

多点測定法による杭の支持力の推定

澤井 廣之¹・塩井 幸武²・吉田 好孝³・境 友昭⁴

¹正会員 株式会社宮地鉄工所 社長(〒 103 東京都中央区日本橋小伝馬町15番18号)

²正会員 工博 八戸工業大学構造工学研究所教授(〒 031 八戸市大字妙字宇大関88-1)

³正会員 東京湾横断道路株式会社技術部技術第二課長(〒 160 東京都千代田区一番町15番5号)

⁴正会員 工博 有限会社アブライド 代表取締役(〒 300-32 つくば市大曾根3816-1)

杭の支持力を杭の打設中に推定する場合、杭に作用する地盤の動的貫入抵抗の値と、杭打設後の地盤の支持力の回復率を測定する必要がある。本論では、波動理論に基づいて、杭の周面及び先端での地盤の動的抵抗を測定する方法、および杭の打設終了後、定期的に杭を打撃し、この時に杭に作用する地盤の抵抗を測定することによって地盤の支持力回復率を推定する方法を示す。試験は、東京湾横断道路で行い、多点測定方法によって推定された杭の支持力と静的載荷試験による支持力値は非常に近い値となった。

Key Words : dynamic, bearing capacity of piles, stress-wave theory

1. まえがき

杭基礎の支持力を確認するために杭の静的載荷試験が行われる。しかしながら、大口径の海洋杭に対して杭の支持力を確認する手段として静的載荷試験を適用することは経済的視点から困難である場合が多い。

一方、打込み杭では、打撃中、あるいは打設後の杭を再打撃し、その時の杭の動的挙動から杭の支持力を推定する方法がある。すなわち、動的載荷試験技術である。この方法は、打撃された杭中の応力伝搬が一次元の波動理論によって説明されることを前提に、波動現象に対する境界条件としての地盤の抵抗力(動的貫入抵抗)を分布パラメータとして推定しようとする方法である。動的載荷試験技術では、杭の波動現象の測定を杭頭のみで行うことが一般的であるが、この場合、杭に働く周面摩擦力を含む地盤の抵抗力を直接測定することはできない。杭に働く地盤の抵抗力を力学モデルで表現し、測定された杭の動的挙動から解析的にその力学モデルのパラメータを推定する方法が用いられている。これまでの杭頭計測方法を中心とした動的載荷試験技術では、杭頭に到達した反射波を解析に利用することから、(1) 打撃力が十分でないと杭が貫入するような地盤の降伏状態での抵抗力が測定できない、(2) 多層地盤の各層毎の周面摩擦力による地盤の抵抗を測定できない、という問題点があった。また、杭の打設中の測定のみでは、特に、(3) 粘性土系の地盤では杭打設後に地盤の支持力が回復する現象(セットアップ)があり、杭の静的支持力の推定が難しい、などの問題点もあった。

そこで東京湾横断道路では、(1) 及び(2) に対応するため、杭中の多点で波動を計測し、これから、杭に作用

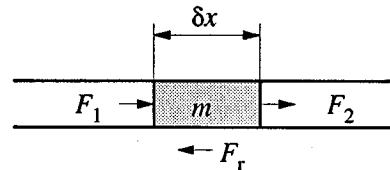


図-1 弾性棒での力の釣合

する地盤の抵抗を杭の単位長さ毎に算出する手法(多点測定法)を開発し、また、(3) に対応するため、杭打込み終了後に再度打撃し、杭に作用する地盤の抵抗の回復状態を測定するという方法を用いた。

本文では、多点測定法による杭の動的貫入抵抗の測定方法の理論と実際、再打撃によって地盤抵抗の回復現象を測定する方法について論じる。また、多点測定法をベースとした動的載荷試験技術によって、杭の静的支持力を推定する方法とその結果について論じる。

2. 多点測定方法の測定理論

図-1に示すような弾性棒(断面積 A 、密度 ρ 、縦弾性係数 E)の微小部分 δx の両端に力 F_1 、 F_2 が作用するとともに、この微小部分には、 F_r の外力が作用していると考え。この時、弾性棒が1次元弾性体とみなせるとすれば、運動方程式、

$$\rho \delta x A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - (F_2 - F_1) = F_r \quad (1)$$

が成立する。ここで u は杭の微小部分の変位、 t は時間である。式(1)では、微小部分 δx が質点とみなし得る程微小であること、すなわち、この区間を通過する波動の波長が δx の2倍以上の長さであることを前提としてい

るが、力 F_1 , F_2 , F_r に制限はない。式(1)において、力 F_1 , F_2 は杭の軸力であり、杭体のひずみが測定されていれば、

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= AE\varepsilon_1 \\ F_2 &= AE\varepsilon_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。ここで、 ε_1 , ε_2 は杭体の断面1, 2 でのひずみであり、断面1, 2 にひずみゲージを貼付して測定可能である。同様に加速度 $\partial^2 u / \partial t^2$ は、断面1, 2 で測定した加速度 $a_1(t)$, $a_2(t)$ をもとに、

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{2} \{a_1(t) + a_2(t)\} \quad (3)$$

として算出される。式(1)において、 F_r 以外は、既知量あるいは測定量であるから、すなわち、微小区間に作用した外力(杭打ちの場合、地盤の抵抗)が測定されることとなる。なお、式(1)において、 $F_r = 0$ で $\delta x \rightarrow 0$ の場合、

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

の波動方程式が得られる。

3. 東京湾横断道路での試験の概要

(1) 試験概要

東京湾横断道路では、打込み杭の支持力管理法の確立を目的に、杭の動的載荷試験および静的載荷試験を行っている^{1),2)}。

多点測定法を用いた杭の動的載荷試験は、1992年4月~5月に東京湾横断道路の木更津側P8橋脚の緩衝工の基礎杭を試験杭として実施した。試験杭の打設深度および地盤の土質柱状図を図-2に示す。試験杭の諸元を表-1、ハンマの仕様を表-2に示す。

表-1 杭の仕様

杭長(m)	52.05
杭径(mm)	1,597.9
肉厚(mm)	22.25
弾性係数(N/m ²)	2.06×10 ¹¹
密度(kg/m ³)	7,850
材質	SKK490

表-2 ハンマの仕様

ラム質量(kg)	24,000
最大高さ(m)	1.5
クッション	油圧クッション

(2) 測定システム

a) センサー

センサーは、加速度計とひずみゲージによって構成される。加速度計は、ひずみゲージ式加速度計で周波数範囲0~2,000Hz、容量1,000Gである。ひずみセンサーは、防水型カプセルゲージ2枚をアクティブゲージとしてスポット溶接で杭に取付け、また2個の精密固定抵抗

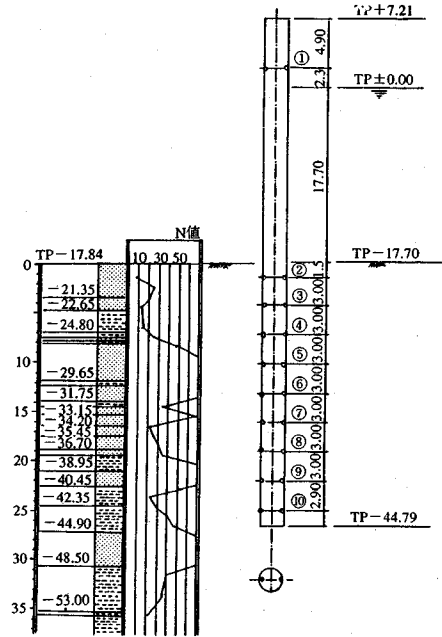


図-2 センサーの取り付け位置

をダミーゲージの代わりに用い、ホイートストーンブリッジを構成した。ダミーゲージと加速度計は、アルミニウムダイカストで作成した防水ケースの中にアクリルプレートをクッション材として収納し、また防水ケースはM6のボルト4本で杭に固く取付けた。センサーは、有効測定周波数範囲を0~800Hzとして設計している。

センサーの取付け位置は、図-2中①~⑩の10点である。センサーはいずれも同一断面对角位置に2個1組として取付けた。これは、杭の偏打による曲げの影響を排除するため、およびセンサーの破損、断線などによる測定データの欠損を防ぐためである。

①点は、同時に測定したDPA³⁾、DPAS⁴⁾、TNO⁵⁾などの杭頭計測法(杭頭で波動現象を測定し、杭の支持力を推定する方法を総称して杭頭測定法という)の測定点と同一位置であり、杭頭計測法と多点測定法のデータの相互比較を行うために設けた測定点である。②~⑩は、地盤の抵抗を測定するための測定点であり、測定点の間隔は3mである。

b) 測定系

ひずみ測定用アンプは、電流型を用いた。これは、センサーからアンプまでの距離が長く、また杭頭位置と杭先端位置では40m以上の距離差があり、電圧型では、ブリッジ電圧の降下による測定誤差が考えられたから

である。測定信号は、100 μ secで同時にサンプリングし、A/D変換して計算機にデジタル信号として取込んだ。データ長は、1ch当り800個、測定時間は80msecである。また、すべてのデータはアナログ式のデータレコーダに記録するとともに重要な波形データについてはオシログラフに出力した。

c) 測定のタイミング

杭の打設中の波動は、杭先端の深度がTP-33.0mとなった位置から深度1m毎に各10打程度、連続して測定、記録した。打設の途中、杭が支持層(TP-44.7m)およびその上部の粘性土層(TP-43.3m)に達した位置でハンマの落下高さを7段階(0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5m)に変化させて各2打づつ試験打撃を行った。試験杭の打ち止めは、TP-44.7m¹とした。試験杭の打込みに要した総打撃回数は1,635回であった。

杭の再打撃は、打撃終了から、6分、15分、33分、1時間、2時間、27時間および76時間後に実施した。33分後までは、ハンマの落下高さを1.5mで各2回、1時間以降の再打撃では、これに加えて、ハンマの落下高さを0.2mから1.5mまで変化させて各1回づつ測定した。また、76時間後は、連続して100打、打撃し、地盤の軟化(リラクゼーション)の過程を観測した。

4. 測定結果

測定波形の一例を図-3に示す。加速度は、積分して速度とし、これに杭の機械インピーダンス $Z = A\sqrt{\rho E}$ を乗じて、力換算した波形を示している。これは、波動理論から導出されるように、進行波(\downarrow で表記)、後退波(\uparrow で表記)について、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} F_{\downarrow} &= Zv_{\downarrow} \\ F_{\uparrow} &= -Zv_{\uparrow} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

F : 力 (N:圧縮方向を正)

Z : 杭の機械インピーダンス (N/m/s)

v : 速度 (m/s)

の関係があるからである。杭頭に発生した打撃力は進行波として杭先端方向に伝搬するが、地盤の抵抗が作用すると、これによって波動の速度成分が減少し、その反力として、正の成分を持つ後退波が発生する。波動の力成分は、進行波と後退波の合成によって強くなり、逆に速度成分は、後退波の負の成分を持つことから小さくなる。

図-3において、波動の力成分と速度成分に差が生じるのは、このような地盤の抵抗に起因するものであり、両者の差が大きい程、その測定点以下の地盤の抵抗が強いことを示している。

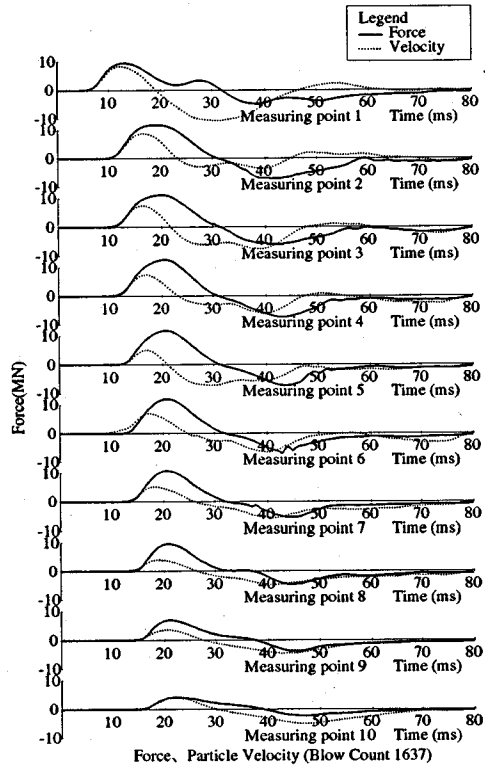


図-3 測定波形

図-4に、式(1)によって算出した地盤の抵抗を杭の各測定区間について示す。測定区間2,3は、測定点2,3の間で測定、算出された力成分を意味する。差分打撃力は、式(1)における $F_2 - F_1$ 、慣性抵抗は、 $\rho \delta x A \partial^2 u / \partial t^2$ を示す。地盤の抵抗は、この差分打撃力と慣性抵抗の差である。反力であることから、力の作用する方向が作用力と逆となり、したがって図の負の方向が実際的な反力としては正の成分となる。

杭の貫入過程(10~30msec)では、ほとんどの区間で、地盤の抵抗は杭の貫入を抑制する方向に作用していることが分かる。また、杭の貫入過程が終了した後では、地盤の抵抗は逆の成分となっている。抵抗の発生機構から考察すると、この過程では、杭が地盤によって押し戻されていること、すなわちリバウンド状態となっていることが示される。打撃回数1,637は、杭打設後6分経過し、杭がほとんど貫入していないことから、このような杭のリバウンドが生じたものと考えられる。

(1) 地盤の抵抗の力学モデル

多点測定法では、相隣接する測定点間で杭に作用する地盤の抵抗の時間波形を得ることができる。これを基にして、杭周面での地盤の抵抗の力学モデルについて考察する。

¹ 杭の最終貫入深度は、TP-44.79mであるが、静的載荷試験による杭の沈下量を考慮し、TP-44.7mを打ち止め深度としている。

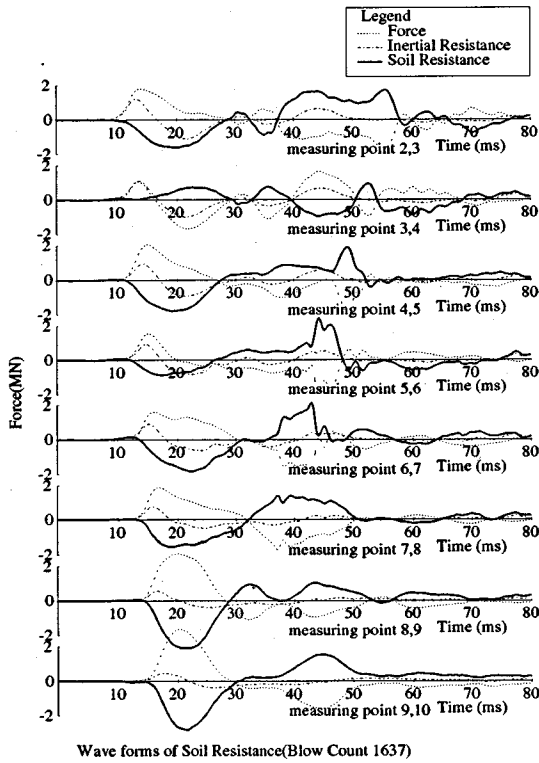


図-4 各測定点間に作用する地盤の反力の波形

a) 杭の周面抵抗の力学モデル

波動理論による杭の支持力解析の数値解析方法を紹介した Smith E.A.L.⁶⁾は、図-5に示すような地盤抵抗の力学モデルを提案した。Smith モデルである。地盤の抵抗は、バネ、スライダ及びダッシュポットによって構成され、スライダは、極限抵抗力以下の外力に対しては動かず、それ以上の外力が作用すると一定抵抗を保ちながら摺動する。バネは、杭周面での地盤の弾性変形に伴う抵抗を示し、バネのみが作用している段階では、杭と地盤との接触面は破壊されていない。ダッシュポットは、地盤の変形速度に比例する抵抗（弾性領域）及び杭と地盤との相対変位が生じる場合（塑性領域）での相対変位速度に比例する抵抗力を示している。弾性領域と塑性領域とでは、粘性抵抗の発生機構が異なることから、弾性領域と塑性領域で別々のダッシュポットを用いるモデルや、杭周面に密着した地盤の慣性抵抗による波動の減衰を考慮した付加質量モデル⁷⁾なども提案されている。

b) 打撃力と地盤の抵抗の関係

図-6に、打撃力（進行波）と地盤の抵抗の関係を示す。進行波の強さは、区間の上側での力と速度の測定値から、

$$F_1(t) = \frac{1}{2} \{F(t) + Zv(t)\} \quad (6)$$

として算出したものである。図は、打撃数 1,380 杭深度 TP-44.5m の例を示すもので、この打撃では、杭は約

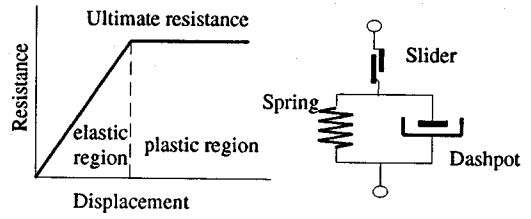
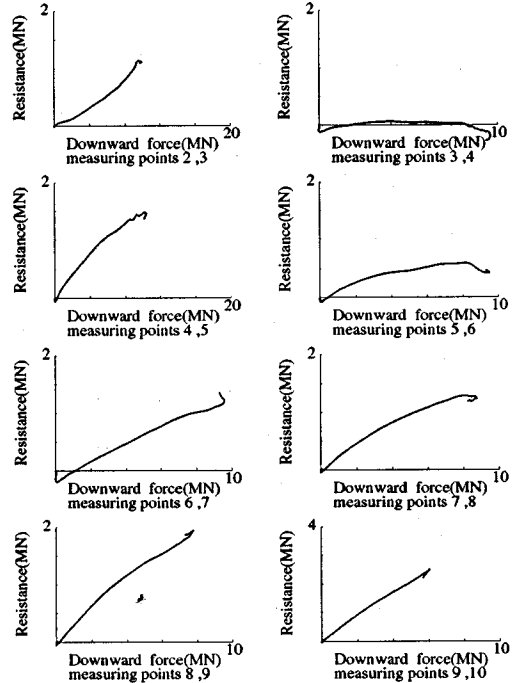


図-5 地盤の抵抗の力学モデル



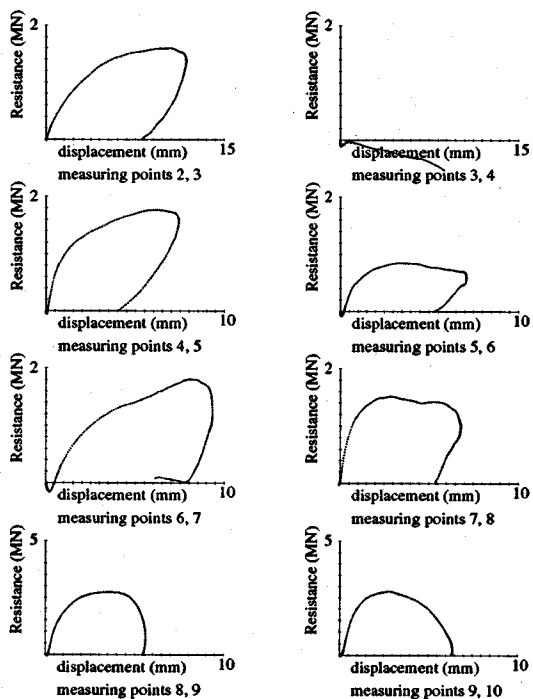
Relation between Driving force and resistance of soil (Blow Count 1380)

図-6 打撃時の進行波と地盤の抵抗の関係

5mm 貫入している。すなわち、図-5にの地盤の反力モデルが成立する場合、杭には地盤の極限抵抗力が作用していることになる。しかし、図に示すように、特に、地盤の抵抗が強い 8-9、9-10 の測定点間において進行波と地盤の抵抗は比例するような関係にあり、杭は貫入しているにもかかわらず、全ての区間でスライダの特性（作用する力が極限値を越えると一定の抵抗力となる。）が示されている訳ではない。

c) 杭の変位と地盤の抵抗の関係

図-7に杭の測定点間の変位と地盤の抵抗の関係を示す。測定点間の杭の変位は、測定した加速度の2階積分によって求めたものである。図に示すように、変位と地盤抵抗に比例関係が見出せる区間と、変位の増加にも関わらず地盤の抵抗が一定となる区間に区分される。前者を弾性範囲、後者を塑性範囲とするならば、Smith モデルが成立すると考えられる。変位が大きくなった場合、



Relation between displacement of pile and resistance of soil (Blow count 1637)

図-7 各測定点間の平均変位と地盤の反力の関係

地盤の抵抗がほぼ一定値に収束する傾向を示すことは図からも明らかであり、すなわち、杭に作用する地盤の周面抵抗には極限値の存在が考えられる。しかしながら、図-6に示されるように、地盤の抵抗は、進行波の強さと比例する関係にあり、地盤の抵抗が最大値に達するのは進行波の強さが最大となった時である。この事実からすると、図-7で極限値とみなし得る地盤抵抗は、進行波の強さの最大値に対応した値であり、杭、地盤系の固有の値とは判断できない。図-7に見られる弾性変形限界の変位量は、進行波の強さが最大となるまでの間での杭周面の変位量に相当し、これは、進行波の波形(強さが最大に達するまでの時間)の影響を受けることから、地盤の固有の特性とは判断されない。また、変位は、杭の速度の時間積分であり、図-6に示すように地盤の抵抗(後退波)が、進行波の強さと比例関係にあるとすると、式(5)から明らかのように、杭の速度は進行波の強さに比例し、よって、進行波が正の力を保持している時間では、杭の変位は進行する。図-7での塑性領域は、この変位の進行によって形成されたものと判断される。これから、地盤の抵抗は、進行波の強さに比例して増大し、進行波の強さが最大値に達した後、進行波が地盤の抵抗を発生させる強さを持つ時間内では、ほぼ一定値となったことが示される。すなわち、図-8で示す○の点で地盤の反力は最大となり、これ以降の時間で進行波が十分に強

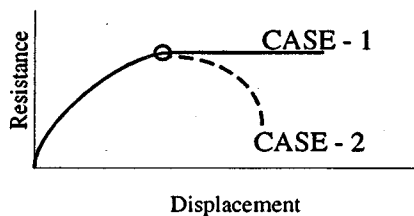


図-8 地盤の変位と抵抗の関係のモデル

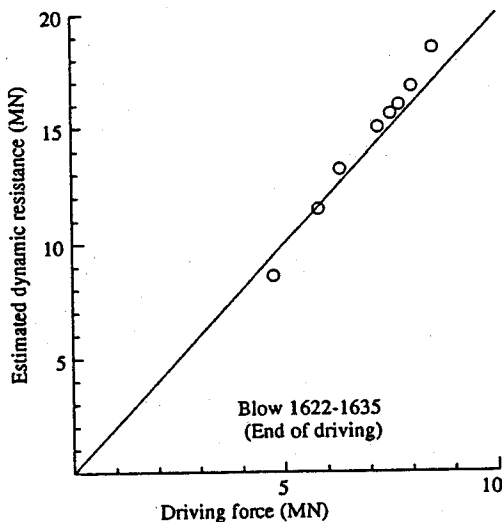


図-9 杭頭に発生した最大打撃力と測定された動的貫入抵抗の関係

ければ、CASE-1のように変位に関わらず、一定の反力となり、進行波が弱ければCASE-2のように変位の進行によって反力は小さくなる。地盤の反力は、その区間に伝搬した進行波の強さに影響され、その区間に固有の値とは言えない。図-9に、ハンマの落下高さを変えて(進行波の強さを変えることと同義)地盤の抵抗を測定した結果を示す。図に示されるように、進行波の強さと地盤の反力は比例する傾向を示している。この打撃試験内での杭の深度に数cmの違いはないことから考えて、地盤の抵抗の最大値は、進行波の強さに依存し、地盤の固有の値ではないことが分かる。

(2) 杭の動的貫入抵抗の深度分布

図-10に、多点測定法によって測定した杭の動的貫入抵抗の軸力分布と、静的載荷試験によって得られた降伏支持力の時の軸力分布とを比較して示す。多点測定法における先端抵抗は、杭の先端位置でのひずみゲージから求めた値である。動的貫入抵抗の分布は、打撃回数1,635(杭の打ち止め)と1,670(76時間後の再打撃)に

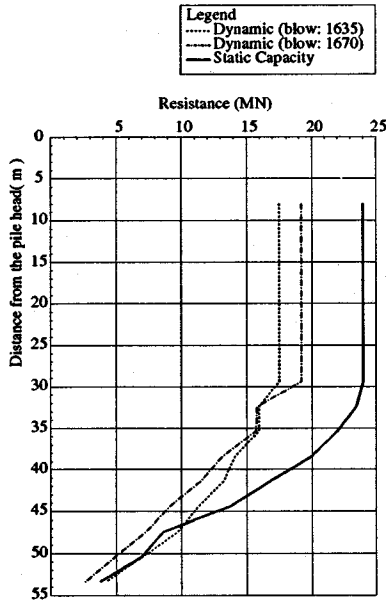


図-10 打撃時の地盤の貫入抵抗の杭軸方向分布

ついて示している。多点測定法によって得られた動的貫入抵抗は、杭の打ち止め時で17.5MN、打設終了後76時間で19.2MNである。これらの値は、いずれも静的降伏支持力24MNより小さい。測定された動的貫入抵抗は、打設終了後76時間経過することによって約15%大きくなっているが、しかし、図-10で見ると、杭の深い位置(35m以深)では逆に動的貫入抵抗が小さく測定されている。これは、杭の上部に作用する地盤の抵抗が回復し、杭の下部に伝搬する打撃力が相対的に弱くなり、これによって発揮される地盤の抵抗が小さくなったものと考えられる。すなわち、地盤の抵抗が回復することによって、杭の下部では打撃力不足の状態となったものと考えられる。

(3) 動的測定による杭の支持力の推定

多点測定方法によって、打撃された杭に作用する地盤の抵抗は測定されるが、杭の支持力を推定するためには、杭打ちが終了した後での地盤の支持力回復現象(セットアップ)を把握しなければならない。このセットアップ係数の測定を目的に杭打設後に経時的に杭を打撃し(再打撃)この時に地盤の動的貫入抵抗の変化を測定した。

表-3は、再打撃によって測定された動的貫入抵抗および地盤の抵抗の発現比(着目区間に作用した打撃力と測定されたその区間の地盤の抵抗の比率、図-6の勾配)をまとめたものであり、杭の打ち止め時の値を1として基

表-3 貫入抵抗の時間変化率(セットアップ係数)(上段:地盤の抵抗, 下段:地盤の抵抗の発現比)

測定位置	測定時間							
	打止め (1621)	6分 (1637)	15分 (1639)	33分 (1641)	60分 (1642)	2時間 (1652)	27時間 (1660)	76時間 (1670)
2-3	1.00	1.03 (1.04)	1.14 (1.12)	1.29 (1.24)	1.51 (1.50)	1.58 (1.28)	2.32 (1.88)	2.23 (1.81)
3-4	1.00	1.00 (1.00)	1.00 (1.00)	1.00 (1.00)	1.00 (1.00)	1.00 (1.00)	1.00 (1.00)	1.00 (1.00)
4-5	1.00	1.29 (1.08)	1.24 (1.08)	1.30 (1.14)	1.40 (1.31)	1.40 (1.30)	1.67 (1.21)	1.78 (1.41)
5-6	1.00	1.37 (1.16)	1.54 (1.33)	1.69 (1.51)	2.12 (1.80)	2.00 (1.83)	2.65 (1.77)	2.61 (2.04)
6-7	1.00	1.34 (1.18)	1.34 (1.36)	1.40 (1.55)	1.41 (1.90)	1.46 (1.88)	1.57 (2.25)	1.64 (2.29)
7-8	1.00	1.25 (.21)	1.33 (1.25)	1.32 (1.30)	1.42 (1.46)	1.42 (1.45)	1.47 (1.58)	1.46 (1.54)
8-9	1.00	1.20 (1.07)	1.22 (1.09)	1.23 (1.09)	1.22 (1.22)	1.22 (1.20)	1.06 (1.28)	1.06 (1.31)
9-10	1.00	1.17 (1.04)	1.17 (1.04)	1.15 (1.05)	1.14 (1.14)	1.14 (1.14)	0.94 (1.23)	0.98 (1.26)
先端	1.00	1.00	0.94	0.85	0.78	0.74	0.58	0.63

表-4 セットアップ係数と動的貫入抵抗の推定値

	2,3間	3,4間	4,5間	5,6間	6,7間	7,8間	8,9間	9,10間	先端
Setup	2.23	-	1.78	2.61	1.64	1.54	1.31	1.26	1.26
R_d	3.53	0.11	2.65	1.73	2.43	2.03	3.10	3.18	5.45
動的貫入抵抗の合計値:24.2MN									

準化している。表に示されるとおり、測定区間3,4を除いて、測定された動的貫入抵抗は、経過時間とともに増加する傾向を示すが、測定点⑧以深では、逆に、測定された地盤の抵抗が小さくなる傾向を示す。これは、測定点⑧以浅での地盤の抵抗が回復し、結果的に測定点⑧以深に達する打撃力が小さくなったためと考えられる。実際、抵抗の発現比は、杭のほぼ全区間にわたって時間の経過とともに大きくなっており、時間の経過による地盤の抵抗の増加が観測されなかった区間においては、その抵抗の発現比を手掛かりとして、地盤のセットアップ係数の推定を行うことができよう。なお、測定区間3,4での動的貫入抵抗および抵抗の発現比に時間増加傾向が観測されなかったのは、測定点3での力波形の測定値が小さく、結果的にこの区間での地盤の抵抗が小さく計算されたためと考えられる。また、このため測定区間2,3での地盤の抵抗および抵抗の発現比が大きき値として計算されており、杭全体の動的貫入抵抗の測定値に対する測定点3の測定誤差の影響は小さい。

表-4は、推定した地盤のセットアップ係数(杭打設後76時間)を示すもので各測定区間ごとに、貫入抵抗あるいは抵抗の発現比のうち大きい方の値を用いている。抵抗値 R_d は、打ち止め時の地盤の抵抗に推定したセットアップ係数を乗じたものである。なお、杭先端でのセットアップ係数は、測定区間⑨-⑩の値と同じとしている。表に示すとおり、推定された支持力値は、24.3MN(2,374tonf)であり、これは、静的載荷試験での杭の降伏支持力の値にほぼ等しい。図-11は、これを軸力分布図として示したもので、動的載荷試験によって推定した軸力は、静的載荷試験によって得られたものと類似することが示さ

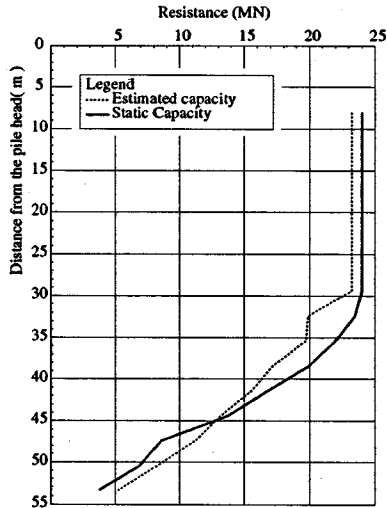


図-11 動的載荷試験によって推定された杭の支持力と静的載荷試験結果の比較

れる。

5. 結論

本論では、杭の支持力を動的な載荷試験技術によって測定することを目的として実施した①多点測定方法による杭の動的貫入抵抗の測定技術、②再打撃による地盤の支持力回復率(セットアップ係数)の推定方法について論じた。

今回対象とした杭では、多点測定方法によって高い精度で先端支持力および周面支持力を推定できることが分かった。また、杭周面に作用する地盤の抵抗は、杭が貫入する状態であってもその区間に作用した打撃力にはほぼ比例する傾向を示すことが分かった。これは、従来からの地盤の力学モデルでは、杭の周面抵抗は、地盤と杭で構成される系の固有のものと考えられていたことに対し、今回の試験では、打撃力の強さに応じて発現される強さが異なることが明らかになった。この場合、これまでの波動理論による杭の支持力解析技術が前提としていた地盤の抵抗と打撃力の独立性には、疑問が生じることとなる。

東京湾に打設された今回の杭の場合、打設終了後に地盤の支持力が回復すること、すなわちセットアップ現象があることが明らかになった。このことは、単に、杭の打撃中の動的貫入抵抗のみで杭の支持力を推定すると、支持力を少な目に評価する可能性があることを示している。すなわち、打込み杭の支持力管理のためには、試験杭を用いて打込み後、再打撃試験を行うなどの方法によって、あらかじめ、地盤の各地層のセットアップ係

数を把握しておくことが求められる。今回の試験によって得られた平均的なセットアップ係数は、約1.5である。すなわち、東京湾横断道路における大口径杭の支持力は杭の打止め時の動的貫入抵抗の50%増しの値となることが推定される。

多点測定方法によって杭の動的貫入抵抗を精密に測定し、かつ、再打撃によって地盤の支持力のセットアップ係数が推定できることもわかった。今回の杭では、杭の周面抵抗が打撃力に比例するという傾向を持っており、このため、打撃力不足によって杭の周面抵抗を完全に発揮させることができない状態であったが、セットアップ係数の推定が可能となった。

なお、今回の試験では、測定点の間隔を3mと非常に短くして実施したが、実用的には打撃力の波長の1/2以下の距離であれば十分であり、杭の地中部の3~4点で杭の動的挙動を測定すれば、同様の結果が得られる。

謝辞： 本論文の対象とした杭の静的・動的載荷試験は、東京湾横断道路株式会社が杭の支持力管理方法の確立を目的として実施した試験の一部である。関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Y. Shioi, O. Yoshida and M. Homma : Estimation of bearing capacity of steel pipe pile by static loading test and stress wave theory (Trans-Tokyo Bay Highway), *Proc. of Application of stress-wave theory to Piles*, pp.325-331, 1992.
- 2) 澤井廣之, 塩井幸武, 吉田修, 本間正幸 : 東京湾横断道路大口径鋼管杭載荷試験(その3), 第28回土質工学研究発表会講演集, pp.1691-1692, 1993.
- 3) Rausche, F. and Moses, F. : Soil resistance predictions from pile dynamics, *J. Soil and Found. Div., ASCE Proc.* Vol.98, No.SM9, pp.917-935, 1972.
- 4) 境友昭, 村上浩, 沖健, 田中幸芳, 篠原敏雄 : 杭の支持力の動的測定, 杭の打込性および波動理論の杭への応用に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.103-106, 1989.
- 5) van Koten, H. and Middendorp, P. : Equipment for integrity testing and bearing capacity of piles, *Intl. Seminar on the Application of stress wave theory on piles, Proc.*, pp.69-76, 1980.
- 6) Smith, E.A.L. : Pile Driving Analysis by the wave equation, *Soil Mech. Found. Div., ASCE*, Vol.86, No.SM4, pp.35-61, 1960.
- 7) Randolph, M.F. and Deeks, A.S. : Dynamic and static soil models for axial pile response, *Proc. of Application of stress wave theory to Piles*, pp.3-14, 1992.

(1995. 8. 11 受付)

DETERMINATION OF THE BEARING CAPACITY OF THE PILE BY MEANS OF STRESS WAVE THEORY

Hiroyuki SAWAI, Yukitake SHIOI, Yoshitaka YOSHIDA and Tomoaki SAKAI

To estimate the bearing capacity of the piles during driving, both of the dynamic resistance of the soil against penetration of the pile and the setup factors of the each soils should be determined. In this paper, the method to measure the dynamic resistance of the ground working along the pile shaft and beneath the pile base based on the stress wave theory and so called re-driving method to determine the setup factors of soil layers are presented. And the fact that the estimated bearing capacity of the test pile from the dynamic measurement and it determined by the static loading test are very close is shown in this paper.