

骨材の粒子形状の評価方法に関する研究

EVALUATING METHOD FOR PARTICLE GEOMETRY OF AGGREGATE

李 柱国 ——— * 1

Zhuguo LI ——— * 1

キーワード:

骨材, 形状, 表面粗さ, 透水試験, 平均粒径

Keywords:

Aggregate, Shape, Surface texture, Permeability test, Mean particle diameter

Particle geometry of aggregate used in concrete is fully expressed in terms of three independent properties: form, angularity (or roundness), and surface texture. In this study the author proposed an evaluating method to integrate the three shape characteristics into a shape index using the specific surface area and mean particle diameter that are measured by the permeability test and the sieve analysis test, respectively. The shape index is able to include the surface texture of particles, and to evaluate the shape of mixed aggregate with fine and coarse aggregates.

1. はじめに

骨材の形状特性(Geometry or Shape)は、図1に示すように、評価のスケールによって、全体としての形状(Over shape or Form、例えば球形、立方体など)、角張り度または円形度(Angularity or Roundness: large scale smoothness)および表面粗さ(Surface texture: fine scale smoothness)の三つの独立特性を含む¹⁾。角張り度の変化は、粒子の全体形状の変化を引き起こすが、表面粗さの変化は、粒子の全体形状と円形度の変化をもたらさない。したがって、三つの特性は互いに独立で、一つの特性が変わっても他の二つの特性が必ずしも変わるわけではない。

骨材の形状がコンクリートの性質に大きな影響を及ぼすことは周知の事実である。骨材の粒形が丸みを帯びるほど、フレッシュコンクリートの流動性は高くなるが、分離抵抗性は低くなる²⁾。また、骨材とセメントペーストとの付着強度は、骨材の表面粗さによりかなり異なり、研磨面、切断面および自然破砕面の順に増加する³⁾。表面が滑らかであるほど、付着力が低減するため、硬化コンクリートの性能が低下する⁴⁾。高強度のコンクリートを得ようとするれば、骨材自体の強度と共にセメントペーストとの付着強度が大きいことが求められる。

近年、天然骨材に比べ、形状が悪い砕砂およびスラグ骨材などの人工骨材の使用量が増加しつつある。人工骨材を用いたコンクリートは、天然骨材コンクリートと異なる性能を示す。しかし、現状では、骨材形状の定量的評価方法はまだ確立されていないため、骨材形状がコンクリートの硬化前後の性能に与える影響を解明する研究は非常に少ない。また、コンクリート性能の数値解析では、コンクリートに実際に使用した骨材形状を反映できず、球形や円形としたものが多い。したがって、骨材形状の数値化はコンクリートの性能評価および影響要因の解明に対して極めて重要である。

既存の骨材粒形の評価法は直接法と間接法に大別される。直接法には様々な提案があり、例として粒子の長径・中間径・短径の比(Shape factor)⁵⁾、実断面積と凸面面積(Convex area)の比(Convexity ratio, 図2参照)⁶⁾または断面の周長と面積の比⁷⁾、および断面の実

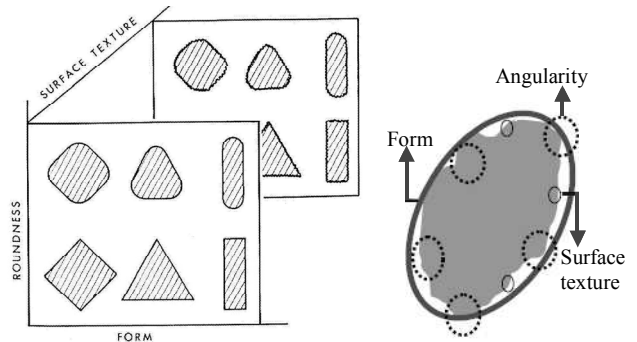


図1 粒子の形状特性のイメージ図

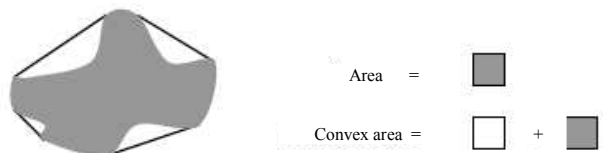


図2 粒子断面の実際面積と凸面面積の概念

際表面積と見かけ面積の比(Roughness factor)⁸⁾を用いて、個々の粒子の全体形状 (Form)、と角張り度(Angularity)や円形度(Roundness)および表面粗さ(Surface texture)をそれぞれ評価する。最近、SEM や X線 CT などのデジタルイメージング分析法を利用して表面粗さの評価精度が向上し、3 次元的評価が可能となった^{9), 10), 11)}。しかし、撮影と画像分析の精度が大幅に向上したと言っても表面粗さを十分な精度で評価できるとは言えず、3 つの形状特性を統合的に評価できないなどの問題点がある。また、電子顕微鏡や X線 CT などの高価な装置および画像分析技能が必要となる。なお、評価結果の信頼性と代表性を確保するために、数多くの粒子を評価しなくてはならないため、多大の労力を要する。

一方、間接法として、代表的な方法は、実積率または ASTM D 3398 (Standard Test Method for Index of Aggregate Particle Shape and Texture) に準じる形状係数を測定するものである。実積率は、55%~85%の

¹⁾ 山口大学大学院理工学研究科 准教授
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

¹⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi Univ.

範囲にあり、単に粒形のみでは決定されず、粒度分布の影響も受けるため、全粒子群を試料とした実積率の測定値は骨材粒形を評価できない¹¹⁾。全粒子群を単一粒群に分けて単一粒群の実積率を測定しても、当該単一粒群の粒子形状を正確に評価することができない。Kwanらは、単一粒群の実積率が主に全体形状(Form: Shape Factor)と角張り度(Angularity: Convexity ratio)の二つの特性の影響を受けると指摘している¹²⁾。

微小粒が粗大粒の間隙に入ると、形状の評価結果は微小粒の形状を反映できないおそれがある。ASTM法は、この問題を解決しようとして、骨材を単一粒群に篩い分けて、各々の形状を評価した後、質量比で各単一粒群の形状係数を統合して全粒子群の形状係数を求めている。単一粒群の形状をそれぞれに評価するため、多くの時間と手間を要する。また、ASTM法の形状係数を測定する際の測定容器に充填した骨材粒子の多少は、粒子の接触状況に依存し、粒子の全体形状(Form)、角張り度(Angularity)および表面粗さ(Surface texture)の影響を反映すると考えられる。しかし、粒子の表面にはサイズがごく小さく、形が様々な凹凸(テクスチャとなるもの)が数多く存在するため、粒子の接触状況はすべての表面凹凸の影響を受けるわけではない。したがって、ASTM法の評価結果は、粒子の表面粗さを十分に反映できるとは言えない。

また、他の間接法の一つとして、透水実験で骨材の比表面積を測定することによって、粒子の表面粗さを評価する方法が提案されている^{13),14)}。しかし、比表面積は粒子群の粒度に依存するため、評価結果は、粒度分布が異なる骨材の形状を比較することに利用できない。

上記の背景を踏まえて、本研究では骨材形状の簡便な評価方法を開発する。開発した評価法は、評価結果が骨材の粒度に依存せず、粒子の表面粗さを十分に反映し、3つの形状特性を統合的に評価でき、細・粗混合骨材にも適用しうる特徴を有する。

2. 形状係数の評価方法

2.1 評価式

粒子の体積比表面積(表面積と体積の比)は、粒子の形状と寸法によって異なり、粒子が大きいほど比表面積は小さい。表面に凹凸のない滑らかな球状粒子の場合、比表面積は式(1)に示すように $3/r$ であるが、粒子表面に凹凸があると、この値にならない。

$$SS = 4\pi^2 / \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{3}{r} = \frac{6}{d} \quad (1)$$

ここに、 SS : 体積に対する比表面積(m^2/m^3)、 r と d : それぞれ粒子の半径と直径

式(2)に示す X の値($SS \cdot d/6$ 値の記号)は、滑らかな球形粒子の場合に、式(1)によって粒子の寸法によらず、1である。しかし、滑らかな球形粒子ではない場合に、比表面積 SS が増大するため、 X の値は1より大きくなる。本研究では、滑らかな球形粒子の形状を基準とし、任意寸法・形状を有する骨材の形状係数を X の逆数と定義して、式(3)によって表すことにした。したがって、ランダムな形状を有する粒子

の形状係数の評価値は、1より小さく、粒子の寸法に依存しない。

$$X = SS \cdot d / 6 \geq 1 \quad (2)$$

$$SI = \frac{1}{X} = \frac{1}{SS \cdot d_m / 6} = \frac{6}{SS \cdot d_m} \quad (3)$$

ここに、 SI : 形状係数、 d_m : 粒子群の平均直径(m)

一方、粒状体の透水係数は、式(4)によって表され、粒状体の間隙比の増大または質量比表面積(表面積と質量の比)の減少に伴って大きくなる¹⁵⁾。

$$k = C \cdot \frac{g}{\eta_l \cdot \rho_l \cdot SS_m^2 \cdot D_r^2} \cdot \frac{e^3}{1+e} \quad (4)$$

ここに、 k : 透水係数(m/s)、 η_l : 流体の粘度($g \cdot m/s$)、 ρ_l : 流体の密度(kg/m^3)、 SS_m : 質量に対する比表面積(m^2/kg)、 D_r : 骨材粒子の絶対密度 ρ_s と流体の密度 ρ_l の比、 e : 間隙比、 g : 重力加速度(m^2/s^2)、 C : 定数であり、球状粒子の場合には0.5である。

式(4)によって、体積比表面積 SS は、式(5)によって表される。

$$SS = \rho_s \cdot SS_m = \rho_s \cdot \sqrt{C \cdot \frac{g}{\eta_l \cdot \rho_l \cdot k \cdot D_r^2} \cdot \frac{e^3}{1+e}} \quad (5)$$

平均粒径 d_m は、2.2節に述べるように骨材の篩い分け試験結果に基づいて求められる。また、 SS_m は、2.3節に述べるように透水実験で計測される。 d_m と SS_m の計測値は、粒子の形状、角張り度および表面粗さの影響を受けるため、形状係数は3つの形状特性を統合的に評価できると思われる。ここに、この評価法を粒径-比表面積法と略称することにする。

2.2 平均粒径の求め方

JIS A 1102:2006に準じた砂のふるい分け試験結果の一例を表1に示す。砂の粗粒率(FM値)は、一般にJIS Z 8801-1に規定する公称目開きが0.15mm以上の各ふるいを通らない全部の試料の百分率の和を100で除した値である。粗粒率の値は、工学上の意義として、骨材粒径の平均的な値が、使用する最小の目開きのふるいから数えて何番目のふるいの目開きで代表されるかを示す。例えば、表1に示すふるいの公称目開きが4.75~0.15mmの各ふるいとどまる質量分率(%)に基づいて計算した粗粒率は2.624である場合、この種類の砂の平均粒径は、0.15mmふるいから2番目と3番目のふるいの目開きの間(0.3~0.6mm)にある。直線挿入法を利用すると、平均粒径 d_m は、 $0.3 + (2.64 - 2) \times (0.6 - 0.3) = 0.492$ mmのように求められた。

平均粒径の評価精度を高めるために、本研究では、微粒分を考慮して公称目開きが0.075mm以上の各ふるいとどまる質量分率(%)によって粗粒率を計算した。表1に示すように、公称目開きが4.75~0.075mm範囲の各ふるいとどまる質量分率(%)で計算した粗粒率は3.616である。したがって、砂の平均粒径 d_m は、0.075mmふるいから3番目と4番目のふるいの目開きの間(0.3~0.6mm)にあり、 $0.3 + (3.63 - 3) \times (0.6 - 0.3) = 0.489$ である。平均粒径の計算式の一般形を式(6)に

表1 粗粒率に基づく平均粒径の計算例

ふるいの公称目開き (mm)	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	合計		FM 値		平均粒径 d_m (mm)
								4.75~0.15mm	4.75~0.075mm	粒度範囲: 4.75~0.15mm	粒度範囲: 4.75~0.075mm	
ふるいとどまる 質量分率(%)	2	10	29	48	77	98	99	264	363	2.64	3.63	0.489

示す。このように求められる平均粒子径はふるい分け径である。

$$d_m = X_n + (X_{n+1} - X_n) \times (\text{FM 値} - \text{FM 値の小数点前の整数 } n) \quad (6)$$

ここに、 X_n, X_{n+1} ：それぞれ開き目が 0.075mm のふるいから FM 値の小数点前の整数 n 番目と $n+1$ 番目のふるいの目開き (mm)

しかし、単一粒度をもつ骨材粒子群の平均粒径は、粒子が通過するふるいの最小の開き目と粒子が留まるふるいの最大の開き目の平均値とした。例えば、粒度範囲が 0.15~0.30mm である細骨材の平均粒径は 0.225mm である。

2.3 比表面積の測定

骨材の比表面積の測定は、JIS A 1218 : 2009 に準じた定水位透水試験によって行う。透水実験装置を図 3 に示す。アクリル製透水円筒の高さと直径はそれぞれ 270mm と 100mm である。円筒の底部は有孔板であり、その上に 200 メッシュの金網を載せた。水頭 h は、使われる越流水槽の深さによって異なるが、本研究では 149mm であった。

JIS A 1104(骨材の単位容積質量及び実積率試験方法)に準じて骨材試料を透水円筒に充填した。50mm ずつ充填し、突き棒で均等に 20 回を突いた。3 回の充填・締固めの後、試料の高さを 0.1mm の精度で測定した。また、充填した試料の体積、絶乾質量、絶乾密度および吸水率で間隙比 e を式(7)によって計算した。骨材粒子の内部にある空隙は透水速度に影響を与えないと考えられるため、式(7)中の括弧内の第 2 項によって間隙比の計算値を補正した。

$$e = \frac{V - (m / \rho_s + m \cdot W_a / \rho_w)}{(m / \rho_s + m \cdot W_a / \rho_w)} \quad (7)$$

ここに、 V ：試料の体積(cm^3)、 m ：試料の絶乾質量(g)、 ρ_s ：試料の絶乾密度(g/cm^3)、 W_a ：細骨材の吸水率、 ρ_w ：水の密度(g/cm^3)
透水量をメスシリンダーで計量した。500ml の流出水量になるまでの経過時間を測定した上で、透水速度を計算した。さらに透水係数 k を式(8)により算出した。

$$k = Q \cdot L \cdot A / h \quad (8)$$

ここに、 Q ：透水速度(m^3/s)、 L ：試料の高さ(m)、 A ：透水円筒の断面積($7.85 \times 10^{-3} \text{m}^2$)、 h ：水頭(0.149m)

3 回の透水試験で得られた透水係数の平均値を用いて、式(5)によって骨材の体積比表面積 SS を求めた。

3. 粒径-比表面積法の妥当性の検証

3.1 表面粗さの評価

粒径-比表面積法の評価結果が、粒子の表面粗さを反映できることを検証するために、表面粗さが異なるガラスビーズを利用して評価試験を行った。ガラスビーズの密度は $2.42 \text{g}/\text{cm}^3$ であった。一部のガラスビーズをサンドペーパーで処理して、表面を粗くした。試料 No.1 の全量は未処理のガラスビーズであり、平均直径が 2.6mm であった。試料 No.2 と No.3 は、処理した粗面ガラスビーズを混入したものである。粗面ガラスビーズの割合はそれぞれ 20% と 50% とした (表 2 参照)。

ガラスビーズの透水試験の場合には、水の流れが速く、水位を一定にすることができないため、水の代わりに、粘度が水より高く、

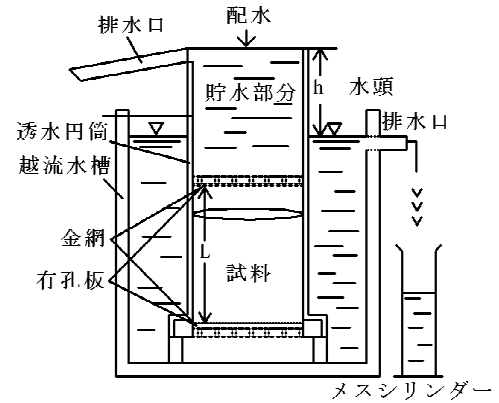


図 3 透水試験装置

表 2 ガラスビーズ試料の構成と透水試験結果

No.	d_m (mm)	粗面ビーズ使用率(%)	e	Q ($\times 10^{-6}, \text{m}^3/\text{s}$)	k ($\times 10^{-4}, \text{m/s}$)	SS_m (m^2/kg)
1	2.60	0	0.501	4.673	5.27	2.17
2	2.55	20	0.546	4.167	4.70	2.58
3	2.54	50	0.564	3.731	4.21	2.84

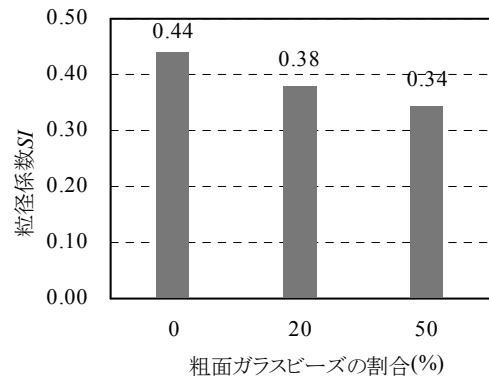


図 4 ガラスビーズの形状係数と粗面粒子の割合の関係

果糖ぶどう糖液糖を主成分としたガムシロップを使用した。20°C におけるガムシロップの粘度と密度は、それぞれ $0.04 \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ および $1.303 \text{g}/\text{cm}^3$ であった。

透水試験の結果および形状係数の測定値をそれぞれ表 2 と図 4 に示す。図 4 に示すように、粗面ガラスビーズの割合の増加に伴い、粒形の評価値 SI は小さくなる傾向が見られた。粗面ガラスビーズの混入量が多いほど、試料全体の形状は悪くなるためである。この結果によって、体積比表面積を用いた形状係数が粒子表面の粗さを反映できることを検証した。

3.2 異なる試験方法による評価結果の比較

粒径-比表面積法を用いて、12 種類の細骨材の粒形を評価した。細骨材の物理性質を表 3 に、粒度分布を図 5 に示す。0.075~4.75mm の粒度分布を基に計算した粗粒率 FM 値と平均粒径 d_m 、間隙比 e および透水試験で求められた比表面積 SS_m を表 4 に示す。得られた平均粒径 d_m と比表面積 SS_m によって、各種類の細骨材の形状係数を求めた。

図 6 に、細骨材の形状係数 SI と実積率の関係を示すが、実積率と形状係数の間に、一義的な相関関係が見られない。透水試験で計測

表3 細骨材の物理性質

物理性質	海砂1	WS	川砂1	陸砂1	山砂1	砕砂	豊浦砂	BS	海砂2	陸砂2	川砂2	山砂2
密度(g/cm ³)	2.54	2.46	2.51	2.52	2.55	2.68	2.64	2.72	2.53	2.58	2.60	2.53
単位容積質量(kg/m ³)	1694	1769	1594	1630	1420	1731	1672	1629	1682	1801	1737	1604
吸水率(%)	1.48	1.68	1.98	1.47	1.28	0.52	2.50	1.52	1.62	1.81	1.96	1.48
実積率(%)	66.7	71.9	63.5	64.7	55.7	64.6	58.8	59.9	66.5	69.8	66.8	63.4

[Notes] 海砂1, 海砂2: それぞれ唐津と玄界灘産、陸砂1, 陸砂2: それぞれ島根と大井川産、川砂1, 川砂2: それぞれ島根と鬼怒川産、山砂1, 山砂2: それぞれ島根と愛知県多治見市産、砕砂: 島根産、WS: 宇部産都市ゴミ焼却灰溶融スラグ細骨材、BS: J F E ミネラル(株)製高炉スラグ細骨材

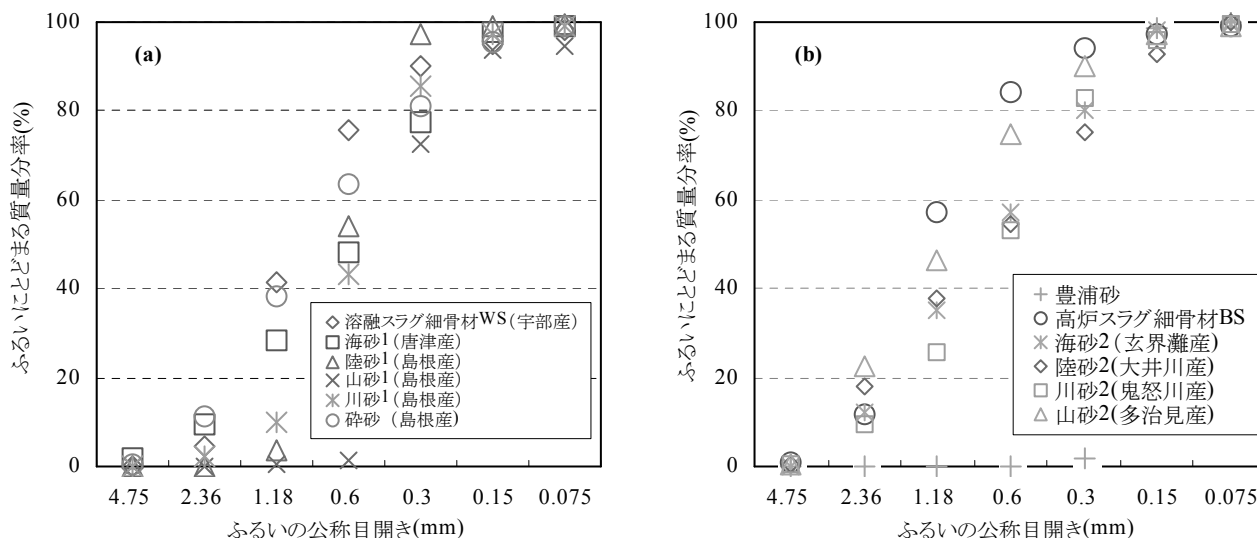


図5 形状評価実験に用いた12種類の細骨材の粒度分布

した比表面積は、粒子の表面の粗さを反映できるため、体積比表面積で計算したSIは、粒子の表面の粗さを評価できると思われる。しかし、第1章に述べたように、全粒子群を試料とした実積率の測定値は、粒子分布に依存するため、粒子形状を評価できない。このため、SIは実積率と相関しない。

ASTM D 3398 による骨材形状の評価手順として、まず、骨材試料を篩い分けて、各単一粒群の試料を3層に分けて容器に詰め、各層を10回および50回締め固めた後に空隙率(式(9)を参照)をそれぞれ計測する。各層試料を10回と50回締め固める場合の空隙率をそれぞれ μ_{10} , μ_{50} と記す。次に、各単一粒群の形状指数を式(10)によって求める。さらに、質量比で各単一粒群の形状指数を統合化する。

$$\mu = \left(1 - \frac{W}{\rho_p \cdot V}\right) \cdot 100 \quad (9)$$

表4 細骨材の形状係数の試験結果

測定値	海砂1	WS	川砂1	陸砂1	山砂1	砕砂	豊浦砂	BS	海砂2	陸砂2	川砂2	山砂2
FM 値	3.62	4.05	3.38	3.54	2.63	3.89	2.01	4.45	3.82	3.82	3.66	4.31
間隙比 e	0.50	0.38	0.56	0.55	0.80	0.58	0.65	0.66	0.50	0.42	0.48	0.58
d_m (mm)	0.49	0.63	0.41	0.46	0.24	0.57	0.23	0.86	0.55	0.54	0.50	0.78
k (cm/s)	0.02	0.11	0.07	0.10	0.05	0.01	0.02	0.07	0.03	0.01	0.02	0.05
SS_m (m ² /kg)	18.43	6.06	12.44	10.18	23.90	30.69	24.66	14.46	16.67	19.42	17.16	15.15
SI	0.26	0.63	0.47	0.51	0.40	0.13	0.40	0.18	0.26	0.22	0.27	0.20

ここに、 μ : 試料の空隙率(%),
W: 試料の質量、 ρ_p :
試料の嵩密度、V: 試料の嵩体積、

$$I_a = 1.25\mu_{10} - 0.25\mu_{50} - 32.0 \quad (10)$$

ここに、 I_a : ASTM 法の形状指数

本研究では、ASTM D 3398 に準じて12種類の細骨材の形状係数を評価した。砂のふるい分けを行い、二

表5 I_a 測定に用いた砂の粒度

砂	粒度範囲(mm)		質量割合 (a : b)
	a	b	
山砂1	0.15~0.3	0.3~0.6	2 : 7
WS	0.6~1.18	1.18~2.36	1 : 1
海砂1	0.3~0.6	1.18~2.36	2 : 3
陸砂1	0.3~0.6	0.6~1.18	4 : 5
川砂1	0.3~0.6	0.6~1.18	4 : 3
砕砂	0.6~1.18	1.18~2.36	1 : 1
豊浦砂	0.15~0.3	-	1 : 0
海砂2	0.6~1.18	1.18~2.36	2 : 3
陸砂2	0.6~1.18	1.18~2.36	1 : 1
川砂2	0.3~0.6	0.6~1.18	1 : 1
山砂2	0.6~1.18	1.18~2.36	2 : 3
BS	0.6~1.18	1.18~2.36	2 : 3

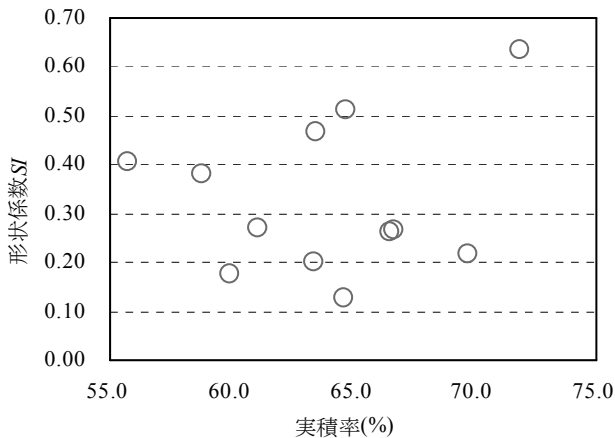


図6 形状係数 SI と実積率の関係

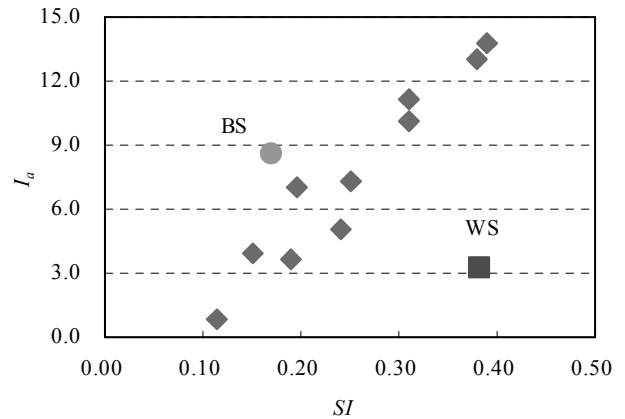


図7 SI と ASTM 法による形状係数 I_a の関係

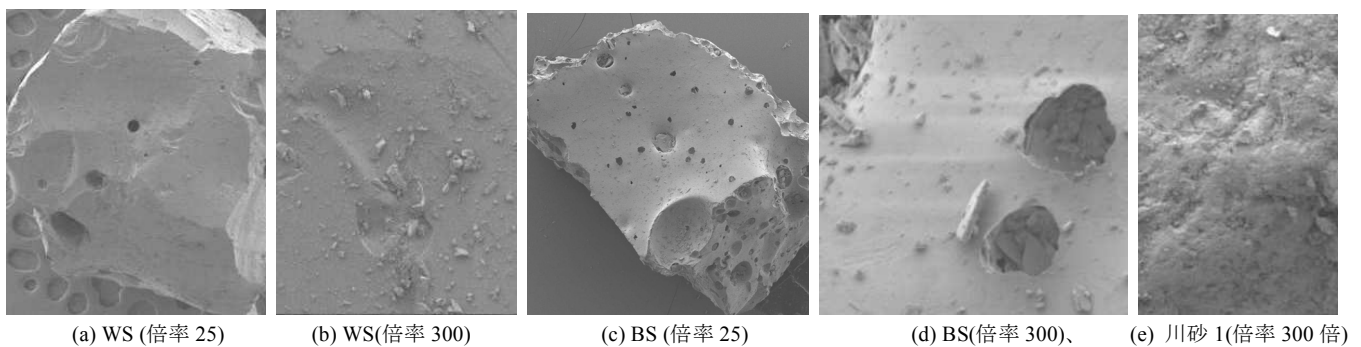


図8 WS、BS および川砂粒子の表面状態の SEM 写真

つの単一粒群の試料を用いてそれぞれの形状係数を評価した上で、質量の割合で二つの評価結果を統合した。統合した形状係数 I_a は、二つの単一粒群の混合体の形状を表すものである。 I_a を測定した時に用いた各種類の砂の粒度範囲を表5に示す。なお、二つの単一粒群の混合体の形状を本研究で提案した手法で評価した。しかし、豊浦砂の粒度はほとんど 0.15~0.3mm の範囲にあるため、0.15~0.3mm の単一粒群を使って実験を行った。

二つの形状評価方法で得られた結果を図7に示す。同図に示すように、WS と BS を除き、他の 10 種類の細骨材の I_a は SI の増大に伴って大きくなり、両者の関係は線形関係にあることが認められた。WS と BS の I_a-SI 関係プロットが他の細骨材の I_a-SI 線形関係から離脱した理由を以下のように考察する。

図8に、水冷で製造した都市ごみ焼却灰熔融スラグ細骨材(WS)、高炉スラグ細骨材 (BS) および川砂の粒子表面の SEM 写真を示す。図8(b)より、WS 粒子の表面は相対的に平滑であることがわかる。したがって、WS の比表面積は小さく、形状係数 SI の評価値は式(3)より大きくなり、表面が平滑であることを反映できる。しかし、ASTM 法の測定値 I_a は、第1章に述べたように粒子の表面テクスチャを十分な精度で反映できないため、WS の I_a の測定値は過小になり、WS の形状を実際より悪く評価してしまう。一方、BS の場合、図8(c)に示すように、BS 粒子の表面に凹みや細孔が多く存在する。これは、冷却前の気泡の破裂や脱出によるものであると考えられる。凹みや細孔は大きな内表面をもつため (図8(d)を参照)、BS 粒子の比表面積が増大し、式(3)によって SI の評価値は小さくなり、凹みの影響を反映できる。しかし、ASTM 法の評価値 I_a は、粒子表面の凹凸状況

表6 砕石の物理性質

最大寸法 (mm)	粒形判定実積率 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	単位容積質量 (kg/m ³)	微粒分量 (%)
20	59.2	2.71	0.47	6.68	1605	0.5

表7 細粗混合骨材の組成と形状係数の試験結果

測定値	シリーズ					
	砂の種類					
	WS	山砂1	海砂1			
砕石-砂質量比	1:0.8	1:0.8	1:0.7	1:0.8	1:0.9	1:1
間隙比 e	0.13	0.27	0.25	0.22	0.21	0.20
FM 値	5.98	5.35	5.93	5.79	5.67	5.57
密度 (g/cm ³)	2.54	2.46	2.64	2.63	2.63	2.63
d_m (mm)	2.34	1.59	2.27	2.11	1.97	1.85
k (cm/s)	0.058	0.051	0.026	0.024	0.020	0.017
SS_m (m ² /kg)	1.74	5.05	6.35	5.64	5.58	5.56
SI	0.57	0.28	0.15	0.19	0.21	0.22

をある程度反映するが、凹みの影響を反映できないため、BS の形状指数 I_a が過大になり、BS の形状を過良に評価してしまう。したがって、粒径-比表面積法は、ASTM 法より簡便で粒子の表面粗さをよく反映でき、骨材の形状を正確に評価できると言える。

4. 細・粗混合骨材の形状評価への適用性

粒径-比表面積法の細・粗混合骨材への適用性を検証するために、6 シリーズの細・粗混合骨材を用いて形状係数の評価試験を行った。使った粗骨材は砕石であり、その性質を表6に示す。表7に示すよ

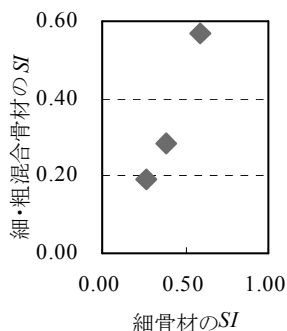


図9 細・粗混合骨材のSIと細骨材のSIの関係

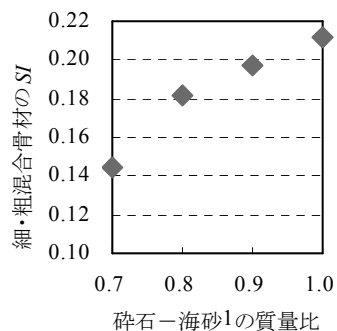


図10 細・粗混合骨材のSIと細・粗骨材質量比の関係

うに、シリーズ1と2は、砕石-細骨材質量比を一定としたが、細骨材の種類を変えた。つまり、シリーズ1,2では細骨材の形状係数は異なった。また、シリーズ3~6では、海砂1を使い、砕石-細骨材質量比を4水準とした。

図9は、シリーズ1,2および4の形状係数の試験結果である。シリーズ1,2および4は、砕石-細骨材質量比は1:0.8であり、細骨材はそれぞれWS、山砂1と海砂1であった。図9に示すように、細骨材の形状係数SIの増加に伴って細・粗混合骨材の形状係数SIは大きくなる傾向が見られた。

図10は、シリーズ3~6の細・粗混合骨材の形状係数の試験結果を示すものである。海砂1を用いたシリーズ3~6の砕石-細骨材質量比は1:0.7~1.0の範囲に変動させた。図10によって、本研究で用いた海砂1と砕石の場合には砂の割合が大きいかほど、細・粗混合骨材の形状係数SIは大きくなるのがわかった。図9と図10の結果より、細・粗混合骨材の形状係数の評価結果は、構成骨材の種類と割合の変化によって変化する傾向が見られ、粒径-比表面積法は細・粗混合骨材の形状の統合評価に適用しうると考えられる。

5. まとめ

本研究ではふるい分け試験と透水試験に基づく細骨材の形状評価方法(粒径-比表面積法)を提案し、既存の評価法の結果と比較して妥当性の検証を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 粒径-比表面積法は、単一粒群の各々の評価を必要とせず、全粒子群を一括して評価するため、ASTM法に比べ、簡便な方法である。
- 2) 粒径-比表面積法は、評価結果が粒子の表面粗さに敏感であり、骨材の全体形状、円形度および表面粗さを3次元・統合的に評価して、一つの形状指標で表すことができる。
- 3) 粒径-比表面積法は、スラグ骨材にも細・粗混合骨材の形状評価にも適用できる。本研究で使用した海砂1と砕石を混合する場合には砂の混合率が高いほど、混合骨材の形状係数は大きい。
- 4) 粒径-比表面積法の評価結果は、実積率との間に一義的な関係が見られず、スラグ骨材以外の場合にはASTM D 3398による評価結果との間に密接な相関関係がある。

本研究で提案した骨材の形状係数の評価方法によって骨材の形状を定量化すると、コンクリートの硬化前後の性能に与える影響についての検討が容易になる。

謝辞 本研究の実験に際して、山口大学工学部感性デザイン工学科卒論生・受川悠司君の助力を得ました。また、(一財)建材試験センター西日本試験所・流田靖博氏、独立行政法人建築研究所・浜崎仁氏ならびに愛知工業大学工学部建築学科・瀬古繁喜先生には細骨材のサンプルを提供していただきました。なお、本論文の作成に際しては名古屋大学名誉教授・谷川恭雄先生にご助言をいただきました。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) P. J. Barrett : The shape of rock particles, a critical review, *Sedimentology*, Vol.27, pp.291-303,1980.
- 2) 渡会正典・寺西浩司・野中寛之:骨材粒形がフレッシュモルタルおよびコンクリートの性質に及ぼす影響, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.1210-1215,2012
- 3) T. C. Hsu, and F. O. Slate : Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar, *Journal of ACI*, Vol.60, No.4, pp.465-486, 1963.1
- 4) 添政司・折田紘一郎・大和竹史:都市ゴミ溶融スラグのコンクリート用細骨材としての有効利用に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.26, No.1, pp.1623-1628, 2004
- 5) B.C. Aschenbrenner : A new method of expressing particle sphericity, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 26, pp 15-31, 1956
- 6) C. F. Mora, and A. K. H. Kwan : Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.3, pp. 351-358, 2000.3
- 7) T. Al-Rousan, E. Masad, E. Tutumluer, and T. Pan : Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics, *Construction and Building Materials*, Vol.21, pp.978-990, 2007
- 8) R. N. Wenzel : Surface roughness and contact angle, *Journal of Physical and Colloid Chemistry*, Vol. 53, p.1466, 1949
- 9) S. Arasan, A. S. Hasiloglu, and S. Akbulut: Shape properties of natural and crushed aggregate using image analysis, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp.221-233, 2010
- 10) E. Masad, and J. Button : Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture, *Journal of Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.15, No.4, pp.273-280, 2000
- 11) S. T. Erdogan, and D. W. Fowler: Determination of aggregate shape properties using X-ray tomographic methods and the effect of shape on concrete rheology, *Research Report ICAR 106-1*, International Center for Aggregate Research, pp.23-200, 2005.8
- 12) A. K. H. Kwan, and C.F. Mora : Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles, *Magazine of Concrete Research*, Vol.53, No. 2, pp.91-100, 2001.4
- 13) M. A. Ozol : Shape, Surface Texture, Surface Area, and Coatings in Significance of *Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials*, Special Technical Publication 169 B, American Society for Testing and Materials, pp. 584-628, 1978
- 14) 近田孝夫・前田悦孝・松下博通:余剰ペースト膜厚理論における骨材の形状評価とモルタルの流動性に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.18, No.1, pp.441-446, 1996
- 15) P. C. Carman : Fluid flow through granular beds, *Transactions of Institute of Chemical Engineers*, Vol.15, pp.150-166, 1937

[2014年2月18日原稿受理 2014年4月11日採用決定]