

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。

表-1 実験ケース一覧表

ケース	すべり面までの深度 (m)	β (°)	アンカー長		初期緊張力 (kN)	グラフ凡例 (図-2)
			すべり面まで	固定端まで (自由長)		
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	●

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。

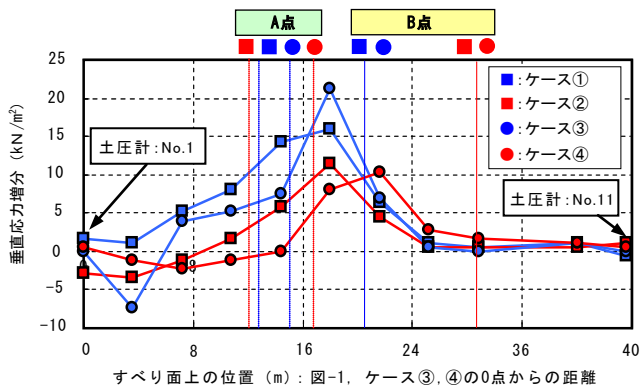


図-2 すべり面に作用する垂直応力増分

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 $\beta=60^\circ > \beta=40^\circ$ （■>■、●>●）の傾向を示した。3) β が 40° の場合は、すべり面深度が浅く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 物性値一覧表

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/m²) 4.4×10^4	(kN/m²) 6.9×10^7	(kN/m²) 1.9×10^8	(kN/m²) 0.0	(°) 28.4	(kN/m³) 5,000

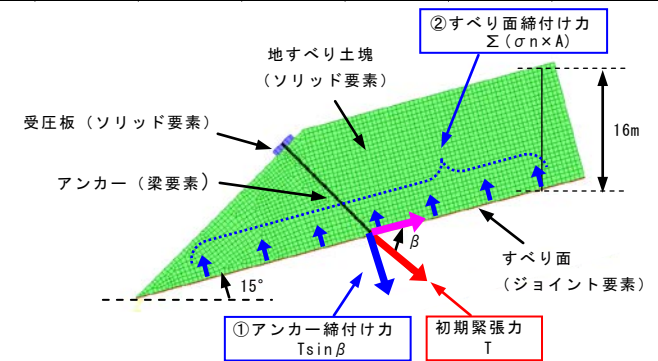


図-3 解析モデルのメッシュ図（ケース①、②）

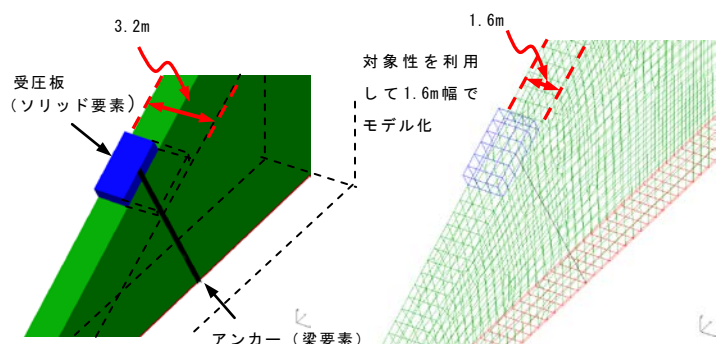


図-4 受圧板付近の解析モデル

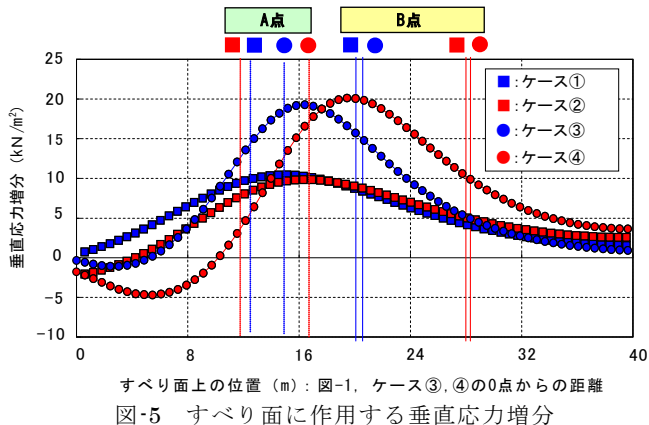
(2) 解析方法

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

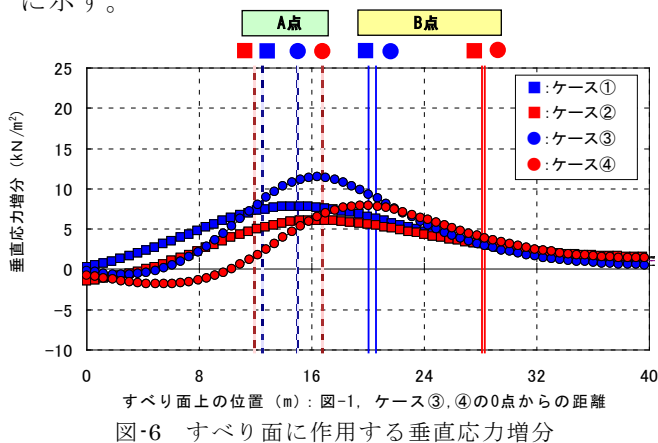
実験時の初期緊張力を導入した際の、すべり面に作用する垂直応力増分を図-5に示す。



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 (● > ■、● > ■) 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。

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

ここで、 σ_n : 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。

表-3 締付け効果の比較検証結果

ケース	初期緊張力 (kN)	β (°)	①:アンカー 締付け力 (kN)	②:すべり面 の締付け力 (kN)	締付け割合 ②/①×100 (%)
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。

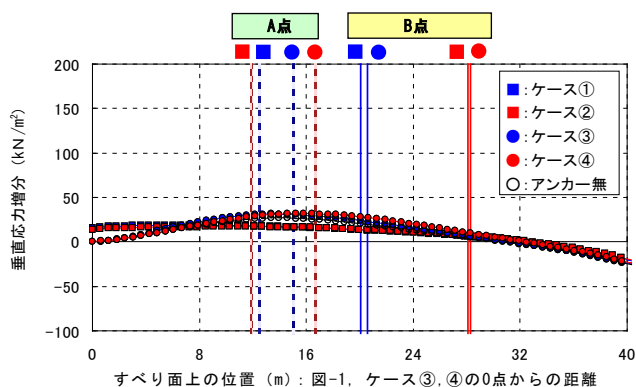


図-7 すべり面上に作用する垂直応力増分 (0.1m)

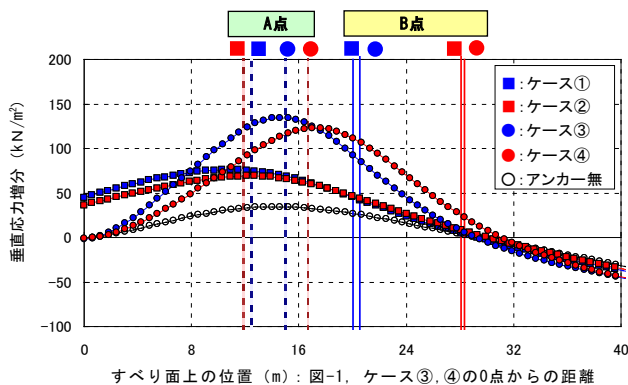


図-8 すべり面上に作用する垂直応力増分 (0.3m)

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。

- ① 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。
- ② 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

窪塚大輔*



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