

III-437

仮想粘塑性法による弾塑性非排水解析

東海大学 工学部 正員 ○赤石 勝
小野田ケミコ（株） 正員 竹田 敏彦
（株）オオバ 正員 杉山 太宏

1. まえがき

超過応力型の粘塑性流動則を用いた解析は、定常状態であれば塑性解析に相当し¹⁾、仮想粘塑性法と呼ばれている。最近、小林²⁾は、仮想粘塑性法を用いれば数値計算上非常に安定した解が得られるため、有限要素法でも安定解析が可能であることを示した。その後、飯塚ら³⁾も仮想粘塑性法を用いその有用性を明らかにしている。小林・飯塚らの研究は、いづれも数値解析上の安定性を得るため、限界状態に達した要素にのみ仮想粘塑性を導入している。しかし、仮想粘塑性法は、初期応力法や初期ひずみ法などと同様、等価荷重による非線形解析法の一つであり、限界状態到達以前の変形解析にも利用しうる。したがって載荷直後から限界状態に達するまでの弾塑性解析に仮想粘塑性法を用いれば破壊近くまでの地盤の変形量を精度よく予測することが可能と思われる。そこでこの報告では、弾塑性解析の代わりに載荷当初より仮想粘塑性法を用いたF E解析を実施し、解析精度の検討を試みた。

2. 仮想粘塑性法

超過応力型の粘塑性流動則によれば、粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^p$ は、次式で与えられる¹⁾。

$$\dot{\epsilon}^p = \gamma \langle F \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad \dots\dots\dots (1) \quad \text{ここに、} F \text{ は降伏関数、} Q \text{ は塑性ポテンシャル、} \gamma \text{ は粘性に関する定数であるが仮想粘塑性法では任意の定数値でよい。} F \leq 0 \text{ ならば、} \langle \rangle \text{ 内の値はゼロとし、} F > 0 \text{ ならば通常のカッコとして取り扱うものとする。}$$

この報告では、構成式として修正Cam Clayモデルを用いるので、式(1)は粘塑性関連流動則 ($F \equiv Q$) となり、降伏関数 F は、次式で与えられる。

$$F = 3\bar{\sigma}^2 + M^2\sigma_m'(p_0 + \sigma_m') \quad \dots\dots\dots (2) \quad \text{ここに、} \sigma_m' \text{ は平均有効応力、} \bar{\sigma} \text{ は偏差応力の第2不変量の平方根、} p_0 \text{ は、降伏面のサイズパラメーター、} M \text{ は限界状態線の勾配である。}$$

剛性方程式は、式(3)で表わされる。

$$K\delta - R^p - R = 0 \quad \dots\dots\dots (3) \quad \text{ここに、} R \text{ は、節点に作用する外力、}$$

$$K = \int, B^T (D' + m m^T k f) B dv, \quad R^p = \int, B^T D' \epsilon^p dv \text{ である。}$$

式(3)の R^p は、粘塑性ひずみによる等価節点力であり、節点外力 R に加えて式(3)を解くことになる。

仮想粘塑性法の計算手順を要約すると図-1のようになる。

収束判定の方法は、(A) 最大節点変位の反復1回の変化率が0.1%以下になれば収束とする。(B) 繰返し解かれる節点変位の差が許容値以下になれば収束とする⁴⁾。二方法を採用し比較した。また、時間積分法には、Zienkiewiczら⁵⁾の提案する τ 基準を用いた。

$$\delta t \leq \tau \|\dot{\epsilon}\| / \|\dot{\epsilon}^p\| \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\|\dot{\epsilon}\| = \sqrt{\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}}$, $\|\dot{\epsilon}^p\| = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij}^p\dot{\epsilon}_{ij}^p}$, τ は時間増分係数で、0.01~0.15の範囲内の値が選択される⁴⁾。

3. 計算結果と考察

仮想粘塑性法によって等方圧密した正規圧密粘土の三軸CU試験の解析を行い、仮想粘塑性法の適応性を検討した。解析に用いた定数は、表-2に示すとおりである。

側圧を一定に保ち、軸方向応力増分(0.1kgf/cm²)を段階的に加えたCU試験の有効応力経路の計算結果が図-2である。

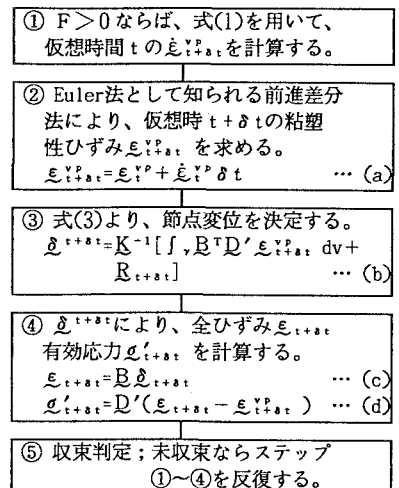


図-1 仮想粘塑性法の概略計算手順

収束基準A,Bによる計算結果の差は認められないが、時間増分係数 τ の大きさによって修正Cam Clayモデルの有効応力経路からの隔たりが観察される。

表-1 F E 解析に用いた定数

λ	k	e_0	ϕ' (度)	E (kgf/cm ²)	ν	K_w (kgf/cm ²)	K_s (kgf/cm ²)
0.261	0.034	1.924	38.0	166.0	0.286	2.083×10^4	5.0×10^5

図-3は、せん断中の各载荷段階における収束までの繰返し計算回数である。図-2の有効応力経路と同様、収束基準による繰返し回数の差は認められない。また、 τ が1桁違うことによる繰返し計算回数の増加は、3倍以下である。

ある応力比 η における修正Cam Clayモデルの平均有効応力 p' は、次式から得られる。

$$p' = p_o' [(\eta/M)^2 + 1]^{-1/\lambda} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)の p' とF E解析から得られる平均有効応力 p'_F との比と τ との関係を調べたのが図-4である。 τ を十分小さくすれば、F E解析結果は、式(5)から得られる有効応力経路に極めて近いことが分かる。

図-5は、偏差応力 q ～軸ひずみ関係である。CSLの勾配 $M(=1.55)$ に対し η が1.5を越える付近からF E解析による偏差応力は、少しずつ大きくなる。軸ひずみ15%の偏差応力 q_{15} とCSL上の q_t とを比較すると $q_{15}/q_t = 1.721/1.697 \approx 1.014$ である。

このように厳密解との間に若干のズレは観察されるが、仮想粘塑性法によってせん断当初からCSL近傍までの応力～ひずみ関係をかなりの精度で計算できた。

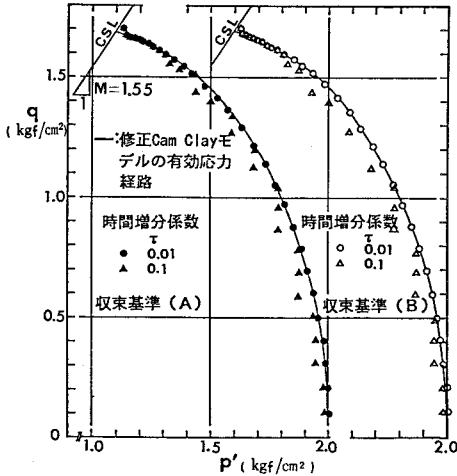


図-2 CU試験の有効応力経路の計算

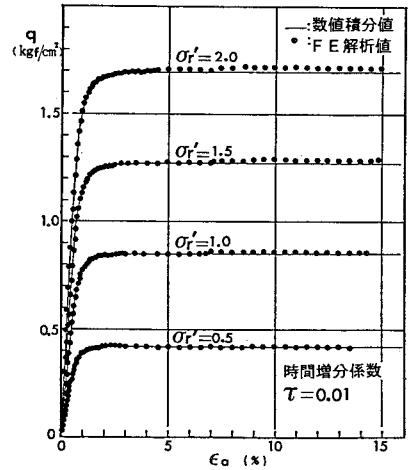


図-5 偏差応力～軸ひずみ関係

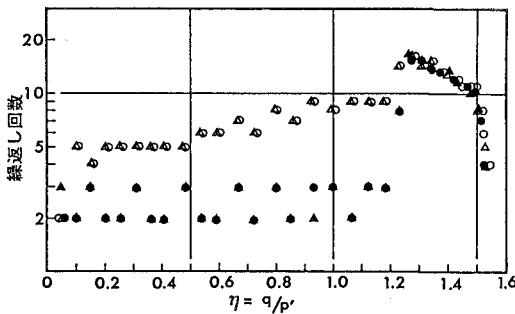


図-3 収束までの繰返し回数

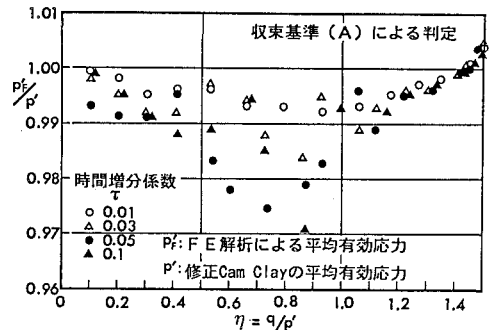


図-4 修正Cam Clayの有効応力経路からの隔たり

参考文献:1)D.J.Naylor et al.:Finite Elements in Geotechnical Engineering, Pineridge Press,pp86-90, 1981. 2)小林:有限要素法による地盤の安定解析, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, pp83-101, 1984. 3)飯塚, 良峰, 太田, 島:極限支持力と地盤内応力変化の有限要素解析, 土木学会論文報告集, 第382号/Ⅲ-7, pp255-263, 1987. 4)D.R.J.Owen,E.Hinton:Finite Elements in Plasticity, Pineridge Press,1980. 5)Zienkiewicz.O.C.,Corneau.I.C.:Visco-plasticity and Creep in elastic solids a unified numerical solution approach,Int.J.Num.Meth.Engng.8,pp821-845,1974.