

III-109

単純せん断における砂の応力-ひずみ関係

東京大学生産技術研究所 正員 ○プラダン テージ B. S
 同上 正員 龍岡 文夫
 労働省産業安全研究所 正員 堀井 宣幸

1. まえがき: 盛土や斜面など土構造物における要素の挙動を調べる際単純せん断試験を用いるのが直接的である。従来の単純せん断試験では供試体の水平面上のせん断応力 τ_{at} 、鉛直方向に作用する応力 σ_v' 、せん断ひずみ γ_{at} および軸ひずみ(図-1(a))だけが測定可能であるため主応力、主ひずみの計算ができなかった。主応力を求めるため小田、小西¹⁾は最大主応力(σ_1)方向の鉛直方向に対する角度(α)を規定するため半理論的に式(1)を導いた。

$$\tau_{at}/\sigma_v' = x \cdot \tan \alpha \quad \text{--- (1)}$$

ここで $x = \sin \phi_{ov}$ で ϕ_{ov} は等体積状態における内部摩擦角である。本報告では単純せん断試験より得られるデータ(τ_{at} 、 σ_v' 、 γ_{at})から砂の強度・変形特性を推定する方法および実験結果との比較について述べる。

2. 試料および実験方法: 試料に豊浦標準砂を用い、空中落下法で中空供試体(高さ20cm、外径10cm、内径6cm)を作った。異方圧密($\sigma_{v0}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_{r0}' = 0.4 \text{ kgf/cm}^2$)した後 σ_v' 一定条件で単純せん断試験を行った。試験装置及び方法について文献2)を参照されたし。

3. シミュレーションおよび考察: 計算に必要な数式を次の様に導いた。

(1) $\tau_{at}/\sigma_v' \sim \gamma_{at}$ 関係は双曲線関数で式(2)の様に表現できると仮定した。

$$\tau_{at}/\sigma_v' = \eta_r \cdot G \cdot \gamma_{at} / (\eta_r + G \cdot \gamma_{at}) \quad \text{--- (2)}$$

ここで、 G は $\tau_{at}/\sigma_v' \sim \gamma_{at}$ 関係の初期勾配で、 η_r は τ_{at}/σ_v' の最大値である。緩い砂においてpeakが現れないため大ひずみまで、また密砂においては明確なpeakが現れ軟化が生じるためpeak時までを近似すべきである。図-2にTEST NO CTSS05($e_{s0} = 0.798$)の実験データ及び双曲線近似曲線を示した。初期の部分は多少ずれているが全般的によく近似している。この時の G 、 η_r は表-1に示す。(2)式(1)を用いるとモールの応力円(図-1(b))が描け、主応力値が次の様に計算できる^{3), 4)}。

$$\sigma_1 = \{(\tau_{at}/\sigma_v')^2 + x\} / (x/\sigma_v'), \sigma_3 = (1-x) \sigma_v' \quad \text{--- (3)}$$

ここで x を2種類仮定した。(i)小田による $x = \sin \phi_{ov} = 0.584$ 、(ii)龍岡⁵⁾による $x = \sin \phi_n \{1 - \sin(\nu - 2\delta)\} / \{1 - \sin \phi_n \cdot \sin(\nu - 2\delta)\} \quad \text{--- (4)}$

ここで $\sin \phi_n = (R-1)/(R+1)$ 、 $R = \sigma_1/\sigma_3$ 、 $\sin \nu = (R-K)/(R+K)$ 、 $K = R/(-d\epsilon_3/d\epsilon_1)$ 、 δ は最大主ひずみ増分($d\epsilon_1$)方向と σ_1 方向のなす角度である。(3)中間主応力係数 $b = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ と α の関係は密度に依らずユニークな関係にある⁶⁾。それよ

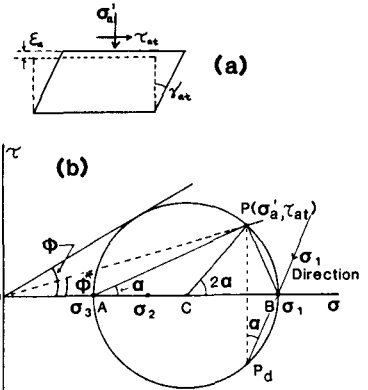


図-1 応力状態及びモールの応力円

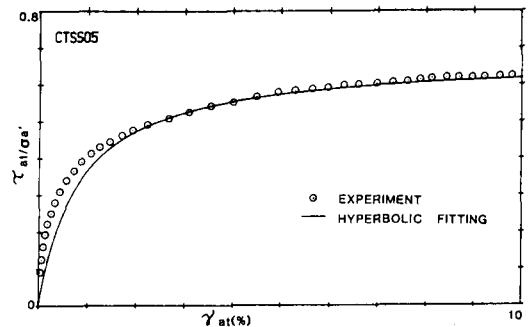


図-2 $\tau_{at}/\sigma_v' \sim \gamma_{at}$ 関係

表-1: SIMULATION に用いたPARAMETERS

TEST NO	G	η_r	σ_{v0}'	K_0	K
CTSS01	70	0.640	1.0	0.42	3.26
CTSS03	294	0.738	1.0	0.38	3.07
CTSS04	205	0.709	1.0	0.40	3.08
CTSS05	83	0.673	1.0	0.40	3.07
CTSS06	163	0.848	1.0	0.38	3.09

(x 一定の場合: $x = 0.584$)

り中間主応力 σ_2 は式(5)の様に表せる。

$$\sigma_2 = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) * 9.67 * 10^{-6} * \alpha^{2.67} \quad (5)$$

(4) Roweのタイルタンジ係数 K を用いると体積ひずみ増分 dv は式(6)より求められる。

$$dv = (K - R) / (K + R) * d\gamma_{at} \quad (6)$$

シミュレーションに用いたパラメータを表-1に示す。 K_0 、 σ_{at} はそれぞれ静止土圧係数及び初期の上載圧力である。

TEST NO CTSS05に対するシミュレーションを代表例として示す。図-3に各主応力値及びせん断ひずみ γ_{at} の関係を示した。2種類の α の値に依らず全般的に実験値とよく対応している。図-4に主応力比 $R \sim \gamma_{at}$ ～体積ひずみの関係を示した。式(4)による α を用いた方が実験の体積ひずみとよく対応している。図-5に R と α の関係を示した。せん断初期において R が若干減少し、 R が小さい間に大部分の σ_1 方向の回転が生じている。式(4)の α を用いた方が上記の現象をよりよく説明している。図-6に実験による ϕ （内部摩擦角）、推定した ϕ と間隙比の関係を示した。 $\phi^* = \{\tan^{-1}(\tau_{at}/\sigma'_a)\}_{max}$ は通常の単純せん断試験により求める摩擦角であり、真の摩擦角 $\phi = \{\sin^{-1}(R_{max}-1)/(R_{max}+1)\}$ より低いことが分かる（図-1(b)参照）。 ϕ_{kc} と ϕ_{cc} はそれぞれ $\alpha=0.584$ とした場合のcurve fittingで求めた $(\tau_{at}/\sigma'_a)_{max}$ 値とその測定値から推定した内部摩擦角である。密砂における○と■の差はpeak時において α が0.584よりも大きくなるためと思われる。以上、 α ＝一定の仮定は全体としてはほぼ妥当であるがより詳細に見ると変形初期の δ が大きい時及び ϕ の値を $(\tau_{at}/\sigma'_a)_{max}$ から推定する時は近似的な仮定であると考えられる。

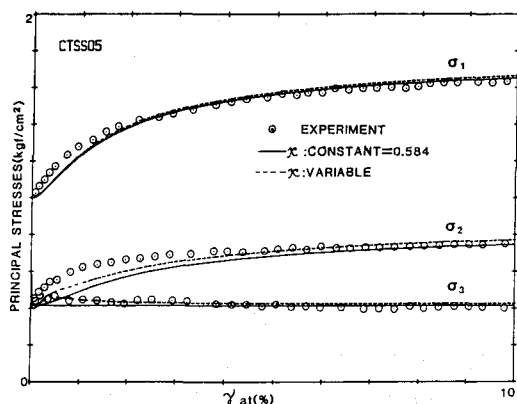


図-3 主応力値 $\sim \gamma_{at}$ 関係

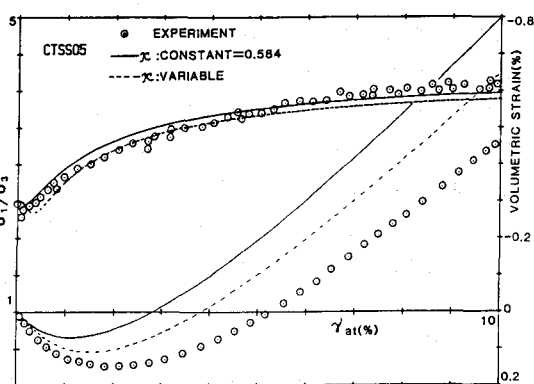


図-4 主応力比 $\sim \gamma_{at}$ ～体積ひずみ関係

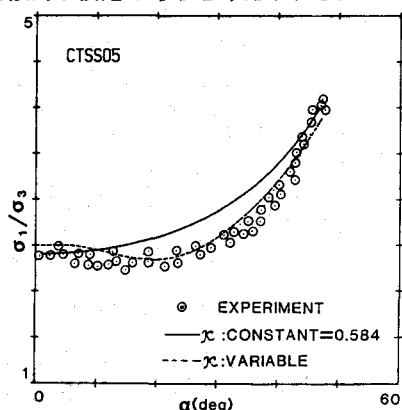


図-5 主応力比 $\sim \alpha$ 関係

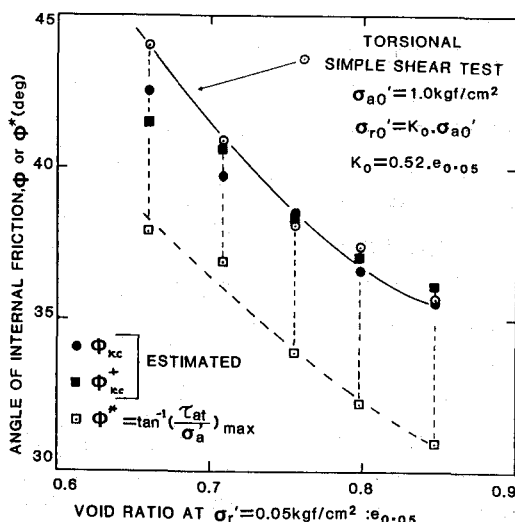


図-6 内部摩擦角 $\sim$ 間隙比 関係

参考文献：1)小田、小西；S&F, vol14, no4(1974)、2)堀井、7°ヲツ、龍岡：22回土質工学会、3)落合：S&F, vol15, no4(1975)、4)小田：S&F, vol15, no4(1975)、5)龍岡：S&F, vol125, no4(1985)、6)7°ヲツ、堀井、龍岡：22回土質工学会。