

Lecture

地すべり解析における有限要素法の利用 第13回 Finite element method for landslide analysis No.13

4. FEMの地すべり解析への適用例

Application of FEM for landslide analysis

山田正雄／国土防災技術株式会社

Masao YAMADA／Japan Conservation Engineers Co., Ltd.

キーワード：杭工，杭工設計式，FEM解析

Key words：pile work, pile design method, FEM analysis

4.2 杭工におけるFEM解析

4.2.1 はじめに

今回は抑止工法としてよく用いられる杭工を取りあげ、FEM解析の適用例を紹介する。

杭工のメカニズムについては、「地盤に密着させて埋め込まれた鋼管杭は、地すべりの移動または山側からの地すべり土圧（推力）を受けてたわむ。それに伴って杭材に発生する曲げモーメントおよびせん断力と地すべり推力とをつり合わせ、または推力の一部を地盤反力によって支持する」（地すべり鋼管杭設計要領，2003），すなわち、杭の変形が移動層と基岩層に力を伝達し土塊の地盤反力によって支持するとされている。そのため杭工が採用される場合は杭背面の地盤反力が期待できるかどうかのポイントで、地盤反力の有無は設計時の大事な留意点の一つである。杭工には種々の設計式があり、本稿では従来の実務における杭工設計に対するFEM解析結果を紹介し、現在のFEM解析の位置づけを提示したい。

4.2.2 杭工の設計式の種類

地すべり鋼管杭設計要領（2003）では、地すべりに対する杭の設計式として作用外力の分布型、杭谷側の有効抵抗力、地すべり活動状況の違いによって、くさび杭、補強杭、せん断杭、抑え杭の4つに分類しており、地すべりの実態に合わせて杭の設計式を適用する必要があるとしている。

くさび杭は、移動層と基岩層が相対的に変位する場合の杭の挙動を解析するもので、すべり面位置に地すべり推力に相当するせん断力を付加する。地すべり移動が繰り返して発生する活動的な地すべりに適用される。

補強杭は、杭を弾性床土上の梁として考え、地すべり推力は移動層部分に三角形分布荷重として与える。杭下流側移動層が安定していることが前提であり、杭の変形による杭下流側移動層の単独すべりが発生しない条件を課している。一旦安定状態にある地すべりの安定度をさらに確保する目的で適用される。

抑え杭は、すべり面深度の1/2～1/3の深度に集中荷重を与え、すべり面より上を片持ち梁として、基岩層部分は地盤反力を期待して解析するもので、斜面勾配が急で

大野亮一／国土防災技術株式会社

Ryoichi OHNO／Japan Conservation Engineers Co., Ltd.

杭谷側移動層の地盤支持力が期待できない場合に適用する。

せん断杭は、すべり面におけるせん断抵抗力で地すべりを抑止するもので杭のモーメントやたわみを考慮しておらず最近ではあまり使われていない。

4.2.3 杭工のFEM解析例

(1) 解析課題

仮想断面を用いて、通常の設計に用いられる地すべり対策工の設計諸量と、FEM解析から得られる変位・力といった解析諸量との対応関係についてみていきたい。

図-1のような斜面（斜面長50m、平均傾斜角26°、最大移動層厚10m）における杭工を計画する（FEM解析との比較に主眼をおくため横断方向の杭間隔を1.0m固定とする）。図に示す位置にくさび杭、補強杭、抑え杭をそれぞれ設計し、FEM解析との比較をおこなった。なお、初期安全率は地下水排除工実施後の斜面安全率とし、1.05とする。

(2) 各種杭工の設計

各種杭工のたわみ、曲げモーメント、せん断力の計算を以下の手順で行った。

- 1) 最初に、地下水排除工実施段階における安全率1.05で逆算により粘着力を求めた。安定解析には非円弧すべり断面用の安定解析式である簡易Janbu法を採用した。
- 2) 初期安全率1.05，目標（達成）安全率を1.20（15%増）として、くさび杭による設計をおこない杭規格を調整した。

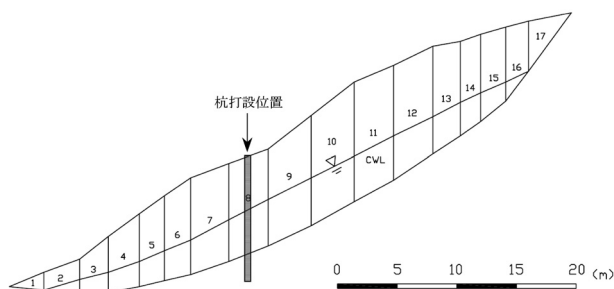


図-1 解析斜面とスライス分割

- 3) 次に、同規格の杭、同じ杭間隔1.0mで補強杭、抑え杭の設計を行った。このとき達成安全率はそれぞれ1.38 (33%増)、1.08 (3%増) であった。また負担推力 H_u はくさび杭353kN、補強杭793kN、抑え杭66kNとなった。各種杭工の設計諸量を表-1に示す。
- 4) 最後に同様の杭規格でFEM解析をおこない、杭のたわみ、曲げモーメント、せん断力を調べた。
- (3) **FEM解析条件**

解析領域は図-2に示すメッシュで表現した。解析条件、その他諸元を以下に示す。

表-1 各種杭工設計諸量

共通項目	杭規格	D300・t16.5	(SCW490CF同等)
	杭剛性 EI	29,628	[kNm ²]
	杭断面係数 Z	987.6	[cm ³]
	杭断面積 A	146.96	[cm ²]
	初期安全率	1.05	
	横断方向杭間隔	1.0	[m]
	接線力総和 ΣT	2,988	[kN]
	すべり面傾斜角 α	21.5	[°]
	すべり面深度 h	8.15	[m]
くさび杭	負担水平推力 H_u	353	[kN]
	達成安全率	1.20	
	杭の根入長 l_r	3.85	[m]
	杭の全長 l_p	12.00	[m]
	移動層の受動土圧 Q_{p1}	1,487	[kN]
	基岩層の受動土圧 Q_{p2}	6,612	[kN]
補強杭	負担水平推力 H_u	793	[kN]
	達成安全率	1.38	
	杭の根入長 l_r	3.35	[m]
	杭の全長 l_p	11.50	[m]
	移動層の受動土圧 Q_{p1}	-	[kN]
	基岩層の受動土圧 Q_{p2}	-	[kN]
抑え杭	負担水平推力 H_u	66	[kN]
	達成安全率	1.08	
	杭の根入長 l_r	4.35	[m]
	杭の全長 l_p	12.50	[m]
	移動層の受動土圧 Q_{p1}	1,487	[kN]
	基岩層の受動土圧 Q_{p2}	7,513	[kN]

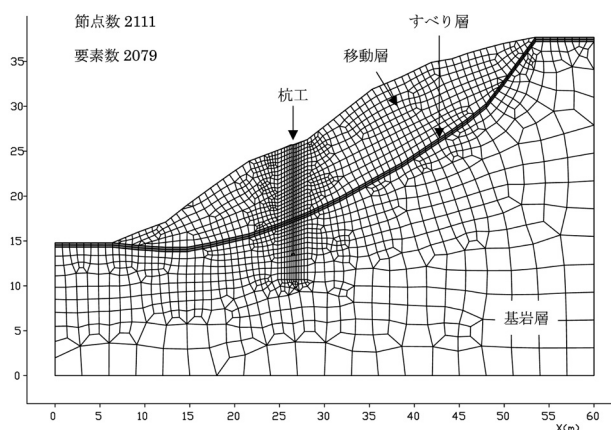


図-2 メッシュ分割 (杭打設時)

- 1) 解析手法：二次元鉛直断面の弾塑性有限要素法を用いる。
- 2) 解析領域の設定：解析範囲の左右及び底部境界は、すべりに影響を与えないように十分広い範囲とする。
- 3) 杭体：杭体をFEMで取り扱う場合、梁要素もしくはソリッド要素（三次元）を用いるのが通例である。本稿では、二次元解析であり梁要素を採用している。なお、ソリッド要素は三次元解析のみ取扱い可能である。

断面力の検討においては、梁要素は杭諸元をそのまま設定可能（それを主目的とした要素）であるが、ソリッド要素は断面力の別途換算を要する。一方で、杭体と地盤の接触に関して、梁要素単体では接触面の概念を持ち得ないのに対し、ソリッド要素は接触面の力学的取り扱いが可能である。

- 4) 杭体と地盤の接触面：杭型ジョイント要素を用いて杭-地盤間の接触面を考慮した。杭型ジョイント要素とは通常の面型（線型）ジョイント要素と異なり、ジョイント節点の片組みは、地盤をあらわす平面ひずみ要素と節点を共有せず、杭を表現する梁要素とのみ節点を共有する。いいかえれば、杭は地盤と直接に節点を共有しない。

なお、ジョイントの設定値はグラウトの付着強度を見込んで、移動層で100kPa、基岩層では500kPaのせん断強度とした。

- 5) 二次元・三次元解析：杭の解析において次元数の差異が顕著となる項目は、杭-地盤の接触面と杭打設間隔である。

厳密に杭-地盤の接触面を考慮するには、三次元解析で杭をソリッド要素で表現する（物理的な杭径を有する要素をモデル内に構築する）のがもっとも素直な方法と思われる。梁要素で接触面を評価するには、4)で触れたように杭型ジョイント要素を媒介とする等の工夫が必要となる。

また、二次元解析では杭の横断方向打設間隔にあわせて、奥行き単位長1.0mに適合するよう杭剛性または地盤物性の等価置換が必要となる点にも留意されたい (Wakai et al., 1997)。今回は、打設間隔を1.0mとしており、とくに等価置換はおこなっていない。三次元解析では、打設間隔に応じたメッシュ構築とすればよい。

- 6) すべり面（層）：すべりの表現には本来、面型ジョイント要素が最適だが、ジョイントと梁の交差（すべり面と杭の交差）の取り扱いがやや煩雑であることや、ジョイントの代わりに引張抵抗が限りなくゼロに近くかつ破壊しない平面要素としても解析結果には影響を与えないことから、すべり現象を適切に再現するためジョイント要素ではなく平面要素とした。ただし、冠頭部すべり面位置にのみ、ジョイント要素を設定し、開口亀裂を再現するようにした。

- 7) 外力：FEM解析では、対象領域に自重や分布荷重・点荷重・強制変位など外力を与える必要がある。地すべり現象もなんらかの外力を付加することで再現される。既往の解析事例では、水位上昇に伴う間隙水圧を外力として与える方法（吉松1983, 石井ら2004）や、すべり層を挟む上下層に強制（相対）変位を与える方法（鵜飼・蔡, 2001）がある。間隙水圧を外力として与える方法は、地盤の初期応力状態によっては、単なる弾性領域の除荷にとどまり、想定するすべりをうまく再現できない場合がある。また、強制変位を与える方法は、今回のような斜面全体を対象とする場合、その設定が難しい。本稿ではすべりを発生させる外力は自重のみとし、単純に応力ゼロの状態から、10～20ステップで段階的に土塊に自重を加え、変位・応力および杭体の挙動を計算した。
- 8) 物性値：平面要素である移動層、基岩層、すべり層と梁要素である杭体の物性値一覧を表-2に示す。表中の変形係数はくさび杭の設計において参照（道路橋示方書, 2002）されたものである。基本的に、地盤の弾性（変形）係数など、通常設計時に使用し

たものを採用し、ポアソン比など他の値も、想定したN値（移動層15, 基岩層115）から想定される一般値を採用している。物性値の一般値は既報（山崎・山田, 2004）も参照されたい。なお、すべり層の変形係数の設定は任意であり、かつ非常に重要なパラメータの一つであることから、ここではcase1（=6000kN/m²）、case2（=2000kN/m²）の2通りを設定した。

(4) 杭の挙動に関する考察

図-3は、FEM解析結果4パターン（case1, case2が弾性・弾塑性の組合わせ）と通常設計のくさび杭、補強杭、抑え杭の合計7パターンについて杭のたわみ、曲げモーメント、せん断力を比較したものである。弾性解析と比較して弾塑性解析のたわみ増分が塑性変形分である。塑性域の分布をみると杭上流側移動層で杭の変形が大きくそれに土塊が追従する形で塑性変形によるせん断破壊が生じていた。

杭のたわみは、くさび杭が、FEM解析のcase1（すべり層の変形係数6000kN/m²）とcase2（2000kN/m²）の中間の値をとり、補強杭よりも大きな値を示す。くさび杭ではすべり面に大きな地すべり推力を作用させてい

表-2 FEM解析における物性値一覧

			基岩層	移動層	すべり面
平面ひずみ要素	弾性係数 E	[kN/m ²]	217,000	23,000	6,000(case1) 2,000(case2)
	ポアソン比 ν	[-]	0.35	0.40	0.45
	粘着力 c	[kN/m ²]	800	50	10.7
	内部摩擦角 ϕ	[°]	35	30	25
	単位体積重量 γ	[kN/m ³]	23.9	19	18
	ひずみ硬化率 H'	[kN/m ²]	0	0	0
	引張強度 σ_{tf}	[kN/m ²]	800	200	100
梁要素	ヤング率 E	[kN/m ²]	2.0E+08		
	断面二次モーメント I_z	[m ⁴]	1.4814E-04		
	断面積 A	[m ²]	1.4696E-02		

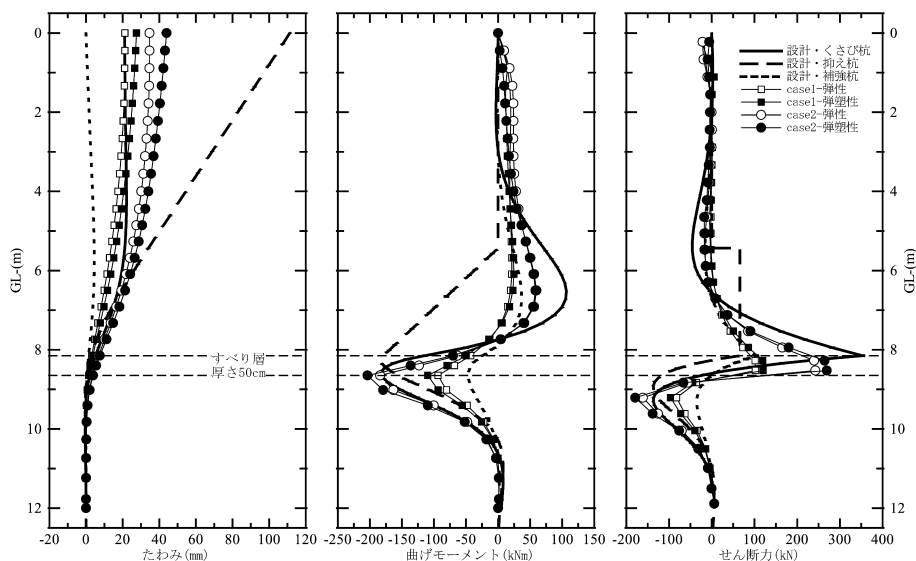


図-3 各種杭工のたわみ・曲げモーメント・せん断力

る点、補強杭では三角形分布の地すべり土圧を作用させ弾性的な杭の変位を対象としている点から、この結果はうなずける。その意味ではFEM解析結果はくさび杭の設計値にだいぶ近い結果となっている。なおcase 2の弾塑性杭のたわみはくさび杭の2倍に達する。この傾向は、鵜飼・蔡（2001）が、現行設計法は杭頭変位を過小評価するとの指摘と合致する。

杭の曲げモーメントをみると、すべり面より上のピークは補強杭がcase 1とcase 2の中間に位置し、すべり面より下の負のピークはくさび杭がcase 2の値に近い。設計値でみるとFEM解析結果はすべり面に大きな地すべり推力を作用させているくさび杭の値に近いが、これは、FEMではすべり層の変形係数を移動層よりも小さく設定しているためと考えられる。なお補強杭では移動層の他に直接すべり層を設定する概念がなく、すべり面強度定数を踏まえた安定解析より得られる杭負担荷重を与えて設計することで対応している。

杭のせん断力は、すべり面より上の正のピーク値をみると、変形係数がcase 1の場合、補強杭に近い値となり、case 2の場合くさび杭の値に近い。またすべり面より下の負のピークはcase 1とcase 2の間のときくさび杭の値に近い。

抑え杭では移動層の地盤反力が期待できないため、くさび杭の5倍強のたわみが発生しているが、基岩層ではくさび杭の曲げモーメントやせん断力に近い値となっている。これはすべり面より下の杭の設計式がくさび杭と抑え杭では作用位置が異なる（抑え杭では地すべり推力をすべり面からすべり面深度の1/3の位置に作用させる）ものの、地すべり推力が集中荷重である点で基本的に同じ設計式を用いているためと考えられる。

(5) FEM解析と通常設計

FEM解析は非常に自由度の高い力学モデルであり、移動層、基岩層、すべり層の地盤定数等、パラメータの設定は任意である。たとえば、FEM解析で抑え杭を表現する場合、極端には杭下流側移動層を完全に除去した検討も可能である。ほかにもFEMの利用法として、たわみが大きいとき、移動層に形成される塑性域の影響などより突っ込んだ検討が可能となる。

今回は、移動層・基岩層に通常設計で算定されるN値を基にした物性値を与え、杭の挙動をFEMで表現した。また、ボーリング孔を利用した水平載荷試験等で各層の変形係数を取得すれば、合理的に杭の変形挙動を表現することができる。すべり層に適切な変形係数を与える必要は残されるが、これも、最大曲げモーメントおよび最大せん断力（あるいは負担推力）が合致するように、すべり層の変形係数を調整することで、くさび杭または補強杭に近い杭の挙動が再現される。

くさび杭、補強杭、抑止杭はいずれも作用外力の分布

型、杭谷側の有効抵抗力、地すべり活動状況の違いが反映された設計式である。これに対し、現地調査を踏まえたFEM解析を実施し、地盤挙動を事前に把握することで、杭の設計式選定時には有力なツールとして活用することができるであろう。

4.2.4 おわりに

地すべり抑止工の代表例である杭工についてFEM解析を行い、その適用例を示した。FEM解析から得られる成果としては、設計実務の中でいまだ見過ごされたものが、FEMを通して浮かび上がってくる部分があり、今後より解析事例を積み重ねる中で、FEMという力学モデルと各種設計法の対応が明確になってくるものと考ええる。

一方で、地すべり抑止杭工については設計式・解析モデルとも、まだ完成された段階にあるとはいえず、特に解析モデルの取扱いは標準と呼べるものがなく、専門家の中でも合意または総意が形成されていない事項が多い。

本稿では、比較的取扱いの容易な二次元解析を実施したが、本来地盤反力を力学モデルで表現するには、杭ー地盤の接触面を三次元的に表現する必要がある。二次元解析は奥行き単位長であり、接触面を直接表現することはできない。とはいえ、三次元解析は高度の技術と手間を要するのも事実である。したがって、解析の内容により、二次元で検討してよいもの、三次元で取扱う必要があるもの、そうした内容の切分けも重要となってくる。

現在は、三次元FEM解析のツールも市販されており、三次元解析の使用頻度は今後ますます高まるであろう。地すべり抑止杭に関するさまざまな理論・課題に対し、FEM解析を駆使することで研究・開発が進展し、抑止杭工法の発展・改良に反映されることを期待したい。

参考文献

- 石井靖雄・藤澤和範・西本晴男・倉岡千郎・太田敬一（2004）：有限要素法解析によるくさび杭の設計式の適用範囲の検討，第43回日本地すべり学会研究発表会講演集，平成16年9月，pp. 423-424.
- 日本道路協会（2002）：「道路橋示方書（I共通編・IV下部構造編）・同解説」，平成14年3月，pp. 253-257.
- 日本地すべり学会（2003）：「新版地すべり鋼管杭設計要領」，地すべり対策技術協会，pp. 215.
- 鵜飼恵三・蔡飛（2001）：地すべり抑止杭の解析－現行設計法と弾塑性FEMの比較，地すべり，Vol. 38，No. 2，pp. 19-24.
- Akihiko Wakai, Keizo Ugai, Tetsuo Matsuda and Shingo Gose（1997）：Analyses of lateral displacement of a pile supported abutment constructed in a soft subsoil profile, Soils and Foundations, Vol. 37, No. 4, pp. 65-76.
- 山崎孝成，山田正雄（2004）：講座「地すべり解析における有限要素法の利用第8回 2. FEMによる地すべり解析の基礎理論」，地すべり，Vol. 41，No. 1，pp. 74-77.
- 吉松弘行（1983）：有限要素法による地すべり斜面の安定解析について，地すべり，Vol. 20，No. 1，pp. 1-9.

（原稿受付2004年11月26日，原稿受理2005年1月6日）