

III-54

シークエンス効果を考慮した砂の非排水繰返し有効応力経路の予測法

名古屋工業大学 学生員 ○村田卓則、名古屋工業大学 正員 松岡 元
大成建設㈱ 正員 原 康彦、名古屋市 廣見裕明

地震時の不規則な応力波の下での非排水繰返し有効応力経路は、大小様々なせん断応力の順序の影響、すなわちシークエンス効果を受ける。そこで、シークエンス効果を考慮した非排水繰返し有効応力経路の予測を行うため、図-1に示すような除荷から載荷に至る一連の両振り繰返し有効応力経路を、除荷開始時(初期載荷時を含む)の粒子構造の差異を考慮した砂の構成式に基づいて解析した。ここでは、繰返し単純せん断変形を想定し、単純せん断面上で応力 $\sim$ ひずみ関係式を立てて予測を試みるとともに、等体積繰返し単純せん断試験結果と比較した。

1. 不規則な繰返しせん断応力下の非排水有効応力経路の予測法¹⁾

まず、単純せん断面上のせん断・有効垂直応力比 $X_z (= \tau / \sigma'_z)$ からせん断ひずみ γ_z 間の双曲線関係を式(1)で、応力比 $\sim$ ひずみ増分比関係を式(2)で表わす。

$$\gamma_z = k_{sz} \cdot \frac{X_{zf} \cdot X_z}{X_{zf} - X_z} \quad (1) \quad X_z = \lambda_z \cdot \left(-\frac{d\epsilon_z}{d\gamma_z} \right) + \mu_z \quad (2)$$

ここに、 k_{sz} は双曲線の初期接線勾配の逆数を、 X_{zf} は単純せん断面上の破壊時の応力比を、 μ_z は変相応力比を意味する。式(1)、(2)より、垂直ひずみ増分 $d\epsilon_z$ は式(3)で、有効垂直応力 σ'_z が減少するときの K_0 膨張による垂直ひずみ増分 $d\epsilon_z^c$ は、 C_s を膨張指数、 e_0 を初期間隙比として式(4)で表わされる。

$$d\epsilon_z = k_{sz} \cdot \frac{\mu_z - X_z}{\lambda_z} \cdot \frac{X_{zf}}{(X_{zf} - X_z)^2} \cdot dX_z \quad (3) \quad d\epsilon_z^c = \frac{0.434 \cdot C_s}{1 + e_0} \cdot \frac{d\sigma'_z}{\sigma'_z} \quad (4)$$

そこで、非排水せん断時の有効垂直応力 σ'_z は、式(3)、(4)と非排水条件 $d\epsilon_z + d\epsilon_z^c = 0$ より、次式で与えられる。

$$\sigma'_z = \sigma'_{z0} \cdot \exp \left[-\frac{1 + e_0}{0.434 \cdot C_s} \cdot k_{sz} \cdot \lambda_z \cdot X_{zf}^2 \cdot \left\{ \frac{(\mu_z - X_{zf}) \cdot (X_z + X_{z0})}{(X_{zf} - X_z) \cdot (X_{zf} - X_{z0})} + \ln \left(\frac{X_{zf} + X_{z0}}{X_{zf} - X_z} \right) \right\} \right] \quad (5)$$

ここに、 σ'_{z0} 、 X_{z0} はそれぞれ除荷開始時の有効垂直応力、有効応力比を意味する。式(5)中の $C_s / (1 + e_0)$ 、 λ_z は非排水単純せん断試験から求められないので、 $(1 + e_0) \cdot k_{sz} / (C_s \cdot \lambda_z)$ を1つのパラメーター A に置き換えて計算を行う。

さて、土は有効応力比に支配される材料であるとの考えから、図-1に示すように、ある有効応力比から除荷されて載荷側の破壊線に至る非排水単純せん断時の有効応力経路が、基本的に原点に関して相似形であることに着目する。²⁾

図-2は、繰返しせん断応力 $\tau_p = 0.25$ (kgf/cm²) のもとでの豊浦砂の等体積繰返し単純せん断試験結果を、除荷開始時の有効垂直応力 σ'_{z0} で正規化した過剰間隙水圧増分 $\Delta u / \sigma'_{z0}$ とせん断応力 τ / σ'_{z0} の間で整理した図を示している。

図中の点線は初期の第1サイクルを、破線は変相線 ($\tau / \sigma'_z = 0.42$) を、一点鎖線は破壊線 ($\tau / \sigma'_z = 0.80$) を示している。同図より、除荷開始時の有効応力比が異なれば、粒子構造に差異が生じるため、各有効応力経路は点(1.0, 0) (有効応力経路の原点を意味する) に関して相似形にならないことがわかる。そこで、除荷開始時の有効応力比 X_{z0} によってパラメーター A を変化させた式(5)による計算結果を図-3に示す。図-3は図-2に示す実測値の傾向をよく説明しているため、これに基づいて有効応力経路を予測することを試みる。ここで、豊浦砂の種々のせん断応力のもとでの等体積繰返し単純せん断試験結果を、除荷開始時の有効応力比 $\tau_p / \sigma'_{z0} (= X_{z0})$ と除荷終了時 ($\tau = 0$) の過剰間隙水圧増分 $\Delta u_p / \sigma'_{z0}$ の関係で整理すると図-4を得るが、 $\tau_p / \sigma'_{z0} \sim \Delta u_p / \sigma'_{z0}$ 関係が2本の直線ではほぼ近似できることに着目する。そして、この関係図より、すべての除荷開始時の有効応力比 $\tau_p / \sigma'_{z0} (= X_{z0})$ に対して $\Delta u_p / \sigma'_{z0}$ 、すなわち図-3

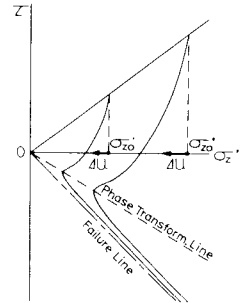


図-1 非排水有効応力経路の原点に関する相似性

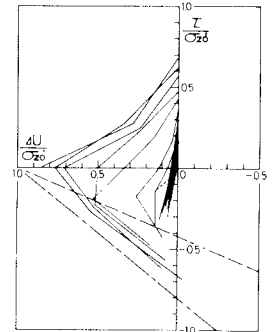


図-2 除荷開始時の有効垂直応力 σ'_{z0} で正規化した過剰間隙水圧増分 $\Delta u / \sigma'_{z0}$ とせん断応力 τ / σ'_{z0} の関係

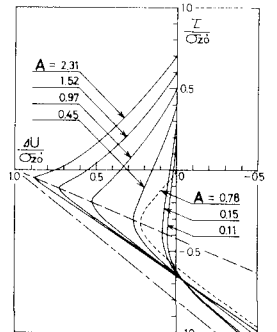


図-3 単純せん断面上の応力 $\sim$ ひずみ関係式を用いた解析

の横軸上の $\Delta u/\sigma'_{zo}$ の値を定め、その点を通るようにパラメーターAの値を決定するものとする。なお、図-4において第1の直線が横軸の0.1を通り原点を通っていないのは、逆方向せん断時に発揮される粒子間摩擦のためと考えられる。そのため、図-3の除荷開始時の有効応力比 $\tau/\sigma'_{zo}=0.10$ 以下の場合は $A=0$ となって載荷側においても過剰間隙水圧が発生しないことになる。そこで、載荷側で過剰間隙水圧が発生するよう、ここでは便宜上除荷開始時の有効応力比 $\tau/\sigma'_{zo}=0.12$ 以下の場合は $\tau/\sigma'_{zo}=0.12$ の時のパラメーターAの値を代用することとした。一方、載荷時においては、いままでに経験したことのない大きな有効応力比を受けた場合（第1サイクル目を含む）には、バージン的な粒子構造の変化を起こし、大きな過剰間隙水圧が生じると考えられる。そこで、せん断応力の正負それぞれの領域で、以前に受けた有効応力比を越えた時点において、パラメーターAの値を図-3中に点線で示す第1サイクル時のパラメーターに変えて、点線を点(1.0, 0)に関して相似形に引き伸ばした線に乗り移るものと考えた。ただし、変相線を越える場合には、すべての粒子構造は近くなると考えられるので、乗り移りは考えないものとした。

このように、本予測法の特徴は、粒子構造の変化に着目し、繰返される有効応力比の大小によってパラメーターAの値を変化させるとともに、未経験の大きな有効応力比を受ける場合には、初期の第1サイクル時の有効応力経路への乗り移りを考慮することにある。したがって、繰返されるせん断応力の大小ではなく、有効応力比の大小によって非排水繰返し有効応力経路が規定されることになるので、せん断応力の順序の影響（シークエンス効果）は当然評価される。

2. 等体積繰返し単純せん断試験結果と予測値の比較

実験は繰返し単純せん断試験機を用い、飽和豊浦砂($e_0=0.69\sim 0.71$)と飽和富士川砂($e_0=0.67\sim 0.69$)を試料として等体積条件で行った。図-5, 6, 7は十勝沖地震時の加速度波形をせん断応力波形と見なして行った試験結果と予測値の比較を示している。どの場合においても、半波毎にせん断応力が不規則に変化することによる過剰間隙水圧の発生の様子を的確に表現しており、また試料が異なっても本予測法が有用であることを表わしている。

以上より、本予測法によれば、ある1つの適当な一様振幅の非排水繰返し単純せん断試験を行い、図-3に示すように除荷開始時の有効応力比に対してパラメーターAを決定することによって、シークエンス効果を考慮した非排水繰返し有効応力経路の予測が可能となる。

謝辞 適切な助言を頂いた本学山内 利彦教授、中井 照夫助教授、

また富士川砂を分けて頂いた東大石原研究室に謝意を表します。

参考文献 1) 松岡 他(1987): 第22回土質工学研究発表会(投稿中)。

2) 松岡 他(1987): 昭和61年度土木学会中部支部講演概要集, III-8。

3) 松岡 他(1985): 第20回土質工学研究発表講演集, 244, pp. 623-624。

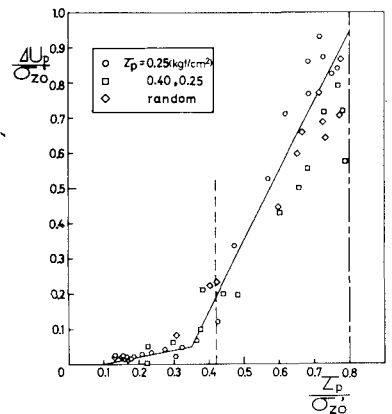


図-4 除荷開始時の有効応力比 τ_p/σ'_{zo} ($=X_{zo}$)と除荷終了時($\tau=0$)の過剰間隙水圧増分 $\Delta u_p/\sigma'_{zo}$ の関係

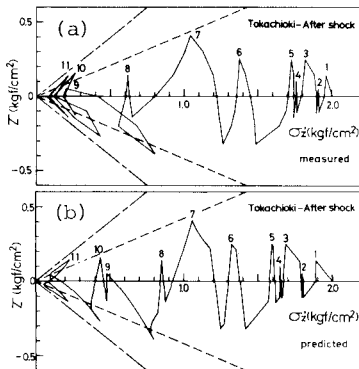


図-5 豊浦砂の十勝沖地震の余震の地震波をシミュレートした場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値

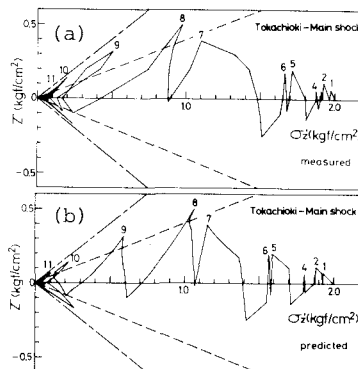


図-6 富士川砂の十勝沖地震の本震の地震波をシミュレートした場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値

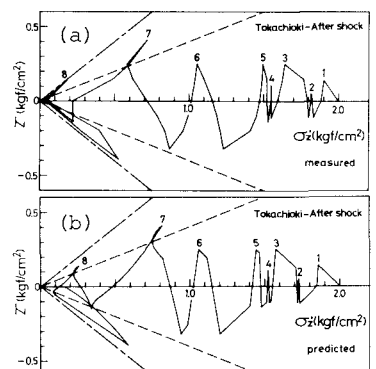


図-7 富士川砂の十勝沖地震の余震の地震波をシミュレートした場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値