

三次元における FEM 浸透流解析結果と斜面安定解析 LEM の連携

三次元斜面安定解析 極限平衡法 FEM 浸透流解析
蔡飛（群馬大） 鶴飼恵三（群馬大） 若井明彦（群馬大）

株式会社フォーラムエイト 正会員 中村淳

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）に活用できると考えられる。

本報告は、3DFEM 結果と 3DLEM の連携システムの概要、データの処理内容、並びに、連携事例を対象にその有効性、評価方法などについて整理し、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。

2. 連携システムの概要

3DFEM の解析モデルは図-1 に示すように、四面体要素などの立体要素の集合体で構成される。一方、3DLEM は、地表面、地層面、地すべり面などの境界面を三次元格子点標高モデル(Digital Elevation Model、以下「DEM」と略す)で作成する。

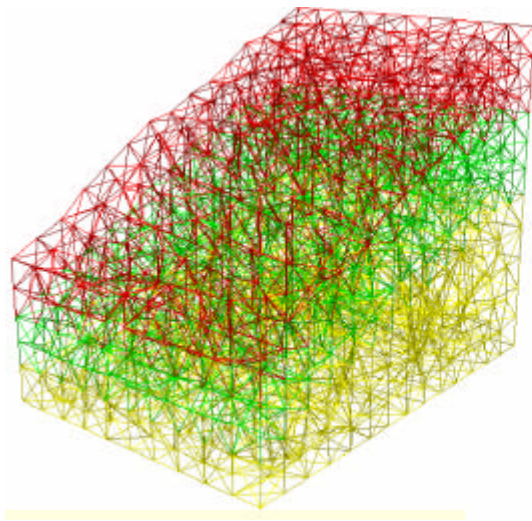


図-1 3DFEM 解析モデル図

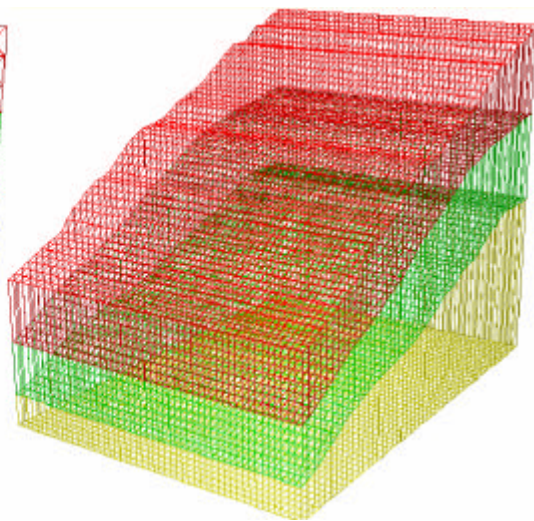


図-2 3DLEM 解析モデル図

本連携システムは、図-3 のように、3DFEM から全節点の圧力水頭を読み、これに、3DLEM の地すべり面 DEM データを重ね合せ、図-4 に示すように地すべり面における地下水面を生成し、その地下水面を用いて 3DLEM 解析を行い、安全率を算出するものである。

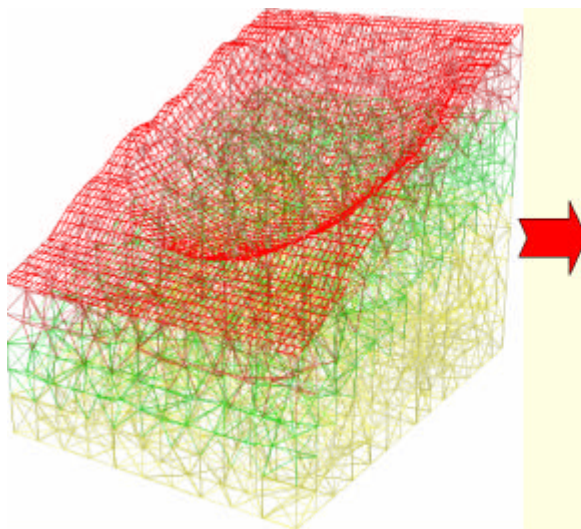


図-3 3DFEM モデルと 3DLEM 地すべり面の重ね合せ図

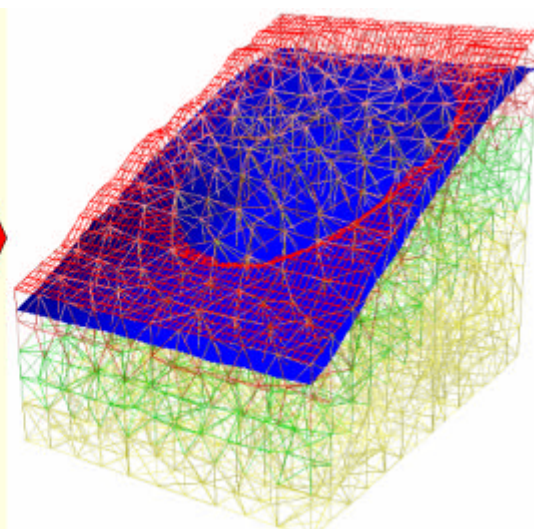


図-4 地下水面の生成状況図

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

Atsushi NAKAMURA (FORUM8 Co.,Ltd) Fei CAI (Gunma Univ) Keizo UGAI (Gunma Univ) Akihiko WAKAI (Gunma Univ)

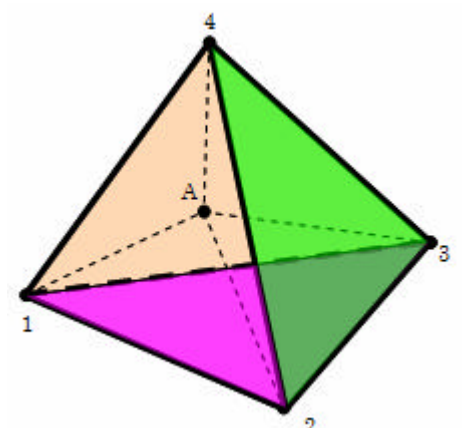
3. データ処理

地下水面を生成するまでのデータ処理の流れは、はじめに、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、次に、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というものである。

(1) 地すべり節点の属する要素の検索

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。頂点 1,2,3,4 とする四面体要素の体積(V)は式(2.1)の通りである。

表-1 地すべり節点(A)を含む四面体とその体積(V)

	<p>頂点 1,2,3,4 とする四面体要素の体積(V)</p> $V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \cdot \cdot \text{式(2.1)}$
---	---

また、地すべり節点が四面体要素内にあるものとして、これを頂点とした4つの小四面体に分割した場合のそれぞれの四面体の体積は表-2の通りである。

表-2 地すべり節点を頂点とした分割後の四面体体積

<p>頂点 A,2,3,4 の四面体体積(V1)</p> $V_1 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_A & y_A & z_A \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \cdot \cdot \text{式(2.2)}$	<p>頂点 A,1,3,4 の四面体体積(V2)</p> $V_2 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_A & y_A & z_A \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \cdot \cdot \text{式(2.3)}$
<p>頂点 A,1,2,4 の四面体体積(V3)</p> $V_3 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_A & y_A & z_A \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \cdot \cdot \text{式(2.4)}$	<p>頂点 A,1,2,3 の四面体体積(V4)</p> $V_4 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_A & y_A & z_A \end{vmatrix} \cdot \cdot \text{式(2.5)}$

下式(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。

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

(2) 四面体形状関数の計算

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。

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

(3) 節点(A)の水圧値の計算

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。

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

(4)地下水面 DEM の出力

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)。

4. 連携事例と評価法

4-1. 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-5(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。

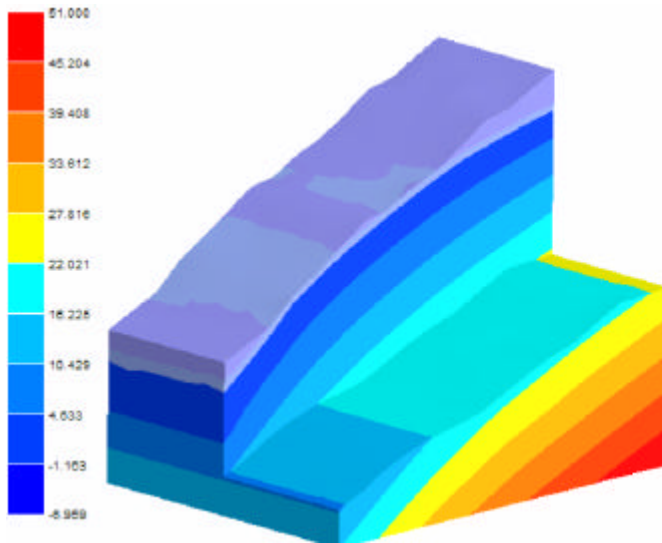


図-5(a) 対策前(現況)の浸透流解析結果

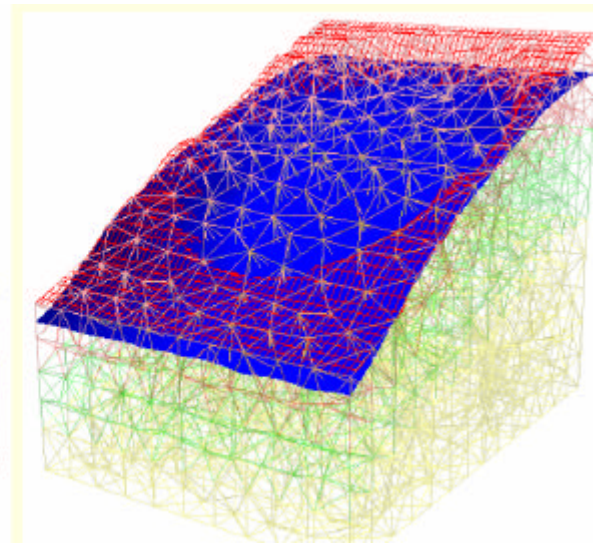


図-5(b) 対策前地下水面 DEM 図

(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-6(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(塗り潰し面が地下水面)。

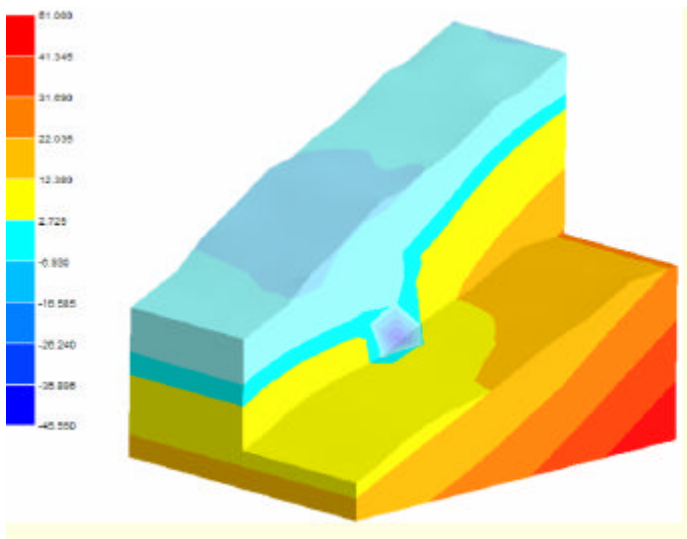


図-6(a) 対策後の浸透流解析結果

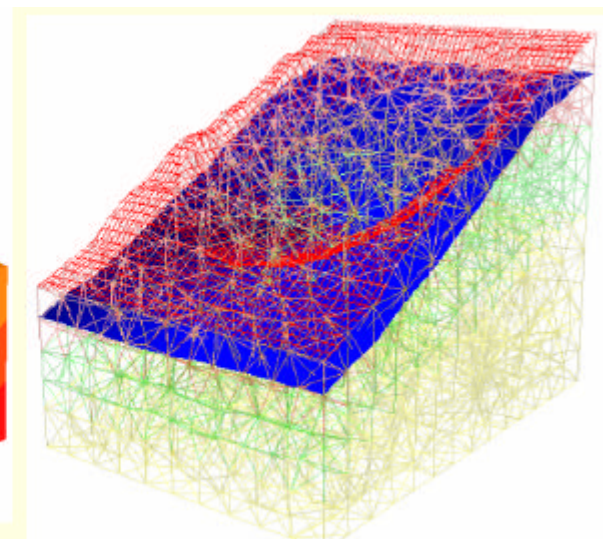


図-6(b) 対策後の地下水面 DEM 図

4-2. 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-3 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-3(a) 対策前の安全率

対策前	c(kN/m ²)	(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(kH=0.15)			1.000(0.768)	0.887(0.746)

表-3(b) 対策後の安全率

対策後	c(kN/m ²)	(度)	Fs(簡易 Janbu 法)	Fs(Hovland 法)
常時	35.847	20.000	1.590(1.236)	1.482(1.253)
地震時(kH=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。

5. 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、今回提示した地すべり節点での圧力水頭値から地下水面を生成する方法に加え、圧力水頭値ゼロ節点から地下水面を生成する方法も検討したいと考える。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