

砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法

吉村優治*・小川正二**

砂粒子の形状が、せん断強さなどの工学的性質に影響を与えることは周知の事実である。しかし、砂は個々の粒子が小さく、しかも形状の定量化の作業がかなり煩雑であるために工学的性質に与える粒子形状の影響に関する系統的な研究を阻害してきた。本論文では粒状体の粒子形状を評価する凹凸係数 FU を提案し、種々の砂およびこれまで形状の評価に用いられてきた視覚印象図の定量化例について述べている。

Keywords : grain shape, granular material, sand, measurement

1. はじめに

第四紀沖積層および洪積層の一部、岩層の風化土、さらには埋立地などの土層より成る地盤は、工学的な面から多くの問題を含んでいる。たとえば、工学的に見れば比較的良好な地盤に属する砂のような粒状体から成る地盤でも、緩い沖積砂層は掘削時のバイピングやボイリング、地震時の液状化などいくつかの問題を含んでいる¹⁾。

第四紀沖積砂層を中心とした砂の工学的諸問題、特に液状化に関する研究が活発に行われるようになったのは、1964年に相次いで発生したアラスカ地震、新潟地震以後のことである。すなわちこのとき以来、液状化の発生のメカニズムや液状化特性に影響を与える要因などに関する基礎的な研究が精力的に行われ、またそれ以前の研究成果も十分に活用されて、短期間のうちに砂の種類や状態、例えば砂粒子の大きさ、細粒分含有率や粒度分布、その砂の詰まり程度などを評価した液状化予測手法や対策工法、各種構造物の設計基準などが提案されてきた。

これ以前の砂に関する研究の多くはせん断強さを求めることが目的とされ、わが国では最上²⁾による粒状体の力学に関する総合的な研究で代表されるように、内部摩擦角と空隙比の関係などに主眼がおかれ、Bjerrumら³⁾やRowe⁴⁾もせん断中の体積変化にも着目し同様の研究を行っている。

一方、砂粒子の形状がせん断強さなどの工学的な性質に与える影響については、Terzaghi and Peckの著書⁵⁾の中で報告されており、その後Sowers and Sowers⁶⁾により密度や粒度分布も考慮した内部摩擦に関する研究成果が報告された。その後、わが国⁷⁾⁻⁹⁾あるいは米国^{10), 11)}

などにおいてはこの種の研究が盛んに行われたが、砂粒子は個々の粒径が小さく、しかもこれらの研究で用いられた形状係数の定量化の作業がかなり煩雑であったために工学的性質に与える粒子形状の影響に関する系統立てた研究成果はいまだにまとめられるには至っていない。このように、砂のような粒状体に関する研究において、早くから砂粒子の形状がせん断特性などの工学的性質に大きな影響を与えることが指摘されているにもかかわらず、現在も粒子形状の定量的評価はほとんどなされていない。したがって、砂の工学的諸特性に及ぼす粒子形状の影響を系統的に解明するには、まず統一された粒子形状の定量的評価が必要である。

本論文では、このように粒状体の形状の影響に関する系統的な研究を阻害してきた粒子形状の簡易な定量化の方法を提案し、これを用いて行った種々の砂の形状の定量化例について述べている。また、これまでに粒状体の形状の評価に用いられてきた視覚印象図^{12), 13)}を定量化した結果も示している。

2. 従来の研究

粒状体などの形状測定あるいは形状を定量化する試みは、地学(鉱物、堆積学)^{14), 15)}の分野で始まり、機械工学(鋳物、金属学)¹⁶⁾、医学(細胞学)¹⁷⁾の分野でも行われ、土木の分野ではコンクリート工学の骨材とセメントマトリックスの付着の研究¹⁸⁾においてかなり古くから行われてきた。しかし、これらの形状の表現方法は目的に応じて異なっている。ここでは後述の本研究との関連性を示すために、そのいくつかについて基本的な考え方に着目して整理し、若干の考察を加える。

Wadell¹⁴⁾は、粒子の円磨度を表す指標として roundness の概念を提案した。これは、粒子内に直交する三軸を考え、図-1のようにその長軸と中間軸を含む平面に粒子を投影し、全ての突起部に内接する円の半径 r_i を

* 正会員 工修 岐阜工業高等専門学校講師 土木工学科
(〒501-04 本巣郡真正町上真桑 2236-2)

** 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 工学部建設系

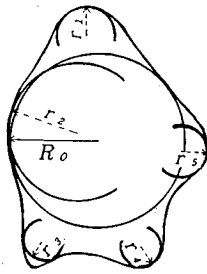


図-1 Wadell の roundness

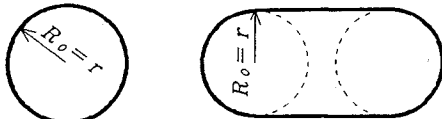


図-2 roundness=1.0の粒子断面の相違

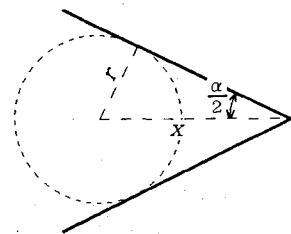


図-3 Lees の angularity

内接する最大円の半径 R_0 で除した値 (n 個) の平均であり次式で表される。

$$\text{roundness} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{r_i}{R_0}\right)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{nR_0} \dots\dots\dots (1)$$

この roundness の特徴は、鉱物あるいは岩石の円磨される前の粒子の形を考慮しており、運搬作用などにより元の形からどの程度円磨されたのかを適切に評価しているところにある。しかし、図-2 に示すように粒子のかどが完全に丸びを帯た二つの粒子の場合、断面の形は明らかに異なるものの roundness は共に 1.0 である。したがって、roundness はこのような鉱物あるいは堆積学の研究においては大変有効であるが、工学的性質に与える粒子形状の影響を議論しようする場合には適切な係数とは言い難い。ただし、粒子は平面上に置くと一番安定した状態、すなわち長軸と中間軸を含む面に落ち着き、これは roundness を求めるための投影断面であり、平面上に置いた粒子を真上から見たときの形に他ならないので取扱いは比較的容易である。

roundness は碎石のように尖ったかどが多い場合には、その形状をうまく表現できないので、Lees¹³⁾ は角張りの度合を表す指標として、図-3 に示すように粒子断面の一つのかどの角度を α 、かどの先端と最大の内接

0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.6	0.7	0.8	0.9	Broken Pebbles 0.3 0.4 0.5

(a) roundness R

0-99	100-199	200-299	300-399	400-499	500-599
600-699	700-799	800-899	900-999	1000-1099	1100-1199
1200-1299	1300-1399	1400-1499	1500-1599		

Angularity

(b) total degree of angularity A

図-4 Krumbein および Lees の視覚印象図

円の中心との距離を x 、その内接円の半径を r として、この一つのかどの angularity の度合いを次式で表した。

$$\text{Angularity} = (180^\circ - \alpha) \frac{x}{r} \dots\dots\dots (2)$$

さらに、この一つ一つのかどの angularity を加えたものを「total degree of angularity」= A と定義した。

しかし、個々の粒子に対して roundness あるいは A の値を算出するのは容易ではなく、しかもかなりの個人誤差が含まれる。そこで、Krumbein¹²⁾、Lees¹³⁾ は roundness および A を視覚的に読み取れる図-4 (a) および (b) の印象図を作成し、粒子断面とこの図とを比較する視察のみから roundness あるいは A を近似的に求めた。また、Powers¹⁹⁾ は roundness を基に粒子の円磨の程度を 6 分類にクラス分けを行った。このような視覚印象図や 6 分類法は、厳密さには欠けるが粒子の形状による分類が容易であるので土質工学の分野でも時々利用されてきた²⁰⁾。

さらに、Zingg¹⁵⁾ は Wadell¹⁴⁾ と同様に粒子内に直交する三軸を考え、図-5 に示すようにその長径 a 、中径

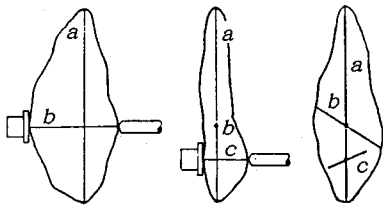


図-5 Zinggの三軸
(a:長軸, b:中軸, c:短軸)

b, 短径 c を計測し, それらの比, $b/a, c/b$ の両値から粒子の形を分類する方法を提案した. この分類法は, コンクリート骨材の粒形を評価するとき一般的に用いられており, またこの三径と粒子の容積を使った容積係数, 球形率, 偏平率などの粒形に関する他の係数も提案されている²¹⁾. しかし, 三径 a, b, c の測定は, 礫のように粒径の大きなものについては可能であるが, 砂のように小粒径の粒子についてはほとんど不可能に近い. そのため三笠ら²²⁾は, 新たに考案した長目ふるいを用いて c を予測し, これと写真から a, b を測定することにより三径を知る方法を提案しているが, JIS規格外のふるいが必要であり, 一粒子の形状の定量化にかなりの手間を要する.

以上の研究は, いずれも粒子形状をその目的に応じた角度から定量化しており, これらの係数は各分野において有効に利用されている. しかし, 土質工学の分野において砂のような粒状体の形状が, 工学的性質に与える影響を議論しようとする場合, これらの形状係数は個人差が入りやすく, 個々の粒径が小さいこともあり, 定量化の作業がかなり煩雑であるか, あるいは不可能に近いなどのために適切であるとは言えない. したがって, 工学的性質に与える粒状体の形状の影響に関する系統的研究を行うには, まず形状の定量化が比較的簡単であり, しかも個人誤差が入りにくく, その形状係数が取扱い易い数値であること, 自然にある砂の形状の違いを適切に表現できることが必要である.

3. 簡易な粒子形状の定量化の方法

粒子の投影断面の形状を数値化して表示するときに, その計測が比較的簡単で, 個人誤差が入らないような量は面積, 周長, 最大長および幅とこれからの換算値である. そのため, このような量および換算値(たとえば, 投影断面の実面積と等価な面積を有する円相当径や円相当周など)を用いて, 粒子形状の違いを評価できる種々の係数を考え, その係数が取扱い易い数値であり, 実用的であるか否かを検討した結果, 以下に述べる凹凸係数 FU による粒子形状の定量化法を提案する.

(1) 凹凸係数 FU の定義

粒子の取扱易さを考慮し, Wadell¹⁴⁾, Zingg¹⁵⁾ らと同

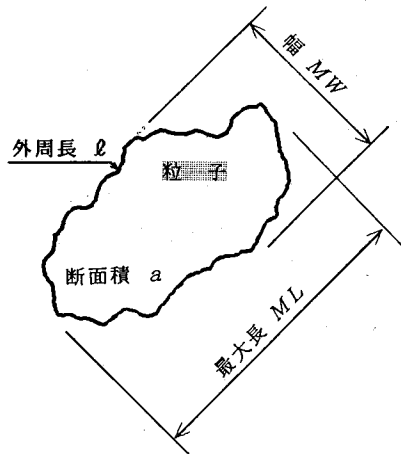


図-6 粒子の投影断面模式図

様に粒子内に直交する三軸を考え, 図-6 のようにその長軸と中間軸を含む平面に粒子を投影した断面について考える. ここで粒子周辺の凹凸の度合いが増すにしたがって, 投影断面の外周長 ℓ が長くなり断面積 a との比が大きくなることに着目し, これらの比である無次元量 f を次式で表す.

$$f = \frac{a}{\ell^2} \dots \dots \dots (3)$$

この値は金属組織学の分野では, 鑄鉄の黒鉛片の断面形状を表す形状係数¹⁶⁾として使われることもあり, また画像処理の分野では, この式の逆数が塊状図形の形状特徴を表す複雑度²³⁾として定義されている. 式(3)は円の場合に最大となり, 円の半径を R_0 とすれば次式のようになる.

$$f_c = \frac{\pi R_0^2}{(2\pi R_0)^2} = \frac{1}{4\pi} = 0.0796 \dots \dots \dots (4)$$

この f と f_c の比を粒子形状を表す凹凸係数 (the coefficient of form unevenness) として次式で定義する.

$$FU = \frac{f}{f_c} = \frac{4\pi a}{\ell^2} \dots \dots \dots (5)$$

凹凸係数 FU は粒子が完全球 (投影断面が円) の場合に 1.0 で, 凹凸の度合いが激しくなるほど小さくなることになる. したがって, この FU を用いると砂のような粒状体の粒子形状を 0~1.0 の数値で表すことができる.

ただし, この FU は以下のような問題を含んでいる.

① FU 測定のための粒子断面は長軸と中間軸を含む面, すなわち平面上に置いた粒子を真上から見たときの断面であるので取扱いは比較的容易であるが, 雲母などの偏平な粒子ではこの投影断面の形状よりも偏平の程度が工学的性質に与える影響が大きいことが予想されるが, この偏平の度合いを評価できない.

② FU の値は粒子が針のように細長い場合にも小さくなるので, 厳密には凹凸の度合いのみを表しているわ

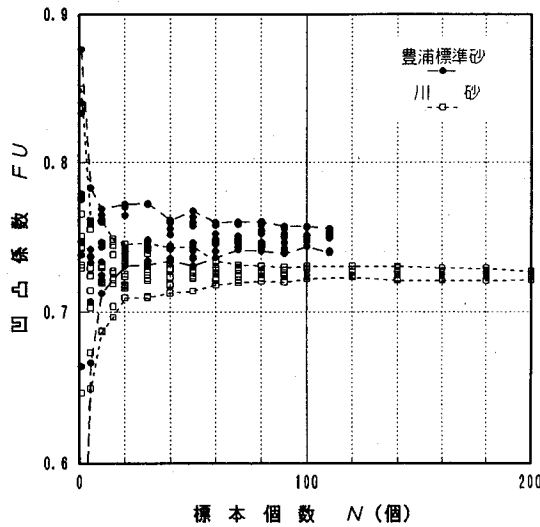


図-7 凹凸係数 FU と標本個数の関係

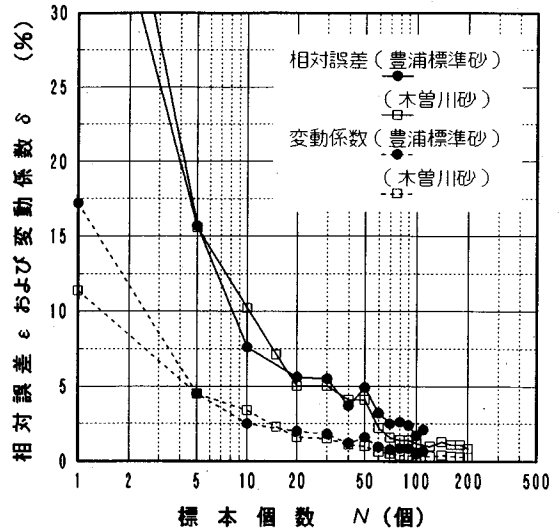


図-8 相対誤差および変動係数と標本個数の関係

けではない。

しかし、自然にある砂の多くは岩石からの変化の過程（風化→運搬→堆積）でできた砕屑性堆積物であり、原岩の鉱物および岩片の集合であるので、雲母鉱物を多く含んだ偏平な砂や極端な針状をした自然砂はほとんど無いと考えられる。したがって、土質工学の分野では粒子形状を FU によって定量化しても実用上は問題が無いと言える。また、仮にこのような形状の砂があったとしても定量化の際に目視や手触りで判断が可能なので、 FU の特徴を理解していればその適用を考えればよい。

(2) 定量化の方法

FU の定量化に必要な量は平面上に置かれた粒子断面の周長 l と面積 a の 2 つであるので、砂粒子の顕微鏡写真を撮るかテレビカメラを介してディスプレイモニターに投影した形をトレースして粒子断面の外周長と面積を、距離計（キルピメーター）および面積計（プランメーター）、あるいはその両用計で測定すればよいので、その作業は簡単であり、かつ個人誤差などもほとんどない。

また、周長および面積測定に統計的手法（ポアンカレの定理およびサンタローの定理）を用いれば、精度はやや低下するものの距離計および面積計の計測器を必要とせず定規のみで極めて簡単に周長および面積が推定できる²⁴⁾。

さらに、最近ではパーソナルコンピュータ（以下、パソコンという）のメモリ容量、処理速度などの機能が向上しており、画像入力装置（光学顕微鏡あるいはビデオカメラ）と画像解析装置（以下、これらを含めて画像処理装置という）も高性能でしかも比較的安価になってきているので、画像処理装置内に二値化して入力された画像データを、これに接続したパソコンで粒子部分の画素の

面積と境界画素の長さを計測し、このデータを記憶装置に保存することが可能である^{24), 25)}。このシステムを用いれば短時間で周囲長および面積の計測と FU の計算、さらにこれらのデータの保存ができ、しかも個人誤差が皆無である。

(3) 標本個数の検討

集合体である砂の個々の粒子形状は異なっているので、その砂の形状を数値として明示するためには、母集団からの標本の抽出数を検討する必要がある。図-7 は豊浦標準砂および代表的な川砂（木曾川の濃尾大橋付近から採取）の標本個数 N に対して各 10 組の凹凸係数 FU の関係を示したものであり、両試料とも $N=10$ 個程度で FU のばらつきが激減することがわかる。さらに、図-7 に示した標本が N 個の場合の 10 組の FU に対する相対誤差 ϵ および変動係数 δ は次式により求められる。

$$\text{相対誤差 } \epsilon = \frac{FU_{\max} - FU_{\min}}{FU_{\text{ave}}} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{変動係数 } \delta = \frac{\sigma}{FU_{\text{ave}}} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 FU_{\max} 、 FU_{\min} および FU_{ave} は FU の最大値、最小値および平均値、 σ は FU の標準偏差である。この ϵ および δ と標本個数 N の関係を示す図-8 をみると、許容するばらつき度により必要とする標本の抽出個数は異なってくるが、 $N=10$ 個で相対誤差は 10%、変動係数は 3%、 $N=20$ 個ではそれらの値は 5% および 2% 程度となり、またその減少率も相対誤差が $N=10 \sim 20$ 個、変動係数が $N=5 \sim 10$ 個程度で著しく小さくなっている。

以上のことを考慮すると、一砂試料から 20 個程度の

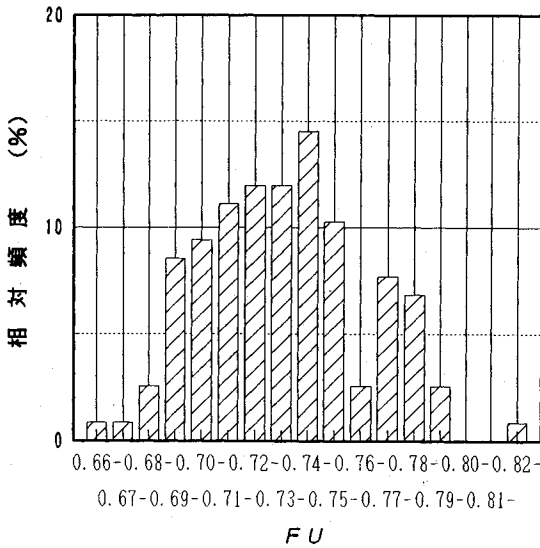


図-9 自然砂のFUの頻度分布

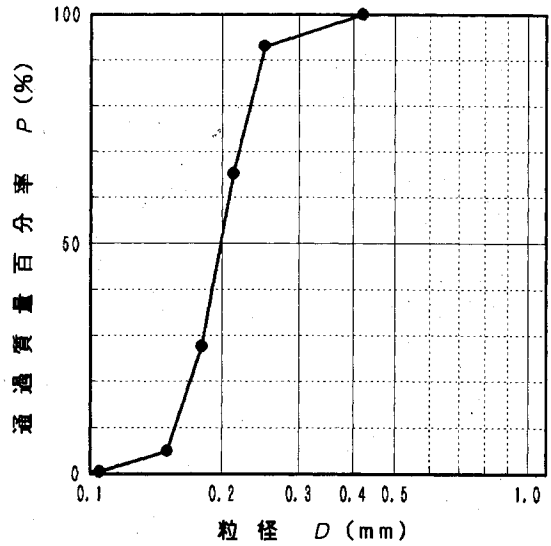


図-11 試料の粒径加積曲線

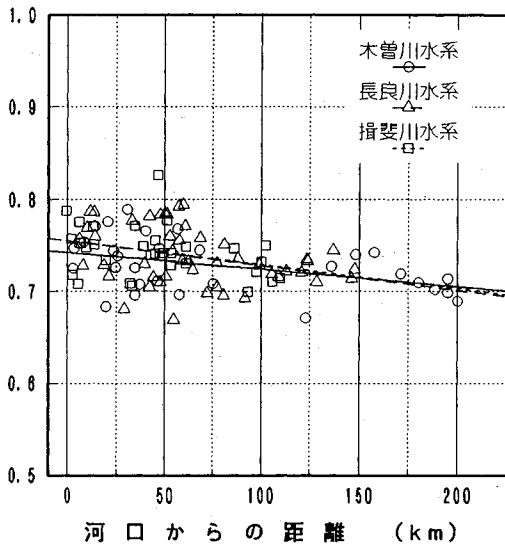


図-10 河口からの距離に伴うFUの変化

標本を無作為抽出してFUを計測し、その平均をもってその試料の代表値とすれば十分に形状の特徴を表現し得ることがわかる。なお、母集団からの標本抽出個数の決定に用いられる一般的な統計的手法においても、標本個数 $N=20$ は信頼水準を95% (したがって、有意水準を5%) としたとき、FUに対する抽出誤差が両試料とも0.0003となり、 $N=20$ は統計的な標本抽出理論からも妥当な標本数であることが裏付けられる。

4. 種々の砂の凹凸係数FU

数種類の試料についてFUの計測を、プランメーターとキルピメータにより手作業で行った場合、画像処理装

置でデータを取り込みパソコンで処理した場合および市販の画像処理装置付きパソコンを用いた場合を比較した結果、精度上の差異はまったく無かったが計測時間にはかなりの差が生じた。粒子断面のトレースの時間なども含めると平均的な一試料 (標本個数約20個) のFU計測時間は、各々約1時間、30分および10分程度であり、全測定を手作業で行っても定量化は十分可能であり、個人誤差もほぼ皆無である。

ここに示す種々の砂のFUは、標本個数約20個に対して市販の画像処理装置付きパソコンを用いて計測を行った結果である。

(1) 木曾三川水系の碎屑性堆積砂のFU

木曾三川 (木曾、長良、揖斐川) 水系の中・下流域から採取した約120種類の砂のFUを測定した結果、木曾三川水系の碎屑性堆積砂のFUは0.66~0.83程度であり²⁴⁾、そのFUの頻度分布は図-9に示すように、FU=0.73~0.74を平均値とする正規分布に近い分布状態にある。

また、図-10は河口からの距離に対するFUの変化を各水系毎に示しているが、水系によるFUの有意な差はみられず、単に河口からの距離が長くなるほど、つまり運搬距離が短いほどFUは小さくなり粒子の凹凸の大きいことが明白にされている。

(2) 四種類の粒状体のFU

定量化の検討のために、図-11に示す粒度分布 (平均粒径 $D_{50}=0.202$ mm, 均等係数 $U_c=1.32$) となるよう人工的に粒度調整し、写真-1のように粒子形状のみが異なる四種類 (Glass Beads, 豊浦標砂, 木曾川砂, 砕砂) の粒状体を用いた。表-1にこれらの粒状体のFUおよび標準偏差を示す。ただし、ここで用いた木曾

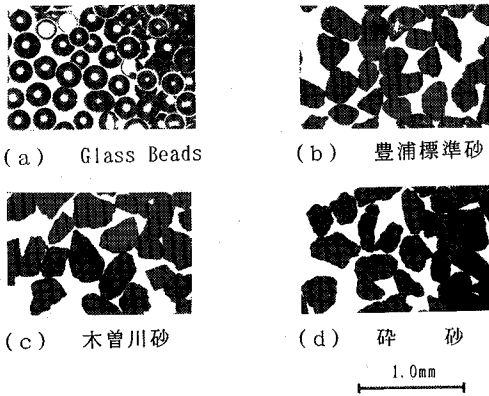


写真-1 典型的試料の光学顕微鏡写真

表-1 典型的試料のFU

	FU	標準偏差
Glass Beads	0.908	0.0176
豊浦標準砂	0.745	0.0582
木曾川砂	0.689	0.0575
砕砂	0.644	0.0743

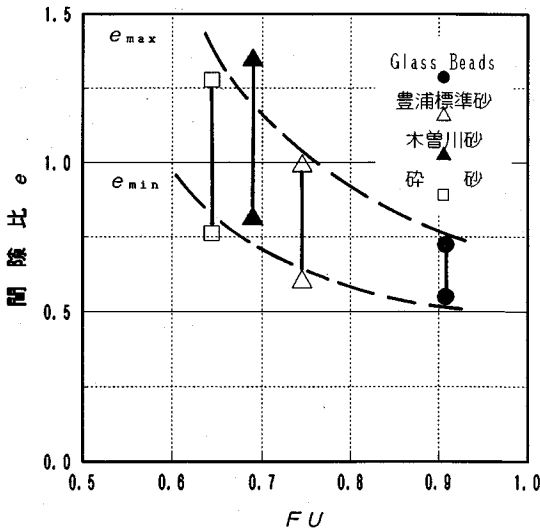


図-12 間隙比と凹凸係数FUの関係

川砂は現木曾川河川敷の堆積砂では最上流部にあたる愛知県犬山市のライン大橋下流の右岸側から採取したものであり、形状はかなり角張っている。写真-1、表-1より粒子断面の形状とFUの値の関係を視覚的に判断できるので、上述した木曾三川水系の砕屑性堆積砂のFUの値から判断すると、多くの木曾三川水系の堆積砂の粒子形状は、これまでわが国の砂の研究で良く使用されてきた豊浦標準砂に類似していることがわかる。

さらに、筆者らはこの四種類の試料について詰まり方²⁶⁾、静的強さ²⁷⁾、液状化強さ²⁸⁾などの重要な工学的性質がわずかなFUの違いで著しく変化することを確かめ

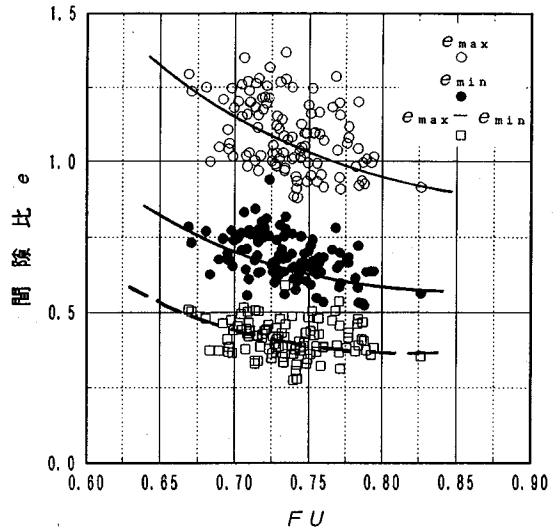


図-13 自然砂の間隙比とFUの関係

ている。たとえば、図-12はこれらの試料の最大・最小間隙比 e_{max} ・ e_{min} とFUの関係であり、FUが大きくなり形状が丸くなるほど e_{max} 、 e_{min} およびその間隙比の幅 ($e_{max} - e_{min}$) は小さくなっている。この間隙比とFUの関係は上述の木曾三川水系の約120種類の種々の粒度組成の砂について示した図-13についてもおおよそ成り立つ。

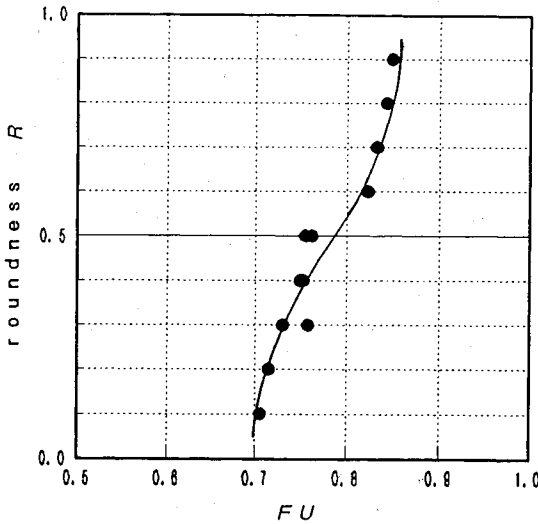
5. 視覚印象図とFUの関係

視覚印象図とFUとの関係を知るために、Krumbein¹²⁾、Lees¹³⁾によって作成された代表的な円磨度および角張り度印象図(図-4)のroundness (R)および「total degree of angularity」(A)の値とFUの関係を求めると図-14のような関係となり、両者の間には一定の関係がある。したがって、これまでにしてしばしば粒子形状の評価に関する研究²⁰⁾で用いられてきたこれらの視覚印象図はFUを用いて評価することが可能である。

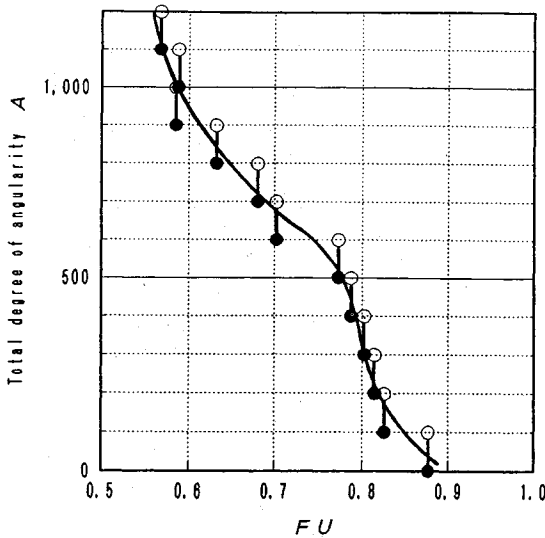
写真-1に示すGlass Beads、豊浦標準砂、木曾川砂、砕砂の断面形状は図-4の視覚印象図では $R \approx 1.0, 0.4, 0.1, -$ 、 $A \approx 0, 600, 700, 850$ 程度であり、図-14からこのRおよびAに対応するFUを読み取るとおおよそ表-1の結果と一致する。

6. 投影断面による粒径加積曲線の推定

凹凸係数FUの定量化に必要な量は、平面上に置かれた粒子断面の周長 l と面積 a であるが、図-6に示すようにこの2つの量の他に、最大長 ML およびこれに対する幅 MW を測定すると、 ML は長径 a 、 MW は中径 b に相当する(図-5参照)。一粒子の体積を MW を直径とする完全球の体積として近似すると、集合体である砂



(a) RとFU



(b) AとFU

図-14 視覚印象図のRおよびAとFUの関係

粒子の個々の土粒子密度が等しいとすれば質量百分率はこの体積を小さい方から順次累計した百分率に一致する。したがって、粒子の中径 MW は JIS の標準ふるいを通過する最小径に相当するので、体積の累計百分率と MW との関係を描けば、土質工学会 (JSF) で基準化されている粒径加積曲線に対応した関係を求めることができる。

図-11 に粒度分布を示した四試料についてこの関係を示したのが図-15 である。図中の実線は図-11 に等しく、ふるいの呼び寸法 (ふるいの開きメッシュ D) によって作成した JSF 基準の粒径加積曲線であるが、実際には粒子がそのメッシュを通過できる径は図-16

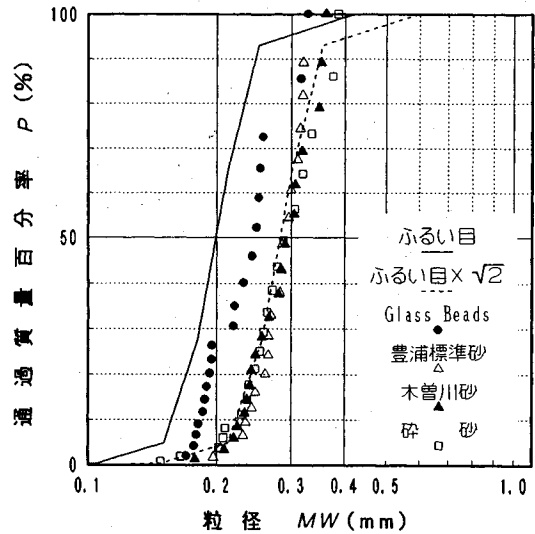


図-15 粒子の投影断面から推定した粒度分布

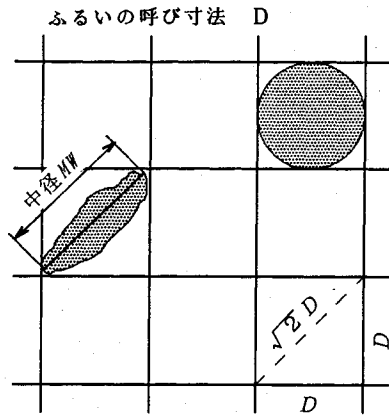


図-16 ふるいのメッシュ模式図

のようにおおよそ対角線長 $\sqrt{2}D$ に相当する。図-15 では、Glass Beads を除いた三試料の累計百分率は破線で示したこの対角線長とよく一致しており、砕屑性堆積砂である木曾三川水系から採取した多くの自然砂についても同様の関係があった。このことは砂の粒度分布はふるい分け試験を行わなくても、わずか 20 個程度の粒子の投影断面から推定できることを示唆しており、JSF で基準化されている粒径加積曲線に対応させるためには、粒径 MW を $\sqrt{2}$ で除した値を用いればよいことになる。ただし、Glass Beads のように三径がほぼ等しい粒子については、その径とメッシュ長 D がほぼ等しくなるので、図-15 に示すように $MW \approx D$ となる。

7. まとめ

粒状体の形状を定量化する試みは、Wadell や Lees などにより古くから行われてきたが、これらの方法では

定量化の際に個人誤差が入り易かったり、あるいはその作業が極めて煩雑であるなどの問題がある。そのために本論文では、工学的性質におよぼす粒子形状の影響を評価できる簡易な定量化の方法を提案し、これを用いて種々の砂の形状を定量化した結果およびこれまでに形状の評価に用いられてきた視覚印象図との関係を検討した結果について述べてきた。本研究で得られた結果および問題点をまとめると以下のとおりである。

(1) 砂のような粒状体の粒子形状の評価には凹凸係数 FU を用いるとよい。 FU は、粒子内に直交する三軸を考え、その長軸と中間軸を含む平面に粒子を投影した断面の外周長を l 、断面積を a としたときに、

$$FU = \frac{4\pi a}{l^2}$$

で定義され、粒が完全球(投影断面が円)の場合に 1.0 で、凹凸の度合いが激しくなるほど小さくなる係数であり、粒子形状を 0~1.0 の数値で明示できる。また、一砂試料の FU の推定には無作為抽出した 20 個程度以上の計測が必要である。

(2) 木曾三川水系の砕屑性堆積砂の凹凸係数 FU は 0.66~0.83 程度であり、その頻度分布は $FU=0.73\sim 0.74$ を平均値とする正規分布に近い分布状態にある。また、 FU はしばしば粒子形状の評価に用いられてきた典型的な視覚印象図の roundness および total degree of angularity (A) と一定の関係があり、 FU を用いてこれまでの形状に関する研究の評価が可能である。

(3) しかし、凹凸係数 FU が厳密には凹凸の度合いのみを表していないこと、雲母などのような偏平な粒子では FU よりも偏平度の方が工学的性質に与える影響が大きいであろうことを考えると、この FU は全ての粒状体の粒子形状を工学的な立場から完全に評価できるものではないが、一般の砂については、実用上 FU で粒子形状を評価しても十分である。

(4) 凹凸係数 FU の定量化の際に、粒子断面の幅 MW も測定すれば、粒径加積曲線を描くことも可能である。

謝辞：本研究を行うにあたり、岐阜工業高等専門学校機械工学科 橋浦正史教授、長岡技術科学大学建設系杉本光隆助教授、北海道大学工学部 三浦均也助教授には有益な御助言と御指導をいただきました。ここに、感謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) 土質工学会編：建設計画と地形・地質、土質工学会、pp.31~133, 1984.
- 2) 最上武雄：土質力学、技報堂、pp.893~1036, 1969.
- 3) Bjerrum, L., Kringstand, S. and Kummeneje, O.: The Shear Strength of Fine Sand, Proc. 5th Int. Conf. SMFE. Vol.1, pp.29~37, 1961.
- 4) Rowe, P.W.: The Stress-dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Royal Soc., London, Series A. Vol.269, pp.500~527, 1962.
- 5) Terzaghi, K. and Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, p.85, Wiley, New York, 1948.
- 6) Sowers, G.B. and Sowers, B.F.: Introductory Soil Mechanics and Foundations, Macmillan, New York, 1953.
- 7) 春山元寿：粒状体のセン断特性に関する粒子の形の影響、第24回年次学術講演会講演概要集(Ⅲ)、pp.21~24, 1969.
- 8) 三笠正人・高田直俊・望月秋利：粒子形状が力学特性に及ぼす影響について、第25回年次学術講演会講演概要集(Ⅲ)、pp.117~120, 1970.
- 9) 小田匡寛・榎本文勇・鈴木 正：砂粒子の形状・組成が砂の土質工学的性質に及ぼす影響に関する研究、土と基礎、Vol.19, No.2, 1971.
- 10) Youd, T.L.: Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands, STP 523 of ASTM, pp.98~112, 1972.
- 11) Holubec, I. and D'Appolonia, E.: Effect of Particle Shape on the Engineering Properties of Granular Soils, STP 523 of ASTM, pp.304~318, 1972.
- 12) Krumbein, W.C.: Measurement and Geologic Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles, J. Sed. Petrol., 11, pp.64~72, 1941.
- 13) Lees, G.: A New Method for Determining the Angularity of Particles, Sedimentology, 3, 1964.
- 14) Wadell, H.A.: Volume, Shape and Roundness of Rock Particles, Jour. Geol., Vol.40, pp.443~451, 1932.
- 15) Zingg, Th.: Beiträge zur Schotteranalyse, Min. Petrog. Mitt. Schweiz., 15, pp.39~140, 1935.
- 16) 宮田征一郎・菊池政郎：統計的手法による鑄鉄の黒鉛組織の数値化の試み、鑄物、45, pp.563~572, 1973.
- 17) Wied, G.L., Bartels, G.F. and Oldfield, D.G.: Taxonomic Intracellular Analytic System(TICAS) for Cell Identification, Acta Cytol., 12, 180, 1968.
- 18) 杏沢 新：骨材の粒度と形状のパラメーター、とくに空けき率との関係(1)セメントコンクリート、No.179, pp.3~11, 1962.1.
- 19) Powers, M.C.: A New Roundness Scale for Sedimentary Particles, Journal of Sedimentary Petrology, Vol.23, No.2, pp.117~119, 1953.
- 20) たとえば、三浦均也・松本吉英・長谷川敬寿・土岐祥介：砂の物理的性質に及ぼす粒子形状および粒度分布の影響、北海道大学工学部研究報告、第148号、pp.17~31, 1990.
- 21) 西林新蔵：土木材料、朝倉書店、pp.94~96, 1973.
- 22) 三笠正人・高田直俊・望月秋利・三輪重昭：土粒子形状の一試験法、第24回年次学術講演会講演概要集(Ⅲ)、pp.17~20, 1969.
- 23) 田村秀行：コンピュータ画像処理入門、総研出版、pp.65~94, 1985.3.
- 24) 吉村優治・小川正二・土居正信：砂の粒子形状の新しい定量化法、新しい土の物理試験方法に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp.105~112, 1992.3.

-
- 25) 吉村優治・森本雅彦：画像処理装置を用いた砂粒子の形状測定，岐阜工業高等専門学校情報処理教育・研究報告，第17号，pp. 15～18，1990.
- 26) 吉村優治・荻田博行：砂の詰まり方に影響を及ぼす種々の因子，第46回年次学術講演会講演概要集（Ⅲ），pp. 426～427，1991.
- 27) 吉村優治・阿部 滋：砂の排水せん断特性に及ぼす粒子形状の影響について，第26回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 465～466，1991.
- 28) 吉村優治・土居正信・小川正二：砂の非排水繰返しせん断強度に及ぼす粒子形状の影響，第46回年次学術講演会講演概要集（Ⅲ），pp. 442～443，1991. (1992. 6. 12 受付)
-

A SIMPLE QUANTIFICATION METHOD OF GRAIN SHAPE OF GRANULAR MATERIALS SUCH AS SAND

Yuji YOSHIMURA and Shoji OGAWA

It is a well known fact that grain shape of sand particle has an influence on geotechnical characteristics, such as shear strength. However, we have been prevented from studying this influence systematically, because particle size of sand is small and the method to quantify its shape is quite complicated. This paper proposes the coefficient of form unevenness FU , which is a measure of the grain shape of granular materials, and shows how to quantify grain shape of various kinds of sand and the sketches of roundness and angularity which have been utilized to measure the shape.
