

建設省土木研究所 正員 龍岡文夫
建設省土木研究所 学生員 吉田精一
千葉工業大学 学生員 河俣和久

§1 はじめに

至レベルで、 10^{-6} から 10^{-4} 程度までの砂のせん断変形係数 G と減衰係数は、当所で開催した共振法土質試験機により求めることのできる。これまでに筆者は、砂のせん断変形係数はシルト分を含んでおらず、粒子径のそろっている砂の場合、至レベルを考慮すれば一定の式で表わし得ることを示して来た。(参考文献1) しかし、自然砂は一般にシルト分以下を多少なりとも含んでおり、また、粒度分布もそれほどそろっていないのが普通である。今回は、シルト分以下を含むことにより G は減少すること、及び粒度分布が良くなることと G は減少することを実験的に調べた結果を報告する。

§2 実験装置、実験方法の概略

高さ 25 cm, 外径 10 cm, 内径 6 cm の中空炭素管を用い、下部を固定し上部でゆり振動力を与える。 G は系の共振振動数から求め、履歴減衰係数 η は系の自由振動時の対数減衰率 δ を 2π で除すことにより得る。詳しくは、参考文献2を参照されたい。

表-1 に実験に用いた砂の物理特性を示す。実験は、空気乾燥の飽和の状態を主に $d_1/d_2 = 1.0$ の応力状態で行った。図-1(a), (b), (c) は、粒径加積曲線である。図-1(a) は、シルト分を含んでおらず、きれいな砂のものである。図-1(b) は、粒度が良いかあるいはシルト分を含んでいる自然砂及び人工粒度砂のものである。ここが浅間山 A, B, C などアルファベットの記号のついた砂はすべて人工粒度砂である。図-1(c) は、入間砂 Z1 (これは、豊満砂とほぼ同じ粒度分布特性を持つようにして

表-1 実験に用いた砂の物理特性

砂の名称	粒形	G_s	D_{10}	D_{30}	D_{60}	U_c	$C_{max}^{a)}$	$e_{min}^{a)}$	図-2.3 の記号 ^{b)}	図-4.5.6 7の記号 ^{b)}
豊満砂	やや角ばっている	2.64	0.12	0.162	0.175	1.48	0.96	0.64		
空気乾燥		$d_1/d_2 = 1.0 \cdots \bigcirc$				飽和 $d_1/d_2 = 1.0 \cdots \bullet$				
30-50 オオワカサ	丸	2.66	0.3	0.52	0.54	1.8	0.80	0.48		
砕石 (砂岩)	角ばっている	2.73		2.0-5.0d)		-	1.09	0.80	+	
砕石 (石灰岩)	やや角ばっている	2.74		2.0-5.0		-	0.93	0.64	x	
浅間山砂	やや角ばっている	2.70	0.16	0.33	0.38	2.37	0.91	0.59		○ ●
浅間山砂 A	やや角ばっている	2.65		0.85-2.0		-	0.82	0.61	□ A	
浅間山砂 B	やや角ばっている	2.72		0.40-0.85		-	0.92	0.67	□ B	
浅間山砂 C	やや角ばっている	2.68		0.25-0.40		-	0.98	0.65	□ C	
浅間山砂 D	やや角ばっている	2.695	0.05	0.103	0.124	2.48	1.216	0.808		○ ● D
浅間山砂 (水洗)	やや角ばっている	2.70	0.13	0.34	0.41	2.68	0.89	0.60	◇	
利根川砂	やや角ばっている	2.71	0.15	0.325	0.37	2.74	1.00	0.65	◇ ▲	
利根川砂 (水洗)	やや角ばっている	2.71	0.17	0.31	0.345	2.93	0.98	0.70	◇ ▲	
福島砂	やや角ばっている	2.69	0.20	0.37	0.45	2.25	0.72	0.49	空乾 □ ▼ 飽和 □ ▼	
高砂砂 (水洗)	やや角ばっている	2.69	0.21	0.35	0.39	1.85	0.81	0.55	空乾 □ ▼ 飽和 □ ▼	
東京湾中央砂	やや角ばっている	2.74	0.07	0.8	1.1	1.57	0.96	0.43	◇ ◆	
入間砂	角ばっている	2.75	0.28	0.5	0.55	1.98	0.84	0.57	空乾 □ ■ 飽和 □ ■	
入間砂 A	角ばっている	2.67		2.0-5.0		-	1.06	0.79	▼ A	
入間砂 B	角ばっている	2.68		0.85-2.0		-	0.92	0.66	▼ B	
入間砂 C	角ばっている	2.63		0.4-0.85		-	0.98	0.66	▼ C	
入間砂 D	角ばっている	2.93		0.25-0.40		-	0.99	0.68	▼ D	
入間砂 E	角ばっている	3.29		0.12-0.16		-			▼ E	
入間砂 F	角ばっている	3.257	0.083	0.114	0.118	1.42				▼ F
入間砂 Z1	角ばっている	3.22	0.13	0.184	0.192	1.48	1.02	0.69	▽ Z1	
入間砂 Z2	角ばっている	2.89	0.30	0.40	0.42	1.40	0.96	0.68	▽ Z2	
入間砂 Z3	角ばっている	2.79	0.50	0.69	0.74	1.48	0.94	0.68	▽ Z3	
入間砂 Z4	角ばっている	2.68	1.02	1.37	1.43	1.45	0.88	0.62	▽ Z4	
入間砂 X1	角ばっている	2.91	0.08	0.54	0.72	9.0			▽ X1	
入間砂 X2	角ばっている	2.81	0.11	0.92	1.1	1.00			▽ X2	
入間砂 X3	角ばっている	2.80	0.20	0.92	1.1	5.50			▽ X3	
入間砂 X4	角ばっている	2.91	0.11	0.45	0.56	5.09			▽ X4	
入間砂 Y	角ばっている	3.08	0.145	0.26	0.285	1.97			▲ Y	
入間砂 W1	角ばっている	2.914	0.13	0.63	0.80	6.15			□ ■ W	
入間砂 Z1 (1)	角ばっている	3.24	0.136	0.185	0.195	1.43			○ ● Z1 (1)	
入間砂 Z1 (2)	角ばっている	3.18	0.135	0.185	0.195	1.44			○ ● Z1 (2)	
入間砂 Z1 (4)	角ばっている	3.12	0.132	0.185	0.195	1.48			○ ● Z1 (4)	
入間砂 Z1 (8)	角ばっている	2.98	0.115	0.185	0.195	1.70			○ ● Z1 (8)	
入間砂 Z1 (16)	角ばっている	2.77	0.068	0.185	0.195	2.87			○ ● Z1 (16)	
入間砂 Z1 (S)	角ばっている	3.22	0.13	0.184	0.192	1.48			▽ Z1 S	
入間砂 (水洗)	角ばっている	2.75	0.31	0.48	0.518	1.67	0.86	0.58	◇ ★	

a) 空気乾燥状態で求めた。

b) 特に注記のないのは、 $d_1/d_2 = 1.0$ 、空気乾燥状態で試験したものである。

c) Drnevich and Richart (1970) による。

d) 粒子径の範囲。

e) 水洗砂はシルト分以下 (≦ 0.075 mm) をカットしたものである。

f) 入間砂 X1 のシルト分を除いたものである。

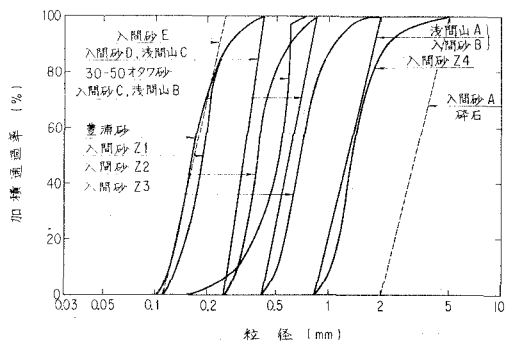


図-1(a) それいかな砂の粒径加積曲線

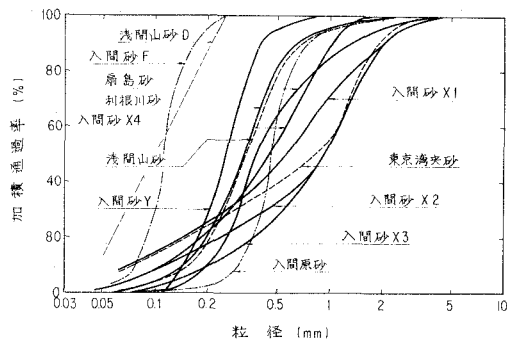


図-1(b) 粒度分布のよい又はシルト分以下を含んでいる砂の粒径加積曲線

作った人工粒度砂である)にシルト分以下の成分を1, 2, 4, 8, 14%と混ぜて作った人工粒度砂; 入間砂Z1(1)……Z1(14)の粒径加積曲線である。

§ 3 実験結果

(1) “きれいな”砂のG

実験は、拘束圧を平均主応力 $P = \frac{1}{2}(\sigma_1 + 2\sigma_3)$ で表わすと、 $P = 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 \text{ kg/cm}^2$ で順次行なった。図-2, 図-3は、それぞれ $\gamma = 10^6$ と $\gamma = 10^{-4}$ の時の $P = 0.5$ と 2.0 kg/cm^2 の G の値を示してある。“きれいな”砂の場合は、多様な砂の種類、間隙比の広い範囲に対して次の実験公式が、よくあてはまることを示している。

$$\gamma = 10^{-6} \text{ に対して } G = 900 \frac{(2.17 - e^2)}{1 + e} \cdot p^{0.38} \quad (1)$$

$$\gamma = 10^{-4} \text{ に対して } G = 700 \frac{(2.17 - e^2)}{1 + e} \cdot p^{0.5} \quad (2)$$

ここで、 G, P の単位は kg/cm^2 である。(1)(2)式が成り立つことは、相対密度で G の値が表わされないことを意味している。以下、シルト分以下の混入、粒度分布の変化の G に与える影響の程度の議論は、この2式を基準として行なう。

(2) 粒度分布のよい砂、シルト分以下を含んだ砂の G

図-4, 図-5に自然砂の $\gamma = 10^6$ と $\gamma = 10^{-4}$ の時の $P = 0.5, 2.0 \text{ kg/cm}^2$ の時の G の値を示す。明らかにシルト分以下を含み、粒度もよい自然砂の G は(1)(2)式に示す値より小さい。また、“きれいな”砂の場合より、値のばらつきはるかに大きくなっている。また、図-6, 7に入間砂をふりいけて作ったシルト分以下を含んでいる砂や粒度のよい人工粒度砂の G を示す。この場合も自然砂と同様に(1)(2)に示す値よりも G の値は小さく、かつ、その値のばらつきも大きい。以上示した様にシルト分以下を含有すること、粒度配合がよくなることは G を小さくする働きがあることがわかる。

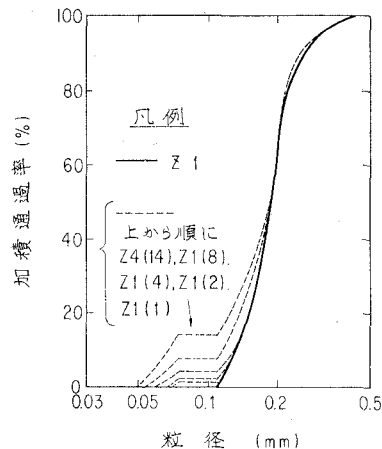


図-1(c) 入間砂Z1, Z1(1)~Z1(14)の粒径加積曲線

§ 考察

次に上記のことについて若干考察を行なう。そのために(1)(2)式による G の値と実測値の比を示す B は、次のように定義する。(次ページ)

$$B = \left(\frac{\gamma = 10^{-6} \text{ での } P = 0.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ での } G \text{ の実測値}}{(1) \text{ 式での } G \text{ の値}} \right) + \left(\frac{\gamma = 10^{-6} \text{ での } P = 2.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ での } G \text{ の実測値}}{(1) \text{ 式での } G \text{ の値}} \right) + \left(\frac{\gamma = 10^{-4} \text{ での } P = 0.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ での } G \text{ の実測値}}{(2) \text{ 式での } G \text{ の値}} \right) + \left(\frac{\gamma = 10^{-4} \text{ での } P = 2.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ での } G \text{ の実測値}}{(2) \text{ 式での } G \text{ の値}} \right) / 4 \quad (3)$$

ここで(1)(2)式での G の値は実際の P, e の値を用いて計算する。当然のことながら、 G の値が常に(1)(2)式の値と一致する場合は、 $B = 1.0$ である。

(1) 粒径の影響

粒径のパラメーターとして、 D_{50} (mm) をとった場合の「きれい」砂の D_{50} と B の関係を図-8に示す。 $D_{50} \approx 0.15 \sim 3$ mm の範囲で B の値は、大体1.0であり、「きれい」砂については、 G は粒径の大きさにかかわらず(1)(2)式で表わせることがわかる。

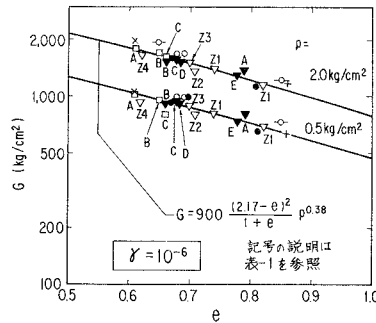


図-2 “きれい”砂の G ($\gamma = 10^{-6}$)

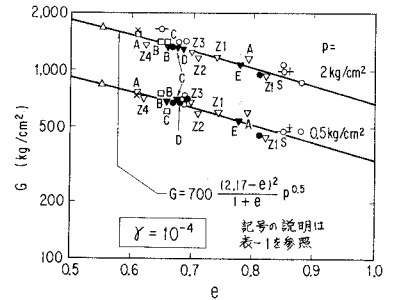


図-3 “きれい”砂の G ($\gamma = 10^{-4}$)

(2) 粒度分布の影響

粒度分布のパラメーターとして、均等係数 $U_c = D_{60}/D_{10}$ をとったときの U_c と B の値の関係を図-9に示す。これは、密締め砂のデータのみをまとめたものであるが、白抜き記号で示してあるシルト分以下を含んでいない砂については、ある一定な $B \sim U_c$ 関係があるようである。すなわち、シルト分以下を含んでいなくても U_c が大きくなると B 値は、下がる傾向にある。ところが、シルト分以下を含んでいる砂については、明らかにこの曲線関係よりも低い B 値を持つ。たとえば、 U_c が1.5程度であってもシルト分以下の含有量が多い程、 B 値は小さくなる。従って、シルト分以下の含有量が多く、そのうえ U_c の大きな砂の B の値はかなり小さなものと

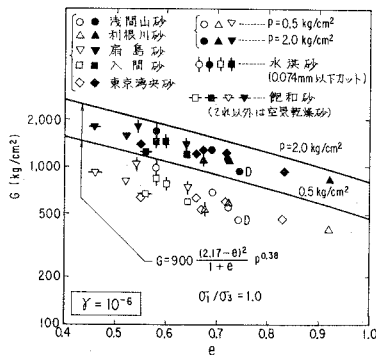


図-4 自然砂の G ($\gamma = 10^{-6}$)

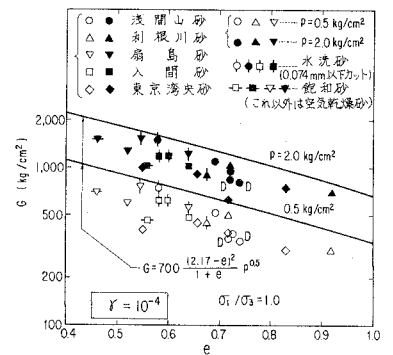


図-5 自然砂の G ($\gamma = 10^{-4}$)

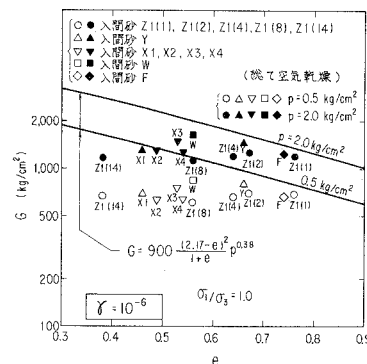


図-6 入間砂 (粒度分布がよいがシルト分を含んでいる人工砂) の G ($\gamma = 10^{-6}$)

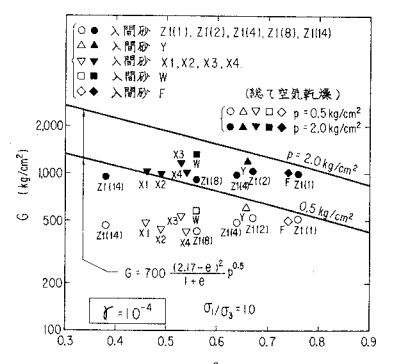


図-7 入間砂 (粒度分布がよいがシルト分を含んでいる人工砂) の G ($\gamma = 10^{-4}$)

なる。

(3) シルト分以下の含有量の影響

図-10は、入間Z1にシルト分を混入させた人工粒度砂を用いてシルト分以下の含有量の影響を示すものである。図に示すようにシルト分以下の含有量が増加するに従って、B値は減少していく。特に含有量5%あたりまでのB値の減少率が大きい。また、含有量8%までは U_c はほとんど一定であるから、この間のB値の減少は U_c の増大のためというより、シルト分以下の混入そのものによるものであろう。含有量が14%になると U_c も大きくなるから、この効果によってもB値は減少しているのであろう。では、シルト分以下の混入によって何故B値は減少するのであろうか。まづ、シルト分以下の粒子は砂粒子の間に位置し、せん断抵抗に寄与していないことが想定される。そこで、シルト分以下の重量を無視して計算した間隙比を e^* とすると、これは実際の間隙比 e よりも大きくなる。この e^* を用いて(3)式によってB値を計算したのを図-10に●印で示す。 e^* を用いて計算したB値もやはりより小さいということは、シルト分以下の存在は、粒子のせん断抵抗に寄与しないという以上に、更に積極的にせん断抵抗の低下をもたらしていることを意味している。

§まとめ

- (1). シルト分を含んでいない $D_{50} \approx 0.15 \sim 3.0 \text{ mm}$ の間の粒度のそろった($U_c \approx 1.5$)の砂の G は、実験公式(1),(2)によって評価しうる。
- (2). 粒度分布がよくなると G は相対的に減少し、その減少率は図-9の曲線で評価しうる。
- (3). シルト分以下の混入によって G は相対的に減少し、その減少率は図-10の○印の曲線(含有量約8%までの)で評価しうる。

なお、本研究を進めるにあたって、土木研究所振動研究室長岩崎敏男氏の御指導を得たことも未筆ながら感謝の意を表しする。

§参考文献

- (1) 岩崎・龍岡・堀内(1974.6) "共振法土質試験機による土の動的変形特性" 第9回土質工学会
- (2) 土木研究所資料N0.912, (1974.5) "土の動的変形特性"

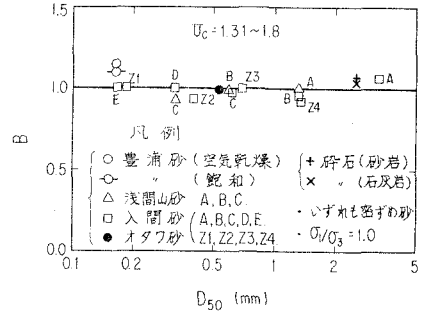


図-8 きれいな砂のBと D_{50} の関係

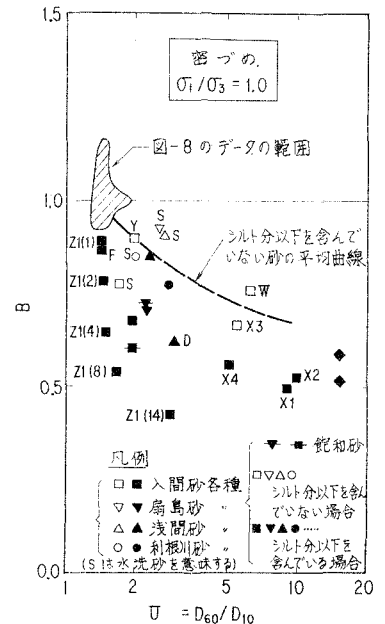


図-9 B値と U_c の関係

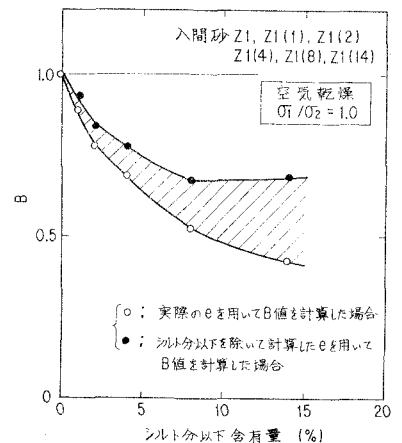


図-10 B値とシルト分以下含有量