

山口大学工学部 正員 三浦 哲彦
徳山市役所 正員 ○小林 健二
宇部興産(株) 三田 浩之

1. まえがき

砂質土の応力ひずみ関係は Lade モデル¹⁾によって比較的よく予測できることが知られている。このモデルは、塑性ひずみ増分を塑性仕事増分 dW_p の関数で表わしているところから、まさ土のような破砕性砂質土にも適用できるのではないかと考えた。それは、破砕性砂質土のせん断応力下における粒子破砕量は塑性仕事と密接な関係にあることがわかっているからである²⁾。

本報では、まず低圧下においてはほとんど粒子破砕を起こさない豊浦砂に対して Lade モデルを適用しその適合性および問題点を検討した。次いで、この理論をまさ土にも適用して、粒子破砕が応力ひずみ関係の予測にどのような影響するかを検討した。

2. 三軸圧縮試験

2.1 実験試料 実験試料として、豊浦砂およびまさ土を用いた。豊浦砂のおもな性質は、土粒子比重 2.637、均等係数 1.33、50% 粒径 $200\mu\text{m}$ である。本実験では、気乾状態 ($w=0.1\sim0.2\%$) の試料を使用した。また、まさ土は、 $4760\mu\text{m}$ 以下の通過した気乾試料 ($w=2.6\sim2.8\%$) を用いた。おもな性質は、土粒子比重 2.63、50% 粒径 $1010\mu\text{m}$ である。

2.2 実験方法 豊浦砂では初期間隙比 $0.62\sim0.64$ 、まさ土では初期間隙比 $0.72\sim0.74$ の密づめ供試体を作製し所定の拘束圧 ($100\sim300\text{kPa}$) のもとで等方圧密した後、側圧一定、排水条件による三軸圧縮試験を行った。

3. 塑性応力ひずみ関係

Lade モデルでは応力～塑性ひずみ増分関係は次式で表わされる。

$$dE_1^p = d\lambda K_2 \left(\frac{3}{K_2} I_1^2 - \sigma_3^2 \right) \quad (1)$$

$$dE_3^p = d\lambda K_2 \left(\frac{3}{K_2} I_1^2 - \sigma_1 \sigma_3 \right) \quad (2)$$

$$d\lambda = \frac{dW_p}{3\beta} \quad (\beta = I_1^3 - K_2 I_3) \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{3I_1^2(1+\nu_p)}{\sigma_3(\sigma_1+\nu_p\sigma_3)} \quad (4)$$

ここで、 I_1, I_3 は第 1 次、第 3 次応力不変量

β は塑性ポテンシャル、また $\nu_p = -(dE_3^p/dE_1^p)$

である。塑性仕事増分 dW_p は、三軸圧縮試験の結果を図 1 および図 2 のように $\beta - \epsilon$ 関係、 $p - v$ 関係に整理することにより次式から求められる。

$$dW_p = \sigma_1 dE_1^p + 2\sigma_3 dE_3^p = (\sigma_1 - \sigma_3) \left(dE_1^p - \frac{d\nu}{3} \right) + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} d\nu$$

$$= \beta (d\epsilon - dE_1^p) + p d\nu \quad (5)$$

ここで添字 p 、 e は塑性、弾性成分を表わす。また、 β は軸差応力、 p は平均有効主応力、 dE_1, dE_3 は主ひずみ増分、 $d\nu$ は体積ひずみ増分、 $d\epsilon$ はせん断ひずみ増分である。なお、実験結果から、せん断中においては $d\nu \approx 0$ であることがわかっているため、式 5 の変形においては $d\nu = 0$ とおいている。

このようにして求めた塑性仕事率と応力レベル $f = I_1^2/I_3$ との関係は図 3 に示すとおりであった。

4. 材料定数

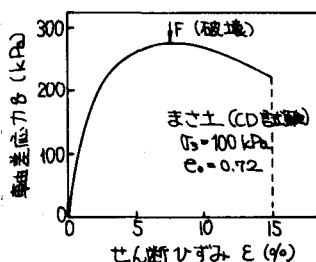


図 1 $\beta - \epsilon$ 曲線の 1 例

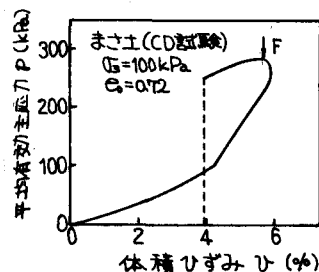


図 2 $p - v$ 曲線の 1 例

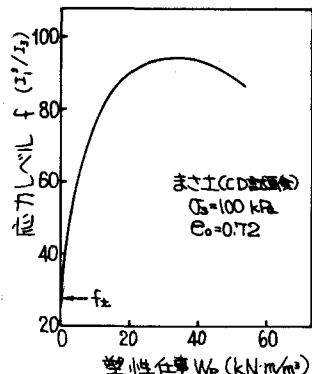


図 3 $f - W_p$ 関係

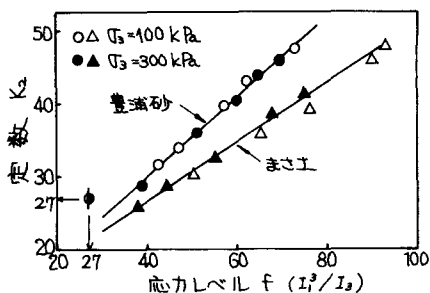


図4 $K_2 \sim f$ 関係

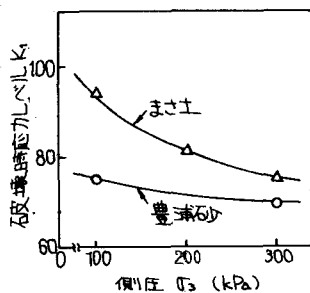


図5 $K_1 \sim \sigma_3$ 関係

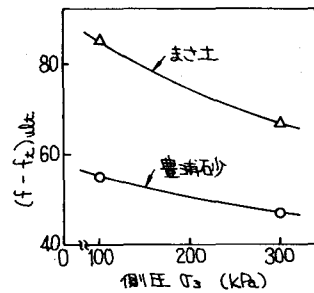


図6 $(f-f_c)_{ult} \sim \sigma_3$ 関係

4.1 $K_2 \sim f$ 関係 図4は式4で定義される定数 K_2 と応力レベル f の関係を示したものである。Lade は K_2 と f の関係は $K_2=27$, $f=27$ を通る直線で近似できるとしているが、図4に示す通り豊浦砂、まさ土ともに $(K_2, f) = (27, 27)$ の点を通る直線で近似することはできない。これは、供試体の異方性のために、せん断初期において体積収縮が過大に生じたためであろうと考えられる。この影響を正しく評価するため図4のように、 $K_2=27$, $f=27$ を通らない直線で $f \sim K_2$ 関係を近似することにした。

4.2 $K_1, (f-f_c)_{ult}$ について 破壊時における応力レベルは特に K_1 と表わされている。この K_1 はLadeモデルでは供試体の初期密度のみに依存する定数であるとされているが、せん断中に粒子破碎を起こすまさ土では、図5のように拘束圧の増加とともに K_1 が減少する傾向が見られる。

次に、Ladeモデルでは、応力レベル $f (= I_1^3/I_2)$ が低い間は塑性ひずみは発生せず、ある応力レベル f_c を越えて始めて塑性ひずみが生じるとして、 W_p と関係づけるパラメータとして $(f-f_c)$ なる量を用いている。その極限值 $(f-f_c)_{ult}$ は定数となるはずであるが、本実験試料の場合には図6に見られるように拘束圧 σ_3 とともに変化することがわかった。そこで、 $\sigma_3 \sim (f-f_c)_{ult}$ 関係を双曲線で近似することにより任意の σ_3 に対応する $(f-f_c)_{ult}$ の値を推定することにした。

5. 応力ひずみ関係の予測

三軸圧縮試験によって種々の材料定数を決定し、それらに基づいて描いた応力ひずみ曲線を実験曲線と比較したのが図7および図8である。

豊浦砂およびまさ土ともに、軸差応力 σ_1 と軸ひずみ ϵ_1 関係は予測値と実測値は比較的良好に一致しているのがわかる。一方、体積ひずみについては、豊浦砂の場合には予測値と実測値はほぼ一致しているが、まさ土においては予測値は実測値よりも1%程度脚張側に大きくでることがわかった。

6. 結論 1) 豊浦砂のような非破砕性の砂の応力ひずみ関係はLadeモデルにより大むね予測できる。もし、パラメータ K_2 と $(f-f_c)_{ult}$ を定数とせず σ_3 によって変わるとすれば、モデルの適合性は一層高いものとなる。2) まさ土では、 K_1 および $(f-f_c)_{ult}$ の値は粒子破碎の影響で σ_3 の増大に伴って著しく低下する。これらのパラメータと σ_3 との関係も双曲線で近似しておくと、その応力ひずみ関係はLadeモデルによって概略予測できる。しかし、体積ひずみについては、実測値に比べて若干の誤差を生じるようである。最後に、本実験は院生原田敦君の労に負うところが多かったことを記し謝意を表します。

参考文献 1) P.V. Lade and J.M. Duncan, Rec. ASCE, Vol. 101, No. 6T10, 1975. 2) N. Murai and S. Ohara, Soils & Foundations, Vol. 19, No. 3, 1979.

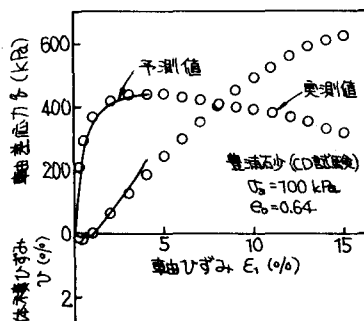


図7 豊浦砂の応力ひずみ曲線

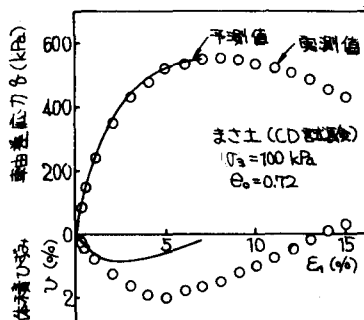


図8 まさ土の応力ひずみ曲線