

ロック材の応力・ひずみ関係について

山口大学工学部 正員 三浦哲彦
山口大学大学院 学生員 〇山本紀之

1. まえがき

土の応力・ひずみ関係を知ら ことは、土質工学上の重要な課題の一つであり、合理的かつ実用的な応力・ひずみ理論の出現が待たれている。すでに提案されている応力・ひずみ理論の一つに、限界状態の概念に基づく *Reesce* らの理論がある。この理論は、通常の圧力下の正規圧密、または、軽く過圧密された粘土によく適合する理論である。さて、高压下のロック材の力学的特性には、次のような特徴が見られる：a). ある値を越えた拘束圧下では、ロック材は、せん断中に体積膨張をきたさなくなり、また、応力・ひずみ曲線は、ピークを示さない。；b). $e \sim \ln p$ 曲線は、ある圧力（圧密降伏圧力）付近で、急にその勾配を変えざるが、これは、粒子破砕に起因する不可逆的な間隙比変化を意味する。これらの実験事実は、通常圧力下での粘土の特徴とよく似ている。もし、高压下のロック材の挙動と、通常圧力下の粘土の挙動に一貫した対応性があるならば、*Reesce* らの理論によって、高压下のロック材の応力・ひずみ関係を予測し得るかもしれない。本研究では、このような観点から、*Reesce* らの応力・ひずみ理論を、高压下のロック材に適用しようと試みたものである。なお、上述のことと、同様な考へ方に基づいて、高压下の砂の応力・ひずみ挙動を、おおむね予測できることが、先の研究²⁾で明らかにされている。

2. 材料定数 λ , K , 及び M

Reesce らは、土の応力・ひずみ性を導びくにあたり、3つの材料定数 λ , K , 及び M を導入した¹⁾。これらの材料定数は、次のようにして求めることが出来る。すなわち、土の圧密試験結果を $e \sim \ln p$ 平面にプロットする。

このとき、圧密降伏圧力点を折れ点とする二本の直線が得られる。圧密降伏圧力より低い圧力域の直線は、粘土の過圧密曲線（膨張曲線）に相当し、その傾きが K となる。圧密降伏圧力以上の圧力域にある直線は、粘土の正規圧密曲線に相当し、その傾きが λ となる（図1）。また、限界状態とみられるロック材の平均有効主応力 $\bar{p}$ ($= (\sigma_1' + 2\sigma_3)/3$) と、軸差応力 q ($= (\sigma_1' - \sigma_3)$) の関係を $\bar{p} \sim q$ 平面にプロットすると、原点を通過する直線が描かれる。その直線の傾きをもって、 M の値とする（図2）。なお、本研究では、4種類のロック材について検討しているが、これらの材料の高压三軸せん断試験、及び高压圧密試験の結果は、文献3), 4)より引用したものである。これらのロック材の材料定数を表1に示す。三つの材料定数のうち、 λ , M については、そのロック材に、十分な粒子破砕が生じているような圧力域に於いてのみ、正しく求められると考えられる。

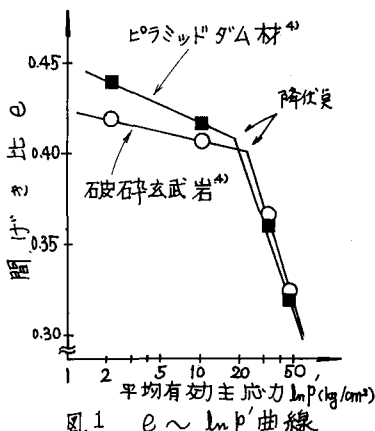


図1 $e \sim \ln p'$ 曲線

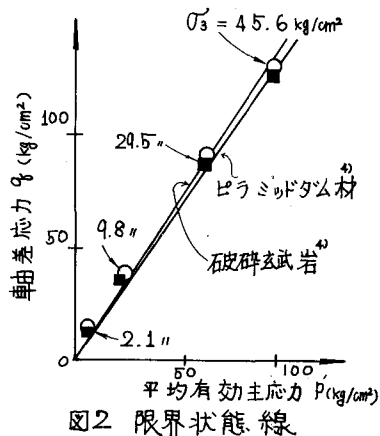


図2 限界状態線

表1. 各ロック材の材料定数

材 料 名	λ	K	M
緑 色 片 岩 ³⁾	0.140	0.0036	1.57
破 砕 玄 武 岩 ⁴⁾	0.078	0.014	1.51
ピラミッドダム材 ⁴⁾	0.094	0.013	1.44
オロピュダム材 ⁴⁾	0.041	0.004	1.49

3. 応力～ひずみ関係

Rocheらが導き出した Cam-clay 式³⁾及びその修正式⁴⁾は、せん断ひずみ ϵ 、体積ひずみ ν を、排水せん断試験⁵⁾に対して、次のように表している。

Cam-clay 式:

$$\epsilon(\%) = \frac{100(1+e)}{(1+e_0)} \left\{ \frac{1}{3-M} \ln \left(\frac{3-\nu}{M-\nu} \right) - \frac{1}{M} \ln(M-\nu) + C_1 \right\} \quad (1)$$

$$\nu(\%) = \frac{100}{1+e} \left\{ \frac{2-K}{M} \nu - \lambda \ln(3-\nu) + C_2 \right\} \quad (2)$$

修正式:

$$\epsilon(\%) = \frac{100(1+e)}{(1+e_0)} \left\{ \frac{3}{2M(3+M)} \ln(M+\nu) - \frac{3}{2M(3-M)} \ln(M-\nu) - \frac{1}{M} \tan \left(\frac{\nu}{M} \right) + \frac{3}{9-M^2} \ln(3-\nu) + C_3 \right\} \quad (3)$$

$$\nu(\%) = \frac{100}{1+e} \left\{ (2-K) \ln(M^2+\nu^2) - \lambda \ln(3-\nu) + C_4 \right\} \quad (4)$$

ここに ν は応力比 $(=q/p')$ 、 e は等方圧密後の間隙比である。また、積分定数 C_1 は、正規圧密状態では、 $\nu=0$ で $\epsilon=\nu=0$ の条件より求める。

過圧密状態にあるロック材の応力～ひずみ関係については、前と同様、排水せん断試験の場合と考慮して、弾性域では、

$$\epsilon=0, \quad \nu=\nu^r = \frac{K}{1+e} \ln \left(\frac{3}{3-\nu} \right) \quad (5)$$

また、弾塑性域の応力～ひずみ関係は、(1)～(4)式によ、て与えられるものとする。ただし、積分定数 C_1 は、降伏曲面に達したときの ν の値 ν_q を(4)式で求め、この値を(1)～(4)式へ代入し、その時、 $\epsilon=0$ 、 $\nu=\nu_q$ の条件より決定する。

$$\left. \begin{aligned} \nu_q &= 3(p' - p_0) / p' \\ \nu_q &= M \ln(P_0/P') \text{----- Cam-clay 式} \\ P'/P_0 &= M^2 / (M^2 + \nu_q^2) \text{----- 修正式} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 P_0 は、材料の圧密降伏応力である。

このようにして求めた応力～ひずみ理論曲線と、実測値とを比較したものが、図3、図4である。図3では正規圧密状態のロック材を、図4では過圧密領域でのロック材の応力～ひずみ関係を示した。軸ひずみ $\epsilon_1 (= \epsilon + \nu/3)$ ～軸差応力 q の関係とすると、

Cam-clay 式は、軸差応力 q に対し、軸ひずみ ϵ_1 を過大評価する傾向が強い。これに対し、修正式は、 q が小さい場合、ひずみ ϵ_1 を過少評価し、 q が大きくなるとひずみ ϵ_1 を過大評価する傾向がある。ここでは、修正式の方がより適合性に富んでいると思われる。全く同様なこと、応力～体積ひずみ、せん断ひずみの間にもみられた。次に、軸ひずみ ϵ_1 ～体積ひずみ ν の関係を見ると、Cam-clay 式の方が適合性に富んでいるようであるが、これは、Cam-clay 式が、 ϵ_1 、 ν を共に過大評価するために生じた偶然の結果であると思われる。また、過圧密状態のロック材の理論曲線は、降伏点に達するまじり、せん断ひずみ ϵ を無視しているため、不自然な形となっている。この仮定には、再検討の余地がありとうである。以上の結果から

高压下のロック材に、Rocheらの理論を適用することは、大筋において可能であると言えよう。

- 文献) 1) Roche et al; Engineering Plasticity, 1968 2) 三浦: 土木学会論文報告集 No. 282, 1979
3) 九電総合研究所土木研究室; 第9回材料試験に関する報告検討会資料(その1, その2), 1978
4) N.D. Marachi et al; Geotechnical Engineering Report NO. TE 69-5, 1969

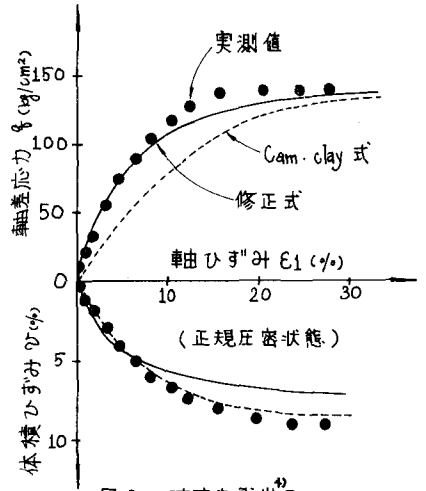


図3. 砕石(石灰岩)の
応力～ひずみ曲線

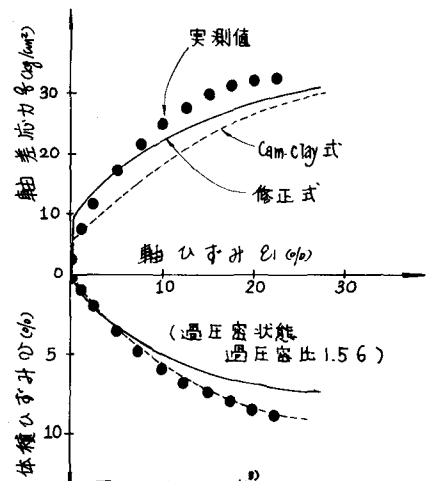


図4. 緑色土の
応力～ひずみ曲線