

株式会社 **オオバ** ○正会員 杉山 太宏
 株式会社 **オオバ** 正会員 向後 隆道
 株式会社 **オオバ** 正会員 山田 道男
 東海大学土木工学科 正会員 赤石 勝

1. まえがき

カムクレイモデルは、土構造物の弾塑性有限要素解析に広く利用されている。構成式が簡単で、含まれている定数が少ないことが広く利用されている理由の一つと考えられる。Mayne¹⁾、修正カムクレイモデルを用いた約100種類の粘性土の非排水強度を予測し、実験値と比較して、その幅広い適用性を明らかにしている。しかしながら、カムクレイモデルによる限界状態に達するまでの応力～ひずみ関係の予測と、実験結果の適合性についての検討は比較的少ないように思われる。

そこでこの報告では、沖積粘性土の三軸 $\bar{C}U$ 試験結果とカムクレイモデルによる予測を比較し、特に偏差応力～軸ひずみ関係と塑性ポテンシャルについて考察を加えた。

2. 試料と実験結果

実験に用いた沖積粘土試料の主な物理的・力学的性質は、Table-1に示すとおりである。カムクレイモデルを用いて偏差応力 q ～軸ひずみ ε_a 関係を計算するには、Table-1の定数の他に弾性係数 E とポアソン比 ν ならびに定数 M と χ_i が必要となる。この報告では、せん断抵抗角 ϕ' から静止土圧係数 $K_0(=1-\sin\phi')$ を求め、式(2.1)～(2.4)により ν 、 E 、 M 、 χ_i をそれぞれ計算した。

$$\nu = K_0 / (1 + K_0) \quad \cdots \cdots (2.1)$$

$$E = 3(1 - 2\nu) \cdot (1 + e_0) \cdot p' / \kappa \quad (2.2)$$

$$M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi') \quad \cdots (2.3)$$

$$\chi_i = (1 + e_0) / (\lambda - \kappa) \quad \cdots \cdots (2.4)$$

ここに、 e は間隙比、 p' は平均有効応力である。

Table-1 試料の物理的・力学的性質

試料	Gs	w _L (%)	w _p (%)	Grading (%)			ϕ' (°)	λ	κ	注) e_0
				Clay	Silt	Sand				
A	2.65	59	47	13	41	46	35.6	.221	.035	1.38
B	2.69	97	43	17	67	16	38.4	.384	.039	1.97

注) e_0 は等方圧密圧力1 kgf/cm²の時の間隙比

Fig. -2.1の実線が三軸 $\bar{C}U$ 試験の結果、点線がカムクレイモデルによる計算結果である。図の縦軸の偏差応力は、軸ひずみ $\varepsilon_a=15\%$ における偏差応力 q_f で除して無次元化してある。

Fig. -2.1の特にSample-Aのように、カムクレイモデルでは実験結果に比較してせん断（あるいは載荷）当初の軸ひずみの発生がかなり小さく、 $\varepsilon_a=4\%$ 前後で q/q_f は1に達するようである。

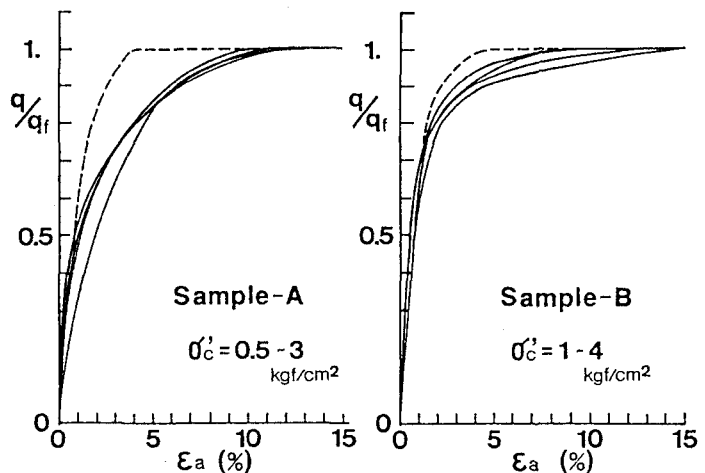


Fig. - 2. 1

3. 数値計算による検討

計算手法は、式(3.1)の粘塑性ひずみ速度による仮想粘塑性法を用いた。 $F \leq 0$ ならば<>内の値はゼロとし、 $F > 0$ ならば通常のカッコとして取り扱うものとする。

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \gamma \langle F \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad \dots\dots\dots (3.1) \quad \text{ここに、} F \text{は降伏関数、} Q \text{は塑性ポテンシャル、} \gamma \text{は粘性に関する任意の定数値である。}$$

また、修正カムクレイモデルの塑性ポテンシャル Q を、Fig.-3.1に示すように载荷当初より比較的大きなせん断ひずみが発生するよう若干修正して検討に用いた。この塑性ポテンシャル Q は、次のように表される。

$$Q = 3(1 - \mu)^2 \bar{\sigma}^2 + \mu^2 M^2 \{(\sigma'_m + \mu p'_0)^2 - p_0'^2(1 - \mu)^2\} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに、 σ'_m は平均有効応力、 $\bar{\sigma}^2$ は偏差応力の第2不変量の平方根、 p_0' は塑性ポテンシャルのサイズパラメーター、 μ と M は定数である。

式(3.1)の定数 μ を0.5とすれば、塑性ポテンシャルは修正カムクレイモデルと一致する。この報告では正規圧密粘土を対象とするため、Dry側の形状に問題はあるが、特に議論しないこととする。

μ を変化させて、数値積分により計算した三軸 $\bar{C}U$ 試験の偏差応力～軸ひずみ関係がFig.-3.2の実線である。Fig.-2.1の実験結果に近い μ の値は、Sample-Aが0.25、Sample-Bが0.4程度である。

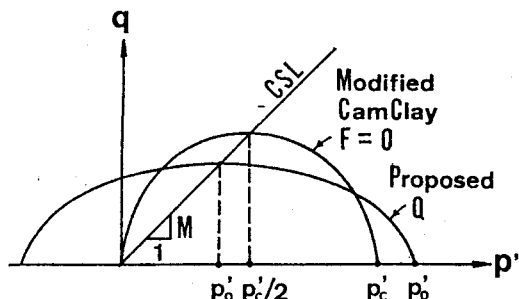


Fig. - 3. 1

著者らは、仮想粘塑性法を载荷直後から限界状態に達するまでの弾塑性FE解析に適用し、かなりの精度で計算可能なことを報告している²⁾。そこで、提案した塑性ポテンシャルにより、式(3.3)で表される剛性方程式を用い、Fig.-3.3の計算手順でFE解析を行った。

$K \underline{\delta} - \underline{R}^{vp} - \underline{R} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.3) \quad \text{ここに、} \underline{R} \text{は接点に作用する外力、} \underline{R}^{vp} \text{は粘塑性ひずみによる等価接点力、} K \text{は剛性マトリックス、} \underline{\delta} \text{は変位マトリックスである。}$

μ を0.5と0.3の二通りでFE計算した結果が、Fig.-3.2の点線である。仮想粘塑性法によるFE計算でも、数値積分とほぼ同じ計算結果が得られた。

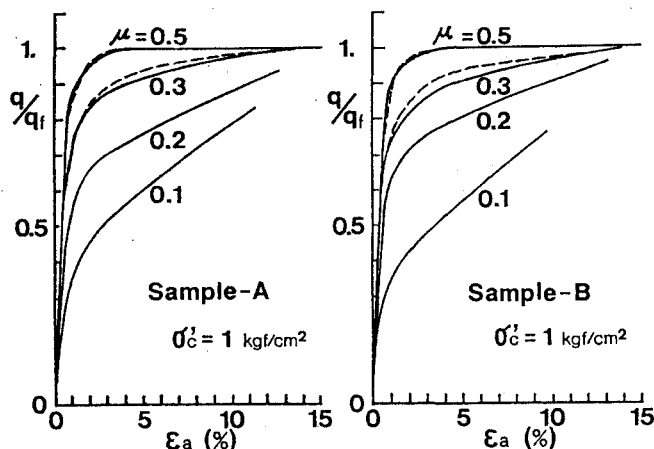


Fig. - 3. 2

- | |
|--|
| ① $F > 0$ ならば、式3.1を用いて、仮想時間 t の $\dot{\varepsilon}^{vp}_{i,j}$ を計算する。 |
| ② Euler法として知られる前進差分法により、仮想時間 $t + \delta t$ の粘塑性ひずみ $\varepsilon^{vp}_{i,j}$ を求める。
$\varepsilon^{vp}_{i,j} = \dot{\varepsilon}^{vp}_{i,j} \delta t$... (a) |
| ③ 式3.3より、節点変位を決定する。
$\underline{\delta}^{n+1} = K^{-1} [\underline{F} - \underline{R}^{vp}(\underline{\delta}^n)] / \delta t$... (b) |
| ④ $\underline{\delta}^{n+1}$ により、全ひずみ $\varepsilon_{i,j}$ 、有効応力 $\sigma'_{i,j}$ を計算する。
$\varepsilon_{i,j} = \varepsilon^e_{i,j} + \varepsilon^{vp}_{i,j}$... (c)
$\sigma'_{i,j} = D'(\varepsilon_{i,j} - \varepsilon^{vp}_{i,j})$... (d) |
| ⑤ 収束判定；未収束ならステップ①～④を反復する。 |

Fig. - 3. 3

参考文献 1) Mayne, P.W. "Cam Clay Predictions of Undrained strength" Proc. ASCE, Vol. 16, GT11, PP1219-1242, 1990
2) 赤石、竹田、杉山 "仮想粘塑性法による弾塑性非排水解析", 土木学会第45回年次学術講演会, 1990