

# 不連続性岩盤斜面における 3次元変位計測結果の一評価法

松田浩朗<sup>1</sup>・野村貴司<sup>2</sup>・藤谷隆之<sup>3</sup>・清水則一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 飛島建設(株) 技術研究所 (〒220-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

(元 山口大学大学院 理工学研究科 博士後期課程)

<sup>2</sup>正会員 修(工) 若築建設(株) 九州支店 (〒812-0035 福岡県福岡市博多区中呉服町2-1)

(元 山口大学大学院 理工学研究科 博士前期課程)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 日本技術開発(株) 大阪支社 (〒531-0072 大阪市北区豊崎5-6-10)

(元 山口大学大学院 理工学研究科 博士前期課程)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail : nshimizu@yamaguchi-u.ac.jp

岩盤は節理や層理などの不連続面が存在し、岩盤斜面の崩壊はこの不連続面による岩盤すべりの形態を取ることが多い。このため、岩盤斜面の安定評価において不連続面の幾何学情報は重要となる。筆者らは、これまでにGPS変位計測システムを開発しており、このシステムによって、比較的容易に、しかも精度良く3次元変位を連続的に計測することが可能である。本研究では、3次元変位計測結果から求められる変位方向と、不連続面の幾何学情報(傾斜および傾斜方位)とを利用した安定評価法を提案する。さらに、この方法の妥当性を実験に基づくシミュレーションにより検証した。

**Key Words** : slope stability, GPS, displacement measurements, discontinuities, stereonet, prediction of failure

## 1. 序論

岩盤は節理や層理などの不連続面が存在し、岩盤斜面崩壊はこの不連続面に支配されるすべりの形態を取ることが多い<sup>1)</sup>。このため、岩盤斜面の安定評価において不連続面の走向、傾斜角(以下、傾斜)などの幾何学情報は重要であり、不連続面調査結果とステレオネットを用いて安定性の評価が行われている<sup>2)4)</sup>。一般に、斜面の安定評価においては、不連続面の強度など岩盤の力学定数が必要である。しかし、対象とする斜面のすべての岩盤の力学定数を得ることは困難であるため、実際の安定評価においては現場計測を行うことが多い。

現場計測においては、計測結果に基づき、斜面の安定性を評価することが重要であり、例えば、変位計測結果に対して、時系列データから崩壊あるいは崩壊時刻を予測する方法<sup>5)7)</sup>、逆解析を利用して強度定数を推定し、安全率を求める方法<sup>8)9)</sup>、すべり面を推定する方法<sup>10)</sup>などが提案されている。

しかしながら、力学的な解析手法に比べて、現場計測結果の評価に関する研究は少なく、現場計測に基づく斜面の安定評価法の確立は課題となっている。

筆者らはこれまでに、長大斜面の変位監視を目的として、GPSを利用した変位モニタリングシステムを開発し現場に適用している<sup>11)13)</sup>。このシステムによって、これまで計測が困難であった3次元変位が比較的容易に、しかも精度よく連続的に計測することができる。3次元変位計測が可能となると、変位の大きさだけでなく、方向を求めることができるようになった。

本研究では、不連続面の幾何学情報(傾斜および傾斜方位)とGPSによる変位計測結果から得られる変位方向を利用し、すべりが生じている不連続面を推定する方法を提案する。また、この提案法の妥当性を検証するために、実験およびシミュレーションを行う。さらに、筆者らが文献13)で提案した崩壊時刻予測法を組み合わせ、すべりが

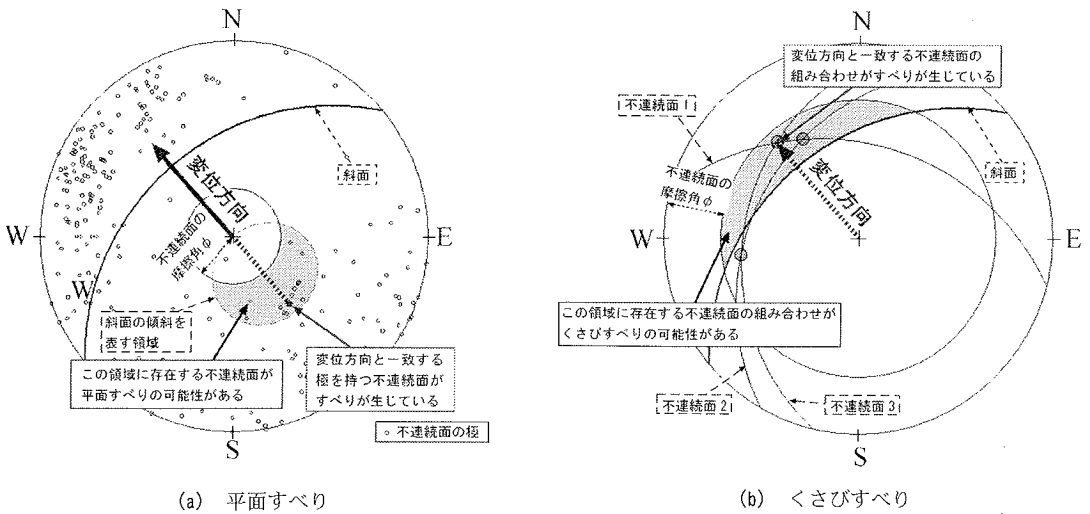


図-1 ステレオネットによるすべりの評価<sup>1)</sup>

生じている不連続面だけでなく、崩壊時刻も同時に推定できることを示す。なお、本研究では岩盤すべりのうち、平面すべり、および、くさびすべりを対象とする。

## 2. 3次元変位計測結果と不連続面の幾何学情報に基づく評価法の考え方

平面すべりとくさびすべりに対する、ステレオネットを用いた従来の安定評価の概要は次のとおりである(図-1参照)。すなわち、不連続面の強度基準がクーロンの摩擦法則に従い、不連続面の粘着力が0と仮定すると、平面すべりは、不連続面の傾斜が、1) 不連続面の摩擦角より大きく、かつ、2) 斜面の傾斜より小さい、場合に発生する。つまり、図-1(a)において、摩擦角を示す円より外側にあり、かつ、斜面の傾斜を表す領域内部にある極で示された不連続面においてすべりが発生する可能性がある。

また、くさびすべりは、くさびの稜線(2つの不連続面の交差線)の傾斜が、1) 不連続面の摩擦角より大きく、かつ、2) 斜面の傾斜より小さい、場合において発生する。つまり、すべりブロックに作用する外力がすべり抵抗力より大きく、すべる方向に自由面(斜面)が存在することが条件となる。図-1(b)においては、斜面を表す大門より外側にあり、摩擦角を示す円に対して内側に大門の交点がある不連続面によって構成されるくさびにすべりが発生する可能性がある。

ステレオネットによる評価において、どの不連続面で平面すべり、あるいは、くさびすべりが生じるかを知るためには、摩擦角が必要である。しかし、実際に現場において不連続面の摩擦角を得ることは困難である。

一方、すべり方向とすべりを生じる不連続面の間には、次のような関係を仮定することができる。まず、平面すべりにおいては、すべり方向は不連続面の傾斜方向に一致する。これは、すべりブロックの変位ベクトルの極とすべりが生じている不連続面の極は一致することを意味する。また、くさびすべりにおいては、すべりが生じるくさびブロックの変位方向が、くさびを形成する不連続面の交線(ステレオネット上では不連続面を表す大門の交点)方向と一致する(図-1参照)。実際の挙動はこのような単純なものではないと考えられるが、本研究では問題を単純化するために、すべり方向に対して上記の考え方が成り立つと仮定する。

そこで、もし、現場において斜面の3次元変位方向を正確に計測することができれば、上記のすべり方向に関する仮定からステレオネット上で、実際にすべりが生じている不連続面、あるいは、くさびブロックを形成する不連続面を特定することができる。

このような考え方に基づいて、本研究では、あらかじめステレオネット上に示した不連続面の傾斜および傾斜方位とGPSによる3次元変位計測結果を用いて、すべりが生じている可能性のある不連続面を抽出する方法を提案する。提案方法によって、時々刻々得られる計測変位からすべりを形成

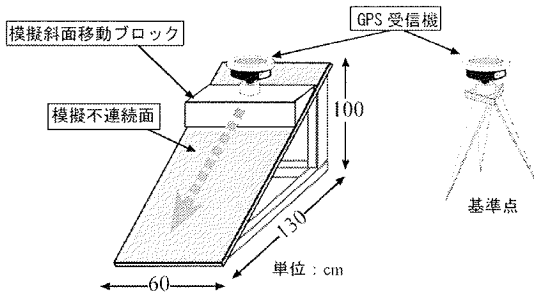


図-2 平面すべりを模擬する実験

する可能性のある不連続面とそうでない不連続面を区別することが可能となる。

さらに、時系列データの解析によって、崩壊時刻の予測<sup>13)</sup>を行い、時間および空間的に岩盤斜面の安定性を評価することを目指す。

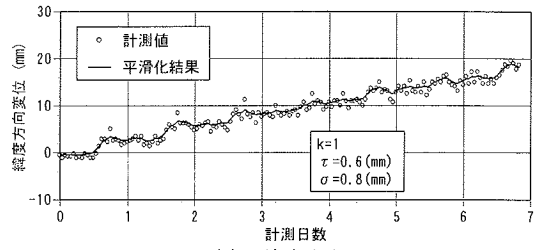
### 3. 実験およびシミュレーション

#### (1) 平面すべり

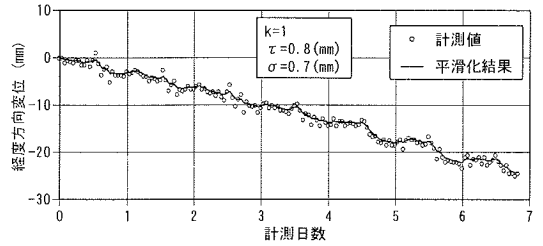
図-2に示す、平面すべりを模擬する実験装置(木製)を製作し、GPS受信機を設置した移動ブロックを、不連続面を想定した斜面(模擬不連続面)に載せ、この斜面に沿って移動ブロックに変位を与える。模擬不連続面の傾斜は $37^\circ$ 、傾斜方位は $310^\circ$ (クリノメータを用いて測定)で、実験は、移動ブロックに1日1回5mmの変位を、鋼尺を用いた目視により人為的に模擬不連続面傾斜方向に沿って下方に与え、7日間(合計35mm)にわたりGPSによって変位計測を行った。なお、GPS受信機にはスティック方式の受信機を用い、データ取得エポックは60秒、データ解析は1時間分の受信データを用いた。したがって、変位計測時間間隔は1時間である。

計測結果を図-3に示す。上から緯度、経度、および高さ方向の変位(○印が計測値)であり、実線は計測結果に対するトレンドモデル<sup>13)・15)</sup>による平滑化結果(以下、平滑化結果)を示す。また、図-4に、計測変位と与えた変位との比較を示す。図-3および図-4において、1日1回変位を与えたため、平滑化結果は階段状になっている。また、平滑化結果は数mmの誤差で与えた変位を検出している。なお、図中 $k$ はトレンドモデルのモデル次数、 $\tau$ はシステムノイズ、 $\sigma$ は観測ノイズで、いずれも平滑化の過程において得られる<sup>13)・15)</sup>。

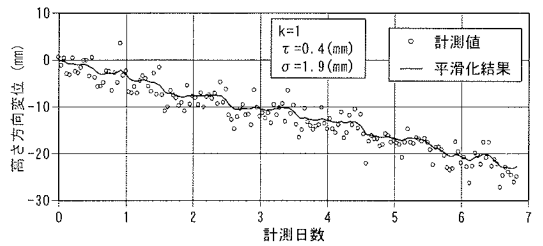
平滑化結果を用いて、変位方向の傾斜、および傾斜方位を算出した結果を図-5に示す。なお、図



(a) 緯度方向



(b) 経度方向



(c) 高さ方向

図-3 GPSによる計測変位と平滑化結果  
(平面すべり実験)

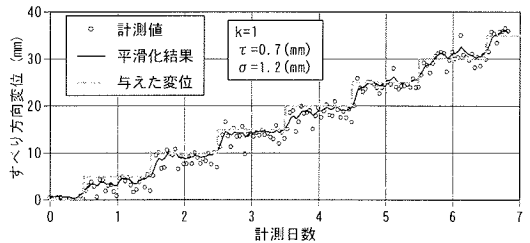
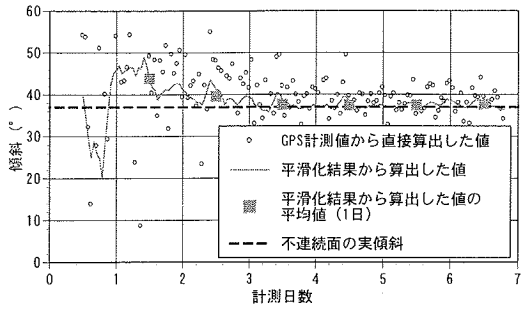
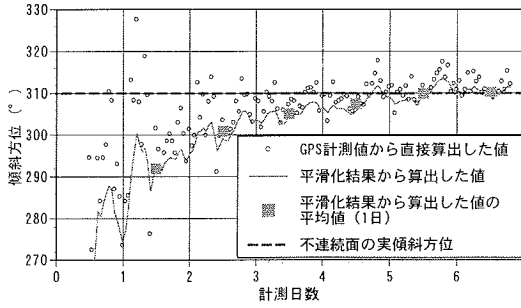


図-4 移動ブロックに与えた変位とGPSによる計測変位  
および平滑化結果との比較(平面すべり実験)

中の値は変位が発生した時点から示している。実線は平滑化結果から算出した変位方向の傾斜および傾斜方位であり、参考のため、GPS計測値から算出した変位方向の傾斜および傾斜方位を○印で示す。また、平滑化結果から算出した変位方向の傾斜および傾斜方位(図-5において実線)の平均値を●印で表す。ここで、平均値とは計測開始2日目から1日ごとに、過去1日分の平滑化結果から算出した値であり、図においては、平均を取った期間の中心にプロットしている。また、クリノメータ



(a) 傾斜



(b) 傾斜方位

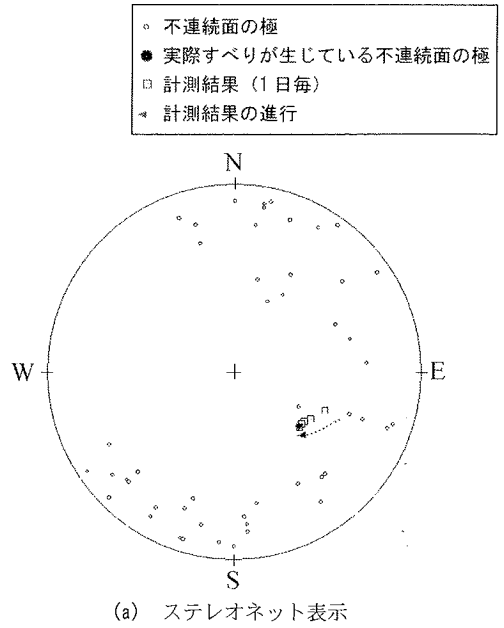
図-5 計測変位に基づくすべりが生じている不連続面の傾斜および傾斜方位の推定(平面すべり実験)

で測定した模擬不連続面の傾斜および傾斜方位を破線で示す。

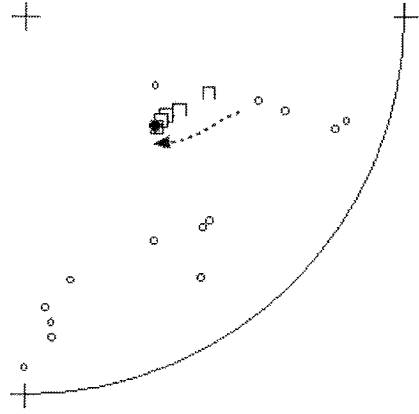
図から、計測初期では変位量が小さいことから、変位量に対する計測誤差の割合が大きく、平滑化結果から算出した傾斜および傾斜方位とも(図-5実線)大きくばらついているが、変位が進行するにつれて、模擬不連続面の実際の傾斜および傾斜方位(図-5破線)に近づき、計測日数5日目(移動変位25mm)付近で、ほぼ実際の値に収束していることが分かる。また、平滑化結果から算出した傾斜および傾斜方位の平均値(図中■印)は、より滑らかに実際の値に収束している。そこで、本研究では、この平滑化結果から算出した値の平均値によって変位方向を判断する。

次に、この計測結果を用いてシミュレーションを行う。シミュレーションは、ある斜面で実測された不連続面調査結果を仮想不連続面データとして用いる。この不連続面の傾斜および傾斜方位を、実験装置の模擬不連続面の傾斜および傾斜方位と同一のステレオネット上にプロットする。そして、この多くの不連続面の中から、すべりが生じている不連続面(実験装置の模擬不連続面)を変位計測結果から推定できるかを調べる。

図-6に、ステレオネット表示したシミュレーション結果を示す。本研究では、下半球等面積投

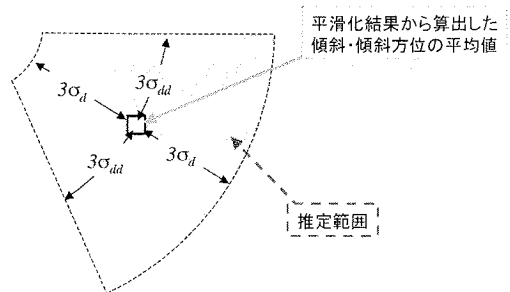


(a) ステレオネット表示



(b) (a)の計測結果付近拡大図

図-6 変位計測結果に基づく推定すべり面の極の軌跡



$\sigma_d$ : GPS計測値から算出した傾斜の標準偏差  
 $\sigma_{dd}$ : GPS計測値から算出した傾斜方位の標準偏差

図-7 推定範囲の設定方法

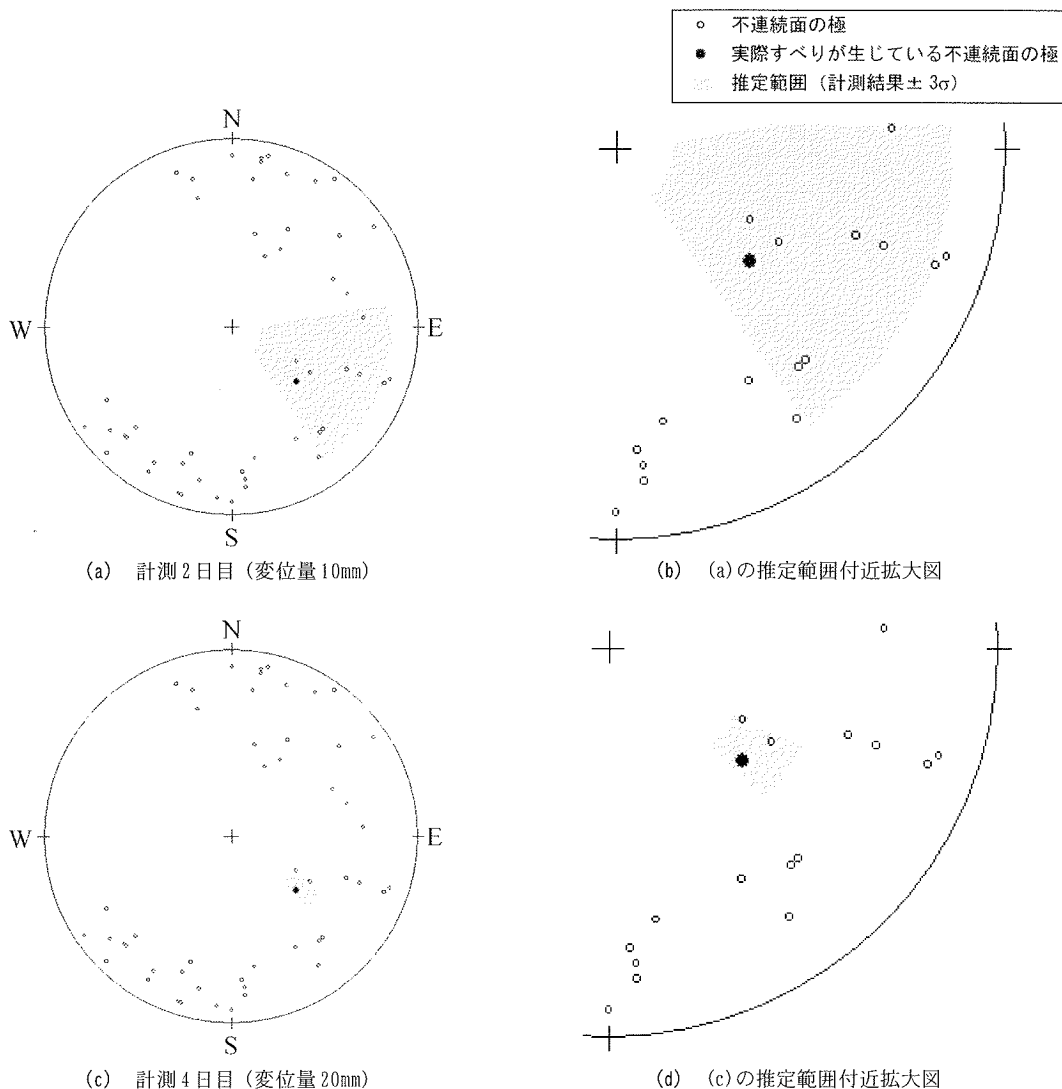


図-8 すべりが生じている不連続面の極に対する推定範囲の推移 (平面すべり)

影法りを用いる。ここで、図中○印はすべりが生じていない不連続面 (ある斜面の不連続面) の極であり、図中●印はすべりが生じている不連続面 (実験装置の模擬不連続面) の極である。また、図中□印で、前述の実験により得られた変位方向の計測結果 (平滑化結果から算出した平均値、図-5 ■印) を計測1日毎に示している。図から、計測が進み計測変位が大きくなるにつれて、推定した方向 (□印) はすべりが生じている不連続面の極 (●印) に近づき、最終的にはすべり面の極と $1^\circ$ 未満の差で一致している。

しかしながら、計測初期においては、変位方向の誤差が大きく、すべりが生じている不連続面の極と大きく離れている。このため、計測初期の段

階においては、すべりが生じている不連続面を特定することが困難となっている。

そこで、変位方向の計測誤差を考慮して、不連続面の極の存在する範囲を推定する。すなわち、GPS計測値から直接算出した傾斜および傾斜方位の1日分の標準偏差をそれぞれ $\sigma_d$ および $\sigma_{dd}$ とおき、計測による変位方向 (平均値、図-6では□印) を中心に $3\sigma_d$ および $3\sigma_{dd}$ の範囲をすべりが生じている不連続面が含まれている範囲と判断する (図-7参照)。

このように、本研究では、まずGPSによる変位計測値の平滑化結果から算出した傾斜および傾斜方位についてその平均値を求め、その結果を推定する変位方向の中央値とする。そして、実際の計測

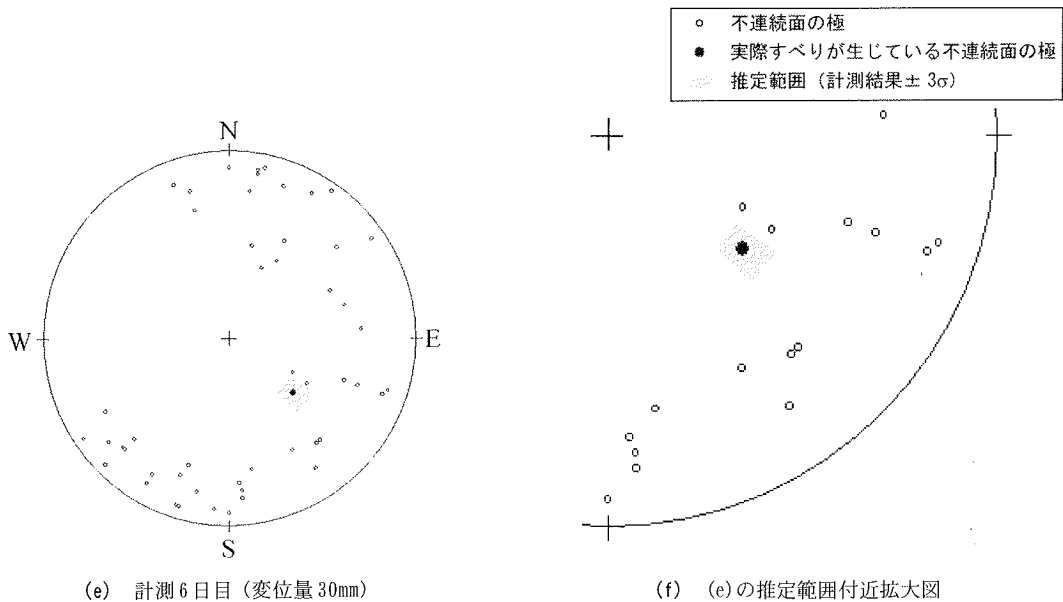


図-8 すべりが生じている不連続面の極に対する推定範囲の推移 (平面すべり) (続き)

値である GPS 計測値から算出した値の標準偏差を計測誤差と考え、本研究では、この標準偏差の3倍の値を推定範囲の大きさとして利用する。なお、 $\sigma_d$  および  $\sigma_{dd}$  は前述の平均値と同様に、過去1日分のGPS計測値から算出した傾斜および傾斜方位を用いて計算する。

図-8に、計測誤差を考慮したシミュレーション結果を示す。図から、計測2日目(変位量10mm)の段階では、多くの不連続面の極が推定範囲の中に存在するが、計測6日目(変位量30mm)には、すべりが生じている不連続面を特定している。このように、本シミュレーションでは、すべりが生じている不連続面は計測初期から推定範囲内にあり、さらに、計測が進むにつれ推定範囲が小さくなり、すべりが生じている不連続面を他の不連続面の中から絞り込み、最終的には特定できることが示された。

## (2) くさびすべり

図-9に示すような、くさびすべりを模擬する実験装置(木製)を製作し、GPS受信機を設置した移動ブロックに、実験装置の2つの不連続面の交線である、くさびの稜線に沿って、鋼尺を用いた目視により人為的に変位を与えた。実験装置の模擬不連続面1の傾斜および傾斜方位は、それぞれ $59^\circ$ および $327^\circ$ 、模擬不連続面2の傾斜および傾斜方位は、それぞれ $56^\circ$ および $92^\circ$ である(クリノメータを用いて測定)。これら2つの模擬不連続面の交

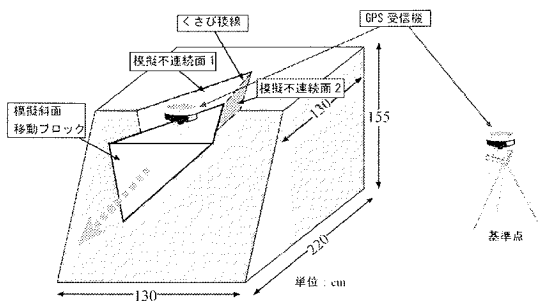


図-9 くさびすべりを模擬する実験

線(くさびの稜線)の傾斜および傾斜方位は、それぞれ $36^\circ$ および $31^\circ$ である。実験では、1日毎に10~90mmの変位を、くさびの稜線に沿って下方に与え、7日間(合計245mm)に渡り、GPSによって変位計測を行った。

計測結果を図-10に示す。また、移動ブロックに与えた変位と計測変位との比較を図-11に示す。さらに、平滑化結果を用いて変位方向の傾斜、および傾斜方位を算出した結果を図-12に示す。

変位方向の計測結果を用いて、前項と同様にシミュレーションを行う。このシミュレーションにおいても、平面すべりのシミュレーションと同様に、ある斜面で実測された不連続面の傾斜および傾斜方位と、上記の模擬不連続面の傾斜および傾斜方位を同一のステレオネット上にプロットし、計測変位からくさびすべりが生じている2つの不連続面の稜線を特定できるかを調べる。

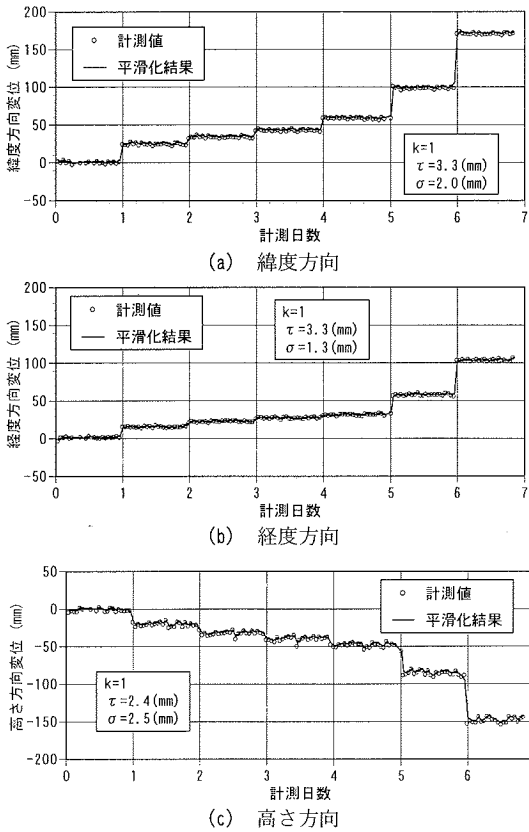


図-10 GPSによる計測変位と平滑化結果  
(くさびすべり実験)

図-13に、シミュレーション結果を示す。図中+印は、不連続面（ある斜面および実験装置）の組み合わせによるくさびの稜線方向を示している。また、変位計測結果から得られるくさび稜線方向の推定範囲（図-7参照）も併せて示す。図から、計測2日目（変位量50mm）の段階では、多くのくさびの稜線方向が推定範囲の中に存在するが、計測6日目（変位量245mm）では、すべりが生じている不連続面の組み合わせ（実験装置のくさびの稜線）を特定している。このように、くさびすべりに対するシミュレーションにおいても、すべりが生じている不連続面の組み合わせを特定できることが示された。

#### 4. 崩壊事例の実測データに基づくシミュレーション

ここでは、平面すべりを例に、図-2に示した平面すべりの実験装置を用いて、斜面崩壊の実測値りに基づき移動ブロックに変位を与え、GPSによ

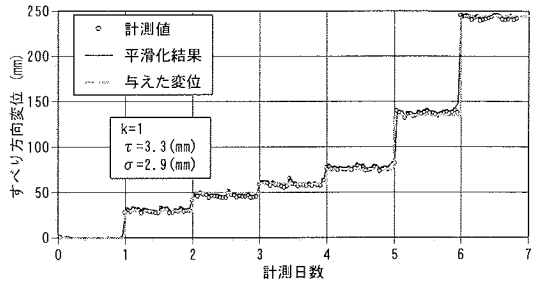
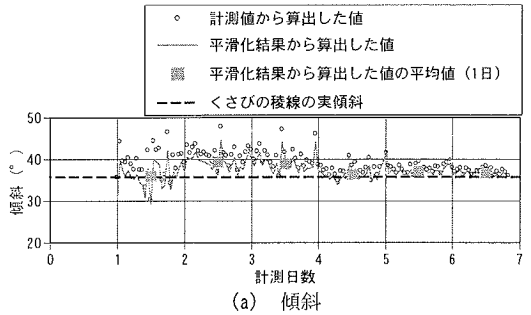
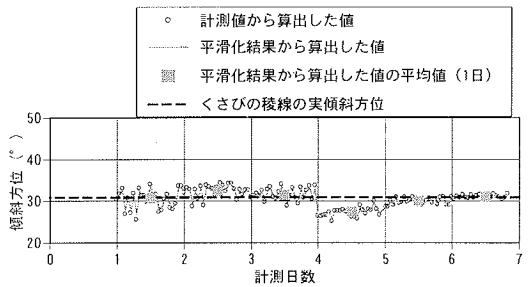


図-11 移動ブロックに与えた変位とGPSによる計測変位および平滑化結果との比較（くさびすべり実験）



(a) 傾斜



(b) 傾斜方位

図-12 計測変位に基づくくさびの稜線および傾斜方位の推定（くさびすべり実験）

てその変位を計測し、3. (1)に示した不連続面の推定法と、文献13)に示した崩壊時刻の予測法を組み合わせで適用する。変位としては、文献4)の実測結果を用いるが、実測値をそのまま用いると本実験装置の変位許容値を超えるため、実測の半分値をブロックに与える。なお、この崩壊例では計測開始後35~36日で崩壊している。また、実測値は斜面頭部の引張亀裂を伸縮計により計測された1次元変位であり、本実験においては、時系列データとして利用し、実験装置のすべり方向に計測された変位を与えている。

図-14に、GPSによる計測結果および平滑化結果を示す。また、移動ブロックに与えた変位と計測変位との比較を図-15に示す。さらに、平滑化結果から算出した変位方向の値に対する1日毎の平均

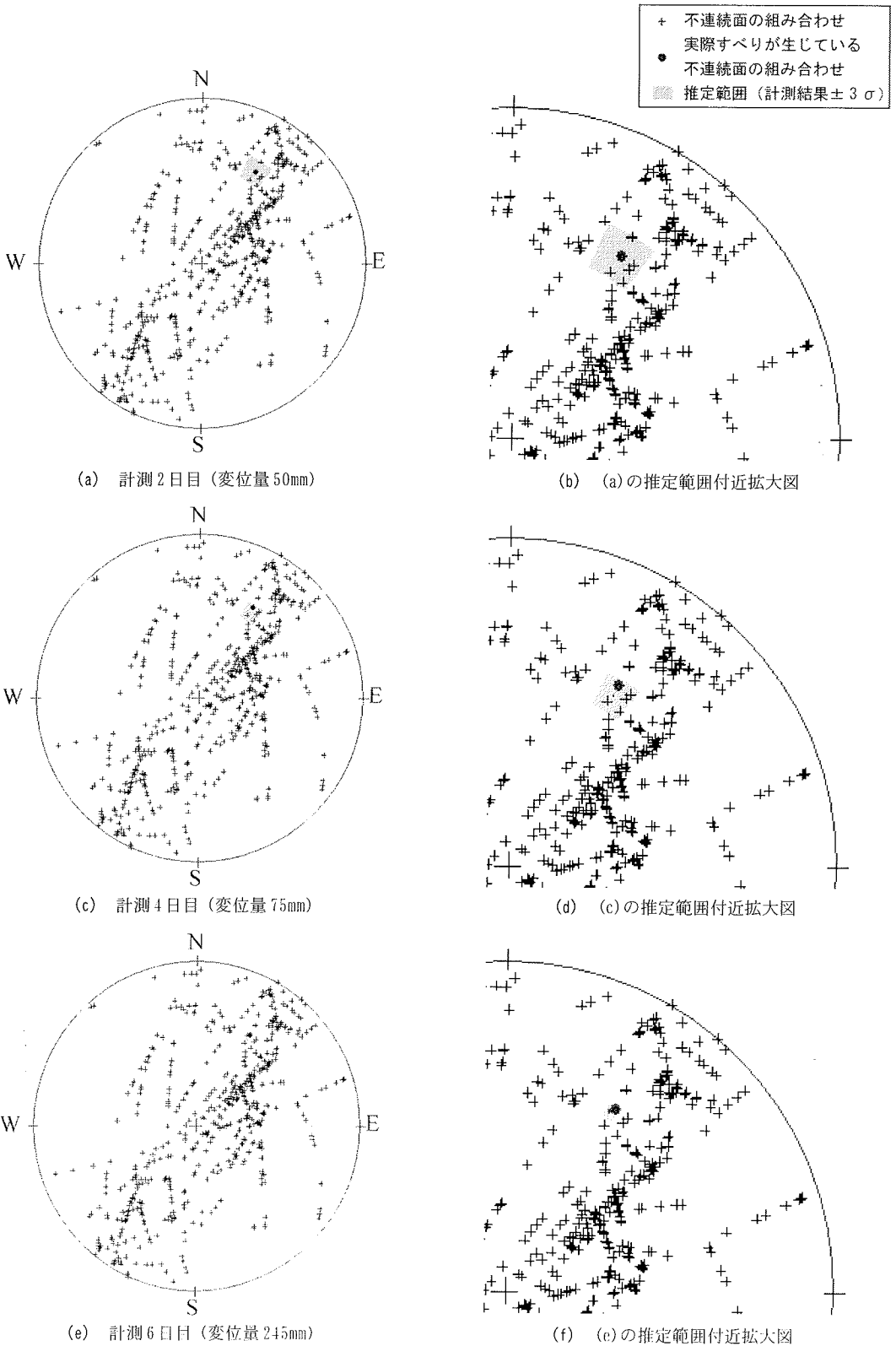
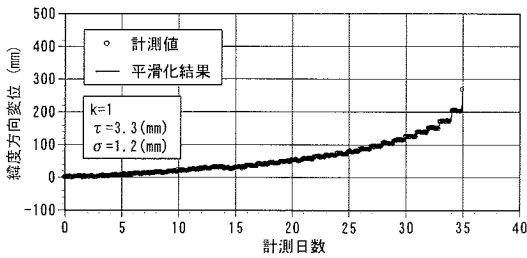
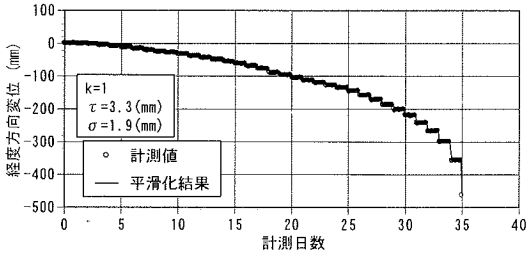


図-13 すべりが生じているくさびブロックの稜線方向に対する推定範囲(くさびすべり実験)

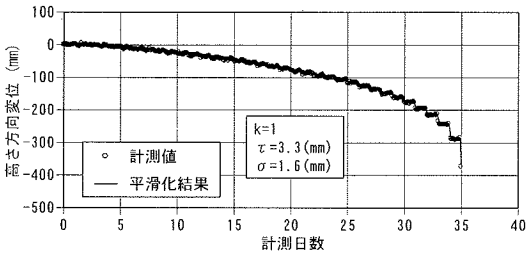




(a) 緯度方向



(b) 経度方向



(c) 高さ方向

図-14 GPSによる計測変位と平滑化結果(崩壊事例の実測データを用いたシミュレーション)

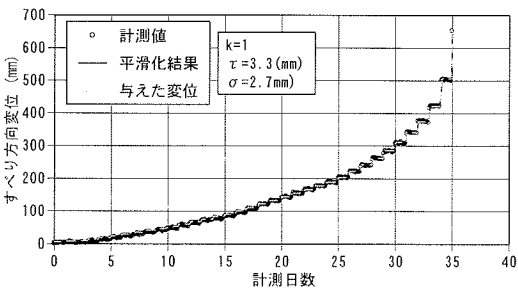
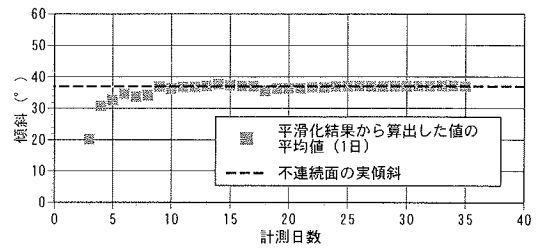
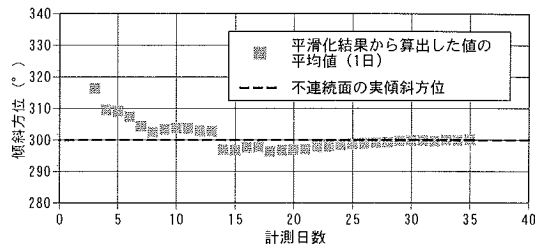


図-15 移動ブロックに与えた変位とGPSによる計測変位および平滑化結果との比較

値を図-16に示す。なお、図中の破線は、実験装置の模擬不連続面の値(クリノメータを用いて測定、傾斜 $37^\circ$ 、傾斜方位 $300^\circ$ )を示す。図-16から、変位が進行するにつれて、平滑化結果から算出した傾斜および傾斜方位の平均値は模擬不連続面の実際の値に近づき、さらに、傾斜については計測開始後10日頃から、傾斜方位については計測開始後25日頃から収束している。



(a) 傾斜



(b) 傾斜方位

図-16 計測変位に基づくすべりが生じている不連続面の傾斜および傾斜方位の推定

次に、この計測結果を用いて、すべりが生じている不連続面を推定するシミュレーションの結果を図-17に示す。図から、変位が進行するにつれて、すべりが生じている不連続面(実験装置の模擬不連続面)が絞り込まれる様子が見られる。そして、計測開始後14日目にはすべりが生じている不連続面を特定している。

さらに、崩壊時刻の予測法<sup>13)</sup>も併せて適用して崩壊時刻を予測する。崩壊時刻の予測結果を図-18に示す。横軸は予測を行った時刻を、縦軸はその時刻までに計測された緯度、経度、ならびに高さ方向の計測結果を用いて予測した崩壊時刻をそれぞれ示している。なお、計測開始時刻を0としており、前述のように実際の崩壊時刻は35~36日目である。図-18から、緯度、経度、ならびに高さ方向の計測結果による予測結果すべてにおいて、崩壊の1週間前に真の崩壊時刻をほぼ予測している。

以上のように、本手法により、不連続面の傾斜および傾斜方位の調査結果と3次元変位計測結果を用いて、すべりが生じている不連続面を推定するとともに、崩壊時刻も同時に推定できることが示された。

図-19に、提案手法の流れを取りまとめる。

## 5. 結論

本研究では、斜面の安定性の評価法としてGPS

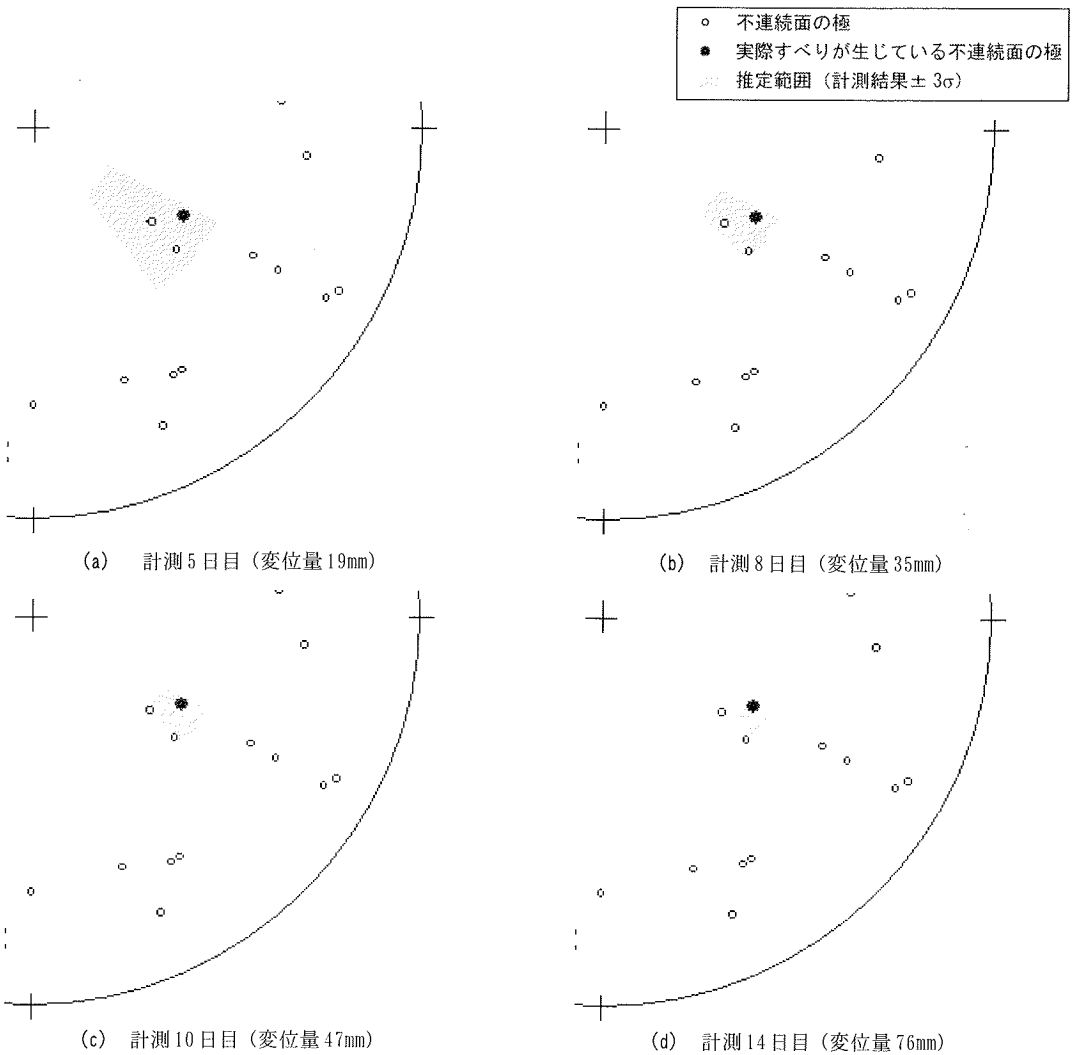


図-17 すべりが生じている不連続面の極に対する推定範囲の推移（推定範囲付近拡大図）

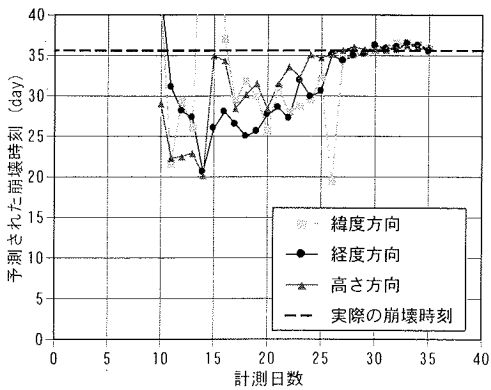


図-18 変位計測結果に基づく崩壊時刻の予測値の推移

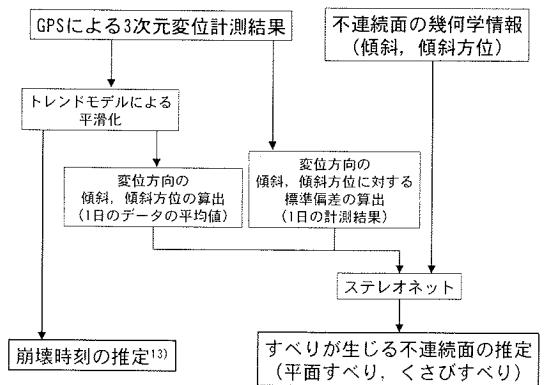


図-19 提案手法のフロー

から得られる3次元変位計測結果と不連続面の幾何学情報(傾斜, 傾斜方位)を利用する方法を提案し, その妥当性を実験とシミュレーションにより検証した.

本研究の結果をまとめると以下ようになる.

- 1) 不連続面調査結果とGPS変位計測システムにより計測された変位方向から, すべりが生じている不連続面を推定する手法を提案した. 平面すべりとくさびすべりに対して, 実験とシミュレーションにより, いずれのすべりに対しても, すべりを生じている不連続面を特定できることを示した.
- 2) 崩壊時刻の予測手法と不連続面の推定法を併せて用いることにより, 計測変位からすべりが生じている不連続面と崩壊時刻を併せて推定できることを示した.

本手法は, 不連続面は平面であり, 移動方向は最大傾斜の方向という仮定を設けている. 実際の不連続面と変位方向はこのように単純ではなく, 提案手法には限界があると思われる. 今後, 本手法を実測値に適用して問題点を抽出し, その解決に取り組むことが課題と考える.

謝辞: 本研究の一部は, 石灰石鉱業協会の研究奨励金の支援を受けて行ったものである. ここに感謝の意を表す. また, 本研究の実験実施に対して協力頂いた, 山口大学工学部 技術専門職員 故 坂尾和男氏に感謝するとともに, 哀悼の意を捧げる.

## 参考文献

- 1) Hoek, E. and Bray, J. W. (小野寺透, 吉中龍之進 訳): 岩盤斜面工学, 朝倉書店, 1979.
- 2) Goodman, R. E. and Shi, G. H. (吉中龍之進, 大西有三 訳): ブロック理論と岩盤工学への応用, 土木工学社, 1992.
- 3) 鷺見武富, 八嶋厚: 不連続面位置とくさび効果を考慮した岩盤斜面の安定性評価手法, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.265-276, 2000.
- 4) 土木学会岩盤力学委員会編: 岩盤斜面の安定解析と計測, 土木学会, pp.161-166, 1994.
- 5) 福岡輝旗: 表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法, 地すべり, Vol.22, No.2, pp.8-13, 1985.
- 6) 斉藤迪孝: 実証土質工学, 技報堂, pp.157-159, 1992.
- 7) Glastonbury, J. and Fell, R.: Analysis and Prediction of the pre-collapse deformation of cut rock slope, Proc. Int. Soc. Rock Mech., pp.95-100, 1999.
- 8) Sakurai, S.: Interpretation of the Results of Displacement Measurements in Cut Slope, Proc. 2nd Int. Sympo. Filed Measurements in Geomechanics, pp.1155-1166, 1987.
- 9) 櫻井春輔, 清水則一: GPSによる切取り斜面の変位測定と計測結果の逆解析に基づく安定性の評価, 地盤と建設, Vol.11, No.1, pp.129-138, 1993.
- 10) 宮澤圭, 吉澤孝和: 地すべり地の地表変位測量データを利用した三次元すべり面形状の推定, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.51-62, 2000.
- 11) 近藤仁志, M. E. Cannon, 清水則一, 中川浩二: GPS変位による地盤変位モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集, No.546/VI-32, pp.157-168, 1996.
- 12) 清水則一, 安立寛, 荒井正, 会津隆士: 地すべり監視におけるGPS変位モニタリングシステムの適用, 地盤工学会誌, Vol.48, No.2, pp.25-27, 2000.
- 13) 松田浩朗, 安立寛, 西村好恵, 清水則一: GPSによる斜面変位計測結果の平滑化処理と変位挙動予測手法の実用性の検証, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.333-343, 2002.
- 14) 清水則一, 安立寛, 小山修治: GPS変位モニタリングシステムによる斜面の変位計測結果の平滑化に関する研究, 資源と素材, Vol.114, No.6, pp.397-402, 1998.
- 15) 北川源四郎: 時系列解析プログラミング, 岩波書店, pp.255-258, 1993.

(2003. 3. 24受付)

## A METHOD FOR INTERPRETING THREE DIMENSIONAL DISPLACEMENTS MEASURED ON DISCONTINUOUS ROCK SLOPE

Hiroaki MATSUDA, Takashi NOMURA, Takayuki FUJITANI and Norikazu SHIMIZU

Monitoring the slope displacements can help them assess the stability of the slope. The most important issue when monitoring the slope behavior is how to interpret the behavior and then assess the stability from the monitoring results.

This paper presents a method to detect a sliding plane among many discontinuities for both plane and wedge failures from three-dimensional displacements measured by GPS. The method is extended to predict the collapse time of the slope failure as well as a sliding plane. Both field experiments and numerical simulations are conducted to verify the proposed method.