

明 細 書

発明の名称： C A S E 法を援用した杭の急速載荷試験方法

技術分野

[0001] 本発明は、杭頭に重錘を落下させ、重錘落下による荷重と杭頭の変位との関係から杭の静的な荷重－変位関係を求める杭の急速載荷試験方法に関するものである。より具体的には、重錘の落下高さを変化させて、杭頭に対する複数回の急速載荷試験を行い、その測定結果から杭頭荷重と杭頭変位の間係を求める場合において、新たな解析手法を用いることにより、より精度の高い荷重－変位関係を求めることができる杭の急速載荷試験方法に関するものである。新たな解析法により、これまでよりも軽い重錘を用いた急速載荷試験が可能となる。

背景技術

[0002] 従来の杭の急速載荷試験方法・解析方法に関する特許文献としては、例えば、特許文献 1－3 が挙げられる。

[0003] 特許文献 1 には、杭頭に重錘を落下させて杭頭に打撃力を加え、杭の沈下剛性と支持力を求める急速載荷試験方法において、重錘と杭頭との間に、比重が 0.35 以上 0.5 以下の材料からなる緩衝材を介在させることで、より小さい荷重で精度の高い試験結果が得られるようにした技術が開示されている。

[0004] 特許文献 2 には、地中に打設された杭の支持力を推定するのに必要なデータとして、信頼性の高いデータを短時間でかつ簡単に得ることができる杭の急速載荷試験装置として、杭頭を打撃する重錘と杭頭と重錘との間に、複数の金属板と当該金属板間に挟まれる高分子材料とを積層して形成されクッション材を介在させる杭の急速載荷試験装置が開示されている。

[0005] 特許文献 3 には、杭頭を打撃する重錘と杭頭と重錘との間に、クッション材を介在させる場合において、杭頭に落下して跳ね上る重錘を素早くキャッチして繰り返しバウンドするのを停止できるようにし、信頼性の高いデータ

を短時間でかつ簡単に得ることができるようにした杭の急速載荷試験装置が開示されている。

[0006] このような杭の急速載荷試験方法に関しては、日本国内において、杭の急速載荷試験が動的な載荷試験法として地盤工学会基準（JGS1815-2002）に追加され20年が経過した。急速載荷試験が載荷試験基準に追加された2002年当時、急速載荷試験の加力装置は反力体慣性力方式が主流であったが、加力装置の改良が進んだ現在では試験のほとんどが軟クッション重錘落下方式で実施されている。これに伴って、載荷回数も極限支持力相当の荷重を1回載荷する方法から、ハンマー落下高さを段階的に上げ、最後に極限支持力相当を載荷する複数回載荷となっている。

[0007] 反力体慣性力方式では1回の載荷で測定した動的シグナルから除荷点法（ULP法）によって荷重－変位量の関係を算出していた（図1参照）。それに対し、載荷回数を複数回としたことで、静的抵抗力とみなすことができる除荷点荷重とそのときの杭変位が落下回数分だけ得られるようになった。そのため、杭の荷重－変位関係は、複数の除荷点での荷重と変位を単純に接続する除荷点接続法（ULPC法）が主体となっている（図2参照）。

[0008] [除荷点法（ULP法）]

除荷点法では、杭の急速載荷試験では杭体中の波動伝播の影響は無視できるものとし、急速載荷試験では、杭を剛体質点として、杭に動的荷重 $F_{\text{rapid}}(t)$ が作用するとき、杭には静的地盤抵抗力 $R_w(t)$ と動的地盤抵抗力 $R_v(t)$ が作用するものと仮定する。

[0009] これらの関係は、式(1)、(2)および図1で表わされる。

[0010] [数1]

$$R_{\text{soil}}(t) = F_{\text{rapid}}(t) - R_a(t) = F_{\text{rapid}}(t) - m \cdot a(t) \quad (1)$$

[0011] [数2]

$$R_{\text{soil}}(t) = R_w(t) + R_v(t) = R_w(t) + C \cdot v(t) \quad (2)$$

[0012] ここで、

F_{rapid} :杭頭における荷重

R_{soil} :地盤抵抗力

R_a :杭体の慣性力

R_w :静的地盤抵抗成分

R_v :動的地盤抵抗成分

m :杭体の質量

α :杭体の加速度

C :減衰定数

v :杭体の速度

[0013] 変位 w の最大値 w_{max} は除荷点と呼ばれる。除荷点では、杭速度 v が 0 となるため、除荷点での荷重（除荷点荷重 R_{ulp} ）は、静的地盤抵抗力 R_w に等しくなる。

[0014] 除荷点以外での R_w を求めるには、減衰定数 C を決定する必要がある。非特許文献 1 では、式(3)によって、 C を決定することを提案している。

[0015] [数3]

$$C = (R_{\text{soil}(\text{max})} - R_{\text{ulp}}) / v^* \quad (3)$$

[0016] ここで、 $R_{\text{soil}(\text{max})}$ は R_{soil} の最大値、 v^* は $R_{\text{soil}(\text{max})}$ 時の杭変位速度である。

C が杭の変位や速度に関わらず一定と仮定すれば、式(4)を用いて、 $R_w - w$ 関係を求めることができる。

[0017] [数4]

$$R_w(t) = R_{\text{soil}}(t) - C \cdot v(t) \quad (4)$$

[0018] [除荷点接続法（ULPC法）]

前述した除荷点法（ULP法）は、極限支持力相当の荷重を 1 回載荷することを想定しているため、減衰定数 C の決定が必要となる。しかし、 C の値は杭の変位や速度によって変わって来ることあり得る。

[0019] 軟クッション重錘落下方式の載荷試験では、ハンマー落下高さを段階的に上げる複数回載荷となっている。そのため、各打撃において、除荷点荷重とそれに対応する除荷点変位が複数個得られる。したがって、除荷点を単に接続することで、除荷点法（ULP法）で必要とされる減衰定数Cを求める必要が無く、除荷点を結ぶだけで、図2に示すように簡単に R_w-w 関係を得ることができる。

[0020] ただし、除荷点法（ULP法）や除荷点接続法（ULPC法）では、杭を剛体質点と仮定しているため、杭長が長くなるほど、杭の弾性変形の影響が大きくなる。例えば、杭の加速度の測定位置によって、荷重－変位関係の推定結果が影響される。

[0021] [一次元波動理論に基づくCase法]

非特許文献2によるCase法は、衝撃載荷試験に用いられてきた方法であり、一次元波動理論に基づき、打撃中の杭の貫入抵抗力およびJ₀係数と呼ばれる経験的係数を用いて静的貫入抵抗力を求めるものであるが、急速載荷試験で求める荷重－変位関係は考えていない。

[0022] まず、計測シグナル（軸方向力Fと杭速度v）から下降波 F_d と上昇波 F_u を計算する（式(5)、(6)）。それから、式(7)を用いて、杭の貫入抵抗力 R_{soil} の時間変化を得る（図3参照）。

[0023] [数5]

$$F_d(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) + Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (5)$$

[0024] [数6]

$$F_u(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) - Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (6)$$

[0025] [数7]

$$R_{soil}(x_m, t) = F_d\left(x_m, t - \frac{L_m}{c}\right) + F_u\left(x_m, t + \frac{L_m}{c}\right) \quad (7)$$

[0026] ここで、

x : 杭軸に沿った座標（杭頭を 0）
 x_m : 計測位置
 v : 杭速度
 L_m : 計測位置から杭先端までの長さ
 F : 軸方向力
 F_d : 下降波
 F_u : 上昇波
 Z : 杭体のインピーダンス ($E A / c$)
 c : 縦波伝播速度
 E : 杭材のヤング率
 A : 杭の断面積
 R_{soil} : 貫入抵抗力

[0027] Case法は、打込み時の杭の貫入抵抗力を評価するものであり、これだけでは杭の荷重－変位関係を得ることはできない。しかし、Case法は一次元波動理論に基づいた方法であるため、杭長が長くなってもほぼ正しく杭の貫入抵抗力を評価できる。

[0028] 非特許文献 3 では、杭の急速載荷試験の数値解析を行い、Case法から得られる地盤抵抗力と除荷点法（ULP法）解析から得られる地盤抵抗力を比較・検討している。その結果、相対載荷時間 $T_r = t_L / (2 L_m / c)$ （ここで、 t_L は載荷継続時間）が 5 を下回ると、後者の解析から得られる地盤抵抗力が前者の解析から得られる値を過大評価することを示している。しかし、荷重－変位関係に及ぼす影響には言及していない。

[0029] 非特許文献 4 では、先端支持杭の急速載荷試験を行い、CASE法を援用して静的な杭の荷重－変位関係を求めている。この試験では、打撃力が比較的大きな 1 回の打撃を行っている。そのため、減衰定数 C の決定が必要であった。

先行技術文献

特許文献

[0030] 特許文献1：日本国特開2002-303570号公報

特許文献2：日本国特開2005-068802号公報

特許文献3：日本国特許第6613430号公報

非特許文献

[0031] 非特許文献1：Kusakabe O., Matsumoto T. (1995): Statnamic tests of Shonan test program with review of signal interpretation, Proc. 1st Int. Statnamic Seminar, Vancouver, Canada, pp.113-122.

非特許文献2：Raushe F. Goble G., Likins G.E. Jr. (1985): Dynamic determination of pile capacity, ASCE Jour. Geotech. Div., 111(3), pp.367-383.

非特許文献3：児島・西村（2021）：急速載荷試験の地盤抵抗の解析方法について、第56回地盤工学研究発表研究会

非特許文献4：Matsuzawa, Nakashima, Nakayama, Matsumoto (2008): A piling method accompanying rapid load testing, Proc. the 8th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Lisbon, Portugal, pp.487-495.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0032] 除荷点法や除荷点接続法では、相対載荷時間 T_r が短くなると、解析精度が劣ってくる。 T_r を長くするために、試験装置が非常に大掛かりなものとなり、1回の試験にかかる費用も非常に高額となるという課題がある。

[0033] 本発明は、杭頭に対する複数回の急速載荷試験を行うことを前提として、従来の除荷点接続法（ULPC法）に衝撃載荷試験で用いられているCase法の考え方を取り込んだ新たな解析手法を開発し、より精度の高い荷重－変位関係を求めることができる杭の急速載荷試験方法を提供することを目的としたものである。

課題を解決するための手段

[0034] 本発明は、杭頭に重錘を落下させ、重錘落下による荷重と前記杭頭の変位との関係から杭の静的な荷重－変位関係を求める杭の急速載荷試験方法において、

前記重錘の落下高さ h を変化させて、前記杭頭に対する複数回の急速載荷試験を行うステップと、

前記複数回の急速載荷試験のそれぞれについて、一次元波動理論に基づく Case 法による下記の (a)、(b) の手順によって打撃中の杭の貫入抵抗 R_{soil} を求めるステップと、

直接測定される前記杭頭の変位 w の時間変化から、前記杭頭の変位 w と前記地盤抵抗 R_{soil} の関係を求めるステップと、

最大変位 w_{max} 時点の地盤抵抗 $R_{soil(max)}$ を静的抵抗 R_w とみなして、除荷点荷重 P_h と除荷点変位 w_h を求めるステップと、

異なる落下高さ h ごとに得られる前記除荷点荷重 P_h と前記除荷点変位 w_h を接続した杭頭荷重 P_h －変位 w_h の関係を求めるステップと、
を備えることを特徴とするものである。

[0035] (a) 急速載荷試験における軸方向力 F と杭速度 v から、以下の式 (5)、(6) によって、下降波 F_d と上昇波 F_u を計算する。

[数5]

$$F_d(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) + Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (5)$$

[数6]

$$F_u(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) - Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (6)$$

(b) 次に、式 (7) を用いて、杭の貫入抵抗 R_{soil} の時間変化を得る。

[数7]

$$R_{soil}(x_m, t) = F_d\left(x_m, t - \frac{L_m}{c}\right) + F_u\left(x_m, t + \frac{L_m}{c}\right) \quad (7)$$

ここで、

x :杭軸に沿った座標（杭頭を0）
 x_m :計測位置
 v :杭速度
 L_m :計測位置から杭先端までの長さ
 F :軸方向力
 F_d :下降波
 F_u :上昇波
 Z :杭体のインピーダンス（ $E A / c$ ）
 c :縦波伝播速度
 E :杭材のヤング率
 A :杭の断面積
 R_{soil} :貫入抵抗力

[0036] すなわち、本発明では、ある杭に対して複数回の打撃（急速載荷試験）を行い、Case法から得られる貫入抵抗力 R_{soil} と直接測定した杭変位 w の時間変化から、 $w - R_{soil}$ 関係を求め、これから除荷点荷重 R_{ULP} と除荷点変位を得る。その後、除荷点接続法（ULPC法）と同様に、複数の除荷点を接続することで、最終的に静的な荷重－変位関係を求めることができる。

発明の効果

[0037] 本発明の杭の急速載荷試験方法によれば、杭頭に対する複数回の急速載荷試験を行うことを前提として、従来の除荷点接続法（ULPC法）に衝撃載荷試験で用いられているCase法の考え方を取り込んだ新たな解析手法を開発し利用することで、より精度の高い荷重－変位関係を求められる杭の急速載荷試験方法を提供することができる。

[0038] 本発明の杭の急速載荷試験方法は、一次元波動理論に基づいているため、杭の慣性力の補正が必要なくなる。そのため、杭長による適用制限、すなわち相対載荷時間による適用制限が緩和される、などの利点を有する。これまでの除荷点法や除荷点接続法では、 T_r を長くするために、試験装置が非常に大掛かりなものとなり、1回の試験にかかる費用も非常に高額となる課題が

あったが、それらが解決される。

図面の簡単な説明

- [0039] [図1]従来の急速載荷試験方法の一例としての除荷点法（ULP法）における荷重－変位関係を示すグラフである。
- [図2]従来の急速載荷試験方法の一例としての除荷点接続法（ULPC法）における荷重－変位関係を示すグラフである。
- [図3]従来の衝撃載荷試験で用いられるCase法の概要を示す図である。
- [図4]試験地点のN値分布と杭の根入れ状態を示す図である。
- [図5]従来の除荷点法（ULP法）で求めた杭頭荷重 P_h －変位 w 関係を示すグラフである。
- [図6]従来の除荷点接続法（ULPC法）で求めた杭頭荷重 P_h －変位 w 関係を示すグラフである。
- [図7]地盤抵抗および急速荷重、変位、速度、加速度の時刻歴（ $T_r = 3$ 、 $h = 1.0$ m）を示すグラフである。
- [図8]本発明の方法（ULPC_CM法）で求めた杭頭荷重 P_h －変位 w 関係を示すグラフである。
- [図9]従来の除荷点接続法（ULPC法）と本発明の方法（ULPC_CM法）による杭頭荷重 P_h －変位 w 関係の比較を示すグラフである。
- [図10] $T_r = 3$ 、4、5の急速載荷試験における F_{rapid} 、 $R_{\text{soil(Case)}}$ 、 $R_{\text{soil(ULP)}}$ の時刻歴を示したグラフである。

発明を実施するための形態

- [0040] 以下、本発明の急速載荷試験方法の合理性を検討するために行った試験について説明する。
- [0041] まず、相対載荷時間 $T_r = 5$ 、4、3の急速載荷試験を対象として、静的載荷試験、除荷点法（ULP法）、除荷点接続法（ULPC法）および本発明における解析法（「ULPC_CM法」と呼ぶ。）から得られる杭の荷重－変位関係を比較・考察した。
- [0042] [試験杭の仕様・地盤概要・載荷試験手順]

表 1 に示す鋼管試験杭に対して静的載荷試験 (SLT) と、軟クッション重錘落下方式の急速載荷試験装置 (杭頭に鋼板とエラストマーで構成されるクッション材を設置) を用いて、急速載荷試験 (RLT) を実施した。試験杭の全長は 48.0 m であり、N 値 50 以上の支持層に根入れした (図 4 参照)。

[0043] [表1]

試験杭の仕様	
項目	値
長さ、 L (m)	48.0
外径、 D_o (mm)	800
内径、 D_i (mm)	750
肉厚、 t_w (mm)	25
断面積、 A (m ²)	0.0609
ヤング率、 E (kPa)	2.00×10^8
密度、 ρ (ton/m ³)	7.85
質量、 m (ton)	22.314
縦波速度、 c (m/s)	5133

[0044] 急速載荷試験では質量 $m_h = 2.3$ ton の重錘を用い、落下高さ h を 0.05 ～ 1.80 m に変化させた。試験では軟クッションのばね係数を調整し、載荷時間 t_L を変化させ、相対載荷時間 $T_r = t_L / (2L/c) = 3, 4, 5$ となるようにした。今回の急速載荷試験では、杭頭のみで動的シグナル (荷重、加速度) を計測した。

[0045] (1) 除荷点法 (ULP法) による解析結果

図 5 は $T_r = 3 \sim 5$ の急速載荷試験に対する、除荷点法 (ULP法) 解析による杭頭荷重 P_h - 変位 w 関係と静的載荷試験結果の比較である。

[0046] 各急速載荷試験の解析では、一打撃の動的シグナルを用い、減衰定数 C を決定した上で、 P_h - w 関係を算出した。一打撃のみの動的シグナルを用いた除荷点法 (ULP法) による P_h - w 関係は静的載荷試験結果と大きく乖離した。

[0047] (2) 除荷点接続法 (ULPC法) による解析結果

図 6 は $T_r = 3 \sim 5$ の急速載荷試験に対する、除荷点接続法 (ULPC法) 解析による P_h - w 関係と静的載荷試験結果の比較を示す。

[0048] 図5の結果と比較すると、除荷点接続法（ULPC法）による解析結果は静的載荷試験結果を良く表現できている。ただし、ある杭変位 w では T_r が減少するとともに P_h を過大評価している。

[0049] (3) 本発明による解析法（ULPC_CM法）による解析結果

図7は $T_r=3$ 、重錘落下高 $h=1.0$ mの急速載荷試験における急速荷重 F_{rapid} 、変位 w 、速度 v 、加速度 α の時刻歴を示す。なお、Case法および除荷点法（ULP法）から求めた地盤抵抗 $R_{\text{soil(Case)}}$ と $R_{\text{soil(ULP)}}$ を F_{rapid} に併せて示している。

[0050] 最大杭変位時点では、速度 $v=0$ である。この時点の $R_{\text{soil(Case)}}$ を除荷点法（ULP法）と同様に静的抵抗力 R_w （ R_{ULP} ）と定義する。 h を変化させた一連の急速載荷試験から求まる本発明による解析法での除荷点荷重と変位を接続することで、静的な荷重－変位関係を構築する。

[0051] 図8は $T_r=3\sim5$ の急速載荷試験に対する、本発明による解析法による P_h-w 関係と静的載荷試験結果の比較を示す。

[0052] いずれの急速載荷試験でも、本発明による解析法による解析結果は静的載荷試験結果とほぼ一致している。すなわち、本発明による解析法では、 T_r が3まで減少しても、 P_h-w 関係は T_r の影響をほぼ受けないことがわかる。

[0053] なお、本発明による解析法と除荷点接続法（ULPC法）の結果を比較し易いように、図6および図8の結果を図9にまとめて示す。

[0054] (4) 解析結果の比較・考察

図10は、 $T_r=3, 4, 5$ の急速載荷試験における F_{rapid} 、 $R_{\text{soil(Case)}}$ 、 $R_{\text{soil(ULP)}}$ の時刻歴を示したものである。 $T_r=5$ では、 $R_{\text{soil(Case)}}$ と $R_{\text{soil(ULP)}}$ の間に大きな差は見られない。

[0055] $T_r=4, 3$ と小さくなるにつれて、 $R_{\text{soil(Case)}}$ と $R_{\text{soil(ULP)}}$ の間に大きな差が生じている。本試験結果では、除荷点接続法（ULPC法）による解析は $T_r=5$ が適用限界であった。一方、本発明による解析法では、 $T_r=3$ まで適用できた。

[0056] 従って、本発明の杭の急速載荷試験方法・解析法によれば、より精度の高

い荷重－変位関係を求めることができる。

請求の範囲

[請求項1]

杭頭に重錘を落下させ、重錘落下による荷重と前記杭頭の変位との関係から杭の静的な荷重－変位関係を求める杭の急速載荷試験方法において、

前記重錘の落下高さ h を変化させて、前記杭頭に対する複数回の急速載荷試験を行うステップと、

前記複数回の急速載荷試験のそれぞれについて、一次元波動理論に基づくCase法による下記の(a)、(b)の手順によって打撃中の杭の貫入抵抗 R_{soil} を求めるステップと、

直接測定される前記杭頭の変位 w の時間変化から、前記杭頭の変位 w と前記地盤抵抗 R_{soil} の関係を求めるステップと、

最大変位 w_{max} 時点の地盤抵抗 $R_{\text{soil}(\text{max})}$ を静的抵抗力 R_w とみなして、除荷点荷重 P_h と除荷点変位 w_h を求めるステップと、

異なる落下高さ h ごとに得られる前記除荷点荷重 P_h と前記除荷点変位 w_h を接続した杭頭荷重 P_h －変位 w_h の関係を求めるステップと、
を備えることを特徴とする杭の急速載荷試験方法。

(a) 急速載荷試験における軸方向力 F と杭速度 v から、以下の式(5)、(6)によって、下降波 F_d と上昇波 F_u を計算する。

[数5]

$$F_d(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) + Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (5)$$

[数6]

$$F_u(x_m, t) = \frac{F(x_m, t) - Z \cdot v(x_m, t)}{2} \quad (6)$$

(b) 次に、式(7)を用いて、杭の貫入抵抗 R_{soil} の時間変化を得る。

[数7]

$$R_{\text{soil}}(x_m, t) = F_d\left(x_m, t - \frac{L_m}{c}\right) + F_u\left(x_m, t + \frac{L_m}{c}\right) \quad (7)$$

ここで、

x :杭軸に沿った座標（杭頭を0）

x_m :計測位置

v :杭速度

L_m :計測位置から杭先端までの長さ

F :軸方向力

F_d :下降波

F_u :上昇波

Z :杭体のインピーダンス（ $E A / c$ ）

c :縦波伝播速度

E :杭材のヤング率

A :杭の断面積

R_{soil} :貫入抵抗力