

III-1

ランダムな応力波を受けた砂の非排水有効応力経路の予測

名古屋工業大学 大学院
名古屋工業大学

学生員 ○ 原 康彦
正 員 松岡 元

地震時に地盤は繰返し単純せん断的な変形をして液状化に至ると考えられる。そこで地震時の応力波に対する単純せん断変形下の有効応力経路、すなわち過剰間隙水圧の変化を予測できれば、その地盤のその応力波に対する液状化発生の有無を判定することができる。そこで、前報の有効応力経路の原点に関する相似性に基づき、半サイクル毎のせん断応力の変化を含むランダムな応力波に対してシーケンス効果も考慮して、有効応力経路を予測できる方法を提案し、実測値と比較した。

1. 非排水有効応力経路の相似性に着目した有効応力経路の予測法

非排水繰返しせん断時の有効応力経路を、図-1に示すように半サイクル毎に、さらに載荷時と除荷時に分け、有効応力経路の原点に関する相似性に着目すれば、次の関係式を得る。

$$\tau_{p1}/\sigma'_{z\ell 1} = \tau_{p2}/\sigma'_{z\ell 2}, \Delta u_{\ell 1}/\sigma'_{z\ell 1} = \Delta u_{\ell 2}/\sigma'_{z\ell 2} \quad \tau_{p1}/\sigma'_{zu1} = \tau_{p2}/\sigma'_{zu2}, \Delta u_{u1}/\sigma'_{zu1} = \Delta u_{u2}/\sigma'_{zu2}$$

ここで τ_p は半サイクル中の最大のせん断応力を、添字 ℓ は載荷時を、添字 u は除荷時を示す。上記の関係に基づいて各種の豊浦砂の非排水繰返し単純せん断試験結果を整理したのが図-2, 3である。図中の破線、一点鎖線はそれぞれ変相線、破壊線を示している。

図-2, 3は有効応力経路の相似性に基づけば一つのユニークな関係になるはずであるが、シーケンス効果により変相線に至るまでは一つの関係にまとめることはできない。そこで次の3つの場合に分類した。①シーケンス効果を考慮しなくてもよい場合：一様振幅のように徐々に有効応力比が変化し、間隙水圧が徐々に発生する。②初めて大きなせん断応力を受ける場合（第1サイクル目を含む）：有効応力比が大きく変化し、大きな塑性ひずみが発生することにより間隙水圧も大きく発生する。③急にせん断応力が小さくなる場合：今までに受けた有効応力比よりも小さな有効応力比になる時は、弾性的で原点に関する相似性に着あり間隙水圧はあまり発生しない。以上のように3つの場合に分類すれば、それぞれ図-2, 3に①, ②, ③で示すような直線関係に近似することができ、シーケンス効果も表現することができる。図-2, 3の直線群を式示すると次のようになる。

【載荷側】

$$\Delta u_{\ell}/\sigma'_{z\ell} = A_1 (\tau_p/\sigma'_{z\ell})$$

$$(\textcircled{1} A_1 = 0.2, \textcircled{2} A_1 = 0.8, \textcircled{3} A_1 = 0.05)$$

$$\Delta u_{\ell}/\sigma'_{z\ell} = 1 - 1/0.42 \cdot (\tau_p/\sigma'_{z\ell})$$

$$\Delta u_{\ell}/\sigma'_{z\ell} = -1.1 \cdot (\tau_p/\sigma'_{z\ell} - 0.42)$$

【除荷側】

$$\Delta u_u/\sigma'_{zu} = A_2 (\tau_p/\sigma'_{zu} - 0.1)$$

$$(\textcircled{1} A_2 = 0.2, \textcircled{2} A_2 = 0.4, \textcircled{3} A_2 = 0.1)$$

$$\Delta u_u/\sigma'_{zu} = 2.0 \cdot (\tau_p/\sigma'_{zu}) - 0.65$$

ここで、①, ②, ③の直線の勾配の比は実験結果に基づいて載荷側では、1 : 4 : 1/4、除荷側では、1 : 2 : 1/2 と定めている。これらの式を組み合わせることにより、種々のランダムな応力波に対する有効応力経路、すなわち過剰間隙水圧の変化を予測し、液状化発生の有無を判定することができる。

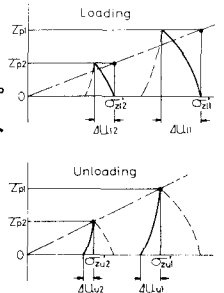


図-1 有効応力経路の

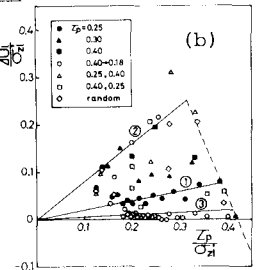


図-2 載荷側のみに着目した有効応力比 $\tau_p/\sigma'_{z\ell}$ と 間隙水圧 $\Delta u_{\ell}/\sigma'_{z\ell}$ の関係 (b) 図は一部拡大したもの)

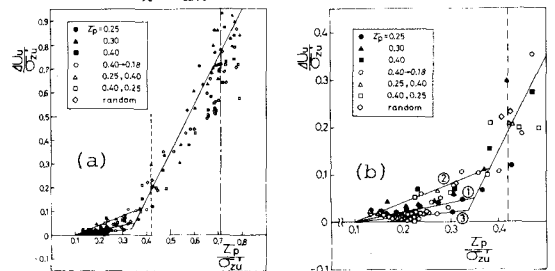


図-3 除荷側のみに着目した有効応力比 τ_p/σ'_{zu} と 間隙水圧 $\Delta u_u/\sigma'_{zu}$ の関係 (b) 図は一部拡大したもの)

2. 実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て等体積試験で行ない、供試体は圧密終了時に間隙比が0.71になるように作製された飽和豊浦砂である。図-4 (a)は $\tau_p=0.25(\text{kgf/cm}^2)$ における実測の有効応力経路であり、同図(b)は予測した有効応力経路である。この場合 τ_p が変化しないため、第1サイクル目だけ②の直線を用い、それ以降は①の直線を用いている。なお、図中に示す四角で囲んだ数字は有効応力経路が破壊線に当たった時の波数である。図-5 (a)は $\tau_p=0.40(\text{kgf/cm}^2)$ で1サイクルせん断した後、 $\tau_p=0.18(\text{kgf/cm}^2)$ に変えて繰返しせん断を行なった場合の実測値で、同図(b)はその予測値である。2波目以降は急にせん断応力が小さくなるため予測においては③の直線を用い、最初に受けた有効応力比を越えた時点で①の直線を用いている。なお、応力履歴はせん断応力の正(上側)と負(下側)で別々に考えている。図-6 (a)は $\tau_p=0.40(\text{kgf/cm}^2)$ と $\tau_p=0.25(\text{kgf/cm}^2)$ のせん断を1サイクル毎に交互に繰返した場合の実測値であり、同図(b)はその予測値である。2波目は③の場合であり、有効応力経路はあまり入り込まない。また、4波目も③の場合であるが、3波目で変相線を越えているため有効応力経路は大きく入り込むようになる。そのため予測においては②の直線を用いている。図-7 (a)は τ_p を0.25, 0.25, 0.40, 0.20, 0.40, 0.25(kgf/cm^2)と1サイクル毎に変化させた場合の実測値であり、同図(b)はその予測値である。3波目は初めて大きなせん断応力を受ける②の場合であり、有効応力経路は大きく入り込む。また、4波目は図-6 (b)の4波目と同様に②の直線を用いている。

以上、4種類の実験結果について予測値と比較を行なったが、予測値は実測値の傾向をよく表現しており、破壊線に当たるまでの波数もよく一致している。以上より、本予測法によれば、ある一つの一様振幅の非排水繰返し単純せん断試験を行ない、図-2, 3に示す整理を

して直線群の式を求めておけば、他のあらゆる応力波に対して、かなりの精度で有効応力経路を予測できるものと思われる。

謝辞

日頃御援助いただいている
本学山内 利彦教授、有益な
助言をいただいた中井 照夫
助教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 松岡・山崎・松原・原(1985):
第20回土質工学研究発表
講演集, 243, pp.621-622.

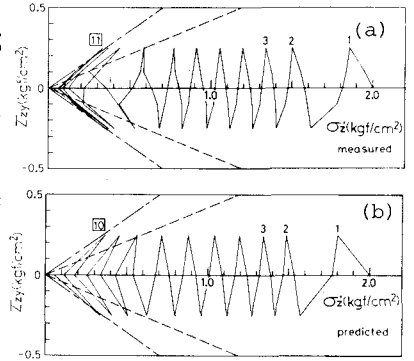


図-4 一定のせん断応力 $\tau_p=0.25(\text{kgf/cm}^2)$ のもとでの有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値

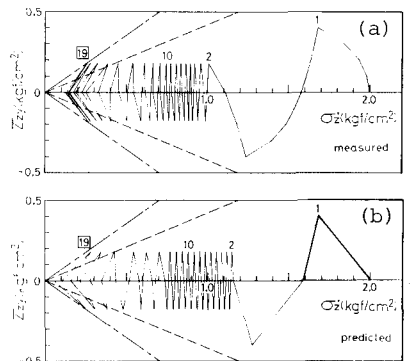


図-5 せん断応力 τ_p を $0.40(\text{kgf/cm}^2)$ から $0.18(\text{kgf/cm}^2)$ に変化させた場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値

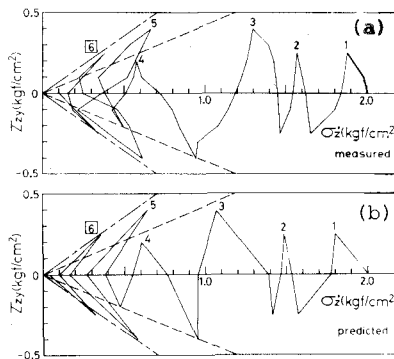


図-7 ランダムなせん断応力を受けた場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値

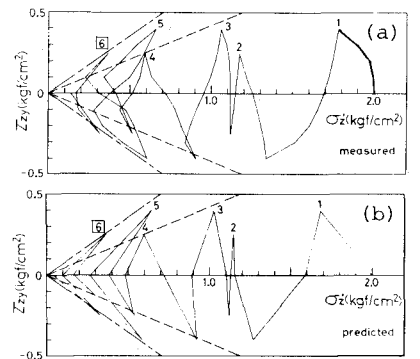


図-6 せん断応力 τ_p を $0.40(\text{kgf/cm}^2)$ と $0.25(\text{kgf/cm}^2)$ に交互に変化させた場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値