

## 杭の衝撃載荷試験の波動解析に用いる入力波の検討

正会員 小嶋 英治\*  
正会員 松本 樹典\*\*

衝撃載荷試験 特性曲線法 差分法  
入力波 マッチング解析 杭

## 1. 目的

2002年5月に、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」<sup>1)</sup>(以下、基準と省略する)が発行され、杭の衝撃載荷試験法もそのうちのの一つとして導入された。同載荷試験法は、杭頭を打撃し、杭の加速度およびひずみなどから杭に生じる軸方向力を求め、杭と地盤をモデル化し、波形マッチング解析から杭先端や周面の静的抵抗などを求めて、杭の荷重-変位(沈下)関係と支持力を推定する方法である。反力装置が不要のため、低コストで工期が短いことから、杭の支持力確認に広く使われるようになった。

基準では、波形マッチング解析法として一次元波動理論に基づいた特性曲線法<sup>1)</sup>が紹介されている。特性曲線法も断面が一樣な杭であれば、容易に解を求めることができる。しかし、非一樣断面杭や異種杭となると、解も複雑になる。そこで、杭と地盤の微小領域のつり合いから求めた偏微分方程式を、差分法<sup>2)</sup>やマトリックス法<sup>3)</sup>などで解く方法や、Smith法によって波形マッチングする解析法も用いられている。これらの解法では、入力波は杭頭に与えた衝撃力(軸方向力)を用いている。

特性曲線法は、地盤抵抗を離散化し、離散化した杭節点に地盤抵抗が集中しているモデルとし、波動伝播理論は、軸方向力を上昇波と下降波に分離して組み立てている。また、基準で紹介している特性曲線法では、入力波に計測点の下降波を用いている。

衝撃載荷試験では入力波をどう扱うかは大きなテーマであるが、論文(例えば4)、5)は非常に少ない。本論文は差分法やマトリックス法と比較し、基準で紹介されている特性曲線法の入力波について検討するものである。

## 2. 入力波

入力波を検討するために、図1に示すような、地中に埋め込んだ鋼管に、直径400mm、杭長8mの既成コンクリート杭(直杭)を挿入し、先端抵抗のみが存在する条件で、杭頭を打撃する試験を行なった。

図2は、重錘の質量300kg、落下高さ80cmで打撃した場合の、杭頭から80cm下の計測点を示す。一番上が計測点の軸方向力 $F_m(x_0, t)$ で、上から二番目および三番目の波が、軸方向力を下降波 $F_d(x_0, t)$ と上昇波 $F_u(x_0, t)$ に分離した波で、計測波から次式で求めた。

$$F_d(x_0, t) = \frac{1}{2} \{ F_m(x_0, t) + Z \cdot v_m(x_0, t) \} \quad (1)$$

$$F_u(x_0, t) = \frac{1}{2} \{ F_m(x_0, t) - Z \cdot v_m(x_0, t) \} \quad (2)$$

ここに、 $x_0$ は杭頭から計測点までの距離で、 $Z$ は機械インピーダンス、 $v_m(x_0, t)$ は計測点の粒子速度である。

図2の一番下が計測点の軸方向力 $F_m(x_0, t)$ および粒子速度 $v_m(x_0, t)$ から求めた杭頭の軸方向力で、次式で求めた。ただし、杭頭の軸方向力は衝撃力であるので、 $F_1(t) = F(0, t)$ とした。ここで、 $t_0$ は杭頭から計測点までの伝播時間である。

$$F_1(t) = F(0, t) = F_d(0, t) + F_u(0, t) = F_d(x_0, t + t_0) + F_u(x_0, t - t_0) \quad (3)$$

$$= \frac{F_m(x_0, t + t_0) + F_m(x_0, t - t_0) + Z \cdot \{ v_m(x_0, t + t_0) - v_m(x_0, t - t_0) \}}{2}$$

図3は、地盤抵抗の全くない両端自由の杭の杭頭に、図2で示した衝撃力が入射したとして、波動伝播のイメージを示したものである。杭頭の最初の第一波が衝撃力で、この衝撃力が伝播する様子を、下降波を青の実線で、上昇波を赤の点線で示した。杭頭および杭先端とも自由端であるので、位相が反転して伝播している。すなわち、杭先端では、下降波と上昇波の位相が反転しているため、軸方向力は0となる。これは波の伝播した自由端では、軸方向力が0である知見と一致している。杭頭では、衝撃力以外は位相反転のため、上昇波と下降波が打ち消しあって、軸方向力が衝撃力のみとなる。図3の一番上の下降波(青の実線)と上昇波(赤の点線)を加えると、図2の一番下の入力波となることから理解できる。すなわち打撃は一波であり、後は自由振動を生じていることになる。

杭頭の衝撃力を直接計測するためには、ロードセルが必要であるが、計測点の加速度およびひずみからも杭頭の衝撃力を求めることができる。

特性曲線法では、上記したように、軸方向力を下降波と上昇波に分離して波動伝播理論を組み立て、入力波として計測点の下降波を用いている。すなわち、特性曲線法の入力波は式(1)で与えられる。

偏微分方程式を直接解く方法(差分法やマトリックス法)と特性曲線法との入力波を比較する。前者は入力波が杭頭に入力する衝撃力で、図3で言えば一番上の最初の第一波である。実際の杭では地盤の抵抗があり、第一波が衝撃力という単純な波にはならないため、図2の一番下に示すように、式(3)を用いて求めることになる。

マッチング解析は、初めに杭周面および先端の地盤抵抗の初期値を仮定する。図3では杭周面および先端の地盤抵抗は0である。もし、何らかの地盤抵抗を仮定すれば、おのずと上昇波、下降波が変わってくる。偏微分方程式を直接解く差分法やマトリクス法では、杭頭に加わった衝撃力を入力波としているので、地盤抵抗を変えても入力波は変化しない。ところが、後者の特性曲線法では下降波を入力波としているので、波形マッチング解析で入力波とした下降波がマッチングモデルに合致するのは、マッチングが完了したときのみである。それまでは、マッチングできていないのにマッチングできた時の下降波を与えていることになる。すなわち、マッチング途中に、マッチング完了時の下降波を与えることで、解析結果が地盤抵抗の仮定値の変化に敏感で無くなる。

波形マッチングの対象波としては、軸方向力および粒子速度があり、両方の波をマッチング対象波とする方が良いが、経験から言えば、軸方向力のみで充分マッチング解析が可能である。また、これらの波そのものを用いるのか、分離した上昇波または下降波を用いるかの選択ができる。筆者は上昇波を用いることをお勧めする。この理由は、上昇波に杭・地盤モデルの情報が顕著に現れるためである。ただし、上昇波と下降波の両波をマッチング対象波とすることもできる。

### 3. まとめ

これまで、特性曲線法に基づいた波形マッチング解析では、入力波として分離した下降波を用いることが推奨されていたが、この場合、解析結果が地盤抵抗の仮定値の変化に鈍感となり、見かけ上マッチングが終了したと判断される場合もでてくる。本報告では、特性曲線法に基づいた波形マッチング解析であっても、解析における入力波として、杭頭における衝撃力の時間変化を用いることの優位性を示した。

### 参考文献

- 1)地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，pp.227-271，2002.5.
- 2)小嶋英治・桑山晋一：杭の鉛直載荷試験の開発と実験による検証，第48回地盤工学シンポジウム，pp.99-106，2003.11.
- 3)松本樹典，Kitiyodom P.，小嶋英治(2005)：鉛直および水平方向の動的・静的杭載荷試験の解析プログラム開発，2005年度日本建築学会大会学術講演梗概集．
- 4)Hayashi M.，Matumoto T.，Asai Y. & Kato K.：Sensitivity to soil parameters of a wave matching analysis of a STATNAMIC test，*Proc. 2<sup>nd</sup> Int. STATNAMIC Seminar*，pp.321-326，Tokyo，Japan，1998.
- 5)小嶋英治：衝撃載荷試験の波形マッチングに差分法を用いる場合の入力波の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），構造，pp.561-562，2003.09.

### 謝辞

建築学会の「杭の鉛直支持力小委員会動的の問題WG」での議論は、本論文を展開する上で、非常に参考になりました。委員の方々に、感謝の意を表します。

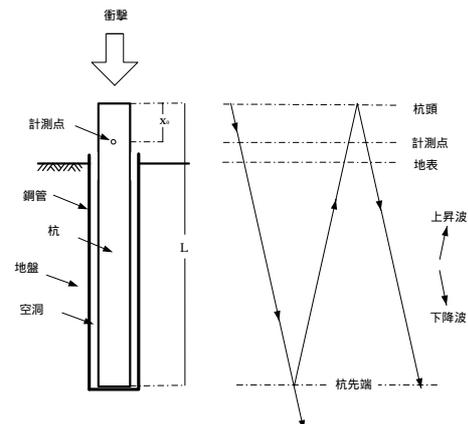


図1 杭先端・周面自由の杭モデル

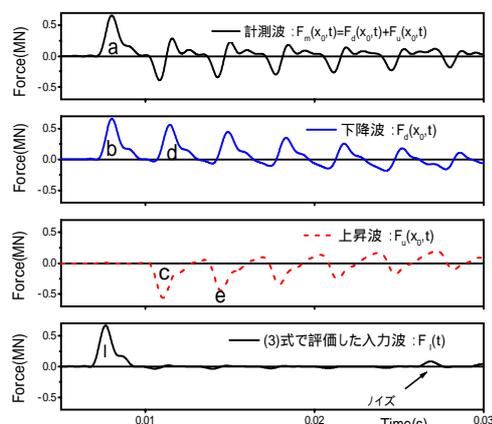


図2 鋼管に立て込んだ直杭の計測波

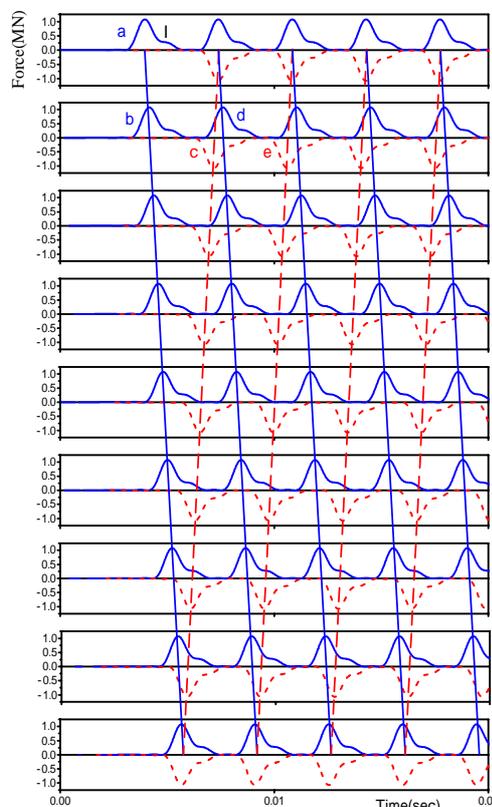


図3 杭先端・周面自由の杭の波動伝播

\* ジャパンパイル(株) 博士(工博)  
\*\* 金沢大学大学院 教授・工博

\* Japanpile Corporation, Dr. Eng.  
\*\* Professor, Kanazawa University, Dr. Eng.