

2. FEMによる地すべり解析の基礎理論

Fundamental theories of FEM for landslide analysis

蔡 飛／群馬大学工学部

Fei CAI／Faculty of Engineering, Gunma University

キーワード：有限要素法，地すべり対策工，弾塑性，3次元解析

Key words：finite element analysis, landslide stabilization, elasto-plastic, three-dimensional analysis

2.4 FEMによる地すべり対策工の効果判定

2.4.1 弾塑性FEM解析の必要性

地すべり対策工を計画する際に，次の各事項が確保されなければならない。すなわち (1) 地すべりの安全率が計画安全率より大きいこと，(2) 対策構造物が崩壊しないことである。これまでは，2次元極限平衡法により計画安全率を達成するために必要な対策工の効果（例えば，杭工においては抑止力，アンカー工においてはアンカー力，地下水排除工においては地下水位の低下量等）を算定し，安全性を確保できる地すべり対策工の規格，規模等を決定してきた。2次元極限平衡法は，経験と実績に裏付けられた簡便な方法であるが，杭工やアンカー工など対策構造物と地すべり土塊との相互作用，対策構造物の3次元性，土の弾塑性の性質などを定量的に考慮できない。したがって，より詳細に対策工の効果を評価するために，弾塑性FEMが必要であると考えられる。

弾塑性FEM解析では，まず土の自重および水圧による初期応力を計算する。次に対策工を設置し，対策工が設置された地すべりにせん断強度低減FEMを適用し，地すべりの安全率を算定すると同時に，計算された応力を用いて，対策構造物の安全性を判定する。せん断強度低減FEMの詳細は文献 (1, 2) を参照されたい。また，本講座はこれまで主に2次元弾塑性FEM解析の手法を説明してきた。3次元解析手法は2次元解析と概ね同じなので，ここでは省略させていただく。詳細は文献 (1) を参照されたい。

以下に対策工が単独で設置された場合の対策工の効果をせん断強度低減FEMにより計算した例を示す。実際の地すべりでは各種の対策工が同時に施工される場合もあり，せん断強度低減FEMは複数の対策工の施工に対しても適用し得る。

2.4.2 FEMによる地下水排除工の効果判定

地下水排除工の効果を判定するためには，地下水排除工による地下水位の低下を求めなければならない。地下水排除工として良く用いられている集水ボーリング工と排水パイプをモデル化する方法として4つあげられる。
(1) 最も簡単な方法として，集水ボーリング工もしくは

排水パイプ上にある全ての節点の圧力水頭をゼロとする³⁾，(2) 集水ボーリング工もしくは排水パイプを1次元要素によりモデル化する⁴⁾，(3) 集水ボーリング工もしくは排水パイプを1本ずつモデル化せず，集水ボーリング工もしくは排水パイプの占める領域をある厚さをもつ透水性のよいゾーンとする⁵⁾，(4) 集水ボーリング工もしくは排水パイプを1本ずつモデル化せず，集水ボーリング工もしくは排水パイプの占める領域を透水性のよいゾーンとして，平面要素を用いてモデル化する⁶⁾。

代表的な地下水排除工である集水井には集水ボーリング工が施工されるのが一般的であり，集水井内部より放射状に数十本施工される。理想的には集水ボーリング工を1本ずつモデル化することが望ましいが，メッシュ作成，解析時間，コンピュータの性能によって計算が制約されるため，集水ボーリング工を前述の方法 (3) もしくは (4) を用いてモデル化するのが有効であると考えられる。

以下に排水パイプを方法 (1) を用いてモデル化した解析例を示す。斜面の崩壊の多くは，降雨などによる地下水位の上昇が原因で生じる。砂質土からなる斜面では，浅層崩壊を防ぐために短い排水パイプを法面から挿入することがある。図-1はそのような例である。時間雨量を一定と仮定し，飽和・不飽和浸透流解析を実施した。計算された圧力水頭を利用して3次元せん断強度低減FEMにより全体安全率を計算した。降雨時も排水パイプ内は満水でないことが確認されたので，飽和・不飽和浸透流解析では，排水パイプ上にあるすべての節点の圧

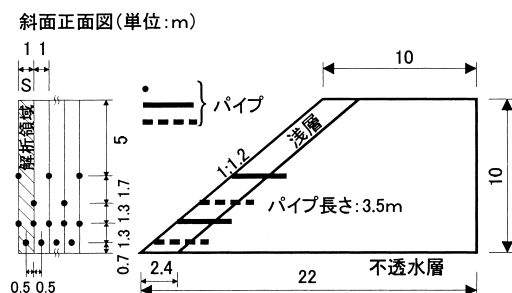


図-1 排水パイプを有する斜面のモデル

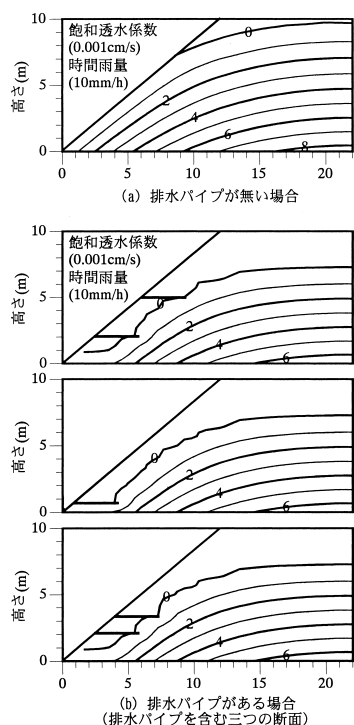
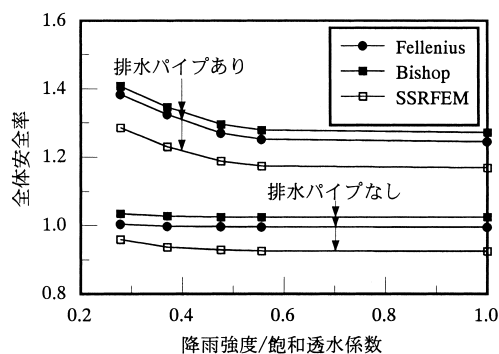


図-2 圧力水頭 (単位: m) の分布図

図-3 全体安全率と飽和透水係数により除した降雨強度との関係 (浅層: $c' = 8.83 \text{ kPa}$, $\phi' = 27^\circ$, 深層: $c' = 24.53 \text{ kPa}$, $\phi' = 27^\circ$)

力水頭をゼロであるとした。また、解析では、対称性を利用して最小限の領域を解析対象とした。図-2に排水パイプを設置しない場合と設置した場合における定常状態での圧力水頭の分布図を示す。図-2に示すように排水パイプを設置することで、斜面表層の地下水位が大きく低減したことがわかる。図-3に排水パイプを設置しない場合と設置した場合の全体安全率と飽和透水係数により除した降雨強度との関係を示す。図-3より、排水パイプの効果がある。

2.4.3 FEMによる杭工の効果判定

FEM解析において、杭工をモデル化する方法は2つある。(1) 杭工を梁要素によりモデル化する方法^{7,8)}、また(2) 杭工をソリッド要素によりモデル化する方法である。梁要素は杭工を簡便にモデル化できるが、線的な要素で体積がないため、杭工と地すべり土塊との相互作用

用を厳密に考慮するには限界がある。しかし、微小変形の範囲では梁要素とソリッド要素の結果に大きな差はないと考えられ、杭が数十本あるような大規模な地すべり解析を行う場合には梁要素の用いられる場合が多いのが現状である。

以下に杭工をソリッド要素によりモデル化する方法の一例を示す。図-4に1列の杭工で補強された斜面モデルを示す。直径 $D = 0.8 \text{ m}$ 、杭間隔 $D1 = 3D$ の杭が斜面の直交方向に無限に配置されている状態を仮定した。対称性を利用して最小限の領域を解析対象とし、3次元解析を行った。また、杭と地盤の間のすべりを含む接触機構を表現するために、3次元インターフェース要素を杭周面に配置した。杭は弾性体であると仮定した。解析手順として、まず杭の無い斜面の初期応力を求めるために、杭の部分も土であるとして、土の自重を作用させた。次に、杭に相当する土の部分に杭の材料に置き換えた。このとき杭に土の応力が残るため、これが杭の初期応力になる。この初期応力の大きさは、斜面破壊直前での杭に生じる応力に比べると無視できる程度に小さい。この後せん断強度低減FEMを適用して、杭で補強された斜面を破壊に至らせ、全体安全率を求めた。

杭の設計では、杭の安全性を確保するために、杭外周面に生じる最大応力度は許容応力度より小さくしなければならない⁹⁾。FEM解析では、杭外周面の応力が直接求められないので、要素内部のガウス点の応力を用いて杭の曲げモーメントおよびせん断力を算定し、これらの結果から杭外周面の応力を求める。以下にその概略手順を説明する。

ある深さでの杭断面とガウス点を図-5に示す。この断面に作用する曲げモーメントは、式(1)に示すようにガウス点の軸方向応力(この例では z 方向)とアーム長の積のガウス積分により求めることができる。

$$M = \sum_{\text{element } j=1}^{NG} w_j \sigma_{zj} x'_j \det \mathbf{J}_j \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 w_j 、 σ_{zj} 、 x'_j 、 $\det \mathbf{J}_j$ はそれぞれガウス点 j の重み、 z 方向の応力、中心軸からの距離、ヤコビアン・マトリックスの行列式である。 NG は曲げモーメントを計算する断面内にある1つの要素におけるガウス点の数で

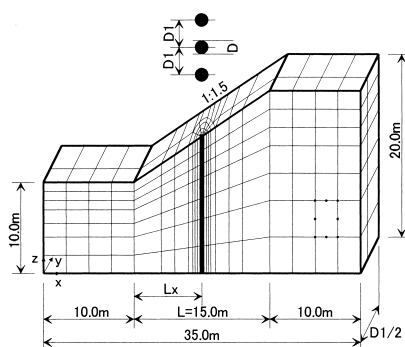


図-4 杭で補強された斜面のモデル

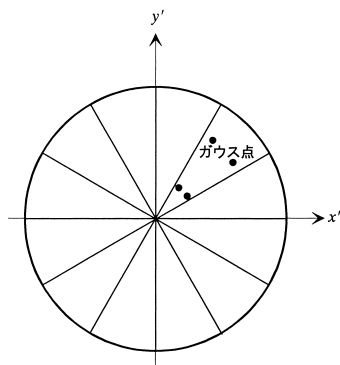


図-5 杭工の断面図

あり、要素のガウス点の数と違うので注意されたい。

$\sum_{\text{element}}$ は曲げモーメントを計算する断面内にある各要素の曲げモーメントを合計することを意味する。

せん断力は次の式で表される。

$$S = \sum_{\text{element}} \sum_{j=1}^{NG} w_j \tau_{xzj} \det J_j \dots\dots\dots (2)$$

深さ方向の各断面における曲げモーメントやせん断力をそれぞれフィッティングし、最大値を求めることができる。このようにして求めた最大曲げモーメントやせん断力を用いて、従来法と同じように杭の安全性を判定できる。

図-4に示す杭工で補強された斜面において、全体安全率と杭工の位置との関係を図-6に示す。図-6で自由とヒンジは、それぞれ杭頭が自由に変位し回転ができるケースと、変位がゼロかつ回転が自由のケースを指す。杭頭の変位を拘束したヒンジの場合のほうが斜面の補強効果は明らかに大きいことがわかる。また、杭の設置位置が斜面の中間であるとき、杭頭の拘束条件に関係なく補強効果は最も大きいことが明らかである。

杭頭自由のケースについて、斜面崩壊直前での杭の水平変位、曲げモーメント、せん断力は、杭が斜面の中間位置にある時が最も大きいことが図-7に示されている。このようにFEMを用いることにより効果的な打設位置を検討することができる。また、曲げモーメントは弓型分布となっている。曲げモーメントの弓型分布は現場計測によっても多数の事例が報告されている¹⁰⁾。

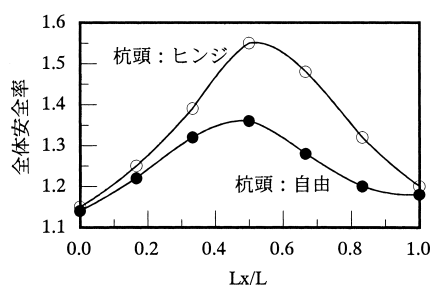


図-6 全体安全率と杭工の位置との関係

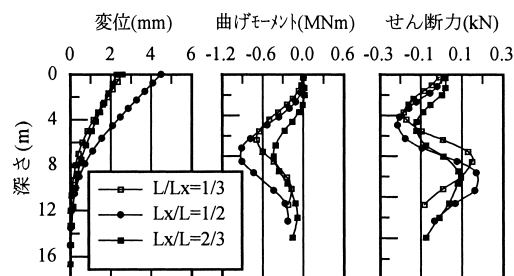


図-7 杭工の挙動 (杭頭が自由)

2.4.4 FEMによるアンカー工の効果判定

FEM解析において、アンカー工をモデル化する方法は主に3つある。(1) 1つの集中力として、斜面や地すべり表面を押さえる¹¹⁾、(2) 1つのバー要素^{11,12)}、ばね要素¹³⁾、もしくは梁要素¹⁴⁾を用いてモデル化する、(3) ソリッド要素により、アンカー工をありのままにモデル化する¹¹⁾といった方法である。方法(1)は最も簡便であるが、アンカー工の頭部変位量と荷重との関係を適切に考慮できない。すなわちアンカー体と地盤との間に生ずる応力やアンカー体周辺の地盤に生ずる応力などを求めることができない。方法(2)は方法(3)より簡便にアンカー工をモデル化できる。ただし、これらのモデルはその厳密性に違いがあるものの、図-8に示す単純斜面において、全体安全率はいずれのモデルでもほぼ同じである¹¹⁾。

以下にアンカー工をソリッド要素によりモデル化する一つの解析例を示す。解析モデルを図-8に示す。高さ8m、勾配1:1の均質斜面を想定した。アンカー工は1段で、アンカー傾角 θ 、奥行き方向の間隔D1=1.5m、斜面先からアンカー頭部中心までの水平距離Lx=4mとして設置されている。図-8に示す3次元解析領域と

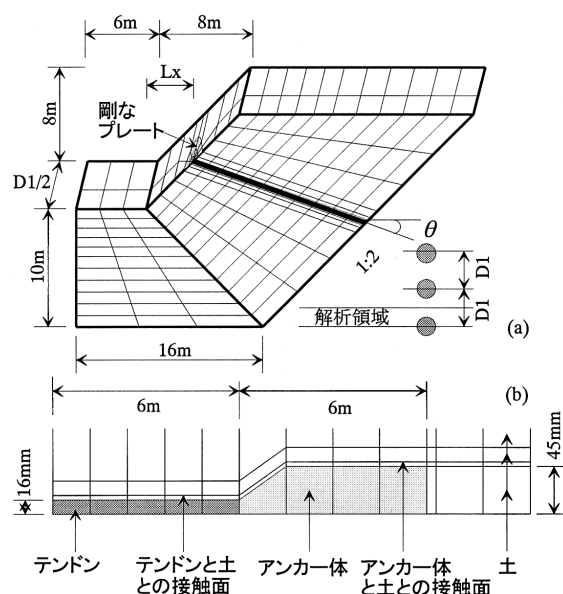


図-8 アンカー工で補強された単純斜面のモデル (a) 全景, (b) アンカー工に沿った断面

そのメッシュを用いて弾塑性FEM解析を行った。アンカー長は12mで、それぞれ6m長のテンドンとアンカー体から構成される。テンドンは鋼製で外径は32mmとし、土との接触面は滑らかとした。アンカー体の外径は90mmとし、鉄筋コンクリートと同じ材料定数を仮定した。アンカー体及びテンドンと土との接触面をモデル化するために、3次元インターフェース要素を導入した。アンカー体と土との接触面のせん断強度定数は土と同じであると仮定した。アンカー頭部には、直径30cmの剛なプレートと想定した。

無補強斜面の全体安全率は、弾塑性FEMで1.09、フェレニウス法（簡便分割法）で1.04であり、両者は近い値になった。なお、簡易ビショップ法による全体安全率は1.08になり、弾塑性FEMとほぼ同じ値になった。

弾塑性FEM解析では、アンカーの打設や初期緊張力の導入をできるだけ忠実に再現するために、まず図-8に示す斜面内のすべての部分を土と同じ定数にして、土の自重を作用させた。次に、アンカー体、テンドン、アンカー体と土との接触面、テンドンと土との接触面に相当する土の部分の定数をそれぞれの材料定数に置き換えた。このとき応力状態は変化させないため、アンカー体の周りには土の自重による土圧が作用し、テンドンとアンカー体内には土の自重による応力が残る。これらの大きさは斜面破壊直前での両者の内部に生じる応力に比べると無視できる程度である。次にテンドンに初期緊張力に相当する引張り力を与える。これにより、アンカープレートには土への押し込み力、アンカー体には引張り力が生じる。剛なアンカープレートの挙動をシミュレートするために、プレートの位置に対応するすべての節点に対して、節点力の総和が初期緊張力になるまで同一の変位をアンカー軸方向に強制的に与えた。この後せん断強度低減法を適用して、アンカー工で補強された斜面を破壊に至らせ、全体安全率を求めた。

3次元弾塑性FEMにより計算される斜面破壊時のアンカー力を単位奥行き方向に平均化して、2次元簡易ビショップ法およびフェレニウス法により、アンカー工で補強された斜面の全体安全率を計算した。

図-9にアンカー傾角 θ と全体安全率との関係を示す。弾塑性FEM解析では、初期緊張力はゼロとした。図-9より、弾塑性FEMと簡易ビショップ法は、ほぼ同じ値を示すが、フェレニウス法は小さめの値である。しかし、いずれの方法も曲線の傾向は同じである。図-10はアンカー傾角が 15° であるときの斜面破壊直前の変位ベクトル図である。図中には、フェレニウス法および簡易ビショップ法で求めたすべり面も示した。変位ベクトルが大きな領域の境界にすべり面は位置しており、3つの方法はほぼ同様なすべり面を与えている。

参考文献

- 1) 田中忠次・鶴飼恵三・河邑眞・阪上最一・大津宏康（1996）：

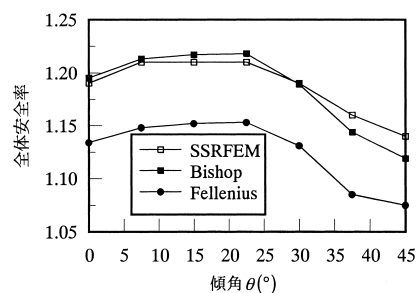


図-9 全体安全率とアンカー傾角との関係

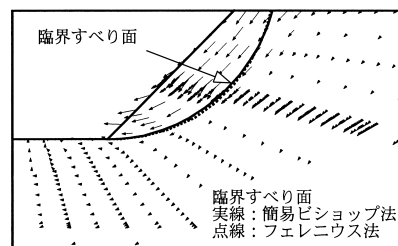


図-10 アンカー傾角が 15° であるときの斜面破壊直前の変位ベクトル図

地盤の三次元弾塑性有限要素解析、丸善。

- 2) 若井明彦・蔡 飛（2003）：地すべり解析における有限要素法の利用 第4回（せん断強度低減法（SSRM）による全体安全率の計算），日本地すべり学会誌，Vol. 40, No. 3, pp. 76-80.
- 3) 鶴飼恵三・蔡 飛・若井明彦・阪上最一（1998）：集水ボーリングの効果に関する定量的評価手法の提案，地すべり，Vol. 35, No. 3, pp. 1-7.
- 4) 西田憲司・山上拓男・蒋景彩（2000）：三次元有限要素解析に基づく排水ボーリング効果の定量的評価法，地すべり，Vol. 37, No. 3, pp. 1-9.
- 5) Azam, S. M.・蔡 飛・鶴飼恵三・若井明彦（2003）：Finite element analyses of horizontal drains and its homogenization model, 第42回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 303-306.
- 6) 牧野孝久・倉岡千郎・鶴飼恵三・若井明彦・蔡 飛・角田信吉（2003）：生須地すべりにおける集水井工の3次元有限要素浸透流解析，第42回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 135-138.
- 7) 木下慎逸・田中比月・酒井哲哉・吉松弘行（2001）：地すべりにおける深礎杭の3次元解析事例，地すべり，Vol. 38, No. 3, pp. 108-115.
- 8) 石井靖雄・小山内信智・仲野公章・倉岡千郎・太田敬一（2003）：地盤の変形係数等が地すべり抑止杭工の変形特性に及ぼす影響の検討，第42回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 309-312.
- 9) 日本地すべり学会（2003）：地すべり鋼管杭設計要領（新版），地すべり対策技術協会。
- 10) 福本安正（1976）：地すべり防止グイの挙動について，土質工学論文報告集，Vol. 16, No. 2, pp. 91-103.
- 11) 蔡 飛・鶴飼恵三：アンカー工による斜面の補強効果-極限平衡法と弾塑性FEMとの比較，日本地すべり学会誌，Vol. 40, No. 4, pp. 8-14.
- 12) 藤田壽雄（1990）：有限要素法による地すべりの安定解析と対策工の設計，地すべり，Vol. 27, No. 1, pp. 19-26.
- 13) 中村浩之・星野和彦・奥田公也（1992）：アンカー工における最適な初期定着力の設定，地すべり，Vol. 29, No. 1, pp. 16-23.
- 14) 吉松弘行・中山守人（1993）：離散化モデル解析によるアンカー工抑止効果，地すべり，Vol. 30, No. 1, pp. 36-44.

（原稿受付2003年8月12日，原稿受理2003年12月15日）