

杭の施工法と先端支持力について再考する

—摩擦杭を復活させよう(その2)—

(一社)基礎構造研究会代表理事 杉村義広

杭の先端支持力の問題は摩擦杭には縁が遠いように思われるが、市街地での打込み杭が禁止されて掘削を伴う工法による支持杭が主体的となっている今日では支持杭でも先端の挙動が意外に摩擦杭に似ている状況が見られる。それ故、今回は支持杭の先端の挙動について再考してみたい。

杭の先端支持力については歴史的に打込み支持杭が基本とされ、それとの比較として場所打ちコンクリート杭などの場合も考察することが行われて来ている。いしずえ通信で何度も書いたことであるが、打込み杭が杭径の10%沈下時が事実上の極限支持力になるということに倣って、その沈下時を“見かけの極限支持力”とか、“極限支持力の代わり”とかと称して基準にすることが基礎指針(2019)でも示されている〔筆者注:1988基礎指針では、この時の荷重を“基準支持力”と呼んで用語にも挙げられ、極限支持力とは区別することが明記されていたが、2001基礎指針以後、その用語が削除されてしまったので、いつの間にか“見かけの”とか、“代わりの”の言葉が抜けて極限支持力であるかのように混同して議論されるようになってしまっているのが現状である〕。昔は杭径1mに満たない50cm径や60cm径が最大の時代であったので、杭径の10%沈下時は5、6cm程度の沈下の範囲内が対象となり問題は少なかったのであるが、場所打ちコンクリート杭は大口径への道を歩き続け、今日では3mを超える場合も珍しくないほどになっている。そのために載荷試験自体が実施困難な状況であり、研究目的で大口径杭の支持力性状を調べる載荷試験を行って見たことがある。当初は直径を1m、2m、3mの3種類にする計画であったが、予算の関係で2種類に絞る必要が出て大口径とみなされる1.5mと2.5mを選定することに決め、支持メカニズムが複雑な拡底杭よりは単純なストレート杭を対象とすることにし、10%沈下時の状況をつぶさに調べることにした。杭先端下部の地盤の挙動を詳細に見出すことを主目的の一つとしたが、2.5m径の杭については残念ながら電気システムのトラブルがあって詳細な計測が不可能となったが、1.5m径の杭については計測出来たので考察の対象とした。何度も使っているその図-17〔杭の10%沈下時の先端以深の地盤の動き〕を右に示すが、杭先端直下では矢印が垂直下方へ向いて沈下しており、下部になるほど45°方向へ動いていることが見られた。この動きは杭先端での地盤の支持力がそれほど大きくはないので、周面摩擦力の抵抗を受けながら杭がズブズブと貫入していると考えられた。そのことから、筆者は“杭先端のパンチングシア状態での貫入”と呼ぶことにしている。事実、1.5mと2.5mの2本の杭の先端面積に対する基準支持力度〔黒丸〕をほかの文献の結果〔白丸〕も含めて示すと図-19のようになって右下がり45°の直線となっている。これは、杭1本当当たりの支持力(MN)

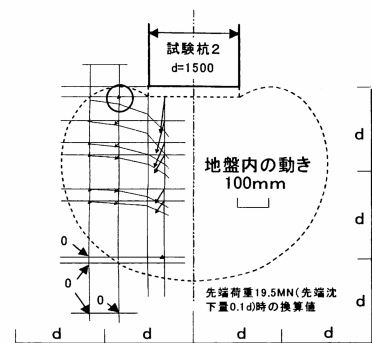


図-17 試験杭2の杭先端付近での地盤の動き

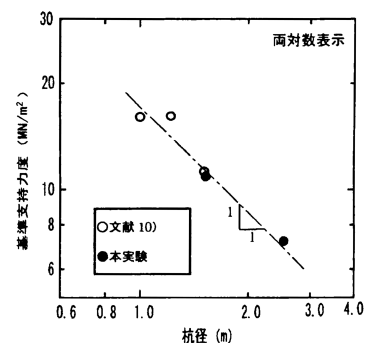


図-19 杭径と基準支持力度

に表現し直すと杭径に比例する関係になっていることを示している。すなわち、場所打ちコンクリート杭は掘削による応力解放の影響を大きく受け、掘削底面のリバウンドによる緩みが生じたための現象と考えられる。またスライム処理の影響も受けていたかとの想像も加わることで、摩擦杭に近い挙動を示す状況にあったと思わせるものである。それ故、筆者は「場所打ちコンクリートは摩擦杭である」と言い続けて来ているのである。

これもよく使うグラフであるがBCP委員会の実験（打込み杭と埋込み杭の載荷試験を比較したもの）を1988基礎指針が引用した図6.2.1を右に示す。掘削を伴うという意味では場所打ちコンクリート杭は埋込み杭に通じるので、その点も意識しながら極限支持力について再考してみる。試験杭は実験用として繰り返し使えるように製作された20cm径の鋼管杭の特殊なものであるが、打込み杭と埋込み杭の10% (0.1D) 沈下時を示した20mmの赤丸印同士の荷重は倍半分ほどの差がある。また、杭径の1.5D (300mm) での打込み杭の四角印〔真の極限支持力〕と埋込み杭の赤丸印〔真の極限支持力4.5Dがグラフの下方に飛び出してしまうので代わりに選んだ見かけの極限支持力〕は、ほぼ同じ荷重値となっていることも見られる。また、埋込み杭の真の極限支持力では沈下量が格段に大きいところで生じるが、荷重は見かけの極限支持力とほとんど変わらない大きさである。

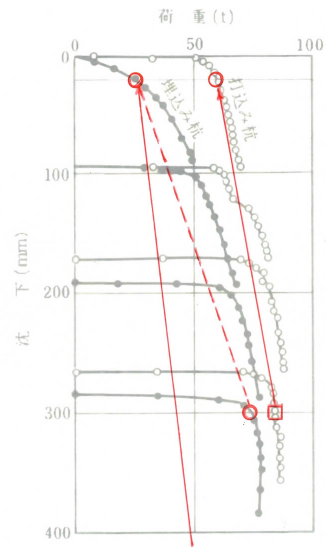
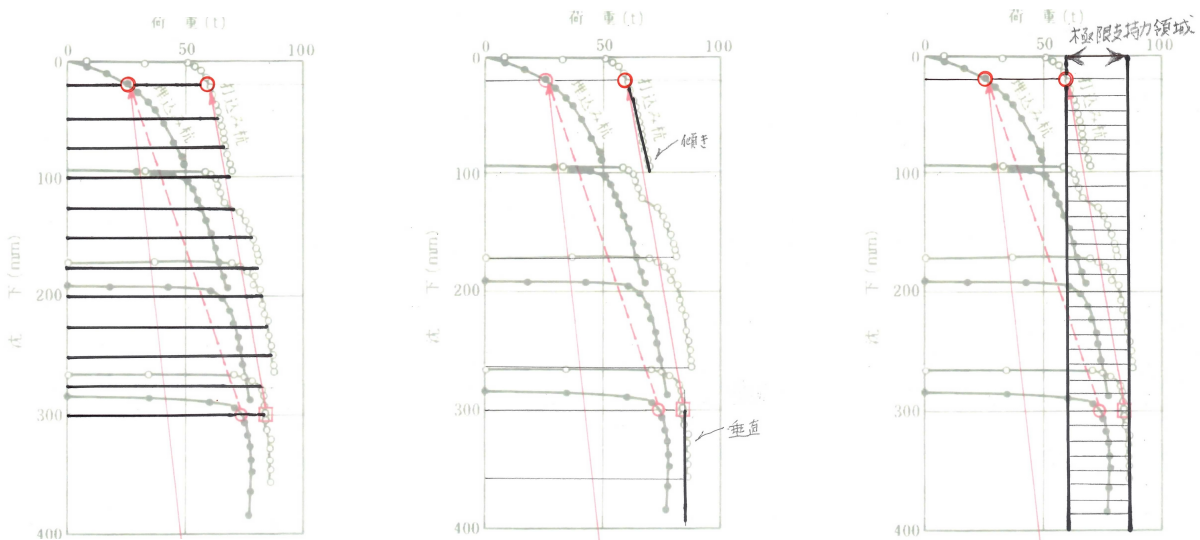


図6.2.1 打込み杭と埋込み杭の先端荷重—沈下関係の相違^{6.2.1)}

そこで真の極限支持力とは何かをもう一度考察するために打込み杭の場合の荷重-沈下曲線に注目してみる。各段階での荷重の大きさを横線で示したものを下図の左に示し、中央の図では杭の10% (0.1D) 沈下時と300mm (1.5D) 沈下時以降の沈下も含めての荷重-沈下関係の変化状況を示す。これらの図からは0.1D沈下時ではまだ荷重が増えて行く傾向が残っていること、それに対して300mm (1.5D) では、それ以上は荷重が上がりなくなって一定値に至っている状況が読み取れる。それより大きな荷重の載荷を試みても、支持層が“これ以上は支持することが出来ません”と応えているわけで、その状態を極限支持力と言うのである。“極限支持力とは荷重-沈下曲線が沈下軸に平行になる点”と定義される所以である。



荷重のみに注目した場合(左)、荷重-沈下の傾きに注目した場合(中央)、極限領域の表示(右)

実際、筆者も学生時代に杭の載荷試験のダイヤルゲージ測定員として携わったことがあるが、荷重の小さい間は将棋盤などを持ち込んで指す時間がたつぷりあるが、荷重が大きくなると急に沈下が大きくなりだして危険を感じるほどになり、測定していた杭頭周囲から離れることを何度も経験している。ダイヤルゲージの読み取りも素早く終えては所定の位置を離れるなどの繰り返して、緊張が高まる中での計測であったことを覚えている。

BCP 委員会の実験は 20cm 径の杭であったから真の極限支持力までの載荷が可能であったと思われるが、それでも危険性については十分配慮しての実験であったものと推測される。通常の実大杭では危険過ぎて実験はほとんど不可能なので、真の極限支持力というものを体験した人はいないのが実態であると思われる。

それは兎も角として BCP 委員会の結果では、打込み杭の真の極限支持力は杭径の $1.5D$ 倍であり、国際的なコンセンサスとなっている杭径の 10% ($0.1D$) とは随分離れている。そのことを考えて右の図では両者を含む領域を図示してみた。これを“極限支持力領域”と呼ぶことにすれば〔定義と考えてもよい〕、杭径の 10% ($0.1D$) 沈下時はその入り口にあたっていることに気づくであろう。このことから打込み杭の場合には杭径の 10% ($0.1D$) 沈下時は“事実上の極限支持力”であり、国際的なコンセンサスとも呼応することが分かる。

埋込み杭の場合は、BCP 委員会の実験結果では真の極限支持力が $4.5D$ であるが、見かけの極限支持力として選んだ 300mm 沈下 ($1.5D$) 時もこの領域内にあるので問題はなく、結局、〈杭の極限支持力とは杭の施工法によらず支持層の性質で決まるものだ〉との結論も検証されたことになる。残る問題は、埋込み杭、掘削を伴うという意味では場所打ちコンクリート杭の場合も含めて、杭径の 10% ($0.1D$) 沈下時は極限支持力領域とはかけ離れた半分程度の荷重領域に位置することである。基礎指針が言う“みかけの極限支持力”とか“極限支持力の代わり”とかと言えないのも明らかであり、筆者が“基準支持力”という言い方に拘泥する理由はここにあることも理解していただけるであろう。

場所打ちコンクリート杭は〔高支持杭など埋込み杭も含めて〕大口径化の道を進むばかりであることを考えると、沈下量も現実的ではない値になることも考慮する必要が出て来るので、前述した摩擦杭的な性質のほかには杭径の 10% ($0.1D$) 沈下時という基準もそろそろ考え直し、沈下量そのものを基準に考えるべき時期に来ているということも言い添えておきたい。

筆者注：杭径が 1m 以下の時代には場所打ちコンクリート杭の載荷試験も多くなされており、研究的資料も多く残っている。したがって、最大値を 1m とすれば $0.1D$ は 10cm となり、それ以上の杭径に対してはその値までを基準とすれば、従来との関連性も保ててよいのではないかと筆者は持っている。大口径杭の場合も、出来ればそこまで載荷試験は行うことを原則として行うこと、繰り返し載荷を採用することでおねを求めることなど、沈下量を基準としての設計へ変換して行くべきであろうことは別の機会に再度考察してみたい。