



## コンクリート骨材粒度の数値化

|       |                                                                                                                                              |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | <p>言語: jpn</p> <p>出版者: 室蘭工業大学</p> <p>公開日: 2014-07-24</p> <p>キーワード (Ja):</p> <p>キーワード (En):</p> <p>作成者: 後藤, 知以</p> <p>メールアドレス:</p> <p>所属:</p> |
| URL   | <a href="http://hdl.handle.net/10258/3636">http://hdl.handle.net/10258/3636</a>                                                              |

# コンクリート骨材粒度の数値化

後 藤 知 以

## Numerical Characterization of Grading of Concrete Aggregate

Tomoyuki Goto

### Abstract

A primary condition of developing formula for the relations between the grading of aggregate and workability of concrete is that the grading of concrete aggregate should be characterized numerically by a few factors.

In this paper, it is pointed out that four statistics (mean, standard deviation, skewness and kurtosis) based on the fineness modulus scale of particle size distribution are the most suitable parameters for the grading evaluation of concrete aggregate (fine, coarse and combined aggregate).

### 1. ま え が き

通商産業大臣の諮問機関である、産業構造審議会 住宅・都市産業部会 骨材小委員会は、昭和 41 年と 47 年に答申した「今後の骨材政策のあり方」の中で、骨材需給の実績と見通しを示している。これによると、天然堆積粒度の骨材の割合が減少し、昭和 40 年度に供給量の 8 割を超えていた砂と砂利が、昭和 50 年度には、5 割以下になると見通している。急流な河川が多く、四季の変化の大きい日本でも、治水・用水の整備、建設量の増大などのため、破碎・造粒・整粒して採算させる必要のある骨材が、過半を占めるようになってきた。

このように、天然産骨材から加工・人工骨材へと移行が進み、従来「できあい」として対処してきたコンクリート骨材の粒度を、経済的に選択の可能な「あつらえ」特性として認識し、対処すべき状況・条件が整ってきた。しかしながら、コンクリートの軟度などの物性におよぼす骨材粒度の効果が未定量のため、あつらえるべき最適粒度が、いまだ明確に設定されていないのが現状のように思う。

日本建築学会 建築工事標準仕様書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事では、プラスチックでワーカブルなコンクリートを経済的に得ることができるとする粒度範囲を、標準粒度と記して、粗骨材と細骨材の粒度を別々に規定している。しかし、これら標準粒度範囲を設定した理論的根拠を明示していないこと、骨材などの生産事情が経済性の評価を変えていること、細粗混合粒度を対象にした標準粒度であるべきこと、標準粒度の範囲の影響が不明確なこと、などの理由により、現行の標準粒度をあつらえるべき最適粒度とするには、なお多くの検討が必要

であると思う。

たとえば、標準粒度範囲を規定してはいるが、その効果が未定量のため、細粗混合割合やコンクリートの軟度は、いまだに「試し練り」、すなわち試行錯誤で決定するのを原則としている。この「試し練り」の義務化と「できあい」としての骨材粒度が、コンクリートの軟度解析の必要性を少なくし、その研究を渋滞させてきた主な要因であると思う。このことは、水セメント比説と粗粒率の提案者である Abrams が 1940 年に、「コンクリートの調合の基本として、試し練りを唱道することは（これは設計ではない）、我々が過去の世紀の間、コンクリートに関し、ほとんど何も学んでいないことを認めることになる。」と指摘するところである<sup>1)</sup>。セメントの発明以来、理想粒度を目標に多くの提案がなされてきたが<sup>2)</sup>、いまだに「試し練り」が励行されるのは、骨材粒度の記述表示の不充分さにも原因があると思う。

上記の骨材生産事情の変化に加えて、産業廃棄物の骨材資源としての活用、ポンプ打設コンクリートの流動性と品質の向上、結合材としてのプラスチックの利用、などの諸問題とも関連させて、コンクリートの軟度におよぼす骨材粒度の効果を定量的に検討して、あつらえるべき粒度を設定すべきであると思う。

プラスチックでワーカブルなコンクリートの骨材体積濃度は、その骨材の実積率と表面積に密接に関連する特定の値を有する<sup>3)</sup>。それゆえ、粒度の効果を定量化するためには、骨材粒子の充填構造および骨材粒子形状の量的把握が必要であるとともに、粗粒率や最大寸法のほかに、粒度そのものの適正な数値化による記述表示が不可欠である。

本報告は、骨材の個数・長さ・面積・体積を基準にした粒子寸法分布の平均・標準偏差・歪度・尖度の 4 個の統計量を粒度パラメーターとして採用して、コンクリート骨材粒度の数値化を試みる。さらに、平均が慣用の粗粒率となるように粒子寸法を対数変換した分布の体積基準の粒度パラメーターが、細骨材、粗骨材および細粗混合骨材粒度に共通して有効な数値化法であることを指摘し、提案する。

## 2. コンクリート骨材粒度

建築学会の仕様書 (JASS 5) や土木学会の示方書によると、骨材の粒度とは、「骨材の大小粒の混合割合」とか、「骨材の大小粒が混合している程度をいう」と規定、定義している。骨材の粒度に関連する用語を、JASS 5 規定から抄出して、以下に記す。

細 骨 材 「5 mm ふるいを重量で 85% 以上通る骨材」

粗 骨 材 「5 mm ふるいに重量で 85% 以上とどまる骨材」

粗骨材の最大寸法「骨材が重量で 90% 以上通るふるいのうち、ふるい目の開きが最小のものの呼び寸法で示される粗骨材の大きさ」

粗骨材の最小寸法「骨材が重量で少なくとも 95%以上とどまるふるいのうち、ふるい目の開きが最大のものの呼び寸法で示される粗骨材の大きさ」

粗 粒 率「40, 20, 10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15 mm のそれぞれのふるいにとどまる骨材の、全骨材に対する重量百分率の総和を 100 で除した値」

土木学会にも、ほぼ同じ内容の用語が定義されている。これらによると、ある特定の通過比を示すふるい目の開きさえ一致すれば、かなり異質な粒度の骨材でも、同じ用語あるいは数値で表示されることがある。しかし、一般には、気象などの堆積地の条件や、対象とするコンクリート性状が異なるためか、各国のコンクリート関係諸団体毎に、独自の粒度範囲を規定している。それらの規定では、あまり極端な粒度は除外している。JASS 5（昭和 44 年版）に規定する粗骨材と細骨材の標準粒度、および標準調合表の作成に仮定した 3 種の寸法の砂の粒度を表－1 に示す。建築用コンクリートに用いられる粗骨材の最大寸法は、部材断面・鉄筋間隔・かぶり厚さなどの制約から、40 mm 以下に限定される。通常の鉄筋コンクリート建築物には、ほとんど 25 ないし 20 mm の最大寸法が採用されている。

表－1 のふるい通過重量百分率は、JIS A 1102「骨材ふるい分け試験方法」により測定される。それには、JIS Z 8801「標準ふるい」から抽出した、特定の目の開きの 16 個の標準網ふるいが用いられる。寸法の細かい部分は、4 番目毎に抽出した標準ふるい目の開きなので、公比 1：2 の等比数列をなしている。

骨材生産およびコンクリート施工管理上、一般にコンクリート骨材は 5 mm 前後を境に、粗

表－1 JASS 5（昭和 44 年版）標準粒度、および調合表作成に仮定した砂の粒度

| ふるい    |            | ふるいを通るものの重量百分率 |        |        |         |        |          |       |       |  |
|--------|------------|----------------|--------|--------|---------|--------|----------|-------|-------|--|
| 呼び寸法   | 目の開き       | 40 mm          | 30 mm  | 25 mm  | 20 mm   | 砂      | 5 mm     | 2.5mm | 1.2mm |  |
| 100 mm | 101.6mm    | (標準粒度)         |        |        |         |        | (調合表作成砂) |       |       |  |
| 80 "   | 76.2 "     |                |        |        |         |        |          |       |       |  |
| 60 "   | 63.5 "     |                |        |        |         |        |          |       |       |  |
| 50 "   | 50.8 "     | 100            |        |        |         |        |          |       |       |  |
| 40 "   | 38.1 "     | 95-100         | 100    |        |         |        |          |       |       |  |
| 30 "   | 31.7 "     |                | 95-100 | 100    |         |        |          |       |       |  |
| 25 "   | 25.4 "     |                |        | 90-100 | 100     |        |          |       |       |  |
| 20 "   | 19.1 "     | 35-70          | 40-75  | 60-90  | 90-100  |        |          |       |       |  |
| 15 "   | 15.9 "     |                |        |        | (55-80) |        |          |       |       |  |
| 10 "   | 9.52 "     | 10-30          | 10-35  | 20-50  | 20-55   | 100    | 100      |       |       |  |
| 5 "    | 4760 $\mu$ | 0 - 5          | 0 - 10 | 0 - 10 | 0 - 10  | 90-100 | 95       | 100   |       |  |
| 2.5 "  | 2380 "     |                | 0 - 5  | 0 - 5  | 0 - 5   | 80-100 | 80       | 90    | 100   |  |
| 1.2 "  | 1190 "     |                |        |        |         | 50-90  | 50       | 65    | 90    |  |
| 0.6 "  | 590 "      |                |        |        |         | 25-60  | 30       | 40    | 55    |  |
| 0.3 "  | 297 "      |                |        |        |         | 10-30  | 10       | 20    | 30    |  |
| 0.15 " | 149 "      |                |        |        |         | 2-10   | 5        | 5     | 6     |  |

骨材と細骨材に区分して取り扱われている。それ故をもって、標準粒度などで、粗骨材と細骨材の粒度を個別に規定し固定すると、その制約下における粒度の効果は検討できても、最適の細粗混合粒度が得られるとは限らない。したがって、本来的に標準あるいは最適粒度は、細粗別々ではなく、細粗混合粒度を対象に設定さるべきであると思う。

以上のようなコンクリート骨材粒度、すなわち、寸法範囲が広く、そのわりに細粗混合でも10個程度と数少ない、しかも不等間隔の目の開きのふりいで測定される骨材粒度に、あらかじめ、ある特定の分布関数をあてはめて粒度を記述表示するのは、あまり適当ではないと思う。また、土の粒度の善し悪しの判断に利用される、JIS A 1104「土の粒度試験方法」規定の均等係数と曲率係数による数値化では、まだ不十分のように思う。

### 3. 粒度パラメーター

細骨材、粗骨材および細粗混合骨材など、かなり任意な分布を示すコンクリート骨材の粒度を数値化する試みとして、骨材粒子寸法分布の平

均・標準偏差・歪度・尖度の4個の統計量を、個数  $N = \int_0^x n dx$  「粒度パラメーター」と名付けて採用する。

一般に、骨材粒子はふるい分けにより分級されるので、その寸法はふるい目の開きで定義される。

ふるい分け試験で、測定の対象とするのは重量である。粒度効果の定量化を意図するコンクリート

の物性によっては、重量以外の骨材の量、個数・長さ・面積・体積などを基準とする粒度パラメーターによる解析が必要となる。いま、ある骨材試料

中の、寸法  $x$  以下の骨材粒子群の個数  $N$ 、長さ  $L$ 、

面積  $A$ 、体積  $V$  は、傾向を誇張した図-1の陰影部の面積で示される。ただし、 $n$ 、 $l$ 、 $a$ 、 $v$  は、単位粒子寸法あたりの個数、長さ、面積、体積とする。

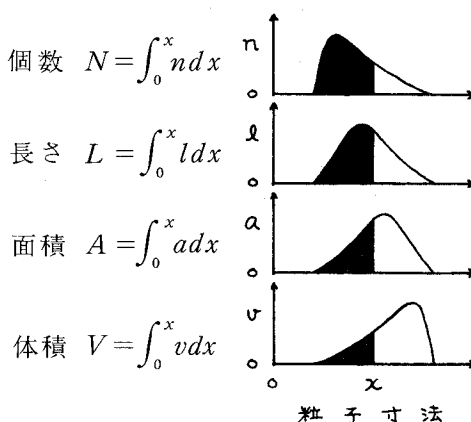


図-1 各基準の粒子寸法分布

$$n = \frac{l}{\alpha x} = \frac{a}{\beta x^2} = \frac{v}{\gamma x^3} \quad \dots (1)$$

このとき、各基準量の次元から、(1)式が成立する。 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は、骨材粒子形状に関連する係数とする。形状が相似なら、粒子寸法にかかわらず定数となる。球では、1、 $\pi$ 、 $\pi/6$ 、立方体では、1、6、1となる。個数基準では小寸法粒子の、体積基準では大寸法粒子の効果が強調される。

一般に、ふるい目の開き  $x$  の通過比、すなわち分布関数  $F(x)$  を(2)式とすると、各基準の粒度パラメーターは(3)~(6)式で計算される。ただし、 $g(x)$  は、求める粒度パラメーターの基準と、密度

関数  $f(x)$  の基準とを対応させて示した、表-2 の関数とする。(7)式は、平均まわりの  $r$  次の積率、すなわちモーメントである。

$$\text{分布関数} \quad F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad \text{---(2)}$$

$$\text{平均} \quad M = \int_0^\infty x f(x) g(x) dx / \int_0^\infty f(x) g(x) dx \quad \text{---(3)}$$

$$\text{標準偏差} \quad SD = M_2^{0.5} \quad \text{---(4)}$$

$$\text{歪度} \quad S = M_3 / M_2^{1.5} \quad \text{---(5)}$$

$$\text{尖度} \quad K = M_4 / M_2^{2.0} \quad \text{---(6)}$$

$$\text{積率} \quad Mr = \int_0^\infty (x-M)^r f(x) g(x) dx / \int_0^\infty f(x) g(x) dx \quad \text{---(7)}$$

表-2 密度関数  $f(x)$  の基準と粒度パラメターの基準に対応する関数  $g(x)$

| 密度関数 $f(x)$ | 粒度パラメターの基準     |                     |                  |                     |
|-------------|----------------|---------------------|------------------|---------------------|
|             | 個数             | 長さ                  | 面積               | 体積                  |
| 個数基準 $n(x)$ | 1              | $ax$                | $\beta x^2$      | $\gamma x^3$        |
| 長さ基準 $l(x)$ | $1/\alpha x$   | 1                   | $\beta x/\alpha$ | $\gamma x^2/\alpha$ |
| 面積基準 $a(x)$ | $1/\beta x^2$  | $\alpha/\beta x$    | 1                | $\gamma x/\beta$    |
| 体積基準 $v(x)$ | $1/\gamma x^3$ | $\alpha/\gamma x^2$ | $\beta/\gamma x$ | 1                   |

以上により、任意基準の密度関数から、任意基準の粒度パラメターを計算することができる。なお、体積基準の分布関数あるいは密度関数は、粒子比重（密度）を媒介にして、重量から容易に換算される。粒子寸法にかかわらず比重が一定なら、重量基準と体積基準は等しくなる。

前章にも記したが、コンクリート骨材は、数少ない、しかも不等間隔の目の開きのふりいの通過比で表示されるので、階級内分布の計算仮定の如何によっては、結果に大きな差異を生ずる。沓沢は<sup>16)</sup>、階級中央に集中する離散の変量を仮定して、粗骨材の粒子寸法分布の標準偏差を計算しているが、使用するふりいの数（階級境界の数）が少なくなると、実際の相違が大きくなる。とくに、一対のふりいで分級された単位としての粒度、単粒の標準偏差は、階級巾にかかわらずなく、全てゼロと評価されてしまう。

階級巾の異なる単粒を相応に評価するためにも、できるだけ実際に近い粒子寸法分布を仮定して、連続的な密度関数を精度よく近似することが重要となる。そのための種々の補間近似法が考えられるが、単調非減少の分布関数を確保するため、初歩的ではあるが、1次補間を採用する。そうすると、階級内一様分布となるので、その間の密度関数は定数となる。

たとえば、体積基準の分布関数  $V(x)$  を1次補間したときの、各基準の平均  $M$  と平均まわ

りの  $r$  次の積率  $Mr$  は, (8), (9) 式で計算される。この積率  $Mr$  から, (4), (5), (6) 式を使って, 粒度パラメーターが得られる。

$$\text{平 均 } M = \sum_{i=1}^n \frac{V(x_i) - V(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \int_{x_{i-1}}^{x_i} x g(x) dx / \sum_{i=1}^n \frac{V(x_i) - V(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \int_{x_{i-1}}^{x_i} g(x) dx \quad \cdots (8)$$

$$\text{積 率 } Mr = \sum_{i=1}^n \frac{V(x_i) - V(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \int_{x_{i-1}}^{x_i} (x - M)^r g(x) dx / \sum_{i=1}^n \frac{V(x_i) - V(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \int_{x_{i-1}}^{x_i} g(x) dx \quad \cdots (9)$$

ただし,  $n$ : 階級数,  $i = 1 \sim n$ ,  $x_{i-1} < x_i$ : ふるい目の開き,  $V(x_{i-1}) \leq V(x_i)$ : 通過体積比,  $V(x_0) = 0$ ,  $V(x_n) = 1$ ,  $g(x)$  は表-2 の最下行の関数とする。粒子形状が階級内で相似なら,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  は定数となるので, 定積分は容易に求められる。

なお, 体積以外の基準の分布関数を 1 次補間しても, それぞれ各基準の平均と積率は得られるが, その基準毎の補間近似なので, それらは互に一致はしない。

#### 4. 粗粒率基準の粒度パラメーター

確率的な現象の結果として造粒・堆積した粉粒体の粒子寸法は, 一般に左(小寸法)側に偏った分布を示すことが多い。これの分散が大きい場合, ゼロあるいは負の粒子寸法が強制されることがある。このように左側に偏った分布の場合, 粒子寸法の対数を採用すると, ほぼ左右対称になり, 対数正規分布の適用が可能になることもある<sup>4)</sup>。

コンクリート骨材でも, ふるい分け試験結果を, 粒子寸法の対数を横軸として図示することが慣例になっている。細骨材のふるい分けに用いるふるい目の開きは, 等比数列を示すので, その対数は等差数列となる。この公比 1:2 系列の目の開きのふるい残留比は, 細骨材のみにとどまらず, 粗粒率の計算に用いられる。

粗骨材に比較して, コンクリートの軟度に大きな影響をおよぼす細骨材は, 大寸法粒子の効果が強調される体積基準の粒度パラメーターでも, 標準粒度範囲内の分布の相違を顕在化させるには, まだ不十分のように思われる。したがって, 骨材粒子寸法の対数を採用して, 平均が慣用の粗粒率となるような分布の粒度パラメーターによる数値化を考察する。

Tyler 社の標準系列のふるいを用いて, Abrams が粗粒率を提案<sup>5)</sup>して以来, その概念およびコンクリートの調合軟度設計への応用に関し, 種々の検討と評価が続けられてきた<sup>3)6)~13)</sup>。仕様書や示方書では, 最も単純で直接的な求値計算法を示して粗粒率を定義している。ASTM C 125 には, an empirical factor であると用語規定しているが, Abrams は提案時に粗粒率が骨材粒子寸法の対数関数であることを言明して, (10) 式を示していた<sup>7)</sup>。

$$m = 7.94 + 3.32 \log d \quad \text{---(10)}$$

ただし,  $m$ : 粗粒率,  $d$ : 粒子径 in,

これから推論されるように, 粗粒率は, 粒子寸法の対数分布の平均に比例する値である<sup>10)</sup>との観点から, ふるい目の開きの寸法比が1:2の階級巾を1.0とし, ASTMと共通なJIS標準ふるい目の開きである4.76 mmを通過し, 2.38 mmに残留する粒子の粗粒率を5.0とする変換関数を, (11)式に示す。

$$X = \frac{\ln x + 2.25206}{\ln 2} \quad \text{---(11)}$$

ただし,  $x$ : ふるい目の開き, あるいは骨材粒子寸法 mm

(11)式の  $X$  の分布の平均は粗粒率となる。Tyler と JIS とのふるい目の開きの誤差で(10)式と同等である。この  $X$  は, 粗粒率そのものではなく, 粗粒率 (FM) スケールとでもいうべきもので, Wentworth 提案<sup>14)</sup>の堆積岩石粒子の粒度尺度  $\phi$  (phi) スケール<sup>15)</sup>と同趣旨のものであると思う。(12)式で示される  $\phi$  とは, (13)式の関係がある。

$$\phi = -\frac{\ln x}{\ln 2} \quad \text{---(12)}$$

$$X = 3.249 - \phi \quad \text{---(13)}$$

この  $X$  に対応するふるい目の開きの通過体積比を1次補間した分布の平均 (粗粒率) と積率は, (14), (15)式で計算される。前章と同様, 平均と積率から計算される標準偏差, 歪度, 尖度を, 粗粒率基準の粒度パラメーターと名付ける。

$$\text{平均 } M = \sum_{i=1}^n \frac{V(X_i) - V(X_{i-1})}{X_i - X_{i-1}} \int_{X_{i-1}}^{X_i} X dX \quad \text{---(14)}$$

$$\text{積率 } Mr = \sum_{i=1}^n \frac{V(X_i) - V(X_{i-1})}{X_i - X_{i-1}} \int_{X_{i-1}}^{X_i} (X - M)^r dX \quad \text{---(15)}$$

ただし,  $n$ : 階級数,  $i = 1 \sim n$ ,  $x_{i-1} < x_i$ : ふるい目の開き mm,  $X = (\ln x + 2.25206) / \ln 2$ ,  $V(X_{i-1}) \leq V(X_i)$ : 通過体積比,  $V(X_0) = 0$ ,  $V(X_n) = 1$  とする。

このように一般的に表示すると, 従来粗粒率の算定から除外されていた, 公比2の系列以外の, たとえば25や15 mmなど, 任意の目の開きのふるいによるデータから, 粗粒率が算定される。さらには, 寸法範囲の限定も必要なく, たとえばJIS Z 8901「試験用粉体」の6種, 普通ポルトランドセメントの粗粒率は, Walker<sup>7)</sup>と略等の-2.24と計算される。

粗粒率基準の粒度パラメーターは, 慣用の粗粒率が平均として計算されること, コンクリートの軟度に影響の大きい細骨材の粒子寸法分布の記述表示に適していること, などからコンクリート骨材粒度の有効な数値化法と考える。なお, 計算式にも示すように, この粗粒率基準の

表-3 JASS5 (昭和44年版) 標準粒度の各種基準の粒度パラメーター

| 基準<br>粒度<br>パラメーター | 40 mm |       |       | 30 mm |       |       | 25 mm |       |       | 20 mm |       |       | 砂     |        |        | mm     |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
|                    | 大     | 中     | 小     | 大     | 中     | 小     | 大     | 中     | 小     | 大     | 中     | 小     | 大     | 中      | 小      | 5      | 2.5   | 1.2   |
| 個<br>数             | M     | 9.07  | 5.78  | 5.12  | 9.30  | 2.48  | 2.22  | 8.16  | 2.71  | 2.36  | 8.37  | 2.74  | 2.41  | 0.16   | 0.14   | 0.13   | 0.14  | 0.15  |
|                    | SD    | 5.63  | 4.06  | 3.30  | 5.43  | 2.56  | 1.96  | 4.11  | 2.59  | 2.01  | 3.83  | 2.62  | 2.02  | 0.14   | 0.10   | 0.11   | 0.11  | 0.10  |
|                    | S     | 2.46  | 3.00  | 2.95  | 1.93  | 4.65  | 4.94  | 2.18  | 3.39  | 3.60  | 1.44  | 2.91  | 3.24  | 6.55   | 6.25   | 8.02   | 6.30  | 4.27  |
|                    | K     | 10.10 | 16.54 | 17.30 | 6.73  | 33.16 | 38.94 | 8.25  | 19.17 | 21.13 | 4.46  | 13.53 | 16.78 | 115.84 | 114.01 | 154.87 | 92.58 | 37.89 |
| 長<br>さ             | M     | 12.56 | 8.64  | 7.25  | 12.47 | 5.12  | 3.95  | 10.23 | 5.19  | 4.07  | 10.12 | 5.25  | 4.10  | 0.29   | 0.21   | 0.23   | 0.22  | 0.21  |
|                    | SD    | 8.24  | 6.57  | 5.21  | 7.26  | 5.56  | 4.19  | 5.58  | 4.72  | 3.67  | 4.61  | 4.43  | 3.51  | 0.35   | 0.23   | 0.30   | 0.24  | 0.18  |
|                    | S     | 1.44  | 2.07  | 2.30  | 1.06  | 2.24  | 2.71  | 1.37  | 1.86  | 2.04  | 0.80  | 1.40  | 1.75  | 6.30   | 6.92   | 6.41   | 5.47  | 3.57  |
|                    | K     | 4.55  | 7.94  | 10.04 | 3.23  | 8.49  | 12.07 | 4.23  | 7.04  | 8.03  | 2.67  | 4.60  | 6.23  | 85.30  | 122.87 | 81.63  | 53.27 | 22.88 |
| 面<br>積             | M     | 17.96 | 13.64 | 11.00 | 16.69 | 11.16 | 8.39  | 13.28 | 9.49  | 7.38  | 12.21 | 8.98  | 7.10  | 0.70   | 0.45   | 0.61   | 0.48  | 0.37  |
|                    | SD    | 10.13 | 9.29  | 7.61  | 8.20  | 8.36  | 6.94  | 6.72  | 6.45  | 5.22  | 4.95  | 5.37  | 4.66  | 0.92   | 0.61   | 0.82   | 0.57  | 0.33  |
|                    | S     | 0.63  | 1.10  | 1.46  | 0.36  | 0.83  | 1.23  | 0.66  | 0.95  | 1.07  | 0.27  | 0.54  | 0.82  | 4.28   | 5.83   | 3.80   | 3.14  | 2.31  |
|                    | K     | 2.50  | 3.51  | 4.83  | 2.05  | 2.79  | 4.00  | 2.42  | 3.32  | 3.74  | 2.10  | 2.42  | 2.94  | 29.21  | 58.29  | 25.35  | 16.13 | 10.02 |
| 体<br>積             | M     | 23.67 | 19.97 | 16.27 | 20.72 | 17.42 | 14.13 | 16.68 | 13.88 | 11.07 | 14.23 | 12.19 | 10.16 | 1.92   | 1.27   | 1.71   | 1.15  | 0.66  |
|                    | SD    | 10.31 | 10.54 | 9.41  | 7.92  | 8.62  | 8.00  | 6.97  | 7.02  | 5.85  | 4.82  | 5.27  | 4.91  | 2.04   | 1.62   | 1.70   | 1.04  | 0.50  |
|                    | S     | -0.10 | 0.37  | 0.68  | -0.15 | 0.11  | 0.43  | 0.11  | 0.37  | 0.50  | -0.10 | 0.04  | 0.25  | 1.95   | 2.87   | 2.03   | 1.45  | 1.31  |
|                    | K     | 2.28  | 2.20  | 2.43  | 2.11  | 2.01  | 2.25  | 2.02  | 2.24  | 2.40  | 2.31  | 2.10  | 1.93  | 6.30   | 11.89  | 7.74   | 4.75  | 4.53  |
| 粗<br>粒<br>率        | M     | 7.59  | 7.27  | 6.95  | 7.45  | 7.08  | 6.72  | 7.12  | 6.77  | 6.42  | 6.96  | 6.65  | 6.34  | 3.43   | 2.76   | 3.30   | 2.80  | 2.19  |
|                    | SD    | 0.76  | 0.90  | 0.91  | 0.68  | 0.95  | 1.04  | 0.71  | 0.89  | 0.92  | 0.58  | 0.80  | 0.87  | 1.47   | 1.49   | 1.48   | 1.39  | 1.13  |
|                    | S     | -0.78 | -0.57 | -0.32 | -0.90 | -1.13 | -0.88 | -0.53 | -0.82 | -0.80 | -0.77 | -1.09 | -0.89 | -0.08  | 0.16   | -0.31  | -0.21 | -0.17 |
|                    | K     | 2.93  | 2.61  | 2.43  | 3.08  | 4.29  | 3.50  | 2.27  | 3.76  | 3.64  | 2.72  | 4.42  | 3.77  | 2.64   | 2.72   | 2.68   | 2.26  | 2.27  |

粒度パラメータは、骨材の重量ではなく、体積の通過比を対象に算定している。これは、粒子寸法により比重の異なる軽量骨材などの粒度でも、砂や砂利のそれと同様な検討を可能にするためである。現在では、ふるい分け試験法との関連から、重量で粗粒率を定義することが多いが、Abrams は、体積あるいは重量と併記して提案している<sup>5)</sup>。

なお、いずれも砂についてはあるが、Fulton<sup>8)</sup>は粒度の優劣の表示に、Zeitsman<sup>9)</sup>は実積率におよぼす粒度の効果の評価に、粗粒率基準に相当する標準偏差を利用している。しかし、これらは離散の変量を仮定して計算しているので、階級数の少ない場合は、実際の粒子寸法分布を相応に評価しない。

## 5. JASS 5 標準粒度の粒度パラメータ

表-1のJASS 5(昭和44年版)標準粒度について計算した、各基準の粒度パラメータを、表-3に示す。標準粒度の範囲を規定する通過比の下限、上限、その中央を大、小、中と表記する。粒子の寸法にかかわらず比重を一定、および粒子形状を相似と仮定している。すなわち、通過重量比と通過体積比を等しく、および形状に関連する係数である $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ を定数と仮定して計算している。なお、最小ふるい目の開きの通過比がゼロでない規定の場合は、その1/2のふるい目の開きを $x_0$ とし、それに全留するとして、粒度パラメータを計算した。

平均と標準偏差が、小寸法粒子の強調される個数基準から、大寸法粒子の強調される体積基準へと、漸増するのは当然であるが、粗骨材の最大寸法間の平均の重複が大きく、最大寸法の相違よりも、通過比の上下限による差異の大きいのが認められる。

左右の偏りの程度を表す歪度は、粗骨材の体積基準ではゼロに、すなわち左右対称に漸近してくるが、細骨材では、まだ相当に左側に偏っている。粗粒率基準では、逆に粗骨材が右側に偏るが、コンクリートに影響の大きい細骨材が左右対称に漸近し、尖度も適度に減少するので、標準粒度範囲内外の粒度の効果の顕在化には、粗粒率基準による粒度パラメータが有効である。さらに、この粗粒率基準の標準偏差が、JASS 5の標準実積率と、よい対応を示しているのは興味深い。

以上、標準粒度の数値計算結果から、他の粉粒体と同様に粒子寸法の対数関数を採用した、粗粒率基準の粒度パラメータ(平均・標準偏差・歪度・尖度)が、コンクリート用細骨材、粗骨材および細粗混合骨材の粒度を、共通に数値化する有効な方法であると判断し、ここに提案する。

## 6. あ と が き

今後は、これらの粒度パラメータを用いて、モルタルやコンクリートの諸物性、特に軟度におよぼす骨材粒度の効果を定量的に検討して、骨材資源の活用ならびにコンクリートの品質の

向上を図るとともに、試行錯誤による軟度決定の依存度を軽減していきたい。

そのために、骨材の実積率におよぼす粒子寸法分布の影響についての実験的研究を継続中であるが、粗粒率基準による粒度パラメーターの有効性が確認されている。これについては、稿を改めて報告する予定でいる。

おわりに、本報告のみならず、日頃から種々のご配慮をいただいております、本学建築工学科 荒川 卓 教授に、心から感謝いたします。

なお、粒度パラメーターの計算には、北海道大学大型計算機センターのFACOM 230-60と本学情報処理教育センターのFACOM 230-28を利用しました。

(本報告の要旨は、昭和49年3月、日本建築学会北海道支部 第41回研究発表会で発表しました。)

(昭和51年5月22日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) Abrams, D. A. : J. ACI **36** (9), 400-5 (1940)
- 2) Price, W. H. : ASTM STP **169-A**, 404 (1966)
- 3) Kennedy, C. T. : J. ACI **36** (2), 373 (1940)
- 4) 三輪茂雄：粉粒体工学 朝倉書店, 85 (1972)
- 5) Abrams, D. A. : SMRL Bull. **1**, 1 (1918)
- 6) Swayze, M. A. and Gruenwald, E. : J. ACI **43** (3), 829 (1947)
- 7) Walker, S. and Bartel, F. F. : J. ACI **43** (12), 844-1 (1947)
- 8) Fulton, F. S. : J. C and CE **51** (3), 313 (1956)
- 9) Zeitsman, C. F. : J. ACI **53** (5), 1041 (1957)
- 10) Popovics, S. : RILEM Bull. **16**, 19 (1962)
- 11) Popovics, S. : MCR **18** (56), 131 (1966)
- 12) Lecompte, P. : J. ACI **66** (6), 474 (1969)
- 13) Howard, E. L. : J. ACI **66** (12), 1023 (1969)
- 14) Wentworth, C. K. : J. Geol. **30**, (1922)
- 15) 庄司力偉：堆積岩石学 朝倉書店, 5 (1972)
- 16) 沓沢 新：セメント・コンクリート **179**, 3 (1962), **180**, 8 (1962)