

浸透流 FEM 解析結果と三次元斜面安定解析(LEM)の連携

Combination of the 3-D groundwater flow FE analysis and the 3-D slope stability analysis

中村 淳(株式会社フォーラムエイト)、鵜飼恵三(群馬大)、若井明彦(群馬大)、蔡飛(群馬大)
Atsushi NAKAMURA (FORUM8 Co.,Ltd), Keizo UGAI (Gunma Univ)

Akihiko WAKAI (Gunma Univ), Fei CAI (Gunma Univ)

キーワード：三次元斜面安定解析，極限平衡法，有限要素法

Keywords : 3-D slope stability analysis, Limit equilibrium method, 3-D finite element method

1. はじめに

三次元 FEM 浸透流解析(以下「3DFEM」と略す)から得られた地下水面を用いて、三次元地すべり斜面安定解析(以下「3DLEM」と略す)を行うことができれば、3DFEM 結果を現行の設計法(極限平衡法)に活用できることになる。

本報告は、3DFEM 結果と 3DLEM の連携システムの概要とデータの処理内容、並びに、連携事例を対象にその有効性並びに評価方法について整理し、3DFEM 結果を活用した三次元斜面安定解析の実用化について検討した。

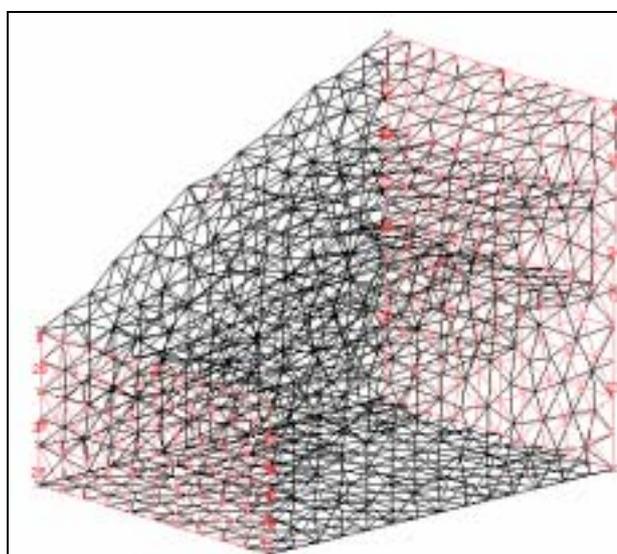


図-1 3DFEM モデル図

2. 連携システムの概要

連携システムとは、3DLEM の地すべり面計算格子点(Digital Elevation Model、以下「DEM」と略す)における圧力水頭値を 3DFEM 結果から取得し、地下水面(格子点水位高)を生成し、この地下水面を用いて、3DLEM で安定解析を行うものである。

2-1. 入力

入力として、3DFEM モデルの節点、要素データ(図-1 参照)、3DFEM 結果である節点圧力水頭値、そして、3DLEM の地すべり面 DEM 情報(図-2 参照)などが挙げられる。

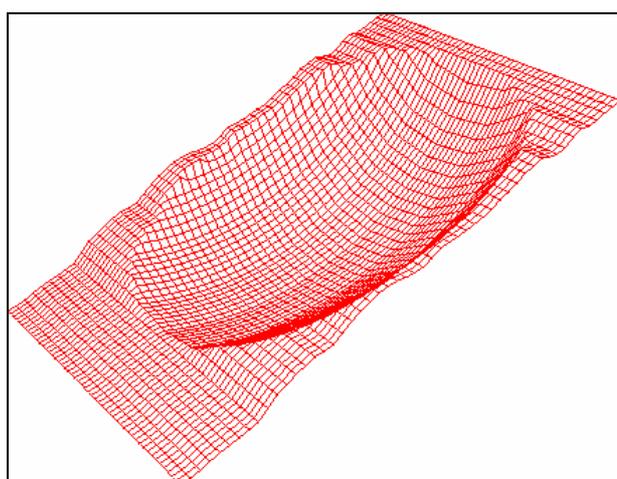


図-2 地すべり面 DEM 図

2-2.処理

(1) 地すべり節点の属する要素の検索

3DLEMの地すべり節点と3DFEMモデルの節点は必ずしも一致しない。そこで、地すべり節点(A)が、3DFEMモデルにおけるどの要素内に属するかを検索し、形状関数¹⁾を用いて地すべり節点での圧力水頭値を算出することにした。本システムでは、浸透流解析に用いた要素(八節点六面体、四節点四面体、六節点五面体)を、全て四面体要素に分割し、地すべり節点(A)が属する四面体要素を検索することにした。

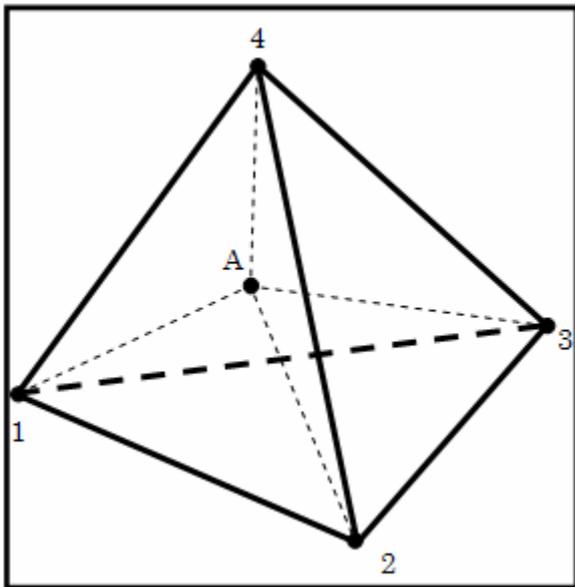


図-3 四面体要素と地すべり節点(A)

今、四面体の頂点、地すべり節点(A)をそれぞれ、 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 、 (x_3, y_3, z_3) 、 (x_4, y_4, z_4) 、 (x_A, y_A, z_A) とすると、各四面体の体積は次の通りである。

a. 頂点 1, 2, 3, 4 の四面体体積(V)

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \dots \text{式(2.1)}$$

b. 頂点 A, 2, 3, 4 の四面体体積(V1)

$$V_1 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_A & y_A & z_A \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \dots \text{式(2.2)}$$

c. 頂点 A, 1, 3, 4 の四面体体積(V2)

$$V_2 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_A & y_A & z_A \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \dots \text{式(2.3)}$$

d. 頂点 A, 1, 2, 4 の四面体体積(V3)

$$V_3 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_A & y_A & z_A \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \dots \text{式(2.4)}$$

e. 頂点 A, 1, 2, 3 の四面体体積(V4)

$$V_4 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_A & y_A & z_A \end{vmatrix} \quad \dots \text{式(2.5)}$$

式(2.6)を満足する場合は、地すべり節点(A)が頂点 1、2、3、4 で構成される四面体要素内にあると判断できる。

$$|V_1| + |V_2| + |V_3| + |V_4| = |V| \quad \dots \text{式(2.6)}$$

(2) 四面体形状関数

節点(A)に対する小四面体の形状関数(L)は式(2.7)の通りである。

$$L_1 = \frac{|V_1|}{|V|}, L_2 = \frac{|V_2|}{|V|}, L_3 = \frac{|V_3|}{|V|}, L_4 = \frac{|V_4|}{|V|} \quad \dots \text{式(2.7)}$$

(3) 節点(A)の水圧値

地すべり節点(A)における圧力水頭は、式(2.8)にて求まる。ここで、 p_i は要素節点*i*での圧力水頭である。

$$p_A = \sum_{i=1}^4 L_i p_i \quad \cdot \cdot \text{式(2.8)}$$

2-3. 出力

地すべり格子計算点の圧力水頭値を DEM(標高)に展開し、本ケースの地下水面 DEM 情報を出力する(事例にて後述)。

3. 連携事例と評価法

3-1. 連携事例

連携事例として、地下水排除工を前提にした対策前と対策後について示す。幅 50m × 長さ 70m の地形で、3DFEM は幅方向 10 分割、長さ方向 15 分割、3DLEM は両方向 50 分割で要素(メッシュ)を作成した。

(1) 連携事例(対策前)

対策前(現況)の飽和・不飽和定常浸透流解析結果を図-4(a)に示す。すべり面上の圧力水頭値を地下水面に換算した地下水面 DEM 図を(b)に示す。

(2) 連携事例(対策後)

対策後(地下水排除工実施)の飽和・不飽和定常浸透流解析結果を図-5(a)に、換算した地下水面 DEM 図を(b)示す。対策前に比べて地下水排除工による水位の低下状況がわかる(上面の格子面が地表面、下面の塗り潰し面が地下水面)。

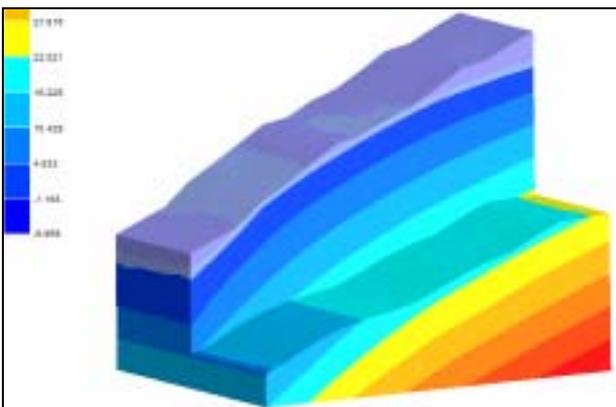


図-4(a) 対策前(現況)の浸透流解析結果

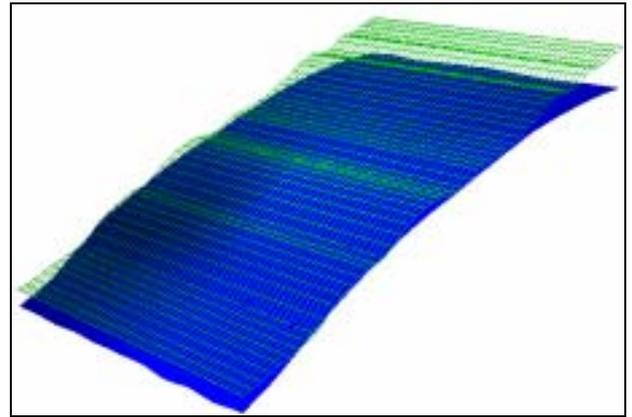


図-4(b) 対策前地下水面 DEM 図

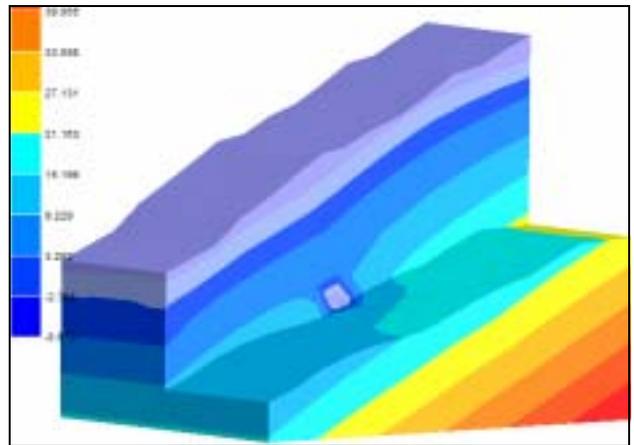


図-5(a) 対策後の浸透流解析結果

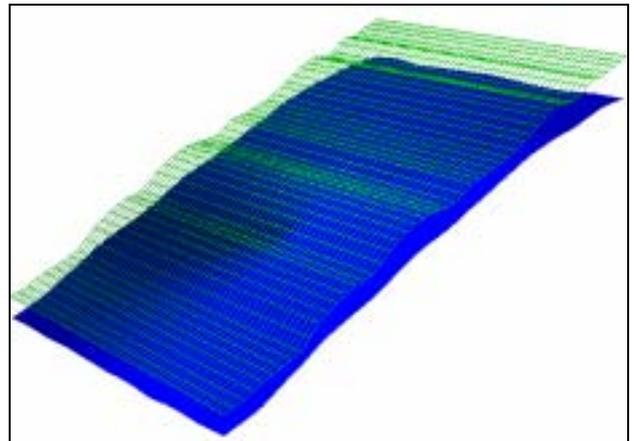


図-5(b) 対策後の地下水面 DEM 図

3-2 . 評価法

対策前において、簡易 Janbu 法²⁾による地震時 (KH=0.15)三次元地すべり斜面安全率が 1.00 になるように地すべり面の c 、 ϕ を逆算し、同じ物性値で対策後の安全率を計算した結果を表-1 に示す。簡易 Janbu 法の妥当性³⁾については、既に検証済みであるが、参考までに、Hovland 法の解析結果も併記した。また、表中()内の安全率は二次元断面(最深すべり部)の結果である。

表-1(a) 対策前の安全率

対策前	c (kN/m ²)	ϕ (度)	Fs(簡易 Janbu 法)	Fs(Hovland 法)
常時	35.847	20.000	1.403 (1.084)	1.273 (1.084)
地震時(0.15)			1.000 (0.768)	0.887 (0.746)

表-1(b) 対策後の安全率

対策後	c (kN/m ²)	ϕ (度)	Fs(簡易 Janbu 法)	Fs(Hovland 法)
常時	35.847	20.000	1.590 (1.236)	1.452 (1.253)
地震時(0.15)			1.145 (0.886)	1.043 (0.871)

FEM 結果を地下水面情報に変換することで、いずれの場合も、地下水排除工の効果が安全率の上昇という、より明確な数値情報で確認できることがわかる。

4 . まとめ

本報告では、3DFEM 結果を現行の設計法レベル(極限平衡法)で活用する方法について検討した。

具体的には、3DFEM 結果から地すべり斜面における地下水面を生成し、3DLEM に連携し利用するものである。実際に、連携システムを構築し、以下の有効性を確認することができた。

- (1) 3DFEM 結果という膨大な情報から、極めて短時間に地下水面を生成することが可能になった。
- (2) 3DFEM 結果を地下水面に変換することで、現行の設計法(極限平衡法)に取り入れることが可能になった。これより、複数の地下水排除工につ

いて 3DFEM を実施し、その効果を地すべり斜面安全率という数値で評価ができるものと考えられる。

今後は、本文で説明した 3DFEM 連携システムの操作性を向上させると同時に、3DFEM モデル図(図-1)に、地すべり面 DEM 図(図-2)を重ね合わせた 3D 描画を行うなど、異なるモデル間の相関関係をビジュアルに確認できるようにしたいと考える。また、今回は、浸透流 3DFEM 結果を地下水面に変換し 3DLEM に連携したが、浸透流解析以外の FEM 結果を現行の設計法に取り入れる手法を提案し、それを支援できるプログラムの強化を図りたい。

本文の計算、事例ではプログラム「三次元浸透流解析(VGFlow)」⁴⁾「三次元地すべり斜面安定解析(LEM)」⁵⁾(群馬大学、フォーラムエイト共同開発)を用いた。

【 参考文献 】

- 1) O.C. ツィエンキーヴィッツ、R.L. テイラー、(訳者代表：矢川元基)：マトリックス有限要素法(改訂新版) 科学技術出版社、1996.
- 2) 鶴飼恵三ほか：簡易 Janbu 法による斜面の三次元安定解析 地すべり第 24 巻 第 3 号 1987
- 3) 鶴飼恵三・若井明彦・蔡飛・中村淳：三次元斜面安定解析による杭工の設計、日本地すべり学会第 43 回研究発表会、秋田、2004.
- 4) UC-1 地盤解析シリーズ 三次元浸透流解析(VGFlow)(株)フォーラムエイト 2004.8
- 5) UC-1 地盤解析シリーズ 三次元地すべり斜面安定解析(LEM) (株)フォーラムエイト (<http://www.forum8.co.jp/>) 2004.3