

種々の粗砂の平面的な粒子形状分布

野並 賢*

Distribution of Planer Particle Shapes of Various Course Sands

Satoshi NONAMI*

ABSTRACT

In this paper, the planar particle shape which has big influence on the shear strength characteristics was measured to 21 kinds of coarse sands used as a construction material, and the distribution tendency of the measured value was shown. As a particle shape index, I adopted coefficient of form unevenness (FU coefficient) related to a shear-resistance angle with an easy instrumentation. As a result, the production origin and the measured value of a specimen were related. And there is a tendency for a particle-shaped dispersion to become large as FU coefficient becomes small.

Keywords : Course sand, Particle shape, Coefficient of form unevenness, Standard deviation

1. はじめに

社会インフラとして重要な役割を担っている盛土構造物がこれまでに多数築造されている。それらのほとんどは常時の供用に問題がないものの、地震時や豪雨時になって変状を生じ、初めて安定性の不足が露呈するものがある。一方、盛土の安定性を評価するためには、盛土材のせん断強度特性を把握することが望まれるが、無数にある既設盛土全てに対してせん断試験を実施することは現実的でない。そこで、比較的容易に測定可能な物理特性からせん断特性を推定する手法の確立が望まれている。ここで、粗粒土の物理特性のうち粒径や粒度分布、粒子形状など、試料の生来的な性質である一次性質に着目すると、粒子形状の影響が最も大きいことが知られている。Terzaghi and Peck¹⁾は、「乾燥砂の内部摩擦角は角張った粒子ほど、粒度分布の良いほど、また砂粒子が堅硬なほど大きくなる」ことを報告している。また、小田ら²⁾は10種類の砂について、一次性質（粒度組成、粒子形状、鉱物組成）と最大・最小間隙比、せん断抵抗などの関係を検討し、これらに与える粒子形状、粒径、粒度の影響が大きいことを報告している。吉村・小川^{3,4)}は、粒状土の強度定数に及ぼす影響因子の中で一次性質に関連する因子に着目し、粒子形状の影響が最も大きいと報告している。

Maeda and Miura^{5,6)}はせん断強度の側圧および相対密度への依存性に影響を与える一次性質のうち、粒子形状の影響が大きいことを示している。筆者の研究室では、一面せん断強度に及ぼす異方性の影響に関する実験的検討を実施しており^{7,8,9)}、粒子の平面的な凹凸を示す粒子形状と、立体的な粒子形状を表す扁平率の両方がせん断抵抗角に影響を与えることを述べているが、前者の影響の方が大きいこと、後者は異方性に影響を与えることを示している。

粒子形状指標と強度試験結果との対比を行う場合、粒径や粒度分布など他の一次性質に関する指標を揃えればこれらの影響を排除できるため、焦点を絞った議論が可能となる。ただし、筆者らの研究成果を踏まえれば、平面的な粒子形状指標のみで粗粒土のせん断強度特性を説明できるわけではない。このため、平面的な粒子形状を主たる指標とし、粒子の立体的な形状を表す扁平率や、微視的な表面構造と関連のある最大・最小間隙比、粒子の硬さを表す圧裂強度などを補助的な指標としたせん断強度定数の推定手法が提案できれば、平面的な粒子形状のみの指標に基づくものよりも、推定精度の上昇が期待できると考えられる。

以上の背景に基づき、本稿では上記の検討を行うにあたっての第一段階として、建設材料として用いられる、生成由来の異なる21種類の粗砂に対し、粒子の平面形状を測定した。その結果に基づき、試料の生成由来と測定値との関係や、測定値の分布傾向について検

* 都市工学科 教授

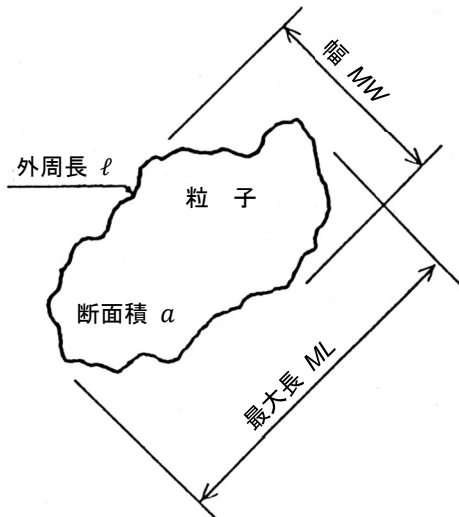


図1 凹凸係数 $FU^{12)}$ の定義方法

討したものである。

2. 粒子形状指標と用いた試料

2.1 粒子形状指標と測定方法 粒子の平面的な形状を表すための指標はさまざまなものが提案されており、既往文献^{10,11)}に取りまとめられている。本稿では人為的誤差が含まれず、定量化が容易な指標として、凹凸係数 $FU^{12)}$ を採用する。FU の定義は以下の通りである。図1に示すように、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について考える。そして粒子周辺の凹凸の度合いが増すにしたがって、投影断面の外周長が長くなり、断面積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。

$$f = \frac{a}{\ell^2} \tag{1}$$

ただし、 a : 影断面の断面積
 ℓ : 投影断面の周長

式(1)は粒子が完全球(投影断面が円)の場合に最大となり、その値 f_c は円の半径を R_0 とすれば次式のようになる。

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

粒子形状をあらわすFUは、 f と f_c の比として次式で定義される。

$$FU = \frac{f}{f_c} = \frac{4\pi a}{\ell^2} \tag{3}$$

FU は、粒子の投影断面が球である完全円の場合に1になり、凹凸の度合いが激しくなるほど小さな値となる。そして、FUにより粒子形状を0から1までの数値で表すことができる。

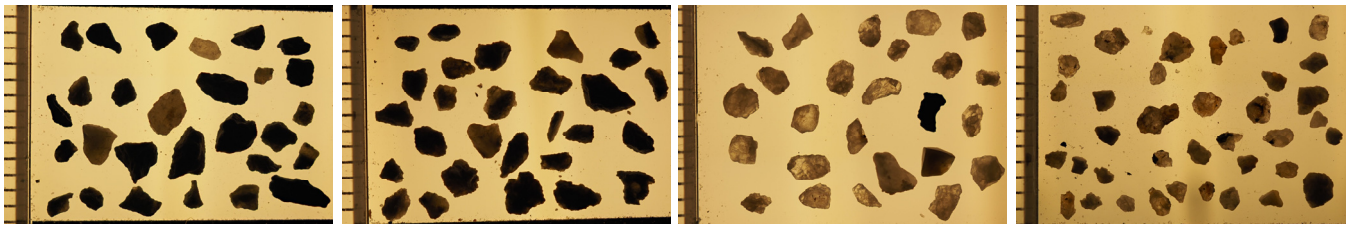
測定方法として、ガラス板上に粒子が重ならないように注意しながら、20mm×15mmの範囲に粒子を30～

表1 試料一覧

カテゴリー	番号	試料名	サブ試料名	備考
1	11	砕砂1	有馬層群流紋岩	神戸市北区
	12	砕砂2	播磨道頁岩	兵庫県佐用町
	13	珪砂1		岐阜県土岐市
	14	珪砂2		南あわじ市
2	21	山砂1	丹波層群砂岩	猪名川町産
	22	山砂2	神戸層群砂岩・泥岩	神戸高専敷地際
	23	山砂3	播磨道土砂	佐用町産風化岩
	24	まさ土1		市販
	25	まさ土2		筑波山産
3	31	陸砂1	大阪層群礫質土細粒分多	神戸市西区桜ヶ丘
	32	陸砂2	大阪層群礫質土細粒分多	小野市産業団地
	33	陸砂3	大阪層群礫質土細粒分少	いなみ野台地
4	41	川砂1	住吉川河口	
	42	川砂2	加古川下流	加古川市
	43	川砂3	加古川中流	加東市
	44	川砂4	加古川上流	丹波市青垣町
5	51	海砂1	慶野松原	南あわじ市
	52	海砂2	明石海岸	明石川河口付近
	53	海砂3	熊野灘ウミガメ公園	三重県紀宝町
	54	海砂4	熊野灘花の窟	三重県熊野市
	55	海砂5	貝殻混じり	和歌山県白浜町

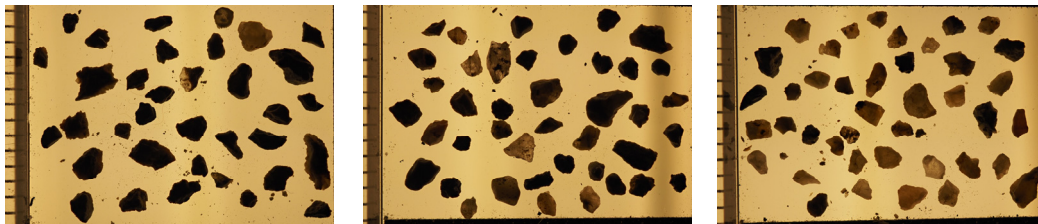
40個程度配置し、背面から蛍光灯をあてシルエットを撮影した。そして、得られたJPGファイルを輝度調整して画像解析ソフトに取り込み、FUを求めた。撮影は2000万画素のマイクロフォーサーズ規格のデジタルカメラとマクロレンズを用いて行い、等倍程度で写るようにピント面の位置を調整した。また、粒子の厚みの違いに起因して、各粒子の輪郭部と撮像素子面の距離は一定でなく、全ての粒子にピントが合わない恐れがある。そこで、鮮明な画像が得られるよう、ピント位置をずらした複数枚の写真を合成し、被写界深度の深い写真を作成する深度合成モードを用いた。撮影は異なる粒子で3回行い、それらの平均値を試料の代表値とした。以下では、代表値をFU値と称する。画像解析ソフトはパブリックドメインの画像処理ソフトウェアであるImage J^{13,14)}を用いた。

2.2 試料 本稿では、建設材料として一般的に用いられる粗粒土の粒子形状分布を把握するため、生成由来の異なる21種類の試料を用いた。準備した原粒度の試料は、細粒分も含む幅広い粒度から構成されるものもあったが、測定対象とした粒径は0.85mm～2mmに調整したものとした。この粒度を採用したのは、今後実施を予定している粒子の扁平率測定や、圧裂強度測定が実施可能かつ、砂の最大・最小密度試験が実施可能な粒径としたためである。このことに加え、板橋ら¹⁵⁾が指摘するように、母岩を同一とする試料でも粒径の

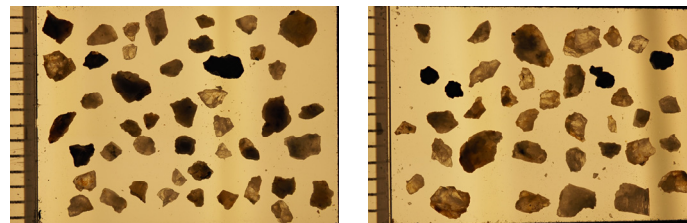


(a) 砕砂 1 (FU 値=0.708) (b) 砕砂 2 (FU 値=0.647) (c) 砕砂 1 (FU 値=0.680) (d) 砕砂 1 (FU 値=0.692)

写真1 砕砂・珪砂の接写写真

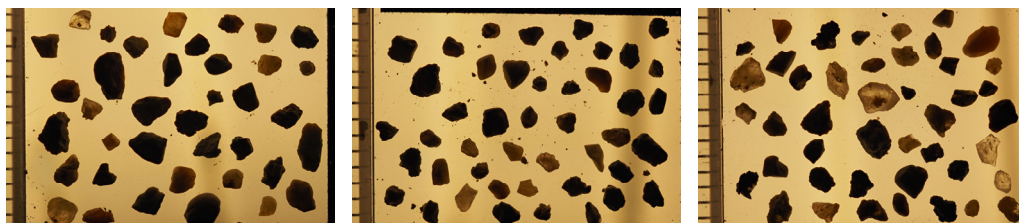


(a) 山砂 1 (FU 値=0.644) (b) 山砂 2 (FU 値=0.695) (c) 山砂 3 (FU 値=0.673)



(d) まさ土 1 (FU 値=0.670) (e) まさ土 2 (FU 値=0.656)

写真2 山砂・まさ土の接写写真



(a) 陸砂 1 (FU 値=0.719) (b) 陸砂 2 (FU 値=0.721) (c) 陸砂 3 (FU 値=0.706)

写真3 陸砂の接写写真

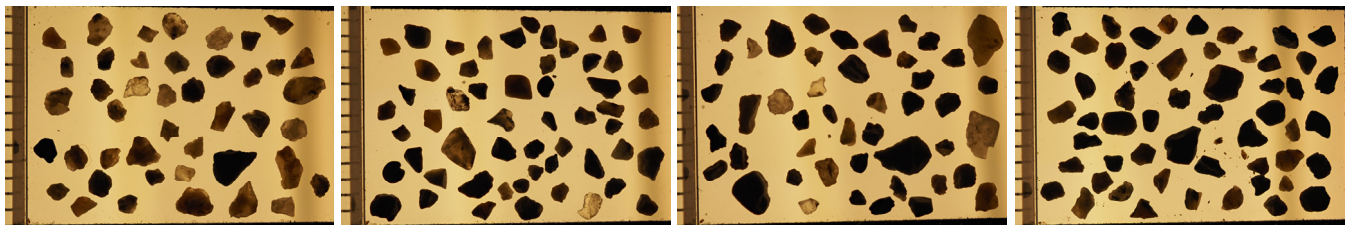
違いにより、粒子形状が異なる可能性があるため、粒径を揃えることでその影響を排除した。

試料の一覧を表 1 に示す。試料は生成由来の違いにより 5 つのカテゴリーに分類した。カテゴリー1 は岩石をクラッシャーで粉砕して作製したものであり、砕砂 1 は流紋岩質、砕砂 2 は頁岩を母岩とする。珪砂 1、2 は花崗岩質を母岩とするものである。カテゴリー2 は母岩が現地で風化し残積したものを採取したものであり、山砂と称する。山砂 1~3 は母岩が古生代~中生代の丹波層群および古第三紀の神戸層群である。まさ土 1 はホームセンターで販売されているものを用い、まさ土 2 は室内土槽作製用に大量に準備した茨城県つくば産のものを用いた。カテゴリー3 は淡水域で運搬、堆積作用を受けた第 4 紀の段丘層（大阪層群）で採取したものであり、陸砂と称する。原粒度はいずれも良粒

度の大坂層群礫質土であるが、陸砂 3 は他の試料と比べて細粒分が少なかった。カテゴリー4 は河川域で採取した試料であり、川砂と称する。これらは表六甲を流下する住吉川で採取したものと、兵庫県の東南部を流下する加古川で採取したものであるが、後者は試料毎に河口からの距離が異なっている。カテゴリー5 は海岸で採取したものであり、海砂と称する。瀬戸内海で採取した海砂 1、2 と、太平洋に面した海岸で採取した海砂 3、4、5 を対象とした。

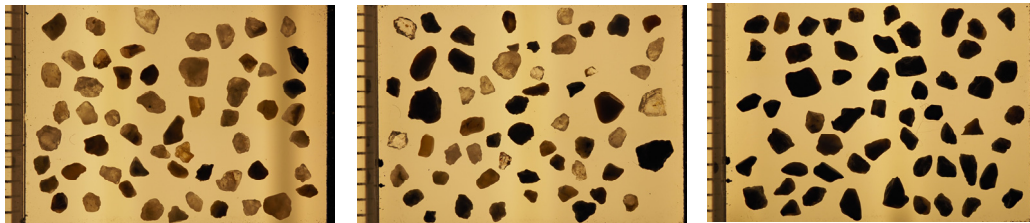
3. 測定結果

カテゴリー1 の各試料の代表的な撮影結果を写真 1 (a)~(d)までに示す。左端に写っている目盛は、1mm 間隔の定規である。各試料の見出しには FU 値もあわせて示している。同様に、その他のカテゴリーの撮影結

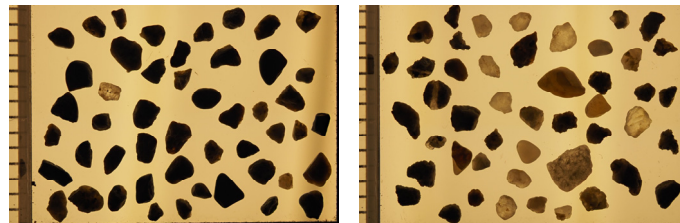


(a) 川砂 1 (FU 値=0.726) (b) 川砂 2 (FU 値=0.760) (c) 川砂 3 (FU 値=0.741) (d) 川砂 4 (FU 値=0.723)

写真4 川砂の接写写真



(a) 海砂 1 (FU 値=0.763) (b) 海砂 2 (FU 値=0.758) (c) 海砂 3 (FU 値=0.761)



(d) 海砂 4 (FU 値=0.766) (e) 海砂 5 (FU 値=0.753)

写真5 海砂の接写写真

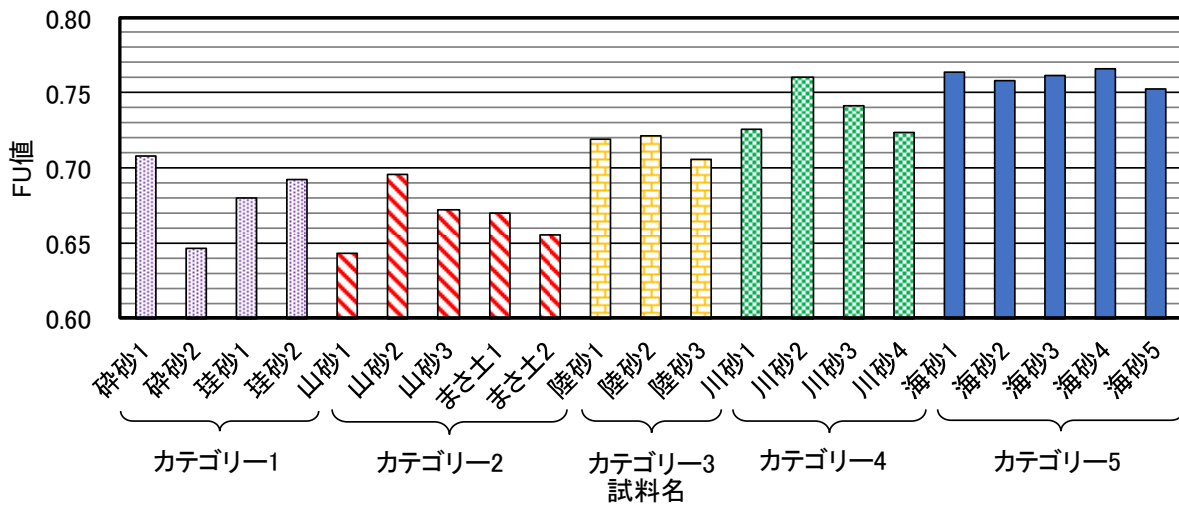


図2 各試料のFU 値測定結果一覧図

果を写真2～写真5までに示す。また、図2に各試料のFU 値一覧を示す。これより、FU 値の最大値が海砂4の0.766、最小値が山砂1の0.644であり、理論上0～1までの値を取り得る指標としては、比較的狭い範囲に分布している。また、FU 値とせん断抵抗角の間には正の相関が見出されているが¹⁶⁾、そのことと今回の結果を踏まえると、今回の試料を同じ密度に調整してせん断試験を実施しても、せん断抵抗角は異なることが予想される。

カテゴリー毎のFU 値の出現傾向に着目すると、風化・運搬作用を経していないカテゴリー1のFU 値はいずれも小さく、凹凸の度合いが最も激しいことがわかる。風化作用は受けているものの運搬作用のないカテゴリー2のFU 値も、同程度の値となっている。一方、海流による運搬作用を経たカテゴリー5が最もFU 値が大きく、次いで河川流による運搬作用を経たカテゴリー4のFU 値が続いている。加古川で採取したカテゴリー4の川砂2, 3, 4は下流の方がFU 値は大きくなってお

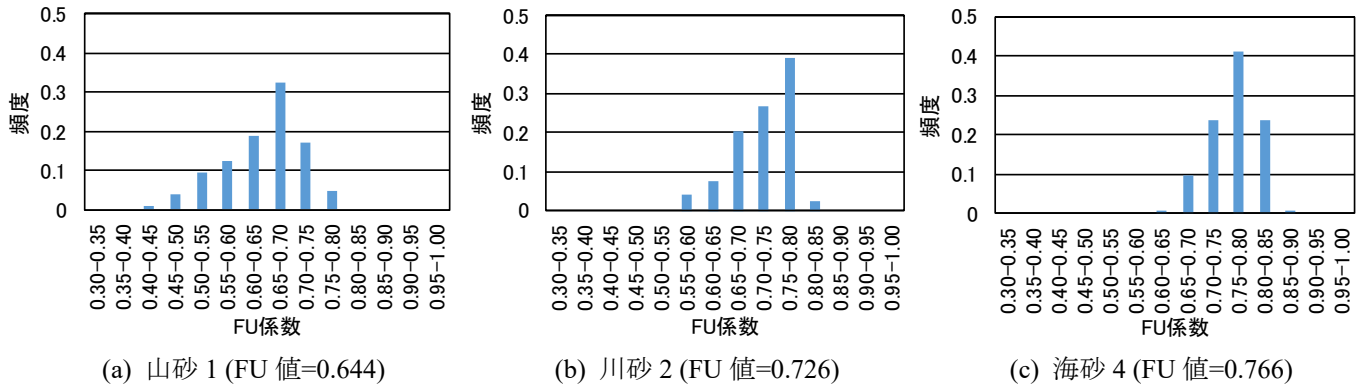


図3 試料毎の測定値の頻度分布図

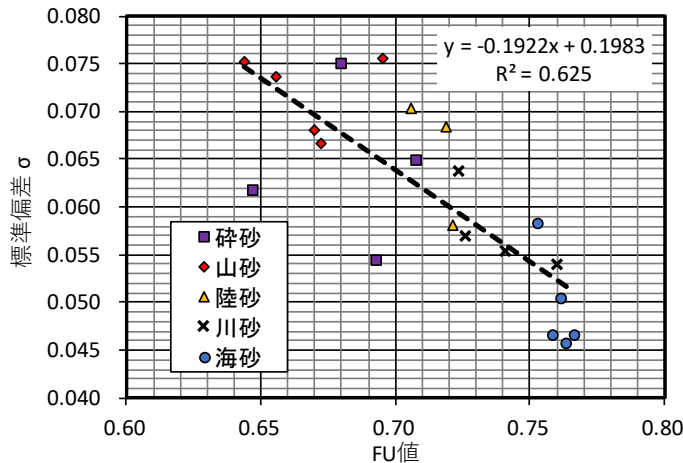


図4 各試料のFU 値と標準偏差の関係

り、運搬作用により粒子が丸くなる傾向が確認された。段丘層から採取したカテゴリー3 の FU 値は中間的な値をとっており、細粒分の多い層であった陸砂 1, 2 の FU 値が陸砂 3 よりもやや大きい結果となった。なお、地質学の分野では、浸食・運搬・堆積過程の違いが粒子の円磨度に大きな影響を与えることが知られているが、粒子形状と生成過程に相関性が見られるという本結果は、その知見に矛盾しないといえる。

同一試料における粒子形状のばらつきを評価するため、図 3 (a)~(c)に代表的な試料の測定値の頻度分布図を示す。(a)が FU 値最小の山砂 1, (b)が平均的な FU 値の川砂 1, (c)が FU 値最大の海砂 4 である。これより、FU 値が小さい試料ほど、粒子形状のばらつきが大きく、多様な粒子形状の粒子から構成されていることがわかる。次に、測定値のばらつきの程度を表す標準偏差と、FU 値の関係を図 4 に示す。これより、両者に良好な相関があり、FU 値が小さいほど標準偏差は大きくなることがわかる。今のところ、粒子形状のばらつきの程度が力学特性に与える影響は不明であるが、両者の関係を検討するにあたっての基礎的な知見として活用することが期待される。

4. おわりに

本稿では建設材料として用いられる 21 種類の粗砂に対し、せん断強度特性に大きな影響を及ぼす平面的な粒子形状を測定し、測定値の分布傾向を示した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 粒子形状指標として、せん断抵抗角との相関があり、かつ測定が容易な凹凸係数 FU を採用した。0.85mm~2mm に粒度調整した試料を用いて測定を行ったところ、同一の粒度を有する粗砂でも生成由来に応じて測定結果の平均値である FU 値が異なることがわかった。風化・運搬作用を経ていない試料の FU 値は小さく、凹凸度合いが激しい。一方、運搬作用の影響が大きいほど FU 値は大きくなる傾向が確認された。
- 2) FU 値が小さい試料ほど、粒子形状のばらつきが大きく、多様な粒子形状の粒子から構成されることがわかった。

今後同一の試料に対し、扁平率や最大・最小間隙比、圧裂強度などを求め、今回求めた FU 値を含めたそれらの測定結果と、せん断強度試験結果との比較を行うことにより、せん断強度定数の推定手法の検討を行う予定である。

謝辞

本研究に用いた一部の試料の採取にご協力いただいた、神戸高専都市工学科卒業生の久保 珠妃氏（現奥村組）と、鈴木 美結氏（現日建設計）に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) Terzaghi, K. and Peck, R.B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, p.85, Wiley, New York, 1948.
- (2) 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, pp.5-12, 1971.
- (3) 吉村 優治, 小川 正二 : 粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響, 土木学会論文集,

- No.487, III-26, pp.98-108, 1994.
- (4) 吉村 優治, 小川 正二: 砂の等方圧密およびせん断特性に及ぼす粒子形状の影響, 土木学会論文集, No.487, III-26, pp.187-196, 1994.
- (5) Maeda, K and Miura, K: Confining Stress Dependency of Mechanical Properties of Sands, Soil and Foundations, Vol.39, No.1, pp.53-68, 1999.
- (6) Maeda, K and Miura, K: Relative Density Dependency of Mechanical Properties of Sands, Soil and Foundations, Vol.39, No.1, pp.69-80, 1999.
- (7) 野並 賢, 吉元 咲葵, 大辻 知樹, 河原 輝虎, 鳥居 宣之: 粗粒土の堆積角および粒子の扁平率が一面せん断強度に与える影響, 第 56 回地盤工学研究発表会概要集, 2021.
- (8) 野並 賢, 大久保 珠妃, 稲上 皓紀, 鳥居 宣之, 加藤 正司: 堆積角と一面せん断強度の異方性の関係に関する実験的検討, 第 57 回地盤工学研究発表会概要集, 2022.
- (9) 野並 賢, 稲上 皓紀, 大久保 珠妃, 鳥居 宣之, 加藤 正司: 粒子配列に着目した供試体作製方法が一面せん断強度に与える影響, 第 57 回地盤工学研究発表会概要集, 2022.
- (10) 松島 亘志, 前田 健一, 石川 達也: 粒子特性の評価と工学的意義, 4. 粒子形状の評価と土の力学挙動, 土と基礎, Vol.55, No.7, pp.37-44, 2007.
- (11) 板橋 一雄, 松尾 稔, 内藤 充則, 神谷 圭吾: 均一な粗粒材料の粒子形状評価と充填特性, 地盤工学会論文報告集, Vol.43, No.1, pp.115-127, 2003.
- (12) 吉村 優治, 小川 正二: 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法, 土木学会論文集, No. 463, III-22, pp. 95-103, 1993.
- (13) Rasband, W.S.: ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 1997. <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2012.
- (14) Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W. : NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, Nature Methods 9, pp.671-675, 2012.
- (15) 神谷 圭吾, 板橋 一雄: 海砂・川砂の粒子形状と粒径の関係, 第 37 回地盤工学研究発表会概要集, pp.569-570, 2002.
- (16) 松岡 元, 劉 斯宏, 吉村 優治, 山田 章史, 松山 幸太郎: 粒子形状と相対密度による砂、礫、粗粒材の内部摩擦角の推定法, 第 38 回地盤工学研究発表会概要集, pp.551-552, 2003.