

出る杭は打たれる！－Great winds blow on high hills－

土質基礎研究室

秀でて人の役に立つ人間は尊ばれるが、自我ばかり押し通し強引に人の上に立とうとする人間は、妬まれ叩かれるのが、昔からの常です。

つまり“出る杭は打たれる”わけです。

海外にも、同じような諺があり、副題を直訳すると“高い山の頂上は風が強い”となり、同様のニュアンスになります。

この際の“出る杭”とは、まさに土木でいう基礎に用いる杭からきています。土木では、杭打ち工事はつきものですが、出来れば“出る杭”とはせずに、所定長打ち込めればいいのですが、支持層の傾斜などから高止まりが生じている事例もあり、対処法を考えれば

施工管理は以外と難しいものです。

ところで、土質基礎研究室が主催する全道の若手道路技術者を対象とした「土と基礎に関する若手勉強会」は、今年で第8回となりますが、本年度は「杭基礎」をテーマに平成12年8月22日に開催されました。この中で、やはり話題となっていたのは、会計検査対応を意識した杭基礎構造計算のチェックポイントと、支持力確認を主体とする杭基礎の施工管理でした。

そのため、ここでは現場でよく問題となる杭打ちに関する設問を取り上げ、特に直接施工管理に携わることの多い現場技術者を対象に、現在道路で用いられている杭打ち施工管理手法について解説します。

Q－1 動的支持力式で、リバウンド量 $K=0$ でも設計支持力を満足してしまふ場合は、どのように管理すればよいのでしょうか。

現場で動的支持力式を使って、一度でも杭打ち管理をしたことがある人なら、ありうる現象と納得する疑問です。

現在、道路では昭和55年道路橋示方書制定以来、杭打ち管理は、下式に示した波動方程式により導かれる方法を採用しています。

$$R_u = A \cdot E \cdot K / e_o \cdot L_1 + N \cdot U \cdot L_2 / e_f$$

R_u ：杭極限支持力 (kN)

A ：杭純断面積 (m^2)

E ：杭ヤング係数 (kN/m^2)

K ：リバウンド量 (m)

L_1 ：支持力算定上の杭長 (m)

L_2 ：地中部杭長 (m)

N ：杭周面平均N値

U ：杭周長 (m)

e_o, e_f ：杭とハンマに関する補正係数の誘導の際には、以下の仮定条件を設定しています。

1. 杭体を伝播する応力波は1次元波動とする。
2. 杭は断面積が等しく材質が均一である。
3. 杭周面の動摩擦力は無視する。

4. 杭応力は杭体を1往復する時間 $T = 2L/C$ 継続する。

5. 杭頭変位は時間 T 最大、 $2T$ 後に一定となる。

6. 杭先端変位は $1/2T$ 後に始まり $3/2T$ で最大となる。

7. 杭先端応力は $1/2T$ から $3/2T$ まで平均評価する。

そのため、この動的支持力式は仮定条件3からも分かるように、本来、第1項の先端支持力を算定するもので、最終系でトータル支持力が合致するように、第2項として周面摩擦力をMeyerhof式で付加したものです。

設問は、第2項の周面摩擦力のみで設計支持力を満足してしまうというケースのことです。そして、なぜ設問ようなケースが起きるかといえば、動力学式では静力学式と異なり周面摩擦力算定の際に、砂質土・粘性土の地盤種類別の違いによる区分がないからに外なりません。具体的には、たとえばN値が杭全長に渡って一様とした鋼管杭の場合、粘性土で対比すると、静力学に対し動力学式の周面摩擦力の値が0.4倍小さく

なり、砂質土では、逆に動力学式の周面摩擦力が2倍大きくなるわけです。つまり、地盤の周面摩擦が卓越した設問のケースでは、安易に動力学式を用いてはならないことになります。

しかし、それでは回答にならないので、現場管理の工夫として、以下⑤項目の試みの実施を提案します。

- ①. リバウンド量K以外の打込み管理記録にも注目し、支持層に適確に根入れされていることを確認する。
- ②. ジャスト・ポイントでのボーリング調査により支持層を明確にし、必要に応じ管内ボーリングにより打込み杭の先端閉塞効果を確認する。
- ③. その信頼性から、動力学周面摩擦力の項に静力学式で算定される周面摩擦力の適用を試みる。
- ④. 道路橋示方書の波動方程式以外の、Helley式・建設省告示5 S式・建築設計施工基準式などの他機関で用いられている算定式でも支持力検証する。
- ⑤. どうしても不明瞭な場合は、多少予算は必要とするがフリクションメーターによる周面摩擦力判定、動的載荷試験あるいは静的鉛直載荷試験を実施し極限支持力を明確にする。

現場条件によっては、以上のような総合的な判定による支持力評価も必要に応じて実施すべきであり、是非今後の現場管理の参考にして下さい。さらに、動力学式の使用上の留意点を2, 3述べます。動力学式に用いられるリバウンド量Kは、杭体リバウンド量Koと杭先端地盤リバウンド量Ksの和として表され、下式で示したように動力学式の誘導仮定で、杭先端地盤リバウンド量Ks=貫入量Sとしています。

$$A \cdot E \cdot (S + K_s + 2K_o) / 2e_o = A \cdot E \cdot K / e_o$$

つまり、打込み時点で貫入量Sがリバウンド量Kを上回るような状態では、この動力学式を使用してはならないことになります。なお、リバウンド測定の際、

杭が跳ね上がる瞬間に鉛筆を素早く横に動かすと、例外と簡単にKoとKsの分離測定が可能なので一度試してみてください。

また、先に波動方程式による動力学式の誘導仮定を示しましたが、7つの仮定のうち仮定条件4～7については、ディーゼルハンマによる標準的施工の観測結果によっています。ここでいう標準的施工とは、杭とハンマの重量がほぼ等しい場合の杭打ち施工のケースであり、たとえば、油圧ハンマ施工のように杭に対しハンマ重量が非常に大きい場合、逆に、長尺杭施工となり杭重量が大きくなる場合には、打撃波長が任意となり、下式により杭先端極限支持力が算定されます。

$$R_p = A \cdot E \cdot K(m+n)^2 L_1 \{m+n+mn+\Sigma i\}$$

R_p : 杭先端支持力 (KN)

m : S+K最大値の発生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

その際の補正係数 e_o は、 $e_o \div (m+n)^{1/3}$ に近似した形で求められます。そのため、油圧ハンマ・中掘りモンケン施工の場合は、道路橋示方書Ⅳ下部構造編に示されているように補正係数 e_o を1/3乗し $e_o = (1.5W_H / W_P)^{1/3}$ として杭支持力を算定する必要があります。

最後に動力学式の使用上の認識として、動的支持力式は、動的貫入抵抗によって地盤の静的な極限支持力を算定しようとするもので、原理的に自ずと限界があり、算定式というより管理式の位置付けで運用すべきであるという意見もあります。

しかしながら、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、現行のN値を主体とする静力学式より優位であるという考え方も成り立ち、動力学式は波動方程式以外にも種々提案されており、説明してきたように使用上の留意点はあるものの、打込み中の杭挙動をよく理解した上で使用するならば、これほど実用的に有用なものもないといえます。

Q-2 打込み杭が高止まりした場合、どのように対処すべきでしょうか。

決断の問題です。しかも、現場を長期間止めることは許されないので、早急な対応を要します。簡単にいえば、打込み杭が高止まり時点で杭が支持力的に問題ないと判断できれば杭は切断するし、所要の支持力が確保されていないとなれば中掘り工を併用してでも再打撃することになります。

ただし、決断理由は出来るかがり説明が可能な明確なものである必要があります。

つまり、打止めという技術的判断を下すのであれ

ば、少なくとも高止まりの主原因が支持層の不陸などからボーリングで予想したよりも支持深度が浅い位置にあり、杭貫入量が一般に打ち止めの目安と言われる $S = 2 \text{ mm}$ 以下と小さく、Q-1で提案した試みなどからも、先端閉塞効果も十分に発揮されており支持力的な問題はないという理由が必要です。

逆に、高止まりの理由が、打抜きが困難な中間層の存在・支持層以浅の周面抵抗増大による貫入不能・砂質地盤でみられる土の締め固め効果あるいは偏打などの

施工精度、特に鋼管矢板基礎であれば継手の競合い影響と判断されれば、杭の設計根入れ長決定条件の一つである鉛直支持力を満足していない場合もあります。その際はハンマ重量を大きくする・中掘り工実施による再打設・フリクションカッターを先端部に取り付けるなどの対策工が必要です。そのため、事前の試験杭打設によるその現場に合わせた管理手法を作っておく必要もあります。

しかし、いずれの判断を下したとしても安心はできず、クリアしなければならぬ問題があります。まず、高止まり杭の切断を決断したケースですが、1点目は杭に断面変化がある場合の継手位置の問題です。継手位置は、杭地中部曲げモーメントが杭頭剛結および杭頭ヒンジとした場合の最大曲げモーメント M_{max} の1/2以下となる位置に設ける必要があります、それが難しい状況であっても、少なくとも杭本体の実応力は確保しなければなりません。そのため、試験杭の打設状況などで高止まりが懸念される地盤では、予め継手位置を下げておく対応も必要です。また、特にPHC杭の杭頭をカットオフする場合は、有効プレストレスの減少にも注意を要します。事前の対応として、支持層の不陸傾斜はボーリングを出来るだけ密に行い、必要な限り想定しておくことは言うまでもありません。

2点目は、高止まり杭切断により、杭設計長が変化したことに対する基礎の安定性の再検討です。杭基礎の安定計算は通常、変位法設計によりおこなわれますが、杭長がそれぞれ違ってくると軸方向バネ定数 K_v が変化するため、杭一本当たりの杭頭反力が当然変わってきます。特に、実現象としても短杭に応力が集中することが懸念されるため、必ず実杭長で基礎の安定性を再照査しなければなりません。変位法計算は、三元連立方程式が解ければ、杭長が一本毎に変化しようが $K_h \cdot K_v$ がバラバラでも筆算でも可能なので、設計コンサルタントに頼らずに自分でトライしてみることを進めます。

次に、高止まり杭の再打設を決断した場合ですが、即応としてハンマ重量のランクを上げて再打設することがよく現場で実施されますが、その際杭体の座屈に対する事前検討が必要です。局部座屈に対する検証式は、板厚半径比 t/r の関係から種々提案されていますが、ハンマ打撃は少なくとも材料の降伏応力以下でおこなう必要があります。また、杭が長く突出状態にあるときはEulerの座屈公式で代表される長柱座屈に対



写真-1 杭高止まり状況

する検討も必要です。その他、実施工に際しては、打撃手法・補強材の入れ方・キャップやクッションの選定にも配慮すべきで、必要によっては、剛性コンクリートにより杭頭を補強することも考慮する必要があります。

写真は、杭が高止まりした現場の状況写真ですが、この現場は対応として油圧ハンマ杭打ち機のラム重量を $W_H = 7$ tonから10tonに変更し、ひずみゲージによる杭体打撃応力および動的波形を管理しながら再打設することにより、全杭所定長の打込みを全て完了しています。

次に中掘り工を併用する場合ですが、中掘りを実施するということは、本来杭が持っている管内閉塞効果を解放することに他ならないことから、予め計算あるいは試験杭によって支持力確保に影響を与えない範囲で、中掘り長を決定する必要があります。また、フリクションカットとして杭先端に補強バンドを設置して打設する場合についても、施工性はもちろんよくのですが、地盤性状によっては設計周面摩擦力を大きく低減させる可能性もあることから、補強バンドは6 mm程度に押さえるべきと考えます。

対応策としていかなる手法を選択してとしても、その理由および事前の検討が必要なわけです。

色々と述べてきましたが、いずれにしても、人も杭も“出る杭”とはならずすんなりとトラブルなしにいきたいものです。そのためには、事前の根回し、杭打ち工であれば綿密な事前調査工が非常に重要となってくるといえます。

(文責 富澤)