
「杭基礎の品質管理と設計」
－性能設計の導入に向けて－

2000年2月24日

(社) 日本建築学会 関東支部 構造専門研究委員会

新しい載荷試験方法

(株)ジオトップ 小椋仁志

1. 序

基礎の設計を行う場合、基礎構造物（杭、フーチング等）や地盤が支持力や変形に関する要求性能を満足しているかどうかを調べる必要がある。これには様々な方法があるが、出来上がった杭が所定の性能を持っているかどうか、すなわち、杭の品質がそれに見合うものであるかどうかを、最も直接的で確実に調べる方法が載荷試験である。したがって、載荷試験も「杭の品質管理手法の一つ」として位置づけられる。

ここでは杭の性能のうち鉛直支持力を取り上げ、その把握を目的とした試験方法について述べる。特に、近年実績が増え、試験基準にも新たに加えられる3種類の新しい載荷試験方法に焦点を当て、それらの特徴や問題点、活用方法などについて、紹介する。なお、本文は文献1)に加筆・修正したものである。

2. 杭の載荷試験基準の改正

現在、地盤工学会では杭の鉛直載荷試験方法の基準の改正作業が進んでおり、改正案はすでに学会誌上に発表されている²⁾。今回の改正で、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法」は、以下の6種類の基準で構成されることになる。

「杭の押込み試験方法（JGS1811）」

「杭の先端載荷試験方法（JGS1812）」

「杭の引抜き試験方法（JGS1813）」

「杭の鉛直交番載荷試験方法（JGS1814）」

「杭の動的載荷試験方法（JGS1815）」

「杭の衝撃載荷試験方法（JGS1816）」

これらのうち、押込み試験方法とは、杭頭に静的な鉛直荷重を載荷する通常の鉛直載荷試験方法である。この試験基準は地盤工学会で1971年に「クイの鉛直載荷試験基準」として制定され、1993年に地盤工学会基準（当時は土質工学会基準）「杭の鉛直載荷試験方法（JGS1811）」として改正されて今日に至っている。今回の改正案では、荷重を一定時間保持する従来の載荷方式（段階載荷方式）に加え、荷重を保持せずに連続的に載荷する方式（連続載荷方式）も基準化されている。また、サイクル数、試験杭と反力杭の最小間隔、一部の用語などが見直されている。

引抜き試験方法は、1989年に「杭の引抜き試験方法（JGS1821）」として制定されていたものである。今回の改正案では、押込み試験方法とは載荷方向が変わるだけで鉛直荷重を杭に載荷することは同じとの観点から、杭の鉛直載荷試験方法のうちの一試験方法として組み込まれている。したがって、押込み試験方法の基準との共通化が可能な限り図られている。

他の4種類の試験方法は、今回、新たに試験基準が制定されるものである。これらのうち、鉛直交番載荷試験方法は、ロッキング荷重等が杭に作用したときの挙動を調べるための試験方法であって、兵庫県南部地震以降の耐震設計法の進歩に対応したものである。

残る3種類の試験方法が、「新しい載荷試験方法」と呼ばれるものである。いずれも押込み試験方法と同じように、杭の押込み方向の支持力や沈下性状を調べるのが主目的の試験方法である。これらが開発された背景には、反力杭（または反力アンカー）と載荷梁（以下、総称して反力装置と呼ぶ。）を用いる押込み試験方法は、杭の大径化や長尺化に伴って多大な費用や時間を要するようになったことから、建物の設計のための載荷試験がほとんど実施されなくなったということがある。新しい載荷試験方法は、いずれも反力装置を必要としない試験方法である。

3. 先端載荷試験方法

先端載荷試験方法は、図-1のように、杭体の先端付近に取り付けたジャッキによって、先端抵抗と周面抵抗とを相互に反力として載荷する試験方法である。簡易載荷試験法、支持力相反載荷試験法とも呼ばれてきた。この方法は米国のJ. O. Osterberg(オスターバーグ)が実用化したもので、わが国ではこれまで60件を超える試験例がある。試験方法の詳細は、文献3)や文献4)などを参照されたい。以下、概略のみを述べる。

この試験方法は、先端抵抗と摩擦抵抗とを互に反力として静的荷重を載荷するため反力装置が不要になる。このため、経済的な費用で、かつ、短い準備時間で済むことになる。また、敷地状況や上空制限などの制約のため押込み試験方法が難しい場所でも試験が実施できる、杭に大きな荷重を安全に載荷することができる、といった特徴もある。

さらに、押込み試験方法では、杭頭へ載荷した荷重の大部分が周面摩擦抵抗に費やされて先端まで十分に荷重が伝わらないことが多いのに対し、先端載荷試験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がほぼ確実に得られる。この特徴を生かして、押込み試験方法では難しいような大口径杭の先端支持力の性状を調べることも可能になる。

一方、問題点としては以下のことが挙げられる。

- ① 先端抵抗と摩擦抵抗の一方が極限状態に達すると、それ以上の載荷ができない。
- ② 杭頭での荷重～沈下量関係が得られない。
- ③ 摩擦抵抗の向きが通常とは逆方向になる。
- ④ 杭体が上方に押し上げられることによって先端付近の応力分布が変わるため、先端支持力の値が押込み試験とは異なる可能性がある。

これらの問題点への対処法については、文献5)などを参照されたい。

試験結果の一例として、外径2,200mm、根入れ長さ48mの大口径場所打ち杭の例⁶⁾を図-2に示す。この試験では杭先端に29.4MN(3000tf)載荷でき、先端沈下量は459.01mmと杭径の20%を超える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。

4. 衝撃載荷試験方法

衝撃載荷試験方法は、図-3のように、杭を手ハンマーで打撃して、その時に計測された杭頭のひずみと加速度から、杭を一次元弾性体とみなした波動理論を適用することにより支持力を求める方法である。杭を手ハンマーで打撃する健全性試

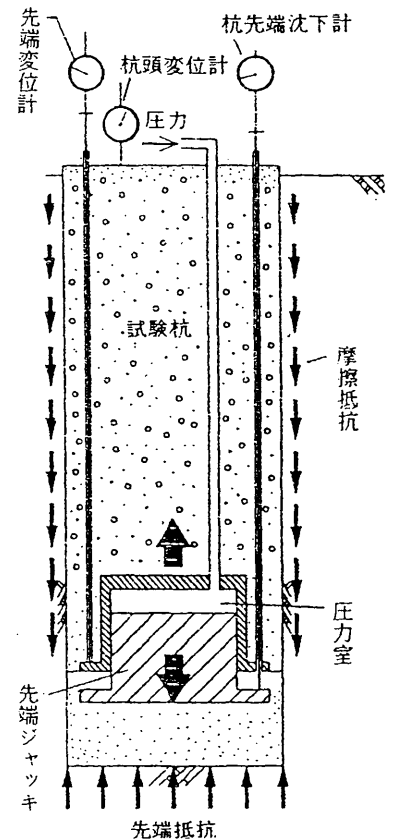


図-1：先端載荷試験方法の概念図

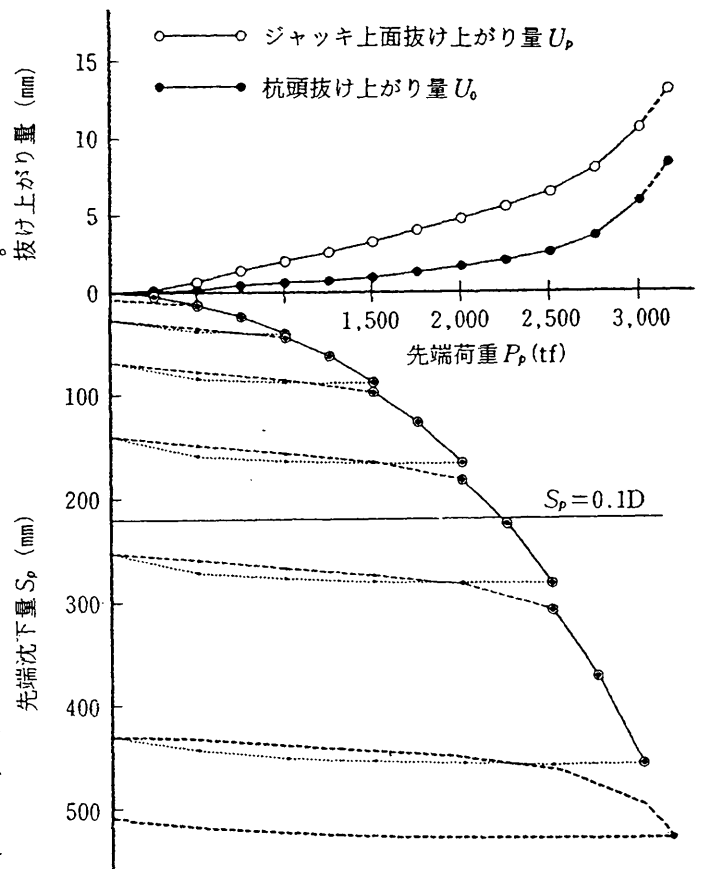


図-2：先端載荷試験結果の一例

験が杭体に低レベルのひずみを発生させるのに対し、この試験方法では高レベルのひずみを生じさせることによって支持力を得るわけである。

海外では古くから用いられてきた試験方法であるが、わが国では十数年前から、松本ら⁷⁾や境ら⁸⁾によって開発されている。試験方法の原理や詳しい説明は、文献9)などを参照されたい。現在は、鋼管杭を中心に土木分野で主に使用されており、建築物の設計を目的とした適用例は少ないようである。なお、これまでは一般に「動的試験方法」と呼ばれていたが、急速载荷試験方法も動的载荷試験方法に含まれるため試験基準(案)ではこの試験方法を「衝撃载荷試験方法」と呼んでいる。

この試験方法は、反力装置が不要で、試験時間も短くて済む(载荷時間は0.005~0.03秒)ため、非常に経済的に杭の支持力を求めることができる。反面、直接得られるのが動的支持力であるため、静的支持力を推定するには波動理論による解析が必要になる。また、荷重~沈下量関係も直接は得られないので、同様な解析が必要である。解析方法はCAPWAP法、DWAVE法など数多く提案されている。

以前に、打込み杭に対する衝撃载荷試験方法で得られた同じ波形を用いて、別々の人が18種類の解析方法によって静的支持力を推定した例が報告されている¹⁰⁾。この例では、押込み試験に用いた静的支持力に対して、推定値は±15%の範囲におさまっていたとされている。図-4は、打込み鋼管杭に対して行われた衝撃载荷試験による速度と力の波形である¹¹⁾。この波形から極限支持力は1807kNと推定されたが、この値は押込み試験方法の結果1890kNとほぼ一致している。

なお、埋込み杭や場所打ち杭については、衝撃試験方法で推定された静的支持力の評価は定まっていない。これは、押込み試験との比較例が少ないこと、静的試験と動的試験で極限支持力の解釈が異なることなどのためである。

なお、軽いハンマーを用いて杭体に生じるひずみを中レベルとしたミッドレンジ方式の衝撃試験方法も提案されている。これは、ハンマーを軽くして、極限支持力ではなく、測定が必要な支持力(たとえば、設計支持力の3倍)の確認や荷重~沈下量関係の初期のバネ定数の推定に主眼をおいた試験方法である。同時に、杭の健全性試験としても適用できるとしている。この方法の原理等は、文献12)を参照されたい。

5. 急速载荷試験方法

急速载荷試験方法は衝撃载荷試験方法と同じように動的载荷試験の一種であるが、载荷時間を衝撃载荷試験方法よりも長くしたものである。すなわち、载荷時間を0.05~0.2秒と衝撃载荷試験方法の約10倍程度に

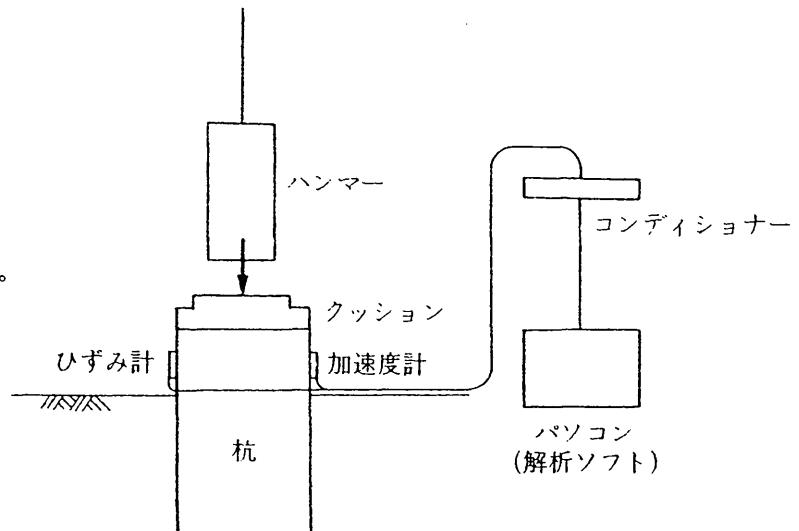


図-3：衝撃载荷試験方法の装置図

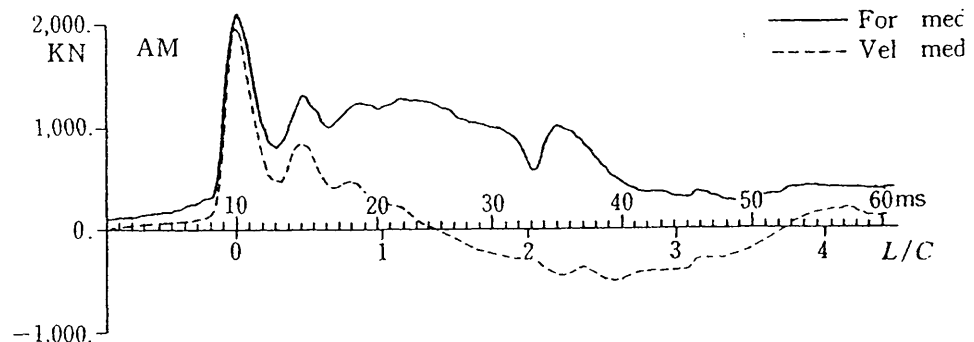


図-4：衝撃载荷試験結果の一例

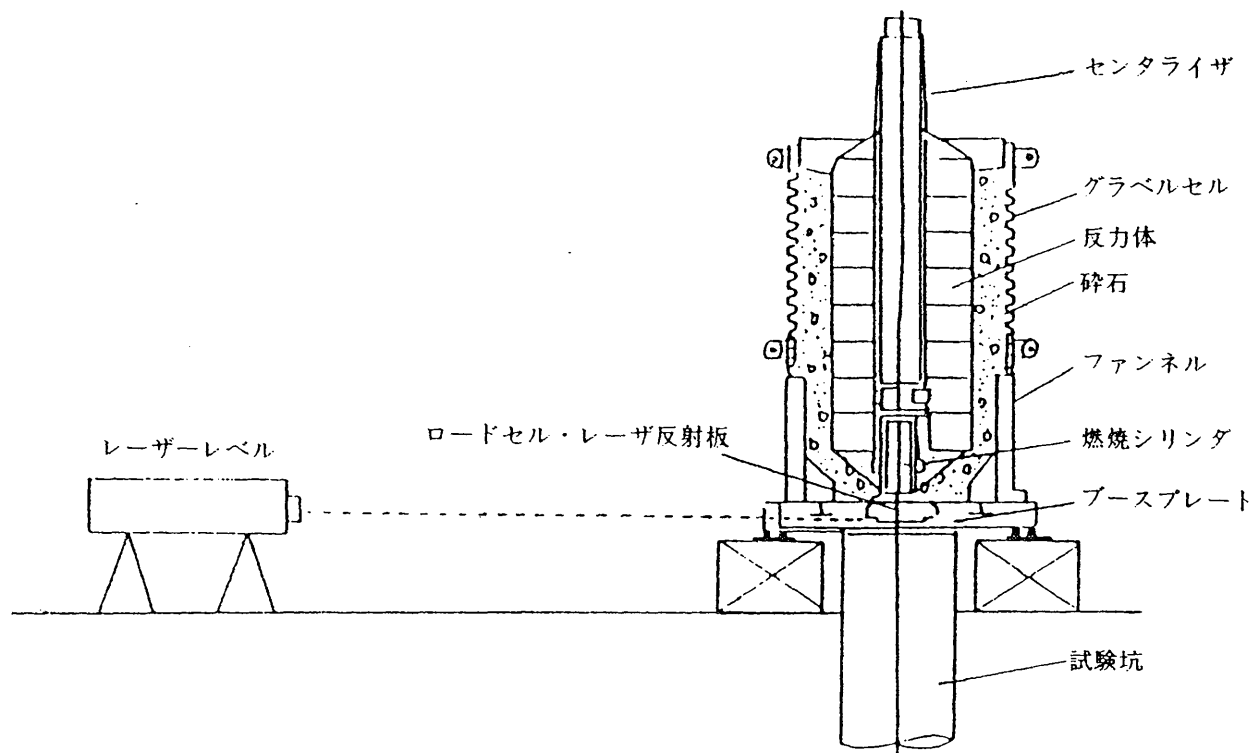


図-5：急速載荷試験方法の装置図(スタナミック試験)

長くすると、杭体内に発生する波動現象が無視できるようになる。この結果、杭体を剛体と扱えるようになり、静的支持力を求めるのに適用するのは波動理論ではなく振動理論で済むことになる。また、荷重～沈下量関係を直接得ることもできる。この原理を応用したのが、急速載荷試験方法である。

この載荷試験方法には、大別して2種類ある。まず、図-5のように、計画荷重の5%の質量を持つ反力体を特殊な推進薬を燃焼させて打ち上げ、その反力を杭頭に載荷する方法である。1989年にオランダとカナダで共同開発され、スタナミック試験と呼ばれる。わが国には1992年に紹介され、現在まで約80件の試験例がある。この試験方法については、「急速載荷試験法研究会（委員長日下部治東京工大教授）」や、地盤工学会「杭の急速載荷試験法研究委員会（委員長岡原美知夫建設省土木研究所部長）」の場で、試験結果の解釈等について詳細に検討されている。この試験方法の詳細は、文献9)や文献13)などを参照されたい。

もう一つの急速載荷試験方法は、図-6のように、バネを介してハンマーを落下させることによって、衝撃載荷試験方法よりも載荷時間を長くした準静的載荷試験方法である。この方式は、オランダでは実用化されているものの、わが国では設省建築研究所を中心に模型実験が行われている¹⁰⁾段階である。

急速載荷試験方法は、「急速」との名が示すように、静的載荷試験方法と衝撃載荷試験方法の中間的なものである。まず、反力装置が不要で、静的載荷試験方法に比べ経済的に試験を行えるが、衝撃載荷試験方法に比べると載荷装置は大がかりで試験費用も多く必要となる。また、試験で得られる支持力や荷重～沈下量関係も、静的載荷試験方法に近いものが得られるが、全く等価なものではなく、振動理論に基づく解析法を介してダンピングや速度の影響を除く必要がある。

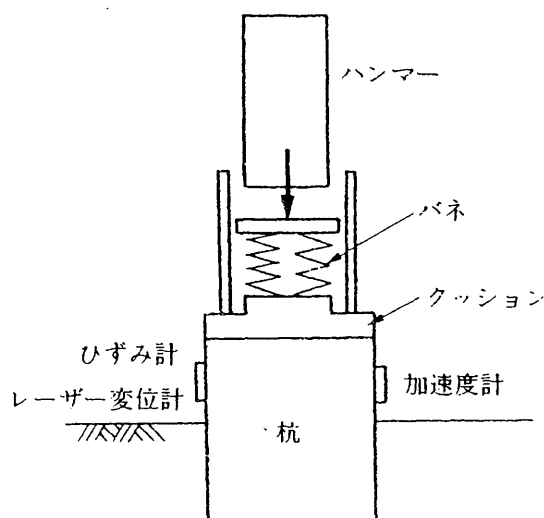


図-6：急速載荷試験方法の概念図(準静的載荷試験)

図-7に、 $\phi 300$ のPHC杭に対して行われたスタナミック試験の結果を示す¹⁵⁾。同じ地盤で行われた静的荷重試験の結果と比較しているが、降伏荷重までの荷重～沈下量関係は、ほぼ一致している。

6. 各種荷重試験方法の比較

本節では3種類の新しい試験方法と押し込み試験方法との比較を行う。以下、押し込み試験方法は「押し込み」、先端荷重試験方法は「先端」、衝撃荷重試験方法は「衝撃」と、急速荷重試験方法は「急速」と略す。

① 荷重時間

「押し込み」、「先端」：数時間～数十時間

「急速」：0.05～0.2秒

「衝撃」：0.005～0.03秒

② 経済性

一般的には、次の順に経済性が向上する。

「押し込み」→「先端」→「急速」→「衝撃」

すなわち、「押し込み」を1カ所行う予算があれば、「先端」は1～2カ所、「急速」は数カ所、「衝撃」は数十カ所行うことができる。もちろん、「先端」+「衝撃」などの組み合わせも有意義である。

③ 得られる支持力の特徴

「押し込み」：実際の建物によるものと、ほぼ同じ荷重条件の支持力が得られる。

「先端」：静的支持力が得られる。ただし、周面摩擦力の向きは逆方向になる。先端抵抗は、「押し込み」よりも確実に得られる。

「急速」：得られるのは動的支持力である。振動理論による解析によって、「押し込み」に近い静的支持力が推定できる。

「衝撃」：得られるのは動的支持力である。波動理論による解析によって静的支持力が推定できる。

④ 得られる支持力の大きさ

「押し込み」：荷重を大きくすれば、極限支持力が得られる。ただし、大口径杭では極限支持力を得るのに十分な荷重を載荷するのは難しい。

「先端」：荷重を大きくすれば、先端支持力と周面摩擦力の一方の極限值が得られる。補助反力装置を併用するなどの工夫をすれば、両方の極限值が得られる¹²⁾。

「急速」、「衝撃」：荷重を大きくすれば、極限支持力が得られる。

⑤ 荷重P～沈下量S関係

「押し込み」：杭頭のP～S関係をはじめ、測定器を設置すれば任意の位置のP～S関係が得られる。

「先端」：杭先端のP～S関係と周面摩擦力～変位量関係が得られる。杭頭のP～S関係は、荷重伝達法などの解析によって計算できる。

「急速」：振動理論による解析によって、「押し込み」に近いP～S関係が推定できる。

「衝撃」：波動理論による解析によって、P～S関係が推定できる。

⑥ 既存杭（試験計画時に施工が完了している杭）への適用性

「押し込み」：試験杭の周囲に、反力杭やアンカーを設置すれば可能だが、実際には難しい場合が多い。

「先端」：適用できない。

「急速」、「衝撃」：適用できる。

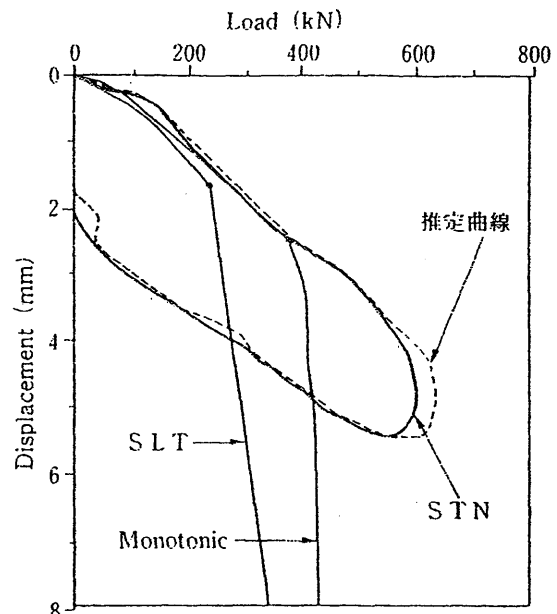


図-7：スタナミック試験結果の一例

7. 結語

現在、載荷試験を行ってその結果を反映するような設計があまり行われたいのは、試験費用が多いためであることと、今の設計基準類にはその費用に見合うメリットがあまり記載されていないためである。前者については、ここで紹介した新しい載荷試験方法の発展によって、かなりの程度解決できるであろう。後者については、性能設計の導入によって載荷試験をすることのメリットが大きくなるであろう。したがって、近い将来は、載荷試験の結果に基づいた合理的な杭の設計が行われるようになるものと期待される。

参考文献

- 1)小椋仁志・カキマツ・境友昭：新しい載荷試験の動向，基礎工，Vol. 24, No. 8, pp. 41～47，総合土木研究所，1996. 8.
- 2)地盤工学会基準部：地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法」の改正案について，土と基礎，Vol. 47, No. 12, pp. 67～84，地盤工学会，1999. 12.
- 3)小椋・岸田・須見・吉福：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，土質工学会，1995. 5.
- 4)青木一二三：荷重相反型載荷試験と支持力，基礎工，vol. 24, No. 5, pp. 10～17，総合土木研究所，1996. 5.
- 5)小椋仁志：杭先端載荷試験法の概要と適用例，G B R C，No. 87, pp. 54～67，日本建築総合試験所，1997. 7.
- 6)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，総合土木研究所，1998. 7.
- 7)松本樹典・西田義親・武井正孝：動的計測による杭の動的貫入挙動の評価方法と応力波解析プログラムKWAVE，杭の打込み性および波動理論の杭の応用に関するシンポジウム，pp. 107～110，1988
- 8)境友昭・村上浩・沖健・田中幸彦・篠原敏雄：杭の支持力の動的測定，杭の打込み性および波動理論の杭の応用に関するシンポジウム，pp. 103～106，1988
- 9)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，総合土木研究所，1996. 5.
- 10)FELLENIUS, B. H. : VARIATION OF CAPWAP RESULTS AS A FUNCTION OF THE OPERATOR, The 3rd International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles , 1988. 5.
- 11)片山猛・西村真二・脇屋泰士・林正宏：動的載荷試験による鋼管杭の支持力推定法，土と基礎，Vol. 43, No. 5, pp. 28～30，1995. 5.
- 12)HORIGUCHI, T., KARKEE, B. M., SAKAI, T., 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.
- 13)続誠：爆発推進力を利用した載荷試験－STATNOMIC，基礎工，Vol. 20, No. 1, pp. 111～113，総合土木研究所，1992. 1.
- 14)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回土質工学研究発表会(金沢)，pp. 1441～1442，1995. 7.
- 15)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(その一)－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. 9.