

26. 地下ダム施工における地盤評価装置の開発

大成建設株式会社 技術センター ○近藤 高弘

1. はじめに

地下ダムは、離島などの水資源確保のため地中に遮水性の壁を連続的に設けることで地下水を堰き止め貯水する工事である。南の離島では珊瑚が厚く堆積した琉球石灰層の下に不透水層の基盤として粘板岩などが存在している。地中連続壁の施工にあたり琉球石灰層の下にある不透水基盤層まで確実に到達させる必要がある。

削孔機先端がこの基盤層まで到達したかの判定手段として、従来は調査ボーリングデータを基に削孔深度と対比しながら削孔機の電流値の変化などを施工経験に基づいて基盤層の判定が行われてきた。そこで削孔時に発生する掘削振動を計測し、掘削振動波形を解析して比較評価することで未経験者でも客観的に評価ができる新たな評価方法の開発と地盤評価装置の開発を行った。

2. 地下ダム施工データの収集

地下ダム施工の削孔手順を図-1 に示す。施工手順はケーシング削孔→先行削孔→三軸削孔の順で削孔が行なわれる。先行削孔は1軸のオーガーで所定深度の基盤層まで削孔を行う。先行削孔機はドーナッツオーガーを使用する。新たな評価方法の開発のためのデータ収集として、先行削孔時に各種の削孔時データを収集する事にした。

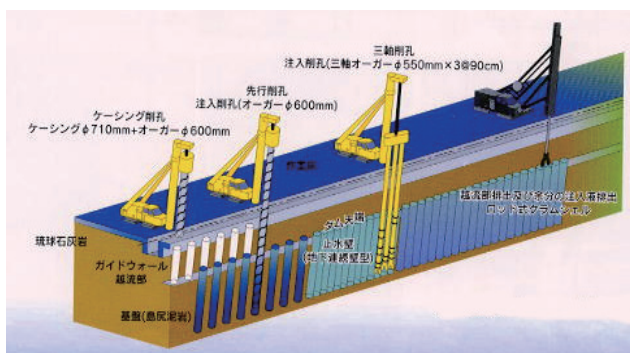


図-1 地下ダムの削孔手順の概要

当初は、何が基盤判定に有効な計測項目なのかが不明であったので、従来の削孔時の電流値を含

めて、三軸振動加速度、削孔時の音、削孔ロッド回転、削孔荷重などを削孔時波形データとしてデータログで収集した。

削孔か所は、ボーリング柱状図の調査孔2か所とその近傍の3か所の合計5か所の削孔データを収集した。

削孔時の振動および削孔音のセンサ設置場所として削孔機ビット先端で収集する事が理想であるが、削孔ロッドの加工や実用時のシステム導入のし易さを考慮して簡易な場所にセンサを設置して判定することを考えた。

センサ取付け位置は、掘削時の振動は削孔スクリー・ロッドを伝搬して地上の削孔機本体に伝わって来ると考え削孔機本体の減速機フランジ部に三軸振動加速度計とマイクを図-2 に示す位置に設置した。

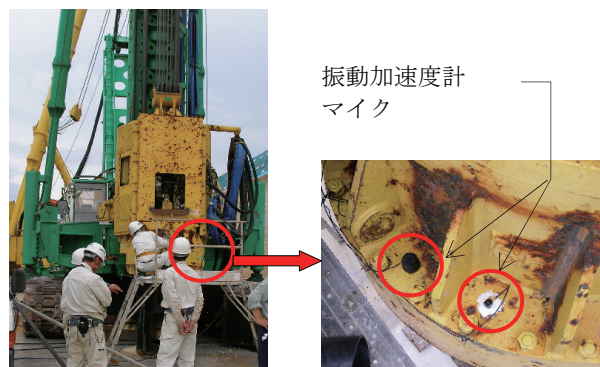


図-2 振動加速度計・マイク設置位置

削孔振動の解析周波数を10KHzまで考慮して、サンプリングレートは20KHzとした。

削孔データの収集は、沖縄県伊江地下ダム第二期建設工事において施工データ収集した。

図-3 に示すように、削孔時のセンサデータは12ch分を一旦データログで収集した後に解析を行う事とした。収集した削孔データは約100Gの容量となった。

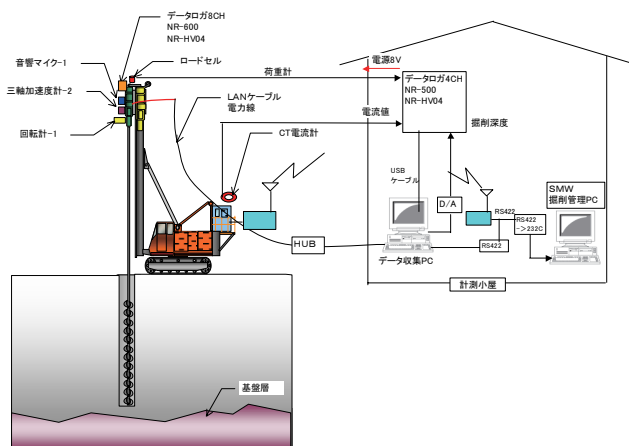


図-3 施工データ収集システム

3. 削孔データの分析

調査ボーリング孔のボーリング柱状図を参考にして、削孔深度毎に任意に波形データを抽出しスペクトル解析を行いその周波数の特徴を調べた。

まずは従来の判定方法による電流値の変化の特徴を把握しようと削孔ロッド回転や削孔電流値の解析を行った。その結果、基盤層到達時には回転のムラや電流値の変動などが大きくなりモータに大きな負荷が加わる事がスペクトル解析結果から理解できた。しかし波形解析からは特有のスペクトルを見つけ出す事は出来なかった。図-4に示す。

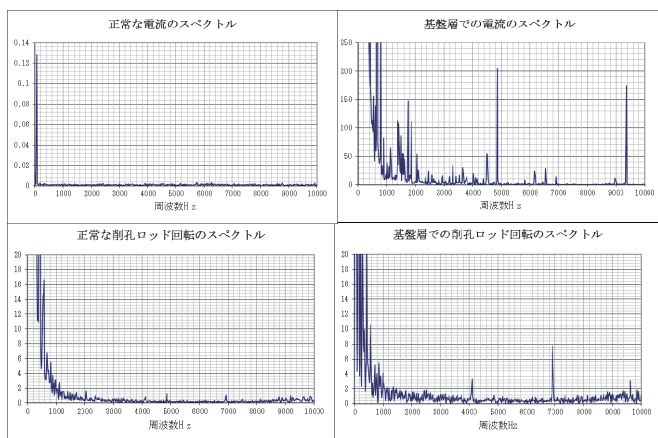


図-4 削孔電流・ロッド回転のスペクトル

振動加速度データと削孔音データは基盤層到達時に特徴的なスペクトルを示す事が波形解析結果からわかった。そこで、この基盤層削孔時の解析データを基にした教師データを作り、削孔時の波形データをスペクトル解析して教師データと比較する事で基盤層到達の判定が可能になると考えた。

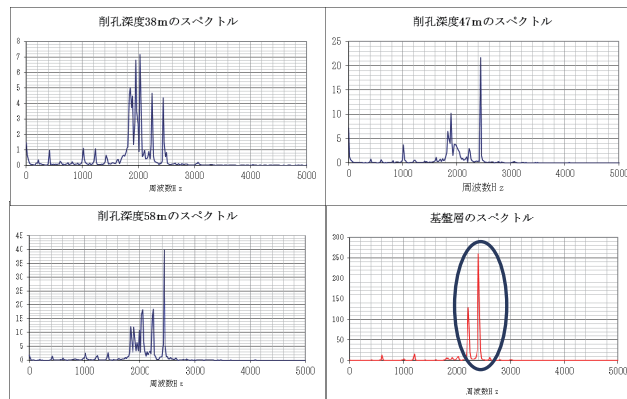


図-5 削孔深度別のスペクトルの変化

しかし波形解析に必要なデータサンプリング時間はほんの数十分の一秒程の微小な時間である。実施工では1つの先行削孔には数時間を要しているので削孔深度全体のスペクトルを把握し確認する必要があった。

そこで図-6に示す削孔完了までの全データを1秒間隔でスペクトル解析した。スペクトルは各周波数成分に対する強度を表示するもので、施工全体のスペクトルを把握する方法として、解析したスペクトルの最大値から最小値を赤～緑色の色の变化として表現する事で1本の直線上の色の变化として表現することで、全体のスペクトルを平面的に色の变化として把握する事ができた。この事により基盤層には特徴的なスペクトルが存在する事が判明した。

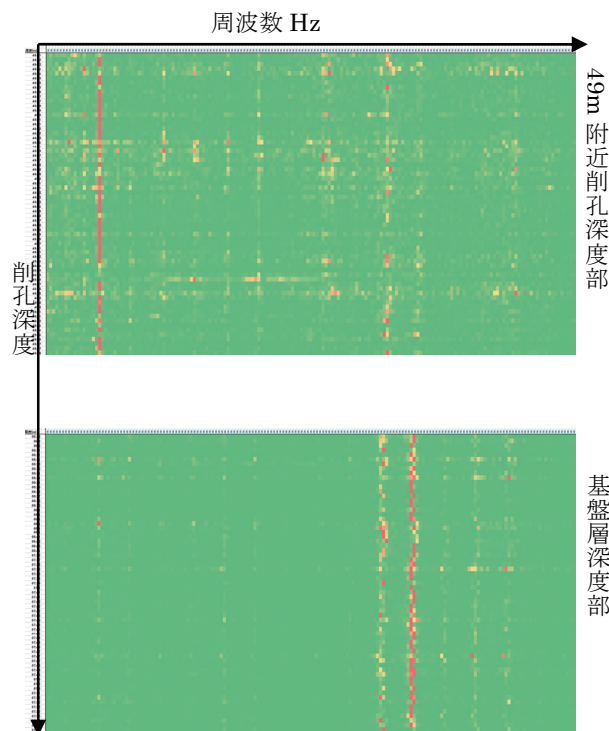


図-6 可視化した削孔深度毎のスペクトル

削孔データの比較に用いる教師データは、その判定精度を上げるためにより特徴的なスペクトルとして加工した。図-5の基盤層のスペクトルと比較して、単純平均とせずノイズスペクトルと思われる周波数帯を意図的に削除した。

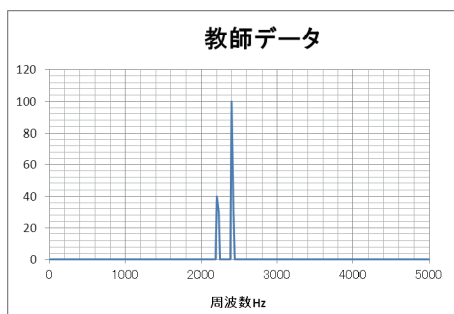


図-7 教師データのスペクトル

4. 基盤層の評価方法

基盤層の判定は、削孔時波形データをリアルタイムにスペクトル解析し、教師データとの比較を行いその類似度合いを求める事で可能になる。

この類似性の度合いを示す統計学的指標として相関係数を用いる事にした。

ここで相関係数について少し説明する。相関係数は、あくまでも確率変数の線形関係を計測しているもので、確率変数間の因果関係を説明するものではない。例えば「相関係数が0.2と0.4であることから、後者は前者より2倍の相関がある」などと言う一般的な相関とは意味が異なる。あくまで類似の度合いの指標で最大値は1を示す。相関分析とは2つの変数の間に線形関係があるかどうか、およびその強さについての分析である。それに対し回帰分析とは、変数の間にどのような関係があるか具体的な関数の形についての分析であり、近似式を作る事を目的としている。

相関係数の数値はあくまでも教師データとの類似度合いを表しているので、基盤判定値のしきい値は施工現場の状況により判断される。

今回の伊江地下ダム第二期建設工事の削孔データからは相関係数0.5以上であれば基盤層と判定される事を確認した。

相関係数は、2組の数値からなるデータ列

$$(x \ y) = \{(x_i \ y_i)\} (i=1,2,3...n) \quad (1)$$

があたえられたとき、相関係数は以下のように求める。

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

ここで図-7の教師データと、現場で収集した全削孔深度の振動加速度データを1秒間隔で相関係数を求めたものを図-8に示す。この図-8では削孔深度のいたる個所で教師データと類似度の高い相関結果が表れている。瞬間的に教師データに類似する事は削孔する地層が均一でないで瞬間的に類似度が高くなることは想像に難しくない。

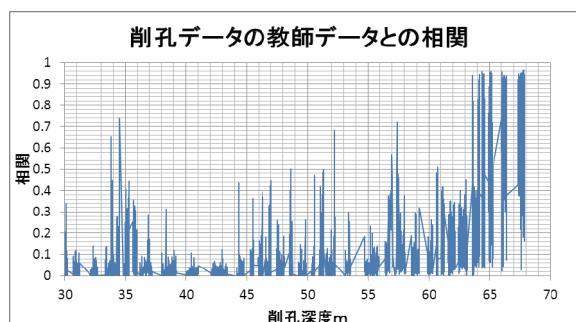


図-8 削孔深度における振動加速度の相関

そこで相関結果の移動平均処理を行い表示したものが図-9である。移動平均処理する事でより基盤層の判定が明瞭になり電流値の変化よりも明確に判断する事が可能になった。

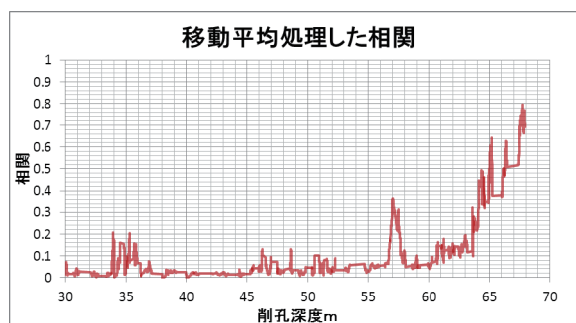


図-9 削孔深度相関の移動平均処理結果

この時の削孔機本体の電流値の変化を図-10に示す。従来は基盤層削孔時の電流変化を経験的に判断して基盤層到達を判断していた。この電流値判定では削孔機の吊荷負荷の状況により電流値が変化し電流値のしきい値からの判定が困難である。

本評価方法では吊荷負荷の影響は受けず客観的な評価が可能である。

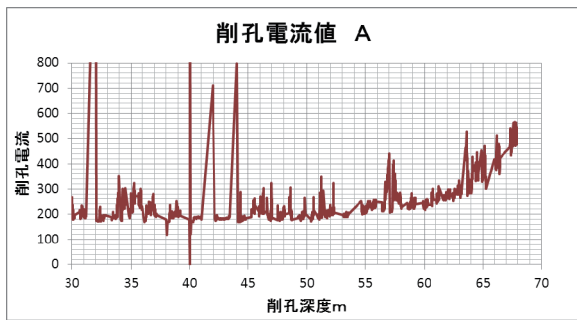


図-10 削孔機械の電流値の変化

5. 地盤評価装置のシステム概要

波形解析および評価方法を実際の施工で実施する場合の具体的な手順を以下に示す。

- (1).調査ボーリング孔の調査結果を参考にし、同一箇所を施工し削孔データを収集する。
 - (2).上記の基盤層の削孔データのスペクトル解析を行い、教師データを作成する。
 - (3).調査ボーリング孔または近傍で施工し削孔データをリアルタイムに波形解析し教師データと比較する。
 - (4).教師データと削孔スペクトル解析データの相関係数から基盤層を評価判定する。
 - (5).施工件数が増えた時点で再度教師データの最適化を行う。
- 以上の施工手順で運用する。

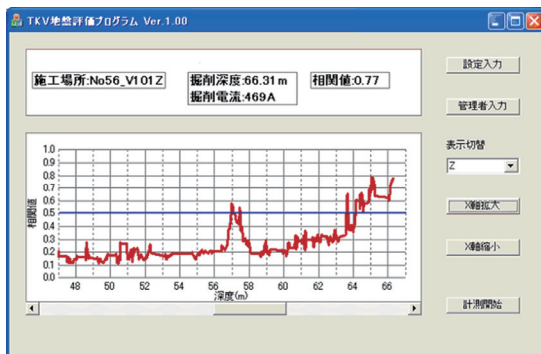


図-11 基盤評価装置と計測表示画面

開発した地盤評価装置は、三軸の振動加速度と削孔音入力のアナログ入力4ch、サンプリング周

波数20KHzで波形データを計測する。地盤評価装置は削孔機本体に設置し削孔データをリアルタイムに有線で地盤評価PCに転送する。

地盤評価PCを設置する計測小屋までは、最大300mまで通信ケーブルを延ばす事ができ、測定データを高速転送できるベースバンドモデムを採用した。

地盤評価装置は教師データの作成や表示方法などの基本的な設定を入力すれば、後は削孔オペレータが表示画面(図-11)を確認しながら施工できる。

削孔データは地盤評価PCに保存され、再度教師データを変更した場合に新たな教師データでシミュレーションが行える。また削孔データから新たに教師データを作成する事が可能である。

6. おわりに

従来、地下ダム施工の基盤層への削孔到達の判定は、削孔時の電流値の変化を経験的に判定していた。開発した地盤評価装置は基盤層への到達をよりの確に判定でき施工の信頼性を確保する技術と考える。今後、本技術の可能性として地下ダムの基盤層判定以外に一般の基礎杭施工における支持層の判定評価に利用できるように今後さらに改良や新たな解析手法を開発して行く所存である。

参考文献

- 1) 安部 透・石塚与志雄：SMW施工時の掘削音を用いた地層判別の現場試験，土木学会第55回年次学術講演会，III-A281，平成12年
- 2) 沖縄総合事務局 農業農村整備ホームページ：主な工事，<http://ogb.go.jp/nousui/nns/iejima/p4.htm>