

# 地下ダム施工における基盤評価装置および基盤評価方法の開発

近藤 高弘<sup>\*1</sup>・大塚 寿次<sup>\*2</sup>・平山 哲也<sup>\*3</sup>

*Keywords : underground dam, bedrock layer, evaluation, waveform analysis, vibration acceleration, correlation*

地下ダム, 基盤層, 判定評価, 波形解析, 振動加速度, 相関

## 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。南国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総合的に評価する客観的な評価手法と基盤評価装置の開発を行った。

## 2. 地下ダム削孔データの収集

地下ダム施工の削孔手順を図-1 に示す。手順はケーシング削孔→先行削孔→三軸削孔の順で行なわれる。先行削孔は1本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ツオーガーを使用する。そこで、先行削孔時に各種の波形データを収集する事にした。

はじめ、何が基盤判定に有効な計測結果なのかが不明であったので三軸振動加速度、削孔音、削孔ロッド回転、削孔荷重、削孔電流などを削孔時波形データとしてデータロガで収集した。

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

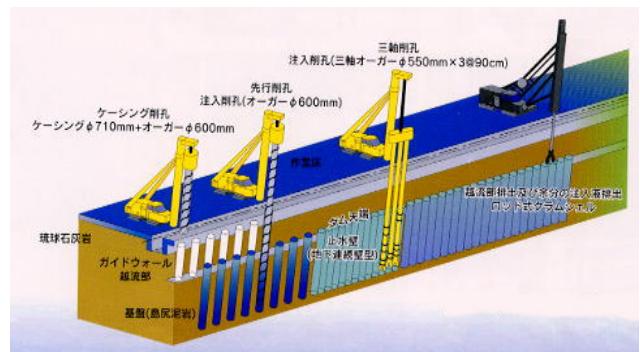


図-1 地下ダムの削孔手順の概要

Fig.1 The overview of the underground dam boring procedure

削孔時の振動および削孔音の収集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、掘削時の振動は削孔スクリュー・ロッドを伝搬して地上削孔機本体に伝わって来ると考え削孔機本体部に加速度計とマイクを図-2に示す位置に設置した。

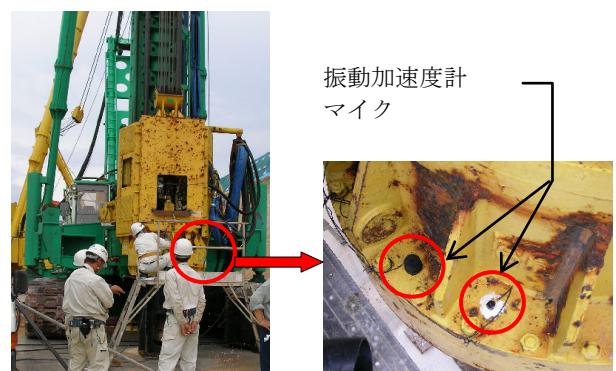


図-2 振動加速度計・マイク設置位置

Fig.2 The accelerometer microphone location

\*1 技術センター 土木技術開発部 土木技術開発プロジェクト室

\*2 土木本部 土木技術部

\*3 土木本部 機械部

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。図-3に示す削孔データの収集システムを用いて、伊江地下ダム第二期建設工事において削孔データを収集した。(削孔データは100Gの容量となった。)

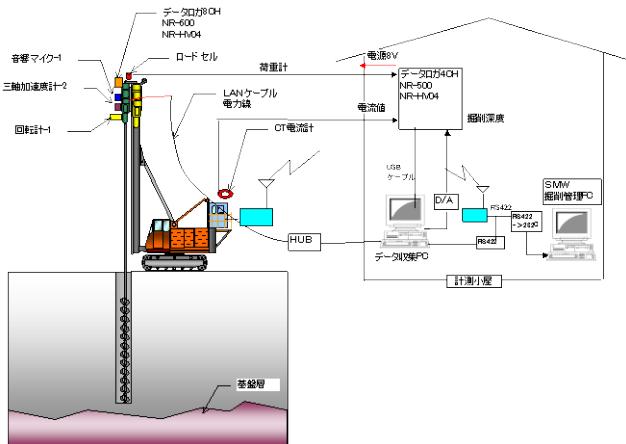


図-3 削孔データ収集システム  
Fig.3 The boring data acquisition system

### 3. 削孔データの解析

調査ボーリング孔のボーリング柱状図を参考にして、削孔深度毎に波形データを任意に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っている事がスペクトル解析結果から理解できた。図-4に示す。

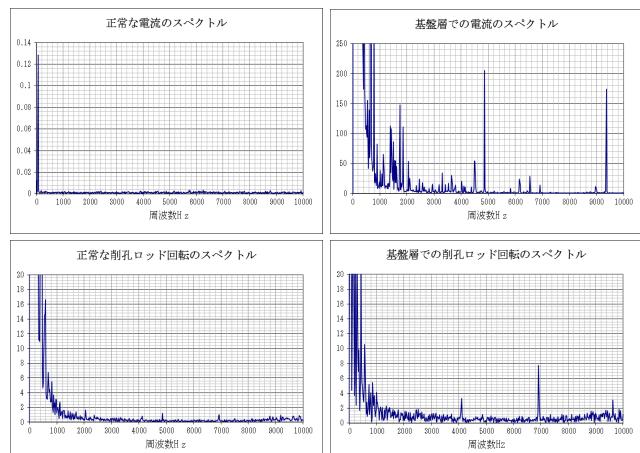


図-4 削孔電流・ロッド回転のスペクトル  
Fig.4 The boring electric current and rod rotation spectrum

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が発生している事が解析結果から

わかった。この基盤層の削孔解析データを基に教師データを作り、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。

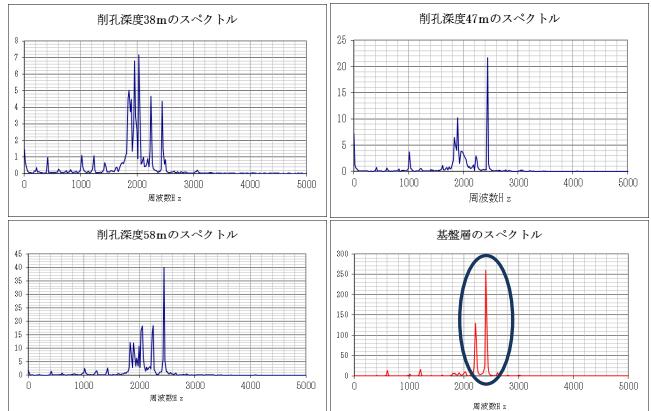


図-5 削孔深度別のスペクトルの変化  
Fig.5 It is the change of spectrum to the boring depth

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。

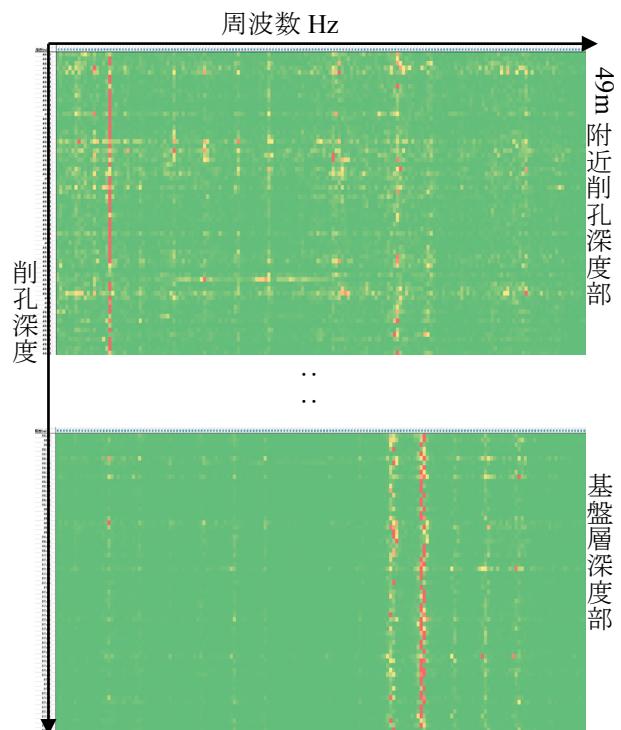


図-6 可視化した削孔深度毎のスペクトル  
Fig.6 The visualized boring depth spectrum

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。解析したスペクトルの最大値から最小値を赤～緑色の色の変化として表現する事

で、全体のスペクトルを把握する事ができ、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。

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。

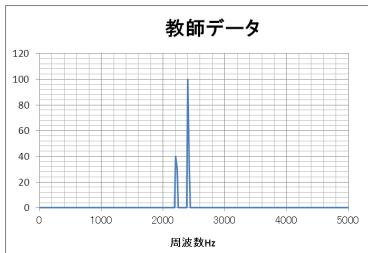


図-7 教師データのスペクトル  
Fig.7 The spectrum of the teacher data

#### 4. 基盤層評価方法

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。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

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

があたえられたとき、相関係数は以下のように求められる。

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

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されている。瞬間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ので瞬間に類似度が高くなることは想像に難しくない。

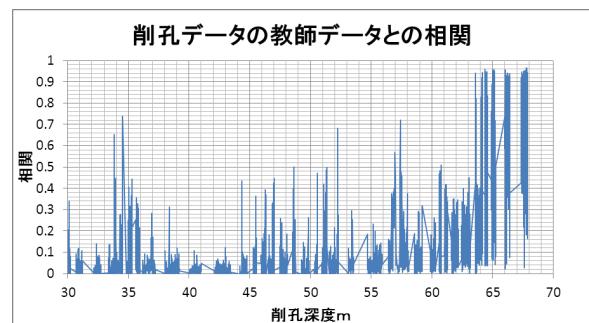


図-8 削孔深度における振動加速度の相関  
Fig.8 The correlation of the vibration acceleration about the boring depth

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。

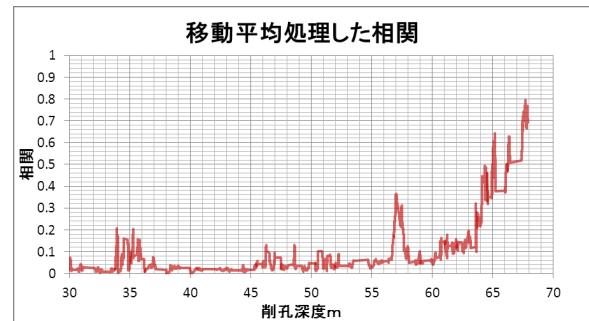


図-9 削孔深度相関の移動平均処理結果  
Fig.9 The moving average processing result of the boring depth correlation

この時の削孔機本体の電流値の変化を図-10 に示す。従来はこの電流値の変化で基盤層到達を判断していた。

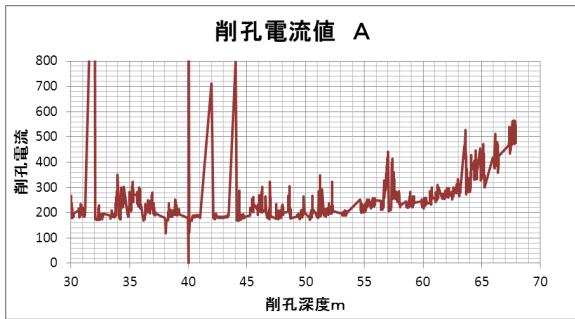


図-10 削孔機械の電流値の変化

Fig.10 The change of the mechanical current value about the boring depth

## 5. 基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。

開発した基盤評価装置は、三軸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。基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基盤評価 PC に転送する。

基盤評価 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ードを採用した。

基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。

削孔データは基盤評価 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。



図-11 基盤評価装置と計測表示画面

Fig.11 The bedrock layer judgment evaluation equipment and the measurement display-screen

## 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的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、より確実なものとするために早期に実証試験を行い有効性を対外的にアピールしていきたいと考えている。また、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: S MW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>