

粒子破砕領域における砂の応力ひずみ関係について

山工学部 正員・三浦哲彦 同 正員 安福規久
佐藤道路 (株) 水津和典 向井建設(株) 水谷 浩

1. まえがき

先の研究¹⁾²⁾において、粒子破砕領域における砂や礫の応力ひずみ関係は Roscoe らの弾塑性応力ひずみ式³⁾によっておおむね予測できることを示した。本報では、新しい塑性仕事式に基づく応力ひずみ増分式を提案し、それが4種類の三軸圧縮・三軸伸張試験の結果によく適合するものであることを示す。

2. 応力ひずみ増分式

これまでの検討から、砂の応力ひずみ挙動に対して Cam-clay 式は過大なせん断ひずみ ε を予測し、Burland の修正式は逆に過小な ε を予測することがわかってゐる。両式の違いは、試料の単位体積当りの塑性仕事 δW^p に関する仮定の違いによるものである。すなわち、

$$\text{Cam-clay 式: } \delta W^p = p' (M \delta \varepsilon^p) \quad (1)$$

$$\text{修正式: } \delta W^p = p' \sqrt{(M \delta \varepsilon^p)^2 + (\delta v^p)^2} \quad (2)$$

これに対して筆者らは次の塑性仕事式を用いる。

$$\delta W^p = p' \sqrt{(M \delta \varepsilon^p)^2 + (\delta v^p)^2 - (M \eta)^2 \delta v^p \delta \varepsilon^p} \quad (3)$$

ここで、 p' = 平均有効主応力 $(\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ 、 η = 応力比 q/p' 、 q = 軸差応力 $(\sigma_a - \sigma_r)$ 、 M = 材料定数、サフィックス p は塑性成分を示す。

式(3)を基に若干の計算を行うと次の応力ひずみ増分式を得る。⁴⁾ まず、体積ひずみ増分 δv は、

$$\delta v = \frac{\lambda}{1+e} \left[\frac{\delta p'}{p'} + \left(1 - \frac{K}{\lambda} \right) \frac{(2+M^2\eta)\eta \delta \eta}{M^2\eta^3 + \eta^2 + M^2} \right] \quad (4)$$

次にせん断ひずみ増分 $\delta \varepsilon$ については、

$$\delta \varepsilon = \frac{\lambda + K}{1+e} \left[\frac{\delta p'}{p'} + \frac{(2+M^2\eta)\eta \delta \eta}{M^2\eta^3 + \eta^2 + M^2} \right] \left[\frac{(2+M^2\eta)\eta}{M^2 - \eta^2} \right] \quad (5)$$

ここに、 e = 空隙比、 λ = $e \sim \ln p'$ 正規圧密曲線の勾配、 K = 同じく膨張曲線の勾配である。式(5)においては ε の弾性成分 ε^e は無視している。

3. 実験方法および結果の検討

ゆるぎめ豊浦砂 ($e_0 = 0.82 \sim 0.85$ 、直径 5 cm、高さ 12.5 cm) について側圧 σ_r - 一定の三軸圧縮

および三軸伸張試験を行った。本試料の材料定数は $\lambda = 0.141$ 、 $K = 0.009$ 、 $M_e = 1.30$ 、 $M_e = -0.90$ ⁴⁾。 M_e 、 M_e は圧縮、伸張領域 Γ' の限界状態線の勾配である。

(1) 側圧一定三軸圧縮試験: $\sigma_r = 10 \text{ MPa}$ で等方圧密した後 σ_r - 一定でせん断試験を行い図-1の結果を得た。実験曲線と比べて、Cam-clay 式の適合性は悪く、修正式は軸ひずみ ε_a を小さめに評価する。これに対して提案式は実験値によく適合することがわかる。体積ひずみについては3つの式はいずれも比較的良好に実験値に合っている。

(2) 側圧一定三軸伸張試験: 伸張供試体のセットは次のように行った⁴⁾。供試体自立のあと、その外側に供試体ねじれ防止のため円筒を固定し、その上部に切欠スリットに上部ペダスタルに付けた2本のロッドをはめこむ。供試体は回転は妨げら

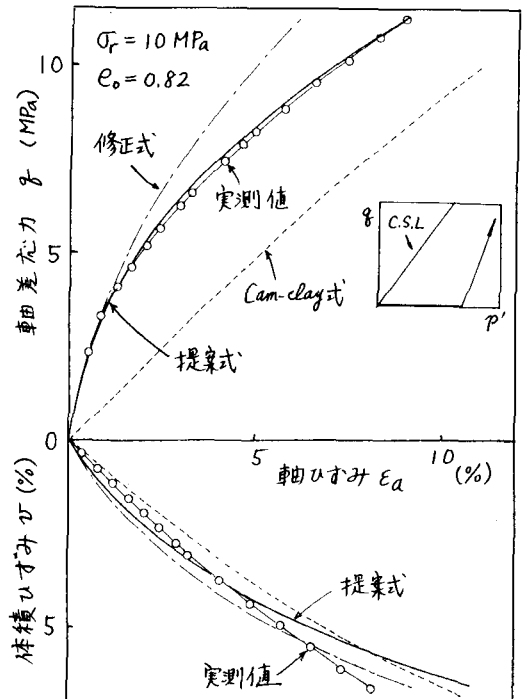


図-1 側圧一定三軸圧縮試験の結果

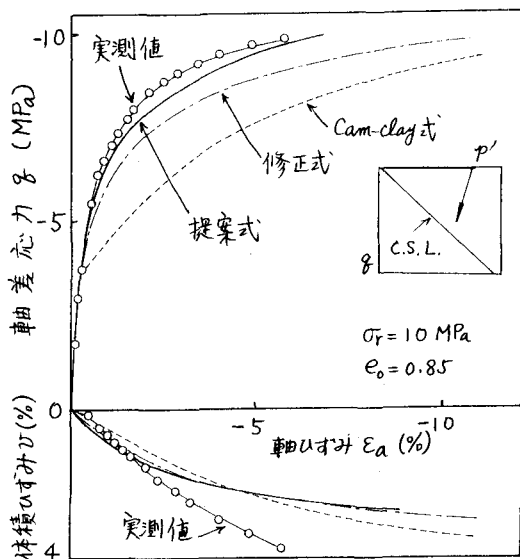


図-2 側圧一定三軸伸張試験の結果

れるが軸方向の変位は自由である。三軸室をセットし、上方からピストンを下ろしてペDESTALに丁度接するところでクランプする。しかる後、ピストン中心部の孔を通してネジを差込みピストンとペDESTALが一体となるよう締付ける。

実験は、まず 10 MPa で等方圧密させるために側圧を漸増させつつ軸応力 σ_a が σ_r に等しくなるようにピストン荷重を増やしていく。その後、 σ_r 一定の状態で σ_a を減少させて伸張試験を行った。実験結果は図-2 に示すようであった。 $q \sim \epsilon_a$ 曲線については、Cam-clay 式、修正式とも大きな ϵ_a を予測しているが提案式はよく合っているといえよう。

(3) 平均主応力一定三軸圧縮試験：(1) と同じ供試体について等方圧密後、 $\sigma_r = \sigma_{r0} - \Delta\sigma$ とすると同時に $\sigma_a = \sigma_{a0} + 2\Delta\sigma$ とすることで p' -一定試験を行った。結果は図-3 に示すように、 $q \sim \epsilon_a$ 曲線については σ_r -一定の場合とほぼ同じような傾向のあることがわかった。 $\epsilon_a \sim \epsilon_v$ 曲線については、 ϵ_v のレベルが高くなると提案式は実測値から離れていくようである。

(4) 平均主応力一定三軸伸張試験：(2) と同じ供試体について p' -一定で伸張試験を行い図-4 の結果を得た。この場合は、提案式は $q \sim \epsilon_a$ 、 $\epsilon_a \sim \epsilon_v$ 両曲線とも実測値に比較的よく一致している。Cam-clay 式はかなり実測値から離れている。

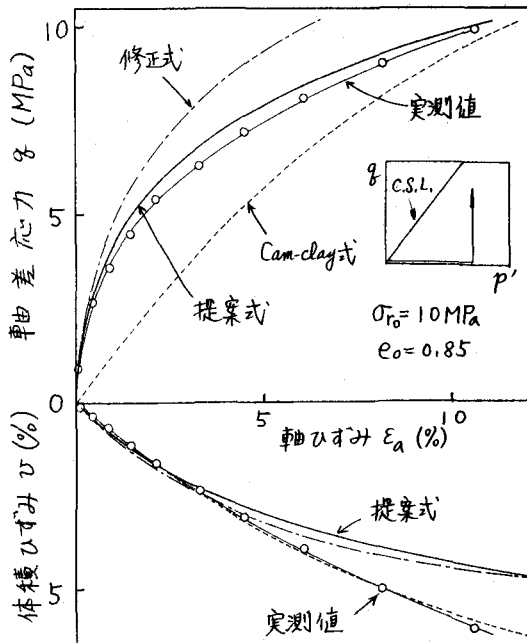


図-3 平均主応力一定三軸圧縮試験の結果

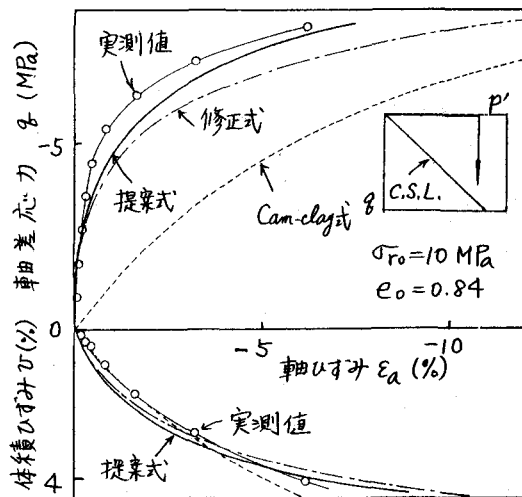


図-4 平均主応力一定三軸伸張試験の結果

4. まとめ

以上、4 種類の三軸試験結果との比較により、式 (4) および (5) で与えられた提案式は粒子破砕領域における砂の応力ひずみ式としてかなり適合性の高いものであることが明らかにされた。

文献

- 1) 三浦：地盤論文報告集, No. 282 (1979), 2) 三浦・山本：山吹子工部局研究報告, 30-2 (1980), 3) Roscoe & Burland: Engineering Plasticity (1978), 4) 三浦他: Tech. Reps. Yamaguchi Univ. (1982)