

油圧ハンマーを用いた鋼管杭の打止め管理

佐原 守 石井 雄輔
(本社 晴海JV工事事務所)

清 広歳 宮崎 祐助

概要

埋立て地に建設される火力発電所の基礎として、油圧ハンマーを用いた打撃工法による鋼管杭を採用する計画があった。敷地が約330m×220mと広く、事前の地盤調査結果から、想定される支持層深度が敷地内で異なることが予想されていた。また、約7,200本の杭を短期間に打設する必要があり、落下機構の異なる油圧ハンマーを併用せざるを得ない状況にあった。このような条件の下で杭の要求性能を満足し、かつ予定工期限内に杭を打設するためには、支持層深度が異なる領域、および油圧ハンマーの違いによる打撃効率の差異等を明確にし、杭の打止め管理基準を事前に設定しておく必要があった。

本報では、上記の問題を解決することを目的として実施した杭打ち試験の結果、およびこれに基づいて提案した実用的な杭の打止め管理手法について紹介する。さらに、杭打ち試験で得た杭の打撃エネルギーと地盤のN値との相関を利用して地盤条件を適切に評価することによって、より合理的な打止め管理が可能であることを示す。

1. はじめに

埋立て地に建設される火力発電所の基礎として、直径600mmの鋼管杭を油圧ハンマーを用いた打撃工法によって施工する計画があった。杭の打止め管理を設定するにあたり、以下の問題点を解決しておく必要があった。1) 敷地内において支持層に設定した地層の層厚が薄く、所定の支持力を満足し得ない領域が混在していたため、これらの平面的な境界をあらかじめ明確に把握しておく必要があった。2) 杭頭における打撃効率が等価でかつ杭材の健全性を保ち得る適切なハンマー落下高さを提案するために、落下機構の異なる油圧ハンマーの機種やヤットコの使用の有無の組合せに応じて、それぞれの打撃効率を把握しておく必要があった。これらの問題を解決し、合理的な打止め管理を行うために、本設杭の打設に先立ち、杭打ち試験を実施することにした。

本報では、杭打ち試験の結果およびこれに基づいて提案した実用的な杭の打止め管理手法を紹介する。さらに、杭の打撃エネルギーと地盤のN値との相関を利用して地盤条件を適切に評価することによって、より合理的な打止め管理が可能であることを示す。

2. 杭工事の概要と試験杭の計画

Fig.1に代表的なボーリング柱状図を示す。当初、GL-40m以深に堆積する洪積砂層(以下、Ds4層と略記)を杭の支持層と想定したが、GL-25~-30mに堆積する洪積砂層(以下、Ds3層と略記)に打止めた杭の鉛直載荷試験を実

施した結果¹⁾、所定の支持力を満足することが確認できたため、基本的にDs3層を支持層に設定することとした。しかしながら、事前に実施したボーリング調査結果から、敷地内の一部の領域にはDs3層の層厚が薄く、支持層として不適切な領域も存在していることが判明し、この領域ではDs4層を支持層とする必要があった。Fig.2に事前のボーリング調査結果から想定したN値50以上のDs3層の厚さの平面分布図を示す。敷地の西部と南部の一部に層厚の薄い領域があり、この領域のDs3層は支持層として不適切であることが予想された。杭材を合理的に発注し、無駄を省くためには、Ds3層を支持層とする領域とDs4層を支持層とする領域の境界を明確にするとともに、敷地全体にわたって適切な打止め深度の平面分布を把握しておく必要があった。

約330m×220mと広範囲の敷地に、約7,200本と多数の鋼管杭を約5ヶ月の短期間に打込む必要があったため、最多時で25台の油圧ハンマーを使用した。油圧ハンマーの機種は、油圧シリンダーを用いてハンマーに下向きの加速度を与える機種と、自由落下させる機種の2種類に大別され、以後それぞれを加速型ハンマー、自由落下型ハンマーと略記する。適切な打止め管理基準を設定するためには、ハンマーの機種とヤットコの使用の有無に応じて杭頭における打撃効率の差異を把握し、打止め時の打撃効率が等価となり、かつ杭材の健全性を保ち得る適切なハンマー落下高さを提案しておく必要があった。

上記の問題を解決することを目的として、以下に示す2種類の杭打ち試験を計画した。

(1) 打止め深度の確認(打止め管理杭:146本) 支

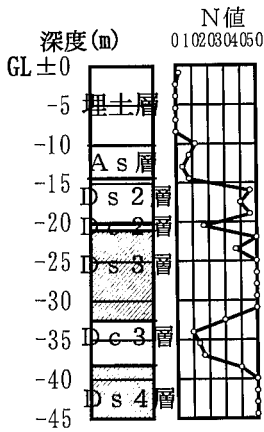


Fig. 1 代表的なボーリング柱状図
Typical Boring Log

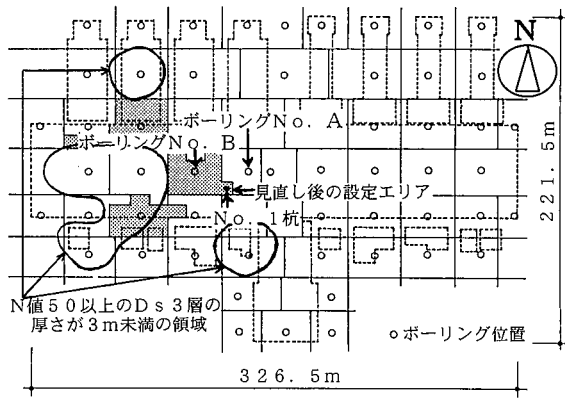


Fig. 2 敷地平面図
Site Plan

Table 1 杭・ヤットコ・油圧ハンマーの仕様

Specification of Pile, Follower, and Hydraulic Hammer

杭	長さ：22~30m(支持層：Ds3層) 32~43m(支持層：Ds4層) 直径：600mm, 板厚：9~14mm 先端補強バンド：t=12mm, w=300mm
ヤットコ	長さ：4~9m, 板厚：16mm
油圧ハンマー	加速型：型式(NH-100), クッション厚：269mm 自由落下型：型式(HNC-105), クッション厚：100mm

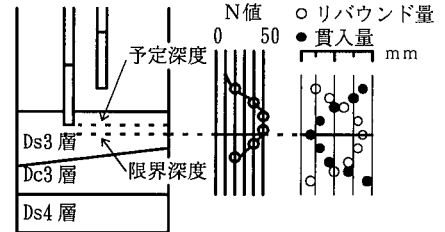


Fig. 3 貫入量とリバウンド量の深度分布の模式図
Relationship between Penetration and Rebound

持層深度の異なる領域を明確にするとともに、敷地全体にわたって適切な打止め深度の平面分布の把握を目的とする。試験杭は、敷地全体の傾向が把握できるように配置するとともに、事前のボーリング調査結果から想定したDs3層の厚さの薄い領域と厚い領域の境界域に特に密に配置するよう配慮した。取得した杭打ち記録は、各深度におけるハンマー落下高さ、貫入量・リバウンド量、および打撃回数である。

(2) 杭の打撃効率の確認(応力計測杭：6本) ハンマー機種・ハンマー落下高さ・ヤットコの使用の有無に応じた打撃効率の差異を把握することを目的とする。各ハンマー機種ごとに落下高さを変えた場合の、杭頭発生応力・貫入量・リバウンド量を計測した。なお、杭頭発生応力は、杭頭部から50cmの位置に歪みゲージを円周方向に4点貼付して計測した。

Table 1に杭・ヤットコ・油圧ハンマーの仕様を示す。

3. 杭打ち試験の結果に基づく打止め管理手法の提案

3.1 支持力算定式の選定

杭打設時のリバウンド量・貫入量等から杭の鉛直支持力を算定する支持力算定式^{2), 3)}がいくつか提案されている。後述するように、杭打設時の貫入量とリバウンド量は地盤の堆積状況と密接に関連しており、地盤が硬質なほど貫入量は小さく、リバウンド量は大きくなる(3.2.1参照)。したがって、支持力算定式のうちリバウンド量と支持力が反比例する式では、地盤が硬質となりリバウンド量が増加した場合、実際の支持力が大きくなるにもかかわらず、計算上の支持力は減少し、支持力を過小評価するといった問題がある。また、貫入量のみから支持力を算定する式では、施工の都合上で杭打ちを一旦休止した場合、時間の経過とともに杭の周面摩擦抵抗が回復するため、休止前と比較して再開時では貫入量が減少して、支持力を過大評価するといった問題がある。実際に、打止め直前で打込みを休止し1日程度放置した後再

打撃してみたところ、再開当初は貫入量が半減した。

打止め管理式として上記の問題がない宇都・冬木式(道路橋示方書・同解説の式)(1)式を、本工事における支持力算定式に採用することにした。(1)式では、杭の鉛直支持力を周面摩擦抵抗と先端支持力に分けて評価する。周面摩擦抵抗に関する補正係数 e_f は、鉛直載荷試験結果による実測周面摩擦抵抗値に整合させて6.0に設定した。また、(1)式は先端支持力をリバウンド量で評価する。したがって、適切なハンマー落下高さを提案するためには、施工能率が高くかつ杭材の健全性を保つことのみならず、安定したリバウンド量が得られることも考慮に入れておく必要がある。

$$R_a = \frac{1}{3} \left(\frac{AEK}{e_0 L_m} + \frac{NUL}{e_f} \right) \dots\dots\dots(1)$$

R_a ：杭の長期許容鉛直支持力(t_f)

A ：杭の実断面積(m^2)

E ：杭のヤング係数(t_f / m^2)

K ：リバウンド量(m)

$$e_0 : \text{補正係数} \left(= \left[1.5 \left(\frac{W_h}{W_p} \right) \right]^{1/3} \right)$$

(W_h ：ハンマーの重量, W_p ：杭の重量)

L_m ：杭先端からリバウンド測定位置までの長さ(m)

N ：杭周囲の平均N値

U ：杭の周長(m)

L ：周面摩擦力を評価する長さ(m)

e_f ：補正係数

3.2 杭打ち試験の結果と考察

3.2.1 打止め管理杭 Fig. 3は、Ds3層を打抜いた場合の貫入量とリバウンド量の深度分布の模式図である。杭先端が支持層と想定したDs3層に到達するまでは、貫入量が大きくリバウンド量が小さい状態にある。Ds3層に到達すると貫入量は減少し、リバウンド量が増大して、

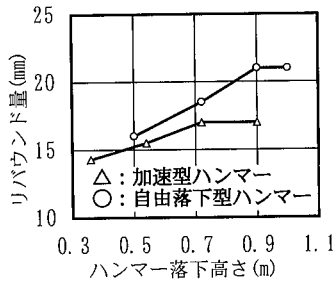


Fig. 4 ハンマー落下高さ～リバウンド量
Relationship between Hammer Height and Rebound

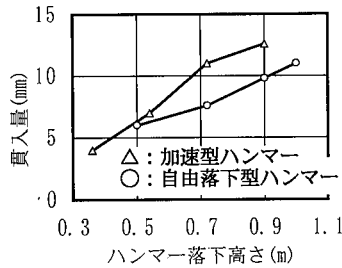


Fig. 5 ハンマー落下高さ～貫入量
Relationship between Hammer Height and Penetration

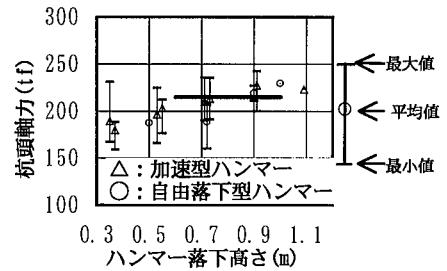


Fig. 6 ハンマー落下高さ～杭頭軸力
Relationship between Hammer Height and Pile Head Force

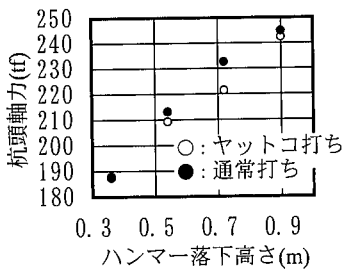


Fig. 7 ヤットコの使用の有無による杭頭軸力の比較

Comparison Direct Driving Force and Follower Driving Force

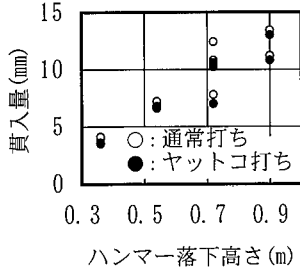


Fig. 8 ヤットコの使用の有無による貫入量の比較

Comparison Direct Driving Penetration and Follower Driving Penetration

両者の関係は逆転する。さらに杭を打設し杭先端が下部粘性土層の影響を受け始める深度に達すると、再び貫入量は増加しリバウンド量は減少し始める⁴⁾。地盤条件によって若干の変動はあるが、下部粘性土の影響が現れる深度は、Ds3層の下端から杭径の2.5倍(1.5m)程度上方であった。

ここでは、下部粘性土の影響が現れ始める深度を「限界深度」と定義し、限界深度以浅において次の2条件を満足する深度を「予定深度」として設定した。

- 1) 所定の支持力を上回る。
- 2) リバウンド量が貫入量を上回る。

限界深度を超えても上記2条件を満足できない場合には、原則としてDs4層まで杭を打設することになるが、Ds4層を支持層とする領域は当初想定していた領域とおおむね対応はしているものの、若干東側にズレていることを確認した。

3.2.2 応力計測杭 Fig. 4,5にハンマー落下高さとしリバウンド量の関係、ハンマー落下高さとし貫入量の関係を示す。ある落下高さ以上になると、リバウンド量は上限値に達して安定した状態になるのに対して、貫入量はハンマー落下高さの増大にともない増加していることがわかる。この理由は、ハンマー落下高さがある値以上になると、杭先端地盤が完全に塑性化して、それ以上落下高さを上げて地盤からの反力は一定のまま、貫入量のみが増大する状態に達しているため⁴⁾と考える。加速型ハンマーの場合は落下高さ0.72m以上で、自由落下型ハンマーの場合は0.90m以上でリバウンド量が一定となっている。Fig. 4,5に示したデータは、異なる地盤条件下において計測した値であったため、定性的な

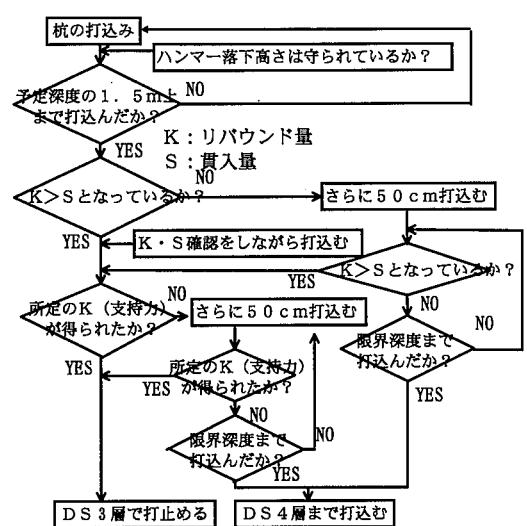


Fig. 9 杭の打止め管理フロー
Flow of Pile Driving Control

比較に留まり定量的な比較ができなかった。したがって、同一の地盤条件下において別途同様の杭打ち試験を実施した。その結果、加速型ハンマーで落下高さ0.72m、自由落下型ハンマーで落下高さ0.90mの際に発生するリバウンド量・貫入量が、おおむね等しいことを確認した。Fig. 6は、測定した動ひずみから杭頭軸力を算定し、油圧ハンマー機種が異なることによる杭頭軸力の差異を比較したものである。同一ハンマー落下高さで比較した場合、加速型ハンマーによる軸力が自由落下型ハンマーによる軸力を上回る傾向にあり、加速型ハンマーの落下高さ0.72mに対して自由落下型ハンマーの落下高さ0.90mで、ほぼ等しい軸力が発生している。また、この時発生する杭頭応力度は、杭材の許容応力度⁵⁾を下回っていることを確認した。

以上の計測結果を踏まえて、打止め時のハンマー落下高さを加速型ハンマーの場合0.72m、自由落下型ハンマーの場合0.90mに設定した。

Fig. 7,8にヤットコの使用の有無による杭頭軸力の比較、ヤットコの使用の有無による貫入量の比較を示す。打撃効率は、95～100%の間にあり、ヤットコを使用することによる打撃エネルギーの損失量は、工学上無視し得る程度である。したがって、ヤットコを使用した場合の打撃エネルギーの損失量を考慮しないことにした。

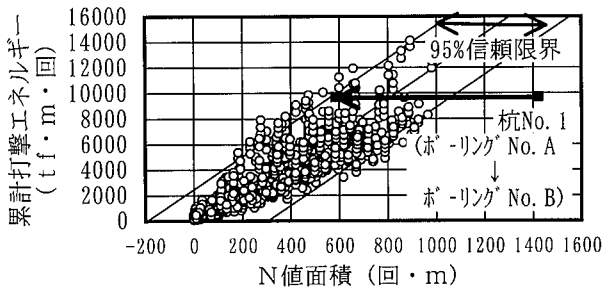


Fig.10 累計打撃エネルギー～N値面積 Relationship between Integrated Driving Energy and Integrated SPT N-value

3.3 打止め管理フロー

上記の検討結果に基づき、Fig. 9に示す打止め管理フローを作成し、同図を用いて本設杭の打止め管理を行うことを提案した。なお、打止め時の貫入量・リバウンド量は、局所的な地盤条件の変化にも対応できるように、その領域で設定した予定深度から1.5m浅い深度から計測することとし、3.2.1に示した2条件を満足する深度で杭を打止めることにした。

4. 杭打ち記録に基づく地盤条件の見直し

敷地内で調査した各ボーリング地点間の距離は約30～40mであり、これらの間を等分割するように敷地をエリア分けした。当初、各エリア内にある杭に関しては、対応する標準貫入試験結果に基づいて杭の周面摩擦力を算定することにした。しかしながら、エリア境界部の隣接する杭を打設した際に、杭の打撃に要するエネルギーや打止め時のリバウンド量がおおむね等しいにもかかわらず、想定するエリアが異なるために、算定支持力が大きく異なるという不都合が生じた。

Fig. 10は、地盤条件が明確な杭として、標準貫入試験を実施した地点から半径7.5m以内にある38本の打止め管理杭を選定し、杭の打撃に要するエネルギーと地盤のN値との関係を示したものである。ただし、杭の打撃エネルギーは(2)式で定義する累計打撃エネルギーを、また、地盤のN値に対応する指標として(3)式で定義するN値面積を採用している。また、N値には上限を設けず実測N値に基づく換算N値を採用し、検討の対象とした地盤は洪積層に限定した。

$$E(z) = \Sigma(n \cdot W \cdot H) \dots\dots\dots(2)$$

$$N(z) = \Sigma(N \cdot \Delta z) \dots\dots\dots(3)$$

$E(z)$ ：累計打撃エネルギー($tf \cdot m \cdot 回$)
 $N(z)$ ：N値面積($m \cdot 回$)、 n ：打撃回数(回)
 W ：ハンマー重量(tf)、 H ：ハンマー落下高さ(m)
 N ：N値(回)、 Δz ：N値の測定間隔(m)

$$N(z) = 0.078E(z) + 55.7 \dots\dots\dots(4)$$

Fig. 10から明らかなように、両者の間には比較的良好な相関性が認められ、N値面積が大きいほど杭の打込みに要する累計打撃エネルギーも大きくなるのがわかる。最小二乗法を用いて算定した相関式は(4)式のとおりである(相関係数0.86)。ここでは、Fig. 10の関係を

Table 2 エリアの見直しに関するデータの一例 A Typical Driving Data Concerned with Modified Area

	リバウンド量 (mm)	貫入量 (mm)	総打撃回数 (回)	長期許容鉛直支持力(t)	
				当りのエリア (ボーリングNo.A)	見直し後のエリア (ボーリングNo.B)
No. 1杭	19	6.8	1552	165	138
No. 2杭	20	6.1	1594	140	—

利用して地盤条件を見直すこととした。

Fig. 2に示すように、No.1杭はボーリングNo. Aで代表するエリアにあった。しかしながら、No.1杭の杭打ち記録はボーリングNo. AのN値と対応が悪く、むしろ隣接するボーリングNo. BのN値に良く対応していた。No.1杭に関して上記の整理を行った結果をFig. 10に示す。当初設定したボーリングNo. Aの場合、杭の打撃に要したエネルギーに比して地盤のN値が大きく、95%信頼限界を逸脱する。一方、ボーリングNo. Bを想定した場合には、若干N値を小さめに評価するものの95%信頼限界内に収まる結果が得られる。以上から、No.1杭近傍の地盤は、当初設定したボーリングNo. AよりもボーリングNo. Bで代表すべきと判断できる。このような考え方に基づいて、エリアの見直しを行った結果、連続的な支持力分布を示すより合理的な打止め管理を行うことが可能となった。エリアの見直しを図った結果をFig. 2に、具体的なデータの一例をTable 2に示す。

5. まとめ

支持層深度の異なる広い敷地に、約7,200本の鋼管杭を短期間に打設する工事に際して、杭打ち試験結果に基づく管理手法を提案し、さらに杭の打設に要する打撃エネルギーとN値との相関を用いて地盤条件を見直すことにより、実用的かつ合理的な杭の打止め管理が可能となった。

謝辞

本研究を進めるに当たって、打止め管理全般にわたり御指導頂きました東海大学・宇都一馬教授、ならびに東京電力(株)・東電設計(株)の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 工藤、他5名：千葉火力発電所1・2号系列新設工事における鋼管杭の打止め管理手法(その1：杭の鉛直載荷試験結果)、第32回地盤工学研究発表会、投稿中、(1997)
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、(1988)
- 3) 鋼管杭協会：建築の分野における鋼管杭の諸問題(建築鋼管杭研究会)上巻、p.2110～2132、(1983)
- 4) (財)国土開発技術研究センター：低騒音型油圧バイルハンマ施工研究報告書、(1984)
- 5) 鋼管杭協会：鋼管杭の打撃応力と適正ハンマ(鋼管杭協会特別技術委員会施工分科会)、p.75、(1982)