

不規則なせん断応力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 正員 松岡 元、 学生員 〇原 康彦  
 学生員 鷹見 裕明、 学生員 村田 卓則

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非排水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。しかし、地震時には大小様々なせん断応力が連続的に作用するので、その順序の影響(シークエンス効果)も合わせて考慮する必要がある。ここでは、有効応力経路の原点に関する相似性に着目し、1/4サイクル毎にせん断・垂直応力比に基づいたひずみの出方の評価を行うことにより、不規則な繰返しせん断応力を受けた砂の非排水有効応力経路を予測し、実測値と比較した。

1. 非排水有効応力経路の予測法

土は有効応力比に支配される材料であるとの考え方から、非排水繰返し単純せん断時の有効応力経路が基本的に図-1(a)に示すように原点に関して相似形であることに着目する。そして、図-1(b)、(c)のように除荷側と載荷側に分けて考察する。図-1(b)に示す除荷側では、除荷開始時の有効垂直応力  $\sigma'_{z0}$  で正規化された除荷終了時 ( $\tau=0$ ) の過剰間隙水圧増分  $\Delta u_p / \sigma'_{z0}$  と除荷開始時の有効応力比  $\tau_p / \sigma'_{z0}$  の間で整理を行った。また、図-1(c)に示す載荷側では、載荷開始時の有効垂直応力  $\sigma'_{z0}$  で正規化された刻々の過剰間隙水圧増分  $\Delta u / \sigma'_{z0}$  と刻々の応力比  $\tau / \sigma'_{z0}$  の間で、有効応力経路の相似性に着目した整理を行った。なお、図-1(b)に示す除荷側において、刻々の  $\Delta u$  で整理しなかったのは、除荷開始時の有効応力比  $\tau_p / \sigma'_{z0}$  が異なるときに有効応力経路の相似性が成立しなかったからである(データ省略)。

さて、飽和豊浦砂( $D_{50}=0.2 \text{ mm}$ ,  $U_c=1.3$ ,  $G_s=2.65$ , 圧密終了時の間隙比  $e_0=0.69\sim 0.71$ )を試料として、種々変化するせん断応力のもとで等体積繰返し単純せん断試験を行い、有効応力経路を求めた。図-2(a), (b)は、それぞれ、それらの試験結果の図-1(b)に示す除荷側の整理と図-1(c)に示す載荷側の整理を示したものである。なお、図中の破線は変相線( $\tau / \sigma'_z \approx 0.42$ )を、一点鎖線は破壊線( $\tau / \sigma'_z \approx 0.71$ )を示している。ここで、図-2(b)中の白いプロットは、①せん断応力の正負のそれぞれの領域で、いままで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)を表し、バージンのな粒子構造の変化を起こし、塑性的なひずみが発生し、大きな過剰間隙水圧が生じる(なお、この図では途中から大きな有効応力比を受ける場合には、最初からバージンのな状態として  $\sigma'_{z0}$  の値を補正している)。また、直前のせん断応力波によって変相線を越えている場合も、粒子構造が逆方向へ大きく変化するので、このケースに相当すると考えられる。図-2(b)中の黒いプロットは、②いままでに経験したことのある有効応力比を受けた場合を表し、粒子構造が大きく変化せず、塑性的なひずみがあまり発生せず、過剰間隙水圧もあまり生じない。なお、②の状態から①の状態へ移行する場合には、図-2(b)の②の線上のある応力比から①の線に平行に生じるものとし、変相線に到達後も相似性の考え方から変相線以降の直線(図-2(b)参照)に平行に生じるものと仮定した。

以上より、除荷側では変相線付近で折れ曲がる2つの直線で、載荷側では①、②と変相線以降の3つの直線で、それぞれ次式のように近似することができる(図-2(a), (b)参照)。

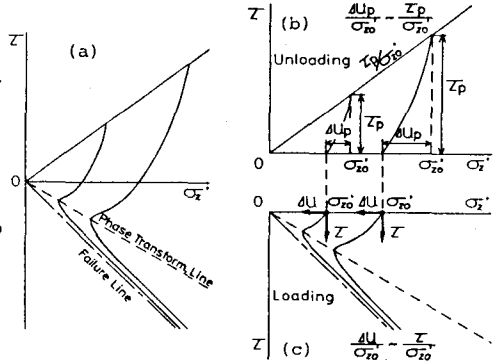


図-1 有効応力経路の原点に関する相似性に着目した過剰間隙水圧増分の整理法

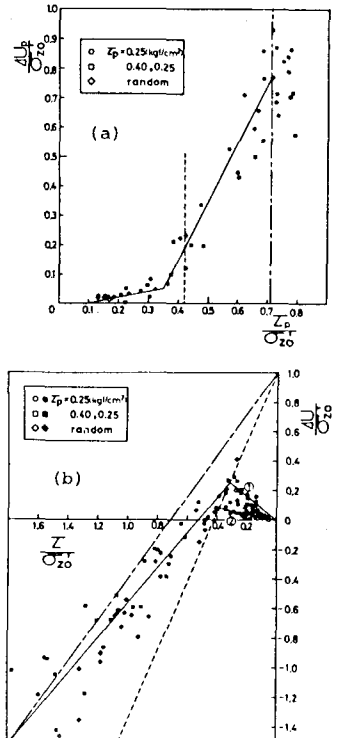


図-2 (a)除荷終了時の過剰間隙水圧増分  $\Delta u_p / \sigma'_{z0}$  と除荷開始時の有効応力比  $\tau_p / \sigma'_{z0}$  の関係と (b)載荷時の刻々の過剰間隙水圧増分  $\Delta u / \sigma'_{z0}$  と刻々の応力比  $\tau / \sigma'_{z0}$  の関係

(除荷側)

$$\tau_p/\sigma'_{z0} \leq 0.35: \Delta u_p/\sigma'_{z0} = 0.2(\tau_p/\sigma'_{z0} - 0.10) \quad (1)$$

$$\tau_p/\sigma'_{z0} > 0.35: \Delta u_p/\sigma'_{z0} = 2.0(\tau_p/\sigma'_{z0}) - 0.65 \quad (2)$$

(載荷側)

$$\textcircled{1} : \Delta u/\sigma'_{z0} = 0.8(\tau/\sigma'_{z0}) \quad (3)$$

$$\textcircled{2} : \Delta u/\sigma'_{z0} = 0.2(\tau/\sigma'_{z0}) \quad (4)$$

$$\text{変相線以降: } \Delta u/\sigma'_{z0} = -1.2(\tau/\sigma'_{z0}) + 0.63 \quad (5)$$

なお、除荷側において直線が原点を通っていないのは(式(1)参照)、逆方向せん断時に、粒子間摩擦が発揮される間は粒子が滑動しにくく、過剰間隙水圧が発生しないためと考えられる。

2. 等体積繰返し単純せん断試験結果と予測値の比較

図-3 (a)は1サイクル毎の最大のせん断応力 $\tau_p$ を0.25, 0.25, 0.40, 0.20, 0.40, 0.25 (kgf/cm<sup>2</sup>)と変化させた場合の有効応力経路の実測値を示し、同図(b)は予測した有効応力経路を示している。なお、予測は載荷・除荷終了時点、変相線上の点、および有効応力比が過去に受けたものより大きくなる時点で $\Delta u$ を決定して直線近似することにより行った。予測値は3波目で大きく入り込み、変相線を越えるため、4波目も大きく入り込む実測値の傾向をよく説明している。図-4 (a)は $\tau_p = 0.40$  (kgf/cm<sup>2</sup>)と0.25 (kgf/cm<sup>2</sup>)を1サイクル毎に交互に繰返した場合の実測値を示し、同図(b)はその予測値を示している。2波目は1波目に受けた有効応力比を越えないため、あまり過剰間隙水圧が発生しないのがみられるが、予測値は実測値のこのような傾向をよく表現している。図-5, 6は十勝沖地震時の2種類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結果の比較を示したものである。両ケースとも半波毎にせん断応力が変化することによる過剰間隙水圧発生の違いをほぼ適切に評価しており、この予測法の妥当性を表している。

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-2 (a), (b)に示す整理を行えば、他の不規則なせん断応力波に対する有効応力経路を予測することができることになる。

謝辞

日頃御援助頂いている本学山内利彦教授、有益な助言を頂いた中井照夫助教に謝意を表します。

参考文献

- 1) 原・松岡 (1986): 第41回土木学会年次講演概要集, III-1, pp. 1-2.

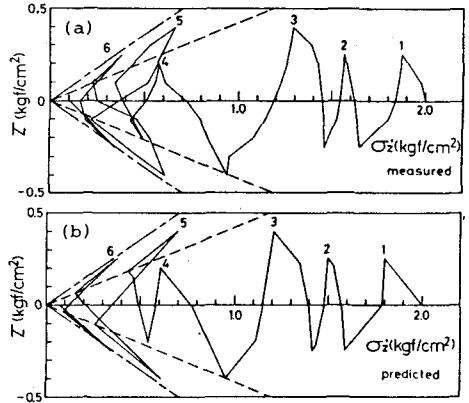


図-3 せん断応力 $\tau_p$ を0.25, 0.25, 0.40, 0.20, 0.40, 0.25 (kgf/cm<sup>2</sup>)と変化させた場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値

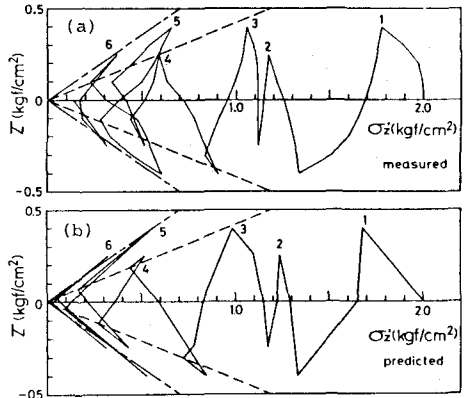


図-4 せん断応力 $\tau_p$ を0.40と0.25 (kgf/cm<sup>2</sup>)交互に変化させた場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値

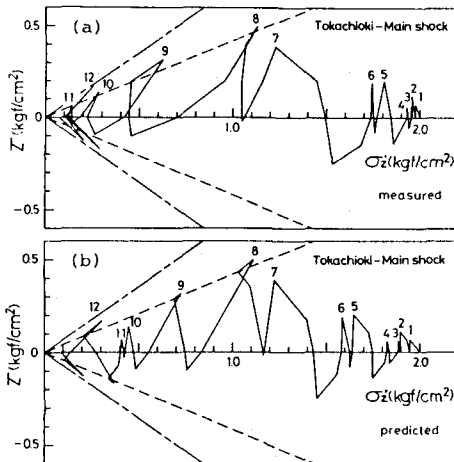


図-5 十勝沖地震の本震の地震波をシミュレートした場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値

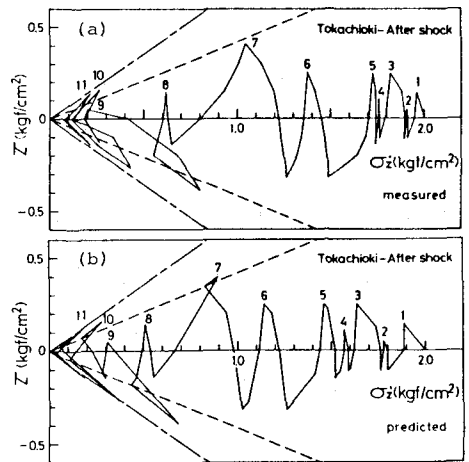


図-6 十勝沖地震の余震の地震波をシミュレートした場合の有効応力経路の(a)実測値と(b)予測値