

II-9 アンカー荷重計と光ファイバー情報網を用いた地すべり監視手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平14～平17

担当チーム：土砂管理研究グループ（地すべり）

研究担当者：藤澤和範、石井靖雄

【要旨】

本研究ではアンカーを表現できるFEM解析モデルを構築し、アンカー抑止効果の作用や地すべり滑动時のアンカーの挙動を求めた。また、地すべり監視手法としてアンカー荷重計を利用する方法について、地すべり自動観測システムの構築に関する現状と構築時の留意点を調査した。その結果、すべり面に作用する締付け効果は既往設計手法から求められる値よりも小さく、地表面からすべり面までの距離が遠くなるほど小さくなることが分かった。すべり面形状を変化させた解析の結果からは、地すべり滑动時のアンカー緊張力の変化はすべり面形状によって異なり、傾向としては地すべり末端付近に打設されたアンカーの緊張力上昇が大きいことが分かった。また、アンカー緊張力の変化は地すべり地表面変位量と相関性を有しており、緊張力を監視することで地すべりの滑动状況を判断できることが示された。地すべり監視手法に関しては、自動監視システムの構築に際する留意点をまとめることができた。

キーワード：地すべり、アンカー、有限要素法、締付け効果、地すべり自動観測システム

1. はじめに

地すべり対策の抑止工の一つとしてアンカー工が用いられるが、その配置や初期緊張力の決定方法などは理論的な根拠が必ずしも明らかではなく、地すべり滑动の程度や施工条件および経済性などから技術者が経験的に判断して設計し、施工されている。また、施工されたアンカーの緊張力をモニタリングすることで地すべりの挙動を監視していくことが望まれるが、アンカー荷重の変化と地すべり滑动の関係についても必ずしも明確に示されていない。

そこで、アンカーによる抑止効果の作用を明らかにしてその評価が可能となれば、設計におけるアンカーの配置や初期緊張力などについて合理的に決定できると考えられる。また、地すべり滑动時のアンカーの挙動を分析できれば、アンカー緊張力をモニタリングすることで地すべりの監視ができると考えられる。

本研究は、①荷重計付アンカーによる張力監視及び情報提供手法の提案、②地すべりアンカーの配置計画手法の提案を達成目標として次のことを実施した。

はじめにアンカーを表現できるFEM解析モデルを構築し、アンカー抑止効果の作用や地すべり滑动時のアンカー緊張力の変化を検討した。そして、アンカー荷重計を地すべり監視手法として用いるための自動観測システムの構築に関する既往技術の調査と構築時の留意点を整理した。

2. アンカーのFEM解析モデルの構築^{1), 2)}

FEM解析によるアンカーの研究事例は少なく、そ

のモデル化手法は統一されたものはない^{3), 4), 5)}。本研究では、模型実験⁶⁾を再現解析することで、アンカーの緊張力変化や地すべり土塊への応力伝達が表現できる3次元FEM解析モデルの構築を行った。

2.1 模型実験の概要⁶⁾

アンカーの模型実験は、大型一面せん断試験装置を用いて実施した。模型は図-1に示すような土槽（幅1.5m×長さ2.0m×高さ1.0m）に、すべり面としてベントナイトを敷き、その上に地すべり土塊としてシルト質砂を締固めて作成した。アンカーは鉄筋を用い、定着部は土槽底面に固定し、地表面は支圧板を配してある。模型実験は、アンカーにプレストレス ($P_i=3.38 \times 10^3$ MN) を与え、1 mm/minで地すべり土塊を滑らせた。この時、載荷板による強制変位量、アンカー頭部荷重、すべり面に作用する土圧(7箇所)、載荷板に作用する土圧(3箇所)を計測した。

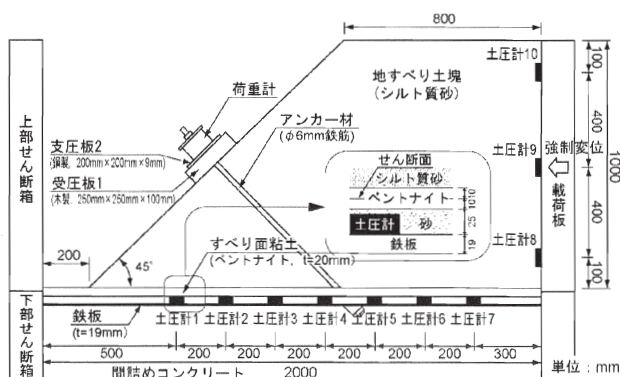


図-1 模型実験装置

2.2 解析モデル

2.2.1 解析条件

解析モデルはアンカーを中心とする実験模型の幅1/2の領域についてモデル化した(図-2)。アンカー、支圧板、地すべり土塊、載荷板およびすべり面はソリッド要素とした。物性値は、載荷板、支圧板、アンカーは一般値として道路橋示方書⁷⁾より“鋼”の値を、すべり面は土質試験の結果を用いた。地すべり土塊は、土質試験結果を参考に变形係数を変化させた感度解析を行い、アンカーの緊張力変化が最も再現できる値とした。

解析モデルに作用させる外力は、自重、アンカーのプレストレスおよび強制変位である。プレストレスは模型実験と同じとなるよう、FEM解析上で擬似的にアンカー要素に温度変化を与えて緊張力を発生させた。

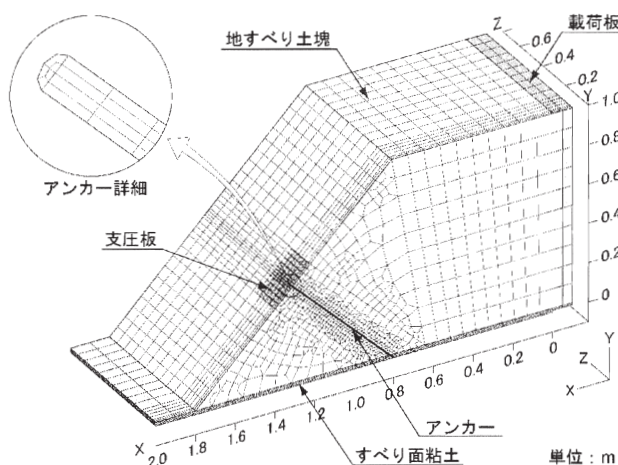


図-2 模型実験の解析モデル

2.2.2 アンカーに緊張力を与える方法

アンカーにプレストレスを導入する方法は、アンカー要素に式(1)に示す線膨張係数と温度変化量の関係を用いて行った。この時、アンカーが縮小して引張力が発生するが、地すべり土塊の表面では支圧板を介して応力が伝達して沈下が生じ、引張力が低下する。そのため、引張り力の低下分を補うために更に温度変化を与える。

$$P_r = \alpha \Delta t EA \quad \dots \text{式(1)}$$

- ここに、
 α : 線膨張係数(1/°C)
 P_r : プレストレス(N)
 Δt : 温度変化量(°C)
 E : 変形係数(Pa)
 A : 断面積(m²)

地すべり土塊の变形係数を変化させて感度解析を行った結果、目標とするプレストレスを得るためには、

当初に計算した温度変化量よりも大きな値が必要なることが示された。地すべり土塊の变形係数との関係については、变形係数が小さくなるほど大きな温度変化量(Δt)が必要であることが示された。

2.3 再現解析の結果

図-3に再現解析の結果を示す。図-3a)には、強制変位とアンカー緊張力(応力 σ_1)の関係を示す。図-3a)を見ると、アンカーが破断する強制変位50mmまで実験値と類似した応力変化を示し、概ね実験結果を再現できた。図-3b)には、強制変位とすべり面土圧および載荷板土圧の関係を示す。これらについても概ね実験結果を再現できた。

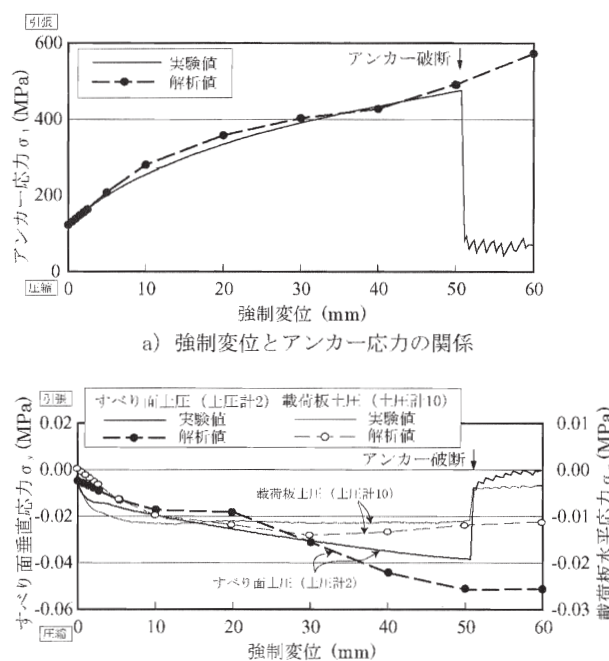


図-3 再現解析結果

3. FEM 解析モデルの再現性の検証

模型実験の再現解析により構築した FEM 解析モデルの妥当性を検証するために、実際の地すべり現場に打設されたアンカーの緊張力やアンカー体部の応力計測結果との比較を行った。

3.1 解析モデル

解析モデルを図-4に示す。解析モデルは、模型実験の再現解析時のモデルと同様に、アンカー、受圧板、地すべり土塊、不動層およびすべり面はソリッド要素とし、アンカーの緊張力は温度変化によって与えた。

3.2 解析結果

解析結果を図-5~7に示す。図-5では、所定のアンカー緊張力がアンカー長全域に導入されるかの確認を

行った。その結果、アンカー長で発生する引張力はアンカーの端部を除いてほぼ正確に発揮できており、5mから30mの間では計画された緊張力が±1%の範囲で再現できている。図-6では耐荷体に発生する応力を検証した。解析値は実験値よりもやや大きな値となるが、先端部で大きく地表面側ほど小さくなる分布形状は再現できている。また、図-7に示すアンカー体のグラウトに発生する応力については、応力の分布形状と値をほぼ同様に再現できた。

以上のことから、本モデルは、アンカーの緊張力およびアンカー体で発生する応力を表現できるモデルであることが検証できた。

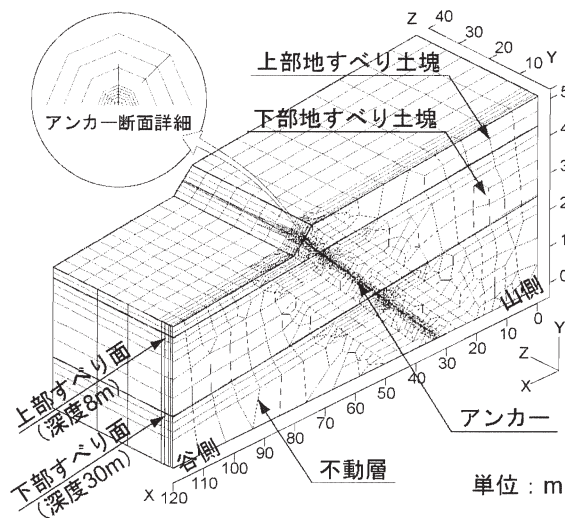


図-4 地すべり地の解析モデル

4. アンカー締付け効果の検証

4.1 検証項目

地すべり地を再現した図-4に示す解析モデルを用いて、アンカーに緊張力を与えた時にすべり面に作用する締付け効果について検討した。検討は、①すべり面の深さ、②地すべり土塊の変形係数、③アンカー体のすべり面からの挿入余長などを変化させて行った。

4.2 解析結果

ここではすべり面の深さを8m（上部すべり面）、30m（下部すべり面）とした場合について記述する。図-8、9に地盤内で発生した圧縮応力の分布とすべり面に作用する垂直応力（締付け力）の分布を示す。また図-10には、図-8b)、9b)に示すA-A測線におけるすべり面に作用する垂直応力の分布を示す。

図-8a)、9a)に示した地盤内の圧縮応力分布では、地表面とアンカー体から圧縮応力がすべり面に向かって発生していることが分かる。図-8b)、9b)では、ア

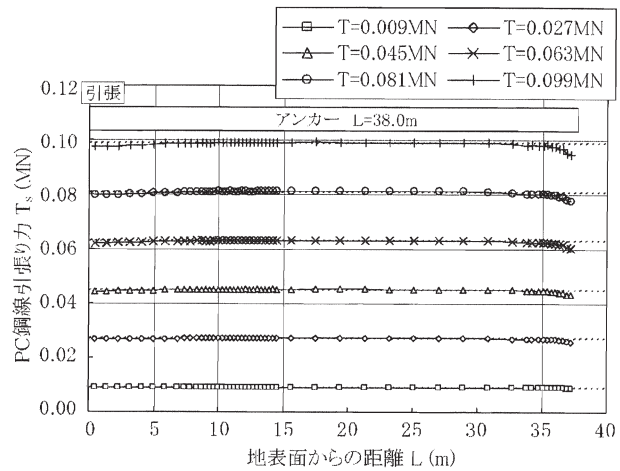


図-5 PC鋼線の軸力分布

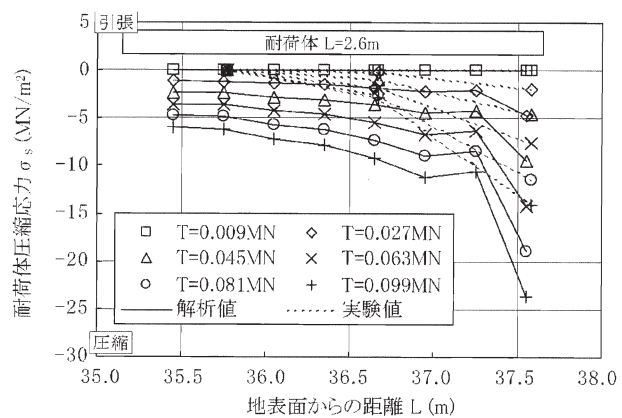


図-6 耐荷体の圧縮応力分布

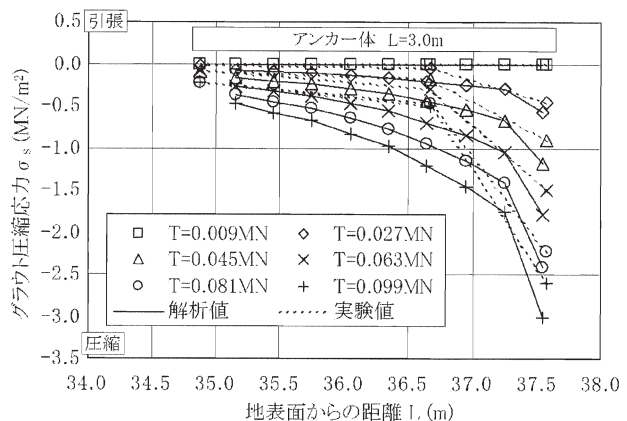


図-7 グラウトの圧縮応力分布

ンカーの緊張によりすべり面に円状に垂直応力が作用していることが分かる。すべり面深度8mのケース(図-8b))では、アンカーより少し谷側を中心とした応力分布円が見られる。一方、すべり面深度30mのケース(図-9b))では、アンカーを中心とした狭い応力分布円とアンカーよりも約20m谷側を中心とした小さい垂直応力の広い応力分布円が見られる。これらの結果は図-10からも読み取ることができ、図-8b)、9b)に

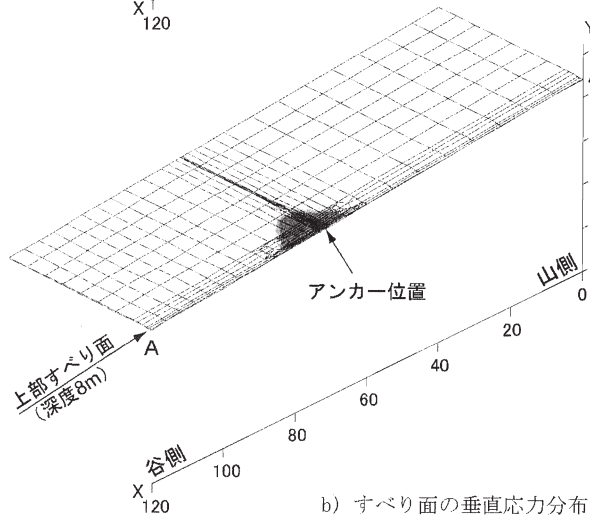
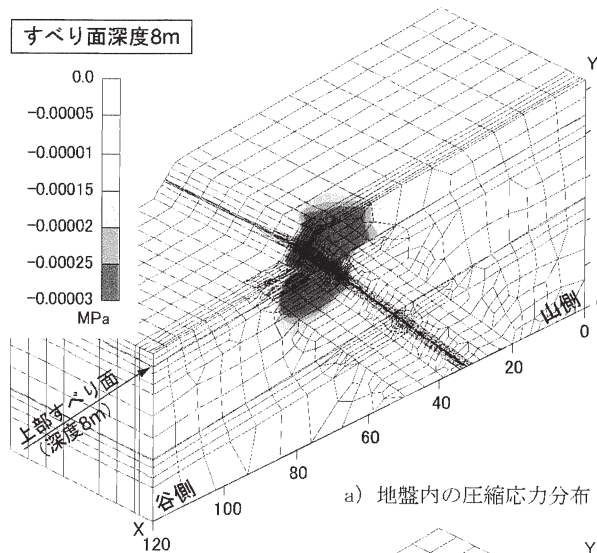


図-8 地盤内の圧縮応力分布およびすべり面の垂直応力分布 (解析ケース: すべり面深度8m)

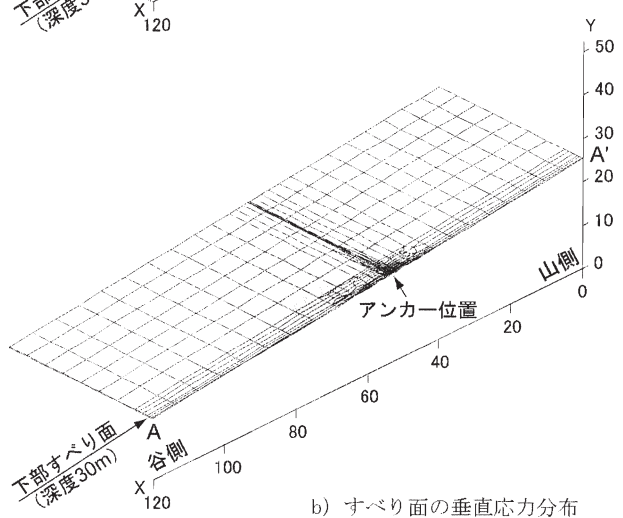
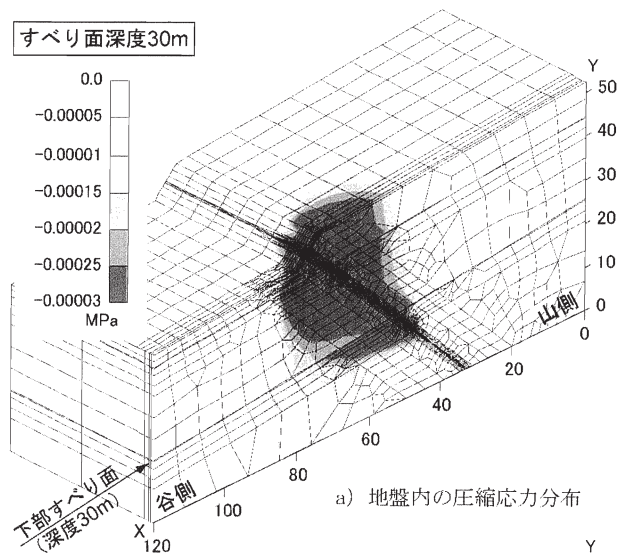


図-9 地盤内の圧縮応力分布およびすべり面の垂直応力分布 (解析ケース: すべり面深度30m)

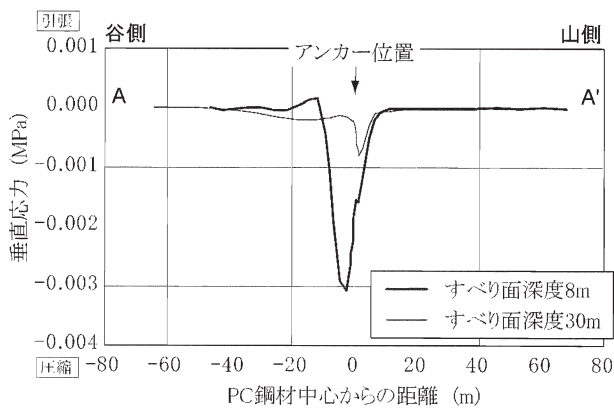


図-10 A-A'測線におけるすべり面に作用する垂直応力分布

示した A-A'測線におけるすべり面に作用する垂直応力の分布は、すべり面深度 8m のケースでは垂直応力

表-1 締付け力の解析値と理論値

項目	ケース	
	すべり面 30m	すべり面 8m
最大圧縮応力 σ_{max} (Pa)	812	3074
解析締付け力 P_1 (kN)	122	137
理論締付け力 P_0 (kN)	231	227
締付け力比 $R=P_1/P_0$	0.53	0.60

が働いている範囲が狭いが、その応力値は大きいことが分かる。一方、すべり面深度 30m のケースでは応力値は小さいものの広範囲に垂直応力が作用していることが分かる。同図よりすべり面へ作用している垂直応力の分布範囲は、両ケースともアンカーより山側への分布範囲は大差ないが、谷側への分布範囲は、すべり面深度 30m のケースのほうが広く分布している。表-1 に、すべり面に作用する締付け力を求めた結果を

示す。締付け力の算出は、すべり面要素に作用する垂直応力と要素面積の積を総和して求めた。その結果、FEM 解析によって求められた締付け力は、現行設計法から求められる値に対して 50~60%程度しか発揮されていない結果となった。

以上のことから、すべり面深度が異なる場合では、すべり面に発生する応力の分布範囲とその大きさが異なることが分かり、すべり面に作用する締付け力はすべり面が深いほど小さくなることが分かった。そして、締付け力は、現行設計法で求められる値ほど発揮していないことが示された。

5. モデル斜面によるアンカー緊張力挙動のパラメトリック解析

アンカーを表現できる FEM 解析モデルを用いてすべり面の形状を①円弧すべり、②舟底すべり、③椅子型すべりの 3 タイプに変化させ、地すべり滑動時のアンカー緊張力の変化を検討した。以下に①円弧すべり、②舟底すべりについて記述する。

5.1 解析モデル

解析モデルを図-11 に示す。モデルは、地すべり土

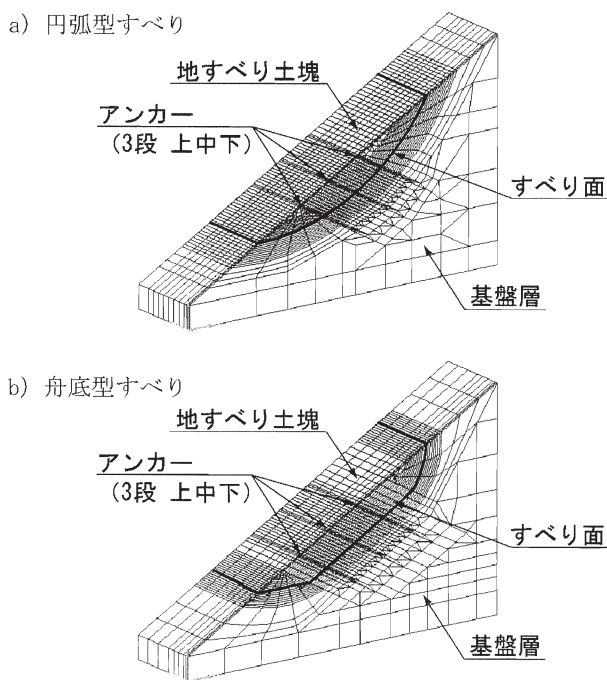


図-11 解析モデル

表-2 アンカー長

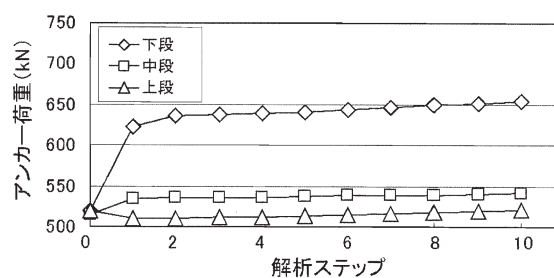
すべり面形状	円弧型すべり	舟底型すべり	
アンカー長 (m)	上段	19.393	21.436
	中段	21.436	21.436
	下段	18.949	21.436

塊、すべり面、基盤からなり、それぞれ弾塑性体として扱いソリッド要素でモデル化した。アンカーは鋼材とグラウトに分けてモデル化した。解析は、アンカーを設計荷重の 50%で緊張し、その後地下水位を 10 ステップに分けて上昇させ、地すべりを滑らせた。各モデルのアンカー長について表-2 に示す。

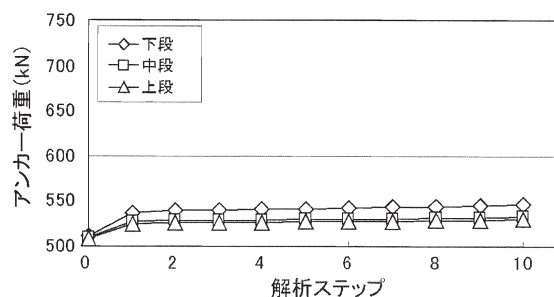
5.2 すべり面形状の影響

地下水位を上昇させて地すべりを滑動させたときのアンカー荷重の変化を図-12 に示す。図-12a)に示す円弧型すべりでは、下段アンカーの緊張力の上昇が大きい。それに対して中段アンカーの緊張力の増加はわずかであり、上段アンカーに関してはステップ 1~2 において一旦減少した後に増加している。図-12b)に示す舟底型地すべりでは、下段アンカーの緊張力が上中段アンカーよりもやや上昇しているが、全段あまり大差ない挙動を示した。

以上の結果より、すべり面形状の違いによって地すべりが滑動した際に斜面に配置されたアンカーの緊張力変化の挙動が異なることが分かった。円弧すべりでは下段アンカーの荷重増加が多いため、地すべり末端付近にアンカーを配置することで効果的に地すべりを抑止することができると考えられる。また、地すべりの初期挙動を捉えるには、下段アンカーの緊張力増加と上段アンカーの一時的な緊張力の低下を確認することが有効と考えられる。舟底型すべりで各段のアンカー挙動に大差がないのは、地すべり層厚とすべり面の勾配がどの位置でも同じであるためと考えられる。



a) 円弧型すべり



b) 舟底型すべり

図-12 解析ステップとアンカー荷重の関係

5.3 アンカー緊張力変化と地表面変位の関係

図-13 に円弧型すべりおよび舟底型すべりのアンカー緊張力と地すべり土塊の地表面変位量の関係を示す。地すべり土塊の地表面変位量は、最も変位が大きかった地点（下段アンカーよりも 10m 程度地すべり末端よりの位置）の移動量を用いている。図中には最大地表面変位量-アンカー荷重関係の近似式を記入している。

図-13a)によれば、円弧すべりについて下段アンカーの荷重上昇が大きいことは先の述べたが、最大地表面変位量との関係においても荷重の増加傾向が大きく、上段、中段アンカーよりも地表面変位に対するアンカー荷重変化の反応が大きい。このことから、円弧すべりでは下段アンカーが最も地すべり全体の挙動を表現できる。図-13b)の舟底型すべりでは、最大地表面変位量とアンカー荷重の関係は、やや下段アンカーの近似式の傾きが大きいが、どれも大差ない。しかし、その中でも地すべり全体の挙動を捉えるには、最も反応しやすい下段アンカーの荷重変化に注目することが望ましい。

ただし、今回の FEM 解析モデルでは、地すべり変位量がミリオーダーであるため、今後、実際の地すべりのような数 10cm オーダーの変位が表現できるモデルに改良する必要がある。

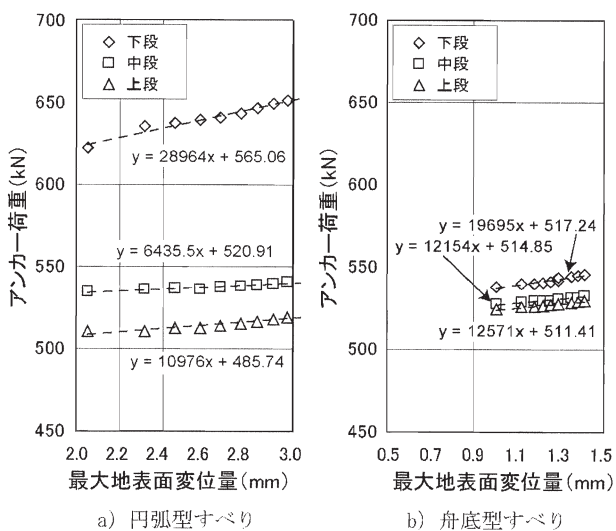


図-13 地表面変位量とアンカー荷重の関係

6. 自動観測システム構築に関する調査

アンカー荷重計をモニタリングすることで地すべりの滑動状況を把握することが可能であることを前項で述べた。よって、遠隔地（例えば道路管理事務所）でアンカー荷重計の変動をモニタリングすることで、地

すべり滑動を把握して道路通行止めや解除の判断材料とすることができる。本項では、アンカー荷重計を自動観測するシステムの構築に関して、現行手法の調査結果と構築時の留意点を述べる。

6.1 自動観測システムの構成

自動観測システムの全体構成を図-14 に示す。自動観測システムの構成は大まかに次の5つに分けることができる。

- ①センサー部：地すべり地内において計測するために設置したセンサー部分（例えば、アンカー頭部の荷重計）。センサーは変位量を電気的に変換しており、変換方式によって歪ゲージ、差動トランス、半導体ゲージ、サーボ加速度計、ロータリーエンコーダ、振動弦に分けられる。
- ②データ収集部：地すべり地内または近傍において、データ処理部からの指令で各センサーのデータを集積する部分（一般的にデータロガーと称する）。
- ③データ処理部：地すべり地近傍または管理事務所において、パソコンを用いデータロガーに対してモデムなどを介して計測指示を出し、回収したデータを編集・表示・出力・蓄積する部分。
- ④端末装置部：関係諸機関において、データ処理部で処理され転送される計測データを受信して閲覧する部分。
- ⑤データ伝送部：上記①～④間において、1次、2次、3次伝送と分けられ、情報のやり取りを行うライン。1次伝送はメタリックケーブルによる伝送を行うが、2次伝送、3次伝送では有線方式（電話回線、光ファイバーケーブル etc）や無線方式（衛星通信、無線回線 etc）がある。

6.2 自動観測システム構築時の留意点

アンカー荷重計の観測する場合、荷重計の変換方式に留意して自動観測システムを構築しなくてはならないことが分かった。市場に流通しているアンカー荷重計の変換方式を分類すると、①差動トランス、②歪ゲージに分けられ、自動観測する現場で用いられる変換方式に応じてデータロガーのタイプを選定する必要がある（図-14のデータ収集部のデータロガーに※1と示した部分）。すなわち、荷重計に差動トランスを用いている場合は、差動トランスを計測できる差動トランス方式のデータロガーを選定する必要がある。なお、現在市場に流通している差動トランス方式のデータロガーは歪ゲージも計測可能である。

伝送方式については、最も重要な2次伝送方式について以下に留意点をまとめる。2次伝送方式では、デ

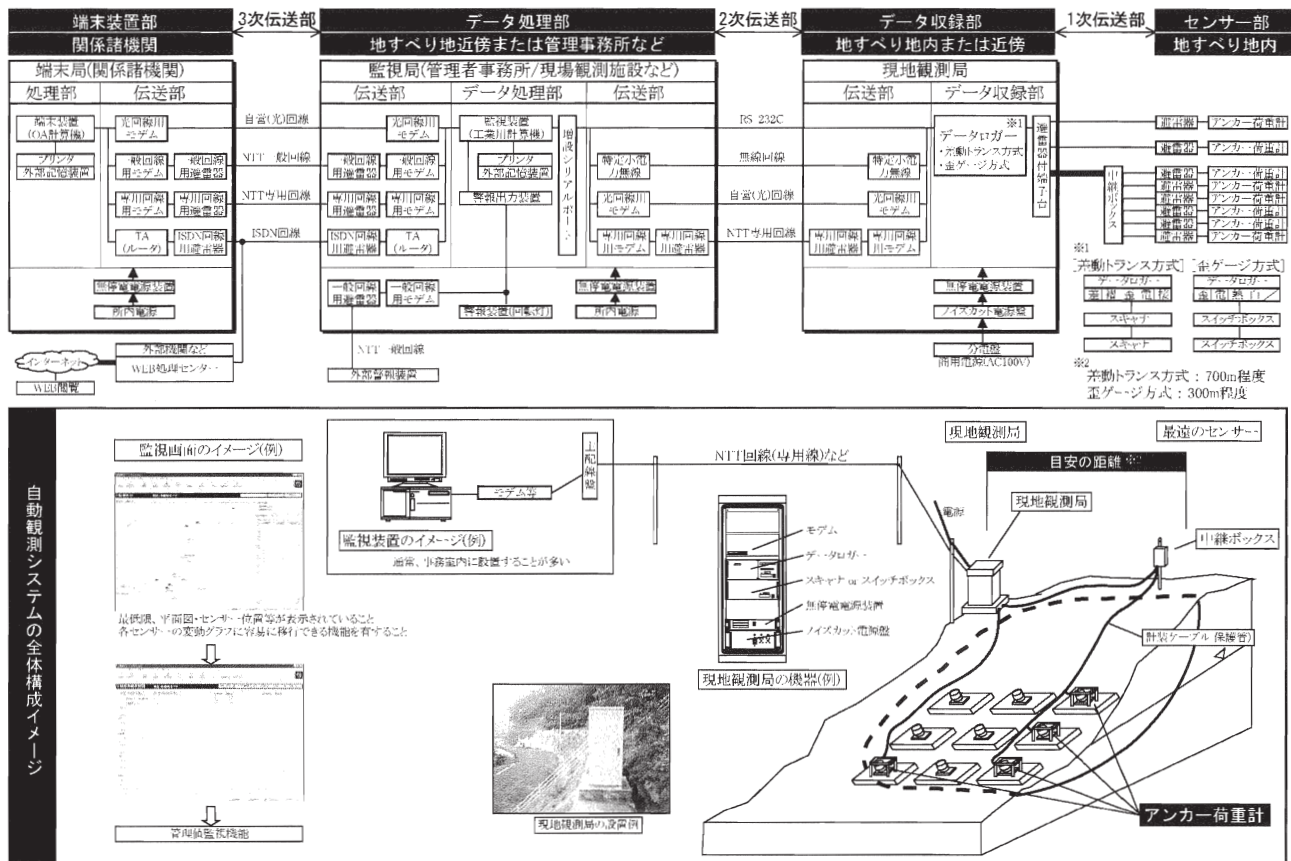


図-14 自動観測システムの全体構成

データ収録部とデータ処理部の距離がある場合には電話回線、光ファイバーケーブル、無線回線の方法があるが、一般的には電話回線のNTT専用回線を選択することが多い。光ファイバーケーブルの利用は、自動観測システム運用後の低ランニングコストや通信速度が速いといったメリットがある。しかし、観測したい地すべり地付近に光ファイバーケーブルがない場合には、新たに敷設する必要があり、イニシャルコストが高くなる場合がある。国土交通省により主要国道に敷設した光ファイバーケーブルを利用するにあたって、そのケーブルにつなぐクロージャが近くになれば、同様にそこまで新たに光ファイバーケーブルを敷設する必要がある。したがって、これらの現場条件を勘案して、最も適した伝送方式を選択することが重要であることが分かった。

7. まとめ

本研究ではアンカーを表現できるFEM解析モデルを構築し、アンカー抑止効果の評価や地すべり滑动時のアンカーの挙動について検討した。また、アンカー

荷重計を維持管理手法として用い、地すべりの挙動を監視するためのアンカー自動観測システム構築に関する現状調査と構築時の留意点を調査した。その結果、達成目標を満たすことができ、以下のことが示された。

- 1) FEMによってアンカーを表現する場合、緊張力はアンカー要素に擬似的に温度変化を与えることで発生させることができる。
- 2) アンカーの締付け効果は、既往設計手法で求められる値ほど発揮されておらず、すべり面が深くなるほど小さくなることが分かった。
- 3) 地すべり滑动時のアンカー緊張力の変化は、すべり面形状によって異なる。傾向としては地すべり末端付近に打設されたアンカーの緊張力上昇が大きい。
- 4) すべり面形状によって、地すべり土塊の地表面変位量とアンカーの緊張力変化の関係は異なる。最も地表面変位に緊張力が反応する箇所のアンカーをモニタリングすることで、地すべりの滑动を捉えることができる。傾向としては、地すべり土塊の下方に打設されたアンカーを選定するのが良い。

- 5) アンカー自動観測システムの構築において、センサーのタイプに応じてロガーを選定する必要がある。
- 6) 光ファイバー情報網を用いた自動観測システムを構築する場合、情報網への引き込むクロージャと現場の位置関係を考慮してシステムを構築する必要がある。

今後、本研究で構築した FEM 解析モデルを数 10cm オーダーの地すべり変位を表現できるモデルに改良し、実際の地すべりに近い状態でのアンカー緊張力の変化を検討することが課題である。

参考文献

- 1) 藤澤和範、森下淳、石井靖雄、木村隆俊、小堀勝弘、川場浩二：3次元弾塑性 FEM 解析によるアンカーの抑止効果に関する検討，第 44 回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.277-280，2005
- 2) 田中尚、石井靖雄、藤澤和範、森下淳：模型実験の再現によるアンカー工弾塑性 3 次元 FEM 解析モデルの検討，土木技術資料，No.48，No.4，pp.64-69，2006
- 3) 藤田壽雄：有限要素法による地すべりの安定計算と対策工の決定，地すべり，Vol.27，No.4，pp19-26，1990
- 4) 中村浩之、星野和彦、奥田公也：アンカー工における最適な初期緊張力の設定，地すべり，Vol.29，No.1，pp.16-23，1992
- 5) 蔡飛、鵜飼恵三：アンカー工による斜面の補強効果—極限平衡法と弾塑性 FEM との比較，地すべり学会誌，Vol.40，No.4，pp.8-14，2003
- 6) 建設省土木研究所砂防部地すべり研究室：湛水地すべり地におけるアンカー工の設計に関する調査，土木研究資料，第 3244 号，平成 6 年 3 月
- 7) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編IV 下部工編，平成 14 年 3 月