

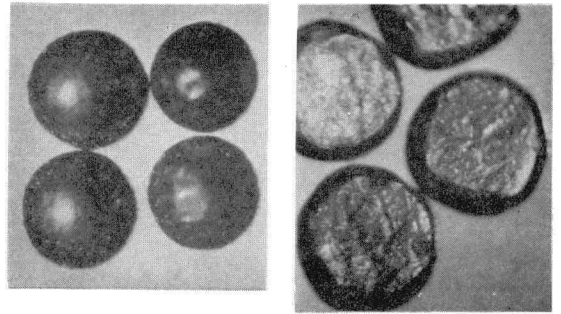
鹿兒島大学農学部 正員 春山元寿

## 1. はじめに

砂のような粒状体のせん断挙動は排水条件や応力条件のみならず形、表面のあらさ、および大きさなどの個々の粒子の性質と粒度、密度、粒子配列、および水分状態などの粒子の集まりの性質によって影響を受ける。筆者らはさきに砂のせん断特性に対する粒子形状の影響について発表した(1)。本文はせん断特性に影響する上記の諸因子のうち粒子の形とその方向性の影響を詳細に知るために、粒子の形の異なる種々の鉛弾に対して排水三軸圧縮試験を行なった結果についての概要である。

## 2. 試料、供試体、および試験方法

試料は粒径  $1.56\text{ mm}$  の等大球鉛弾(記号  $L_a$ )、この鉛弾を扁平にして  $2.00\text{ mm}$  フルイを通過した粒子(記号  $L_b$ )、および  $L_b$  よりさらに扁平な鉛の粒子(記号  $L_c$ )の3種類である。鉛弾の粒子形状を写真-1に示す。供試体の大きさは直径  $5.0\text{ cm}$ 、高さ  $1.31\text{ cm}$  である。試験は2つの方法で行なった。1つは定圧・定ヒズミ法(ヒズミ速度  $0.8\%/\text{min}$ )の普通の排水三軸圧縮試験であり、他の1つはせん断中の粒子配列の変化および粒子の方向性のせん断



(a) 球粒子  
写真-1 鉛弾の顕微鏡写真  
(b) 扁平粒子

特性に及ぼす影響を知るために、1回破壊後まで試験された供試体を、ゴムスリーブに入れたまま初期の大きさに再成形して第2回目のせん断を破壊後まで行なう。このようにして同一供試体を数回くりかえして試験する。

## 3. 試験結果および考察

## 3.1 セン断強さと変形について

応力・ヒズミ・体積変化の関係から求めた諸性質の代表例を表-1に示す。表中  $e_0$  = 初期間ゲキ比,  $e_f$  = 破壊時間ゲキ比,  $\epsilon_f$  = 破壊時軸ヒズミ,  $(d_v/d\epsilon)_f$  = ダイレイタンシー指数,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  = 破壊時軸差応力,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ff}$  = Bishop (2) の式で,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$  = Rowe (3) の式でそれぞれ体積変化に関する補正を行なった軸差応力である。

いま、初期間ゲキ比がほぼ等しい等大球供試体  $L_a$  と扁平粒子供試体  $L_c$  を比較すると、 $L_c$  の  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  およびせん断抵抗角  $\phi_a$  は  $L_a$  のそれらより平均的にみて約  $70\%$  および  $33\%$  もそれぞれ大きい。また拘束圧  $2.0\text{ kg/cm}^2$  のもとで試験した粒子の扁平度が異なる供試体の応力・ヒズミ・体積変化曲線を図-1に示す。これによれば、粒子が扁平なほどせん断抵抗角が著しく増大しておりまたダイレイタンシーも大きい。以上の試験結果から球粒子よりも扁平粒子が、扁平粒子においては扁平さを増すほどせん断抵抗が大きくなることが明らかとなる。これらの供試体の粒子は同一材質で

あるから粒子間の摩擦係数は同じであると考えてよい。したがって  $L_a$  と  $L_o$  あるいは  $L_b$  の強さの差や図-1に示されるせん断抵抗の増加分は扁平粒子のかみ合いの効果を表わしているものと考えられる。

ただしここで注目したいことは、体積変化・ヒズミ曲線から判断して扁平粒子の集まりはせん断初期の体積減少が球粒子のそれに比較して大きいことである。これは扁平粒子の集まりが等体積でせん断を受けるときの挙動に関する重要な示唆を与えるもので現在検討中である。

### 3.2 セン断中の粒子の変形について

表-1に見られるように扁平度の高い  $L_o$  はその低い  $L_b$  よりかなりゆるい充てんであり、そのため  $L_o$  のダイレイタンスは  $L_b$  に比べてかなり小さいけれども、 $L_o$  のせん断抵抗角  $\phi_a$  は  $L_b$  のそれより大きい。これの直接的原因は拘束圧  $\sigma_3$  と  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  の関係にあるが、その物理的原因は粒子の変形性あるいは破砕性にあると考えられる。すなわち、 $L_o$  の粒子は  $L_b$  のそれより扁平であるため変形されやすい。拘束圧が大きくなると粒子のかみ合いが強くなって粒子はせん断中変形を受けたりあるいは摩耗されたりする。これは試験後の粒子の形を観察すると極端に扁平になっているもの、ねじれたような形になっているもの、および粒子の摩耗によって生じた鉛の微粉末が粒子表面に付着していることなどによって知ることができる。せん断中のこのような粒子自体の変形・摩耗は余分のエネルギーを必要とするのでそ

表-1 鉛弾供試体の試験結果

供試体	$e_o$ (%)	$e_f$	$\sigma_3$ ( $kg/cm^2$ )	$\epsilon_f$ (%)	$(\frac{dV}{d\epsilon})_f$	$\sigma_3^o$ ( $kg/cm^2$ )	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ( $kg/cm^2$ )	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ( $kg/cm^2$ )	$(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ ( $kg/cm^2$ )	$(\sigma_1 - \sigma_3)_R$ ( $kg/cm^2$ )
$L_a$	0.613 (3.80)	0.610	0.5	2.67	0.22	0.11	0.59	0.48	0.52	0.39
		0.595	1.0	3.82	0.17	0.17	1.28	1.11	1.03	0.95
		0.569	1.5	5.34	0.13	0.19	1.98	1.79	1.72	1.58
		0.581	2.0	6.87	0.13	0.26	2.56	2.30	2.18	2.03
		0.575	3.0	6.87	0.13	0.39	4.06	3.67	3.59	3.25
		$\phi$ ( $kg/cm^2$ )					-0.035	-0.052	-0.051	-0.061
		$\phi$					$24^{\circ}04'$	$22^{\circ}49'$	$22^{\circ}20'$	$21^{\circ}16'$
$L_b$ ①	0.480 (3.24)	0.518	0.5	9.16	0.46	0.23	1.11	0.88	1.00	0.60
		0.497	1.0	8.40	0.39	0.39	2.20	1.81	1.65	1.30
		0.481	1.5	8.40	0.26	0.39	3.02	2.63	2.27	2.09
		0.475	2.0	9.16	0.39	0.78	4.34	3.56	3.74	2.56
		0.456	3.0	9.16	0.34	1.02	6.37	5.35	4.72	3.99
		$\phi$ ( $kg/cm^2$ )					0.008	-0.020	-0.054	-0.012
		$\phi$					$30^{\circ}54'$	$28^{\circ}07'$	$26^{\circ}02'$	$23^{\circ}40'$
$L_o$	0.608 (3.78)	0.592	0.5	6.92	0.13	0.06	1.00	0.94	0.88	0.83
		0.591	1.0	6.92	0.16	0.16	2.08	1.92	1.64	1.66
		0.586	1.5	8.46	0.18	0.27	2.87	2.60	2.37	2.20
		0.573	2.0	8.46	0.21	0.42	4.41	3.99	3.98	3.30
		0.552	3.0	9.23	0.16	0.48	6.67	6.19	5.77	5.34
		$\phi$ ( $kg/cm^2$ )					-0.070	-0.071	-0.088	-0.065
		$\phi$					$32^{\circ}15'$	$30^{\circ}55'$	$30^{\circ}11'$	$28^{\circ}18'$

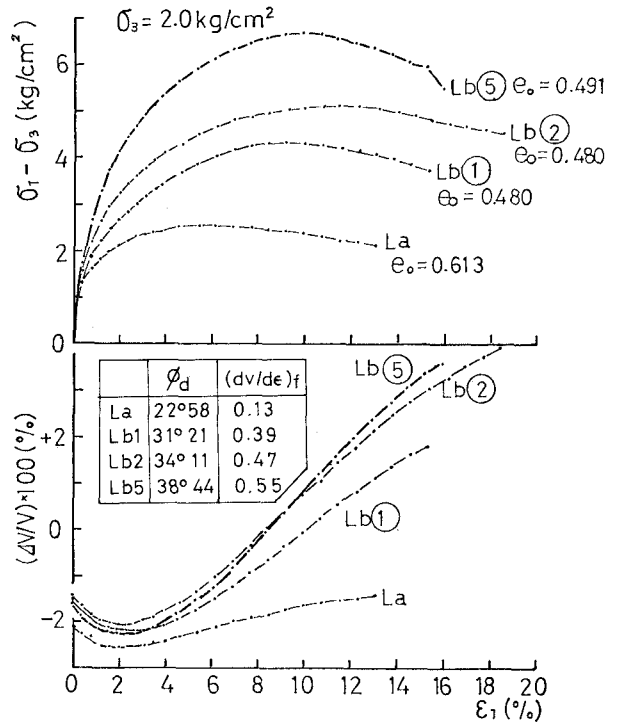


図-1 粒子の扁平性の増加による変形と強さの関係の変化、 $L_a$  は等大球、 $L_b$  1,  $L_b$  2,  $L_b$  5 の順に扁平度を増す

の部分だけ軸差応力（せん断抵抗）は大きくなる。また、せん断中粒子が変形すればかみ合いをゆるめるためのダイレイタンスーを必要としないであろう。したがって  $L_0$  の  $(du/d\varepsilon)_f$  はそれほど大きくないのである。また  $L_b$  の破壊包ラク線は直線であるが、 $L_0$  のそれは上にコンケーブな形を呈している。これは  $L_0$  においては拘束圧の増加にしたがって粒子変形の効果がせん断強さにかなり寄与していることを意味しているものであると考えられる。

### 3.3 粒子の方向性について

供試体の変形様式は図-2に示されるように最初のせん断では破壊領域の範囲が大きく、供試体はタル状に変形し、次いでせん断をくりかえすごとに破壊領域は狭くなり、最終的には1つのすべり面が形成される。これはせん断を繰返すごとに粒子が配列をかえて方向性を持つようになるためであろうと考えられる。

応力・ヒズミ・体積変化曲線の代表例を図-3に示す。せん断回数とともに応力・ヒズミ曲線のピークは平坦になる。破壊時の軸ヒズミに関しては一定の傾向をつかめない。また体積変化・ヒズミ曲線を見るとせん断初期の供試体の体積減少は大差を示していないが体積膨張率はせん断回数とともに少なくなり、最小になった後増加の傾向を示している。

いま  $\sin\phi_a = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 + \sigma_3)_f$  によって求めた  $\sin\phi_a$  と  $(du/d\varepsilon)_f$  の関係を図-4に示す。せん断回数の増加にしたがってせん断抵抗角  $\phi_a$  と  $(du/d\varepsilon)_f$  はまず減少し、4~5回目のせん断から増加している。また  $(du/d\varepsilon)_f$  の増減とせん断強さのそれはよく対応している。せん断回数4回目ぐらいまでのせん断強さの減少

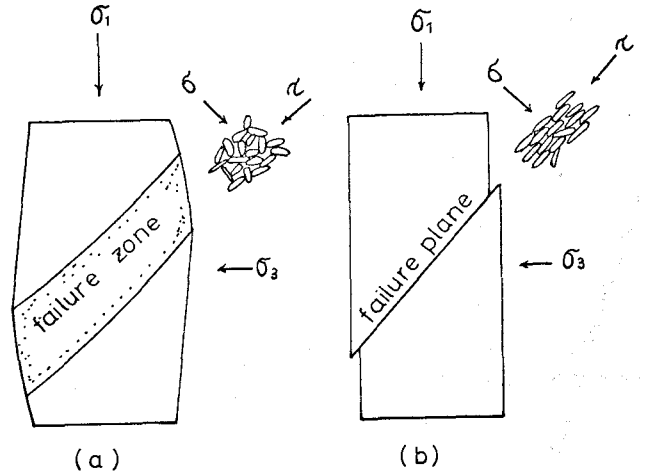


図-2 扁平粒子から成る供試体の破壊状況  
(a) 粒子配列に方向性がない場合  
(b) 粒子配列に方向性がある場合

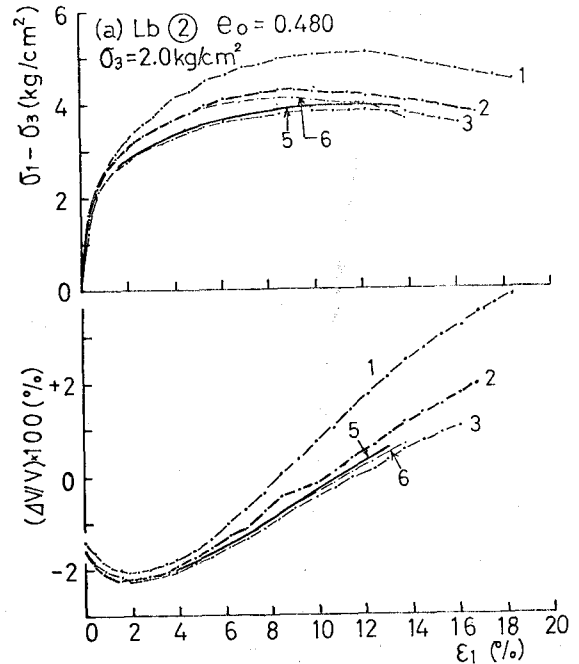


図-3 繰返してせん断破壊を起させた供試体の応力・ヒズミ・体積変化曲線、図中の数字はせん断回数を示す。

の原因は、セン断中セン断領域内の扁平粒子がセン断の方向に配列をかえるためにかみ合いによる強さの寄与が低下することにあるということが  $(dv/d\varepsilon)_f$  の性質から考えられ、またその後のセン断強さの増加の原因は粒子自体の変形・摩耗による強さへの寄与にあるものと考えられる。いま、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  に対するかみ合いの寄与は、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  と  $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$  の差で表わされると仮定すると、図-5に示されるようにそれは、粒子変形の影響がなければ、セン断回数とともに減少し3~4回でほぼ一定となり図-4の傾向と全く一致している。

#### 4. 結論

以上を要約すると次のような結果が得られる。なお、変形特性については現在検討中である。

1) セン断抵抗は球粒子の集まりよりも扁平粒子の集まりの方が、また扁平粒子においては粒子が扁平なほど大きい。このような粒子の形の変化によるセン断強さの増加の原因はかみ合いの効果の増加にある。

2) 扁平粒子の集まりにおけるダイレイタンスは粒子が扁平なほど大きい。

3) 粒子の扁平性が高くなると拘束圧が高いほどセン断中粒子自体の変形や摩耗が起り、これはセン断抵抗を増加させる。この場合破壊包ラク線は上にコンケーブな曲線となる。

4) 扁平粒子の集まりはセン断中セン断の方向に粒子の配列をかえ、繰返してセン断を受けるとセン断抵抗およびダイレイタンスを低下させる。粒子に方向性のない供試体は強いかみ合いのために破壊領域の範囲が大きいが、粒子がセン断方向に配列するとかみ合いは弱まり、1つの面によって破壊が発生する。

最後にこの研究を進めるにあたって指導をいただいた九州大学工学部山内豊聰教授に深謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 山内豊聡・春山元寿, 九州大学工学集報, Vol. 40, No. 4, 昭. 42. 7, pp. 542~552.
- 2) Bishop, A. W., Géotechnique, Vol. 4, No. 1, 1954, pp. 43-45.
- 3) Rowe, P. W., Proc. Royal Soc., London, A, Vol. 269, 1962, pp. 500-527.

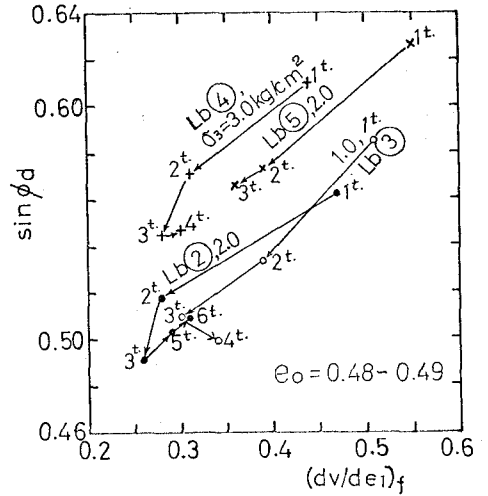


図-4

セン断回数の増加によるセン断強さとダイレイタンスの関係の変化, 図中の数字はセン断回数を示す。

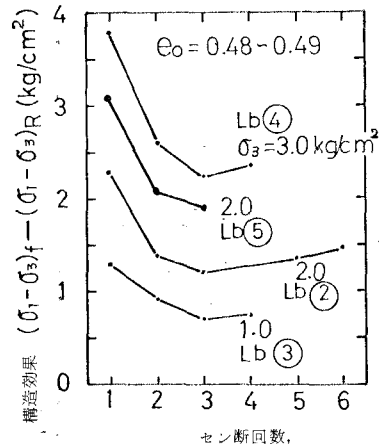


図-5 セン断回数と構造効果の関係