

削孔振動波形を用いた地盤判定技術の開発

地下ダム施工および一般基礎杭における地盤判定への適応

近藤 高弘

地下ダムの施工は、離島などの水資源確保を目的に施工される。この様な離島の多くは珊瑚が厚く堆積した琉球石灰層の下部に不透水層地盤があり、確実に目的の基盤層まで根入れ削孔する事が重要である。この琉球石灰層、不透水層地盤ともに軟岩に近く一般的な土質の杭施工とはかなり異なっている。そのため実際の施工にあたり、一定間隔で調査ボーリングを行い地質調査結果から削孔深度が計画されている。

目的の基盤層まで削孔して到達したかの判定手段として、従来は削孔機の削孔電流値の変化等を観測して施工経験に基づいた判定が行われてきた。

本報告は、削孔機の削孔時に発生する削孔振動を三軸加速度センサで計測し波形解析を行う事で、目的の地盤層に到達したかを判定する方法を開発し検証試験の結果を報告する。

キーワード：削孔、地下ダム、加速度センサ、振動波形、地盤判定、相関、周波数解析

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、地下水を堰き止め地中貯水する工事である。概要を図-1に示す。

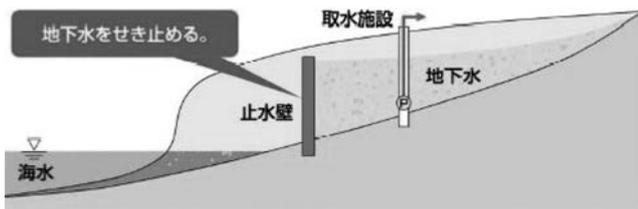


図-1 地下ダム施工概要

地下ダムの施工では珊瑚が厚く堆積した通水性のある琉球石灰層の下に不透水層の基盤層が存在している。通水層である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根入れする必要がある。

実際の削孔に当たっては三点支持式杭打機とオーガ駆動装置の構成で施工される。施工は従来の一般土質層の削孔と異なり、軟岩程度の硬い地盤を削孔する事になりオーガ先端のビットの摩耗も激しい。

そのような施工条件の中で、基盤層まで到達したかの判断として、従来は調査ボーリングデータを基に設計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た基盤層の判定が行われてきた。

そこで新たな判定方法として、削孔時に発生する削

孔振動がオーガ駆動装置へ伝搬されると考え、削孔機の振動波形を計測収集しその振動データの波形解析を行う事で基盤判定を行う方法と、削孔振動波形をリアルタイムに処理を行う事のできる地盤判定装置の開発を行った。

この様な地盤判定装置を開発する事で、従来の削孔電流判定を補完する技術の確立ができると考えた。

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-2に示す。施工手順はケーシング削孔→先行削孔→三軸削孔の順で行われる。先行削孔は基盤層まで削孔するので、地盤判定を行う削孔データは先行削孔時に収集する事にした。

削孔の試験データ収集箇所として、事前に地質調査

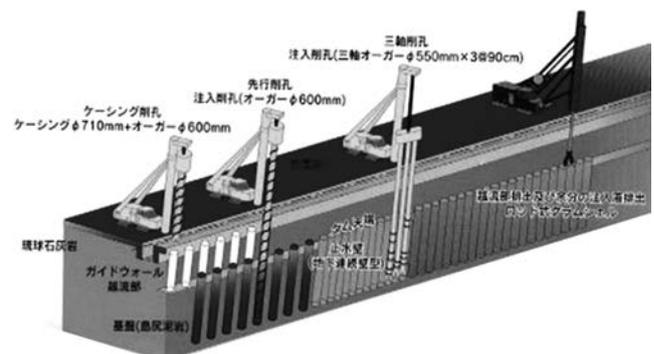


図-2 地下ダムの削孔手順の概要

を行ったボーリング調査孔とその近傍の削孔データの収集を行い解析する事にした。

当初は、何が基盤の判定に有効な計測項目なのか不明であったため、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。

削孔時の振動および削孔音のセンサ設置場所としては削孔機ビット先端で収集する事が理想であるが、その為には削孔ロッドを加工する必要があり、実用化した時のシステム導入の容易さを考慮して一般的に設置可能な場所を選択した。削孔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、オーガ駆動装置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写真-1に示す位

置に設置した。三軸加速度計の設置座標系は杭打機オペレータから見て左右方向がX軸(+右)、前後方向がY軸(+前)、上下方向がZ軸(+上)に配置した。

削孔スクリー・ロッドの回転計測は減速機の回転フランジに電圧出力のアナログ式の回転計を写真-2に示す位置に取付けた。



写真-2 回転計の設置状況

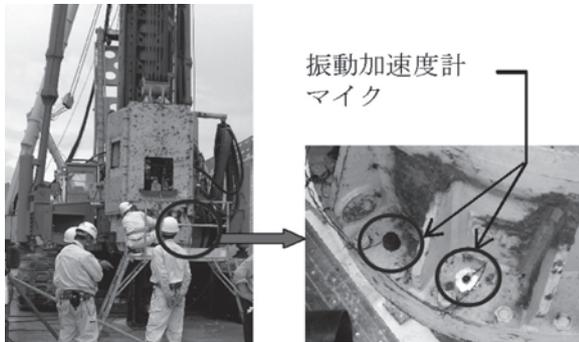


写真-1 振動加速度計と集音マイクの設置位置

波形解析周波数帯域は未知であったため加速度計のセンサスペックを考慮して10 kHzまでとした。よって削孔振動データのサンプリングレートは20 kHzとなる。

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て行った。地質調査のボーリング調査孔直上の2か所とその近傍の3か所の合計5か所で、削孔深

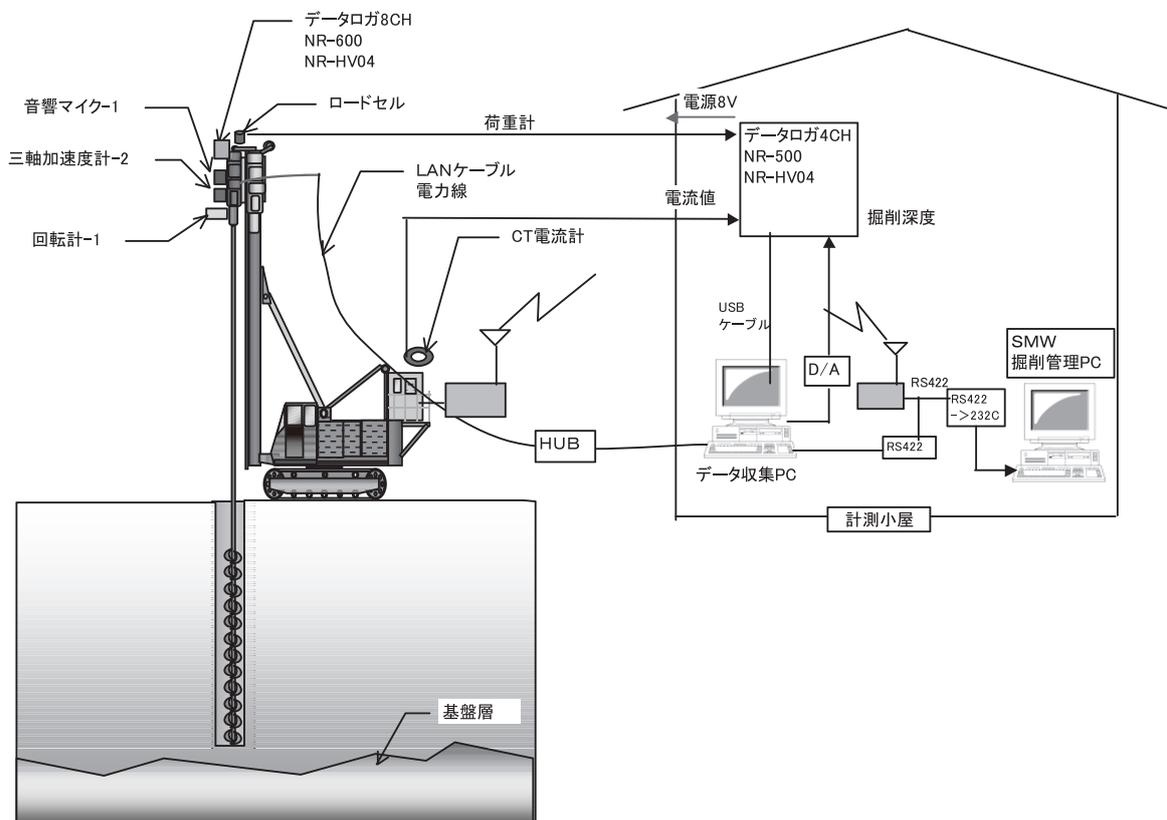


図-3 削孔データ収集システムの概要

度 65 ~ 70 m の削孔データを収集した。

図-3 に削孔データ収集システムの概要を示す。

削孔時の振動データは中硬岩を削孔するため振動加速度値の予測が出来なかったため 40 G と 400 G の同じタイプの三軸加速度計を用意して対応した、音響マイク、回転計、削孔機ロードセル、削孔電流値、削孔深度の各センサデータ 11 ch 分を一旦データログで収集した後で解析を行う事とした。アナログデータとは別に施工業者の管理装置からデジタルデータとして電流値と削孔深度も同時に収集した。削孔データは約 100 G の大容量となった。

3. 削孔データの分析

地下ダム地質は図-4 に示すボーリング柱状図より琉球石灰岩層、礫状石灰岩層、石灰岩礫状板岩層等からなる地層で最終基盤層はルジオン試験で確認する。一般の土質柱状図とはかなり異なり全般的に軟岩削孔である。

ボーリング柱状図を参考にして、削孔深度毎の各計測項目を選択し波形データのスペクトル解析を行いその周波数成分の特徴を調べた。

まずは従来の判定方法である電流値の変化に特徴的なスペクトルが有るかを確かめた。その結果、基盤層到達時に回転ムラや電流値の変動などが大きくモータ負荷が大きい事がスペクトル解析結果から理解できた。しかし電流値の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-5 に示す。

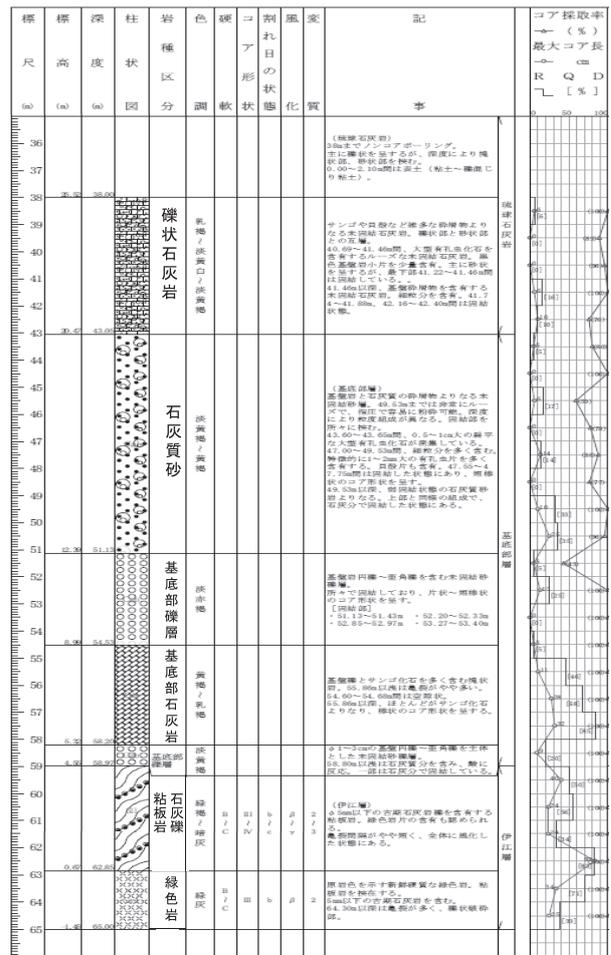


図-4 ボーリング柱状図 (地下ダム)

次に調査ボーリング孔を試験掘した削孔振動データより、任意の削孔深度での削孔振動および削孔音響の波形解析スペクトルを確認した。その結果から一般的

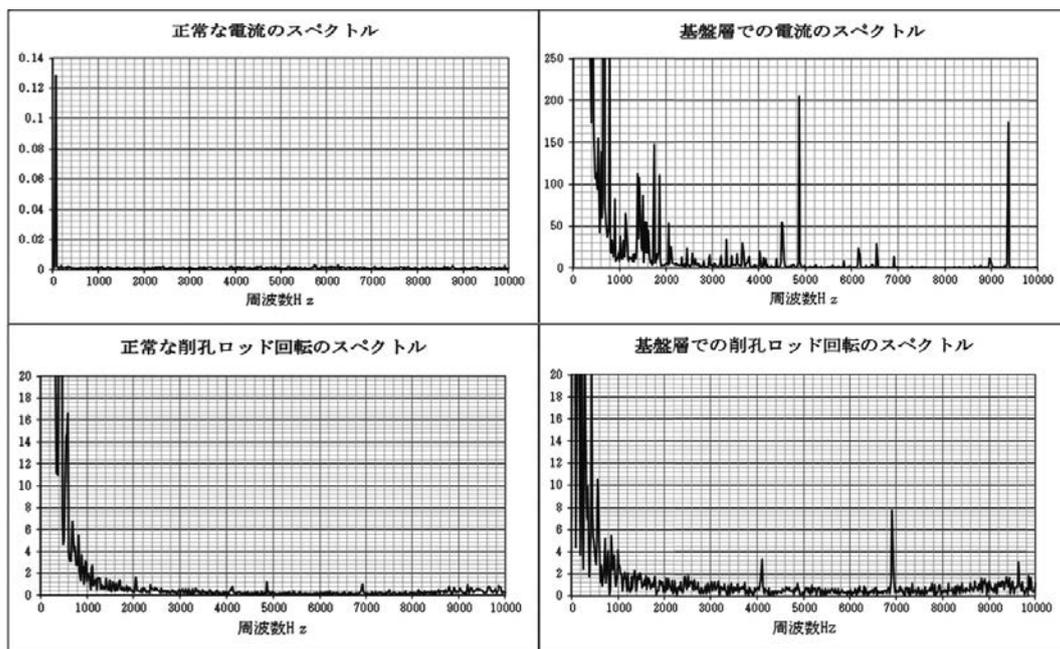
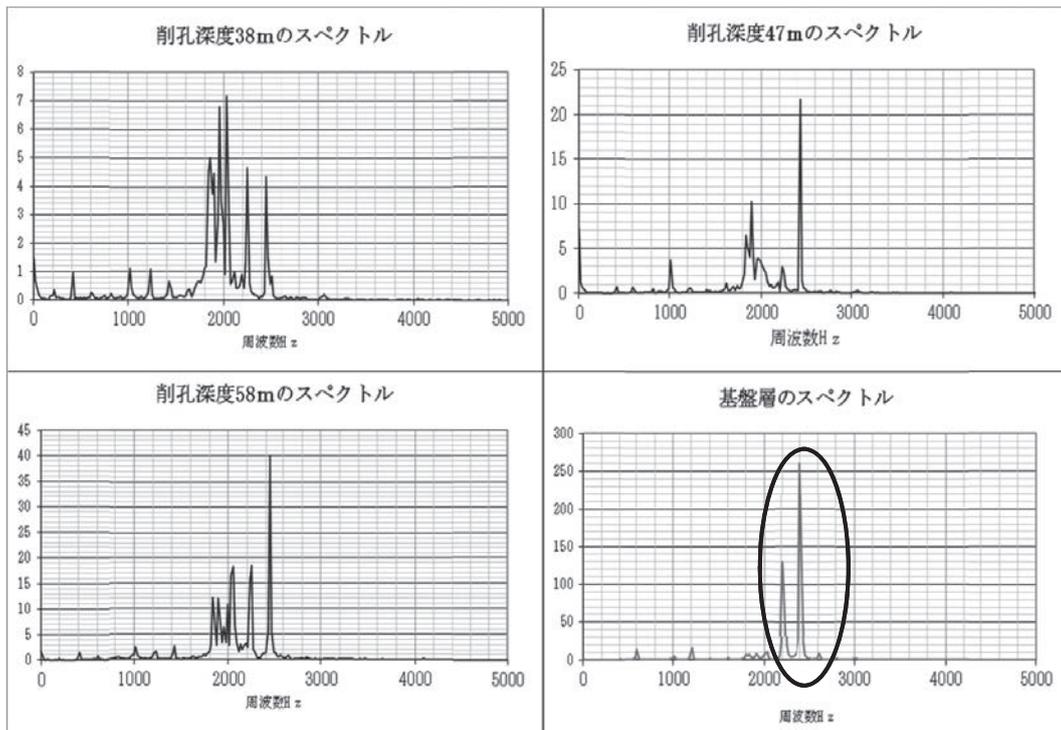


図-5 削孔電流とロッド回転のスペクトル



図一六 削孔深度別のスペクトルの変化

な地層部と基盤層部ではスペクトルが異なり、基盤層の削孔時には特徴的なスペクトルを示す事が確認できた。そこで、この基盤層削孔時のデータを基に比較するための基準となる教師データを作り、施工時の削孔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。図一六に各深度でのスペクトルを示す。

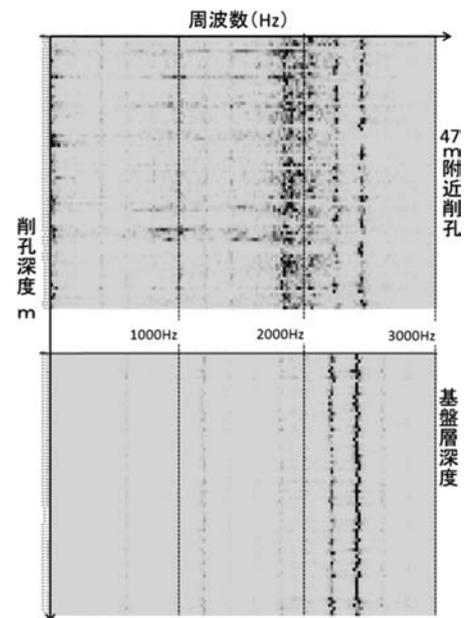
しかし波形解析に必要なデータサンプリング時間は、ほんの微小な瞬間的な結果を反映している。一か所の削孔施工には何時間も要する。削孔深度全般的にどのようなスペクトル分布を示すかを把握する事は、単純な波形解析の結果からは困難であった。

削孔深度全体のスペクトルを把握し確認するため、1秒間隔でスペクトル解析して、周波数を直線上に表現し周波数毎のスペクトル強度を色分けする事で、一回の解析結果を1次元の線上に表現する事ができる。これを毎秒毎深度積み重ねる事で、深度とスペクトルを2次元表示する事ができ、削孔全体のスペクトルを把握する事ができた。

図一七に2次元表示されたスペクトル解析を示す。スペクトルは各周波数成分に対する強度を色表示するもので、最大値から最小値を黒～灰色の色の濃淡の変化で表現した。

この2次元表示により基盤層には特徴的なスペクトルが存在する事が確認できた。

基盤判定方法に用いる教師データは、単に基盤層の



図一七 可視化した削孔深度毎のスペクトル

削孔データを平均化して求めるのではなく、判定精度の向上を考慮する必要があった。計測した基準データには、特徴的なスペクトルとノイズスペクトルが混在している。ノイズ成分としては、杭打機およびオーガ駆動装置から発生する機械振動等が含まれる。これらの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。

図一八にノイズスペクトルを削除した基盤層の教師データを示す。

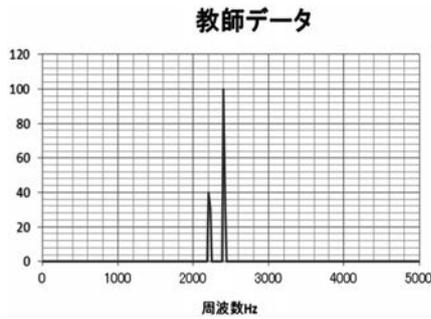


図-8 教師データのスペクトル

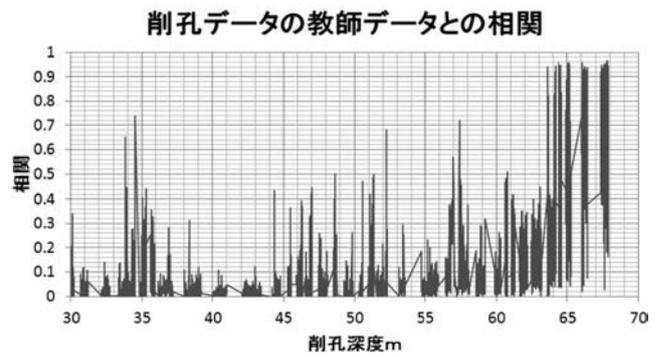


図-9 削孔深度毎の振動加速度の相関結果

4. 基盤判定方法

基盤判定方法は、削孔時の振動および音響の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方法である。

この類似性を示す統計学的指標として相関係数を用いる事にした。

相関係数は、2つの確率変数間の相関（類似性の度合い）を示す統計学的指標で-1から+1の値をとる。1に近いときは2つの確率変数には正の相関がある事を示す。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。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。

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、基盤判定値のしきい値は施工現場ごとに判断される。

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 (1) 式が当てられたとき

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

相関係数は (2) 式により求める。

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

ここで図-8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-9に示す。

このグラフ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質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。

そこで相関結果の平滑化処理を行い表示したものが図-10である。平滑化処理する事でより基盤層の判定を明確に判断する事が可能になった。

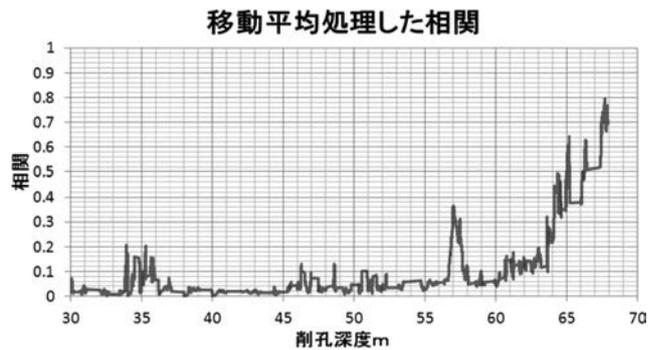


図-10 図-9を平滑化処理した相関結果

この時の削孔機本体の電流値の変化を図-11に示す。

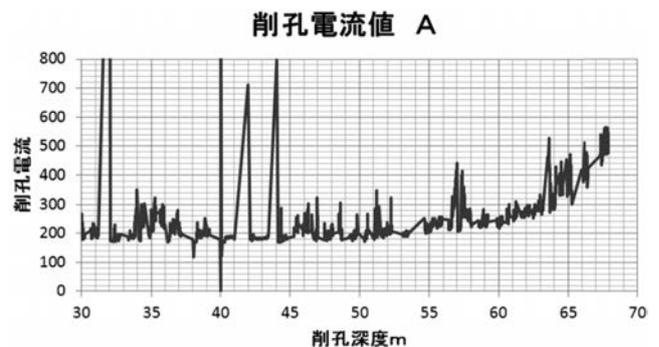


図-11 削孔機の電流値変化

従来は基盤層削孔時の電流値の変化を経験的に判断して基盤層到達を判定しているが、杭打機オペレータの操作技能による電流値の変化も無視できない。

この基盤判定方法は従来の電流値管理で判断されていた判定結果に、削孔振動波形という新たな技術が加

わり基盤判定を補完する技術と考えられる。これにより一層客観的な判定が可能になるものとする。

図-12 にその他の試験削孔データの地盤判定結果を示す。

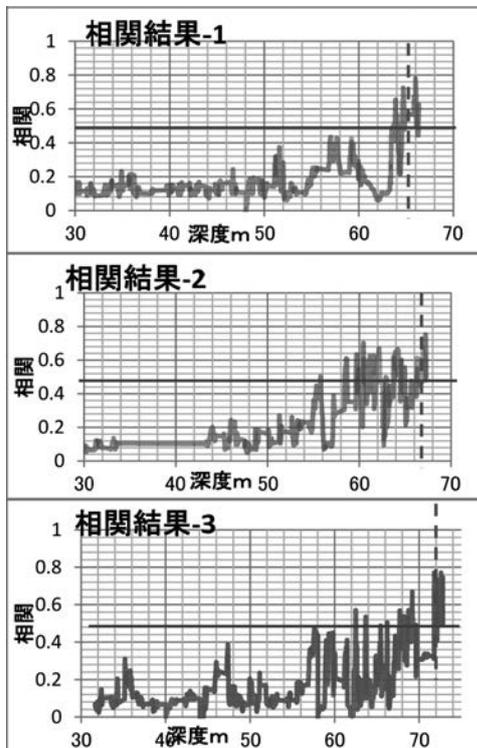


図-12 他の削孔データの地盤判定結果

図-12の波線部は設計基盤深度を示している。基盤深度以降では相関値0.5以上が確保され、教師データの地層に類似している事が示されている。

5. 地盤判定装置のシステム概要

地盤判定装置は、杭打機削孔時の振動および音響の波形データを収集し波形解析する事で、基盤層部の削孔時発生する特徴的なスペクトルを検知し比較する事で判定を行う。

地盤判定装置の仕様は、三軸の振動加速度センサと集音マイクのアナログ入力4ch、サンプリング周波数20kHz、1秒間隔で波形データを計測しリアルタイムに波形解析を行う装置である。

地盤判定装置を用いて地盤判定を行う場合の具体的な手順を以下に示す。

- ①施工箇所または近傍で調査ボーリング実施し、地質データを事前に把握しておく。
- ②調査孔直上および近傍で試験削孔して、削孔波形データの収集と波形解析を行い、教師データを作成する。

③教師データを地盤判定装置に登録設定する。

④運用は、削孔波形データをリアルタイムに波形解析し教師データとの相関係数を算出し支持層の判定を行う。

地盤判定装置は、削孔機本体に設置し削孔データをリアルタイムに地盤判定PCに転送し比較判定する。

地盤判定PC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、後はオペレータがリアルタイムに表示される判定画面(図-13)を確認しながら施工できる。

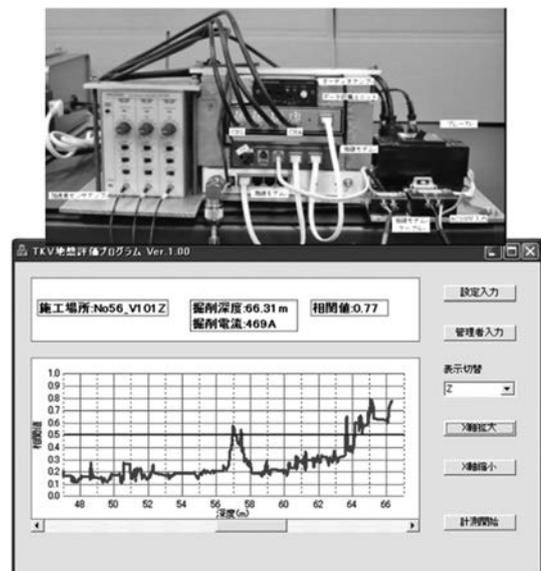


図-13 地盤判定装置とモニター表示画面

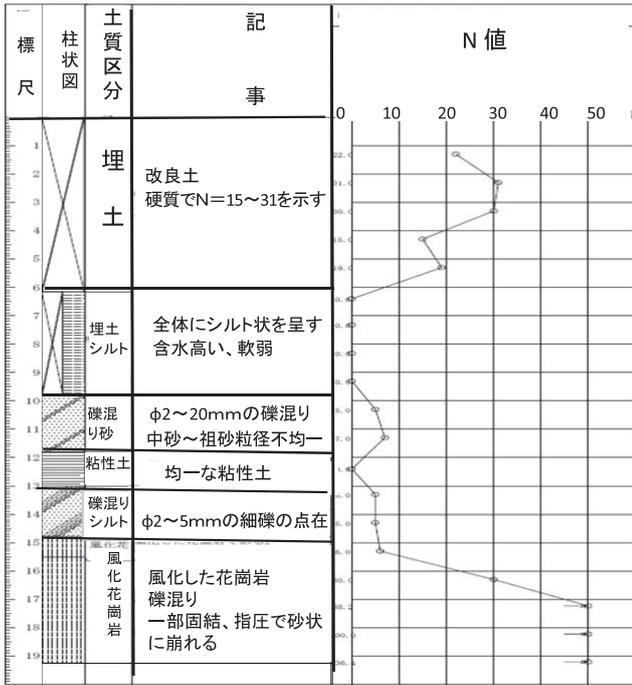
削孔データは地盤判定PCに保存され、再度教師データを変更したい場合、既存の削孔データから地盤判定のシミュレーションを行いその教師データの有効性を確認できる。また既存の削孔データから新たな教師データを作成する事が可能である。

6. 一般地質による地盤判定装置の試験結果

開発した地盤判定装置を一般基礎杭施工への適応確認として、福岡県北九州市若松区向洋町ひびき LNG 基地構内、ひびき LNG 基地建設工事プラント設備工事における杭打工事の施工に地盤判定装置を用いて試験施工を行った。

プレボーリング根固め工法による杭施工を実施、PHC 杭径φ300～600mm、削孔深度は16～20m、施工本数350本の内試験施工30本を実施、支持層は風化花崗岩である。杭打機のオーガ径はφ550mmとφ750mmの2種類で施工した。

試験に際しては事前に調査ボーリングを行い地層の



図一 14 ボーリング柱状図 (基礎杭施工)

把握を行った。図一 14 にボーリング柱状図を示す。表土は埋土で途中シルト層、軟弱粘土層、粘土層が介在し最終支持層は N 値 50 以上の礫混じり砂状の風化花崗岩である。

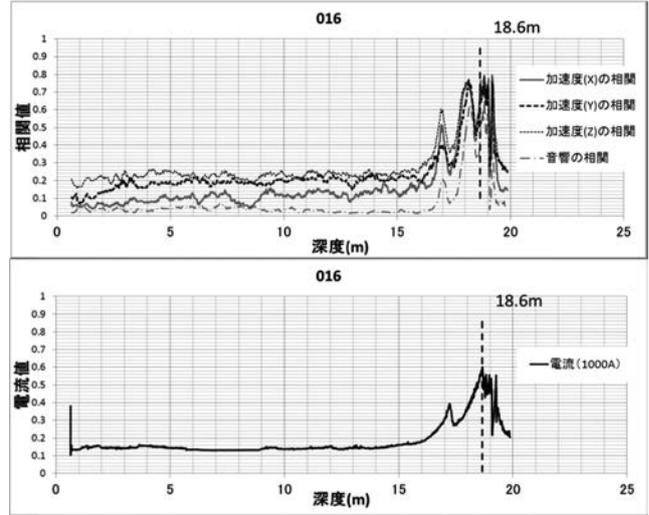
現場の支持層到達判定管理は、試験掘の結果、掘削径 ϕ 750 で掘削電流値 450 A 以上 1 分間をもって支持層と判断している。

今回のひびき LNG では、削孔径 ϕ 750 mm と ϕ 550 mm 合わせて 30 本の掘削データを収集する事ができた。その全てはほぼ同じ傾向にあった。

図一 15 は削孔径 ϕ 750 mm による地盤判定結果を示す。三軸加速度センサと集音マイクおよび掘削電流値をまとめて示している。波線部分は現場の施工管理に基づき支持層と判定したラインである。

支持層判定ラインと地盤判定装置の判定値には明らかに相関関係がある。

基礎杭施工の地盤判定の教師データは三軸の加速度と音響の 4 つの教師データ全てにおいて良好な判定結果を得る事ができた。これは判定する周波数域が比較的低い可聴域であったため音響データの判定が良かったものと考えられる。



図一 15 基礎杭施工における地盤判定結果

7. 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断していた。開発した地盤判定装置は基盤層への到達をより確実に判定でき、施工の信頼性を確保する技術と考える。

地盤判定装置を用いた一般土質の支持層判定として N 値 50 以上の支持層の判定試験を実施し良好な結果を得る事ができた。これは地下ダムの教師データの特徴とはかなり異なっているが、地盤判定装置が地下ダムの軟岩削孔以外にも一般基礎地盤にも利用可能である事が確認できた。

この地盤判定結果からは実用化への大きな可能性が見えてきた。

今後は一般基礎工事への利用を考慮し、砂・砂礫・土丹層等といった支持層の削孔データを収集して新たな解析手法を開発することで信頼性の高い確実な地盤判定装置へ開発を進めたいと考える。

JCMMA

《参考文献》

- 1) 近藤高弘・伊佐健次：地下ダム施工における先行削孔での基礎部判定の考察，土木学会第 66 回年次学術講演会，CS9-013，平成 23 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>
- 3) 近藤高弘：地下ダム施工における地盤判定装置の開発，建設施工と建設機械シンポジウム，平成 24 年

【筆者紹介】

近藤 高弘 (こんどう たかひろ)
大成建設
技術センター 土木技術開発部
次長

