

飽和砂の液状化特性に及ぼす供試体形状と端面拘束の影響

東北大学大学院 学生員 ○永見 健二  
 東北大学 正会員 柳沢 栄司

1. はじめに：砂の三軸液状化試験は多くの機関で行なわれているが、試験装置の違い、試験方法および試験条件の違い、あるいは実際に試験を行なう試験者個々の技術の違い、等が三軸液状化強度に影響を与えるものと思われる。今回、これらの影響のうちH/D（高さ直径比）に着目し、実験および解析によりその影響の程度・特性を比較検討したのでここに報告する。

2. 試験試料、試験方法および試験条件：供試体試料は豊浦砂 ( $G_s = 2.64$ ,  $e_{max} = 0.977$ ,  $e_{min} = 0.605$ )を用いた。供試体はすべて空中振動法で作成し、 $\rho \geq 0.96$  のものに対して有効拘束圧  $\sigma'_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$  で1時間等方圧密したのち、周波数  $f = 0.5 \text{ Hz}$  の正弦波を与えることにより、繰返し非排水三軸試験を行なった。供試体の形状としては表-1に示した3種類のものを用い、相対密度  $D_r$  は50%, 70% の2種類で行なった。

Group	直径 D(cm)	高さ H(cm)	H/D
A	5.0	12.5	2.5
B	5.0	7.5	1.5
C	5.0	5.0	1.0

表-1 高さ直径比(H/D)

3. 実験結果：供試体ごとの密度のバラつきは少なからず強度に影響を与える。

そこで、今回の実験データは各データの  $D_r = 50\%$ ,  $70\%$  からのズレを複数のデータを補正することにより、所定の  $D_r$  に対する  $N_c$  の値とした。図-1, 図-2はこのようにして求めた  $N_c$  とせん断応力比  $SR$  ( $\sigma_{dp}/\sigma'_c$ ) の関係である。ゆる詰め砂、密詰め砂共にH/Dによる液状化強度の違いがみられ、大抵H/Dが小さいほど液状化強度は大きくなっているといえる。特に密な砂に関してはその傾向が顕著にみられ、液状化の下限値もH/Dが小さいものほど大きくなっている。一方ゆるい砂では液状化強度には差がみられるもののSRが小さくなるにつれてその影響は小さくなり、液状化の下限値には差がみられない。このような液状化強度のH/Dによる差は以下のように考えられる。

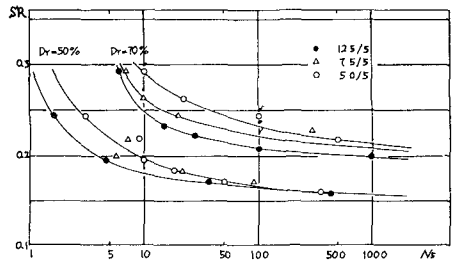


図-1 DA=5%に対する液状化強度曲線

「端面の摩擦により供試体の変形が妨げられせん断力は大きくなるが、それに伴う平均有効主応力  $\sigma'_m$  の増加のため結果としてせん断応力比が小さくなる。そのため間隙水圧の上昇も小さくなり液状化強度は大きくなる。」

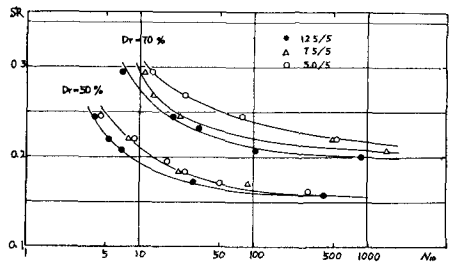


図-2 DA=10%に対する液状化強度曲線

4. 応力解析：上記のような仮説を確かめるために端面拘束条件での供試体の挙動を有限要素法を用いて弾塑性解析を行なった。解析に必要な構成式は西・三刺らのモデル<sup>(1)</sup>に若干の修正を加えて用いた。また砂は等方で応力異方性の影響を受けないものとした。用いた降伏関数等は以下の通りである。

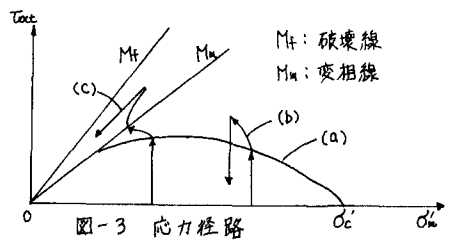


図-3 応力経路

$$\text{降伏関数 } f = \frac{T_{tot}}{\sigma'_c} - \alpha \cdot M_m \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_m}{\sigma'_c}} - 1 \quad (1)$$

降伏曲面(a)は楕円形状であり、 $\alpha$ はその形を決める定数である。 $M_m, M_f$ は(2)のようにモール・クーロンの式により三次

元的に与えられるようにした。塑性ポ  
ンシャル $\phi$ は(3)を用い、 $\tau_{oct}/\sigma'_m \sim$

$$M_m = \frac{2\sqrt{2} \sin \phi_m \sqrt{b^2 - b + 1}}{3 + (2b - 1)}, \quad b: \text{中間主応力に関する値}, M_f \text{も同様} \quad (2)$$

$\tau_{oct}$ を双曲線で近似することにより、変相線通過前の塑性域での応力径路(b)のようにした。また変相線通過後の応力径路は(c)のように定めた。

応力解析は供試体の軸対称  
性と上下対称性を考慮して供

$$g = \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} + M_m \cdot \ln \sigma'_m \quad (3)$$

試体断面4分の1の領域で行  
なった。要素分割は図4に示

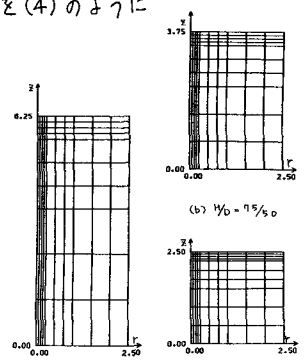
$$d\sigma'_m = -\frac{3(1+\nu)}{2GK} \cdot \left( M_m - \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \right) \left( \frac{M_f}{M_f - \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m}} \right)^2 d\tau_{oct} \quad (4)$$

す通り、10×10の100要素で  
中心方向および端面方向に細

$$d\sigma'_m = \frac{2}{M_m + M_f} \cdot d\tau_{oct} \quad (5)$$

かくとった。拘束条件として  
端面におけるr方向の変位u

$$E_s = E_{s0} \sqrt{\frac{\sigma'_m}{\sigma'_c}} \quad (6)$$

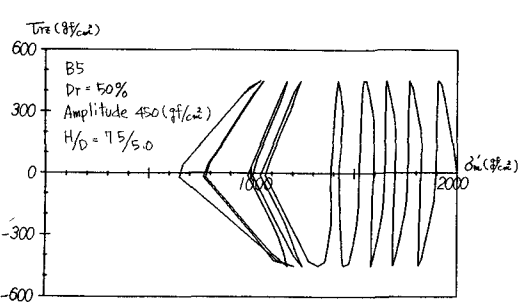
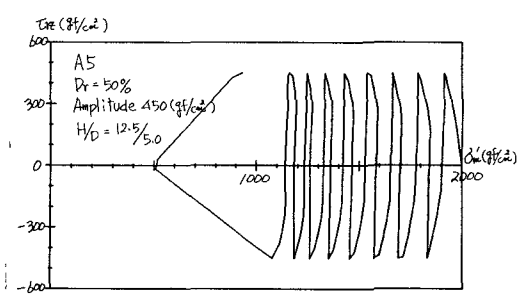
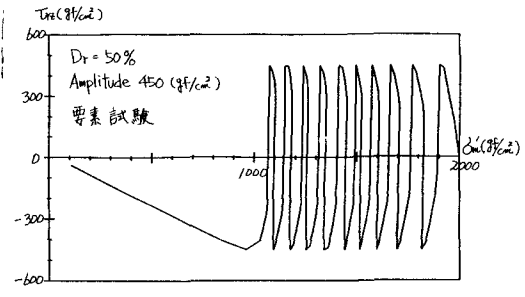


=0とし、固相のヤング率 $E_s$ は有効応力によって(6)のように減少するものと 図4 要素分割

した。載荷は拘束条件との関係上変位増分法を用い、 $\sigma'_r$ の平均値と $\sigma'_z$ の平均値の差 $|\sigma'_r - \sigma'_z|$ が応力振幅 $\sigma_{dp}$ 以上になることを反転の条件とした。また、供試体内を要素ごとに発生した間隙水圧は瞬時において消散すると考え、各増分ごとに要素体積を重みとして平均化した。

このような条件のもとで数値計算を行なった。その一例を図5、図6、図7に示す。図5は端面に拘束が全くない場合、すなわち本来要素試験としてあるべき有効応力径路である。図6、図7はそれぞれ $H/D = 2.5$  or  $1.5$ のときの有効応力径路である。解析結果より明らかに端面拘束の有無による影響及び端面を拘束した場合の $H/D$ による違いが表れている。本解析には変相線を越え(5)に従う有効応力径路をとるため要素試験では変相線到達の前後でその挙動は完全に分離する。しかしながら、複数の要素に分割した場合、各要素はその応力状態および応力履歴によりそれぞれ異なる時点で変相線に到達するため段階的に挙動を変化させることになる。その結果、除荷時の傾きが $\sigma'_m$ の減少に伴って徐々に着していくという現象となつて現れている。よって $\sigma'_m = 50$   $gf/cm^2$ を液状化の規準とした場合、その強度は本研究の範囲では $H/D$ が小さくなるほど大きいと言えようである。

と 結び：本研究の範囲では、 $H/D$ の減少に伴い液状化強度は大きくなるという結果が得られ、特に密な砂ではその傾向が顕著であり液状化をおこなふ応力振幅の下限値にも影響していた。解析に関しては現時点では数量が少ないので種々な場合で解析してやる予定である。



〈参考文献〉西村一、河野清行“繰返し荷重下における飽和砂の塑性性モデル”