

(特に粒子形状を考慮した dilatancy effect の実用問題への適用について)

宮崎大学工学部 正員 藤 本 廣

○ 學生 杉 尾 哲

一俊五足

山下文洋

したがふ

土の強度定数を通常の三軸圧縮試験で求めようとする場合、現在一般に行われている方法は、(1)非排水試験 (U-test), (2)圧密非排水試験 (CU-test) および (3)排水試験 (D-test) の何れかのうち、試験結果の適用目的に最も合理的に合致すると考えられる排水条件の試験法を採択するという方法が推奨されている。この方法に対する検討は、対象土が特に飽和粘土の場合については、この数年來かなり実験資料も集積され、突こんだ討議も行なわれており、現用の土質試験法 (土質工学会刊)^{(1),(2),(3)} でも一応基本的の方針としてその趣旨に沿った解説がなされている。ところが、砂質土^{(4),(5),(6)} については、従来、いわゆる非粘性土として、僅かに dilatancy の影響が考慮されている程度で、とにかく「砂は密な程強い——内部摩擦抵抗大——」といった定性的な説明に終始しているような安易な考え方が今なお朋友ごまかしている状況にある。例えば、上述の dilatancy effect にしても、従来の取り扱いは粒度や間隙比の面から検討されているだけで、粒子形状を考慮に入れた interlocking の程度にまで言及論議されてはいないようである。この他にも、砂質土の試験値の取り扱い方については次のような問題点があるように考えられる。

- (1) 砂の場合の破壊規準の問題。
- (2) 砂質土の安定性と検討する場合に、U-testとD-testで求めた強度定数の使い分けが確立されているのか、という問題。
- (3) 粘土の場合にみられるような、土の物性に即した安全率（例えばTerzaghiの提案した粘土の鋭敏比に基づく安全率の採り方）を砂の場合に考慮することの要否。

存どが、とりあえず考えられる。

本文では、主として副題にあげた矢と上記(1)と(2)の問題点について、筆者らがこれまでに
行なってきた実験的考察の結果を報告する。

2 試料と実験方法

実験に使用した試料の物理的指数値は表1に示した通りで、それらの粒度曲線は図1に示す。写真1~4はこれらの試料のうち、代表的な試料としての四酸化スズ、極大保スズ、豊浦

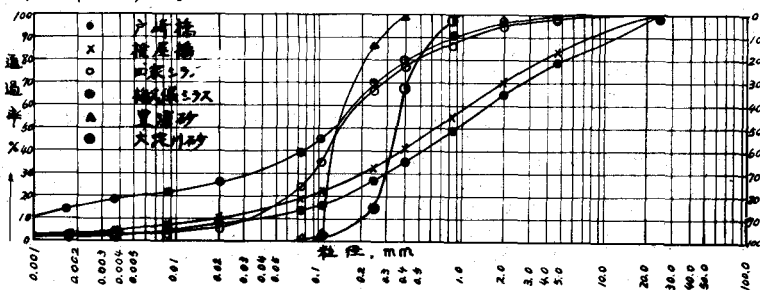


図1. 試料の粒度曲線

砂および大淀川砂の粒子形状を顕微鏡写真とある。

表-1 試料の物理的指数

試料名	豊浦砂	大淀川砂	四家シス	柳又保シス	戸崎橋	
粒子比重	2.63	2.79	2.34	2.45	2.62	
密度	max. G_s	1.647 g/cm^3	1.775 g/cm^3	1.152 g/cm^3	— g/cm^3	— g/cm^3
	min. G_s	1.435 "	1.474 "	0.816 "	— "	— "
度	G_{sat}	2.057 "	2.100 "	1.665 "	1.737 "	1.867 "
	min. C	0.600	0.575	1.030	—	—
間隙比	max. C	0.833	0.867	1.873	—	—
	$C_{at test}$	0.650 0.788	0.620	1.015 1.172	0.753	0.864
粒度	0.05~2.0	100 %	100 %	82.8 %	67.1 %	86.5 %
	0.005~0.05	—	—	13.8 %	12.2 %	8.2 %
	~0.005	—	—	3.4 %	20.7 %	5.3 %
	D_{60}	0.160	0.400	0.230	0.190	1.800
度	D_{10}	0.110	0.220	0.033	0.001	0.064
	D_{50}/D_{10}	1.5	1.8	7.1	170.	28.1
	コンシステンシー	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.



写真-1. 豊浦砂 (×86)



写真-2. 大淀川砂 (×86)

写真の粒子径の範囲は 0.25 ~ 0.40 mm のものである。これらの写真からシラス粒子の扁平性、多稜角性が豊浦砂や大淀川砂に比べて著しいことがよく判る。なお大淀川砂中にはシラスもみられる。試料は、最初、すべて豊浦砂の粒径範囲と同等に調整したものを実験に使用する予定であったが（このようにすれば、全く粒子形状の影響のみが求められる）、今回は粒度の影響（均等係数との関連性）をも検討することにしたので、シラス系統の試料は 10 mm 以下である。



写真-3. 四家シス (×86)



写真-4. 柳又保シス (×86)

三軸試験は、飽和試料について、D-test、CU-test を行った。戸崎橋にだけ別に不飽和試料について U-test を行った。D-test では体積変化と、CU-test では NGI 型の間隙水圧計でセン断中の間隙水圧を計測した。供試体の寸法はすべて径 5 cm、高さ 12.0 cm である。変形速度は 0.85 %/分である。

3. 実験結果の考察

3-1. ダイレイタンスー効果について

三軸圧縮試験 (D-test) における dilatancy effect を赤井博士は次のように定量的に表わしている。すなわち、破壊時の軸差応力 $(\sigma - \sigma_3)_f$ に対し、 $(\sigma - \sigma_3)_{f0}$ を供試体の粘着力と内部摩擦抵抗とだけに打ちかっに要する軸差応力の部分とし、 dW が $d\varepsilon$ なる軸方向ひずみの増加の間に生じた外的仕事量とすると、定側圧の場合には $(d\sigma/d\varepsilon) = 0$ であるから、体積変化 $(\Delta V/V)$ で表わせば $(\sigma - \sigma_3)_f$ は次式で表わされる。

$$(\sigma - \sigma_3)_f = (\sigma - \sigma_3)_{f0} + d(\Delta V/V)/d\varepsilon \quad \text{--- (1)}$$

上式中の $d(\Delta V/V)/d\varepsilon$ を赤井博士は dilatancy の大きさを示す尺度であるとして、これを膨張指数 (Dilatancy Index) と称している。DI の値は、 $(\sigma - \sigma_3)$ - ε 曲線のピーク $(\sigma - \sigma_3)_f$ に対応する $(\Delta V/V)$ - ε 曲線の接線の勾配で表され、密な砂では正の値で、密度が小さくなるにつれて 0 に近づき、負の dilatancy では負の値となる。これまでに DI の値は、Skempton はらひに Bishop⁶⁾ や Newland はらひに Alley⁷⁾、さらに赤井博士⁵⁾ によつて求められた例があるが、い

1. けれども周隙比ならびに粒径との関連で求められているもので、粒子形状は別に考慮されてはいない。たゞ Newland の資料で散弾表面の潤滑性が考慮されている程度である。DI の値は

Skempton, Newland および赤井のデータと合わせてみれば、一般に周隙比 (e) が同じならば e が大きい程小さい値となる傾向を示す。したがって、同じ e の場合の $d(\sigma_v/v)/d\epsilon$ の値は e が大きい程大きくなる。表-2 は筆者等の求めた DI に関する資料である。表中、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ff}$ は式 (1) によって $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ から $[d(\sigma_v/v)/d\epsilon] \sigma_3$ としたものである。 ϕ_f は $\sin \phi_f = [(\sigma_1/\sigma_3) - 1] / [(\sigma_1/\sigma_3) + 1]$ により求めた破壊時の最大応力に対応する内部摩擦角、 ϕ_{ff} はダイレイション効果が無いとしたときの $\sin \phi_{ff} = [(\sigma_1/\sigma_3) - 1] / [(\sigma_1/\sigma_3) + 1]$ により求めた内部摩擦角である。また ϕ_u は Rowe, P.W. の理論式

$$\frac{\phi'}{\sigma_3} = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi_u}{2}) \left(1 + \frac{q_v}{d\epsilon}\right) \quad \text{----- (2)}$$

を応用して求めたもので、Rowe によれば ϕ_u は粒子周りの純粋な摩擦角とされている。

表-2 の資料とそれとを比べてみれば、シラス系統の砂と豊浦砂との DI の間には粒子形状に由来する差が現われていないようであるが、これは試料の周隙比が両者でかなり異なっているからである。因みに、⁽²⁾シラス (D) の DI を豊浦砂 (e=0.790) と同じ周隙比の場合に換算——同一 e で DI が e に反比例すると仮定して——して見ると表-4 のようになり、シラスの DI がかなり大きいことがうかがわれる。

ところで、この DI 値の実用計算への応用については、土質試験法に D テストの最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ff}$ から $[d(\sigma_v/v)/d\epsilon] \sigma_3$ と差し引いた修正圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ff}$ 、すなわち

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ff} = (\sigma_1 - \sigma_3)_f - [d(\sigma_v/v)/d\epsilon] \sigma_3 \quad \text{----- (3)}$$

が安全側の Mohr の応力円径を表わし、したがって安全側の強度定数 C_{ar} , ϕ_{ar} を与えると説明されている。表-3 は (3) 式によって次頁に示したような Mohr の応力円で求められた C_{ar} , ϕ_{ar} と各排水条件の試験で得られた破壊時の Mohr 円で求められた通常の強度定数とを比較したものである。この表から、周隙圧計測の非排水試験で求めた有効応力表示の強度定数 C_{cu} , ϕ_{cu} と D テストの強度定数 C_d , ϕ_d とが全く等しいものであることが従来よく知られているよう

表-2. D-test によるダイレイション指数

	e	σ_3	$d(\sigma_v/v)/d\epsilon$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ff}$	ϕ_f	ϕ_{ff}	ϕ_u
四葉	1.630	2.0	0.108	2.274	2.058	44-20	42-55	42-13
シラス	"	1.5	0.192	5.727	5.671	41-60	40-50	38-08
(D)	"	1.0	0.224	4.244	4.120	43-15	42-20	38-52
"	"	0.5	0.408	2.012	2.808	48-60	47-30	42-46
四葉	1.198	2.0	0.345	10.826	9.786	46-20	45-10	40-12
シラス	"	1.5	0.353	7.382	6.852	45-15	44-00	38-58
(D)	"	1.0	0.482	5.675	5.223	47-40	46-15	40-00
"	"	0.5	0.673	3.456	3.117	50-50	47-10	45-00
四葉	1.015	2.0	0.275	11.500	11.350	47-35	47-40	46-38
シラス	"	1.5	0.625	10.800	9.462	50-55	47-30	42-16
(D)	"	1.0	0.800	8.500	8.100	52-00	51-20	46-00
"	"	0.5	0.562	5.300	5.019	57-15	56-30	47-40
梅沢砂	0.960	2.0	0.266	10.377	10.267	46-20	46-00	44-58
シラス	"	1.5	0.101	8.138	7.986	46-50	46-31	42-22
"	"	1.0	0.882	5.717	4.037	58-20	47-00	37-22
"	"	0.5	0.283	3.828	3.622	62-20	51-65	46-52
豊浦砂	0.790	2.0	0.587	6.780	5.766	37-20	36-10	28-56
"	"	1.5	0.790	5.790	4.662	41-20	37-25	27-52
"	"	1.0	0.351	3.550	3.199	37-45	38-00	32-50
"	"	0.5	0.585	1.924	1.721	41-10	38-20	30-30
豊浦砂	0.650	3.0	0.382	11.146	10.120	40-20	38-55	33-50
"	"	2.0	0.374	7.587	6.837	40-45	40-05	33-40
"	"	1.0	0.602	3.787	3.587	41-40	40-05	34-10
"	"	0.5	0.837	2.067	1.650	42-25	38-20	27-60
大湊砂	0.620	2.0	0.335	7.624	6.784	41-00	37-25	30-38
"	"	1.5	0.723	5.833	4.788	40-30	37-50	28-38
"	"	1.0	0.776	3.718	3.222	41-50	38-05	28-22
"	"	0.5	1.441	1.712	1.171	41-10	33-00	17-10
戸崎橋	0.850	2.0	0.233	8.157	7.673	42-10	41-10	37-22
"	"	1.0	1.144	4.580	3.436	43-40	39-10	28-24
"	"	0.5	1.733	2.486	1.517	45-20	37-05	17-58

表-3. 強度定数一覧表

試料	e	U-test		CU-test		CU-test		D-test		D-test	
		C_u	ϕ_u	C_{cu}	ϕ_{cu}	C_{cu}	ϕ_{cu}	C_d	ϕ_d	C_{ar}	ϕ_{ar}
豊浦砂	1.430							0.400	35-30	0.280	37-30
シラス	1.190							0.300	43-00	0.250	43-00
(D)	1.015			0.810	41-40	0.520	46-24	0.520	44-10	0.660	42-54
梅沢砂	0.960			0.650	31-30	0.350	42-00	0.350	43-00	0.380	43-00
豊浦砂	0.790							0-	37-30	0-	37-24
砂	0.650			0.250	44-00	0-	44-00	0-	44-00	0-	39-00
大湊砂	0.620							0-	41-00	0-	37-22
戸崎橋	0.850	0.325	36-24	0.340	35-06	0-	42-36	0-	42-30	0-	40-00

表-4. 四葉シラスの DI の換算値

e	σ_3	シラス	豊浦砂
0.790	2.0	0.786	0.587
"	1.5	0.871	0.765
"	1.0	0.700	0.351
"	0.5	0.756	0.585

に異論なく確かめられる。しかし、安全側であるといわれている強度定数 C_{dr} , ϕ_{dr} と Dテストの C_d , ϕ_d とを対比してみると、豊浦砂、大淀川砂およびオナ峠橋砂のように、 $C_d = 0$ の試料は確かに理論通りに安全側の内部摩擦角 ϕ_{dr} を示しているが、シラス系統の試料は $C = 1.190$ の四家シラスを除いて、一見しただけでは安全側にあるか否か、いずれとも言い難い。つまり、今が一定であるため、 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ によって描いた Mohr の応力図から求められる ϕ_{dr} がたとえ ϕ_d よりも小さくなくても C_{dr} は常に C_d よりも小さくなるには限らぬわけである。このことを確かめるために、極く簡単な例として、直立法面の安定を保ちうる限界高さ H_c を次式で計算してみると、四家シラスの $C = 1.095$ の場合、 C_d , ϕ_d で計算した H_c が 31.2 m となるのに対し C_{dr} , ϕ_{dr} で計算した H_c は 36.4 m となる。たとえ H_c は

$$H_c = (4C/\gamma) \tan(45^\circ + \phi/2) \quad \text{----- (4)}$$

すなわち、 C_{dr} , ϕ_{dr} の方が危険側の強度定数ということになるのである。したがって、一概にダイレイタンシー効果を差引いて求めた修正強度定数が如何なる砂に対しても安全側の値を与えるものとは決して云われたいことにはなる。この原因は、(1) 式が単に砂に対する体積変化の仕事量という観点からのみ誘導されておらず、粒子形状に基づく interlocking の程度の差を考慮していないからではないかと思われる。この意味からは、前述 Rowe の理論の方が比較的合理的であるように思われるが、Rowe の場合は主応力比に基準をおいているので、この実は破壊規準の問題との関連性において考察せねばならぬ。ただし、筆者等の実験では $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ のピークと $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ のピークとが完全に同一で生じていたことを付記しておく。残る問題実は発表会当日に説明する。(文献)

- 1) 例として、ASCE, Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960.
- 2) 三笠正人、"土の強度と安定計算法", 土質工学会関西支部「基礎研究のための土質工学」1963, 3.
- 3) 粘土工学研究グループ「粘土工学的断層と安定問題への適用」, "土と基礎" Vol. 13, No. 1, No. 3, No. 4, No. 9, 1965年1月, 3月, 4月および7月.
- 4) 土質工学会刊「土質試験法」pp. 259~253, 1964年3月.
- 5) 赤井浩一、"砂のせん断におけるダイレイタンシー効果について", 土木学会論文集 No. 50, 昭. 33年7月, pp. 76~81.
- 6) Bishop & Henkel, The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, 1957, pp. 67~70.
- 7) Alley, Newland, Volume Changes in Drained Test on Granular Materials, Géotechnique, Vol. 7, 1957, pp. 17~39.
- 8) Rowe, P.W., Stress-Dilatancy, Earth Pressure and Slopes, Proc. ASCE, Vol. 89, No. SM3, 1963, pp. 37~61.
- 9) 土質工学会, 土質試験法, 昭. 34年3月, pp. 309.

