

# 模型杭を用いたインテグリティ試験における 地盤拘束の影響に関する研究

今田和夫<sup>1</sup>・松本樹典<sup>2</sup>・仲田慶正<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株) フジエンジニアリング 調査設計部 第一部長 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28)

<sup>2</sup>正会員 工博 金沢大学 工学部 土木建設工学科 教授 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

<sup>3</sup>正会員 (株) フジエンジニアリング 調査設計部 調査一課 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28)

インテグリティ試験を基礎杭の調査に適用する場合、基礎杭は地盤で拘束されているため、杭体中の波動伝播は杭体の断面変化だけでなく地盤の影響を受ける。そこで、人工地盤中に設置した模型杭を用いて行ったインテグリティ試験においてサンプリングした杭頭部の速度波形を基に、地盤拘束の影響を評価した。また、一次元波動解析を行うことにより実測波形にマッチングした解析波形を求め、計算上仮定した地盤定数が実測値と概ね一致することから、解析の妥当性を検証した。さらに、実杭を対象として、既存の土質調査結果に基づく地盤定数を用いて計算した解析波形は、実測波形と比較的一致した結果が得られたことから、波動解析法は実杭における波形判定に有効な手法であることを明らかにした。

**Key Words :** *integrity test, foundation pile, soil restriction, soil resistance  
one dimensional stress wave analysis*

## 1. はじめに

兵庫県南部地震により甚大な被害を受けた基礎構造物の被災程度を確認するために、衝撃弾性波を用いた非破壊調査(インテグリティ試験、略称: IT)が大々的に採用された<sup>1)</sup>。この手法は、従来、基礎杭の品質管理を目的として、1970年代後半にヨーロッパにおいて開発、実用化されたものである。我が国には1980年代半ばに導入され、基礎杭の品質管理の一手法として、その簡便性や実用性は確認されるに至っている<sup>2)</sup>。ITは兵庫県南部地震を契機として調査の適用範囲が品質管理のみならず、損傷確認調査へと広がってきている<sup>3)</sup>。

ITは基礎杭を1次元の弾性体として、波動理論を用いてデータの処理を行っているが、実際の杭は地盤中に埋設されており、測定波形は地盤拘束により伝播速度や波形の変化、あるいは波動(振幅)の減衰などの影響を受ける。この地盤拘束の様々な影響を定量的に評価することは難しい問題といえる。現実的には検尺等により杭長が確認されている基礎杭の測定データから、伝播速度を

設定したり、経験的な判断で伝播速度を仮定する場合もある。また、波動の減衰に関しては、測定データを時間経過と共に増幅する方法<sup>4)</sup>や振動速度に比例する抵抗によって生じるものと考え、解析的に評価する手法<sup>5), 6)</sup>などが提案されている。ITにおける測定波形が変化する要因としては、杭自体の断面変化や欠陥、あるいは品質不良部などインピーダンスの変化だけでなく、この地盤拘束の影響が挙げられる。したがって、今後、ITの精度向上と適用範囲の拡大を図るには、測定された波形の変化が何に起因して生じているのかを正しく把握することが重要となる。そのためには、地盤拘束の影響を定量的に把握することが必要である。

そこで、地盤拘束の影響を把握することを目的として、条件の異なる人工地盤中に模型杭を設置し、基礎実験を行った。その結果、測定波形は地盤の特性を反映した変化を示すことに加え、実測により得られた測定波形と一次元波動解析(以下、波動解析と呼ぶ)により実測波形にマッチングさせた解析波形を求めることにより、解析波形を計算する上で仮定した地盤定数が実測により

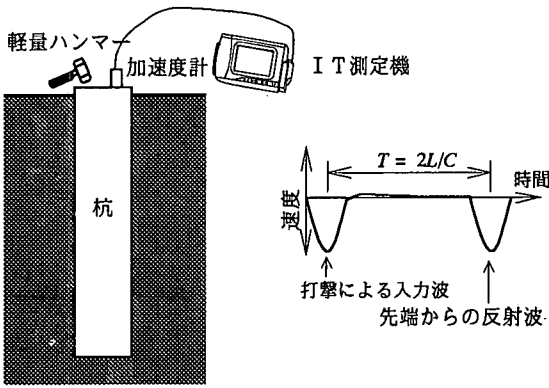


図-1 試験方法の概要

得られた数値と概ね一致することを確認し、波動解析手法の妥当性を検証した。

本論文では、模型杭による基礎実験結果に基づき、地盤拘束が測定波形に及ぼす影響を把握すると共に、波動解析による計算波形は実測波形を精度良く表現することが可能であり、有効な解析手法であることを示した。また、実杭への適用性について検証し、実杭を対象とした I T による測定波形の解釈では、波動解析手法を併用することにより、地盤条件が既知の場合は実測波形における地盤の影響を解析的に推定することが可能であり、逆に、地盤条件が不明な場合は解析波形から杭周辺地盤の地盤定数の推定が可能であることを明らかにした。

## 2. I T の概要

本試験は軽量ハンマーにより杭頭を軽打し、そのときの応答を加速度計により計測して(加速度は速度に変換されている)、杭の健全性及び損傷状況を調査するものである。ところが、地盤に根入れされた杭を打撃すれば、それによる杭変位により地盤抵抗が発生する。この地盤抵抗は杭に新たな応力波を生じさせるため、測定データから杭体自身の変化を見つけたことが困難となる。そこで、I T では杭頭に与える衝撃をきわめて小さくすることにより地盤抵抗が発揮されないという仮定に基づいて試験を行う低ひずみ(low-strain)法を用いている。一般的な試験方法の概要を図-1 に示す。

杭頭に打撃が与えられると、その衝撃が波動となって杭体内を伝播する。このとき杭体に摩擦等の外力が作用せず、動的な応力-ひずみ関係がひずみ速度の影響を無視して、静的な Hooke(フック)の法則に従うものとすれば、杭中での波動は式(1)に示す波動方程式で表すことができる。この式(1)は 1867 年に St.Venant(サンブナン)によって最初に導かれた<sup>7)</sup>。

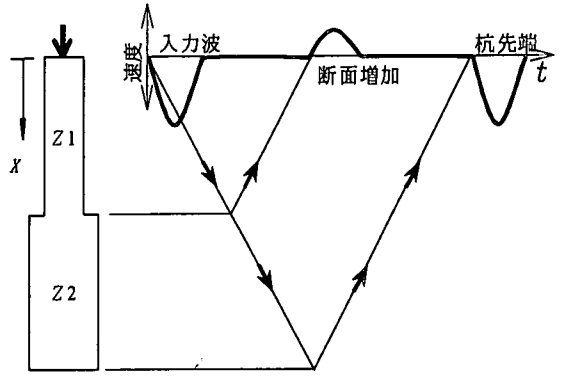


図-2 断面変化に伴う波形変化

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

ここに  $u$  は変位、 $c$  は杭体を伝播する波動の伝播速度を表し、杭が拘束されていない場合、すなわち杭体の半径方向の応力がゼロの場合、 $c = \sqrt{E/\rho}$  ( $E$  は弾性係数、 $\rho$  は杭体密度) となる。この波動方程式(1)の一般解は D'Alembert(ダランベール)によって式(2)で与えられている。

$$u = f(x-ct) + g(x+ct) \quad (2)$$

ここに、 $f$  は杭軸の正の方向に伝播する波動(進行波)を示すのに対し、 $g$  は負の方向に伝播する波動(後退波)を示している。本論文では、座標  $x$  は杭頭を原点として、下向きを正にとることとする。

杭頭から入力された波動は、進行波として杭先端方向に伝播し、杭断面変化部や先端部で反射して杭頭へ戻ってくる。したがって、波動の伝播速度  $c$  を設定すれば実測した反射波の到達時間  $t$  を式(3)に代入すれば断面変化位置や杭長  $L$  を推定することができる。

$$L = \frac{c \cdot t}{2} \quad (3)$$

一方、杭体が断面変化を有する場合は、杭頭に与えられた打撃により発生する波動は杭先端方向に伝播するが、断面変化点に達すると一部は反射して杭頭へ向かい、他は透過して更に進行する。このときの速度に関する反射率  $\alpha$  および透過率  $\beta$  は進行波に対して式(4)で与えられる(図-2 参照)。

$$\alpha = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad \beta = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

表-1 実験装置

区分	名称	仕様・寸法	
模型杭	テフロン棒	直径	$d=25\text{mm}$
		長さ	$L=800\text{mm}$
		密度	$\rho=2.18\text{ton/m}^3$
		弾性係数	$E=1.65 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$
		伝播速度	$c=800\text{m/s}$
		ポアソン比	$\nu=0.30$
人工地盤	豊浦標準砂+石灰(15%)のブレンド材		
実験槽	アクリル管	直径	250 mm
		長さ	1000 mm
突固め装置	ランマー	形状(直径)	100 mm
		重量	58.8 N
強度測定	コーンペネトロメータ	先端角	$30^\circ$
		断面積	$640 \text{ mm}^2$
		外径	28.5 mm
		ロッド径	16 mm
I T測定機	Sonic Integrity Test (FPDS-6)	TNO 製	
地盤の弾性波速度	超音波発信器	50 kHz	
	AEセンサー	200 kHz	
	ウルトラソニックテスタ		
	オシロスコープ		

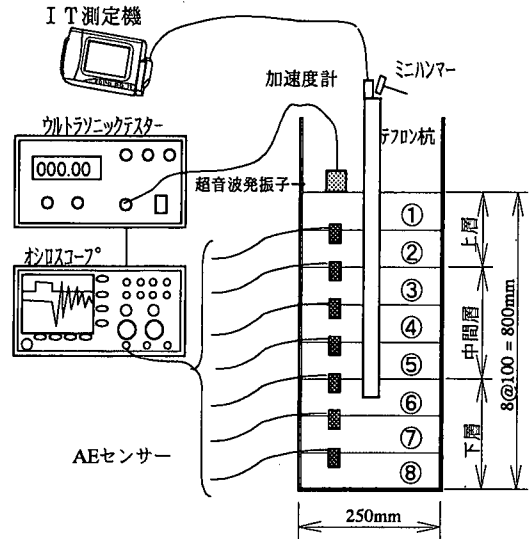


図-3 実験装置概略図

のミニスチールハンマーで、打撃時間は約 0.0005 s、波長は 0.2m 程度であり、テフロン杭の杭長(800mm)は波長の 4 倍の長さを有するものである。

b) 実験内容

実験において地盤特性の相違は、突固め回数を変化させ、各々の突固め回数と地盤の密度および強度(以下、コーン抵抗値で表す)の関係で評価した。本論文において突固め回数とは、実験用に製作した 58.8N のランマーを 200mm の高さから落下させたときの回数をいう。

また、I Tでは地盤条件(密度、コーン抵抗値)の相違および根入れ長と測定波形の関係を把握した。さらに、波動解析による計算波形から求められる地盤定数と比較するために、地盤の S波速度(以下、 $V_s$ と呼ぶ)を、実測した P波速度(以下、 $V_p$ と呼ぶ)から推定した。

c) 実験方法

実験に用いた装置の仕様を表-1 に、また、試験装置の概要を図-3 に示す。実験槽の直径は、テフロン杭の直径  $d$  の 10 倍とし、テフロン杭先端から実験槽底面までは 10  $d$  確保することとした。実験手順および実験方法は以下の通りである。

まず、試験土を 1 回 78.4N ずつ投入し、所定回数突固めた後、各層の試料高さから密度を計算する。下層 3 層の突固め終了後、テフロン杭を土槽中央に設置し 50mm 根入れさせる。このときから I T を実施し、試験土 1 層投入毎に順次 I T を行ない、所定の深度まで根入れ長と測定波形の関係を把握する。また、各層における人工地盤作製時に、土槽底面から 100mm 毎に AE センサーを地盤中に設置しておき、人工地盤作製後、表面から超音波パルスを入力し、各 AE センサーへの超音波パルスの到達時間から区間毎の地盤の P 波速度  $V_p$  を求め、 $V_p$  とポアソン比  $\nu$  から S 波速度  $V_s$  を算定した。次に、

ここに、 $Z_1$ 、 $Z_2$  は断面変化点の上下における各々の杭のインピーダンスであり、一般にインピーダンス  $Z$  は杭の断面積を  $A$ 、弾性係数を  $E$  とすると、 $Z=AE/c$  で表される。

3. 地盤拘束の影響確認実験

(1) 実験概要

a) 実験目的

地中に埋設された基礎杭を対象とした I T で得られる波形が受ける地盤拘束の影響について、地盤条件の相違とそれに対応した測定波形を分析することにより評価を行う。実地盤での実験は大規模となり、地盤条件を任意に選定することが難しいことから人工地盤を作製し、模型杭を用いて地盤拘束の影響を把握することを目的とした室内実験を行った。模型杭の材料としては、実杭で用いられるコンクリートあるいは鋼材が望ましいが、これらの材料では波動の伝播速度が各々 4000m/s、5000m/s 程度であるため、通常用いるプラスチックハンマー(重さ 7.0N)の打撃時間約 0.001s を考慮すると、入力波の波長はコンクリートで 2.0m、鋼材で 2.5m となる。したがって、杭長としてはこの入力波の波長以上の長さが必要となるため、実験装置が大型化する。そこで、波動伝播速度が、これらの材料の 1/5~1/6 程度である中実のテフロン製の棒を模型杭(以下、テフロン杭と呼ぶ)として用いることにより、実験装置の小規模化を図ることとした。ただし、試験に用いたハンマーは、重さ 0.02N

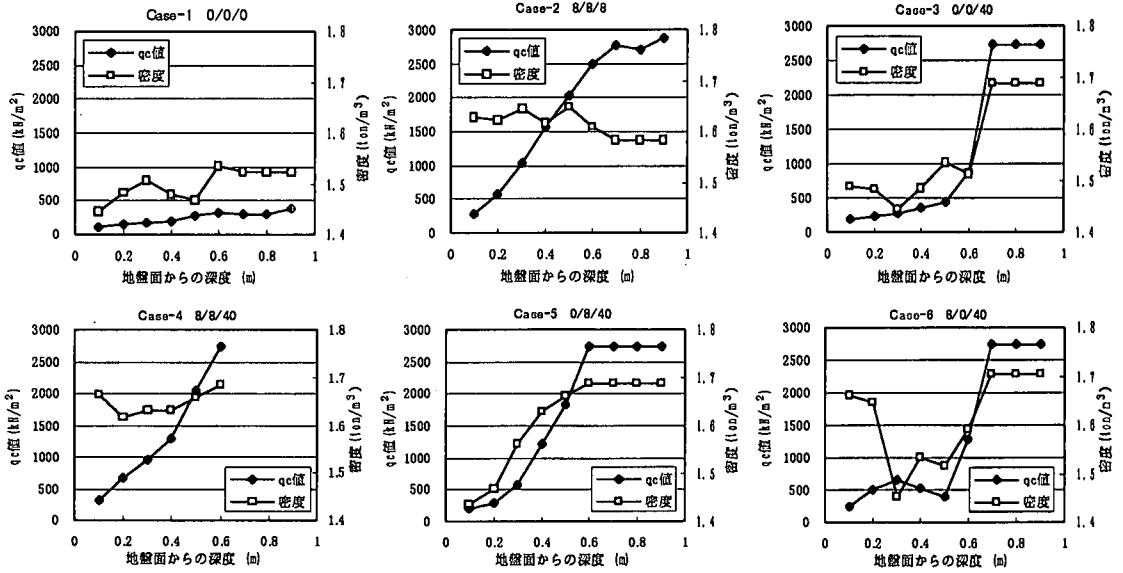
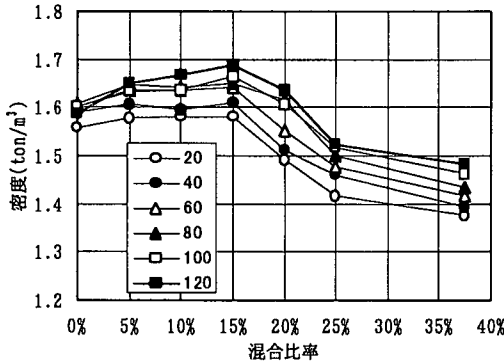


図-4 突固め回数と密度の関係



※図中の凡例は突固め回数を示す。

図-5 突固め回数と密度の関係

地盤強度を把握するために、コーンペネトロメータを用いて地盤表面から100mm毎に力計の値を読みとり、コーン抵抗値を測定した。

## (2) 人工地盤の作製

### a) 地盤条件

人工地盤の材料として、豊浦標準砂と石灰のブレンド材を用いた。豊浦標準砂単体では調整できる密度がある程度限定されるため、締固め度を向上させる目的で石灰を使用した。両者の混合割合は、予備実験にて突固め回数を20回から120回まで、20回間隔で変化させたときの密度を各々求め、最もよく締固まる重量混合比率である15%と決定した(図-5参照)。また、人工地盤の種類は単一地盤から多層系地盤を対象とし、表-2に示すように1層地盤から3層地盤までの6種類とした。

表-2 人工地盤の種類

地盤区分	Case No	突固め回数(回)			備考 略称
		上層	中間層	下層	
1層	Case-1	0	0	0	0/0/0
	Case-2	8	8	8	8/8/8
2層	Case-3	0	0	40	0/0/40
	Case-4	8	8	40	8/8/40
3層	Case-5	0	8	40	0/8/40
	Case-6	8	0	40	8/0/40

### b) 人工地盤の特性

6種類の人工地盤における突固め回数と密度およびコーン抵抗値の関係を図-4に示した。密度は突固め回数の相違にほぼ対応した変化が現れているが、コーン抵抗値(図中 $q_c$ 値と表示)は突固め回数や密度に関わらずゼロから次第に増加している傾向が伺える。突固め回数が0回の場合(図中、Case-1, Case-3参照)、密度とコーン抵抗値はほぼ対応した変化を示し、深度(上載圧)の増加と共に若干コーン抵抗値が増加する傾向がみられる。それに対し、突固め回数が8回(Case-2, Case-4参照)では、密度の変化は小さいがコーン抵抗値は深度(上載圧)に対応してゼロから次第に増加している。また、Case-5やCase-6のように3層地盤では、コーン抵抗値は突固め回数および密度の変化にほぼ対応した変化を示すが、Case-6における上層(突固め回数8回)でのコーン抵抗値はCase-2, Case-4と同じ現象を示している。このように、コーン抵抗値は突固め回数および密度の影響を受けるだけでなく、深度(上載圧)の影響を受けて変化していることが判る。

また、密度とコーン抵抗値の関係を根入れ長に基づき3つのグループに分けて比較したものを図-6に示す。グループ化は根入れ長200mm未満、200mm以上400mm

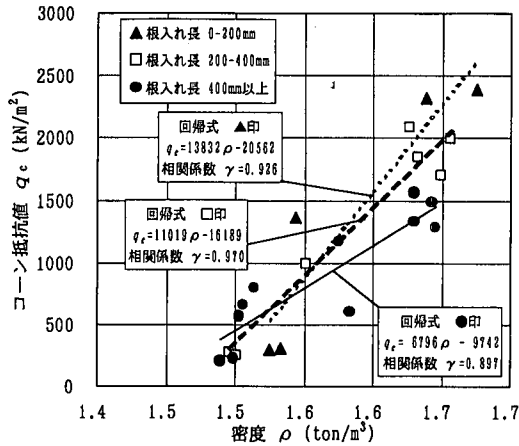


図-6 密度とコーン抵抗値の関係

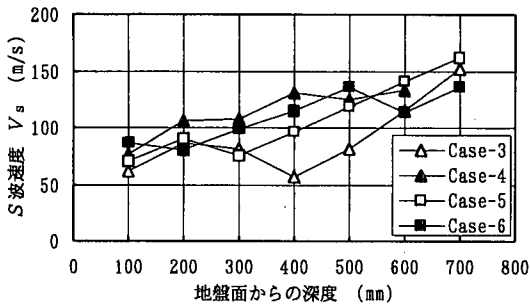


図-7 実測  $V_p$  から換算した  $V_s$  の分布

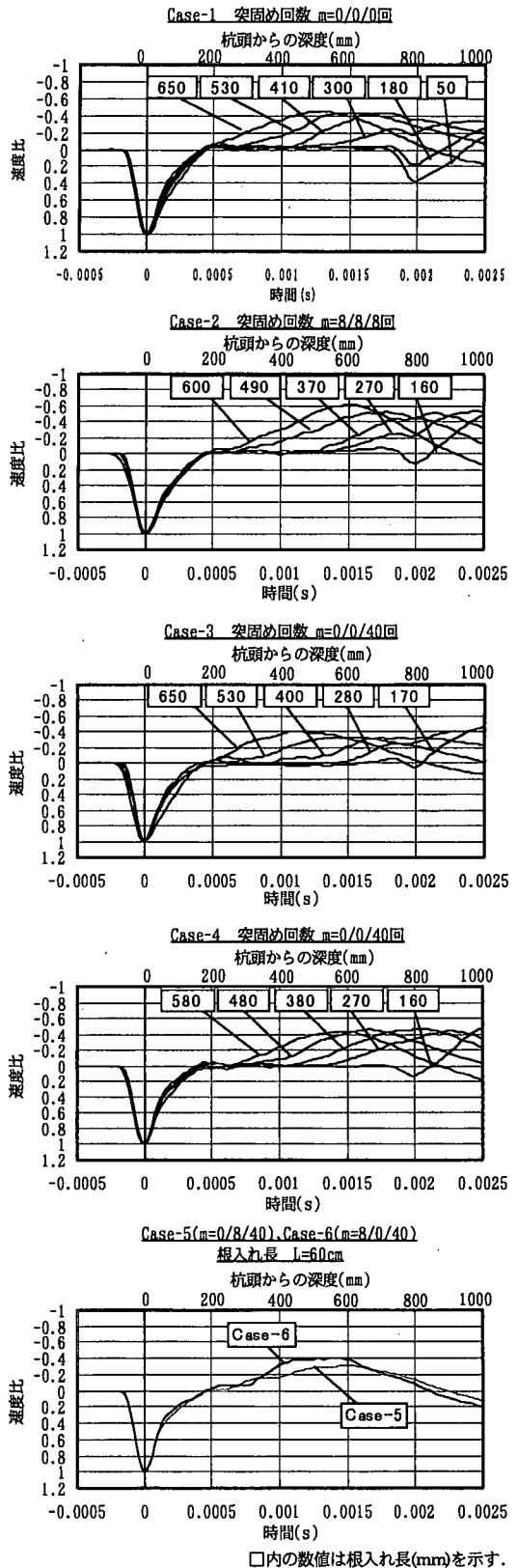
未満、そして 400mm 以上とした。同じグループ内でも突固め回数が異なるものがあるため、3つのグループのデータが重複していることが判る。同一グループ内の密度とコーン抵抗値は、比較的良好な相関関係にあることが確認でき、根入れ長が大きくなる程、回帰式の勾配は小さくなる傾向がみられる。

次に、人工地盤表面から入力した超音波の到達時間を人工地盤中に設置した A/E センサーで計測し、A/E センサー間の距離から各層における地盤の  $V_p$  を測定した。この測定した  $V_p$  とテフロン杭のポアソン比を  $\nu=0.3$  として式(5)により  $V_s$  を換算した結果の一部を図-7 に示す。換算した  $V_s$  は 50m/s~150m/s の範囲に分布しており、全体的には、人工地盤面からの深度が増加するにしたがい速くなる傾向が伺える。

$$V_s = V_p \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (5)$$

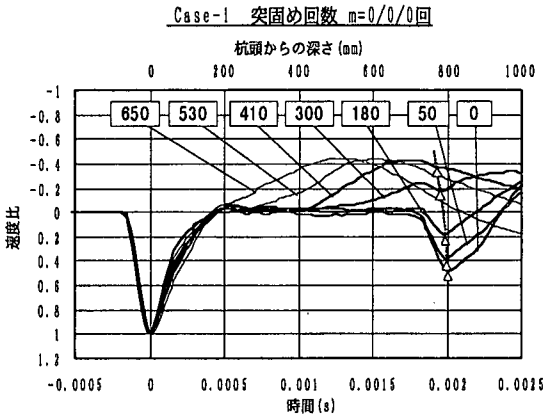
### (3) 測定波形

6種類の地盤条件下で、各々、各根入れ長毎に実施した I T の測定波形を並べてグラフ化したものを図-8 に示す。横軸下端は杭頭打撃時の速度波形のピーク時をゼロとしたときの時間軸で表し、横軸上端は時間にテ



□内の数値は根入れ長(mm)を示す。

図-8 地盤条件と測定速度波形



図中□内の数値は根入れ長(mm)を示す。  
図-9 先端反射波の発生深度の変化

フロン杭の伝播速度 800m/s を乗じて 2 で除して換算した杭頭からの深度を表している。時間ゼロにおける下向きに凸な波形が入力波を表す。また、縦軸は入力波の振幅で測定データを除して正規化し、入力波を 1 としたときの速度比で表示している。また、図中□内の数値はテフロン杭の根入れ長(mm)を表している。図-8 に示す各測定波形に共通して言えることは以下の通りである。

- ① 0.002s(800mm)の位置にみられる入力波と同じ下向きに凸な波形は、杭先端部における反射波を示すが、その発生位置は根入れ長が大きくなるほど若干早く(浅く)出現する傾向が伺える。
- ② 各グラフの 0.002s に現れている杭先端からの反射波の振幅は、根入れ長が大きくなるにしたがい小さくなり、400mm 程度根入れされると判別できなくなる。
- ③ テフロン杭の根入れ部における波形は、入力波と反対の方向に盛り上がり、蒲鉾形状を呈する。これは杭の根入れ部において上向きの周面摩擦が発揮されるため、圧縮の上昇波が生じ、これが杭頭へ伝播してくるためであると考えられる。
- ④ 根入れ部において速度波形が入力波と反対の方向に変化し出す深度は、杭頭から地盤面までの距離(テフロン杭の杭長 800mm から根入れ長を引いたもの)とほぼ対応している。
- ⑤ Case-3~Case-6 のように突固め回数の異なる 2 層間の境界部では、明確な凹凸状の反射波形は確認されない。

これらの測定波形を基に、各地盤条件すなわち密度、コーン抵抗値、あるいは根入れ長等と波形との関係を比較、分析することにより、測定波形に及ぼす地盤の影響を考察・評価することとした。その結果を次章に示すものとする。

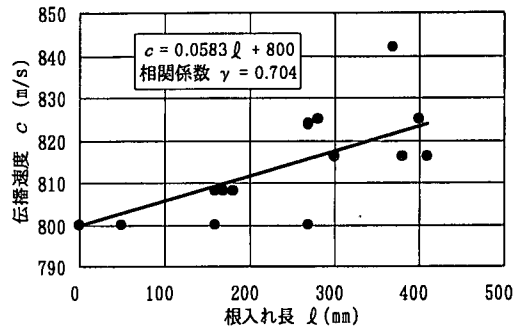


図-10 根入れ深さと伝播速度

#### 4. 波形に及ぼす地盤拘束の影響

##### (1) 地盤拘束が波動伝播速度へ及ぼす影響

###### a) 杭の根入れ長の影響

空中で測定した結果(図-9における根入れ長ゼロ時)から、テフロン杭の先端での反射波が打撃時から 0.002 s 後に現れていることから、テフロン杭の伝播速度は 800m/s と算出される。この伝播速度を用いて一連の I Tを行ったが、図-9 に示した杭先端からの反射波の深度(図中△印)をみても分かるように、テフロン杭の根入れ長が大きくなるほど、杭先端からの反射波の発生位置が若干浅く計測される。言い換えると、根入れ長が大きくなるほど、波動の伝播速度が速くなることになる。全測定結果からテフロン杭の根入れ長と伝播速度との関係性を求めたものを図-10 に示す。図-10 には根入れ長ゼロで伝播速度が 800m/s として求めた回帰式を併記したが、根入れ長と波動伝播速度との 1 次回帰式は式(6)で表すことができ、根入れ長が深くなるに従い伝播速度は速くなる傾向が確認できる。

$$c = 0.0583 \cdot l + 800 \quad (6)$$

ここに  $c$  は伝播速度(m/s)、 $l$  は根入れ長(mm)である。

ただし、地盤拘束の影響を受けた杭の波動伝播速度は根入れ長に比例して速くなるが、杭体もつポアソン比により限界がある。理論的には地盤等で杭が拘束され、杭の水平方向のひずみ  $\epsilon_r$  がゼロの場合の波動伝播速度は式(7)で示され、この値が伝播速度の最大値を示す。

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu_p)}{\rho(1-2\nu_p)(1+\nu_p)}} \quad (7)$$

ここに、 $c_1$  : 波動伝播速度、 $E$  : 杭の弾性係数、 $\rho$  : 杭体の密度、 $\nu_p$  : 杭体のポアソン比である。

ここで空中に置かれた杭のように、杭体への地盤拘束

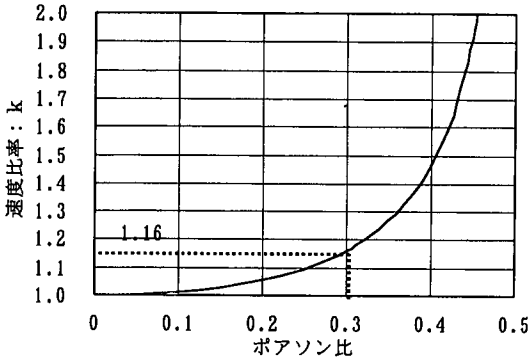


図-11 ポアソン比と速度比率

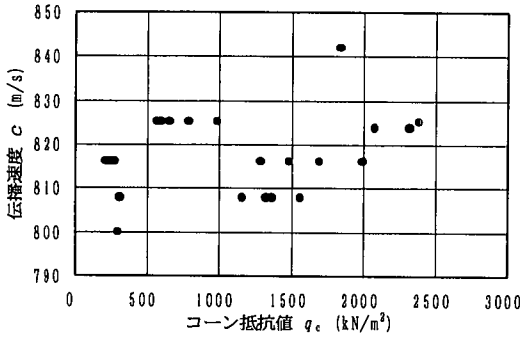


図-12 コーン抵抗値と伝播速度の関係

等の影響がない場合、杭体の軸方向に直角方向の応力  $\sigma_r$  がゼロであるから杭体を伝播する波動伝播速度は  $c_2 = \sqrt{E/\rho}$  で算出することができる。この波動伝播速度  $c_2$  と、式(7)で算出した波動伝播速度  $c_1$  との速度比率 ( $k = c_1/c_2$ ) は次式により算出される。

$$k = \frac{c_1}{c_2} = \sqrt{\frac{1 - \nu_p}{(1 - 2\nu_p)(1 + \nu_p)}} \quad (8)$$

式(8)によりポアソン比を 0~0.5 まで変化させたときのポアソン比と比率  $k$  の関係を図-11 に示す。図-11 において、テフロン杭のポアソン比を 0.3 とすると、伝播速度は気中における場合より最大 16% 速くなることが確認できる。しかし、実際には周辺地盤は半径方向に変形するため、 $\epsilon_r = 0$  とはならないため、一般的に伝播速度は式(7)から算定したものより小さくなる。例えば、テフロン杭の測定結果から得られた回帰式(6)で、実験における最大根入れ長 600mm の場合の波動伝播速度を算定すると 835m/s となり、気中における伝播速度 800m/s の 1.04 倍程度であることが分かる。

一方、実際の杭の IT においても、杭の根入れ長が大きくなると伝播速度は若干速くなることが報告されている<sup>2)</sup>。したがって、地盤拘束等の影響を受けない気中で

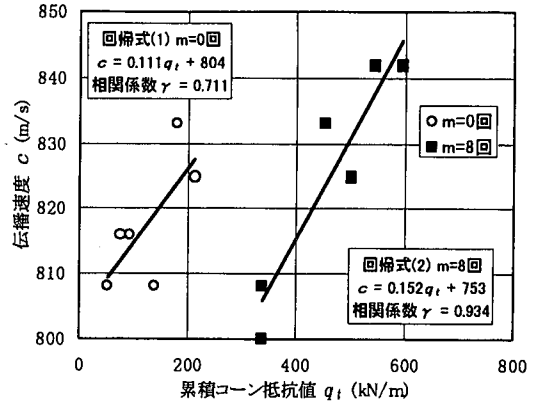


図-13 累積コーン抵抗値と伝播速度の関係

の応力波伝播速度  $c_2$  を用いて杭長を推定した場合、数% のオーダーで杭長を過小評価する可能性があることを示唆している。

#### b) 地盤強度の影響

各実験ケース毎に IT を実施した後、地盤の強度を把握するためにコーンペネトロメータによりコーン抵抗値を測定した。実測したコーン抵抗値と伝播速度の関係を図-12 に示す。コーン抵抗値が大きくなると伝播速度も若干大きくなる傾向はみられるが、明瞭な相関とはいえない。これは人工地盤を作製しながら IT を行っていることから、土被り厚の影響を考慮していないために生じているものと考えられる。そこで、土被り厚の影響を考察するために、1層地盤 (Case-1, Case-2) における突固め回数 0 回と 8 回のデータに着目して、実測したコーン抵抗値を用いて、各実験ケース毎にテフロン杭の根入れ部の累積コーン抵抗値 (コーン抵抗値を根入れ深さで積分した値) を求め、IT により推定した伝播速度との関係を比較した。その結果を図-13 に示す。データ数は少ないが、両者とも比較的良好な相関性が認められ、突固め回数 0 回、8 回の場合の相関係数  $\gamma$  は 0.711, 0.934 である。突固め回数が 0 回の場合には、8 回の場合と比較するとやや相関性が低いのが、これは 0 回の場合には自由落下法で地盤を作製しているため、強度にバラツキが生じているためと考えられる。また、図-13 から突固め回数 0 回と 8 回の相対的な強度の相違に着目して、伝播速度の変化を見ると以下の傾向が把握できる。

- ① 累積コーン抵抗値が大きいほど、伝播速度の増加は大きくなる。
- ② 突固め回数が 0 回と 8 回では、累積コーン抵抗値に着目すれば強度差に対応した 2 つのグループに分かれるが、伝播速度に着目すれば突固め回数の差による相対的な強度差を反映した分布を示すというより、同一の突固め回数では累積コーン抵抗値の影響を強く受けた分布を示す。

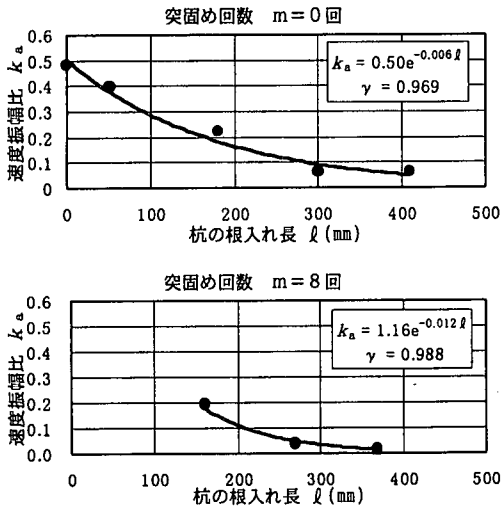


図-14 根入れ長と速度振幅比の関係

表-3 根入れ長と速度振幅比

突固め回数	回帰式	相関係数: $\gamma$
m = 0回	$k_a = 0.50 e^{-0.006 l}$	0.969
m = 8回	$k_a = 1.16 e^{-0.012 l}$	0.988

ここに、 $k_a$ は速度振幅比、 $l$ は根入れ長を表す。

上記のことから、伝播速度は地盤強度の大きさの影響を受けるが、地盤拘束を受けて伝播速度が速くなる現象は、今回の実験ではコーン抵抗値そのものより累積コーン抵抗値、つまり根入れ長の影響の方が大きいものといえる。

### (2)地盤抵抗が速度振幅に及ぼす影響

図-8 および図-9 から明らかなように、テフロン杭の地中への根入れ長が大きくなるに従い、杭先端からの反射波の振幅が小さくなり、400mm程度根入れされると判別できなくなる。ここで、0.002sに現れる杭先端の反射波において、波形が下向きに変化する地点と反射波の最底部との速度比の差を反射波の振幅とし、入力波の振幅を1としたときの反射波の振幅との比率(速度振幅比と呼ぶ)を求め、根入れ長と速度振幅比の関係を示したものが図-14である。図-14において、上段は突固め回数が0回、下段は突固め回数が8回で作製した人工地盤での測定結果である。速度振幅は、地盤強度が高いほど減衰が大きいことが確認できる。また、速度振幅比の減衰は指数関数が最も相関性が高く近似でき、根入れ長と速度振幅比との回帰式ならびに相関係数を表-3に示す。この波動の減衰については、文献3)では地震の影響を受けた基礎杭の実測データに基づき、杭の根入れ長と速度減衰の関係を双曲線で近似できることを報告している。この両者の相違は、前述したようにテフロン杭と実杭では使用するハンマーの違いによる入力エネルギー

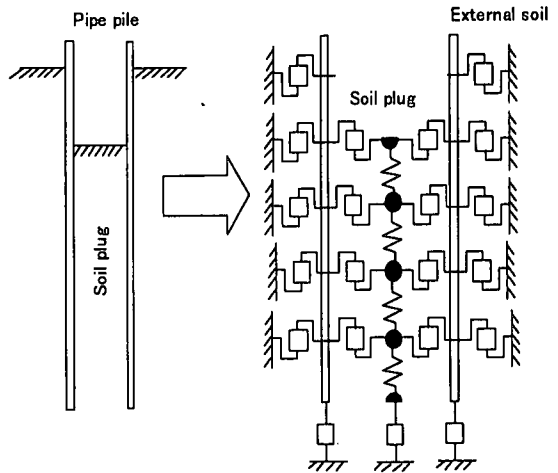


図-15 KWAVEにおける杭と地盤のモデル化

の大きさに起因するものと推察される。さらに6章で示す実杭の根入れ長を文献3)の近似式に適用した減衰の大きさと、実測波形における減衰とを比較すると、文献3)の近似式での減衰は実測波形の1/10程度と小さいことが確認される。これは文献3)は前述したように地震の影響で被災した杭を対象としているため、杭体が発生しているクラック等の影響で減衰が大きいものと考えられる。

したがって、減衰した速度振幅は表-3における回帰式の逆数を地盤面以深の測定データに乗じることにより増幅する方法が採られるが、増幅の仕方は今回の実験結果からも分かるように地盤の強度により違いが生じる。単一地盤であれば、地盤強度に基づき増幅方法を設定できる可能性はあるが、現実的には多層系地盤に根入れされている杭が大半であるため難しく、経験的な判断で行っているのが現状といえる。今後、杭体の形状推定のように反射波の大きさを定量的に把握する必要がある場合、実地盤の特性と実測波形の速度振幅の減衰に関するデータ収集が必要である。

### (3)地盤抵抗が波形変化に及ぼす影響

地中に根入れされたテフロン杭を伝播する波動は、根入れが始まる地盤面を境にして入力波と反対の向きに盛り上がり、蒲鉾形の波形を呈することが確認できる。これは前述したように、周面摩擦による圧縮の応力波が発生するためである。一般に、上下2層間に相対的な強度差があると、その境界面で反射波が発生することが知られている。ところが、今回のテフロン杭を用いた実験では、土層の境界面では明瞭な反射波を確認することはできなかった。この原因としては、図-4に示したコーン抵抗値の分布から判るように、層境上下における相対的な強度差が小さいことが考えられる。



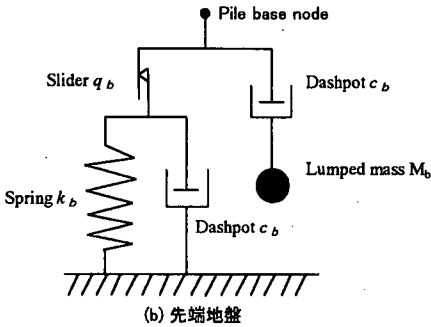
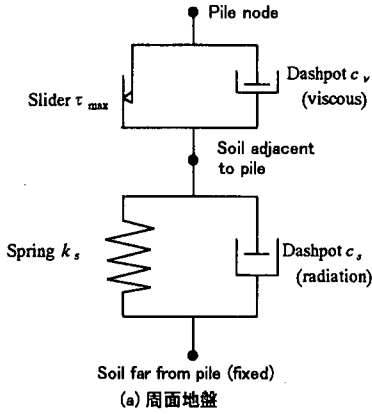


図-16 KWAVEにおける地盤モデル

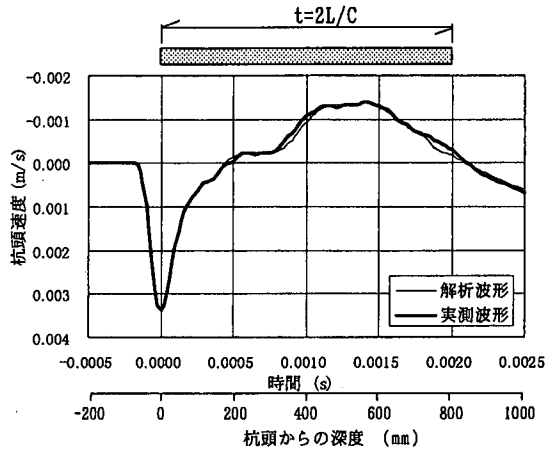


図-17 実測波形にマッチングさせた解析波形

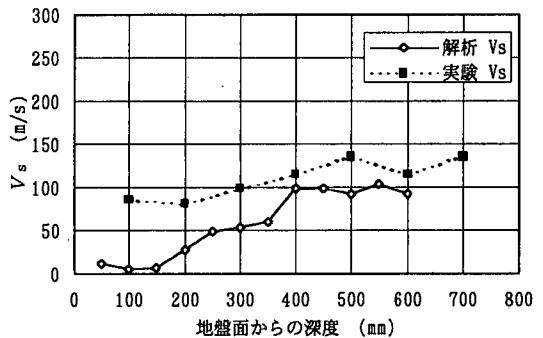


図-18 実験 Vs と解析 Vs の比較例

## 5. 一次元波動解析

### (1) 波動解析プログラムの概要

#### a) 杭と地盤のモデル化

I Tの波動解析には、著者の一人が開発した波動解析プログラム(以下、KWAVE<sup>8)</sup>と呼ぶ)を用いた。KWAVEにおける杭と地盤のモデルを図-15に示す。このモデルは鋼管杭における杭と地盤モデルである。杭は連続体、管内土はバネと質点でモデル化し、杭の節点には地盤抵抗を作用させる。杭中の応力波伝播は一次元波動理論に基づく特性曲線法を利用し、管内土の応力波伝播はSmith(スミス)法で計算する。また、杭頭の応力の境界条件として、動的測定シグナルから得られる下降応力波を与える。本論文のI Tでは、中実杭を用いているため、管内土は考慮していない。

#### b) 地盤モデル

KWAVEにおける地盤モデルはRandolph(ランドルフ)らによって提案されているモデル<sup>9)</sup>を用いた(図-16参照)。図において、スライダは最大せん断応力 $\tau_{max}$ を表し、上部のダッシュポットは、杭と杭周辺地盤との相対速度による粘性減衰 $c_v$ を表す。また、下部のダッシュポットは地盤の逸散減衰 $c_r$ を表す。このモデルでは、バネ定数と逸散減衰定数を地盤パラメータ(せん断弾性係数 $G$ とポアソン比 $\nu$ )と杭直径 $d$ からある程度理論

的に推定することが可能である。

一方、I Tの解析では打撃力が非常に小さく、スライダのすべりが発生しないため、スライダ $\tau_{max}$ および粘性減衰 $c_v$ の値の仮定は必要ない。そこで、解析に必要な地盤定数は、杭周面に関してはRandolph(ランドルフ)ら<sup>10)</sup>が提案している式(9a)(9b)により、また、杭先端に関してはLysmer(ライズマー)ら<sup>11)</sup>が提案している式(9c)(9d)により求めた。

$$\langle \text{杭周面} \rangle \quad k_s = \frac{2.75 G}{\pi d} \quad (9a)$$

$$c_r = G/V_s \quad (9b)$$

$$\langle \text{杭先端} \rangle \quad k_b = \frac{8 G}{\pi d(1-\nu)} \quad (9c)$$

$$c_b = \frac{3.4 G}{\pi(1-\nu)V_s} \quad (9d)$$

ここに、 $k_s$ : 杭周面の地盤バネ定数、 $c_r$ : 杭周面地盤の逸散減衰定数、 $k_b$ : 杭先端の地盤バネ定数、 $c_b$ :

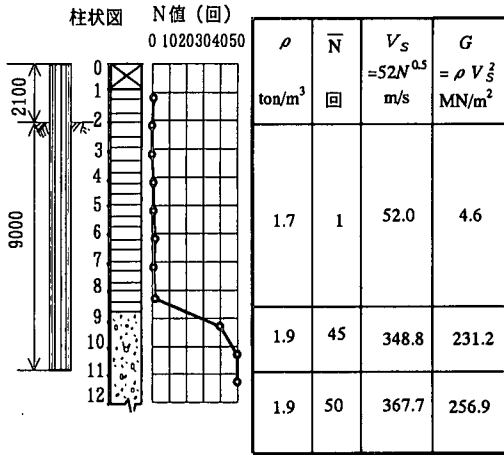


図-19 地盤条件と杭諸元

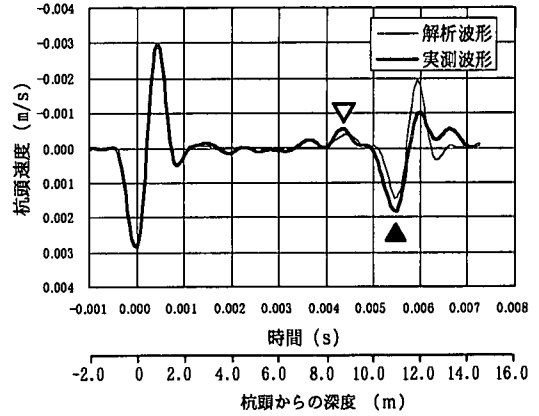


図-20 実杭における解析波形と実測波形

杭先端地盤の減衰定数,  $G$ :せん断弾性係数,  $d$ :杭直径,  $\nu$ :ポアソン比,  $V_s$ :地盤のS波速度である。

## (2) KWAVEによる波形マッチング

地盤のバネ定数や減衰定数を仮定し、繰返し計算により波動解析による計算波形を実測波形にマッチングさせた。テフロン杭の根入れ部を50mm間隔で、12個のエレメントに分割し、杭頭部から順次、せん断弾性係数を仮定して計算波形を求め、計算波形が実測波形に一致したと考えられるまで繰返し計算を行った。計算波形が実測波形にマッチングするまでの計算回数は、各エレメント当たり3~5回程度であった。計算波形と実測波形を比較したものを図-17に示す。これは実験Case-6(3層地盤  $m=8/0/40$ )における検討結果である。この解析計算上仮定したせん断弾性係数から地盤の  $V_s$  を算定し(以下、解析  $V_s$  と呼ぶ)、実験により得られた層厚100mm毎の地盤の  $V_p$  から  $V_s$  を求めたもの(以下、実験  $V_s$  と呼ぶ)を比較したものが図-18である。解析  $V_s$  の方が若干小さな値を示すが、両者は概ねオーダー的には一致した結果といえる。

このように波動解析による計算波形を実測波形に忠実にマッチングさせることにより、杭周辺地盤の条件が不明な場合でも、弾性係数やせん断弾性係数等が推定できる可能性を示唆している。

## 6. 実杭における実測波形への適用

5章では模型杭を対象に実施したIT実測波形に、マッチングした計算波形を求める波動解析手法を適用することにより、杭周辺地盤の地盤定数推定の可能性を示した。ここでは、土質調査結果から得られた地盤定数をKWAVEに適用し、計算により求めた解析波形と実測波形とを比較することにより、実杭に対する解析手法適用

の妥当性を検証する。ただし、前述したように杭の半径方向のひずみを完全に拘束した場合でも、杭の伝播速度は16%しか増加せず、実際の杭では数%にとどまる。そこで、深さ方向の地盤拘束の程度の相違による影響は小さく、実測データにはそれらの影響が含まれているため、実杭の解析では杭体の伝播速度は実測データから  $c=2L/t$  ( $c$ :伝播速度,  $L$ :杭長,  $t$ :打撃波が杭を1往復する時間)により求めた平均的な伝播速度4000m/sを用いることとした。また、実杭の解析では杭の要素長を実測サンプリングタイム( $4.48 \times 10^{-5}$ s)と伝播速度4000m/sから0.18mとした。

対象とした地盤は比較的シンプルな2層地盤で、図-19に地盤条件および杭諸元を示した。地盤調査結果は  $M$  値のみであるため、地盤の  $V_s$  は各層の平均  $M$  値を用いて、今村, 吉村<sup>12)</sup>が提案している  $V_s = 52N^{0.5}$  (m/s)により算定した。計算により求めた地盤定数を図-19に併記した。これらの地盤定数から推定した地盤のバネ定数と減衰定数を用いて波動解析により計算した解析波形と実測波形を比較したものを図-20に示す。横軸は時間軸とし、併せて時間に波動伝播速度4000m/sと1/2とを乗じて、杭頭からの深度に換算して併記している。0.0055s(11m)付近に現れている杭先端からの反射波の振幅の減衰は、テフロン杭の場合と比べると小さいことが判る。これはテフロン杭は実杭に比べて直径が小さく、断面積と周面積の比が小さいため、周面摩擦による速度減少の効果が実杭では小さく現れることに起因しているものと考えられる。この図から明らかのように、土質調査結果に基づく地盤定数を用いて求めた解析波形は、実測波形と比較的良好一致を示していることが判る。このことは詳細な土質調査結果があれば、解析的に実測波形を想定できる可能性を示唆している。また、解析波形における波形の変化状況から判断して、実測波形における杭先端部からの反射波(図中▲印)の手前に見られる入力波と反対の向きの反射波(図中▽印)は、上下地盤に

強度差が見られる土層の境界部からの反射を示すものであると考えられる。

したがって、波動解析法は実杭における波形判定に有効な解析手法であり、この手法を用いることは測定精度の向上に繋がるものといえる。

## 7. 結論

人工地盤にテフロン杭を埋設して行った I T 試験結果から、地盤拘束が測定波形に及ぼす影響として以下の内容を確認した。

- ① 杭の根入れ長が大きくなるほど、波動伝播速度は若干速くなる。
- ② 杭の根入れ長が大きくなるほど、速度振幅は指数関数的に減衰し、地盤の強度が高いほど減衰は大きい。
- ③ 杭が地盤に根入れされた深度から、入力波と反対向きに蒲鉾型の波形変化が生じる。

また、波動解析により実測波形にマッチングさせた計算波形を求め、その計算上仮定した地盤のパネ定数から逆算した地盤の  $V_p$  は、実測した地盤の  $V_p$  から算定した  $V_p$  と概ねオーダー的に一致することを確認した。そこで、比較的シンプルな地盤での実杭を対象とした実測波形と、標準貫入試験で得られた  $N$  値を用いて地盤パラメータを設定し、波動解析によって求めた計算波形とは、比較的一致した結果が得られた。したがって、土質調査から得られる地盤定数の推定精度が向上すれば、さらに解析精度も向上するものと考えられる。こうした観点から、土質調査法としては原位置で連続したデータが得られるコーン貫入試験は一つの有効な方法であると考えられる。最近ではコーン貫入試験を行いながら地盤の  $V_p$  や  $V_s$  が測定できるサイズミックコーンが開発され、原位置での  $S$  波速度  $V_s$  とそれを用いたせん断弾性係数の評価法としての適用性が報告されている<sup>13)</sup>。こうしたコーン貫入試験によるデータを用いた解析手法の妥当性の検証は今後の検討課題としたい。

このように実測波形から杭の健全性や損傷の有無を評価する場合、地盤条件を事前に把握し、さらに、土質調査により得られた地盤定数に基づき計算した解析波形と照査することが、波形判断の的確性と推定精度の向上に繋がる要点であるといえる。一方、逆に地盤条件が不明な場合においては、実測波形にマッチングさせた解析波形の計算上の仮定値から地盤を想定することも可能となり、I T の適用性の拡大にも繋がることになる。

I T を実杭に適用し、杭の健全性や損傷確認を行う上で、測定波形が受ける様々な地盤の影響を正しく評価し、杭体自体の応答波形を精度良く判定することが大切である。そのためには I T を適用する場合は、地盤条件

を詳細に把握することが必要不可欠といえる。ところが、古い杭などの調査では、設計図面が無い場合が多く、地盤条件も不明な場合が少なからずある。こうした場合、実測波形に解析波形をマッチングさせることによって、計算上仮定した地盤定数から、ある程度地盤条件を推定することが可能となることを実験ならびに実測データから示した。

謝辞：本実験を行うに当たり、立命館大学理工学部土木工学科の福本武明教授にご指導ならびにご教示を賜りましたことに、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団, (財)阪神高速道路管理技術センター: 埋地地盤の橋梁基礎構造物に関する震災調査研究, pp.103-132, 1996.
- 2) 塚田幸広, 市村靖光: インテグリティ試験による場所打ち杭の品質管理法, 土木学会論文集, No.603/III-44, pp.139-146, 1998.
- 3) 松井 保, 南荘 淳, 安田扶律, 仲田慶正, 今田和夫: 非破壊試験による基礎杭損傷調査における解析手法の開発と適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp.261-270, 1998.
- 4) Van Koten, H. and Middendorp, P.: Testing of foundation piles, HERON, Vol.26, No.4, pp.3-9, 1981.
- 5) Van Koten, H., Middendorp, P. and Van Brederode, P.: An analysis of dissipative wave propagation in a pile, Proc. of Int. Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, pp.23-40, 1980.
- 6) 境 友昭, 下坪賢一: 波動理論を応用した杭の形状推定法, 土木技術資料 32-8, pp. 38-43, 1990.
- 7) Timoshenko, S. and Goodier, J.M.: Theory of Elasticity, McGraw-Hill, 2nd Ed., 1951.
- 8) Matsumoto, T. and Takei, M.: Effects of soil plug on behaviour of driven pipe piles, Soils & Foundations, JSSMFE, Vol.31, No.2, pp.14-34, 1991.
- 9) Randolph, M.F. and Deeks, A. J.: Dynamic and static soil models for axial pile response, Proc. 4th Int. Conf. Appl. of Stress-Wave Theory to Piles, pp.3-14, 1992.
- 10) Randolph, M. F. and Simons, H. A.: An improved soil model for one dimensional pile driving analysis, Proc. 3rd Int. Conf. On Numerical Method in Offshore Piling, Nantes, pp.1-17, 1986.
- 11) Lysmer, M. and Richard, F. E.: Dynamic response of footing to vertical loading, Jour. Soil Mech. And Found. Div., ASCE, Vol.92, No. SM1, pp.65-91, 1966.
- 12) 今井常雄, 吉村正義: 軟弱地盤における弾性波速度測定の意味, 第4回土質工学研究発表会, pp.101-106, 1969.
- 13) 西田 薫, 高村 透, 中島雅之, 田中洋行, 田中政典: サ

## ESTIMATION FOR THE INFLUENCE OF SOIL-RESTRICTION ON INTEGRITY TEST IN MODEL PILE

Kazuo IMADA, Tatsunori MATSUMOTO and Yoshimasa NAKATA

Measured waves in integrity test for foundation piles are influenced by the soil restriction. Therefore, it is important to grasp the influence of the soil restriction in order to interpret the measured signal. In a laboratory, the influence of soil restriction was estimated by analyzing the waves which were measured by integrity test on the model piles set up in a man-made ground. Moreover, the velocities of shear waves, which were evaluated from matching the analytical wave to the measured wave by KWAVE-method, one of the one dimensional stress wave analysis methods, gave good agreement with the velocity of shear wave which had been obtained directly by the soil investigation. It was confirmed that KWAVE-method can be applied for foundation piles and the characteristics of ground can be estimated by calculating from the deformation modulus assumed by the method of signal matching.