

1. まえがき

砂の力学的性質、とくにせん断特性は砂の種類とその状態に影響される。従来、同一の砂では、そのせん断強度は密度との関係のみが重視されてゐるが、最近の微視的立場に基づく研究¹⁾によれば、同一の密度でも、その詰め込み方法によつて、そのせん断強度は異なることが知られてゐる。このことは、砂試料と土との応力履歴が砂粒子の配列状態を変化させるものである。砂にあっては、粘土と同様、その強度特性に応力履歴の影響があることを示唆するものである。本文では、同一の方法で同一の密度に詰め込んだ砂試料に、せん断面上の種々の大きさのせん断応力あるいは水平変位を繰返し作用させた場合、せん断時の垂直応力 σ より大きい垂直応力 σ_0 を与えて過圧密状態にした場合およびある過圧密比に相当する垂直応力を繰返し作用した場合に、砂のせん断強度がどのように変化するか、砂のようは粒状土の締固め方法の問題と関連させて、実験的に検討した。

2. 試料および試験方法

試料は含水比約5%の豊浦標準砂を用ひ、改良型の一軸せん断試験機により、スプリング制御方式の等圧せん断試験に次の条件で行はつた(表-1参照)。TEST I-1: $e_0 = 0.691$, $\sigma = 1.924 \text{ kg/cm}^2$ 、一定のせん断応力 $\pm \tau_R$ を N 回繰返し繰返しせん断後、残留状態までせん断する(τ_R const. test)。

TEST I-2: $e_0 = 0.691$, $\sigma = 1.924 \text{ kg/cm}^2$ 、一定の水平変位 $\pm S_R$ を N 回繰返し繰返しせん断後、残留状態までせん断する(S_R const. test)。

TEST II-1: $e_0 = 0.754$ の試料に、まず垂直応力 σ_0 を圧縮後、 $\sigma = 1.415 \text{ kg/cm}^2$ まで解除し、残留状態までせん断する。TEST II-2: $e_0 = 0.754$ の試料に $\sigma_0/\sigma = 2 \rightarrow 1$ の垂直応力を N 回繰返し載荷後、 $\sigma = 1.415 \text{ kg/cm}^2$ と残留状態までせん断する。

なお、表-1において、TEST I-2の S_R const. testでは繰返し水平変位 $\pm S_R$ 時のせん断応力 $\pm \tau_{SR}$ は繰返し回数 N とともに変化するが、 $N=1$ のときのせん断応力 $\tau_{SR, N=1}$ と $\tau_{f, N=1}$ とを比べると、 τ_{SR} は $\tau_{f, N=1}$ の約1.5倍と推定される。また、TEST Iにおいて繰返し回数 N は応力の方向毎に数え、せん断応力 τ_R 、水平変位 S_R は最初大加した方向を正としてゐる。

3. 試験結果と考察

試験結果を表-1に示す。一定のせん断応力 $\pm \tau_R$ を繰返しせん断する TEST I-1 では、繰返し回数 N とともに $\pm \tau_R$ に達するまでの水平変位 $\pm S_{CR}$ は減少し、体積も減少する。その結果、応力-ひずみ曲線の各ループによって囲まれる面積は減少し、また各ループはほぼ一直線となる。一方、一定の水平変位 $\pm S_R$ を繰返しせん断する TEST I-2 では、繰返し回数 N とともに、繰返し水平変位時のせん断応力 $\pm \tau_{SR}$ は増加し、体積は減少する。このようなせん断面沿うせん断応力あるいは変位を繰返し作用させると、一般にその強度は増加する。 τ_R const. test では $N=25$ で、 S_R const. test では $N=23$ と残留状態までせん断

表-1. 試験条件および結果

TEST I-1 (τ_R const. test)						
$\pm \tau_R$ (kg/cm ²)	$\frac{\tau_R}{\tau_{f, N=1}}$	N	$\tau_{f, N=25}$ (kg/cm ²)	$\frac{\tau_{f, N=25}}{\tau_{f, N=1}}$	e_N	
1.160	0.503	25	2.474	1.073	0.674	
1.445	0.627	"	2.566	1.113	0.670	
1.734	0.752	"	2.740	1.188	0.660	
1.879	0.815	"	2.824	1.225	0.665	
2.023	0.877	"	2.847	1.235	0.656	
2.168	0.940	"	3.088	1.339	0.651	
2.254	0.978	"	2.991	1.277	0.660	
2.407	1.000	"	1.821	0.770	0.660	
TEST I-2 (S_R const. test)						
$\pm S_R$ (mm)	$\frac{S_R}{S_{f, N=1}}$	N	$\tau_{f, N=23}$ (kg/cm ²)	$\frac{\tau_{f, N=23}}{\tau_{f, N=1}}$	e_N	
0.5	0.802	23	2.757	1.116	0.662	
0.6	0.852	"	2.841	1.232	0.663	
0.7	0.897	"	2.991	1.277	0.661	
0.8	0.926	"	3.059	1.327	0.652	
0.9	0.955	"	2.950	1.279	0.656	
1.0	0.983	"	2.601	1.128	0.655	
1.0	—	11	1.751	0.762	0.683	
TEST II-1						
σ_0 (kg/cm ²)	σ (kg/cm ²)	σ_0/σ	τ_f (kg/cm ²)	$(\tau/\sigma)_f$	e_c	
1.415	1.415	1.00	1.549	1.095	0.749	
2.123	"	1.50	1.556	1.107	0.746	
2.830	"	2.00	1.560	1.103	0.745	
3.645	"	3.00	1.562	1.104	0.742	
5.660	"	4.00	1.569	1.109	0.741	
7.429	"	5.25	1.548	1.094	0.741	
TEST II-2						
σ_0 (kg/cm ²)	σ (kg/cm ²)	N	$\tau_{f, N=20}$ (kg/cm ²)	$\frac{\tau_{f, N=20}}{\tau_{f, N=1}}$	e_c	
2.830	1.415	20	1.585	1.016	0.743	

TEST I: $e_0 = 0.691$, $\sigma = 1.924 \text{ kg/cm}^2$

$\rightarrow \tau_{f, N=1} = 2.306 \text{ kg/cm}^2$

TEST II-2: $e_0 = 0.754$, $\sigma_0 = 2.830 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma = 1.415 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \tau_{f, N=1} = 1.560 \text{ kg/cm}^2$

e_N : N 回繰返し後(最終のせん断開始時)の含水比。

e_c : σ_0 から σ に解除した時(せん断開始時)の含水比。

してはいるが、その時の σ - τ 強度 (τ/σ)_{f, N=25}, (τ/σ)_{f, N=23} が
 降返しせん断を受ける場合には σ - τ 強度 (τ/σ)_{f, N=1} に対して
 どの程度増加する事を示したものが図-1である。 $\tau_{R, const. test}$
 $\sigma_{R, const. test}$ とし、初期詰め込み時の σ - τ 強度以下の応力がある
 11は変位で降返しせん断を受けると、せん断領域での粒子間の接
 触面積および接触数の増加に伴いはばらばらな面ダケの減少を意味
 する)、せん断方向に対する粒子長軸の平均的配列方向を増す
 ことに対応して、その強度は増加するが、強度増加に及ぼす
 最適の降返し応力がある11は変位が存在し、それは初期詰め込み時
 の σ - τ 強度の90~95%付近に対応するものである。このこと
 は σ - τ 強度の90~95%付近で最もせん断力に抵抗する方向に
 粒子の再配列がなされることを示しており、それ以上の応力がある
 11は変位になると、強度増加に及ぼす降返し効果は小さくなり、
 一度 σ - τ 強度の応力を受けると粒子はせん断面に沿って再配列
 され(せん断方向に対する粒子長軸の平均的配列方向が非常に
 小さくなり)、それ以後は残留強度付近まで低下する。とく
 に残留状態に対応する $\pm \sigma_R = 4.0 \text{ mm}$ で降返しせん断を受けると、
 密な試料にもかかわらず、明確な σ - τ 強度は $N=1$ のときだけ
 で、 $N=2$ 回目以後は非常にゆるい試料の応力-ひずみ曲線のよ
 うに残留強度付近に落ち着き、それ以上大きくならぬ。

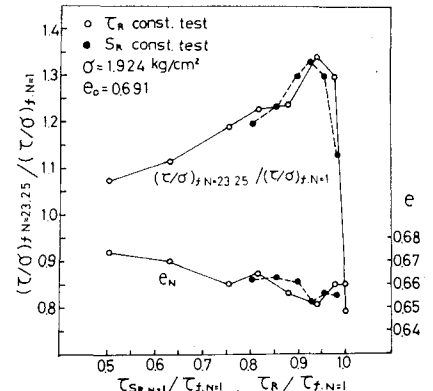


図-1. 降返しせん断応力とJ強度変化
(TEST I-1, I-2)

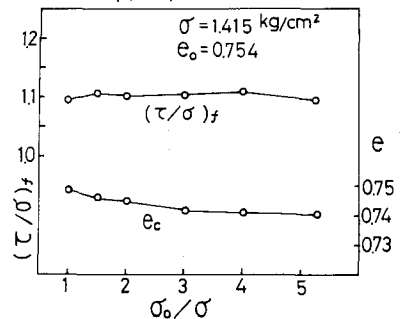


図-2. 過圧密比と強度変化
(TEST II-1)

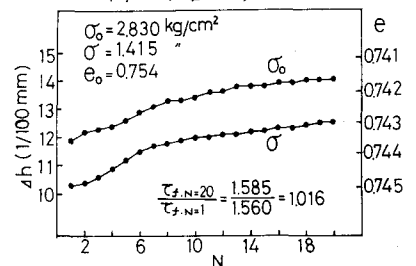


図-3. 垂直応力の降返しによる面ダケ比
変化とJ強度変化 (TEST II-2)

図-2はある密度に詰め込みた試料に、せん断時の垂直応力
 は大きく垂直応力応えと、過圧密状態にしてせん断する
 TEST II-1の結果である。 σ_0/σ が大きくなると、せん断時の面ダ
 ケ比 e_c は多少小さくなるが、強度の増加はほとんどない。これは
 中位の密度に詰め込みた砂試料に大きな垂直応力を静的に載荷
 すると、密度の増加は多少期待できるができてくると、詰め
 込み時の粒子配列はせん断に対して有利に変化させることはでき
 ず、強度の増加は期待できずであることを示している。ところが側方
 拘束状態の砂試料にある応力を降返し載荷した後、通常の圧密
 試験と同様の載荷試験を行なうと、応力と圧縮変形量との関係は、降返し載荷した応力の境に集まるこ
 とが実験的に確かめられて⁽²⁾。そのような垂直応力の降返し載荷が強度にどのような影響するかの検討したの
 がTEST II-2である。図-3は $\sigma_0/\sigma = 2 \sim 10$ の垂直応力を静的に20回降返し載荷したときの試料高さの変化を
 示している。この場合も、密度の増加は期待できずであることを示すが、粒子配列はせん断に対して有利に変化させ
 る方法とはなりえず、強度の増加は小さい。

4. まとめ

一般に、砂のせん断強度に対する応力履歴の影響は対しとされてはいるが、以上の結果によ
 り、砂試料に与えた応力の履歴が砂粒子の配列状態を変化させるものである(それは面ダケ比の減少を伴
 うが)、砂の強度特性に応力履歴の影響があると考えられる。また砂の強度増加に及ぼす最適の降返し応力
 がある11は変位が存在すること、および砂のような粒状土の締固めには、垂直応力を載荷した状態をせん断力と
 降返し作用させる方法が有効であることも併せて明らかにした。

文献 1) Oda, M: Soils and Foundations, Vol. 12, No. 2, 1972 2) 落合他: 土木学会西部支部研究発表会, 昭和48年2月。