

打ち込み杭の施工管理手法に関する研究

喜 多 直 之 崎 本 純 治

Study on Execution Management of Driven Piles

Naoyuki Kita Junji Sakimoto

Abstract

When piles are driven, the bearing capacity, drivability and integrity of piles are important aspects of execution management. One-dimensional wave theory is sufficient to handle these aspects, predict behavior and manage troubles. This report shows the procedure of real-time execution management by using a flow chart to estimate the bearing capacity. The total execution management system including prediction is based on one-dimensional wave theory using the procedure. The validity of parameter estimation based on this theory is examined in accordance with the results of actual examinations, and the influence of hammer type or driving energy in execution is considered.

概 要

打ち込み杭を施工する際には、杭の支持力、貫入性、杭体の健全性が重要な管理項目となる。一次元波動理論は、これらに関するトラブルへの適切な対処や事前予測などの挙動評価および精度の高い施工管理を可能にするものであり、これまでに現場への適用を図ってきた。本報告では、まず静的支持力算定の管理フローなどを用いた打ち込み杭のリアルタイムな施工管理手法の概要を示した。この手法の確立により、事前予測を含めた一次元波動理論によるトータル施工管理システムが構築できた。また、この管理手法の基礎となる波形マッチング解析による地盤評価の妥当性を適用事例に基づいて考察するとともに、ハンマ種類や打撃エネルギーが施工性に大きな影響を与えることを示した。

1. はじめに

打ち込み杭は騒音振動が比較的問題にならない埋立て地や水際の工事において多用され、その施工にあたっては、支持力、貫入性、杭体の健全性が重要な管理項目となる。現状では貼付紙を用いて貫入量とリバウンド量を測定し、動的支持力式によって支持力を管理するのが一般的であるが、適用性や精度が問題となる場合もあり、また貫入性や健全性の検討には対応できない。一次元波動理論¹⁾は、施工上のトラブルへの適切な対処や事前予測などの挙動評価および精度の高い施工管理を可能にするものであり、これまでに実工事への適用²⁾を図ってきた。

本報告では、まず一次元波動理論を用いた施工管理手法における予測から評価に至る一連の手順を整理し、静的支持力算定の管理フローなどを用いた打ち込み杭のリアルタイムな施工管理手法の概要を示す。この手法の確立により、事前予測を含めた一次元波動理論によるトータル施工管理システムが構築できた。次に、この管理手法の基礎となる波形マッチング解析による地盤評価の妥当性を適用事例に基づいて考察するとともに、ハンマ種類や打撃エネルギーが施工性に大きな影響を与えることを示す。

2. 施工管理の概要

一次元波動理論を適用した打ち込み杭の施工管理は、Fig. 1に示すように施工性予測と現場施工管理に大別され、現場施工管理には貫入性、杭体の健全性管理の他に支持力管理が加わる。一次元波動理論を用いて杭の静的支持力をリアルタイムに算定するには、CASE法と呼ばれる簡易計算法を適用する。これは、一次元波動理論の一般解を用いて、杭頭に与えた打撃による入力波と、杭体を1往復して戻ってきた反射波の和が地盤の抵抗と釣り合うとして地盤の全(貫入)抵抗力を計算するものであり、静的抵抗力は全抵抗力のうち動的成分をCASEダンピング定数により分離して求める。静的支持力は得られた静的抵抗力に長期的な強度回復率(セットアップ率)を乗じることによって算定される。CASEダンピング定数やセットアップ率はあらかじめ別途静的載荷試験および動的載荷試験(試験杭施工時、再打撃時)を実施するなどして求めておく。

管理結果は波形マッチング解析によって管理定数の妥当性として評価することができ、これらの過程で得られる情報は次回の予測にフィードバックされる。

具体的な支持力管理フローをFig. 2に示す。静的支持力の算定は、上記のように計測時にCASE法で直接求

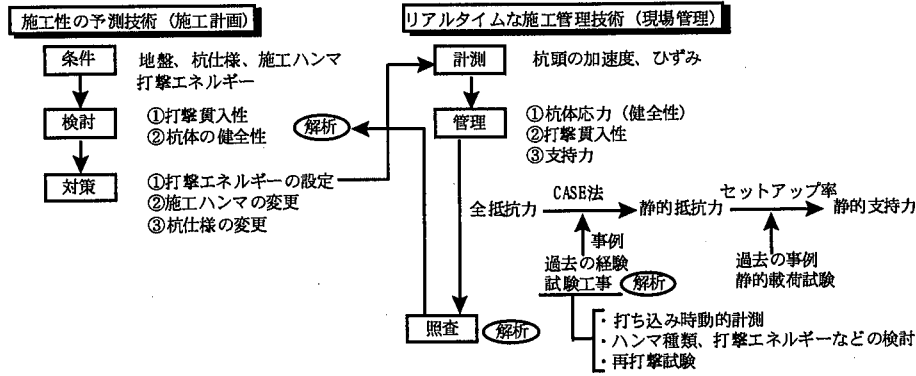


Fig. 1 施工管理概要
Outline of Execution Management

める方法(A法)と、貼付紙によって計測される貫入量・リバウンド量を全抵抗力に対応させるための換算係数を試験工事結果から設定する方法(B法)がある。前者の場合は、管理する各杭について動的載荷試験を実施することになり、後者は従来どおりの貼付紙によって静的支持力を補助的に評価する。貼付紙は全数について実施できる利点があるが、計測のばらつきの大きさを十分に理解し、計測方法およびその重要性を周知徹底しておく必要がある。

換算係数Cfは、Hiley式に用いる係数(通常の油圧ハンマで2.0、IHC社の油圧ハンマで2.5)が静的支持力を算出するものであるのに対して、打ち込み時の全抵抗力に相当する動的貫入抵抗力を算定するための係数である。この動的貫入抵抗力から静的貫入抵抗力を分離するための静的抵抗比は、試験工事結果の波形マッチング解析によって求めておく。

得られた静的支持力を所定の設計支持力と比較する際には、施工のばらつきを考慮して、個々の結果だけではなく総合的に判断することが望ましい。

3. 波形マッチング解析における定数評価

3.1 波形マッチング解析

波形マッチング解析とは、杭と地盤をFig. 3のようにバネとダッシュポットによってモデル化し、一次元波動理論に基づいて算定した計算波形と杭頭で得られた測定波形が一致するように解析定数を決め、全抵抗力から静的抵抗力を分離する方法である。したがって主な解析定数は、バネの降伏値Fyと弾性限界変位であるクウェークUq、ダッシュポットの速度比例定数であるダンピング係数Cである。ハンマによって与えられた圧縮波は、地盤から順次反射してくるため、浅い層から先端に至るまで「試行錯誤的に」順次合わせていけばよい。ここで、Fig. 4の例をみると、(a)のように正解と考えられるバランスのよい設定のときは、先端反射以降も比較的良好な一致を示しているのに対して、(b)では先端反射までは大差ないものの、それ以降は振動して一致しなくなっていることがわかる。各種地盤に対するそれぞれの定数の

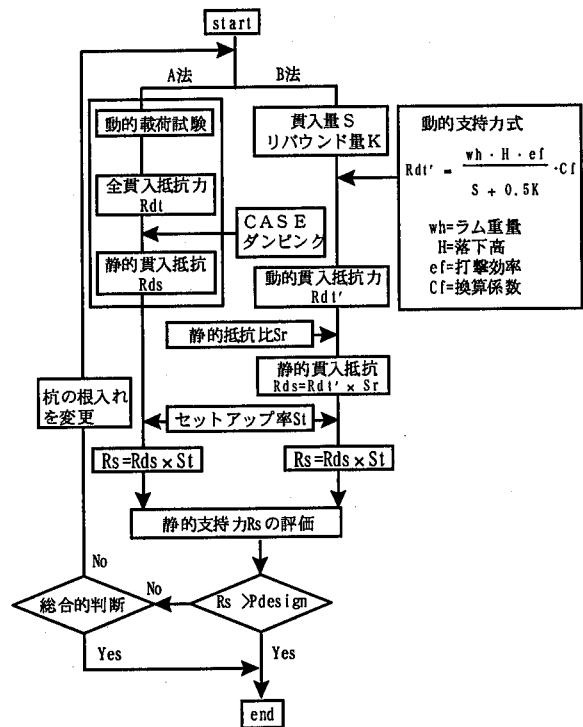


Fig. 2 支持力管理フロー
Procedure for Estimating the Bearing Capacity

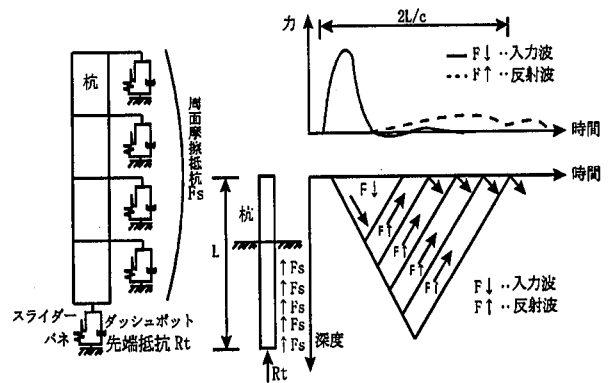


Fig. 3 一次元波動理論によるモデル化
One-dimensional Idealization

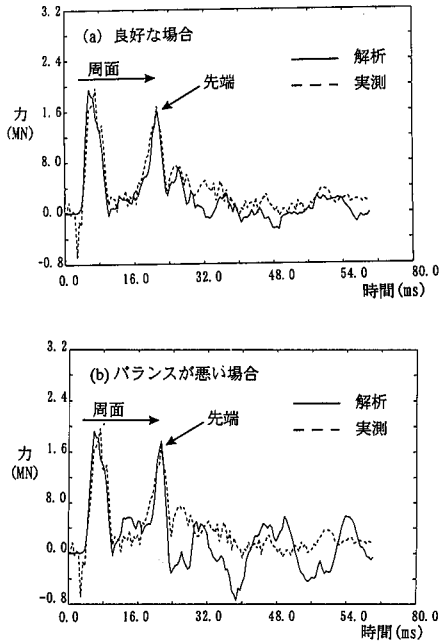


Fig. 4 波形マッチング結果
Results of Wave Matching Analysis

概略値を知っておくことによって、効率的、合理的な評価を行うことができ、予測の精度も向上する。また、それぞれの定数は条件によって挙動への寄与度が異なる点にも注意が必要である。

3.2 定数評価

Table 1に波形マッチング解析から得られた具体的な2事例の定数およびヨーロッパで一般的に用いられている推奨値⁴⁾を、Fig. 5に各々の事例の地盤柱状図を示す。

事例(1)の定数はハンマの種類によって分けている。NH-150B(ラム重量15tf)は一般的な油圧ハンマであり、S-200(ラム重量10tf)はラムの落下時に速度を与えることによって単位時間あたりの打撃回数を多くしていること、クッションを使用する必要がなくエネルギー伝達効率が高いことに特徴がある。

杭周面に関してはハンマによる明確な差は認められないが、先端の強度には有意な差のあることがわかる。これは、数十mにわたって貫入した結果、施工方法に関わらず杭の周面摩擦力度は十分に低減した値になっているが、先端は常に初期地盤へ貫入していることから、打撃間隔の違いによる過剰間隙水圧の差などが影響しているものと思われる。また、砂礫における周面摩擦力度が通常考える値よりも大きくなっているのは、動的载荷の場合、大口径開端杭の先端付近では閉塞していないために杭内面の摩擦分が含まれ、かつ内面の摩擦が卓越するためであると考えられる。

推奨値との比較からは、周面のダンピング定数にやや差があることを除けばほぼ妥当なものであると判断される。

Table 1 パラメータ
Parameters

| 事例(1) | NH-150 | | | S-200 | | | |
|-------|--------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|
| | fy | Uq | C | fy | Uq | C | |
| | MPa | mm | MNs/m ³ | MPa | mm | MNs/m ³ | |
| 周面 | シルト | 0.001 | 1.0 | 0.007 | 0.001 | 1.0 | 0.002 |
| | シルト質砂 | 0.035 | 1.0 | 0.019 | 0.025 | 1.0 | 0.003 |
| | 砂礫 | 0.300 | 2.0 | 0.01 | 0.300 | 2.0 | 0.01 |
| 先端 | 砂礫 | 32.5 | 10.0 | 3.5 | 20.0 | 10.0 | 5.5 |

| 推奨値(1) | fy | Uq | C | |
|--------|-------|-------|--------------------|------|
| | MPa | mm | MNs/m ³ | |
| 周面 | シルト | 0.002 | 0.34 | 0.42 |
| | シルト質砂 | 0.02 | 0.72 | 0.93 |
| | 砂礫 | 0.11 | 1.32 | 1.6 |
| 先端 | 砂礫 | 25 | 68.8 | 2.97 |

| 事例(2) | NH-100 | | | 推奨値(2) | | | |
|-------|--------|-------|--------------------|--------|-------|--------------------|------|
| | fy | Uq | C | fy | Uq | C | |
| | MPa | mm | MNs/m ³ | MPa | mm | MNs/m ³ | |
| 周面 | ヘッドロ | 0.001 | 1.0 | 0.001 | 0.009 | 0.52 | 0.73 |
| | 砂礫 | 0.005 | 1.0 | 0.001 | 0.099 | 1.28 | 1.54 |
| | シルト/細砂 | 0.1 | 1.0 | 0.003 | 0.03 | 0.82 | 1.06 |
| | 砂礫 | 0.01 | 1.0 | 0.005 | 0.11 | 1.32 | 1.06 |
| 先端 | 砂礫 | 10.0 | 15 | 6.0 | 25 | 68.8 | 2.97 |

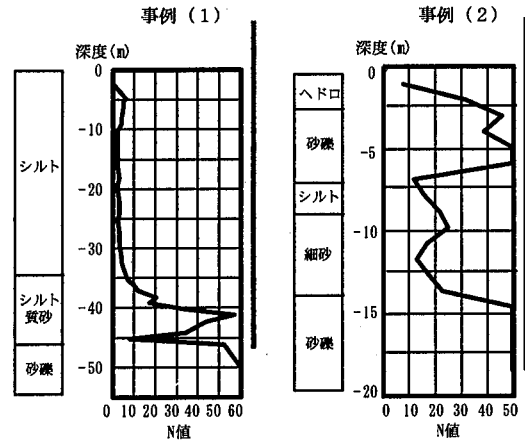


Fig. 5 地盤柱状図
Soil Profile

事例(2)では、周面の定数がいずれも推奨値より小さめになっている。これは、油圧ハンマで打ち止める前の大部分をパイプロハンマで施工する際に、杭の鉛直性が悪かったため引き抜いたことが影響しているものと考えられる。先端は、事例(1)と同様な傾向となっている。

4. 施工管理への適用事例

4.1 セットアップ率の評価

波形マッチング解析から分離した静的貫入抵抗力による事例(1)の地盤の強度回復をFig. 6に示す。打ち込み時にはNH-150Bに比べてS-200の静的抵抗力が小さくなっていること、しかしその後の回復はほぼ同じ傾向を示していることから、S-200はセットアップ率が大きいことがわかる。平均的なセットアップ率は約2.6である。この結果を各地層ごとの周面摩擦力度と先端降伏強度に分離

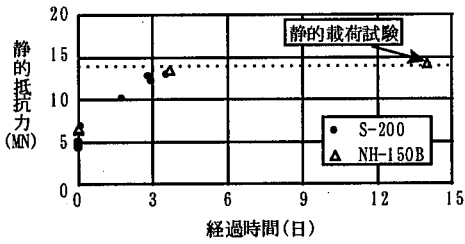


Fig. 6 地盤の強度回復
Recovery of Driving Resistance

するとFig. 7が得られる。いずれもFig. 6と同様に回復している様子が伺えるが、各層のセットアップ率は、軟弱シルト層とその下にあるシルト質砂層において大きな値となる。特にシルト層は摩擦力度の絶対値は小さいものの層厚が大きいため、全体の回復支持力はかなり大きく、セットアップ率は周面全体で2.7、先端が2.3であった。

4.2 杭体の健全性予測

Fig. 8に一次元波動理論による事前予測の例を示す。この事例は、中間砂層を有する軟弱シルト層に長さ13mのPHC杭を2本継ぎでNH-70による施工を計画していたものであり、中間層を打ち抜いて上杭を継いだ直後について、ラム落下高による杭体応力と貫入量の差異を示している。杭先端が軟弱層にある場合は、杭の引張限界応力を越える引張応力が発生することが予想されるため、打撃エネルギーを小さくした慎重な施工が必要であり、この事例ではハンマの変更が望ましい。

4.3 ラム重量が貫入性に与える影響予測

ラム重量による施工性の違いについての予測例をFig. 9に示す。打撃エネルギーが一定の条件では、ラム重量が増加すると落下高が小さくなり、軽いラムを高いところから落とすよりも、重いラムで落下高が小さい方が貫入性がよく、杭体に発生する圧縮応力も低く抑えられることがわかる。これは落下高が小さいと衝突速度が小さいため、ダンピングによる抵抗力が小さくなることによると考えられる。したがって、貫入性が悪いときにはむやみに打撃力を大きくするのではなく、大きめのハンマで細かく打撃する方がよいと判断される。

5. まとめ

本報告では、一次元波動理論を用いた打ち込み杭の施工管理手順と、解析定数評価及び適用事例について述べた。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 打ち込み杭の施工管理は、事前予測と現場管理からなり、一次元波動理論による手法は両者の総合的な評価を可能にする。
- 2) 波形マッチング解析は有効な解析定数評価手法であり、その結果を利用した挙動予測は現実の挙動を適切に表現している。

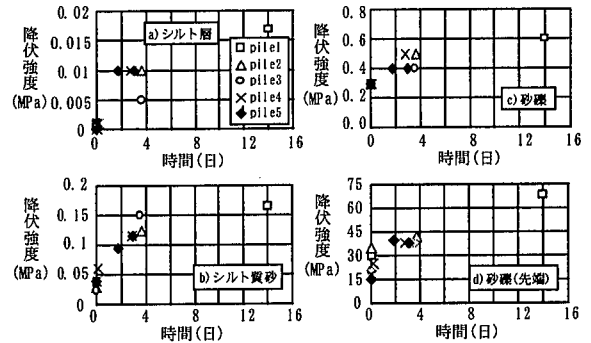


Fig. 7 地層ごとの強度回復
Recovery of Strength (Each Layer)

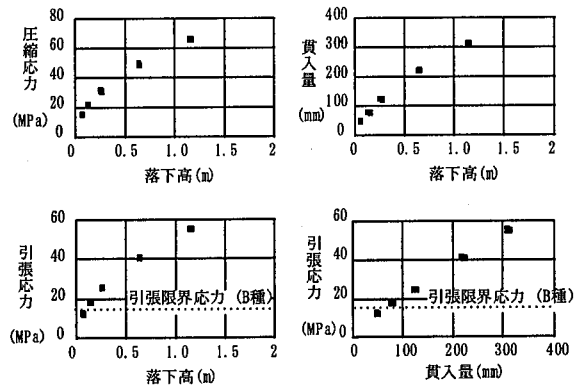


Fig. 8 施工性予測例
Examples of Prediction

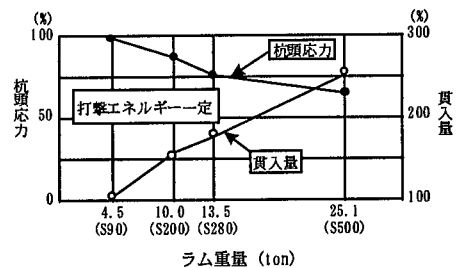


Fig. 9 ラム重量の影響
Influence of Ram Weight

現状では、わが国において一次元波動理論を用いた手法が基準化されていないことから、民間工事を中心とした適用に留まっているが、今後はより合理的な施工管理の必要性からも適用事例を増やし、地盤条件、施工条件に対応したデータベース的なものを整備していきたい。

参考文献

- 1) 近藤, 他: 波動理論による杭打ち解析プログラムの適用性に関する研究, 大林組技術研究所報, No. 43, p. 93~98, (1991)
- 2) 崎本, 他: 波動理論解析の杭の打込み管理への適用性, 大林組技術研究所報, No. 50, p. 41~46, (1995)
- 3) 喜多, 他: 載荷試験による鋼管杭打設後の地盤強度評価について, 第33回地盤工学研究発表会(投稿中)
- 4) TNO: TNOWAVE User's Guide Version 1.0