

III-183

空間滑動面に基づいた粘着成分を有する摩擦性材料の破壊規準とその変形挙動の解析

名古屋工業大学

学生員

○星川 拓哉

”

正員

松岡 元

鹿島建設(株)

上野 健治

粒状体のような粒子間のボンドのない摩擦性材料と金属のようなボンドの強固な粘着性材料の中間の特性をもつ材料について、すでに「拡張された空間滑動面」(Extended SMP)に基づいた破壊規準を提案し¹⁾、金属材料のためのミーゼス規準、粒状材料のための松岡・中井規準との明解な関係についても考察した。ここでは、同じ観点から粘着成分を有する摩擦性材料の変形挙動についても解析を試みる。

1. 粘着成分を有する摩擦性材料のための破壊規準

すでに提案している松岡・中井規準^{2), 3)}を粘着成分を有する摩擦性材料に対しても拡張するため、大槻⁴⁾にならって3次元応力下の3個のモールの応力円に σ 軸上の負の1点(この点の絶対値をボンド応力 σ_0 と名付ける。 $\sigma_0 = c \cdot \cot \phi$ (c :粘着力、 ϕ :内部摩擦角))から接する3本の直線を想定する(図-1参照)。ここで、この点 $\hat{O}$ を新しい座標原点と考え、これを $\hat{\sigma} \sim \hat{\tau}$ 座標をすれば、以前の $\sigma_0 = 0$ の場合と同じ式の展開が可能となる。この新しい座標系で考えれば、主応力 $\hat{\sigma}_i$ 、応力不変量 $\hat{J}_1$ 、 $\hat{J}_2$ 、 $\hat{J}_3$ 、粘着成分を有する摩擦性材料のための「拡張された空間滑動面」の法線方向余弦 $\hat{a}_i$ は次式で表される(図-2参照)。

$$\hat{\sigma}_i = \sigma_i + \sigma_0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{J}_1 &= \hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2 + \hat{\sigma}_3 = (\sigma_1 + \sigma_0) + (\sigma_2 + \sigma_0) + (\sigma_3 + \sigma_0) \\ \hat{J}_2 &= \hat{\sigma}_1 \hat{\sigma}_2 + \hat{\sigma}_2 \hat{\sigma}_3 + \hat{\sigma}_3 \hat{\sigma}_1 \\ &= (\sigma_1 + \sigma_0)(\sigma_2 + \sigma_0) + (\sigma_2 + \sigma_0)(\sigma_3 + \sigma_0) + (\sigma_3 + \sigma_0)(\sigma_1 + \sigma_0) \\ \hat{J}_3 &= \hat{\sigma}_1 \hat{\sigma}_2 \hat{\sigma}_3 = (\sigma_1 + \sigma_0)(\sigma_2 + \sigma_0)(\sigma_3 + \sigma_0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\hat{a}_i = \sqrt{\frac{\hat{J}_3}{\hat{\sigma}_i \hat{J}_2}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

式(3)で表される方向余弦は、 $\sigma_0 = 0$ のときには従来のSMPに、 $\sigma_0 \rightarrow \infty$ のときには正八面体面に対応する。拡張された空間滑動面上の垂直応力 $\hat{\sigma}_{SMP}$ 、せん断応力 $\hat{\tau}_{SMP}$ は次式で表される。

$$\hat{\sigma}_{SMP} = \hat{\sigma}_1 \hat{a}_1^2 + \hat{\sigma}_2 \hat{a}_2^2 + \hat{\sigma}_3 \hat{a}_3^2 \quad (4)$$

$$\hat{\tau}_{SMP} = \sqrt{(\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_2)^2 \hat{a}_1^2 \hat{a}_2^2 + (\hat{\sigma}_2 - \hat{\sigma}_3)^2 \hat{a}_2^2 \hat{a}_3^2 + (\hat{\sigma}_3 - \hat{\sigma}_1)^2 \hat{a}_3^2 \hat{a}_1^2} \quad (5)$$

もし粘着成分を有する摩擦性材料が、従来の摩擦性材料の場合と同様に、 $\hat{\tau}_{SMP} / \hat{\sigma}_{SMP}$ がある一定値に達したとき破壊するものとすれば、次の破壊規準を得る。

$$\frac{\hat{\tau}_{SMP}}{\hat{\sigma}_{SMP}} = \sqrt{\frac{\hat{J}_1 \hat{J}_2 - 9 \hat{J}_3}{9 \hat{J}_3}}$$

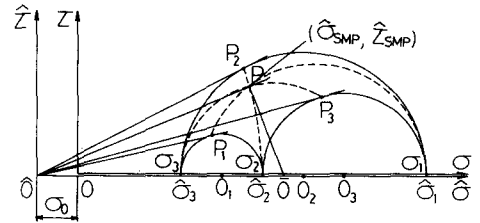


図-1 粘着成分を有する摩擦性材料のための「拡張された空間滑動面」上のせん断応力($\hat{\tau}_{SMP}$)と垂直応力($\hat{\sigma}_{SMP}$)

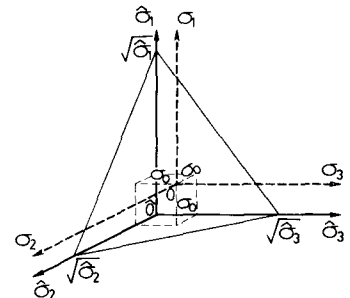


図-2 粘着成分を有する摩擦性材料のための「拡張された空間滑動面」

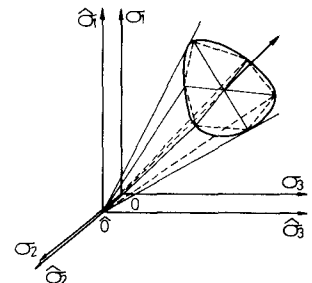


図-3 3次元応力空間で表した粘着成分を有する摩擦性材料のための破壊規準

$$= \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{4(\sigma_1 + \sigma_0)(\sigma_2 + \sigma_0)} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{4(\sigma_2 + \sigma_0)(\sigma_3 + \sigma_0)} + \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)^2}{4(\sigma_3 + \sigma_0)(\sigma_1 + \sigma_0)}} \\ = \text{const.} \quad (6)$$

図-3は、式(6)による破壊規準の3次元応力空間における形を示したものである。なお、式(6)は $\sigma_0=0$ のときは松岡・中井規準に、 $\sigma_0 \rightarrow \infty$ のときはミーゼス規準に帰着される¹⁾。

2. 粘着成分を有する摩擦性材料の変形挙動の解析

ここでは、粘着成分を有する摩擦性材料として過圧密粘土を考える。図-4は通称藤の森粘土($w_L=41\%$, $w_p=23\%$, $G_s=2.67$)の過圧密比OCR=8での三軸圧縮試験と三軸伸張試験の結果を $\sigma_1/\sigma_3 \sim e_1$, e_3 関係で整理したものであり、図-5は従来の空間滑動面のせん断・垂直応力比 $\sim$ せん断ひずみ $\sim$ 垂直ひずみ関係で整理したものである。これらの図では三軸圧縮時と三軸伸張時の変形挙動を統一的に説明することができないようである。そこで、粘着成分を有する摩擦性材料のための拡張された空間滑動面上の応力比 $\sim$ ひずみ関係で整理することを試みる。拡張された空間活動面上の垂直ひずみ増分量 $d\hat{e}_{SMP}^*$ とせん断ひずみ増分量 $d\hat{\gamma}_{SMP}^*$ は次式で表される。

$$d\hat{e}_{SMP}^* = d\epsilon_1 \hat{a}_1 + d\epsilon_2 \hat{a}_2 + d\epsilon_3 \hat{a}_3 \quad (7)$$

$$d\hat{\gamma}_{SMP}^* = \sqrt{(d\epsilon_1 \hat{a}_2 - d\epsilon_2 \hat{a}_1)^2 + (d\epsilon_2 \hat{a}_3 - d\epsilon_3 \hat{a}_2)^2 + (d\epsilon_3 \hat{a}_1 - d\epsilon_1 \hat{a}_3)^2} \quad (8)$$

図-6は、上述のOCR=8の藤の森粘土の三軸圧縮試験と三軸伸張試験の実測値を、 $\hat{e}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim \hat{\gamma}_{SMP} \sim \hat{e}_{SMP}$ 関係で整理したものである。図-5と比べて、破壊時の応力比が三軸圧縮と三軸伸張で揃っており、ダイレイタンシーも近づくのがみられる。以上より、粘着成分を有する摩擦材料の破壊規準だけでなく変形挙動についても、提案している「拡張された空間滑動面」の概念によって統一的な評価が可能なのである。なお、ボンド応力 σ_0 については、三軸圧縮試験と三軸伸張試験の破壊時のモールの応力円から $\sigma_0=0.6 \text{ kgf/cm}^2$ と定めて計算している(図-1参照)。

参考文献

- 1) 松岡・星川・上野(1989):第24回土質工学研究発表講演集(投稿中)。
- 2) Matsuoka & Nakai(1974):Proc. Japan Society of Civil Eng., No. 232, pp.59-70.
- 3) Matsuoka & Nakai(1985):Soils and Foundations, Vol. 25, No. 4, pp.123-128.
- 4) Ohmaki (1979):Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, pp.465-474.

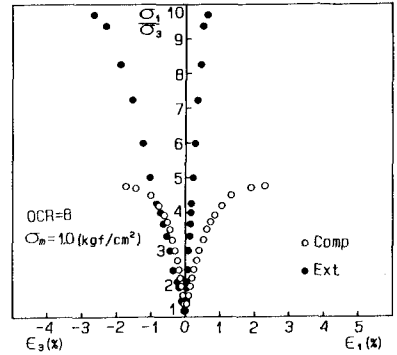


図-4 OCR=8の三軸圧縮・三軸伸張試験での主応力比 $\sim$ 主ひずみ関係の実測値

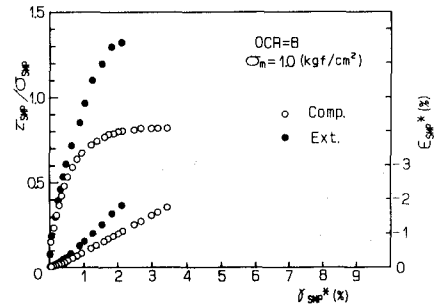


図-5 OCR=8の三軸圧縮・三軸伸張試験での $\tau_{SMP}/\sigma_{SMP} \sim \gamma_{SMP}^* \sim e_{SMP}^*$ 関係の実測値

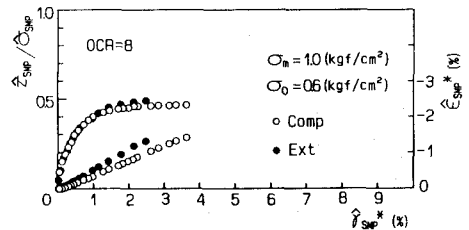


図-6 OCR=8の三軸圧縮・三軸伸張試験での $\hat{e}_{SMP}/\hat{\sigma}_{SMP} \sim \hat{\gamma}_{SMP} \sim \hat{e}_{SMP}$ 関係の実測値