

岩盤斜面の安定性を評価する新しい計測手法

New measuring techniques to estimate stability of rock slopes

進士 正人
SHINJI Masato

1. まえがき

豊浜トンネルの岩盤崩壊事故を契機として、斜面崩壊のメカニズムの把握、並びに、岩盤崩壊の前兆現象の理解や崩壊の予知の可能性を検討することを目的として、建設省を中心として全国の数多くの岩盤斜面で現地モデル斜面を選定し、各種計測機器を設置し、岩盤斜面の挙動を把握する現地観測が行なわれている。この観測の中には、新しい調査・試験が数多く試行されている。その詳細については、「斜面のモニタリング」¹⁾の中で述べられるが、本文では、最近の研究報告^{2),3)}や岩盤斜面調査・試験において試行されている新しい計測手法について述べる。

2. 岩盤斜面計測の特徴

岩盤斜面の調査は、地形が急崖であること、遷急線の上方斜面が植生に被われていることにより、専門家による十分な踏査が出来ない場合が多い。このため、専門家を支援するような調査法の確立が望まれる。たとえば、岩盤露出斜面での割れ目分布や性状を調査するための遠赤外線写真解析の適用、岩盤中の割れ目に地下水が存在する場合に対する電磁探査の適用、合成開口レーダーによる植生に被われた遷急線上方斜面における開口割れ目や段差などの変状把握などが挙げられる。

これらの調査手法のうち、熱赤外線写真解析は岩盤斜面表層の不安定部や浮石の抽出技術としてほぼ実用化レベルに達しており、電気・磁気探査も現場状況次第では岩盤割れ目の検出技術として実用化に近い技術と考えられるが、合成開口レーダーは、異なる標高からのマイクロ波の位相のずれを利用して干渉画像を作成し、基準面から地表各点の高さ（地形）の情報を得る手法（干渉SAR）が開発されている。人工衛星、航空機などをもちいて計測が行なわれている。この手法は、現時点では開発途上の技術であり、実用化についてはかなりの時間を要するものと思われる。

これらの調査は、主に上空から岩盤斜面を撮影するものである。岩盤斜面の解像度を上げるためには、カイト気球やラジコンヘリコプターによる低空からの写真、ビデオ撮影技術が、これらの調査に欠かせないものになりつつある。また、写真撮影も、通常の見光線から赤外線フィルムの利用も可能となり、より幅広い画像情報を簡便に収集することができるようになってきた。

また、岩盤斜面の状態変化を経時的に調査することにより、岩盤斜面の健全度を評価する手法として、弾性波探査やレーダー調査が挙げられる。いずれの調査も、期間をおいて繰り返し実施することにより、岩盤斜面の挙動を弾性波伝播に伴う減衰変化や、レーザービームによる岩盤表面の振動変化として検出するものである。これらの調査は、岩盤斜面の劣化状況を非破壊で把握する手段として適しており、実用化に近い技術である。

岩盤斜面の動態観測を目的とした調査・試験としては、加速度計や地震計によるAEや常時微動測定、GPSによる変位測定が考えられる。加速度計、地震計によるAEや常時微動測定にもとづく崩壊の検知はこれまで十分な事例がないが、破壊時の振動や岩盤斜面の緩み状況を捉えようとするものである。ただし、これらの機器で岩盤斜面が変位する際の振動を検出することは、地質や岩盤変形部分の応力状態によって発生する亀裂発生振動の周波数や大きさが異なること、周辺からのノイズが多いことから容易ではない。実用レベルにするには多くの実証実験の検証が必要とされる。

一方、GPSによる変位測定は、測定精度が近年向上しつつあり、機器のサイズ、価格ともに小さく、安価になりつつある。従って、岩盤斜面への固定配置が可能な状況になりつつある。GPS測量は大きく分けて、単独測

位と相対測位があり、高精度測量を行う場合には後者をもちいる。相対測位の代表的な測量方法には、スタティク測量とキネマティク測量がある。スタティク測量は、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少なくとも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。観測時間は衛星の個数および基線長により異なるが、4衛星を同時受信出来る場合、1～2時間程度を目安としている。それに対して、キネマティク測量は、基準となる点にアンテナと受信機を固定し、観測点のアンテナと受信機を移動させ、それらの測点間の相対距離を測定するものである。この方法では、1観測点における観測時間は数秒～数分程度でよい。

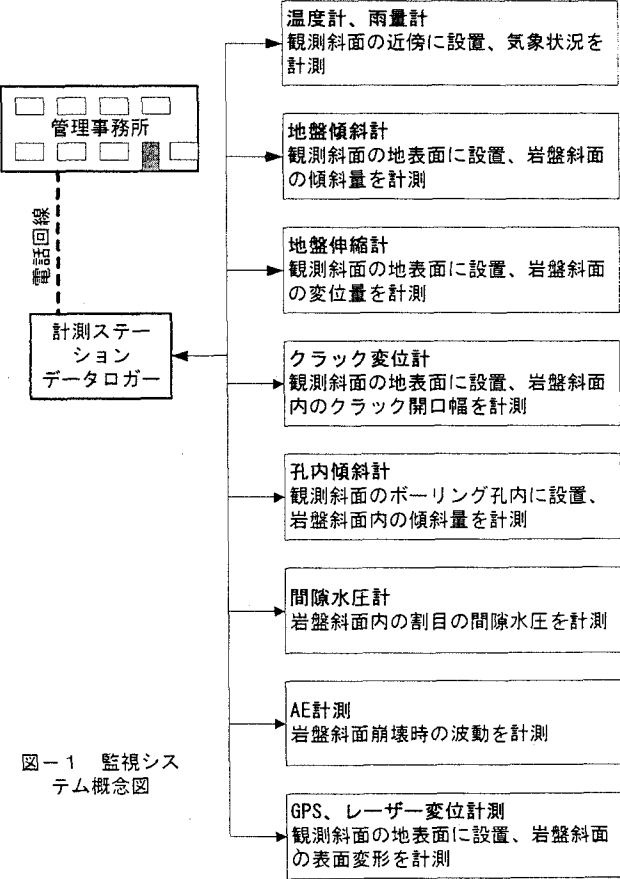
いずれの相対変位においても、受信したデータは、一旦受信機内のメモリーに記憶し、観測終了後、コンピューターに受信結果を転送し、解析によって観測点の3次元座標を求めることになる。この方法では、観測結果を処理するために時間と作業が必要となる。従って、斜面崩壊などの現象に対応するには、処理が追いつかないなどの問題点も発生する。

最近、リアルタイムキネマティク方式が注目されている。この方法は、変位監視を必要とする地域に設置された複数のGPS受信機（計測点）と、不動と考えられる基準点に設置された一台のGPS受信機（基準点）からの観測データを、ネットワークを通じてコンピューターに集約することにより、各計測点と基準点との間の相対的な三次元座標（基線ベクトル）をリアルタイムに求め、表示するシステムである。位置の測量法は、相対測位方式による。精度的には1cm以内の変位計測が可能となる見込みであり、比較的近いうちに変位計測への適用が可能になるものと思われる。

光ファイバーのマイクロベンディング散乱原理を用いた岩盤変位計測が注目されている。光ファイバーは、中心部にコアとよばれる屈折率が相対的に高い部分とそれを取り囲むクラッド部と呼ばれる部分および機械的強度を確保するためのシースからなる。コアもクラッドも材質としてはガラスである。クラッド径、は約0.1mm程度と極めて細い。光ファイバーケーブル内を、光はクラッドで散乱しながらコア内を伝搬する。光ファイバーは、高温流体を冷却してつくったデバイスであるので密度の空間的ゆらぎをもっている。このため、屈折率が空間的に不均一となり、光の散乱（レイリー散乱）を引き起こす。表－1に各種光ケーブル中の散乱要因の一覧を示す。この散乱とは別に、光パルスの進行方向と逆方向に反射波を出す性質がある。これを「後方散乱」と呼ぶ。コアとクラッドの屈折率の差により光がコア内に伝播する。光ファイバー内

表－1 光ファイバーケーブル中の散乱要因

散乱	強度比	特徴
レイリー散乱	1	ガラス中の組成・密度ゆらぎで発生。強度は屈折率に依存する。
ラマン散乱	約 1/1000	ガラスの格子振動により発生。強度は弱い温度依存性がある。
ブリルアン散乱	約 1/50	音響フォノンモードにより発生。



図－1 監視システム概念図

表一2 岩盤斜面の新しい観測手法

観測手法	概要説明	岩盤への設置方法	対照範囲	表面状態の影響	気象の影響	挙動把握方法	岩盤斜面への適用実績	その他	総合評価
カメラによる挙動観測	写真、CCD、ITVによる監視	非接触	面的	植生の影響大	雪、雨の影響有り	前回の写真との比較	実績有り、施工中の斜面監視にも使われている	夜間監視の工夫も必要	特に、植生に対する問題（視界不良、誤作動）の問題がある
光ファイバーセンサーによる観測	光ファイバーのマイクロベンディング散乱を利用し、変位・ひずみを測定 落石センサーとして利用例、実験例あり	接触（設置が難しい）	線的	植生の影響中	雪、温度の影響あり	ひずみ量から変位箇所の認知、分解能は、曲率半径数cm	地すべりではあり、岩盤斜面の落石検知システムとして採用例あり	耐雷性に有効 千円/mと安価	数mmオーダーの変位が検知できるような器具の開発が必要。雪、温度の影響あり
ワイヤーによる、応力・ひずみ測定	ワイヤーを対象岩盤に設置し応力、変位を測定（落石センサーをも含む）	接触	線的	植生の影響小	ワイヤーの雪、温度の影響有り	検知精度高い、適用可能 精度の検証が必要	落石センサーを斜面上で、岩盤斜面への適用実績無し	ネット掛け施工の斜面上に適用可能 動物による振作動問題	現状は適用性が高い。岩盤斜面への実績がなく、現場実験が必要
地震計の面的配置	弾性波探査における地震計を面的に配置	非接触	面的	植生の影響中（木のゆれによるノイズ）	植生の影響少	変位量の測定不可能、落石の確認	探索実績有り、岩盤斜面への観測実績なし	キャッチできる振動、ノイズの除去が問題	メンテナンスフリーの点では有利、適用可能性についてさらに検討が必要
レーザー測距儀 光波測距儀	レーザー波、光波の到達時間で距離を測定し、変位を計算する。	非接触～接触	点的	植生の影響大	雪、雨の影響有り	レーザーの精度30cm。光波の精度高い	斜面切り取り時の監視に実績有り	光波の自動観測で面的配置では精度が劣る	自動監視、メンテナンスフリーの点で劣る。光波測距に関して、岩盤モニタリングで実施
ドップラーレーザー振動計	対象物が振動している場合、反射波の周波数変化を測定	非接触	面的	植生の影響大	雪の影響あり	岩盤の緩み（原理的には測定可能）	実績無し	—	現在の振動計は対象物との距離が数km程度で岩盤斜面に適用するには問題有
弾性波振幅	岩盤内の緩みが進行するに従い、弾性波の振幅が大きくなることから緩みの進行や、亀裂の発達を評価	接触	面的	—	—	緩みや亀裂の発達の評価	地建の岩盤モニタリングで実施	—	自動計測は難しい。ボーリング孔が必要
AE・MS	AE センサーや MS センサーを岩盤周囲に設置し、崩落前の微小破壊による弾性波を検知	接触	立体的	植生の影響小	影響は少ない	破壊音の測定と累積量の測定	モニタリング実験の実績多い	設置がやや難しい	3次元的なクラック発生位置の同定が可能。ボーリング孔が必要
GPS	人工衛星を用いて、対象岩盤の変形を測定	接触	点的	植生の影響大	雪、雨の影響有り	変位が測定可能。分解能は10cm程度	斜面切り取り時の監視に実績有り	リモートセンシング技術も利用可能	広範囲の斜面モニタリングが可能 今後のコストダウンと精

のコアとクラッドの屈折率の差は極めて小さいため、光ファイバーに微小な曲げが生じると、コアを通過してきた光の一部はクラッドに入り込むことから、光ファイバーを通過する光は減少する。これを「マイクロベンディング損失」という。したがって、人工的に光ファイバーを局部的に曲げる（マイクロベンディングさせる）と、マイクロベンディング損失が発生し、損失の増加量から変位発生量を検出することが可能となる。光ファイバーを用いた変位計測は、地盤と共に変形するU型金具により光ファイバーが局部的に曲がることによりリアルタイムに斜面変形挙動を計測・検知するシステムとして注目されている。この計測ケーブルは約1000円/mと比較的安価で、その上、落雷に強いというメリットもある。

表-2に、これまで述べてきた岩盤斜面の新しい計測手法について一覧表に整理した。

3. 将来展望

岩盤斜面の調査・試験技術は、現在、機器開発や現場での適用性試験を実施している段階であり、適用試験の結果をフィードバックし、機器開発の修正、機器改良を積極的に行っていく必要がある。今後は、先に述べた調査機器の特質を考慮し、岩盤斜面の挙動計測への適否を整理する必要がある。現時点における主な計測機器としては、岩盤斜面の傾動を計測するための地盤傾斜計や孔内傾斜計、変位を計測するための地盤伸縮計やクラック変位計、気象条件を観測するための雨量計や温度計が設置されている。また、亀裂内の地下水の影響を測るための土圧計などを設置する場合や、岩盤内の変形や破壊に伴う音波（弾性波）を捕捉するAEセンサーを設置する場合がある。計測は、1～2時間毎に実施し、現地に設置したデータロガーで収録した上でNTT回線を通じて管理事務所まで転送するシステムとなっている。図-1にシステムの概要を、図-2に計測の概要を示す。しかし、計測の結果から得られるのは、極めて監視範囲が限定された情報であり、路線全体の斜面の安定性を評価し、重点的に監視する箇所を抽出するには、更なる斜面計測手法の開発が必要である。

菅原は、斜面の傾斜変動値と崩壊までの余裕時間の関係を、各種室内試験と現場計測データおよびその状況証拠により、傾斜変動の安定度評価に対する有効性について調べた。検討の結果、 10°rad/day 程度以下であれば、日常の斜面変動として良いと述べている。大規模な岩盤崩壊を想定した場合、岩盤の規模は数メートルであるため、その変動量は1年あたり有意な変形挙動を示す場合の変形余裕は数センチ程度と考えられる。従って、解析精度もその程度の精度を保証することができれば可能であり、GPSや人工衛星によるリモートセンシング技術、低空写真測量による変位計測が注目される。

これら計測機器自体のハードの開発と同時に、コンピューター処理技術の進展は十分期待できるものがあるため、コンピューターが道路管理者の代わりに岩盤斜面計測データを処理し、問題があれば管理者に注意を促すいわゆるエキスパートシステムのようなソフト開発が今後推し進める必要がある。現在の計測機器のシステムでは、誤作動も含むすべてのデータを技術者が判断する必要があり、24時間の管理を行なうには、大変多くの労力を必要としているのが実体である。従って、計測機器の安全評価のための管理基準と合わせて、計測データ全体を評価するソフト開発も重要となる。

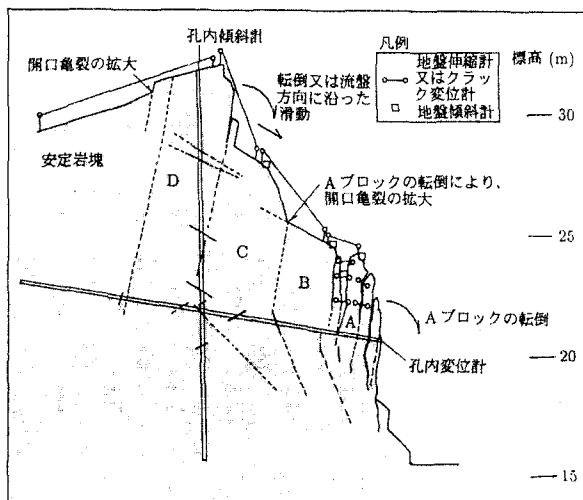


図-2 計測システム概念図⁴

参考文献

- 1) 小俣新重朗：斜面のモニタリング、第29回岩盤力学に関するシンポジウム パネルディスカッション、1999
- 2) 土木学会：大規模岩盤崩壊に関する技術検討委員会報告書、1997
- 3) 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測、1994
- 4) 門間敬一、小嶋伸一：岩盤斜面挙動観測システム、土木技術資料39-12、pp.4~5、1997