

III-161

セメント混合砂の降伏曲面について

名古屋工業大学 正会員 ○ 孫 徳安
" " 松岡 元

c, ϕ 材料であるセメント混合砂の降伏曲面の決め方には、いくつかの方法がある。ここでは、まず同じ応力状態を通る種々の応力経路に沿ってセメント混合砂の排水三軸圧縮試験を実施し、提示した硬化パラメーターがc, ϕ 材料の変形の状態量としてふさわしいかどうかを検討した。その後、セメント混合砂の降伏曲面として、実測値よりこの硬化パラメーターのコンターラインを描いてみた。

1. 供試体作製方法

実験に用いた砂は豊浦砂で、セメントは普通ポルトランドセメントである。試料の混合重量比は砂：セメント：水=15:1:3とした。これらをソイルミキサーで十分練り合わせた後、内径5cm、高さ15cmのアクリル製モールドに1/3ずつ入れて棒で突いて充填した。その後、1~2日間放置して、供試体を脱型し、ポリエチレン袋に入れ、恒温室(20±1°C)内で水分一定条件下で約3ヶ月間養成した。養成後、供試体をマイターボックスの中にいれて両端面を包丁あるいは鋸で切って高さを10cmにした。したがって、供試体の寸法は最終的に直径約5cm、高さ約10cmとなる。試験前の供試体の密度は1.80±0.01g/cm³である。また、成形した供試体を脱気水中に入れて、飽和させるために真空脱気を1時間以上行った。実験時には、まず、ある平均有効主応力まで等方圧密した後、種々の応力経路に沿って排水三軸圧縮試験を実施した。

2. 硬化パラメーターの定義と検討

硬化パラメーターとして、 t_{ij} -sand モデル¹⁾を参照して、次のような $\bar{\sigma}_{ij}^*$ に基づく塑性仕事相当量 $\bar{W}^{*p}$ を採用した。

$$\bar{W}^{*p} = \int \bar{\sigma}_{ij}^* d\epsilon_{ij}^p \quad (1)$$

ここでは、 $\bar{\sigma}_{ij}^*$ は粘着成分を考慮した修正応力テンソルであり²⁾、 $d\epsilon_{ij}^p$ は塑性ひずみテンソルである（付録参照）。

等方応力状態の場合、あるいは $\sigma_o \rightarrow \infty$ （金属の場合と想定。ただし、 $\sigma_o = c \cdot \cot \phi$ ；c：粘着力、 ϕ ：内部摩擦角）の場合には、 $\bar{\sigma}_{ij}^* = \sigma_{ij}$ であるので、

$$\bar{W}^{*p} = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p = W^p \quad (2)$$

ここに、 W^p は通常の塑性仕事であり、金属などの塑性力学では硬化パラメーターとしてよく用いられている。

硬化パラメーターとして、 $\bar{W}^{*p}$ の値が応力経路に関係なく、応力状態だけに関係することを種々の応力経路下で検討するため、図-1に示すような4つの応力経路（すべて点Eを通る）に沿って、セメント混合砂の排水三軸圧縮試験を実施した。

図-2は、式(1)による定義の塑性仕事相当量 $\bar{W}^{*p}$ ～応力経路の関係の実測値を示している。同図より、点Eの $\bar{W}^{*p}$ は

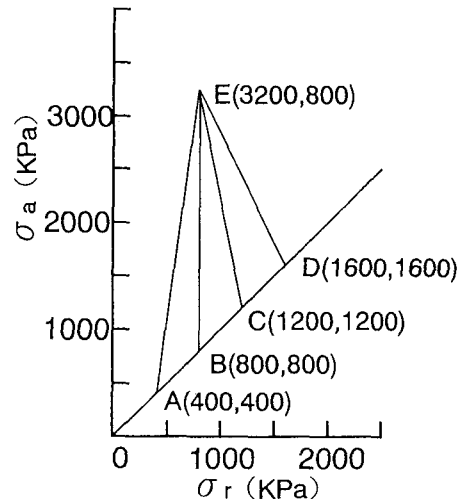


図-1 硬化パラメーターをチェックするための応力経路

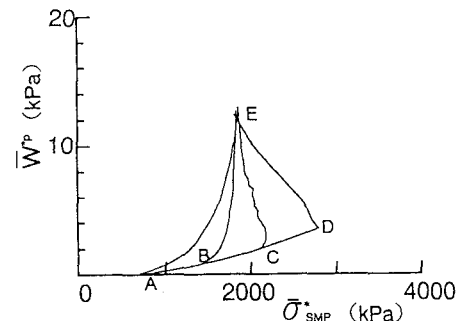


図-2 応力経路の違いによる硬化パラメーター $\bar{W}^{*p}$ の値

応力経路の違いにかかわらずほぼ同じ値となるので、 $\bar{W}^{*p}$ を c 、 ϕ 材料の変形の状態量として採用できると考えられる。したがって、 $\bar{W}^{*p}$ は c 、 ϕ 材料の硬化パラメーターとしてふさわしいものである。

3. セメント混合砂の降伏曲面について

セメント混合砂の降伏曲面を調べるために図-3に示すような応力経路に沿って排水三軸圧縮試験を行った。図-4中の数字は実測値により計算した硬化パラメーター $\bar{W}^{*p}$ の値を $\hat{\tau}_{SMP}^{*} \sim \hat{\sigma}_{SMP}^{*}$ 平面(付録参照)で示したものである。図中の実線は実施した応力経路で、破線は硬化パラメーター $\bar{W}^{*p}$ の値の等しい点($\bar{W}^{*p} = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ kPa}$)を結んで描いたコンターラインである。この図中の破線をセメント混合砂の降伏曲面と考えている。

付録²⁾

粘着成分を考慮した修正応力テンソル $\bar{\sigma}_{ij}^{*}$ は次式で

$$\bar{\sigma}_{ij}^{*} = \sigma_{ik} \delta_{kj} \quad (a-1)$$

与えられる。 $\hat{b}_{ij}$ は拡張SMPの方向余弦 $\hat{a}_{ij}$ の $\sqrt{3}$ 倍を主値とする対称テンソルである。 $\bar{\sigma}_{SMP}^{*}$ と $\bar{\tau}_{SMP}^{*}$ は $\bar{\sigma}_{ij}^{*}$ の主値ベクトルの拡張SMPに垂直成分と平行成分で、次式で表される。

$$\bar{\sigma}_{SMP}^{*} = \bar{\sigma}_1^{*} \hat{a}_1 + \bar{\sigma}_2^{*} \hat{a}_2 + \bar{\sigma}_3^{*} \hat{a}_3 = \bar{\sigma}_{ij}^{*} \hat{a}_{ij} \quad (a-2)$$

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{SMP}^{*} &= \sqrt{(\bar{\sigma}_1^{*} \hat{a}_2 - \bar{\sigma}_2^{*} \hat{a}_1)^2 + (\bar{\sigma}_2^{*} \hat{a}_3 - \bar{\sigma}_3^{*} \hat{a}_2)^2} \\ &\quad + \sqrt{(\bar{\sigma}_3^{*} \hat{a}_1 - \bar{\sigma}_1^{*} \hat{a}_3)^2} = \sqrt{\bar{\sigma}_{ij}^{*} \bar{\sigma}_{ij}^{*} - (\bar{\sigma}_{ij}^{*} \hat{a}_{ij})^2} \end{aligned} \quad (a-3)$$

また、図-4に用いたパラメーター $\hat{\sigma}_{SMP}^{*}$ と $\hat{\tau}_{SMP}^{*}$ は、 $\bar{\sigma}_{SMP}^{*}$ と $\bar{\tau}_{SMP}^{*}$ との間で次式が成立する。

$$\hat{\sigma}_{SMP}^{*} = \bar{\sigma}_{SMP}^{*} + \sqrt{3} \sigma_0 \quad (a-4)$$

$$\hat{\tau}_{SMP}^{*} = \bar{\tau}_{SMP}^{*} \quad (a-5)$$

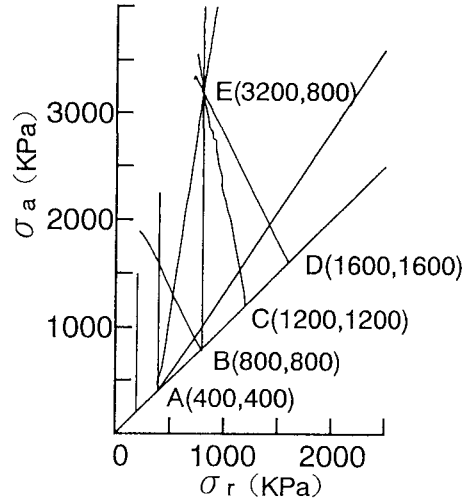


図-3 降伏曲面を描くための応力経路

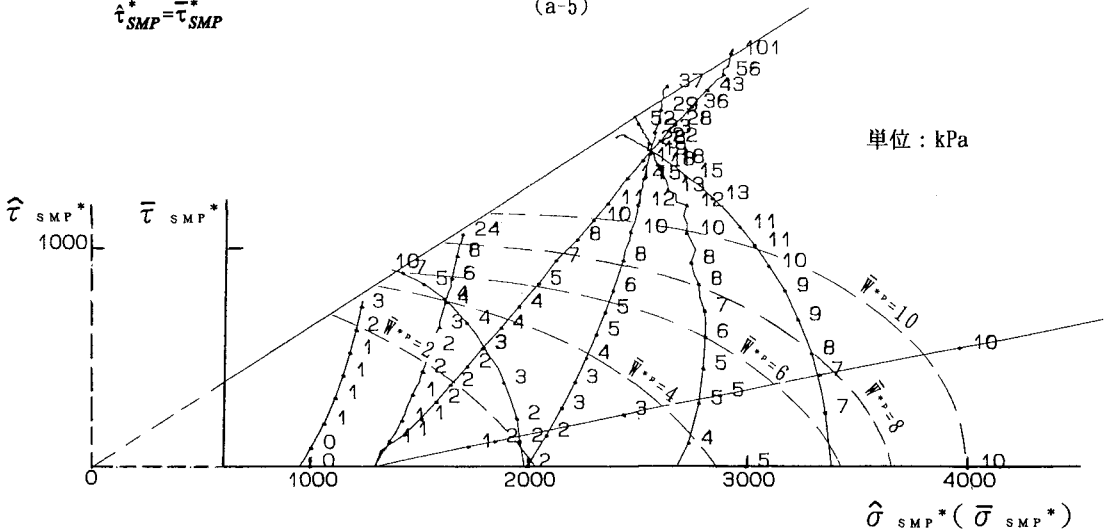


図-4 セメント混合砂の降伏曲面

文献 1) Nakai, T. : An isotropic hardening elasto-plastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stress. Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.119-137, 1989. 2) 松岡 元・孫 徳安 : 摩擦性材料から粘着性材料まで適用可能な構成式、粒状体の力学シンポジウム発表論文集、pp.39-42, 1993.12.