

載荷試験による性能確認

関 ジ オ ト ッ プ 技 術 開 発 本 部 ● 小 椋 仁 志

はじめに

性能設計においては、これから設計する杭にどの程度の性能を要求するか、あるいは、施工された杭が設計時に要求された性能を満足するかどうか、などを的確に評価することが必須事項になる。その評価手法として、まず、支持力式や沈下量の算定式を用いる方法がある。しかし、全国の地盤は千差万別であって、さまざまな地盤に設置される杭の支持力・変形性能を全国一律の支持力算定式や沈下量算定式などから求めるのは無理があり、この方法のみによって杭の性能を評価するのは妥当ではない。

性能評価手法として最も適切な方法は、杭が持っている支持力や変形に関する性能を確実に評価できる載荷試験であろう。載荷試験は、実際と同じ地盤に、実際と同じ施工法で設置された杭に、実際とほぼ同じ状態の荷重を載荷して支持力や沈下量のデータを取得するため、杭の性能を最も的確に評価することができる。したがって、性能設計においては、載荷試験は欠かすことのできない性能評価手法となる。

しかし、現状では、載荷試験（ここでは、杭の鉛直載荷試験）には設計諸基準や費用、準備時間などの面で制約が多く、あまり行われていないのが実状である。本報では、これらの制約を解消できる新しい試験方

法を紹介し、載荷試験を活用して性能設計に即した合理的な設計が行われるようになるための条件を考える。

載荷試験基準の改正

建築分野において、基礎杭の設計を目的として載荷試験が行われることは非常に少ない。年間200～300件行われていると推定される載荷試験（載荷重3 MN以上）の大部分は建設大臣の工法認定を取得するためのものであって、基礎杭の設計に際してその性能を評価することを目的とする試験は100件以下であろう¹⁾。これには次の理由が考えられる。

- ①載荷試験をしても、支持力を大きく取れるなどの優遇規定が、建築分野の現行の設計基準類にはほとんどない。
- ②載荷試験には時間がかかるため、試験によって支持力を決めたり確認することが、日程の関係で難しい。
- ③載荷試験には多額の費用がかかるが、設計においてそれに見合うだけのメリットがない。

①は現行の設計基準類に関する問題であり、これについては後述する。②と③は時間的、経済的な問題である。これらを解決するため、近年、「短時間で経済的に行える載荷試験方法」が相次いで開発されている。すなわち、短時間で行える載荷方式や、反力装置が不要で経済的な載荷試験方法が海外から導入され、国内

では約十年前から実施されており、試験例も相当数にのぼっている。これを受けて、本年3月に(社)地盤工学会の杭の鉛直載荷試験基準が改正され、これらの試験方法が新たに基準化された^{2)~4)}。現在、2002年春の出版に向けて、基準の解説文を作成中である。

これまで鉛直方向荷重に対する地盤工学会の杭の載荷試験基準としては、1971年制定、1993年改正の「杭の鉛直載荷試験方法」と、1989年制定の「杭の引抜き試験方法」とがあった。今回の改正では、これら2基準が改正され、新たに4種類の試験基準が制定された。新しい地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法」は、これら6種類の基準の総称であって、従来の鉛直載荷試験方法は「押し込み試験方法」と改称されている。新たに制定された試験基準は、地震時のロッキング動などに対応して杭頭に静的交番荷重を載荷する「鉛直交番載荷試験方法」と、反力杭や載荷梁（以下、反力装置）を用いることなく杭の鉛直支持力や変形性能を評価できる「先端載荷試験方法」、「急速載荷試験方法」および「衝撃載荷試験方法」である。

反力装置を用いない3種類の載荷試験方法は、後述するように試験に要する費用が低減されるだけでなく、試験の準備時間も大幅に低減される。また、動的荷重を載荷する急速載荷試験と衝撃載荷試験は試験時間がほとんどかからない。先端載荷試験の

試験時間は押し込み試験と同じであるが、荷重を保持せずに連続して増加する「連続載荷方式」が新たに基準化されたことによって、これらの静的載荷試験でも試験時間の短縮が可能になった。以下、これらの新しい載荷方式や載荷試験方法について述べる。

連続載荷方式

従来の試験基準では、荷重を段階的に一定時間を保持しながら荷重増加させる載荷方式（これを「段階載荷方式」と呼ぶ）だけが規定されていた。今回、新たに追加された「連続載荷方式」は、荷重を保持せずに連続的に荷重増加させる載荷方式である。

筆者は砂地盤に打設した長さ 8 m の PHC 節杭（節部径 440 mm—軸部径 300 mm）を用いて両載荷方式を比較した実験を行ったが、図 1 に示すようにほぼ等しい荷重～沈下量関係が得られた⁵⁾。さらに、両方式を比較した他の諸実験も含めて載荷方式の影響を検討したが、荷重～沈下量関係に及ぼす影響は±10%以下であった⁵⁾。したがって、両方式は実用的には同等であるといえよう。

連続載荷方式は、試験目的や地盤条件によっては適用できない場合もあるが、試験が短時間で済む、極限荷重が明確になる、極限荷重以後の

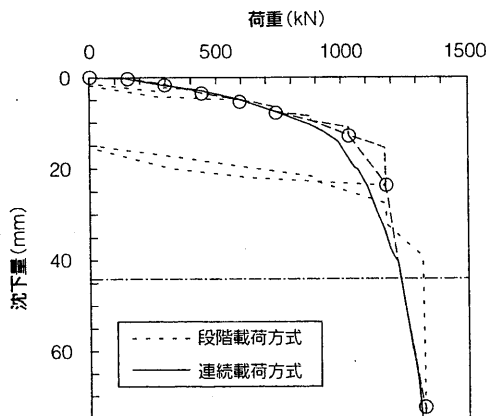


図 1 両載荷方式での荷重～沈下量関係

荷重の低下も明確に測定できる、などの長所も多い。今後、この載荷方式が多く採用されて試験データが蓄積されるとともに、試験時間の短縮化などにより載荷試験がこれまでより数多く行われるようになることを期待したい。

先端載荷試験方法

図 2 のように、あらかじめ先端付近に設置したジャッキによって、先端抵抗と押し上げ抵抗（周面摩擦抵抗＋杭自重）とを互に反力として載荷するのが先端載荷試験方法である。詳細は、文献⁶⁾などを参照されたい。この試験方法のアイデアは古くからあったが、実用化したのは米国の J.O.Osterberg である。わが国には 1987 年頃導入され、これまで 60 件を超える試験例がある。図 3 は、その試験結果の一例⁷⁾である。この例に示した載荷試験の試験杭は、外径 2,200 mm、根入れ長さ 48 m の大口径場所打ち杭であって、この杭の先端に 29.4 MN (3000 tf) 載荷し、459.01 mm と杭径の 20% を超える先端沈下量が得られている。このとき周面摩擦抵抗は極限状態に達していない。

この試験方法の最大の特徴は、押

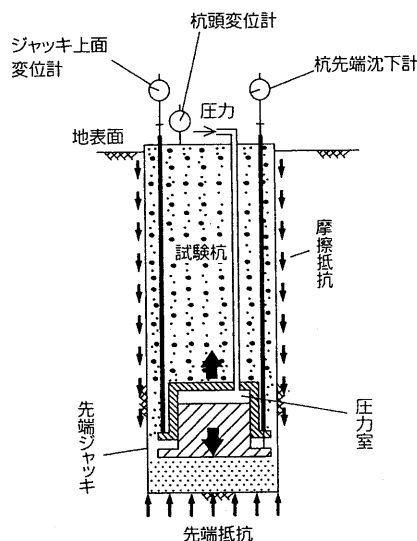


図 2 先端載荷試験方法の概念図

込み試験と同じ静的荷重を、反力装置を使わずに載荷できることである。このため、試験費用が経済的で、かつ準備時間も短くて済む。また、敷地状況や上空制限などの制約のため押し込み試験が難しい場所でも実施できる。さらに、押し込み試験では周面摩擦抵抗のため杭頭に載荷した荷重が先端まで十分に伝わらないことが多いのに対し、この方法では先端地盤に直接載荷するため、大きな先端抵抗や先端沈下量をほぼ確実に得ることができる。

一方、先端抵抗と押し上げ抵抗の一方が極限状態に達するまでしか載荷ができない、杭頭での荷重～沈下量関係が得られないなどの問題がある。前者については、補助的な反力装置を用いて対処するなどの提案がある⁸⁾。後者については、荷重伝達法を用いた解析によって精度のよい推定値が得られている⁸⁾。また、摩擦抵抗の向きが通常とは逆方向になる、先端付近の応力分布が変わる、などにより得られる極限摩擦力や先端支持力が押し込み試験と少し異なるとの指摘もある⁹⁾。ただし、いずれも押し込み試験よりも小さい値を与えるため、先端載荷試験で得られた値を設計に用いるのは安全側ということになる。

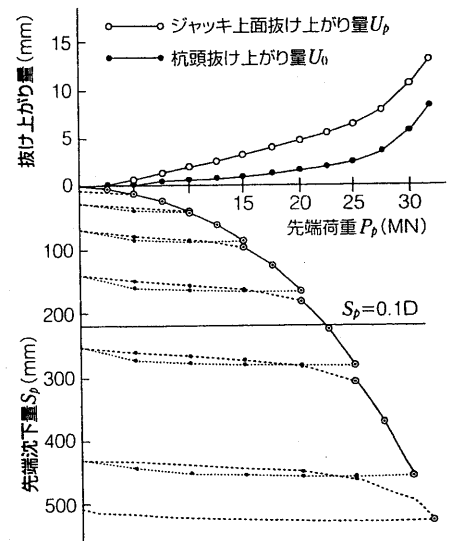


図 3 先端載荷試験結果の一例

急速荷重試験方法

急速荷重試験方法と衝撃荷重試験方法は、動的荷重による荷重試験である。両者の差は、荷重時間と、荷重による縦波が杭体を一往復するのに要する時間との比で定義される相対荷重時間 T_r によって決まり、試験基準では $T_r \geq 5$ を急速荷重、 $T_r < 5$ を衝撃荷重としている（静的荷重は $T_r \geq 500$ ）。一般的な荷重時間は、衝撃荷重の約 10 倍の 0.05~0.2 秒である。この荷重時間では、荷重中に杭体がほぼ全圧縮状態となり、杭体の縦波による波動現象をおおむね無視することができる。このため、杭体を剛体と扱える結果、波動理論など煩雑な方法ではなく、振動理論など比較的簡単な方法によって静的支持力や荷重~沈下量関係を推定することができる。詳細は、文献⁴⁾や文献¹⁰⁾などを参照されたい。

この荷重試験方法の代表例が、図4のように、反カマス等特殊な推進

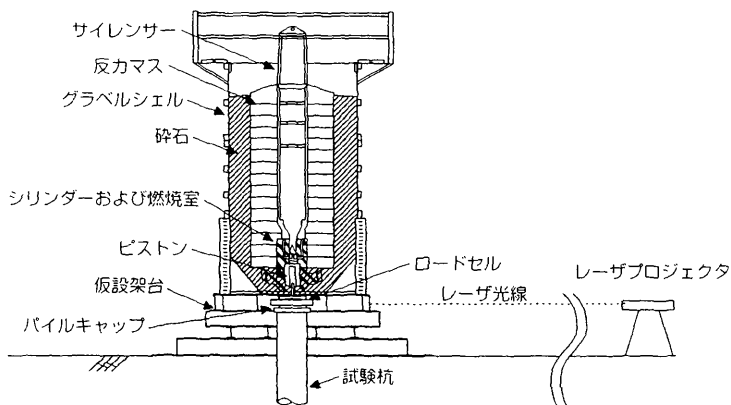


図4 スタナミック試験の装置図

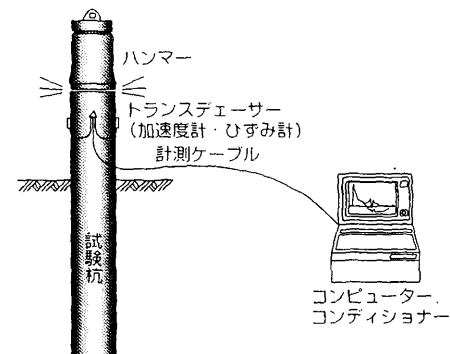


図6 衝撃荷重試験方法の装置図

葉を燃焼させて打ち上げ、そのときに下向きに生じる反力を杭頭への荷重とする加力方式のスタナミック試験である。オランダとカナダで共同開発されたもので、わが国では1992年に初めて実施され、現在まで70例以上の試験例がある。衝撃荷重試験に比べると装置は大きいが、押込み試験よりはるかに大規模に試験を行えるのが特徴である。

図5に、試験結果で得られる荷重~沈下量関係の一例を示す。この図では、最大変位点に着目して、荷重荷重 F_{sin} から加速度成分 M_a と速度成分 F_v を差し引いて静的抵抗荷重 F_w を求めている（徐荷点法）。これらの解析によって、降伏荷重程度までは押込み試験とよく一致した結果が得られるとされている¹¹⁾。

なお、加力方式には、ばねなどのクッションを介して杭頭を打撃する方法（準静的荷重試験法¹²⁾も提案されており、海外では実用化されている。荷重試験基準では、加力方式

は計画最大荷重や計画荷重時間が満足できれば、どの方式でもよいとしている。

衝撃荷重試験方法

図6のように、杭頭部にひずみ計と加速度計を取り付けておき、ハンマー打撃などにより杭頭に衝撃を与えたときに（荷重時間は0.005~0.03秒）発生するひずみ波形と加速度波形から、杭の貫入抵抗や支持力特性を評価するのが衝撃荷重試験方法である。海外では古くから用いられており、いくつかの国では基準化もされている。わが国では約10年前から、鋼管杭を中心に土木分野で使用されている。試験方法の原理や詳しい説明は、文献⁴⁾や文献¹³⁾などを参照されたい。図7に、試験で得られた波形の一例を示す。

反力装置が不要で、準備時間も試験時間も短くて済むため、非常に簡便かつ経済的に杭の支持力を求めることができる。ただし、直接測定さ

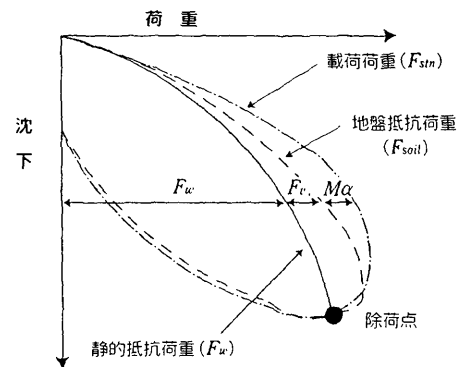


図5 スタナミック試験による荷重~沈下量関係

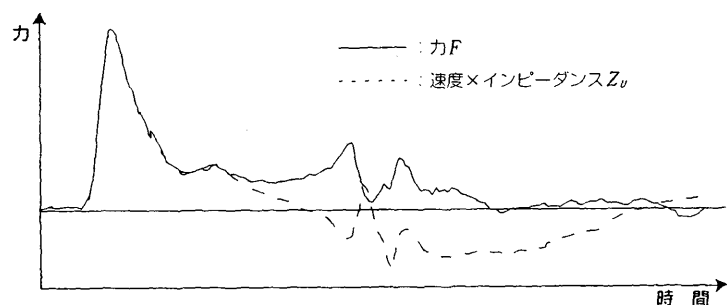


図7 衝撃荷重試験による波形

れるのは動的支持力であって、静的な支持力や荷重～沈下量関係は得られない。このため、杭を一次元弾性体とみなした波動理論に基づいた解析を行うことによって、静的支持力などを推定することになる。解析法は、CAPWAPC法¹⁴⁾、KWAVE法¹⁵⁾、MID-RANGE法¹⁶⁾など数多く提案されている。

13例の打込み鋼管杭について、解析結果を押込み試験による結果と比べた報告¹⁷⁾では、降伏荷重まではよい精度で静的な支持力や荷重～沈下量関係が推定できるとしている。埋込み杭や場所打ち杭については、押込み試験との比較例がほとんど報告されていないこと、押込み試験と衝撃載荷試験では極限支持力の解釈が異なることなどによって、衝撃載荷試験から推定される静的支持力の評価は定まっていないのが現状である。衝撃載荷試験時の杭体の変位レベルから考えると、この試験で推定できる静的支持力は、押込み試験の降伏荷重程度が限度と考えられる。

なお、この試験方法は、これまで一般に「動的載荷試験方法」と呼ばれていた。しかし、「動的」という言葉は意味が広く、動的載荷試験には急速載荷試験も含むため、基準化に当たって「衝撃載荷試験方法」と改称されている。

載荷試験を活用した設計

これまで述べたように、反力装置を必要としない経済的な載荷試験方法や短時間で試験が可能な載荷方式は、すでに実用化され、今回、基準化もされている。これによって、今までより載荷試験が数多く実施される環境は整ったといえよう。その結果、載荷試験結果に基づいて、その杭が持つ支持・変形性能を的確に評価した合理的な設計が広く行われる

ようになるものと期待される。

ただし、これを実現するためには、もう一つの問題、すなわち、建築基準法を始めとする設計基準類に関する問題を解決していく必要がある。道路橋示方書など土木分野の設計基準には、載荷試験を行うことによって安全率を小さくできる(3→2.5)規定がある。しかし、建築分野の設計基準類では、載荷試験の有無によって安全率を変えることは行われていない。これでは、いくら載荷試験が短期間に、かつ経済的にできるようになっても、試験を行うメリットが小さいため、ほとんど行われないことになる。

そこで、建築分野の諸基準においても、載荷試験の有無や種類に応じて安全率を変えることを提案する。たとえば、載荷試験を行わない場合は3.0、衝撃載荷試験を行うと2.8、急速載荷試験では2.6、静的載荷試験では2.3など試験の種類に応じた値を設定するのである。また、静的載荷試験を1か所行い、かつ衝撃載荷試験を数多くの杭に対して行った場合は、安全率を2.0とすることなども有意義であろう。

性能設計では、杭に対して要求される性能を明確にすることと、それに応じて、杭が所定の性能を持つかどうかを確かめることが重要となる。建築分野の基礎杭の設計も、これまでのように全国一律の支持力算定式や沈下量算定式などだけから杭の性能を評価するのではなく、性能設計化を機に、載荷試験によって杭がその地盤に対して持つ支持力・変形性能を的確に評価した合理的な設計に脱皮することを期待したい。

(おぐら ひとし)

【参考文献】

- 1) 小椋仁志・カルキーマダン・境友昭：新しい載荷試験の動向，基礎工，Vol. 24, No. 8, pp. 41～47, 1996年8月
- 2) 杭の鉛直載荷試験方法基準化委員会：杭

の鉛直載荷試験方法の新しい基準について(その1：改正・制定の経緯)，第35回地盤工学研究発表会(岐阜)，pp. 1～2, 2000年6月

3) 杭の鉛直載荷試験方法基準化委員会 静的試験 WG：1)と同名(その2：静的載荷試験方法)，第35回地盤工学研究発表会(岐阜)，pp. 3～4, 2000年6月

4) 杭の鉛直載荷試験方法基準化委員会 動的試験 WG：1)と同名(その3：動的載荷試験方法)，第35回地盤工学研究発表会(岐阜)，pp. 5～6, 2000年6月

5) 小椋仁志・菊地登志光：打込み節杭の鉛直載荷試験における段階載荷方式と連続載荷方式の比較例，第35回地盤工学研究発表会(岐阜)，pp. 9～10, 2000年6月

6) 小椋仁志・岸田英明・須見光二・吉福司：杭先端載荷試験法の場所打ち杭と既製杭への適用例，土と基礎，Vol. 43, No. 5, pp. 31～33, 1995年5月

7) 小椋仁志・渋谷孝男：大口径場所打ち杭の先端載荷試験－関東郵政局等庁舎新築工事での試験例－，基礎工，Vol. 26, No. 7, pp. 84～89, 1998年7月

8) 小椋仁志：杭先端載荷試験法の概要と適用例，GBRC, No. 87, pp. 54～67, 日本建築総合試験所，1997年7月

9) 唐鎌成夫・国府田誠・田村昌仁・山下利夫・佐藤秀人・佐藤有伸：模型杭による鉛直載荷試験法の検討 3. 杭先端載荷試験法，第33回地盤工学研究発表会(山口)，pp. 1433～1434, 1998年7月

10) 地盤工学会 杭の急速載荷試験法研究委員会：杭の急速載荷試験の載荷メカニズムと適用性，地盤工学会，1999年3月

11) 加藤一志・篠田善朗・坂本和雄・三木正久・永岡高：急速載荷試験法によるモデル杭試験報告(その1)－施工法の異なる杭の荷重沈下特性比較－，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集3-B, pp. 780～781, 1994年9月

12) 窪田博年・井上波彦・田村昌仁・阿部秋男・田中実・桑原文夫：杭の準静的載荷試験法の適用性に関する研究，第30回地盤工学研究発表会(金沢)，pp. 1441～1442, 1995年7月

13) 日下部治・松本樹典：新載荷試験法－動的載荷試験と急速載荷試験，基礎工，Vol. 24, No. 5, pp. 18～26, 1996年5月

14) GRL Inc.: CAPWAPC Manual, 1990

15) Matsumoto, T. and Takei, M.: Effects of soil plug on behaviour of driven pipe piles, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 2, pp. 14～34, 1991.6.

16) Horiguchi, T., Karkee, M. B., Sakai, T. and Kishida, H.: Assessment of pile integrity and the mobilized bearing resistance using mid-range dynamic test, The 5th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 1996.9.

17) 脇屋泰士・柴田厚志・西海健二・西村真二・林正宏・松本樹典：日本における動的載荷試験の利用状況と推定精度について，第35回地盤工学研究発表会(岐阜)，pp. 29～30, 2000年6月