

4. 杭リバウンド計測システム

清水建設㈱：西村 淳

1. はじめに

既製杭の打ち止め管理は、杭の根入れ長さ、リバウンド量（動的支持力）、貫入量、支持層の状態等により総合的に判断しなければならない。通常は支持層における打撃1回当たりのリバウンド量、貫入量等から動的支持力算定式を用いて支持力を推定している。現在、最も多く採用されているリバウンド量、貫入量の計測は、作業員によって記録用紙へ杭打ち時の杭の動きの軌跡を記入する方法であるが、この計測は、作業員が打撃稼働中にハンマー直下で行うため、落下物の危険や、振動、騒音等により作業環境は極めて悪い。また、計測結果からの支持力算出も係員の手作業によって行われており、データ処理にも時間を費やしている。



写真-1 従来の計測方法

こうした背景から開発した「杭リバウンド計測システム」について報告する。

2. システム概要

本システムは、コンピュータ、リアルタイム位置計測装置、CCDカメラ、ライト、プリンター、計測用ターゲット、基準用ターゲットで構成されている。（図-1参照）

本装置で使用するリアルタイム位置計測装置は、計測対象に取付けた反射ターゲットをCCDカメラによって認識し、その反射ターゲットの移動量を360[Hz]（約3msec/回）で計測することができる。精度は、CCDカメラの解像度から算出すると、CCDカメラに映し出される視野の長さの約1/1000程度になっている。計測対象に取り付ける反射ターゲットは、反射テープを直径約20[mm]程度に丸く切り取ったものを使用し、それぞれの計測ターゲットに貼ることにより、計測用ターゲット、基準用ターゲットとして使用する。

リアルタイム位置計測装置は、画像処理を用いた計測方法で、計測する杭に取付けた計測用ターゲットと、その近傍の地面に設けた基準用ターゲットの2点をCCDカメラで撮影して計測する。計測された2点のデータから、杭の移動のデータ（計測用ターゲットのデータ）を、地面の揺れのデータ（基準用ターゲットのデータ）を基準にして換算することにより、杭打撃時に発生する振動による地面の揺れやカメラの揺れを差し引いた杭の移動を計測するしくみとなっている。

計測前にコンピュータへ計測する杭の杭番号、杭長、測定深度、ハンマー落下高、計測位置、総打撃回数、計測時間等を入力する。計測は事前に設定された計測時間行う。計測を終了した時点で、計測し

たリバウンド量と、事前に設定した数値より算出した支持力を『杭貫入量測定記録』として表示する。それぞれの計測データは杭番号、測定深度をファイル名として保存される。保存されたファイルは事務所で再表示でき、それを印刷することができる。

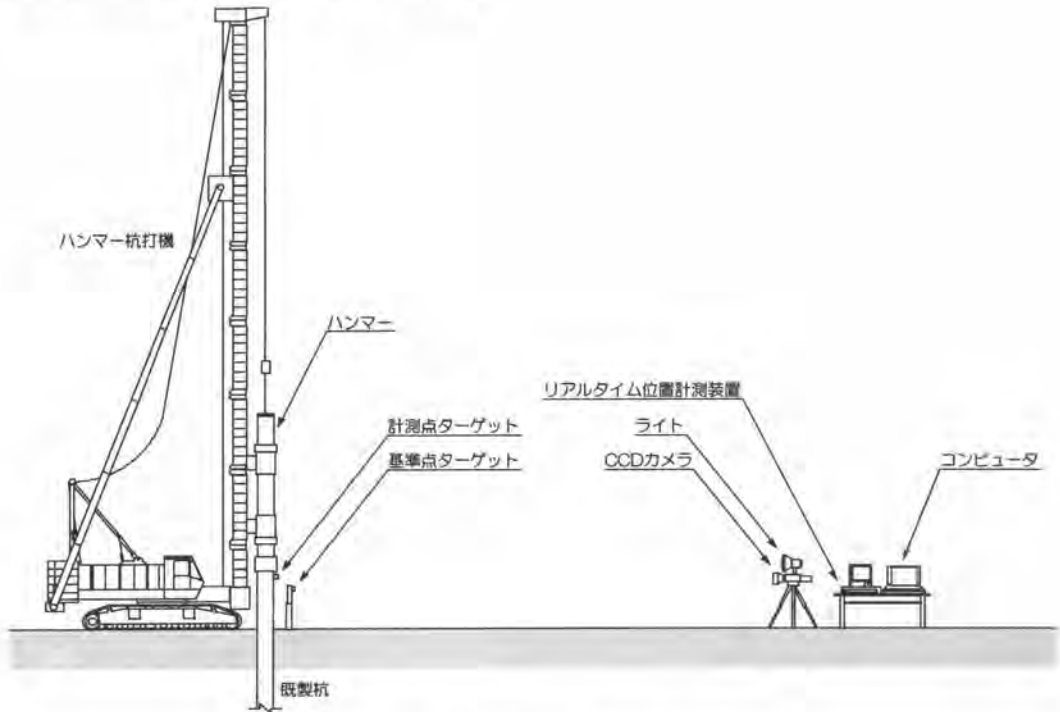


図-1 システム概要図

3. 画像処理による計測方法

リアルタイム位置計測装置は、丸く切り取った反射マークに、CCDカメラ側からライトアップして反射させ、その映像をCCDカメラによって360[Hz]（1秒間に360枚）で撮影することにより計測を行う。撮影された映像はライトアップによって光る部分、つまり反射マークの部分が白く、反射マーク以外の部分は黒く映し出される。各々の反射マークの位置は映し出された円の重心座標の位置を自動的に算出する。

キャリブレーションは、上記方法で反射テープ間を任意長さ L （通常300[mm]程度）で貼ったものを撮影し、カメラで撮影した画面の1ドット当たりの長さを算出し画面内での距離を認識させる。1ドット当たりの長さは以下の式より算出できる。（図-2参照）

$$1\text{ドット当たりの長さ} = \frac{L[\text{mm}](\text{任意長さ})}{\sqrt{(Xa - Xb)^2 + (Ya - Yb)^2}}$$

計測精度は、カメラの分解能が固定であるので、撮影する視野の範囲によって1ドット当たりの長さが異なり、撮影視野を広くすれば精度は悪くなり、撮影視野を狭くすれば精度は良くなる。計測精度の目安としては、撮影視野の実際の長さの1/1000程度の精度である。キャリブレーション後、基準用、計測用ターゲットとして反射マークを設置し、それぞれを撮影することにより杭の動きを計測する。

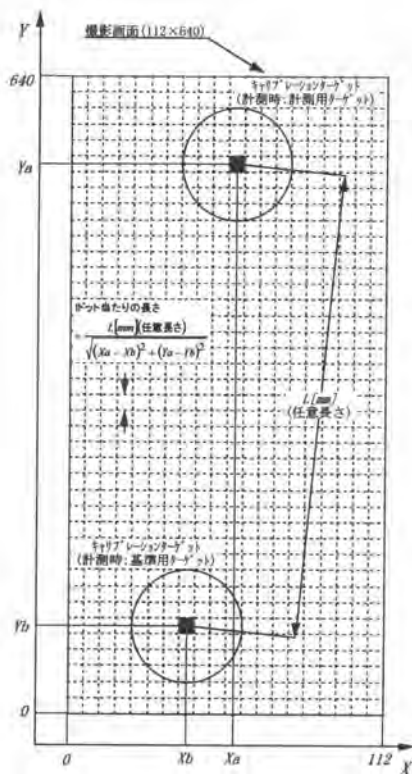
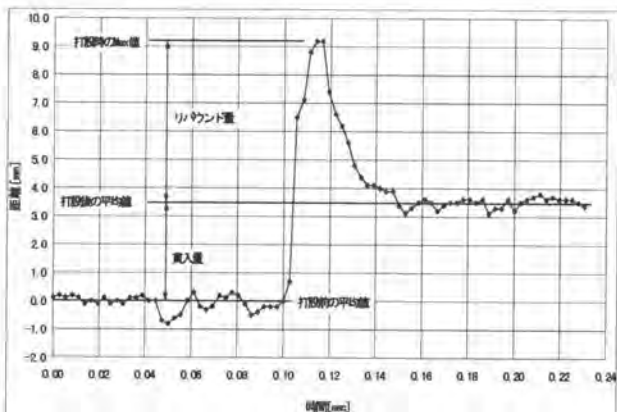


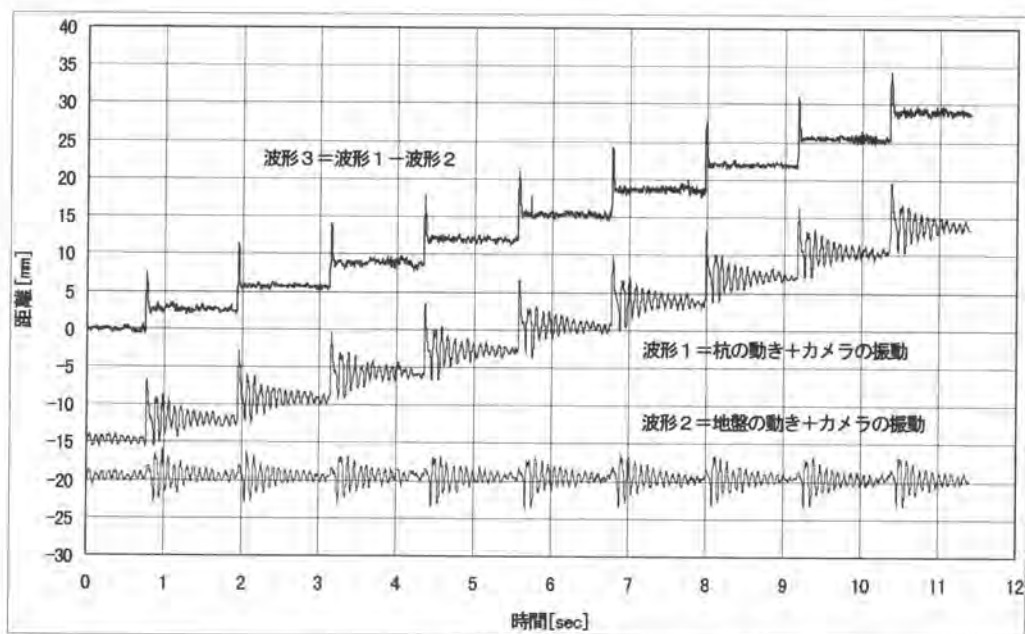
図-2 ターゲット認識方法

4. 計測波形

計測波形をグラフ-1に示す。波形1は計測用ターゲット、波形2は基準用ターゲットの計測波形である。波形1は、杭の動きと計測時の振動によるカメラの揺れを含んでいる。同様に波形2は、地盤の動きと計測時の振動によるカメラの揺れを含んでいる。この2つの結果を差し引いた波形3は、計測時のカメラの揺れを打ち消し、現状のリバウンド測定と同じ計測状態での計測波形となる。



グラフ-2 打撃1回あたりの波形



グラフ-1 計測波形

5. 杭の動的支持力(Ra)の算出方法

グラフ-2にグラフ-1の波形3の打撃1回分の波形を示す。リバウンド量、貫入量は下記の式から算出できる。

$$\text{リバウンド量} = \text{打設時のMax値} - \text{打設後の平均値}$$

$$\text{貫入量} = \text{打設後の平均値} - \text{打設前の平均値}$$

杭の動的支持力算出式は数多く発表されているが、本システムは

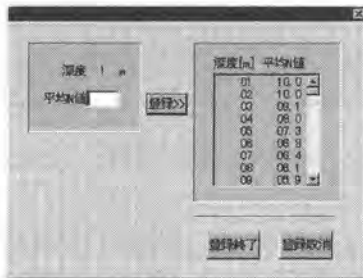
- ①道路橋示方書式
- ②建設省告示の式
- ③吉成の式
- ④Hileyの式

に対応できるシステムになっており、コンピュータの事前設定の『計算式の選択』により使用する計算式を選択する。以下に、本システムで対応できる動的支持力の算出式について説明する。

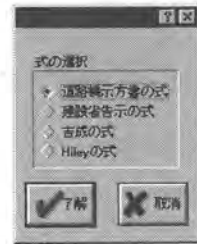
① 道路橋示方書式

$$Ra = \frac{1}{3} \left(\alpha \frac{AEK}{e_0 l_1} + \beta \frac{\bar{N}Ul_2}{e_f} \right)$$

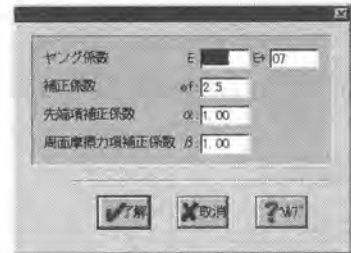
- A : 杭の純断面積 [m²]
- E : 杭のヤング係数 [tf/m²]
- l₁ : 杭長補正值
- l₂ : 地中に打込まれた杭長 [m]
- U : 杭の周長 [m]
- \bar{N} : 杭周面の平均N値
- K : リバウンド量 [m]
- e₀, e_f : 補正係数
- α : 先端項補正係数
- β : 周面摩擦力項補正係数



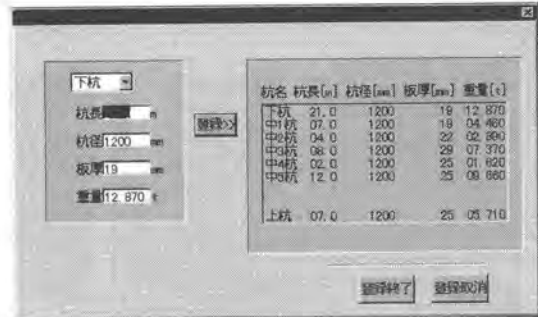
画面-4 ボーリングNo. 登録・編集



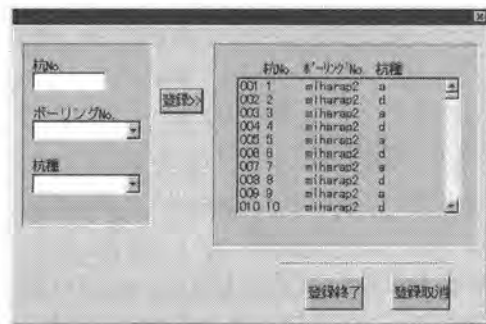
画面-1 計算式の選択



画面-2 プロジェクト詳細編集
(道路橋示方書式)



画面-3 杭種登録・編集



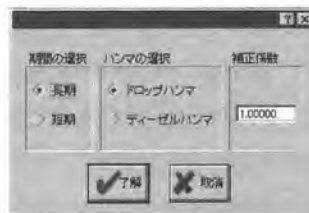
画面-5 杭No.登録・編集

動的支持力を算出する計算式で使用する変数のうち事前に設定できる変数は、『プロジェクト詳細編集』、『ボーリングNo.登録・編集』、『杭種登録・編集』、『杭No.登録・編集』で設定する。

②建設省告示の式

$$Ra = \frac{\alpha \cdot F}{5S + 0.1}$$

- F : ハンマーの打撃エネルギー[tf・m]
ドロップハンマーのとき $F = W \cdot H$
ディーゼルハンマーのとき $F = 2W \cdot H$
- S : 基礎杭の最終貫入量[m]
- α : 補正係数



画面-6 プロジェクト詳細編集
(建設省告示の式)

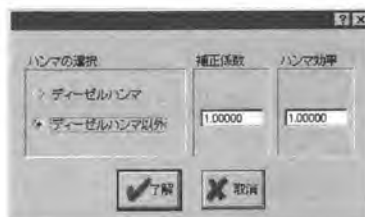
③吉成の式

$$Ra = \frac{\alpha \cdot W_H \cdot H}{4(S + K)}$$

- W_H : ラム重量[tf]
- H : ラム落下高[m]
- S : 杭の貫入量[m]
- K : リバウンド量[m]
- α : 補正係数



画面-7 プロジェクト詳細編集
(吉成の式)



画面-8 プロジェクト詳細編集
(Hileyの式)

④ Hileyの式

$$Ru = \alpha \cdot \frac{e_f \cdot W_H \cdot H}{S + \frac{1}{2}K}$$

- Ru : 杭の極限支持力[tf]
- e_f : ハンマー効率、機械効率に相当 (=0.5)
- W_H : ラム重量[tf]
- H : ハンマーの落下高[m]
ディーゼルハンマーの場合は $2H$
- S : 杭の貫入量[cm]
- K : リバウンド量[cm]
- α : 補正係数



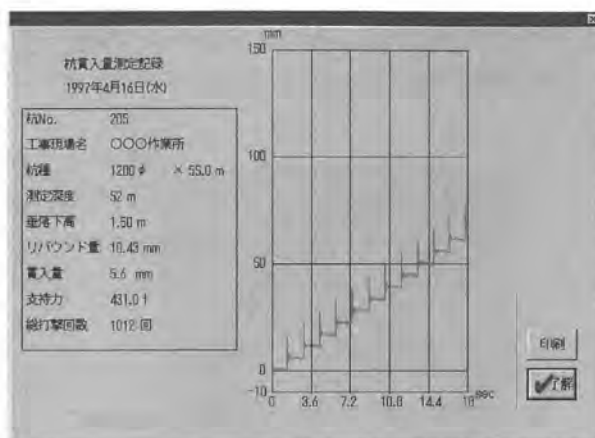
画面-9 計測設定

事前に設定できる変数は『プロジェクト詳細設定』で設定し、計測前に『計測設定』を設定する。これらの変数と、計測波形から前記方法により算出されたリバウンド量、貫入量の値より杭の動的支持力を算出する。

6. 計測結果

計測結果は、杭打ち時の波形、リバウンド量、貫入量、算出した支持力等を記載した『杭貫入量測定記録』として出力する。
(画面-10参照)

画面に表示された『杭貫入量測定記録』はプリンターによって印刷することができ、また、記載する波形は、原寸で出力される。



画面-10 計測結果

7. 効果

- ・ 打設する杭とその手前にターゲットを設置すれば、あとは打設箇所から離れたところで打設時の杭の動きをCCDカメラを使って撮影するだけでよいので、計測時の安全性を向上できる。
- ・ 杭のリバウンド量の計測・計算から地盤支持力の計算や図表化までの各種データ処理がすべて自動化されているため、地盤支持力をリアルタイムで確認できるので、杭の打設をより一層速やかに進められる。さらに、発注者への報告書作成も、本システムではパソコンから即座に出力できるので、従来方法よりも大幅に短縮できる。



写真-2 計測状況



写真-3 カメラ撮影状況

8. おわりに

作業員によって記録用紙へ杭打ち時の杭の動きの軌跡を記入するリバウンド量の計測方法は、ハンマーによる杭打ちが行われはじめたころから実施されている計測である。今回開発した「杭リバウンド計測システム」により、長年問題であった落下物の危険や、振動、騒音による作業環境は改善されたと考える。現在までに3現場での使用を完了し、使用中が1現場、計画中が1現場となっている。

今回採用したリアルタイム位置計測装置は、計測対象とは非接触で計測可能となっており、かつ高速計測できるメリットがあるので、今後、安全管理、施工品質管理等で展開して行きたいと考えている。