

III-29

不規則せん断応力を受ける飽和砂の過剰間隙水圧について

九州大学工学部 正 山内 豊聡 正 坂井 晃
同 上 〇 学 杉本 洋一

1. まえがき

土の変形理論として弾塑性理論等が用いられ過剰間隙水圧を考慮した提案式もあるが、複雑なひずみ履歴に対する表現が困難であり地震時挙動のように不規則な外力を持つ場合には、一般的で簡潔な法則が捉え難い。これに対し、内部状態変数を用いたEndochronic理論は複雑なひずみ履歴をも単一のパラメータで表現できる点に特徴がある。著者は、応力振幅一定の液状化試験を行い、塑性せん断ひずみの累積量、および、単位体積当りのせん断仕事量を内部状態変数として、過剰間隙水圧との対応関係を定式化してきた¹⁾。本研究はさらに、不規則せん断応力による液状化試験を行うとともに、内部状態変数と過剰間隙水圧との対応関係を動的変形モデル(Hardin Drnevich model)に適用し、その妥当性について検討した。

2. 試験方法

試験には、軸圧変動・側圧一定の振動三軸試験装置を用い、截荷応力は、図-1に示されるように、周波数の5 Hzの正弦規則波(波形①)、および、不規則波(波形②、③)を截荷した。試料は、基準標準砂を使用し、供試体は、煮沸した試料を水中落下法で作成した。拘束圧は、 $\sigma'_0 = 196 \text{ kN/m}^2$ (2 kgf/cm^2)で等方圧密し、その後、飽和を期すため 294 kN/m^2 (3 kgf/cm^2)の背圧を加え、相対密度は、50%の同一条件下で実験を行った。

3. 実験結果と考察

3-1 塑性せん断ひずみの累積量 γ_s^p と過剰間隙水圧 u の関係

截荷応力振幅一定試験における γ_s^p と u の関係は次式で与えられる。¹⁾

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{1}{B} \ln \left(1 + \frac{\gamma_s^p}{A} \right) \quad (A, B \text{ は定数}) \quad (1)$$

ここに、 γ_s^p は、図-2に示されるように1サイクルの塑性せん断ひずみ γ_s^p を任意のサイクル数まで加え合わせた値($\gamma_s^p = \sum \gamma_s^p$)である。図-3は規則波形および不規則波形による γ_s^p と u の関係を示した図であるが、両波形とも同一の傾向となり実線で示される式(1)によって表わされる。一方、図-2で示されるせん断ひずみ γ_s の累積量と u の間には幾分のばらつきが認められたことから、過剰間隙水圧が応力経路に依存せず一義的に決定される累積量としては、一般的に用いられる γ_s (ひずみ経路の長さ)ではなく、 γ_s^p の値である。

3-2 単位体積当りのせん断仕事 w_s と過剰間隙水圧 u の関係

図-4は、 w_s と u の関係を示したものであり、応力振幅一定試験による関係式は、次式で表わされる。¹⁾

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{1}{D} \ln \left(1 + \frac{w_s}{C \cdot \sigma'_0} \right) \quad (C, D \text{ は定数}) \quad (2)$$

この図から、 γ_s^p と同様、 w_s と u の関係は、せん断応力の波形に依存せず一義的な関係にあることがわかる。

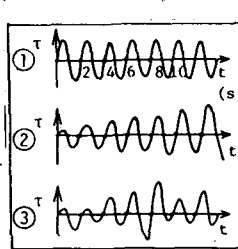


図-1 截荷波形

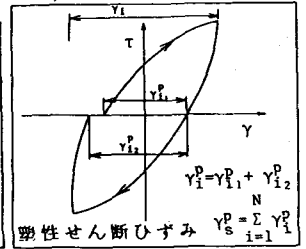


図-2 応力-ひずみ関係

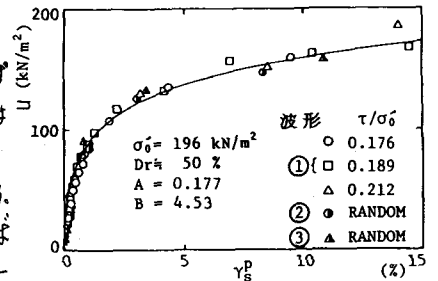


図-3 γ_s^p と u の関係

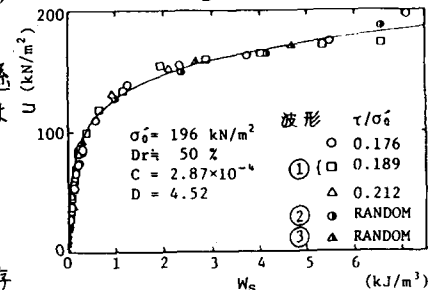


図-4 w_s と u の関係

4. 土の動的変形モデルへの適用

土の動的変形モデルの1つに双曲線や骨格曲線を表示する Hardin - Drnevich モデルがある。このモデルに、Masingの規則による履歴曲線を組み合わせた modified - Hardin - Drnevich モデルは、初期せん断剛性 G_0 、規準ひずみ γ_r 、並びに応力 - ひずみ曲線の折返し点 (τ_0, γ_0) を用いて次式で与えられる。

$$\tau - \tau_0 = \frac{G_0 (\gamma - \gamma_0)}{1 + \frac{|\gamma - \gamma_0|}{\gamma_r}} \quad (3)$$

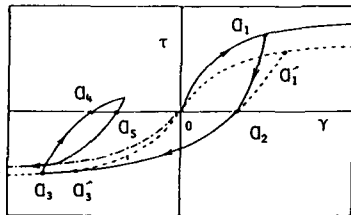


図-5 応力-ひずみ関係

ここでは、modified - Hardin - Drnevich モデルに前節までに述べられた W_s 、および γ_s^p と u の関係を適用し、実験値との比較から過剰間隙水圧の妥当性について検討する。このモデルに必要な G_0 と γ_r は、それぞれ、Richartらの式 $G_0 = 6930(2.17 - e)^3 / (1 + e)(\sigma'_v)^{0.5}$ 、モール・クロウンの破壊規準 ($\tau_f = \sigma'_v \sin \phi' \cos \phi'$ 、圧縮側 ($\phi' = 40^\circ$)、伸張側 ($\phi' = 33^\circ$)) によるせん断強度 $\tau_f (= G_0 \gamma_r)$ によって与え、液状化過程における有効応力の変化に対しても G_0 、 τ_f を変化させた。過剰間隙水圧の評価に際しは、以下の手順に従って液状化過程の応力 - ひずみ並びに過剰間隙水圧の計算を実施した。まず、図-5に土の応力 - ひずみ関係を示す。ここでは、等方応力状態になるときの過剰間隙水圧を評価しているため、半サイクル毎に有効応力を変化させた。すなわち、除荷曲線 $a_1 a_2$ が、 $\tau = 0$ に達する点 a_2 において、半サイクルを終了するが、この時の W_s もしくは、 γ_s^p の値によって、過剰間隙水圧が求められ、次の半サイクルの G_0 、 τ_f が決定される。さらに除荷曲線 $a_2 a_3$ は G_0 、 τ_f によって定まる骨格上の点で、かつ Masing の規則に従う履歴曲線が点 a_2 を通過するような折返し点 a_3' を求めることによって与えられる。また、再載荷曲線 $a_3 a_4$ は、 G_0 、 τ_f を用いて表わされ、点 a_4 までに累積した W_s 、または、 γ_s^p によって次の過剰間隙水圧が評価される。さらに、除荷曲線が a_5 のように、負のせん断ひずみで $\tau = 0$ に達した場合には、新たに求められた G_0 、 τ_f によって定まる骨格曲線に到達するまでに同じ除荷曲線またはそのものとする。以下、同様の手順によって、各載荷毎の、 W_s 、 γ_s^p 、 u の値が計算される。以上の手法を用いて、応力振幅一定の繰返しせん断応力を作用したときの液状化回数 N_L とそのときの応力比の関係を示したのが図-6である。図中、実線、破線は、式(1)、式(2)より計算したものであり、実験値とよく一致していることからこの関係式の modified - Hardin - Drnevich モデルへの適用の妥当性が認められる。図-7は、不規則せん断応力を作用させた場合の一例であり、そのとき生ずる過剰間隙水圧の実験値と計算値と比較したのが図-8である。計算値は、式(1)、式(2)の関係を用いたのであるが、どちらも実験値とよく一致した結果が得られた。

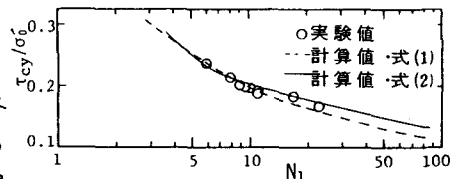


図-6 N_L と τ/σ'_v の関係

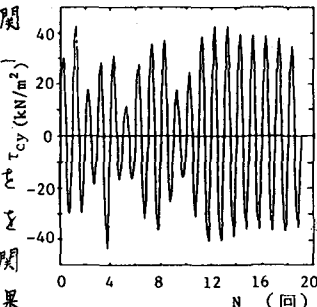


図-7 載荷せん断応力

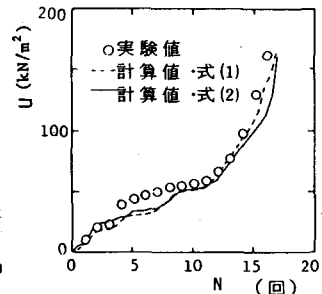


図-8 N と u の関係

5. まとめ

繰返しせん断を受ける飽和砂の過剰間隙水圧を評価するため、規則および、不規則せん断応力を受けた場合の内部状態変数と過剰間隙水圧との関連性並びに動的変形モデルへの適用を試みた結果次のことが見い出された。1) 載荷せん断応力が規則、不規則にかかわらず、過剰間隙水圧と γ_s^p 、 W_s の関係は、繰返しせん断応力の波形に依存しない。2) 動的変形モデルを用いて、過剰間隙水圧を各々、半サイクル後の W_s 、 γ_s^p の値によって決定していく液状化解析は、応力 - ひずみ曲線と過剰間隙水圧との関係を明確にする手法として有効である。

参考文献: 1) 山内, 坂井, 杉本, 砂の液状化における Endochronic 理論の適用, 土木工学集報, Vol. 56, No. 5, 1982.