

FEMによる地盤の変形解析(第2報)

鹿児島大学工学部 学生員 川原克郎
同 上 正員 北村良介
同 上 藤尾保幸

1. まえがき

当研究室では、昨年より地盤の変形・強度解析のためのFEMプログラムの作成を試みてきているが¹⁾、本報告はその第2報である。第1報では、等方線形弾性体の構成式を用いたが、ここでは、地盤材料に対して導かれたCam-clayモデルの構成式を適用している。また、要素数も前報より増加している。

2. FEMプログラムの概要

プログラムの流れは前報で示したフローチャートと同じである。Cam-clayモデルの構成式をテンソル表示するに次のようになる²⁾。

$$d\epsilon_{ij} = \frac{C_s}{6.9(1+e)} \frac{d\sigma'_m}{\sigma'_m} \delta_{ij} + \frac{dS_{ij}}{2G(\sigma'_m)} + \frac{C_c - C_s}{2.3M^*(1+e)} \left\{ \frac{d\sqrt{2J_2}}{(M^*\sigma'_m - \sqrt{2J_2})} + \frac{d\sigma'_m}{\sigma'_m} \right\} \cdot \left[\frac{S_{ij}}{\sqrt{2J_2}} + \frac{(M^* - \sqrt{2J_2}/\sigma'_m) \delta_{ij}}{3} \right] \quad (1)$$

ここに、 C_c : 圧縮指数, C_s : 膨張指数, e : 空隙率, σ'_m : 平均有効主応力, S_{ij} : 偏差応力テンソル,

J_2 : 偏差応力テンソルの2次不変量, $G(\sigma'_m) = \frac{6.9(1+e)(1-2\nu)}{2C_s(1+\nu)} \sigma'_m$: セム断弾性係数, ν : ポアソン比,

M^* : 土質定数, δ_{ij} : クロネッカーのデルタ。

(1)式をマトリックスで表示すると次のようになる。

$$\{d\epsilon\} = [D^{-1}] \{d\sigma\} \quad (2)$$

$$[D^{-1}] = \begin{bmatrix} AX_{11}(BS_{11}+C)+E1 & AX_{11}(BS_{22}+C)+E2 & AX_{11}(BS_{33}+C)+E2 & 2AX_{11}BS_{12} & 2AX_{11}BS_{23} & 2AX_{11}BS_{31} \\ AX_{22}(BS_{11}+C)+E2 & AX_{22}(BS_{22}+C)+E1 & AX_{22}(BS_{33}+C)+E2 & 2AX_{22}BS_{12} & 2AX_{22}BS_{23} & 2AX_{22}BS_{31} \\ AX_{33}(BS_{11}+C)+E2 & AX_{33}(BS_{22}+C)+E2 & AX_{33}(BS_{33}+C)+E1 & 2AX_{33}BS_{12} & 2AX_{33}BS_{23} & 2AX_{33}BS_{31} \\ AY_{12}BS_{11} & AY_{12}BS_{22} & AY_{12}BS_{33} & 2AY_{12}BS_{12}+E3 & 2AY_{12}BS_{23} & 2AY_{12}BS_{31} \\ AY_{23}BS_{11} & AY_{23}BS_{22} & AY_{23}BS_{33} & 2AY_{23}BS_{12} & 2AY_{23}BS_{23}+E3 & 2AY_{23}BS_{31} \\ AY_{31}BS_{11} & AY_{31}BS_{22} & AY_{31}BS_{33} & 2AY_{31}BS_{12} & 2AY_{31}BS_{23} & 2AY_{31}BS_{31}+E3 \end{bmatrix}$$

$$A = \frac{C_c - C_s}{2.3M^*(1+e)}, \quad B = \frac{1}{(M^*\sigma'_m - \sqrt{2J_2})\sqrt{2J_2}}, \quad C = \frac{1}{3\sigma'_m}, \quad X_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{2J_2}} + \frac{M^* - \sqrt{2J_2}/\sigma'_m}{3},$$

$$Y_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{2J_2}}, \quad E1 = \frac{C_s}{6.9(1+e)\sigma'_m}, \quad E2 = \frac{C_s}{6.9(1+e)\sigma'_m} - \frac{1}{6G(\sigma'_m)}, \quad E3 = \frac{1}{2G(\sigma'_m)}.$$

図-1は、(2)式を用いて計算された応力～ひずみ関係である。λカテゴリーは、しらすの側圧一定、排水三軸圧縮試験より得られた値³⁾、 $C_c = 0.065$, $C_s = 0.025$, 初期空隙率比 $e_0 = 1.213$, $M^* = 1.217$, $\nu = 0.3$ を用いている。

3. 解析例

図-2は、変形解析を行った水平地盤と要素分割を示している。地盤の大きさは、深さ10m、中央からの距離が20mである。また、要素数は178である(前報では74)。境界条件は、前報と同じく底面固定、両側面を鉛直方

向のみ可動とし、地盤中央部より半幅1mの範囲に q t/m²の等分布荷重が作用したものとした。地盤は、乾燥した状態の砂質土地盤を想定しており、したがって、地盤内に発生する応力はすべて有効応力であり、間隙水圧はゼロである。入力データは、図-1に示す応力 $\sim$ ひずみ関係の計算の際に用いた前述の値をそのまま適用し、さらに、土の単位体積重量 $\gamma = 1.8$ t/m³、静止土圧係数 $k_0 = 0.5$ を用いている。

解析は、平面ひずみ条件で行っており、載荷重は1 t/m²ずつ増加させている。図-3は、 $q = 2$ t/m²のときの地盤の変形状態を、また、図-4は、同じ荷重段階での主応力の方向と大きさを示している。ただし、図-3、4では、図-2の太線で示した地盤中央部の深さ5m、幅10mの部分のみを示している。

図-3を前報の弾性解析の結果と比較すると、絶対値は異なるが、ほぼ同様の傾向を示している。これは、荷重段階 $q = 2$ t/m²が図-1の応力 $\sim$ ひずみ関係における立ち上がり部分に対応しているためであり、荷重段階が進めば差異がはたてくさるであろうと考えられる。図-4をみると、載荷部分に隣接する地表付近の要素の最小主応力がほとんどゼロになっていることがわかる。さらに1 t/m²の増分を与えた $q = 3$ t/m²の段階では、引張応力が発生したり、破壊(すなわち、 $\sqrt{J_2}/\sigma_c > M^*$)したりする要素があらわれにくる。そのような状態になった要素については、その要素の応力を等価接点荷重にあわせて計算を進めるプログラムを現在作成中であり、その結果については発表当日に示す予定である。

最後に、日頃からお世話になっている当研究室の香山教授に謝意を表します。

(参考文献)

- 1) 北本, 隆幸: FEMによる地盤の変形解析(予報), 土木学会地盤工部研究発表会, pp.217-218, 1982.
- 2) 足立, 龍岡: 新大系土木工学, 18, 土力学(Ⅱ), pp.125-131, 1981.
- 3) 香山: 中低圧下の土の圧縮-せん断挙動(その1, 2) 土木学会年次講演会, Ⅲ-19, 20, 1982.

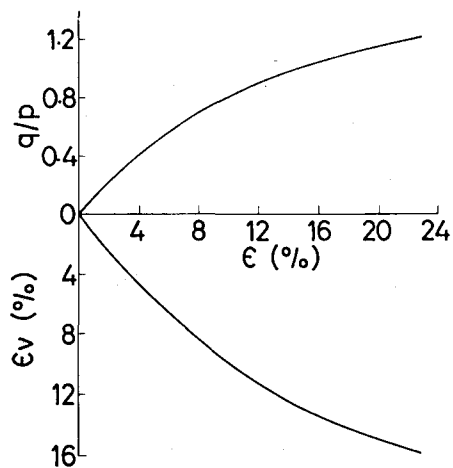


図-1 Cam-clay モデルの応力 $\sim$ ひずみ関係

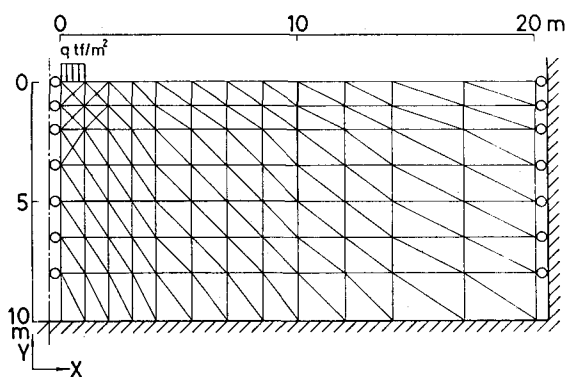


図-2 対象地盤の大きさと要素分割

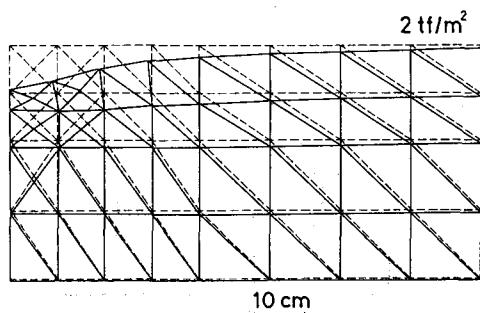


図-3 $q = 2$ t/m²での地盤の変形状態

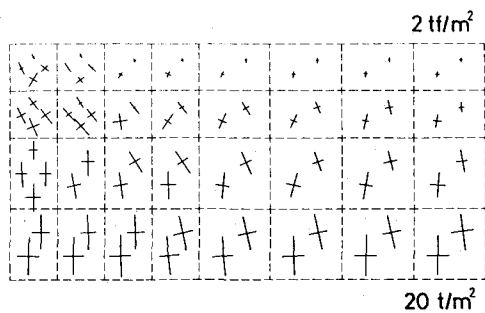


図-4 $q = 2$ t/m²での主応力の大きさと方向