

■ 岩盤計測技術の進歩

独立行政法人北海道開発土木研究所
構造研究室長 池田 憲二

1. はじめに

平成8年2月、一般国道229号豊浜トンネル崩落事故(写真-1)が発生した。痛ましくも通行中の乗用車と路線バスが崩落した岩盤に押しつぶされ、20名もの尊い命が瞬時に失われてしまった。翌平成9年8月には同じく一般国道229号において、第2白糸トンネルが崩落岩盤に押しつぶされてしまった(写真-2)。北海道開発局が設置した豊浜トンネル事故調査委員会は、事故原因の究明に向けて精



写真-2 第2白糸トンネル崩落事故



写真-1 豊浜トンネル崩落事故

力的な調査や審議を行い、とりまとめた報告書の最終章で6つの提言を行っている。すなわち、

- 1) 岩盤生成過程や地形発達過程などの地球科学的な知識をより一層活用すること
- 2) 変化する自然の姿を的確に捉えるために斜面の長期的な経時変化を追跡すること
- 3) 軟岩で構成される急崖斜面に対してきめ細かな点検を実施すること
- 4) テストフィールドを選定して長期モニタリングを行うこと
- 5) 予知予測に関する研究を一層促進すること
- 6) 地域防災体制や道路防災情報システムを構築すること

北海道開発局はそれぞれの課題を行政上の課題と研究上の課題に分類し、真摯に取り組むことになった。

開発土木研究所は研究上の課題を担当する部署として位置づけられ、構造研究室は長期岩盤モニタリングと予知予測に関する研究を担当し、また、これに関連して研究室を横断して行う研究プロジェクトのうち、センサ開発の幹事を務めることになった。

2. 北海道における岩盤モニタリング

北海道開発局が行っている岩盤モニタリングに

- は、大別して3つのタイプがある。すなわち、
- Aタイプ: 研究目的に長期岩盤モニタリングを行うもの (5箇所)
 - Bタイプ: 暫定的な道路防災工事にともない、現道交通に対する有人監視の補助として岩盤モニタリングを行い、工事後も引き続き計測するもの (11箇所)

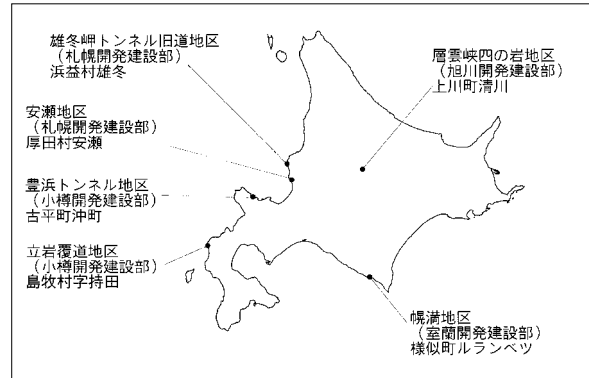


図-1 研究目的の長期岩盤モニタリング箇所

- Cタイプ: 暫定的な道路防災工事にともない、現道交通に対する有人監視の補助として岩盤モニタリングを行い、工事後は計測も終了するもの (10箇所)
- である。

たとえば、Aタイプの例 (図-1) として、雄冬岬、様似町幌満、島牧村立岩 (写真-3)、層雲峡四の岩、

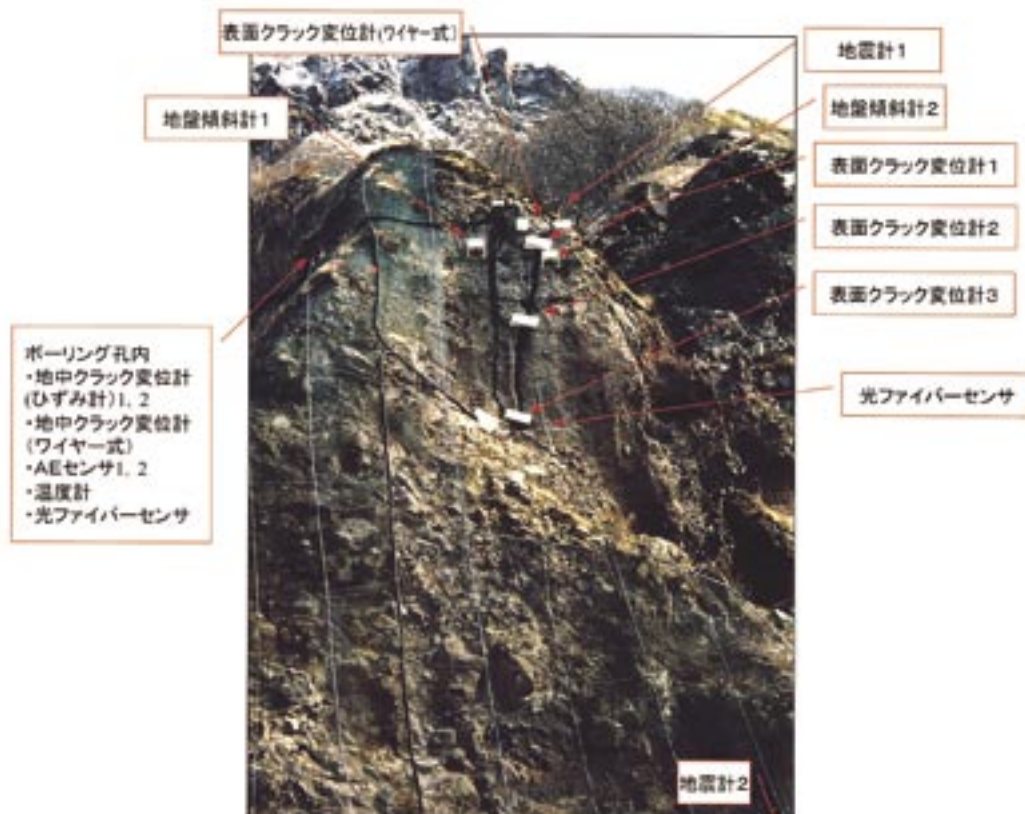


写真-3 立岩岩盤の計測機器の配置

厚田村安瀬がある（豊浜は計測終了）。これらで得られた岩盤計測データは構造研究室で解析・検討され、構造研究室が設置した「北海道での岩盤計測に関する調査技術検討委員会」（委員長：櫻井春輔 広島工業大学学長）で審議されている。

用いられている主なデータは従来型の一般計測器、すなわち、変位計とひずみ計で得られたものである。変位計を亀裂に設置すると亀裂変位計であり、ひずみゲージを鉄筋に貼りつけ、鉄筋をボーリング孔内に挿入し、モルタルを充填すると孔内ひずみ計になる。これらの他にも気温、風向・風速、雨量などの一般気象データや間隙水圧、孔内温度、岩盤表面温度なども計測している。

なお、現地の計測データには誤信号が含まれていたり、欠損したりすることがある。局所 AR モデルを用いて自動的に誤信号か否かを判定するプログラムやデータの統計上の性格を変えることなく自動的に欠損データを補うプログラムも開発した。

岩盤は年間の気温の変動に追従して、緩やかに挙動していることが確かめられた。冬は岩盤が収縮することにより亀裂は開き、夏は岩盤が膨張することにより亀裂が閉じる方向に動いている。岩盤の挙動と気温の変動や潮汐との相関を求め、統計学的手法を用いてこれらの影響を除去すると、真の岩盤挙動が把握できる。観測データからこれら外的要因による変動を除去するプログラムの開発も行った。今のところ、この挙動に変位の累積傾向がみられないので、A タイプの岩盤は安定しているものと考えられる。

また、この外気温による年間を通じた岩盤の挙動をコンピュータシミュレーションで再現することにも成功した。高さ約 15 m の立岩岩盤を約 130,000 個の要素に分解し、岩盤表面と深部に 20℃ の温度差を与え（図-2）、夏冬でそれを逆転させると亀裂の上下方向 3 点における開閉量を実計測結果と一致させることができた。このとき、岩盤背面の亀裂深さは不明であったが、亀裂深さ 3 m とした場合

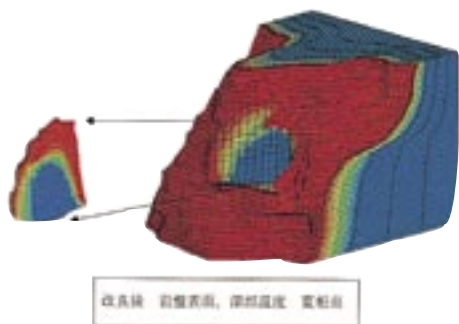


図-2 立岩岩盤のシミュレーション用モデル図と温度分布

に一番よく計測データと一致したことから、この手法を用いれば、目に見えない岩盤背面の亀裂の分布も推定できそうである。さらにこの手法を用いて、亀裂が何mまで進展すると岩盤は崩落するのか、また、震度何以上の地震があれば岩盤が崩落するのか、といったことに用いることができるかもしれないと期待している。ただし、実用化に至るまでにはより詳細な検討・研究が必要である。

3. センサ開発プロジェクトと各センサの特徴

開発土木研究所では新たな岩盤計測センサの開発も行っている。従来型の計測器に加え、以下のセンサの岩盤計測への適用性について検討した。

- 1) 光ファイバーセンサ
- 2) 3次元自動壁面計測装置
- 3) AE センサ
- 4) 落石検知器
- 5) ケーブルセンサ
- 6) レーザスキャニング
- 7) デジタルビデオによる落石検知
- 8) 微電圧測定
- 9) 赤外線カメラ

これらはそれぞれ得失があるが、従来型のセンサと併用することにより、きめの細かい岩盤計測が可能であることがわかった。いくつかを概説する。

1) 光ファイバーセンサ

通信用の光ファイバーに光を入射し、反射光の周波数変化を測定することで、ひずみ量とその位置を特定するものである。鉄筋に沿わせて貼りつけ、ボーリング孔内に埋め込むことで岩盤内のひずみを連続的に測定可能である。しかし、岩盤表面に設置した場合は日照や温度変化の影響を受け、用い方として適当ではないことがわかった。

3) AE センサ

本センサについては建設会社またはコンサルタントと複数の共同研究を実施し、研究を行ってきた。

AE とはアコースティックエミッションの略で、岩盤崩落の前に岩盤内で進行する微細な亀裂が発生する際に放出される弾性波のことである。高感度の地震計で捉えられる。たとえば、「バキッ!」と物が壊れる前に、「ミシミシ」と音がするとき、「ミシミシ」に相当するのが AE である。崩落直前には AE の発生が急増することが知られており、崩落の予測には有効であるが、実用化に向けていくつかの課題も残されている。たとえばトリガーレベルの問題がある。レベルを低く設定すると雨滴や交通振動など

の様々なノイズを拾ってしまい、真の岩盤 AE との区別が難しくなる。また、レベルを高く設定すると遠くで発生する AE や小さな AE を捉えられない恐れがある。

5) ケーブルセンサ

ケーブルセンサは導線と強誘電性絶縁材料や被覆材からなる直径約 5 ミリのケーブルで、外見はテレビのアンテナ線に用いる同軸ケーブルと全く同一である。

このケーブルに振動を与えると、内部で静電気が発生するので、落石の検知に利用可能である。構造研究室および北大大学院の氏平増之助教授と NTT ドコモ北海道との共同研究により、定山溪の林道に設置した落石防護ネットに、格子状にケーブルセンサを取り付けて行った落石実験では、ネット上を転落していく落石の軌跡を特定することができた。

第 2 白糸トンネルの 2 次崩落の直前には多数の小落石が前兆現象として観測されており、ケーブルセンサは崩落の予知に利用できるものと期待されている。

4. 今後の課題

これまでの研究の結果、岩盤モニタリングの方法、センサの得失、データの処理法、シミュレーションの可能性、岩盤の挙動など、多くの知見が得られた。しかし、いまま最大の課題については未解決のままである。それは、崩落の予知予測である。

その第 1 の理由は崩落に至る実測データが存在しないことである。仮に岩盤モニタリングの手法が確立し、確かなデータが得られ、岩盤の挙動がわかったとしても、その挙動が崩落に至る挙動なのか、一定の範囲内で繰り返される安定した挙動なのか、その判断には安定した状態から崩落に至るまでの実計測データが不可欠である。崩落形態にはトッピング、バックリング、滑り型など、様々な形態があり、岩盤の岩質や風化の程度なども千差万別である。正確な崩落の予知予測のためには崩落形態ごとの、岩質ごとの崩落データが必要であるが、我が国で岩盤崩落に至るデータは和歌山県天鳥橋地区のトッピングによる高さ約 4 m の崩落のみであり、これは豊浜トンネルや第 2 白糸トンネルの崩落とは形態も、規模も、岩質も異なるものである。

今後は現在計測している箇所、可能であれば人為的に岩盤の不安定化を促進し、崩落時のデータが取れるかどうか、検討してみたい。

第 2 の理由はどの岩盤をモニタリングすべきか、

その判定は従来の方法によらなければならないということである。北海道には何百キロにもわたる急崖斜面沿いの国道が存在し、第 2 白糸トンネル崩落後の緊急調査では全道で 387 カ所が要対策とされた。この状況で、どこをどうやってモニタリングすべき箇所として選定したらよいのだろうか。それは斜面の高さ、ハングオーバーの有無、亀裂の存在や湧水の程度など、従来の目視点検等によらなければならない。仮にモニタリング技術が向上し、モニタリングにより崩落の予知予測が可能になったとしても、モニタリングすべき箇所は、モニタリングすることなく選定しなければならないのである。

5. 愛する人を地震で失わないための耐震設計

いきなりこんな言葉が出てきて、驚かれたことと思います。いまから 15 年ほど前、つくばの土木研究所に勤務していたとき、免震構造を採用した某建設会社の技術研究所を見学に行ったことがある。そのときにその会社の説明者が使った言葉である。私は耐震設計の目的を構造物の安全性の確保とか、設計の合理化とかという言葉だけで考えていたので、この言葉を聞いたときの驚きと感動はいまも忘れていない。

そして 15 年後、愛する家族が 3 人に増えて再び研究職に就いたときに、私は愛する人を失った人たちを知った。地震災害ではないが、岩盤崩落で。

豊浜トンネル崩落事故に係る損害賠償請求事件(民事裁判)において、国は賠償責任を認めている。しかし、崩落のメカニズム、崩落の予知予測が可能であったという点、崩落の原因はトンネル掘削にあるという点、豊浜トンネルは欠陥トンネルであったという点などについては、原告の主張と異なる見解を述べている。私は国の一員として、この見解を支持しているが、このことについては技術者の良心に恥じるころはないと確信している。しかし、その時、遺族として心情を訴えている原告から提出された文書の内容は思い出さないようにしている。職場でも、もう読まないようにしている。この文書には赤ん坊の時から慈しみながら育ててきた最愛の我が子を失った遺族の悲しみが綴られている。この文書をうっかり職場で無防備に読んでしまうと、涙を流しているところを同僚らに目撃されかねないからである。

もう決して道路利用者にはこのような形で愛する人を失わせてはならない。いまの私に与えられた使命である。

合掌