

3次元FEM解析による地すべり抑止杭工の設計方法

田中 尚* 藤澤和範** 藤平 大*** 石井靖雄****

1. はじめに

地すべり災害を防止する地すべり抑止杭工は、地すべりの主測線などの2次元断面を用いて極限平衡法から求まる地すべり抑止力を満足するように設計され、それを横断方向に展開して配置することが一般的である。しかしながら、地すべり土塊の厚さは横断方向に一樣とは限らないため、この方法では地すべり土塊が薄くなる側部などにおいて過大設計となる可能性がある。そこで、従来の2次元での設計方法を3次元に発展させ、3次元極限平衡法による設計を考えることができる。極限平衡法は地すべり土塊を変形しない剛体とみなし、地すべり滑動力とすべり面の抵抗力及び抑止工の抵抗力の釣合いにより斜面の安定性を求める方法である。しかしながら、実際には地すべり土塊と杭工の相互作用によって杭の変形モードと抑止機能(杭形式)が変化するため、より合理的な設計とするためには、それらを考慮できる設計方法が必要と考えられる。

そこで、筆者らは地すべり土塊と杭の相互作用による変形を考慮できる3次元FEM解析を用い、地すべり抑止杭工の設計方法を検討した。本報文では、その一連の設計手順について述べる。

2. 検討した地すべりの概要

検討は宮崎県荒平地すべりを対象に行った。荒平地すべりは、1999年7月～8月の台風等の豪雨を誘因として図-1及び図-2に示す幅約120m、長さ約170m、最大層厚19mの範囲が滑動した。地すべり土塊は強風化～風化(D級～CL級)の千枚岩からなり、すべり面形状は椅子型を呈す。翌年、対策工として集水井工と図中に示す諸元の杭工が施工された。

3. 設計条件

3次元FEM解析を用いた杭工の設計を行うための設計条件を以下に示す。なお、設計条件は既往の調査結果から設定しているが、3次元的なすべ

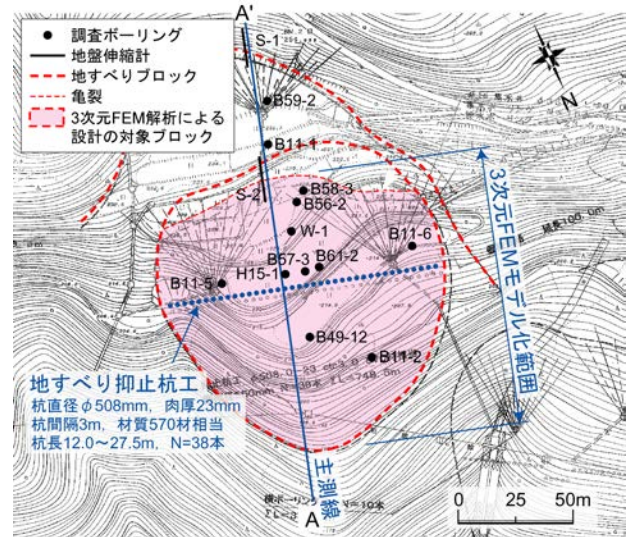


図-1 荒平地すべりの概要

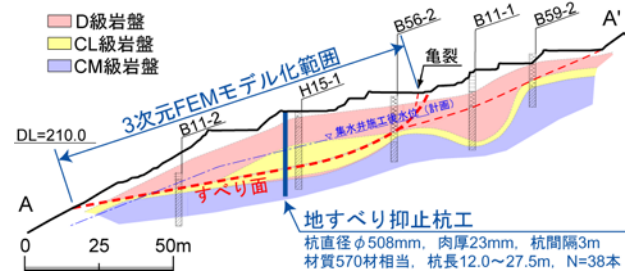


図-2 荒平地すべりの主測線断面

り面形状や地下水位分布、地盤の物性値の設定にあたってデータの少ない位置については仮定した。

設計の対象にした地すべりブロックは、図-1(図中、赤色で示す範囲)及び図-2に示す幅約120m、長さ約120mの範囲である。斜面の安全率及び地すべりの必要抑止力は、集水井工による地下水位低下を図った状態を安全率1.045とし、この状態から安全率1.15まで向上させるための必要抑止力を杭工で負担することとした。地下水位の分布は、ボーリング孔の水位観測結果をもとに主測線(A-A')断面の地下水位を想定し、それをもとに3次元分布を設定した。すべり面形状は、地すべり地内で実施された調査ボーリングの結果をもとに3次元形状を想定した。地すべり土塊及び基盤の物性値は、調査ボーリングで実施した標準貫入試験や孔内水平載荷試験の結果及び3次元FEM解析による荒平地すべりの再現解析を実施

した結果^{1), 2)}から設定した(表-1)。

表-1 解析モデルの要素タイプ、構成則、物性値

項目	要素タイプ	構成則	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ヤング率 E (kN/m ²)	ポアソン比	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
地すべり土塊	ソリッド	弾性体	18.0	46,960	0.3	—	—
基盤	ソリッド	弾性体	18.0	45,870	0.3	—	—
すべり面	ジョイント	粘弾塑性体	—	—	—	19.0	12.17
杭	梁	弾性体	—	2.0×10^8	—	—	—

4. 解析モデル

図-3及び図-4に荒平地すべりの3次

元FEM解析モデルを示す。モデルは、地すべり土塊、基盤、すべり面及び杭工からなり、それぞれの要素タイプと構成則及び物性値を表-1に示す。なお、すべり面強度は、地すべり最大層厚より粘着力19kN/m²とし、地すべりが発生した時の安全率を1.00として、3次元FEMモデルより逆算にて内部摩擦角12.17°を求めた²⁾。

5. 3次元FEM解析による地すべり抑止杭工の設計手順

3次元FEM解析による杭工の設計手順について図-5に示す。本項では、各項目の概要と荒平地すべりでの検討結果を示す。

5.1 既往設計手法による概略設計

3次元FEM解析を用いて杭工を設計する場合、

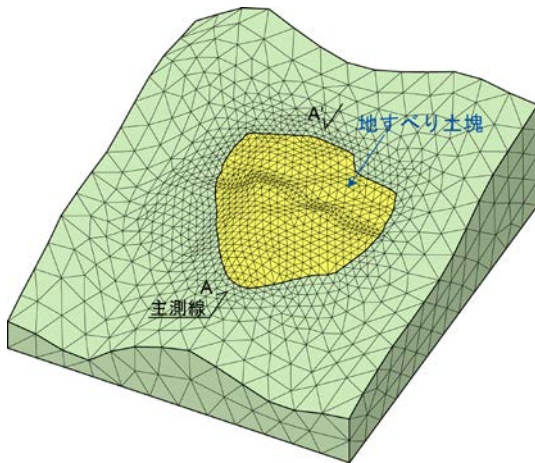


図-3 荒平地すべりの地表面FEMメッシュ

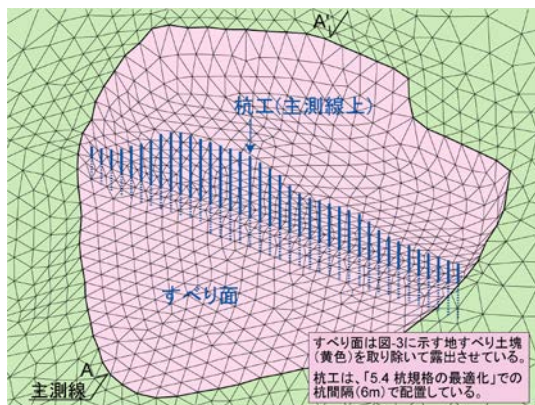


図-4 荒平地すべりのすべり面FEMメッシュ

初めに目安となる杭諸元を見いだすために既往の設計要領³⁾を用いた2次元断面での設計を行う。

本検討では斜面安定計算より求められた必要抑止力668.8kN/mに対してくさび杭の設計を行い、杭諸元(杭間隔3m, 杭直径500mm, 肉厚13mm, N=38本)を仮決定した(以下、「概略設計①」という)。なお、杭間隔は、設計要領³⁾に基づき地すべり土塊の層厚19mに対する標準杭間隔とした。また杭材は引張強さ570N/mm²以上の鋼材とし、以下の検討も同様である。

5.2 杭間隔の検討

設計要領³⁾では、杭間隔について地すべり土塊の層厚に応じた標準杭間隔以下とするよう示されている。これに対して筆者らは、より合理的な設計のために杭形式や地すべり土塊の強度に応じた杭間隔の設定方法について検討してきた⁴⁾。本検討では、これらの結果を用いて杭間隔を決定する。

荒平地すべりにおける杭工の設計では、前述したようにくさび杭の設計を進めている。筆者らの検討によれば、くさび杭の条件では中抜けは発生せず、設計要領³⁾の標準杭間隔よりも杭間隔を広げることが可能であるとしている⁴⁾。そこで、杭間隔を決定するその他の要因、すなわち杭の許容応力値と地盤の受動破壊の有無から杭間隔を決定した。なお、それらの計算は既往設計手法のくさび杭の設計式を用い、杭直径を500mmとして杭間隔と肉厚をパラメーターとして検討した。肉厚については、設計要領³⁾に示されている最大規格(肉厚40mm)までとした。

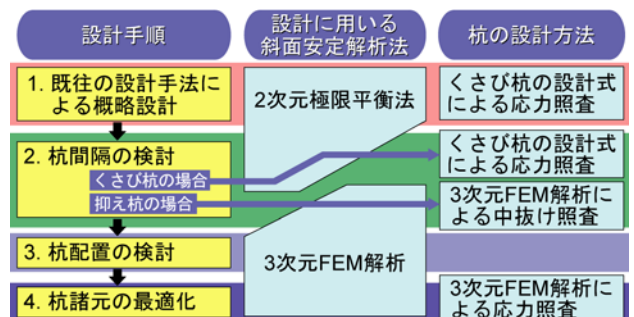


図-5 3次元FEM解析による杭工の設計手順

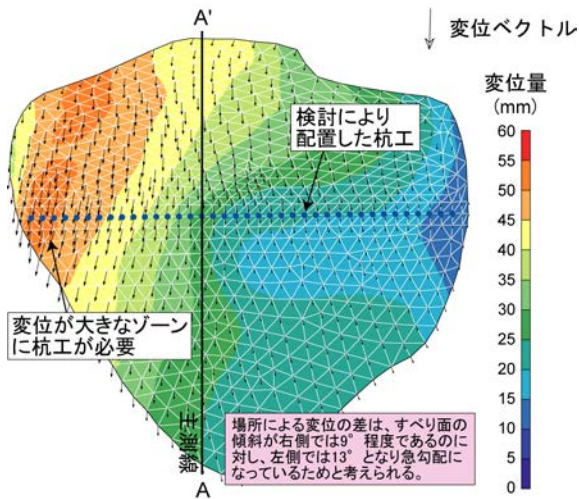


図-6 すべり面における地すべり変位分布

その結果、最大肉厚40mmを用いても杭間隔が7m以上になると杭の曲げ応力が許容値を超えてしまい不適切となる(表-2)。したがって、杭諸元を杭間隔6m、杭直径500mm、肉厚38mm、N=19本とした(以下、「概略設計②という」)。

5.3 杭配置の検討

次に地すべりの有効抵抗力分布や滑動状況(変位分布)、地形、施工条件などを考慮して、杭工をどのように地すべり地内に配置(縦断方向のどの位置に、横断方向にどのように配列)させるかを検討する。

荒平地すべりでは、3次元FEM解析モデルを用いて杭がない時のすべり面における地すべり変位

分布(図-6)を求めて検討した。図-6を見ると、すべり面左側に変位の大きな範囲がある。このことから、この範囲を含めて杭工を配置することが地すべり抑止に効果的であると考えられることから、この範囲に杭工が配置されるように縦断方向の位置を決めた。また現地の施工条件を考慮して、横断方向には直線の配列を計画した(図-6)。なお、有効抵抗力分布の検討から、配置位置がくさび杭の条件であることを確認している。

5.4 杭規格の最適化

前項までに杭の間隔と配置が決定した。また、杭諸元については、「5.1 既往設計手法による概略設計」から概略設計①が、「5.2 杭間隔の検討」から概略設計②が得られた。ここでは、3次元FEM解析モデルに杭工を設定し、FEM解析上で杭に作用する曲げ応力やせん断応力を確認して杭諸元を最適化する。

解析は、まず杭を設定せずに初期応力状態を再現する。次に杭を梁要素で設定し、せん断強度低減法⁵⁾を用いてすべり面の強度定数を計画安全率1.15で除して低下させ、地すべりを発生させる。この時の杭に発生する曲げ応力とせん断応力が杭の許容値を超えないような杭の肉厚を求める。

5.4.1 既往設計手法による概略設計の照査

既往の設計手法により概略設計された概略設計①及び概略設計②の曲げ応力とせん断応力を図-7に示す(図中●及び●)。曲げ応力、せん断応力

ともに地すべりの左側で大きな値を示すが、いずれも許容応力値に対してゆとりがあり、杭間隔を広げる、あるいは肉厚を薄くするなど杭諸元を低減することが可能である。なお、曲げ応力及びせん断応力の不均一さは、図-6に示した地すべりの変位分布や地すべり層厚の影響である。

表-2 応力度及び受働土圧の照査

杭間隔 (m)	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	最大モーメント (kN・m)	③杭1本あたりの水平負担力 (kN/本)	①曲げ 応力度 (N/mm ²)	②せん断 応力度 (N/mm ²)	必要 根入れ長 (m)	杭長 (m)	受働土圧 (kN)
4 OK	500	20	1292.3	2675.2	371.4	177.4	7.1	25.5	7161.0
5 OK	500	28	1748.6	3344.0	376.8	161.1	7.7	26.0	7161.0
6 OK	500	38	2244.9	4012.8	378.8	145.5	8.2	26.5	7161.0
7 NG	500	40	2647.5	4681.6	429.7 NG	162.0	8.3	26.5	7161.0
8 NG	500	40	3025.7	5350.4	491.0 NG	185.1	8.3	26.5	7161.0
9 NG	500	40	3404.0	6019.2	552.4 NG	208.3	8.3	26.5	7161.0
10 NG	500	40	3822.2	6688.0	613.8 NG	231.4 NG	8.3	26.5	7161.0
11 NG	500	40	4160.4	7356.8 NG	675.2 NG	254.5 NG	8.3	26.5	7161.0

※ 採用した杭諸元 (概略設計②)

【判定】

- ①曲げ応力度 ≤ 許容曲げ応力度 (380N/mm²)
- ②せん断応力度 ≤ 許容せん断応力度 (220N/mm²)
- ③杭1本あたりの水平負担力 ≤ 受働土圧

表-3 検討した杭諸元と概算工事費の比較

設計手法	杭 諸 元					杭1本あたりの概算工事費 ^{※1}			杭全本数の概算工事費 ^{※1, ※2}			
	杭間隔	杭外径	肉厚	杭長	本数	施工費	杭材費	合計	施工費	杭材費	合計	比率
既往設計手法 (概略設計①)	3	500	13	24.5	38	1,599	551	2,150	45,891	15,814	61,705	100.0
既往設計手法 (概略設計②)	6	500	38	26.5	19	2,041	1,104	3,145	29,281	15,842	45,124	73.1
3次元FEM解析	6	500	16	25.0	19	1,757	697	2,454	25,213	10,002	35,215	57.1

※1 概算工事費の単位は千円

※2 杭全本数の概算工事費は、地すべり側部において杭長が短くなることを考慮して算出

5.4.2 杭諸元の最適化

前項の通り、概略設計された肉厚など杭諸元は低減できることが示された。そこで、ここでは杭間隔6m、杭径500mmとして、肉厚を薄くしていき、許容応力値内に収まる杭諸元を検討した。

はじめに肉厚13mmとしたが、せん断応力が許容応力値を超えたため低減させ過ぎた結果となった(図-7、図中▲)。次に、肉厚16mmとしたところ、せん断応力が許容応力値内に収まることを確認した(図-7、図中●)。以上の結果から、曲げ応力、せん断応力ともに許容応力値を超えない杭諸元(杭間隔6m、杭直径500mm、肉厚16mm、N=19)が求められた。

5.4.3 概算工事費の比較

3次元FEM解析で設計した杭工のコスト低減効果を検証するため、既往設計手法(概略設計①)と3次元FEM解析による設計手法の概算工事費を算出し、比較を行った。

その結果、本検討の条件においては、表-3に示すように、3次元FEM解析では杭長や肉厚が大きくなるために杭1本あたりの工事費は高くなるが、本数が半減したことによって杭全本数での工事費は4割強の低減効果が見込まれることが分かった。

6. まとめ

本報文では、3次元FEM解析を用いた地すべり抑止杭工の設計方法及び手順について述べてきた。その結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 3次元FEM解析では、杭1本毎の応力度を照査することが可能なため、負荷力を考慮して杭諸元の低減を図ることができる。

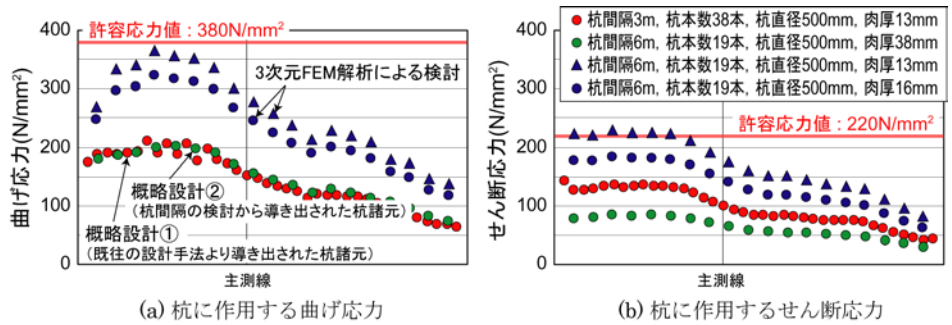


図-7 杭に作用する応力の照査

- (2) 本検討の条件においては、3次元FEM解析を用いた杭工の設計により4割強の工事費低減が見込まれる。

今後は、これらの研究成果を土木研究所資料としてまとめるとともに、本手法を用いた設計を実現場で行い、その適用性について検証して行きたいと考えている。なお、3次元FEM解析を用いた設計手法については、地すべり形状の3次元効果や安全率の考え方など今までの2次元での設計方法と異なる点や、3次元モデルの簡易な作成方法の開発などの課題が残されており、これらについては、今後とも取組んで行きたい。

参考文献

- 1) 石井靖雄・藤澤和範・中島祐一・倉岡千郎：地下水水位の上昇による再活動型地すべりのFEM解析モデルと杭のFEM再現解析，日本地すべり学会誌，Vol.43，No.2，pp.1-9，2006
- 2) 石井靖雄・田中尚・藤澤和範・倉岡千郎・中島祐一：3次元FEM解析による地すべり抑止杭工の再現解析，第45回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.325-328，2006
- 3) (社)地すべり対策技術協会：地すべり鋼管杭設計要領，2003
- 4) 田中尚・藤澤和範・藤平大・石井靖雄：地すべり抑止杭工の杭間隔の新しい決定方法，土木技術資料，Vol.50，No.3，pp.18-23，2008
- 5) 鵜飼恵三：安定解析におけるせん断強度低減法の有用性，土と基礎，Vol.38-1，pp.67-71，1990

田中 尚*



日特建設(株)技術本部主任
(前独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管理
研究グループ地すべりチ
ーム交流研究員)
Hisashi TANAKA

藤澤和範**



独立行政法人土木研究所つ
くば中央研究所土砂管理研
究グループ地すべりチ
ーム
上席研究員
Kazunori FUJISAWA

藤平 大***



国土交通省大臣官房監察官
室監察官(前独立行政法人
土木研究所つくば中央研
究所土砂管理研究グループ
地すべりチ
ーム主任研究員)
Masaru TOUHEI

石井靖雄****



国土交通省中部地方整備局
富士砂防事務所長(前独立
行政法人土木研究所土砂
管理研究グループ地すべ
りチ
ーム主任研究員)
Yasuo ISHII