

杭の載荷試験の意義と設計への適用

Pile Loading Tests: Past, Present and Future

杉 村 義 広 (すぎむら よしひろ)

東北大学工学部建築学科

1. はじめに

1993年6月に改訂出版された土質工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法 JSF 1811-1993(以下基準¹⁾と呼ぶ)」は最近の技術の進歩や研究の成果を最大限に導入しようという意図がみられ、しかも国際的な視野に立って考えられているので、現時点では載荷試験のバイブル的存在であると思う。この基準に関連させて、あまり多いとはいえないが載荷試験を行った経験と見聞とをあわせて載荷試験の意義と設計への適用に関して問題となる点を考えてみたい。ただし、ここでは鉛直載荷試験を中心とする。

2. 設計支持力は載荷試験で決めるのが原則

最近、載荷試験を設計支持力の3倍までで止めたとか、載荷装置の能力不足で極限支持力は確認できなかった、さらには載荷試験そのものを省略したなどと聞くことが多くなった。使用される杭が大口径の長尺杭であることが多くなって、それらに対して載荷試験を行うことは費用がかかりすぎるとするのが理由であり、経済的な理由をあげられると妙に納得してしまう風潮が出てきているようである。しかしよく考えてみると、これは本末転倒なのである。技術的には、従来から杭の支持力は載荷試験に基づいて決めるのが原則とされているし、経験のない新しい杭であるからこそ載荷試験で確認するべきであり、これらの正論は当然守られなければならないからである。基準¹⁾では載荷試験の目的を標準試験と確認試験とに分けているが、後者は上記の経済的理由との妥協の気配もあるので、ここでは載荷試験はすべて標準試験とすべきであるとあえて主張したい。なぜなら、載荷試験はそれ以後の第3者に対して技術的、学術的に十分耐えうる情報を提供する使命があるからである。また、そのためには第3者がその情報に対して、例えば使用料を支払うというシステム、すなわち知的所有権が認められるような社会になる必要もありそうである。

建築の分野に限られるが、場所打ちコンクリート杭については建築センターの指導値と通称されている長期許容支持力の慣用値 250 tf/m^2 というものがあって、仮に載荷試験で調べてみても結局はこの値の方で決められてしまうので、試験をする意欲をなくさせているのが載荷試験軽視の原因の一つであるということも聞いている。この慣用値は、“先端支持力重視の考えで、面積比例型の抵抗力を基本とし、大略1m程度までの杭径に対するトータルの長期許容支持力”を表現したものと解釈さ

れるが、従来の小口径杭に対してはかなりいい線をしていると聞いている。しかし、最近の大口径杭に対しては以下のような問題点がある。

- (1) 先端支持力は面積比例型か？(東京都などではすでに直径比例型の指導値を示している)
- (2) 周面摩擦力と先端支持力の発揮度合いは？(支持力メカニズムはむしろ摩擦杭的である)
- (3) 小口径杭に適用される慣用値あるいは設計式を外挿できるか？

大口径杭に関しては「土と基礎」の1980年11月号に特集されており、そこでは杭径が場所打ちコンクリート杭では1m(できれば2m)以上、既製杭(既製コンクリート杭、鋼管杭)では0.7m以上を目安とされ、それを超える杭について種々の問題点が論議されている^{2)~5)}。今日の感覚では、前者に対しては1.5~2m以上、後者に対しては1m以上が大口径というにふさわしいという気もするが、とりあえず上記の言い方にならない、ここでは場所打ちコンクリート杭では1m未満、既製杭では0.7m未満を小口径、それ以上を大口径ということにする。したがって、以下の問題点はほとんどが大口径杭、そのうちでも場所打ちコンクリート杭に関するものということになる。

3. 真の極限支持力を見い出すのは不可能に近い

極限支持力とは、ある荷重段階で沈下が進む一方となる(荷重-沈下関係が沈下軸と平行になる)ときのその荷重値と定義できる。ただし、実際にはこのような状態になる荷重を見い出すのは非常に困難であること、荷重-沈下のグラフにはある種のマジックが秘められていることに注意する必要がある。図-1はC. van der Veen⁶⁾(ファンデルビーン)の指摘した図に基づいて作成し直したものであるが、四つの荷重-沈下関係が実は同一のデータをプロットしたものであると信じられるだろうか。曲線aは極限支持力状態にはまだほど遠いが、曲線dになるにつれてほぼその状態になっているとみえるのではないか。このマジックは荷重軸は同一としたままで、沈下軸のスケールのみ変化させて描いたことによる(すなわち最大沈下量はa~dで同一の値)。図-1にスケールを入れなかったのはこの理由であり、両軸のプロポーシオンによって印象がかなり変わること留意されたい。基準¹⁾では最大荷重と最大沈下量のグラフ上での長さの比が1:0.7~1.3程度であることを推奨しているが、実はこれらの範囲に相当する図として示

したのが曲線 b と c である。この二つの曲線間でも極限支持力の判定に関しては印象がかなり違う。一般に荷重-沈下関係のグラフを作成しながら載荷試験を行うことが多いが、初期段階では沈下量の変化具合を詳細に知りたいということもあって沈下量のスケールの倍率を c のように大きくとる傾向がある。そのグラフを極限荷重付近まで用いていると、上述したように鉛直軸に平行になりつつあると強調された判断をしがちなので、b に近いグラフを別に用意しておいて両者を比較しながら試験を進めるようにするのがよい。

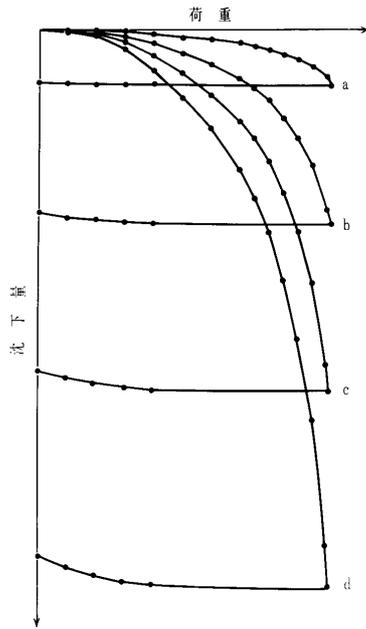


図-1 荷重-沈下関係のグラフのマジック

図-2 は直径20 cm の先端閉塞鋼管杭を比較的均一な砂層に打込みと埋込みの方法で設置した後載荷した例であり⁷⁾、初期の段階では両者の沈下量に差があるが、杭径の2倍程度まで押し込むと両者とも同程度の支持力を示し、沈下軸にほぼ平行な関係、すなわち極限状態に達していることがみられる。このように、真の極限支持力は比較的均一な層で杭径の数倍押し込むという条件がそろわないと、なかなか見い出せない。

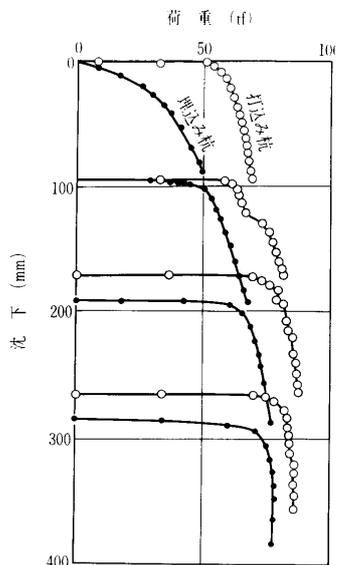


図-2 打込み杭と埋込み杭の先端荷重-沈下関係

4. 沈下を杭径比で表すのは妥当か

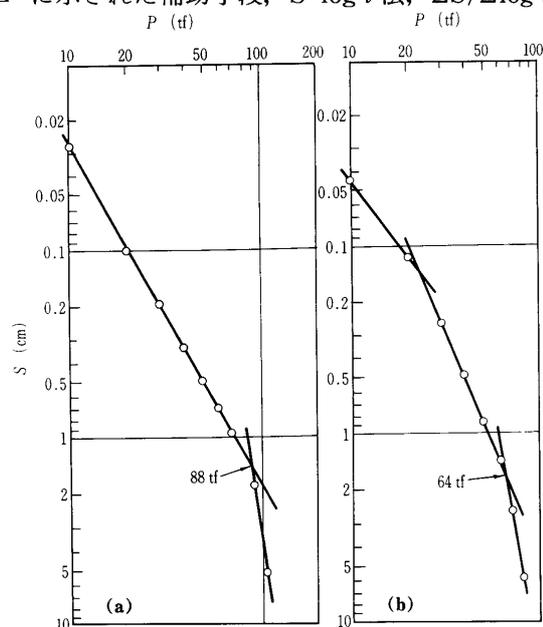
厳密な意味で極限支持力を見出すのはむしろ不可能に近いことに配慮して、基準¹⁾では次のように規定している。「第2限界荷重は、杭先端直径の10%相当の杭先端沈下量が生じたときの荷重と杭頭の荷重-沈下量曲線が沈下量軸にほぼ平行とみなされる荷重のうち、小さい方とする。ただし杭先端沈下量の代わりに杭頭沈下量を採用してもよい。」これは沈下量の概念を導入して、より実際の極限支持力を判定する方法を併用したものである。この0.1d (d: 杭径) という沈下量は、図-2にもみられるように打込み杭では実用的な意味でほぼ極限状態を表すということが定説になっており、各国の基準に採用されている例も多い(基準¹⁾の付録2参照)。

建築学会の基礎構造設計指針⁸⁾では、場所打ちコンクリート杭に対してもこの沈下量をあてて、そのときの荷重を基準支持力と呼んで極限支持力に代わって設計支持力を求める基準にしている。実は、この基準支持力の決め方には、打込み杭の場合と違って設計上注意すべき重要な問題が含まれているのである。すなわち、打込み杭の場合はほとんどが小口径で、仮に杭径が1mとしても基準にする沈下量は最大で10cmであり、安全率で除した設計支持力に対応する沈下量は数mmのオーダーとなるので問題はないが、場所打ちコンクリート杭の場合は2mや3mあるいはそれ以上の杭径のものが使用され出しているので事情が異なる。このような杭の場合には20cmや30cmあるいはそれ以上の沈下量での値を基準とすることになり、設計支持力に対応する沈下量が大きくなりすぎないかという疑問が生じる。長期許容支持力は荷重に対する安全率のみでなく、沈下量も数mmであることを設計判断に入れて決めるのが通常である。したがって、この程度の沈下量で収まるようにするためには、基準支持力の決定に際してもある程度絶対沈下量の概念を導入しておく必要がある。例えば、この量を20cmとして「沈下量が0.1dあるいは20cmの小さい方の値に達したときの荷重を基準支持力とする」などである。このことによって、荷重のみでなく沈下量に対しても安全率の概念を導入したことになる。今後、設計上問題となるのは、今ここで仮に20cmとした基準支持力決定用の絶対沈下量が実際にはどの程度に設定するのが妥当かを検討することである。これはあくまでも設計者の判断事項であるが、その支援のためにも大口径杭の載荷試験(それも十分な沈下量を与える試験)が必要とされる。

5. log P-log S の折れ点はいくつも生じる

基準¹⁾では「第1限界荷重は log P-log S 曲線に現れる明確な折れ点の荷重をいい、S-log t 法、 $\Delta S/\Delta \log t$ -P 法、残留沈下量の急増点などを総合して判定する」(P: 荷重, S: 沈下量, t: 処女荷重における経過時間)とある。これは従来降伏荷重と呼ばれていたものである。ところで、載荷試験結果の整理の際に log P-log S の折れ点が複数生じること、それも荷重段階を詳細に

プロットすればするほど、その傾向が強くなることを経験した人は少なくないと思う。図—3はその一例を示すものである（実験条件の詳細は省略する）。同図(a)は2本の直線で近似でき、折れ点の一つとなる（したがって降伏荷重は88tfと推定される）が、(b)はどうみても複数の折れ点があると判断せざるを得ない（したがって概略の全周面摩擦力をあらかじめ推定しておき、それに近い荷重を示す折れ点である64tfと推定する）。(a)は均一な単一層からなる地盤、(b)は軟弱な多層地盤であり、どちらも中位の長さの杭で先端には明確な支持層がなく、したがって摩擦杭ともいふべき場合である。これらの折れ点が杭周面摩擦力の降伏を意味すること、載荷試験時の杭軸ひずみが一般には深さ方向に逆三角形に近い分布となることを考えあわせれば、杭頭部から順に摩擦力が降伏すると考えるのが合理的であり、(b)の多層地盤ほど各層ごとの降伏現象が顕著に出やすいために明確な折れ点が複数生じたと解釈できるわけである。基準¹⁾に示された補助手段、 S - $\log t$ 法、 $\Delta S/\Delta \log t$ - P 法、



図—3 $\log P$ - $\log S$ 関係の折れ点判定の例

残留沈下量の急増点などは、これら複数の折れ点が生じた時に最も妥当な値を選定するための有力な支援方法でもある。

なお、ここに示したような周面摩擦卓越型の杭の場合は、それぞれ第1限界荷重と判定された荷重をそのまま事実上の極限支持力と考えておいた方がよい。なぜなら、杭先端以深には明確な支持層がないので、それ以上の支持力を期待できないと考えておく必要があるからである。埋込み杭や場所打ちコンクリート杭もこれに似た荷重-沈下関係を示すことが多いが、先端を支持層内に根入れし、根固めやスライム処理を十分に行った場合は、図—2に例示したように沈下量（杭径の数倍を必要とする）が大きくなると打込み杭と変わらない先端支持力を示すようになる。すなわち、直径など杭の諸元が同じならば杭先端の極限支持力は支持層の性質で決まり、杭施工法の差異はそれに至るまでの経過で現れるのみと考えてよ

い。杭先端支持力のメカニズムと杭施工法との関係については、岸田・高野の文献⁹⁾に詳しいので参照されたい。

6. 載荷方法等の工夫が必要

杭の支持力メカニズムを理想的な形で調べるには、従来から行われている杭頭載荷方式が最善であることには変わりはない。その場合、基準¹⁾では地盤沈下地帯で負の摩擦力がかかると予想される場合には支持力効果に加算させないために該当する地層部分のフリクションカットを行うことを推奨している。また、計画最大荷重を抑えるための手段として先端支持力確認用と周面摩擦力確認用の杭に分けて、それぞれ試験を行うことも示唆している。すなわち、前者では杭周面のフリクションカットを施し、後者では杭先端部に意図的に厚いスライム層を作って先端抵抗力を小さくするなどの工夫である。この場合には、両者を合成して設計支持力を設定する際に沈下量の適合性を十分に考慮することが重要な条件となるが、費用のかかる大口径杭の載荷試験の実施に対しては有力な手段であると言える。

最近の傾向として、載荷方法そのものに新しい提案をする研究も増えている。杭先端にジャッキを入れて杭を押し上げる、いわゆる杭先端載荷試験がよい例で、実用の段階に入ってきたとみてよい¹⁰⁾。この場合、杭自重と周面摩擦力の和が最大反力となるので、その荷重までしか試験ができないこと、軸ひずみ分布が杭頭載荷の場合と逆になることなどが特徴（ある意味で欠点）であるが、通常の載荷試験では杭先端到達荷重が十分に大きくないうちに終了というケースが多いのに対して、この方法はかなりの荷重段階まで先端支持力を直接に調べることができ、そのメカニズムの検討が可能になるという点が最大の長所である。先端地盤が砂礫層などでしっかりしたものであれば問題ないが、砂層などの場合はときにジャッキのセット時にゆるめるなど施工面での問題があるとも聞いている。しかし、それは経験を積むうちに解決される類の問題であり、杭頭に上載荷重を用いれば最大荷重も大きくすることができるという点と並んで本質的な欠点とはならないであろう。今後必要となる大口径杭の載荷試験、とくに先端支持力の解明に有力な手段であると言える。

スタナミック試験と呼ばれる試験法¹¹⁾も新しいものである。原理的には、杭頭に必要な質量分の土砂を詰めたタンクを載せ、その中で爆発を起こさせてそのショックを土砂を通じて杭に押し込み力として伝達するもので、いわば一瞬のうちに終わる試験であることが特徴である。これは、通常の静的載荷試験結果との対応性と、どの程度の大きさの上載荷重まで試験が可能かという点が問題と思われ、これらが解決すれば今後やはり有力な載荷試験法の一つになりうると考えられる。

7. コンクリートの応力-ひずみ関係は非線形

コンクリート系杭の軸力 P_i は通常次式に基づいて求めている。

$$P_i = \epsilon_i (E_c A_{ci} + E_s A_{si}) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ϵ_i は i 番目の測定断面の鉄筋計による軸ひずみであり、平面保持の仮定からコンクリートのひずみでもあるとする。 E_s , A_{si} は鉄筋のヤング率および断面積で、試験を通じて変化なしと考えられる。 E_c , A_{ci} はコンクリートのヤング率および断面積であり、場所打ちコンクリート杭の場合には掘削孔の超音波測定が必要になるが、断面積は試験を通じて変化なしと考えられるのに対してヤング率は非線形性を考慮する必要がある。そのため最上部の（多くは地表面位置で摩擦力が作用していない区間の）鉄筋計測定断面において(1)式から ϵ_i に対する E_c の関係を求めておき、これをほかの断面における解析に対しても適用する。これは同じ杭の杭頭部付近での関係は杭下方部でも成立するであろうとの仮定に立脚している。最近、このような解析が普通に行われるようになったと思われるが、かつては E_c が各荷重段階を通じて一定とされた整理法がかなり多かったのである。結果として、計算軸力が大き目に出るので杭頭部で実測軸力と合うように低減率を求め、軸力分布全体をこの比率で補正するという方法がとられていた例は意外に多い。このような解析整理を行うと杭上部では周面摩擦力が早めに降伏する傾向が出るので、また、極端な場合は負の摩擦力が生じたような分布となることもあるので注意が必要である。

コンクリートのヤング率に関しては、以上のほか、次のような厄介な問題がある。連続地中壁から切り出されたコンクリート試験体に対する圧縮試験結果では、深さ方向にヤング率がやや大きくなる（したがって拘束圧の影響により剛性が増大する）傾向が見られる。杭の荷重試験結果の整理では、通常この効果は考えておらず、コンクリートのヤング率の初期値自体は深さ方向で一定としていると思われる。大口径でしかも長尺杭となると、あるいはこの効果を導入する必要が出てくるかも知れない。軸力算定という観点からは、上記の非線形性とは逆の影響要素であり、拘束圧の影響ということになると、剛性のみならず応力-ひずみの非線形性自体が影響されると考える必要も生じてきて、問題は一層複雑となるので注意が必要である。

8. 長期荷重が作用した状態が初期条件

最後に、地震時に杭が引抜きと押込みの繰返しを経験することを想定して杭の鉛直方向交番荷重試験を行ったときの経験について述べたい^{12),13)}。この実験では長期荷重を想定したフーチングを杭頭に載せたこと、引抜き側から試験を開始したことが特徴である。結果については文献¹⁴⁾でも触れたが、従来、杭材のポアソン比や有効応力等の影響があって、杭周面摩擦抵抗は押込み時の方が大き目に出る（引抜き時と同等とするものもあるが逆はない）ことを指摘する研究が多かったのに対し、この実験では引抜き時の方が大きく出た。何かの間違ひではないかと種々調べた結果、杭頭フーチングの荷重（厳密には土と置き換わった有効荷重）がすでに押込み側に作

用していることを考慮すべきであることに気づいて補正したところ、引抜き、押込み時ともほぼ同等の抵抗力であるとの結論に至った。後にこの結果は実験地盤が関東ロームで粘性土であったためであり、砂質土では有効応力の影響を受けやすいので押込み時の方が大きくなるのが矢島らの指摘¹⁵⁾で明確になったが、いずれにせよ、周面摩擦力問題では長期荷重がすでに作用していることの重要性を認識させられた実験であった。

9. おわりに

以上には、主として設計への適用という観点から載荷試験に関する注意点を思いつくままに述べてみた。参考になれば幸いである。そのほかの問題点として、最近の地震観測結果で軸ひずみ分布が通常の載荷試験でみられるような逆三角形でなく、むしろ等分布に近いということをよく聞く。これは常時と地震時（あるいは静的と動的）の相違を考える必要があるかも知れないという点で気になることであるが、ここでは別のテーマとして触れないことにする。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，1993.
- 2) 吉田 巖：大口径杭の現場から見た問題，土と基礎，Vol. 28, No. 11, pp. 1~3, 1980.
- 3) 山肩邦男：大口径杭の現状と鉛直支持力に関する問題点，土と基礎，Vol. 28, No. 11, pp. 5~11, 1980.
- 4) 岸田英明・高野昭信：大口径杭の鉛直極限支持力，土と基礎，Vol. 28, No. 11, pp. 13~20, 1980.
- 5) 阪口 理：大口径場所打ち杭の鉛直支持力，土と基礎，Vol. 28, No. 11, pp. 21~26, 1980.
- 6) C. van der Veen: The Bearing Capacity of a Pile, 3rd ICSMFE, Vol. 2, pp. 84~90, 1953.
- 7) BCP Committee: Field Tests on Piles in Sand, Soils and Foundations, Vol. 11, No. 4, pp. 14~20, 1983.
- 8) 建築学会：建築基礎構造設計指針，1989.
- 9) 岸田英明・高野昭信：砂地盤中の埋込み杭先端部の接地圧分布（その2），日本建築学会論文報告集，第261号，pp. 25~40, 1977.
- 10) 小椋仁志・桑山晋一・岸田英明・五十嵐寛：杭先端載荷試験による場所打ち杭の鉛直支持力の検討，第29回土質工学研究発表会，pp. 1397~1400, 1994, など.
- 11) 西村真二・崎本純治・椿原康則・森 康治：砂地盤における鋼管杭のスタナミック試験，第29回土質工学研究発表会，pp. 1411~1415, 1994, など.
- 12) 岡部徳一郎・杉村義広・中田慎介・大岡 弘・角谷真弘・青木雄二郎・大木紀通：場所打ちコンクリート杭基礎の引抜き耐力に関する研究（その1~その8），日本建築学会大会，pp. 1045~1060, 1987.
- 13) 杉村義広・中田慎介・岡部徳一郎・青木雄二郎，大木紀通：杭基礎の引抜き抵抗力に関する研究，第23回土質工学研究発表会，pp. 1393~1394, 1988.
- 14) 杉村義広・大杉文哉：杭の引抜き力を考慮する，土と基礎，Vol. 41, No. 12, pp. 74~78, 1993.
- 15) 矢島淳二・青木雄二郎・柴崎富士夫：杭の引抜き時と押込み時における周面摩擦力の比較，日本建築学会大会，pp. 1283~1284, 1992. (原稿受理 1994.12.1)