

打込み鋼管杭リバウンドのエネルギー特性

Energy Characteristics of Driven Steel Pipe Pile Rebound Energy characteristics of driven steel pipe rebound

(株)砂子組	○正 員 廣上 伸二 (Sinji Hirogami)
(株)砂子組	正 員 名和 紀貴 (Noritaka Nawa)
(株)砂子組	正 員 樋口 大介 (Daisuke Higuti)
(株)砂子組	正 員 長谷川 雅樹 (Masaki Hasegawa)

1. はじめに

打込み杭の打止め管理では、通常一打撃当りのリバウンド量と事前にボーリング等で調査された地盤 N 値を用いて動的支持力式から推定し、動的支持力が設計許容支持力を上回る事や打込み管理記録より杭が所定支持層へ到達したと考えられる事を判断基準としているが¹⁾²⁾、実施工では必ずしもこの基準が満たされない事も多い。そこで道路橋示方書・IV 下部工編では、一打撃当りの貫入量 2~10 mm を目安に、総合的な知見・判断から基礎の設計上の安定を前提に、高止まりが許容される¹⁾²⁾。本報では、新たな試みとして実現場において施工時に計測した打込み鋼管杭の杭頭加速度データと歪みデータに基づき、一打撃当りの貫入量（目安 2~10 mm）の妥当性等を考察した。

2. 計測概要

図-1 に歪みゲージ位置を示す（測定方向は軸方向）。歪みゲージは図-1 の L1~U で対向位置に 2 点配置し、定着を兼ねた防水処理材で覆い、延長ケーブル（ETFE4C シールド付）は、歪みゲージも含めてアルミテープで杭体に定着させ、打ち込み時の地盤抵抗から保護した。杭頭には加速度計（歪みゲージ式、1000G）も配置し、現場継手ごとに移設を繰り返した。設置位置は現場継手位置から下方 500 mm、記号は A-2 である。測定サンプリングは 10 kHz であり、全データ量は 707 MB になる。

データ処理においては、対向位置 2 点の測定値を平均し、測定できたランマー打撃時の波形 454 波を 130 m/sec の長さで抽出した。なお、加速度計には圧電式も併用したが、ランマー打撃力の増加とともにノイズが卓越するデータとなったため、加速度計は歪みゲージ式の 1 点のみの結果である。

3. 打込みエネルギーの解析

歪みゲージは L1 を除き杭頭（現場継手）から 2000 mm の位置に、加速度計は 500 mm の位置の杭頭付近にあるため、L2~U の歪み測定値に鋼管断面積をかけた値を杭頭へのランマー打撃力とみなした。同様に加速度計 A-2 の測定値を時間で 2 階数値積分したものを貫入量とした。図-2、図-3 に典型的な一打撃の変位波形、ランマー打撃力波形を示す。打込みエネルギーは図-3 の打撃力を杭頭変位（貫入量）で積分する事で求めている（図-4）。図-4 において、1 打撃の最大貫入量に対応する打込み仕事を地盤への入力エネルギーとみなす。

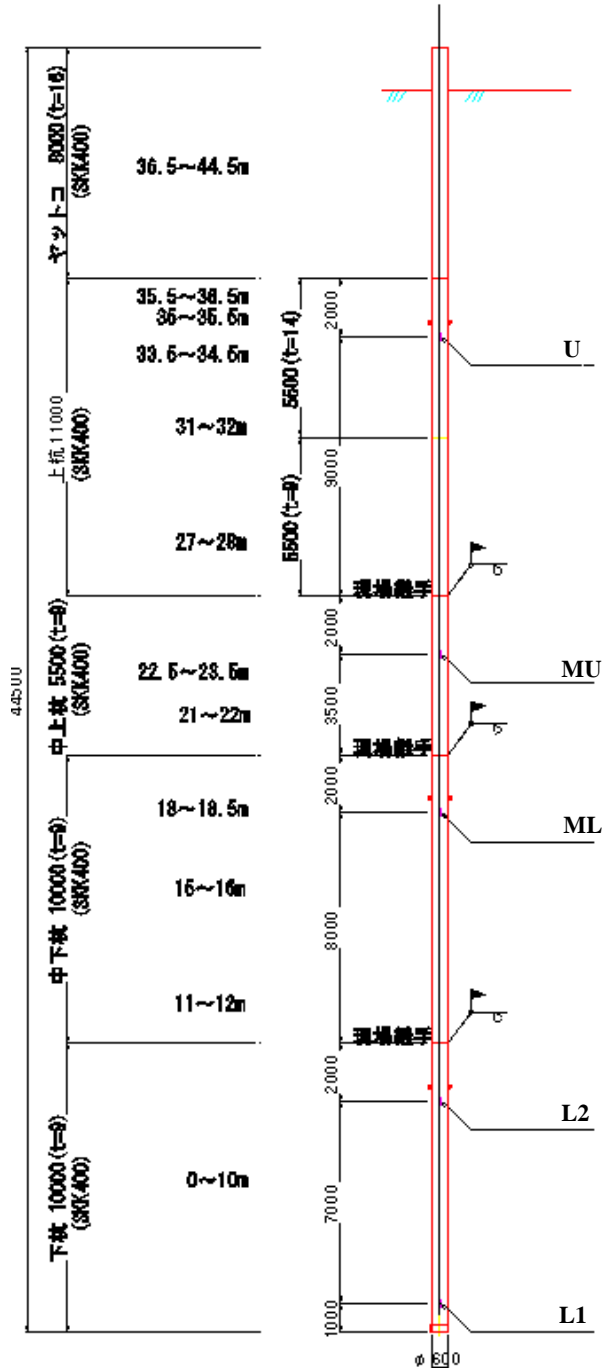


図-1 歪みゲージ設置位置

最大貫入量からリバウンド量を引いた貫入量に対応する打込み仕事は、有効な打込みエネルギーと考えられる。

また、地盤への入力エネルギーと打込みエネルギーとの差をリバウンドエネルギーと呼ぶ。

4. 打込み速度と貫入量

図-5 に打込み速度とリバウンド速度を、図-6 に貫入量とリバウンド量を示す。図の横軸は、図-4 の1打撃の貫入量を打撃回数で算定した打込み量である。打込み量 22~28 m の間隙は加速度計の脱落によるもので、他の間隙はデータ不良である。

打込み速度は図-3 の最終変位を時系列長さ 130 m/sec で除した平均であり、リバウンド速度は最大変位と最終変位の差をリバウンド開始時刻からの時間間隔で平均した値である。

図-5, 6, 表-1 に示すように貫入量とリバウンド量およびそれらの速度は、打込み量 22 m まではランマー打撃力の変化の影響が大きい、28 m 以降は地盤 N 値の影響が大きいと考えられる。28 m 以降はほぼ支持層内にあり、貫入量とリバウンド量（および速度）は等しくなる傾向が見られる。なお鋼管杭に 1 m 刻みで描いたスケールを目視観察した結果と図-5, 6 の結果は概ね一致した。

5. 貫入量とエネルギーの関係

図-7 に最大貫入量と地盤への入力エネルギーの関係を示す。両者には非常に良い線形相関があり、 R^2 値は 0.9 以上ある。データは打込み深度に従って 4 つのグループに別れる。これは表-1 に示すように、深度に対応した地盤 N 値とランマー打撃力の違いと思われるが、打込み量 0~18 m の範囲で N 値はほぼ一定の 7 程度であり、打撃力は 75 ~175 tf と大きく変化するのに対して、同範囲は一つのグループをなす事から、地盤の影響が大きいと思われる。また回歸直線の切片は、打込み時のエネルギーロスと考えられ、地盤 N 値の増加とともに増大する。特にほぼ支持層に達したと考えられる 28 m 以降では、最大で打込み開始時の 20 倍のエネルギーロスになっており、入力エネルギーの 50%以上が失われているのがわかる。

図-8 に貫入量と地盤への打込みエネルギーの関係を示すが、図-7 と同様な傾向にあり、 R^2 値は概ね 0.9 前後ある。打込み時のエネルギーロスは 28 m 以降、打込み開始時の 15 倍のエネルギーロスで、打込みエネルギーの 60%以上が失われている。

6. リバウンド量とリバウンドエネルギーの関係

図-9 にリバウンド量とリバウンドエネルギーの関係（全データを使用）を両対数で示すが、非常に良い線形相関が成り立っている。回歸直線は両対数で $y=1.0277x-1.8575$, $R^2=0.97$ となる。通常目盛りでは、

$$E_R = f_R \delta_R, \quad f_R = 16 \quad (式. 1)$$

となる。ここに E_R : リバウンドエネルギー(tf-m), δ_R : リバウンド量(m)である。

7. 貫入量の推定

入力エネルギーと最大貫入量、打込みエネルギーと

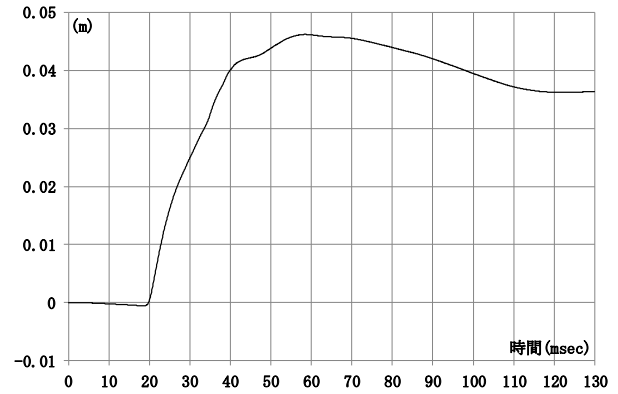


図-2 一打撃の杭頭変位波形

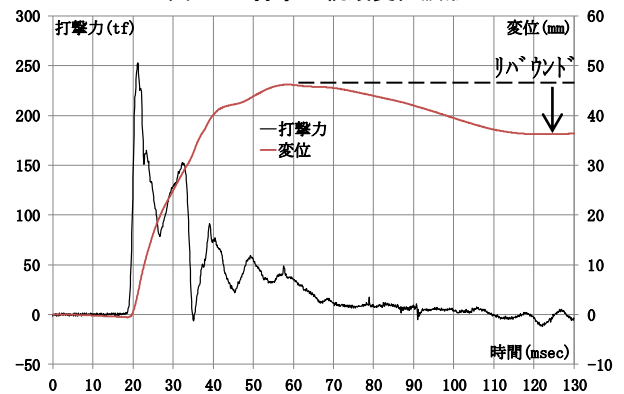


図-3 一打撃のランマー打撃力と杭頭変位

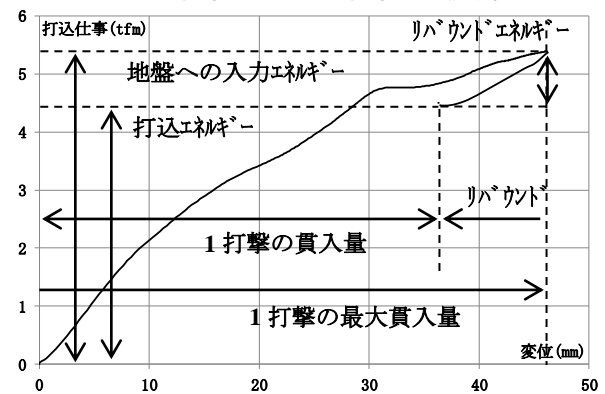


図-4 一打撃の打込み仕事

貫入量、リバウンドエネルギーとリバウンド量には良好な線形相関があり、以下で近似できると考えられる。

$$E_m = f_m \delta_m + E_{mL} \quad (式. 2)$$

E_m : 入力エネルギー(tfm), δ_m : 最大貫入量(m), E_{mL} : エネルギーロス。 f_m と E_{mL} の値は図-7 に図示。

$$E_e = f_e \delta_e + E_{eL} \quad (式. 3)$$

E_e : 打込みエネルギー(tfm), δ_e : 貫入量(m), E_{eL} : エネルギーロス。 f_e と E_{eL} の値は図-8 に図示。

入力エネルギーは、打込みエネルギーとリバウンドエネルギーの和なので、

$$E_m = E_e + E_R \quad (式. 4)$$

となり、(式.4)を(式.1)~(式.3)で表すと、

$$f_m \delta_m + E_{mL} = f_e \delta_e + E_{eL} + f_R \delta_R$$

から、貫入量 δ_e について、

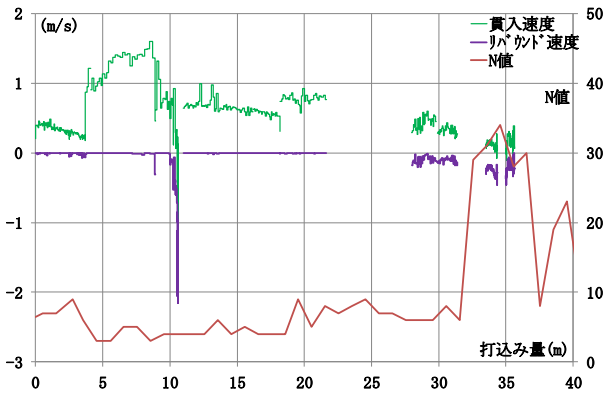


図-5 打込み速度とリバウンド速度

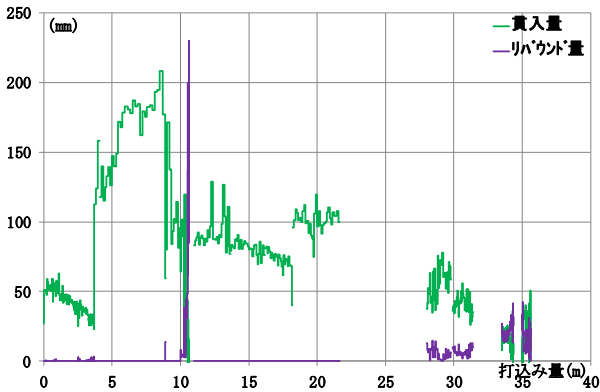


図-6 貫入量とリバウンド量

表-1 N値，最大打撃力

打込み量 (m)	地盤N値	最大打撃力 (tf)
0～4	8	75
4～18	5	175
18～22	7	200
28～32	8	375
33.5～35.5	30	350

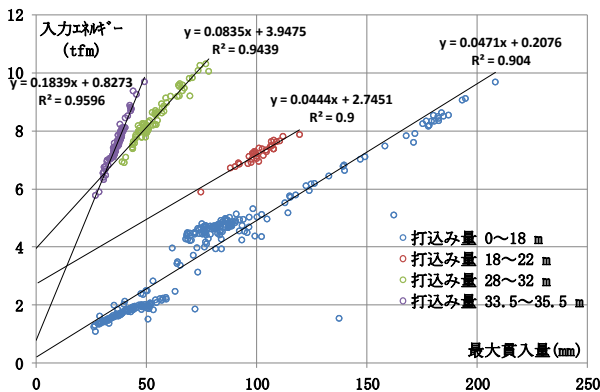


図-7 最大貫入量と地盤への入力エネルギー

$$\delta_e = \frac{f_m}{f_e} \delta_m - \frac{f_R}{f_e} \delta_R + \frac{E_{mL} - E_{eL}}{f_e} \quad (\text{式. 5})$$

が得られる。 f_m , f_R , E_{mL} , E_{eL} として図-7, 8, 9 の回帰直線の傾きと切片を、 δ_m と δ_R に測定値を用いて δ_e を推定した結果が、図-10 の黒点となる。実測の貫入量は緑ラインである。

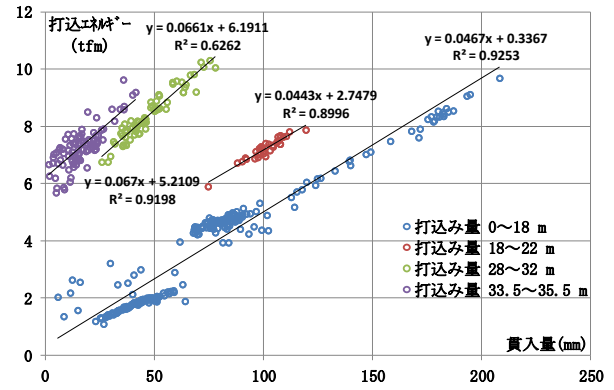


図-8 貫入量と打込みエネルギー

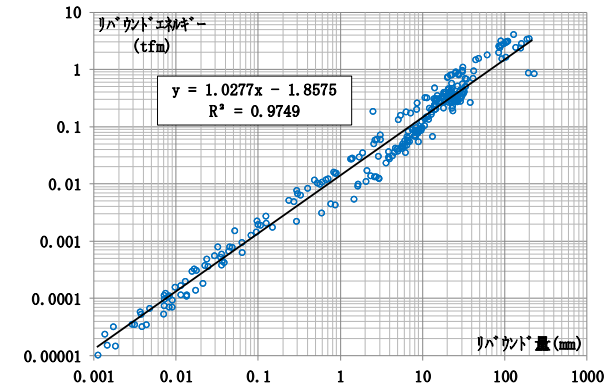


図-9 リバウンド量とリバウンドエネルギー

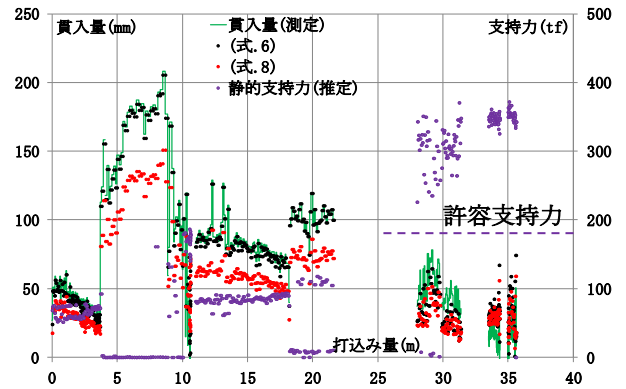


図-10 貫入量の推定

図-6 で貫入量とリバウンド量が概ね等しくなる打込み量 33.5 ～35.5 m の範囲は、ほぼ支持層に達していると思われるので、条件、

$$\delta_e = \delta_R$$

を追加すると、

$$\delta_e = \frac{f_m}{f_e + f_R} \delta_m + \frac{E_{mL} - E_{eL}}{f_e + f_R} \quad (\text{式. 6})$$

が得られ、図-10 の赤点となる。(式.5)の結果は全体的に実測貫入量に良く一致し、(式.6)の結果も打込み量 33.5 ～35.5 m の範囲ではかなり良く一致する。同範囲での実測の平均と最小値は平均 16 mm, 最小 2 mm, (式.5)では平均 31 mm, 最小 1 mm, (式.6)では平均 28 mm, 最小 7 mm となった。

また別途推定した静的支持力も、この時点で許容支持力を上回るものであった。

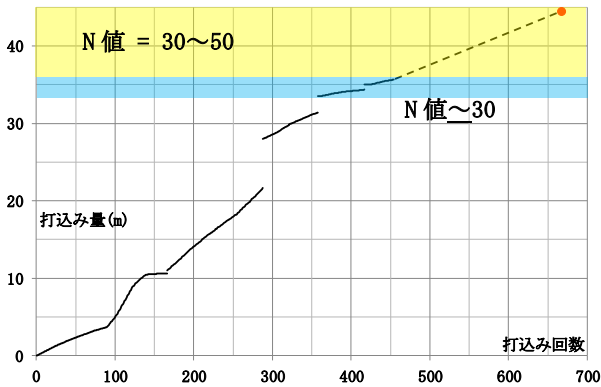


図-11 打込み量

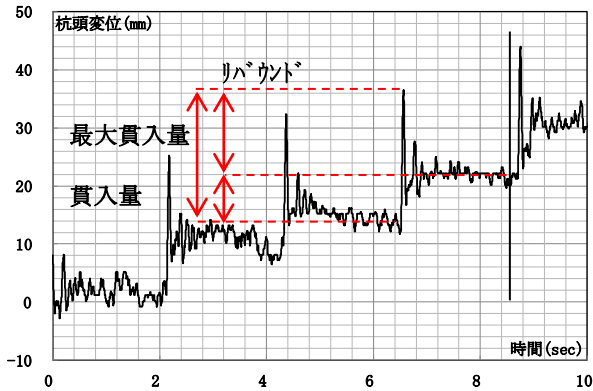


図-12 支持層での杭頭変位

8. ヤットコでの打込み時

図-11 に、打込み回数に対する打込み量を示す。図中の実線は加速度計の積算によるもので、点線部分は打撃回数と全打込み量の記録のみあり、ヤットコでの打込みになる。ヤットコ時の地盤 N 値は、その直前より最大で約 1.6 倍大きいにも関わらず、1 打撃当りの貫入量は平均で 38 mm に達し、先の結果の 1.5 倍になる。これはオペレータ判断でランマー打撃力が増加したためであるが、1 打撃当りの貫入量は、ランマー打撃力や重量に大きく影響され事が示されている。当然の事ながら最終打込み深度は設計上の支持層である。

それに対して図-12 は、ヤットコに貼りつけたターゲットを地表からレーザー変位計で測った杭の変位挙動である。最大貫入量 22 mm と大きいのが、それに応じてリバウンドも 14 mm と大きく、貫入量は 8 mm でリバウンドが最大貫入量の 50% を越え、リバウンドが貫入量より大きくなっている。ヤットコ直前では、リバウンドと貫入量はほぼ等しく、リバウンドが最大貫入量の 50% 程度だった。

9. まとめ

当該現場では、貫入量と打込みエネルギー、最大貫入量と入力エネルギー、リバウンド量とリバウンドエネルギーに良好な線形相関が認められて。リバウンドを除き、相関性は地盤の影響を強く受けると考えられ、リバウンドに関しては、地盤 N 値にもランマー打撃力にも無関係な相関となった。

相関関係に基づいた貫入量の推定は、全体的に測定値とかなり良く一致し、ほぼ支持層に達したと思われる範

囲では、貫入量とリバウンド量が等しいとした推定でも良く一致した。なお貫入量とリバウンド量が等しい条件は、リバウンド量が最大貫入量の 50% に達する事を意味する。また 1 打撃当りの貫入量はこの時点で、道路橋示方書の打止め目安を概ね満たす範囲であった。

エネルギーロスはその時点で、打込み開始時の 15~20 倍になっており、ランマー入力エネルギーの 50% 以上が失われたと考えられる。エネルギーロスは貫入量に依存しなかったため、散逸減衰および地盤や杭自体の速度に比例した構造減衰の可能性がある。

ヤットコでの打込み時では、設計地盤に達していたにも関わらず、1 打撃当りの平均貫入量はその直前よりも大きかった。これはランマー打撃力が増加したためと推察される。しかしながらリバウンド量は最大貫入量の 50% を越え、リバウンドが貫入量より大きくなり、貫入量が道示の打ち止め目安を満たす打撃も多くみられた。この時点では道路橋示方書による動的支持力¹⁾は許容支持力に達していなかったため、設計深度までの打込みが行われた。

当該現場で、ほぼ支持層に達する事、1 打撃当りの貫入量 2~10 mm 程度になる事、リバウンドが最大貫入量の 50% を越える事、エネルギーロスが急激に増大する事が現象として同時に起こったと考えられる。貫入量とリバウンド推定に用いた、貫入量と打込みエネルギーの相関関係は他現場でも同様である可能性はあると考えられるため、本事象が同時に起こったのは、偶然ではない可能性があり、杭基礎の安定性確保を条件に打込み深度 36.5 m のヤットコによる打込み前で打止めとした方が、より合理的であった可能性も否定できない。

以上の考察より、打込み杭の現場実施において杭打止め管理において、重要と考えられる項目を列記する。

- (1) 打込み深度から、設計上の支持層と同等程度の地盤に達したと考えられる。
- (2) ランマースペックによっては、過大に打込める現象も考えられるので、適切なランマー重量と打撃力を選択する。
- (3) 推定静的支持力が、許容支持力以上である。
- (4) 1 打撃当りの貫入量が 2~10 mm 程度である¹⁾。
- (5) リバウンドが最大貫入量の 50% 以上である。

実施に際しては、本事項を総合的に判断し杭支持機構を判断・評価するのが望ましいと考えられる。

なお、一連の現場計測実施および本報のとりまとめ精査に当たっては、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所と協議を行っている。

【参考文献】

- 1) 道路橋示方書・同解説IV.下部工編, pp.554~557, 日本道路協会, 平成 24 年.
- 2) 杭基礎施工便覧, pp.126~132, 日本道路協会, 平成 27 年.