

1. はじめに

近年、すでに打設されたコンクリート杭の健全性を調べることを目的としてインテグリティテストが行なわれるようになってきている¹⁾⁻⁴⁾。インテグリティテストでは、杭頭部を手で持ったハンマで軽打した際の杭の応答(一般的には加速度)を測定する。そのため、多数の杭を容易に検査でき、また検査時に杭体や周辺地盤を破壊させることはない。解釈は一次元波動理論に基づいて行なわれる⁴⁾が、その際杭に発生するひずみレベルが非常に小さく杭変位も小さいため、地盤抵抗が作用しないものとして測定データの解釈をすることが多い。

堀口ら(1989)はセメントミルク工法によって施工された杭(外径40cm,長さ17mのPHC杭)をインテグリティテストによって経時的に測定した結果を報告している。この報告によれば、杭周固定液や根固め液が固化していない杭埋設直後には杭先端からの反射シグナルが明確に現われているが、時間が経過して杭周固定液と根固め液が固化すると先端からの反射シグナルが杭頭で測定されなくなる。このことは、インテグリティテストのような低ひずみ打撃試験においても地盤抵抗の影響が無視できないことを強く示唆している。

本研究では、著者が開発した応力波解析プログラム⁵⁾によってインテグリティテストのシミュレーションを行い、インテグリティテストの測定データの解釈において地盤抵抗の影響を考慮することの重要性を示す。

2. インテグリティテストのシミュレーション解析条件

杭は断面が一定のコンクリート杭を想定し、表1のような力学的・幾何学的条件を設定した。全長10mの杭が7mだけ根入れされており、杭側面には深さ方向に一様な周面摩擦、および先端部に先端地盤抵抗が作用しているものとする。

解析に用いる地盤モデルとしてRandolph(1987)のモデル(図1)を用いた。スライダは最大周面摩擦応力 τ_{max} (または最大先端応力 $(\sigma_b)_{max}$)、バネは周辺地盤の弾性変形、ダッシュポットは逸散減衰を表している。周面摩擦に対するバネ定数 k_s と減衰定数 c_s は、Novakら(1978)の研究に基づいて以下の式で決定した。

$$k_s = 2.9G / (2\pi r_o) \quad (1)$$

$$c_s = G / V_s \quad (2)$$

先端地盤のバネ定数 k_b と減衰定数 c_b は、Lysmer and Richart(1966)に従って、次式で決定した。

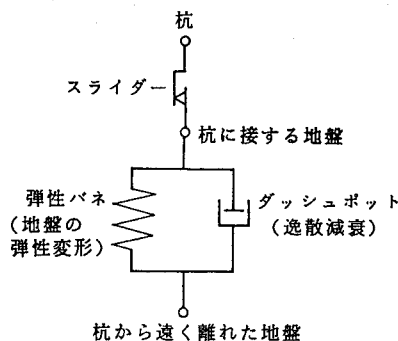


図1 解析に用いた地盤モデル (Randolph model)

$$k_b = \frac{4G}{\pi r_o(1-\nu)} \quad (3)$$

$$c_b = \frac{3.4G}{\pi(1-\nu)V_s} \quad (4)$$

上式において、 r_o は杭の半径である。 G 、 ν 、 V_s は、それぞれ地盤のせん断剛性、ポアソン比、せん断波速度である。せん断波速度 V_s は土の密度を ρ_s として、 $V_s = \sqrt{G/\rho_s}$ で与えられる。

杭頭に与える打撃応力は、図2に示すような三角形波とした。その最大応力は 0.5 kgf/cm^2 であり、通常の杭打ちに比べて非常に小さな値である。

計2通りの解析を行なった。Case 1は、地盤抵抗が作用しない場合である。Case 2は地盤抵抗が作用する場合である。Case 2で用いた地盤パラメータは、表2に示す通りである。

表1 解析に用いた杭の条件

直径	D	30.0 (cm)
断面積	A	706.9 (cm ²)
長さ	L	10.0 (m)
根入れ長	L_d	7.0 (m)
ヤング率	E	3.5×10^5 (kgf/cm ²)
密度	ρ	2.14 (g/cm ³)
波速度	c	4000 (m/s)

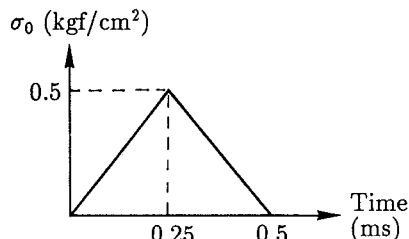


図2 解析に用いた杭頭の打撃応力

表2 Case 2の解析に用いた地盤パラメータ

せん断剛性 G	500 (kgf/cm ²)
ポアソン比 ν	0.49
密度 ρ_s	1.6 (g/cm ³)
せん断波速度 V_s	175 (m/s)
周面バネ定数 k_s	15.4 (kgf/cm ³)
周面減衰定数 c_s	0.029 (kgfs/cm ³)
最大摩擦応力 τ_{max}	0.5 (kgf/cm ²)
先端バネ定数 k_b	83.2 (kgf/cm ³)
先端減衰定数 c_b	0.061 (kgfs/cm ³)
最大先端抵抗 $(\sigma_b)_{max}$	2.0 (kgf/cm ²)

解析結果

図3は、Case 1における杭頭の速度の解析結果である。入力波形のピークから $2L/c$ 時間後に先端からの反射応力波によって再び大きな速度が生じている。Case 1では、地盤抵抗が作用していないため2回目のピーク速度が最初のピーク速度よりも大きくなっていることに注意されたい。

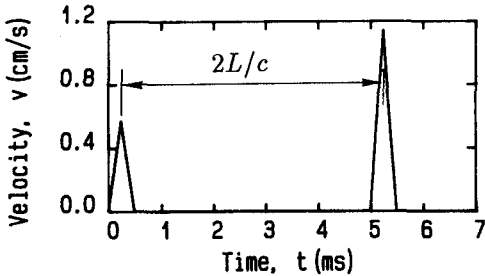


図3 杭頭の速度波形 (Case 1: 地盤抵抗無し)

図4は、Case 2の杭頭速度である。周面摩擦による上昇波が杭頭に到達し始める時刻 $t = 2(L - L_a)/c = 1.5$ ms から負の速度が生じている。先端からの反射波が杭頭に到達すると再び正の速度に転じている。時刻 $t = 5.25$ ms におけるピーク速度は地盤抵抗の存在によって Case 1の場合に比べて非常に小さくなっている。このような速度波形から杭の長さを同定することは実際上難しい。

インテグリティテストにおける杭の変位は非常に小さい。Case 2における杭の最大変位は杭頭でもわずか 0.001 mm である。このように非常に小さな変位を静的に杭に与えた場合の地盤抵抗は無

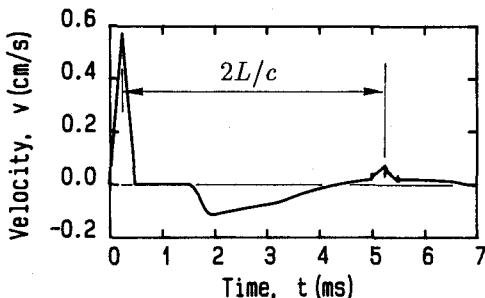


図4 杭頭の速度波形 (Case 2: 地盤抵抗有り)

視し得るものである。本解析によれば、インテグリティテストにおいて地盤抵抗を無視できない要因は逸散減衰によることが示されている(図5)。

図5は、Case 2におけるエネルギー収支の解析結果である。杭に伝達された打撃エネルギーは杭体の持つエネルギー(運動エネルギーとひずみエネルギーの和)、地盤の弾性エネルギー(地盤バネのひずみエネルギー)、逸散エネルギーの和となっていることがわかる。逸散エネルギーは地盤中の半径方向の波動伝播によって失われるエネルギーであり、ダッシュポットで消費されるエネルギーに等しい。本解析では最大周面摩擦が発揮されなかったため、スライダで消費されるエネルギーは無い。ここで興味深いことは、杭に伝達された打撃エネルギーの大部分が最終的に逸散エネルギーとなって地盤に伝達されていることである。このことが、インテグリティテストのような低ひずみ打撃試験においても地盤抵抗が杭の応力波伝播に大きく影響する要因となっている。

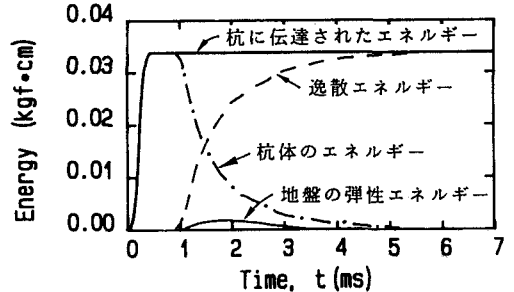


図5 エネルギー収支の解析結果 (Case 2)

実際のインテグリティテストの測定速度波形は、Case 2のような波形となっている¹⁾²⁾。本研究の結果は、インテグリティテストのような低ひずみ打撃試験においても地盤抵抗の影響を考慮することが重要であることを示している。

参考文献

- 堀口ら(1989): 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, pp.91-94.
- 本間ら(1989): 同上, pp.95-98.
- 近藤ら(1989): 同上, pp.99-102.
- 松本・村上(1990): 施工された既製コンクリート杭の非破壊検査, 建築技術12月号, pp.139-144.
- Matsumoto and Takei(1991): Proc. Conf. on Deep Foundation Practice, pp.153-160.
- Randolph M.F.(1987): Proc. 9th S.E. Asian Geotech. Conf., pp.6.1-6.14.
- Novak et al(1978): J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.104, No.EM4, pp.953-959.
- Lysmer & Richart(1966): J. Soil Mech. Fnds. Div., ASCE, Vol.92, No.SM1, pp.65-91.