

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

正会員 ○小嶋 英治*

衝撃載荷試験 差分法 入力波
マッチング解析

1. 概要

2002年5月に、杭の鉛直載荷試験方法基準化委員会の成果として、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説(平成14年5月)」¹⁾(以下地盤工学会基準と称す)が発行された。この地盤工学会基準では、従来の試験方法に加え、新たな三つの試験方法が加えられた。ここで対象にしている衝撃載荷試験もそのうちの一つである。

地盤工学会基準の、杭の衝撃載荷試験方法第5章1)の③に、「軸対称に測定した同種波形の形状が相似であること」とある。加速度は同一杭周面ではほぼ同一波形になるが、小径の杭では偏打しないように充分気をつけても、ひずみは等しくならないこと、また逆位相になること、若干ではあるが相似にならないこともあることを経験している。そこで、杭頭から杭径の1.5倍程度離れた杭周面で、加速度およびひずみ波形を調査し、杭頭からの距離が同じであれば、加速度は杭周面で安定して同一波に近いこと、ひずみは軸対象の平均が安定して同一波に近いことを確認²⁾した。

本論文は、上記のことを基本として、衝撃載荷試験の波形マッチングに差分法を用いた場合の入力波について検討するものである。

2. 入力波の検討

衝撃載荷試験は一次元波動理論に基づいて地盤の抵抗を求める試験法である。本論文で検討するのは、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 $F_I(t)$ である。

差分法による杭頭の振動方程式は次式で表される。

$$A \cdot E \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = F_I(t) \quad (1)$$

ここで、 A 、 E 、 u 、 x 、 t は杭の断面積およびヤング係数、杭の軸方向の変位振幅、座標および時間である。

ここで問題なのは、杭頭に生じる軸方向力 $F(0,t)$ を直接計測することができないことで、この理由は以下の通りである。

- (1) 杭頭のひずみおよび加速度を計測する目的で、センサーを張ることができない。(加速度計は破損の恐れあり)
- (2) 杭頭の衝撃によるひずみは、杭頭では一様ではなく、真の軸方向力(衝撃力)を杭頭で計測することはできない。

以上の理由から、地盤工学会基準では杭頭から杭の直径の1.5倍以上離れた点を計測点とすることを推奨している。

衝撃載荷試験では、計測データから杭における軸方向力の下降波 $F_d(t)$ ・上昇波 $F_u(t)$ を分離している。

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

$$\text{上昇波: } F_u(x_0,t) = \frac{1}{2} \{ F_m(x_0,t) - Z \cdot v_m(x_0,t) \} \quad (3)$$

上式で、添え字の m は計測データを意味する。また、 $F_m(x_0,t)$ 、 $v_m(x_0,t)$ は軸対称の平均の値で評価した。(3)、(4)式は参考文献2では下降波・上昇波、参考文献3では進行波・後退波、地盤工学会基準¹⁾および参考文献4では入力波・反射波としている。本論文は参考文献2に倣った。)

衝撃載荷試験では、入力波の評価として、(a)計測点のひずみから求めた軸方向力を入力波とする方法、(b)計測点のデータから軸方向力を下降波・上昇波に分離し、下降波を入力波と評価する方法、がある。

前者の(a)の入力波を式で表せば次の通りである。

$$F_I(t) = F_m(x_0,t) \quad (4)$$

地盤工学会基準は特性曲線法を用いる場合の入力波として、後者の(b)を採用している。

$$F_I(t) = \frac{1}{2} \{ F_m(x_0,t) + Z \cdot v_m(x_0,t) \} \quad (5)$$

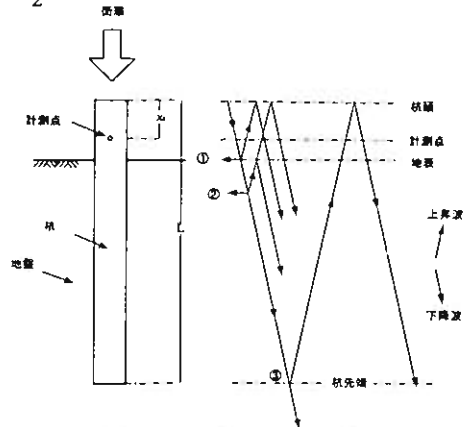


図1 衝撃による軸方向力の波動イメージ

図1に衝撃載荷試験における、軸方向力の波動イメージを示す。衝撃力は軸方向力となり、杭を伝播し下降する。①の地表で地盤に伝播する波とそのまま下降波になる波、および上昇波となる波に分かれる。更に、下降波が、②の地盤の抵抗により地盤に伝播するもの、そのまま下降波になる波および反射し上昇波となる波に分かれる。上昇波となったものは、杭頭で全反射し下降波となる。③の杭の先端まで伝播した波は、杭先端から地下逸散する波と上昇波に分かれる。すなわち下降波は、入力波のみでなく、抵抗のある個所で反射した上昇波が杭頭で全反射して下降波となった波との混合である。衝撃載荷試験では計測点付近を露出させていることから、

杭頭の軸方向力 $F(0,t)$ を杭頭から x_0 の距離の軸方向力の下降波 $F_d(x_0,t)$ と上昇波 $F_u(x_0,t_0)$ を用いて次式で定義した。

$$F(0,t) = F_f(t) = F_d(x_0,t+t_0) + F_u(x_0,t-t_0) \quad (6)$$

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

ここで、 $t_0 = x_0/V_L$ (V_L : 縦波の伝播速度)、 $F_d(x_0,t+t_0)$ 、 $F_u(x_0,t-t_0)$ は、杭頭から x_0 の距離における下降波 $F_d(x_0,t)$ および上昇波 $F_u(x_0,t_0)$ を杭頭にもどした波である。

(6)式では、杭頭の軸方向力 $F(0,t)$ が杭頭の入力波 $F_f(t)$ と等しいとしている。これは、杭頭が自由端であることから、軸方向力の上昇波が杭頭で全反射し下降波となる時に逆位相となり、上昇波と下降波が打ち消しあい、杭頭の軸方向力には入力波しか存在しなくなるからである。

3. 確認実験

入力波の確認のために杭の周面を自由面とした、地盤と杭のシンプルなモデルを製作した。杭の周面を自由面とするために、先端を閉鎖した鋼管をソイルセメント埋設工法で打設し、その中に試験杭を立て込んだ。衝撃装置には、重錘 3kN のものを用い、落下高さは 800mm とした。また、杭は杭長 8m の B 種の直杭 ($\Phi 400$) を用い、計測点は杭頭から 800mm 離れた箇所とした。図 2 に波動伝播のイメージを示す。

図 3 に衝撃載荷試験の波と波形マッチング結果を示す。図 3 の上から、計測した軸方向力 ((a) の入力波)、分離した下降波 (b) の入力波・上昇波、(6)式で評価した入力波 $F_f(t)$ を示す。最下図に、(6)式で評価した入力波 $F_f(t)$ を基にマッチングした上昇波と計測より得られた上昇波を示す。

入力波 $F_f(t)$ (図 3 の上から四番目の I) が、杭頭から x_0 下の計測点に伝播する。下降波で見れば、図 3 の上から二番目の b である。軸方向力 b が杭の先端まで伝播し、杭頭で反射し計測点まで戻る。杭周面を自由面とした実験のため、杭周面の抵抗と減衰はなく、杭先端からの地下逸散と杭自体の減衰のみである。杭先端で反射した軸方向力は符号が反転し上昇する。この上昇波の計測点の軸方向力が図 3 の上から三番目の c である。軸方向 c が上昇し、杭頭で全反射して符号の反転した軸方向力が下降し計測点に伝播する。この軸方向力が d である。この軸方向力がさらに杭先端に伝播し、反射して上昇波となる。この上昇波が図 4 の上から三番目の e である。図 3 の最下図に示すように、(6)式で評価した入力波 $F_f(t)$ を用いれば、非常に良いマッチングが可能である。

4. まとめ

本論文では、衝撃載荷試験における差分法を用いた波形マッチングの入力波 $F_f(t)$ の検討を行った。すなわち、杭頭から離れた計測点のデータを進行波・後退波に分離し、分離した波から杭頭の軸方向力を逆算し、それを入力波 $F_f(t)$ と評価する方法である。シンプルな実験を行い、その波形マッチング解析から、入力波の妥当性を確認した。

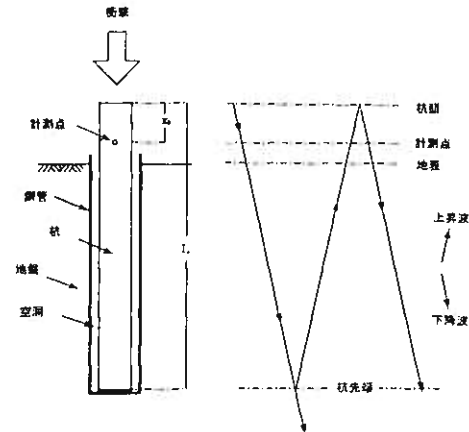


図 2 実験モデルの軸方向力の波動イメージ

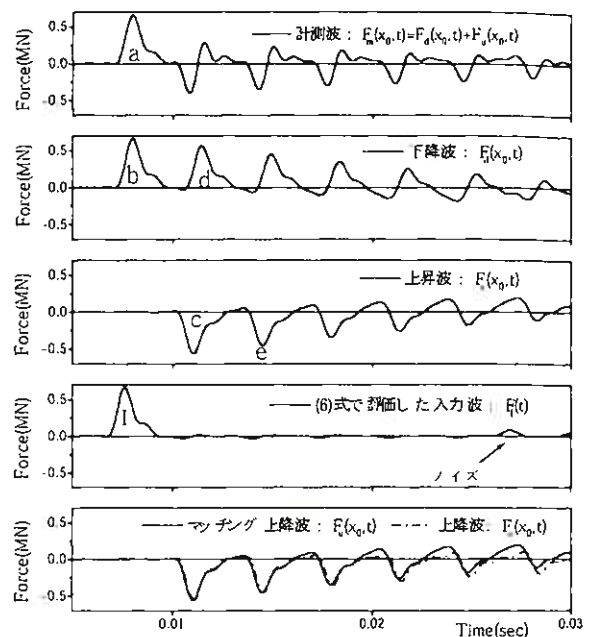


図 3 衝撃載荷試験の波と波形マッチング結果

参考文献

- 1) 地盤工学会：杭鉛直載荷試験方法・同解説、pp.227-244 2002.5.
- 2) 松本樹典：波動理論の杭への応用における理論的背景、杭の打ち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.7-21、1989.
- 3) 境友昭：波動理論の基礎—杭打ち解析のプログラム—杭の打ち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.23-33、1989.
- 4) 西村真二：衝撃載荷試験におけるシグナルマッチング解析の要件、第 36 回地盤工学研究発表会講演集、pp.1645-1646、2001.
- 5) 小嶋英治・二見智子・本間裕介・桑山晋一・渡辺基弘：縦方向に断面の変化のある杭に適用できる衝撃載荷試験の基礎的研究 その 1～3、第 38 回地盤工学研究発表会講演集に投稿、2003.