

名古屋工業大学 正会員 加藤 正司

名古屋工業大学 正会員 松岡 元

名古屋工業大学 正会員 孫 徳安

北陸電力(株) 正会員 滝脇 泰将

**1. はじめに** サクシヨンの作用は主に有効応力を増加し、土の骨格剛性を変化させることである。軽部<sup>1)</sup>およびAlonsoら<sup>2)</sup>は、このサクシヨンによる土の骨格剛性の変化を考慮した等方応力面上の降伏線を取り入れた構成モデルを提案している。しかしそれらのモデルはカムクレイモデルに基づくため相異なる3主応力条件下での土の挙動を予測することは難しいと考えられる。この点を解決するため、松岡・孫<sup>3)</sup>はすでに粘着成分を有する摩擦性材料に対する拡張SMPに基づいた弾塑性構成式を提案している。ここでは、この弾塑性構成式を拡張すれば、コラプス現象を含む不飽和土の変形挙動を説明できることを示す。

**2. 拡張SMPに基づいた弾塑性構成式<sup>3)</sup>の拡張** 拡張SMPに基づく応力パラメーター $\bar{\sigma}_{SMP}, \bar{\tau}_{SMP}$ とボンド応力 $\sigma_o$ <sup>3)</sup>による応力空間 $(\bar{\sigma}_{SMP}, \bar{\tau}_{SMP}, \sigma_o)$ において塑性仕事相当量一定条件を示す降伏曲面を以下に示す方法により定義する。なお、応力・ひずみの定義は既報<sup>4)</sup>と同様である。

軽部ら<sup>5)</sup>はサクシヨンSおよび平均有効主応力p一定条件の三軸圧縮試験を行い、破壊強度をダイレイタソンシー補正して得られる破壊線からサクシヨン応力 $f(S)$ を定義した。さらに軽部らは、サクシヨン一定条件下の等方圧縮時の塑性体積ひずみ $\epsilon_v^p$ を与える次式を提案している。

$$\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p + f(S)}{p_o + f(S)} \quad (1)$$

ここに、 $\lambda, \kappa$  : 圧縮指数および膨潤指数でありサクシヨンの変化に対して一定である。また、 $e_0$  : 基準間隙比、 $p_o$  :  $\epsilon_v^p = 0$ の時の平均有効主応力である。なお、破壊時に体積膨張しない場合は $\sigma_o = f(S)$ と考えられ、さらに等方応力条件下では $p = \bar{\sigma}_{SMP} / \sqrt{3}$ となるから式(1)より次の関係が得られる。

$$\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{\bar{\sigma}_{SMP1} + \sqrt{3}\sigma_o}{\bar{\sigma}_{SMP0} + \sqrt{3}\sigma_o} \quad (2)$$

つぎに応力テンソル $\bar{\sigma}_{ij}$ および塑性ひずみ増分テンソル $d\epsilon_{ij}^p$ により定義される、次式に示す塑性仕事相当量 $\bar{W}^p$ <sup>3)</sup>を考える。

$$\bar{W}^p = \int \bar{\sigma}_{ij} d\epsilon_{ij}^p \quad (3)$$

式(2)の関係をを用いて、等方応力条件下において式(3)の積分を行うと次式が得られる。

$$\bar{W}^p = \frac{\lambda - \kappa}{\sqrt{3}(1 + e_0)} \left[ \bar{\sigma}_{SMP1} - \bar{\sigma}_{SMP0} - \sqrt{3}\sigma_o \ln \frac{\bar{\sigma}_{SMP1} + \sqrt{3}\sigma_o}{\bar{\sigma}_{SMP0} + \sqrt{3}\sigma_o} \right] \quad (4)$$

式(4)の右辺の対数項中の $\sigma_o$ によって、図-2中の $\bar{\sigma}_{SMP} \sim \sigma_o$ 面( $\bar{\tau}_{SMP} = 0$ )での曲線が表現されているが、この点が新たに拡張したところである。なお、式(4)はボンド応力一定条件において得られたものであるが、ここではボンド応力が変化する場合にも適用できるものと仮定する。図-1(a)、(b)は、式(4)に基づく $\bar{\sigma}_{SMP}$ と $\sigma_o$ の関係の概念図とその計算例を示している。図-1(a)中のA点からB点のようにボンド応力が増加した場合、A点と同じ塑性仕事を与えるには、C点まで外力を増加する必要があることを示している。すなわちこの曲線はボンド応力の増加による骨格剛性の増加を示していると考えられる。

締固めた不飽和土供試体を用いたサクシヨンおよび平均有効主応力一定条件での三軸圧縮・伸張試験結果より得られる、拡張SMP上の応力比 $\hat{\sigma}_{SMP} / \hat{\tau}_{SMP}$ とひずみ相当量増分比 $(-d\hat{\epsilon}_{SMP} / d\hat{\gamma}_{SMP})$ の関係<sup>4)</sup>は、応力パ

ラメーター $\bar{\sigma}_{SMP}^*$ ,  $\bar{\tau}_{SMP}^*$ とボンド応力 $\sigma_0$ を用いると次式により示される。

$$\frac{\bar{\tau}_{SMP}^*}{\bar{\sigma}_{SMP}^* + \sqrt{3}\sigma_0} = \hat{M}^* + \hat{a} \left( -\frac{d\hat{\epsilon}_{SMP}^*}{d\hat{\gamma}_{SMP}^*} \right) \quad (5)$$

ここに $\hat{a}$ 、 $\hat{M}^*$ は、せん断特性を示すパラメーターである。

さらに、ボンド応力一定条件下の降伏関数を以下のように誘導する。まず、ひずみ増分 $d\epsilon$ のうちの塑性成分 $d\epsilon^p$ を、等方的な塑性圧縮成分 $d\epsilon^{p(1C)}$ とそれ以外の成分 $d\epsilon^{p(AF)}$ に分けて考える<sup>6)</sup>。そして、平均有効応力一定条件下で生じるひずみ増分については、弾性成分 $d\epsilon^e$ と等方的な塑性圧縮成分 $d\epsilon^{p(1C)}$ を除いて得られる $d\epsilon^{p(AF)}$ 成分に対しても式(5)のような関係が成立すると仮定する。この仮定により式(5)から次式が導かれる。

$$\frac{\bar{\tau}_{SMP}^*}{\bar{\sigma}_{SMP}^* + \sqrt{3}\sigma_0} = \hat{M}^* + \hat{a} \left( -\frac{d\hat{\epsilon}_{SMP}^{p(AF)*}}{d\hat{\gamma}_{SMP}^{p(AF)*}} \right) \quad (6)$$

式(6)に直交則を適用し、関連流動則を仮定すると降伏関数 $f$ として次式が得られる<sup>3)</sup>。

$$f = g = \ln(\bar{\sigma}_{SMP}^* + \sqrt{3}\sigma_0) - \frac{\hat{a}}{1-\hat{a}} \left( 1 - \frac{1-\hat{a}}{\hat{M}^*} \frac{\bar{\tau}_{SMP}^*}{\bar{\sigma}_{SMP}^* + \sqrt{3}\sigma_0} \right) - \ln(\bar{\sigma}_{SMP1}^* + \sqrt{3}\sigma_0) = 0 \quad (7)$$

式(4)と式(7)により、応力空間 $(\bar{\sigma}_{SMP}^*, \bar{\tau}_{SMP}^*, \sigma_0)$ において図-2のような降伏曲面を定義することができる。なお、この降伏曲面の硬化パラメーターは式(3)に示す塑性仕事相当量である。

提案構成モデルでは図-2に示す降伏曲面をもとにして、弾塑性状態を判断するものとする。なお、等方的な塑性圧縮成分 $d\epsilon^{p(1C)}$ については、次式で与えられるものとする。

$$d\epsilon_{ij}^{p(1C)} = \frac{\delta_{ij}}{3} \frac{\bar{\sigma}_{SMP}^* + \sqrt{3}\sigma_0}{\bar{\sigma}_{SMP1}^* + \sqrt{3}\sigma_0} d\epsilon^* \quad (8)$$

ここで、 $\delta_{ij}$ ：クロネッカーのデルタである。また、 $d\epsilon^{p(AF)}$ 成分については、その各座標軸に対する成分が次式で与えられるものとする。

$$d\epsilon_{ij}^{p(AF)} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}^*} \quad (9)$$

この構成モデルによる不飽和土の三軸試験結果の予測に関しては別報<sup>7)</sup>を参照されたい。

**参考文献** 1) Karube D., ASTM STP977, 1988, pp.539-552. 2) Alonso E.E., Gens A. & Josa A., Geotechnique 40 (3), 1990, pp.405-430. 3) 松岡・孫、土木学会論文集、No.505/Ⅲ-29、1994、pp.201-210. 4) 加藤・松岡ら、第28回土質工学研究発表会講演集、277、1993. 5) 軽部・西海・勝山、土木学会論文集、No.406/Ⅲ-11、1989、pp.205-212. 6) Nakai T., S & F 29 (1), 1989, pp.119-137. 7) 滝脇・松岡ら、土木学会第50回年次学術講演会概要集、1995（投稿予定）。

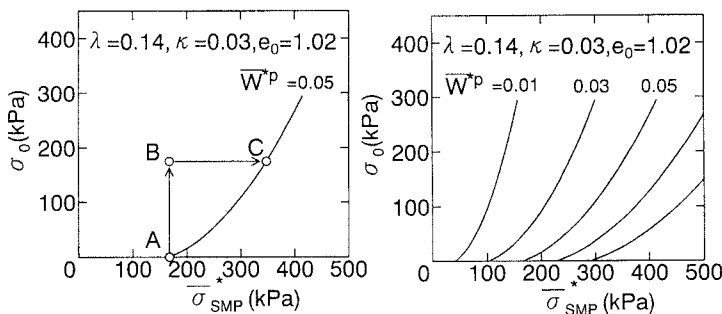


図-1 式(4)に基づく $\sigma_{SMP}^*$ と $\sigma_0$ の関係  
(図中の $W^p$ の単位は(kPa)である)

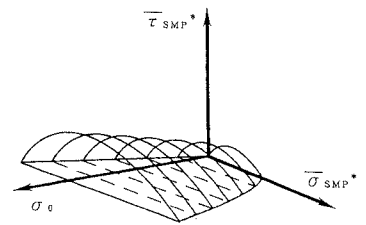


図-2  $(\bar{\sigma}_{SMP}^*, \bar{\tau}_{SMP}^*, \sigma_0)$  応力空間における降伏曲面