

大谷石採取場跡地の観測システムについて

The Observation System for the Quarry Site of the Oyaishi Stone

村山 信策 (むらやま しんさく)

栃大谷地域整備公社

藤原 盛光 (ふじわら もりみつ)

川崎地質綱宇都宮事務所

野口 静雄 (のぐち しずお)

川崎地質綱大谷石採取場跡地観測所

大村 猛 (おおむら たけし)

川崎地質綱大谷石採取場跡地観測所

1. はじめに

1989 (平成元) 年に発生した陥没事故を契機に, 住民の安全確保のため, 大谷石採取場跡地を監視するモニタリングシステムとして「大谷石採取場跡地観測システム」(以下, 単に「システム」とよぶ) が構築された。

このシステムは, 1989年9月29日に12観測地点で地震計による予備観測として開始され, 1990 (平成2) 年3月28日からは, 95観測地点に地震計を増設したシステムで運用していた。今までの期間に, 1990~1991年と1996~1997年に発生した陥没の前兆を振動現象として検出^{1)~5)}し, システムの有効性が実証された。

さらに, 当時としては珍しい, 光ファイバケーブルを使用した信号の伝送など, 将来を見据えたシステム構築が図られ, 時代ごとの新技術を駆使した計測機器の改善と工夫を随時加えながら更新しているものの, その骨格は, 現在も大きな変更もなく運用されている。

本論文では, このシステムについてのデータ計測, 解析, 管理および運用などの面を主に述べる。

2. 観測システムの概要

システムは, 栃木県宇都宮市の大谷石採取場跡地 (東西約3.0 km, 南北約5.5 km) 観測区域に, 2003 (平成15) 年12月31日現在, 124観測地点に増した地震計によって, 地下空洞の天盤, 壁面あるいは残柱から剥離落下

する岩片の床面衝突や, 岩盤内部の亀裂発達等によって発生する衝撃振動を観測および監視することを主な目的とする。

システムの構成は, 機能面から「サテライト部」, 「受信監視部」, 「トリガ監視部」, 「常時監視部」, 「処理解析部」, 「無停電電源部」の六つに区分けされる。

また, 地下空洞や旧陥没地および立坑の埋戻し域における自然地下水位と空洞内水位の変動を随時把握するため, 従来実施されていた手動による水位観測を発展させた, 水位計によるリアルタイム自動監視を行っている。

さらに, 岩盤崩落等の事故防止対策に必要な基礎データを得るため, トンネル天盤部に亀裂変位計を設置したリアルタイム自動計測も行っている。

これらの観測システムブロックを図-1に示す。

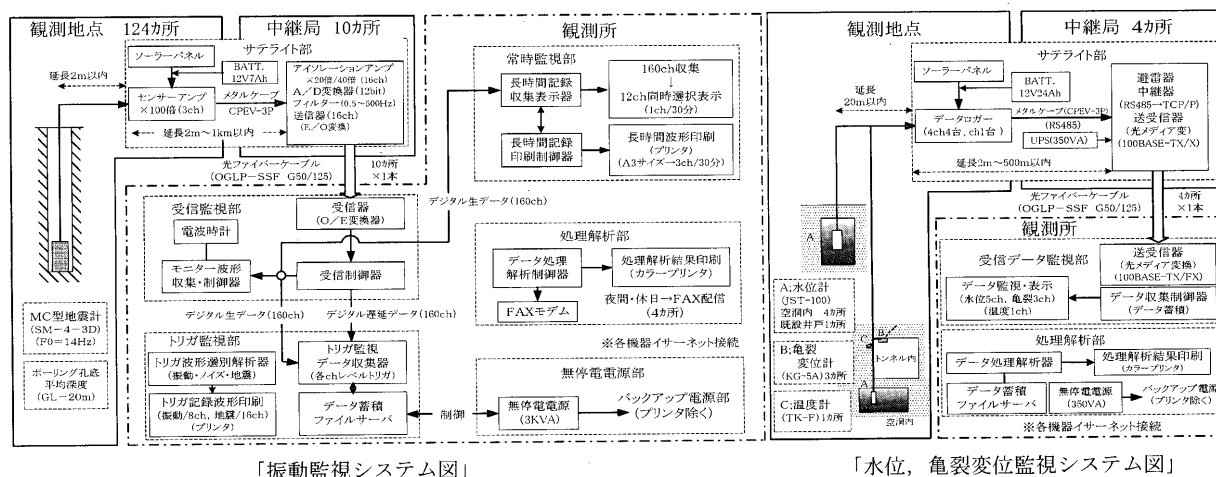
3. 計測

3.1 観測地点, 送信ユニット

(1) 地震計, センサーアンプ, 絶縁アンプ

地震計 (SM-4-3D, 3成分動コイル型速度計, 固有振動数14 Hz, 感度0.45 V/kine) は, 背景雑音 (地表ノイズ) を避けるために, 凝灰岩 (大谷石) 岩盤中のボーリング孔底 ($\phi=66$ mm, 平均深度約20 m) に設置した。

地震計の出力信号は, 観測地点のセンサーアンプで増幅 (100倍) して送信ユニットへ伝送される。この間が互いに離れた場所 (最大1 km程度) にあり, しかも信



「振動監視システム図」

「水位, 亀裂変位監視システム図」

図-1 観測システムブロック

論文

号ラインがノイズ（電柱架設）の多い測定環境の中を引き回すために、正確な計測を妨げる原因の一つとして電気的ノイズ（誘導、雷害等）が問題になる。計測では以下に示す、これらの影響分を軽減防止する方法を採用した。

① センサーアンプの電源

- ・太陽電池駆動方式の採用「雷害の軽減防止」

② センサーアンプの入力、出力部

- ・入出力差動方式の採用、±信号間中点にバランス調整トリマー回路（GND；接地しない）で不平衡インピーダンス調整（CMR）「電磁気ノイズの軽減防止」
- ・入出力±信号ラインとコモン間にサージアブソーバ（低電圧用）回路、バリスタ内蔵型アレスタ（高電圧用）回路の併設「雷害の軽減防止」

③ 絶縁アンプ

- ・差動入力、絶縁アンプの採用「コモンモード誘導ノイズ、複数入力成分間の干渉等の軽減防止」、「電気的絶縁（耐圧±1kV）、後段電気回路の保安」
- ・保安器（電流制限抵抗）の設置「雷害の軽減防止」

以上、各種のノイズ対策を施すことで、S/N比の向上を図った。信号ラインのノイズ対策回路の構成を図-2に示す。

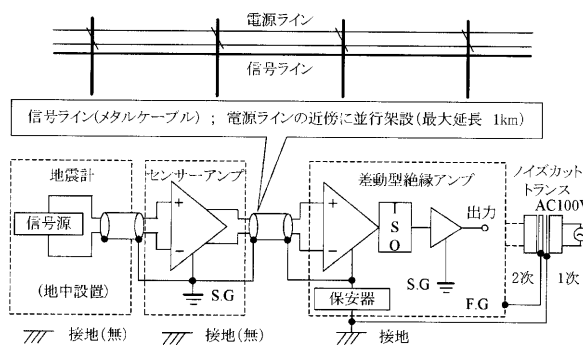


図-2 信号ラインのノイズ対策回路

(2) 水位計、亀裂変位計

最近、新たに観測区域中5カ所の既存ボーリング孔と既設井戸底に、半導体ゲージ圧力型水位計（JST-100）を設置して、水位計測を開始した。また、トンネル天盤部の3カ所の亀裂に亀裂変位計（KG-5A）を設置して、亀裂幅の相対的な変化を計測中である。

水位と亀裂変位の計測データは、観測地点に設置されたデータロガーで収録され、設定された時間ごと（現在毎正時）に中継局～観測所へと自動伝送される。データロガーの電源は、太陽電池駆動方式を採用した。

3.2 中継局

中継局は、観測区域全体を11カ所の監視ブロックに分け、10カ所に設置して、1カ所当たり、最大16成分の信号が集められる。前節の送信ユニットでは、アナログ信号を絶縁アンプで増幅（20倍/40倍）した後、A/D変換器、E/O変換器（光トランスミッタ）により光信号に変換して、観測所内の受信ユニットまで光ファイバー

ケーブルで長距離伝送（最大約3km）を行っている。光ファイバーケーブルは、予備回線を含めて2系統敷設して、水位計、亀裂変位計の自動記録データ通信にも使用している。送信ユニットの主な仕様を表-1に示す。

表-1 振動計測用送信ユニットの主な仕様一覧表

名称	項目	仕様
・フィルタ	遮断周波数	500Hz
	傾度	12dB/oct
・A/D変換器	チャンネル数	16ch
	入力電圧	±10V(F.S)
	分解能	12bit
	サンプリング	5KHz
・光トランスミッタ	出力周期	12.5μs
	出力	シリアル16Bit

3.3 観測所

観測所では、受信ユニット（10台）の伝送データ（160成分）をサンプリング周期（1.0ms）で同期を取りながら、生データ（実時間）と遅延データ（5s）とに出力され、システム上のデータバスとして、トリガスタート監視、常時監視、データ処理・解析の各システムに分配される。

所内への計測上のデータは、光伝送方式のデジタル信号であるので、電気的に絶縁され野外の機器から回り込むノイズは発生しない。地震計から受信制御器までの振動データの流れを図-3に示す。

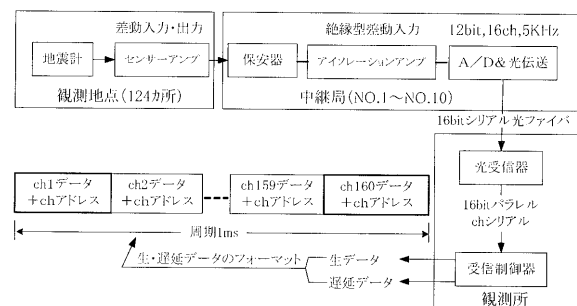


図-3 振動データの流れ

4. 処理・解析

4.1 データ収集

振動データの収集は、トリガスタート監視、常時監視の各システムにより、以下の方法で行われる。

(1) トリガ収集

振動データは、各観測地点であらかじめ設定したトリガレベル値以上の振幅が記録中に発生した場合、その発生源に近接した、8カ所の観測地点を選定して、波形データ（収録時間16s）を収集保存している。トリガ値は、各観測地点とも常時微動の約2～3倍とし、おおむね50～150μkineの範囲に設定している。このほか、地震発生時では、全観測地点から任意に選択した16カ所の波形データ（収録時間32s）を特別に収集保存している。

(2) 常時モニター収録

モニター収録は、次の2種類の方法で行っている。

① 常時監視モニター

このモニターでは、124カ所の観測地点の中から振動が頻発する、あるいは過去の陥没地に隣接する観測地点等から12カ所を選び、24時間常時に波形をモニタリングする。波形出力は、ディスプレイ表示と紙面印刷の両方で監視される。選択する観測地点の設定は、振動発生状況の推移等により、随時変更可能である。

② 個別波形モニター

このモニターでは、全観測地点について、設定した観測地点数ごと（最大16成分）に一定の時間間隔でディスプレイ表示（全観測地点約20 s）を行う他、任意の観測地点を1カ所選んでモニターを行うことで、観測所内から、速やかに不具合等が対処できるようにしている。

4.2 データ処理

振動データは、トリガ方式で収集されるため、この時点では様々なノイズ（交通車両、土木工事等）が含まれることから、以下に示すデータ選別処理が施される。このデータ選別処理のフローを図-4に示す。

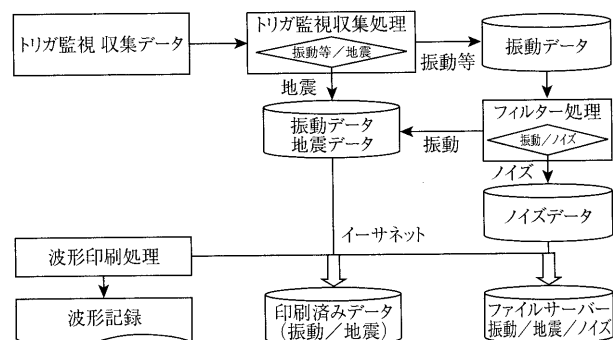


図-4 データ選別処理のフロー

トリガの判定は、レベル値、時間、チャンネル数の三つの要素により振動と自然地震に大別し、それぞれの処理に適したフォーマットでファイルとして収集した後に振動と判定されたデータファイルを解析することで、ノイズファイルを除去する方法で行っている。

(1) 振動

基本的には、トリガチャンネルの最大振幅に対して、トリガ前後（1～8 s）の時間区間別振幅比で判別されるが、あらかじめ設定した複数の判定条件のフィルタ処理でノイズデータを排除して、確実な振動データを抽出している。判定項目としては、「振動判定チャンネル数」、「判定チャンネル最大振幅比」、「プリトリガ振幅比と波数」、「周波数解析」等である。このフィルタ処理後、個別に「振動ファイル」として格納される。

以上のデータ選別処理により、必要な振動データを得ることができるが、野外作業に伴う振動や、立坑への土砂等の投入に伴う振動の中には、空洞内部を原因とする、岩盤の亀裂発達や崩落に伴う振動と、波形的に類似しているものがあるため、可視化記録で再考している。

(2) 自然地震

複数（現在16カ所）の観測地点の振幅値が同時刻にトリガレベルを超えた場合、自然地震として判定し、ト

リガ前（5 s）より収集され、振動等とは個別に「地震ファイル」として格納される。

4.3 データ解析

選別処理後の振動データについて、震源の位置推定、波形分析（分類および周波数解析）、発生頻度、振動の規模（エネルギー）等の解析処理を行う。

従来までの監視データ処理、解析は、アナログ記録から走時、振幅を直読して震源情報を求める方式であった。この場合、走時および振幅の読取差異が大きく、決定した震源の誤差が10 m以上、解析時間は約1～2時間を要することがあった。

このため、速報版と確定版の2段階方式の震源推定を行い、データ解析処理の迅速化、高度化を図った。

速報版の震源決定は、各観測地点で検出された振動の振幅値について、距離減衰特性を利用している。過去の岩片落下実験から、震源からの距離の1.7乗に反比例する、一般値に近い距離減衰特性が得られている。この特性を利用することで、3カ所以上の観測地点があれば、波形の最大振幅値を利用して、震源と各観測地点との距離比を算出して、発生源（震央）を近似的に推定することができる。

一方、確定版については、初動到達時刻（走時）が重要であるため、波形データから走時をディスプレイ上にて読取り（1 ms 単位）、この読取データに対して当地の地下構造を与えた逐次近似法を適用した⁵⁾。

データ解析・表示等のフローを図-5に示す。

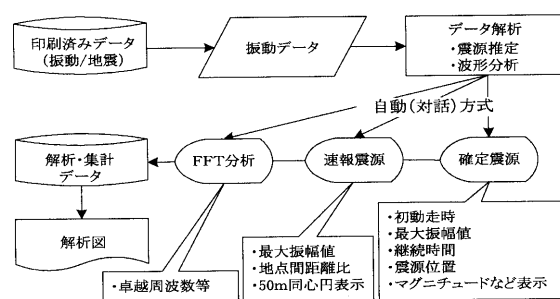


図-5 データ解析・表示のフロー

震源決定に要する時間は、速報版が約1分以内、確定版は約30分以内で、従来に比べて大幅に短縮された。

波形については、その外観的特徴から岩盤における亀裂発生や伸張、崩落および埋戻し土砂の移動等、原因を推察して波形分類を行っている。また、振動波形の特性を把握するため、FFT法による周波数解析を行い、データ分析の資料としている。

振動の規模については、ローカルマグニチュード M として、次の式で表している。

$$0.85M - 2.5 = \log A_v + 1.73 \log r \quad (1)$$

ここで、 $r(\text{m})$ は発生源位置までの距離、 $A_v(\text{kine})$ は波形の最大速度振幅である。

4.4 データ集計・表示

振動データについては、その時系列変化を表すものとして、次の二つの指標を用いている。一つは発生頻度で

論 文

あり、もう一つは、活動指数という指標を定義して用いている。活動指数は、次の式で定義される^{1),2)}。

$$(\text{活動指数}) = (\text{最大振幅 (m/kine)}) \times (\text{振動継続時間 (s)}) \quad (2)$$

これは、振動波形には様々な形態があり、波形エネルギーの変化も著しく異なるため、発生規模を補足する意味合いで、導入している。

以上、処理解析された振動データは、データの保存と将来にわたる監視や陥没等の予測資料として活用するため、振動データベースを作成し、他のデータとともに登録されている。データベースの要素フローを図-6に示す。

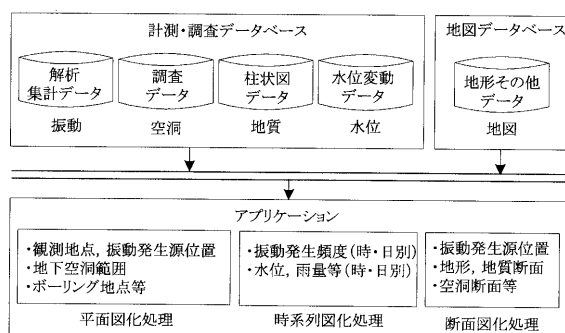


図-6 データベースの要素フロー

5. 管理・運用

振動データやその他データは、以下の方法で管理・運用されている。

(1) 管理

振動データ、水位・亀裂変位データは、パソコンのハードディスクや光磁気ディスク等に保存している。

このデータベースについては、パソコン内のソフトウェアにより発生頻度等の時系列分析を行うほか、計測データの表示を可能にしている。

(2) 運用

振動データ等の運用については、「観測情報」として栃木県や宇都宮市等の関係機関に随時報告するほか、観測所の掲示板に貼り出す形で、地域住民に情報を提供している。

通常の観測体制は、有人観測のため、異常時の場合の即応が可能である。しかし、平日の夜間や休祝日、年末年始等では、機器監視による無人観測である。このため、波形記録をFAXによって複数の運用管理者へ配信することで、異常時のより迅速な対応が図られている。

データ管理・運用（情報伝達）のフローを図-7に示す。

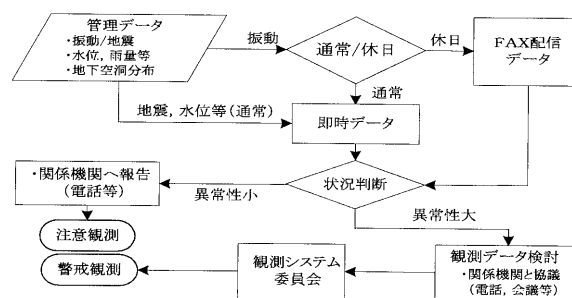


図-7 データ管理・運用（情報伝達）のフロー

6. おわりに

このシステムは、東西約3.0 km、南北約5.5 kmにある採石場跡地に地震計、水位計、亀裂変位計を設置した観測網による監視システムである。本論文では、システムにおける計測・解析技術の一端について述べた。

1989（平成元）年に発生した陥没事故以降において、35カ所の採取場が廃坑となり、現在、廃止採取場が約300カ所に達し、十数カ所の採取場が稼働しているにすぎない。このことにより、空洞内の地下水の汲み上げが無くなり、水没廃坑が徐々に増える傾向にある。この結果として、地下空洞の荒廃がより進み、広範囲に及ぶとともに、水理的な要因も加わっている。

これについて、最近、振動計測では、地下空洞に対して実施された安定度評価を基に、評価の低い地域を対象に、従来の観測地点に15カ所増設する見直しを行った。また、水位観測については、空洞内への地下水流入経路（水理系）を考慮して、自動計測でリアルタイム表示による監視を始めたばかりである。

今後は、計測・解析の結果について、紹介できればと考えている。

最後に、本システムの運営にあたり、栃木県、宇都宮市および大谷石材協同組合の関係者各位に尽力を賜っております。ここに感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 中田文雄・野口静雄：野外 AE 観測データ処理ソフトウェアの開発，物理探査学会第83回学術講演会論文集，pp. 51～56，1990.
- 2) 中田文雄：大谷石採取場跡地における振動観測データ処理システムの構築と AE 活動，情報地質，第1巻，第2号，pp. 179～189，1990.
- 3) 佐野俊一・野口静雄：大谷石採取場跡陥没地をたずねて，火薬と保安，Vol. 23，No. 3，pp. 30～36，1991.
- 4) 岡川建之介・小平佳志・中田文雄・野口静雄：大谷石採取場跡地の陥没に伴う野外 AE 活動，土と基礎，Vol. 40，No. 9，pp. 45～48，1992.
- 5) 中田文雄・野口静雄：大谷石採取場跡地における野外 AE 観測システム，地質と調査，〔小特集〕空洞調査，第2号，pp. 18～24，1993.

（原稿受理 2004.1.8）