

# 中掘り鋼管杭に関する動的支持力式の適用性

## — 特に補正係数 $e_0$ について —

富澤幸一\*\* 稲葉和寿\*\* 日下部祐基\*

### 1. はじめに

打込み杭の動的支持力式は種々提案されているが、いずれも動的貫入抵抗から静的な極限支持力を算定しようとするものであるため、原理的にその適用性におのずと限界があるとされている。そのため、現場では支持力算定式というよりは、あくまでも推定による打止め管理式という位置づけで、現在まで施工管理に運用されてきた。

しかしながら、杭の先端支持力については、杭打ちを巨大な動的貫入試験であるという立場からみると、動的支持力式の方が現行の  $N$  値を用いた静的支持力式より優位であるという見解<sup>1)</sup>もある。このため、杭の動的支持力式に対する適用性および使用上の留意点など種々の批判があるものの、打込み中の杭の挙動をよく理解した上でこれを利用するならば、実用的に有用なものと考えられる。

著者らは、動的支持力式の適用性を考える上で、現場での施工状況および支持力式の原理からも、打込みによる中掘り杭には油圧ハンマによる式を適用させ、現場管理すべきであるという考えを持っていた。そこで、今回現場において打込み杭の適切な打止め管理式を見いだすことを目的に、中掘り鋼管杭の打撃試験を実施した。本文では、波動理論の見地から特に打撃波の形状および波長に注目し、現行道橋示方書動的支持力式(以下、道示式)<sup>2)</sup>の誘導仮定の検証およびその適用性について検討を加えた。

### 2. 現場および試験概要

現場試験は、函館管内国道改良工事内での延長 200 m の擁壁工区および函渠工区の基礎工事で実施した。

擁壁および函渠工基礎は、現場条件より最終打撃工法による中掘り鋼管杭を採用している。鋼管杭の打設総本数は 135 本で、杭諸元は一律  $\phi 600$  mm,  $t=9$  mm としている。施工は中掘り機により支持層近くまでオーガー掘削し、最終の 2.5 D (D: 杭径) を打設する手順であるが、設計長は地盤線の傾斜により 11.5~14.0 m と変化させている。なお、中掘り機の打撃装置は、モンケン重量 8 ton の D-120H 型を使用し、ハンマ落下高さは 50 cm 一定とした。

本施工に先立ち、代表的な位置の 5 本を試験杭として選定し、打込み時に生じる種々の現象を観測し、支持力に関する施工管理を行うこととした。試験杭では通常の貫入量、リバウンド量、打撃回数などの打込み記録以外に、図-1 に示すように杭頭部にひずみゲージおよび変位センサーを設置し、打撃時の応力・波形および変位量を観測することとした。

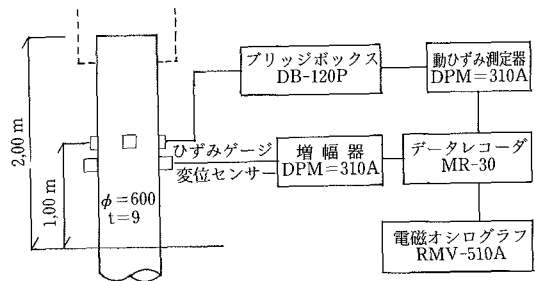


図-1 打撃試験計測ブロック

図-2 は、試験現場の土質柱状図である。現場地盤は、深は 10 m まで一部シルト層を介した  $N$  値 10 程度の砂質土層で、それ以深は支持層に相当する  $N$  値 30 以上の比較的密実な砂礫層という土層構成である。

\* 土質基礎研究室研究員 \*\* 函館開発建設部函館道路事務所第一工事課

また、本工事現場は振動、騒音規制法の対象となるため、これらの測定も実施した。測定結果によれば、振動では敷地境界線上で 70 dB、騒音では境界線より 30 m 離れた所で 80 ホーンで両値とも基準値以下の値となった。

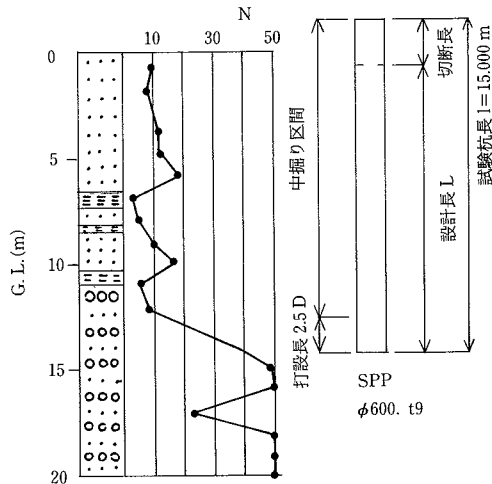


図-2 現場土質柱状図

### 3. 打撃試験結果

#### (1) リバウンド量 K・貫入量 S

試験杭の打込み管理記録によれば、支持地盤の付近から 1 打当たりの貫入量 S は直線的に減少し、それに伴いリバウンド量 K は増加収束する傾向を示した。貫入量 S とリバウンド量 K の関係に注目することにより、支持層をおおむね判断することが可能となるが、設計長打設時で貫入量 S は比較的大きいものの、S、K はほぼ安定した傾向が得られた。総打撃回数についてはほぼ 50~60 回程度である。

図-3 には、試験杭打止め時に変位センサーによって得られた杭頭変位の一例を示した。通常の鉛筆を使用した測定に対し、変位センサーを用いることにより、貫入量 S・リバウンド量 K を精度よく測定することができ、時間 t との関係も測定可能となった。図によれば、a 点から b 点にかけて杭頭が沈下し、b 点から c 点にかけて上向きにリバウンドしていることがわかる。a 点から c 点の変位差が貫入量 S (≒ 8 mm) で、b 点と c 点の変位差がリバウンド量 K (≒ 6 mm) である。a 点から b 点にかけては、ハンマの落下エネルギーが杭体へ伝播している工程であり、この間杭の貫入に有効な打撃応力が発生していることになる。応力発生時間 T はハンマ重量が大きいこ

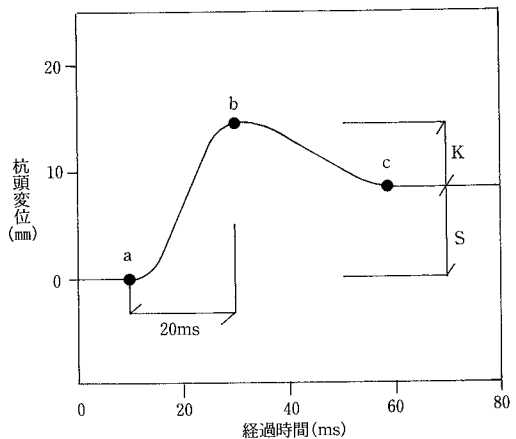


図-3 杭頭の時間(変位センサー)

ともあり、 $T=20.0$  ms と比較的大きな値が得られている。

また、一般にリバウンド量 K については、打撃初期に現われる杭体の弾性によるリバウンド  $K_0$  とその後遅れて現われる杭先端地盤のリバウンド  $K_s$  によって表わされるが、今回、貫入量 S が比較的大きいこともあり  $K_0$  と  $K_s$  を明確に分離した値は得られなかった。

#### (2) 打撃応力・波形

中掘り鋼管杭打設時に得られた実測波形と、一次元波動の基礎理論である St. Venant 解の基本波形<sup>3)</sup>を重ね合わせて比較したものを、図-4 に示した。

また、下式は St. Venant 解で打撃応力の第 1 ピーク値を求める式である。

$$\sigma_t = \sigma_0 \cdot e^{(-\gamma_H \cdot A_P / W_H \cdot C_P \cdot t)}$$

ここに、 $\sigma_0 = E_P / C_P \sqrt{2gH}$

$\sigma_t$  : 打撃応力の第 1 ピーク値 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_0$  : St. Venant 解の最大応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\gamma_H$  : 杭単位体積重量 ( $7.85 \times 10^{-3}$  kgf/cm<sup>3</sup>)

$A_P$  : 杭断面積 (cm<sup>2</sup>)

$W_H$  : ハンマ重量 (kgf)

$C_P$  : 杭弾性波速度 ( $5.12 \times 10^5$  cm/s)

$E_P$  : 杭弾性係数 ( $2.1 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>)

$g$  : 重力加速度 ( $9.8 \times 10^2$  cm/s<sup>2</sup>)

$H$  : ハンマ落下高 (cm)

$t_t$  については、ハンマ重量、クッションのパネ定数などにより定まるものである。通常のディーゼルハンマあるいは油圧ハンマの場合には、 $t_t=2\sim3$  (ms) 程度の範囲にあるとされている<sup>4)</sup>。図によれば、 $t_t=7$  (ms) と他の工法に比べて大きな値を示しているが、最大

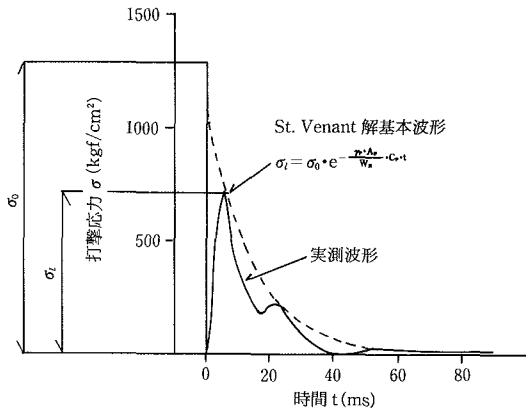


図-4 実測波形と St. Venant 解基本波形

応力  $\sigma_t$  が生じる時間  $t_t$  の位置で St. Venant 解の値と実測値が一致しており、それ以後の理論波形と実測波形もほぼ一致していることから、本中掘り鋼管杭の場合も波動理論による解析が可能であることがわかる。

また、ハンマ重量および落下高さについては、座屈応力での管理も必要となる。座屈に対する考え方は杭径、板厚などの関係で種々提案されており、SKK 41,  $t=9$  mm では座屈応力は  $\sigma_{cr}=3000$  kgf/cm<sup>2</sup> と推定される。実測打撃応力は貫入量  $S$  が大きかったこともあり  $1000$  kgf/cm<sup>2</sup> 以下と小さく、座屈に対しては問題ないものとなった。

#### 4. 動的支持力式

道路橋示方書では、従来まで用いられてきた Hiley 系式では、ひずみエネルギーの関係より、特に大口径杭でバラツキが大きくなるなどの理由から、宇都・冬木らの提案による打撃時の応力波を一次元の波動とする波動方程式<sup>5)6)</sup>による方法を採用している。

$$Ru = (AEK/e_0 \cdot l_1) + (\bar{N}U l_2/e_r)$$

ここに、 $Ru$  : 動的極限支持力式 (tf)

$A$  : 杭の純断面積 (m<sup>2</sup>)

$E$  : 杭のヤング係数 (tf/m<sup>2</sup>)

$l_1$  : 動的先端支持力算定上の杭長 (m)

$l_2$  : 地中部杭長 (m)

$\bar{N}$  : 杭周面平均  $N$  値

$U$  : 杭の周長 (m)

$K$  : リバウンド量 (m)

$e_0, e_r$  : 補正係数

しかしながら、この現行道示式は以下に示した種々の仮定および境界条件を設けており、実際の運用に

当たっては留意しなければならない点も数多い。

仮定条件

- ① 杭体を伝播する応力波は、一次元の波動として取扱い得る。
- ② 杭は全長にわたって断面積が等しく、均一である。
- ③ 杭周面の動摩擦力は無視する。
- ④ 杭頭の応力は、応力波先頭が杭体を一往復する時間  $T=2l/C$  継続して発生する。
- ⑤ 杭頭変位は、図-5 に示すように打撃後  $T$  時間で最大  $S+Ks+Ko$  となり、 $2T$  時間後に杭の弾性によるリバウンド  $Ko$  が生じて一定となる。
- ⑥ 杭先端変位は図-5 に示すように打撃後  $1/2 T$  から貫入が始まり、 $3/2 T$  で最大値  $S+Ks$  になり、その後はそのまま持続する。
- ⑦ 杭先端に発生する応力は、 $1/2 T$  から  $3/2 T$  までの平均値で評価する。

上記仮定の中で、仮定①、②、③は支持力式誘導の際の前提条件ではあるが、仮定④、⑤、⑥、⑦については、ディーゼルハンマによる標準的施工によるものである。

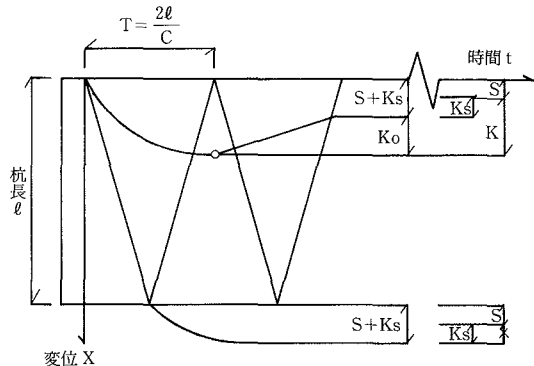


図-5 杭頭・杭先端の時間・変位の模型図

図-6 には、今回の打撃試験によって得られた時間と変位の関係の一例を示した。図によれば、応力波は仮定条件とは異なり、杭体を約 3.5 往復する時間  $T \approx 7l/C$  継続して発生しているのがわかる。これは杭長が極端に短い場合、あるいは油圧パイルハンマ施工による場合などのように、杭体に対しハンマ重量が大きい場合と同様の現象である。

(1) 先端支持力補正係数  $e_0$

$e_0$  は杭体に生じる応力波の波長とリバウンドに関する補正係数である。道示式では、補正係数  $e_0$  を打撃波長  $\lambda = 2 l' = 2e_0 \cdot l_1$  (ここに  $l'$ : 有効杭長、

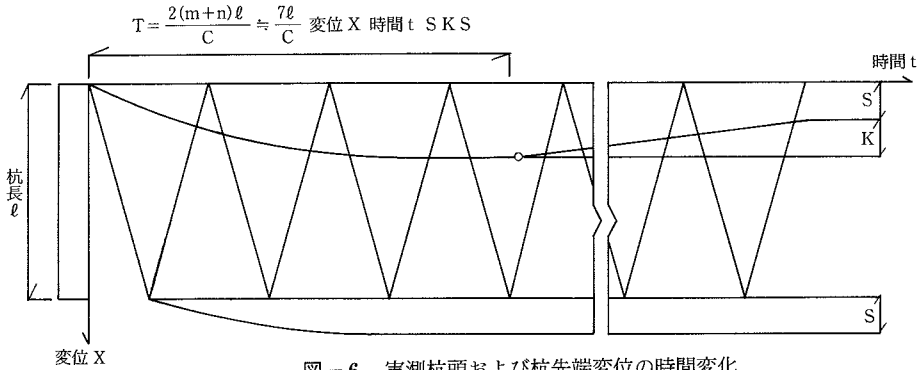


図-6 実測杭頭および杭先端変位の時間変化

$l_1$  : 動的支持力算定上の杭長)として、ハンマと杭の重量比  $W_H/W_P$  の関係より実験的に杭種、施工法別に設定している。先端支持力  $R_d$  については、その誘導仮定から  $R_d = AEK/l' = AEK/e_0 \cdot l_1$  としており、そのため、有効杭長  $l'$  を設定できれば算定が可能となる。

今回の打撃試験結果より有効杭長  $l'$  を直接決定すると、図-3によれば、実測応力発生時間  $T = 20.0$  ms であることから、打撃波長  $\lambda = T \cdot$  伝播速度  $C$  ( $C = \sqrt{E_p \cdot g/s}$ ) の関係より  $\lambda = 20.0/1000(s) \times 5.12(m/s) = 102.4(m)$  となり、実測有効杭長  $l'(1) = \lambda/2 = 51.2$  m が得られる。これに対して道示式で有効杭長  $l'(2)$  を求めると、中掘り杭最終打撃の補正係数  $e_0 = (1.5 W_H/W_P)$  から、 $l'(2) = e_0 \cdot l_1 = (1.5 \times 8^{1.0n}/1.965^{1.0n}) \times 15 m = 91$  m となり、実測有効杭長  $l'(1)$  に比べて大きくなり、先端支持力を過小評価することになる。

さらに、有効杭長  $l'$  の考え方は、本式の誘導仮定にある打撃波長  $\lambda$  はちょうど杭長  $l$  の2倍のときの現象を取扱うという条件を満たしていないことを考えると、本式に実測有効杭長  $l'(1)$  をそのまま代入して先端支持力  $R_d$  を求めることにも問題がある。油圧パイルハンマ施工研究報告書<sup>4)</sup>では、今回の現象のように波長が任意の場合の支持力式を誘導している。同報告書では、誘導仮定で打撃波長  $\lambda = 2(m+n)l_1$  とおき、先端支持力  $R_d$  を求める式を示している。

$$R_d = \frac{AEK}{(m+n)^2 l_1} \left\{ m+n+mn + \sum_{i=1}^{n-1} i \right\}$$

上式を、 $R_d = AEK/e_0 \cdot l_1$  の形に整理すると、

$$l'(3) = e_0 l_1 = (m+n)^2 / (m+n+mn + \sum_{i=1}^{n-1} i) \cdot l_1$$

ここに、 $m$  :  $S$ (貫入量)+ $K$ (リバウンド量)の最大値が発生する波と、先頭応力波との位相差

$n$  : 杭全長を応力波が往復する回数

実測打撃波長  $\lambda = 102.4(m)$  より  $m, n$  を求めると、 $m = 0.41, n = 3$  が得られる。これを式に代入して、 $l'(3) = 22.83$  m が得られる。

著者らは、先に打込み杭の打止め管理式の適用性について、過去に施工された実杭のデータを基に考察し、道示式の補正係数  $e_0$  が1を超える杭については、油圧ハンマの式の適用が妥当であることを示した<sup>7)</sup>。本試験杭の補正係数  $e_0 = 1.5 W_H/W_P = 6.11 > 1$  となる。そこで、補正係数  $e_0$  を道示に示された油圧ハンマでの  $e_0 = (1.5 W_H/W_P)^{1/3}$  として求めると、 $l'(4) = e_0 \cdot l_1 = (1.5 \times 8/1.965)^{1/3} \times 15 = 27.45$  m となり、先に求めた実測有効杭長  $l'(1)$  と比較すると、おおよそ1/2程度の値となる。

以上の結果より各有効杭長  $l'$  を比較すると、 $l'(2) = 91 > l'(1) = 51.2 > l'(4) = 27.45 > l'(3) = 22.0$  となる。理論計算上では、 $l'(3)$  が実際の支持力に最も近い値を示していることになる。

しかし、この式を施工管理に用いるには、各杭の打撃波長  $\lambda$  を測定する必要があり、現状での施工管理手法では困難である。

そこで、本現場の施工管理には  $l'(3)$  に近似して、しかも安全側の管理となる油圧ハンマの式による有効杭長  $l'(4)$  を用いることとした。

(2) 周面摩擦力補正係数  $e_f$

周面摩擦力  $f$  は Meyerhof が与えた  $N$  値との関係より、 $f = \bar{N} U l_2 / e_f$  で評価したもので、打込み管理記録 ( $K, S$ ) と無関係に地盤平均  $N$  値から得られており、安全側の支持力を与えるものである。そのた

め、静力学式の摩擦力  $f$  とは必ずしも一致せず、特に地盤別の分離をしていないため、粘性土地盤と砂質土地盤では大きな差異が生じてしまう。

今回の打撃試験からは周面摩擦力に関する資料を得るにはいたっていないが、今後種々の載荷試験を実施し、中掘り杭に限らず施工法・地盤別に応じた適切な補正係数  $e_f$  の決定が必要である。

## 5. まとめ

今回の打撃試験より、その主なものをまとめると次のようになる。

- ①本中掘り鋼管杭の最終打撃における打撃実測波形と St. Venant 解の理論波形を比較した結果、よい一致がみられたことから、本工法についても一次元波動理論による解析が可能であることが判明した。
- ②実測による有効杭長  $l'(1)$  と、道示式で示されている中掘り杭最終打撃の有効杭長  $l'(2)$  を比較した結果、大差が認められた。またこれらの値は、式の誘導仮定を満足していないことから道示式での打止め管理は不適当である。
- ③本杭のように、道示式の補正係数  $e_0$  が 1 を超える場合には、中掘り鋼管杭においても油圧ハンマの式の適用が妥当である。
- ④打撃時の応力発生時間を測定することにより、打撃波長  $\lambda$  を設定できれば、先端支持力  $R_d$  をより精度よく推定できる可能性がある。

以上、今回載荷試験は実施していないが、補正係数  $e_0$  を試験杭の打撃試験結果より妥当と考えられる油圧パイルハンマと同様の  $1/3$  乗とした値を用いた管理により、全杭静力学による設計支持力 ( $R_u=168\sim 183$  ton) を確保させることができた。

## 6. おわりに

近年、杭打ちの施工管理には、NCASE 法、DWAVE 解析法などの特殊なシステムの利用が提案<sup>8)</sup>されてきているが、通常の打込み杭の現場施工にお

いては、従来からの道示式により施工管理が行われている。ただし、道示式を利用する場合には、誘導の際種々の仮定が設けられており、必ずしも万能ではないことを認識する必要があるといえる。そのため、支持力算定は種々の打込み記録による総合的な判断が必要となる。

今回の打撃試験は道示式の適用性を検討する目的から試みたものであるが、機会があれば今後も現場試験により不明な点を究明し、現場に適した施工管理手法の確立に努めたいと考えている。本報文が、今後の杭打ち工事施工管理の一助になれば幸である。

なお、本報文をまとめるに当たり、当研究所能登繁幸構造部長および西川純一土質基礎研究室長には、多大な御助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土質工学会：杭基礎の設計法とその解説，p. 878～879，1985.12.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅳ下部構造編・同解説，p. 367～371，1990.2.
- 3) 鋼管杭協会：鋼管杭—その設計と施工—，p. 417～418，1990.
- 4) 低騒音型油圧パイルハンマ施工研究会：低騒音型油圧パイルハンマ施工研究会報告書，国土開発技術研究センター，p. 25～28，1984.9.
- 5) 宇都一馬，冬木 衛，小山 滋：波動理論に基づいた杭の動的支持力算定式の提案，第 14 回土質工学研究発表会，p. 901～904，1979.
- 6) 宇都一馬，冬木 衛：波動理論に基づいた杭の打止め管理式，第 15 回土質工学研究発表会，p. 949～952，1980.
- 7) 日下部祐基，富澤幸一：杭の打止め管理式の適用性について，開発土木研究所月報 No. 467，p. 15～18，1992.4.
- 8) 境 友昭ほか 5 名：杭の支持力の動的測定技術の開発(11)，第 26 回土質工学研究発表会，p. 1321～1322，1991.7.