

III-117 高压下の砂に対する一般化 modified Cam-clay モデル

（財）大阪土質試験所 正会員 平山英喜

1. まえがき 杭の先端では、応力レベルが10MPa 以上になることもあり、著しい砂の粒子破碎が生じる。このような状態での砂に対する応力-ひずみモデルとして、modified Cam-clay モデル¹⁾にいくつかの改良を加えて一般化した弾塑性モデルを提案する。

2. 高压下の砂の弾塑性挙動

粒子破碎が生じるような応力レベルまで考えると、砂の圧縮特性は粘土のそれと同様になることが知られている。図-1に $\log(1+e)-\log p$ 関係³⁾で整理した例を示す。したがって、高压下の砂に対しては負のダイレイタンスに加えて、平均主応力の変化に起因した塑性体積ひずみ（圧密）も考える必要がある。両者に降伏曲面（例えば $p = \text{const.}$ と $q/p = \text{const.}$ ）を想定して、2つの降伏曲面を有する弾塑性モデルを用いると、FEMへの適用に際して非常に複雑になる⁴⁾。さらに、ダイレイタンスと圧密は、粒子のすべりや破碎など、かなり共通の要因で生じるため、両者は完全に独立でなく、相互作用が存在する。したがって、単一の降伏曲面で高压下の砂⁵⁾や、過圧密な砂⁶⁾の弾塑性挙動を近似できると考えられる。

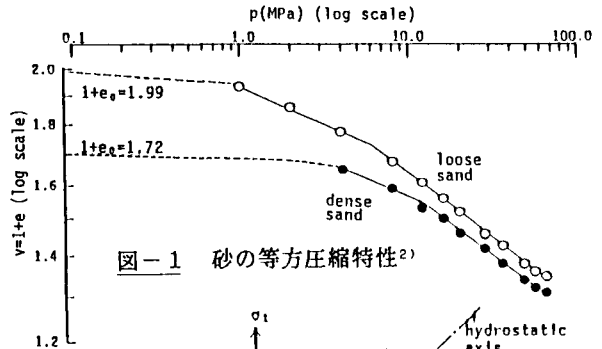


図-1 砂の等方圧縮特性²⁾

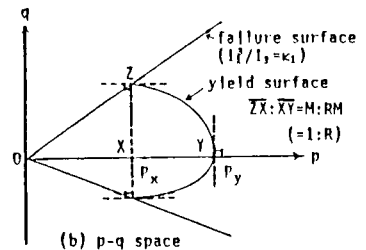
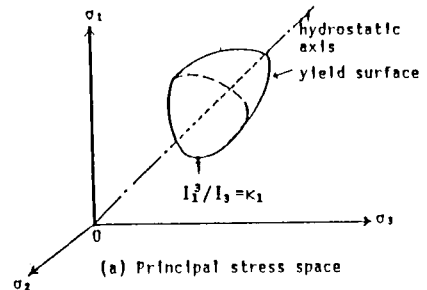


図-2 降伏（ポテンシャル）曲面

3. modified Cam-clay モデルの一般化

modified Cam-clay モデルの特長として次のことが挙げられる：①楕円形のポテンシャル曲面のため、等方圧縮とcritical state の両極端の応力状態での挙動がモデル化できる；②normality condition を仮定しているので、数値解析的な観点から簡潔である。

一方、高压下の砂への適用という観点から、次のような問題点が挙げられよう：③正八面体面(octahedral plane)上での降

伏曲面は円であり、破壊規準も含めて中間主応力の効果が考慮されていない⁷⁾；④高压下の砂に対して観測された降伏曲線は、Cam-clay モデルとmodified Cam-clay モデルの中間的なものである⁸⁾；⑤楕円の形が固定されているため、①で述べた両極端の場合の中間で降伏（ポテンシャル）曲線の形が固定されている；⑥図-1に示したように、砂の $\log(1+e)-\log p$ 関係は、乱された粘土のそれと類似しており、単一の折点では近似度が低い。

上記の①②の特長を残した上で、③～⑥に関連して、パラメーター決定およびFEM解析に際してあまり複雑にならないということに留意して、modified Cam-clay モデルに以下のような改良を加える。

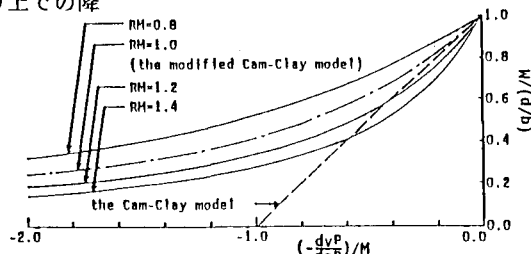


図-3 パラメーターRMのダイレイタンス特性に及ぼす効果

③に対して：正八面体面での降伏および破壊曲線がLade-Duncan⁸⁾のパラメーター $f=I_1^3/I_3$ (I_1, I_3 は1次、3次の応力不変量) により $f = \text{const.}$ で表わされるものとする。破壊規準は $f = \kappa_1$ とする (図-2(a)参照)。

④⑤に対して：楕円の長軸と単軸の比Rを $1/M$ に固定せずRMを1つのパラメーターとする (図-2(b)および図-3参照)。

⑥に対して： $\log(1+e) - \log p$ が2折点を持つ直線で表わされるものとする (図-4参照)。なお Wroth & Houlsby⁹⁾ は、正規圧密粘土に対し $e - \log p$ のかわりに $\log(1+e) - \log p$ を用いて modified Cam-clay モデルの minor variant を提案している。

以上の改良により、降伏 (ポテンシャル) 関数は次のようになる。

$$F = \left[I_1 - \frac{I_{1y}}{RM+1} \right]^2 - \left[I_{1y} - \frac{I_{1y}}{RM+1} \right]^2 + 9R^2(I_1 - 3I_2) \quad (1)$$

ここに $I_{1y} = 3p_y$, $R = (p_y - p_x)/MP_x$ (図-2(b)参照)

$$M = \frac{q}{p} \Big|_{\text{at failure}} = \frac{3\sqrt{k}}{2\cos\alpha}; \cos 3\alpha = -\sqrt{k}\cos 3\theta, k = 1-27/\kappa_1, \theta = \text{Lode 角}$$

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), q = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

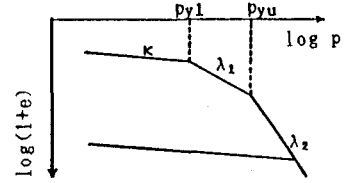


図-4 提案モデルで仮定した圧縮特性 (硬化関数)

4. 高压下の砂の三軸試験の解析

上記の応力-ひずみモデルを FEM プログラムに組み込み、四辺形単一要素による軸対称解析により Miura et al.¹⁰⁾ による高い拘束

圧下での豊浦砂に対する三軸試験結果を解析した。用いたインプット・データを表-1に、計算結果と実験結果の対比を図-5に示す。この結果から、提案したモデルは、FEMへの適用を考慮した高压下の砂のモデルとして有効なものと考えられる。

表-1 インプット・データ

κ	λ_1	λ_2	p_{y1} (kPa)	p_{yu} (kPa)	ν	κ_1	RM
0.0105	0.0472	0.0962	5400	13000	0.3	45.04	1.20

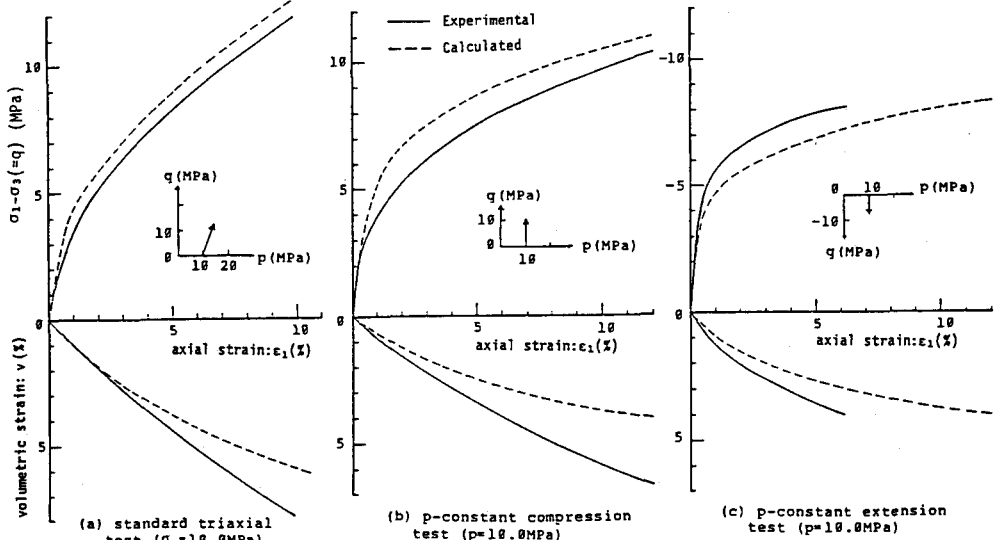


図-5 高压下の砂の三軸試験結果の解析結果

- 参考文献 1) Roscoe & Burland (1968) : Engineering Plasticity, Cambridge Uni. Press, pp.535-609
 2) Vesic & Clough (1968) : Proc. ASCE, No. SM3, pp. 661-688 3) Butterfield (1979) : Geotech., No. 4, pp. 469-480
 4) Hirayama (1987) : S & F (投稿中) 5) 三浦・山本 (1982) : 土木学会論文報告集, 第326号, pp. 83-90
 6) 谷本 他 (1985) : 第20回土質工学研究発表会, pp. 381-382 7) Wroth & Houlsby (1985) : Proc. 11th ICSMFE, Vol. 1, pp. 1-55
 8) Lade & Duncan (1975) : Proc. ACSE, No. GT10, pp. 1037-1053
 9) Wroth & Houlsby (1980) : Proc. The Workshop on Limit Equilibrium, Plasticity and Generalized Stress-Strain in Geotech. Eng., pp. 592-627
 10) Miura et al. (1984) : S & F, No. 1, pp. 77-89