

III-12 三軸圧縮・伸張試験および正八面体面上の円経路試験における「液状化強度の下限值」の推定法

運輸省港湾技研(元名工大大学院生)
名古屋工業大学

正員 ○山崎 浩之
正員 松岡 元

非排水繰返し三軸圧縮・伸張試験において、多数回繰返しても液状化を起こさない「液状化強度の下限值」を、排水三軸試験と等方圧縮試験のみから簡便に推定する方法を提案する。さらに、正八面体面上の円経路試験における「液状化強度の下限值」の推定法を提案するとともに、三軸圧縮・伸張試験における「下限値」との関係を示す。

一般に3主応力下では、2主応力間でせん断・垂直応力比 τ/σ_N が最大となる滑動面は図-1に示すように3個存在する。3主ひずみが各滑動面で発生するひずみの重ね合せにより表で現できるものとし、滑動面上で成り立つ応力・ひずみ関係式を用いて砂の構成式が提案されている¹⁾。この構成式中のパラメーター $\mu (= \tan \phi_\mu)$ (滑動面上の垂直ひずみの最大圧縮点での τ/σ_N の値で排水三軸試験より求まる)は粒子間摩擦係数に対応するものである¹⁾。砂をある方向にせん断し、その後逆方向にせん断する場合、粒子間摩擦のため滑動面上の応力比 τ/σ_N が 2μ 変化する間はひずみが発生しないと考えられる。そこで、この μ に着目して「液状化強度の下限值」の推定法を提案する。

図-2に示すモール・クーロン規準は、最大・最小主応力比 σ_1/σ_3 が $R_\mu (\tau/\sigma_N = \mu$ のときの $\sigma_1/\sigma_3)$ に対応するものであるが、この規準の内側では応力状態がどこに移っても滑動面上の応力比の変化は 2μ 以下である。排水三軸伸張試験により(τ_{oct} 一定の場合、圧縮側より伸張側の方が σ_1/σ_3 が大きくなるため伸張側で考える)応力状態がO点からE点に移った場合、図-1のI-II軸間とI-III軸間の2個の滑動面が働き、せん断による体積ひずみ ϵ_v^S が発生する。しかし、それ以降の三軸圧縮・伸張経路(E-O-A-O-E)では滑動面上の応力比の変化が 2μ 以下であるため体積ひずみは発生しないと考えられる。ここで、非排水条件式 $de_v^S + \{0.434C_s/(1+e_o)\} \cdot dp/p = 0$ (C_s : 膨張指数, e_o : 平均有効応力 p が初期の p_o のときの空隙比)を考慮すれば、 ϵ_v^S が生じなければ有効応力経路は入り込まないことになる。したがって、初期の ϵ_v^S による有効応力経路の入り込みを無視すれば、非排水三軸圧縮・伸張試験の「液状化強度の下限值」は図-2の τ'_{octl} より、 τ'_{octl}/p_o となる。

次に、正八面体面上の円経路試験の場合は、図-1の3個の滑動面が全て働く。図-2に示すモール・クーロン規準の内接円経路では、その接点において滑動面上の応力比は μ になるが、3個の滑動面上の応力比が全て μ になった後は、何周回しても体積ひずみは発生しないと考えられる。なお、円経路の体積ひずみは三軸圧縮・伸張経路の1.5倍になるが、1.5倍は働く滑動面の数の比が3個:2個であることに基づいている。ここで、三軸圧縮・伸張経路の場合と同様に初期の ϵ_v^S を無視すれば、 $\tau'_{octl(r)}/p_o$ が円経路の場合の「液状化強度の下限值」となる。 τ'_{octl}/p_o および $\tau'_{octl(r)}/p_o$ は三軸伸張条件においては R_μ を用いて次式により与えられる。以下、添字(r)は円経路を意味する。

$$\tau'_{octl}/p_o = \sqrt{2(R_\mu - 1)/(2R_\mu + 1)} \quad (1), \quad \tau'_{octl(r)}/p_o = (R_\mu - 1)/\sqrt{2(R_\mu^2 + R_\mu + 1)} \quad (2), \quad (\text{ここに } \mu = (\sqrt{R_\mu} - \sqrt{1/R_\mu})/2)$$

したがって、 μ の値だけから下限値が求まることになる。

次に、初期の有効応力経路の入り込みを考慮する場合について考える。上記の非排水条件式を積分することにより次式を得る。

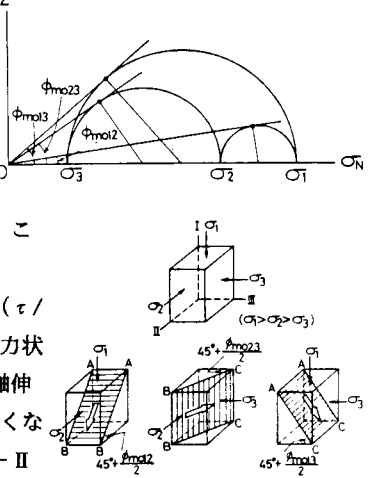


図-1 3主応力下の3個の2次元滑動面

$$\epsilon_{v(\mu)}^S + \{C_s / (1 + e_o)\} \cdot \log_{10} (p/p_o) = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\epsilon_{v(\mu)}^S$ は三軸試験で応力比が μ に対応するときの体積ひずみである。式(3)により三軸圧縮・伸張経路での初期の有効応力経路の入り込みが求まる。したがって、この場合の三軸圧縮・伸張経路での「液状化強度の下限値」 τ_{oct1}/p_o は、図-2を参考にして τ'_{oct1}/p_o より (p/p_o) 倍だけ小さくなり、次式を得る。

$$\tau_{oct1}/p_o = [\sqrt{2}(R_\mu - 1) / (2R_\mu + 1)] \cdot (p/p_o) \quad (4)$$

次に円経路の場合は三軸圧縮・伸張経路の1.5倍の体積ひずみが発生することにより次式を得る。

$$1.5\epsilon_{v(\mu)}^S + C_s / (1 + e_o) \cdot \log_{10} (p(r)/p_o) = 0 \quad (5)$$

また三軸圧縮・伸張経路の場合と同様に次式を得る。

$$\tau_{oct1(r)}/p_o = [(R_\mu - 1) / \sqrt{2(R_\mu^2 + R_\mu + 1)}] \cdot (p(r)/p_o) \quad (6)$$

したがって μ 、 $\epsilon_{v(\mu)}^S$ および $C_s / (1 + e_o)$ の値がわかれば式(3)~(6)より非排水三軸圧縮・伸張試験および円経路試験での「液状化強度の下限値」を求めることができる。さらに、式(3)~(6)より次式を得る。

$$\frac{\tau_{oct1(r)}}{p_o} = \frac{(R_\mu - 1)}{\sqrt{2(R_\mu^2 + R_\mu + 1)}} \cdot \left[\frac{\tau_{oct1}/p_o \cdot (2R_\mu + 1)}{\sqrt{2}(R_\mu - 1)} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

R_μ は試料が決まれば一定と考えられるので、ある間隙比での非排水三軸圧縮・伸張試験の下限値 τ_{oct1}/p_o がわかれば、式(7)よりその間隙比における円経路試験の下限値 $\tau_{oct1(r)}/p_o$ は容易に求まる。

次に実験結果との比較を示す。図-3は山田・石原らによる豊浦砂($e_o=0.85$)の三主応力制御試験結果を示している。豊浦砂の $\mu=0.20$ ($R_\mu=1.49$), $C_s/(1+e_o)=0.50\%$ である。図-3より明らかに異方性があるので、伸張試験の $\epsilon_{v(\mu)}^S = 0.120\%$ ($(\tau_{oct}/p)\mu=0.174$) および伸張試験と圧縮試験の $\epsilon_{v(\mu)}^S$ を平均した $\epsilon_{v(\mu)}^S = 0.092\%$ を用い2通りの予測を行なった。伸張試験の $\epsilon_{v(\mu)}^S$ を用いた場合、圧縮・伸張経路の下限値は0.101、円経路の下限値は0.071と求まり、図-4(a)に実測値との比較を示す。平均した $\epsilon_{v(\mu)}^S$ を用いた場合、圧縮・伸張経路の下限値は0.114、円経路の下限値は0.085と求まり、図-4(b)に実測値との比較を示す。平均した $\epsilon_{v(\mu)}^S$ を用いた場合は実測された下限値をよく説明している。

謝辞

貴重な実験データを引用させていただいた東大山田恭央助教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) Matsuoka, H., Koyama, H. and Yamazaki, H. (1985): S&F, Vol. 25, No. 1, pp. 27~42.
- 2) Yamada, Y., Ishihara, K. (1979): S&F, Vol. 19, No. 2, pp. 79-94.
- 3) 石原・山田・岸田(1978): 第13回土質工学研究発表会, 104 pp. 413-416.

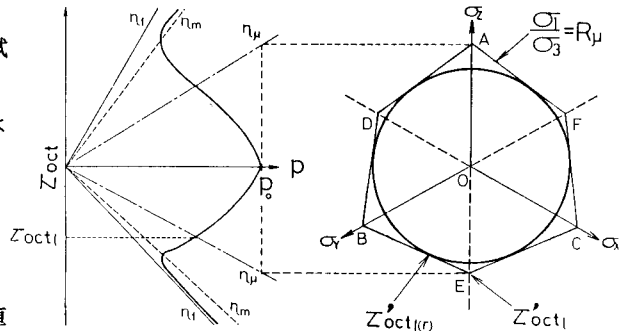


図-2 非排水有効応力経路と滑動面の応力比が μ になるときのモール・クーロン規準

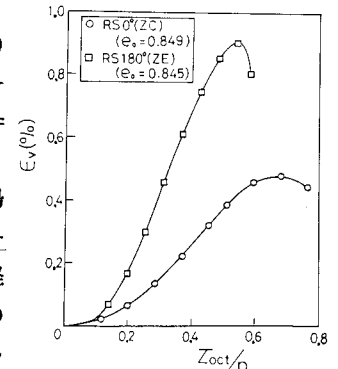


図-3 豊浦砂の排水三軸試験結果

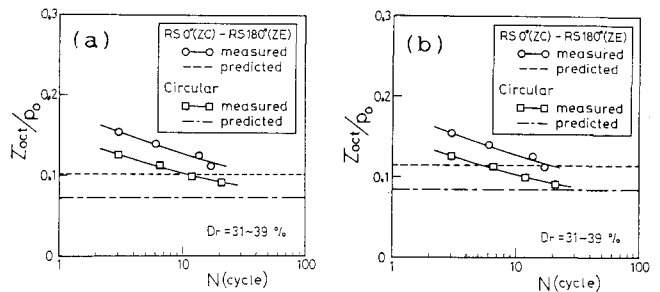


図-4 応力比~繰返し回数関係の実測値と下限値の予測値