

## 粗砂の粒子すべり角と物理・変形強度特性の関係に関する実験的検討

### Experimental Study on Correlations of Particle Sliding Angle of Coarse Sand and Physical and Strength-deformation Properties

野 並 賢                      鳥 居 宣 之  
Satoshi Nonami              Nobuyuki Torii

#### 1. はじめに

近年の土構造物の設計・施工技術の高度化や、盛土構造物の大型化に伴い、盛土の要求性能によっては、通常行われる締固め度による管理のみならず、せん断強度の確保が求められることがある。代表的な試料に対しては、時間も費用も掛かるものの、精度の高い三軸圧縮試験、一面せん断試験などの室内試験によってせん断強度を求めておくことになるが、日常の材料管理に室内試験を実施することは現実的ではない。そこで、せん断強度との相関性が高く計測が容易な物性値を見出せば、せん断強度の管理が容易となる。一方、粒径や粒度分布、粒子形状、粒子の硬さなど、試料の生来的な性質を一次性質と呼ぶが、盛土材のせん断強度特性に与える影響として、Terzaghi and Peck<sup>1)</sup>は、乾燥砂の内部摩擦角は角張った粒子ほど、粒度分布が良いほど、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<sup>2)</sup>は一次性質と最大・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、粒子の表面相度、粒径、粒度の影響が大きいことを報告している。これらのことは、比較的計測が容易な一次性質を、せん断強度の指標にすることが可能であることを示唆するものといえる。

土のせん断強度特性の評価について、土粒子間の接触接線方向の力の伝達に影響を与える粒子間摩擦角は、一次性質である表面粗度が支配的要因であるといえる。そのため表面粗度は、土のせん断強度特性に影響を与えていると考えられる。表面粗度に関する既往検討に着目すると、土粒子を構成する鉱物の摩擦角について、自然乾燥状態における表面の滑らかな鉱物の摩擦角は、鉱物の種類によって異なることが報告されている<sup>3)</sup>。また、粒子接点（せん断面）に水が存在すると、石英や長石などの結晶構造が大きい鉱物の摩擦係数は大きく増加するが、雲母や緑泥石などの層構造を持つ鉱物の摩擦係数は低下する<sup>3)</sup>。表面粗度がせん断強度特性に与える影響について、表面粗度を変えたガラスビーズを用いた一面せん断試験では、粗度の増加により最大せん断応力および体積膨張量が大きくなることが示されている<sup>4)</sup>。表面粗度を粒子表面形状の「ギザギザ」の違いと捉えた事例では、その程度と最小密度に負の相関のあることが報告されている<sup>5)</sup>。そして、自然砂の三軸試験結果から、ギザの程度の違いは静的なせん断強度にあまり影響を与えないものの、ギザのある試料は液化強度が大きくなることが示されている<sup>5)</sup>。次に、数値解析手法である個別要素法 (DEM) による結果に着目すると、円粒子もしくは球粒子を用いた場合、粒子間摩擦角を変えてもせん断抵抗角はあまり変化しないものの、粒子の凹凸に起因するかみ合わせ効果を表現した転がり抵抗を導入した場合は、粒子間摩擦角とせん断抵抗角が比例関係になることが報告されている<sup>6), 7)</sup>。また、供試体作製時に粒子を出現させ、パッキングを行う際に設定する粒子間摩擦角と、初期間隙比に比例関係のあることが示されている<sup>8)</sup>。

ところで、自然砂の粒子同士の摩擦角を求めるためには、粒子を回転させることなく接触、加圧させ、粒子法線方向および接線方向の微小な荷重および変位を測定する必要があるため、それらに対応可能な高価な測定機器を用いなければならない。また、微小変位における測定誤差の影響を最小限に抑えるため、実験装置を高剛性に作製する必要がある。これを備えた装置による粒子間摩擦力の計測結果は、せん断変位とせん断荷重の関係に強い非線形が認められること<sup>9)</sup>、

粒子表面の粗度高さと粒子間摩擦係数の間に相関の見られることなどが報告されている<sup>9),10)</sup>。ただし、試験装置が研究用に試作されたものであり、一般に普及していないことや、測定に熟練作業が必要と考えられることなどから実施事例は少なく、当該研究グループ以外による測定例は筆者らが知る限り見受けられない。一方、水分量によって表面粗度は変化するが、粒子間摩擦角を求める際の設定方法に関する検討事例は見られない。以上の状況を反映して、表面粗度とせん断強度特性の関係に関する影響についての検討は、ほとんど行われていないのが実情である。なお、光学干渉計の高精度化に伴い、白色干渉計を用いて粒子表面上の粗度高さを計測することで、表面粗度を評価する手法<sup>11)</sup>も検討され始めている。

以上を背景に本研究では、盛土材の品質管理指標の一つとして表面粗度に着目することとした。盛土材の日常管理に資するという研究目的を見据え、表面粗度を直接的に計測するのではなく、これに近い物理的意味を持ち、容易に実施可能な実験方法を採用することとした。そこで、ガラス板と土粒子の摩擦角である粒子すべり角 $\phi_s$ を提案し、これを成因、採取箇所が異なる30種類の粗砂に対して求めた。そして、粒子すべり角と各種物理特性、および一次元圧縮特性と一面せん断強度特性の関係を整理し、粒子すべり角の特徴および適用性について検討を行った。

## 2. 粒子すべり角の測定方法および結果

### 2. 1 測定方法

1章で述べたように、日常の施工管理現場においても実施可能な手法で、土粒子の表面粗度と関連付けられる指標を採用することとした。土粒子同士を接触して得られる摩擦角を求めるのは困難であるため、滑らかな面を有したガラス板上を粒子が滑り出すときの摩擦角を粒子すべり角 $\phi_s$ とした。したがって、厳密には粒子間摩擦角を評価する物性値ではないことに留意されたい。写真-1 (a) に本試験で用いた器具を示した。ガラス板は一般に普及しており、平面度が高い(300mm四方において平面度70 $\mu$ m)方法で作製されるフロートガラス(厚さ4mm)を採用した。なお、すりガラス作製時に行うような表面の研磨処理は実施していない。試験にはフロートガラス板とこれを支えるアングル、およびアングルを持ち上げるジャッキとその高さを計測する定規と、土粒子を並べるためのピンセット、土粒子が回転するのを抑える厚さ1mmで20mm四方のアルミ板を用いており、いずれも一般的なホームセンターで入手可能なものである。測定手順は以下の通りである。なお、粒子が滑り出すときの角度は粒子により一様ではなかったため、本研究では1試料につき32回の測定を行った。

- a) フロートガラス板の上に、写真-1 (b) のように気乾状態の粒子を3粒ずつ、15mm程度に均等な間隔となるよう、正三角形の頂点の位置に置く。このとき、粒子が回転しにくいように粒子の向きを、最小径とガラス表面が直交するように配慮した。試料を気乾状態に限定したのは、表面粗度に影響を与える含水状態を統一することが望ましいことを踏まえ、試験時の表面張力の影響を排除できる方法を採用したためである。
- b) 写真-1 (c) のように、粒子が回転せずに滑り落ちるようになるため、粒子の上に厚さ1mm、1辺20mmのアルミ板を乗せる。
- c) 写真-1 (d) のように、ガラス板を載せたアングル(長さ450mm)の端部にジャッキを設置し、ジャッキを10mmずつ上げていく。
- d) 写真-1 (e) のように、粒子が滑った時のジャッキの高さを記録し、上昇量とアングルの長さからガラス板の傾きを求め、これを粒子すべり角とする。

次に試験試料について、盛土材を扱う場合、生成由来と産地で区別することが多い。そこで生成由来の違いにより、表-1のように30種類の試料を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。砕砂はトンネルずり、珪砂は建材用に花崗岩質の母岩をクラッシャーランで粉砕したものである。カテゴリー2は母岩が現地で風化した残積土を採取したものであり、山砂と称する。まさ土とそれ以外の山砂を区分して扱っている。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阪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。川砂2~4と川砂5・6は同じ河川で採取したが、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。



写真-1 粒子すべり角試験状況

試料の粒度について、粒径の違いより物理特性が変化する影響を除くことと、別途実施している一面せん断試験結果に大きな影響を与える粒度特性を揃えることで、これ以外の物理特性に対象を絞った議論を行うこととした。そこで、これらの試料を採取後水洗いしたのち、ふるいにかけて粗砂(0.85mm~2mm)の粒径に調整した。なお、粒径を粗砂としたのは、後述する立体的な粒子形状の指標である扁平率の測定において、目視で実施可能な粒径としたためである。今回の試料は細粒分を含んでいないことから、後述する一面せん断試験結果は粗粒土の典型的な挙動を対象にしていると考えられる。

## 2. 2 測定結果

試験の結果得られた粒子すべり角を、 $0.5^\circ$  ずつに区分して粒子すべり角の頻度分布図を作成した。代表的なものを図-1 (a) ~ (d) までに示す。図-1 (a) は平均値および中央値が最大となった陸砂1、図-1 (b) は最頻値が最大となった山砂1、図-1 (c) は平均値が最小となったまさ土1、図-1 (d) は中央値および最頻値が最小となった砕砂3である。図-1 (a) ~ (d) までに示すように、試験結果はばらつきを有しており、代表値をどのように設定するかが課題となる。このことを検討するために、図-2 (a) に粒子すべり角の平均値 $\phi_{sa}$ と粒子すべり角の中央値 $\phi_{sd}$ の関係を示した。あわせて、図-2 (b) に粒子すべり角の最

表-1 試料一覧  
(全ての試料で粗砂(0.85mm~2mm)の粒径に調整)

カテゴリー	番号	試料名	産地
1	11	砕砂1	神戸市北区(有馬層群流紋岩)
	12	砕砂2	兵庫県佐用郡(丹波層群頁岩)
	13	砕砂3	兵庫県洲本市(領家帯花崗岩)
	14	珪砂1	岐阜県土岐市
	15	珪砂2	兵庫県南あわじ市
2	21	山砂1	兵庫県川辺郡(有馬層群凝灰岩)
	22	山砂2	神戸市西区(神戸層群砂岩)
	23	山砂3	兵庫県佐用郡(丹波層群砂岩)
	24	山砂4	兵庫県洲本市(和泉層群砂岩・泥岩)
	25	まさ土1	市販品(不明)
	26	まさ土2	茨城県つくば市
	27	まさ土3	神戸市須磨区
3	31	陸砂1	神戸市西区(大阪層群)
	32	陸砂2	兵庫県小野市(大阪層群)
	33	陸砂3	兵庫県加古郡(大阪層群)
	34	陸砂4	京都府八幡市(大阪層群)
4	41	川砂1	神戸市東灘区(住吉川河口)
	42	川砂2	兵庫県加古川市(加古川下流)
	43	川砂3	兵庫県加東市(加古川中流)
	44	川砂4	兵庫県丹波市(加古川上流)
	45	川砂5	兵庫県たつの市(揖保川支流栗栖川)
	46	川砂6	兵庫県宍粟市(揖保川上流)
5	51	海砂1	兵庫県南あわじ市
	52	海砂2	兵庫県明石市
	53	海砂3	三重県南牟婁郡
	54	海砂4	三重県熊野市
	55	海砂5	和歌山県西牟婁郡
	56	海砂6	兵庫県洲本市
	57	海砂7	兵庫県洲本市
	58	海砂8	京都府京丹後市

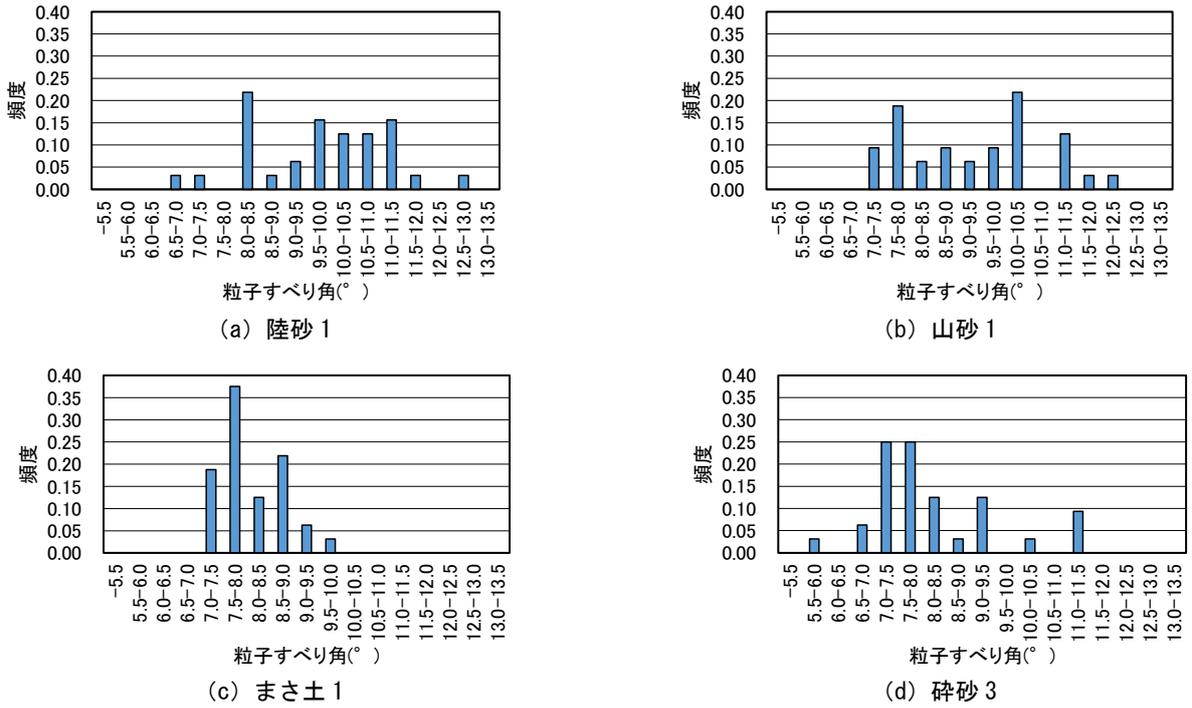


図-1 粒子すべり角の出現頻度分布

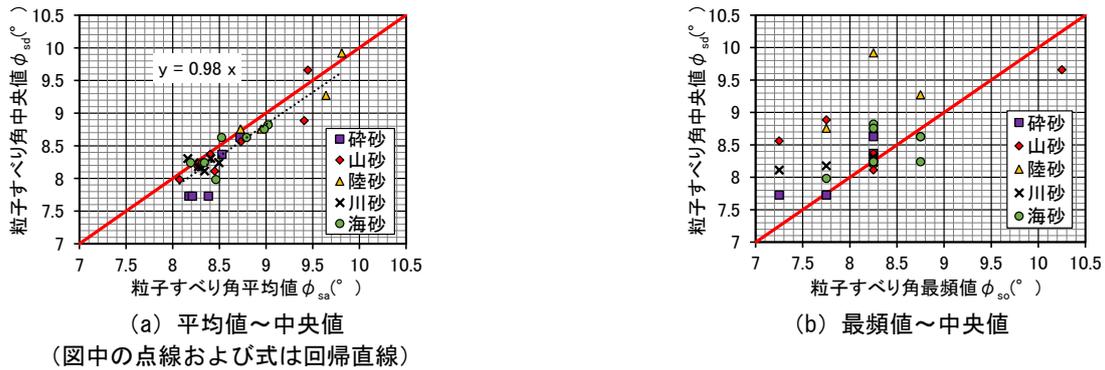


図-2 粒子すべり角算出値の比較結果

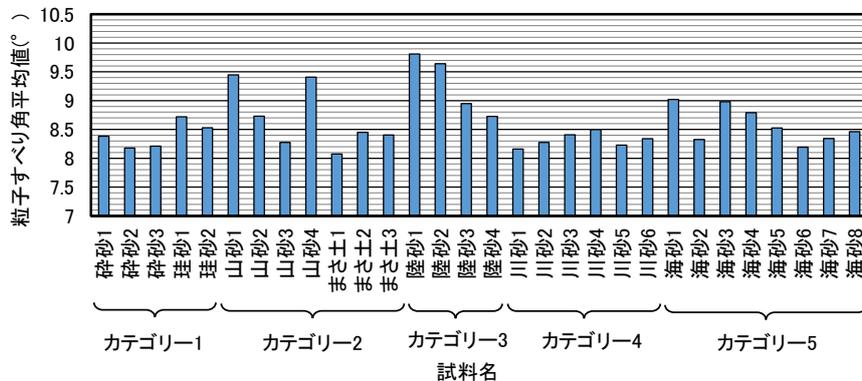
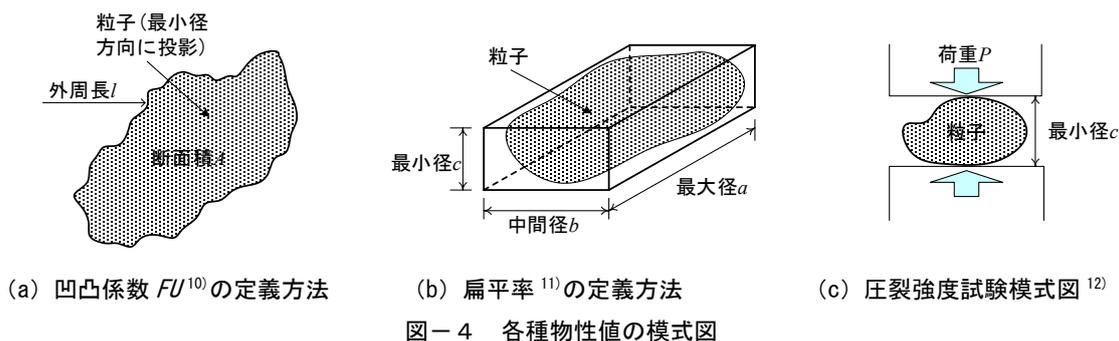


図-3 粒子すべり角一覧図

頻値値 $\phi_{so}$ と粒子すべり角の中央値 $\phi_{sd}$ の関係を示した。これより、ほとんどの試料で最頻値<中央値<平均値となっており、試料が異なるにもかかわらず、粒子すべり角の出現頻度は概ね非対称分布を呈することがわかる。したがって、粒子すべり角の出現頻度を、物体が破壊するときの確率分布を表すWeibull関数で近似した場合、形状係数 $m$ は1以上



の値になると考えられる。ただし本研究では、粒子すべり角と他の物性値との関係を考察することによってその適用性を議論することを主目的としており、出現頻度の傾向については検討していない。図-2 (b) より、最頻値は複数の試料が同じ値になっており指標としては扱いつらいこと、図-2 (a) より中央値と平均値の回帰直線(図中黒色破線)の係数が1に近く、どちらの値でも物理、力学試験結果との相関関係に差が出ないことが予想される。さらに、別途実施した整理により、標準偏差との回帰直線の相関は平均値の方が中央値よりもよいことを考慮し、本研究では一般的に採用されることが多い平均値を採用することとした。図-3にカテゴリ毎にまとめた代表値である粒子すべり角平均値一覧を、表-2には試験結果一覧を示した。図-3より、陸砂の値がやや大きくなっているが、カテゴリ毎の明確な傾向は見られないことがわかる。また、粒子すべり角の値の範囲は  $8^{\circ} \sim 10^{\circ}$  と、後述するせん断抵抗角の取り得る幅より比較的狭いものであった。

### 3. 粒子すべり角と物理・変形強度特性の関係

粒子すべり角の盛土材の品質管理への適用性を検討するにあたっては、他の物理特性との相互関係を把握しておくことが望ましい。また、粒子すべり角と一次元圧縮特性およびせん断強度特性の関係を評価する必要がある。そこで以下に、粒子すべり角と物理・力学特性の関係を整理した。

#### 3.1 物理特性との相関関係の評価

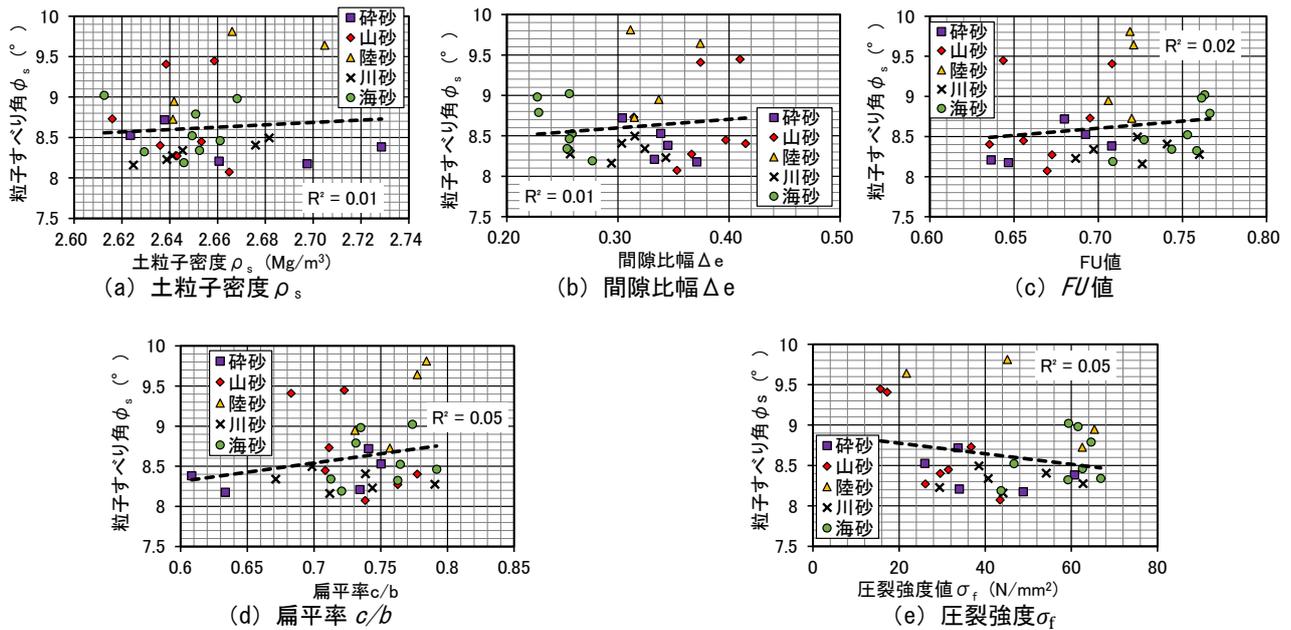
本研究で比較対象としたのは、①土粒子を構成している鉱物組成や有機物の含有量などを反映する土粒子密度  $\rho_d$ 、②砂が取り得る密度幅を表す間隙比幅 ( $e_{\min} - e_{\max}$ )、③粒子の平面的な形状の指標である凹凸係数  $FU = 4\pi A / l^2$  ( $A$ : 影断面の断面積、 $l$ : 投影断面の周長、図-4 (a) 参照)、④粒子の立体的な形状の指標である扁平率  $c/b$  ( $b$ : 中間径、 $c$ : 最小径、図-4 (b) 参照)、⑤粒子の硬さを表す指標である圧裂強度  $\sigma_f = P/c^2$  ( $P$ : 圧裂荷重、図-4 (c) 参照)である。以下に、算出過程を示す。

土粒子の密度試験は JIS A 1202 に従って実施した。間隙比幅を求めるための砂の最大密度・最小密度試験は JIS A 1224 に従って実施した。

凹凸係数  $FU$  値はその値が小さいほど粒子の凹凸度合いが大きくなる指標 <sup>12)</sup>であり、粒子 80~100 個の平均値より求めた。測定方法は、ガラス板上に粒子が重ならないように注意しながら、12mm×15mm の範囲に粒子を配置し、背面から

表-2 試験結果一覧

試料名	平均値 ( $^{\circ}$ )	中央値 ( $^{\circ}$ )	最頻値 ( $^{\circ}$ )	最大値 ( $^{\circ}$ )	最小値 ( $^{\circ}$ )	標準 偏差
砕砂1	8.38	7.73	7.75	11.48	6.32	1.36
砕砂2	8.18	7.73	7.75	10.44	5.30	1.13
砕砂3	8.21	7.73	7.25	11.22	5.56	1.32
珪砂1	8.72	8.63	8.25	11.88	6.70	1.26
珪砂2	8.53	8.37	8.25	10.70	7.09	0.88
山砂1	9.45	9.66	10.25	12.14	7.34	1.38
山砂2	8.73	8.56	7.25	11.22	7.34	1.07
山砂3	8.27	8.18	8.25	12.01	6.70	1.17
山砂4	9.41	8.88	7.75	15.88	6.19	1.92
まさ土1	8.07	7.98	7.75	9.92	7.22	0.66
まさ土2	8.45	8.11	8.25	14.80	6.83	1.56
まさ土3	8.40	8.37	8.25	10.18	6.19	0.79
陸砂1	9.81	9.92	8.25	12.67	6.96	1.34
陸砂2	9.64	9.27	8.75	12.67	5.69	1.54
陸砂3	8.95	8.76	8.25	11.88	5.43	1.18
陸砂4	8.73	8.76	7.75	10.44	5.18	1.19
川砂1	8.16	8.31	8.25	10.57	4.29	1.31
川砂2	8.28	8.18	7.75	10.18	5.94	1.03
川砂3	8.41	8.31	8.25	9.79	7.22	0.64
川砂4	8.50	8.24	8.25	10.70	5.94	0.91
川砂5	8.23	8.24	8.25	11.61	5.05	1.30
川砂6	8.34	8.11	7.25	12.01	6.32	1.07
海砂1	9.02	8.82	8.25	10.83	5.18	1.24
海砂2	8.32	8.24	8.25	10.18	5.43	1.14
海砂3	8.98	8.76	8.25	13.46	7.09	1.19
海砂4	8.79	8.63	8.75	11.48	7.22	0.86
海砂5	8.52	8.63	8.75	10.44	6.96	0.76
海砂6	8.19	8.24	8.75	9.92	5.56	0.87
海砂7	8.34	8.24	8.25	12.80	5.81	1.16
海砂8	8.46	7.98	7.75	11.09	6.83	1.17



図－5 物理特性を表す各種物性値と粒子すべり角の関係

蛍光灯をあてシルエットを撮影した。得られたJPGファイルを輝度調整し、画像解析ソフトに取り込んで算出した。

扁平率はその値が大きいほど丸くなる指標<sup>13)</sup>であり、1試料あたり60個の粒子を無作為に抽出し、定義に沿って、高さが最小径になるように粒子を置き、分解能0.01mmの電子ノギスを用いて、目視にて最小径を測定した。続いて、最大径、中間径を測定した。測定時には最大径と最小径の方向がわかりやすいように、方眼紙上に粒子を載せて行った。計測値の平均を代表値とした。

圧裂強度は既往検討<sup>14)</sup>を参考に、荷重計と鉄板の間に高さが最小径になるように粒子を置き、0.02mm/sの載荷速度を目安にゆっくりロードセルを降ろして荷重を作用させた。荷重計の値を0.2s毎に読み出し、その読み値の変化と破断音から粒子破壊を確認し、荷重計の値が急落するときの荷重を圧裂荷重として記録した。

図－5 (a)～(e)までに物理特性を表す各種物性値と粒子すべり角の関係を示した。破線は最小二乗法で求めた回帰直線であり、決定係数 $R^2$ を記している。これより、回帰直線の傾きの値が正となった物性値が土粒子密度、間隙比幅、FU値、扁平率の4つ、負となった物性値が圧裂強度の1つであった。ただし、いずれの物性値とも決定係数は0.05以下であり、相関のないことがわかる。したがって、粒子すべり角は他の物理特性と独立した物性値であることがわかった。なお、粒子すべり角を除いた各物性値間の相関については、別紙<sup>15)</sup>を参照されたい。

### 3. 2 変形強度特性との相関関係の評価

本研究では、力学試験として一面せん断試験を採用した。一面せん断試験は三軸圧縮試験よりも容易にせん断強度定数が得られるため、本研究のような多くの試料を対象として強度定数を得る場合に有効であるのに加え、一次元圧縮特性の評価も可能であることが特徴として挙げられる。

一面せん断試験は定圧条件で実施した。加圧板はせん断箱とは独立して変位する構造となっており、隙間幅が一定で垂直変位を計測可能である。また、反力側で垂直荷重を計測しており、供試体周面摩擦の影響を補正している。供試体は直径60mm、高さ20mmである。供試体の密度は相対密度 $d_r=90\%$ とし、気乾状態の試料を用いて空中落下法でせん断箱に投入したのち、剛板で静的な圧力を加えることで、所定の密度を確保するようにした。試料の粒度は粒子すべり角試験を実施した試料と同じ粗砂(0.85mm～2mm)の粒径に調整した。せん断箱の隙間幅について、異なる粒度の試料間の比較や、実材料のせん断強度を精度良く求めたい場合は、粒径に応じた隙間幅を採用することが望ましい。しかし本研究は、同一粒度に調整した試料のせん断強度を求めるものであり、粒径の影響は全試料で同一と見なせる。そこで、便宜上地盤工学会基準に従った0.3mmを採用し、議論を試料間のせん断強度特性の比較検討に絞ることとした。

一面せん断試験の圧密過程はベディングエラーによる見かけの圧縮量と、垂直応力の作用による圧縮量を分けて評

価するため、図-6 (a) に示したように垂直応力 $\sigma=10 \text{ kN/m}^2$ で3分間载荷し、そこから所定の垂直応力まで一段階で3分間载荷した。各段階の圧縮量は、いずれの試料も载荷後すぐに一定値になることを確認している。図-6 (b) のように後者の過程で生じた圧縮量に着目して初期供試体高さで除して圧縮ひずみを算出し、図-7のように垂直応力との関係で得られた回帰直線の傾きを(a)変形係数 $E$ とした。

せん断過程について、気乾状態の試料であり間隙水圧が発生しないことから、試験実施時の労力を考慮しせん断速度 $0.5 \text{ mm/min}$ で実施した。せん断変位~せん断応力・垂直変位模式図を図-8に示した。せん断応力最大値(図中の▼印)を破壊強度とし、垂直変位増分 $dh/ds$ が0、もしくはせん断変位最大時(7mm)を残留強度とし、この時のせん断強度を↓印で示した。破壊時の垂直応力~せん断応力模式図を図-9に示したが、せん断強度の拘束圧依存性などにより、一般的な最小二乗法による強度定数算出方法では、図中破線で表した破壊線のように見かけの粘着力が計測される。一方、試料は粘着力が発揮されないような乾いた状態にあることを考慮し、本研究では図中実線で表したように粘着力 $c=0$ として、(b)破壊時のせん断抵抗角 $\phi$ 、および(c)残留時のせん断抵抗角 $\phi_r$ を求めた。また、破壊時のせん断変位~垂直変位の傾きの平均を、(d)ダイレイタンスー係数 $dh/ds$ とした。

次に、強度定数の拘束圧依存性を評価するため、図-10 (a) に示すように、粗粒土に対し $c=0$ として垂直応力 $\sigma$ 毎にせん断抵抗角 $\phi$ を算出し、図-10 (b)のように垂直応力を対数軸でとった平面上にプロットし、(e) $\log \sigma \sim \phi$ の傾き $I_\phi$ を求めた。破壊時の $dh/ds$ も図-8のように $\sigma$ の増加により減少するので、図-10 (c)のように(f) $\log \sigma \sim dh/ds$ の傾き $I_d$ を求めた。

図-11 (a) ~ (f) までに、力学特性を表す各種物性値と粒子すべり角 $\phi_s$ の関係を示した。回帰直線の決定係数が最大となっているのが(d)に示したダイレイタンスー係数 $dh/ds$ との関係であるが、それでも0.27と小さいものであった。したがって、粒子すべり角は力学特性との関連性はあまり見られないことがわかった。とりわけ、(b)に示した破壊時のせん断抵抗角 $\phi$ との回帰直線の傾きは負の値となっており、粒子間摩擦角が大きくなるとせん断抵抗角も大きくなるという既往検討の傾向とは逆の結果となっている。このことは、今回求めた粒子すべり角が表面粗度を適切に反映する指標でない可能性に加え、せん断抵抗角に与える物理特性の影響は、他の指標が卓越していることを示唆するものと考えられる。なお、既往検討における粒子間摩擦角算出方法<sup>9)</sup>では、接触面の曲率半径が同程度になるよう粒子の接

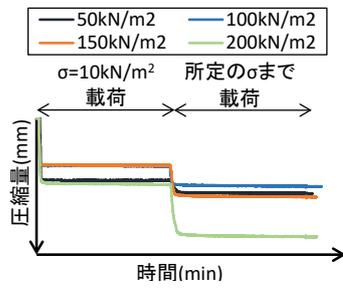


図-6 圧縮過程模式図

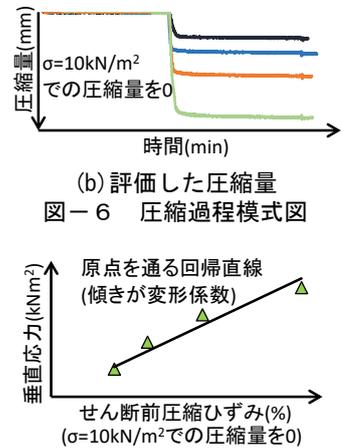


図-7  $\sigma \sim \varepsilon$  関係模式図

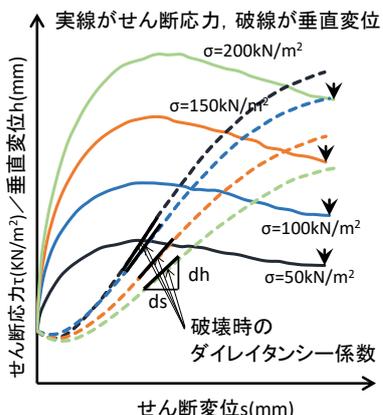


図-8 せん断過程模式図

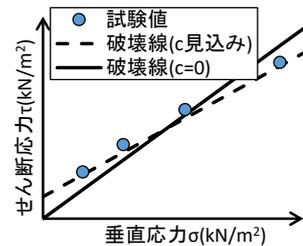
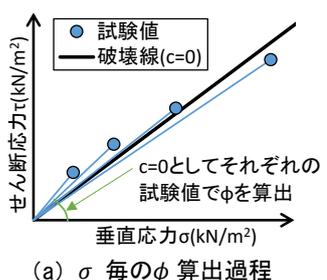
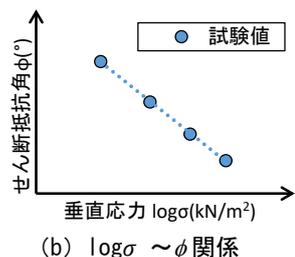


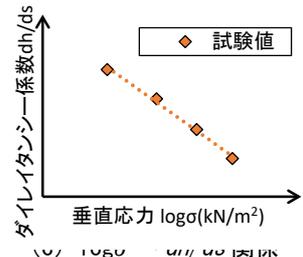
図-9  $\sigma \sim \tau$  関係模式図



(a)  $\sigma$  毎の $\phi$  算出過程



(b)  $\log \sigma \sim \phi$  関係



(c)  $\log \sigma \sim dh/ds$  関係

図-10 強度定数の拘束圧依存性模式図

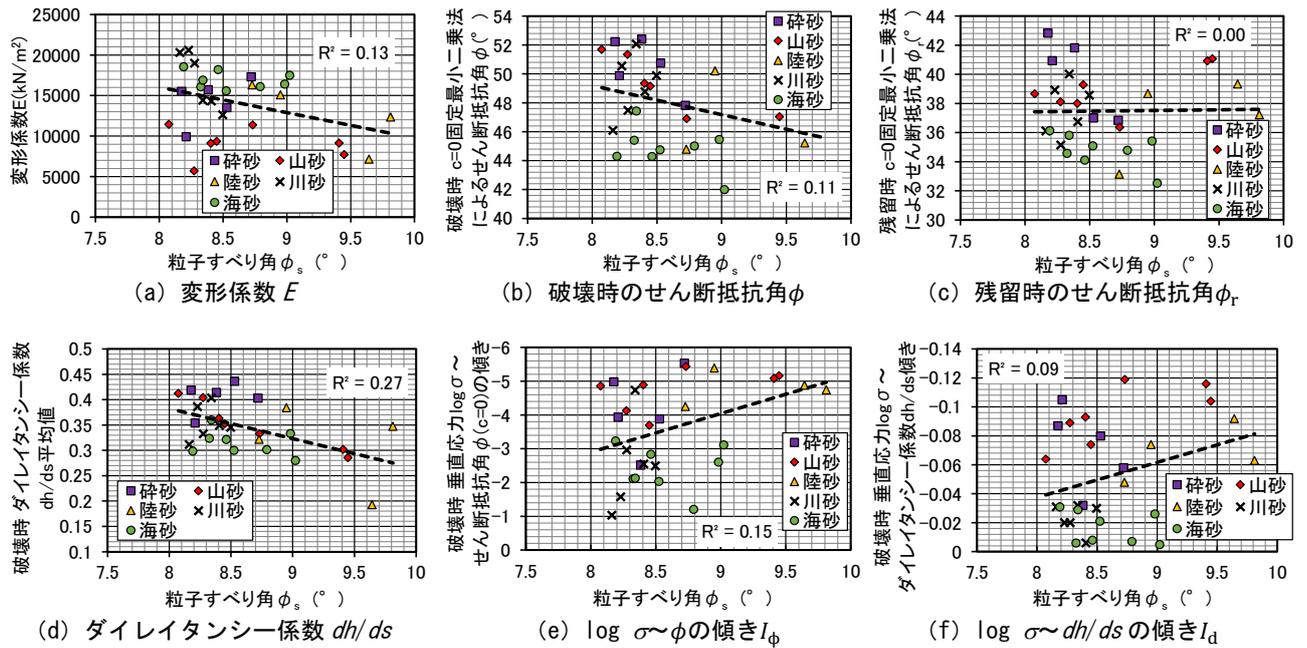


図-1-1 力学特性を表す各種物性値と粒子すべり角の関係

触位置を調整して信頼性の高い計測結果を得ている。これに対し、片面が平面なガラス板である本研究の粒子すべり角算出方法では、粒子の凹凸度合い、言い換えれば粒子の局所的な曲率がガラス板と粒子の接触面積に影響を及ぼし、計測結果に反映されるため、相対的に表面粗度の影響が目立たなくなった可能性がある。また、ガラス板の摩擦係数が砂粒子よりもかなり小さく、その影響が卓越して粒子すべり角が全体的に小さくなり、試料の違いによる計測値の差が現れなかったことも指摘できる。これらのことが、粒子すべり角と表面粗度の間に相関が見られず、既往検討結果と異なる傾向になった原因と考えられる。(c)の残留時のせん断抵抗角 $\phi_r$ も回帰直線はほぼ水平となっており、同様の傾向となっている。

なお、粒子すべり角以外の物理特性と力学特性の相関関係については別紙<sup>16), 17)</sup>に取りまとめているが、破壊時のせん断抵抗角 $\phi$ 、および残留時のせん断抵抗角 $\phi_r$ 、ダイレイタンスー係数 $dh/ds$ は $FU$ 値と扁平率 $c/b$ の影響が大きく、変形係数と $\log \sigma \sim \phi$ の傾き $I_\phi$ 、 $\log \sigma \sim dh/ds$ の傾き $I_d$ は $FU$ 値と圧裂強度の影響が大きいことを確認している。

#### 4. おわりに

本研究では日常的に実施する盛土材の品質管理においても計測可能な簡易な方法で、表面粗度と関連性が高いと考えられる粒子すべり角 $\phi_s$ を30種類の粗砂に対して求めた。得られた値と各種物理特性、および一次元圧縮特性と一面せん断強度特性の関係を整理し、粒子すべり角の傾向および適用性について検討を行ったものである。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 土粒子がフロートガラス板上を滑り出すときの傾きを粒子すべり角 $\phi_s$ と定義し、その算出方法を示した。生成由来と産地が異なる30種類の粗砂に対して求めたところ、 $\phi_s$ はいずれの試料もばらついたが、概ね最頻値<中央値<平均値となった。中央値と平均値の回帰直線が1に近いことと、標準偏差との回帰直線の相関は平均値の方が中央値よりもよいことを考慮し、平均値を代表値として採用することを述べた。なお、今回求めた粒子すべり角の値の範囲は、 $8^\circ \sim 10^\circ$ と比較的狭いものであった。
- (2) 粗砂の代表的な物理特性である、土粒子密度 $\rho_d$ 、間隙比幅( $e_{\min} - e_{\max}$ )、凹凸係数 $FU$ 、扁平率 $c/b$ 、圧裂強度 $\sigma_f$ と粒子すべり角の関係を整理したところ、いずれの物性値とも明確な相関は見られず、粒子すべり角 $\phi_s$ はこれらの物性値とは独立した関係にあることがわかった。
- (3) 一面せん断試験結果から得られる力学的指標である変形係数 $E$ 、破壊時のせん断抵抗角 $\phi$ 、残留時のせん断抵抗角 $\phi_r$ 、ダイレイタンスー係数 $dh/ds$ 、 $\log \sigma \sim \phi$ の傾き $I_\phi$ 、 $\log \sigma \sim dh/ds$ の傾き $I_d$ と、粒子すべり角の関係を整理し

たところ、いずれの指標も粒子すべり角 $\phi_s$ との相関は見られないことがわかった。とりわけ、破壊時のせん断抵抗角 $\phi$ との回帰直線の傾きは負の値となっていることから、せん断抵抗角に与える物理特性の影響は、他の指標が卓越していることが示唆された。

以上のように、粒子すべり角は簡潔な算出方法ゆえに粒子の表面粗度を適切に評価できておらず、日常的な品質管理への適用性は低いことがわかった。ただし、筆者らが行っている一次性質に着目した盛土の品質管理手法に関する中間報告<sup>15), 16), 17), 18)</sup>では、粒子の平面的な凹凸度合を主たる指標とし、これに粒子の立体的な形状や粒子圧裂強度を組み合わせることで、せん断強度特性を考慮した盛土材の品質管理手法が提示できる可能性を示している。今後、実験的検討を進め、盛土材の品質管理手法の向上に資するデータを提供していく予定である。

## 謝 辞

本研究に用いたデータを得るための実験を実施していただいた、神戸高専都市工学科卒業生の中塚 星来氏（現 NTT インフラネット）と、長岡 知希氏（現 SMC シビルテクノス）、藤原 大輝氏（現三井住友建設）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) H. M. Horn and D. U. Deere: Frictional Characteristics of Minerals, *Géotechnique*, Vol.12, No.4, pp.319-335, 1962,
- 4) 中野 彰子、Catherine O'Sullivan, J. Antonio H. Carraro, 大坪 正英: 砂のせん断特性に及ぼす粒子表面粗度の影響、第54回地盤工学研究発表会講演集、pp.343-344, 2019.
- 5) 日下部 伸、森尾 敏、兵動 正幸、村田 秀一: “砂粒子表面形状が非排水ねじり単純せん断時の変相線と破壊線に及ぼす影響” 土木学会論文集、No.541/III-35, pp223-232, 1996.
- 6) 村上 貴志、村上 章、阪口 秀: 一面せん断強度に対する個別要素法パラメータの同定、応用力学論文集、Vol.12, pp.533-540, 2009.
- 7) 藤 公博、前田 正広、柳原 大輔、吉川 孝男: 個別要素法および有限要素法による連成解析を適用した鉱石圧推定手法に関する研究、日本船舶海洋工学会論文集、Vol.28, pp.63-74, 2019.
- 8) Kenichi Maeda and Hiroki Hirabayashi: Influence of Grain Properties on Macro Mechanical Behaviors of Granular Media by DEM, *Journal of Applied Mechanics* Vol.9, pp.623-630, 2006.
- 9) Nardelli, V., & Coop, M.R.: The experimental contact behaviour of natural sands: normal and tangential loading. *Geotechnique*, No.69, Vol.8, pp.672-686, 2019.
- 10) Wang, W., Degao, C., Coop, M.R., & Bingxiang, Y.: Experimental study of the micro and macro scale compression behavior of a sand immersed in a viscous liquid. *Géotechnique Letters*, No.13, Vol.2, pp.91-96, 2023.
- 11) 大坪 正英、ヤン リ、桑野 玲子、サデック ナディミ: ガウスフィルタを用いた粒状体材料の表面粗度評価手法の提案、生産研究、Vol.73, No.5, pp363-365, 2021.
- 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方法、土木学会論文集、No.463/III-22, pp.95-103, 1993.
- 13) Zingg Th: Beitrag zur schotteranalyse, *Schweiz. Min. Pentrol. Mitt.*, No.15, 1935.
- 14) 加登 文学、中田 幸男、兵動 正幸、村田 秀一: 地盤材料の単粒子破碎特性、土木学会論文集、No.673/III-54, pp.189-194, 2001.
- 15) 野並 賢、中塚 星来、長岡 知希、鳥居 宣之: 様々な成因を有する粗砂の物理特性の相関関係、第59回地盤工学

研究発表会講演概要集、24-5-3-06、2024.

- 16) 野並 賢、長岡 知希、中塚 星来、鳥居 宣之：粗砂の物理特性と一面せん断強度特性の関係、第 59 回地盤工学研究発表会講演概要集、24-5-3-07、2024.
- 17) 野並 賢、長岡 知希、中塚 星来、鳥居 宣之：粗砂の物理特性と一次元圧縮特性およびせん断強度の拘束圧依存性との関係、第 59 回地盤工学研究発表会講演概要集、24-5-3-08、2024.
- 18) 野並 賢、藤原 大輝、鳥居 宣之：種々の粗砂の一次元圧縮特性と一面せん断強度特性の関係、令和 6 年度土木学会全国大会年次学術講演会概要集、III-450、2024.

## 著 者

野並 賢	所員(非常勤)	神戸市立工業高等専門学校教授、博士(工学)、地盤工学
鳥居 宣之	所員(非常勤)	神戸市立工業高等専門学校教授、博士(工学)、山地防災工学