

三次元斜面安定解析 (LEM) による杭工の設計

Design of piles based on the 3-D slope stability analysis

中村 淳 (株式会社フォーラムエイト)、鶴飼恵三 (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，簡易ヤンプ法，杭工

Keywords : 3-D slope stability analysis, Limit equilibrium method, Simplified Janbu's method, Piles

1. はじめに

三次元形状の顕著な地すべりでは、地すべり中央の二次元断面に基づく対策工の設計を行うと、中央付近では適切な量の対策工になるが、端部に近いほど不経済な設計となる。これは、現行の二次元解析による対策工の設計における大きな問題点であり、三次元解析を実施すれば、このような問題が解消されると考えられるが、現在のところ、三次元斜面安定解析に基づく対策工の設計は殆ど行われていない。

本報告では、三次元斜面安定解析に基づいた対策工の設計を行うために、解決しなければならない諸問題とその対応策について整理し、三次元斜面安定解析に基づいた設計計算の実務化について検討した。

2. 解決すべき諸問題について

設計計算の実務化に向けて解決しなければならない設計上の問題点は、適切な三次元安定解析手法の確立、適切な三次元計画安全率の設定であると考えられる。

同時に、三次元斜面安定解析を行うための技術上の問題点として、三次元地すべり地形そのものを、簡単かつ短時間で再現 (インプット) できるプリプロセッサ (プログラム) が必要であると考えられる。

2.1 適切な三次元安定解析手法について

主な三次元安定解析手法として、Hovland法、簡易Janbu法 (鶴飼ほか)¹⁾²⁾が挙げられる。なお、Hovland法において地下水面以下の土塊重量を水中重量としたHovland (水中重量) 法については紙面の関係で割愛した。本報告では、図 - 1 (a) (b) に示す簡単なくさび地形を対象に厳密解を求め、これと両解析法による結果を比較した。

地形は水平長さ100m幅100mのひし形で、水位のない場合とある場合について検討した。厳密解により初期安全率 $F_0 = 1.00$ に対する c 値ゼロ時の値 (c_0)、値ゼロ時の c 値 (C_0) を逆算した。その逆算値である ($c = c_0, c = 0$) と ($c = 0, c = C_0$) の土質定数の組合せで、両解析法を用いて安全率を計算した。その結果が表 - 1 (a) (b) である。

これより、簡易Janbu法によって得られる安全率が、Hovland法に比べて、初期安全率1.00に近い事から、簡易Janbu法の方が適切な解析方法であると考えられる。

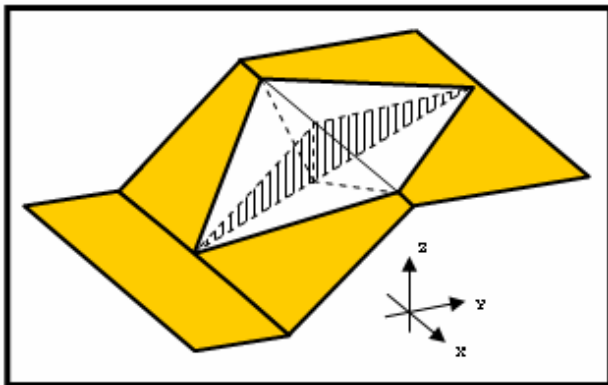


図 - 1 (a) くさび地形鳥瞰図

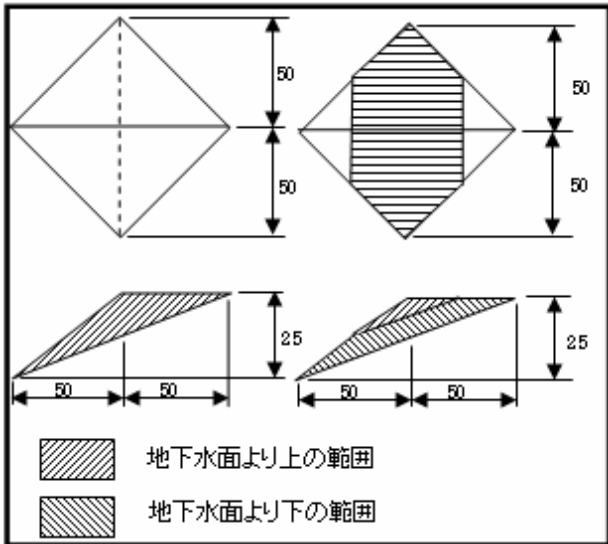


図 - 1 (b) くさび地形平面、側面図
表 - 1 (a) 水位のない場合の比較結果

水位なし (左側の図)	厳密解による値		検証安全率 Fs	
	逆算値	Fo	Hovland	Janbu
値(度)	13.65	1.000	0.944 (0.972)	1.003 (0.972)
c値(kN/m2)	17.16	1.000	1.000	1.001

()内は 2 次元断面の安全率 (参考値)

表 - 1 (b) 水位がある場合の比較結果

水位あり (右側の図)	厳密解による値		検証安全率 Fs	
	逆算値	Fo	Hovland	Janbu
値(度)	18.52	1.000	0.924	1.001
c値(kN/m2)	18.12	1.000	1.000	1.000

2.2 適切な三次元計画安全率の設定について

対策工の抑止力は、計画安全率を満足するように算出される。設計基準類の多くは、二次元極限平衡法に対する計画安全率 (Fsp2) を規定しているが、三次元極限平衡法に対する計画安全率 (Fsp3) の規定は見あたらない。通常、二次元計画安全率と等価な安全性を確保するためには、三次元計画安全率をやや大きめに見積もる必要がある (Fsp3 > Fsp2)。

そこで、本文では、簡易 Janbu法を用いて、二次元計画安全率と等価な三次元計画安全率を算出する方法について提案する。

計算の仮定として、初期安全率は、二次元、三次元ともに同じ値であり、Fo であるとする。必要抑止力は、二次元、三次元ともに同じ値であるとする。つまり、 $Preq3 = L \cdot Preq2$ (L: 抑止工が設置される全幅) とする。

二次元計画安全率 Fsp2 に対応する三次元計画安全率 Fsp3 を求める過程を以下に示す。

(1) 初期安全率 Fo を与える。

(2) 下記に示す二次元安全率式より Fo に対応する c または $\tan f$ を逆算する。

$$F_{o2} = \frac{\sum \left[\frac{\{c \cdot \Delta l \cos a + (\Delta W2 - u \Delta l \cos a) \tan f\}}{\cos a \cdot m a_2} \right]}{\sum \Delta W2 \cdot \tan a}$$

..式 (2.1)

$$m a_2 = \cos a + \frac{\sin a \tan f}{F_{o2}}$$

$$\Delta W2 = g_z \Delta y$$

(3) 二次元計画安全率 F_{sp2} を与え、上記 (2) で逆算された c または $\tan f$ から必要抑止力 P_{req2} を計算する。

$$P_{req2} = \sum \Delta W \tan a - \frac{1}{F_{sp2}} \sum \frac{\{c \Delta l \cos a + (\Delta W - u \Delta l \cos a) \tan f\}}{\left\{ \cos a \left(\cos a + \frac{\sin a \tan f}{F_{sp2}} \right) \right\}}$$

・・式 (2.2)

(4) 三次元簡易 Janbu の式から F_o に対応する c または $\tan f$ を逆算する。

$$F_{o3} = \frac{\sum \sum \left[\frac{\{(c - u \tan f) \Delta A + \Delta W \tan f\}}{\cos a_{yz} \cdot ma} \right]}{\sum \sum \Delta W \cdot \tan a_{yz}}$$

・・式 (2.3)

$$ma = \frac{1}{J} + \sin a_{yz} \frac{\tan f}{F_{o3}}$$

(5) $P_{req3} = L \cdot P_{req2}$ とおき、式 (2.4) 式から F_{sp2} に対応する三次元計画安全率 F_{sp3} を求める。

$$F_{sp3} = \frac{\sum \sum \left[\frac{\{(c - u \tan f) \Delta A + \Delta W \tan f\}}{\cos a_{yz} \cdot ma_3} \right]}{\sum \sum \Delta W \cdot \tan a_{yz} - P_{req3}}$$

・・式 (2.4)

$$ma_3 = \frac{1}{J} + \sin a_{yz} \frac{\tan f}{F_{sp3}}$$

この式から F_{sp3} を求めるには、繰り返し収束計算を行う

以上より、現行の二次元計画安全率と等価な三次元計画安全率が設定できる。

2.3 三次元地すべり地形の再現法について

三次元地形形状を、地形断面図を多数入力する二次元的な操作で、比較的簡単に再現できる仕組みを考案³⁾した。

具体的には、図 - 2 に示すように、二次元の地形断面を複数入力することにより、隣り合う断面間の格

点のあるルールで結び合い、断面間を三角形の平面で覆うという方法である。これにより、複数の地すべり側線データを用意すれば、従来の二次元的な入力方法で、比較的簡単に三次元地形を再現できる。

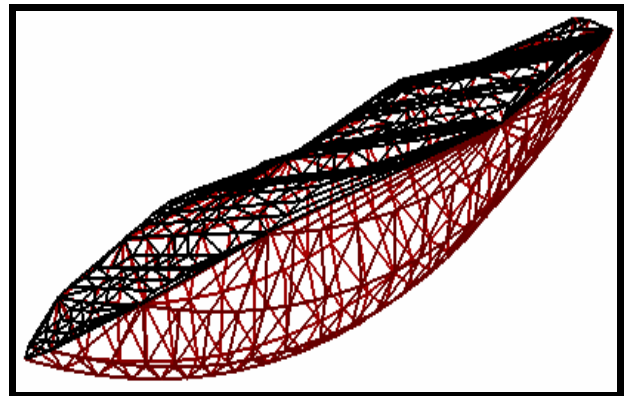


図 - 2 複数の二次元地形断面で三次元化

3. 杭工の設計に見る三次元解析の効果

三次元解析を行い、横方向の抑止力分布状態を可視化できれば、地すべりブロック全体を考慮した適切な杭配置を見出す事が可能になると考えられる。

そこで、抑止力の横方向分配方法と、分配後の杭配置の考え方について述べる。

3.1 抑止力の横方向分配法

地すべり全体を対象とした必要抑止力 (P_{req3}) を、横方向 (列単位) に分配する考え方として、各列の滑動力の比率を考慮することにした。 n 列目の抑止力の計算式は次の通りである。

$$P_{req}(n) = P_{req3} \times \frac{s(n)}{\sum s} \quad \text{・・式 (3.1)}$$

ここに、

s : 全滑動力

$s(n)$: 列単位の滑動力

図 - 3 のメッシュは、地すべり平面図のコラム (土塊ブロック) を表したものである。地すべりは y 軸上方から下方に発生するとし、矢印は滑動力の大きさを示す。

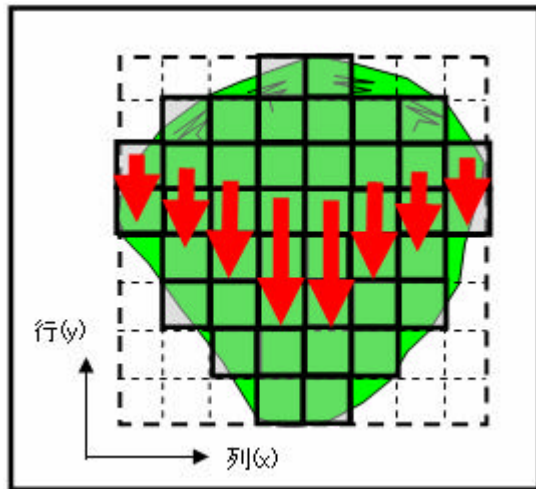


図 - 3 地すべり平面メッシュ図

なお、三次元斜面安定解析は、メッシュの全行全列の滑動力、抵抗力を集計するのに対して、二次元斜面安定解析は、列単位 (1 列ずつ) で滑動力、抵抗力を集計することになる。

図 - 4 に抑止力の横方向分配図を示す。太枠棒グラフが、式 (3.1) にて、三次元斜面安定解析から得られた必要抑止力を、滑動力の比率で横方向に分配した抑止力分布図である。斜線棒グラフが、列毎の抑止力、すなわち、二次元斜面解析による抑止力分布図である。

3.2 杭配置の考え方

図 - 4 から、断面毎の二次元抑止力計算では、地すべり中央で抑止力が顕著化し、地すべり端部の断面では、安定性が保たれるとして、抑止力が発生しない状況になる。しかしながら、設計の実務においては、地すべり中央付近で設計した杭配置を、地すべりブロック全体に設置することになる。

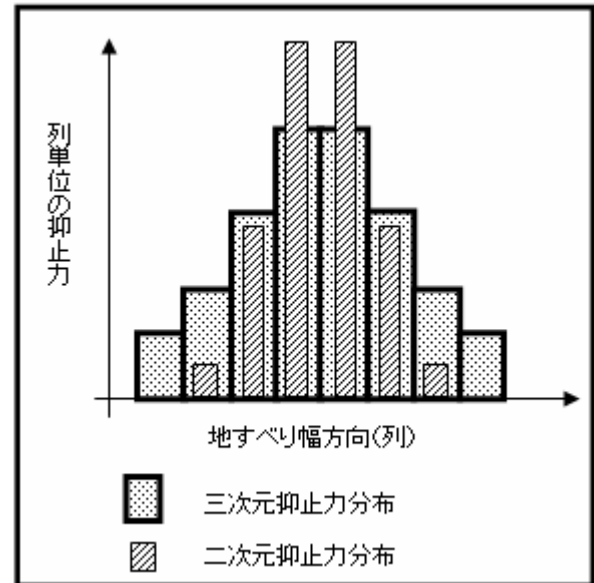


図 - 4 抑止力分布図

一方、三次元抑止力分布図は、地すべりブロック全体に対する分布状態を可視化する事ができる。これにより、地すべり中央付近では杭を密に配置し、地すべり端部では疎に配置するといった、地すべりブロック全体を考慮した適切な杭配置を見出す事ができると考えられる。

4. まとめ

三次元斜面安定解析を行う利点を整理する。

(1) 三次元効果は意外に大きい

実際の崩壊斜面では、三次元安全率が二次元安全率の 1.2 ~ 1.3 倍程度になることが十分ありうる。

(2) 逆算強度定数の過大評価

地すべりなどですべり面の強度定数 c を逆算する場合、二次元仮定では c を過大評価してしまう恐れがある。

(3) 経済性

一般に三次元安全率は二次元安全率より大きいので、設計上二次元安全率を用いると不経済になる可能性がある (たとえば、破壊幅があらかじめ予測でき

る山間部のフィルダムや狭い掘削などで)。

以上は、極限平衡法の利点である。また、三次元解析により、例えば、杭工を配置する場合、最も危険な断面付近に杭を密に配置し、すべり領域の端部付近では疎に配置するといった適正化が考えられる。

このように、三次元斜面安定解析を行う必要性は高いと考えられるが、設計の実務では、三次元斜面安定解析が殆ど行われていないのが現状である。

今後は、本文で説明した処理機能を有する三次元 LEM 斜面解析のプログラム化により、三次元斜面安定解析が行いやすい環境になったことから、現行の二次元斜面安定解析との比較検証を行いながら、実務化に寄与してゆきたいと考える。

三次元 LEM で杭工の配置並び設計計算を行い、さらに、三次元 FEM 解析を用いて、その適正を検証するという設計の流れを支援できるプログラムの開発が次の検討課題である。

本文の計算、検証ではプログラム「三次元地すべり斜面安定解析 (LEM)」³⁾ (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) 鷗飼恵三ほか「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
- 2) 鷗飼恵三ほか「簡易 Bishop 法、簡易 Janbu 法および Spencer 法の三次元への拡張」土木学会論文集第 394 号 1988.6
- 3) JC-1 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