

地すべり抑止工を併用した場合の抑止効果に影響を及ぼすグラウンドアンカー工のパラメータ（設計要素）

窪塚大輔* 石田孝司** 藤澤和範***

1. はじめに

地すべり対策において、地すべりの規模や施工条件、または経済性の観点から抑止工を併用する場合がある。ここでの抑止工とは、抑止杭工（以下、杭工という。）とグラウンドアンカー工（以下、アンカー工という。）である。杭工とアンカー工は地すべりへの抑止力の発現機構が異なる。そのため抑止工を併用して対策する場合は、両者の抑止効果を考慮した上で、負担する抑止力などを算定することが必要と考えられる。しかしながら、現状における技術基準等では、杭工とアンカー工を併用する場合の設計の考え方およびその手法は示されていない。

そこで、これまでに全国から杭工とアンカー工を併用した現場の事例を収集し、設計方法や抑止力の負担割合等を分析した¹⁾。その分析結果を参考にし、抑止工を併用した場合の基礎的な抑止効果のデータを得ることを目的とし遠心力模型実験を実施した。その実験結果を再現できるFEM解析モデルを構築し、より詳細に抑止効果や抑止力の負担割合について検討を実施した。

本稿では、遠心力模型実験を再現したFEM解析を通じて、杭工とアンカー工を併用した場合の抑止効果や抑止力の負担割合に影響を及ぼすアンカー工のパラメータ（設計要素）に関する知見を得たので報告する。

2. 遠心力模型実験

2.1 実験方法

実験模型は事例分析結果に基づき、すべり面数は単独すべりとし、杭工とアンカー工の配置は山側に杭工そして谷側にアンカー工とした。実験模型の様子を写真-1に、模型模式図を図-1に示す。実験は、地すべり土塊と抑止工を模した模型を遠心力装置にて遠心力場80G（G：重力加速度）上に置き、アンカーに初期緊張力を導入した後に、

移動壁を斜面下方へ引くことで地すべり土塊の自重により地すべりを滑動させた。実験中の計測項目は、すべり面上の垂直応力とせん断応力、地すべり土塊の変位、移動壁に作用する荷重、杭工に作用した応力、アンカー荷重である。土塊は、豊浦標準砂とカオリン粘土を重量比8:2で混合した材料を用いて作成した。基盤はアルミ合金を用い、その上面にシリコングリスを塗布し摩擦を低減させてすべり面とした。アンカー模型はアンカー材、受圧板、アンカー緊張装置から成る。アンカーの緊張装置は、基盤内で3本のアンカーを一体化して引っ張る構造とした。

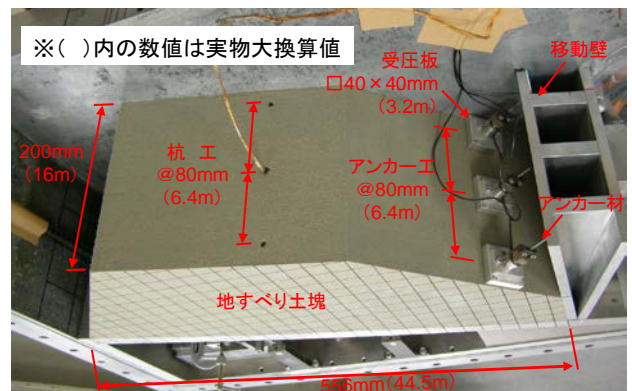
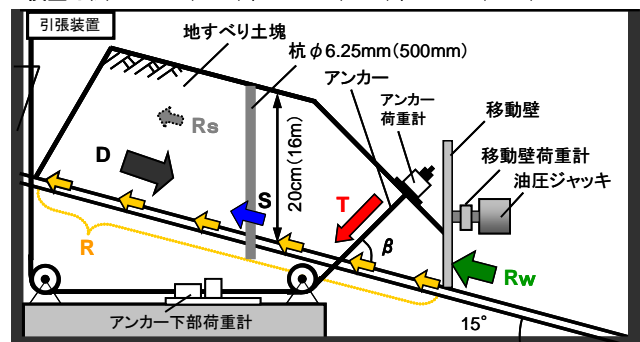


写真-1 遠心力模型実験状況

模型縮尺:1/80 ※()内の数値は実物大換算値
 模型寸法:L80cm(64m)、W20cm(16m)、H50cm(40m)



- D : 地すべり滑動力(一定)
- R : すべり面の抵抗力(一定)
- Rw : 移動壁に作用する滑動力
- Rs : 模型側面の摩擦力(一定)
- T : アンカー工の抑止力
- S : 杭工の抑止力

図-1 実験模型概要図

Parameter of ground anchor that influences deterrent effect when prevention piles and ground anchors work for landslides.

実験ケースは、実験結果を比較する上で基本となる抑止工が無いケース①、アンカー工が単独のケース②、杭工とアンカー工を併用させたケース③～⑤の計5ケースを実施した(表-1)。なお、各ケースの地すべり土塊の形状は同じとした。

表-1 遠心力模型実験ケース一覧

ケース	配置パターン	抑止工諸元			
		杭工	アンカー工		
			剛性	剛性	β
①	-	-	-	-	-
②	アンカー単独	-	大	60	50%
③	杭・アンカー併用	小	小	60	100%
④	杭・アンカー併用	小	小	60	50%
⑤	杭・アンカー併用	小	大	60	100%

2.2 実験結果のデータ整理方法

各ケースの地すべり土塊の形状は同一であることから、各ケースの地すべり滑動力とすべり面の抵抗力および模型側面の摩擦力は一定と見なすことができる(図-1)。すなわち移動壁に作用する地すべり滑動力の差が、各実験ケースの抑止工が発揮した抑止効果、もしくはすべり面に作用した応力として評価できる(式-1)。

$$R_w = D - R - R_s - T - S \dots \text{(式-1)}$$

2.3 全ケースの実験結果

実験結果を式-1にしたがい、移動壁に作用する滑動力に着目し整理した。その結果を図-2に示す。なお、横軸に移動壁の変位量、縦軸に移動壁に作用する滑動力を示す。またケース⑤は移動壁の変位量が2mmに達した際に、地すべり土塊の谷側部が崩壊する恐れがあったため、実験を中断した。

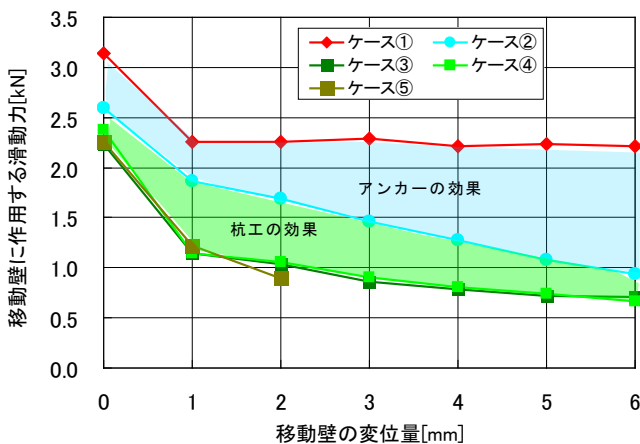


図-2 実験結果(移動壁に作用する滑動力の変化)

ケース①は移動壁の変位が大きくなっても滑動力はほぼ一定の値を示した。その他のケースは、移動壁の変位量に追従し移動壁に作用する滑動力

は低下した。したがって、ケース①とケース②との差が、アンカー工が発揮した抑止効果(図-2中の青色のハッチング部)と考えられる。また、ケース②とケース③～⑤との差は、杭工が発揮した抑止効果(図-2の緑色のハッチング部)と考えられる。一方、ケース③～⑤の移動壁の変位が1mm以降の滑動力の低下傾向は、ケース②よりも小さい。このことから杭工の抑止効果はアンカー工の抑止効果の発現に伴って低減していると推測できる。

3. 遠心力模型実験のFEM再現解析

3.1 解析モデルの構築

遠心力模型実験を再現する解析モデルは、実験模型の奥行き対称性を利用して杭工、アンカー工を含む打設間隔の半分の領域とした(図-3)。

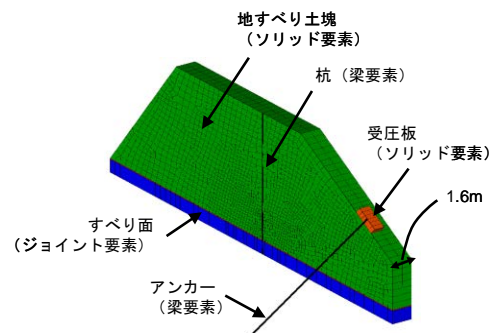


図-3 FEM解析モデル

再現解析に用いる物性値は、実験の各物性値を基に設定した。なお模型側面の摩擦力は、側面の内部摩擦角として設定した。それらの物性値を用いて抑止工を併用したケース⑤の再現解析を行った結果、実験結果と解析結果に差異が生じた。そのため、実験で想定される物性値のパラッキ範囲と地すべり土塊の変形係数に着目しパラメトリック解析を実施した。その結果、表-2に示す物性値を用いることで、移動壁に作用する滑動力、杭工の曲げモーメント、アンカー工の軸力に対して良好な再現性を示した。

表-2 再現解析に用いた主要な物性値

項目	物性値	
地すべり土塊	単位体積重量	19.02 kN/m ³
	変形係数	3,000 kN/m ²
すべり面	粘着力	0.0 kN/m ²
	内部摩擦角	9.5~12.0°

2.3節と同様な方法でまとめた再現解析結果を図-4に示す。この結果、解析モデルは実験結果を概ね再現できたと判断した。したがって、本モデルの解析結果を用いて、杭工とアンカー工を併用した場合の抑止効果や抑止力の負担割合を詳細に精査することとした。

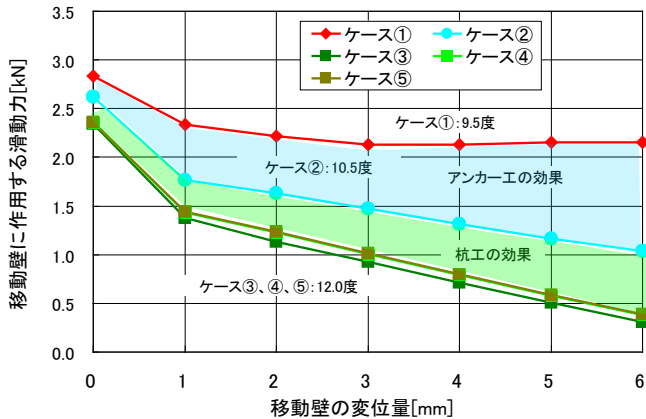


図-4 実験結果のFEM再現解析結果

3.2 抑止効果に影響を及ぼすアンカー工のパラメータの把握

杭工とアンカー工を併用した場合の抑止効果に影響を及ぼす、アンカー工のパラメータを把握するために、ケース③～⑤の解析結果を照査した。ここでの抑止効果は、移動壁の変位中に杭工に作用する曲げ応力、アンカー工に作用する軸力から、それぞれの抑止工が発揮した抑止力に相当する荷重を逆算して、それを評価した。図-5に移動壁の変位に伴い、それぞれの抑止工に作用した荷重変化を示す。なお、図-5における横軸中の“初期緊張”とは、アンカー工に初期緊張力を導入した時点を示し移動壁は変位していない状態である。

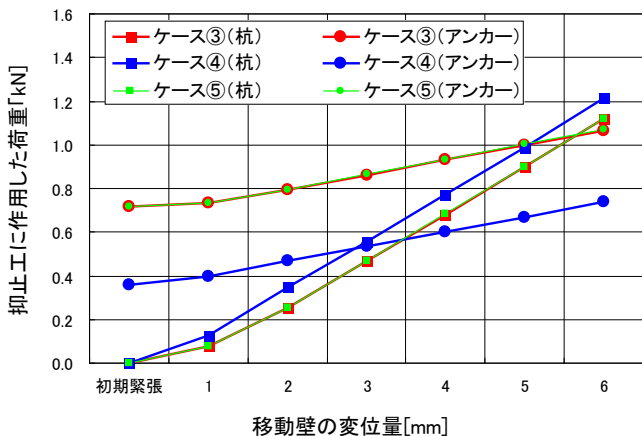


図-5 抑止工に作用した荷重

(1) 併用した場合の抑止効果 (ケース③～⑤)

図-5に示した移動壁の変位中の荷重の増加割合

は、杭工の方が大きく、アンカー工は杭工よりも小さいものの、徐々に増加している。これは杭工とアンカー工の抑止機構や機能の違いによるものである。アンカー工は初期緊張力を導入することで、すべりが発生する前に能動的に抑止力を地すべり土塊へ伝達し、すべり面の抵抗力を増加させ、すべりに抗する機能を有するものである。一方、杭工はすべりに対して杭の変位を許容しながら、すべりに抗する受動的な機能を有するものである。図-5の結果は、こうした両者の抑止機構や機能の違いを反映したものと考えられる。

(2) 初期緊張力導入量の影響 (ケース③と④)

図-5に示した杭工に作用した荷重は、アンカー工の初期緊張力導入量の大きいケース③の方が小さいケース④より小さいことを示している。これはアンカー工の締め付けにより杭工の谷側斜面の変形が小さくなり、杭に作用した荷重が低下したと考えられる。一方、移動壁の変位に伴うアンカー工の荷重は、初期緊張力の導入量の差分が、保持された傾向となった。

(3) アンカー工の剛性の影響 (ケース③と⑤)

アンカー工の剛性の異なるケース③と⑤における、杭工とアンカー工に作用した荷重は、殆ど同じであった。よってアンカー工の剛性による抑止効果への影響は小さいものと考えられる。

3.3 抑止力の負担割合に対するアンカー工の初期緊張力導入量の影響 (ケース③と④)

前節においてアンカー工の初期緊張力の導入量の違いは、抑止工を併用した場合の抑止効果に対して影響を及ぼすことを確認した。そこで初期緊張力の導入量が違うケース③と④の解析結果を用いて、初期緊張力の導入量の違いと、それぞれの抑止力負担割合との関係を検討した。なお抑止力は、前節と同様に移動壁の変位に伴い杭工とアンカー工に作用した応力と軸力から、それぞれの抑止工が発揮した抑止力に相当する荷重を逆算して、それを評価した。図-6に移動壁の変位に伴い、それぞれの抑止工が負担した抑止力の割合を示す。なお、図-6における横軸中の“初期緊張”とは、アンカー工に初期緊張力を導入した時点を示し移動壁は変位していない状態である。

図-6より、両ケースとも移動壁の変位量の増加に伴い、アンカー工の抑止力負担割合は低下し、杭工の抑止力負担割合が増加する傾向を示してい

る。これは前述した杭工とアンカー工の抑止機能の違いと考えられる。

一方、ケース③では移動壁の変位量が6mm付近、ケース④では3.5mm付近で、杭工とアンカー工の抑止力負担割合は、ほぼ均等になることを示している。またケース④の移動壁の変位量が3.5mm以降では、抑止力負担割合は、それ以前の割合と逆転している。これらからアンカー工の初期緊張力の導入量の大きさの調整により杭工の抑止機能の発現時期を調整できると考えられる。

以上の結果から、アンカー工の初期緊張力の導入量は、抑止工を併用した場合の抑止力の負担割合に影響を及ぼすパラメータとして評価できると言える。

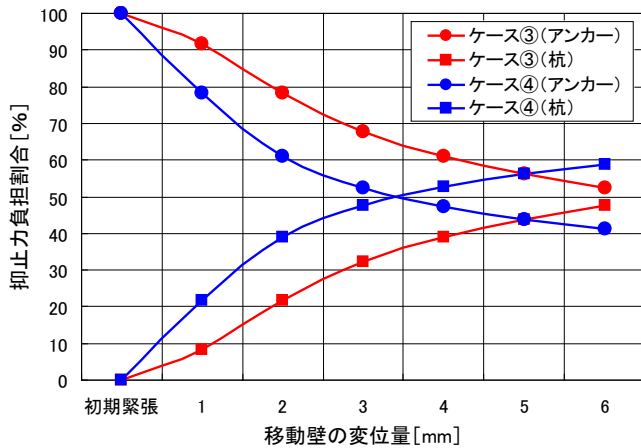


図-6 抑止力の負担割合

4. まとめ

杭工とアンカー工を併用した遠心力模型実験結果を再現できるFEM解析モデルを構築し、その解析結果から抑止工を併用した場合に影響を及ぼすアンカー工のパラメータ（設計要素）に着目し検討を行った。その結果を以下にまとめる。

- 1) 地すべり土塊の変位が大きくなるに伴い、杭工の発揮する抑止効果および抑止力の負担割合は大きくなる。
- 2) アンカー工の初期緊張力の導入量は、抑止工を併用する場合の抑止効果および抑止力の負担割合に影響を及ぼすパラメータ（設計要素）として評価できる。
- 3) アンカー工の初期緊張力の導入量の大きさにより、地すべり滑動中の抑止力の負担割合を調整することができる。

最後に、地すべり対策工に用いるアンカー工の初期緊張力の導入方法は、一般的に設計アンカー力の40～80%程度、アンカーの引止め効果を期待する場合には20～30%程度とある^{2), 3)}。しかしながら、杭工とアンカー工を併用させ両者に必要な抑止力を負担させた設計を行う場合は、本稿で示した様にアンカー工の初期緊張力の導入量の大きさにより、抑止力の負担割合が異なるためアンカー工の初期緊張力の導入量は、慎重に検討する必要がある。今後は、アンカー工の適正な初期緊張力の導入方法についても研究を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 藤澤和範・田中尚・藤平大：杭工とアンカー工を併用する地すべり対策の設計方法の実態、土木技術資料、第49巻、第8号、pp.9～10、2007
- 2) (社)日本道路協会：道路土工一切土工・斜面安定工指針、2009
- 3) (社)地盤工学会、「グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説」、2000

窪塚大輔*



日特建設株式会社（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）
Daisuke KUBOZUKA

石田孝司**



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
Koji ISHIDA

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