

高精度地表面変位計測による迅速な切土すべりの規模推定手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 15～平 18

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：藤沢和範、小嶋伸一

【要旨】

道路建設に伴う切土によって地すべりが発生した場合、発災時の対応の遅れが被災規模の拡大を招くことから、発生初期における早急な対応が重要である。そのためにはその規模を早期に把握する必要があるが、一般に通常のボーリング調査等では日数を要し、しかも地すべり地内での作業であるため安全確保の点からも慎重な対応が求められる。このことから、本研究では地すべりの発生初期において地すべり地内での作業を縮減し、変状の規模を迅速に把握する手法として、高精度地表面計測技術及び変状規模の迅速な推定手法の提案を行うために、既存の災害事例等に関する資料を収集・分析を行うとともに地すべりの地表面変位ベクトルの高精度計測技術の適用性検討や地表面変位ベクトルからすべり面を推定する手法について検討し、現場で利用可能なプログラムを作成して既存の地すべり事例による検証を行った。その結果、本手法により概ね妥当なすべり面が推定できることを明らかにした。

今後、本研究成果をもとに災害発生時等において現場で精度よく容易に活用できるシステムを開発していく必要がある。

キーワード：地すべり、災害対応、すべり面、地表面変位計測

1. はじめに

道路建設に伴う切土によって地すべりが発生した場合、発災時の対応の遅れが被災規模の拡大を招くことから、発生初期における早急な対応が重要である。そのためにはその規模を早期に把握する必要があるが、一般に通常のボーリング調査等では日数を要し、しかも地すべり地内での作業であるため安全確保の点からも慎重な対応が求められる。

このことから、本研究では地すべりの発生初期において、地すべり地内での作業を縮減し、変状の規模を迅速に把握する手法として、高精度地表面計測技術及び変状規模の迅速な推定手法を提案するために、①道路において発生した地すべりの災害事例等に関する資料を収集・分析、②地すべり地表面変位ベクトルの高精度計測技術の適用性検討、③地表面変位ベクトルからすべり面を推定する手法の検討と現場で利用可能なプログラムの作成を行った。

2. 既存文献調査

2. 1 調査方法

道路斜面における地すべり及びすべり面推定手法に関する文献を収集し整理した。

表－1は、切土のり面の崩壊形態¹⁾である。

切土で生じる崩壊は、浅い崩壊、深い崩壊、深く

表－1 崩壊の発生位置とその規模による分類¹⁾

型式	概要	平面図	断面図
I型	切土法面の崩壊が地山の上部まで及ぶ大規模なもので、地すべり型崩壊の典型。		
II型	切土法面の内部で起こる崩壊のうち、直高が約20m以上の規模にわたって起こる大規模なもので、これも地すべり型崩壊とよぶ。		
III型	切土法面の内部で起こる中規模以下の崩壊のうち、法面の上部(地山の表層部)で起こるものをIII型崩壊といい、山崩れ型崩壊とよぶ。		
IV型	切土法面の内部で起こる中規模以下の崩壊のうち、法面の内部(地山の深部)で起こるものをIV型崩壊といい、山崩れ型崩壊とよぶ。		
V型	切土法面の表層部で起こる。ガリや落石程度の小規模な崩壊で、表層剥離型崩壊とよぶ。		

広い崩壊に分けられる。本調査で対象とするのはI型又はII型の切土により発生した地すべりとなる。

2. 2 調査結果

図－1、図－2は、資料²⁾による115事例の切土による地すべり発生箇所の地質構造及び縦断型を分類したものである。切土による地すべりは、流れ盤の椅子型の地すべりが多くっており、特にこのようなタイプの地すべりのすべり面を精度良く推定できることが望ましいことがわかる。

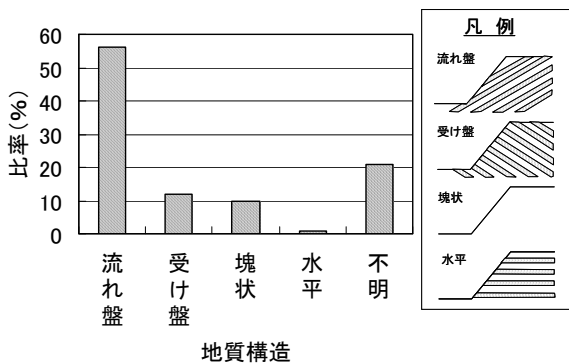


図-1 切土による地すべりにおける地質構造

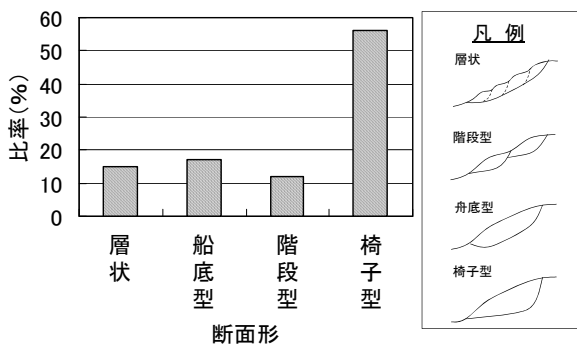


図-2 切土による地すべりの断面形

表-2 切土による地すべりでの応急対策工

文献 番号	崩壊の 形式	応急対策工				
		盛土	排土	集水井	水抜き	他
3	I型	—	—	○	○	アンカー、杭
4	I型	○	—	—	—	—
5	II型	—	○	—	○	本線シフト
6	I型	○	—	—	—	—
7	II型	○	—	—	—	—
8	I型	○	—	—	—	—
9	I型	—	○	—	—	—
10	I型	○	—	—	—	—
11	I型	○	—	—	○	—
12	I型	○	—	○	—	—

表-2は、文献調査から認められた、切土における地すべりの応急対策工である。応急対策工には頭部排土工、押え盛土工等が実施されていることがわかる。頭部排土工や押え盛土工の効果的な実施には、すべり面の形状を把握することが重要であるが、すべり面調査を実施するためのボーリング作業は一般に日数を要し、地すべりの活動状況によっては、安全上実施できない場合もある。効率的な応急対策実施には、地すべり地内に入らずにすべり面を推定する手法の必要性が確認できる。

地すべり地表面変位ベクトルからすべり面形状を推定する手法は、吉澤ら^{13)、14)、15)、16)}及び櫻井ら¹⁷⁾により研究されてきている。吉澤らの方法では、地すべり地の地表面の複数地点における変位ベクトルデータを用い、各地点の変位ベクトルの方向に応じ

てすべり面形状を推定していくものであり、二次元断面において、すべり面の形状を円弧（または複数の円弧の組合せ）として近似する方法^{13)、16)}、変位ベクトルに平行な直線をつないだ多角形での近似する方法（多角形法）¹⁴⁾、曲線を表現する多項式を用いて近似する方法（多項式法）¹⁵⁾が提案されている。また、三次元におけるすべり面の推定法も提案されている。

本研究では、切土による地すべり現場で地表面変位ベクトルを計測して、すべり面形状を迅速に推定するシステムを構築することを目的としてプログラムを作成することとした。

3. 地表面変位ベクトルの高精度計測手法の適用性検討

3.1 調査方法

地すべり地表面変位ベクトルを計測する既存の手法としては、光波測量、GPS測量等が考えられる。（図-3）

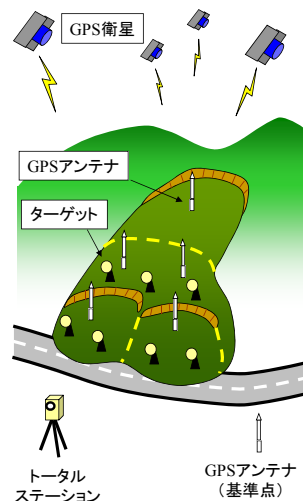


図-3 既存の地表面変位ベクトルの計測方法

光波測量では、通常、地すべり地にターゲット（反射板）を設置しその移動量を計測する。このため、ターゲットを見通せる必要があり、I型の地すべりの場合には、斜面上部を計測することは困難な場合があると考えられる。また、固定点がわかっている必要がある。

一方、GPS測量では、観測点の見通しを必要とせず、全天候で24時間監視可能等の利点があり、一周波型スタティック法では $\pm 10 + 1\text{ppm} \cdot L$ (L: 基線長)、二周波型スタティック法では $\pm 5 + 1\text{ppm} \cdot L$ (L: 基線長)の精度であるが、観測に1～3時間程度の時間が必要となる。

そこで、ジャイロとGPSを組み合わせることにより既存のGPSより短時間で精度の高いハイブリッドGPS¹⁸⁾により、地すべりの地表面変位ベクトルを高精度で計測することを試みた。

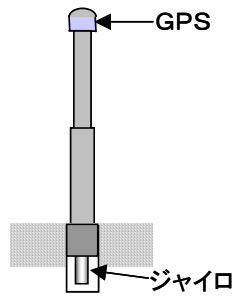


図-4 ハイブリッドGPS

試験地は、T地すべりの末端部に位置するブロックである。写真-1に地すべりの全景を示す。

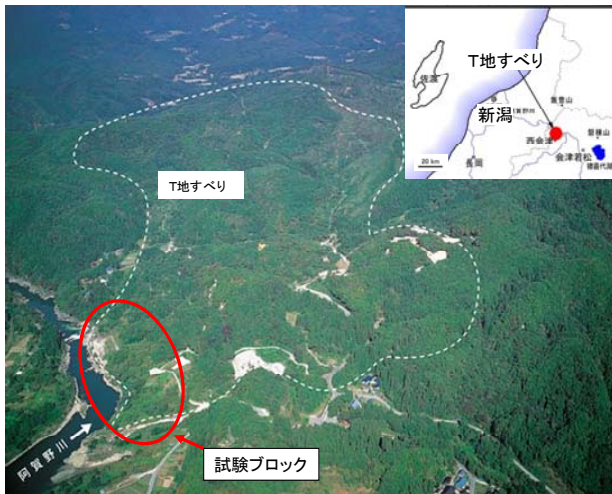


写真-1 T地すべり

図-5は、ハイブリッドGPS及び既存のGPSの設置位置図である。

ハイブリッドGPSは、既存のGPS観測点近傍に設置し、ハイブリッドGPSと既存のGPS測量（一周波型スタティック法）結果の比較を行った。計測結果の出力は、既存のGPSで1時間間隔、ハイブリッドGPSでは、10分間隔である。

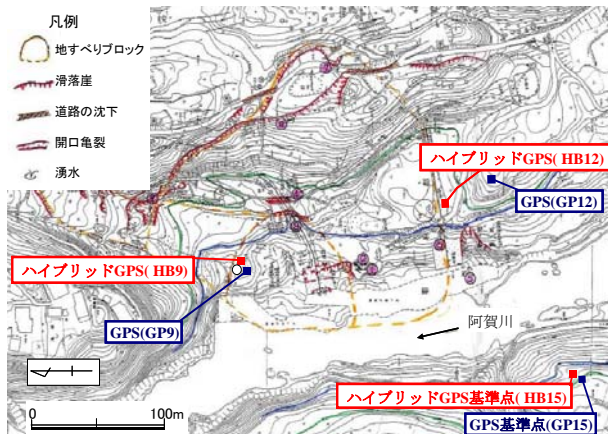


図-5 計測機器設置位置図

なお、HB15、GP15は、地すべり地外の不動点に設置している基準点である。

3.2 計測結果

図-6は、ハイブリッドGPS (HB-9)の10分間隔出力データと既存のGPS計測データ (GP-9)である。既存のGPS計測データでは、±10mm程度のバラツキが見られるのに対し、ハイブリッドGPSでは、バラツキが認められない。

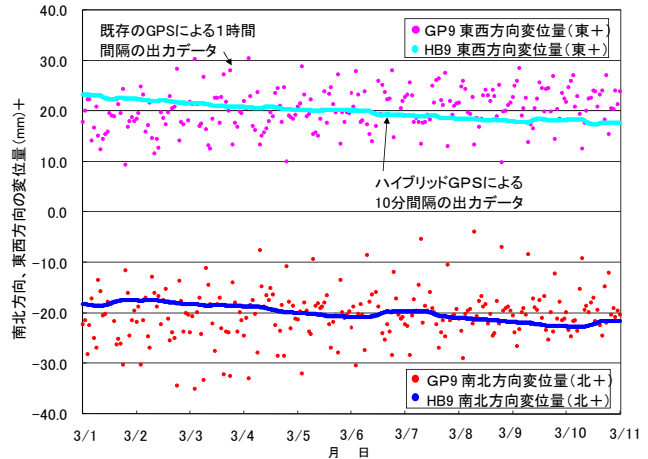


図-6 ハイブリッドGPSと既存のGPSの比較結果

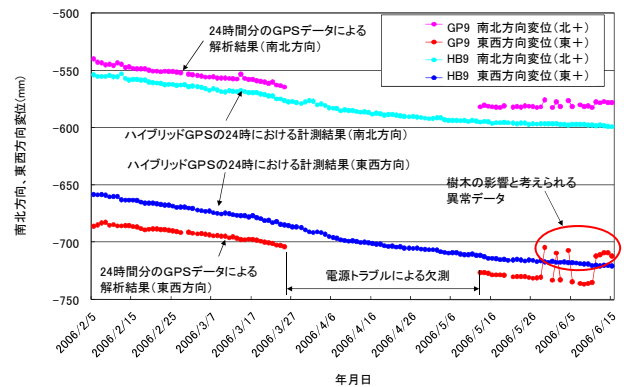


図-7 既存のGPSによる1日単位での解析結果

図-7は、既存のGPSの24時間分のデータの解析から得られた変位量とハイブリッドGPSの24時の出力データを比較した図である。既存のGPSでも24時間単位でデータを解析するとハイブリッドGPSと同程度に変位量の把握ができることがわかる。

今回の調査では、ハイブリッドGPSは、短時間に地表面変位を高精度に計測が行えることがわかった。しかしながら、地すべりの移動量が小さく1日1回程度の計測で十分ならば、既存のGPSでも十分に対応可能と思われる。

また、災害発生時の状況を考えた時、計測機器の

設置、排土や盛土による応急対策での計測機器の移設、滑落に至った場合の計測機器の損壊が考えられる。このことを考慮すると災害発生時の地表面ベクトルの計測には、見通しが必要であるものの、地すべり地内にターゲットを設置するだけの、光波測量による地表面変動計測が現実的であると考えられる。

4. 地表面変位ベクトルによるすべり面推定プログラムの作成

4. 1 調査方法

(1) すべり面推定プログラムと地表面変位ベクトルによるすべり面推定法

現場で地表面変位ベクトルを計測してすべり面形状を迅速に推定するシステムを構築するため、すべり面推定プログラムを作成¹⁹⁾し、プログラムの有効性について実際の地すべり事例をもとに検討した。

プログラムは、現場では主測線断面での調査・計測・検討が一般的であることから、二次元断面ですべり面を推定することとし、現地での作業が可能なように、パーソナルコンピュータ上で扱えるものを開発した。

プログラムへの主な入力項目は、地表の断面形状、計測点位置座標、計測点における地表面変位ベクトル、地すべり頭部や末端の位置座標であり、現地における調査・計測結果から簡単に入力できる。地表面変位ベクトル等からすべり面を推定し、その結果をパソコン画面及びすべり面の座標データとして出力する。

本手法では、切土による地すべりの地すべり頭部、末端部が明瞭な場合が多いことから地すべり頭部、末端部を固定点として取扱い、すべり面は地層構造の影響をうけ椅子型、舟底型等の複雑な断面型となることから地すべりブロックを分割して計算することで複雑なすべり面に対応できるようにした(以後、土研式すべり面推定法と記す)。

以下に土研式すべり面推定法を示す(図-8)。

1) 一つ以上の計測点をもつ*i*ブロックにおけるすべり面形状を近似する式を①式とする。

$$Z = a_i X^2 + b_i X + c_i \quad \dots\dots\dots ①$$

a_i, b_i, c_i : 係数

2) 今、*i*ブロックにおける計測点を一カ所とした時、計測点*i*の時刻*t*における座標を(X_{it}, Z_{it})、計測点位置でのすべり面深さを D_i 、計測誤差を V_{it} とすると、①式は②式ようになる。

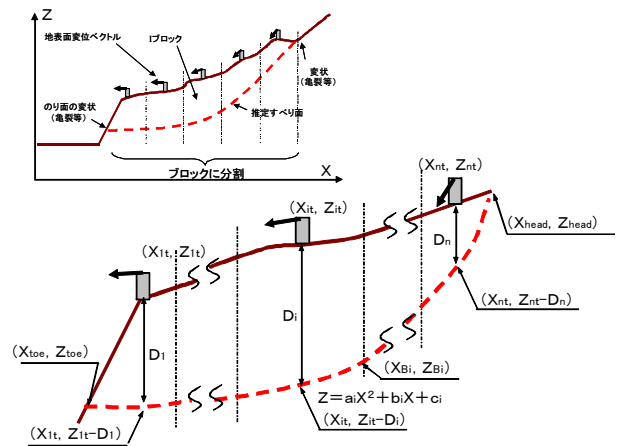


図-8 土研式すべり面推定方法

$$V_{it} = a_i X_{it}^2 + b_i X_{it} + c_i + D_i - Z_{it} \quad \dots\dots\dots ②$$

X_{it} : 時刻*t*における*i*ブロック内の計測点*i*の水平座標

Z_{it} : 時刻*t*における*i*ブロック内の計測点*i*の鉛直座標

D_i : *i*ブロック内の計測点*i*におけるすべり面深さ

V_{it} : 計測誤差

ここで、 a_i, b_i, c_i, D_i が未知数である。

3) また、計測点*i*において時間をとおいて*n*回の計測したときの誤差を最小とするすべり面は、③~⑥式を満たす。

$$\frac{\partial \sum_{t=1}^n V_{it}^2}{\partial a_i} = 0 \quad \dots\dots\dots ③$$

$$\frac{\partial \sum_{t=1}^n V_{it}^2}{\partial b_i} = 0 \quad \dots\dots\dots ④$$

$$\frac{\partial \sum_{t=1}^n V_{it}^2}{\partial c_i} = 0 \quad \dots\dots\dots ⑤$$

$$\frac{\partial \sum_{t=1}^n V_{it}^2}{\partial D_i} = 0 \quad \dots\dots\dots ⑥$$

ここで、⑤式と⑥式は等しくなるため、解は求められない。

4) そこで、ブロック*i*、*i*+1のブロック境界でのすべり面高さ、傾斜は等しくなることから⑦、⑧式を導入する。

(i) 等高条件

$$a_i X_{Bi}^2 + b_i X_{Bi} + c_i = a_{(i+1)} X_{Bi}^2 + b_{(i+1)} X_{Bi} + c_{(i+1)} \quad \dots\dots ⑦$$

X_{Bi} : *i*ブロックと*i*+1ブロックの境界線での水平方向座標

(ii) 等勾配条件

$$2 a_i X_{Bi} + b_i = 2 a_{(i+1)} X_{Bi} + b_{(i+1)} \quad \dots\dots ⑧$$

なお、切土による地すべりでは地すべり頭部、末端部が明確な場合が多く、境界条件として地すべり頭部座標(X_{head}, Z_{head})、末端部座標(X

Z_{toe} , Z_{head}) が与えられるので、⑨、⑩式が成り立つ。

$$Z_{toe} = a_1 X_{toe}^2 + b_1 X_{toe} + c_1 \quad \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

$$Z_{head} = a_n X_{head}^2 + b_n X_{head} + c_n \quad \dots\dots\dots \textcircled{10}$$

以上、③～⑤式、⑦～⑩式を用いて、これらの方程式を解くことにより a_i , b_i , c_i , D_i が求められる。

なお、⑧式は、滑らかなすべり面を推定するための条件であり、用いなくともすべり面は推定できる。また、土研式すべり面推定法では、不自然なすべり面の生成をさけるため、⑪⑫式で示す α , β を設定する事により等勾配条件を緩和できるようにしている。

$$0 < a_i \leq \alpha \quad \dots\dots\dots \textcircled{11}$$

$$\beta = 2 a_{(i+1)} X_{Bi} + b_{(i+1)} - 2 a_i X_{Bi} - b_i \quad \dots\dots\dots \textcircled{12}$$

(2) 検証に用いた既存の地すべり概要

今回の検証では、10箇所の地すべりについて地表面変位ベクトルから土研式すべり面推定法によりすべり面を推定した。表-3は、今回の検証に用いた既存の地すべりの一覧である。

検証に用いた地すべりの断面型は、椅子型、船底型、階段型がみられ、船底型の断面型が最も多かった。地すべりの規模は、長さ 60m、幅 50m～長さ 1300m、幅 700mのものであった。主測線近傍の計測点は、2～10点認められるが、地すべり頭部や末端部に比較して中部に配置されているものが多い。

地表面変位の計測手法については光波測量が8箇所、GPS測量が2箇所であり、光波測量により計測されているものが多かった。移動量は、H地区以外は、観測期間中に最大数十 cm 以上の大きな移動量が認められている。また、切土による地すべりはJ地区のみで他は自然斜面の地すべりであった。

これらの既存の地すべり事例ですべり面推定プログラムにより計算したすべり面（以後、計算すべり面と記す）とコア判定や計測結果から実際に観測されたすべり面（以後、観測すべり面と記す）を比較した。

4. 2 調査結果

今回は、緩和条件 α は用いず、 β はA地区で 0.5、それ以外の地区で 0.1 と設定し計算した。

図-9は、すべり面推定プログラムにより、地表面変位ベクトルからすべり面を計算した結果である。なお、D地区は斜面中央部でやや上向きの計測結果が認められるため、斜面上部と下部に分けて計算した。

計算すべり面と観測すべり面を比較すると、頭部や末端部で形状及びすべり面深さが異なるものが多い。計算すべり面は観測すべり面と比較して全体にやや浅めに推定されており、丸みを帯びたすべり面形状を示すものが多くみられる。地表面変位ベクトルの計測点がバランス良く配置されている部分では比較的すべり面は一致しているが地すべり頭部や末端部等の測点が少ない箇所では、すべり面のずれが大きくなると考えられる。J地区のように頭部から末端部までバランスよく計測点が配置されている場合、すべり面がよく一致している。なお、計測点が多数あるにも関わらず複雑なすべり面形状を示すD地区のような場合は、すべり面をうまく再現できな

表-3 検証に用いた地すべりの諸元

地区番号	地すべり分類	断面型	規模 (L:長さ、W:幅、D:最大深(m))	計測方法	計測点数			移動量 (最大)
					頭部	中部	末端部	
A	風化岩すべり	椅子型	L:300m,W:150m,D:30m	光波	0	6	0	約1m/4年
B	崩積土すべり	椅子型	L:1300m,W:700m,D:130m	光波	2	2	0	約6m/6年
C	風化岩すべり	船底型	L:60m,W:50m,D:15m	光波	1	1	1	約80cm/月
D	風化岩すべり	階段型	L:400m,W:300m,D:50m	光波	2	6	2	約40cm/年
E	崩積土すべり	階段型	L:750m,W:240m,D:60m	GPS	1	0	1	約20cm/2年
F	崩積土すべり	船底型	L:150m,W:100m,D:20m	光波	0	3	1	約2.7m/3月
G	風化岩すべり	船底型	L:80m,W:60m,D:15m	光波	0	4	0	約2m/月
H	風化岩すべり	船底型	L:150m,W:150m,D:20m	光波	0	2	1	約4cm/1.5年
I	風化岩すべり	船底型	L:300m,W:200m,D:20m	GPS	1	0	1	約30cm/4年
J	岩盤すべり	船底型	L:70m,W:60m,D:10m	光波	1	2	1	約20cm/月

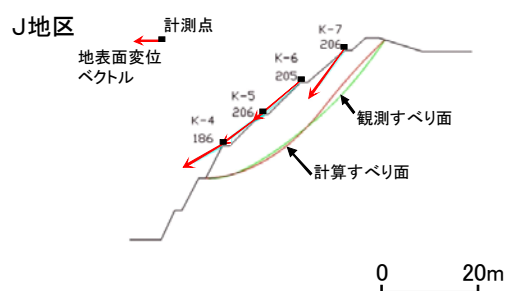
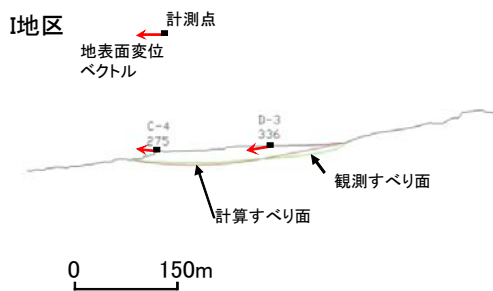
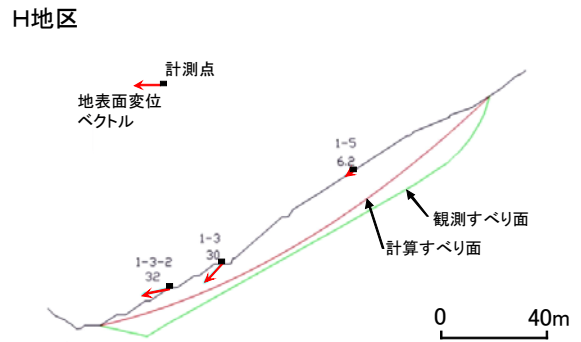
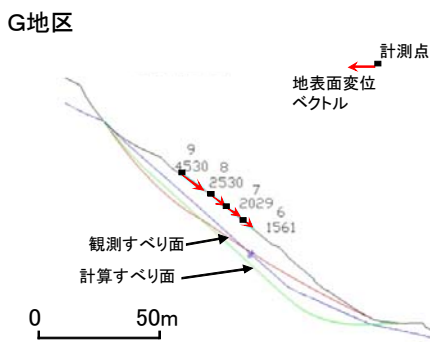
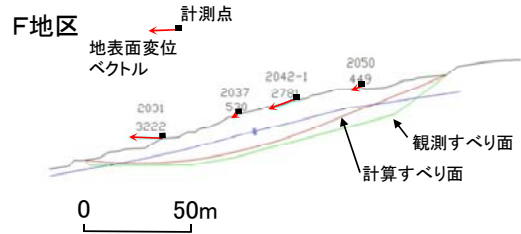
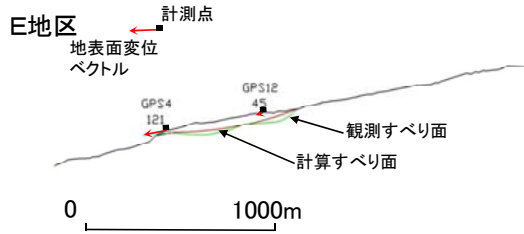
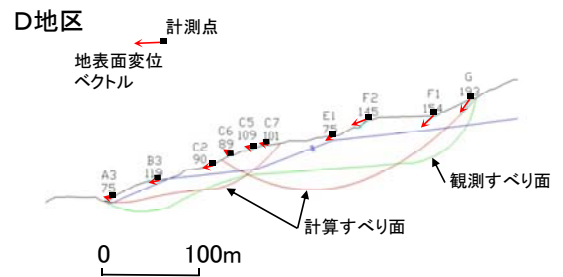
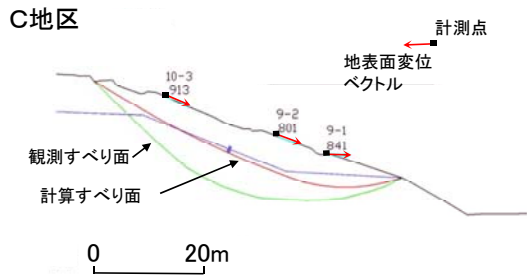
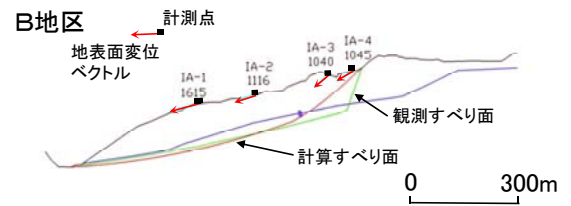
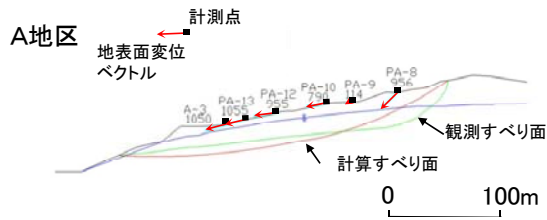


図-9 すべり面推定プログラムによるすべり面計算結果

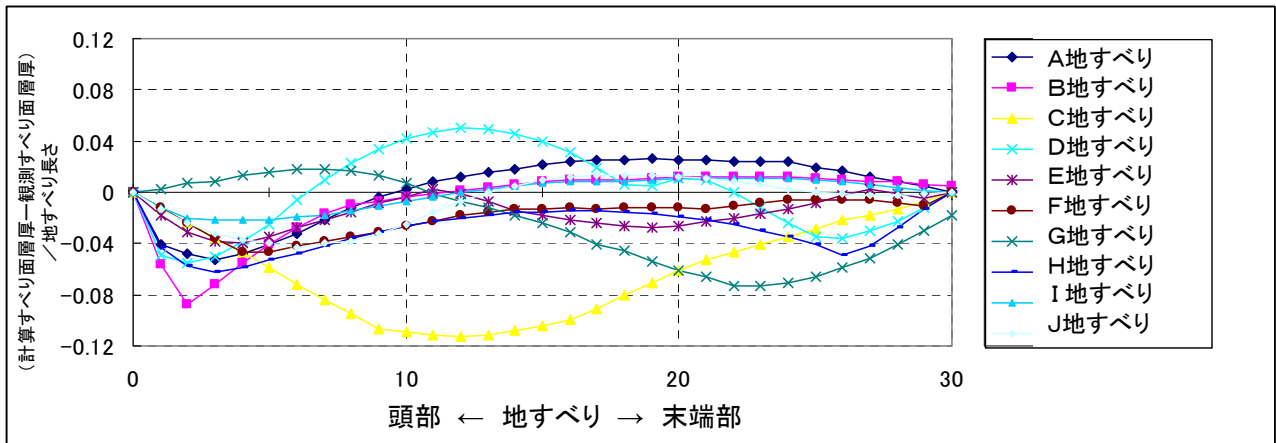


図-10 (計算すべり面深さ-観測すべり面深さ) / 地すべり長さ

い場合があることがわかる。

図-10は、解析断面における地すべりブロックの長さを30等分して区分点における計算すべり面層厚と観測すべり面層厚の差を地すべり長さで除したものである。今回対象とした事例では、地すべり頭部および末端部で計算すべり面が観測すべり面より薄くなる(値が-)ものが増えているが、その差は大きくとも地すべり長さの1割以内に収まっていることがわかる。

この結果から、調査ボーリング等を実施する際には、頭部及び末端部では計算すべり面より、地すべり長さの1割程度余裕を持って調査することが必要であると言える。

応急対策工の規模を決めるためには、現状の安全率を計算し、目標とする安全率まで上がるように対策工を実施する必要がある。そこで、観測すべり面と計算すべり面を用いて安全率の比較を行った。

表-4は、観測すべり面で安全率が1.0となるように設定した土質定数を用いて、計算すべり面における安全率を求めたものである。

なお、土質定数C (kN/m²)については、地すべりで一般的に用いられている最大層厚から求め、 ϕ (°) は、観測すべり面を用いて逆解析により求めた。

計算すべり面を用いたときの安全率は、観測すべり面での安全率に比較して大きくなっているものと小さくなっているものが認められる。また、計算すべり面と観測すべり面による安全率の差は、多くが±0.15以内とやや大きな差が生じている。また、C地区では0.3以上になっているが、これは計算すべり面が浅く地下水の影響を受けなかったためだと考えられる。

今回用いたデータは過去に発生した地すべりでの

表-4 計算すべり面による安定解析結果

地区番号	計測点数			計算されたすべり面による地すべり安全率
	頭部	中部	末端	
A	0	6	0	0.873
B	2	2	0	0.818
C	1	1	1	1.316
D	2	6	2	1.004(上)、0.928(下)
E	1	0	1	1.043
F	0	3	1	1.095
G	0	4	0	1.128
H	0	2	1	1.029
I	1	0	1	0.932
J	1	2	1	1.021

計測データを用いたものであり、今回のようにすべり面を推定することを目的として計測点を配置し、計測したものではない。このため、計算すべり面と観測すべり面と差が大きくなっていることが考えられる。計測点の配置方法等さらに検討することによりすべり面の推定精度はさらに向上すると期待される。

5. まとめ

本研究では、切土等の建設現場において地すべりの発生初期段階で変状の規模を迅速に把握する手法として、高精度地表面計測技術及び変状規模の迅速な推定手法の検討を行った。その結果以下のことがわかった。

- (1) 既存資料の整理から、切土による地すべりは、流れ盤の椅子型が多い。また、応急対策工では盛土、切土が多く見られた。
- (2) ハイブリッドGPSは、リアルタイムでmmオーダーでの計測が可能であるが、移動量が少なく1

日1回程度の計測で良い場合は通常のGPSでも十分である。なお、災害現場での作業性や地すべり滑落時の計器の破損等を考えるとターゲットを見通すことが必要であるが、光波測量が実用的と考える。

- (3) 土研式すべり面推定法を考案し、2次元断面で現場でも容易に利用できる地表面変位ベクトルからすべり面形状を推定するプログラムを作成した。
- (4) 実際の地すべり地で計測された地表面変位ベクトルを用いてプログラムの検証を行った。その結果、地表面変位ベクトルの計測点がバランスよく配置されている部分ではすべり面が比較的良く一致しているものの、頭部や末端部などの計測点が少ない箇所ではすべり面のずれが生じるが、その範囲は地すべり長さの1割程度以内であった。また、計算すべり面と観測すべり面より求めた安全率の差は概ね±0.15に収まることがわかった。このような誤差を考慮することで、本プログラムは応急調査や応急対策の目安として活用できると考えられる。

今回の事例検証事例では、地すべり地表面変位ベクトルによりすべり面を推定しようとして計画的に地表面ベクトルを計測したものではない。このため、すべり面の再現性も低下していると考えられ、今後は、現在実施している共同研究を主体に、データの取得方法や計算方法の改良を行い、現場に適したシステムとして実用化を進めていく予定である。

【参考文献】

- 1) 奥園誠之・島田忠則：これまでの事例にみる切土のり面の崩壊形態とその対策：施工技術，Vol. 9, No. 4, pp. 35-43, 1976.
- 2) 土木研究所地すべり研究室：道路建設に伴う切土工による地すべりの実態，土木研究所資料2288号，1986.1
- 3) 大須賀伸夫、松本正司、中川渉、谷口清：供用中の高速道路法面に発生した堆積軟岩の遅れ破壊機構と復旧対策工法、土と基礎 Vol. 51 No. 9 pp. 10-12、地盤工学会、2003. 9
- 4) 山本哲郎、鈴木素之、他：火山岩切り取り斜面の地すべりと地すべり粘土の強度特性、土と基礎 Vol. 50 No. 11 pp. 42-44、地盤工学会、2002. 11
- 5) 山崎勝志、友尻正一、佐々木隆夫：降雨防災 道央自動車道・黒松内東栄地区の融雪法面災害、ハイウェイ技術 No. 16 pp. 75-81, 2000. 4
- 6) 末峰章：結晶片岩地域の予想しがたい地すべりの事例、地すべり Vol. 34 No. 4 pp. 27-34、日本地すべり学会、1998
- 7) 中島武博、福原力、松本茂美、蒲田浩久：グラウンドアンカー工法 グランドアンカーによる変成岩地帯地すべり対策工—徳島自動車道池田地区の切土の法面対策、基礎工 Vol. 25 No. 7 pp. 84-89、総合土木研究所、1997. 7
- 8) 江良允仁、北村敬司、船山満也、長谷川昌弘：高速道路切土工事における地すべりと抑止対策、とびしま技報土木 No. 43 pp. 62-68、飛鳥建設、1992. 3
- 9) 谷本喜一、池尻勝俊：神戸層群地域における建設工事による地すべりについて その2、建設工学研究所報告 No. 33 pp. 257-276、1991. 12
- 10) 谷信弘、福本安正：北陸自動車道大平寺地区における地すべり変状と対策工、基礎工 Vol. 19 No. 9 pp. 111-119、総合土木研究所、1991
- 11) 石川渉、堀野義郎、渡辺広明：高速道路切土区間における風化軟岩すべり抑止対策、西松建設技報 No. 14 pp. 142-152、1991
- 12) 矢野滋：地すべりと対策工 第三紀層の大規模地すべり対策 北陸自動車道湯上地区、基礎工 Vol. 13 No. 9 pp. 61-67、総合土木研究所、1985
- 13) 宮澤圭・吉澤孝和(2000)：地すべり地の地表面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.
- 14) 吉澤孝和(2001)：時間差測量による地下すべり面の推定解析法(その1)—四次元測量の地すべり解析への応用一、地すべり技術，第28巻第2号，pp. 12-22.
- 15) 吉澤孝和(2002)：時間差測量による地下すべり面の推定解析法(その2)—四次元測量の地すべり解析への応用一、地すべり技術，第28巻第3号，pp. 17-27.
- 16) 吉澤孝和(2002)：時間差測量による地下すべり面の推定解析法(その3)—四次元測量の地すべり解析への応用一、地すべり技術，第29巻第1号，pp. 16-28.
- 17) 櫻井春輔・安達健司・武石朗(2001)：計測変位を用いた斜面の安定性評価法、土と基礎，第49巻第7号，pp. 10-12.
- 18) 大河原孝・田保榮太郎：ジャイロ・GPS装置による地すべり試験観測、第42回地すべり学会研究発表会，pp. 135-138、(社)日本地すべり学会、2003. 8
- 19) 浅井健一、藤澤和範、田中尚、武石朗(2006)：地すべり発生初期における地表面変位計測によるすべり面推定手法の検討、第45回地すべり学会研究発表会講演集，pp. 393-394.

【英文要旨】

When a landslide is induced by cutting roadside, it is quite important to install emergency countermeasures as soon as possible, because the delay of installment often makes the damage larger. For their immediate installment, it is necessary to know the moving feature and size of a landslide without taking time. However, ordinary methods, such as investigating a slip surface by taking core samples and monitoring the movement of land mass using vertical boring holes, is quite time-consuming. In addition, there is an issue of safety, as operational works required to these methods have to be carried out directly on unstable landslides.

This study developed a monitoring technique of ground surface displacement and examined an estimation method of the depth of a slip surface. For monitoring surface displacement, hybrid GPS provided accurate monitoring data, although it was inflexible, for GPS points have to be set fixed. On the other hand, employing an optical theodolite enables flexible and reasonably accurate monitoring, proving to be suitable in emergency situation. A computer program which estimates the depth of slip surface from the vector data of surface movement at several points was developed and applied to several landslides. The slip surfaces given by the program were agreeable to the actual surfaces estimated from ordinary methods. In future, it is necessary to further improve monitoring systems of active landslide mass and estimation methods of their size in a quick, easy, and reliable manner to be practically applicable to disaster areas.