

32. 基礎杭施工時の振動波形による支持地盤の判定

地盤評価装置による基礎杭施工への適応評価

大成建設株式会社 技術センター ○近藤 高弘
ひびきエル・エヌ・ジー株式会社 溝口 敬義
千代田化工建設株式会社 佐々木 睦雄

1. はじめに

地盤評価装置はオーガ杭打機を用いる地下ダム施工における止水層である基盤層の削孔判定を目的に開発された。杭打機先端部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杭打機の電流値の変化などを監視し施工経験に基づいて基盤層到達の判定が行われてきた。この地盤評価装置は、杭打機が削孔時発生する掘削振動波形を計測しリアルタイムに波形解析を行い比較評価する事で未経験者でも容易に地盤判定を可能にする技術である。

地下ダム施工として軟岩掘削に対応した地盤評価装置を開発した。一般地層における可能性として基礎杭施工時の支持層判定に適応ができるかを試験施工にて実施した。

2. 施工場所の概要

施工場所は、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評価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 $\phi 300\sim 600\text{mm}$ 、削孔深度は16~20m、施工本数 350 本、支持層は風化花崗岩である。杭打機のオーガ径は $\phi 550\text{mm}$ と $\phi 750\text{mm}$ の2種類で施工した。

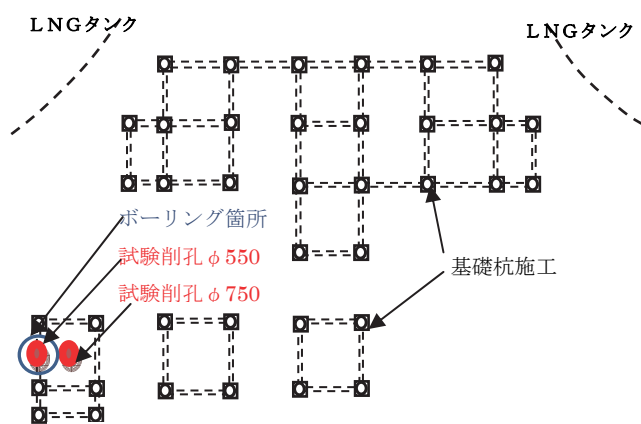


図-1 杭施工エリア

杭打機は2台使用して施工、1台に地盤評価装置を設置し今回の試験施工を行った。

杭打工の工期は2012年12月~2013年3月まで行われた。試験期間は12月末~2月末とした。

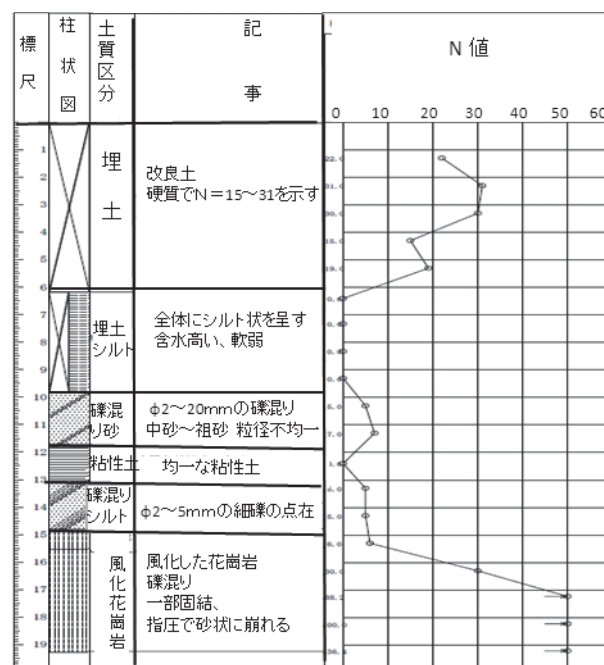


図-2 調査ボーリング結果

試験に際しては事前に試験削孔予定地付近の調査ボーリングを行い地層を把握した。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以上の礫混り砂状の風化花崗岩である。

3. 地盤評価装置の概要

地盤評価装置は、杭打機の削孔時に発生する掘削振動および掘削音の波形データを収集し波形解析する事で、支持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評価判定を行う。

地盤評価装置は、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。

地盤判定を行う為に比較するためのデータを事前に準備する必要がある。地質が明確な箇所を杭打機で削孔し支持層までの削孔データを収集し、支持層部での波形解析から比較のための基準データとする教師データを作成する必要がある。

この教師データを基準に地盤評価装置はリアルタイムに判定評価を行う。

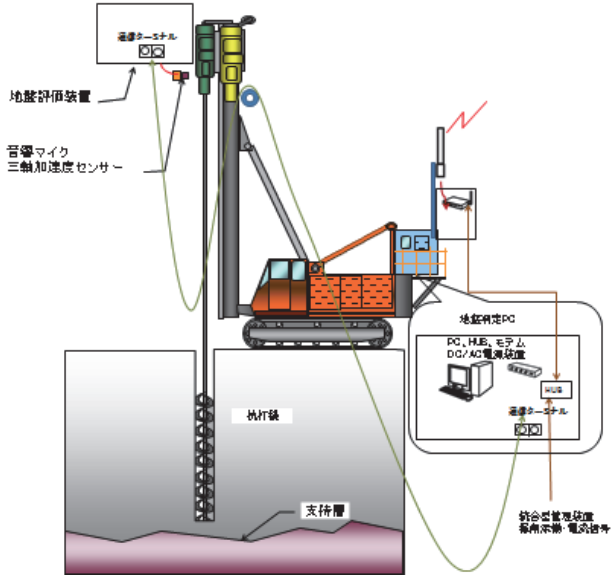


図-3 地盤評価装置システム図

この比較のため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。あくまでも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、地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。

相関係数は、2組の数値からなるデータ列が与えられたとき

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

相関係数は以下のように求める。

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

また削孔する地層は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。

そこで瞬時の相関結果の移動平均処理を行いある程度平滑化して表示を行う。

教師データは比較する対象波形の種類だけ用意する必要がある。

地盤評価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、掘削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). 教師データを地盤評価装置に登録設定する。
- (4). 運用は、掘削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評価判定の表示を行う。

以上の施工手順で運用する。



写真-1 地盤評価装置・センサ取付け状況



写真-2 地盤評価PC取付け状況

杭打機は三点支持式杭打機（DH408-95M）、オーガ駆動装置（SMD-120HP）の構成で、杭打施工業者は施工情報を管理するための管理装置（統合型管理装置）を備えており、削孔深度・削孔電流

情報を地盤評価装置にリアルタイムに取り込めるようにした。

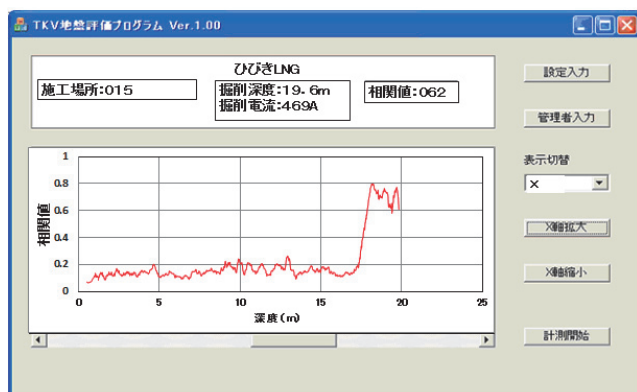


図-4 地盤評価装置の表示画面

地盤評価装置はオーガ駆動装置の上部に設置し、三軸加速度計センサおよび集音マイクはオーガ駆動装置の減速装置のフランジ上部に設置、収集した振動波形データは通信ケーブルを介し杭打機後部の地盤評価 PC に転送されリアルタイムに地盤判定結果をモニター表示している。三軸加速度計の設置座標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) に設置した。

地盤評価 PC に収集された計測データは無線 LAN を介し事務所に設置した PC に計測データのコピーを転送しデータの二重保管を行っている。

4. 教師データの作成

図-1 に示す調査ボーリング孔の近傍に試験削孔を (削孔径 $\phi 750\text{mm}$ と $\phi 550\text{mm}$) 2 か所施工しその時の削孔データを収集し教師データとして利用した。

試験削孔施工時 (削孔径 $\phi 750\text{mm}$) の各削孔深度での振動加速度 (X 軸方向) の波形解析結果を以下に示す。

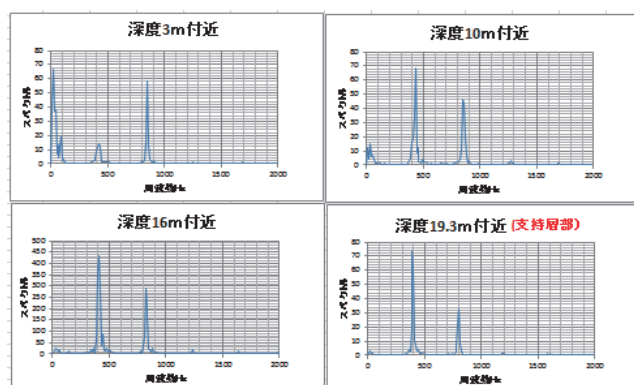


図-5 各削孔深度での解析スペクトル

教師データは試験削孔で収集した削孔深度19.34～19.5mの削孔データを加工し採用した。

削孔深度による解析スペクトルの違いが確認できる。支持層部の波形解析結果から、400と800Hzに支持層の特徴的なスペクトルが観測される。しかし0～100Hz附近にも微小なスペクトルを観測する事ができる。

教師データの作成にあたり本来の削孔スペクトル以外のノイズ成分を削除することにより、より一層判定精度が向上すると考えた。そのため機械掘削に伴う機械的な揺れやオーガ駆動装置と杭打機リーダとのあたりによる振動等の周波数成分の低い値は全てノイズと考えて0～100Hzをカット処理した。

各教師データを以下に示す。

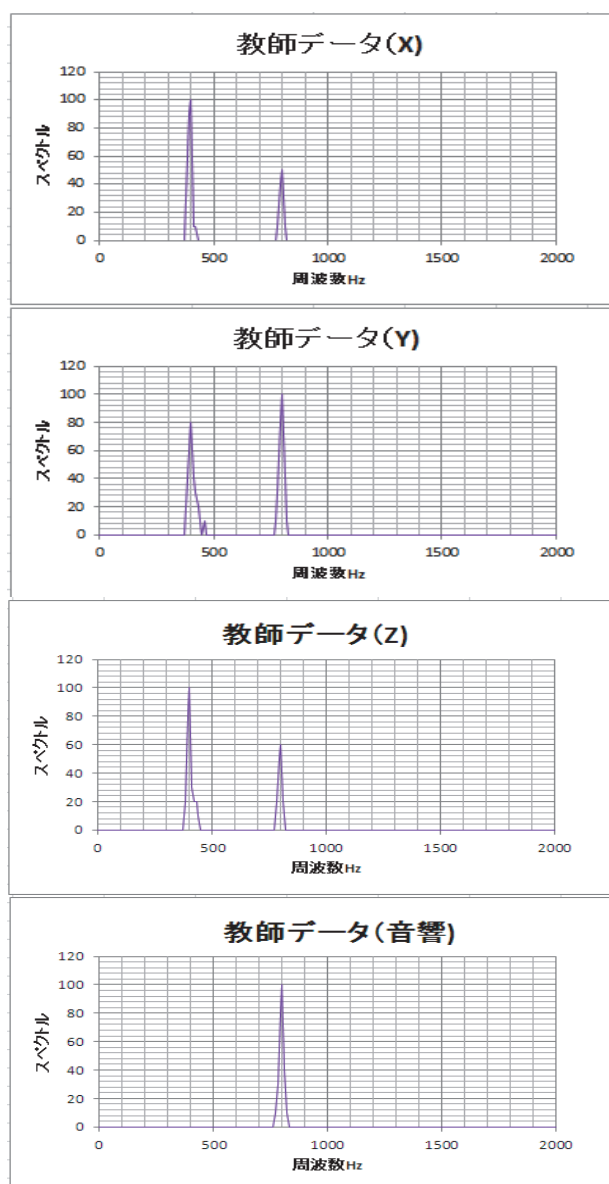


図-6 各教師データのスペクトル

三軸加速度センサの各軸方向で教師データが微妙に異なっている事が確認できる。

5. 地盤評価装置の計測結果

現場の支持層到達判定管理は、試験掘の結果、掘削径φ750mmで削孔電流値450A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φ750mmとφ550mm合わせて30本の削孔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-7は削孔径φ750mm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削孔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。

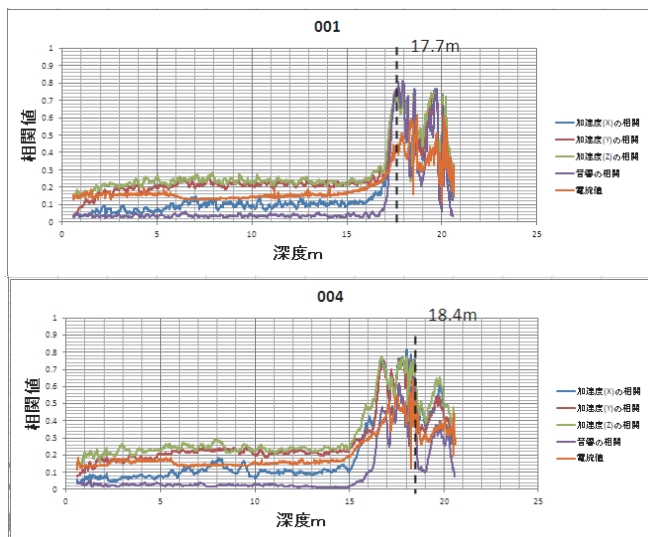


図-7 削孔径φ750の地盤判定結果の一例

支持層判定ラインと地盤評価装置の相関値には明らかに相関関係がある。判定ラインより地盤評価装置の相関値の変化の方が先にある場合もあるが、削孔電流値の変化は杭打機オペレータの吊荷荷重の加え方などの操作方法の違いや同じ地層での強弱により多少削孔電流値に影響を与えるものと考えられる。

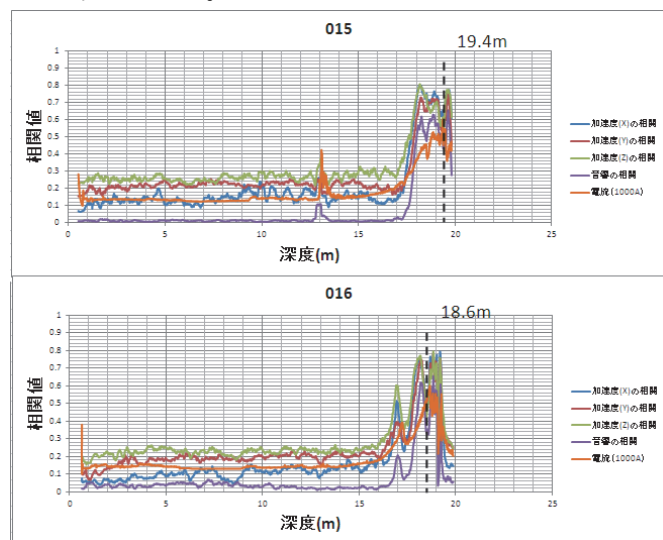


図-8 削孔径φ550の地盤判定結果の一例

同様にφ550mmによる地盤判定結果を図-8に示す。この判定に用いた教師データは先に作成したφ750mmで試験掘した同じ物を使用している。

判定結果から削孔径φ750mmの結果と同様な判定結果が得られ、削孔径φ750mmとφ550mmとの差異はないことが判明した。

今回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非常の良い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。

6. おわりに

地盤評価装置は地下ダムの止水層の判定を目的に開発されたが、今回一般的な地質での支持層判定に向けての貴重なデータを収集する事ができた。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。

地下ダムでは判定用の教師データの周波数は今回の物よりかなり高く、特性も異なっていた。今後は一般基礎工事への利用を考慮して、砂・砂礫・土丹層といった支持層の削孔データを収集解析することで信頼性の高い確実な地盤評価装置へ開発を進めたいと考える。

最後に今回試験に協力していただいた、ひびきLNG基地建設工事関係者の皆様にお礼を申し上げる。

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) 近藤高弘：地下ダム施工における地盤評価装置の開発，建設施工と建設機械シンポジウム，平成24年