

弾塑性構成式を用いたセメント改良土の強度変形予測

福岡大学工学部 学生員○木下 秀之
福岡大学工学部 正 員 佐藤 研一
福岡大学工学部 正 員 黒木 健実
福岡大学工学部 正 員 吉田 信夫

1. はじめに

セメント系改良地盤の改良形式には、ブロック式をはじめ杭式、壁式、格子式等が提案されている。それらの形式の改良効果を予測するためには、土質材料の終局的な力学挙動を把握し、実験と数値解析の両面からの検討が必要である。そのための基礎的な研究として、土の弾塑性構成式を用いた有限要素解析プログラムを開発し、模型地盤の強度変形挙動を予測する。

2. 弾塑性構成式

有限要素法により離散化されたカム・クレイモデルの弾塑性構成マトリックス式¹⁾として次式を用いる。

$$\begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_z \\ d\tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\lambda} + 2\tilde{\mu} & \tilde{\lambda} & 0 \\ \tilde{\lambda} & \tilde{\lambda} + 2\tilde{\mu} & 0 \\ \tilde{\lambda} & \tilde{\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\mu} \end{bmatrix} - \frac{1}{D} \begin{bmatrix} A^2 & AB & 2\tilde{\mu}f_{xy}A \\ AB & B^2 & 2\tilde{\mu}f_{xy}B \\ AC & BC & 2\tilde{\mu}f_{xy}C \\ 2\tilde{\mu}f_{xy}A & 2\tilde{\mu}f_{xy}B & 4\tilde{\mu}^2f_{xy}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\epsilon_x \\ d\epsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、

$$A = \tilde{\lambda}f_{ik} + 2\tilde{\mu}f_x, \quad B = \tilde{\lambda}f_{ik} + 2\tilde{\mu}f_y, \quad C = \tilde{\lambda}f_{ik} + 2\tilde{\mu}f_z, \quad D = \tilde{\lambda}f_{ik}^2 + 2\tilde{\mu}(f_x^2 + f_y^2 + f_z^2 + 2f_{xy}^2) + f_{ik}$$

ここで、 $\tilde{\lambda}$ および $\tilde{\mu}$ は非線形な *Lame'* の定数である。また、 f_{ik} 、 f_x 、 f_y 、 f_z および f_{xy} は降伏関数

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left(\ln \frac{p}{p_0} + \frac{\eta}{M} \right) - v^p \quad (2)$$

を有効応力で微分したものより得られる。この関数は関口・太田モデルで定義されているものをオリジナルなケンブリッジモデルに帰着させた降伏関数である。ここで、 λ ：圧縮指数、 κ ：膨潤指数、 e_0 ：土が p_0 という圧力で、等方圧密されたときの間隙比、 p ：平均有効応力、 M ：破壊応力比、 η ：平均有効応力と軸差応力の比、 v^p ：塑性体積ひずみである。

3. 解析プログラムの検証

開発した土質材料の弾塑性解析プログラムの検証例として幅80(m)、高さ10(m)の粘土層の中心に荷重を載荷した場合を想定し、解析には図1に示すように粘土層の対称性を考慮して右半分のみを解析モデルとして用いた。また、解析に用いた粘土層の材料定数を表1に示す。なお、比較対象としてCRISP²⁾を用いた。図2は80(kPa)まで載荷したときの粘土層地表面の中心における応力 - ひずみ関係を示したものである。31(kPa)載荷時に初めて要素の降伏が始まったが弾性域および塑性域においても両プログラムは同じ力学挙動を示すことが確認された。また、図3は80(kPa)載荷時における粘土層内の降伏状況および変形を表したものである。

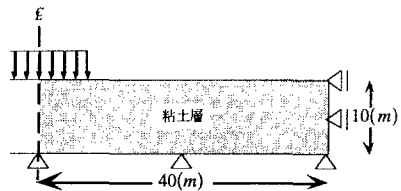


図1 解析モデル

表1 材料定数

λ	0.161
κ	0.062
e_0	1.759
M	0.888
v	0.25

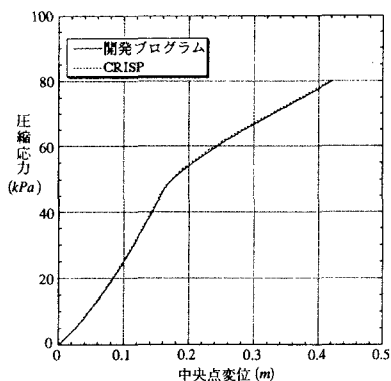


図2 応力-ひずみ関係の比較

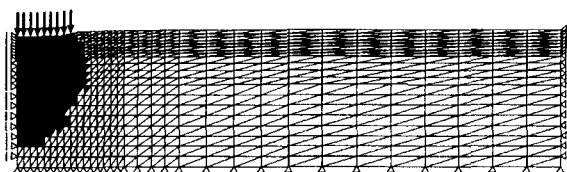


図3 80(kPa)載荷時の降伏状況および変形図

4. セメント改良土の強度予測

セメント系改良地盤の改良形式には杭式をはじめブロック式、壁式、格子式等が考えられている。このうち有明粘土をセメント改良した土の強度変形予測として壁式を取り上げ、改良率を55(%)、70(%)、85(%)とした時の改良土の強度を予測する。図4は壁式を用いた85%改良土の模型地盤の例であり、その寸法は高さ15(cm)×横30(cm)×厚さ20(cm)である。この模型地盤において凹部を未改良地盤とし、この幅を変えることにより改良率を設定する。また、各改良率ごとに凹部の数を変化させ、その影響についても考慮した。有限要素解析においては模型地の対称性を利用して右半分について解析を行うものとする。

図5は壁式を用いた85%改良土の模型地盤の応力-ひずみ関係を、開発したプログラムとCRISPとで比較した例である。このように、壁式を用いたセメント土の強度予測においてもCRISPと同等の精度で解析を行えることが確認された。また、図6は15(kg/cm²)載荷時の模型地盤の塑性状況を表している。黒い部分が塑性した部分であるがほぼ全要素が塑性域に達し、模型地盤は不安定な状態であることがわかる。

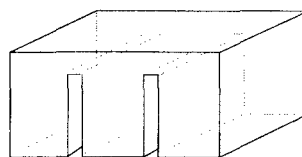


図4 壁式を用いた85%改良土の模型地盤

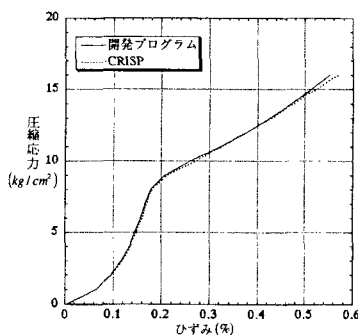


図5 応力-ひずみ関係

5. まとめ

3節点三角形要素による弾塑性解析プログラムを開発した。CRISPの約4倍の要素数でCRISPと同精度の解析結果を得ることができた。

【参考文献】

- 1) 第9回地盤工学における数値解析法入門セミナーテキスト, 財団法人日本科学技術連盟, PP67-PP110, 1992.5
- 2) Britto and Gunn: CRITICAL STATE SOIL MECHANICS VIA FINITE ELEMENTS, ELLIS HORWOOD LIMITED, 1987

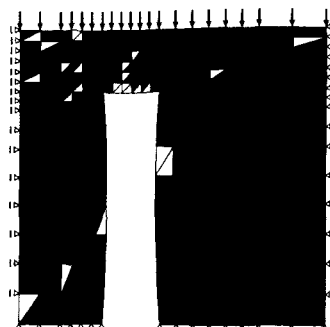


図6 15(kg/cm²)載荷時の塑性状況