

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

お 小 田 匡 寛*
えの もと 文 勇**
すず 木 正***
鈴 本

1. ま え が き

基本的には、土の力学的性質は土粒子の基本的要素（土粒子の材質、土粒子の粒度組成、土粒子の形状、土粒子表面のあらさ、吸着イオンの質と量）と土粒子の集合状態（密度、含水量、骨組構造）とによって決定される¹⁾。土粒子の粒度組成、密度、含水量などの影響因子に関する実験的研究はしばしば報告されてきたが、測定技術の普及が遅れている土粒子の材質、土粒子の形状、土粒子表面の粗さ、骨組構造などが、土の土質工学的性質に及ぼす影響についての理解はきわめて定性的である。この研究は砂粒子の基本的要素、とくに砂粒子の材質、砂粒子の形状、表面のあらさなどが、砂の土質工学的性質、とくにセン断抵抗、最大・最小間ゲキ比などに及ぼす影響について検討したものである。この種の研究は、砂質土の合理的な分類を実施するためにも不可欠なものであろう。すなわち、砂質土の土質工学的性質を決定する最も基本的な支配因子は何であるかについての知識が、砂質土の分類の前提条件であらう。

先にも述べたように、砂の力学的性質は砂粒子の基本的要素のみならず、砂粒子の集合状態の関数でもある。それゆえに、砂粒子の基本的要素だけでは砂の強度・変形常数は定まらない。しかし、砂粒子の集合状態は、他とまったく独立して決定されるものではなく、粒子形状、粒度組成、粒子表面のあらさなどによっても支配されている。たとえば、砂の間ゲキ比の取り得る範囲は砂の表面のあらさ、粒度組成などによって支配されており、また、砂粒子の長軸の方向性および粒子間接点での接平面の方向性は粒子形状、とくに細長比に支配されることが示されている^{2), 3)}。

粒子の基本的要素が砂の強度、変形常数に直接影響を与え、かつ砂粒子の集合状態（構造）をある程度決定するという考えを合わせれば、砂の基本的要素の測定方法の開発およびその測定量と強度・変形常数との相関

関係について、現時点で究明しておくことは意味のあることと思っている。

この研究報告の前半は砂の基本的要素、とくに鉱物組成、砂粒子の形状、砂粒子表面のあらさの測定方法と測定結果を示し、後半は直接セン断試験、最大、最小間ゲキ比試験について述べ、さらに基本的要素の測定結果とセン断抵抗・最大・最小間ゲキ比などの土質工学常数との相関関係を示している。

表—1 試料の採取地、粒径・粒度、比重

試料名		採取地	粒径・粒度	比重	備考
A 砂	A ^{1.19} _{0.84}	山口県・徳山	1.2~0.84	2.63	海砂
	A ^{0.84} _{0.42}		0.84~0.42	2.64	
	A ^{0.42} _{0.25}		0.42~0.25	2.64	
B 砂	B ^{1.19} _{0.84}	栃木県・栗野	1.2~0.84	2.67	珪質ホルンフェルスの砕砂
	B ^{0.84} _{0.42}		0.84~0.42	2.67	
	B ^{0.42} _{0.25}		0.42~0.25	2.68	
C 砂	C ^{1.19} _{0.84}	福島県・相馬	1.2~0.84	2.65	砂岩の砕砂
	C ^{0.84} _{0.42}		0.84~0.42	2.65	
D 砂	D ^{1.19} _{0.84}	不明	1.2~0.84	2.67	—
	D ^{0.84} _{0.42}		0.84~0.42	2.67	
E 砂	E ^{1.19} _{0.84}	埼玉県・小鹿野	1.2~0.84	2.70	河川砂 (荒川上流)
	E ^{0.84} _{0.42}		0.84~0.42	2.71	
	E ^{0.42} _{0.25}		0.42~0.25	2.71	
F ^{1.19} _{0.84} 砂	埼玉県・小鹿野	1.2~0.84	2.71	河川砂 (荒川上流)	
G ^{0.42} _{0.25} 砂	山口県・豊浦	0.42~0.25	2.64	豊浦標準砂	
H ^{1.19} _{0.84} 砂	栃木県・関谷	1.2~0.84	2.67	河川砂	
I ^{1.19} _{0.84} 砂	愛知県(矢作川)	1.2~0.84	2.65	河川砂	
J ^{0.42} _{0.25} 砂	新潟県	0.42~0.25	2.66	—	

2. 試 料

本実験に使用した砂の試料は 10 種類（A 砂……J 砂）で、その採取地、比重および粒径・粒度を表—1 に示し

* 埼玉大学理工学部建設基礎工学科

** 建設技術研究所

*** 奥村組

た。なお採取した砂は、水洗い後乾燥して、1.19, 0.84, 0.42, 0.25 mm の各フルイでフルイ分けた。実験に使用した砂は、便宜上、たとえば、 $A_{0.84}^{1.19}$ で表わし、これは 1.19 mm フルイを通過し、0.84 mm フルイに留まる A 砂を示すことにする。

3. 構成粒子の基本的要素の測定方法と測定結果

三笠正人¹⁾ は砂の種類を規定する因子として必要かつ十分なものとして次の5つの性質をあげている。それは、土粒子の材質、土粒子の粒度組成、土粒子の形状、土粒子表面のあらさ、吸着イオンの質と量である。これらの規定因子としての性質を具体的、定量的に把握するために測定すべき量は、鉱物組成、有機物含有量、比重、最大粒径、有効径、均等係数、粘土分含有量、球形率、丸味率、pH 値、各種イオン含有量である。本研究に使用した砂は水洗い後乾燥しているの、有機物含有量、粘土分含有量、pH 値、各種イオン含有量の測定は問題にならない。また使用した砂の粒径・粒度は 1.19~0.84mm, 0.84~0.42 mm および 0.42~0.25 mm の3種で狭い粒度範囲なので、ほぼ均一径と見なせるものとして今後の議論を進める。比重は砂の鉱物組成に完全に依存するので、独立変数とは見なさない。洗いかつフルイ分けした砂の試料では、結局、鉱物組成、球形率、丸味率および粒径が砂の構成粒子の特性を把握するために測定すべき量である。

3.1 砂粒子の細長比と円摩度

粒子の形状測定はタイ積学^{4),5)} や骨材研究⁶⁾ などによって古くから研究されている。それらの研究によると、粒子形状と粒子表面のあらさを明確に区別すべき概念として扱っている。粒子形状を表現する量として Krumb-ein のスフェリシティー⁵⁾ があり、粒子表面のあらさ測定には Waddell の円摩度⁴⁾ がある。スフェリシティー、円摩度とともに極めて良好な測定量を与えるが、測定が極めてはん雑であり、粒径の小さい砂に直接応用するのは不可能に近い。この研究ではこれらに代るものとして、細長比と修正円摩度とを用いた。

細長比……細長比測定の概略は次のとおりである²⁾。直径 5 cm, 高さ 10 cm の円筒容器に適量の砂を詰め、低粘性接着剤を粒子間に浸透させた後、固結させる。固結した砂試料の鉛直断面と水平断面における顕微鏡観察を実施するために、それぞれの断面における厚さ約 0.03 mm の偏光顕微鏡用薄片を作る。鉛直断面から無作為に M 個の粒子を抽出し、選定した粒子の断面内において見掛けの長軸と短軸との長さ a_i, b_i を測定し

1つの粒子の細長比 $\left(\frac{b_i}{a_i}\right)$ を求める。 $\bar{n} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (b_i/a_i)$

を砂の細長比とし、粒子形状のパラメーターとした。先の報告において^{2),3)}、砂の細長比は砂の構造、すなわち粒子の長軸の方向性、粒子間接点における接平面の方向性などを支配していることを実験的に実証した。この意味においても、平均的細長比 \bar{n} を粒子形状のインデックスとして利用できると判断している。

修正円摩度……Waddell⁴⁾ は粒子内に、直交する三軸を考え、その長軸と中間軸とを含む平面に粒子を投影し、次式によって円摩度 R_i' を求めた。

$$R_i' = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{r_0}}{n} \quad \left(\begin{array}{l} r_i: \text{粒子の先端部分の曲率半径} \\ r_0: \text{粒子に内接する最大円の半径} \\ n: \text{曲率半径の測定数} \end{array} \right)$$

この方法は測定の選定に個人差が生じやすく、測定時間が長くなるなどの欠点を持っている。Waddell の円摩度を若干修正し、1つの粒子の修正円摩度 R_i を

$$R_i = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{2r_i^2}{l_i^1} + \frac{2r_i^4}{l_i^1} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{2r_i^1}{l_i^2} + \frac{2r_i^3}{l_i^2} \right) \right\} \\ = \frac{1}{2} \left(\frac{r_i^2 + r_i^4}{l_i^1} + \frac{r_i^1 + r_i^3}{l_i^2} \right)$$

で定義する。

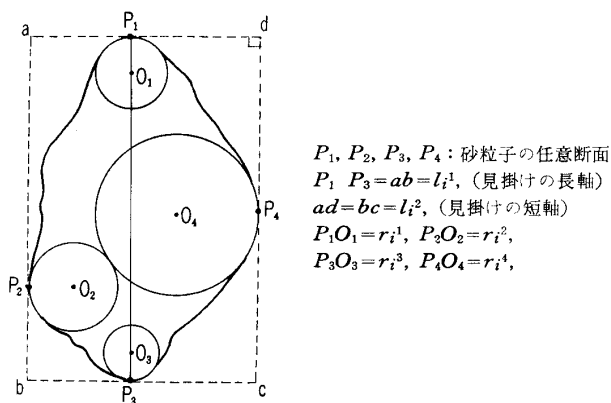


図-1 修正円摩度測定

図-1 に示したように、 $r_i^1, r_i^2, r_i^3, r_i^4$ はそれぞれ粒子の任意断面の点 P_1, P_2, P_3, P_4 における曲率半径とし、 l_i^1, l_i^2 をそれぞれ ab, bc の長さとする。 $\frac{2r_i^2}{l_i^1}, \frac{2r_i^4}{l_i^1}, \frac{2r_i^1}{l_i^2}, \frac{2r_i^3}{l_i^2}$ が小さい程、点 P_2, P_4, P_1, P_3 の先端は丸みのないものとなる。粒子の断面が円となるならば、 $\frac{2r_i^2}{l_i^1} = \frac{2r_i^4}{l_i^1} = \frac{2r_i^1}{l_i^2} = \frac{2r_i^3}{l_i^2} = 1$ となり、 $R_i = 1$ である。 $\frac{2r_i^2}{l_i^1} > 1$ の場合は、 P_2 の先端部分を凸部として認めず、 R_i を

$$R_i = \frac{1}{2} \left(\frac{2r_i^4}{l_i^1} + \frac{r_i^1 + r_i^3}{l_i^2} \right) \text{ で求める。}$$

前述の細長比測定に使用した鉛直断面と水平断面の薄片から 70~100 個の粒子断面を無作為に抽出し、 R_i の平均値

$$\bar{R} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{r_i^2 + r_i^4}{l_i^1} + \frac{r_i^1 + r_i^3}{l_i^2} \right) \\ \text{(ただし、} M \text{は測定個数)}$$

表-2 砂粒子の基本的性質

試料名		細長比 \bar{n}	修正円摩度 \bar{R}	鉱物組成 (個数%)							構成粒子の風化と破砕性	
				Q	Q _{ag}	Q _c	F _e	R.F.	M	P.A.		O.
A	A ^{1.19} _{0.84}	0.675	0.14	29.0	29.5		35.0		4.5		2.0	砂粒子（とくに、雲母、長石）の風化が進み、粒子の破砕性はいちじるしい。
	A ^{0.84} _{0.42}	0.618	0.15	36.7	21.4		33.8		4.3		3.8	
	A ^{0.42} _{0.25}	—	0.24	49.3	8.4		27.1		6.0		9.1	
B	B ^{1.19} _{0.84}	0.698	0.13	28.5	58.5	1.0			2.5		9.5	大きな粒子は小さな石英の単結晶の集合体であり、きわめて破砕性のいちじるしい粒子である。
	B ^{0.84} _{0.42}	0.700	0.24	70.5	26.0	0.5			0.5		2.5	
	B ^{0.42} _{0.25}	0.706	0.28	84.5	12.5				1.0		2.0	
C	C ^{1.19} _{0.84}	0.696	0.37	74.5	17.0		8.5					大部分が石英、長石の単結晶からなり、破砕性は小さい。
	C ^{0.84} _{0.42}	0.671	0.30	78.0	10.5	1.0	10.5					
D	D ^{1.19} _{0.84}	0.607	0.20	6.4	8.1	59.2	3.9	19.3			3.0	破砕強度の大きいチャートの岩片が多く、砂の破砕性は小さい。
	D ^{0.84} _{0.42}	0.668	0.21	11.9	7.2	53.2	3.4	23.0			1.3	
E	E ^{1.19} _{0.84}	0.573	0.27	0.5	7.9	21.8		69.3			0.5	破砕強度の小さいケツ岩の岩片が多量に含まれており、A砂、B砂ほどではないが、粒子の破砕性はかなり大きい。
	E ^{0.84} _{0.42}	0.559	0.20	2.3	6.4	30.6		59.8			0.9	
	E ^{0.42} _{0.25}	0.626	0.25	7.5	5.3	25.4	0.4	58.3			3.1	
F ^{1.19} _{0.84}		0.652	0.22	3.1	10.7	48.0	1.8	29.8			6.7	破砕性は小さい。
G ^{0.42} _{0.25}		0.605	0.25	72.5	1.5	1.0	21.5		0.5		3.0	風化程度の弱い石英・長石の単結晶からなり、破砕性はきわめて小さい。
H ^{1.19} _{0.84}		0.641	0.20	11.0	2.5	2.5	2.5	81.0			0.6	多孔質粒子からなり、破砕性はかなり大きい
I ^{1.19} _{0.84}		0.657	0.19	22.5	22.5	1.4	41.3		3.2		9.2	破砕性は小さい。
J ^{0.42} _{0.25}		0.679	0.22	49.3			8.4	12.4	0.4	14.7	14.7	粒子の風化が進み、破砕性は大きい。

で砂の修正円摩度とした。

この方法により求めた修正円摩度は Krumbein による visible chart とよく対応しており、また円摩度測定にともなう個人差も少なくすることができ、短時間で測定可能という優れた点を持った方法である。各種の砂について測定した \bar{n} , \bar{R} を表-2 に示したが、0.42~0.25 mm およびそれ以下の粒径では、測定技術上若干の疑問があり、今後 0.25 mm 以下の粒子の精度のよい測定ができるように改良したい。

3.2 鉱物組成の測定

砂粒子としてごく一般的にみられる鉱物は、石英、長石類（加里長石、斜長石）、雲母類、角セン石類、輝石類、磁鉄鉱、かっ鉄鉱などである。その他に、チャート、ケツ岩、火成岩、変成岩を起源とする岩片がある。チャートの岩片は石英の微晶ないし非結晶質の SiO₂ からなり、ケツ岩の岩片は粘土鉱物、雲母、炭質物質、石英などの微晶鉱物からなり、火成岩および変成岩の岩片は石英、長石、雲母、角セン石、輝石などの鉱物の集合体である。Horn⁷⁾, Rowe⁸⁾ などが実験的に求めた鉱物の粒子間摩擦角 (ϕ_p) などを考慮して、砂粒子を次の 8 種に識別し記載した。

石英（記号：Q）：1つの砂粒子が1~2個の石英単結晶粒子からなるもの。

石英の集合体（記号：Q_{ag}）：1つの砂粒子が3~20個の石英粒子の集合体をなすもの、他の鉱物も若干含む。

チャートの岩片（記号：Q_c）：石英の微晶粒子か非結晶の SiO₂ からなるもの、不純物も含む。

長石類（記号：Fe）：加里長石と斜長石とを含む。他の鉱物と集合体をなす場合には、長石類の占める体積が大きい時このグループに入れる。

チャート以外で、微結晶からなる岩片（記号：R.F.）：ケツ岩と火山岩の岩片が大部分を占める。

雲母類（記号：M）：白雲母と黒雲母とを含む。

輝石、角セン石（記号：P.A.）

その他（記号：O）：上述以外の副成分鉱物と変成岩および一部の火成岩の岩片を含む。

砂試料から無作為に抽出した 200 個の砂粒子を偏光顕微鏡を用い、上述の分類にしたがって識別し、その結果を表-2 に示した。

3.3 粒子の破砕性

砂の側方拘束圧縮試験⁹⁾ および高側圧三軸圧縮試験¹⁰⁾

結果によると、砂粒子の破碎性が試験結果を大きく左右する。この事実から構成粒子の強度を考慮した分類が望ましい。しかし、上述の分類では岩片の強度を決定する粒子の風化程度や粒子間結合力などは無視せざるを得なかった。そこで、構成粒子の風化程度や破碎性について定性的な記述を表—2 に示した。

4. 最大・最小間ゲキ比試験と直接セン断試験

4.1 最大・最小間ゲキ比試験

最大・最小間ゲキ比は砂粒子の形状、表面のあらさ、粒径・粒度などの砂の基本的性質に依存すると同時に、測定方法によっても相当大きく異なった値を示す。測定容器の大きさ、詰め込み速度、詰め込み方法、詰め込み時間、含水状態などの影響を受ける。砂の e_{\max} , e_{\min} の重要性はすでに認識されているが、かならずしも統一した試験方法は確立されておらず、各研究者によって報告されている豊浦標準砂の測定結果も相当にばらついている現状である。

最大間ゲキ比 (e_{\max})……Kolbuszewski¹¹⁾ は粒子の落下速度、詰め込み時間、容器の大きさ、水の影響などについて詳しく実験し、 e_{\max} の測定法について次のよ

うな提案をした。2000 cc の円柱状容器に 1000 g の砂を入れ、よく振り、容器を逆さにする。その後で、すばやく容器をもとの状態に戻し、その時の砂の状態における砂の間ゲキ比を測定する。

本研究では直径 5 cm, 長さ 20 cm の円筒容器を用い、ほぼ Kolbuszewski の方法に従って求めた。

最小間ゲキ比 (e_{\min})……最大間ゲキ比の場合と同様 Kolbuszewski の実験がある。しかし、氏の提案している方法は砂粒子の破碎（特に A, B 砂の場合はいちじるしい）が認められ、今回の実験には不適當であると判断した。そこで、便宜的に砂粒子の破碎が少ない、次のような測定法を採用した。

直径 5 cm 高さ 10 cm の円筒容器に砂を 3 層に分け注ぎ込む。各層ごとに上方に 0.85 kg のオモリを置き、容器の側壁を 50 回連打する。以上のようにして求めた e_{\max} , e_{\min} を表—3 に示した。

4.2 直接セン断試験

試験方法……本研究に使用した試験機は下部可動直接セン断試験機である。この型の試験機はセン断時の試料の膨張に際し、試料とセン断箱内壁との間に大きな側面摩擦が働くため、三軸圧縮試験や上部可動直接セン断試

表—3

試料名		最大間 ゲキ比 e_{\max}	最小間 ゲキ比 e_{\min}	$e_{\max}-e_{\min}$	ϕ_1 (度)	ϕ_1' (度)	ϕ_2 (度)	ϕ_2' (度)	C_1 (kg/cm ²)	C_1' (kg/cm ²)	相対密度 (%)
A 砂	A ^{1.19} _{0.84}	1.126	0.678	0.448	56.5	56.5	44.0	44.0	0.10	0.05	90
	A ^{0.84} _{0.42}	1.235	0.785	0.450	55.6	54.0	46.0	47.0	0.20	0.14	95
	A ^{0.42} _{0.25}	1.314	9.816	0.498	47.5	47.5	—	—	0.25	0.21	88
B 砂	B ^{1.19} _{0.84}	1.126	0.705	0.421	62.0	62.0	46.5	46.5	- 0.20	- 0.4	98
	B ^{0.84} _{0.42}	1.124	0.695	0.429	53.0	51.0	38.6	39.0	0.16	0.12	96
	B ^{0.42} _{0.25}	1.132	0.714	0.418	—	—	—	—	—	—	—
C 砂	C ^{1.19} _{0.84}	0.859	0.539	0.320	45.5	43.5	—	—	0.13	0.10	86
	C ^{0.84} _{0.42}	0.951	0.610	0.341	50.6	49.0	—	—	0.16	0.12	100
D 砂	D ^{1.19} _{0.84}	1.057	0.691	0.366	54.0	52.5	—	—	0.05	0.04	100
	D ^{0.84} _{0.42}	1.132	0.740	0.392	52.5	51.5	—	—	0.12	0.08	100
E 砂	E ^{1.19} _{0.84}	1.111	0.766	0.345	48.5	48.5	—	—	0.17	0.15	95
	E ^{0.84} _{0.42}	1.147	0.787	0.360	52.2	51.5	—	—	0.14	0.05	95
	E ^{0.42} _{0.25}	1.204	0.891	0.313	47.5	47.5	39.6	39.6	0.13	0.10	95
F ^{1.19} _{0.84} 砂		1.085	0.725	0.360	52.2	51.5	—	—	0.10	0.08	100
G ^{0.42} _{0.25} 砂		0.986	0.666	0.320	47.3	47.0	—	—	0.17	0.13	100
H ^{1.19} _{0.84} 砂		1.359	0.938	0.421	53.0	53.0	—	—	0.30	0.20	100
I ^{1.19} _{0.84} 砂		1.113	0.786	0.327	49.7	49.0	—	—	0.10	0.10	95
J ^{0.42} _{0.25} 砂		1.109	0.721	0.388	49.0	49.0	40.5	40.5	0.13	0.10	91

験によるものと比べ大きなセン断抵抗を生じる¹²⁾。しかし、下部可動直接セン断試験機の普及性、操作の簡便性などの利点とともに、得られる強度の絶対値ではなく、相対的な相互の強度関係を求める目的には十分活用できるものと考え本試験機を採用した。今回の実験は砂粒子の基本的要素のセン断抵抗への影響についてだけ問題にしたので、含水比、相対密度および詰め方などの砂の状態を、次に述べるように、各試験で同一になるよう工夫した。

使用した試料は表-1 に示した 10 種の合計 17 試料である。洗い乾燥の後、自然乾燥状態で放置した試料（含水比 0.1~0.5%）をセン断箱内に注ぎ込み、上方を手で静かにおさえ、セン断箱の側面を連打し、なるべく密な状態に詰めた。詰め込み終了時の試料厚さとセン断箱直径との比が 2.3~3.5 となるように調整する。セン断前の試料の相対密度はほぼ 90~100 % であり、同一相対密度と見なした。垂直応力は 0.1, 0.3, 0.6, 1.1, 1.4, 1.6, 2.1, 2.6 kg/cm² に変化させることができ、毎分 1~5 % のセン断速度でセン断する。

直接セン断試験結果……上述のように、密に詰めた砂試料のセン断試験において、その試料の破壊時における垂直応力とセン断応力とをそれぞれ σ , τ_f とする。 $A_{0.84}^{1.19}$ -砂, $B_{0.42}^{0.84}$ -砂, $C_{0.42}^{0.84}$ -砂, $G_{0.25}^{0.42}$ -砂, $H_{0.84}^{1.19}$ -砂の各砂試料について、 σ と τ_f の関係を 図-2~図-6 に示した。図-2~図-6 によると、測点がほぼ直線上にあると見なせるもの（ $C_{0.42}^{0.84}$ -砂, $G_{0.25}^{0.42}$ -砂, $H_{0.84}^{1.19}$ -砂）と、けっして一直線では回帰できないもの（ $A_{0.84}^{1.19}$ -砂, $B_{0.42}^{0.84}$ -砂）とがある。ここでは、便宜上、2 本の直線、 $\tau_f = C_1 + \sigma \tan \phi_1$ を、 $\tau_f = C_2 + \sigma \tan \phi_2$ とによって表わせるものとした。一直線で表わせる場合は、 $C_1 = C_2$, $\phi_1 = \phi_2$ である。このような σ - τ_f 関係の非直線性は粒子の破壊と密接に関係すると考えられているが¹⁰⁾、この報告ではこの問題には触れない。セン断抵抗 τ_f を体積膨張に費されるエネルギーを考慮した補正式、 $\tau_f' = \tau_f - \sigma \times \left(\frac{dH}{d\varepsilon} \right)$ （ただし、 $d\varepsilon$: セン断ヒズミの増分 dH : 試料高さの増分）から求めた τ_f' と垂直応力 σ との関係を 図-2~図-6 に示した。 τ_f と σ との関係同様、 $\tau_f' = C_1' + \sigma \tan \phi_1'$ と $\tau_f' = C_2' + \sigma \tan \phi_2'$ とで回帰される。各試料で求めた ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_1' , ϕ_2' , C_1 , C_1' を表-3 に示した。 C_1 , C_1' は、機械的誤差が大きく影響し、構成粒子の基本的要素との相関ははっきりせず、今後の議論では触れないことにする。

5. 最大・最小間ゲキ比およびセン断抵抗角に与える砂粒子の基本的要素の影響

5.1 鉱物組成の影響

砂のセン断抵抗は、砂の粒子間摩擦、ダイレイタンス

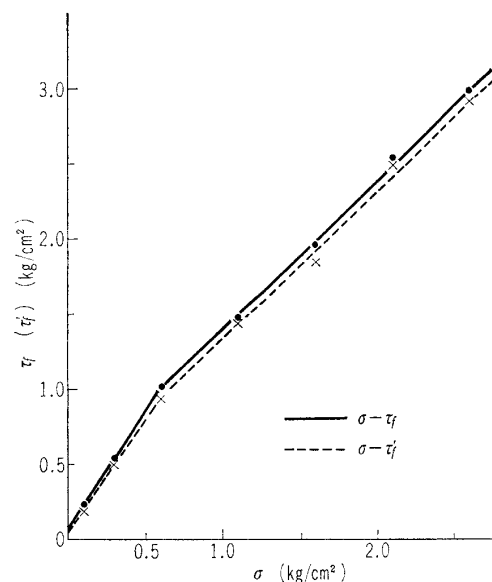


図-2 $A_{0.84}^{1.19}$ 砂の σ - τ_f と σ - τ_f' 関係図

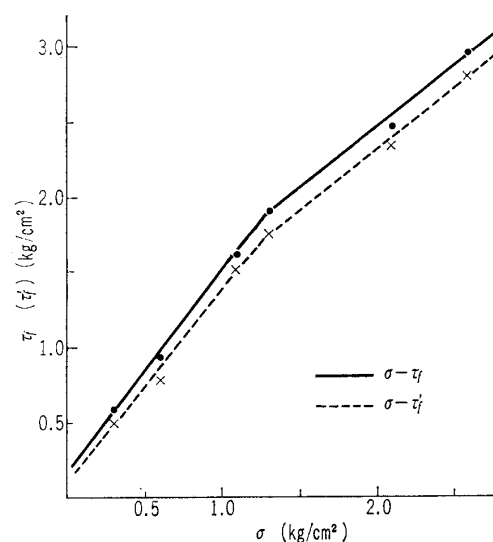


図-3 $B_{0.42}^{0.84}$ 砂の σ - τ_f と σ - τ_f' 関係図

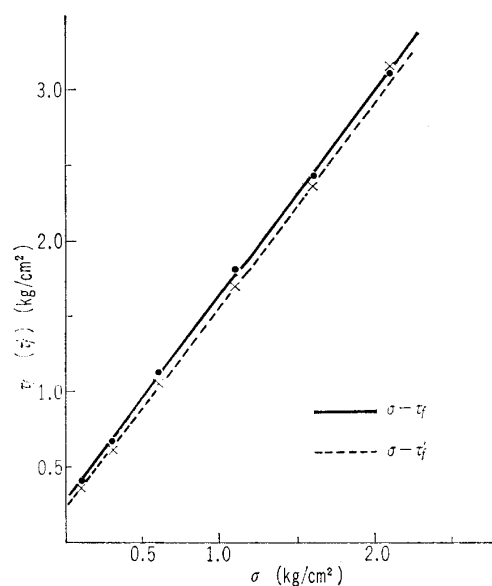


図-4 $C_{0.42}^{0.84}$ 砂の σ - τ_f と σ - τ_f' 関係図

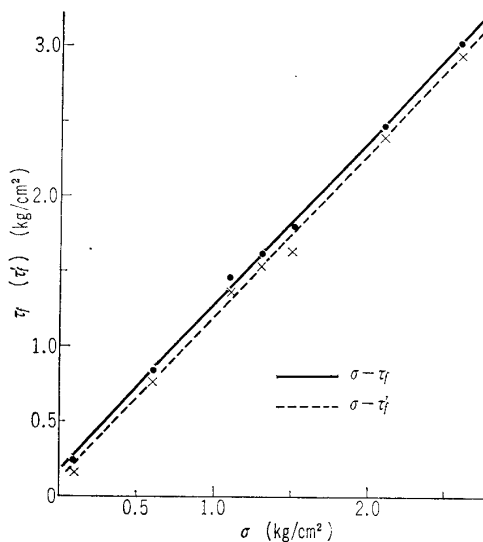


図-5 $G_{0.42}^{0.42}$ 砂の $\sigma-\tau_f$ と $\sigma-\tau_f'$ 関係図

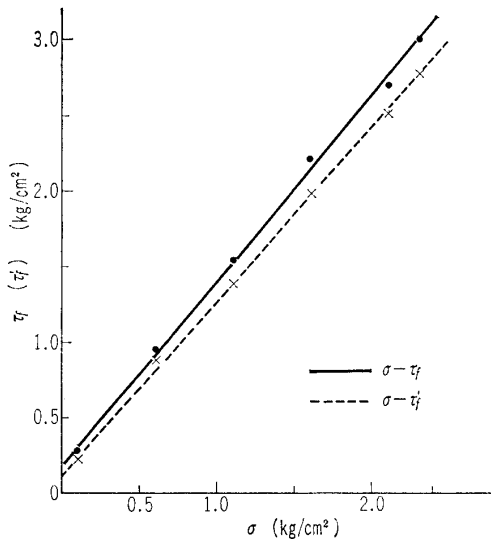


図-6 $H_{0.84}^{1.19}$ 砂の $\sigma-\tau_f$ と $\sigma-\tau_f'$ 関係図

一、粒子の再配列、粒子の破碎などの諸要因で決定される。砂の粒子間摩擦角 (ϕ_u) はせん断抵抗に重要な役割を占めるが、 ϕ_u の測定法および測定結果の報告は比較的古いものである。自然乾燥状態における粒子表面のなめらかな石英、長石、雲母の粒子間摩擦係数はそれぞれ、0.11~0.16, 0.12~0.13, 0.26~0.30 である⁷⁾。しかし、粒子表面のあらひ鉱物試料の ϕ_u は、表面の滑らかな試料の ϕ_u と異なり⁷⁾、またチャート、ケツ岩などの岩片の ϕ_u は実験的に求められていない。それゆえ、砂の組成から砂の ϕ_u を定量的に推定することはできないが、各鉱物でその化学組成、結晶構造、表面あらさが異なり、鉱物によって ϕ_u は相当変化すると考えられる。それゆえに、砂のせん断抵抗には鉱物組成の影響が期待されるが、表-2 の鉱物組成と表-3 の ϕ_1, ϕ_1' との視察、および、図-7 と図-8 の (イ) によっても明らかなように、鉱物組成の顕著な影響は認めがたい。今回使用した試料に関する限り、下部可動直接せん断によるせん断抵抗

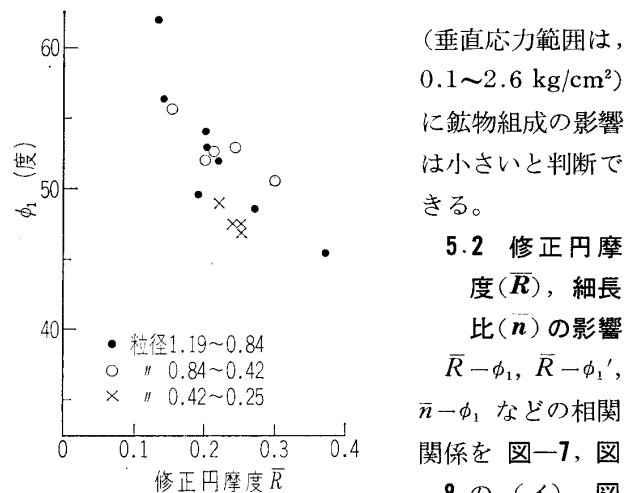
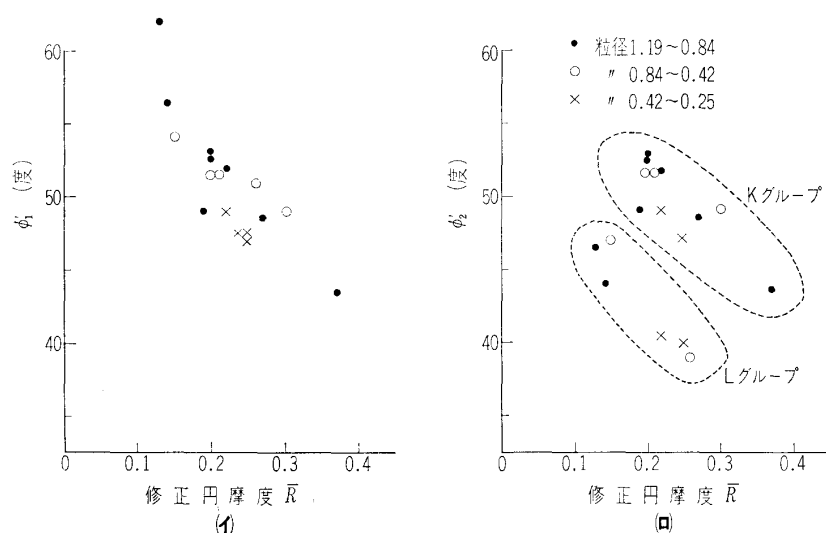
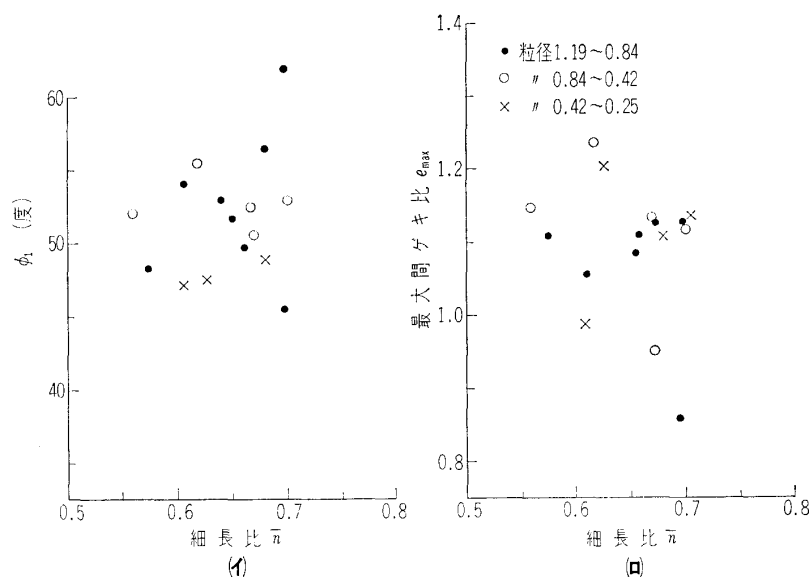


図-7 ϕ_1 と修正円摩度 \bar{R} との関係

を示す。垂直応力範囲が約 1 kg/cm^2 以下でせん断抵抗角 ϕ_1, ϕ_1' はともに修正円摩度、すなわち粒子表面のあらさとかかなりの相関関係を示すが、 $\bar{n}-\phi_1$ はほとんど無相関である。

図-7、図-8 (イ) によると、粒径 $1.2 \sim 0.84 \text{ mm}$ および $0.84 \sim 0.42 \text{ mm}$ の砂の測点はほぼ同じ回帰曲線上にあるが、 $0.42 \sim 0.25 \text{ mm}$ の砂はその回帰曲線よりわずかに下方にはずれている。このことは修正円摩度の項でもふれたように、 $0.42 \sim 0.25 \text{ mm}$ 砂の修正円摩度の測定にともなうあいまいさが原因なのか、粒径の違いが主因なのかは今後の問題である。水で飽和した石英の粒子間摩擦角 ϕ_u の測定によると⁸⁾、シルト→細砂→砂→粗砂→レキの順序で、すなわち粒径が大きくなるにしたがって、 ϕ_u は 31° から 22° へと小さくなっている。この実験事実を考慮すれば、粒径 $0.42 \sim 0.25 \text{ mm}$ の砂の測点は $1.19 \sim 0.84 \text{ mm}$, $0.84 \sim 0.42 \text{ mm}$ の測点からもとめた回帰線より上方にあることが予想されるが、今回得た結果はこの予想と矛盾している。

下部可動直接せん断試験から得た $\sigma-\tau_f$ および $\sigma-\tau_f'$ の関係は、かならずしも直線的でないことはすでに指摘した。 $\sigma-\tau_f'$ の非直線関係を2直線、すなわち $\tau_f' = C_1' + \sigma \tan \phi_1'$ と $\tau_f' = C_2' + \sigma \tan \phi_2'$ とで表わすと、この2直線の交点は垂直応力が $0.6 \sim 1.7 \text{ kg/cm}^2$ の所にある。 \bar{R} と ϕ_2' との関係を図-8 (ロ) に示す。図-8 の (ロ) によると、 $\bar{R}-\phi_2'$ はほぼ無相関な関係でばらついていて、このことは、粒子強度の低い A 砂、B 砂のような砂をほぼ 1.7 kg/cm^2 以上の垂直応力でせん断する時、そのせん断破壊にともなって粒子の破碎現象が強くあらわれ、せん断抵抗にあたえる形状の影響が比較的低下することによるものと考えられる。図-8 の (ロ) の K グループは $\sigma-\tau_f'$ 関係において直線を示すもの、つまり $\phi_2' = \phi_1'$ であり、L グループは $\sigma-\tau_f'$ 関係が非直線である。L グループに属する砂は、K グループに属する砂に比べて、粒子強度が低いように思われるが、まだ

図—8 ϕ_1' , ϕ_2' と修正円摩度 \bar{R} との関係図図—9 ϕ_1 , 最大間ゲキ比と細長比との関係図

定性的な観察からの判断であり、結論は今後の研究に待ちたい。なお、K, L の各グループに限定すれば $\bar{R}-\phi_2'$ にかんがりの相関関係を認めることができ、興味ある事実である。 $\bar{R}-\phi_2$ にも $\bar{R}-\phi_2'$ と同様な関係を認めることができることを付記しておく。

セン断破壊時のダイレイタンシーインデックス, D.I. は修正円摩度, 粒径などの関数であると予想されるが試験機械による誤差が大きく, これを明らかにすることはできなかった。図—10 の D.I.- σ 関係に示されるように, D.I. は垂直応力の増加で減少傾向を示し, 粒径の影響ははっきりしない。

$\bar{R}-e_{\max}$, $\bar{R}-e_{\min}$, $\bar{n}-e_{\max}$ などの関係を図—11, 図—9, (ロ) に示す。ただし, $H_{0.84}^{1.19}$ -砂は砂粒子自体に空ゲキの多い粒子からなり, 他の砂と一緒に含めて議論するのは不適当と判断し省略した。粒径別に見れば, 1.2~0.84 mm および 0.84~0.42 mm の砂は, $\bar{R}-e_{\max}$ に

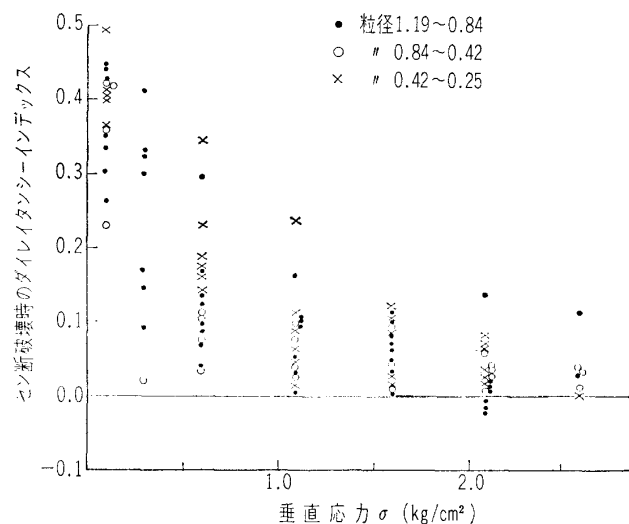
はかなりの相関関係を認めることができるが, 0.42~0.25 mm の砂はほぼ同一の \bar{R} に対し, e_{\max} の値は大きく変動している。1.19~0.84 mm の砂の回帰線は 0.84~0.42 mm の砂の回帰線の下方に位置するが, 最上武雄¹³⁾ も同様な傾向を報告している。 $\bar{R}-e_{\min}$ に弱い相関関係を認めることができるが, 0.42~0.25 mm の砂はほぼ同じ \bar{R} の値に対し e_{\min} は大きく変動し, $\bar{R}-e_{\max}$ と似た傾向を示す。 $\bar{n}-e_{\max}$ はほぼ無相関である。

5.3 ま と め

10 種, 17 試料の下部可動直接セン断試験結果から判断すると, 砂粒子のもつ基本的性質の中で修正円摩度がセン断抵抗にもつ意味は大きく, 鉱物組成, 細長比の役割は当初予想したよりは小さい。Kirkpatrick¹⁴⁾ は, ほぼ等しい形状と表面のあらさをもつガラス玉の三軸圧縮試験から, セン断抵抗は粒径のみならず粒度によっても大きな影響を受けることを実証した。セン断抵抗という観点から洗った砂を基本的要素で分類する場合に, 粒子の表面のあらさ, 粒径, 粒度は無視し得ないファクターであろう。

今回の実験では鉱物組成のセン断抵抗への関与は明らかでないが, Rowe⁸⁾, Lee¹⁵⁾ による飽和砂の排水三軸圧縮試験によると, 粒子を構成している物質の ϕ_u がセン断抵抗に極めて大きな影響を持つことを実

証しているので, 三軸圧縮試験などにより鉱物組成の影響についてさらに詳しい実験的研究が必要である。



図—10 垂直応力とダイレイタンシーインデックスとの関係図

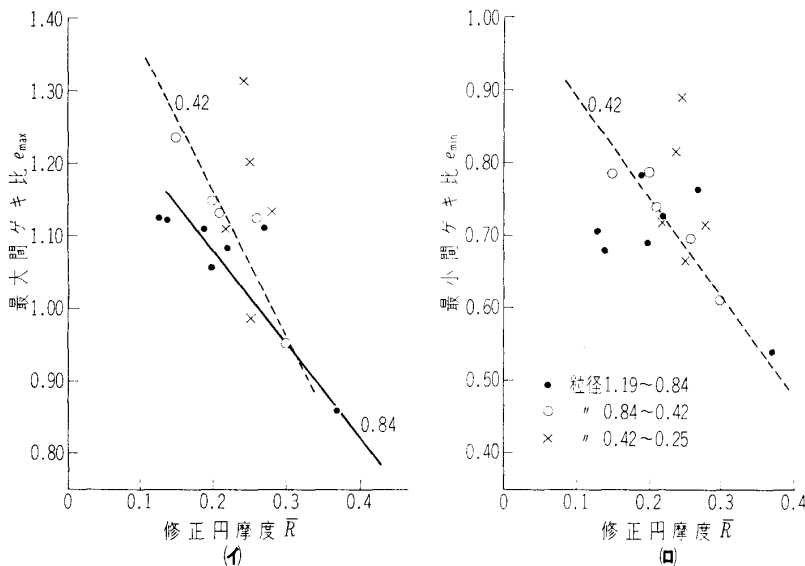


図-11 最大間ゲキ比, 最小間ゲキ比と修正円摩度との関係図

6. 結 論

1) Waddell の円摩度を修正定義した 修正円摩度, $\bar{R} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{r_i^2 + r_i^4}{l_i^3} + \frac{r_i^1 + r_i^3}{l_i^2} \right)$ は粒子の表面の あらさ の定量的表現として活用できる。

2) 低い ($\sigma < 0.6 \text{ kg/cm}^2$) 垂直応力範囲において, 下部可動直接セン断試験より求めた セン断摩擦角 (ϕ_1, ϕ_1') におよぼす修正円摩度 \bar{R} の影響はいちじるしく, 鉱物組成, 細長比の役割は比較的小さい。高い垂直応力 ($1.7 \sim 2.6 \text{ kg/cm}^2$) 範囲のセン断摩擦角 (ϕ_2, ϕ_2') の修正円摩度への依存性は小さく, 砂粒子の破碎性が強い支配因子であることが予測できた。

3) 粒径をパラメーターに取れば, 修正円摩度と最大・最小間ゲキ比はある程度の相関関係を持つが, 細長比とは無相関である。

なお, この研究を実施するにあたり, 常に温い御指導御鞭撻を賜った 埼玉大学小野寺透教授, 関陽太郎教授, 吉中竜之進助教授, 風間秀彦氏および根岸勤氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 三笠正人: 土の工学的性質の分類表とその意義, 土と基礎, 第 12 巻, 第 4 号, 1964, pp.17-24
- 2) 小田匡寛, 風間秀彦: 砂の異方性に関する基礎的研究, 土と基礎, 第 18 巻, 19 号, 1970 pp. 15-21
- 3) 小田匡寛: 砂のような粒状体の構造に関する基礎的研究, 第 5 回土質工学研究発表会講演集 1970, pp.65-68
- 4) H. Waddell: Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles, Jour. Geol., Vol. 43, 1935
- 5) W.C. Krumbein: Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles, Jour. Sedi. Petrol., II, No. 2
- 6) 杓沢 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, 1月号, pp. 3-11
- 7) H.M. Horn and D.V. Deere: Frictional Characteristics of Minerals, Geotechnique, Vol. 12, 1962, pp. 319-355
- 8) P.W. Rowe: The Stress-Dilatancy Relations for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Royal Soc. London, Series A, Vol. 269, 1962, pp. 500-527.
- 9) K.L. Lee and I Farhoomand: Compressibility and Crushing of Granular Soil in Anisotropic Triaxial Compression, Canadian Geotechnical Jour., Vol. 4, 1967, No. 1
- 10) K.L. Lee and H.B. Seed: Drained Strength Characteristics of Sands, Jour Soil Mech. Found Div. No. SM 6, 1967, pp. 117-141
- 11) J. J. Kolbuszewski: An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sands, Proc. 2th. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, 1948, pp. 158-165
- 12) 土のセン断試験法に関する基礎的研究, 土質工学会, 1968
- 13) 最上武雄: 粒状体の力学, 土質力学 (技報堂), 第 8 章, 1969, pp. 893-1032
- 14) W.M. Kirkpatrick: Effects of Grain Size and Grading on the Shearing Behaviour of Granular Materials, Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, 1965, pp. 273-278
- 15) I.K. Lee: Stress-Dilatancy Performance of Feldspar, Jour. Soil Mech. Found. Div., No. SM 2, 1966 (原稿受付, 1970.5.14)

※

※

※