

砂の流動化に及ぼす粒子形状の影響について

建設省土木研究所 正員 □佐々木 隆 後藤昌隆

1. まえがき

飽和砂層が流動化する要因には砂の粒度分布、粒子形状、密度、地震力の大きさなどが挙げられる。これらの因子を調べるために多くの研究機関が実施している室内試験には大きく分けて2通りの方法がある。

その1つは砂の供試体に周期的な繰返しせん断応力を加える方法であり、他の1つは砂を入れた箱を振動させて加速度を加える方法である。前者の代表的なものは Seed らの行なった繰返し三軸試験や単純せん断試験であり、後者の例には最上・久保らの行なった実験やあるいは土田らの振動実験が挙げられる。繰返し三軸試験や単純せん断試験は応力や変形の量が明確である反面、砂箱の振動実験にくらべて実験には高度の技術を必要とする。またこれら2通りの方法のもっとも大きな違いは、結果の整理をせん断応力で行なうか、加速度で行なうかということである。

現在のところ砂の流動化の機構は完全には明らかにされてはいないので、現場の設計士の適用のために上記の2つの量のいずれをとるか決め手はないのが現状である。しかし、いずれも実際の地震の際に砂層中に生じ得る量と関連づけることができるので、せん断応力または加速度のいずれも流動化の恐れを示す指標として用いることが可能ではあるが、これらは将来1つの形に統一されるべきものである。

著者らは、沈埋トンネルの底部に用いる敷砂の選定規準の作成に関連して、砂の流動化に関する実験を行なっているが、この実験方法は以下に述べるように砂箱を振動させる方法である。ここでは実験結果の整理を行なうに当たって砂箱に加えた加速度の大きさを指標としているが、繰返しのせん断応力の影響を無視しているわけではなく、この点に関しては今後の課題と考えている。

この報告では、現在までに得られている実験結果のうち主に砂の粒子形状が流動化に及ぼす影響について述べる。

2. 実験装置ならびに試料

実験に用いた装置は図-1に示すように合成樹脂でできた箱と加振機から成っている。加振機は油圧サーボ型式のものでその能力は周波数範囲 1.0 ~ 50.0 Hz の正弦波形の加速度を加えることができるものである。最大加速度は 500 gal である。箱の大きさは高さ×幅×奥行きが 50 cm × 40 cm × 50 cm のもの

である。

振動の方向と平行な側面に、箱の底面から 5 cm 間隔に

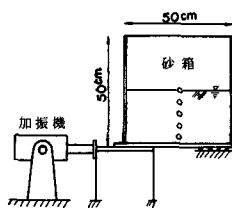


図-1 砂箱を用いた振動実験の装置

表-1 実験に用いた砂の性質

記号	A	B	C
産地	豊浦(標準砂)	千葉	千葉
比重	2.64	2.77	2.71
e_{max}	0.953	0.985	1.124
e_{min}	0.720	0.705	0.670
D_{50} (mm)	0.18	0.58	0.26
D_{80}/D_{10}	1.6	2.3	2.2
細長比	0.755	0.670	0.674
修正円摩度	0.58	0.44	0.46

水圧測定用孔があけてあり、これらの孔から水で飽和したビニール管を圧力計まで導き間隙水圧を測定した。使用した圧力計は非接着型ワイヤストレーンゲージタイプのもので最大容量は 0.1 kg/cm^2 である。

実験に使用した砂の性質ならびに粒度分布は表-1および図-2に示すようなものである。Aは豊浦標準砂、BおよびCは千葉県産の山砂である。

3. 実験および実験結果

表-1に示した砂を箱の底面から $23 \sim 28 \text{ cm}$ の厚さに種々の間隙比になるように詰め、水で完全に飽和させた後、振動加速度を加えて間隙水圧の挙動を観察した。

このような実験では砂層の間隙比を予め定めた値にすることは非常に難しいので次に述べるような方法で実験を行ない、種々の間隙比の砂層について間隙水圧の挙動を調べた。まず最初にゆるく詰めた砂層について実験を行ない、この実験が終了した後の次下量から実験後の砂層の平均的な間隙比を求めこれを第2回目の砂層の初期間隙比としてこの砂層について引き続き2回目の実験を行なった。

このようにしてゆるく詰めた砂層が密になるまで数回繰返して同一の砂層を実験に用いた。密になった砂層は箱の底面近くまでホースをさしこみ水を送り、ボーリングを起して砂層をゆるめ再度使用した。

なお、いずれの実験も水面は砂の表面とほぼ同一の高さとなるようにして行なった。

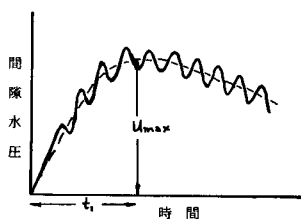


図-3 間隙水圧の上昇過程

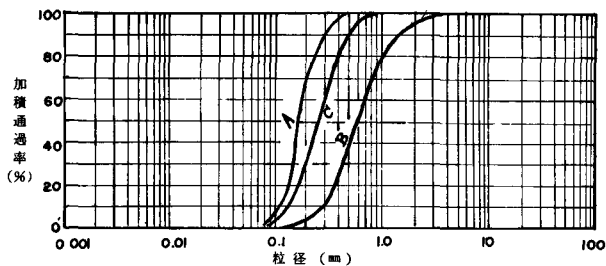


図-2 実験に用いた砂の粒度分布

表-2 振動加速度の組合せ

周波数 (Hz)	加速度 (gal)
3	40, 100, 200, 300
5	40, 100, 200, 300
8	40, 100, 200, 300
10	40, 100, 200, 300

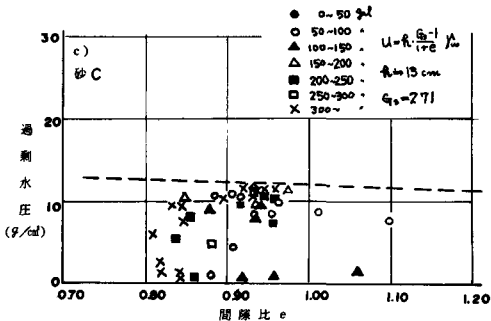
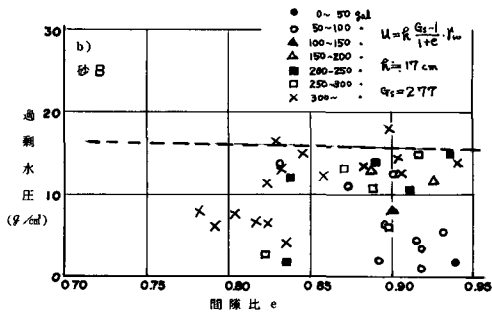
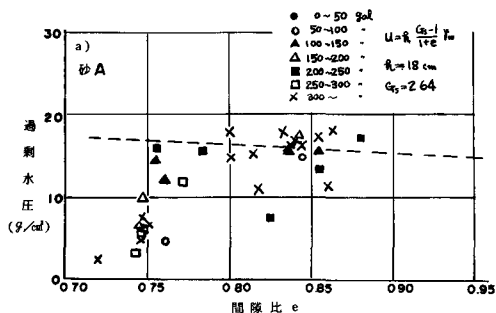


図-4 過剰間隙水圧と初期間隙比の関係

箱に加える加速度の大きさは表-2に示す値を目標にして行ない、振動を継続する時間は15~20秒程度とした。実際に得られた加速度はこの表に示す値より若干上廻っていた。箱の加速度は、加振機にトリつけられている制御用の差動トランス式変位計の出力から変位量を知り、この値を用いて計算によって求めた。

加速度の大きさはほとんど全ての場合、振動を開始してから0.5秒以内に一定の値に達していた。

記録した間隙水圧の値は図-3に示すように箱の振動周波数と同じ振動数の波形を描きながらその中央値は上昇している。実験結果の整理はこの中央値を読み取って行なっているが、その結果によればゆるい砂では振動を開始すると同時に上昇し始め、ピークの値に達した後次第に減少していた。ピークの値に達するまでの時間は、測定した深さによる差が顕著でないことからこの実験に用いた程度の砂層の厚さでは深さ方向にほぼ一様に流動化しようである。

前頁の図-4は底面から10cmの高さの点で測定した間隙水圧の記録から、図-3に示す U_{max} の値を求めて砂層の初期間隙比の値に

対してプロットしたものである。この図では加速度の大きさを7段階に分けて示してあるので、各点の記号からその加速度の大きさも判別することができる。なお図中の点線は砂が完全に流動化して砂の粒子が水中に懸濁した状態になったときに示すべき過剰水圧の値を示したものである。この値は次式で表わされる。

$$U = \eta \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w$$

ここに U : 過剰水圧

G_s : 土粒子比重

e : 間隙比

γ_w : 水の単位体積重量

間隙水圧がこの図に示した U_{max} の値に達するまでに要した時間 t_n から、この値に砂層が受けた振動の繰返し回数を求めてみると右の図-5のようになる。この繰返し回数は大まかに云って15回以下になっており、多くは4~5回程度であったことが判る。繰返し回数の大きさは加速度の大きさには無関係のように見受けられるが、砂層の密度の増大につれて若干増加する傾向が認められる。

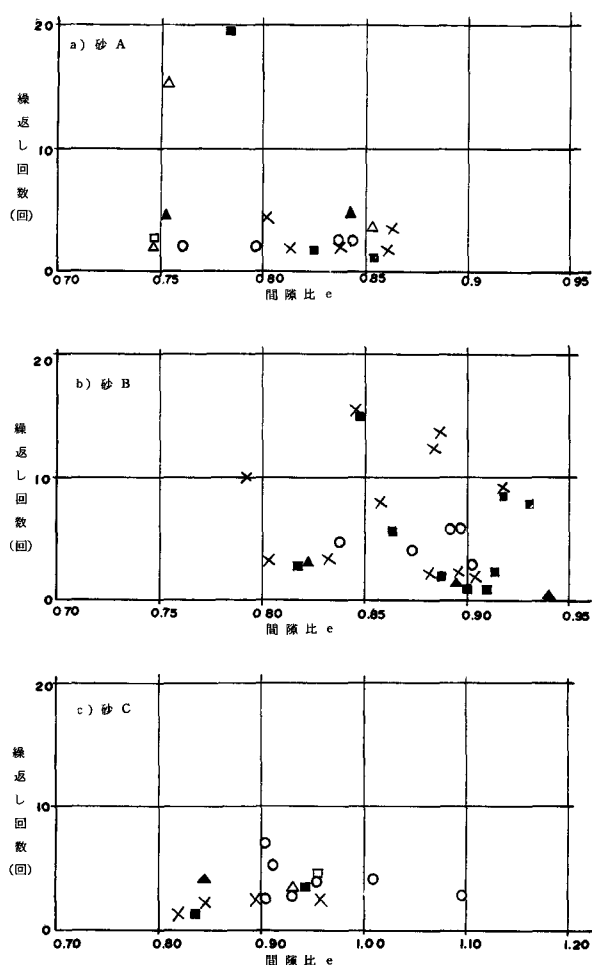


図-5 繰返し回数と初期間隙比の関係
(図中の記号は図-8と同じ)

4. 実験結果の検討

図-4から明らかになようにある程度以上の間隙比の砂層しか間隙水圧が上昇していない。そこで得られた実験結果から間隙水圧が僅かでも上昇している砂層の間隙比の最小値を同じ相対密度に換算して、加えた加速度に対してプロットしてみると図-6のようになる。

これらの点はそれ以上の相対密度では間隙水圧が上昇しなかった上限の値を示すものであるから、これを包絡する線はいわばそれぞれの砂の流動化に対する相対密度の限界を示す目安となるものと考えられる。

この実験に用いた三種の砂はいずれも流動化し易いと考えられる粒度分布を有しているが、図-6に示した相対密度の限界値は相互にかなり異なった傾向を示している。特にA砂とC砂は比較的似たような粒度分布であるにも拘らず相対密度の限界値はかなり異なっている。この原因として考えられることは粒子形状の影響である。粒子の形状を表す数値には図-7に示すような細長比や修正円摩度などがある。ここでは修正円摩度の値を用いて図-6の結果を整理してみた。図-8は図-6における加速度の100, 200, 300 galのそれぞれに対応する包絡線上の点の相対密度を修正円摩度に対してプロットしたものである。この図によれば丸味を持った砂ほど流動化を起し易いことがうかがわれる。砂の流動化し易さを左右する因子として砂の粒度分布の他に粒子形状に対する配慮も必要なことをこの実験結果は示しているものと考えられる。

砂層が流動化するまでに要した時間については、前

述したようにこの実験では振動を開始して1~数秒後には間隙水圧がピークの値に達していた。間隙水圧がどの大きさまで達したときを流動化したと判定するかについては異論もあるところではあるが、ここでは間隙水圧が最大値に達した時点をも一つの目安にとってみた。その結果流動化するまでに砂層が受ける繰返し回数は図-5に示したように一般に繰返し三軸試験などで得られる値にくらべて小さな値となっていた。これは実験に用いた箱が比較的に変形し易い合成樹脂でできていることが影響していると考えられる。振動中に生じた箱のうごきを高速度カメラで測定した極く大まかな推定によれば箱のせん断ヒズミは最大0.1%程度であった。箱の変形し易さ、すなわち振動中に砂層に生ずるせん断ヒズミの量が流動化に及ぼす影響については今後さらに詳細に調査したいと考えている。

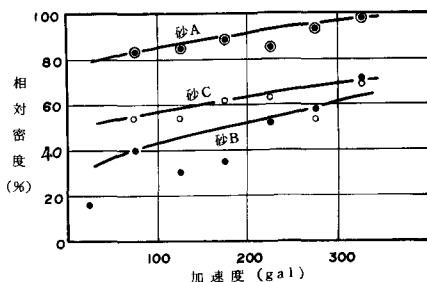


図-6 流動化した砂層の相対密度と加速度の関係

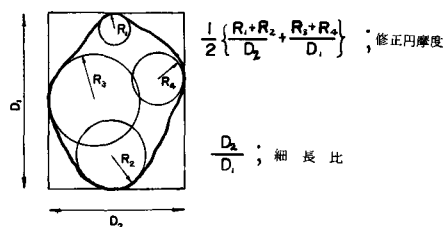


図-7 砂の粒子形状を表す数値
(細長比と修正円摩度)

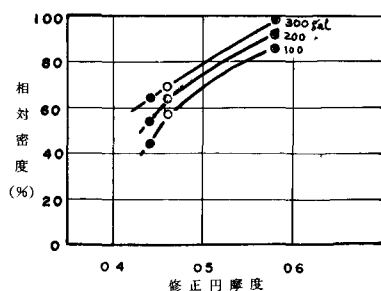


図-8 相対密度の限界値と修正円摩度の関係