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

1. はじめに

現在、地すべり対策工の抑止工として最も多く 用いられているのは、グラウンドアンカー工(以 下「アンカー工」とする。)である。しかし、そ の抑止効果や配置などの決定方法については、理 論的な根拠が必ずしも明確ではなく、すべり面形 状や地形・地質、施工上の制約及び経済性などか ら技術者が経験的に判断している。

アンカー工の抑止効果には、引止め効果と締付 け効果がある。引止め効果とは、地すべり土塊が すべり面に沿って滑動しようとした時に、アン カーのすべり面の接線方向の分力によって、土塊 を引止めようとするものである。締付け効果は、 アンカーの緊張力によりすべり面に作用する垂直 方向の分力がすべり面のせん断強さを増大させ、 すべり滑動力に抵抗するというものである。

近年の設計手法では、経済性の観点から地盤状 況に応じて両機能を考慮することを基本としてい る。しかし、締付け効果は地すべり土塊の土質条 件やすべり面深度などの影響を受けると考えられ、 設計上で見込んだ締付け効果が十分には、発揮さ れていない可能性がある。具体的には、アンカー に緊張力を作用させた時に地すべり土塊が圧縮変 形する粘性土や崩積土、亀裂に富んだ風化岩から なるような場合、また、すべり面深度が深い場合 には、設計上見込んだ締付け効果を期待すること は難しいとの見解が示されている¹⁾。しかしなが ら、現在の設計方法は、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。

そこで、アンカーの締付け効果の定量的評価を 目的とし、アンカーによる地すべり対策を模した 遠心力模型実験を行うと共に、実験結果に基づき アンカーの抑止効果を表現できるFEM解析モデ ルを構築した。その上で、すべり面上に作用する 垂直応力に着目したアンカーの締付け効果の評価 方法の検討を行ったので報告する。

The evaluation of the clamping effect of ground anchors on deep seated landslides

窪塚大輔* 石田孝司** 藤澤和範***

2. 遠心力模型実験

2.1 実験方法

実験は、アンカーエを模した模型(図-1)を遠 心力装置にて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 背面の載荷板をジャッキにより押し出すことで土 塊を滑動させた。実験中の計測項目は、すべり面 上の土圧(応力)とせん断応力、地すべり土塊の 変位、載荷板に作用する荷重、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、受圧板、アンカー緊張装置から 成る。アンカーの材料は直径 φ 1.5mmの鋼より 線を用いた。受圧板は40mm×40mmのアルミ製 とし上端に荷重計を設置した。アンカーの緊張装 置は、基盤内で5本のアンカーを一体化して引っ 張る構造とした。



図-1 遠心力模型実験諸元値及び計測機器配置

実験ケースは、すべり面深度(図-1参照)及び、 アンカーとすべり面の成す角度 β (以下、「 β 」 とする。)を変化させた4ケース(表-1)で実施し た。なお、表-1を含めて以降に示す数値は全て実 物大換算値を用いる。

ケース	すべり面まで の深度	β	アンカー長			
			すべり面まで	固定端まで (自由長)	初期緊張力	グラフ凡例 (図-2)
	(m)	(°)	(m)	(m)	(kN)	
1	14.4	60	16.0	41.3	851.2	
2	14.4	40	21.0	37.0	1030.4	
3	9.6	60	10.0	35.3	1075.2	•
4	9.6	40	15.0	30.1	1625.6	•

表-1 実験ケース一覧表

2.2 実験結果

(1) 初期緊張力導入時の垂直応力増分

表・1に記載する初期緊張力を導入した際の、す べり面に作用する垂直応力増分を図・2に示す。こ こでの垂直応力増分とはアンカーにより土塊を締 付け、すべり面上に作用した垂直応力から土塊自 重による応力を減じたものである。なお、図・2を 含め以降に示すグラフは、縦軸にすべり面上に作 用する垂直応力増分、横軸にケース③、④の法尻 の0点からすべり面に沿った長さ(図・1)を示す。 また、アンカーが地表面と交わる点を「A点」、 すべり面と交わる点を「B点」とした位置をすべ り面上に投影して示す。



垂直応力増分の応力分布傾向としては、1) 垂 直応力増分のピークは、アンカーがすべり面と交 わるB点付近ではなく、A点とB点の間で発生し ている。2) すべり面深度が同じ場合、垂直応力 増分のピーク値は $\beta = 60^\circ > \beta = 40^\circ$ ($\ge > \blacksquare$ 、 $\bigcirc > \bigcirc$) の傾向を示した。3) β が40°の場合は、 すべり面深度が浅くなっても垂直応力増分のピー ク値は大きくならなかった。これはケース④にお ける、すべり面及び土塊側面の抵抗のバラツキが 要因と考えられた。4) ケース②、③、④におい ては、法尻付近の垂直応力増分はマイナスを示し た。これについては3.2(2)で後述する。

(2) すべりを発生させた場合の垂直応力増分

載荷板を押し出す荷重と垂直応力増分の関係は、 載荷板の移動量が0.1m程度までは、載荷荷重が 大きくなれば、垂直応力増分が大きくなる相関関 係を示した。しかし、さらに荷重を載荷し続ける と、アンカーによるすべりに対する抵抗が大きく なるが、載荷荷重がその抵抗力を超えると、土塊 にすべりが発生した。その結果、垂直応力増分の 値は増加と減少を交互に繰り返すという複雑なも のとなった。

3. 遠心力模型実験のFEM再現解析

3.1 再現解析の条件設定

(1) FEM解析モデルのメッシュ

遠心力模型実験を再現する解析モデル(ケース ①、②)のメッシュ図を図-3に示す。再現解析で は実験模型の奥行き方向の対称性を利用して、ア ンカーを含むアンカー打設間隔の半分の領域をモ デル化してメッシュを作成した(図-4)。モデル は地すべり土塊、アンカー、受圧板からなる。主 要な物性値については表-2に示す。

表-2 物性值一覧表



-33-

(2) 解析方法

解析方法は①自重解析、②初期緊張力の導入、 ③すべりの発生を順に行うステップ解析とした。

3.2 FEM解析結果

(1)実験時の初期緊張力導入時の再現解析結果 実験時の初期緊張力を導入した際の、すべり面 に作用する垂直応力増分を図-5に示す。



実験結果(図-2)と再現解析結果を比較すると、 再現解析結果は実験結果の垂直応力増分の分布傾 向を概ね再現することができている。

(2) 同じ初期緊張力条件での解析結果

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、各ケースの初期緊 張力を同じ値(640kN)に設定し解析を行った。 解析後のすべり面に作用する垂直応力増分を図-6 に示す。_____



この解析結果と実験結果2.2(1)の1)~4) を比較すると、1)、2)、4)の項目については実 験結果と同様な傾向を示した。しかし、3)で β が同じ場合、FEM解析では、すべり面深度が浅 くなればアンカーの効果により垂直応力増分の ピーク値が大きくなる傾向($\bigcirc > \blacksquare$ 、 $\bigcirc > \blacksquare$)を 示した。

また、4)の結果における法尻付近の垂直応力

増分がマイナスを示すことについては、アンカー の緊張により、地表面付近の土塊が圧縮され、そ の周辺の土塊が側方へ広がり盛り上がったため、 垂直応力が低下したと考えられた。

なお、全体的な解析結果の垂直応力増分の分布 は、初期緊張力を実験値より小さく設定したこと により、値は全体的に小さくなったが、分布傾向 は実験結果と変化はなく、初期緊張力を適切に設 定することにより、実験結果の再現が概ね可能で あると考えた。

以上より、このFEM解析モデルは実験結果を 概ね再現でき、アンカーの締付け効果は、すべり 面に作用する垂直応力増分として評価できるもの と考えられた。

(3) 締付け効果の検証

ここでは、同じ初期緊張力を導入した際のすべ り面に作用する締付け力について簡便法で算定さ れるもの(図-3-①)とFEM解析で算定されるも の(図-3-②)を下記の式に従って比較検証した。

締付け割合 =
$$\frac{2}{1}$$
×100 = $\frac{\sum(\sigma n \times A)}{T \times \sin \beta}$ ×100

ここで、σn: すべり面に作用する垂直応力、 A: すべり面を構成する各ジョイント要素の面積、 T: アンカーの初期緊張力、β: アンカーとすべ り面のなす角とする。

ケース	初期緊張力	β	①:アンカー 締付け力	②:すべり面の締付けカ	締付け割合 ②/①×100
	(kN)	(°)	(kN)	(kN)	(%)
1	640.00	60	554.26	554.21	99.99
2	640.00	40	411.38	411.42	100.01
3	640.00	60	554.26	554.20	99.99
4	640.00	40	411.38	411.41	100.01

表-3 締付け効果の比較検証結果

表・3より、今回のケースの様に、すべり面が平 面である場合は、FEM解析によりアンカーの締 付け力をすべり面に作用する垂直応力の合計とし て求めた値は、簡便法で算定される荷重とほぼ同 等であることが分かる。

(4) すべりを発生させた場合の解析結果

2.2 (2) で述べたように、すべり発生後の実験 結果は複雑であり、FEM解析での再現は困難で あった。そこで、ここでの解析では実験結果の再 現ではなく、土塊のすべりによってアンカーの締 付け効果が、すべり面に作用する垂直応力増分に どのような影響を及ぼすかを検討した。

ここでは、これまでの4ケースの他にケース③ のモデルにおいてアンカー無しの状態ですべりを 発生させたケースを加えて比較した。

載荷板移動量が0.1m及び0.3m時のすべり面に 作用する垂直応力増分をそれぞれ図-7、8に示す。



図-7より、載荷板の移動量が0.1mのケースで は、垂直応力増分の分布傾向はA点の付近でやや 値が大きくなっているが、アンカー無しのケース でも同じような分布を示していることから、アン カーの影響は現れていないと考えられる。

載荷板の移動量0.3mのケース(図-8)では、 アンカー有りのケースで垂直応力増分が増加して いる。一方、アンカー無しのケースは垂直応力増 分の増加が殆ど見られない。両者の比較から、移 動量が増すことによって、アンカーの締付け効果 が発揮されて、すべり面に作用する垂直応力増分 が増加したことが考えられる。

4. まとめ

アンカー工を模した遠心力模型実験の結果を概 ね再現するFEM解析モデルを作成し、アンカー が地すべり土塊を締付けることにより、すべり面 に与える効果を検討した。結果を以下にまとめる。

- 初期緊張力導入時及びすべりを発生させた場 合のアンカーの締付け効果は、すべり面に作 用する垂直応力増分として評価できる。
- すべり面深度が同じ状態では、初期緊張力導 入時及びすべりを発生させた場合のすべり面 に作用する垂直応力増分のピーク値は、アン カーとすべり面の成す角度βが大きい方が大 きい。
- ③ 初期緊張力導入時及びすべりを発生させた場 合のすべり面に作用する垂直応力増分の分布 は、一様に分布するのではなく釣鐘状に分布 する。また、その垂直応力増分のピークの発 生位置はアンカーが地表面と交わる点とすべ り面と交わる点の間にある。
- ④ すべり面が平面の場合、初期緊張力導入時、 FEM解析によりアンカー締付け力をすべり面 に作用する垂直応力の合計として求めた値は、 簡便法で算定される荷重とほぼ同等である。

今回の実験及び解析は、限られた条件下で実施 した。今後はすべり面形状などを変化させたケー スやアンカーを複数段設置した場合のすべり面に 作用する垂直応力の検討を行い、アンカーの締付 け効果を定量的に評価し、設計手法に反映させた いと考えている。

参考文献

1) 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、pp.113、(社)全国治水砂 防協会、2008



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 交流研究員 -4 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 主任研究員 Koji ISHIDA



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 上席研究員 チーム Kazunori FUJISAWA