

III-A 36

砂地盤の流動ポテンシャル

東京大学工学部 正会員 吉嶺充俊
 東京理科大学理工学部 正会員 石原研而
 元東京大学工学部学生 内田陽介

1. 砂の流動ポテンシャル

土の流動とは、せん断抵抗が低下しつつせん断ひずみが増大する不安定な変形とそれに引き続く定常変形の状態である。ゆるい砂を非排水定速せん断したとき、ピーク強度から極小強度状態(変相状態、準定常状態)に至る過程に流動が観測される。ここでは、砂を等方圧密状態から非排水定速せん断したときの最大過剰間隙水圧比 $u_f = (1 - p_{PT}'/p_c') \times 100$ を流動ポテンシャルと定義する。 p_c' と p_{PT}' は初期状態および変相状態における平均有効主応力である。一般に、流動ポテンシャル u_f は p_c' と砂の相対密度 D_r の関数である。すなわち、 $u_f = u_f(p_c', D_r)$ 。また、 u_f と準定常状態での地盤の残留応力比 S_u/σ_v' の間には1対1の関係がある。

$$\frac{S_u}{\sigma_v'} = \frac{(1 + 2K_0) \sin \phi_s \cos \phi_s}{3 + (2b_s - 1) \sin \phi_s} \left(1 - \frac{u_f}{100} \right) \quad (1)$$

σ_v' は地盤の鉛直有効上載圧、 ϕ_s と b_s は準定常状態での内部摩擦角と中間主応力係数である。

2. 豊浦砂の単純せん断試験

砂の非排水せん断特性はせん断モードによって大きく変化する[1]。ここでは広い様な傾斜地盤の流動などの代表的な変形状態を考え、単純せん断試験を行った。中空ねじりせん断試験機を用い、乾燥堆積法により作成した豊浦標準砂の供試体(外径 10cm, 内径 6cm, 高さ 20cm)に対し、供試体高さと同体積の変化および内セル体積変化を拘束してねじりせん断を加えた。図1は、初期拘束圧 $p_c' = 100 \text{ kPa}$ に関する変相状態を示したものである。単純せん断特性は三軸圧縮せん断と三軸伸張せん断の中間に位置することがわかる。さらに、初期拘束圧 $p_c' = 50 \sim 400 \text{ kPa}$ の条件で単純せん断試験を行い、豊浦砂の密度と流動ポテンシャル u_f の関係を図2にまとめた。この試験条件範囲では p_c' の影響はあまりみられない。また、砂の密度や初期圧密応力比などの試験条件によらず、 $\phi_s = 33^\circ$ 、 $b_s = 0.25$ となることがわかった。

3. N 値と流動ポテンシャルの関係

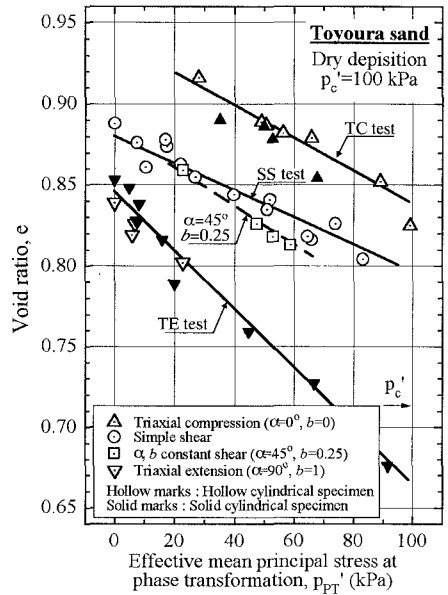


図1 豊浦砂の変相線

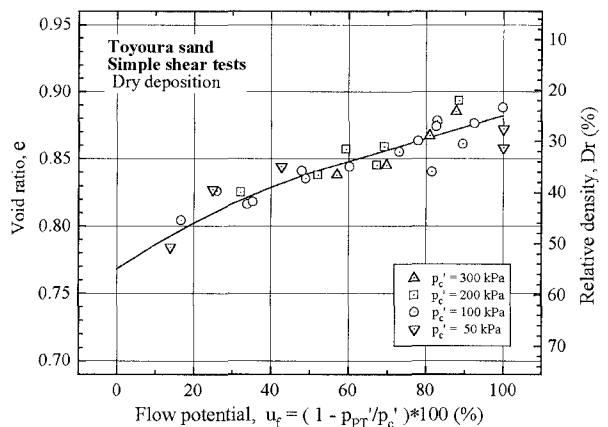


図2 単純せん断時の豊浦砂の流動ポテンシャル

相対密度・有効上載圧と N 値の関係として Skempton の式を用いる。

$$N = \left(a + \frac{b}{98} \sigma_v' [kPa] \right) \left(\frac{Dr}{100} \right) \quad (2)$$

a と b は土の粒径によって決まる定数であり、豊浦砂に関しては $a=33$, $b=37$ とする[2]。図 2 によって得られた Dr と u_f の相関を式(2)へ代入すれば N 値を u_f の関数として表すことができる。豊浦砂の単純せん断時の N 値と u_f の相関を図 3 に示した。いろいろな土に対してこのような相関を求めておけば、N 値から地盤の流動ポテンシャルを簡易に推定できる。

4. 流動ポテンシャルによる地盤の流動評価

室内せん断試験や標準貫入試験から流動ポテンシャル u_f が推定できれば、次のように地震時の地盤の流動評価を行うことができる。

- 1) 完全流動 $u_f = 100$ のとき、著しい軟化とともに過剰間隙水圧が 100% まで上昇し、土は残留強度ゼロの液体状態で流動する。傾斜地盤は完全に水平となるまで流動する。
- 2) 限定流動 地震時の液状化の際、残留強度 S_u が重力による静的荷重 τ_{st} より小さいと流動が発生する。 $\tau_{st} > S_u$ を式(1)へ代入すると、流動の発生条件は次のようになる。

$$u_f > \left(1 - \frac{3 + (2b_s - 1) \sin \phi_s}{(1 + 2K_0) \sin \phi_s \cos \phi_s} \frac{\tau_{st}}{\sigma_v'} \right) \times 100 \quad (3)$$

単純せん断時には $\phi_s = 33^\circ$, $b_s = 0.25$ とし、また $K_0 = 0.5$ を仮定すると限定流動の発生条件は、

$$100(1 - 3.0 \tau_{st} / \sigma_v') < u_f < 100 \quad (4)$$

ひとたび流動が発生すると振動終了後も流動は継続し、静的せん断荷重が残留強度と釣り合うまで流動は進行する。

- 3) サイクリックモビリティ 条件式(3)が満たされないとき流動は発生せず、動的載荷の終了と同時に地盤の変形も終了する。サイクリックモビリティの発生条件は動的な問題であり、土の静的な性質に関する流動ポテンシャル u_f とは関係ないので、図 2 に示した Seed の限界 N 値等によって判定する。なお、条件式(3)が満たされていても地震動が小さく間隙水圧が十分に上昇しないときには流動は発生しない。すなわち、サイクリックモビリティの発生は流動発生の必要条件である。

図 4 は、流動ポテンシャルを用いて N 値と地盤流動特性の関係を模式的に表したものである。

参考文献

- [1]吉嶺・石原・バルガス."主応力方向と中間主応力の大きさが砂の非排水せん断特性に与える影響" 第 30 回土質工学研究発表会, pp501-504, 1995. [2] Ishihara, K. "Liquefaction and flow failure during earthquakes" Geotechnique, Vol.43, No.3, pp351-415, 1993.

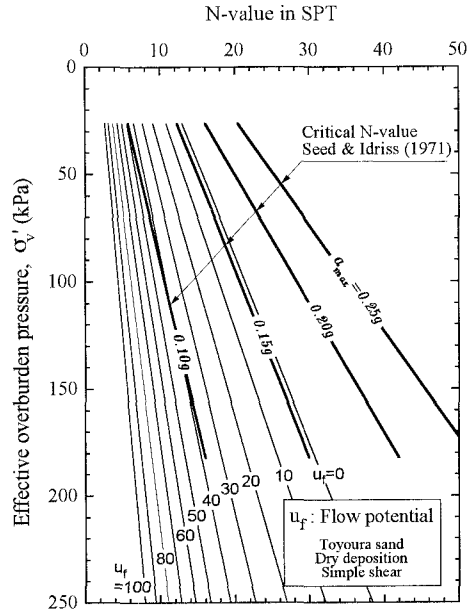


図3 豊浦砂の単純せん断時の流動ポテンシャルと N 値の相関

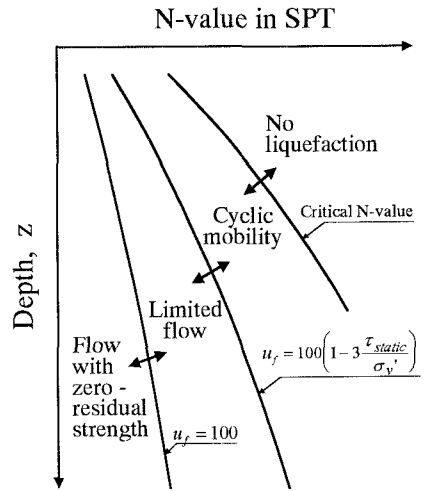


図4 N 値による地盤流動の評価