

斜面のモニタリング

Monitoring of Rock Slope Movements

小俣新重郎*

Shinjuro KOMATA

1. 岩盤斜面のモニタリング（監視）の現状

のり面掘削やトンネル掘削に伴う岩盤計測は実績が多いが、自然斜面を対象として計測機器を用いた岩盤崩壊のモニタリングの事例はすべり破壊を除いて少ない。

この理由として岩盤崩壊は、①脆性を有するため崩壊に先立つ変形量が小さく前兆現象の把握が困難であること、②斜面が急峻であるため計測器の設置や維持が困難であるとともに、運動が急速で目に見えるような変位が発生してから崩壊するまでの時間が短く、計測を導入する時間的余裕がないこと、③岩質や斜面内部の層理や亀裂、ブロックのかみ合わせや破壊面の深さなどに起因して崩壊形態が異なるとともに、岩盤の変形が不規則な変動と休止を繰り返し、連続的な挙動を示すことが少ないこと、④自然の地形形成過程で進行性破壊に起因して発生する大規模な岩盤崩壊の時間間隔は数百年と長いこと、などがあり、土の崩壊や地すべりと異なり、一般にモニタリングが困難といわれている。

しかし、過去の崩壊事例の解析によると、直前の前兆現象として小崩落や落石の発生、亀裂の伸展、構造物の変状等が報告されている¹⁾。一般に自然斜面は植生に覆われていたり、岩盤が露出している人も人が近づけないような急崖であるため、微小な変位を目視だけで把握することは困難である。このため、最近、岩盤崩壊が予想される斜面のいくつかで、恒久対策実施までの管理の一部としてモニタリングが行われようになってきたが、現状ではまだ困難な問題も多く、特に測定結果を用いた岩盤崩壊時期の予知・予測については、一部を除いてまだ研究段階にあるといえる。

2. 岩盤崩壊の機構

一般に、浸食が進行し急峻となった岩盤斜面では、長期的には斜面方向に重力によって徐々に傾き、地質的な不連続面がある場合はこれ沿いに、また特に不連続面がなくとも斜面上方では引張り亀裂が、また斜面下方では上部からの荷重を受けて側方の拘束圧がない一軸圧縮状態となり斜面に平行な縦亀裂が発生すると考えられる。降雨時や融雪時に岩体の荷重が増加すると、これらの亀裂は徐々に進展・連続し、地山との分離が進行して行く。付着部分の引張強度やせん断強度で全岩体の荷重を支えきれなくなると一挙に破壊する。このとき、斜面傾斜が急であれば崩落し、緩ければすべりを生じる。また、崩壊岩体下部で支持され回転モーメントが生じたときにはトップリングとなる。岩盤崩壊の誘因は、降雨、融雪、凍結融解、河川の浸食、地震、切土等といわれるが、これらが長期的に繰り返し作用することによって岩盤斜面の不安定化が徐々に進行し地山が緩み、最終的にある特定の外力で岩盤崩壊が発生すると考えられる。

3. モニタリングの目的と対象範囲

モニタリングの目的は、岩盤斜面が崩壊に至る初期段階の変状を計測機器によって把握し、斜面の安定性の評

*日本工営（株）コンサルタント事業部

価、崩壊の予知・予測を行い、これらを基に適切な対策をとることによって崩壊を未然に防止したり、その被害を最小限に押さえることなどである。したがって、モニタリングの対象範囲は、岩盤崩壊が予想される箇所、これらが崩壊、移動した場合に影響を受ける恐れのある隣接地区、保全対象の位置、さらに工事の施工範囲等を考慮して設定されなければならない。計測対象としては、崩壊に先立つ地山の緩み具合を示す兆候、すなわち発達した開口亀裂、斜面内部の亀裂、崩壊岩体天端の傾動・沈下、流れ盤状の亀裂沿いのせり出し、岩体下端部の圧縮性の亀裂や変形などが重要である。

モニタリングの計画は、岩盤斜面の変形や崩壊形態を予想した上で、計測の目的、対象を明らかにし、これらに沿った計測機器の選定や配置、計測の方法等を検討して立案する必要がある。

4. モニタリングの方法

計測機器には既に要素技術として開発されている以下の種類があり、これらは岩盤斜面でも適用できるが、今後は感度、分解能、測定誤差などで岩盤斜面の計測に適したものに改良したり、重要地点では斜面全体の変動の伝播や変動範囲の広がり等をリアルタイムで把握できる自動計測システムやITV監視手法の導入なども進めるべきである。

- (1) 降雨、温度、地下水、地震等の気象・地象観測：雨量計、温度計、地下水位計、間隙水圧計、地震計
- (2) 崩壊が予想される部分の変位の継続的な測定：①地表面移動：伸縮計、クラック変位計、光波測量、GPS測量、写真測量、ノンミラー測距。②地表面傾斜：地盤傾斜計。③地中内部の変形：地中傾斜計、パイプ歪計、地中変位計
- (3) 前兆現象としての破壊音、小崩壊等の感知：AE計測、落石検知装置
- (4) 構造物の挙動、劣化：土圧計、アンカー荷重計、ロックボルト鉄筋計、歪計、熱赤外映像法、地下水排水量流量計

計測結果は時系列変化を一覧できる変動総括図に整理すると、変動の原因、計測機器相互の関連性、変動の範囲、変動の形態等を推定したり、過去の降水量、間隙水圧、温度等と変動量との相関性を把握する際に効果的である。

5. これまでの計測事例から判明したこと

岩盤斜面の崩壊は、変動が急激で前兆現象がとらえにくいといわれているが、長期間の計測を行うことで、変動の主たる誘因が降雨、温度変化²⁾、地震などであることが判明し、また、岩盤斜面特有の断続的な変位やクリープ等の継続した変動が確認できた斜面もある³⁾。しかし、計測値には実際の地山の変動以外に、天候・湿度による測定誤差、温度変化や地球潮汐などの影響が含まれており、特に微小な変動を計測している場合にはこれらに留意することが必要である。

(1) 温度変化：計測値は、岩盤、計器、治具等の温度特性に応じて気温・地温の影響を受ける。このため、温度の日変化に対しては温度変化の影響が表れにくい夜間0時頃の計測データを使うとよい。また、長期間の計測によれば温度と変動値との相関は高く、両者の散布図を作成することによって実際の変動が発生しているのか判別が可能である。図1は変動の見られない地区の気温の年較差に伴うアンカー荷重計と岩盤傾斜計の変化を示す⁴⁾。図2はアンカー荷重計の温度と変動値との散布図から変動の見られた時期を特定した例である。なお、温度変化を受けながら軽微に累積変動している箇所では、対象斜面を含んだ広域にわたるクリープ変形を生じている可能性もあり、川沿い、海沿いの急斜面ではこの傾向が見られることがある。以上の温度特性の把握には、各地点ごとに実際の現場でのキャリブレーションが必要で、1年間程度のデータに基づき、不安定化につながる有意な変動量を確認しておくことが望ましい。なお、集積されたデータを斜面の構成岩質や地形ごとに整理・解析していけば、このキャリブレーション期間を短縮できよう。

(2) 変動の周期性：変動が特定の時間で繰り返しているような傾向が認められた場合には、周波数解析で潮

リープ曲線になると、最終的な破壊につながる可能性があり、計測はこの変極点を確認することが重要である。ただし、亀裂性岩盤斜面特有の断続的な変動により変動が減速して3次クリープ曲線からはずれる場合もあり、崩壊時期の予測はなかなか困難である。

すべり崩壊以外の崩壊形態に対する崩壊時期の予測・推定は、今後の課題であるが、転倒崩壊については傾斜変動角速度を指標として、斜面の安定性を評価する手法が提案されている⁶⁾。転倒崩壊の前兆である前倒し変形を小さくせん断変形の積み重ねであるとして、その傾斜角速度 θ (rad/day)と崩壊に至るまでの余裕時間TR (day)との関係は、図3に示すように、 $TR \times \theta = 0.3$ と比較的調和している。これによれば、 θ は安定な岩盤斜面で 10^{-5} 、不安定な岩盤斜面で 10^{-4} 、崩落に近い斜面で 10^{-2} 程度で、 $\theta > 10^{-3}$ のとき斜面崩壊の危険が迫っているといえる。地表面に設置する傾斜計は、すべり面のはっきりしない斜面の安定度を評価する実用的システムとして有望である。また、亀裂面の引張破壊に伴う崩落については、前兆となる地形的変化も小さいので、地盤傾斜計や岩盤内部の破壊音の計測 (AE計測) に期待される。

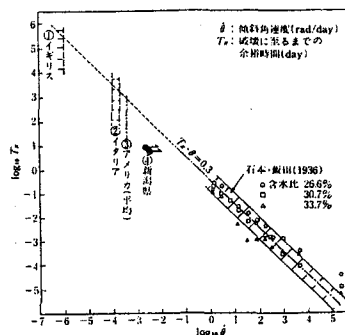


図 3 傾斜速度と破壊までの余裕時間

7. 今後の課題

現地踏査で開口亀裂やズレ亀裂などが見られ崩壊が予想された斜面でも、計測すると必ずしも変動が生じているものでなく、1年間程度の計測では変動が認められない斜面も多い。これは岩盤崩壊の時間間隔が長く、かつ変動が断続的であることによると考えられる。このように現地踏査では岩盤斜面の不安定性の定性的評価は可能だが、踏査だけでは崩壊の時期を判断するのは困難で、計測を併用して初めて変動の有無が把握できる。しかし、現状では計測の実施例が少ないので、代表的な岩盤崩壊危険斜面に対して、各種の計測機器を設置したモニタリングを実施し、データの蓄積・分析を進め、これらを通じて岩盤の挙動を的確に把握する簡易で安価、維持管理が容易な機器やシステムの開発を行うとともに、岩盤崩壊の前兆現象やメカニズムの解明、崩壊時期の予知・予測手法の研究が必要であろう。

モニタリングの実用性からは、全国的に防災対象斜面が多いため、地域の災害履歴、地形地質的な崩壊の起こり易さなどから優先的に詳細な点検や調査を行い、不安定斜面を抽出したうえで計測を行うことが効果的である。また、岩盤崩壊直前には計測値の変化だけでなく、対象岩体が地山から離れることで急激に破断面が形成されることに伴い、破壊音や破断面沿いの落石・小崩壊が頻繁に発生するので、これらの前兆現象を早く察知し、これを安全対策に結びつける社会システムも必要となる。

参考文献等

- 1) 例えば、福井県越前海岸の岩石崩落 (1989年)、長野県国道158号の猿なぎ洞門 (1991年)、北海道国道229号第2白糸トンネル2次崩壊 (1997年) など
- 2) 根岸・中島・氏平：層雲峡熔結凝灰岩における斜面崩壊形態とAEによる崩壊予知に関する基礎研究、開発土木研究所月報、No.453, 1991
- 3) T.WATANABE, T.HAYAKAWA: 30-Years Behavior of Rock Foundation of Kurobe Dam—Result of Measurement at 186m height Arch Dam—, Proceedings of The International Workshop on Rock Foundation Tokyo Japan, 30, 1995.9
- 4) 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測, p.189, 1994
- 5) 例えば、斉藤拙孝：斜面崩壊発生時期の予知に関する研究、鉄道技術研究報告, No.626, 1968など
- 6) 菅原紀明：法面崩壊・地すべり調査のポイント、基礎工, pp.17~22, 1993.3

汐の影響による28日周期などの特定周波数を見出し、この影響を配慮して変動値を解釈するとよい。

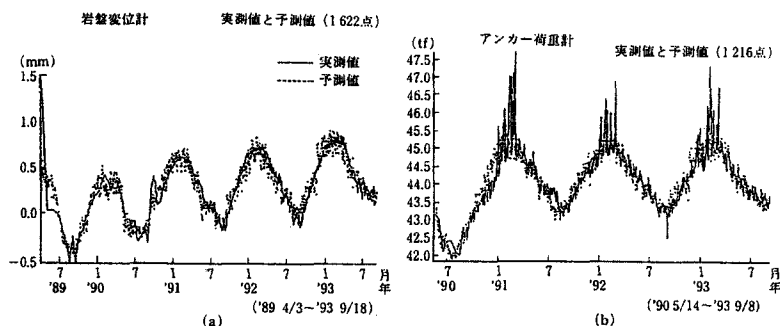


図 1 気温の年較差に伴う岩盤変位計やアンカー荷重計の周期的な変化
(計測値を重回帰分析し、予測値を算出)

(3) 崩壊形態に応じたセンサーの有効性：回転運動が卓越するトップリングでは岩体上部の地盤傾斜計が有効で、すべり破壊では地盤伸縮計やクラック変位計が有効である。

(4) 岩質や不連続面の性状・形成過程による挙動の違い：軟岩から構成される斜面などで、不連続面に粘土を挟在したり前駆的な変位が大きく残留強度に近い場合は連続的な変動を生じやすい。一方、亀裂性の硬岩から構成される斜面などで、

不連続面が粗く、移動岩体を構成する岩塊相互がかみ合わさっている場合やキーブロックが抵抗している場合などは、破壊面でのダイラタンシーや歪みの解放に伴い、変位の進行と停止を繰り返しながら徐々に移動していくような断続的な動きを示す。

(5) 岩質によるひずみ速度の違い：限界ひずみ量の大きい軟岩からなる斜面ではひずみ速度が大きく、硬岩からなる斜面では小さい傾向がある。岩盤の変形の幅を予測してセンサーの測定レンジを事前に把握しておく必要がある。

(6) 亀裂性岩盤における適切な計器配置の必要性：細かな亀裂が発達する岩盤斜面で、センサーを表層部にとりつけた場合には、設置個所の局所的な動きのみ計測する可能性がある。一方、比較的大きなブロック状の岩体では設置個所によっては移動層内部のブロック間の相対的な変形のみを計測することがある。亀裂の中には斜面全体の安定性を代表しないものがあるので、崩壊形態や崩壊規模に応じて、崩壊対象となる岩体全体の動きをとらえることの出来る卓越した不連続面等の的確な箇所に計測器を設置する必要がある。

6. 岩盤崩壊予測の可能性

変状の進行を判断する上で重要なのは、変位や応力の一定方向への累積性や加速度的な変動の有無である。微少でも一定方向への累積性があれば変状は進行し、長期間を見れば不安定化している過程にあると考えられ、また、このとき、降雨や地震等によって変位や応力が増加している場合はとくに注意が必要である。

すべり崩壊については伸縮計等の加速段階の変位曲線から現象論的にクリープ破壊理論を利用した斎藤らなどによる方法で、崩壊時期の推定が可能である⁵⁾。変動曲線が直線的な2次クリープから、加速度的な3次ク

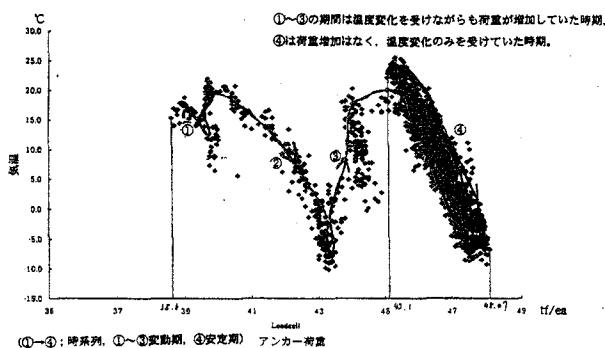


図 2 アンカー荷重と気温との相関