

小特集：災害に備えて

地すべり抑止杭工の杭間隔の新しい決定方法

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ために、抑制工や抑止工を行う。抑制工とは、地すべり発生の誘因を排除する方法で、地下水排除工や地表面排水工などが代表的な工法である。一方、抑止工は剛な構造物によって地すべり滑動を止めようとするもので、杭工やアンカー工といった工法が行われる。

各工法において適切な設計を行うための技術基準などが整備されているが、FEM解析などの数値解析を用いた検討により、より合理的な設計手法の検討が、昨今行われている。本報文では、杭工の設置間隔(図-1、以下、「杭間隔」という)の決定方法について検討した結果を報告する。

2. 課題と研究内容

杭工の杭間隔は従来、地すべり層厚毎に定められた標準杭間隔(表-1)、もしくは最大でも杭直径(D)の8倍(8D)以内として設定されている。これらは杭の間から地すべり土塊がすり抜ける中抜け現象を起こさず、また杭に所定の地すべり抑止力を発揮させるための間隔として、これまでの経験や実験から定められている¹⁾。しかしながら、これまでの実験は地すべりを1G場(G:重力加速度)において模擬した縮小模型実験であるため、杭や地すべり土塊の応力状態が実際のスケールの地すべりとは異なることが課題と

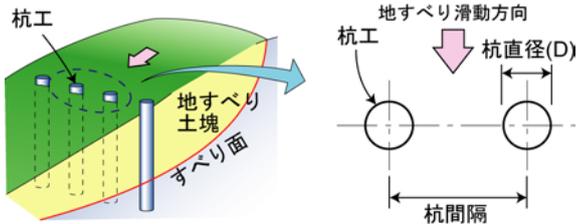


図-1 杭工の設置間隔(杭間隔)

表-1 地すべり層厚と標準杭間隔¹⁾

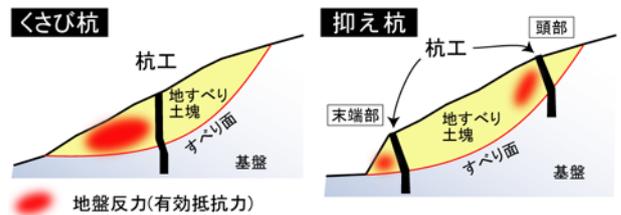
地すべり層厚 (m)	標準杭間隔 (m)
~10	2.0以下
10~20	3.0以下
20以上	4.0以下

して挙げられる。

また、現在の杭工の設計においては、杭谷側の地すべり土塊に期待される地盤反力(有効抵抗力)の大きさによって抑え杭やくさび杭(図-2)の杭形式を選定して設計しているが、杭周辺に作用する地盤反力などの応力状態が変化するのであれば設計に用いる杭間隔も異なってくると考えられる。しかしながら、既往の設計要領¹⁾では、杭形式を考慮した杭間隔の設定方法については記載されていない。

そこで、筆者らは杭形式を考慮したうえで杭間隔を設定する手法を検討すべく、はじめに杭谷側に地すべり土塊がなく中抜け発生に関して厳しい条件と考えられる抑え杭の条件について、杭や地すべり土塊の応力状態をより現実に近い状態に再現できる遠心載荷模型実験を行い、杭間隔と地すべり土塊の物性値が杭周辺地盤に与える影響を検討した^{2), 3)}。その結果、実験における中抜け現象は、図-3に示すような杭間を超える地盤の破壊として現れ、それは地すべり土塊の強度が小さいほど、また杭間隔が広いほど発生しやすいことを明らかにした。

本報文では、この実験結果を用いて構築した



杭谷側の地すべり土塊に地盤反力が期待できる。地すべり土塊と一体となって移動した杭がすべり面の上下でたわむように変形する。

杭を地すべり末端部や頭部に設置した場合、杭谷側の地すべり土塊に地盤反力が期待できない。杭が片持ち梁のように変形する。

図-2 くさび杭と抑え杭

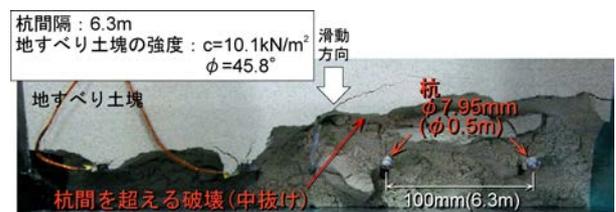


図-3 遠心載荷模型実験における中抜け現象

中抜け現象を表現できるFEM解析モデルを用い、6杭間隔や地すべり土塊の物性値が杭周辺地盤の破壊、すなわち中抜け発生に与える影響を検討した結果について報告する。また、大変形の解析が行えるDEM（個別要素法）解析を用いて、中抜けが発生する条件について検討した結果についても報告する。

3. FEM解析による杭間隔の検討

3.1 解析モデル

FEM解析モデルは遠心載荷模型実験の断面形状²⁾を基本に、杭間隔の1/2の領域をモデル化し、杭谷側に地すべり土塊がない抑え杭のモデル1と杭谷側に地すべり土塊があるくさび杭のモデル2を作成した（図-4）。モデルは、杭、地すべり土塊、すべり面からなり、杭は弾性体として扱い、立体を表現するソリッド要素でモデル化した。地すべり土塊とすべり面は弾粘塑性体として扱い、前者をソリッド要素、後者を面を表現するジョイント要素でモデル化した。

解析は地すべり土塊を自重で滑動させ、杭に発生する曲げモーメントや杭周辺地盤に発生する

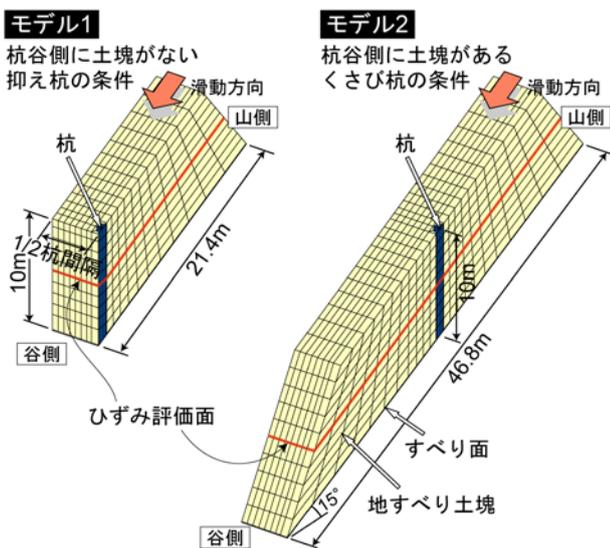


図-4 FEM解析モデル

表-2 解析ケースと物性値

項目		抑え杭(モデル1)	くさび杭(モデル2)
地すべり土塊	単位体積重量 γ (kN/m ³)	18.0	
	変形係数 E (kN/m ²)	50,000	
	粘着力 c (kN/m ²) [*]	10, 15, 20, 50	10, 15, 50
	内部摩擦角 ϕ (°)	30	
	ポアソン比	0.3	
地すべり層厚 (m)		10	
杭間隔 (m) [*]		3, 4, 5, 6, 7, 8, 10	4, 6, 8, 10

※感度解析項目

ひずみの分布や大きさを調べた。

3.2 FEM解析における中抜けの定義

杭工の設計において適切な杭間隔を設定するためには、杭間隔が広過ぎて図-3に示す遠心載荷模型実験のような杭間を超える破壊（中抜け）が生じる杭間隔を明らかにする必要がある。FEM解析を用いて中抜けの検討を行うにあたっては、FEM解析モデルの構築において検討した遠心載荷模型実験の再現解析結果（図-4のモデル1にて検討）から、中抜けの定義としてモデルの断面（図-4、モデル1の右側面）において杭の付け根（杭とすべり面との交点）から山側上方へ向かってひずみの大きなゾーンが発生すること、平面（図-4、モデル1のひずみ評価面）において杭間に杭を端部とする山側に凸なアーチ状のひずみの大きなゾーンが発生することとした³⁾。

3.3 解析ケース

解析ケースは、表-2に示すように地すべり土塊の層厚を10m、変形係数（E）を50,000kN/m²、内部摩擦角（ ϕ ）を30°として、粘着力（c）と杭間隔を変化させたものとした。杭間隔は3m～10mの範囲で変化させた。この時、杭の直径（D）を1mとしてモデル化したため、杭直径に対する杭間隔の比は3D～10Dとなる。

3.4 解析結果

図-5及び図-6にFEM解析モデルの深度5mのすべり面に平行な面（図-4、ひずみ評価面）で発生した最大せん断ひずみの分布を示す。また、図-7に杭間隔中央面（図-4、各モデルの左側面）における最大せん断ひずみの値を示す。

3.4.1 抑え杭の条件

図-5に示す抑え杭の条件（モデル1）では、中抜けの状態と定義したアーチ状の最大せん断ひずみが大きなゾーンが、粘着力（c）が20kN/m²では杭間隔10mで、粘着力（c）が15kN/m²では杭間隔8m以上で発生している。それ未満の杭間隔では、最大せん断ひずみの大きなゾーンは認められない。また、図-7に示すモデル1のケース（図中●）では、最大せん断ひずみがある杭間隔を超えると急激に大きくなる傾向が見られる。ただし、粘着力（c）が50kN/m²では、解析の範囲内では最大せん断ひずみが大きくならなかった。

これらのことから、杭谷側に地すべり土塊がない抑え杭の条件では、杭間隔が広くなると中抜

けが発生し、中抜けが発生しだす杭間隔は地すべり土塊の強度が小さいほど狭いと判断される。

3.4.2 くさび杭の条件

次にくさび杭の条件（モデル2）について図-6を見ると、杭間隔が大きくなっても図-5で見られたようなアーチ状のせん断ひずみが大きなゾーンの発生は認められない。なお、最大せん断ひずみのスケールは、図-5の1/10としていることに注意されたい。また、図-7でもモデル2のケース（図中▲）は杭間隔が広くなくても最大せん断ひずみはほとんど増加していない。

これらのことから、杭谷側に地すべり土塊があるくさび杭の条件では、検討した地すべり土塊の物性値の範囲内ではあるが、地すべり土塊の強

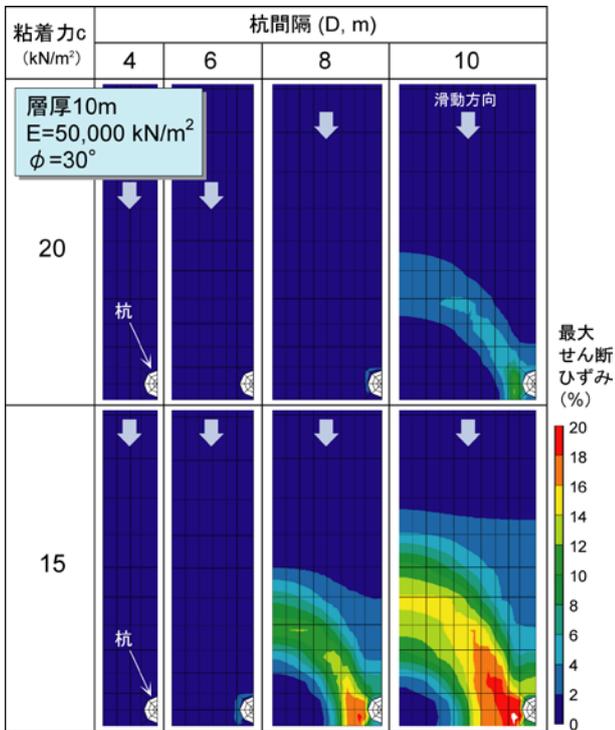


図-5 抑え杭（モデル1）の最大せん断ひずみの分布

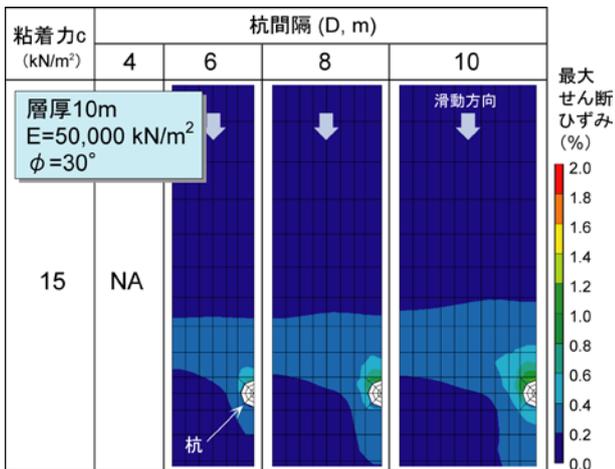


図-6 くさび杭（モデル2）の最大せん断ひずみの分布

度が小さくても中抜けは発生しないと判断される。

3.5 FEM解析の結果から見る中抜け発生条件

前項までの結果から、杭谷側の地すべり土塊の有無、すなわち抑え杭とくさび杭の杭形式の違いによって中抜けの発生状況が異なることが分かった。杭谷側に地すべり土塊がない抑え杭の条件では杭谷側が開放されていることから、地すべり滑動力が杭に作用した時に杭周辺地盤に大きなひずみが発生して地盤が破壊し、中抜けが発生すると考えられる。一方、杭谷側に地すべり土塊がある抑え杭の条件では、杭谷側の地すべり土塊による地盤反力の効果が杭周辺地盤に大きなひずみが発生することを抑制し、中抜けが発生しない状態になっていると考えられる。これらの結果から、杭の間を地すべり土塊が中抜けする現象は抑え杭の条件で発生すると考えられる。

3.6 適切な杭間隔の決定方法

前項までの検討により、抑え杭の条件において中抜けが発生することが示された。では次に、図-7に示された最大せん断ひずみの値によって適切な杭間隔を決定する必要がある。そこで、図-7に併記した遠心載荷模型実験の再現解析³⁾を行った時に求められたFEM解析モデルの最大せん断ひずみ及び文献⁶⁾から調査した地すべり土塊となりうる地盤（粘性土、砂、岩など）が破壊するせん断ひずみレベル（図-8）を使って考察する。

図-7にプロットした遠心載荷模型実験の再現解析結果から、中抜けが発生しなかったケースと中抜けが発生したケース（図中★、杭間隔6.3m）

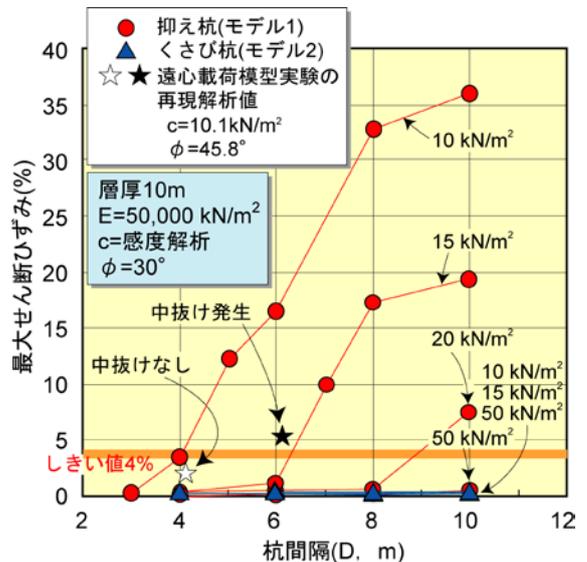


図-7 最大せん断ひずみと杭間隔の関係

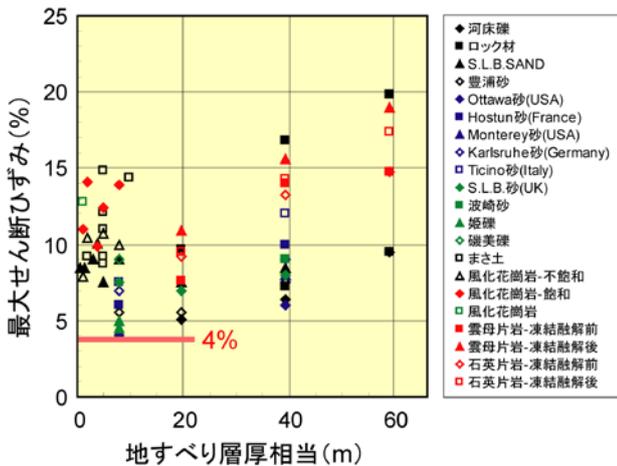


図-8 地盤が破壊する最大せん断ひずみ

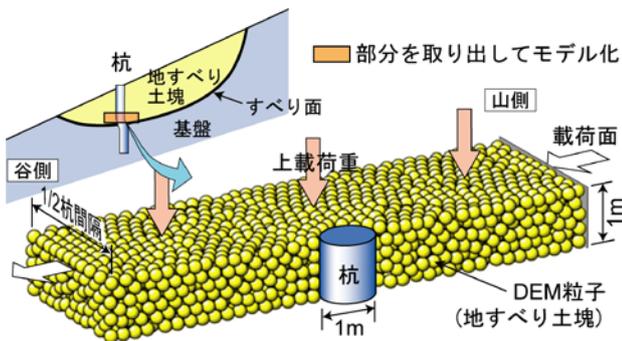


図-9 DEM解析モデル

の最大せん断ひずみ5%を考えると、杭間を超える破壊が生じるしきい値は最大せん断ひずみ2～5%の間と推定される。なお、両ケースの地すべり土塊の物性値は同じである。

次に室内強度試験から求められた地盤が破壊する最大せん断ひずみについて、文献から調査した結果を図-8に示す。なお、グラフの横軸は強度試験の拘束圧を地すべり層厚に換算した値を示している。その結果、最大せん断ひずみが4%を超えると破壊することが分かる。

以上、上記2つの検討結果が示す最大せん断ひずみは整合的であり、最大せん断ひずみが4%以上となった時、杭間隔が広すぎて中抜けが発生する状態になると言える。すなわち最大せん断ひずみ4%は、中抜け発生の有無を判断するしきい値とすることができる。と

言える。そこで、図-7に戻って最大せん断ひずみの値を見たとき、杭谷側に地すべり土塊のない抑え杭の条件では、地すべり土塊の強度（本解析では粘着力）が小さいほど狭い杭間隔でせん断ひずみが大きくなって、しきい値の4%を超えることから、設計においては、これを超えない杭間隔を設定する必要があるということが分かる。なお、既往の

設計要領¹⁾では地すべり層厚が10mの場合では杭間隔2m程度が最大値とされるが、本検討の結果からはそれ以上の杭間隔を設定できることを示している。一方、杭谷側に地すべり土塊のあるくさび杭の条件では、地すべり土塊の強度を変化させ、杭間隔を広げても最大せん断ひずみがほとんど大きくならず、しきい値の4%を超えないことから、中抜けは発生しないといえる。

4. DEM（個別要素法）解析による中抜け現象の再現

FEM解析を用いた杭間隔の検討では、杭谷側に地すべり土塊があるくさび杭の条件で杭間隔を広げても中抜けは生じない結果となった。したがって、地すべり地で杭工を施工する場合、一般的にくさび杭として設計されていることが多いが、そのような地すべり地では中抜けが発生することはないと考えられる。

しかしながら、もし仮にくさび杭の条件で中抜けが発生するとしたら、どのような条件かDEM（個別要素法）解析を用いて検討した。DEM解析は、地盤を小さな球形粒子で表現し、中抜けが生じる地盤の大変形にも対応可能な解析方法である。

4.1 解析モデル

解析モデルは、図-9に示すようにすべり面上部の杭周辺地盤を厚さ1mで取り出し、杭間隔の1/2の領域をモデル化した。モデル化領域の応力状態は、地すべり土塊の層厚相当の上載荷重を作用させることで表した。地すべり土塊は直径20cmの球形粒子の集合体として表現し、その強度はDEM解析による三軸圧縮試験のシミュレーション結果より決定した。モデルの境界条件は、粒子を囲む境界は変形しない剛な面とし、粒子との摩擦はないものとした。すべり面及び側面の位置は固定し、山側の面を載荷面として変位制御によりすべり面に沿って地すべり土塊を谷側に強制変位させた。杭は直径1mの円筒状の剛体とし、粒子と杭の間には摩擦を設けた。

解析は、杭の間から地すべり土塊がすり抜けるように載荷面を強制変位させ、その時の載荷面及び杭に作用する荷重を求めた。

4.2 解析ケース

解析は、地すべり土塊の層厚をFEM解析の時

と同じ10mに設定し、地すべり土塊の粘着力(c)を3.2kN/m²、内部摩擦角(φ)を29.3°、変形係数(E)を38,700kN/m²として、杭間隔を3m(3D)、6m(6D)、8m(8D)と変化させた。

4.3 DEM解析の結果から見る中抜け発生の条件

DEM解析モデルにおける地すべり移動量と地すべり滑動力の関係を見るため、図-10に載荷面の変位と載荷面に作用する荷重の関係を示す。グラフを見ると荷重は載荷面の変位が大きくなるにつれて上昇しているが、変位が30cm程度を超えると頭打ちとなる。この時が杭の間を地すべり土塊がすり抜け、杭が地すべり土塊を抑止することができなくなっている状態、すなわち中抜けが発生している状態である。杭間隔の違いについて見ると、杭間隔が狭いほど載荷面に作用する荷重が大きくなっている。これは、杭間隔が狭いほうがより大きな地すべり滑動力を抑止でき、中抜けが発生しにくいことを示している。この結果は、既往の設計要領¹⁾や前述したFEM解析の結果とも調和的である。

次に載荷面の変位と杭に作用する荷重の関係を図-11に示す。なお、杭に作用する荷重は、杭1本あたりとして1/2領域をモデル化した解析結果の値を2倍している。すると、どの杭間隔でも載

荷面の変位と杭に作用する荷重の関係は類似した結果になった。これは、例えば杭間隔3mでは杭は幅3m分の載荷力を、杭間隔8mでは杭は幅8m分の載荷力を受け持つことから、図-10の結果を杭1本あたりに作用する荷重として計算すると同程度になるということである。この時、モデル化した杭の破壊レベル(1,750kN、杭の直径:1m、鋼管の肉厚:40mmより試算)や前項で示したFEM解析における杭に作用した荷重レベル(400~500kN、モデル2、粘着力10kN/m²、杭間隔6m及び8m)を同図に示すと、杭にかかる荷重はそれらを大きく超えた領域まで上昇し、そこで中抜けの状態となっていることが分かる。この結果から、実際には中抜けが発生する前に杭が破壊してしまうことが伺える。すなわち、杭谷側に地すべり土塊があるくさび杭の条件において、今回の解析ケースの範囲内では、杭が地すべりを抑止している段階ではやはり中抜けは発生しないということを示している。

5. 杭間隔設定手法の提案

前項までの結果より、杭谷側に地すべり土塊がない抑え杭の条件での設計では、地すべり土塊の強度と杭間隔によっては中抜けが発生するため、杭間隔の検討が必要なが示された。一方、杭谷側に地すべり土塊があるくさび杭の条件での設計では、杭工を適用する地すべり土塊の物性値の範囲では中抜けの発生は想定されないことから、杭間隔を左右するそれ以外の検討項目、すなわち杭の許容応力度や地盤の受動破壊などから杭間隔を決定すれば良いことが示された。そこで、以上の結果を踏まえ、杭間隔を設定するための手順を図-12のように提案する。

まず杭間隔を設定するにあたり、中抜けが発生する可能性を、杭谷側に地すべり土塊がない抑え杭の条件と杭谷側に地すべり土塊があるくさび杭の条件として判別する必要がある。その方法としては、現状では既往の設計要領¹⁾に示されている杭谷側地すべり土塊の抵抗力の大きさによって杭形式を判別する有効抵抗力図を用いる。ただし、この時に抑え杭とくさび杭の判断境界付近となる場合は、安全をみて抑え杭として検討を進める必要がある。次に、くさび杭と抑え杭の判別の結果、抑え杭の条件となった場合、既往の設計要領¹⁾の

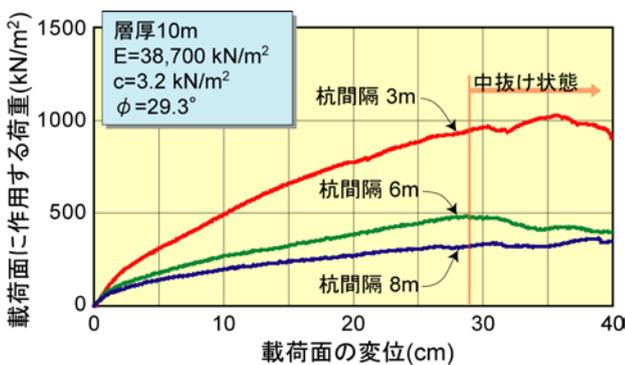


図-10 載荷面の変位と載荷面に作用する荷重

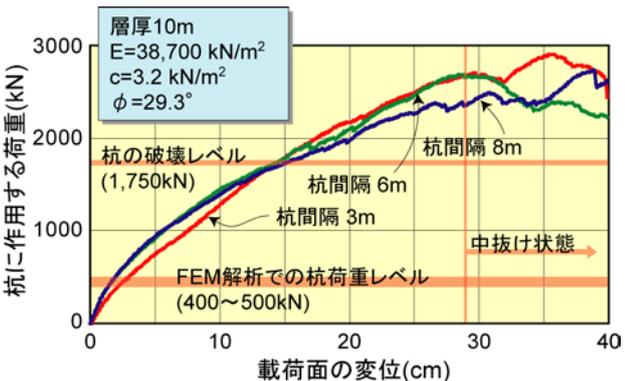


図-11 載荷面の変位と杭に作用する荷重

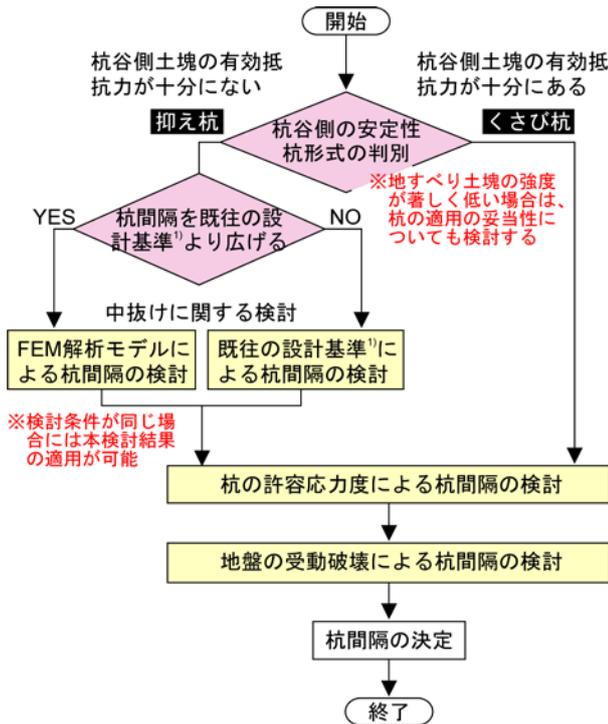


図-12 杭間隔の設定フロー

範囲内で杭間隔を設定する場合は既往の設計要領¹⁾を用い、それよりも広い杭間隔を検討する場合は前述のようにFEM解析を用いた検討にて杭間隔を決定する。その後、決定した杭間隔に対して、杭の許容応力度や地盤の受動破壊に関する確認を行うこととする。一方、くさび杭の条件となった場合には、中抜けは発生しないものとし、杭の許容応力度及び地盤の受動破壊の検討により杭間隔を決定する。その他に、実際には経済性や施工条件などを含めて杭間隔を決定する必要がある。

なお、ここで記述した杭間隔の決定方法を用いて既往の設計要領¹⁾よりも広い杭間隔を設定した場合、杭にひずみゲージを貼付けたり孔内傾斜計やパイプひずみ計を設置して杭の変形をモニタリングするとともに、地すべりの動態観測を行って地すべり抑止杭工の効果を確認する必要がある。

6. まとめ

FEM解析及びDEM解析により杭間隔を検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 杭谷側に地すべり土塊がない抑え杭の条件では、地すべり土塊の強度と杭間隔の関係によって中抜けが発生する可能性がある。
- (2) 杭谷側に地すべり土塊があるくさび杭の条件では、杭工を適用する地すべり土塊の物性値の範囲内であれば、中抜けは発生しない。
- (3) 杭間隔の決定について、抑え杭の条件では既往の設計要領¹⁾やFEM解析を用いた検討により決定し、一方くさび杭では中抜けが生じないことから杭の許容応力度や地盤の受動破壊などにより決定する。

今後は、この杭間隔の決定方法をもとに、現場での合理的設計方法の検討を行う。

参考文献

- 1) (社)地すべり対策技術協会：地すべり鋼管杭設計要領，2003
- 2) 石井靖雄・藤澤和範・田中尚：遠心載荷模型実験による地すべり抑止杭の設置間隔の検討，土木技術資料，Vol.48，No.8，pp.66-71，2006.
- 3) Y. Ishii, H. Tanaka, K. Fujisawa, Y. Nakashima and K. Ito : Study of Pile Interval of Landslide Restraint Piles by Centrifuge Test and FEM Analysis, INTERPRAEVENT International Symposium in Niigata, pp.113-119, 2006.
- 4) 石井靖雄・藤澤和範・田中尚・倉岡千郎・中島祐一：3次元FEM解析による杭間隔の検討，第45回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.323-324，2006.
- 5) 藤平大・田中尚・藤澤和範・倉岡千郎・中島祐一：3次元FEM解析による杭間隔の検討（その2），第46回日本地すべり学会発表会講演集，pp.265-268，2007
- 6) (社)土質工学会：地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム，pp.189-204，1994. ほか

田中 尚*



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）
Yasuo ISHII