

## 粒度の異なる砂礫材の剪断特性について

鳥山 暁司

### Effect of Grain Size Distribution on Shearing Properties of Sand and Gravel Materials

Koushi TORIYAMA

**Abstract** To investigate of the properties of coefficients of shear strength equation of compacted sand and gravel materials, the drained triaxial compression tests were performed using various mixtures of 9.50~2.00mm gravel and 2.00~0.25mm sand. The following results are obtained.

- 1) There are tolerable correlations between dry density  $\rho_d$  or void ratio  $e$  and the fundamental coefficients  $\phi$ ,  $A$  or  $\phi_m$  expressing of the relation between shear strength  $\tau$  and normal stress  $\sigma$ .
- 2) There are no correlation between  $\rho_d$  or  $e$  and coefficients  $\tau_0$ ,  $b$  or  $a$  expressing of non-linearity of  $\tau$  and  $\sigma$ .
- 3) There are nearly linear relation between uniformity coefficient  $U_c$  and  $\phi$ ,  $A$  or  $\phi_m$ , but there are no relation between  $U_c$  and  $\tau_0$ ,  $b$  or  $a$ .

From these results, it is considered that the properties of shear strength of sand and gravel materials are not esimated from grain size distribution or dry density.

Key words: shear strength, grain size distribution, sand and gravel, triaxial compression test

## ま え が き

建設省によるフィルダムの耐震設計指針(案)<sup>1)</sup>において、砂礫材の剪断強度は従来の震度法におけるように実験値を割り引くことをせず、ピーク強度をそのまま設計に用いることになっている。そして、剪断強度を表すために、モール・クーロン式の他に非線形式、内部摩擦角式が提示された。これらの式についての実験による検討は十分には行われていない。そこで、いままで、各種の砂礫材を用いて、これらの式の係数について検討を行ってきた<sup>2), 3), 4)</sup>。これらの結果、材料が同一であれば、剪断強度式の諸係数は締固め密度とかなり相関があるが、材料が異なると殆ど相関が認められないことを示した。

ここでは9.50~2.00mmの礫と2.00~0.25mmの砂の混合比を変えることによって粒度分布を変化させた砂礫材を用いて、剪断特性と強度式の諸係数について実験的に検討する。

## 実験材料と実験方法

実験には礫としては市販のものを用いた。この礫はマサをふるい分けして水洗したものであるが、実験に際してはこの9.50mmふるい通過分を4.75mmと2.00mmふるいでそれぞれ水洗し、これを50%づつ混合したものを礫とした。

砂は市販のコンクリート用の川砂であり、これを2.00mmふるいでふるったのち、0.25mmふるいで水洗したものを実験に用いた。0.25mmふるいで水洗したが、約4%の0.25mm以下が残留した。

粒度調整には礫100%のG100、礫80%、砂20%のG80、礫60%、砂40%のG60、礫40%、砂60%のG40、礫20%、砂80%のG20、礫0%、砂100%のG0の6種の粒度の材料を調整した。各材料の粒度分布を図1に、物理的性質を表1に示す。ここに $e_{max}$ 、 $e_{min}$ は相対密度を求めるための最大間隙比と最小間隙比であり、標準締固め用のモールドを用いて土質試験法のJISの方法に準じて求めた値である。ただし、本実験では最大9.50mmの礫を含んで

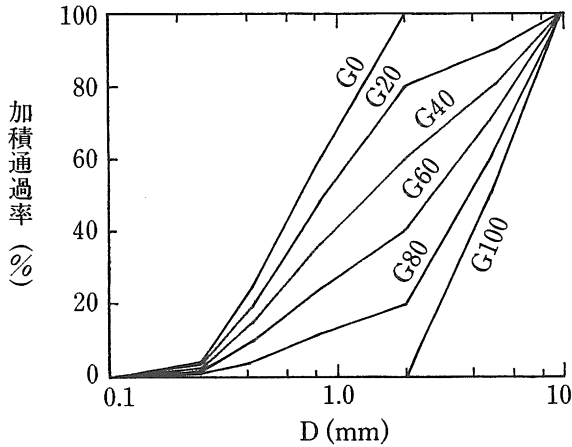


図1 砂礫材の粒度曲線

表1 材料の物理的性質

	礫分 %	砂分 %	比重	$U_c$	$e_{max}$	$e_{min}$
G100	100	0	2.622	2.3	0.795	0.610
G 80	80	20	2.624	6.8	0.676	0.490
G 60	60	40	2.626	8.3	0.602	0.445
G 40	40	60	2.628	5.8	0.701	0.516
G 20	20	80	2.630	3.7	0.806	0.558
G 0	0	100	2.632	2.9	0.979	0.669

いるため、実験結果の信頼性にはいくらかの問題点がある。

砂礫材の剪断試験は全て三軸圧縮試験機を用い、排水条件で行った。実験では1本毎に所定の粒度となるように計量、混合した材料を1日以上水浸して、砂礫粒子に十分に吸水させたのち、三軸試験機の試料台にモールドをセットし、この中に材料を入れ、これを突き棒で所定の回数締固め、これを繰り返して、供試体を作成した。

供試体は緩詰めと密詰めとの2種とし、緩詰めは5層10回の締固め、密詰めは10層50回の締固めとした。これはフィルダムを考えているため、緩詰めといえど、かなりの締固めを受けているためである。緩詰めはGLで、密詰めはGDで表す。

三軸圧縮試験は6本の供試体を1組とした。側圧 $\sigma_3 = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ である。6本の供試体の平均乾燥密度 $\rho_{dave}$ 、空隙比 $e_{ave}$ 、相対密度 $D_r$ を表2に示す。相対密度が100%以上となる供試体があるが、 $e_{min}$ はモールドに材料入れて、側面を木槌でたたいて締固めるが、供試体の作成ではモールド径よりや

表2 供試体諸元

No	$\rho_{dave}$ g/cm <sup>3</sup>	$e_0$	$D_r$ %
GL100	1.499	0.750	24.3
GD100	1.573	0.667	69.3
GL 80	1.677	0.565	59.8
GD 80	1.787	0.469	111.3
GL 60	1.744	0.506	61.3
GD 60	1.826	0.439	112.6
GL 40	1.708	0.539	87.6
GD 40	1.746	0.505	105.8
GL 20	1.611	0.633	69.8
GD 20	1.709	0.540	107.5
GL 0	1.522	0.730	80.4
GD 0	1.611	0.635	111.1

や小さな突き棒で締固めるため、粒子の側方や上への移動が妨げられ、 $D_r > 100\%$ までの締固め度になったものと考えられる。

### 剪断強度式について

検討した剪断強度式は次の3式である。

モール・クーロン式

$$\tau = \tau_0 + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

ここに $\tau_0$  : 基本剪断強度で、粘着力 $c$ に相当する。

非線形式

$$\tau = A(\sigma / \sigma_{01})^b \quad (\sigma > \sigma_0) \quad (2a)$$

$$\tau = \sigma \tan \phi_M \quad (\sigma \leq \sigma_0) \quad (2b)$$

$$\tau = \sigma \tan \phi_0 \quad (3)$$

ここに

$$\phi_0 = \phi_m - a \log(\sigma / \sigma_{01}) \quad (\sigma > \sigma_0) \quad (4a)$$

$$\phi_0 = \phi_M \quad (\sigma \leq \sigma_0) \quad (4b)$$

式(2b)、(4b)の $\phi_M$ は $\sigma = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ のときの内部摩擦角であるが、この求め方としては次の方法がある。

$$\phi_{M1} = \phi_m \quad (5a)$$

$$\phi_{M2} = \phi_{0.5} \quad (5b)$$

$$\phi_{M3} = 0.9 \cdot \tan^{-1}(\tau_0 / \sigma_{01} + \tan \phi) \quad (5c)$$

ここに $\phi_{0.5}$  :  $\sigma_3 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ での内部摩擦角

$\sigma_{01}$  : 基準応力で $\sigma_{01} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ とする。

$\sigma_0$  : (2a)、(2b)または(4a)、(4b)式の交点の応力  
これらの詳細については参考文献2)に示した。

式(2a)、(2b)の $\tau$ と $\sigma$ の計算には各種の方法があるが、これらから求まる係数 $A$ 、 $b$ は殆ど差がないため、ここでは最も簡単な松本・渡辺の次式<sup>9)</sup>を用いて求めた。

$$\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 - (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \cdot \sin \phi_0 \quad (6a)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \cdot \cos \phi_0 \quad (6b)$$

$$\phi_0 = \sin^{-1} \{ (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3) \} \quad (7)$$

(7) 式は(3)式の  $\phi_0$  の計算式である。

モール・クーロン式はそのままでは  $\sigma$  の小さな範囲で過大な剪断強度を与えるが、 $\sigma_3 \geq 1.0 \text{kgf/cm}^2$  では問題はない。そこで  $\sigma_3 < 1.0 \text{kgf/cm}^2$  では  $\sigma_3 = 1.0 \text{kgf/cm}^2$  での内部摩擦角  $\phi_{1.0}$  を用いて

$$\tau = \sigma \tan \phi_{1.0} \quad (\sigma < \sigma_0) \quad (8a)$$

$$\tau = \tau_0 + \sigma \tan \phi \quad (\sigma \geq \sigma_0) \quad (8b)$$

とすればよい。ここに  $\sigma_0$  は(8a), (8b)式の交点の垂直応力である。

## 実験結果

いずれの供試体もピーク強度を示したが、ピークの生じるひずみ  $\varepsilon_f$  は側圧  $\sigma_3$  の増加とともに大きくなり、 $\sigma_3 = 0.5 \text{kgf/cm}^2$  と  $6.0 \text{kgf/cm}^2$  での  $\varepsilon_f$  の大きさには 2 ~ 3 倍の差が生じた。全ての供試体で  $\sigma_3 = 0.5, 1.0 \text{kgf/cm}^2$  ではピーク強度での体積ひずみ  $\varepsilon_{vf}$  は膨張を生じ、 $\sigma_3 = 6.0 \text{kgf/cm}^2$  では圧縮を生じた。相対密度の小さな GL100, GL80 では  $\sigma_3 \geq 2.0 \text{kgf/cm}^2$  で  $\varepsilon_{vf}$  は圧縮ひずみとなっている。これに対して相対密度の大きな GD20 と GD 0 は  $\sigma_3 = 6.0 \text{kgf/cm}^2$  でのみ  $\varepsilon_{vf}$  は圧縮ひずみとなっている。

ピーク強度から求めたモール・クーロン式、非線形式、内部摩擦角式の各強度定数を表 3 に示す。さらに(5b), (5c)式での  $\phi_{M2} = \phi_{0.5}$ ,  $\phi_{M3}$  および(8a)式の  $\phi_{1.0}$  を表 3 に示す。

モール・クーロン式では GL40, GD40 を除いて密に締固めた GD の方が大きな内部摩擦角と基本剪断強度 (粘着力に相当) を持っている。GL40 と GD40 では  $\phi$  は等しいが GD40 の方が他の材料に比べて  $\tau_0$  がかなり大きくなっている。非線形式ではいずれも密な GD の方が A が大きく、GL80 と GD80 を除いて、密な GD の係数 b は小さくなっている。すなわち、密に締固めた供試体ほど強度の非線形性が大きくなっている。 $\tau, \sigma$  関係を直線と仮定すると切片として基本剪断強度  $\tau_0$  が生じるが、非線形式ではこれを原点を通る曲線に置き換えるため、 $\tau_0$  が大きいほど非線形となり b が小さくなる。内部摩擦角式の係数  $\phi_m$  は GD の方が GL より大きい。a も GL80 と GD80 を除いて GD の方が大きい。非線形式と内部摩擦角式は同じ  $\sigma, \tau$  関係を別の式で表したものであり、A と  $\phi_m$  が、b と a がそれぞれ対応している。このため、それぞれ同じ傾向となっている。

乾燥密度  $\rho_d$ , 間隙比 e, 相対密度  $D_r$  と各強度定数の関係を

$$y = \alpha + \beta x$$

(x:  $\rho_d, e, D_r, y: \tau_0, \phi, A, b, \phi_m, a$ ) とし、相関係数 r を求め、0.70 以上のもののみを表 4 に示す。表より、剪断強度の基本となる強度定数  $\phi, A, \phi_m$  と砂礫材の基本的な性質である  $\rho_d, e, D_r$  の間にはある程度の相関が認められるが、非線形性を表す  $\tau_0, b, a$  との間には相関は存在しない。材料は等しくても、粒度分布が異なった場合、強度定数を材料の基本的性質から推定することはできないであろう。

粒度分布の影響を均等係数  $U_c$  で代表して、 $U_c$  と強度定数の関係を図示すると図 2 ~ 4 となる。この場合も

表 3 剪断強度定数

	$\phi$	$\tau_0$ kg/cm <sup>2</sup>	A kg/cm <sup>2</sup>	b	$\phi_m$	a	$\phi_{0.5}$	$\phi_{1.0}$	$\phi_{M3}$
GL100	31.0	0.54	0.925	0.852	42.7	9.37	42.1	41.6	43.9
GD100	33.3	0.61	1.071	0.819	46.9	11.78	47.7	43.4	46.7
GL 80	37.4	0.32	1.006	0.890	45.2	7.23	45.7	44.2	42.5
GD 80	40.3	0.43	1.116	0.902	48.1	6.43	47.2	47.4	46.8
GL 60	39.6	0.37	1.027	0.930	45.8	4.62	44.1	46.4	45.0
GD 60	41.8	0.46	1.224	0.877	50.8	8.06	51.4	48.9	48.3
GL 40	38.2	0.39	0.996	0.925	44.9	4.93	43.7	45.2	44.6
GD 40	38.2	0.63	1.157	0.868	49.2	8.65	48.8	47.1	49.4
GL 20	38.4	0.28	0.975	0.924	44.3	5.00	43.9	44.2	42.3
GD 20	39.9	0.42	1.104	0.899	47.8	6.66	47.9	46.3	46.4
GL 0	36.7	0.34	0.940	0.921	43.2	5.15	43.4	41.7	42.5
GD 0	38.3	0.47	1.061	0.900	46.7	6.54	46.1	45.7	46.3

表 4 剪断強度定数と乾燥密度、間隙比の関係  
(相関係数が0.70以上の係数のみ)

	$\alpha$	$\beta$	$r$
$\rho_d \sim A$	-0.074	0.675	0.786
$\rho_d \sim \phi_m$	15.7	18.4	0.792
$e \sim \phi$	52.1	-24.6	-0.824
$e \sim A$	1.46	-0.697	-0.778
$e \sim \phi_m$	57.4	-19.0	-0.786
$D_r \sim \phi$	30.5	0.0889	0.783
$D_r \sim A$	0.845	0.0245	0.753
$D_r \sim \phi_m$	40.7	0.0672	0.769

$\phi$ ,  $A$ ,  $\phi_m$ と $U_c$ の関係は密締めと、緩締めに分けるとほぼ直線関係があるが、 $\tau_0$ ,  $a$ ,  $b$ と $U_c$ の関係は認められない。

非線形式と内部摩擦角式の適用下限以下での内部摩擦角 $\phi_M$ を求める方法として(5a), (5b), (5c)式がある。 $\phi_{M1} = \phi_m$ と $\phi_{M2} = \phi_{0.5}$ ,  $\phi_{M3}$ の関係を図5に示す。 $\phi_{M1}$ と $\phi_{M2}$ ,  $\phi_{M3}$ の差は $+1.0^\circ \sim 2.5^\circ$ と小さく、 $\phi_M$ は(5a), (5b), (5c)式のどれを用いても、実用上は問題ない。

砂礫材は締固めおよび剪断中に粒子の一部が破碎される。そこで実験後、4.75, 2.00mmふるい残留量を測定して破碎率を求めた。この結果、GL100とGD100では、9.50~4.75mmおよび4.75~2.00mmのいずれの粒子も減

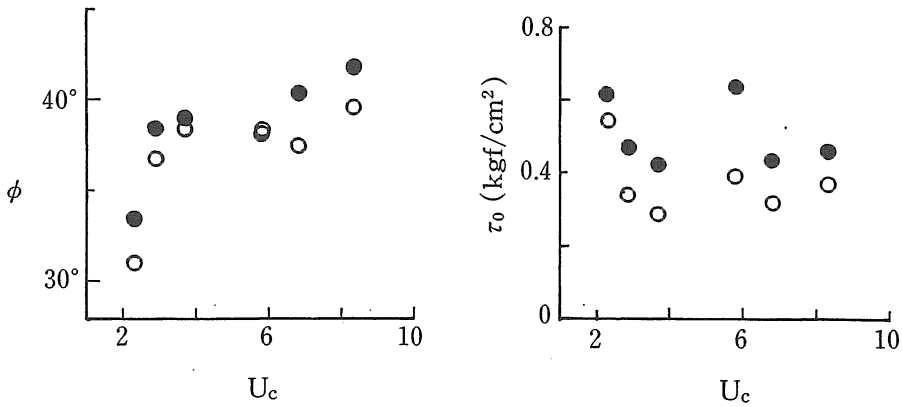


図 2 均等係数とモール・クーロン式の強度定数の関係  
(○ GL, ● GD)

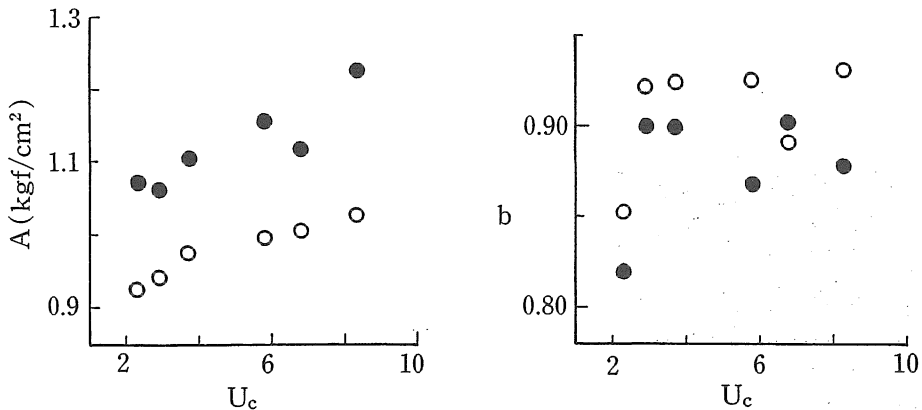


図 3 均等係数と非線形式の強度定数の関係  
(○ GL, ● GD)

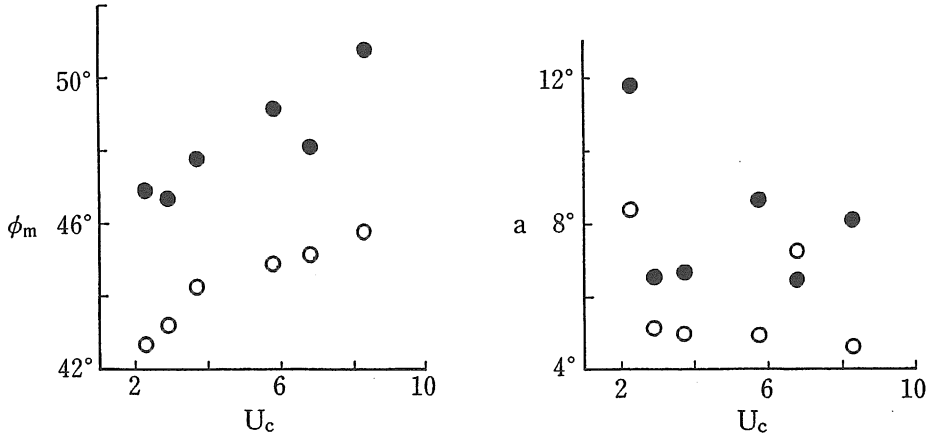


図4 均等係数と内部摩擦角式の強度定数の関係  
(○ GL, ● GD)

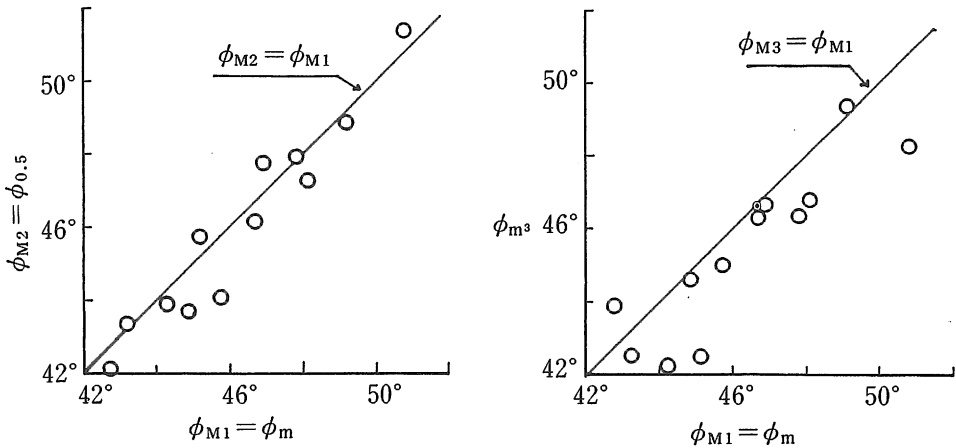


図5  $\phi_{M1}$ と $\phi_{M2} = \phi_{0.5}$ ,  $\phi_{M3}$ の関係

少しており、密なGD100の方が、かつ側圧の増加とともに破砕率は大きくなり、 $\sigma_3 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ で破砕率3.4%が $\sigma_3 = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ となると、12.5%の破砕率となっている。GL80, GD80, GL60, GD60, GL40, GD40は9.50~4.75mmの粒子のみが破砕され、4.75~2.00mmの粒子は増加しており、9.50~4.75mmの割合が減少するにしたがって破砕率も小さくなる。GL20, GD20では9.50~4.75mmの割合が少ないため、破砕は認められない。

あとがき

砂礫材の剪断強度を与える3式の強度定数と材料の基本的性質である乾燥密度、間隙比との関係についてこれまで数種類の材料を用いて実験してきた。この結果、乾

燥密度の増加とともに剪断強度は大きくなること、 $\sigma$ と $\tau$ の関係の非線形性が大きくなることが明らかになった。しかし、強度定数と乾燥密度あるいは間隙比とのはっきりした関係はなく、個々の材料について、剪断試験をしなければ、強度定数についての傾向は求まらないことも明らかとなった。

従来の震度法による安定解析では砂礫材の内部摩擦角は最大で45°、一般には35°~45°の範囲であったが、修正震度法においては内部摩擦角の上限がないため、実際にどの程度まで設計に期待してよいのかを明確にする必要がある。

ピーク強度を用いて強度定数を与える現在の方法ではピーク強度を生じるひずみ $\epsilon_f$ の大きさを全く問題にしていけない。 $\epsilon_f$ の大きさは $\sigma_3 = 0.5 \sim 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ で2~

3 倍の差がある。円弧すべり面全体が常にピーク強度以下のひずみになっているとは限らず、進行性破壊が生じる場合にはすべり面の一部では破壊ひずみを越えるひずみが生じることも考えられる。この場合にはピーク強度に基づく強度定数をそのまま設計に利用することは危険側の設計となり、フィルダムのような重要構造物の設計では避けるべきである。

なお、本実験を行うにあたっては平成6年度の農業施設工学研究室の専攻生の武本吉弘君（エイトコンサルタント（株））、永安 誠君（カナツ技建工業（株））、福田幸輝君（（株）カイハツ）に多大のご協力を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 建設省河川局開発課：フィルダムの耐震設計指針（案）。国土開発技術センター，東京，95pp.1991.
- 2) 鳥山昶司：非粘着性材料の剪断強度式について一凝灰岩と砂礫での事例一。農土論集，167，109-115，1993.
- 3) 鳥山昶司：締固めた非粘着性材料の剪断強度式の諸係数の特性について。島根大農研報，27，47-56，1993.
- 4) 鳥山昶司：均等粒度の砂礫の剪断特性について。島根大農研報，28，67-73，1994.
- 5) 松本徳久・渡辺和夫：ロック材料のせん断強度。土と基礎，35(12)，41-46，(1987).