

-12 不連続性岩盤掘削時の安定性評価に関する有限要素解析システムの開発

(株) 青木建設	研究所	○小谷野康之
〃	〃	永井 哲夫
〃	〃	孫 建生
(株) ファド		前田 信一
東京電力(株) 電力技術研究所		田中 典明

1. はじめに：

これまで、著者の一人は、ロックボルトやPSアンカーなどの支保工により補強された不連続性岩盤の力学的挙動を表現するため、不連続面のせん断剛性の応力依存性を考慮して不連続性岩盤と等価な連続体の構成式を提案している¹⁾。本研究では、不連続性岩盤の掘削問題を対象として、この構成式をC言語でコード化した有限要素解析プログラムに組み込んで独自のソルバーを開発すること、地質情報などを解析モデルに反映させることができるようにプリ・ポストプロセッサを構築すること、最終的にはこれらを統合して有限要素解析システムとして完成させることを目的としている。

2. 現状および問題点：

(1) ソルバー

一般に、有限要素解析の汎用コードは、鋼などの人工材料よりなる構造物やシステムを対象としている場合が多い。そのため、解析で用いられる材料特性（構成式）は明確である。しかし、土や岩盤などの地盤構造物を対象とする場合、材料特性は不明確である場合が多い。とくに、不連続性岩盤のように断層・破碎帯、節理・層理、亀裂などの不連続面を有する岩盤の材料特性を的確に表現できる構成式はなく、研究段階の課題として取り上げられているのが現状である。さらに、支保工の補強効果を表現できる構成式となると、研究段階でもほとんどない²⁾。

(2) プリ・ポストプロセッサ

有限要素解析などの数値解析法を研究開発や設計などの実務に適用する場合、解析データの作成および解析結果の出力を効率的に行う必要がある。そこで、対象となるソルバーに対応したプリ・ポストプロセッサを組み合わせて解析することが重要である。

一般に、プリ・ポストプロセッサは、有限要素解析などの汎用コードに付属したものと、各種解析コードに対応できるように汎用性を持ったものに大別することができる。前者については、有限要素解析の汎用コードが鋼などの人工材料よりなる構造物やシステムを対象としている場合が多く、そこで用いられる材料特性や解析条件などが土や岩盤などの地盤構造物を対象とする場合には十分対応できないことから³⁾⁻⁴⁾、それに付属のプリ・ポストプロセッサも地盤構造物の解析には適していない。後者についても同様に、その対象が人工材料よりなる構造物やシステムであるため、地盤構造物の解析を対象としたソルバーとの適応性はよくない。また、地盤構造物を対象として有限要素解析を行う場合、事前の地質調査で得られた情報を反映させるように解析モデルを作成しなければならない⁵⁾。さらに、本ソルバーにより掘削および補強解析を行う場合、独自のアルゴリズムが必要となる。これに対して、現状のプリ・ポストプロセッサでは、容易に解析モデルを作成することができず、掘削および補強解析にも十分対応できない。

3. 本システムの概要：

(1) ソルバー

本システムでは、著者の一人が提案している不連続面のせん断剛性の応力依存性を考慮した不連続性岩盤と等価な連続体の構成式を取り上げ¹⁾、これをC言語でコード化した有限要素解析プログラムに組み込んで独自のソルバーとしている。この構成式は2次元平面ひずみ状態においては次のように表される。

$$\{\Delta \varepsilon_x \Delta \varepsilon_y \Delta \gamma_{xy}\}^T = [C] \{\Delta \sigma_x \Delta \sigma_y \Delta \tau_{xy}\}^T \quad \dots (1)$$

ここで、 $\{\Delta \varepsilon_x \Delta \varepsilon_y \Delta \gamma_{xy}\}^T$ および $\{\Delta \sigma_x \Delta \sigma_y \Delta \tau_{xy}\}^T$ は、それぞれx-y座標系における増分ひずみベクトルおよび増分応力ベクトルを示している。また、 $[C]$ はコンプライアンスマトリックスであり、その各成分 C_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) は次のように表される。

$$\begin{aligned} C_{11} &= (1-\nu^2)/E + \sum (\sin^2 \theta_j / K_{nj} + \cos^2 \theta_j / K_{sj}) \sin^2 \theta_j / dS_j \\ C_{12} &= C_{21} = -\nu(1+\nu)/E + \sum (1/K_{nj} - 1/K_{sj}) \sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / dS_j \\ C_{13} &= C_{31} = \sum \{-2\sin^2 \theta_j / K_{nj} - (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K_{sj}\} \sin \theta_j \cos \theta_j / dS_j \\ C_{22} &= (1-\nu^2)/E + \sum (\cos^2 \theta_j / K_{nj} + \sin^2 \theta_j / K_{sj}) \cos^2 \theta_j / dS_j \\ C_{23} &= C_{32} = \sum \{-2\cos^2 \theta_j / K_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K_{sj}\} \sin \theta_j \cos \theta_j / dS_j \\ C_{33} &= 2(1+\nu)/E + \sum \{4\sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / K_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j)^2 / K_{sj}\} / dS_j \end{aligned} \quad \dots (2)$$

ここで、 E 、 ν は岩石実質部の弾性係数およびポアソン比、 θ_j 、 dS_j は第j群の不連続面の角度および間隔、 K_{nj} 、 K_{sj} は第j群の不連続面の垂直およびせん断剛性をそれぞれ示す。また、 $\sum$ は複数の不連続面群の重ね合わせを意味する。通常解析では、2～3群程度で十分である。なお、不連続面のせん断剛性については、そこに作用する垂直応力 σ_{nj} の関数として次のように表している。

$$K_{sj} = K_j \cdot \gamma_w (\sigma_{nj} / P_a)^{n_j} \quad \dots (3)$$

ここで、 K_j 、 n_j はせん断剛性に関する剛性数および剛性指数、 γ_w 、 P_a は水の単位体積重量および大気圧をそれぞれ示す。

本ソルバーでは、ロックボルトやPSアンカーなどの支保工による補強効果を不連続面のせん断剛性の向上として取り扱うことにより、この構成式に取り込んで評価するという方法を採用している^{1)・2)}。なお、断層や破碎帯などの規模の大きい不連続面に関しては、薄層要素やジョイント要素などによりモデル化できるように配慮している。

(2) プリ・ポストプロセッサ

本システムでは、前述のソルバーに対応した独自のプリ・ポストプロセッサを構築して、解析データの作成および解析結果の出力の効率化を行った。具体的には、研究開発や設計などの実務における利用を考えて、専門的知識がなくても誰にでも容易にかつ効率的にデータの作成から解析結果の表示までを実行できるように、GUI (Graphical User Interface) を取り入れている。例えば、メッシュ図の作成に際しては、初期画面でプリプロセッサのボタンをクリックすると図-1のような画面が立ち上がり、この画面上のポップアップメニューやアイコンをマウス操作するのみでよい。また、岩盤物性や支保工に関する情報の入力に際しては、入力条件設定テーブルで岩盤特性または支保工の設定のボタンをクリックすると図-2または図-3

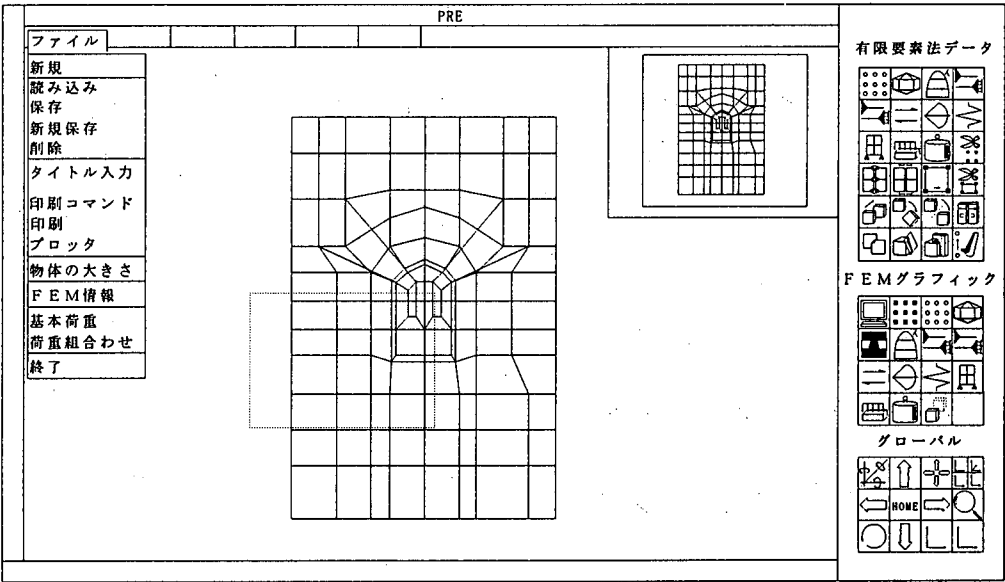


図-1 プリプロセッサ全体構成図

岩石特性テーブル

岩盤番号	ヤング率	ポアソン比	比重	節理 数
1	18.3	0.25	2.65E-05	2
2	18.3	0.25	2.65E-05	2

GPa GN/m²

入力

削除

設定

節理

印刷

取消

①岩石テーブル項を選択 ②節理ボタンクリック

節理特性テーブル

傾斜角	垂直剛性係数	垂直剛性指数	せん断剛性係数	せん断剛性指数	間隔	最大閉塞量
45	1.00E+06	0.817	5.25E+04	0.817	0.5	0.0
135	1.00E+06	0.817	5.25E+04	0.817	2.0	0.0

GN/m³ GN/m³ m m

入力

削除

設定

印刷

取消

図-2 岩盤特性設定テーブル

のような画面が立ち上がり、それぞれのテーブルで諸値をキー入力すればよい。

一方、地質情報を容易に解析モデルに反映させるようにするため、岩種別のメッシュ分割や断層などのメッシュ作成機能を持ったアイコンを具備している。

以上のように、解析に関するほとんどの操作がマウスにより行えるようにして、キー操作の部分を最小限に抑えている。

(3) 有限要素解析システム

前述のソルバーおよびプリ・ポストプロセッサを統合して、不連続性岩盤掘削時の安定性評価に関する有限要素解析システムを構築した。本システムのフローは図-5のようになっている。ここでは、初期画面においてプリプロセッサ、ソルバーまたはポストプロセッサのボタンをクリックするだけで、それぞれのコマンドを起動できるようにしている。

アンカーテーブル (PS)

材料番号	ヤング率	直径	緊張力
1	2.00E+02	0.04	-1.25E-03
2	2.00E+02	0.04	-1.50E-03
3	2.00E+02	0.04	-2.00E-03

GPa

mm

GN

入力

削除

設定

印刷

取消

図-3 PSアンカー設定テーブル

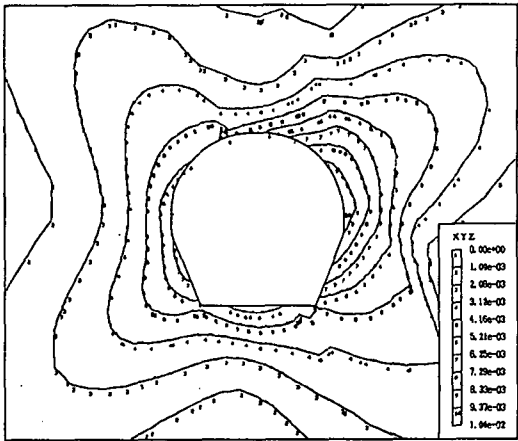


図-5 解析結果の出力例 (変位コンター図)

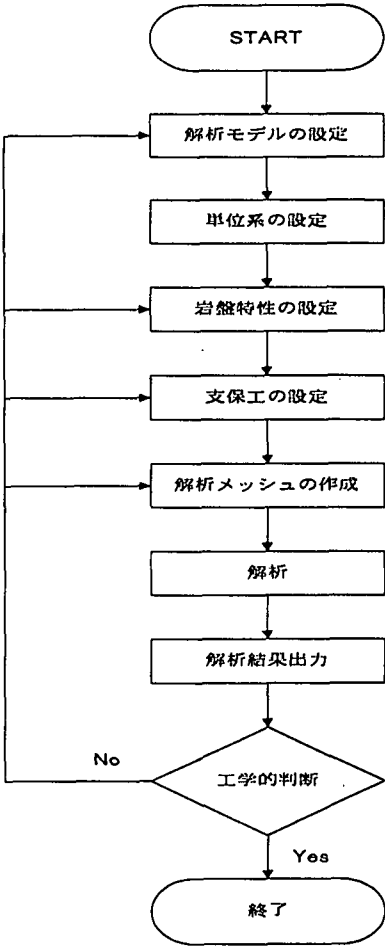


図-4 システムフロー

4. 適用例 :

本システムの有効性を検証するため、トンネルや地下空洞の実測データを用いてシミュレーション解析を行った⁶⁾。その結果、掘削に伴う空洞周辺岩盤の挙動に関して、解析値と実測値は比較的良好に一致することが分かった。その解析結果の出力例を図-5に示す。また、本システムにより解析モデルの作成、解析データの入力、ソルバーによる解析および解析結果の可視化が非常に迅速かつ容易に行えるようになった。今後は、さらに多くの地下空洞の実測データをもとに本システムによるシミュレーション解析を行い、より実用的なシステムへと向上させる予定である。

参考文献 :

- 1) 永井哲夫：ロックボルトにより補強された不連続性岩盤の力学的挙動に関する研究，神戸大学学位論文，1992.
- 2) 東京電力株式会社・株式会社青木建設：不連続性岩盤掘削時の支保工評価手法の研究，平成5年度共同研究報告書，1994.
- 3) 土木学会構造工学委員会構造力学小委員会非線形解析分科会：建設分野からみた数値解析の現状と将来の展望，土木学会論文集第VI部門，pp.17-23，1989.
- 4) 土木学会構造工学委員会構造力学小委員会非線形解析分科会：構造工学における非線形数値解析の現状と将来，土木学会論文集第I部門，pp.11-21，1989.
- 5) 三室俊昭：岩盤掘削における地質調査と結果の解析に関する技術の現状と課題，第13回岩盤システム工学セミナー，システム総合研究所，pp.1-20，1996.
- 6) 東京電力株式会社・株式会社青木建設：不連続性岩盤掘削時の支保工評価手法の研究，平成7年度共同研究報告書，1996.