

1. はじめに

土がある強度を発揮するには、それに対応する変形（ひずみ）の進行が必要である。強度定数はせん断過程において一定値ではなく、変形（ひずみ）の進行に伴ってせん断初期から変形、破壊に至る間に様々変化する。実際の地盤や斜面の内部における変形やひずみは一様ではなく、各点のせん断強度は変形（ひずみ）の関数として表される。しかし、斜面の安定解析を行なう際、土質強度定数をひずみの関数として扱っている研究はあるものの、 $\tau - \gamma$ 関係と $\tau - \sigma$ 関係を統合した関係を示した研究は少ない。

豊浦標準砂のせん断応力 τ と垂直応力 σ の関係は、著者らの研究成果より、サクシオン ϕ の影響を含む $\tau - \sigma$ 関係として整理され、ひずみ γ に対しても $\tau - \gamma$ 関係が定式化された。本研究は、不飽和状態の標準砂における $\tau - \gamma$, $\tau - \sigma$ 両関係を統合した関係式 $\tau (\gamma, \sigma, \phi)$ を提示し、両関係式に含まれるパラメータがどのような相互関係を持っているかを検討したものである。

2. 豊浦標準砂における $\tau - \sigma$, $\tau - \gamma$ 関係

2-1. $\tau - \sigma$ 関係

不飽和土の場合、Bishop の有効応力原理を考慮して、土層中の間隙空気圧が大気と連続している時は 0 であるとする、サクシオン $= \phi$ になるので、Mohr-Coulomb の破壊基準におけるせん断強度式は、以下の(7) 式のように書くことができる。

$$\tau = \sigma \tan \phi - \chi \phi \tan \phi + c_f \tag{1}$$

ただし、 σ_f : 有効応力, σ : 垂直応力, χ : 飽和度に対応する実験定数 ($0 \leq \chi \leq 1$)

τ : せん断応力, ϕ : 内部摩擦角, c_f : 粘着力, ϕ : サクシオン

不飽和土における見かけの粘着力 (c) とサクシオンによる見かけの粘着力の変動分 (Δc) はそれぞれ以下の式(2) と (3) になる。

$$c = c_f - \chi \cdot \phi \cdot \tan \phi \tag{2}$$

$$\Delta c = -\chi \cdot \phi \cdot \tan \phi \tag{3}$$

2-2. $\tau - \gamma$ 関係

$\tau - \gamma$ 関係は、豊浦標準砂を用いたせん断試験においてせん断ひずみ 20%以内の範囲で $\tau = c\gamma + b$ の直線に漸近する傾向を示したので、 γ が小さいとき $\tau = a\gamma$ で、 $\tau = c\gamma + b$ の漸近線を持つ関数形として、次式を用いた。

$$\tau = \frac{a\gamma(k\gamma + b')}{\gamma + b'} \tag{4}$$

ただし、 τ : せん断力, γ : せん断ひずみ, a, b', k : 近似パラメータ, $b' = b/(a-c)$, $k = c/a$ である。

各パラメータと σ , ϕ との関係は解釈結果、以下のように整理されている。

- ① $k (c/a)$: σ , ϕ に影響されない定数
- ② $b' (b/(a-c))$: ϕ で変わり、 σ に影響されない (有効応力とは無関係)
- ③ a : σ , ϕ の両者が影響。 σ , ϕ が有効応力として影響の可能性はある

3. $\tau (\gamma, \sigma, \phi)$ 関係式の提示

2-2 の解釈結果から $\tau - \gamma$ 関係の各パラメータと σ , ϕ 関係について以下のように簡単なモデル化を行なった。

$$a: a(\sigma, \phi) = \alpha(\sigma - \chi\phi) + \beta \tag{5}$$

$$b': b'(\phi) = b_1\phi + b_2 \tag{6}$$

σ , ϕ と近似式パラメータの関係を整理した(5),(6)式の a , b' をそれぞれ (4) 式に代入して整理すると、以下の式 (7) のように、 $\tau - \gamma$, $\tau - \sigma$ 関係が統合された式になる。

$$\tau(\gamma, \sigma, \phi) = \gamma \left\{ 1 - \frac{(1-k)\gamma}{b_1\phi + b_2 + \gamma} \right\} \{ \alpha(\sigma - \chi\phi) + \beta \} \tag{7}$$

つまり、この式は γ について整理すると式 (4) になり、 σ に対して整理すると式 (1) になる。式(7)を展開して σ に対して整理すると、(7) 式は以下の (8) 式のように書くことができるからである。

$$\tau(\gamma, \sigma, \phi) = \alpha\gamma \left\{ 1 - \frac{(1-k)\gamma}{b_1\phi + b_2 + \gamma} \right\} \cdot \sigma + \gamma \left\{ -\alpha\chi \left(1 - \frac{(1-k)\gamma}{b_1\phi + b_2 + \gamma} \right) + \beta\gamma^2(1-k) \left(\frac{b_1}{(b_2 + \gamma)(b_1\phi + b_2 + \gamma)} \right) \right\} \phi + \beta\gamma \left\{ 1 - \frac{(1-k)\gamma}{b_1\phi + b_2 + \gamma} \right\} \tag{8}$$

式 (8) を式 (1) と比較してみると、(8) 式の第 1 項 σ 以外の部分は $\tan \phi$ に相当することが分かる。また、式 (8) の第 3 項は ϕ の影響を受けない項であり、(1) 式の c_f に相当し、(8) 式の第 2 項はサクシオンによって増加する粘着力の増分に相当することが分かる。つまり、式 (8) と (1) 関係から、 $\tan \phi$, c_f , Δc は以下のように書くことができる。

$$\tan \phi = \alpha \gamma \left\{ 1 - \frac{(1-k)\gamma}{b_1\phi + b_2 + \gamma} \right\} \quad \text{-----(9)}$$

$$c_f = \beta \gamma \left\{ 1 - \frac{(1-k)\gamma}{b_2 + \gamma} \right\} \quad \text{-----(10)}$$

$$\Delta c = -\chi\phi \tan \phi + \beta \gamma^2 (1-k) \left\{ \frac{b_1\phi}{(b_2 + \gamma)(b_1\phi + b_2 + \gamma)} \right\} \quad \text{-----(11)}$$

よって、(7)、(8) 式を標準砂の $\tau(\gamma, \sigma, \phi)$ 関係式に設定すると、(4) 式による $\tau-\gamma$ 関係、(1) ~ (3) 式による $\tau-\sigma$ 関係が ϕ の影響を含め、統一的に記述される。

4. $\tau(\gamma, \sigma, \phi)$ 統合式のパラメータと土質強度定数との関連

式(9) ~ (11) より、 $\tau(\gamma, \sigma, \phi)$ 統合式の各パラメータと土質強度定数または $\tau-\gamma$ 近似式パラメータとの関連が図-1 のように整理された。 $\tau(\gamma, \sigma, \phi)$ によると、式(9) では $\tan \phi$ が ϕ の関数になっており、 Δc は、式(11) の第 1 項に該当する Bishop の有効応力による粘着力増分 (Δc_1) 以外に、第 2 項のように、粘着力の増分 (Δc_2) が表示されている。図-2 では、豊浦標準砂の $\tau(\gamma, \sigma, \phi)$ のパラメータの値 ($\alpha:32, \beta:1000, k:0.068, b_1:0.00015, b_2:0.01$) を用いて、式(1)、(4)、(9)、(10)、(11) に適用した結果と実測値を比較したものを示す。本図によると、 $\tau-\gamma$ 、 $\tau-\sigma$ 関係ともに、サクシオンが $30\text{cmH}_2\text{O}$ の場合、計算値が実測値より若干大きい値を示している。 $\tan \phi$ は実測値においては ϕ による影響は少ないが、計算値においては式(9) から分かるように、 ϕ に影響され、 ϕ の増加とともに増加する傾向にあった。一方、 Δc においても、計算値の方が大きく、 Δc_2 は Δc 全体からみると少なく、 Δc の殆どが Δc_1 によるものであることを示している。

5. まとめ
不飽和状態の豊浦標準砂における $\tau-\gamma$ 、 $\tau-\sigma$ の比較両関係を統合した関係式 $\tau(\gamma, \sigma, \phi)$ を提示した。また、統合式による計算値と実測値の比較を行ない、両関係式に含まれるパラメータの相互関係を検討した。 $\tau-\gamma$ 、 $\tau-\sigma$ 関係を統合することは今回がはじめでの試みであり、今後、標準砂以外の土においても両関係を統合した研究あるいは検討が必要であると考えられる。

(参考文献)

李昶雨・執印康裕・鈴木雅一・太田猛彦 (1999) : 単純せん断試験機を用いた不飽和土におけるせん断過程でのサクシオンの影響評価, 砂防学会誌 (Vol. 52, No. 3, p. 55-58)
李昶雨・執印康裕・鈴木雅一・太田猛彦 (投稿中) : 豊浦標準砂を用いた単純せん断試験機による不飽和土の力学挙動に対する解析, 砂防学会誌

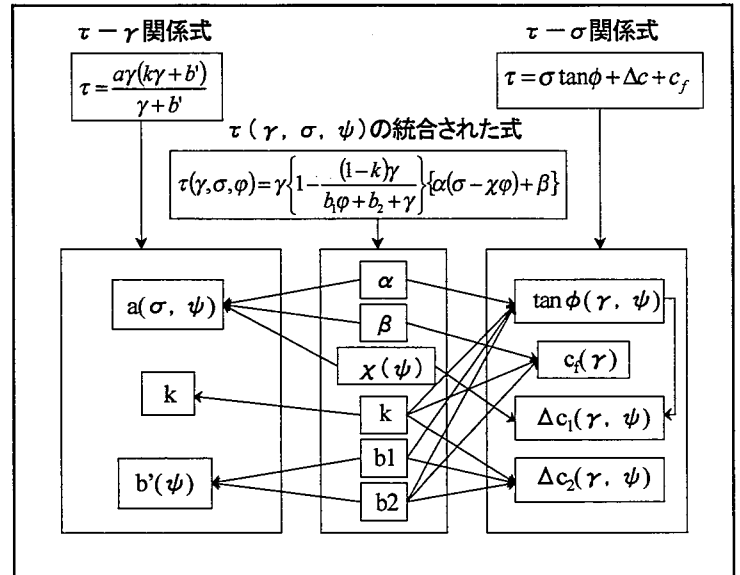


図-1. $\tau(\gamma, \sigma, \phi)$ 統合式の各パラメータの関連図

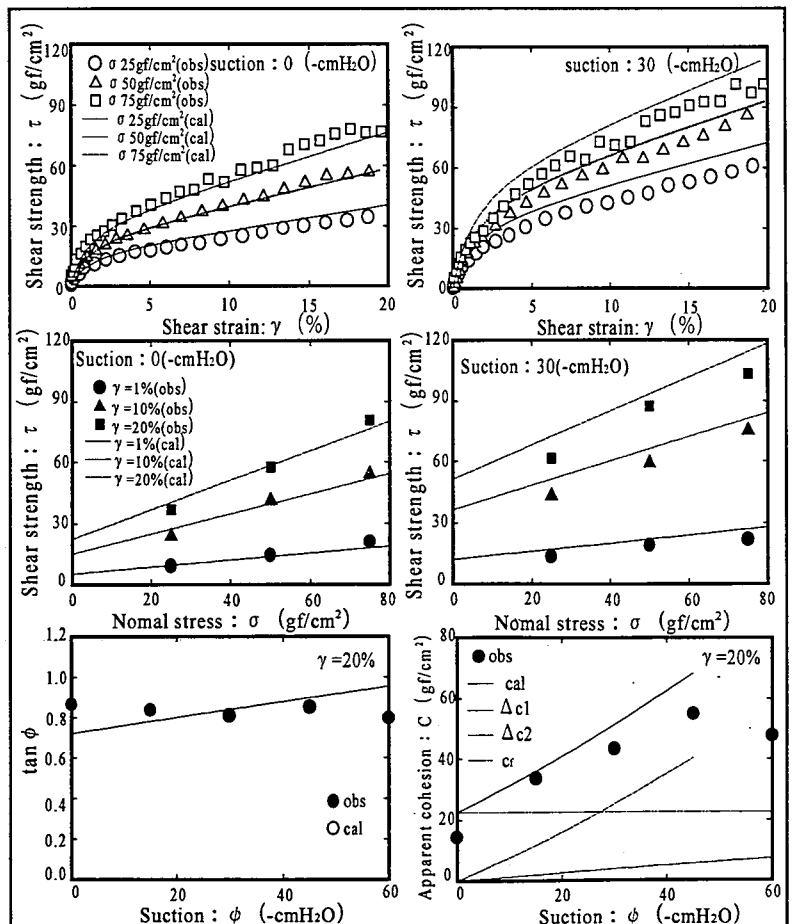


図-2. $\tau-\gamma$ 、 $\tau-\sigma$ 関係の計算値と実測値