

高周波バイブロハンマによる打ち込み力評価

Driving force evaluation by high frequency vibratory hammer

(株)砂子組	○正員	三岩 蓮 (Mituiwa Ren)
岩見沢道路事務所	非会員	土肥侑弥 (Doi Yuya)
(株)砂子組	正員	平島博樹 (Hirashima Hiroki)
(株)砂子組	正員	田尻太郎 (Tajiri Taro)
勇建設(株)	正員	岡本淳敏 (Okamoto Atutoshi)

1. はじめに

バイブロハンマ設計施工指針¹⁾および杭基礎施工便覧²⁾によれば、バイブロハンマによる杭の打ち込みでは、周面抵抗力に対してはバイブロハンマの起振力が、先端抵抗力に対しては杭とバイブロハンマ本体重量の合計が上回れば打ち込みが可能とされている。実際に前年度に行ったバイブロハンマ打ち込み時の測定では、ハンマ起振力の打ち込み力への寄与が、杭頭部(チャック部)で大きく減少し、バイブロハンマの上下方向起振力は、周面摩擦力を動的に低減させるためだけに使われ、先端抵抗力に抗して打ち込みを行っているのは、杭およびハンマ重量による可能性が高いことを確認した³⁾。

本論文は、前年度の結果をより詳細に検証するために行った打ち込み試験について報告するものである。前年度は杭に歪みゲージと加速度計を設置して測定を行ったが、本試験ではさらにロードセルを取り付けたクレーンフックを用い、クレーンによる吊り荷重を考慮した杭とバイブロハンマの実効的な押込み力を定量的に把握し、運動方程式に基づいた定量的な評価を行った。また先端を尖らせた杭を用い、より効率的な打ち込み方法を試験した。

2. 試験概要

図-1 に、試験体一式の概念図を示す。杭本体には $H350 \times 350 \times 12 \times 19 \times 10500$ を用い、バイブロハンマにより下杭より打ち始め、途中現場継手を挟み上杭を打ち込んだ。測定項目は、クレーンの吊り荷重、杭の軸方向歪み、鉛直方向加速度である。吊り荷重は、図-1 に示すロードセルで、軸方向歪みは杭頭より 1500 mm の位置に貼付した歪みゲージおよび、杭先端より 500 mm の位置で測定した。加速度計は、杭頭の歪みゲージの 50 mm 上方である。ロードセルおよび加速度計のレンジは 200 kN と 10G で、サンプリング周波数は 1 kHz とした。また目視観察により、H 鋼にマークされた 50 cm 間隔のスケールを読み、打ち込み長の履歴を記録した。

打ち込み試験では、下杭打ち込み開始直後に全ての計測器が切れ、また上杭打ち込み時には上杭上側の加速度計に過大な零点ドリフトが発生したため、以下に示す歪みゲージと加速度計のデータは、現場継手後の上杭打ち込み時における、上杭上側の歪みゲージと上杭下側の加速度計のものである。

使用したバイブロハンマは、ICE28RF。最大起振力

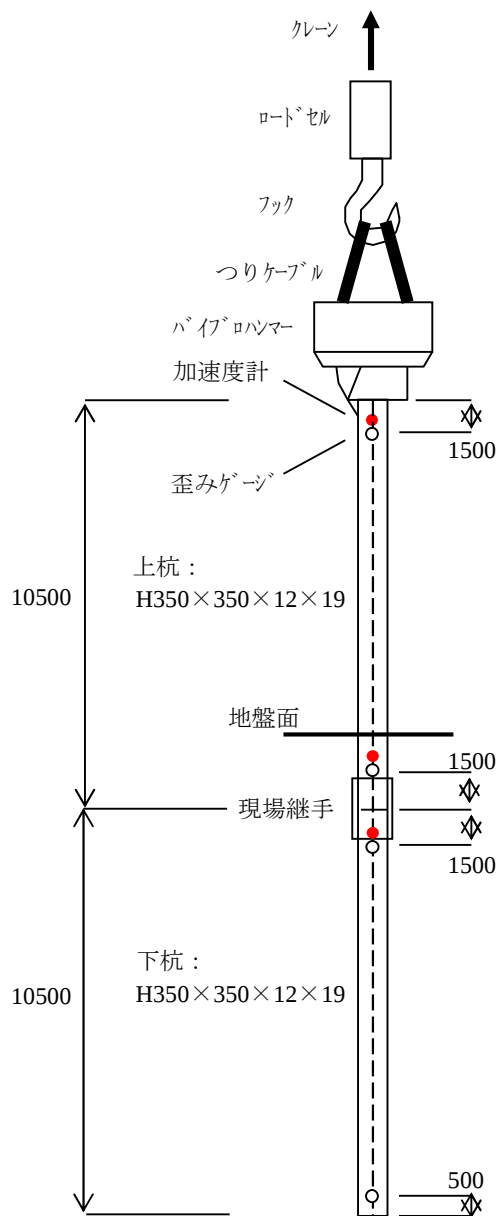


図-1 試験体一式

は 1600 kN、振動数は 2300 rpm (38.333 Hz) となる。

3. 打ち込み長さ、打ち込み速度の時刻履歴

図-2 に全打ち込み過程における、打ち込み長さ(m)と速度(mm/s)の時刻履歴を示す。打ち込み速度は、50 cm 間隔スケールをその移動時間で割ったものである。打ち

込み速度は最大で 12 mm/s 程度と非常に小さく、打ち込みの長時間挙動における実効的な打ち込み加速度は 10^{-6} m/s² オーダーと見積もられ、杭の打ち込みの長時間挙動は、準静的と考えられる。

3. 打ち込み時の短時間挙動

図-1 に示した上杭上側歪みゲージより上方の質量の運動方程式は次式となる。

$$Mg - T - N + f(t) = Ma \quad (1)$$

ここに M は、上杭上側歪みゲージより上方の H350 の質量、パイプロハンマーとつりケーブルおよびフック質量の合計である。 T はクレーンによる吊り荷重、 N は上側ゲージ断面における軸力、 $f(t)$ はハンマー起振力、 a は重心加速度で鉛直下向きを正とする。軸力 N は H 鋼ウェブ中央両面に貼付した歪みゲージ測定値の平均に H350 の断面積をかけて算出し、式(1)の力の向きから、圧縮力を正とした。なお試験体は全体としてほぼ剛体的に運動するものと仮定し、重心加速度 a には上杭下側加速度計の測定値を用いる。表-1 に各部分の重量および質量を示す。

図-3 は上杭打ち込み時のクレーンの吊り荷重であるが、吊り力と打ち込み速度の安定した 7700~7701 秒の押し込み力 F と軸力 N の関係を示すと、図-4 となる。ここでは式(1)の $Mg - T$ の項（自重とクレーン吊り力の差）を押し込み力 F 、 $F - N$ （押し込み力と軸力の差）を不釣り合い力、 Ma を慣性力と呼ぶ。1 秒程度の短時間では押し込み力は一定と考えられる。一方軸力は、パイプロハンマーの起振周波数 38.333 Hz に厳密に一致した周期振動となり、対応して不釣り合い力もほぼ同じ振幅で起振周波数に一致した周期振動である。式(1)より慣性力と不釣り合い力の差がハンマー起振力 $f(t)$ になるが、図-5 に示すようにハンマーの最大起振力 1600 kN (160 tf) と同程度の推定起振力となり、妥当な結果と考えられる。ただし慣性力 Ma には、打ち込みの長時間挙動が準静的である事を考慮して、1 秒間の平均が 0 となる基線補正を適用した。慣性力も起振周波数に一致した周期振動であるので、1 秒間は起振周期 0.026 秒と比較して十分に長時間と判断した。

図-5 より推定起振力もほぼ正確な周期振動となり、長時間挙動における実効的な押し込み力への寄与は小さいと考えられる。推定起振力の 1 秒間の平均値は 3.098 kN であり、ハンマー最大起振力の 0.19% である。

4. 打ち込み時の長時間挙動

上杭打ち込み過程全体における押し込み力、軸力、不釣り合い力を示すと、図-6 になる。図では長時間の実効的效果を明瞭にするため、生データの 10 秒移動平均を用いた。慣性力については実効値が極端に小さいため省略している。式(1)で Ma を無視すると、不釣り合い力の長時間平均が起振力の長時間平均になる。不釣り合い力の長時間平均は 0.327 kN であり、ハンマー最大起振力の 0.02% に過ぎない。

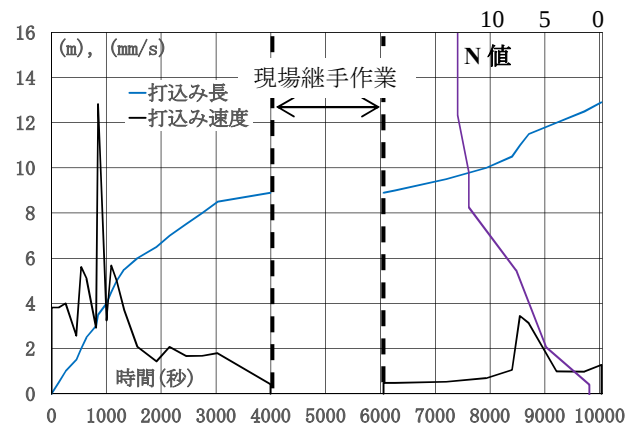


図-2 打ち込み長さ、速度の時刻履歴

表-1 各部分の重量および質量

	重量 (kN, kN/m)	質量 (t, t/m)
パイプロハンマー	71.0	7.10
H350*	1.35	0.135
フック	6.0	0.60
つりケーブル	1.5	0.15
継手当て板	1.0	0.10

*: kN/m

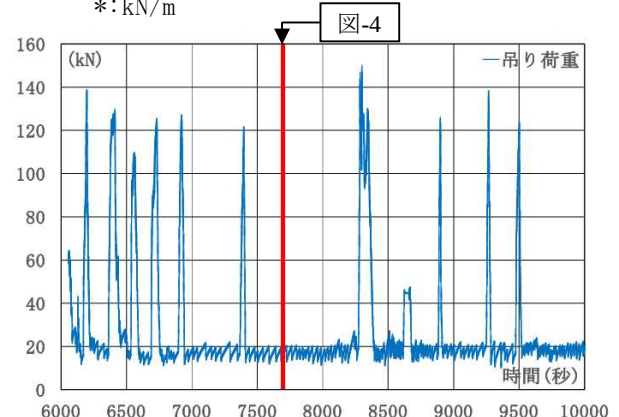


図-3 クレーン吊り荷重

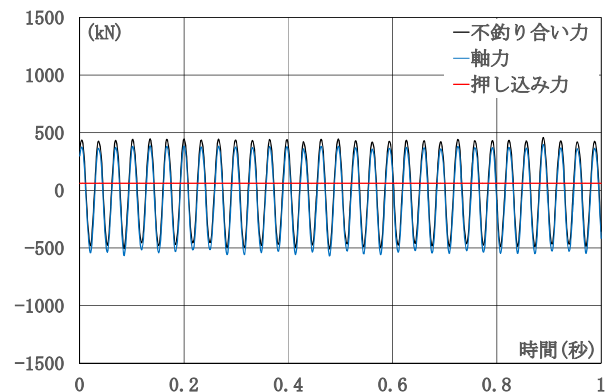


図-4 押し込み力、軸力の短時間挙動

図-6 で押し込み力と軸力に、局所的には大きな変動がみられるにも関わらず、不釣り合い力は全体的にほぼ一定値となっていることから、実効的な起振力も打ち込み

過程を通じてほとんど一定であろうと判断できる。また短時間挙動においても慣性力の基線補正のために不釣り合い力の時間平均は起振力の平均に等しい事、短時間、長時間いずれの挙動においても起振力の平均は、最大起振力の 1%にも満たないことから、実効的な押し込み力への起振力の寄与は、理論的には 0 と考えて差し支えないと判断できる。

5. 打ち込み抵抗力の推定

試験体全体の運動方程式は次式と考えられる。

$$Ma + \left(\sum_{j=1}^{n-1} c_j d_j + c_n (y - Y_{n-1}) \right) v + \left(\sum_{j=1}^{n-1} S_j d_j + S_n (y - Y_{n-1}) \right) + D_n = F \quad (2)$$

ここで M は試験体全体の質量で下杭打ち込み時は、先に述べたパイプロハンマー関連の質量全体と下杭の質量の和、上杭打ち込み時はそれに上杭質量と現場継手の当て板を含めた質量である。 a は試験体の加速度、 v は打ち込み速度で、ここでも試験体はほぼ剛体的に運動するとみなす。 c_j は打ち込み速度に比例した減衰力を表す減衰定数で地層のみで決まると仮定する。 S_j はいわゆる動的な周面抵抗で、これも地層のみで決まるとする。 D_n は杭先端の打ち込み抵抗を表し、 $j=1, 2, \dots$ の地層があったとき、打ち込み長さ y が通過中の n 番目の地層で決まると考える。 d_j は各地層の地層厚、 Y_{n-1} は $(n-1)$ 番目の地層下面までの地盤厚、 F は押し込み力である。前節までの結果により、パイプロハンマーの長時間挙動での実効値は 0 として無視する。

打ち込み加速度 a の実効値は極端に小さいので、ここでも慣性項を無視すると(3)が得られる。

$$\left(\sum_{j=1}^{n-1} c_j d_j + c_n (y - Y_{n-1}) \right) v + \left(\sum_{j=1}^{n-1} S_j d_j + S_n (y - Y_{n-1}) \right) + D_n = F \quad (3)$$

式(3)が妥当だとすれば、例えば先端抵抗を減少させれば減衰項の比率は相対的に高まり、同じ打ち込み力 F に対して、打ち込み速度は増加すると考えられる。

本試験では従来の杭のほかに、H 鋼先端を 35° の角度で尖らせ、先端抵抗力の低減をはかった H350×350×12×19 も用いた(写真-1)。両者における押し込み力と打ち込み長さの履歴を、現場継手作業の時間を除いて図-7、8 に示す。Case-1 が従来杭、Case-2 が先端抵抗低減杭である。

図-7、8 に見られる押し込み力の変動、打ち込み速度の変化、地層変化点を参考に、打ち込み過程を Case-1 では 9 個に、Case-2 では 10 個の区間に分割し、押し込み力、打ち込み速度、打ち込み長さ、地層厚のデータから、 (c_j, S_j, D_j) を最小二乗法によって推定した。用いたデータは 10 秒移動平均である。結果を図-9 に示す。

図-9 の押し込み力は、先に述べた区間における区間平均である。周面抵抗と先端抵抗力の和が一部押し込み力を上回る部分があり、また打ち込み長さが深い部分で

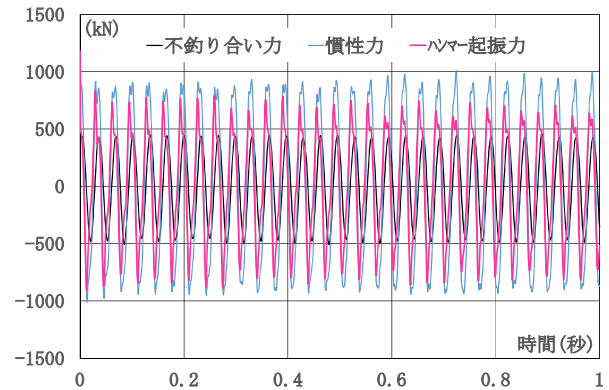


図-5 ハンマー起振力の短時間挙動

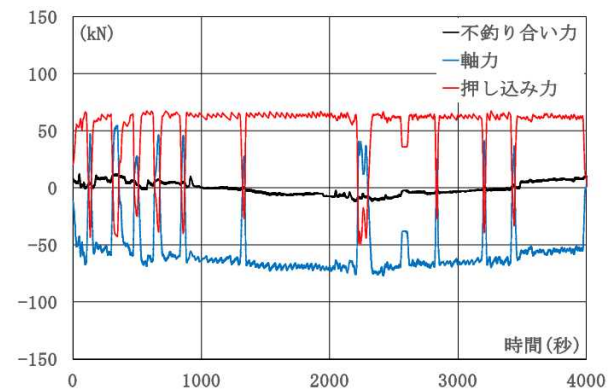


図-6 不釣り合い力の長時間挙動

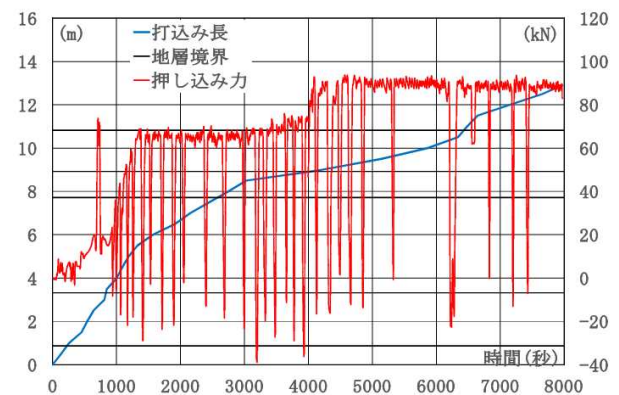


図-7 押し込み力と打ち込み長さ (Case-1)

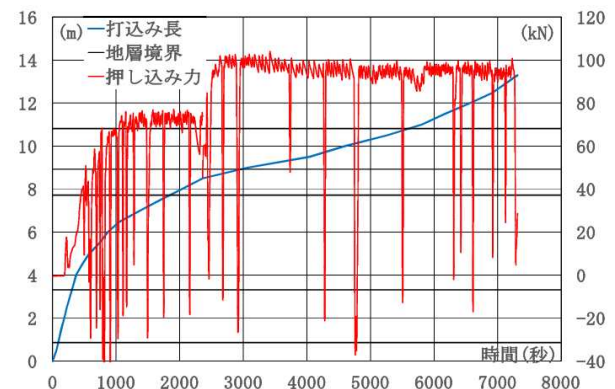


図-8 押し込み力と打ち込み長さ (Case-2)

周面抵抗の合力が減少する箇所もあり、一部不合理な結果であるが、定性的な傾向は妥当と思われる。

Case-1 の動的な周面抵抗力は打ち込みの後半まで 0 となり、打ち込み長さの増加とともに漸増するが、最終的には概ね横這いとなる。抵抗力全体に占める割合も大きくはない。これはハンマー起振力による振動で、周面抵抗が有効に切断されている結果と考えられる。推定した動的周面抵抗力の平均値は、1.6 kN/m となり、N 値から推定される静的周面摩擦力よりかなり小さい。

一方 Case-2 の周面抵抗は地表付近では 0 であるが、打ち込みのかなり早期から増加し、最終的には横這いになるものの先端抵抗と同程度の大きさとなる。平均は 5.6 kN/m で、N 値による静的摩擦力と同程度であり、理由は不明であるが、ハンマー振動が深部までうまく伝わらなかった可能性がある。

Case-1 と Case-2 で押し込み力に大きな違いはみられないが、先端抵抗と押し込み力の比率は平均で Case-1 では 89%、Case-2 では 45%である。これに周面抵抗の合力の平均値を加えると、全抵抗と押し込み力の比率は Case-1 で 94%、Case-2 で 92%に達する。

式(3)より、打ち込み抵抗力の減少に比例して直接的に打ち込み速度が増加するとすれば、両者の打ち込み効率はほぼ等しいことになるが、最終打ち込み長 12.9 m と 13.3 m に対し、実際の総打ち込み時間は 7971 秒と 7313 秒で、ほぼ変わらないものとなった。なお Case-1 と Case-2 の打ち込み箇所は 2 m 程度の距離でありほぼ同一地盤と思われる。

6. 地盤 N 値と先端抵抗力の相関

前節の結果よりハンマー振動が深部まで伝わった場合に先端抵抗力は、打ち込み効率に直接に影響する可能性が高い。図-10 に本試験における地盤 N 値と推定先端抵抗力の相関を示す。図示したように両者には、 R^2 値で 0.8 以上の強い線形相関があると思われる。これは打ち込み対象地盤の N 値に比例した打ち込み効率の悪化の可能性を示唆する。

7. まとめ

- (1) バイブロハンマー起振力は實際上、実効的な押し込み力には寄与せず、従来の原理¹²⁾を実証する結果が得られた。
- (2) 長時間挙動における実効的な打ち込み加速度は極端に小さいことから、作用力に打ち込み速度が比例するタイプの運動方程式が成り立つと考えられる。
- (3) (1), (2)より、ハンマー振動で動的周面抵抗が適切に切られ、周面抵抗が十分小さい場合には、先端抵抗が打ち込み速度（打ち込み効率）に直接的に影響する可能性が高い。
- (4) 先端抵抗と打ち込み対象地盤の N 値とは、強い正の線形相関が得られた。先端抵抗を減らす試みはあって良いと思われる。

本試験結果からは同一地盤ならば、打ち込み効率は自重とクレーン吊り荷重のみ（押し込み力）で決まる事になる。バイブロハンマーの選定基準では、N 値の大きさ

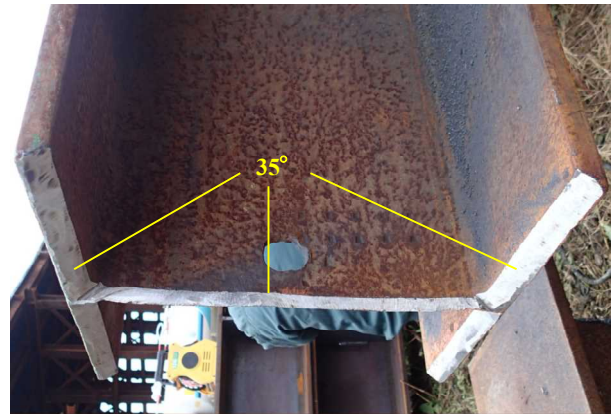


写真-1 先端抵抗低減杭

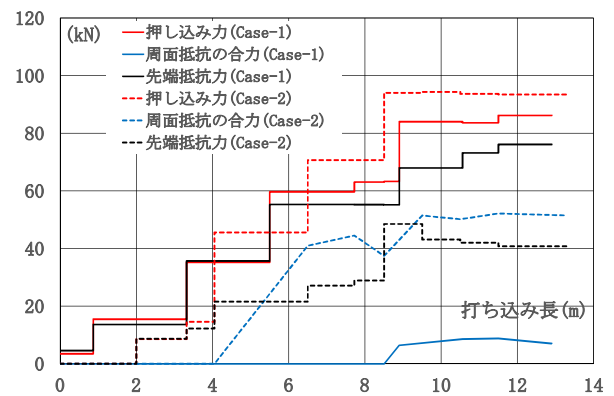


図-9 押し込み力、周面抵抗、先端抵抗

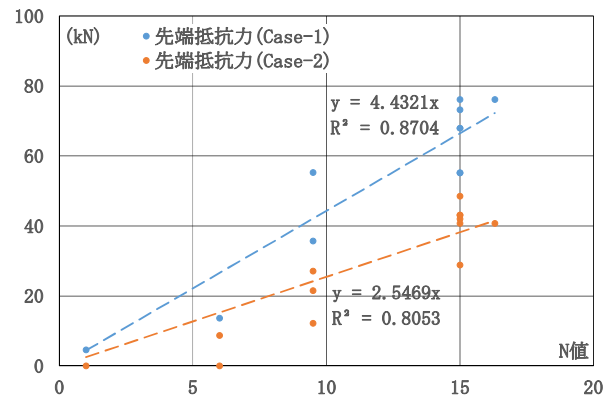


図-10 地盤 N 値と推定先端抵抗

に従い高出力ハンマーを選択する事になるが、高出力である事は必ずしも打ち込み効率の向上につながるとは言えない事になる。ハンマー重量とオペレーター操作による吊り荷重の制御が最も重要と考えられる。

現状ではバイブロハンマーの打ち込み速度が非常に遅く、通常の油圧ハンマーでは連続運転に耐えられないために高出力高周波ハンマーを採用する事も多いが、選定方法としての疑問は残る。

【参考文献】

- 1) バイブロハンマ設計施工便覧, バイブロハンマ工法技術研究会, 平成 27 年 10 月。
- 2) 杭基礎設計便覧, 日本道路協会, 平成 27 年 3 月。
- 3) 仮設H形鋼杭の打ち止め管理とバイブロハンマーの有効打ち込み力評価, 山本他, 土木学会北海道支部報告集第 75 号,F-09, 2019 年 1 月。