% の前後にその傾向が認められる。

図 9(4) は、実験定数 B と C をそれぞれ平均値である 0.7 と 1.2 に固定し、P₅₀ を精算値とした場合である。通過率 50% 前後での適合は良いが、粗粒および細粒の部分で適合が悪くなっている。

図 9(5) は、P₅₀ を略算値とした場合である。粗粒と細粒の部分では図 9(4) とほとんど相違がないが、通過率 50% 付近ではばらつきが大きくなっている。

図10 碎砂の 45%未満規定に関する検討

表5 碎砂の 45%未満規定の検討に用いた粒度

粒度の種類	ふるいの寸法 (mm)	0.15	0.3	0.6	1.2	2.5	5	10	粗粒率
標準粒度の 上限近傍	通過率 (%)	15	32	58	87	99	100	100	2.10
	通過率の差 (%)	17	26	29	12	1	-	-	-
上記より0.15mm以下を2%に減少	通過率 (%)	2	21	53	86	100	100	100	2.38
	通過率の差 (%)	19	32	33	14	0	-	-	-
標準粒度の 下限近傍	通過率 (%)	5	12	26	50	81	98	100	3.28
	通過率の差 (%)	7	14	24	31	17	2	-	-
上記より2.5mm以上を除外し、0.15mm以下を2%に減少	通過率 (%)	2	11	28	59	100	100	100	3.00
	通過率の差 (%)	9	17	31	41	-	-	-	-

なお、図 9(4)で通過率 50%のところの対応がきわめて良くなっているのは、 P_{50} を略算値ではなく、精算値を用いているためで、式(4)および式(1)から分るように、 x/x_0 が 1 になると、通過率 50%のときの推定値が 50%となることによるものである。

3.5 砕砂の 45%未満規定に関する検討

表 3 に示す砕砂 152 件のうち、連続するふるいの間にとどまるものの質量分率の差が 45%以上のものは、標準粒度範囲を大きく外れる砕石砂^{注4)} 1 件 (60%、粗粒率 4.41) と混合用の砕砂 1 件 (84%、粗粒率 4.81) で、それ以外では混合用も含めて最大でも 40%であった。

また、JIS A 5005 に規定される砕砂の粒度範囲内の粒度で修正 Rosin-Rammler 式 ($B=0.7$ 、 $C=1.2$ 、 P_{50} : 精算値) に適合する粒度を求めると、図 10 および表 5 に示すように粗粒率 2.10 から 3.28 の粒度となる。これらの粒度について 45%未満規定に適合しないものはないため、連続するふるいの間にとどまるものの質量分率の差が大きくなるように、粗粒率 2.10 のものについて 0.15mm 以下を粒度範囲の規定値の下限である 2%に減少した場合と、粗粒率 3.28 のもので 2.5mm 以上を除去し、0.15mm 以下を 2%に減少した場合について検討した。その結果、前者の場合には 0.6mm と 1.2mm の間にとどまるものが 33%、また、後者の場合でも 1.2mm から 2.5mm の間にとどまるものが 41%となり、45%未満規定を満足することとなった。このため、45%未満規定、すなわち JIS A 5005 の、連続するふるいの間にとどまるものの質量分率の差を 45%未満とする規定は、砕砂に関しては削除も含めた再検討が必要と考えられる。この規定は ASTM C33 (コンクリート用骨材の仕様)¹⁴⁾から引用されたもので、土木学会のコンクリート標準示方書には規定があるが、JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) 附属書 A (レディーミクストコンクリート用骨材) の砂、JASS 5 の砂および JIS の各種スラグ細骨材には規定がない。

なお、現行の細骨材の粒度の規定は、天然砂を前提として設定されていると考えられるが、今後砕砂の使用が増加することを考えると、たとえば 2.5mm 通過率の緩和なども今後の検討課題と考えられる。

4. まとめ

コンクリート用砕砂の粒度分布の表示方法について三村式と修正 Rosin-Rammler 式を比較し、また、JIS A 5005 の砕砂の 45%未満規定について検討した結果は次のようにまとめられる。

- (1) ロッドミルで製造した砕砂の粒度分布は、三村式では実験定数は 5 個であるが、修正 Rosin-Rammler 式を用いると、実験定数を 2 個とした場合でも残差平方和による比較では三村式とほぼ類似の精度で表示できることが確認された。
- (2) 修正 Rosin-Rammler 式の実験定数 A は、実験定数 B を用いて表示可能であるため、実用的には修正 Rosin-Rammler 式は、実験定数 B と C で表示するのが妥当である。
- (3) 50%通過時のふるいの寸法 P_{50} は、粗粒率を用いて推定することができるが、この場合、通過率 50%付近の通過率の推定値は、ややばらつく結果となった。
- (4) JIS A 5005 に規定されている砕砂の粒度範囲内であれば、砕砂の連続するふるいにとどまるものの質量分率の差を 45%未満とする JIS A 5005 の規定は削除も含めて再検討される必要があると考えられる。

注

- 注 1) JIS A 5004 (コンクリート用砕砂) は、1993 年に JIS A 5005 (コンクリート用砕石) と統合され、JIS A 5005 (コンクリート用砕石及び砕砂) となった。
- 注 2) ここでは、JIS の表記ではなく、既往の論文等に使用されている慣用的な表記を用いている。

本稿で用いた慣用的表記	JISの表記
ふるいの寸法	ふるいの公称目開き [JIS Z 8801-1 (試験用ふるい—第1部：金属製網ふるい)] ふるいの呼び寸法 [JIS A 1102 (骨材のふるい分け試験)]
累加残留率	各ふるいにとどまる質量分率 [JIS A 1102] 各ふるいにとどまるものの質量分率 [JIS A 5005 (コンクリート用砕石及び砕砂)]
通過率	各ふるいを通過する質量分率 [JIS A 1102] ふるいを通るものの質量分率 [JIS A 5005]

注 3) 粗粒率の記号としては、f.m.のほか大文字の F.M.も用いられる。

注 4) 砕石からふるい出したもので、文献では砕石砂と記載されている。

参考文献

- 1) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-28 細骨材の品質調査報告，1976.12
- 2) 永倉正：砕砂の利用と問題点，セメント工業，No.89，pp.67-71，1967
- 3) 服部隆：骨材の試験と粗骨材の破碎試験方法，日本建築学会論文報告集，第 57 号，pp.25-28，1957.7
- 4) 藤井隆：骨材需給の実態と品質的諸問題 IV. 月刊生コンクリート，Vol.10，No.11，pp.53-57，1991.11
- 5) 阿部道彦：粗粒率と標準偏差による細骨材の粒度の表示，国立研究開発法人建築研究所 令和 2 年度建築研究発表・討論会（材料部門），（材）15-1~4，2020.5
- 6) F. S. Fulton : The Fineness Modulus and the Grading of Aggregates, Concrete & Constructional Engineering, pp.313-315, 1956.3
- 7) 三村通精、鈴木勇、上野勇、細谷浩正：ロッドミルによる製砂方法に関する研究，土木学会論文集，第 65 号・別冊 3-2，pp.1-17，1959.12
- 8) 山岡一三：製砂並びにロッドミル製砂の特性粒度分布曲線についての研究，発電水力，No.63，pp.20-34，1963.3
- 9) Rosin, P. & Rammler, E. : The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal, The Institute of Fuel, Vol.7, No.31, pp.29-36, 1933.10
- 10) 沢崎巖：ダム建設における製砂用ロッドミル，神戸製鋼，Vol.4, No.4，pp.196-201，1954.10
- 11) 日本建設機械化協会：骨材の生産，pp.231-241，1959.2
- 12) 実松誠，杉田英明，米村方聖：九州地域で製造されている砕砂の物性とそれを使用したコンクリートの性状について，日本建築学会九州支部研究報告，No.27，pp.29-32，1983.3
- 13) 骨材資源 砕砂特集号，Vol.32，No.127，pp.199-282，2000.12
- 14) ASTM C33-52T : Tentative Specifications for Concrete Aggregates, 1952

[2021 年 6 月 2 日原稿受理 2021 年 8 月 19 日採用決定]