# グラウンドアンカーの荷重分布を考慮した

# 3次元FEMによる地すべり安定性評価に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 3～令 5
担当チーム：地すべりチーム
研究担当者：杉本宏之、鷲尾洋一、神山嬢子

【要旨】
地すべり対策として施工されたグラウンドアンカーは、地すべりの再滑動などにより荷重が増加する場合がある。この時、対策工としてアンカーの増打ち等が行われるが、アンカーに加わる荷重の面的な分布を考慮した地すべりの安定性評価手法は定まっておらず、これらの確立が求められている。本課題では３次元 FEM 解析を用いてアンカー荷重の分布に偏りが生じる要因について検討し、地すべり側部の層厚、側部の強度、そして地すべり土塊の横断形状が荷重分布に大きく影響することが明らかになった。また、３次元的なアンカー荷重分布の傾向を概ね再現し、追加対策後の３次元的な荷重分布の予測手法確立に必要な知見が得られた。

キーワード：地すべり，グラウンドアンカー，荷重分布，３次元弾塑性 FEM 解析

## 1. はじめに

グラウンドアンカー（以下、単にアンカー）は、地すべり対策の抑止工等に広く用いられている。地すべり斜面においてアンカーに変状が発生した場合、アンカー荷重計測や増打ち等の追加対策が行われるが、一度の対策で荷重増加が収束せず、対応が長期化する事例も少なくない[1)]。Aki-Mos 等の荷重計測データの蓄積により、地すべりによるアンカー荷重増加の実態が明らかになってきたが、地すべり中央部と周辺部で荷重増加の差が大きい事例が少なくないことが分かってきた[2)]。このような事例の場合、荷重分布を考慮した計画が可能となれば、より効率的な対策となると考えられる。既往研究[3)]では２次元弾塑性 FEM（有限要素法）を用いた追加対策後のアンカー荷重予測手法が提案されているが、荷重分布を考慮するためには、既往研究の３次元化を図る必要がある。本課題では、追加対策後の３次元的なアンカー荷重予測手法の確立を目指し、地すべり斜面における荷重分布メカニズムの分析・把握[4)5)]を行うとともに、荷重増加がみられた地すべりを事例として３次元的なアンカー荷重分布の再現[6)]を行ったものである。

## 2. アンカー荷重分布メカニズムの分析・把握

本研究では、アンカー荷重分布に偏りが生じる要因について検討するため、単純化した地すべりモデルを用いた３次元 FEM 感度解析を行った。まず初めに、地すべり斜面における荷重分布の要因分析として、地すべり滑動初期段階の変位の分布と物性値がすべり土塊の変位に与える影響の検討を行った。続いて、アンカー荷重分布の要因分析として、地すべりの物性・形状がアンカー荷重の分布に与える影響を検討した。

### 2.1 地すべり斜面における荷重分布の要因分析

#### 2.1.1 解析モデル

地すべり規模・岩盤物性値の統計資料から地すべり規模の平均値・最頻値を考慮して、図-1 に示す本検討の基準となる地すべりモデルを作成した。地すべりモデルは基盤、すべり面、地すべり土塊から構成されている。各構成要素の物性値を表-1 に示す。

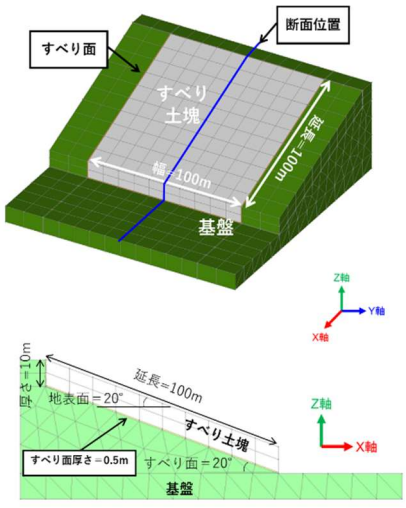


図-1 地すべりモデル

表-1　地すべり荷重解析モデル 物性値

| | 単位体積重量γ (kN/m3) | ヤング率E (kN/m2) | ポアソン比ν | 粘着力C (kN/m2) | 内部摩擦角φ |
|---|---|---|---|---|---|
| すべり土塊 | 18.0 | $1.0\times10^{4}$ | 0.35 | | |
| すべり面 | | $1.0\times10^{3}$ | 0.46 | 25.0 | 15.0 |
| 基盤 | | $1.0\times10^{5}$ | 0.25 | | |

### 2.1.2　解析方法

地すべり土塊の変形に影響する物性値として、E:地すべり土塊のヤング係数、ν:地すべり土塊のポアソン比、c:すべり面の粘着力、φ:すべり面の内部摩擦角を想定した。これら地盤パラメータの内、1つを変化させる事で、各物性値による地すべり土塊の変位に対する影響を検討した。また、今回物性値以外の要素として延長、厚さといったすべり土塊形状を変えたモデルの解析も行った。地すべり土塊の解析の対象とするアンカー工は末端部に配置されるため、評価範囲は地すべり土塊の末端断面とした。また、図-2のように各地すべりモデルを変位量の段彩図表示にすることで、すべり土塊の末端断面の変位量分布を示す。各形状・物性値による地すべり土塊の変位に対する影響は最大変位量、変位量分布、土塊ひずみの3点で評価を行った。ここで土塊ひずみは、図-3で示す土塊中央部－側部間の変位量差と距離から地すべり土塊の横断・縦断方向のすべり土塊のひずみ具合（以下、土塊ひずみ）を表現する。本研究では、物性値を変えた時に見られる横断・縦断方向への影響を検討する。

$$\text{土塊ひずみ}=\frac{\text{中央部(mm)}\quad-\quad\text{側部(地表面部)(mm)}}{\text{節点間の距離(mm)}}$$

### 2.1.3　研究結果

図-4に各地すべりモデルの最大変位量と末端断面の変位量段彩図の一例を示す。図-5に土塊ひずみと最大変位量の相関を示す。研究結果として以下の知見を得ることが出来た。

① すべり土塊滑動の初期段階では変位量分布はすべり面付近に集約する傾向があり、最大変位量の増加に伴い縦断方向へ広がる傾向がある。

② ヤング率以外の地盤パラメータは、最大変位量が近ければ、近い変位量分布を示す。

③ 変動させる地盤パラメータがヤング率の場合、上記とは逆の傾向を示し、最大変位量の増加に伴い変位量分布はすべり面付近へ集約する。

④ 土塊ひずみは横断方向よりも、縦断方向の方が大きくなる傾向にある。

⑤ 横断方向の土塊ひずみの推移は各地盤パラメータ共に似た傾向を示すが、縦断方向はヤング率が他の地盤パラメータよりも大きい増加率を示す

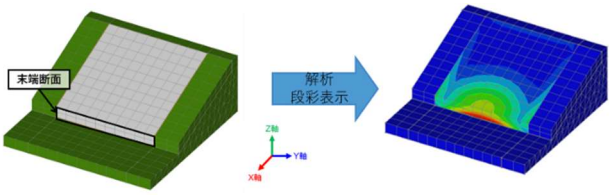


図-2　末端断面位置および段彩表

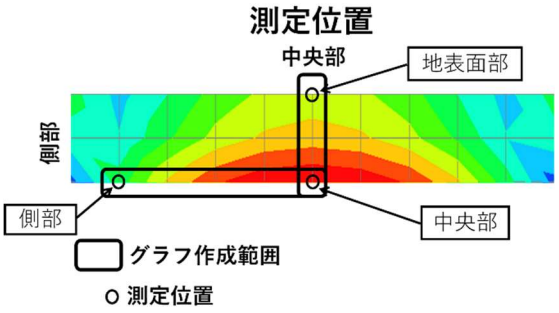


図-3　土塊ひずみ　測定位置

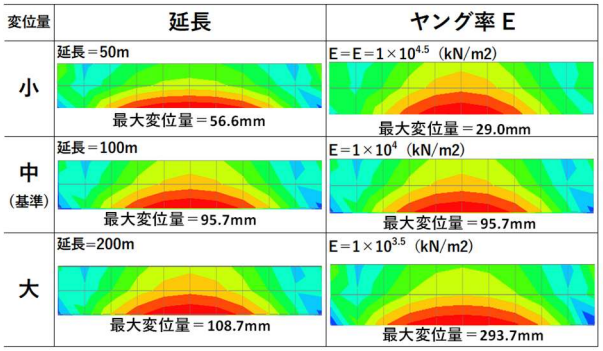


図-4 末端断面 段彩図

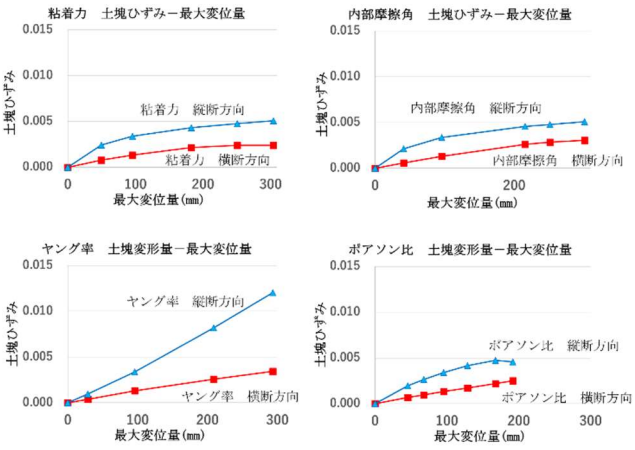


図-5　土塊ひずみと各種パラメータ

## 2.2　アンカー荷重分布の要因分析

### 2.2.1　解析モデル

解析領域とモデル構成を図-6 に示す。解析領域は、対称性を利用し地すべりの半分のみとした。物性値については表-2 の値を用いた。アンカーは節点集中荷重と棒要素によってモデル化した。アンカー諸元を表-3 に示す。

### 2.2.2　解析ステップ

計算は図-7 に示す二段階のステージに分けた。ステージ 1 においては計算される応力のみを初期応力としてステージ 2 に引き継ぎ、変位は消去した。ステージ 2 では、底部すべり面のせん断強度を低減することで、地すべり土塊に変形を生じさせた。このとき棒要素が引き伸ばされることで生じる引張り力を、アンカー荷重の増分とみなした。

### 2.2.3　解析方法

本研究では、解析ケースごとにモデルの物性値や形状を変化させることで、それらの要因が地すべり土塊の変形とアンカー荷重分布に与える影響を検討した。解析ケースを表-4 に示す。

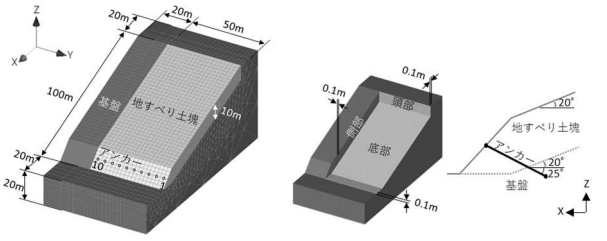


図-6 アンカー荷重解析モデル

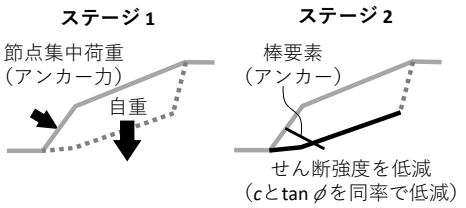


図-7　アンカー荷重解析ステージ

表-2　アンカー荷重解析モデル 物性値

| 区分 | 要素 | 構成則 | 方式 | 単位体積重量 (kN/m³) | 変形係数 E (MPa) | ポアソン比 ν (-) | 粘着力 c (kPa) | 内部摩擦角 ϕ (度) | ダイレイタンシー角 (度) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 地すべり土塊 | 立体 | 弾性 | 線形弾性 | 18 | 100 | 0.25 | - | - | - |
| 基盤 | 立体 | 弾性 | 線形弾性 | 18 | 200 | 0.20 | - | - | - |
| 底部すべり面 | 立体 | 弾完全塑性 | MC-DP | 18 | 2 | 0.46 | 20.0 | 20.0 | 0.0 |
| 側部すべり面 | 立体 | 弾完全塑性 | MC-DP | 18 | 15 | 0.35 | 20.0 | 30.0 | 0.0 |
| 頭部すべり面 | 立体 | 弾完全塑性 | MC-DP | 0 | 0.01 | 0.00 | 0.1 | 0.0 | 0.0 |

表-3　アンカー諸元

| 区分 | 要素 | 構成則 | 方式 | 単位体積重量 (kN/m³) | テンドン自由長 (m) | 変形係数 E (MPa) | 断面積 (mm²) | 傾角 (度) | 横断方向間隔 (m) | ステージ1アンカー力 (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| アンカー | 棒 | 弾性 | 線形弾性 | 0 | 12 | 195,000 | 987.1 | 25 | 5 | 1,000 |

表-4　解析ケース

| ケース | 側部層厚 | 側部すべり面 せん断強度 | 地すべり土塊 物性 | 地すべり土塊 横断形状 | 底部すべり面 せん断強度(低減後) |
|---|---|---|---|---|---|
| ⓪ | 10.0m | c = 20.0 kPa, ϕ= 30.0° | E = 100 MPa, ν=0.25 | A | c =13.3kPa, ϕ=13.6° |
| ① | 2.5m<br>0.1m | c = 20.0 kPa, ϕ= 30.0° | E = 100 MPa, ν=0.25 | A | c =13.3kPa, ϕ=13.6° |
| ② | 10.0m | c = 3.2 kPa, ϕ= 5.3°<br>c = 1.0 kPa, ϕ= 1.7° | E = 100 MPa, ν=0.25 | A | c =13.3kPa, ϕ=13.6° |
| ③ | 10.0m | c = 20.0 kPa, ϕ= 30.0° | E = 200 MPa, ν=0.20<br>E = 20 MPa, ν=0.35 | A | c =13.3kPa, ϕ=13.6° |
| ④ | - | - | E = 100 MPa, ν=0.25 | B<br>C<br>D | c =16.0kPa, ϕ=16.2° |

## 2.3　研究結果

計算結果としてアンカー荷重分布を図-8 に示す。アンカー荷重の増分はそれぞれ解析値を各ケースの最大値で割って正規化している。図-8 のケース①から、側部の層厚次第でアンカー緊張力分布が大きく異なることが分かる。側部が厚いほど、アンカー緊張力の増加は中央に偏った分布となった。図-8 のケース②、ケース④においても同様にアンカー緊張力分布への大きな影響がみられた。それぞれ、側部の強度が大きいほど、土塊の層厚に偏りがあるほど、アンカー緊張力の増加は中央に偏った分布となった。対して、地すべり土塊の物性（硬さ）を変化させた場合は図-8 のケース③に示すように、アンカー緊張力の横断方向分布への影響は小さかった。以上、各要因がアンカー緊張力分布へ与える影響の傾向についてまとめると表-5 のようになる。

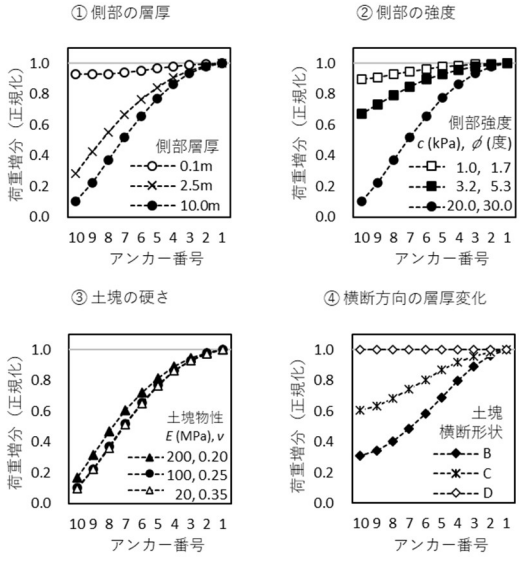


図-8　アンカー荷重分布

表-5　アンカー荷重への影響要因

| 要因 | 傾向 | | | 影響度 |
|---|---|---|---|---|
| 側部の層厚 | 厚 | ↔ | 薄 | 大 |
| 側部の強度 | 強 | ↔ | 弱 | 大 |
| 土塊の層厚 | 偏る | ↔ | 均一 | 大 |
| 土塊の硬さ | 軟 | ↔ | 硬 | 小 |
| アンカー荷重 | 偏る | ↔ | 均一 | |

## 3. 三次元 FEM 解析による荷重増加の再現

本研究では、対策後に荷重増加した事例をもとに、３次元 FEM 解析を行なった。ここで、３次元解析を実施する場合には、計算機能の制約から、２次元解析と比較して節点数を少なくした簡略化モデルが必要となる。本研究では、モデルの簡略化の影響について検討[7]を行い、工事に用いられた平面図、縦断図を元に作成したモデルを簡略化して解析を実施している。

### 3.1 研究方法

#### 3.1.1 解析モデル

本研究は、秋田県内の高速道路沿いの地すべりを対象に行った。解析対象地を図 9 に示す。当該地すべりは、道路建設工事に伴う掘削を誘因とする地すべりで、当地域の地質は新第三紀船川層に属する薄い砂岩・凝灰岩を伴う泥岩層からなり、切土法面に対して流れ盤構造であった。地すべり対策工としては主に切土工・アンカー工・集水井工が実施された。作成した 3 次元 FEM モデルを図-10 に示す。主な構成要素はソリッド要素としており、アンカーのみ棒要素で構成している。境界条件はモデルの側面、底面で設定しており、側面はそれぞれの面に対して垂直方向の変位、底面はすべての方向の変位を完全に抑制するような設定としている。また、すべりの層厚はボーリングコアの結果から 10cm としている。アンカーは当該地すべり範囲内には当時 371 本打設されていたが、本検討では 22 本に集約している。

#### 3.1.2 再現対象とする荷重増加イベント

当該地すべりはアンカー工を併用しながら切土掘削が進められていた。図-11 に、切土掘削及び抑え盛土に伴うアンカー荷重分布の推移を示す。最下段の掘削が中央部付近に差し掛かった時、地すべり土塊中央部を中心とするアンカーの荷重増加が発生した。その後、応急対策として抑え盛土を施工した結果、荷重増加は収束した。本検討ではこの掘削による荷重増加から抑え盛土施工後、荷重増加が収束した状況を再現する。

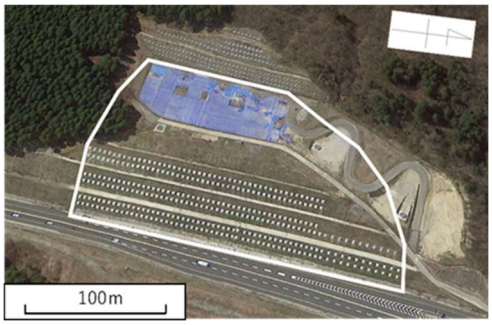


図-9 解析対象の地すべり

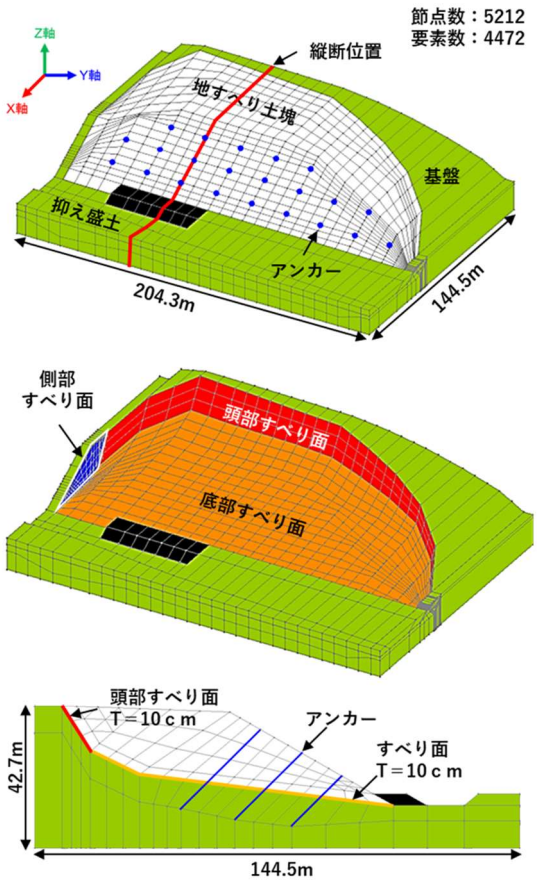


図-10 再現解析モデル

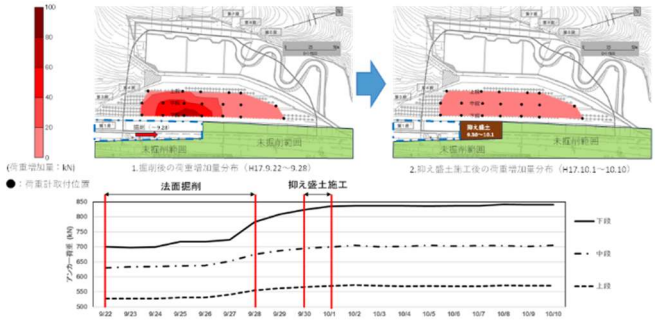


図-11 再現対象とする地すべりの変状イベント

#### 3.1.3 物性値

各要素に設定した物性値を表-6 に示す。構成則はすべり面以外を線形弾性モデル、すべり面を弾・完全塑性モデルとしている。

表-6 再現解析モデル 物性値

| | 要素タイプ | 構成側 | 単位体積重量 (kN/m3) | ヤング率 (kN/m2) | ポアソン比 | 内部摩擦角φ (°) | 粘着力C (kN/m2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 基盤 | ソリッド要素 | 線形弾性 | 18.5 | $1.0\times10^5$ | 0.25 | – | – |
| 地すべり土塊 | ソリッド要素 | 線形弾性 | 18.5 | $4.0\times10^4$ | 0.30 | – | – |
| 抑え盛土 | ソリッド要素 | 線形弾性 | 18.5 | $1.5\times10^4$ | 0.36 | – | – |
| 底部すべり面 | ソリッド要素 | 弾完全塑性 (MC-DP) | 18.5 | $1.0\times10^3$ | 0.46 | 変数 | 10.00 |
| 側部すべり面 | ソリッド要素 | 弾完全塑性 (MC-DP) | 18.5 | $1.0\times10^3$ | 0.46 | 変数 | 10.00 |
| 頭部すべり面 | ソリッド要素 | 弾完全塑性 (MC-DP) | 0 | $1.0\times10^3$ | 0 | 0.00 | 0.10 |
| アンカー | 棒要素 | 線形弾性 | – | $1.86\times10^8$ | – | – | – |

### 3.1.4　解析ステップ

本検討では、ステージ毎に釣り合い状態なるまで繰り返し計算を行い、そこで得られた変位・応力を次のステージへ引き継ぐマルチステージ解析で再現計算を実施している。本検討では対象地すべりの施工状況、アンカー荷重の増加状況を考慮して図-12 のように設定した。

### 3.1.5　荷重分布再現

本検討では、全 22 本の集約アンカーを対象に、それぞれの実測値・解析値から平均絶対誤差 MAE を算出し本検討における再現指標とした。具体的な算出方法は下記の通りである。

$$\text{平均絶対誤差}\quad \mathrm{MAE\ (kN)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|f_i - a_i|$$

$a_i$（実測値）

$$= \frac{\text{各集約アンカーにおける 9.22～10.10 間の荷重増加量}}{\text{各集約アンカーの集約本数}}$$

$$f_i\text{（解析値）} = \frac{\text{各集約アンカーの解析値}}{\text{各集約アンカーの集約本数}}$$

n = 集約アンカーの数

### 3.1.6　感度解析手法

本検討では、底部すべり面、側部すべり面の内部摩擦角Φを変数として、全 22 本の集約アンカー荷重の平均絶対誤差が最も小さくなるように、底部すべり面は 2.0 毎に、側部すべり面は 5.0 毎に感度解析的に変えることで双方のΦを求めた。

### 3.1.7　荷重増加量分布の段彩図作成方法

前項で得られた集約アンカーの荷重データから荷重増加量分布の段彩図を作成し、実測値と比較を行った。実測値のプロット位置は荷重計、解析値のプロット位置は集約アンカーの挿入位置としている。

### 3.2　研究結果

図-13 にて、集約アンカーにおける実測値、解析値を基に作成した荷重増加量分布の段彩図を示す。実測値の段彩図を基準に解析値段彩図を比較すると、掘削範囲を中心にアンカー荷重の増加量が大きくなっており、その周辺の側部のアンカー荷重が小さくなっていることから、概ねアンカー荷重分布の傾向は再現されている。相違点として、最大荷重増加を示すアンカーが異なっており、より南方でピークが発生している。また、掘削範囲以外のアンカー荷重の増加量は小さい。

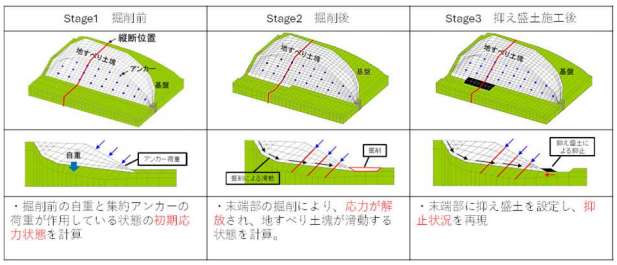


図-12 再現解析ステージ

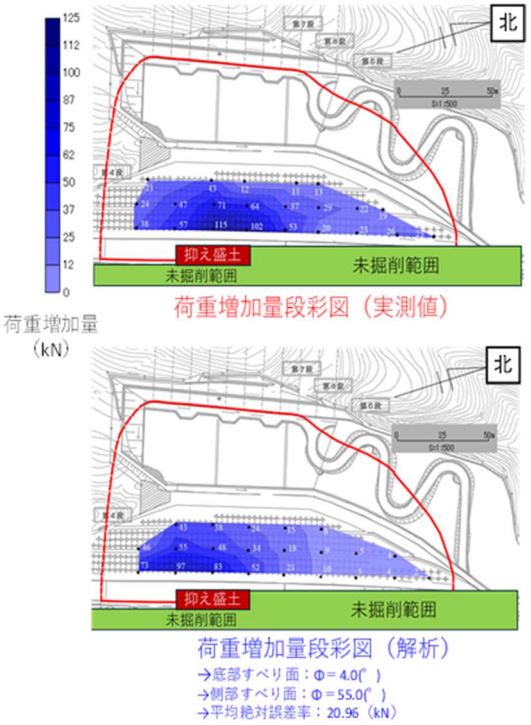


図-13 地すべり変状の再現結果

## 4. 考察

地すべりを模した単純なモデルの３次元 FEM 解析により、地すべりの物性・形状がアンカー緊張力の分布に与える影響を検討した結果、緊張力分布を大きく偏らせる要因は、地すべり側部の層厚、側部の強度、そして地すべり土塊の横断形状であることが分かった。このことから実際の地すべりにおけるアンカー荷重について３次元 FEM 解析を実施する際には、これら要因への留意が重要と考えられる。つまり、十分な調査をもとに側部や土塊の形状・性状を把握し地すべりをモデル化することが、アンカー緊張力分布を考慮するうえで重要と考えられる。次に、3 次元 FEM 解析を用いて、荷重増加量分布の再現検討を作成して実測値と比較した結果、荷重増加ピークの相違や、一部にて荷重増加量が小さいといった違いが見られたが、全体的な荷重増加量分布の傾向は概ね再現できた。今後は、本手法を他の地すべりへ適応した際の荷重増加量分布の

再現性の検証、追加対策後のアンカー荷重増加量分布の予測解析検討が今後の課題であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、３次元ＦＥM解析を用いて、追加対策後のアンカー荷重の分布に偏りが生じる要因について明らかにした。また、追加対策後にアンカー荷重の増加がみられた地すべりを事例として、３次元的なアンカー荷重分布の再現を行い、荷重分布の傾向を概ね再現することができた。これらの成果を踏まえ、引き続き解析事例を増やしていくことで、追加対策後の３次元的なアンカー荷重予測手法の確立が期待される。


## 謝辞

本研究の実施に当たり、国土交通省東北地方整備局秋田河川国道事務所よりデータ提供頂きました。ここに、関係者各位に深謝の意を表します。


## 参考文献


1) 杉本宏之・杉井良平・高木将行・神山嬢子： 地すべりによって荷重が増加するグラウンドアンカーへの対応, 土木技術資料、61 巻、9 号、pp. 12-15、2019 年 9 月
2) 国立研究開発法人土木研究所、一般社団法人日本アンカー協会、国立大学法人三重大学、株式会社高速道路総合技術研究所：グラウンドアンカー維持管理マニュアル、技報堂出版、株式会社、p.141、2020 年 9 月
3) 杉井良平・高木将行・藤平大・石井靖雄：FEM によるグラウンドアンカー荷重変動予測手法の検討－アンカー工が追加された地すべりにおける荷重予測、日本地すべり学会誌、Vol.55、No.5、p.243-252、2018 年 9 月
4) 東龍道・鷲尾洋一・松浦弘明・杉本宏之：地すべり土塊の変形とグラウンドアンカー荷重計測に関する事例研究, 第 61 回日本地すべり学会研究発表会講演集、2022 年 9 月
5) 松浦弘明・鷲尾洋一・東龍道・杉本宏之：三次元 FEM を用いた単純な地すべりモデルにおける変位量分布の検討, 第 61 回日本地すべり学会研究発表会講演集、2022 年 9 月
6) 松浦弘明・鷲尾洋一・東龍道・杉本宏之：三次元 FEM を用いた地すべり変状の再現検討、第 62 回日本地すべり学会研究発表会講演集、2023 年 9 月
7) 東龍道・鷲尾洋一・松浦弘明・杉本宏之：FEM を用いたグラウンドアンカー荷重解析におけるモデル簡略化の影響、第 62 回日本地すべり学会研究発表会講演集、2023 年 9 月

# RESEARCH ON LANDSLIDE STABILITY EVALUATION BY 3D FEM CONSIDERING LOAD DISTRIBUTION OF GROUND ANCHORS

Research Period: FY2022-2024
Research Team: Landslide Research Team,
Erosion and Sediment Control Research Group
Author: SUGIMOTO Hiroyuki
WASHIO Yoichi
KAMIYAMA Joko

Abstract：Ground anchors installed as landslide countermeasures sometimes experience an increase in load due to re-sliding of the landslide. However, there is no established method for evaluating landslide stability that takes into account the areal distribution of anchor loads. In this study, we examined the factors that cause uneven distribution of anchor loads using 3D FEM analysis, and found that the thickness of the landslide side, the strength of the side, and the cross-sectional shape of the landslide soil mass have a significant effect on the load distribution. In addition, the tendency of 3-dimensional anchor load distribution was generally reproduced, and the knowledge necessary for establishing a prediction method of 3-dimensional load distribution after additional countermeasures was obtained.

Keywords: Landslide, Ground Anchors, Load distribution, 3-D Elasto-Plastic FEM Analysis,