

(52) 密な飽和砂層の強震時応答に関する大型振動台実験と解析 (その1)

(財) 電力中央研究所 当麻純一、大友敬三
(株) 奥村組 川井伸泰

1. まえがき

本報告は、密に締まった飽和砂層の地震時安定性を調べる目的で行っている研究の一部をとりまとめたものである。

従来、密な砂層は地震に対して安定であるとされているが、近年、大型の重要構造物がその上に計画されるような場合に、強震時における地盤の応答特性や変形挙動を照査する必要が生じてきた。すでに、三軸試験や中空ネジリ試験などの動土質試験によって密な飽和砂試料の動的強度・変形特性が明らかにされつつあり、ゆるい砂の液状化とはかなり異なった挙動を呈することが指摘されている。

本研究は、①大型せん断土槽を用いた振動台実験、②非排水振動三軸試験、③土槽実験の数値シミュレーションからなり、SH波の一次元波動伝播による密な飽和砂層の強震時挙動を明らかにしようとしたものである。本報(その1)は主として①の内容について述べるものである。

2. 振動台実験

a) せん断土槽: 本実験では、水平地盤のせん断振動現象をできるだけ正確に再現するために、モデル地盤を作成する土槽として特別に工夫したせん断土槽を用いた。この土槽は、直径3.0m、高さ3.0mの円筒形で、モデル地盤と一体に自由に變形しうようになっている。周囲は帆布で補強された厚さ20mmのゴム壁で構成されており、さらに内圧による側方への膨らみに対しては抵抗するように多段にアルミ製リングで胴巻きされている。土槽の自重は約3(tf)であって、内部のモデル地盤の重量(約42tf)の7%程度と低く抑えられている。これは、土槽の慣性力がモデル地盤の挙動に影響を及ぼさないようにする配慮からである。

b) モデル地盤: モデル地盤の材料としては、利根川産の砂を用いた。この砂の平均粒径は0.34(mm)、均等係数は1.95である。水中落下法により土槽内にモデル地盤を作成した。モデル地盤は、①ゆる詰め、②密詰めの2ケースを作り、密度による応答の差異を比較することとした。ゆる詰めの場合には、砂を水中に自由落下させるだけとしたが、密詰めの場合には撒出し厚さ50cmごとに振動台(6.5m×6.0m)を300gal、20Hzで約10分間加振し、振動締固めを行った。地盤作成時にシンウォールサンプラーによる試料採取をして、密度を測定した。砂層の相対密度Drは、ゆる詰めの場合57%、密詰めの場合86%である。いずれの場合も、図-1に示すように土槽の中央付近に、加速度計(共和電業ASW-2A)、間隙水圧計(豊田工機PD241-0.5F)、せん断歪計(ST研究所SS25-001)を埋設した。

c) 自由振動試験: ごく微小歪域での砂層の動特性を把握

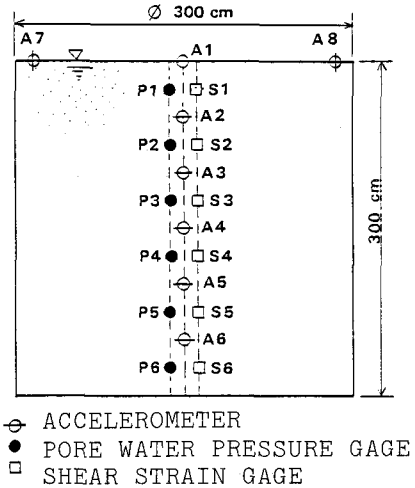


図-1 円筒形せん断土槽内の測点配置

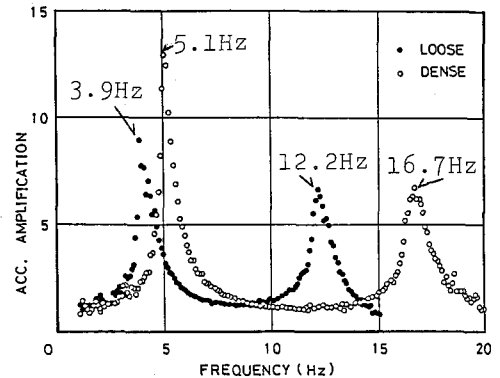


図-2 ゆるい砂と密な砂の共振曲線の比較

する目的で自由振動試験を行った。土槽の頂端部をゴムハンマーで水平方向に軽く打撃する方法により、砂層表面の減衰自由振動波形を得、フーリエ解析をした。その結果、ゆる詰めでは4.88Hz、密詰めでは6.45Hzの固有振動数を得た。これより、砂層の平均的なせん断波速度 V_s は、ゆる詰めでは59m/s、密詰めでは77m/sとなる。さらに、これに対応するせん断弾性係数 G は、飽和砂の単位体積重量が約 2 t/m^3 であることから、ゆる詰めでは 710 t/m^2 、密詰めでは 1210 t/m^2 となる。すなわち、せん断弾性係数では密詰めの方が1.7倍程度大きい。

d) 透水試験：砂層下端から若干量の排水をして、定常時の流量と動水勾配から砂層の平均的な透水係数 k を求めた。その結果、ゆる詰めでは $1.5 \times 10^{-2} \text{ (cm/s)}$ 、密詰めでは $4.4 \times 10^{-3} \text{ (cm/s)}$ が得られ、ゆる詰めの方が3.4倍程度大きいことが知られた。

e) 定常応答：ほぼ線形挙動と見なしうる低歪域での定常応答を調べるために、両振幅10(gal)の正弦波を振動台に入力して砂層の共振実験を行った。図-2は、砂層表面(A1)の水平加速度応答倍率の共振曲線を示したものである。ゆる詰めでは、1次が3.9Hz、2次が12.2Hzであり、密詰めでは1次が5.1Hz、2次が16.7Hzである。砂層の固有(1次)振動数は、自由振動の結果よりもやや低下しており、共振実験では歪依存の影響が若干現れていることが分かる。ただし、過剰間隙水圧の変化はみられなかった。図-3は、密詰めの場合の加速度応答のナイキスト・サークルを描いたものである。1次共振点を含む周波数域(a)では概ね理想的なせん断振動モードをしていることが確認できる。しかし、2次共振点を含む周波数域(b)では両端の鉛直成分が卓越し、曲げの影響が現れている。この点は、ゆる詰めの場合にもほぼ同様の傾向であった。

f) 地震波加振：次に、地震波加振に対する砂層の非線形応答を調べた。用いた地震波はEL CENTRO波(1940, NS)の時間軸を1/5に縮尺した波形で、その最大値を100, 200, 300, 400, 500galと段階的に設定した。図-4に、加振波の波形を示す。代表的な応答結果について、300gal加振の場合を例にとり、ゆる詰めと密詰めに比較して示すと次の通りである。

① 加速度：図-5は、地表(A1)の加速度波形を示したものである。ゆる詰めでは数回の振動を呈した後に応答は消滅している。密詰めでは入力波形よりも長周期化していることが読みとれるが、ゆる詰めのように波形が消滅することはない。この違いは、ゆる詰めでは、液状

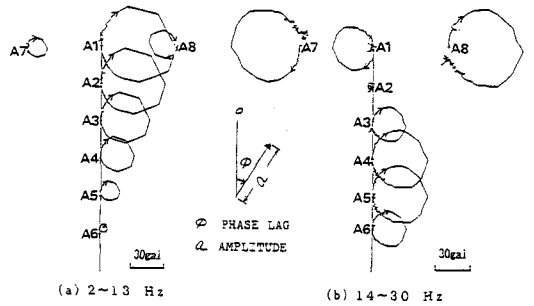


図-3 密な砂のナイキスト・サークル

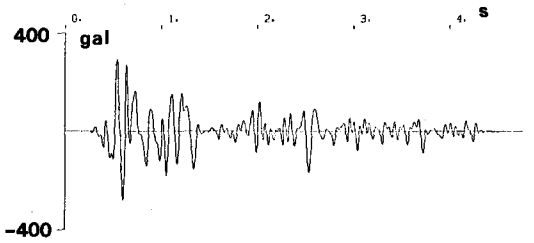
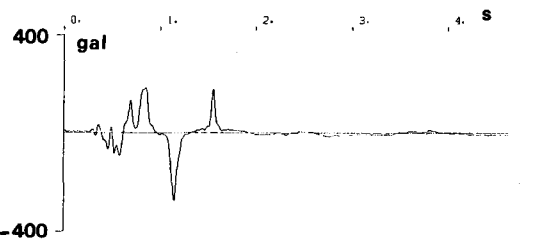
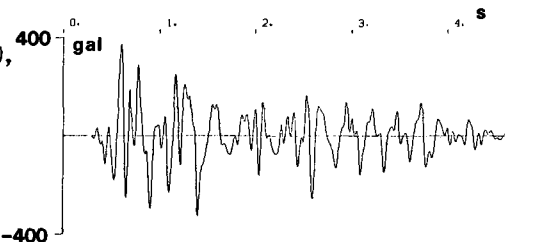


図-4 振動台入力地震波



(a) ゆるい砂



(b) 密な砂

図-5 ゆるい砂と密な砂の地表面加速度の応答波形の比較

化が生じて砂層がせん断力を伝達しなくなったためと考えられる。

②間隙水圧：図-6に過剰間隙水圧比（P2）の波形を示した。密詰めでは負方向にも振動しているのが特徴的である。残留過剰間隙水圧比（▼印）は、密詰めの方が小さくて、ゆる詰めの場合の1/4程度の大きさである。図-7は、残留過剰間隙水圧比の深度分布を示したものである。この図から、ゆる詰めでは地表から深さの半分程度までが液状化に達していることが分かる。一方、密詰めでは、同じ入力にもかかわらず、過剰間隙水圧の上昇量はきわめてわずかである。

g)正弦N波加振：ここではさらに、非常に厳しい応力条件下での密詰めの挙動を調べてみた。すなわち、一定振幅の正弦波を25波連続して振動台に入力した。波数（25波）は、マグニチュード8クラスの大地震による等価正弦波の繰返し回数を想定したものである。入力波の振動数は10, 5, 2Hzの3通りに設定したが、予備的な検討により入力振動数が低い方が過剰間隙水圧の上昇量大きいことが分かっている。以下に、入力波として、両振幅約400gal、振動数2Hzの正弦25波を用いた場合の密詰め砂層の応答について示す。

図-8は、砂層内の加速度、過剰間隙水圧、せん断歪の各々の代表的な波形を示したものである。加速度（A2）は、徐々に振幅が増大していき、最大両振幅約1500galに達している。これは入力波の振幅の約3.8倍であって、加速度の増幅は著しい。この応答波形は、本来の正弦波形より歪んでいる様子が伺えて、とがった形をしている。ここで、過剰間隙水圧（P2）の波形を見ると、加速度の周期の丁度半分の周期で激しく振動していることが読みとれる。この場合、時系列的に見て、正の包絡線は通常の意味での過剰間隙水圧の上昇曲線を表しているが、負方向への振動は有効応力の瞬間的な回復を意味する。これは、正のダイレイタンスによるサイクリックモビリティ現象が砂層内に生じていることを示唆している。過剰間隙水圧の正の最大値は、ほぼ初期有効上載圧のレベルに達しているが、せん断歪波形（S2）は急増することなく、緩慢に増大している。この点は、ゆるい砂の液状化現象と著しく異なるわけであり、密な砂に特有な挙動である。

密な砂のサイクリックモビリティ現象をより明確に把握するために、図-8の波形を用いて、砂の応力-歪関係、有効応力径路を描いてみた。

応力-歪関係：砂のせん断応力を直接に計測していない

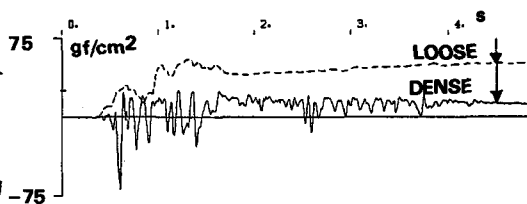


図-6 ゆるい砂と密な砂の過剰間隙水圧の応答波形の比較

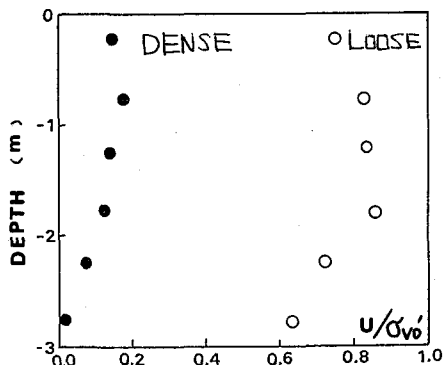
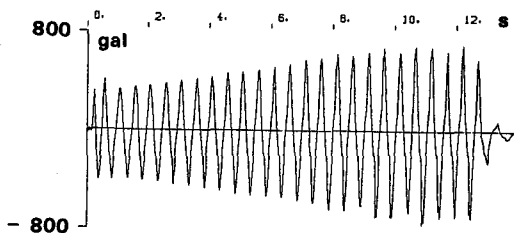
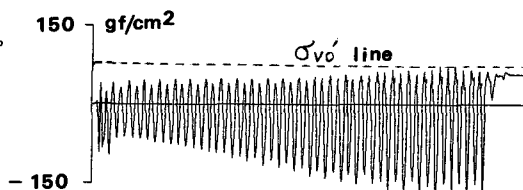


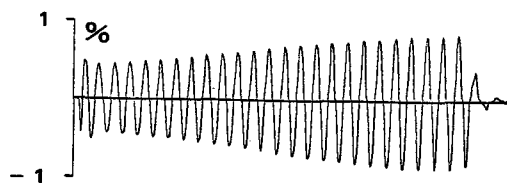
図-7 ゆるい砂と密な砂の残留過剰間隙水圧比の深さ分布の比較



(a) 加速度 (測点A2)



(b) 過剰間隙水圧 (測点P2)



(c) せん断歪 (測点S2)

図-8 正弦25波加振による密な砂の応答波形

ので、ここでは加速度記録からせん断応力の時刻歴を推定した。すなわち、せん断歪計に作用するせん断応力 τ は、それより上方の単位土柱の質量 m とその加速度 $\alpha(t)$ の積と考えて、

$$\tau(t) = m\alpha(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で求めた。

せん断歪計(S2)の記録と、土柱の加速度(A2で代表)の記録とを用いて、応力-歪曲線を描いたものを図-9に示す。図は、1波目から25波目までを連続して表しており、歪の両振幅が1%を越えたあたりから勾配が急増するような、特徴的なヒステリシスループとなっている。ループの大きさは徐々に大きくなる傾向を示しているが、最終の25波に至るまで安定した形状を保っていて、ゆるい砂の液化化のような軟化特性は見られない。このように、砂の応力-歪関係がハードスプリング型の挙動をするために、加速度波状が尖った形になったものと解釈できる。

有効応力径路：有効応力の時刻歴 $\sigma v'(t)$ を間隙水圧の記録から次のように求めた。

$$\sigma v'(t) = \sigma v_0' - \Delta u(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\sigma v_0'$ ：初期有効上載圧、 $\Delta u(t)$ ：過剰間隙水圧。 $\Delta u(t)$ として、測点P2の記録を用いて $\sigma v'(t)$ を求め、先に求めたせん断応力 $\tau(t)$ との関係を図-10に示した。この径路では、最初の数回の繰返しで有効応力ゼロに達しているものの、有効応力ゼロを示すのはせん断応力の小さな瞬間のみであって、その後もせん断応力が加われば有効応力は回復する様子が分かる。そして、有効応力の回復と減少は破壊線とみられる勾配に沿って規則的に行われている。その平均的な勾配は約25°である。

以上示した応力-歪関係、有効応力径路から、密な砂ではせん断歪がある限度を越えると正のダイレイタンスーが現れること、換言すれば有効応力がゼロに達した後も繰返しせん断に対して砂に相当な剛性が存在することが確認できる。

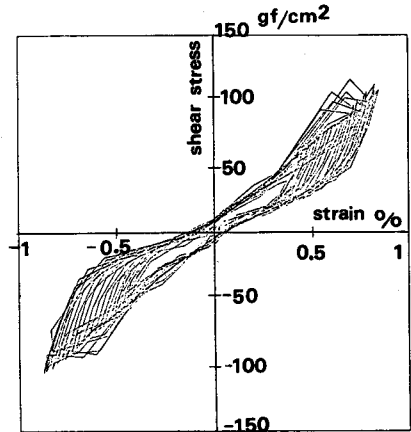


図-9 密な砂の応力-歪曲線

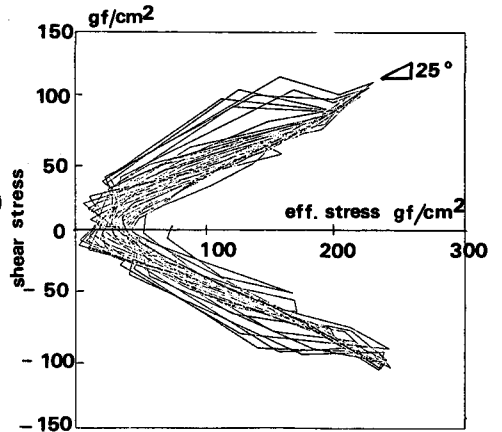


図-10 密な砂の有効応力径路

注) ナイキスト・サークル：ここでは応答の振幅 a 、位差遅れ ϕ をベクトル表示し、任意の周波数域における複素平面上でのベクトル先端の軌跡をいう。

3. まとめ

本報では、高さ3mの飽和砂層の振動台実験の概要を述べた。密な砂では、ゆるい砂とは異なり、繰返しせん断により有効応力が回復することを確認した。このような現象を考慮した有効応力解析法の適用についてを(その2)で述べる。