

杭頭計測法による杭の支持力管理技術

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 八戸市大字妙字大開 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 有限会社アプライド 代表取締役 (〒 300-32 つくば市大曽根 3816-1)

打込み杭の支持力管理方法として、波動理論にもとづいた動的支持力管理技術がある。これらの管理方法では、主に杭頭で測定した杭の動的挙動から杭の周面及び先端に作用する地盤の抵抗を推定するという方法を用いている。ところが、この測定方法では、打撃力が十分でない場合には、地盤の抵抗が極限状態に達せず、従って、推定した支持力の値が静的載荷試験で得られる極限支持力とは異なるという問題点があった。本論文では、この原因を理論的に指摘し、杭頭計測法の適用限界について論じる。

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

1. まえがき

波動理論を用いた杭の支持力管理方法は、Goble ら¹⁾によって提案された CASE 法にその起源を見ることができよう。Goble らは、杭頭にひずみゲージおよび加速度計を取り付けて測定した杭の応力と加速度(実際は積分した速度)から、打撃された杭に作用する地盤の抵抗を測定する方法を開発した。すなわち CASE 法¹⁾である。杭頭近傍のみに測定用のセンサーを取り付けるという発想は、基本的には議論されることなく受け入れられており、波動理論による杭の支持力推定では、杭の挙動を杭頭近傍で測定することを前提にして測定理論が組み立てられていた。しかしながら、杭中の波動現象をもとに杭の支持力を推定する場合、杭の多数の断面での波動現象を測定する方が、情報量も多く推定精度の向上につながることは、十分に考えられることである。このため、杭頭近傍のみにセンサーを取り付けて、杭の支持力を推定しようとする方法を「杭頭計測法」と呼び、杭中の多数の断面にセンサーを取り付けて杭の挙動を測定する方法、「多点測定法」²⁾と区別する。

これまで、杭頭計測法について、その適用限界、測定方法上の問題が議論されることは少なく、その実用性の高さが強調される傾向にあった³⁾。しかし、杭の支持力は、杭に作用する力と釣合うように発揮される地盤の反力であり、極限支持力が反力の限界であるとすれば、作用力はその極限の反力を発揮させるまでの大きさを持たなければならないのは当然である。すなわち、打撃力が十分でない場合に杭の支持力が推定できるかという問題である。

本論文では、杭頭計測法による杭の支持力推定方法に

ついて理論的検討を行ない、その適用限界を示すとともに、東京湾横断道路での測定結果⁴⁾を紹介し、実際的な問題点について論じる。

2. 杭頭計測法の理論

(1) 杭打ちの運動方程式

a) 波動方程式と波動の伝播

杭は細長い棒とみなし得るから、近似的にこれを一次元の弾性体として取り扱うことができる。この時の棒の微小部分 δx では、力の釣合から、

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + \Delta F = \delta F_s \quad (1)$$

が成立する。ここで u は杭の変位、 ΔF は棒の微小部分の両側に作用する力の差分、 m は微小部分の質量である。また、 δF_s はこの微小部分に作用する地盤の抵抗力であり、動的な杭の周面抵抗力とする。杭の周面に摩擦力などの抵抗力が作用していない場合、 δF_s は 0 となる。 ΔF は、微小部分の長さ δx を十分に小さくとると、

$$\Delta F = -AE \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \delta x \quad (2)$$

となる。ここで、 A 、 E はそれぞれ杭の断面積、杭材料の縦弾性係数、 x は距離である。式(2)を式(1)に代入し、 $\delta F_s = 0$ とおくと、式(3)が得られる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{AE \delta x}{m} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

ここで、杭材料の密度を ρ とすると、 $m = A\rho\delta x$ である。これを考慮し、 $c = \sqrt{E/\rho}$ において式を整理すると、

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

となる。すなわち一次元の波動方程式であり、 c は波動の伝搬速度である。この波動方程式の特解のひとつとして、

$$u = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (5)$$

がある。ここで f, g は任意の関数である。式 (5) において、関数 f の値は、 $x = ct + k$ (k : 任意定数) となる直線 (特性曲線) 上では同一値となる。すなわち、 $x = ct + k$ の関係が保たれる場合、波形が変化しないことを意味している。また、関数 g では、 $x = -ct + k$ の場合、同様に波形が変化しないことを意味する。これから、 f を進行波 (座標軸の正の方向に伝搬する波動、 F_1 として示す。) g を後退波 (座標軸の負の方向に伝搬する波動、 F_1 として示す。) と呼ぶ。

杭打ち現象を解析する場合、一般的に杭頭を原点とし、杭先端方向を正とする座標系を用いる。これから、進行波は杭頭に発生した打撃力が杭先端方向に伝搬する過程を示し、後退波は、地盤の抵抗力による杭周面での波動の反射および杭先端での地盤の抵抗との力の釣合による波動の反射を示す。

b) 杭周面での波動の反射

杭打ちでは、一般に杭に作用する圧縮方向の力を正、杭を貫入させる方向の速度を正とする。杭の微小区間 δx に進行波 F_1 が到達し、杭中には δF_s に起因する後退波が発生し、同時に力の釣合から、進行波 F_1 の力は小さくなる。この時、発生する後退波の力を δF_1 とすると、微小区間での力の釣合から、

$$(F_1 + \delta F_1) - (F_1 - \delta F_1) = \delta F_s \quad (6)$$

が成立する。式 (6) において、左辺第 1 項は、微小部分の原点側 (上側) での力、第 2 項は下側での力である。これから、

$$\delta F_1 = \frac{1}{2} \delta F_s \quad (7)$$

として杭の周面抵抗によって発生する後退波の強さが求められる。すなわち杭の周面に抵抗力が作用すると、これによって、その力の 1/2 が後退波となって杭頭方向に伝搬し、また進行波は $\delta F_s/2$ だけその力が弱くなることが示される。

c) 杭先端での波動の反射

杭先端では、力の釣合から、

$$F_1 + F_1 = R \quad (8)$$

となる。これから

$$F_1 = R - F_1 \quad (9)$$

の力が後退波となる。

d) 進行波と後退波の分離

杭頭で測定される力および速度は、それぞれ進行波、後退波の成分が合成されたものである。波動方程式は線形方程式であるから、力および速度とも進行波と後退波の

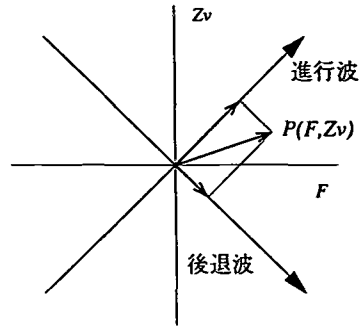


図-1 (F, Zv) 空間での波動の状態

各々の成分の単純加算となる。今、進行波 $u = f(x - ct)$ において、力 (F) および速度 (v) は、

$$F_1 = -AE \frac{\partial u}{\partial x}, \quad v_1 = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (10)$$

ここで、 $\xi = x - ct$ とおくと、

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= -AE \frac{\partial f}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dx} \\ v_1 &= \frac{\partial f}{\partial \xi} \cdot \frac{d\xi}{dt} \\ \frac{d\xi}{dx} &= 1 \\ \frac{d\xi}{dt} &= -c \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

である。式 (11) において、 $\partial f / \partial \xi$ を消去すると、

$$F_1 = \frac{AE}{c} v_1 \quad (12)$$

の関係が得られる。ここで、

$$\frac{AE}{c} \equiv Z \quad (13)$$

とにおいて、これを杭の機械インピーダンスと呼ぶ。後退波の場合は同様にして、

$$F_1 = -Zv_1 \quad (14)$$

となる。これから杭中での波動の状態を力 (F) と速度 (Zv) で構成される 2 次元平面で表現すると、図-1 のようになり、進行波は、 F 軸と 45° を成す直線、また後退波はこれと直交する直線で表現される。これから、任意の状態 $P(F, Zv)$ を進行波と後退波の成分に分離すると、

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{2}(F + Zv) \\ F_1 &= \frac{1}{2}(F - Zv) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

が得られる。

(2) 杭頭計測法

a) 杭の周面に抵抗が作用しない場合

杭の周面に抵抗が作用しない場合、杭頭に発生した進行波は減衰することなく杭先端に達し、また、杭先端で

反射した後退波は同様に減衰することなく杭頭に達する。杭先端での地盤の反力を R_p とすると力の釣合から、

$$F_{lp}(t) + F_{1p}(t) = R_p(t) \quad (16)$$

が成立する。ここで添字の p は杭先端を意味し、それぞれの力は時間 t の関数としている。これは、地盤の反力 R_p は一定値ではなく、杭先端変位、速度などの状態によって異なると考えるからである。また、杭の周面に抵抗が作用しない場合、波動の減衰がないから、式 (16) において、波動がセンサーの位置と杭先端を一往復する時間を T とおくと、

$$\left. \begin{aligned} F_{lp}(t) &= F_{lh} \left(t - \frac{T}{2} \right) \\ F_{1p}(t) &= F_{1h} \left(t + \frac{T}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

の関係がある。ここで添字 h は杭頭 (正確にはセンサーの取付け位置) を意味する。式 (17) を式 (16) に代入して整理すると、

$$R_p(t) = F_{lh} \left(t - \frac{T}{2} \right) + F_{1h} \left(t + \frac{T}{2} \right) \quad (18)$$

が得られる。更に、式 (18) に式 (15) を代入して、整理すると、

$$R_p(t) = \frac{1}{2} \left\{ F \left(t - \frac{T}{2} \right) + F \left(t + \frac{T}{2} \right) \right\} + \frac{1}{2} Z \left\{ v \left(t - \frac{T}{2} \right) - v \left(t + \frac{T}{2} \right) \right\} \quad (19)$$

となる。式 (19) から、杭頭で力および速度を測定することによって、杭先端での地盤の反力が測定できることが分かる。式 (19) は、Goble¹⁾ が CASE 法として発表した杭の支持力の動的管理式と同じ形式である。

Goble らは、運動方程式を組立てる段階では、杭を剛体とみなしながら、杭の貫入に対する地盤の反力を求める場合は、波動が杭を一往復する時間の間での平均値を用いるという、質点系力学と波動理論を組み合わせた方法を用いて式の導出を行った。質点とみなした杭に対して波動を考慮することには論理的な矛盾があり、宇都ら⁵⁾ はこれを論拠のひとつとして CASE 法に対し否定的な批判を行った。しかし、結果的に得られた式は、波動理論にもとづく式と同じであり、実用的に問題はないと言えよう。

b) 杭の周面に抵抗が作用する場合

発表当初の CASE 法では、杭の周面に地盤の抵抗が作用する場合は考慮されていなかった。しかし、後に Rauche⁶⁾ は、この計算式を周面抵抗が作用する杭に適用すると、杭の全抵抗力が得られることを示している。Rauche らは、杭の周面に作用する地盤の抵抗力を Step 関数に置換して、波動の伝搬を特性曲線法 (1 つの特性曲線上を伝搬する波動は、他の特性曲線上を伝搬す

る波動の影響を受けないことを利用した波動の解析方法。) によってトレースするという方法を用いている。しかし、杭の周面に作用する地盤の抵抗が小さく、また、杭頭に発生した進行波が杭の周面抵抗および先端抵抗を十分に発揮させるだけの力を持っていると仮定すれば、波動理論にもとづいた考察によってこれを証明することができる。すなわち、今、杭の周面抵抗を F_s とすると杭先端に到達した進行波は、

$$F_{lp}(t) = F_{lh} \left(t - \frac{T}{2} \right) - \frac{1}{2} F_s \quad (20)$$

となる。杭先端に R_p の杭先端抵抗が作用すると、杭先端での反射波は、式 (16) から

$$F_{1p}(t) = R_p(t) - F_{lp}(t) \quad (21)$$

である。式 (21) に式 (20) を代入すると、

$$F_{1p}(t) = R_p(t) - F_{lh} \left(t - \frac{T}{2} \right) + \frac{F_s}{2} \quad (22)$$

となる。

打撃によって発生した進行波と杭先端で反射した後退波が重ならないとすると、杭先端で反射した波動は、再び杭の周面抵抗によって減衰しながら杭頭方向に伝搬する。よって杭頭に達する時の波動の強さは、

$$F_{1h} \left(t + \frac{T}{2} \right) = F_{1p}(t) + \frac{F_s}{2} \quad (23)$$

となる。式 (23) において、周面抵抗による成分が加算されるのは、杭頭に発生した進行波は十分に大きいと考えており、したがって杭先端で反射波 $F_{1p}(t)$ は、引張り波 (負の成分) となっているからである。杭の周面抵抗は摩擦力であり、したがって作用力の絶対値を減少させる方向に作用する。

式 (22)、式 (23) を式 (8) に代入して整理すると

$$F_{lh} \left(t - \frac{T}{2} \right) + F_{1h} \left(t + \frac{T}{2} \right) = R_p(t) + F_s \quad (24)$$

が得られる。これから杭頭に発生した打撃力が十分に大きい場合、杭頭計測法での管理式 {式 (18)} を用いると、杭の周面抵抗と先端抵抗を合成した全抵抗が測定されることが証明される。

c) 静的支持力の推定

杭の打撃時に式 (18) によって測定される値は、動的な状態での地盤の抵抗であり、これを動的貫入抵抗と言う。杭の支持力すなわち静的支持力を推定する場合、 R_p から動的成分を除去する必要がある。Goble らは、 R_p に含まれる動的成分を、杭先端での速度 (v_p) に比例する粘性抵抗のみとみなし、

$$R_c = R_p - J_c v_p \quad (25)$$

として、静的支持力を推定する方法を提案した。すなわち、動的貫入抵抗を静的支持力成分と動的抵抗成分の線形加算とみなす考え方である。ここで、 J_c は、ケースダンピング係数と呼ばれる値である。粘性抵抗が杭先端

の速度のみに依存するとしているのは、式 (8),(9) 及び式 (12),(14) の関係から、

$$v_p = \frac{1}{Z}(F_i - F_r) = \frac{1}{Z}(2F_l - R_p) \quad (26)$$

として v_p を算出することができるからである。特に、CASE 法は、杭の周面に地盤の抵抗が作用しないことを前提に導かれた式であり、粘性抵抗が作用するとすれば、杭先端のみであることは言うまでもない。

また、境⁷⁾が示しているように、杭の周面抵抗が作用する場合の杭先端の速度は、

$$v_p = \frac{1}{Z} \{2F_l - (F_s + R_p)\} \quad (27)$$

であり、CASE 法によって得られた動的貫入抵抗を式 (26) の R_p に代入することによって、杭の周面抵抗が作用する場合でも同様の結果が得られる。すなわち、粘性抵抗が杭先端の速度にのみ依存するとすれば、杭の周面に抵抗が作用する場合であっても式 (25) が成立する。

3. 杭頭計測法の理論的適用限界

(1) 周面抵抗がない場合

式 (8) に示されるように、杭先端で発揮された地盤の反力は、杭先端での進行波と後退波の力の和と等しい。杭先端での後退波は、作用力としての進行波に対する反力として発生するものであり、したがって、作用力の絶対値を越える強さとはなり得ない。すなわち、

$$|F_{rp}(t)| \leq |F_{lp}(t)| \quad (28)$$

である。

これから杭先端での地盤の抵抗 R_p を測定するために必要な杭頭での進行波の強さは、

$$F_{lh} \left(t - \frac{T}{2} \right) \geq \frac{1}{2} R_p(t) \quad (29)$$

となる。すなわち、杭の周面に抵抗が作用しない時、杭先端での地盤の抵抗 (極限抵抗) を杭頭計測法によって測定するためには、杭頭に発生する打撃力は極限抵抗の 1/2 以上でなければならないことが示される。また、杭頭に発生した打撃力が杭先端地盤の抵抗の 1/2 以下の場合、杭頭計測法によって測定される地盤の抵抗の値は杭頭での打撃力の 2 倍の値となる。逆に言うと、CASE 法で測定された杭の動的貫入抵抗の値が杭頭での打撃力の最大値の 2 倍に達した場合、杭の先端抵抗はその値以上である可能性があることを示唆するものである。

(2) 周面抵抗がある場合

a) 適用限界

杭頭計測法では、杭頭に発生した打撃力と杭先端で反射した後退波を合成して杭の支持力を測定する。このためには、杭先端で反射した後退波が杭頭に戻って来る

必要がある。この条件は、式 (23) において $F_{rh}(t)$ が 0 にならないことであるから、

$$|F_{rp}(t)| > \frac{F_s}{2} \quad (30)$$

となり、杭先端での後退波が正の場合と負の場合がある。後退波が正の場合 この場合、

$$F_{lh} \left(t + \frac{T}{2} \right) = F_{rp}(t) - \frac{F_s}{2} \quad (31)$$

である。これを式 (18) 右辺に代入すると、

$$F_{lh} \left(t - \frac{T}{2} \right) + F_{lh} \left(t + \frac{T}{2} \right) = R_p(t) \quad (32)$$

となる。すなわち、この場合は、杭の周面に地盤の抵抗が作用しても、CASE 法の測定値には周面抵抗が含まれないことになる。このような現象が生じるのは、杭の周面抵抗と比較して先端抵抗力が大きく、かつ打撃力が十分な場合である。

後退波が負の場合 この場合、式 (22) の関係から、

$$F_{lh} \left(t - \frac{T}{2} \right) - \left(R_p + \frac{1}{2} F_s \right) > \frac{F_s}{2} \quad (33)$$

が成立する。式 (33) の左辺は、杭先端で反射した後退波の強さであり、式 (33) を変形して、

$$F_{lh} \left(t - \frac{T}{2} \right) > R_p + F_s \quad (34)$$

となる。式 (34) から、杭に作用する地盤の極限抵抗を杭頭計測法によって測定するためには、杭頭に発生する打撃力は、杭に作用する地盤の極限抵抗より大きくなくてはならないことが示される。

b) 打撃力と後退波の関係

式 (30) の条件が成立しているかどうかを判定する方法を求める。杭先端での反射波 (後退波) は、杭の先端抵抗に依存する。しかし、反射波は入力としての進行波に対する反力として生じるわけであるから、入力の絶対値を越えることはない。よって、式 (30) が成立するためには、杭先端での進行波について、

$$F_{lp}(t) > \frac{F_s}{2} \quad (35)$$

でなければならない。この時、杭頭での打撃力は、式 (20) から、

$$F_{lh} > F_s \quad (36)$$

である。

打撃力の継続時間が波動が杭を 1 往復する時間よりも長い場合、杭頭で測定される後退波の強さの最大値は、式 (7) から明らかのように、 $F_s/2$ となる。よって、

$$F_{lh}(t) \geq 2F_{rh}(t+T) \quad (37)$$

が成立する場合、周面抵抗については、式 (30) の条件が満たされていることが示される。

一方、杭の周面抵抗が杭頭の打撃力より大きい場合、打撃力によって発揮される周面抵抗の大きさは、打撃力

表-1 試験に用いた測定装置

名称	測定項目
DPAS ⁹⁾	加速度, ひずみ
PDA ¹⁰⁾	加速度, ひずみ
FPDS ¹¹⁾	加速度, ひずみ
2点ゲージ ¹²⁾	ひずみ 2点
DPA	加速度

表-2 杭の仕様

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

と等しい。したがって、杭頭で測定される後退波は、式(37)から、

$$F_{1h}(t+T) = \frac{1}{2}F_{1h}(t) \quad (38)$$

となる。このような状態でCASE法を適用すると、

$$R_p \left(t + \frac{T}{2} \right) = 1.5F_{1h}(t) \quad (39)$$

となる。すなわち、CASE法による動的貫入抵抗の値が、杭頭での打撃力の1.5倍を越え、かつ杭頭打撃力と比例関係にある場合は、周面抵抗力が打撃力を上回り、CASE法では動的貫入抵抗の極限值を正確に測定できない状態であること、すなわち式(30)が成立しないことを意味する。

4. 東京湾横断道路での杭頭計測法

(1) 試験に用いた杭頭計測法

東京湾横断道路における杭の動的載荷試験⁴⁾においては、表-1に示す5種の杭頭計測法を用いた。このうちDPA法⁸⁾は、杭頭に取付けた加速度計による測定波形から数値積分によって杭頭での変位波形を得、杭のリバウンド量を測定する方法である。支持力管理は道路橋示方書に示される管理式によっており、波動理論を直接的に応用した他の測定方法とは異なる。

DPAS, PDA, FPDSはいずれも杭頭での加速度(速度)とひずみ(力)を測定するものである。

測定波形をもとにした支持力管理方法には式(24)によって動的貫入抵抗を求め静的支持力を推定する、いわゆるCASE法と、波形マッチング³⁾によって支持力を推定する方法、とがある。波形マッチングは、杭の周面抵抗力および先端抵抗力をモデル化し、そのパラメータを変えながら、杭の応答波形を計算で求め、測定波形とよく一致する時の計算に用いたパラメータを地盤の支持力のパラメータとする考え方である。本論では、CASE法を中心として論じる。

(2) 試験の概要

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-2、ハンマの仕様を表-3に示す。

杭頭計測法のセンサーは、図-2中杭頭から4.9mの①の位置に取付けた。杭は打撃回数1,635回で打設終了

表-3 ハンマの仕様

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

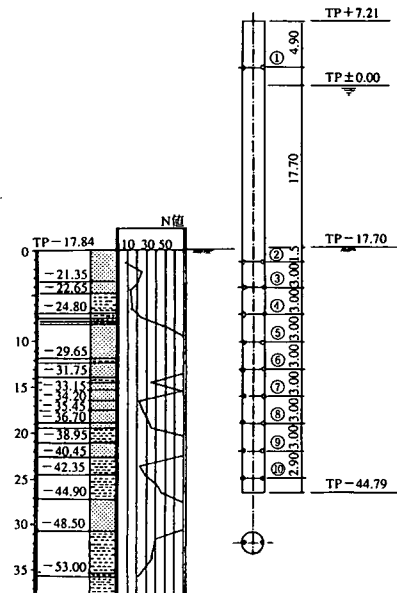


図-2 杭の打設深度と土質

し、この時の杭先端の深度は、TP-44.79mで海底面下の地盤に26.95m貫入した。

なお、打込終了後、76時間経過で、再打撃試験(打込が完了した杭を打撃して動的挙動を測定し、杭の支持力を動的に測定する試験。)を行い、この間での地盤の支持力の回復現象(セットアップ)の測定を行った。

5. 測定結果

(1) 測定波形と動的貫入抵抗の計算値

図-3に杭頭計測法で測定された波形の一例を示す。図は打撃回数1,638回(打設終了15分後)での波形である。DPAS, PDA, FPDSは、いずれも杭のひずみと加速度を測定している。また、加速度は積分して速度とし、杭の機械インピーダンスを乗じて単位を力に変換している。測定波形はいずれも良く似ており、測定装置とし

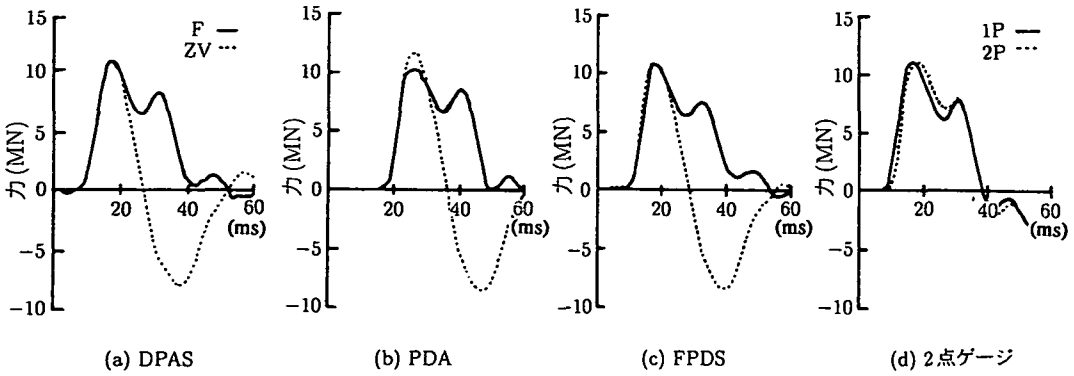


図-3 杭頭計測法による測定波形

表-4 杭頭計測法による測定結果
単位 (MN) Blow count:1638

名称	動的貫入抵抗	静的支持力成分	J_c 値
DPAS	16.82	13.46	
PDA	17.58	16.00	0.3
FPDS	17.31	15.19	0.3
2点ゲージ	16.54		

表-5 静的載荷試験の結果

降伏支持力	24.0MN
極限支持力	26.5MN

での DPAS, PDA, FPDS は、ほぼ同等の性能を有するものと考えることができよう。2点ゲージ法は、2m 間隔でのひずみを測定しており図には2つの測定点での力波形を示している。

表-4に各杭頭計測法によって測定された動的貫入抵抗 (R_d) および推定された静的支持力成分 (R_s) の値を示す。 R_d は、各々の測定波動をもとにしたCASE法による動的貫入抵抗の計算値を示すものである。2点ゲージ法では、2点でのひずみ測定波形から進行波と後退波を分離し、CASE法を適用して R_d の計算を行っている。また、 R_d には、粘性抵抗によるとされる動的抵抗成分も含まれている。計算結果が示すように、最も小さい値となった2点ゲージ法の1,688tonf(16.54MN)と最も大きな値を示したPDAの1,794tonf(17.6MN)でその差は、7.6%である。これに対し、 R_s は R_d から地盤の粘性抵抗によると推定される成分を除いたものであり、2点ゲージ法では計算値が示されていないものの、測定方法間での差は19%に拡大している。このように支持力の推定値の差が拡大したのは、 R_d の中に速度に依存する抵抗成分が存在するか、またその大きさはどの程度であるかについての定説はなく、その判断が解析技術者の主観に依存しているからである。

表-6 杭頭打撃力と動的貫入抵抗の関連性

測定杭深度	回帰係数	相関係数
TP-43.3m	1.31	0.95
TP-44.7m(打止め)	1.61	0.99
再打撃(76時間後)	1.60	0.99

(2) 杭頭計測法の適用

a) 支持力推定上の問題

今回の試験杭については、動的載荷試験方法の適用性の検討を行うことを目的のひとつとして、静的載荷試験を杭打設終了1.5ヶ月後に実施した。静的載荷試験の結果、表-5に示す支持力値が得られている。この値は、表-4中に示した動的貫入抵抗 R_d よりも大きく、また、杭頭計測法によって推定された R_s (支持力)の2倍近い値となっている。この原因のひとつは、杭打設後の地盤のセットアップによる支持力の増加であるが、その差は非常に大きく、セットアップ現象のみでは、この差は説明困難と考える。

b) 杭頭打撃力と動的貫入抵抗

杭頭計測法によって推定した杭の動的貫入抵抗(17.6 ~ 16.5MN)と実際に静的載荷試験で測定した支持力(24.0MN)とに大きな隔たりが生じた原因として、杭頭での打撃力不足が考えられる。

図-4は、ハンマの落下高さを変えて測定した杭頭計測法による動的貫入抵抗の推定値と杭頭に発生した打撃力の最大値との関係を示したものである。この試験は、杭の貫入深度がTP-43.3mの時、杭の打止め時および76時間後の再打撃時に行っている。回帰係数および相関係数の計算値を表-6に示す。図-4および表-6に示されるとおり、杭頭の打撃力と動的貫入抵抗は比例する関係にあり、その比例係数は、貫入深度TP-43.3m時よりも打止め時の方が大きい。これは、後者の方が実際の動的貫入抵抗が大きいためである。しかし、打止めから76時間後の再打撃時の比例係数は、打止め時と同じである。すなわちこの間、地盤の回復によって支持力は増

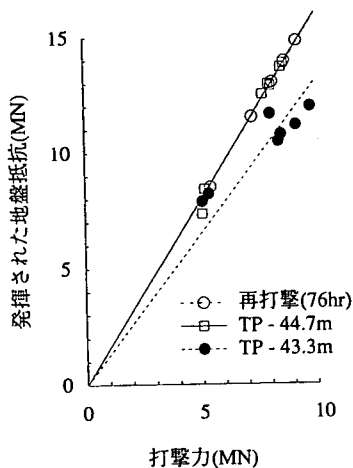


図-4 杭頭打撃力と動的貫入抵抗の関係

加している²⁾にもかかわらず、CASE法による動的貫入抵抗の測定値に変化はない。

これは、表-6に示すように、杭頭打撃力に対するCASE法での R_d の比率が1.5倍以上であり、式(39)から明らかとなっており、杭の周面抵抗の極限值が杭頭での打撃力の最大値よりも大きいためである。すなわち、杭に作用する動的貫入抵抗は、十分に発揮されていないことが示される。このような場合、杭頭計測法では、地盤の動的貫入抵抗の極限值を測定することはできない。

6. 結論

杭頭部で杭の動的挙動を測定し、杭の支持力を推定する杭頭計測法について理論的および実際への適用例の検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) CASE法は、杭の動的貫入抵抗の測定方法として理論的に妥当である。
- (2) 杭の周面抵抗が作用しない杭、すなわち先端支持杭の動的貫入抵抗の極限值を測定しようとする場合、杭頭に発生する打撃力の最大値は、杭の先端抵抗の1/2以上でなければならない。
- (3) 周面抵抗が作用する杭の極限抵抗力をCASE法によって測定する場合、打撃力は杭の周面抵抗力と先端抵抗力を加えた全抵抗力よりも大きくなければならない。
- (4) 東京湾横断道路における動的載荷試験の打撃条件においては、CASE法による杭の支持力推定値は、杭の極限支持力を示すものではない。
- (5) セットアップ現象のある地盤では、その大きさを別の手段で決定できないかぎり、杭の打止め時の測定結果からみれば、杭の静的な支持力を推定することはできない。

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) Goble, G.G., Rauche, F. and Moses, F.: Dynamic studies on the bearing capacity of piles, Phase III Report, Case Western University, 1970.
- 2) 澤井廣之, 塩井幸武, 吉田好孝, 境友昭: 多点測定法による杭の支持力の推定, 土木学会論文集, No.547/III-36, pp.67-74, 1996.
- 3) Fellenius, B.H.: Variation of CAPWAP results as a function of the operator, *Proc. of 3rd Intl. Conf. on the application of stress wave theory to piles*, pp.814-829, 1988.
- 4) 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.
- 5) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学: 杭打ち公式に関する波動理論的考察, 第18回土質工学研究発表会講演集, pp.1013-1016, 1983.
- 6) Rauche, F., Goble, G.G. and Likins, G.E.: Dynamic determination of pile capacity, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.3, pp.367-383, 1985.
- 7) 境友昭: 杭の動的支持力の理論的解析, 土木学会論文集, No.424/III-14, pp.153-159, 1990.
- 8) 宇都一馬, 宮地明彦, 二宮康治, 岩下文彦, 大森弘: 加速度計による杭の打込み現象計測例, 杭の打込み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.119-122, 1988.
- 9) 境友昭, 沖健, 村上浩, 田中幸芳, 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.103-116, 1988.
- 10) Likins, G.E.: Field measurements and the pile driving analyzer, *Proc. of 2nd Intl. Conf. on the application of stress wave theory to piles*, pp.298-305, 1984.
- 11) Beringen, F.L., Van Hooydonk, W.R. and Schaap, L. H.J.: Dynamic pile testing: An aid in analyzing driving behaviour, *Proc. of 1st Intl. Seminar on the application of stress wave theory on piles*, pp.77-120, 1980.
- 12) Matsumoto, T., Nishida, Y., Ohta, H. and Kawakami, K.: Analysis of stress-wave in a pile based on two-point stress measurements, *Proc. of 3rd Intl. Conf. on the application of stress wave theory to piles*, pp.525-534, 1988.

(1996.12.9 受付)

METHOD TO ESTIMATE THE BEARING CAPACITY OF PILES BASED ON THE STRESS-WAVE THEORY BY MEASURING THE PILE DYNAMICS NEAR THE PILE HEAD

Hiroyuki SAWAI, Yukitake SHIOI, Yoshitaka YOSHIDA and Tomoaki SAKAI

As the method to estimate the bearing capacity of the pile during driving, dynamic pile monitoring methods are used. Shaft and point resistance of the pile are estimated by analyzing the wave forms of force and velocity measured near the pile head. However, if the driving force applied on the pile head was not enough to mobilize the full of the soil resistance against the pile penetration, measured soil resistance does not reach its ultimate value. In this case, it can be said that the estimate pile capacity from the dynamic testing was not equal to the results of the static load testing. In this paper, the limitation of the dynamic load test method were examined from the theoretical and practical view points.