

中部電力総合技術研究所 丹羽哲郎
 “ “ 〇河合照久
 “ “ 長谷川英明

ロックフィルダムの応力と変形の数値解析は Duncan 等によって示された非線形な応力～ひずみ関係を用いてなされる場合が多いが、実測結果と比較したときに貯水圧による変形が一致しないことが多く、数値解析手法の改良が望まれている。このことは単に数値解の精度を向上するだけでなく適正な応力～ひずみ関係表現できる塑性論の導入が必要と考えられる。

ここでは、我國において小沢¹⁾によって示された Lade の非粘性土に関する弾塑性理論を紹介し、我々が解析の対象としているロックフィルダム材料の三軸試験を実施して Lade による降伏関数と塑性ポテンシャル関数の決定を試みた結果を報告する。

1 Lade-Ogawa による降伏関数と塑性ポテンシャル関数^{2), 3)}

Lade は石けによる立方体の供試体を用いて互いに直角なる方向の応力変位を独立に制御できる三軸圧縮試験ならびに中空円筒状供試体のねじりせん断試験等によって非粘性土の降伏関数と塑性ポテンシャル関数を導いた。さらに小沢は Lade の理論を発展させ有限要素法による一般土質構造体の数値解析手法を開発している。

Lade による降伏関数は (1) 式で示されている。

$$f = K - K_t - w^p / (a + b w^p) \quad (1)$$

ここに、 K は I_1^3, I_2, I_3 はそれぞれ応力の 1 次、3 次不変量、 K_t は K の初期値、 w^p は全塑性仕事、 a, b はパラメータである。Lade は w^p と K の関係が最小主応力のみにによって決定されること、破破壊時の K は応力の経路に關係しない材料固有のものとしているので都合のよいことに一般の三軸試験によってパラメータ a, b を決定することが出来る。材料が降伏状態にある場合は (1) 式から、

$$w^p / (K - K_t) = a + b w^p \quad (2)$$

(2) 式の左辺が w^p と直線関係にあることから a, b を求めることが出来る。

一方、塑性ひずみ増分の主軸を決定する塑性ポテンシャル関数は (3) 式で示されている。

$$q = (I_1^3 - K_3 I_3) / I_3 \quad (3)$$

K_3 は Lade の示したパラメータ K_2 を用いて小沢が発展させたもので (4) 式で示される。

$$K_3 = 2 K_2 - I_1^3 / I_3 \quad \text{ここに } K_2 = A_1 I_1^3 / I_3 + A_2 \quad (4)$$

Flow rule から $\{d\epsilon_p^p\} = \left\{ \frac{\partial q}{\partial \sigma_i} \right\} d\lambda$ であり $\sigma_2 = \sigma_3$ の円筒状三軸圧縮状態を考慮して $\nu^p = -d\epsilon_p^p / d\epsilon_p^p$ とおけば

$$K_2 = 3 I_1^2 (1 + \nu^p) / \{ \sigma_3 (\sigma_1 + \nu^p \sigma_3) \} \quad (5)$$

ここに、 $d\epsilon_p^p$ は塑性ひずみ増分であり、 σ_1 は軸方向応力、 σ_3 は側圧である。一般の三軸圧縮試験から各応力レベルにおける K_2 を (5) 式から求めれば定数 A_1 と A_2 を決定することが出来る。

2 試験結果

ロックフィルダム実材料を用いて実際の粒度分布に相似させ、円筒状供試体によって三軸圧縮試験を実施した。この材料は最大粒径 20 mm、初期間隙比 0.45、均等係数 12.0、供試体寸法直径 100 mm、高さ 250 mm である。試験は所定の側圧まで等方圧密させた後、軸方向荷重を増大させて破壊させたもので側圧 3, 5, 7 kg/cm² の 3 case の応力～ひずみ曲線は図-1 のとおりである。これらの応力～ひずみ曲線では明瞭な降伏点が存在しないので塑性ひずみを分離する

ための初期の変形係数を求めるのが困難である。

DuncanはKardnerの示した軸差応力～軸ひずみの関係 (6) 式を用いて破壊応力の70%と95%の2点を結ぶ2点によって定数 a, b を求めることを提案している。(6) 式から初期の変形係数

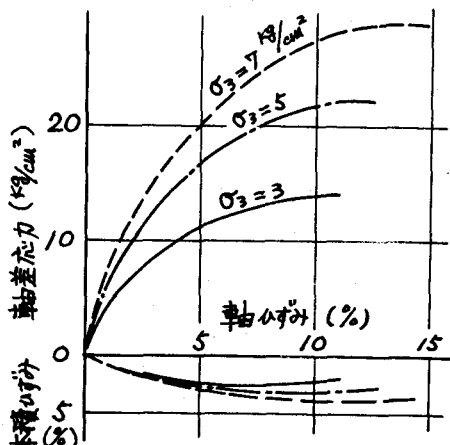


図-1 三軸圧縮試験による軸差応力～軸ひずみ

は $1/a$ で求めることが「できる」が、実測結果は図-2 に示すように初期の範囲でこれをはずれる。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \varepsilon_1 / (a + b\varepsilon_1) \therefore \varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) = a + b\varepsilon_1 \quad (6)$$

そこで筆者らは近似曲線として3つのパラメータをもつ(7)式の双曲線によって初期の変形係数を求め、塑性ひずみを分離した。図-2 中の実線は(7)式による近似であり全体に近似度はよい。初期において曲線に乗らないのは試験精度の限界を越える範囲と考えられる。

$$\varepsilon_1 = A + B / (\sigma_1 - \sigma_3 - B) + C (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (7)$$

図-3 は降伏関数のパラメータを得るためのもので K_t は K が双曲線近似するための初期値として σ_1 に求めることができる。この結果によれば「拘束圧が異なることによって勾配一定で平行移動することが示され、(2) 式のパラメータ a, b が決定される。

一方、塑性ポテンシャル関数のパラメータ K_2 は図-4 に示すように拘束圧に無関係な定数 A_1, A_2 を求めることができる。

以上は Lade の示した降伏関数、塑性ポテンシャル関数のパラメータが均等係数の大きい砂礫土に対して比較的容易に求め得ることを示したにすぎないが、これらの関数がロック材の力学特性を表わす有力な手法の一つと考えられるので今後はさらにその妥当性を検討していきたいと考える。

謝 辞

本研究に対して御指導を賜った名古屋大学川本聡万教授ならびに日建設計小沢良夫氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 小沢良夫: 土の弾塑性有限要素解析について(土木学会29回年次学術講演会, 49.10)
- 2) P.V. Lade: The stress-strain and strength characteristics of cohesionless soils, Thesis presented to U.C. Berkeley for Ph.D., 1972.
- 3) Y. Ogawa: Elasto-plastic Finite Element Analysis of Soil Deformation, Thesis presented to U.C. Berkeley for Ph.D., 1973

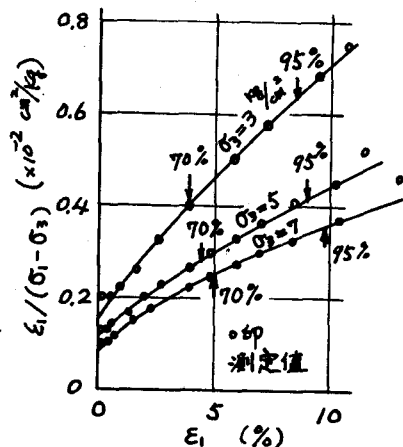


図-2 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 関係

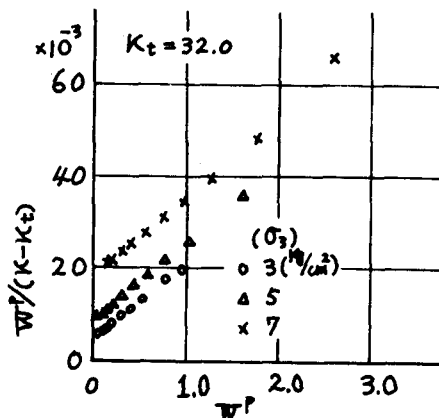


図-3 $W^p / (K - K_e) \sim W^p$ 関係

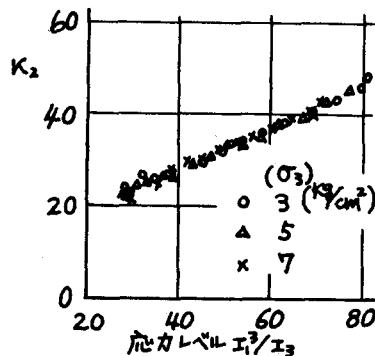


図-4 $K_2 \sim W^p / I_3$ 関係