

繰返し載荷を受ける飽和砂の状態量

九大工学部 山内豊聡 日本地研 下川明人
同上 ○坂井 晃 同上 福田久弥
同上 杉本洋一 同上 武野晟夫

1. まえがき

従来、繰返し非排水せん断によって生ずる過剰間隙水圧の発生量は、繰返し回数比や有効応力径路の二次曲線近似によって定式化されてきた。これらは、不規則外力にも適用されたが、主応力軸の回転をも含めた種々の応力径路に対する関係式を得るまでには至っていない。このため、石原・東畑¹⁾は、中空振りせん断装置を用いて種々の応力径路について実験を行ない、繰返しせん断によって発生する過剰間隙水圧は、単位体積当りのせん断仕事と現在のせん断応力によって一義的に定まり、相対密度・拘束圧・過圧密履歴の影響は受けるものの、応力径路には依存しないことを見出した。本研究は、Endochronic理論²⁾を用いて、相対密度・拘束圧・過圧密履歴の影響を統一的に表現できる関係式を求め、過剰間隙水圧に対する状態量について検討する。なお、実験データ(豊浦砂、中空振りせん断)のせん断仕事と過剰間隙水圧の値は、石原・東畑¹⁾の文献から得たものである。

2. せん断仕事 W_s と過剰間隙水圧 u の関係式

単位体積当りのせん断仕事 W_s は、次式で与えられる。
$$dW_s = \int (\sigma_i d\epsilon_{ij}) dv / V \quad \text{----- (1)}$$

ここで論議する関係式は、せん断応力が等方応力状態を通過する時点までに累積した W_s と u の値を用いた。

2-1 Endochronic理論の適用

砂における塑性ひずみの増加は、せん断ひずみによる不可逆的な土粒子骨格の再配列によって消散されるエネルギーに比例する。したがって、単位体積当りのせん断仕事 W_s とひずみ径路の長さは、応力やひずみに依存する係数を用いて次式で与えられる。
$$d(W_s/\sigma'_v) = F(\xi, \sigma'_v) d\xi \quad \text{----- (2)}$$

また、液状化過程における間隙水圧上昇は、載荷回に伴うエネルギー消散の増加に起因しているから、間隙水圧比増分 $d(u/\sigma'_v)$ は次式で表わされる。
$$d(u/\sigma'_v) = d(W_s/\sigma'_v) / f(W_s/\sigma'_v) \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 $f(W_s/\sigma'_v)$ を簡単な表現方法を用いて、 (W_s/σ'_v) の線形関数で表現すると、
$$f(W_s/\sigma'_v) = A\alpha \left\{ 1 + (1/A)(W_s/\sigma'_v) \right\} \quad \text{----- (4)}$$

A, α は定数。式(4)から、式(3)は
$$u/\sigma'_v = (1/\alpha) \ln \left\{ 1 + (1/A)(W_s/\sigma'_v) \right\} \quad \text{----- (5)}$$
これを W_s について書き直すと次式が得られる。

$$W_s = A\sigma'_v \left\{ \exp(\alpha u/\sigma'_v) - 1 \right\} \quad \text{----- (6)}$$

図-1、図-2は、それぞれ相対密度、拘束圧の違いによる W_s と u の関係を示したものであり、実線で示した計算値との比較から式(6)の妥当性が示された。

2-2 定数 A, α

図-1、図-2から、定数 A は拘束圧 σ'_v のみに依存する定数であり、また、定数 α は相対密度 D_r に依存する定数である。

$$A = g(\sigma'_v), \quad \alpha = h(D_r) \quad \text{----- (7)}$$

図-3は、 A と σ'_v の関係を示したものである。この図から、 A は拘束圧の線形関数として表わされ、せん断仕事 W_s は拘束圧の二次式に比例する。

$$A = g(\sigma'_v) = a\sigma'_v + b = 4.625 \times 10^{-7} \sigma'_v + 1.2 \times 10^{-4} \quad \text{----- (8)}$$

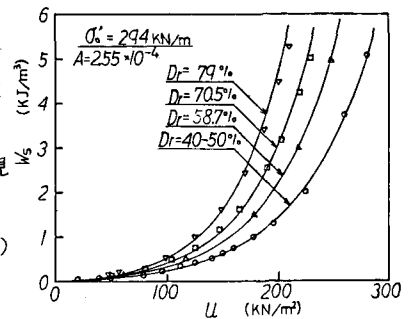


図-1 相対密度の違いによる W_s と u

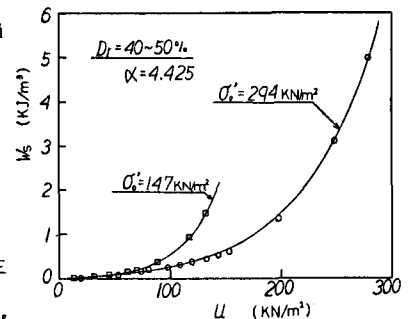


図-2 拘束圧の違いによる W_s と u

定数 α は、図-4に示されるような相対密度の関数で表わされ、密な砂ほど α の値は大きい。

2-3 過圧密履歴の影響

過圧密履歴による液状化強度の増加は、過圧密比($Q.C.R.$)の平方根に比例する。このとき、間隙水圧上昇に要するせん断仕事は増加するから、拘束圧の関数である定数 A は

図-3 定数 A と拘束圧 σ'_c

過圧密履歴の影響を受けることになる。したがって、定数 A は、正規圧密 σ'_c に依存する定数であると考え、次式で表わすことにする。

$$A(\sigma'_c) = A \sigma'_c + b = A(Q.C.R.) \sigma'_c + b \quad \text{---- (9)}$$

図-5は、実験値と比較したものであり、比較的一致した結果が得られた。

2-4 状態量 S

式(6)の定数 A 、 α は、それぞれ拘束圧 σ'_c 、間隙水圧比 u/σ'_c にかかる定数であるから、ここで、新たに σ'_s 、 γ_s を次式で定義する。

$$\sigma'_s = A \sigma'_c, \quad \gamma_s = \alpha u / \sigma'_c \quad \text{---- (10)}$$

これらを用いると、式(6)は次式で表わされる。

$$W_s = \sigma'_s \{ \exp(\gamma_s) - 1 \} \quad \text{---- (11)}$$

したがって、 W_s を σ'_s で割った値 S は、過剰間隙水圧に対する状態量を与える。この状態量 S と γ_s の関係を示

$$S = W_s / \sigma'_s = \exp(\gamma_s) - 1 \quad \text{---- (12)}$$

したのが図-6である。また、完全液状化時には、 $\gamma_s = \alpha$ となるから、この時の S の値 S_L は、

$$S_L = \exp(\alpha) - 1 \quad \text{---- (13)}$$

となる。 S_L は、図-7に示されるように相対密度に比例し、液状化強度に対応する。

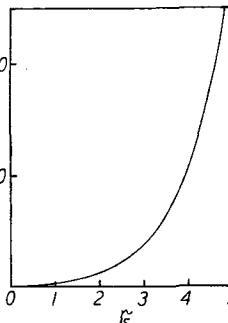


図-6 γ_s と S

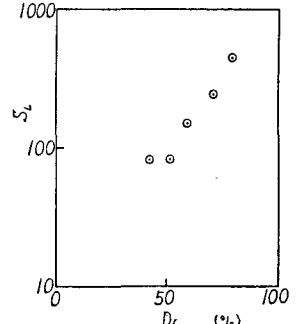


図-7 D_r と S_L

3. K_0 値の変化を考慮した場合の W_s と u の関係式

図-8の異方圧密状態から液状化が起る場合を考えるとき、間隙水圧上昇に伴う平均主応力の増加が見られるから、せん断仕事は拘束圧の変化による影響も受ける。ところが、式(11)から、 $dW_s = (\partial W_s / \partial \sigma'_s)_{\gamma_s} d\sigma'_s + (\partial W_s / \partial \gamma_s)_{\sigma'_s} d\gamma_s$ ---- (13)

は完全微分形であり、 W_s は σ'_s と γ_s の積分経路によらない。したがって、 K_0 状態にある土の W_s も式(11)で与えられることになる。そこで、側圧の増分 $d\sigma_3$ を、 $d\sigma_3 = (1 - K_0)u$ ---- (14) とすると、 σ'_s と γ_s は次式で表わされる。

$$\sigma'_s = \left\{ A(1 + 2K_0)\sigma'_{c0}/3 + b \right\} \left\{ (1 + 2K_0)\sigma'_{c0}/3 + 2(1 - K_0)u/3 \right\}$$

$$\gamma_s = \alpha u / \left\{ (1 + 2K_0)\sigma'_{c0}/3 + 2(1 - K_0)u/3 \right\} \quad \text{---- (15)}$$

図-9は、式(15)を用いて $K_0 = 0.4, 1$ のときの W_s と u の関係を示したものである。等方圧密状態($K_0 = 1$)に比べると、 K_0 値の小さいものほど完全液状化時の W_s が小さく、液状化強度は低い。

参考文献 1) 石原・東畑：ゆるい砂の非排水せん断に見る主応力軸回転の影響，粒状体力学の構成に関する研究，pp.157-174.

2) Basant Z.P. and Kriech, R.J.: Endochronic constitutive law for liquefaction of sand, Proc. ASCE, EM2, pp. 225-238, 1976