

衝撃載荷試験に用いる杭の縦波伝播速度に関する検討

載荷試験, 縦波, 伝播速度

ジャパンパイル(株) 正 山本 辰徳 正 桑山 晋一
正 小嶋 英治

1. はじめに

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」¹⁾が発行されたが、衝撃載荷試験もこのうちのひとつである。この基準では、縦波伝播速度が、「なお、縦波伝播速度は杭体の材質により異なり、鋼杭で5,000m/s程度、コンクリート系の杭で4,000m/s程度の値を用いることが多い」と紹介されている。衝撃載荷試験では、計測した軸方向力の上昇波、下降波の分離、および杭頭の軸方向力の評価を行なうにあたり、正確な伝播速度を把握することは重要なことである。本論文は、杭の衝撃載荷試験に用いる、杭の伝播速度などについて検討を行なったものである。また、正確な伝播速度を与えないと、どのような弊害が生じるかも報告する。

2. 縦波の伝播速度

杭の縦波伝播速度(以下、伝播速度と略す) V_L は次式で与えられる。

$$V_L = \sqrt{E/\rho} \quad (1)$$

ここに、 E は杭のヤング係数、 ρ は杭の質量密度である。杭が地中にあり杭周囲が拘束されていると仮定すれば、杭体の伝播速度は次式で表される。地中の杭の伝播速度は、地盤の減衰にも影響されるが、ここではその影響は小さいと仮定する。

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

ポアソン比は地盤の拘束の影響を受けるが、杭を用いる地盤では、地盤の拘束力が小さいと仮定し、鋼管杭のポアソン比を $\nu=0.3$ とすれば伝播速度は $V_L=1.160\sqrt{E/\rho}$ である。また、コンクリート杭では、同様に、 $\nu=0.2$ とすれば、伝播速度は $V_L=1.054\sqrt{E/\rho}$ である。

3. 縦波の伝播速度の公称値と実測値

3.1 公称値から求めた杭の縦波の伝播速度

公称値を用いて、(1)式から既製杭の伝播速度を求めると、以下に示すとおりである。

鋼管杭: $E=205,000\text{N/mm}^2$, $\rho=7,850\text{kg/m}^3$, $V_L=5,110\text{m/s}$
 コンクリート系の杭(当社の公称値): $E=40,000\text{N/mm}^2$
 $\rho=2,650\sim 2,700\text{kg/m}^3$, $V_L=3,885\sim 3,849\text{m/s}$
 コンクリート系の杭の密度に一般的な値 $\rho=2,400\text{kg/m}^3$ を用いると、 $V_L=4,080\text{m/s}$ となり、地盤工学会基準に記載された伝播速度は、公称値の E および ρ から計算された値であることがわかる。

3.2 実測した杭体の縦波の伝播速度

杭体の伝播速度を計測するため、杭長8mの杭体を用いて、杭頭を打撃する試験²⁾を行なった。試験は先端を閉塞した7mの鋼管を地中に埋設し、その中に杭体を立て込んで行なった。試験杭は、鋼管杭(直径400, 断面積110.6cm²), 直杭のPHC杭(直径400,

断面積722.5cm²)および節杭のPHC杭(直径500-400, 断面積722.5cm²)である。

衝撃方法は、重錘質量300kgの自由落下方式で、落下高さ800mmとした。また、計測点は杭頭から杭径の2倍の0.8m下とした。詳細は参考文献2を参照して頂きたい。なお、データのサンプリングタイムは15 μs である。この結果、鋼管杭、直杭(PHC杭)、節杭(PHC杭)の伝播速度は、それぞれ5400m/s, 4,600m/s, 4,700m/s程度であった。

3.3 施工された杭の縦波の伝播速度

杭の伝播速度は、施工されていない杭を計るのは容易であるが、地中にある杭を計測するためには、杭にセンサーを設置しなければならない。しかし、杭頭部のセンサーで、杭の継ぎ目や不等厚により反射した波を利用して、この波から伝播速度を確認することは可能である。

(1) 不等厚を有する鋼管杭から求めた伝播速度

不等厚を有する鋼管杭から、杭の伝播速度を計測した例を紹介する。計測した杭の諸元などは、表1に示すとおり、直径800mmの鋼管杭で、溶接による4本継ぎ、杭長23.58mである。

計測点は杭頭から0.7m下とした。図1に、重錘質量10t、落下高さ1.44mで行なった衝撃載荷試験の、杭頭の軸方向力を示す。上段が入力波 F で、下段が軸方向力の上昇波 F_u である。ここで、入力波とは杭頭の軸方向力 F (上昇波 F_u +下降波 F_d)を意味³⁾する。なお、杭頭の軸方向力は計測点の加速度およびひずみの時刻歴波形から求めたものである。ただし、この分離には杭の伝播速度が必要であるため、初めに伝播速度を5,400m/sと仮定し、分離した波から暫定の伝播速度を求め、更に求めた伝播速度を用いて、同様な方法から伝播速度を求めたものである。この結果、鋼管杭の伝播速度は5,444m/sであった。なお、伝播速度を上昇波から求めたのは、杭の不等厚の影響が敏感に現れるからである。

(2) 既製コンクリート杭の伝播速度

既製コンクリート杭の無溶接継手の反射を利用して、杭の伝播速度を求めた例を紹介する。既製コンクリート杭の諸元は表2に示すとおり、直径800mm、無溶接継ぎ手の7本継ぎ、杭長81.55mである。

図2に重錘質量20t、落下高さ1.8m、計測点を杭頭から1.0m下とした、衝撃載荷試験の杭頭の軸方向力を示す。上段が入力波Fで、下段が軸方向力の上昇波Fuである。伝播速度の計測・解析方法は(1)と同じ方法を用いた。この結果、SC杭(外殻鋼管付き高強度コンクリートパイル)の伝播速度は5,000m/sで、既製コンクリート杭は4,800m/sであった。

(3) 地中の伝播速度の変化

(2)式によれば、杭周面を拘束すれば、伝播速度は、鋼管杭では16%程度、コンクリート杭では5%程度速くなる。実測の結果は、杭体みの場合と比較して、鋼管杭では一致したが、既製コンクリート杭では4%程度早くなった。これは、杭が施工される地盤は軟弱であり拘束力が弱いこと、既製杭は中空部を有する断面であることから地中による影響は小さいと考える。したがって、コンクリート杭の伝播速度の差異は製品のばらつきと推定する。

4. 伝播速度の評価の違いによる問題点

杭の伝播速度を実測した例を示したが、伝播速度の評価がどのような問題を生じるのかを、SC杭の例で示す。

図3に、計測したSC杭の伝播速度5,000m/sとコンクリート杭の伝播速度4,000m/sを用いて評価した、杭頭の軸方向力を示す。図3の上段が入力波F(=Fu+Fd)およびZ・v(=Z・vu+Z・vd)で、下段がマッチング目標波である、軸方向力の上昇波Fuである。ここに、Zは杭の機械インピーダンスで、vは粒子速度である。計測した伝播速度を用いた場合とそうでない場合を比べると、上昇波に差が生じ、波形マッチング解析を行う際の地盤抵抗の評価に影響が生じる。

5. ヤング係数の評価

既製杭の公称値では、密度ρは実測に近いが、ヤング係数Eは設計で用いるため、安全側の小さめの値となっている。したがって、波形マッチング解析に用いるヤング係数Eは、公称値の密度ρと実測値のVLから求めた方が妥当であると考えられる。

6. まとめ

杭の伝播速度は軸方向力の上昇波を用いて把握できること、および伝播速度に実測値を用いることの妥当性を示した。

【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)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。

表1 鋼管杭の諸元および伝播速度

直径・杭種	断面積 (cm ²)	杭長(m)	到達時間 (ms)	伝播速度 (m/s)
800 (SKK400,t10)	248.2	9.05	7.10	5,444
			10.43	
800 (SKK400,t9)	223.6	14.53	16.20	-

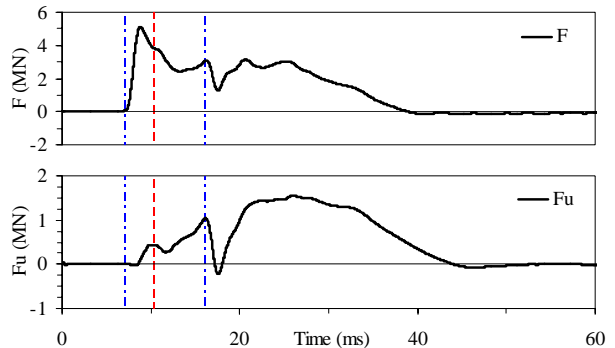


図1 鋼管杭の杭頭の軸方向力

表2 既製コンクリート杭の諸元および伝播速度

直径・杭種	断面積 (cm ²)	杭長(m)	到達時間 (ms)	伝播速度 (m/s)
800(SC,SKK400,t6)	2,889	3.55	7.12	5,035
			8.53	
800 (CPRC)	2,596	13.00	13.73	5,005
800 (PHC A)	2,436	13.00	19.13	4,815
800 (PHC A)	2,436	13.00	24.50	4,842
800 (PHC A)	2,436	13.00	29.90	4,810
800 (PHC A)	2,436	13.00	35.92	-
800 (PHC105N A)	2,436	13.00	41.73	-

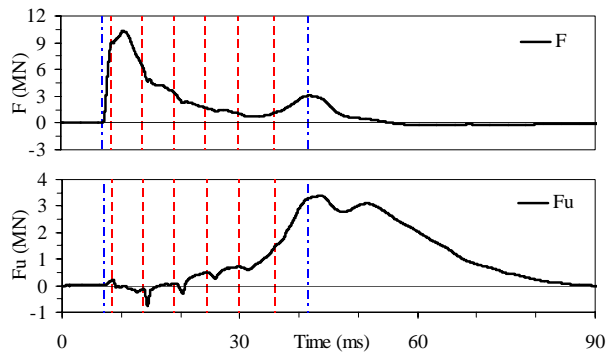


図2 既製コンクリート杭の杭頭の軸方向力

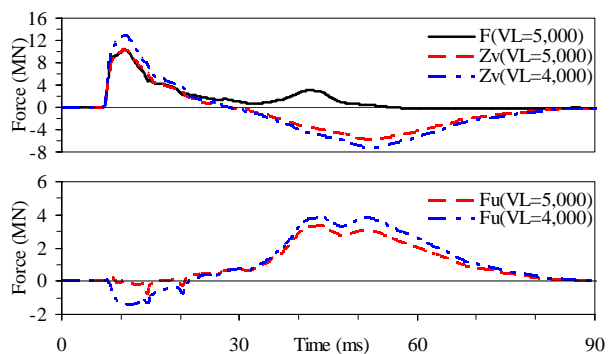


図3 SC杭の杭頭の軸方向力など