

波動理論を応用した杭の支持力評価について

神田 富春* Tomiharu Kanda 豊留 一朗* Ichiro Toyotome

1. はじめに

杭の鉛直支持力を実験的に推定する方法としては、静的載荷試験による方法と動的載荷試験による方法がある。後者は、①動的支持力公式による方法、②波動理論を応用した方法に分けられる。

①の動的支持力公式は、杭打撃時の力学的エネルギーの平衡式から導びかれたものである。代表的なものとして Hiley の公式がある。この方法は式の取扱いが容易であり、各種基準等に示されているために、わが国ではよく用いられてきたが、式の誘導過程で多くの仮定がなされているためにその信頼性は高いとは言えない。

一方、②の方法は、杭打ち時に杭中を伝わる波動（応力波）伝播を考慮した方法である。代表的なものとしては、CAPWAP法、Case法がある。この方法は、わが国ではまだ研究段階であり適用の実績がほとんどないが、欧米では既に豊富な実績が蓄積され実用化の段階にあり、一部の基準に取上げられている。既往の報告によると、その予測精度は±15～20%程度というものがほぼ一致した認識のようである¹⁾。

本報告では、波動理論を応用した杭の支持力評価法について簡単に紹介し、さらにバンコクにおける場所打ち杭の工事への適用例を紹介する。

2. 波動理論を応用した杭の支持力評価法¹⁾

杭打ちあるいは杭の打撃に波動理論を適用する場合には、「打撃された杭の挙動は、一次元波動方程式によって支配されている」ものとしている。支持力の推定は、杭を打撃した時に杭中を伝わる応力（ひずみ）および加速度を計測し、その波形を解析することにより行う。以下に代表的な2つの方法について示す。

(1) CAPWAP法

CAPWAP法は、Smithの数値解析法に基づいた支持力推定法である。本方法は、Fig. 1に示すように、杭打ちシステムを質点とばねにモデル化し、波動方程式を数値的に解こうとするものである。支持力の推定は、解析波形と実測波形のフィッティングにより行う。計算の際には、杭の貫入抵抗を表す地盤モデルのパラメータを変化させていき、波形がよくフィットした時のパラメータにより、杭の貫入抵抗が評価される。本方法では、杭先端抵抗と周面抵抗を分離して求めることができる。

本方法により動的貫入抵抗の推定を行う場合には地盤抵抗のモデル化が必要である。Fig. 2によく用いられる Smithの地盤モデルを示す。本モデルでは杭の静的支持力 R_s および杭打ち時の貫入抵抗 R は次式のように表される。

$$R_s = \begin{cases} K \cdot u & (u \leq Q) \\ R_u & (u > Q) \end{cases}$$

$$R = R_s (1 + J \cdot v)$$

ここに K はばね定数、 u は杭の変位、 R_u は静的最大地盤抵抗力、 Q は最大弾性変位量、 v は杭の貫入速度、 J は減衰定数である。 K 、 Q 、 J の値は経験的に決定される。

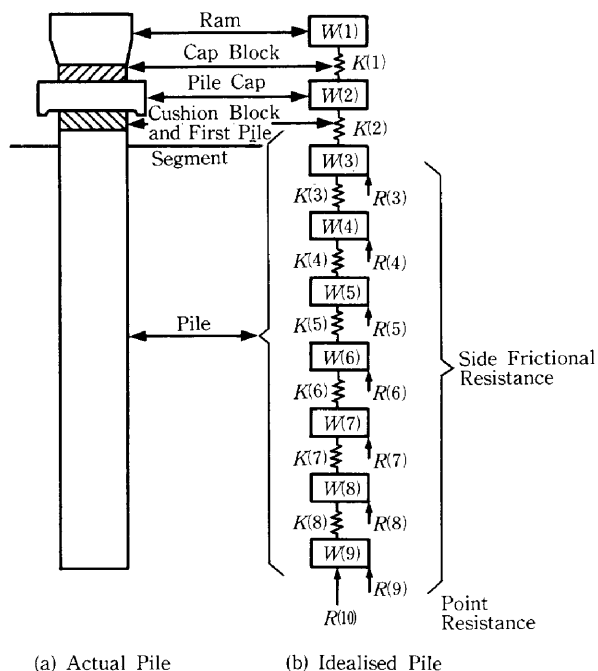


Fig.1 Smithの数値解析法における杭打ちシステムのモデル化¹⁾

*タイ国(営)ラマ四世橋(出)工事係長

推定法の適用性を検証した。本報告ではそのうちの1本の杭に関して報告する。この杭は1991年8月3日に施工されたものである。

試験対象杭の設置状況および土質柱状図を Fig. 5 に示す。地盤は多層地盤であり、杭はGL-28mあたりに位置するシルト質細砂層まで達している。

(2) 動的載荷試験

動的載荷試験は1991年9月20日に実施した。Fig. 6 に試験の概略図を示す。ひずみ計および加速度計は、杭天端から2mの位置に取付け、杭天端には木板と鉄板を組み合わせたクッションを置いた。これに鋼性ケーシング(直径1.2m、長さ8.0m)をセットし、杭頭をラム重量15tf(147kN)のハンマーで打撃した。ハンマーの落下高は4~6mとした。試験はPDAにより解析を行った。試験により得られたひずみ・加速度波形、CAPWAP法によるフィッティングの結果および周辺抵抗分布を Fig. 7 に示す。

この波形を解析した結果は次のとおりである。

杭の降伏支持力 $R_{ut} = 566.2\text{tf}(5552\text{kN})$

周辺摩擦力 $R_{sk} = 529.5\text{tf}(5192\text{kN})$

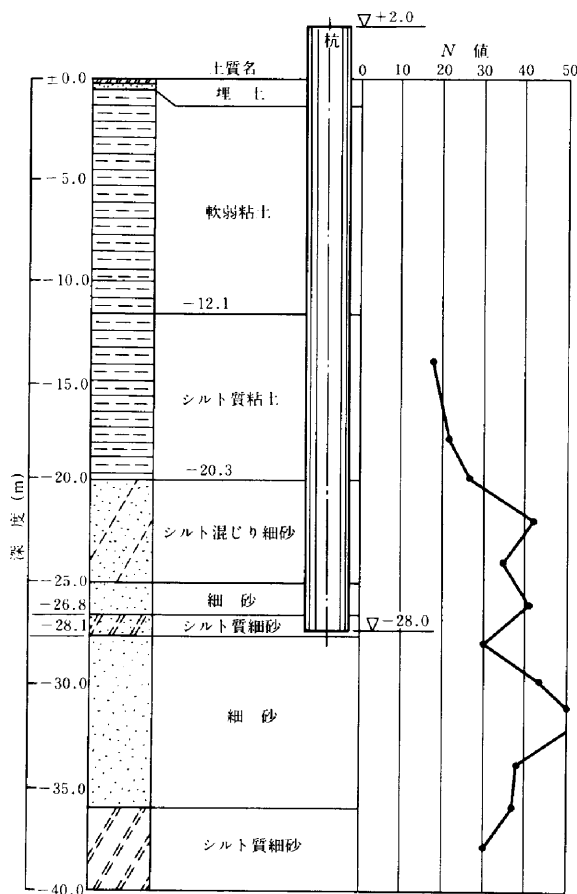


Fig.5 試験杭設置状況および土質柱状図

先端支持力 $R_{to} = 36.8\text{tf}(361\text{kN})$

最大沈下量 $D_{mx} = 11.4\text{mm}$

解析に際して仮定する諸定数、すなわち減衰定数 J 、地盤の最大弾性変形量 Q 等はいずれも経験的な値とし、かつ地盤は単一層であるものとした。

(3) 静的載荷試験

静的載荷試験は試験杭の周囲の杭を反力杭とし、油圧ジャッキにより載荷を行った。試験は動的載荷試験の前後で行い、第1回目は1991年8月31日、第2回目は同年10月4日に実施した。最大載荷荷重は設計荷重の3倍の520tf(5100kN)とした。両者の荷重-沈下曲線を Fig. 8 に示す。図によれば、杭施工後28日経過した第1回目に対して62日経過した第2回目は最大沈下量が18%程度と小さく、しかも降伏点に至っていないことが判る。当該地盤は杭施工後60日程度経過することで周面摩擦が回復するようである。

(4) 動的、静的載荷試験の比較

Fig. 9 には PDA による解析の結果得られた荷重-沈下曲線を示す。図中には静的載荷試験(2回目)の結果も併せて示している。図から明らかなように両者は必ずしも良く整合しているとはいえない。その原因としては、解析に用いた地盤モデルの諸定数が試験を行った地盤に対して適切ではなかったことおよび多層地盤であることを考慮しなかったこと等が考えられる。

なお、両者の整合性を判定するためには、両方の試験を行った他の杭についての検討も必要である。

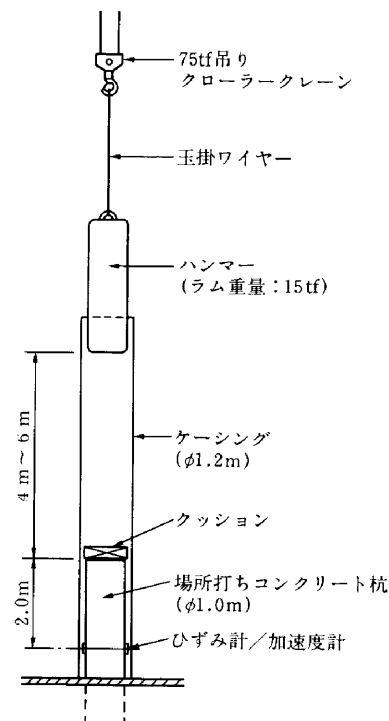


Fig.6 動的載荷試験概略図

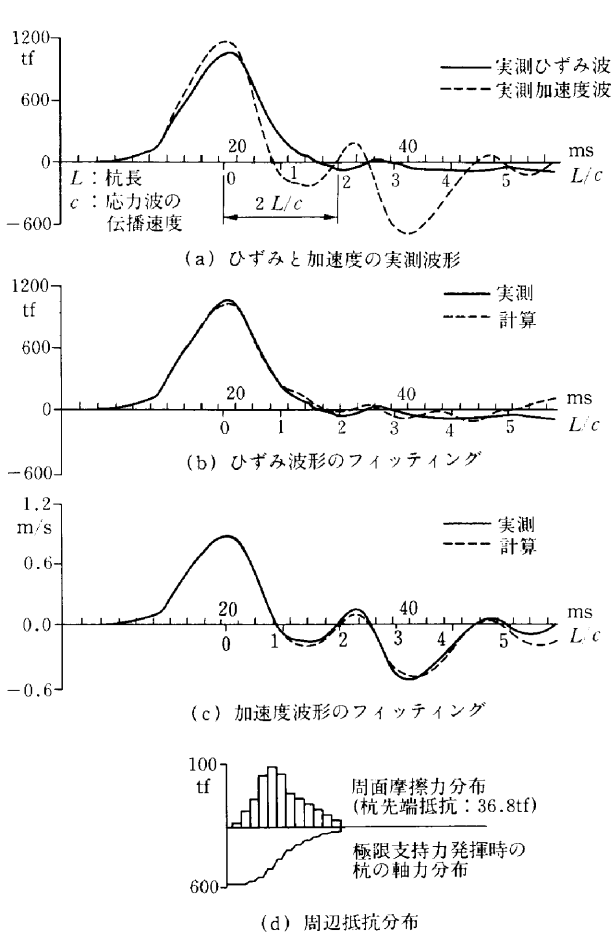


Fig.7 動的載荷試験結果
 (PDAによる解析結果)

5. おわりに

動的載荷試験を計測・解析するシステムは既に市販されており、また静的載荷試験に比べて能率的かつ経済的に行うことができるから、海外では比較的良く利用されている。わが国でも今後利用されるようになるものと思われる。

しかし今回の試験から、単にその既存のシステムを使えるだけでは、その結果の評価を充分に行えないことがわかった。精度の良い評価を行うためには、波動理論を杭打ちに応用することに関する理論的背景を理解しておくことが必要である。今回の試験の感想および今後の課題と思われることを以下に示す。

- ①杭には、ハンマーの打撃により、杭が地盤に貫入するのに十分なエネルギーが与えられなければならないので、今回の試験での打撃エネルギーが十分であったかを検討する必要がある。
- ②地盤モデルの諸定数を各層毎に設定する必要があるものと思われる。

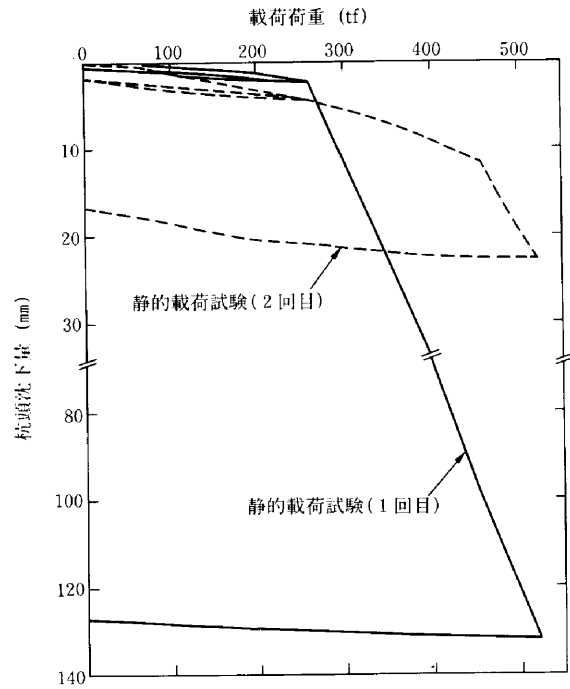


Fig.8 静的載荷試験の荷重-沈下曲線

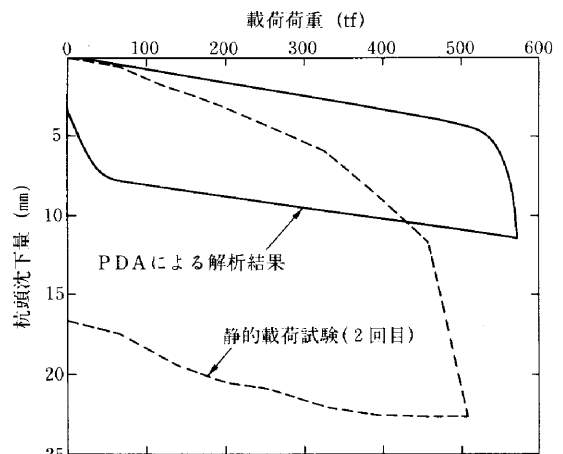


Fig.9 荷重-沈下曲線の比較
 (PDAによる解析結果と静的載荷試験)

- ③実測波形と計算された波形のフィッティングはきわめて微妙であり、解析結果に与える影響が大きい。
- ④バンコクにおける本システムの信頼性を高めるには今後の継続的な試験への適用が必要である。

なお、本支持力評価法は本来海上での鋼管杭の打撃工法において開発され発展してきたものである。したがって、陸上の場所打ちコンクリート杭への適用に関しては最近の研究が進んでいるものの、まだ未解明な部分も多いようである。

参考文献

- 1) 土質工学会：杭の打込み性および波動理論の杭への応用に関するシンポジウム発表論文集，1989。