

8. 地上型レーザ距離計を用いた岩盤斜面の形状と構造把握の試み

An attempt to determine the configuration of rock slopes and their structures using a non-prism laser distance meter

○植松 敏・横田修一郎（島根大学）

1. はじめに

多くの急傾斜な岩盤斜面を有する我が国では岩盤崩壊への対策は急務である。その重要な基礎作業の一つとして測量があるが、対象となるような急崖は危険であり、可能な限り離れた場所から測量できることが望ましい。それに対してレーザ測量は非常に有効である^{1),2)}。

本研究では岩盤斜面の不安定性評価を行うための地上からの高精度レーザ測量手法の確立への初歩的段階として、取扱いが比較的容易な地上型レーザ距離計を用いて多点計測することにより、斜面形状の把握と岩盤斜面を構成する節理面の方向などの認識を試みた。

2. 作業の流れ

岩盤斜面の不安定性評価のためには、そこで起こりうる運動のタイプを把握することが不可欠であり、その運動のタイプは節理面の方向や間隔に依存していると考えられる。よって現在の岩盤斜面の形状には“運動の跡”が節理面などの形で残されている可能性があるため、岩盤斜面の形状を把握することに重点を置いた。

本研究における作業の流れは大きく「岩盤斜面の形状把握」、「形状に基づくクラック面の抽出」、「クラック面と方向による岩盤斜面構造の推定」といった3段階に区分される(図-1)。以下に各作業の具体的な内容を示す。

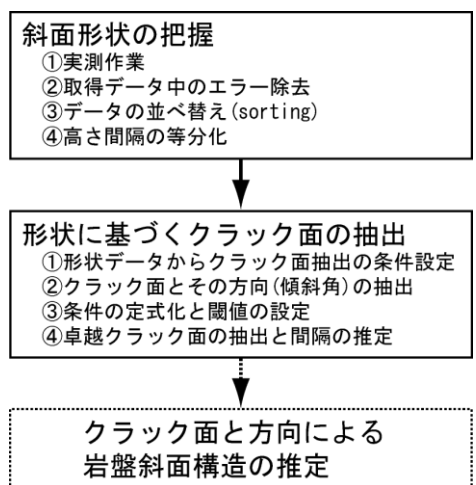


図-1 本研究の作業フロー

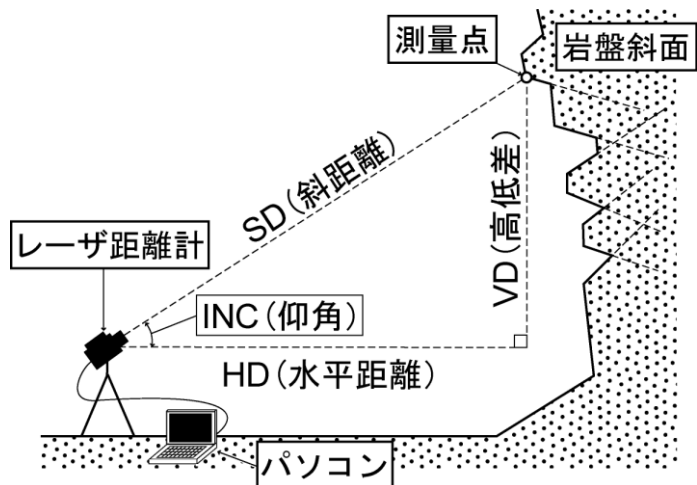


図-2 レーザ距離計の測量による取得データ

2.1 斜面形状の把握

主に 1) 実測作業、2) 取得データ中のエラー除去、3) データの並べ替え(sorting)、4) 高さ間隔の等分化といった作業を通して岩盤斜面の形状把握を行った。モデルとして島根半島北岸(須々海海岸)の砂泥互層斜面(Slope-1)における測量データを示し、作業内容を順に説明する。

1)実測作業

事前に対象とする岩盤斜面の選定、レーザ距離計の設置、機械類の起動と設定、測量する方向

の把握などを行った上で実測を行う。対象とする急崖に対して鉛直方向にレーザ距離計を手動で傾け、仰角を適度に変えながら計測する。レーザ距離計のボタンを押すたびに距離(水平距離：HD, 斜距離：SD)と角度(仰角：INC)のデータが得られ、パソコンに出力されていく(図-2)。10～20分間で100～200点のデータを得ることができる。それらのデータをテキスト方式で保存した後、Excelを用いて表形式にして解析等を行った。ただし、鉛直方向の距離(高低差：VD)はパソコンに表示されないため、水平距離(HD)と仰角(INC)の値から算出した。

2)取得データ中のエラー除去

ここで得られたデータにはエラーが含まれていることもあるため、取得データ中のエラーの判定・除去を行う必要がある。エラーの原因として、植生などによる環境によるものと、距離計がレーザの反射光を捉えられない等の機械的なもの、また手動作業時に生じるブレによるものなどが挙げられる。この作業は主に手動によるものなので、測量時に岩盤斜面周辺の状況を確認し、エラーとなり得る要因等を把握しておくことが重要である。

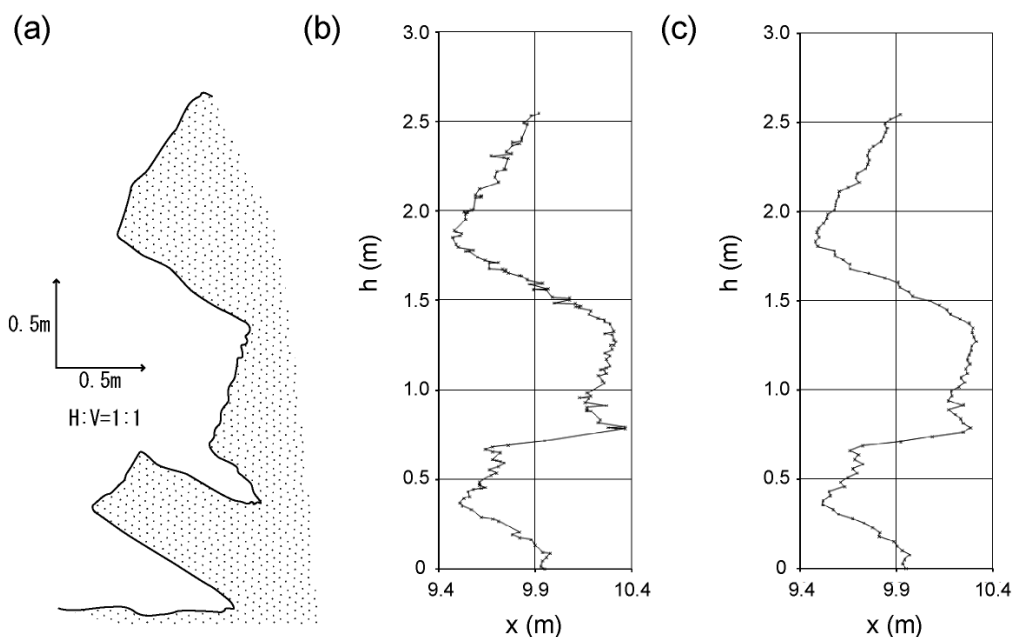


図-3 砂泥互層斜面(Slope-1)の断面スケッチとその測量データに基づいた断面形状。

(a) 斜面の断面形状のスケッチ。

(b) エラー除去直後のデータに基づいた斜面形状。有効データ数 $n=149$ 。

(c) 線形補間後のデータに基づいた斜面形状。線形補間データ数 $n'=101$ 。

3)データの並べ替え(sorting)

この段階でのデータはレーザ距離計の位置を基準としたものである。特に高低差(VD)についてはレーザ距離計より下方の点はマイナスの値として示される。ここでより処理しやすくするため、測量点全体での最低点が基準となるように変換した。これ以降、水平距離、鉛直距離はそれぞれ x, h として示す。また、データの並びは取得順であり、高さに関してもランダムである。解析を行うためには、高さを基準とした順に並べ替えておくと都合がよい。そこでデータを高さに関して降順に並べた。これにはExcelの「並べ替え」の機能を用いた。この作業を経た後にExcel上で斜面形状をグラフという形で示すこともできる(図-3(b))。ただし、Slope-1のケースでは $h=0.7\text{m}$ 前後でレーザ照射の死角により、実際の形状とは異なるデータとなっている。

4)高さ間隔の等分化

データは測量方法の性質上、高さについては必ずしも等間隔にはなっていない。以後の解析の

ことを考えると少なくとも高さに関しては等間隔になっていた方が都合が良い。そこで線形補間を用いてのデータが高さに関して等間隔になるように変換した。

これにより再現される斜面形状は多少簡略化される(図-3(c))。そのため、高さをいくつに等分割するかが解析の精度を考える上で重要となる。本研究では処理を円滑にすることも重視し、100の倍数であり、かつ取得できた有効なデータ数を超えないような分割数 N を設定した。

2.2 形状に基づくクラック面の抽出

節理面は一般には 2~3 の卓越方向があるが、岩石によっては不明瞭であったり、小さなものがランダムな方向で存在することもある。花崗岩や砂岩、火山岩などの場合、破断面として明瞭な節理面が形成される。よってそれらを対象とする場合、破断面は比較的平面的なものを想定すればよいと考えられる。また、破断面としての節理面の大きさは一般には様々であるが、本研究では岩盤崩落を念頭に置いていることから、少なくとも 10cm 以上の広がりをもったものを認識できれば十分であろう。

このように岩盤斜面の形状を精度高く把握し、節理面の卓越方向とそれに対する平均的な間隔が分かれば、それらをもとに岩盤内部の節理面の存在形態を推定することができる。したがって、形状から平面的な要素部分を抽出し、その位置と方向、さらには同方向のもの間隔を把握する必要がある。このうち、平面的な要素はある程度客観的に把握する必要があることから、抽出のアルゴリズムを考察し、実際のデータにて試行した。

先の段階において、岩盤斜面の形状は点と線分で再現された。線分よりなる 2 次元形状データから平面要素を抽出するには、個々の線分から傾斜角を算出し、隣接線分間で傾斜角の変化が小さい部分を見出してゆけばよいと考えられる。したがって、「各線分が示す傾斜角に関して、隣接する 2 つの線分間での傾斜角の差が小さいこと」を条件とした。

ここで線分と鉛直軸とがなす角度を α_j 、線分と水平軸とがなす角度を θ_j とする(図-4)。 j は各線分に下方より順に割り当てられる数字であり、範囲は $j=1\sim N-1$ となる。本研究では計算は基本的に α_j の値を用いているが、一般的には水平方向との角度の方が分かりやすいため、傾斜角のヒストグラム表示の際などには θ_j の値を用いている。

2 つの線分間での傾斜角の差を示すと以下のようなになる。

$$\Delta\alpha_k = |\alpha_{j+1} - \alpha_j| \quad (1)$$

なお、 $k=1\sim N-2$ で、この範囲内で $j=k$ である。これに基づき先の条件を定式化させると、

$$\Delta\alpha_k < T \quad (k = 1\sim N-2) \quad (2)$$

となる。 T は閾値であり、斜面構成岩石によって異なるであろう。

ここでは、現実の岩盤斜面に見られる $\Delta\alpha_k$ を調べ、その度数分布に見られるモードに基づいて設定することとした。 Slope-1 における $\Delta\alpha_k$ の度数分布を図-5 に示す。これに基づき、閾値 $T=10$ を設定した。この閾値に基づいて、 Slope-1 において抽出された「面」を図-6(a)に示す。

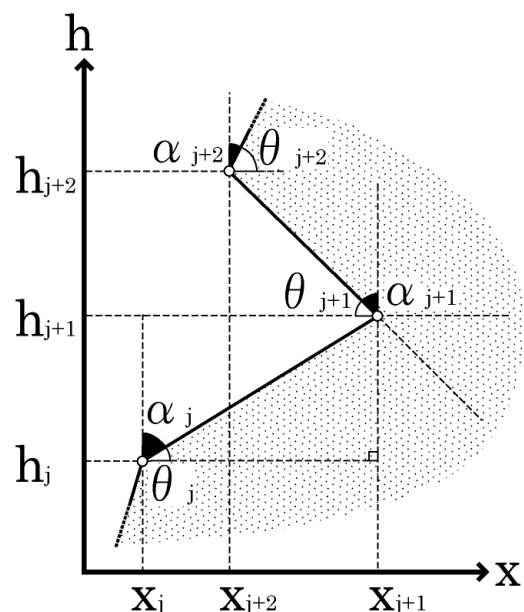


図-4 傾斜角 α および θ の関係

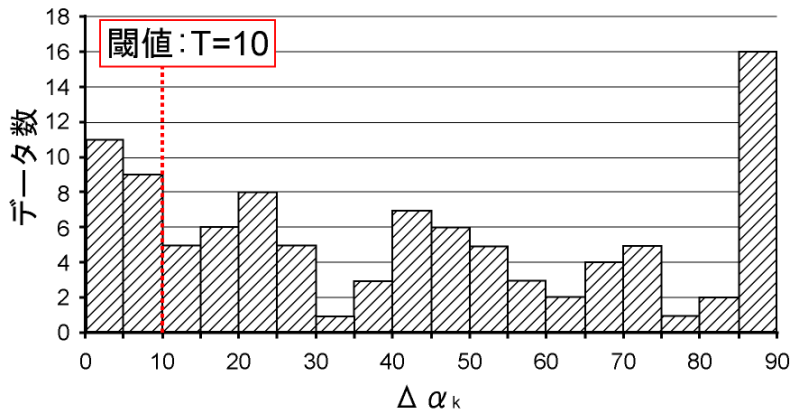


図-5 Δα_kの度数分布(Slope-1)

2.3 クラック面と方向による岩盤斜面構造の推定

図-6(b)は抽出されたクラック面の傾斜の分布をヒストグラム(rose diagram)で表したものである。これは「面」の広がり方を考慮して線分長さに基づいたパーセント表示であるが、明確にいくつかのピークが認められる。それらのピークの傾向と「面」の存在する箇所の情報から、節理面の方向とおおよその間隔を把握でき、それらのデータから岩盤内部の節理面を推定できる。Slope-1 において推定される構造を図-5(a)中の破線部に示した。5~10° のピークについては h=0.7m 付近の死角によるデータが反映されたものであるため、構造推定には用いなかった。その結果、-25~30° の節理が約 1.2m 間隔、65~70° のものが約 1.0m の間隔で存在していると推定される。

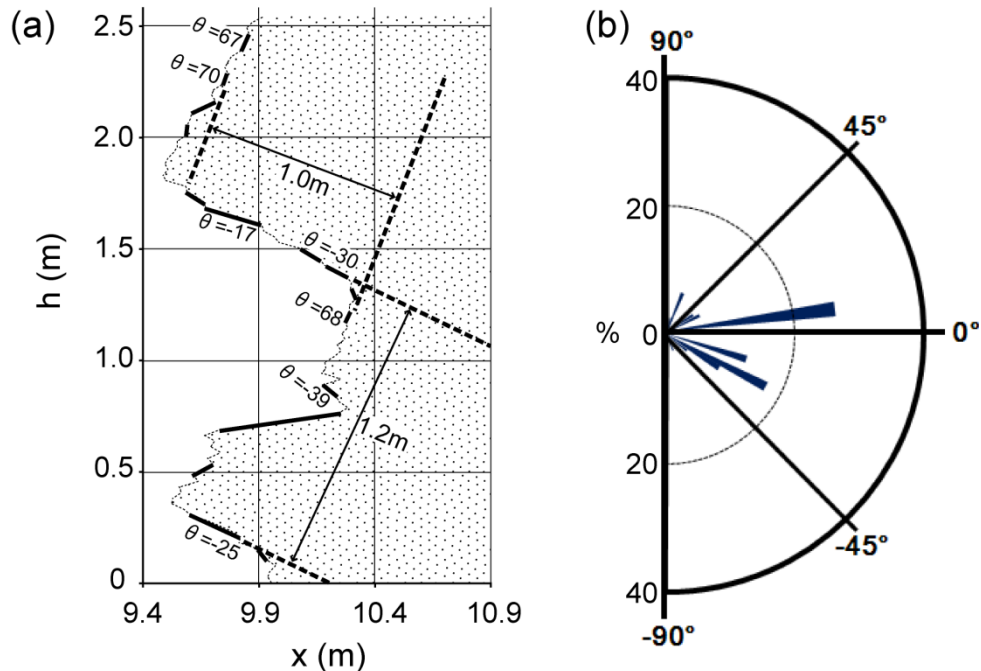


図-6 「面」の抽出結果とその傾向に基づく斜面内部の構造推定(Slope-1).
 (a) 抽出された「面」(実線部)と推定される内部構造(破線部).
 (b) 抽出された「面」の傾斜傾向. 線分長さに基づく%表示.

3. 測量事例

Slope-1 はあくまでモデルケースであり，測量範囲は小規模に設定した．実際の測量はより大規模な岩盤斜面が対象となるため，様々な岩種を選び，いくつかの大規模な岩盤斜面を対象に実測を行った．

3.1 砂泥互層斜面(須々海海岸, Slope-2)

Slope-1 とは 50m ほど離れた地点の高さ約 8m の岩盤斜面を対象としたものである．抽出された「面」などを図-7 に示す．抽出された「面」の多くは $5\sim 10^\circ$ ， $15\sim 20^\circ$ の水平方向に広がりを持つものであった．対して鉛直方向に広がりを持つ面はあまり認識されなかった．これは解析手法による影響とも考えられる．

結果として，Slope-2 では $5\sim 10^\circ$ および $15\sim 20^\circ$ の節理が 0.8~1.2m 間隔， $80\sim 85^\circ$ のものが 2.5~3.0m 間隔で存在すると推定される．

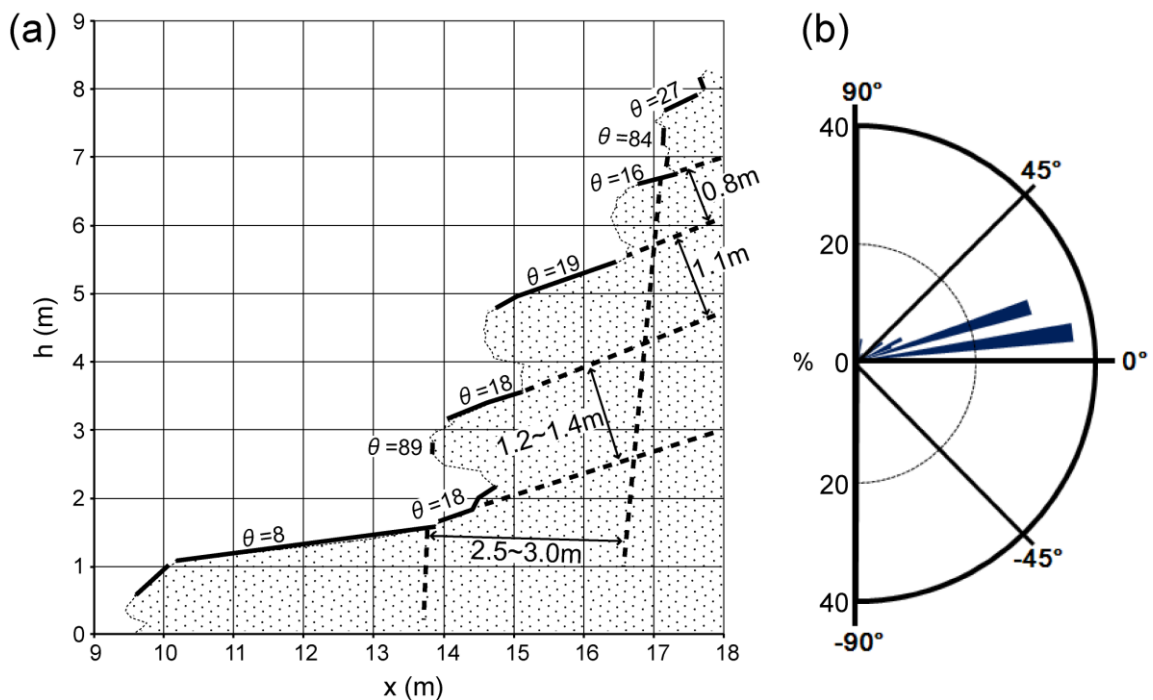


図-7 砂岩・泥岩互層斜面における「面」の抽出結果とその傾向に基づく斜面内部の構造推定(Slope-2).

(a) 抽出された「面」(実線部)と推定される内部構造(破線部).

(b) 抽出された「面」の傾斜傾向. 線分長さに基づく%表示.

3.2 石灰岩斜面(岡山県磐窟溪, Slope-3)

岡山県高梁市にある磐窟溪の石灰岩斜面を対象としたものである．対象までの距離が 55m 前後，測量範囲の高さも約 30m と大規模であった．図-8 に解析結果を示す．

この急崖では露岩がほぼ鉛直な面をなしていることが特徴であり，測量結果もそれをよく示している(図-9)．抽出された「面」も $70\sim 90^\circ$ ， $-70\sim -90^\circ$ の範囲に分布しているため，推定される内部構造(節理面)も鉛直に近いと推定される．間隔は平均して 1.0m 前後と推定される．このことから，対象斜面では鉛直に近い節理面によって表面で剥落が繰り返し発生した結果，現在の斜面形状が形成されたと考えられる．

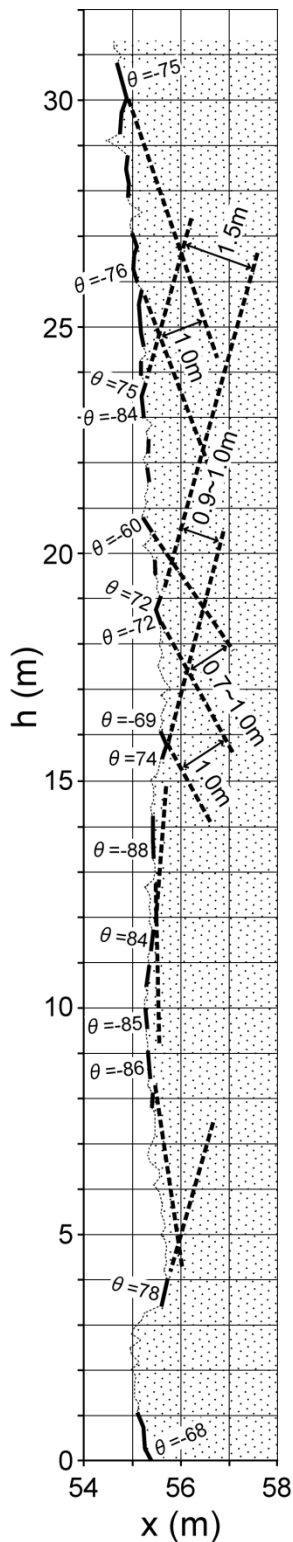


図-8 石灰岩斜面において抽出された「面」(実線部)と推定される内部構造(破線部) [Slope-3].

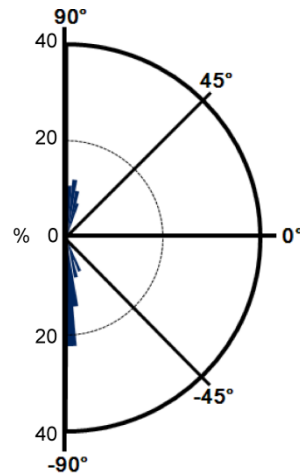


図-9 抽出された「面」の傾斜傾向. 線分長さに基づく表示(Slope-3).

4. まとめ

岩盤斜面の不安定性評価のための初歩的段階として、地上型レーザ距離計を用いて多点計測することにより、斜面形状の把握と岩盤斜面を構成する節理面の方向などの認識を試みた。その結果等を以下に記す。

- 1) 岩盤斜面においてレーザ距離計を用いた計測を行い、短時間で100以上のデータを取得できた。これにより斜面形状を把握でき、レーザ距離計による多点計測の有効性を確認できた。
- 2) 実測で得られたデータを基に解析を行った。傾斜角の変化量を用いれば、ある程度面を認識できた。ただし、鉛直方向の平面は抽出しにくいようであるため、それに対する改善が必要である。
- 3) 上記の計測・解析手法は砂泥互層斜面の他にも石灰岩斜面にも適用でき、手法の確立の見通しをある程度示すことができた。ただし、他の岩相の斜面についても今後検討する必要がある。
- 4) ここで示した斜面の形状・構造の認識手法は斜面の不安定性評価への応用などにいかに発展させるかが今後の課題である。

文 献

- 1) 藤岡展价(2003)：空中レーザー・マッピングとデジタル写真技術の現状とその応用，深田研ライブラリー，No.59，32p.
- 2) 原口 強・中田 賢・矢口潤一郎(2005)：航空／地上レーザ計測による大規模岩盤崩落斜面の三次元モデリング，地盤工学会誌，Vol.53，pp.8-10.