

# 液状化強度の「下限値」の簡便な推定法

名古屋工業大学

正員 松岡 元、 学生員 ○松原 義仁  
学生員 原 康彦、 学生員 鈴木 敏之

地震時の地盤の変形挙動は繰返し単純せん断に近いと考えられる。そこで、非排水繰返し単純せん断時に図-1(a)に示す多数回(10~20回程度)繰返しても液状化を起こさない限界の液状化強度、すなわち液状化強度の「下限値」を粒子間摩擦(あるいは移動硬化理論の弾性域)に着目して、除荷を含む静的な排水せん断試験だけから求められる簡便推定法を提案した。そして、単純せん断試験機を用いて、3種の試料および現場採取凍結試料に対して実験を行ない、この推定法の妥当性と有用性について述べる。

## 1. 液状化強度の「下限値」の簡便推定法<sup>1)</sup>

非排水繰返しせん断試験の除荷時には、粒子間摩擦力が逆方向に発揮されるまで( $2X_{zu}$ の間、 $X_{zu}$ :単純せん断面上での摩擦係数に相当するせん断・有効垂直応力比)、粒子は滑動しにくく塑性ひずみの発生量は少ないと考えられる(この部分は移動硬化理論の弾性域とみなされる)。したがって、図-1(b)に示すように応力比振幅を $X_{zu}$ として非排水繰返しせん断試験を行なうとA~B間を上下することになる。このことを非排水繰返しせん断に対応させれば、図-1(c)に示すようにdenseな試料およびlooseな試料に対して、それぞれ有効応力経路が多数回繰返しても原点方向へ進まない限界の応力状態(せん断・有効垂直応力比で $X_{zu}$ 以下)が考えられる。例えば、図-1(c)でdenseな試料の場合にはa→cへ載荷したのちに繰返せばc→f間を上下することになる。したがって、denseな試料に対しては $\tau_{q2}/\sigma'_{z0}$ 、looseな試料に対しては $\tau_{q3}/\sigma'_{z0}$ が図-1(a)でいう「下限値」となる。ここでは、第一載荷時の有効応力経路の原点方向への入り込みを考慮せず、近似的に $\tau_{q1}/\sigma'_{z0}$ ( $=X_{zu}$ )を「下限値」とみなした。しかし、looseな試料のように入り込みを考慮する必要がある場合には、非排水条件を表す次式によって考える<sup>2)</sup>。

$$\epsilon_v^S + \frac{C_S}{1+e_0} \cdot \log_{10} \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon_v^S$ は排水せん断時の体積ひずみ、 $C_S$ は膨張指数である。式(1)より、排水せん断時に単純せん断面上のせん断・有効垂直応力比が $X_{zu}$ となったときの体積ひずみ $\epsilon_v^S$ から $\sigma'_z$ の入り込み量が求まる。そして、 $\tau_q$ ( $=X_{zu} \times \sigma'_z$ )が決まり、「下限値」 $\tau_q/\sigma'_{z0}$ が推定できる。

## 2. 実験方法および用いた試料

非排水条件を再現するために図-2の単純せん断試験機の概要図に示すようにボルトで鉛直方向の変位、つまり体積変化を起こさないようにし、等体積条件のもとで繰返しせん断を行なった。また図中のスプリングは上載荷板の自重を受け持っている。供試体寸法は直径7cm、高さ約2.8cmの円柱形で、今回用いた試料は豊浦砂( $D_{50}=0.2$ mm,  $U_C=1.3$ ,  $G_S=2.65$ ,  $\sigma'_{z0}=200$ kN/m<sup>2</sup>もとの $K_0$ 圧密終了時の間隙比 $e_0 \approx 0.71$ )、富士川砂( $D_{50}=0.4$ mm,  $U_C=3.2$ ,  $G_S=2.73$ ,  $e_0 \approx 0.71$ )、ガラスビーズ(粒径1.0mm~1.4mm,  $G_S=2.52$ ,  $e_0 \approx 0.69$ )の3種と、ある現場でトリプルチューブサンプラーによって採取し凍結された砂試料(K砂、 $D_{50}=0.31$ ,  $U_C=2.0$ ,  $G_S=2.70$ ,  $e_0 \approx 0.71$ )である。

## 3. 実験結果による検証

図-3(a)は豊浦砂の非排水単純せん断試験から得られた除荷を含む応力比・せん断ひずみ関係である。この除荷部の直線部分(弾性域)の長さ0.20の半分0.10が図-1で示した $X_{zu}$ にあたり、「下限値」に相当する。図-3(b)は繰返し応力比 $\tau_{cy}/\sigma'_{z0}=0.10$ で等体積繰返しせん断試験を行なったときの有効応力経路を示したもので液状化の定義を両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DA}=15\%$ とすれば、液状化するまでに73回を要している。図-3(c)は $\tau_{cy}/\sigma'_{z0}=0.125$ で行なった結果で12回で液状化している。地震時の繰返し回数は10~20回と考えられるので、液状化強度の「下限値」として $\tau_q/\sigma'_{z0}=0.10$ は妥当な値と考えられる。また図-4より、looseな豊浦砂についても直線部分に関しては0.20と同じ値になる。この直線部分を客観

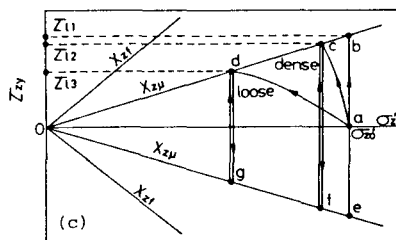
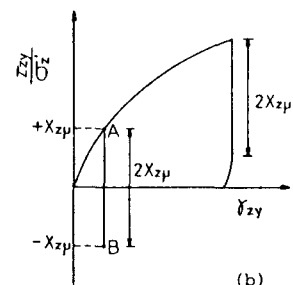
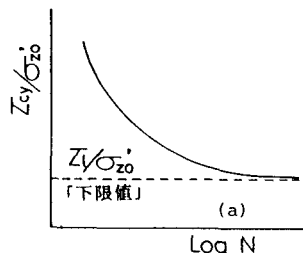


図-1 液状化強度の「下限値」の意味

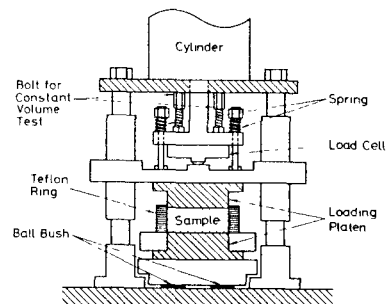


図-2 単純せん断試験機の概要図

的に決定するため、図-5に示すように載荷終了時からの応力比・せん断ひずみの変化量を両対数紙上にプロットし、その折れ曲がり点をもって決めることとした。また、富士川砂、ガラスビーズについても「下限値」は共に0.09となったが、その値が妥当であることがそれぞれ実験的に検証されている。

次に、現場採取凍結試料K砂を凍結したままセットした乱さない状態での実験結果を図-6に示している。同図(a)より求まる直線部分0.16の半分0.08

が「下限値」となる。同図(b)は $\tau_{cy}/\sigma'_{z0} = 0.08$ で行なった結果で液状化するまでに、51回を要しているが、同図(c)の $\tau_{cy}/\sigma'_{z0} = 0.10$ では14回で液状化しているのだ、0.08を「下限値」と考えてよさそうである。さらに、図-7は同じK砂について (a)乱して普通にセットした状態、(b)乱して looseにセットした状態での除荷を含む排水せん断試験結果を示している。除荷部を図-5のようにプロットし、直線部分を求めると共に0.16となり、乱さない状態の図-6(a)と同じ値を示すことは興味深い。また、三軸試験と単純せん断試験で得られる応力比の間の関係として次式が提案されている<sup>3)</sup>。

$$\frac{\tau_{lg}}{\sigma'_{lc}} = \frac{1 + 2K_0}{3} \cdot \frac{\sigma'_{dl}}{2\sigma'_0} \quad (2)$$

$\tau_{lg}/\sigma'_{lc}$  は単純せん断試験における応力比、 $\sigma'_{dl}/2\sigma'_0$  は三軸試験における応力比、 $K_0$  は静止土圧係数である。ここで、乱さない状態でのK砂の振動三軸試験結果から三軸試験の「下限値」を決めると $\sigma'_{dl}/2\sigma'_0 \approx 0.14$ となり、式(2)より、 $K_0$  を0.4とすれば単純せん断試験での「下限値」 $\tau_{lg}/\sigma'_{lc} \approx 0.08$ となる。この値は今回の簡便推定法より得られた値とよく一致している。

以上の一連の実験結果より、攪乱、不攪乱を問わず排水単純せん断除荷時の直線部分の半分の液状化強度の「下限値」とほぼみなせることが検証された。また、今回の4種の試料に対して「下限値」が全てほぼ0.1になることも興味深い。

#### 謝辞

富士川砂を分けて頂いた東大石原研究室 東郷郁生講師、現場採取凍結試料(K砂)を分けて頂いた基礎地盤コンサルタント名古屋出張所古長孟彦所長に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 松岡他 (1985) : 第20回土質工学研究発表講演集, 244, pp.623-624.
- 2) Matsuoka, H., Koyama, H. and Yamazaki, H. (1985) : S&F, Vol.25, No.1, pp.27-42.
- 3) 石原研而 (1982) : 土質力学の基礎, 鹿島出版社, pp.262-265.

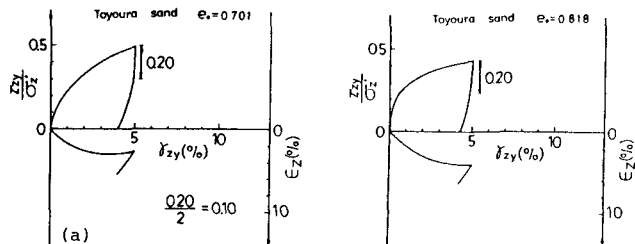


図-4 looseな豊浦砂の除荷を含む排水単純せん断試験結果

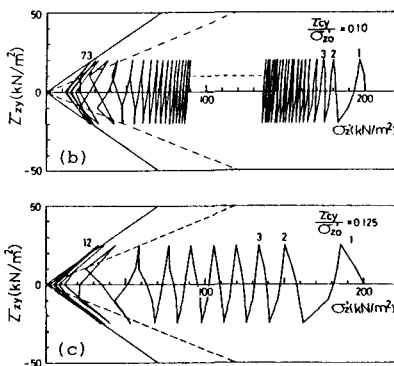


図-3 豊浦砂の液状化強度の「下限値」の簡便推定法と等体積繰返し単純せん断時の有効応力経路

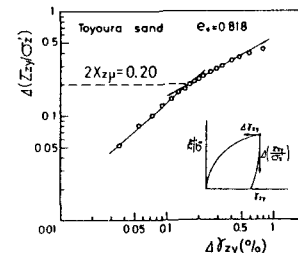


図-5 除荷部の応力・ひずみ関係による「下限値」の決定法

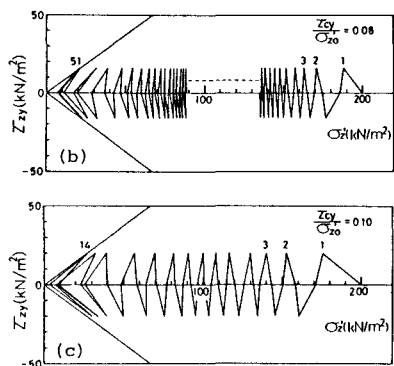
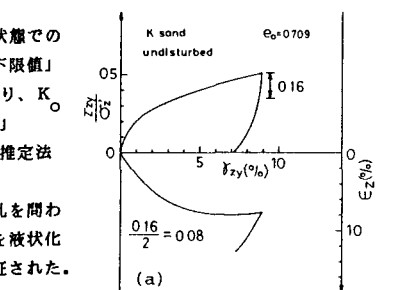


図-6 乱さないK砂の液状化強度の「下限値」の簡便推定法と等体積繰返し単純せん断時の有効応力経路

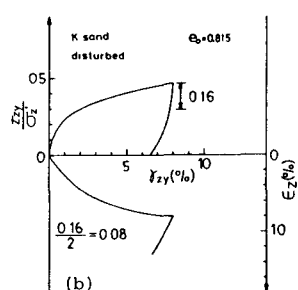
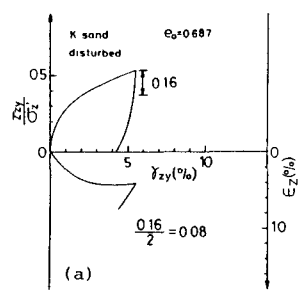


図-7 K砂の(a)乱した状態、(b)乱して looseにした状態での除荷を含む排水単純せん断試験結果