

Ⅲ-476

MID-RANGE 動的載荷法を用いた杭の健全性試験

(株) ジオトップ 正会員 須見 光二 正会員 カルキー マダン 正会員 境 友昭
(株) 松村組 正会員 大岩 忠男 正会員 森中 宏和

1 はじめに

杭の健全性試験方法としては、微小な打撃力を杭頭に入力する、いわゆるローストレイン法が一般的である。しかし、この方法には、杭の周囲での地盤の音響インピーダンスが高い場合や、杭が非常に長い場合には、信号の減衰が激しく、解析に適した杭の応答波形の採取が難しくなることが知られている。

一方、動的載荷試験のように、非常に大きなストレスレベルの打撃力を杭頭に作用させた時、杭が長い場合でも杭先端からの反射波が高い SN 比で計測可能であることも周知の事実である。

これは、微小応力信号が伝搬する時と、高い応力を持つ波動が伝搬する時とは、杭中を伝搬する波動の特性が異なるからである。前者は線形領域のひずみであり、波動のエネルギーは、杭と地盤の音響インピーダンスの比によって規定される放射減衰 (Radiation damping) に起因する。これに対し、後者では杭の周囲での固体摩擦に起因して応力の減衰が生じる。また、後者の場合、入力された打撃力が杭周囲の摩擦抵抗力の極限值に達しなくなった時、前者と同様の線形領域での現象となる。

MID-RANGE 法は、ハイストレインで継続時間の短い信号を用いることによって、信号減衰を抑え、杭先端付近の情報をできるだけ精度よく、測定しようとする方法である。

表-1 にミッドレンジ法の考え方を示す。

表-1: The concept of Mid-range Method

Method	Strain level	Wave length of Impact	pile shape estimation
Low strain	Low (few μ strain)	SHORT ($< \frac{1}{10} L_p$)	
Mid-range	HIGH (1,000~2,000 μ)	SHORT ($\frac{1}{10}$ to $\frac{1}{5} L_p$)	
High Strain	HIGH (1,000~2,000 μ)	long ($> \frac{1}{2} L_p$)	
Resistance Prediction		L_p = Pile Length	

2 測定、解析の理論と装置

杭の機械インピーダンスがハンマークッション系のインピーダンスよりも大きい場合、杭頭は自由端として取り扱うことができる。この時、杭頭での力は、最初の打撃力が通過する時以外は、0 であり、よって杭の動的挙動は、杭頭での速度 (加速度) によって説明することができる。ローストレイン法が杭頭に加速度計のみを取りつけて杭の形状を推定することができるのはこのためである。杭の形状、支持力を波動理論によって、分析するためには、杭に入力された打撃力の波形と杭の応答波形を分離する必要がある。打撃力の継続時間が短い場合には、杭の周囲抵抗に起因する反射波の影響が無視できない大きさになる前に打撃力が減衰し、したがって、杭頭に生じた最初のインパルス被打撃力とし、以下に続く信号を杭の応答として簡単に分離することができる。ただし、厳密に解釈する場合、打撃力として分離した信号の中には、杭頭近傍での応答波形が含まれていることになり、打撃力の継続時間が長くなると解析精度の低下につながる。測定装置は、加速度計、計測アンプ (コントローラ) および、コンピュータからなる。主たる仕様は、次のとおりである。

加速度計	0.1 ~ 20kHz	10,000 G
アンプ部	0.5 ~ 1.5kHz	F.S. 300G
A/D 変換	12bit 50 μ s~200 μ s	4,096 プレトリガー

杭の形状、発現された動的貫入抵抗は、現象が 1 次元の波動理論に従うとして解析する。この時の運動方程式は、式 (1) に示すとおりである。式 (1) において、 F_s は、杭の周囲に作用する地盤の摩擦抵抗、 h は、放射減衰、 A 、 E は、杭の断面積および縦弾性係数である。また、 c は杭中の弾性波の伝搬速度、 u は、速度ポテンシャル、 t, x は、それぞれ、時間、距離を示す。杭の周囲に作用する力は、固体摩擦力として作用し、したがって、杭の微小部分での杭の運動方向によって、摩擦力の作用する方向は異なる。式 (1) では、十分に表現されないが、杭中を伝搬する波動の応力が固体摩擦抵抗力よりも小さくなった時、杭の周囲では、放射減衰項のみが有効となる。杭頭では、打撃力が作用する。したがっ

M. SUMI, Karkee Madan, T. SAKAI, T. OHIWA and H. MORINATA; Mid-range Method of Dynamic Test to Assess Pile Shape

て、打撃力 $F_a(t)$ が 0 となった時、杭頭は自由端となる。また、杭先端には、地盤の発現された抵抗力の時間変化に相当する力が作用するとする。杭の断面積が変化する境界では、力と変位の連続性が保たれるとして運動方程式を解いた。

杭の形状推定及び発現された動的貫入抵抗の解析は、杭頭での最初のインパルスを入力とし、式 (1) で計算される杭の速度応答波形と実際に測定された応答波形のマッチングを行い、最も適合した時に用いたパラメタを解析結果とする方法である。

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \pm \frac{1}{AE} \delta F_s + h \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = F_a(t) \quad \text{at pile head} \quad \frac{\partial u}{\partial x} = R(t) \quad \text{at pile toe}$$

3 現場試験および解析の結果

試験対象とした杭は、オールケーシング工法による場所打ち杭（長さ 14.7m、直径 1.2m）である。杭、及び地質柱状図を図-1に示す。質量 270kg のハンマを高さ 1.5m から落下させて、杭頭に力約 1.2MN、継続時間 2.5ms のインパルスを作させた。杭の応答は、杭頭からほぼ 1m の位置に取りつけた加速度計によって測定した。測定波形を図-2に示す。

測定波形から明かなように、杭頭での力波形の最初のパルスは、ハンマの打撃によるものであり、これはその継続時間が短いことから、後続の杭の応答波形とは容易に分離可能である。

解析は、dWAVE 解析法に基づいた波形マッチング法を用いて行った。計算波形を図-3、両者の比較を図-4に示す。実際の波形と計算波形は、完全に一致するものではないが、杭の形状推定では、杭先端からの反射波が杭頭に戻ってくるまでの間での波形の一致が重要であり、解析では、特にその点に留意した。最終的に得られた杭のパラメタを表-2に示す。杭は、ほぼ直杭で健全であるが、杭頭から 6m 前後の位置に断面力 (AE) が小さく推定されているところがある。これは、杭の造成過程から考慮して、杭先端及び杭頭部分が杭の中間部よりも大きな口径となったためと推定される。

270kg のハンマを 1.5m の高さから落下させて得られた動的貫入抵抗の値は、56tonf である。この値は、ハンマの重量の約 200 倍に相当する。この結果は、杭の支持力を推定する場合には、より大きなハンマが必要となるが、規定の支持力が得られているかどうかを判定するためには、規定支持力の 1/200 の重量のハンマを用意すればよいことを示唆しているものと考えられる。

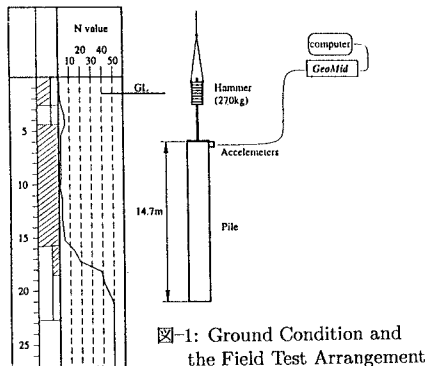


図-1: Ground Condition and the Field Test Arrangement

表-2: Parameters Based on the Analysis

AE of Pile shaft $\times 10^3$ (ton)	Segment length (m)	Resistance (ton)	Damping factor
2940.0	1.0	0.00	0.000
2940.0	4.6	0.00	0.000
2470.0	1.0	0.00	0.006
2900.0	1.9	5.00	0.006
2900.0	1.0	5.00	0.020
2790.0	1.9	5.00	0.020
2940.0	3.3	5.00	0.020
Pile toe	—	36.0	0.070

4 まとめ

High-strain, Short duration の MID-range 法は、杭の形状推定に適用できることが分かった。

今回は、比較的短い杭であったが、同時に試験した Low-strain 法と比較して杭中での信号の減衰は非常に小さいことが明らかになった。MID-range では、杭の周面抵抗に打ち勝って波動が伝搬する過程では波動の減衰比が小さく、したがって、杭が長い場合の健全性試験方法としての適用性が高いものと考えられる。

現場試験では、大阪府北部下水道事務所の協力を得た、ここに感謝の意を表する次第である。

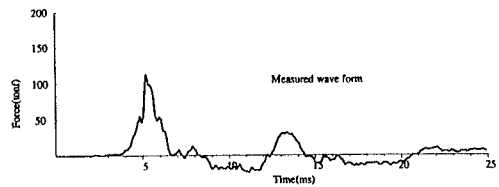


図-2: Measured Force Waveform

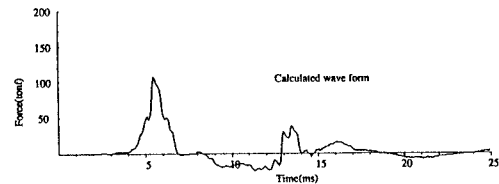


図-3: Calculated Force Waveform

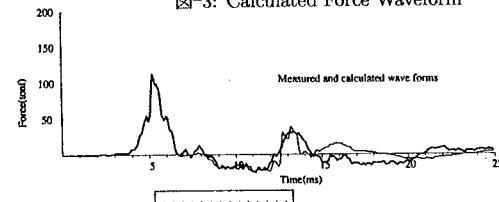


図-4: Comparison of Measured and Calculated Force Waveform