

# グラウンドアンカーの荷重増加が続く地すべりの安定性評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 2

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：杉本宏之、高木将行

## 【要旨】

地すべり対策で施工されるグラウンドアンカーの中には、施工後アンカーの荷重が増加するものがある。しかしアンカーの荷重増加への対応方法は体系的に定まっておらず手法の確立が求められている。本研究において、アンカー荷重増加の原因を調査し、対応方法の実態を整理した結果、アンカー工の施工後に地すべり活動などによってアンカーの荷重が増加した場合、対応が長期化する事例が少なくないことが明らかになった。また、地すべりによるアンカーの荷重増加について、二次元 FEM 解析によって追加対策後の荷重予測が可能であること及びその際のすべり面の  $c$  値、 $\phi$  値の設定手法を示した。

キーワード：地すべり、グラウンドアンカー、荷重増加、有限要素法

## 1. はじめに

グラウンドアンカー（以下「アンカー」という。）は、切土法面の安定化や地すべり対策の抑止工として広く用いられている。この中には、アンカーの荷重が増加し、斜面やアンカーに変状が発生するものがある。このような場合には、斜面の地質調査やアンカー荷重計測等を行った上で、地下水排除工や土工、アンカーの増設等の追加対策が行われる。現在のところ、地すべりによるアンカーの荷重増加への対応方法として体系的に定まったものはないため、アンカーの荷重計測結果等を考慮した地すべりの安定性評価手法や、荷重増加に対する対応手法の確立が求められる。

本課題は、地すべりによるアンカーの荷重増加について、計測に基づく計画的な対応方法の確立を目指し、アンカーの荷重増加の原因<sup>1)</sup>とその対応方法の実態調査<sup>2)</sup>及び二次元 FEM による追加対策後の荷重予測手法の検討<sup>3,4)</sup>を行ったものである。

## 2. アンカーの荷重増加の原因とその対応方法の実態

### 2. 1 アンカー荷重の増加原因

アンカーの荷重増加の原因について、既往文献や災害報告資料から事例を収集し、分析を行った<sup>1)</sup>。対象とした事例は、1988 年以降に施工され、荷重増加が確認された 26 事例である。内訳は、道路 17 事例、ダム 4 事例、河川 2 事例、その他 3 事例である。

図-1 に荷重増加の原因を示す。荷重増加の原因は、地すべりが最も多く、全体の約 7 割 (17 事例) だった。次に多いのは地盤膨張で、これは切土による応力解放や膨張性粘土鉱物の影響によって斜面が膨張したと推定されるものであった。

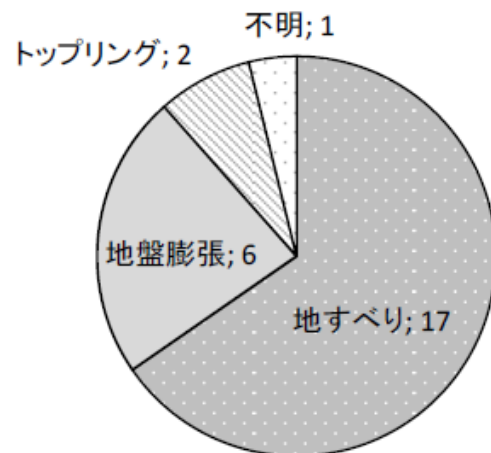


図-1 アンカーの荷重増加の原因

地すべりを原因とする 17 事例について、当初設定したすべり面と荷重増加の原因となった地すべりブロックのすべり面との関係を整理した結果、3 つのケースに分類された (図-2)。Case-1 は、当初設定した地すべりブロックよりも広い範囲の地すべりブロックの滑動により、アンカーの荷重が増加した事例であ

る。Case-2は、当初設定した地すべりブロックよりも深い地すべりブロックにアンカー定着部が位置していたために、深い地すべりブロックの滑動に伴いアンカーの荷重が増加した事例である。Case-3は、当初設定した地すべりブロックが、豪雨などにより地下水位が想定を超えて上昇したことや、土質強度定数( $c \cdot \phi$ )が低下したことにより滑動し、アンカーの荷重が増加したと推定される事例である。Case-1、Case-2の様に、当初設定していたものより大きな規模の地すべりが原因であることが多くなっていた。

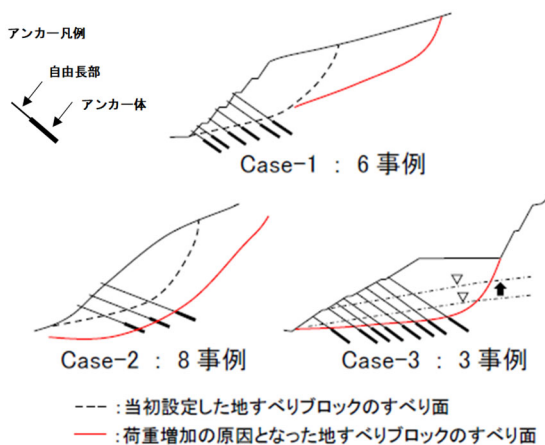


図-2 地すべりによる荷重増加の分類

## 2.2 アンカー荷重の増加への対応方法

アンカー荷重の増加への対応方法については、荷重増加後に追加対策を行った 17 事例について、既往文献等の資料に基づいて対策の実態を整理した<sup>2)</sup>。

図-3 に荷重増加に対する対応方法を示す。荷重増加の原因は3つのタイプに分類した。対策工を地下水排除工(横ボーリング工・集水井・排水トンネル)、土工(応急押え盛土・押え盛土・排土)、抑止工(アンカー・抑止杭・深礎杭)、荷重調整(除荷・再緊張)に区分し、実施した順に左から右に示した。なお、複数の対策工を組み合わせる場合は工種を縦に並べて示した。

設計時に対象とした地すべりブロックよりも大規模なブロックの滑動が原因の場合(Type-A)は、全ての事例において、抑制工(地下水排除工または土工)が施工されていた。一方、設計時に対象とした地すべりブロックの滑動が原因であった場合(Type-B)および地盤膨張・トップリングの場合(Type-C)は、事例番号 14 を除き、全ての事例で抑止工が施工されていた。また、一度の対策工で荷重増加の収束が確認された事例は少なく、荷重増加への対策工が繰り返行わ

れ、対応が長期化する事例が多かった。

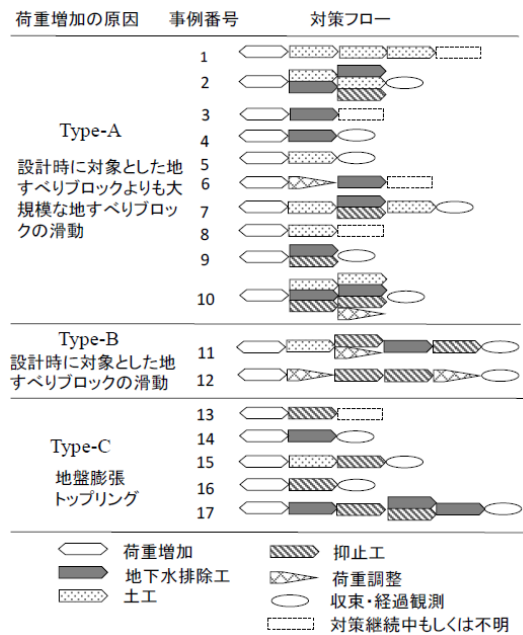


図-3 荷重増加に対する対応方法

## 3. FEM 解析による追加対策後の荷重予測

### 3.1 追加対策後の荷重予測手法の概要

荷重増加への対応として追加対策を行った場合、2.2 で述べたとおり、荷重増加への対策が繰り返行われ、対応が長期化する事例が少なくない。その理由の一つとして、追加対策後にアンカー荷重がどの程度変化するかを予測する方法がなく、段階的に対策を行わざるを得ないためと考えられる。そこで、効果的・効率的な追加対策の計画に資するよう、追加対策後の荷重を予測する手法について検討を行った。

追加対策後のアンカー荷重の予測には、2次元弾塑性 FEM を用いた<sup>3)</sup>。追加対策前の状態において、荷重計で計測されたアンカー荷重値に合うような再現解析により、すべり面の地盤パラメータ( $c$  値、 $\phi$  値)を逆算し、その地盤パラメータを用いて追加対策後のアンカー荷重予測値を計算した。その際の地盤パラメータの設定方法の検討及び、追加対策後のアンカー荷重予測値と実測値の比較を行った。

### 3.2 解析モデル

図-4 に解析対象とした地すべりの平面図を示す。解析対象とした地すべりは、道路建設工事に伴う掘削を誘因として発生し、その規模は最大幅約 200m、最大

長さ約 100m、最大層厚約 20m と推定されている。

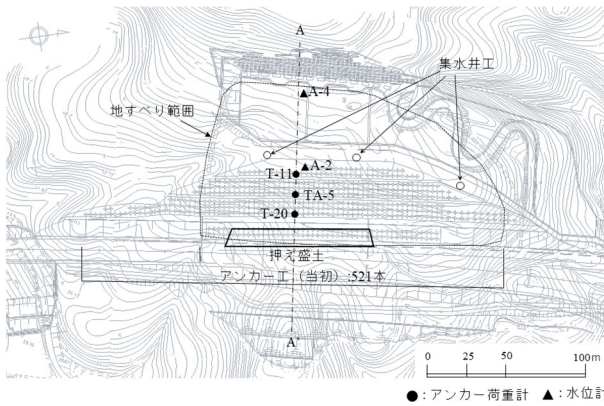


図-4 地すべりの平面図

解析対象とした地すべりの対策工の施工状況とアンカー荷重計測結果を図-5 に示す。掘削により増加した荷重は押え盛土の施工により 2005 年 10 月 4 日に収束した。その後、1 段目のり面の掘削とアンカー工施工により再度アンカー荷重が増加したが 2006 年 6 月 14 日時点で収束した。

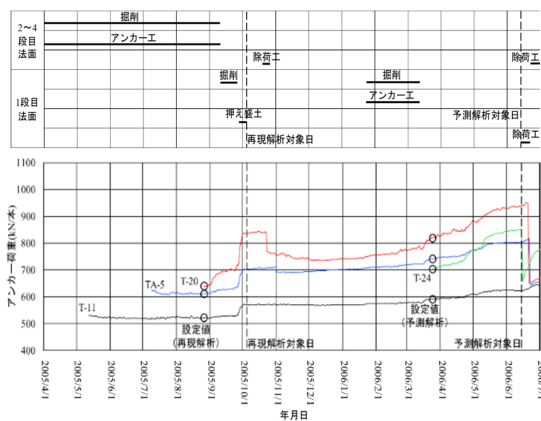


図-5 対策工施工状況とアンカーの荷重計測結果

図-6 と図-7 に解析モデルを示す。図-6 は 2005 年 10 月 4 日時点の押え盛土がある状態、図-7 は 2006 年 6 月 14 日時点の 1 段目のり面の抑え盛土をなくし、アンカーを 2 本追加した状態をモデル化したものである。

解析モデルは地盤とアンカー、地下水面、抑え盛土からなり、地盤は地すべり土塊、すべり面、基盤から、アンカーは受圧板、自由長部、アンカー体で構成される。表-1 にモデルの条件、表-2 に与えたパラメータを示す。すべり面の  $c$  値、 $\phi$  値以外のパラメータは一般値を参考に設定した。アンカーに作用する荷重は、受圧板にアンカー力に相当する荷重を節点集中荷重として水平方向と鉛直方向の分力に変換して設定した。

アンカー体に作用する荷重は、地表面の節点集中荷重に相当する荷重を設定し、荷重をアンカー体全体で受け持つものとし、アンカー体を構成する節点要素の数に分配して設定した。地下水による間隙水圧の影響は、等価節点力に換算しモデル化した。

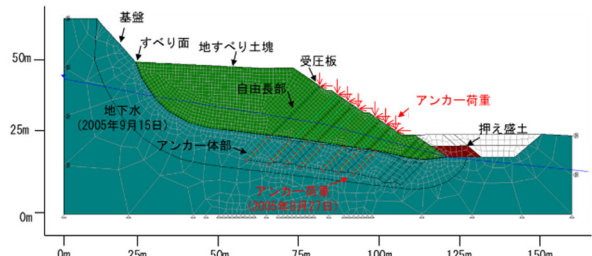


図-6 解析モデル2005年10月4日時点

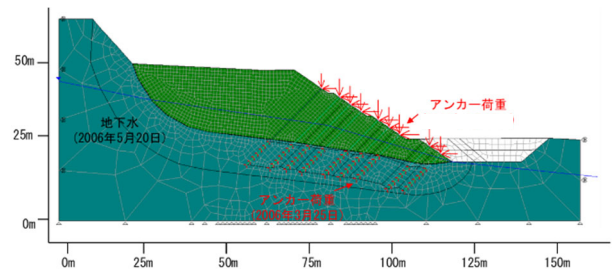


図-7 解析モデル2006年6月14日時点

表-1 モデルの条件

要素		要素タイプ	構成則
地盤	地すべり土塊	ソリッド要素	弾性体
	すべり面	ソリッド要素	弾塑性体
	基盤	ソリッド要素	弾性体
アンカー	受圧板	梁要素	弾性体
	自由長部	棒要素	弾性体
	アンカー体	梁要素	弾性体

表-2 与えたパラメータ

要素		単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比
地盤	地すべり土塊	18.5	0.30
	すべり面	18.5	0.46
	基盤	18.5	0.25

要素		単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	断面積 (m <sup>2</sup> )
アンカー	受圧板	77.0	$2.0 \times 10^8$	$1.1 \times 10^{-1}$
	自由長部 (タイプ-1)	77.0	$1.9 \times 10^8$	$1.8 \times 10^{-4}$
	自由長部 (タイプ-2)	77.0	$1.9 \times 10^8$	$2.3 \times 10^{-4}$
	アンカー体	22.5	$2.2 \times 10^7$	$4.8 \times 10^{-3}$

※自由長部 (タイプ-1) は、最上段のアンカーと増設されたアンカーであり、自由長部 (タイプ-2) は、それ以外のアンカーである。

### 3.3 再現解析によるパラメータ逆算及び予測解析

再現解析は図-6 のモデルによって、再現解析対象日 (2005 年 10 月 4 日) における荷重計による計測荷重を再現できるすべり面の  $c$  値、 $\phi$  値を探索した。地

下水位は直近の最高水位とした。

すべり面の c 値、φ 値の探索は、すべり面の c 値、φ 値を変化させ、次の式で計算する誤差率平均が 0 となる組み合わせを求めた。

$$\text{誤差率平均 (\%)} = \frac{\text{対象アンカー荷重の誤差率の合計}}{\text{対象アンカーの数}}$$

$$\text{対象アンカー荷重の誤差率 (\%)} = \frac{\text{解析値} - \text{実測値}}{\text{実測値}} \times 100$$

予測解析では、追加対策後の予測解析対象日（2006年6月14日）のアンカー荷重計を計算した。予測解析は後に示す c-φ 関係図（図-9）から c 値、φ 値の組み合わせを 5 ケース選定し、追加対策後の荷重を予測した。地下水位は直近の最高水位とした。

### 3.4 解析結果

再現解析の結果の例として、c = 20kN/m<sup>2</sup> の時のアンカー荷重値の計算結果を図-8 に示す。φ の値の大きさに応じて、アンカー荷重の解析値は変化し、φ 値 = 8~9° の時に誤差率平均が 0% となる（表-3）。このように、誤差率平均が 0 となる φ 値を、c 値を段階的に変化させて算出し、c-φ 関係図にプロットしたところ、概ね線形の関係がみられた（図-9）。

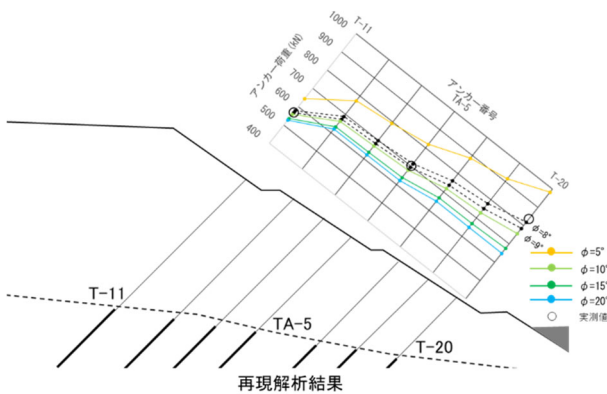


図-8 地盤パラメータの設定 (c = 20kN/m<sup>2</sup>)

表-3 再現解析結果 (誤差率平均)

φ (°)	誤差率平均
5	15.8
8	0.4%
9	-2.5%
10	-4.9%
15	-11.4%
20	-13.7%

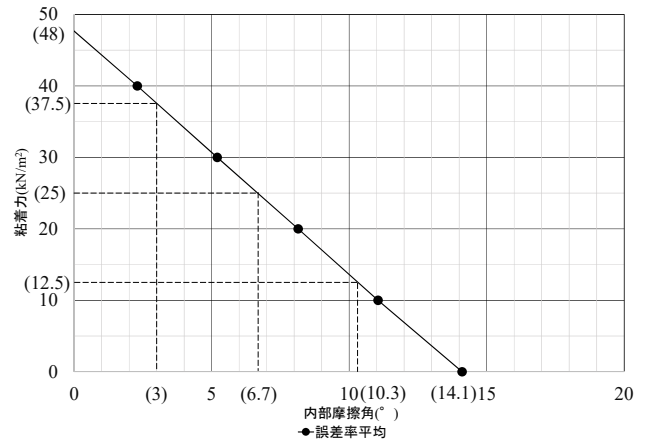


図-9 誤差率平均が 0 となる c-φ 関係図

この直線上の c 値、φ 値の組み合わせであれば、再現解析において実測荷重を再現可能であるが、その c 値、φ 値の組み合わせは無数にある。そこで、予測解析においては、表-4 のように c 値をほぼ均等に 5 段階に変化させ、それに対応する φ 値との組み合わせを設定し、予測荷重値を計算した。予測解析結果は表-4 に示すとおり、c 値、φ 値の組み合わせを変えても、誤差率平均 -2.6~0.0% となり大きくは変動しないという結果が得られた。このことから、再現計算によって逆算した c 値、φ 値の組み合わせを用いれば、c 値、φ 値の組み合わせによらず、計算される予測解析値の変動は小さい可能性が示唆される。その場合は、層厚から c 値を決めて φ 値を FEM で逆算する方法や、地質・土質から一般値を参考に φ 値を決めて c 値を FEM で逆算する方法等を用いることも可能と考えられる。

表-4 予測解析結果

ケース	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (°)	誤差率平均
1	0	14.1	解析発散
2	12.5	10.3	0.0%
3	25	6.7	-1.9%
4	37.5	3	-2.3%
5	48	0	-2.6%

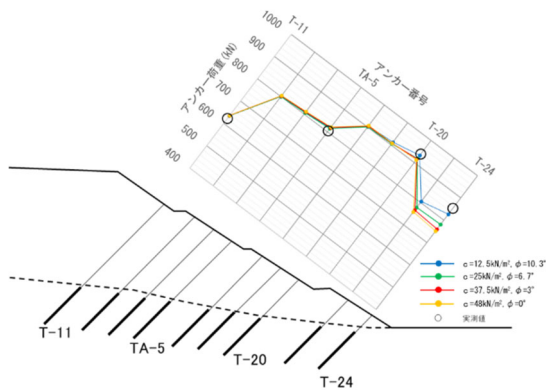


図-11 再現解析結果

#### 4. 考察

これらの研究成果をふまえ、将来的には以下のような流れで追加対策を検討することが想定される。

- ①アンカー工の施工後には必要最小限の荷重計を設置してアンカー工の健全性や斜面の安定性についてモニタリングを続ける。
- ②地すべり活動などによってアンカーの荷重が増加した場合、必要に応じて除荷等の緊急的な対応を行うとともに、荷重増加の原因調査、荷重計による荷重計測を行う。
- ③調査結果及び荷重データをもとに FEM 解析を行って追加対策後の荷重を予測し、効果的な対策を検討する。

今後も引き続き解析事例の更なる蓄積を図り、実務での適用性についての確認を積み重ねていく必要があると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究で実施した調査の結果、アンカー工の施工後に地すべり活動などによってアンカーの荷重が増加した場合、現在は段階的に対策を行い、その効果を見ながら、荷重の増加が収束するまで繰り返し対策が行われ、対応が長期化する事例が少なくないことが明らかになった。また、地すべりによるアンカーの荷重増加について、二次元 FEM 解析によって追加対策後の荷重予測が可能であることと、その際のすべり面の  $c$  値、 $\phi$  値の設定手法を示した。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、国土交通省関係事務所、都道府県には、ご協力を頂いた。ここに記して、感謝の

意を申し上げる。

#### 参考文献

- 1) 杉井良平、高木将行、石黒梓、石井靖雄：事例調査によるグラウンドアンカーの荷重増加原因の考察、土木学会第72回年次学術講演会講演概要集、pp.877～878、2017
- 2) 杉井良平、高木将行、石黒梓、石井靖雄、藤平大：グラウンドアンカー工の荷重増加への対処方法の実態調査、第56回地すべり学会研究発表会講演集、p.38、2017
- 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の変動予測手法の検討-アンカー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.54、No.5、pp.243-252、2018
- 4) 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、Vol.61、No.9、pp.12-15、2019

# RESEARCH ON METHOD TO EVALUATE STABILITY OF LANDSLIDE WITH INCREASED LOAD OF GROUND ANCHORS

Research Period : FY2016-2020

Research Team : Erosion and Sediment Control

Research

Group(Landslide)

Author : SUGIMOTO Hiroyuki

TAKAGI Masayuki

**Abstract** : We investigated the causes of the load increase of anchors and how to deal with it, and examined the load prediction after additional measures by two-dimensional FEM. As a result of arranging the causes of the load increase of the anchors and the countermeasures, landslide is the most common cause of the load increase, and there are few cases in which the convergence of the load increase was confirmed by one countermeasure work, and the load. In many cases, countermeasures against the increase were repeatedly carried out, and the countermeasure was prolonged. In the load prediction after the additional measures by the two-dimensional FEM, the load after the additional measures was roughly predicted using the FEM model in which the ground parameters were set by the inverse analysis based on the load data of the anchors.

**Key words** : landslide, ground anchor, load increase, finite element method