

# 杭の載荷試験の現状と課題

Pile Loading Tests: Past, Present and Future

越 後 勇 吉 (えちご ゆうきち)

川崎製鉄(株) 取締役

## 1. はじめに

杭基礎により構造物を支持する場合に、その杭の支持力を知りたいというのは我々技術者の当然の要求であり、そのために様々な努力が続けられてきた。杭の鉛直・水平支持力を求めるには多くの方法があるが、その中でも直接的に支持力を確認する方法として載荷試験がある。これは、実地盤において実際に荷重を与え杭の変形特性を確認するため、最も信頼性の高い方法である。

杭の載荷試験は、日本では明治40年に皇居西丸紅葉山下において、水槽式による鉛直載荷試験<sup>1)</sup>が実施されたのが初めとされており、大正～昭和初期には口絵写真<sup>2)</sup>に示すようなコンクリート塊をピラミッド状に積み上げる実荷重載荷方式の記録も残っている。それ以降、道路橋や鉄道橋あるいは各種建築構造物分野ごとの載荷試験の方法も基準化されてきたが、各分野で実施されている杭の鉛直載荷試験の標準化を目指すために、1968年に「クイ載荷試験委員会」が発足し、1972年にクイの鉛直載荷試験基準<sup>3)</sup>が制定された。また水平および引抜き試験方法<sup>4,5)</sup>に関しても、1983年と1992年にそれぞれ基準化された。

載荷試験装置については、計測機器の進歩と電子計算機の飛躍的な発達によって、自動計測化が進むと同時に、近年の杭の大口径化・長尺化に伴い、載荷装置の規模も年々大型化する傾向にあり、鉛直載荷試験の場合では載荷荷重が3 600tfにも及ぶ大規模な載荷試験<sup>6)</sup>も実施されるようになってきている。

杭の載荷試験を行う目的は、「採用を予定されている杭について、実際に使用される状態またはこれに近い状態で、支持力判定の資料を得ること」<sup>3)</sup>である。しかしながら現実としては、試験杭を施工するだけでも各種の施工機械や仮設工事が必要となり、載荷試験を行えばそれだけのために多大な費用と時間を要することから、大規模な工事以外ではあまり実施されていない。実施される場合でも設計前ではなく、本施工の段階で設計支持力の確認のために行われていることが多いため、設計に反映させ経済的メリットに結びつけるようなケースはあまり報告されておらず、載荷試験結果が十分に活用されていない面があると思われる。

また支持力の判定においては、杭基礎の支持形態と地盤との関係を適切にイメージしておくことが重要である。構造物の荷重を杭基礎によって支持する場合、杭基礎は

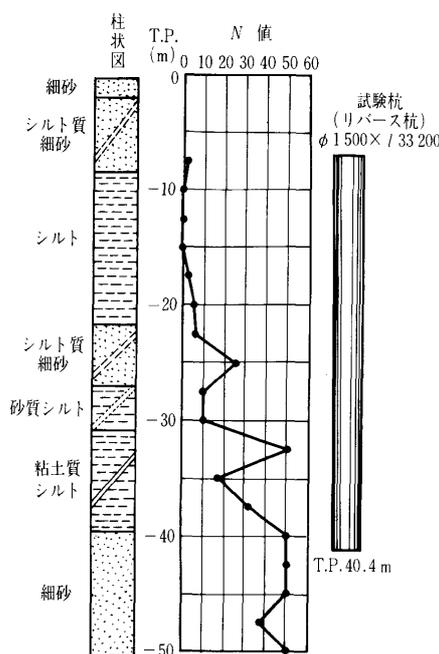
通常単杭として用いられるよりも群杭として用いられることが多い。構造物の平面形状により群杭の本数は千差万別であるが、ここで大事なことは mass としての群杭と mass としての地盤との相対関係をどのように想定するかである。群杭に荷重が作用するとそれぞれの杭は互いに影響し合い、マクロにみると群杭が一塊となって構造物を支える状態が想定される。それに対し、載荷試験は通常単杭の状態で行われるため、実際に構造物の基礎として用いられる状態での支持力特性とは当然違いがあることを認識しておく必要があり、既往の研究成果を踏まえながら試験結果を利用して行くことが大切である。

今回の小特集は杭の載荷試験がテーマであるが、我々はこの機会に今後載荷試験をどのように活用していくべきかをもう一度見つめ直してみるため、これまでに実プロジェクトの中などで載荷試験が有効に利用された事例についての紹介を行いながら、載荷試験の意義とこれからのあるべき姿について考えていきたい。

## 2. 載荷試験の事例

### 2.1 50 cm 押し込んだ大口径場所打ち杭の載荷試験

リバース杭などの大口径場所打ち杭は、載荷荷重が大きく、試験が容易でないため、杭を十分沈下させた試験



図一 地盤状況

## 総 説

事例が少なかった。そのため、荒川左岸の千住新橋付近の地盤（図-1）において杭径 $\phi$ 1500mm、杭長33.2mの大口径場所打ち杭（リバース杭）の支持力特性を確認するため載荷試験<sup>7)</sup>が行われた。

図-2に荷重と沈下量の関係を示す。最大荷重時で493.6mmの非常に大きな残留沈下量が生じるまで載荷は行われており、大口径場所打ち杭の載荷試験としては貴重な結果が得られている。

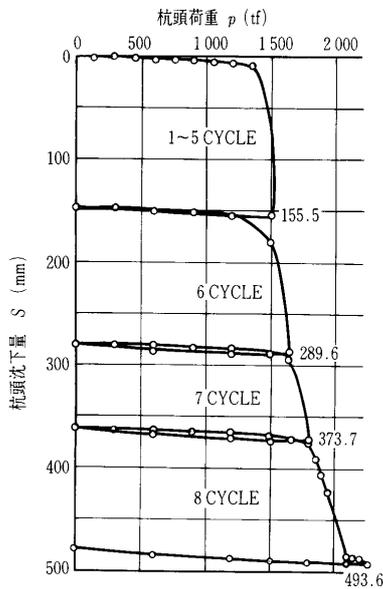


図-2 荷重-沈下量曲線

杭体軸力から先端支持力と周面摩擦力を分離すれば、周面摩擦力は沈下量が小さい段階で設計値以上の値が得られることが確認された。それに対し、先端支持力は周面摩擦力が最大値に達した後に、急激に沈下量が増大しながら徐々に発揮されたため、沈下量が杭径の10%程度では数10tf/m<sup>2</sup>しか期待できないことがわかった。

この結果は、細砂層を支持層とした大口径場所打ち杭の場合には、施工時に地盤の緩みが生じやすいため、杭の支持力は十分に注意して評価しなければならないことを明らかにしたものであり、その後の場所打ち杭の利用において非常に重要なデータとすることができた一例であるといえる。

支持力特性が十分に明らかとなっていない場合には、本事例で示したように載荷試験により確認することが重要であり、こうして得られた結果によってより合理的な基礎杭が構築できることを改めて認識しておくべきである。

### 2.2 建設コスト削減への載荷試験の活用

ここに紹介する事例は、台湾国の某鋼板工場建設工事に際して施工されたPHC杭に関する載荷試験である。

一般に基礎杭はN値が50以上の堅固な層に打ち止めされる支持杭が多いが、近年、支持層が深い場合の摩擦杭の採用や、中間層を有する場合の薄層支持杭の採用事例がみられ、いくつかの設計指針には載荷試験から求めた支持力算定式の明記もされている。

本工事地点における地盤の状況は図-3に示したよう

なものであるが、深さ10~15mに存在するN値が30~40程度の砂層に着目し、ここを杭の打ち止め位置とすることができるか否かの検討が行われた。

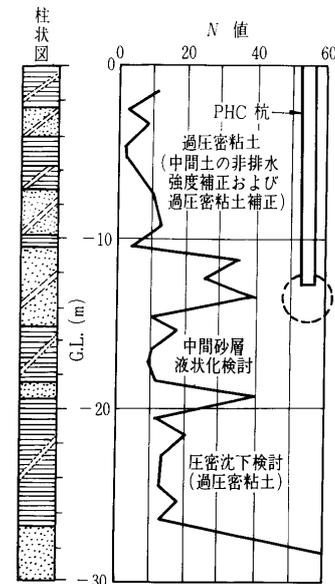


図-3 地盤状況

載荷試験実施に先立ち、粘性土層は過圧密比が3程度あり圧密沈下の可能性が無いこと、また中間砂層の液状化の可能性が無いことが確認されている。

表-1に載荷試験結果を示す。周面摩擦力は今回の引抜き試験結果より、中間土の非排水強度補正および過圧密粘土補正を行ったのち、建築基礎算定式を用いることによって妥当に評価できることが判明した。

表-1 載荷試験結果

杭 No.	杭径 (mm)	杭長 (m)	試験種別	極限荷重 (tf)	降伏荷重 (tf)
1	400	15	鉛直	130	105
2	500	15	鉛直	170	140
3	600	15	鉛直	210	175
4	500	15	引抜き	115	110

また先端支持力の検討にあたっては中間砂層のパンチング耐力等の薄層支持による影響を考慮し、Meyerhofの算定式に改良を加えた式が採用されている。

以上の検討によって、本現場においては中間砂層で打ち止めた杭の採用が可能であると判断され、さらに現場各地点における中間砂層の位置を正確に把握するため、37箇所においてコーン貫入試験が実施され、杭長の修正がなされた。

その結果、この現場では約9000本にのぼるPHC杭の短尺化を実現することによって、建設コストの大幅な削減と工期の短縮を達成している。

薄層支持杭の採用による杭の短尺化については、支持力以外にも長期的な沈下の問題や打ち止め位置の正確な把握等、載荷試験のみでは決定し得ない要因が多いことは事実である。しかしながら最終的な判断を下すにあたり実際に荷重をかけ支持特性を確認するという行為は不可欠であり、ここに載荷試験の大きな意義が存在するも

のと考える。

### 2.3 動的載荷試験による支持力管理

ここでは、洪水調整池上に鋼管杭を用いた栈橋形式の人工地盤を構築する工事に際して、動的載荷試験による支持力管理手法が適用された事例<sup>9)</sup>を紹介する。

本工事における人工地盤の構造断面を図-4に模式的に示す。基礎としての鋼管杭を地表面まで突出させ、建築物の柱と兼用する構造である。

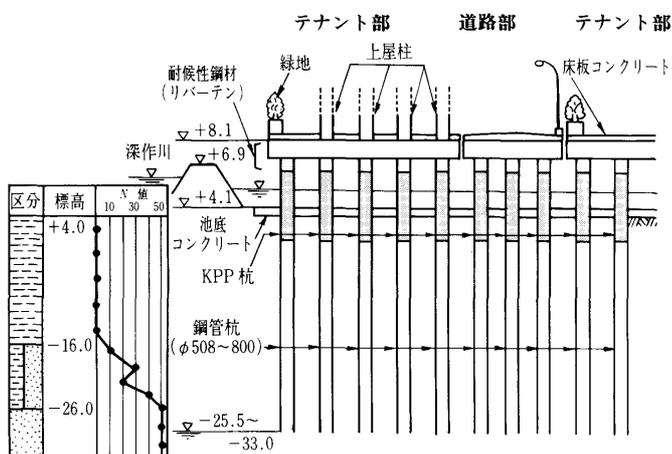


図-4 人工地盤の構造

施工にあたっては、施工中の洪水調整機能に配慮する必要から、水上からの杭打ちと桁架設が可能な手延べ式杭打ち工法 (STEP 工法) が採用されている。工法概要は図-5に示すとおりで、自走機能を有する特殊な装置を既設杭および桁の上を前進させ、順次構造物を完成させる工法である。

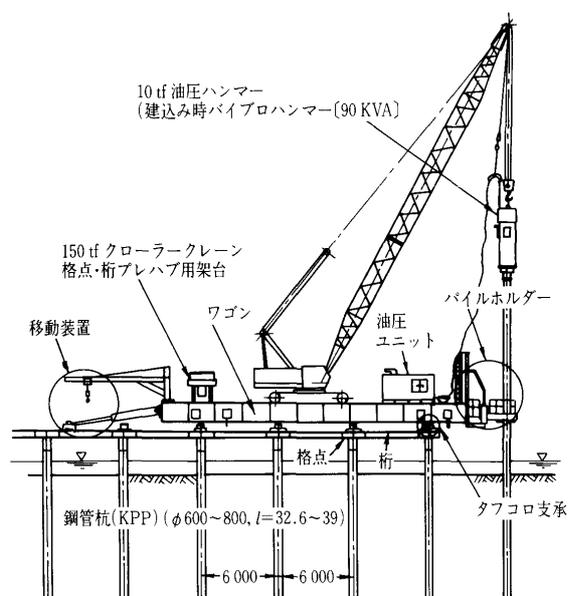


図-5 STEP 工法の概要

この場合、装置の前進に伴い1日放置後の杭に装置の全装重量の1/3に相当する荷重 (122tf) が作用する。したがって、装置の前進時に杭の鉛直支持力が十分確保されていることが重要となる。しかしながら、1日放置後の支持力を確認するために載荷試験を実施することは、作業工程上非常に困難であった。このため、本工事では

杭打撃時の応力波を計測し、波動理論を応用して杭の支持力を推定する動的載荷試験法が採用された。この試験方法は非常に簡易に適用できるため、打設1日後の再打撃計測により直接支持力を確認することができ、その結果、施工サイクルの短縮化に伴う杭打ち直後の支持力管理が効率的に行われるとともに、安全に杭が施工されている。

### 3. 載荷試験の技術課題と今後の展望

前章では載荷試験を有効に活用した事例を紹介したが、我々はそうした経験を今後の杭基礎の設計・施工の中に生かして行くことが大切である。そこで本章では載荷試験に関する現状の課題を今一度整理するとともに、今後の利用の仕方について考えて行きたい。

#### 3.1 載荷試験データの蓄積

通常の鉛直載荷試験のほとんどが設計支持力の安全性の確認のために行われているため、設計荷重の3倍程度の荷重を杭に載荷しているにすぎない。しかし今後基礎分野においても「許容応力度設計法」から「限界状態設計法」へ移行していく上で、地盤もしくは杭材料の「限界」と「沈下特性」を評価する仕事が重要であり、そのためには、杭に十分な沈下量を与えることが必要である<sup>9)</sup>。今後はそうしたデータを蓄積していくことで地盤や施工法に依存する支持力のばらつきが評価できるようになり、より合理的な設計法が確立できるものと考えられる。

また、これまでは杭の載荷試験としては鉛直載荷試験が非常に多く、長期載荷試験、水平載荷試験、あるいは引抜き試験などはあまり多く行われていなかったが、今後は、これら鉛直載荷試験以外のデータも積極的に蓄積していく必要があることも指摘しておきたい。

#### 3.2 載荷試験結果の評価

載荷試験結果を現場に反映させるためには、試験結果を技術者が正しく解釈し、評価することが必要である。

例えば、載荷試験の結果はあくまでも載荷試験を実施した地点での杭の荷重と沈下量の関係であり、工事全体の中での各杭の沈下特性は地盤や施工のばらつきにより一概に決めることはできないものである。したがって常に1本の載荷試験のみで杭全体の沈下特性を評価することには無理があることから、例えばカナダにおいては、工事で施工する杭の本数によって試験杭の数を定める方法<sup>10)</sup>を提案している。

このように載荷試験を工事の中で活用していくためには、実際に構造物を支持する状態を正しく把握しておくことが重要であり、試験結果を評価する際に考慮すべきこととして、構造物の荷重特性 (死荷重、活荷重、衝撃荷重、繰返し荷重) や機能特性 (許容沈下量、構造物の重要度等)、杭の支持力特性 (支持杭、摩擦杭)、杭の材料特性 (場所打ち杭・PHC杭・鋼杭)、杭の施工法、地盤特性、時間特性などがあり、技術者は試験結果と、これらの特性を総合的に判断し安全性 (安全率) を決定しなければならない。

## 総 説

### 3.3 今後の載荷試験法のあり方

これまで我が国の設計は先端支持杭にかたよった利用形態となっていたが、近年の研究の成果<sup>11)</sup>などから摩擦杭の合理性も認められるようになってきており、設計の自由度は広がりつつある。

先に PHC 杭の例で、載荷試験により支持力を確認することで最適な設計を行うことができ、その結果大幅な経済的メリットを達成できた事例を紹介した。今後は載荷試験により支持力を確認し、安全率や設計定数を見直すような方向に進んで行けば、技術者は載荷試験をもっと積極的に活用し、安全性と経済性を総合的に評価しながら設計を行うことができるのではないだろうか。

載荷試験は対象とする範囲内で多数実施し、設計に反映させることが理想ではあるが、工費や工期の面から実際にそれを行うことは困難である。しかしながら鉛直支持力に関しては、近年簡易な載荷試験法（STATNAMIC 試験<sup>12)</sup>、先端載荷試験<sup>13)</sup>、波動理論を用いた動的載荷試験法<sup>14)</sup>等）の研究が積極的に進められており、活用事例の中でも示したように実プロジェクトでの利用も行われつつある。そうした手法を用いれば対象地盤内で実施する載荷試験の数を増やすことができ、1本ごとの支持力の推定精度は、従来の載荷試験に及ばなくても、現場全体で考えれば、支持力の信頼性を向上させることができる。さらに、今まで以上に多くのデータを蓄積することが可能となるため、より合理的な設計法の確立にも役立つものと思われる。

### 4. おわりに

これまで載荷試験の歴史や現状での利用形態および今後の展望について述べてきたが、基本的に載荷試験によって支持力を直接確認すれば、危険であったり、逆に安全すぎる不経済な設計を避けることができるはずである。

これからの基礎分野においては、上部と下部の一体解析や耐震設計法などの研究がさらに行われるとともに、限界状態設計法への移行が進んで行くものと考えられるが、そうした動きの中で将来的には載荷試験を上手に活用していくことで信頼性と経済性のバランスの取れた基

礎構造が構築できるような設計体系が確立されていくことを希望する。

なお、本文の作成にあたっては、(株)吉田組の姫路昭夫氏、清水建設(株)の小粥庸夫氏、日本コンクリート工業(株)の松原範幸氏、梁島郁夫氏より貴重な資料を提供していただいた。これらの方々に、記して感謝の意を表す。

### 参 考 文 献

- 1) 坂本和雄：杭の載荷試験，地質と調査，土木春秋社，Vol. 2, pp. 52～56, 1990.
- 2) 豊島光夫：絵でみる基礎専科，建設資材研究会，pp. 150, 1975.
- 3) 土質工学会：クイの鉛直載荷試験基準・同解説，1972.
- 4) 土質工学会：杭の水平載荷試験方法，1983.
- 5) 土質工学会：杭の引抜き試験方法，1992.
- 6) 縦山好幸・本間政幸・片山 猛・丸山 隆：東京湾横断道路大口径鋼管杭鉛直載荷試験，土と基礎，Vol. 40, No. 2, pp. 47～52, 1992.
- 7) 小粥庸夫・田中達夫・土屋 勉：50cm 押し込んだ載荷試験に基づいて考察したリバース杭の支持力，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，第III部門，pp. 362～363, 1980.
- 8) 福若雅一・土肥宏一郎・新宮和周・尾関史洋：埼玉県南卸売団地人工地盤構築工事における STEP 工法，基礎工，Vol. 20, No. 9, pp. 42～50, 1992.
- 9) 例えば，岸田英明：杭の載荷試験の意義と結果の解釈，基礎工，Vol. 10, No. 9, pp. 2～4, 1982.
- 10) CANADA : Natinal Building Code of Canada, 1960 : section 4.2 Foundations, pp. 8～9, 1962.
- 11) 例えば，西田義親：摩擦杭の考え方について，土と基礎，Vol. 30, No. 2, pp. 5～10, 1982.
- 12) 例えば，続 誠：爆発推進力を利用した載荷試験—STATNAMIC，基礎工，Vol. 20, No. 1, pp. 111～113, 1992.
- 13) 例えば，新井邦彦・藤岡豊一・新井厚生・山田清臣：新しい杭の鉛直載荷試験法の開発，第25回土質工学研究発表会講演集，pp. 1297～1298, 1990.
- 14) 例えば，G. G. Goble, F. Rausche, F. Moses : "Dynamic Studies on the Bearing Capacity of Piles", Phase III, 1970.

(原稿受理 1995.1.19)