

複数の工種を併用する場合の地すべり抑止工の抑止機構と設計手法の研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：藤沢和範、石田孝司

【要旨】

地すべり抑止工として抑止杭工とグラウンドアンカー工を併用する場合がある。しかし、地すべり抑止力の分担割合やその決定方法など設計方法は確立されていない。そこで、本研究では、杭工とアンカー工それぞれの地すべりに対する抑止機能を評価した上で、両工種を併用する場合の地すべり抑止機能を評価し、併用する場合の設計手法の確立に繋げることを目的として検討を行った。その結果、併用時の地すべりに対する抑止機能に関する知見を得た他、設計時に杭工とアンカー工それぞれに許容応力に近い荷重が分担できるようにするために、分担割合に寄与度の高い要素を明らかにするなどの成果を得た。

キーワード：抑止杭工、グラウンドアンカー工、抑止工併用、抑止力分担割合

1. はじめに

地すべり規模や施工条件などにより、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。）を組み合わせた計画・施工がなされる場合がある。それぞれの工種は抑止力を発揮するメカニズムが異なるため、設計にあたっては相互に与える影響を考慮する必要がある。しかし、地すべり抑止力の分担割合やその決定方法など杭工とアンカー工を併用する場合の設計方法は示されていない。そのため、設計者が現場ごとに地すべりの条件などを考慮しながら設計しているのが現状である。

本研究は、杭工とアンカー工を併用する場合にそれぞれの工種がどのように抑止機構を発揮するかを明らかにし、併用する場合の設計手法の確立につなげることを目的とするものである。

2. 研究方法

2.1 杭工とアンカー工を併用した地すべり対策の設計方法の実態分析

過去に設計・施工がなされた杭工とアンカー工を併用した事例において、併用した理由、必要抑止力の分担割合とその決定方法、配置位置、アンカーの初期緊張力などに関する実態を把握するため、「抑止杭工とグラウンドアンカー工を併用した地すべり」の計画・施工事例を調査した。その結果、計 12 の事例を収集することができ¹⁾、これらの事例を基にした実態把握のための分析を行った。

2.2 アンカー工の機能評価

アンカー工を設計・施工する際には、締付け効果と引止め効果を期待する。地すべり対策で使用するアンカー工は、設計アンカー力あるいはそれよりも小さな初期緊張力を与えて定着させ、これにより地すべりを抑止する。初期緊張力は地すべりとアンカーの種々の条件（地すべり運動機構、地すべり土塊の性状、アンカー配置位置、すべり面角度、アンカー傾角など）を考慮して決定されるが、既往の技術指針ではこれらを合理的に設定するための定まった方法を示していない。そこで、遠心力模型実験により移動土塊がアンカーに与える荷重や挙動を把握した。次に、実験結果を参考として FEM 解析モデルを作成し、地すべり土塊やアンカー諸元などの条件を変えた計算を実施することにより、地すべり移動土塊に対するアンカー工単体の機能を評価した。なお、杭工の機能については過年度に実施した研究²⁾の中である程度明らかにしているため、これらの結果を用いることとした。

2.3 杭工とアンカー工を併用する場合の機能評価

杭工とアンカー工を併用して設置した場合にそれぞれの抑止工が地すべり移動土塊に対して与える効果や機能を評価することを目的とし、まず遠心載荷模型実験を行うことにより、杭工とアンカー工を併用した場合に移動土塊から各抑止工が受ける挙動と荷重を把握した。次いで、実験結果を参考として FEM 解析モデルを作成し、杭工とアンカー工の諸元や設置条件を変えた計算を実施し、抑止工とアンカ

一工の抑止力分担割合や、分担割合に寄与するパラメータなどを把握・評価した。

3. 研究結果

3.1 抑止杭工とアンカー工を併用した事例分析結果

3.1.1 併用例の分類方法

収集した事例の整理に際しては、抑止工を設計する際の「すべり面の数」(図-1)と「併用した理由」(図-2)の観点から整理した。収集した事例の分類結果、および諸元を表-1に示す。なお、通常併用とした理由は1つだけでなく様々な要因を考慮して総合的に判断しているが、ここでは経済性>杭谷側安定>移動土塊重複>施工条件の優先順位により併用した理由を整理した。

3.1.2 併用とした理由の傾向

併用とした理由とすべり面の数、および必要抑止力の関係を図-3に示す。なお、必要抑止力が大きい

事例は地すべり規模が大きいものと考えて良い。図-3(a)によると、すべり面の数は「単独」でも「複数」でも抑止工を併用した事例が認められ、すべり面の数が「単独」の場合は「経済性」を理由とした事例が多く、「複数」の場合は「杭谷側安定」や「移動土塊重複」を理由とした事例が多く見られた。

必要抑止力に着目すると、「経済性」を併用理由とした事例では必要抑止力が大きい傾向がある。一方で、必要抑止力が小さい場合には「杭谷側安定」や「移動土塊重複」を理由とする傾向がある。

3.1.3 抑止力分担割合の傾向

抑止力の分担割合について分析した結果を図-4および図-5に示す。抑止力の分担は「杭工>アンカー工」とする事例が多く、平均すると杭工70~80%、アンカー工20~30%であった。抑止力の分担割合が「アンカー工>杭工」であったものは事例①のみである。

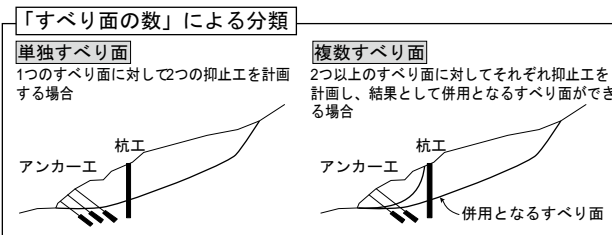


図-1 抑止工を設計するすべり面の数による分類

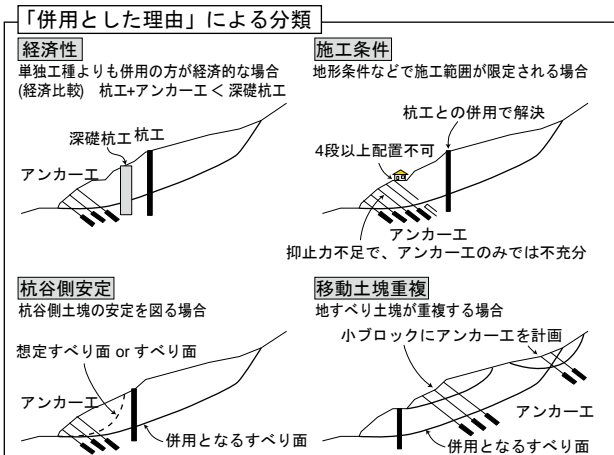


図-2 抑止工を併用した理由による分類

表-1 収集した地すべり抑止工の併用例の諸元

No	地すべり名	都道府県	すべり面の数	併用の理由	抑止力分担割合(配置位置)		アンカー諸元		分担割合の決定方法
					杭	アンカー	初期張力(%)	アンカー抑止効果	
①	秋田昭和緑地区	秋田県	単独	経済性	29%(上)	71%(下)	100	締付+引止	安全率上昇分
②	埼玉平山地区すべり	山形県	複数	移動土塊重複	100%(下)	0%(上)	70	引止	アンカー負担0%
③	新潟(災害)地すべり	新潟県	複数	移動土塊重複	76%(下)	24%(上)	不明	引止	別すべりで決定
④	濃根地すべり	新潟県	単独	施工条件	65%(上)	35%(下)	100	締付+引止	安全率上昇分
⑤	虫生岩戸地すべり	新潟県	複数	移動土塊重複	62%(下)	38%(上)	100	引止	別すべりで決定
⑥	滝ノ沢橋地区地すべり	埼玉県	単独	杭谷側安定	100%(上)	0%(下)	100	締付+引止	アンカー負担0%
⑦	入谷地すべり	長野県	複数	杭谷側安定	100%(上)	0%(下)	56.7	締付+引止	アンカー負担0%
⑧	原地すべり	大阪府	複数	杭谷側安定	100%(上)	0%(下)	不明	引止	アンカー負担0%
⑨	善徳地すべり※	徳島県	単独	経済性	69%(上)	31%(下)	40	締付+引止	安全率上昇分
⑩	大久山地区すべり	愛媛県	単独	経済性	55%(下)	45%(上)	80	締付+引止	アンカー最大
⑪	大森地すべり	山口県	複数	杭谷側安定	100%(上)	0%(下)	不明	引止	アンカー負担0%
⑫	長瀬地すべり	長野県	複数	移動土塊重複	77%(下)	23%(上)	100	締付+引止	別すべりで決定

※: 抑止杭は「深礎杭」

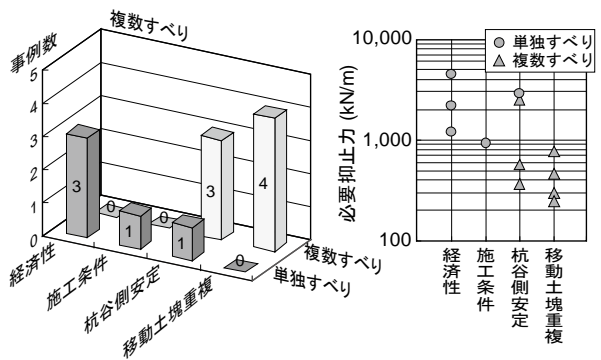


図-3 併用理由とすべり面数、必要抑止力の関係

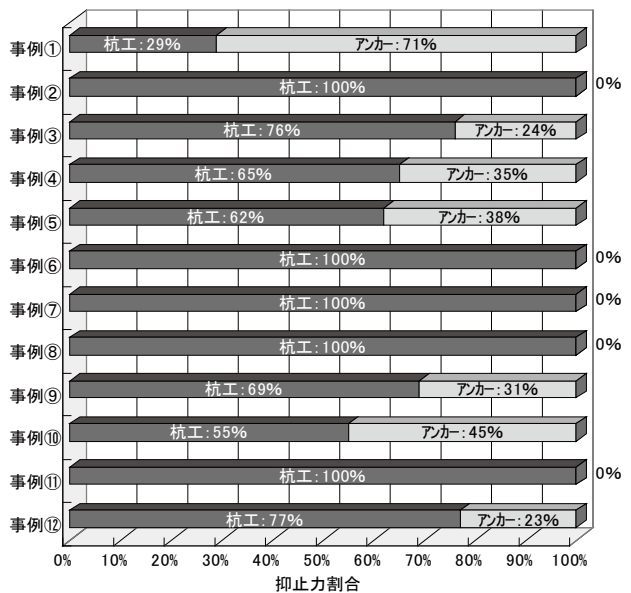


図-4 必要抑止力の負担割合

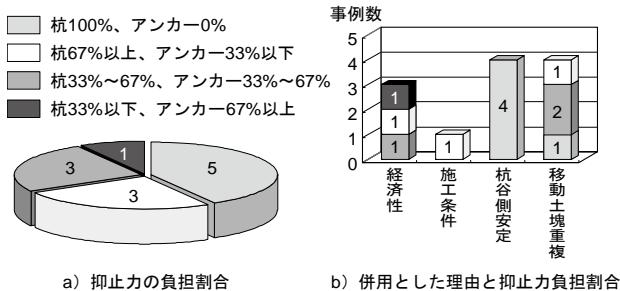


図-5 抑止力負担割合、および併用とした理由との関係

併用とした理由との関係を見ると、「杭谷側安定」を理由とした4事例ではすべてアンカー工の抑止力を見込まない設計方法としている。しかし、そのほかの理由では抑止力の分担割合は様々であり、事例数が少ないことから特に明瞭な傾向は認められなかった。

3.1.4 分担割合の決定方法

抑止力分担割合の決定方法を図-6に示す。決定方法は各現場の状況に応じて様々であるが、大きく分類すると決定方法は以下の4つであった。

- ①アンカー力最大：施工可能なアンカーでの最大抑止力分をアンカー工で負担、残りを杭工で負担
- ②安全率上昇分：設計安全率上昇分の必要抑止力を任意に杭工とアンカー工に振り分ける
- ③別すべりで決定：別のすべりに対して設計したアンカー抑止力を、もう一つのすべりに対しても考慮し、残りを杭工で負担
- ④アンカー工負担0%：アンカー工に抑止力を負担させない

図-6(a)によると、抑止力負担割合の決定方法としては「アンカー力負担0%」とした事例が最も多く（5事例）、次いで「安全率上昇分」、「別すべりで決定」が同数であり、「アンカー最大」とした事例は1事例のみであった。

複数すべりの場合、各すべりに目標とする計画安全率が設定されるため、分担割合の決定方法は、ア

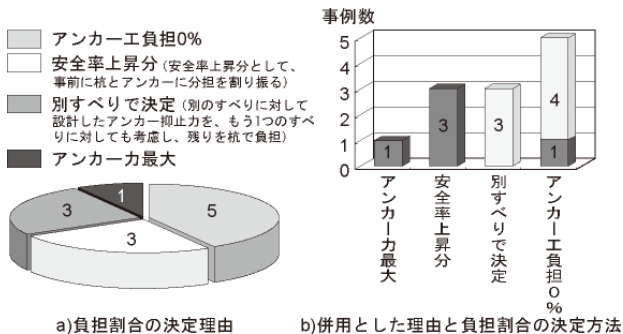


図-6 地すべり抑止力の負担割合の決定理由

図-6 抑止力負担割合の決定方法

ンカー工の抑止力を「別すべりで決定」とするか、決定しても安全側としてアンカー工の抑止力をすべりの安定度向上に考慮しない「アンカー工負担0%」とする方法が見られた。単独すべりの場合、現状では抑止力の分担割合についての決めるがないことから、分担割合を任意の「安全率上昇分」として決定した事例が多い。ただし、詳細に見れば分担割合の決定方法は様々であり、現場条件に応じて設計技術者が決定していることがわかった。

3.1.5 抑止工の配置パターン

杭工とアンカー工の配置パターン、および併用した理由の関係を図-7に示す。図-7によると、「上部：アンカー・下部：杭」とした事例が5事例、「上部：杭・下部：アンカー」とした事例が7事例とほぼ同程度であった。「上部：アンカー・下部：杭」の配置パターンは「移動土塊重複」を理由とする場合に多く、「上部：杭・下部：アンカー」では「移動土塊重複」以外で、特に「杭谷側安定」に多い。

複数すべりの場合は各すべり面の位置関係により配置位置が決定されるため、抑止工の配置についての自由度は低くなる。一方、単独すべりでは配置についての自由度はあるが、1) 杭谷側土塊の安定性を確保する、2) 地すべり土塊末端部の切り土により不安定化する部分の安定性を確保する、などの理由から地すべり末端部にアンカー工を配置する事例が多かった。配置パターンは、杭工とアンカー工では地すべり抑止機構が異なることから、抑止力分担割合を同じにしても、配置位置を逆転させた場合には全体の抑止機構が変化する可能性もあり、合理的な設計を行う上で、抑止工の配置計画は重要な項目と考えられる。

3.1.6 アンカーの初期緊張力

今回収集・分析した事例では、表-1に示したとお

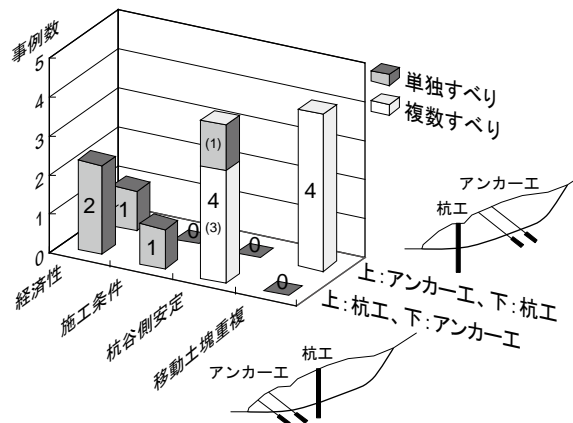


図-7 抑止工の配置位置

り 40~100%の初期緊張力で定着されており、特に 100%で緊張した事例が 5 事例あった。アンカーの初期緊張力を、抑止力分担割合、または抑止工の配置位置との関係で整理し、図-8 に示す。表-1 や図-8 によると、アンカー初期緊張力の設定値は、アンカー抑止効果や杭工との位置関係、地すべり抑止力の分担割合、併用した理由などに関係なく、現場ごとに様々な初期緊張力が設定されていることがわかった。

アンカーの初期緊張力は、一般には設計アンカー力の 40~80%程度、特に引止め効果を期待する場合には設計アンカー力の 20~30%程度とすることが多い³⁾。また、締付け効果を期待する時は 100%も認められている⁴⁾が、明確な初期緊張力の設定方法は確立されていないのが現状である。杭工とアンカー工を併用する場合、杭工が待ち受け工法（杭に荷重が作用し、変形することで抑止効果が発揮される）であることを考慮すれば、杭工が所定の抑止力を発揮するまでの変位を見込んだアンカーの初期緊張力の設定が必要と考えられた。

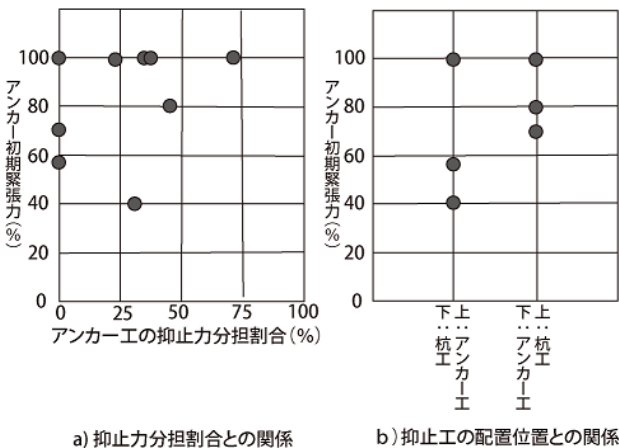


図-8 アンカー初期緊張力の傾向

3.2 アンカー工の機能評価結果

3.2.1 概要

アンカー工は、地すべり抑止効果として「締付け効果」と「引止め効果」がある。このうち、締付け効果はアンカーの緊張力によるすべり面に垂直に作用する力がすべり面のせん断抵抗力を増加させ、地すべり滑動力に抵抗させようとするものである。既往の設計方法においては、アンカー緊張力の垂直分力の全てを設計力に見込んでいる。しかし、締付け効果は地すべり土塊の地盤条件やすべり面深度などによって影響を受けると考えられ、設計上見込んでいる力が全て締付け効果として発揮されるか否かに

ついては明らかではない。このことについては、アンカー緊張力を作用させた時に地すべり土塊が圧縮変形や圧密変形しやすい粘性土や崩積土、亀裂に富んだ風化岩などからなる場合、またすべり面深度が深い場合などでは締付け効果を期待することは難しいとされている⁵⁾。しかしながら、現在の設計手法においてはこれらの影響を定量的に評価できるまでには至っていない。

前記した課題を解決するためには、地すべり土塊の地盤条件やすべり面深度が変化した時の締付け効果を把握する必要がある。その手法として、締付け力を実現場で計測する方法や、模型実験などが考えられるが、前者は計測が困難である。そこで遠心力模型実験により初期緊張や土塊変位に伴う垂直応力、アンカー軸力等の計測を行い、地すべり滑動時の抑止効果を検討した。次いで、実験により得られた値を用いてアンカーの抑止効果を表現できる FEM 解析モデルを構築し、種々の条件におけるアンカーの抑止効果を検討した。

3.2.2 遠心力模型実験

移動土塊に対する抑止工としてアンカーを配した図-9 に示す模型を作成し、これを 80G (G : 重力加速度) の遠心力場に置き、アンカーに初期緊張力を与えた後に、土塊を背面から油圧ジャッキで強制変位を与えることによりすべりを発生させた。実験ケースは表-2 に示すとおりであり、アンカー頭部におけるすべり面までの深さ (以下、「すべり面深度」という。)、アンカーとすべり面のなす角 (以下、「 β 」

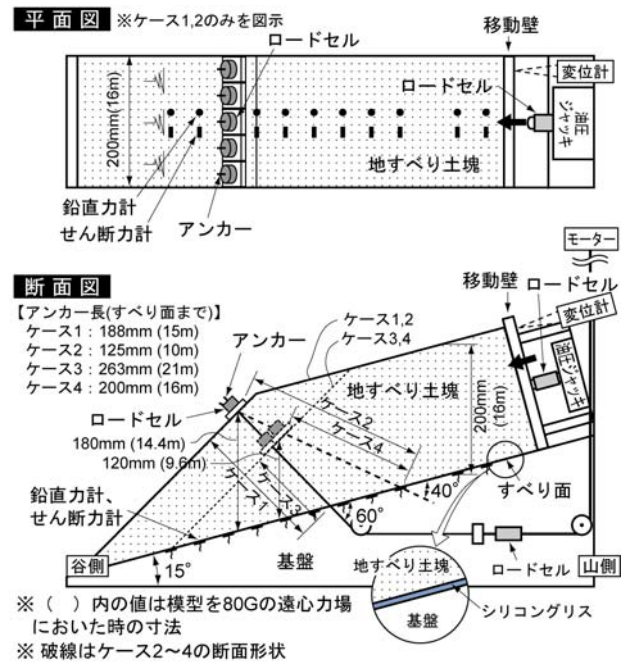


図-9 遠心力模型の諸元及び計測機器の配置

表-2 アンカー工機能評価のための実験ケース

ケース	すべり面深度 [m]	β [°]	アンカー長		グラフ凡例
			すべり面まで [m]	固定端まで (自由長) [m]	
1	14.4	60	16.0	41.3	□
2	14.4	40	21.0	37.0	◇
3	9.6	60	10.0	35.3	■
4	9.6	40	15.0	30.1	◆

という。)を変化させた4ケースを実施した。実験時には、アンカー緊張力、すべり面に作用する垂直応力(土圧)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を計測した。

地すべり土塊は、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た。基盤はアルミ合金を用い、上面にシリコングリスを塗布してすべり面とした。アンカーは直径φ1.5mmのステンレスワイヤーを用いた。

アンカーに初期緊張力を与えた時のすべり面に作用する垂直応力の分布(緊張による増分量)を図-10に示す。なおグラフは実物大換算値で示し、横軸は最も谷側に配置した土圧計の位置(ケース3.4の法尻位置)をゼロとし、すべり面に沿った長さを示している。また、アンカー頭部と定着部の位置を図中の縦線で示した。なお、この時の中央部のアンカー緊張力は、実物大換算でケース1:851kN、ケース2:1,030kN、ケース3:1,075kN、ケース4:1,626kNである。図-10より、垂直応力増分に関して、①位置に多少のバラツキはあるものの、垂直応力のピークはいずれもアンカー頭部と、アンカーとすべり面の交わる位置(以下、「アンカー定着部」という。)の間で発生している、②同じすべり面深度のケースで比較すると、 $\beta=40^\circ$ よりも $\beta=60^\circ$ のほうがピーク位置は谷側に寄っている、③すべり面深度を同じとした場合、垂直応力増分のピーク値は $\beta=60^\circ >$

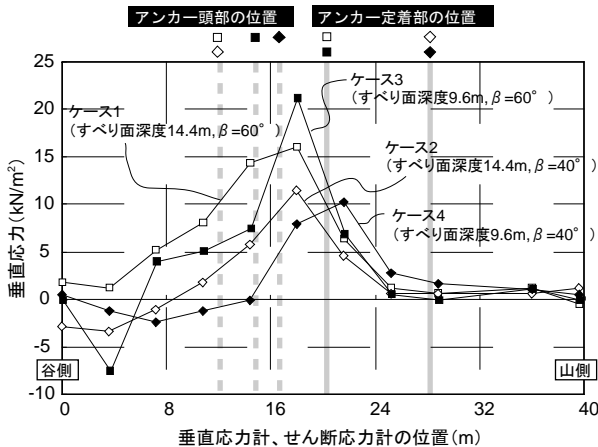


図-10 初期緊張時の垂直応力の分布

$\beta=40^\circ$ の傾向を示した、等の傾向を見ることができた。

3.2.3 遠心力模型実験のFEM解析結果

(1)実験時の初期緊張力による締付け力

遠心力模型実験を再現する解析モデルを図-11に示す。アンカーを中心にすべり方向に左右対称性を有するものとして、アンカー打設間隔の1/2の領域をモデル化した。モデルは、地すべり土塊、すべり面、アンカー、受圧板からなる。主要な物性値を表-3に示す。

図-10に示した実験時の初期緊張力を与えた時にすべり面に作用する垂直応力(締付け力)の分布をFEM再現解析により求めた。その結果を図-12に示す。図-12からは、図-10に示した実験結果と同様に、垂直応力のピークがアンカー頭部とアンカー定着部の間に発生すること、同じすべり面深度のケースを比較した場合 $\beta=40^\circ$ (図中◇,◆)よりも $\beta=60^\circ$ (図中□,■)のほうがピーク位置は谷側に寄るなど、実験結果と類似する結果が得られた。以上のことより、FEM再現解析は、概ね実験結果を表現することができ、アンカー緊張力による締付け効果を評価できるモデルであると判断した。なお、ケース4(図中◆)において、解析結果と実験結果の応力値の大きさが

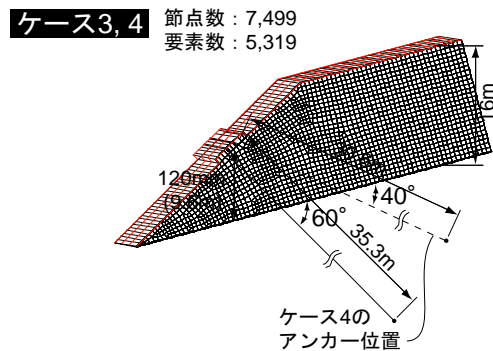
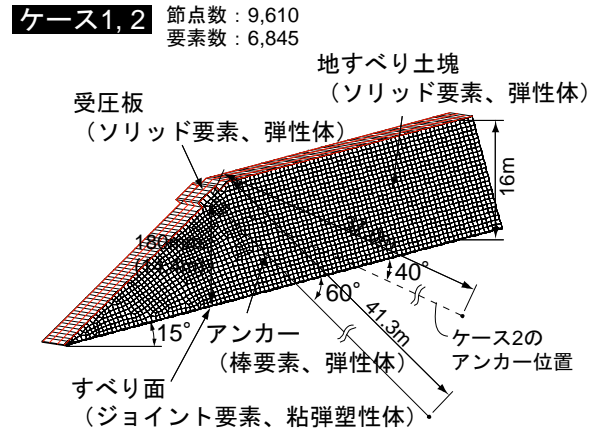


図-11 FEM解析モデル

表-3 解析モデルで用いた物性値

項目	地すべり土塊 変形係数	受圧板 弾性係数	アンカー 弾性係数	すべり面 粘着力	すべり面 内部摩擦角	ジョイント要素 バネ剛性 (垂直・せん断)
物性値	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(°)	(kN/m ²)
	4.4×10^4	6.9×10^7	1.9×10^9	0.0	28.4	5,000

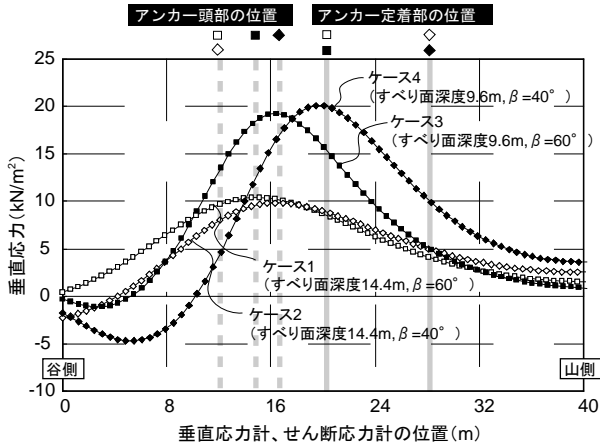


図-12 すべり面に作用する垂直応力の分布
(初期緊張時)

異なっていたが、アンカーに導入する緊張力を調整することで再現できることを確認している。

(2) 緊張力一定条件での締付け力の比較

前項では実験結果を再現するために、アンカーに設定した各ケースの初期緊張力による締付け力を求めた。ここでは、すべり面深度及び β の変化が垂直応力増分へ及ぼす影響を評価するために、各ケースの緊張力一定条件において締付け力を比較した。図-13 にアンカー緊張力を 640kN とした時のすべり面に作用する垂直応力の分布を示す。その結果、図-12 と比較して全体的に垂直応力が小さくなっているが、応力分布の傾向は同じである。

すべり面深度の影響（ケース 1□と 2◇、ケース 3■と 4◆を比較）については、両者の応力分布は類似した形状を示すが、 β が大きいほどピーク値が大きくなる。また、 β が大きいほどピークの位置は谷側にシフトし、アンカー頭部の位置に近づく傾向がある。なお、この時のアンカー緊張力のすべり面での垂直分力として求められる締付け力と、すべり面各要素に作用する垂直応力の総和として求めた締付け力はほぼ同じであった。このことから、本モデルにおいては、アンカー緊張力のすべり面での垂直分力が全て締付け力として作用していることがわかった。

(3) すべり発生時のすべり面に作用する応力

(1)、(2)では初期緊張力を与えた際のすべり面に作用する垂直応力の分布を見たが、ここでは初期緊張

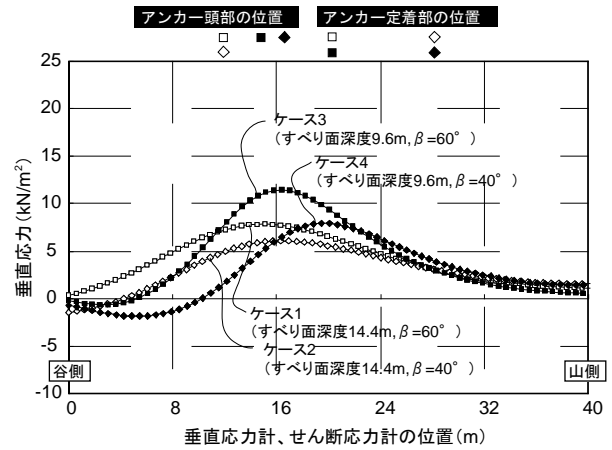


図-13 すべり面に作用する垂直応力の分布
(緊張力一定時)

力を付与した後の強制変位によるすべり発生時のすべり面に作用した垂直応力を FEM で解析し、実験結果と比較した。なお、アンカーを設定しない条件でのモデルも併せて作成し、アンカーの有無の影響を検討した。解析は、すべりの変位が 8cm、32cm、80cm の 3 段階を実施した。その一例として、ケース 3 における解析結果を図-14 に示す。アンカーなし（図中□）では、変位 8cm 時にアンカー頭部付近をピークとした垂直応力の分布が解析された以降、変位が大きくなってほとんど応力値の変化は認められない。アンカーなしのモデルでは、強制変位による地すべり土塊の変形で若干の垂直応力が発生するが、変位を大きくしても締付け力を付与するアンカーがないためにそれ以上は垂直応力が増えないことを示している。一方、アンカーあり（図中■）では、変位が大きくなるにしたがって締付け力が増大している。この時、アンカー緊張力も増加し、締付け力の総和とともにすべりの変位量に比例する結果となった。各変位におけるアンカー緊張力は、8cm : 175kN、32cm : 2,202kN、80cm : 6,852kN である。なお、

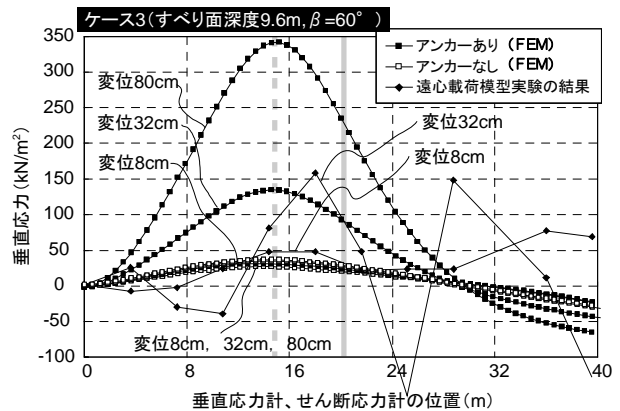


図-14 すべり発生時の垂直応力の変化（ケース 3）

ケース1,2,4の結果の一部は土木技術資料⁶⁾を参照されたい。実験結果(図中◆)とFEM解析結果を比較すると、両者に明瞭な類似性はない。これは、垂直応力を計測する土圧計がすべり面よりやや突出した形状となっており、すべりが発生すると土圧計周辺の地盤状況が変化し、乱れたデータになったことが考えられる。

3.3 抑止工併用時の抑止機能評価結果

3.3.1 概要

前項までに杭工、アンカー工それぞれ単独の場合の地すべりに対する機能を明らかにした。これらを踏まえ、杭工とアンカー工を併用する場合の地すべり抑止機構の解明と合理的設計手法確立を目的とした検討を行った。杭工とアンカー工を併用した遠心力模型実験により、杭にかかるひずみ量、アンカー軸力、土塊変位量、底面の土圧およびせん断力等の計測を行い、抑止工にかかる地すべり滑動力を把握した。次いで、実験結果を表現できるFEM解析モデルを構築し、抑止力分担割合と抑止機構、また抑止機構に影響を及ぼすパラメータについて検討を行った。

3.3.2 遠心力模型実験

実験は、杭工とアンカー工を併用した地すべり抑止工を模した模型(図-15)を遠心力模型実験装置にて80Gの遠心力場に置き、アンカーの初期緊張力を付加した後に土塊を滑動させ、杭工やアンカー工に作用する地すべり滑動力と実験後の変形状況を調べた。土塊の滑動方法として、3.2では土塊背後から強制変位を与えたが、ここではすべり面の抵抗を低減させる工夫を行った結果、土塊谷側の移動壁を谷

表-4 実験ケース

ケース	配置パターン	抑止工の諸元			
		杭 剛性※	アンカー 剛性※	β (度)	初期緊張力
1	なし	—	—	—	—
2	杭単独	大	—	—	—
3	アンカー単独	—	大	40	50%
4	アンカー単独	—	大	60	50%
5	アンカー単独	—	大	60	20%
6	アンカー単独	—	小	60	100%
7	杭・アンカー併用	小	小	60	100%
8	杭・アンカー併用	小	小	60	50%
9	杭・アンカー併用	小	大	60	100%

※ 剛性【杭】大:直径 ϕ 6.25mm,変形係数 $E=2.1 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
 小:直径 ϕ 6.25mm,変形係数 $E=0.7 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
 【アンカー】小:直径 ϕ 1.0mm,変形係数 $E=1.9 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$,破断荷重0.78kN
 大:直径 ϕ 1.5mm,変形係数 $E=1.9 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$,破断荷重1.67kN

側へ引き、自重で滑動させることとした。また、土塊底面の土圧計がすべり面と平滑になるような改良を加えた。実験は条件を3.2から変更したこともあり、杭、アンカーそれぞれを単独で配置したケース、および杭とアンカーを併用したケースを実施した。実験ケースを表-4に示す。なお、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た。

実験結果の一部として、杭・アンカーを併用したケース8、杭単独のケース2、アンカー単独のケース6の地すべり土塊の変形状況(実験後の側面からの観察)、移動壁の変位と地すべり土塊の変位の関係を図-16に示す。図-16b)に示す杭単独配置のケース2では、杭を境に地すべり土塊が引張破壊によって分断され、杭谷側地すべり土塊が滑落した。これは、実験模型のすべり面形状が直線であり、もともと杭谷側土塊の抵抗力が小さかったことに起因する。変位グラフを見ると、移動壁の変位が約1.5mmの時に地すべり土塊が分断し始め、その後、移動壁と共に杭谷側土塊が滑落していることがわかる。一方、杭山側地すべり土塊の変位は、地すべり土塊が分断された後も変位は増加せず、杭工によって抑止されている。次に、図-16c)に示すアンカー単独配置のケース6では、特に地すべり土塊に亀裂の発生は認められなかった。変位グラフを見ると、地すべり土塊の変位は山側と谷側(計測位置は図-15を参照)は同調して増加し、地すべり土塊が一体となって滑動したことがわかる。図-16a)に示す杭とアンカーを併用したケース8では、杭単独配置のケース2のような地すべり土塊が分断するような規模の亀裂は発生しなかったが、杭やアンカー周辺に亀裂が発生した。変位グラフを見ると、全体の傾向としては地すべり土塊の谷側は山側に比べて変位が大きいことがわかる。詳細に見ると、山側の変位は移動壁の変位が5mm以上になると増加速度は減速するが、谷側の変

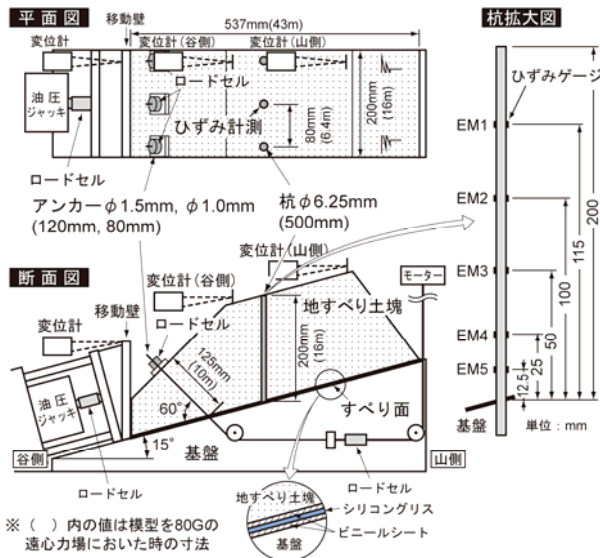


図-15 遠心力模型の諸元及び計測機器の配置(併用時)

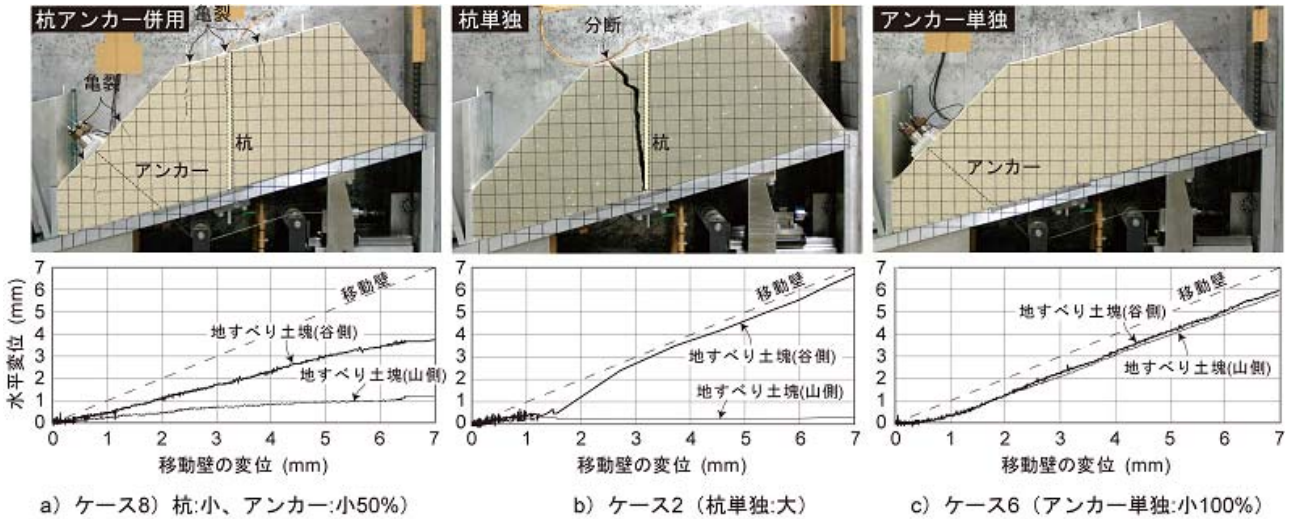


図-16 地すべり土塊の変形状況と変位量（写真はすべて実験終了後に撮影したもの）

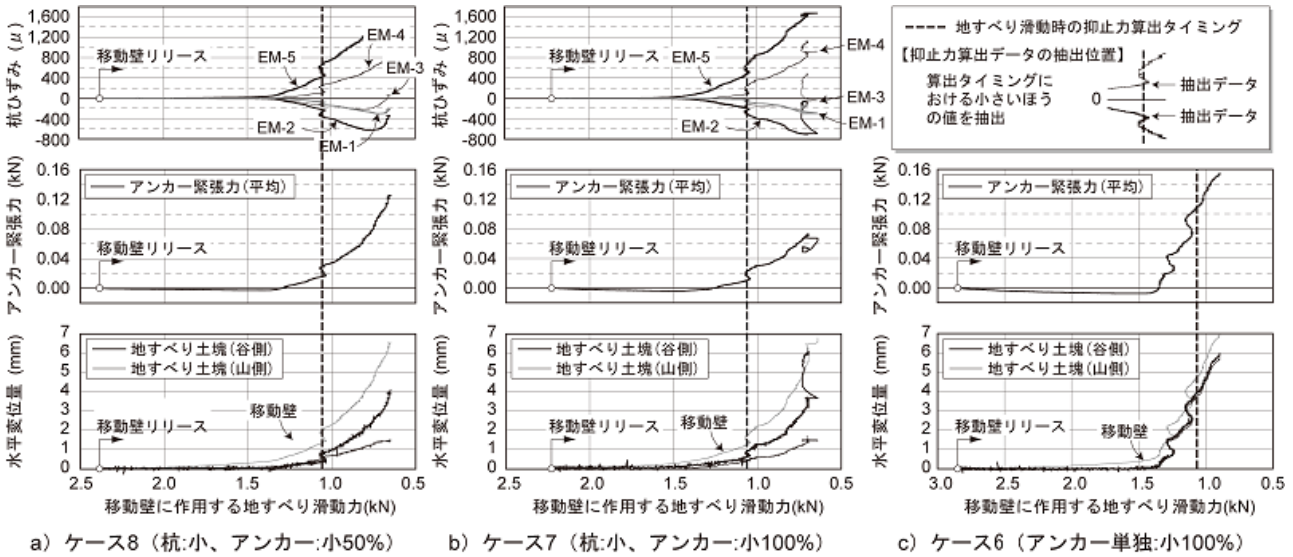


図-17 移動壁に作用する地すべり活動力と杭ひずみ、アンカー緊張力、水平変位の関係

位は移動壁の変位が 5mm の時点でも減速傾向は認められない。

以上の結果を踏まえ、杭とアンカーを併用した場合の変形状況について次のように考察した。杭とアンカーを併用するケースでは、杭単独配置に比べて杭谷側地すべり土塊の安定性を向上させることができる。杭山側では杭工によって地すべり変位が抑制されるが、杭谷側ではアンカーが配置されていても杭山側より大きな変位が地すべり土塊内で発生すると、杭・アンカー間で亀裂が発生する。このことから、設計上の留意点として、杭谷側に設置するアンカーは、杭谷側地すべり土塊の変位が山側と同等になるようにその諸元や初期緊張力を設定する必要があると考えられる。

次に、杭とアンカーを併用してアンカー初期緊張

力を変化させたケース 8 とケース 7、及びケース 7 から杭を除いてアンカー単独としたケース 6 について、計測データから計算される抑止工が発揮した抑止力の大きさを考察するため、移動壁に作用する地すべり滑動力と杭ひずみ、アンカー緊張力及び地すべり土塊の変位の関係を整理し、図-17 に示す。なお、計測データは、移動壁に作用する地すべり滑動力

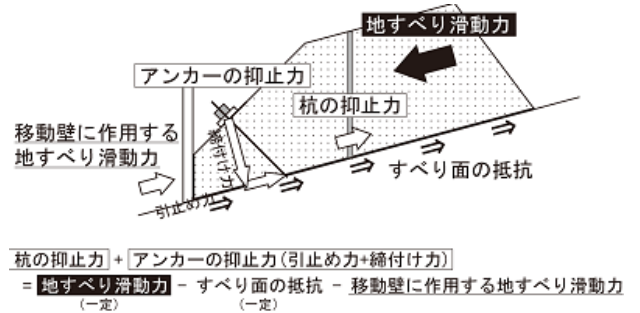


図-18 地すべり滑動時の作用力の関係

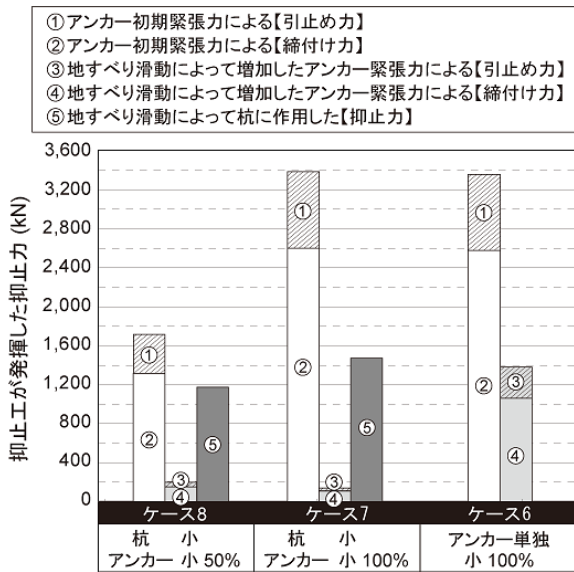


図-19 抑止工が発揮した地すべり抑止力

力を基準とし、図-18 に示す形で整理した。また、抑止工が発揮した抑止力の大きさは、移動壁に作用する地すべり滑動力が 1.05kN時の各計測値から算出し、80G 場における実物換算した模型全幅の値を求め、図-19 に示す。アンカーの初期緊張力に違いがあるケース8とケース7を比較すると、ケース7はケース8の約2倍の初期緊張力を与えているにもかかわらず、杭やアンカーの抑止力に大きな差は認められなかった。このことは、杭谷側に配置したアンカーの初期緊張力を大きくしても、杭に作用する地すべり滑動力を低減させる効果は小さい可能性がある。また、アンカーの初期緊張力は同じで杭の有無に違いのあるケース7とケース6を比較すると、アンカー単独のケース6では、ケース7における杭とアンカーが発揮した抑止力の合計相当がアンカーだけで発揮されていることがわかる。

ケース8とケース7の比較、及び地すべり土塊の変形状況を踏まえると、地すべり土塊の中腹に杭が配置されることにより地すべり滑動力は杭の山側と谷側に分割され、杭は杭山側の地すべり土塊を、またアンカーは杭谷側の地すべり土塊をそれぞれ抑止する機構となっていることが推察された。

3.3.3 FEM 解析による遠心力模型実験の再現解析

地すべりが滑動中の杭工、アンカー工にかかる荷重分担割合や抑止機構を整理し、抑止工併用時の抑止機構を理解すること、また杭工、アンカー工併用時の荷重分担割合に影響の大きいパラメータを抽出することを目的として、FEM により遠心力模型実験の再現解析を行った。再現ケースは、表-4 に示した

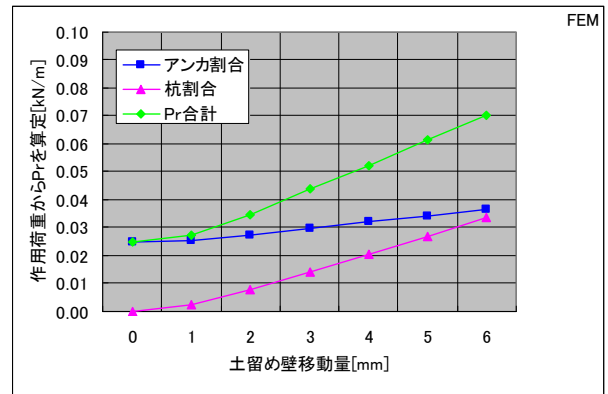


図-20 杭工とアンカー工の分担荷重割合 (ケース7)

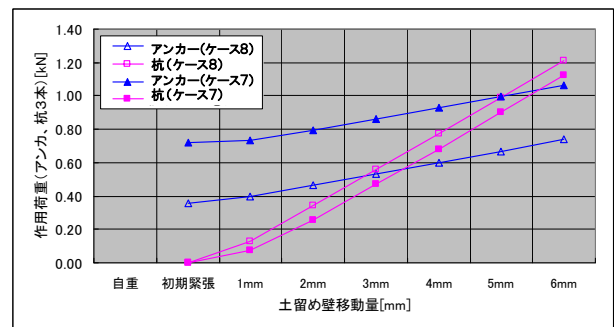


図-21 初期緊張力の違いによる分担荷重の違い

実験ケースのうち、ケース1、3、4、7~9の計6ケースを対象として FEM 解析モデルを作成した。なお、3.2.3 と同様実験模型の奥行き方向の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をモデル化した。再現モデルの構築にあたっては、土留め壁の水平変位を解析モデルに境界条件として与え、土留め壁を変位させた際の土留め壁に作用する荷重(反力)、地すべり土塊の法肩と天端上端の水平変位、アンカーにかかる荷重、杭のひずみを再現項目とした。再現計算の結果明らかになった主な事項を以下に示す。

杭とアンカーを併用し、アンカーの初期緊張力を100%としたケース7の土留め壁移動量と作用荷重の割合を図-20 に示す。土留め壁を谷側へ移動させることにより発生させた地すべり変位に伴う荷重の増加割合は、アンカー工よりも杭工が大きい。アンカー工は杭工より小さい増加割合であるが徐々に増加する傾向がある。これは杭工とアンカー工の機能の違いによるものと考えられ、アンカー工は初期緊張力によりすべりの発生前に荷重を作用させてすべり面の抵抗力を増加させる機能を有し、一方杭工はすべりに対して杭工の変位を許容しながらすべりに抵抗する待ち受ける機能を有するものであり、このような機能の違いをこの結果から確認することが

できる。

次に、アンカーの初期緊張力が抑止力分担に与える影響を見るため、初期緊張力のみが異なるケース7とケース8を比較し図-21に示す。その結果、初期緊張力が大きいほど、すなわちケース8よりケース7の方が杭工に作用する荷重は小さくなった。これは、実験結果(図-19)と整合しない部分であり、今後詳細な検討を行う必要がある。

3.3.4 抑止力分担割合に寄与する設計条件検討のためのパラメトリック解析

3.3.3では、実験結果を概ね表現できるFEM解析モデルを作成し、杭とアンカーにかかる応力分担等について明らかにした。ここでは、抑止力分担割合に寄与する設計条件を明らかにするため、円弧型すべりモデルを表現するFEM解析モデルを作成し、杭工もしくはアンカー工の有する許容荷重に達するまですべり面強度を低減させること(せん断強度低減法)により検討を行った。比較対象とする設計条件は、①杭工とアンカー工の配置間隔、②アンカー工の打設角度、③アンカー工の規格、④杭の曲げ剛性、⑤初期緊張力、⑥すべり面勾配とした。

パラメトリック解析により上記①～⑥のパラメー

タが荷重分担の割合などに与える影響を検討した。その結果の一部を図-22に示す。図-22からは、杭工の規格、アンカー工の初期緊張力は、荷重分担の割合や安全率、アンカー工の許容荷重に対するアンカー工の荷重発生割合を調整する上で有効なパラメータであること、また、アンカー工の規格も荷重分担割合に対する影響度があることから、杭工の規格、アンカー工初期緊張力に次ぐ有効なパラメータであることがわかった。

地すべりが発生した場合には杭工とアンカー工それぞれに荷重が発生するが、それぞれの工種が有する許容応力に近い荷重が発生することが、最も効率的な設計となる。これを達成するためには、まず現場の制約条件などを考慮した上で、杭工、アンカー工併用時の設計条件を設定し、経済比較などから必要抑止力負担割合や規格を設定する。ここまでは通常の設計と同じであるが、この先にFEM解析により安全率や荷重、そして杭工とアンカー工に作用する荷重分担割合を計算し、安全率と必要抑止力を満たす場合には、それぞれの許容荷重に十分に近いかどうかを検証し、バランスが悪いなどの場合には前記した抑止力負担割合に寄与するパラメータの再設

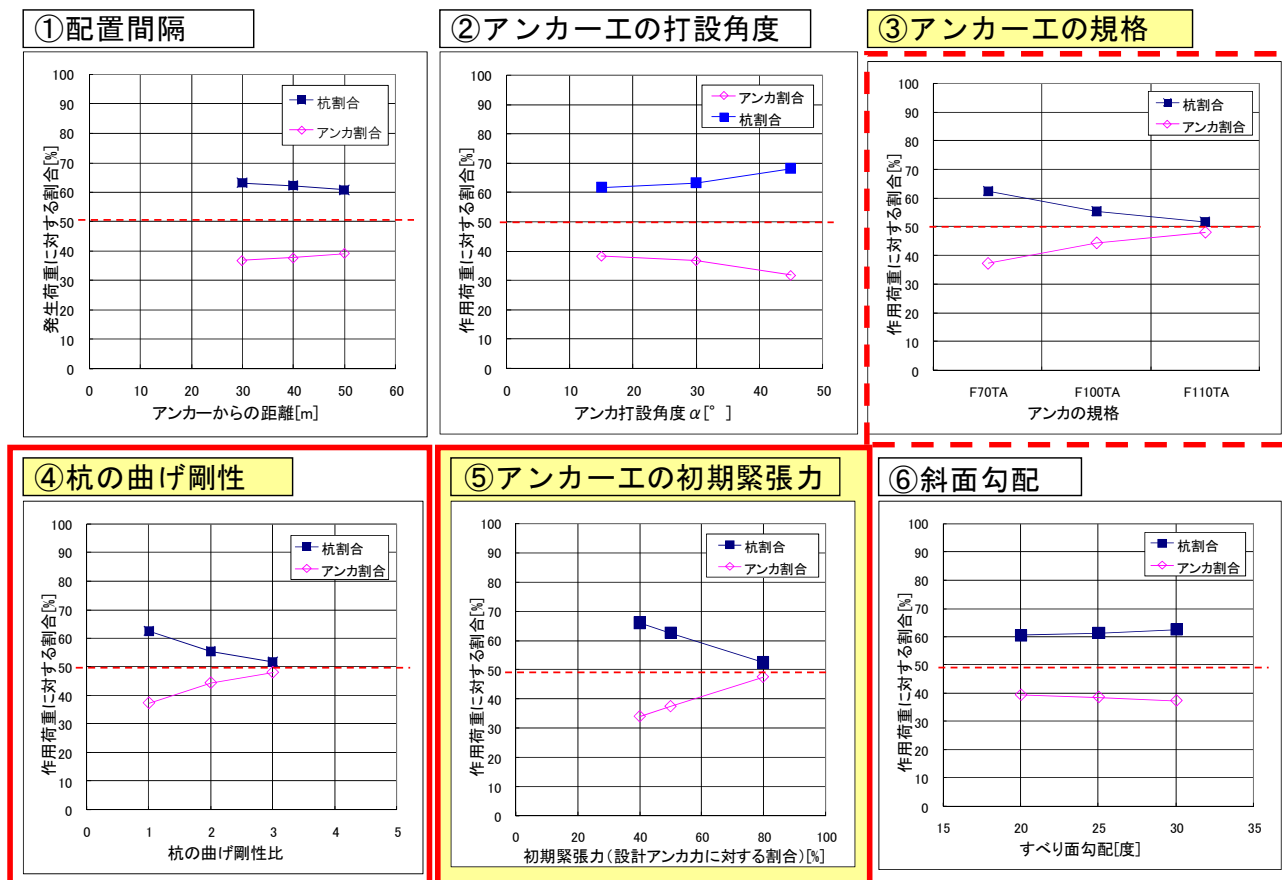


図-22 パラメータ解析の結果

定などにより、最も効果的な負担割合となるように設計を修正することを提案する。

4. まとめ

本研究では、杭工とアンカー工を併用する場合の地すべり移動土塊に対する機能を評価し、合理的な設計手法の確立に資することを目的として検討を進めた。そのためにまず杭工とアンカー工を併用した事例を収集し、併用した理由や抑止力分担割合、その決定方法などについて整理した。次いで、アンカー工単独時の地すべり土塊に対する締付け機能を遠心力模型実験と FEM 解析により明らかにした。これらの検討を踏まえ、杭工とアンカー工を併用する場合についての遠心力模型実験と FEM 解析により、地すべり滑動時の荷重分担割合の変化を求め、また荷重分担割合に寄与度の高いパラメータを明らかにした。得られた主要な事項を以下に記す。

- (1)杭工とアンカー工を併用する事例分析の結果、併用した理由として「経済性」、「施工条件」、「杭谷側安定」、移動土塊重複」があり、必要抑止力分担割合は杭工>アンカー工とする事例が多い。
- (2)アンカー単独時の遠心力模型実験と FEM 解析の結果、すべり面に作用する締付け力の分布及び大きさは、アンカー頭部におけるすべり面までの深さやアンカーとすべり面のなす角度 (β) によって変化する。また締付け力のピークはアンカー頭部とすべり面の交点の間に発生する。
- (3)杭工とアンカー工を併用する場合遠心力模型実験と FEM 解析の結果、地すべり変位に伴う荷重の増加割合はアンカー工よりも杭工が大きい。
- (4)杭工とアンカー工を併用する場合、アンカーの初期緊張力が大きいほど杭工に作用する荷重は小さい。

ただしこの程度を定量的に評価するための検討が必要である。

(5)荷重分担割合に対して寄与度の高い要素は、アンカー工の初期緊張力、杭の曲げ剛性、アンカー工の規格であることがわかった。

本研究により杭工とアンカー工を併用する場合の地すべりに対する抑止機構や、荷重分担割合に対して寄与度の高い要素が明らかになった。今後の課題として、これらの結果を基に、杭工とアンカー工を併用する場合の設計手法を整理し、適用性を検証することが挙げられる。

参考文献

- 1) 藤沢和範、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、Vol.49, No.8, pp7-8、2007年8月
- 2) 藤澤和範、石井靖雄：「地すべり抑止杭工の機能および合理的設計に関する調査」、土木研究所終了課題報告書、2005年
- 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 (JGS4101-2000)、p118、(社)地盤工学会、2000年
- 4) (社)地盤工学会：「地盤工学・実務シリーズ4 グラウンドアンカー工法の調査・設計から施工まで」、p86、1997年
- 5) 国土交通省砂防部、(独)土木研究所：「地すべり防止技術指針及び同解説」、pp162-116、2008年4月
- 6) 窪塚大輔、石田孝司、藤沢和範：「地すべり対策に用いるグラウンドアンカーの締付け効果の評価」、土木技術資料、Vol.51, No.3, pp32-35、2009年3月

Determining the effect of complex control works on landslide movement and design of effective landslide control measures

Abstract : There are a few cases where combined use of pile works and anchor works for restraint works of landslides. But there are no standards of planning method in case of combined use. And restraint mechanisms under combined use are not cleared. This study seeks for the mechanisms and establishes the rational planning methods in case of combined use of restraint works. In this study, we evaluated the mechanisms and share ratio of restraint stress made use of FEM models which reproduced centrifuge model test. Then, we carried out parametric analysis to grasp what parameters are more effective for share ratio of restraint stress. And finally, we made the draft flowchart for planning of combined use of pile works and anchor works.

Keywords : restraint pile works, anchor works, complex control works, ratio of restraint stress