

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

Stability Assessment of a Cut Slope Based on Back Analysis of Displacements Measured
by Global Positioning System

桜井 春 輔* (Shunsuke Sakurai)

清水 則 一** (Norikazu Shimizu)

本文は、砂岩と粘板岩からなる切取り長大斜面の現場において GPS を用いて変位計測を実施し、さらに計測結果の逆解析に基づき斜面の安全管理を行った事例について述べるものである。

GPS は新しい長距離測量法として注目されている人工衛星を用いる測量システムである。本研究では GPS を切取り斜面の変位計測に応用し、実際の工事環境下において比較的容易に精度良く三次元変位測定が行えることを明らかにした。GPS を用いたモニタリングによって、斜面に大きな変位が生じたことが観測されたので、計測結果の逆解析に基づき斜面の安定性の評価を行い、その結果が設計変更に反映された。

キーワード： GPS，現場計測，変位測定，逆解析，斜面安定 (IGC: G6)

1. はしがき

切取り斜面の安定性は極限平衡法などを用いて力の釣合いに基づき評価されるのが一般的である。その場合、斜面地山の強度定数などの力学的定数が必要であるが、設計時においてそれらの値を求めることは容易ではない。したがって、工事前に斜面の安定性を評価することは困難なことが多く、施工中に斜面の安全監視を目的として現場計測が実施されている。

現場で行われる計測は、計測の容易さや精度の観点から変位計測が主流である。現在では、伸縮計や傾斜計などの変位計測機器を用いることによって、斜面の変位をかなり正確に測定できるようになった。しかし、これまでに開発されてきた計測機器は主として、たかだか数 10m 規模の局所的な地盤の変位挙動を測定するものが多い。そのため、長大斜面や大規模露天掘りピットなどのように、広範囲な領域において斜面の変位を測定する必要がある場合には、それが可能な計測機器や計測方法を新たに開発する必要がある。そのような要求に応える方法として、筆者らは、GPS(Global Positioning System: 人工衛星測量システム) に注目して、切取り斜面の変位計測に適用しその実用性を明らかにした^{1)~4)}。

一方、桜井らは、工事中に計測した変位から逆解析を行い、その結果に基づき強度定数を推定し、安全率を求めることによって斜面の安定性を評価する方法を提案した^{5)~8)}。本文は、ある切取り長大斜面の現場において GPS を用いて変位計測を実施し、さらに計測結果の逆解析に基づき斜面の安全管理を行った事例について報告するものである。

2. 対象斜面の概要

対象とする切取り斜面は砂岩と粘板岩からなり、一部の粘板岩は著しく破砕を受けている⁹⁾。斜面の高さおよび幅はそれぞれ約 120m および 200m である(図-1 参照)。図-1 に GPS 測量の基準点(斜面から約 600m 離れた地点 A および B 点) および斜面上の観測点(1 ~ 10) を示す。

*神戸大学工学部建設学科 教授, ** 山口大学工学部社会建設工学科 助教授

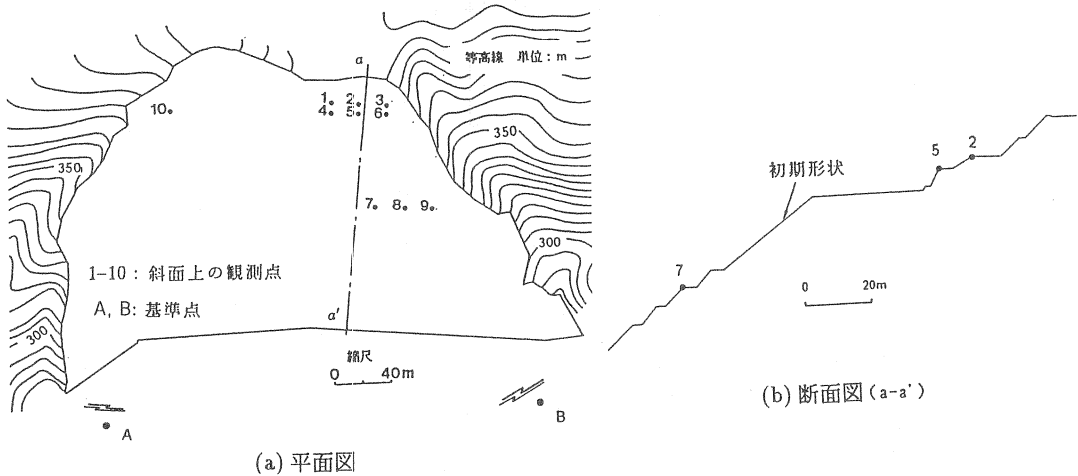


図-1 対象斜面と変位観測点

3. GPS による変位計測

3.1. GPS と変位計測法の概要

GPS は、アメリカ合衆国が開発した人工衛星を用いる測量システムで、人工衛星から送られる電波を受信して、数 km ～数 100km 離れた 2 点間の相対的な位置 (座標) を三次元的に精度良く測定することができる^{10)–12)}。さらに、1) 観測点間の視通を必要としないこと、2) 雨や霧などの天候に影響されにくく、また、夜間でも実施できること、3) 測量作業の人員と時間の省力化が図れること、など従来の測量法より優れた特徴を有している。GPS によって繰り返し観測点の座標を測定し、観測点の移動量を求めることによって、広い領域における地盤の変位を比較的容易に求めることができる。

GPS による測量方式には数種類あるが、本研究では最も信頼の高い結果を得ることができるスタティック方式を用いた。スタティック方式による GPS 測量 (以下簡単にスタティック測量と呼ぶ) は、複数の観測点にアンテナと受信機を固定して、それぞれの点において同時に 3 個以上の人工衛星からの電波を受信し、観測点間の相対座標を求める方法である (図-2 参照)。観測時間は、衛星の個数および基線長によって異なるが、基線長が数 km 以内で 4 衛星を同時に受信できる場合、1 ～ 2 時間程度を目安としている。各観測点で受信したデータはコンピュータに転送され、それを解析することによって座標が求められる。

本研究のように、斜面上の観測点の変位を求める場合は次のようにすればよい。まず、斜面から十分に離れた不動と見なせる位置に基準点 A および B を設ける。ここで、基準点 A および B の座標 $X_i^{0(A)}$ および $X_i^{0(B)}$ は既知とする。次に基準点と斜面上の観測点に対してスタティック測量を実施する (図-3 参照)。GPS 測量によって斜面上の観測点に対して、基準点 A および B との相対座標 $\Delta X_i^{(A)}$ および $\Delta X_i^{(B)}$ が求められる。2 つの基準点から得た観測点の座標 $X_i^{0(A)} + \Delta X_i^{(A)}$ および $X_i^{0(B)} + \Delta X_i^{(B)}$ の各成分を算術平均して観測点 k の座標 $X_i^{(k)}$ を確定する。そのような方法で斜面上の全ての観測点の座標を求め、それを初期座標とする。日時において同様な観測を行い、各観測点の座標を確定して、その座標と初期座標との差を求めれば、それが観測点の変位となる⁴⁾。

3.2. 変位計測結果⁴⁾

図-4 に GPS による斜面の変位計測結果を示す。本観測では、一つの測線の観測時間を 90 ～ 180 分 (データ取得間隔 15 秒) とし、各測線に対して 2 ～ 3 回観測した。また、上空に常時 4 ～ 5 個の人工衛星が飛来する時間帯を選んで観測した。なお、観測には 8 チャンネルの L1 波・C/A コード受信機 (機種: 4000SST, データ解

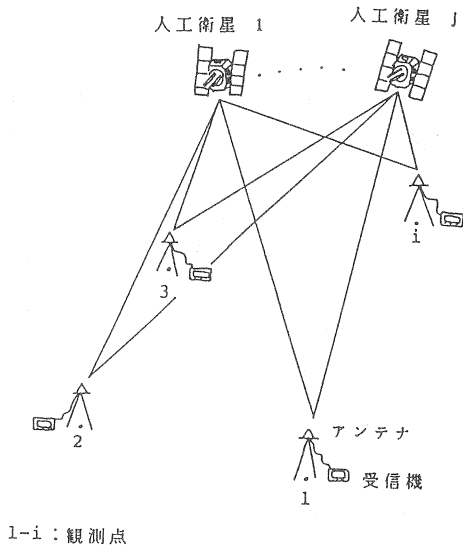


図-2 スタティック方式による GPS 測量

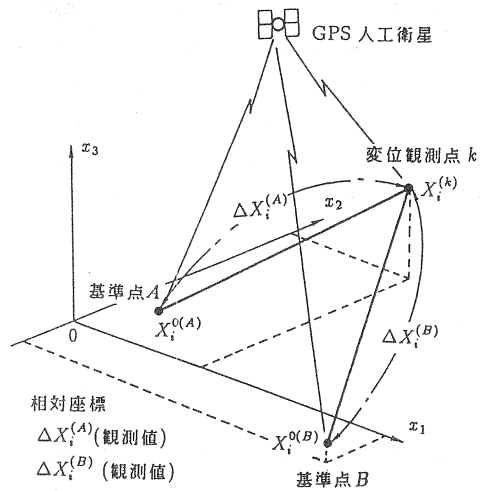
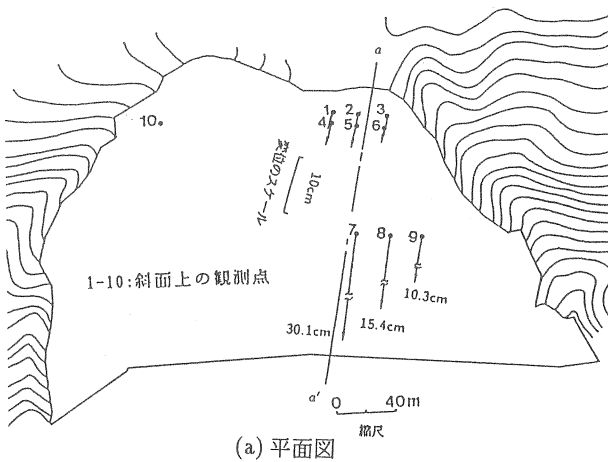
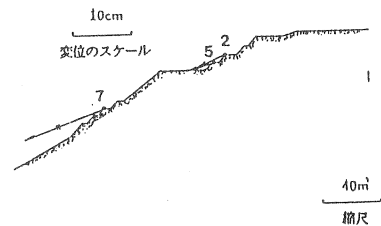


図-3 基準点と観測点



(a) 平面図



(b) 断面図 (a-a')

図-4 GPS による斜面変位の計測結果

析プログラム:TRIMVEC-PLUS, 共に Trimble Navigation 社製) を用いた。

本観測では、GPS 測量の結果の精度を調べるために、いくつかの観測点に対して高精度トータルステーションによる測量を同時に行った。その結果、GPS およびトータルステーション測量による測定変位の差は、水平方向に対して標準偏差約 6mm、および、鉛直方向に対して標準偏差約 18mm であった⁴⁾。トータルステーション測量による変位計測の精度 (標準偏差) は 1mm 以内である¹³⁾ことを考慮すると、GPS 測量によって水平および鉛直方向変位を、少なくとも、それぞれ 10mm および 20mm 程度の精度で測定できるものと考えられる。

図-4 の測定結果を得た観測期間中には斜面掘削は行われなかったが、斜面上部の観測点 1～6 において数 cm の変位が生じ、特に、斜面中腹の観測点 7～9 に非常に大きな変位が検出され、斜面の安定性が懸念された。

4. 斜面の安定性評価

4.1. 計測変位の逆解析と安全率の計算手法の概要⁵⁾⁻⁸⁾

桜井らは、アルミ積層体による斜面のモデル実験から、すべりを生じる層(すべり層)に沿ってせん断剛性が低下し、すべり層にはほぼ平行に最も大きなせん断変形が生じることを観察した¹⁴⁾。そして、その挙動はすべり層に平行な方向に主軸の一つをもつ異方性モデルを用いることによってシミュレートできることを示した¹⁵⁾。すなわち、図-5に示す座標系において、すべり線に平行に局所座標系 $x'-y'$ をとり、次のような増分形式の応力-ひずみ関係式を用いることによって、斜面のすべり変形挙動を表すことができる⁵⁾⁻⁸⁾。

$$\{\Delta\sigma'\} = [D']\{\Delta\varepsilon'\} \quad (1)$$

ただし、

$$[D'] = \frac{E}{(1-\nu-2\nu^2)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & m(1-\nu-2\nu^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

なお、 E および ν は弾性係数およびポアソン比である。また、 m は異方性の程度を示すパラメータで、ここでは異方性パラメータと呼ぶ。さらに、式(1)は全体座標系 $x-y$ において次のように表される。

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} \quad (3)$$

ただし、

$$[D] = [T][D'][T]^T \quad (4)$$

$[T]$ は次に示す変換マトリックスである。

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & -2 \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & 2 \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 α は x' 軸と x 軸のなす角度である。なお、等方性の場合 $m = 1/2(1+\nu)$ となる。式(3)を用いると、斜面のすべり変形挙動だけでなく、弾性的挙動およびトッピング挙動を表し得ることが有限要素解析によって示されている^{6),8)}。

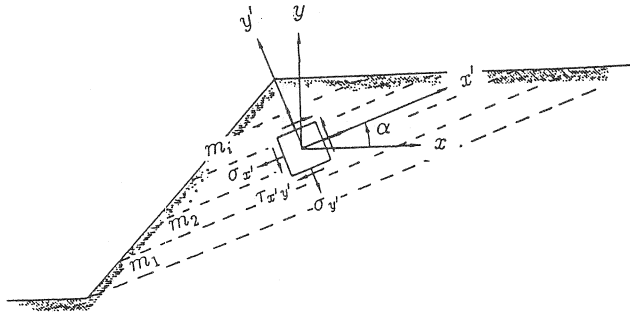


図-5 局所座標系と全体座標系

現場において計測変位 u_i^m が得られると、それと応力-ひずみ関係式 (3) を用いて計算した変位 u_i^c との差の二乗和 δ が最小となるように、パラメータ m, E など (場合によっては初期応力を含む) を求めることができる。

$$\delta = \sum_{i=1}^M (u_i^c - u_i^m)^2 \rightarrow \min. \quad (6)$$

ただし、 M は計測数である。

上述のようにして現場計測変位の逆解析によって得られたパラメータから、強度定数と斜面の安全率は次の手順によって求めることができる⁵⁾⁻⁸⁾。

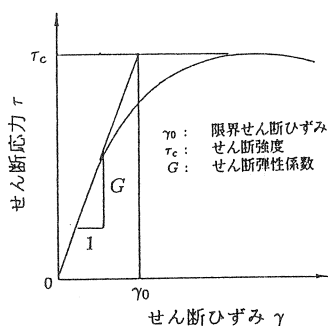
(1) 逆解析によって異方性パラメータ m と弾性係数 E を求める。

(2) せん断弾性係数 G は m, E との関係式から求める。

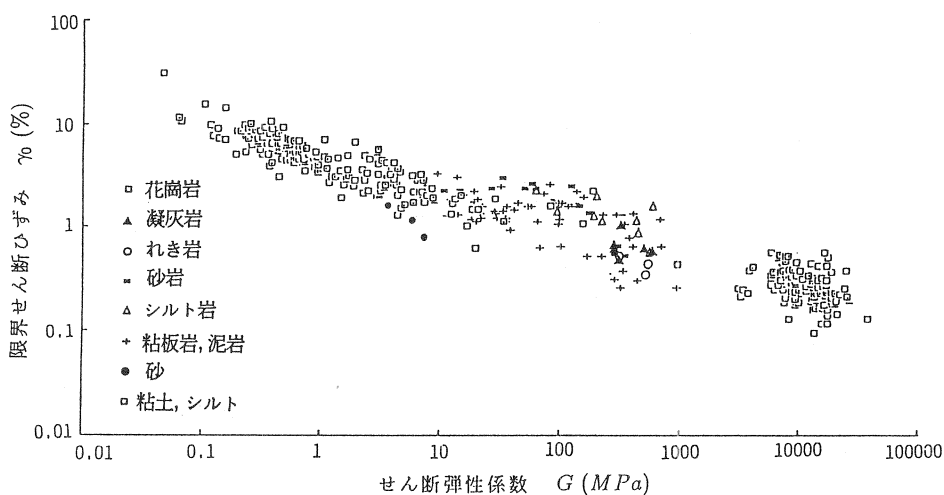
$$G = mE \quad (7)$$

(3) 限界せん断ひずみ γ_0 とせん断弾性係数 G からせん断強度 τ_c を求める (図-6 (a) 参照)。

$$\tau_c = G\gamma_0 \quad (8)$$

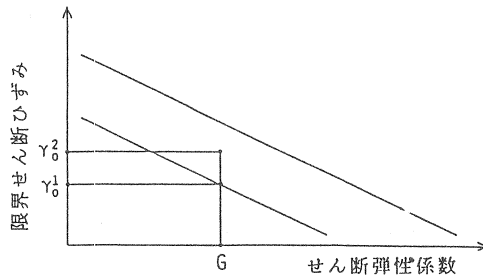


(a) 限界せん断ひずみの定義

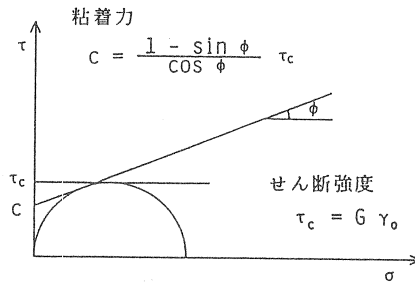


(b) 限界せん断ひずみとせん断弾性係数

図-6 限界せん断ひずみ



(a) 限界せん断ひずみとせん断弾性係数との関係



(b) 粘着力とせん断強度の関係

図-7 粘着力の推定 (模式図)

限界せん断ひずみは室内実験から求められるが、もし、実験値がない場合には、たとえば図-6(b)に示すようなこれまで数々の土および岩石の供試体に対して得られた値^{8),16)}を用いて推定できる(図-7(a)参照)。なお、限界ひずみは材料の不連続面の影響をあまり受けず、岩石コアと原位置岩盤の限界ひずみがほぼ同じ値となることや^{17),18)}、間隙水や温度などの環境の変化にもあまり影響されにくいこと¹⁹⁾が実験的に確かめられている。

(4) 内部摩擦角 ϕ を仮定し、次式によって粘着力 c を推定する(図-7(b)参照)。

$$c = \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} \tau_c \quad (9)$$

(5) 仮定したすべり線に対して一般的な極限平衡法を用いて安全率を求める。

4.2. 逆解析結果⁷⁾

図-4に示した計測結果において、計測変位ベクトルは平面図上斜面の最大勾配方向とほぼ一致しているので、断面 a-a' に対して二次元平面ひずみ問題として、前節で示した逆解析に基づく安全率の計算手法を適用する。すなわち、観測点 2, 5 および 7 の計測変位を入力データとし、図-8に示すような有限要素分割に対して、ゾーン 1～6 の各異方性パラメータと異方性の角度を逆解析によって求めた。計算変位と計測変位とが図-9に示す程度に一致した段階で逆解析を打ち切ったとき、表-1に示すパラメータ m_i が得られた(E, γ, ν, m_1 は仮定)。

逆解析によって得られたパラメータを用いて通常の有限要素解析を行い、斜面の変位および最大せん断ひずみ分布を求めた結果を図-10 および 11 に示す。最大せん断ひずみが集中しているゾーンに沿ってすべり線を仮定し(図-12参照)、安全率を前節に示した手順によって求めると、安全率は 1.1 となった。他の諸定数は表-1に示す通りである。以上の結果を参考にして、斜面の安定を確保するために斜面の一部を排土し、斜面の勾配が変更された(図-12参照)。

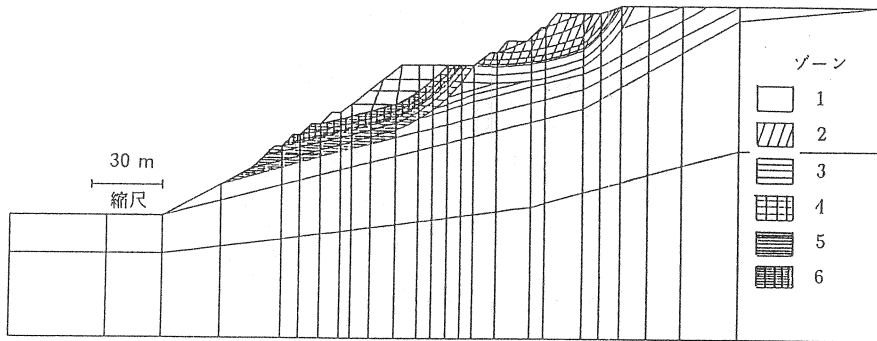


図-8 有限要素分割

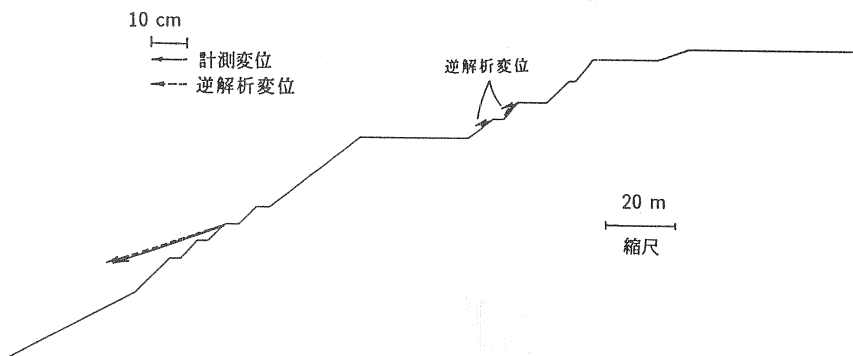


図-9 計測変位と逆解析変位の比較

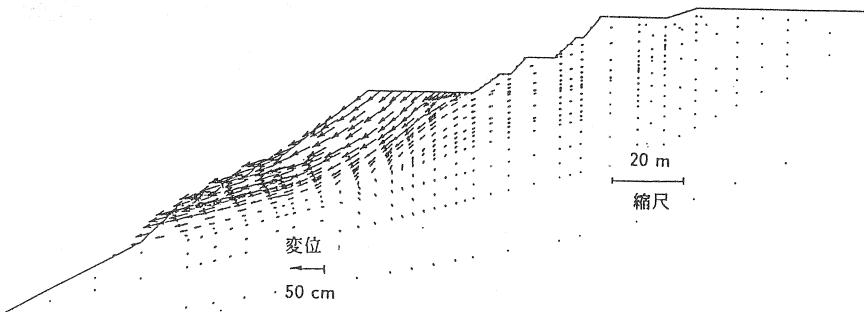


図-10 逆解析結果に基づく斜面の変位分布

表-1 逆解析結果

弾性係数 E	94 MPa
単位体積重量 γ (仮定)	19.6 KN/cm ³
ポアソン比 ν (仮定)	0.30
異方性パラメータ m	
m_1 (ゾーン 1)	0.385 (等方性)
m_2 (" 2)	0.360 ($\alpha_2 = 45^\circ$)
m_3 (" 3)	0.100 ($\alpha_3 = 35^\circ$)
m_4 (" 4)	0.050 ($\alpha_4 = 35^\circ$)
m_5 (" 5)	0.012 ($\alpha_5 = 20^\circ$)
m_6 (" 6)	0.005 ($\alpha_6 = 20^\circ$)
せん断弾性係数 (すべり層)	
G_4 (ゾーン 4)	4.7 MPa
G_5 (" 5)	1.1 MPa
限界せん断ひずみ	
γ_{04} (ゾーン 4)	1.0 %
γ_{05} (" 5)	1.6 %
内部摩擦角 ϕ (仮定)	25 deg
粘着力	
c_4 (ゾーン 4)	3.0×10^{-2} MPa
c_5 (" 5)	1.1×10^{-2} MPa
安全率 F_s	1.1

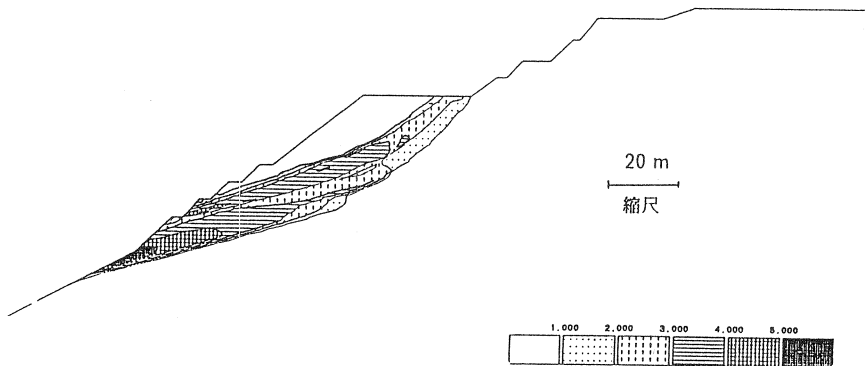


図-11 逆解析結果に基づく斜面の最大せん断ひずみ分布

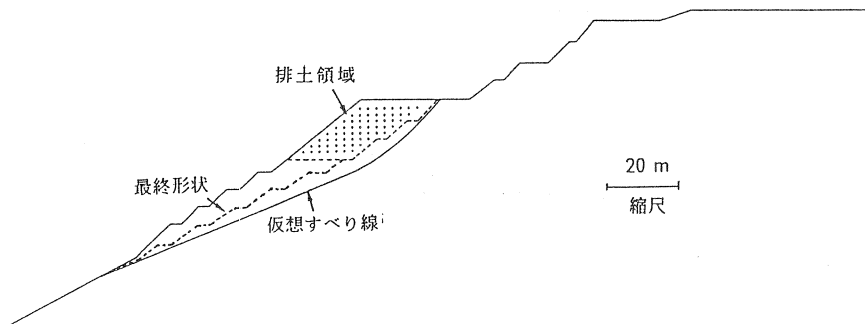


図-12 仮想すべり線と斜面の最終形状

5. むすび

本報告では、砂岩と粘板岩からなる切り取り斜面に対し、GPS による変位計測結果とその逆解析に基づく安定性の評価の一例を示した。

GPS による変位計測では三次元変位を比較的容易に測定することができる。その精度は水平変位および鉛直変位に対し、それぞれ少なくとも 10mm および 20mm 程度であることがわかった。GPS 測量の特徴から、ここで得られた変位計測の精度は斜面の大きさおよび観測領域の広さに関わらずほぼ同程度であると考えられるので、これまで適切な測定手法の少なかった広大な領域の変位計測に GPS が適用できることが明らかとなった。その結果を踏まえると、長大斜面や大規模露天掘りピットなどに対して、GPS と従来の計測手法を併用した図-13 に示すような変位計測システムが考えられる²⁰⁾。すなわち、GPS によって広大な領域の変位を観測し、細部はトータルステーションのような三次元測量が可能な高精度光波測距儀で測定する。そして、斜面の局所的な範囲に変位が生じた場合は、伸縮計や傾斜計によって精密にモニタリングを行う方法が有効であると考えられる。

次に、本文では GPS による変位計測結果に対して、著者の一人が提案した逆解析法を適用して斜面の安定性の評価を行った。従来、斜面の安定性は極限平衡法などによる力の釣合いに基づき評価するが、斜面のモニタリングには変位計測を用いることが多く、必ずしも両者が適切に関連していなかった。ここで用いた逆解析に基づく安定性評価法は、計測変位の逆解析から斜面地山の変形係数を求め、さらに変形係数と強度定数に良い相関があることに着目し、限界せん断ひずみを用いて強度定数を推定して安全率の計算を行うものである。この方法を用いることによって、現場で一般的に行われている計測変位を直接利用して、設計時と同様の考え方で斜面の安定性を評価することが可能となる。

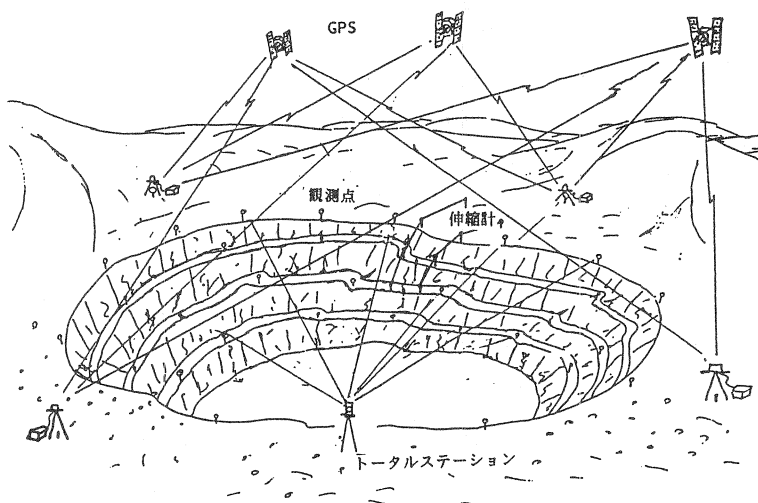


図-13 GPS を用いた長大斜面・大規模露天掘りピットの変位計測システム

謝辞

本研究を遂行するにあたり、GPS 測量の実施においては神戸大学大学院生、川嶋幾夫、皿海章雄、古谷茂也君に、また、逆解析の計算においては元神戸大学大学院生 杵山務君（現日本道路公団）にご協力頂きました。ここに深く感謝の意を表します。さらに、現場において数々のご便宜を図って下さいました関係者各位に感謝します。

参考文献

- 1) 桜井春輔, 清水則一. GPS (汎地球測位システム) の地盤変位計測への応用. 土と基礎, 38(387):65-72, 1990.
- 2) 清水則一, 桜井春輔, 皿海章雄, 古谷茂也. GPS (人工衛星測量システム) による長大斜面の変位モニタリング. 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 440-444, 1992.
- 3) 清水則一, 桜井春輔. GPS の岩盤変位計測への適用. 資源と素材, 109(1):1-7, 1993.
- 4) 桜井春輔, 清水則一, 古谷茂也, 皿海章雄. GPS による切取斜面の変位測定. 土木学会論文集, No.475/III-24:137-142, 1993.
- 5) S. Sakurai. Interpretation of the results of displacement measurements in cut slopes. *Proc. 2nd Int. Sympo. Field Measurements in Geomechanics*, pages 1155-1166, Kobe(1987), 1988.
- 6) S. Sakurai. Monitoring the stability of cut slopes. *Proc. 2nd Int. Sympo. on Mine Planning and Equipment Selection*, pages 269-274, 1990.
- 7) S. Sakurai and N. Shimizu. Back analysis of measured displacements in cut slope. *Proc. Int. ISRM Symposium on Rock Characterization, EUROCK'92*, pages 378-383, City of Chester, 1992.
- 8) S. Sakurai. Assessment of cut slope stability by means of back analysis of measured displacements. *Proc. Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, pages 3-9, Istanbul, 1993.
- 9) 田尻誠, 武石朗. 長大法面における斜面崩壊対策. 第 24 回業務研究発表論集, 建設コンサルタント協会近畿支部, 99-109, 1990.
- 10) 日本測地学会編. 新訂版 GPS-人工衛星による精密測位システム-. 日本測量協会, 1989.
- 11) D. Wells, editor. *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, 1986.
- 12) A. Leick. *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons, 1990.
- 13) 桜井春輔, 岡野兼夫, 清水則一, 北村元. トータルステーションを用いた地盤変位計測手法の開発. 建設工学研究所報告, 32:1-20, 1990.
- 14) N. Deeswasmongkol and S. Sakurai. Study on rock slope protection of toppling failure by physical modelings. *Proc. 26th US Sympo. on Rock Mechanics*, pages 11-18, Rapid City, 1985.
- 15) S. Sakurai, N. Deeswasmongkol, and M. Shinji. Back analysis for determining material characteristics in cut slopes. *Proc. Int. Sympo. Engineering in Complex Rock Formations*, pages 770-776, Beijing, 1986.
- 16) 桜井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦, 松村真一郎. トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ. 土木学会論文集. (投稿中).
- 17) 桜井春輔. トンネル工事における変位計測結果の評価法. 土木学会論文報告集, 317:93-100, 1982.
- 18) S. Sakurai. Displacement measurements associated with the design of underground openings. *Proc. Int. Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, pages 1163-1178, Zürich, 1983.
- 19) 桜井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦. 岩石の限界ひずみに対する環境要因の影響について. 土木学会論文集, No.460/III-22:177-180, 1993.
- 20) S. Sakurai and N. Shimizu. Monitoring of cut slopes by using the Global Positioning System (GPS). *Journal of Mining Research*, 1(3):19-29, 1992.