

## 14 杭の衝撃載荷試験システムの開発と実験による検証

### DEVELOPMENT OF A DYNAMIC LOAD TEST SYSTEM ON PILES AND ITS VERIFICATION IN EXPERIMENTS

小嶋英治\*, 桑山晋一\*\*

Eiji KOJIMA, Shinichi KUWAYAMA

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」が発行された。この基準では六つの載荷試験の基準が定められたが、衝撃載荷試験もこのうちの一つである。筆者らは、保有の衝撃載荷試験システムのハードの老朽化のため、ハードおよびソフトの再開発を行った。この開発で、杭打撃時の杭頭付近の軸方向力の乱れや、ハードの精度の検証などが問題になった。また、差分法を用いた波形マッチングソフトを開発したが、入力波を含むシステム全体の検証を行う必要があった。そこで、実大の杭を用いた杭・地盤モデルを用いてこれらの検証を行い、妥当性を確認した。また、一例ずつではあるが、埋込み工法および打込み工法を用いて衝撃載荷試験と押込み試験で求めた荷重 - 変位量曲線とを比較し、両者に良い整合性があることを確認した。

キーワード：鉛直載荷試験、衝撃載荷試験、差分法、入力波、マッチング解析

Method for Static axial load test of single piles, Method for dynamic load test of single piles, Difference method, Input axial tension wave, Signal matching analysis

#### 1. はじめに

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)」<sup>1)</sup>(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。本論文で対象にしている試験は、このうちの衝撃載荷試験である。衝撃載荷試験は、杭に軸方向の衝撃力を加え、解析は一次元波動理論に基づいて解析することを前提とした試験方法である。この解析法に波形マッチング解析があり、杭と地盤をモデル化し、杭先端や周面の静的抵抗などを求めて杭の支持力を算定する。また、マッチング解析法には特性曲線法と差分法があり、両者では入力波の評価方法が異なっている。地盤工学会基準には入力波の評価式が示されているが、明記されていないものの、特性曲線法の評価式である。

1995 年から衝撃載荷試験を行ってきたが、保有の衝撃載荷試験システムのハードが老朽化したため、筆者らはハードおよびソフトの再開発<sup>2-4)</sup>を行った。開発した波形マッチングのソフトには杭の周面および先端の地盤抵抗モデルに Smith モデル<sup>1),5),6)</sup>を用い、解析法には差分法<sup>6)</sup>を採用している。この開発で、以下の三点について解決しなければならぬ検討項目があった。

杭を打撃すると杭頭付近で軸方向力が乱れ、加速度およびひずみが様にならず、どのように測定値を評価すればよいか。

ハードに米国製  $\pm 5,000G$  の加速度計を採用した。納入時に加速度計は較正済みであるが日本では容易に較正ができない。何らかの方法で精度の確認ができないか。開発した差分法のマッチングプログラムの検証を入力波の評価の問題も含めて実験で検証できないか。そこで、筆者らは、実物大の杭を用いた杭周面自由の杭・地盤モデルを作成し、上記の問題を実験により検討した。この結果、杭頭近辺の乱れを修正したデータの評価方法の妥当性、本計測システムの精度の高いこと、開発した差分法のマッチングプログラムシステムの妥当性などを検証した。更に、一例ずつではあるが、埋込み工法と打込み工法の二種類の工法を用いた杭で衝撃載荷試験と押込み試験の荷重 - 変位量曲線を比較し、両者に良い整合性があることを確認した。



4ch 仕様

8ch 仕様

写真 1 衝撃載荷試験計測システム

\* (株)ジオトップ 設計技術本部 技術部 主席技師

Senior Research Engineer, Geotop Design & Engineering Division

\*\* (株)ジオトップ 設計技術本部 基礎設計部 副部長

Vice Manager, Geotop Design & Engineering Division

## 2. ハードの開発

開発した衝撃载荷試験の計測システムを写真1に示す。回路ブロック図は文献2を参照して頂きたい。本システムの開発には、直杭だけでなく節杭にも適用できるように、サンプリングタイムを小さくすることおよび計測システムの多チャンネル化を目指した。すなわち、AD変換は1ch当たり、分解能12bit、サンプリングタイム $15\mu\text{sec} \sim 8\text{msec}$ 、データ個数65,536以内である。

本ハードシステムはコントローラにパソコン(写真1参照)を使用しており、センサーの感度のバラツキは、チャンネルごとに較正值で補正できるシステムである。加速度計およびゲージには較正值が添付されており、基本的には、計測器自体におけるチャンネル間でのばらつきは生じない。また、ひずみゲージは使い捨てであり、ユーザーはゲージを長期にわたりストックしない。ところが加速度計は長期間使用する。その場合、加速度計の再較正をどうするかが開発当初から問題となった。その理由は、 $\pm 5,000\text{G}$ の米国製の加速度計を採用したため、較正に時間と経費が掛かるからである。そこで、本システムの加速度計とアンプの一部を、較正された別系統の加速度計測システムとに切替えることで、本加速度計システムの較正が容易にできるように設計<sup>2)</sup>した。

## 3. 加速度・ひずみの基礎的実験

衝撃载荷試験では杭頭付近の加速度、ひずみを測定し、支持力を推定するわけであるが、杭頭付近では加速度・ひずみが杭周囲で一様に分布していないことが判っている。特にひずみの乱れは著しい。これは打撃直下の杭頭付近の軸方向力が乱れるためである。地盤工学会基準では、「杭頭付近にセンサーを取り付ける場合には、原則として杭頭から杭径の1.5倍以上離れた軸対称となる2箇所に設置する」こと、また適切な測定波形の条件として、「軸対称に測定した同種波形の形状が相似であること」と明記されている。しかし、1.5倍以上離れたとしても、筆者らは、加速度は同一杭周囲でほぼ同一波形になるが、偏打しないように十分に気をつけても、ひずみは等しくならず、逆位相、あるいは相似性の崩れなどを経験している。また、杭のP波の伝播速度は、地盤工学会基準では、「コンクリート系の杭で $4,000\text{m/s}$ 程度の値を用いることが多い」とあるが、筆者らは $4,000\text{m/s}$ 程度ではマッチング解析が困難なことを経験している。そこで、以上の点の確認と対策のために、実大の杭を用いて確認実験を行った。

### 3.1 実験概要

実際の衝撃载荷試験時の杭・地盤では、波動は複雑な透過・反射・減衰が生じる。本実験の目的は、ハードおよびソフトの妥当性の確認と測定データの評価方法の検討にある。そこで、実験に用いた杭・地盤のモデルは、図1のようなシンプルな波動伝播をイメージし、図2に示す杭・地盤系のモデルを作成した。ただし、図2の右側の、杭先端にゴムを敷いたモデルは、5章のマッチング解析の妥当性を確認するためのもので、紙面の都合、ここに記載した。

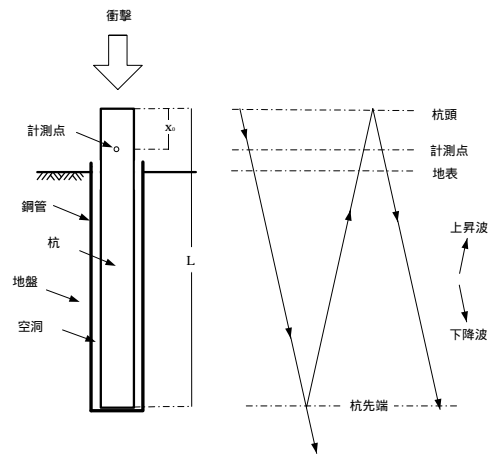


図1 シンプルな実験モデルにおける軸方向力の波動イメージ

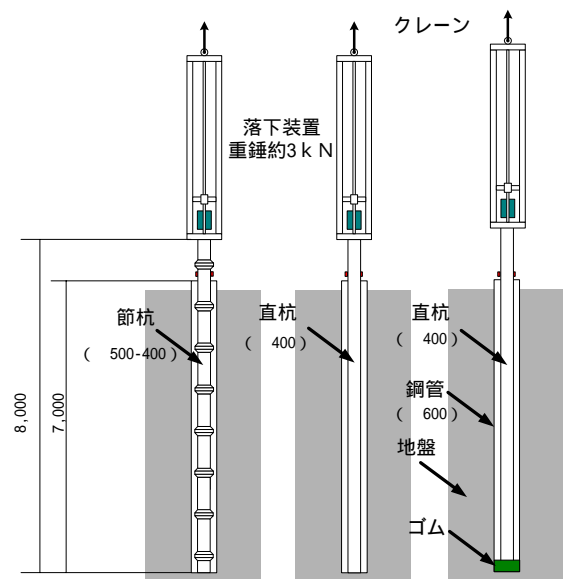


図2 実験に用いた杭・地盤モデル

以下に実験に用いた杭・地盤系のモデルの概要を示す。  
 杭種：節杭 500-400 ( 400 の直杭に 1 m ピッチで直径 500mm の節付き杭 ) および直杭 ( 400 ) の二種類の杭で、杭長および杭断面は両杭とも 8m、 $722.5\text{cm}^2$  である。  
 支持条件：杭に関する基本的なデータ収集を行うために杭の周囲を自由面とした。すなわち、先端を閉鎖した鋼管 ( 600 ) をソイルセメント埋込み工法で打設し、その鋼管の中に試験杭を立て込んだ。鋼管の支持地盤は N 値 10 ~ 15 である。  
 衝撃方法：自由落下方式で、重錘は 3kN、落下高さは 800mm とした。  
 測定箇所：測定箇所は、節杭および直杭の両方の杭で測定可能な箇所とし、杭頭からの距離を 400、800、1200mm としたが、本報告では 800mm のデータのみを報告する。なお、他のデータについては、参考文献3を参照して頂きたい。測定点 ch1 ~ 4 は杭周を四分割し、杭周上に沿って番号を付けた。したがって、ch1 と ch3、ch2 と ch4 が軸対称になっている。  
 サンプリングタイム： $15\mu\text{sec}$

### 3.2 実験結果

直杭および節杭の杭頭付近の加速度およびひずみ波形を測定した。図3、4にそれぞれ直杭の加速度波形およびひずみ波形を、図5、6に節杭の加速度波形およびひずみ波形を示す。図3～6とも、上図に杭の円周上四点の波形を、下図に軸対称の二波平均波形（二対）および四波平均波形を示す。下図に示した三組の平均波形はいずれもほぼ一致し、見分けがつかない。

直杭では、おのこの加速度波形のピーク値は約3%のばらつきがあったが、軸対称四波の平均を基準とした場合の二組の二波の平均のばらつきは±0.2%以内に収まった。同様に、ひずみ波形では、逆位相のものもあったが、軸対称四波の平均を基準とした場合の二組の二波の平均のばらつきは±0.3%以内であった。節杭についても、直杭と同様に、加速度・ひずみ波形を測定した結果、ほぼ同様な結果であった。すなわち、杭周面の加速度波形は杭周面のどの位置でもほぼ安定した波形が得られ、ひずみ波形は杭周面の四点では異なったひずみ波形を示すが、加速度およびひずみとも、軸対称で測定した平均波形は安定して同一であった。このことから、加速度およびひずみ間のばらつきは、杭自体がそのように振動していたため、計測器自体のばらつきはなかったと推定する。以上の知見から、筆者らは、杭周面上を等しく四分割して測定点とし、二組の軸対称二点平均波と四点平均波を比較し、軸対称の平均の加速度およびひずみが杭周面で安定していることを確認<sup>3)</sup>して衝撃載荷試験を行うことを基本としている。

本実験では、杭周面を自由面とするため、杭を鋼管に建て込んで衝撃載荷試験を行っている。このため、衝撃載荷試験時に杭の浮き上がる現象が生じている。加速度波形で見ると、波のピーク値の間隔が、途中から半分になっている箇所（矢印で明示）がある。図3の直杭では5波以降で、図5の節杭では6波以降である。これは、杭先端が打撃により押さえつけられ、その後浮き上がりにより支持条件に変化（以下、浮き上がりと呼ぶ）が生じたためと推定する。図3の直杭、図5の節杭の加速度波形の後半部分を用いて、杭を10往復する時間から伝播速度を求めた。杭によってもばらつきがあるが、ここで示した実験の杭では、直杭が4,636m/s、節杭が4,742m/sであった。求めたP波の伝播速度が妥当であるかどうかは、この実験だけでは結論が出ない。そこで、計測システム全体の精度も含め、5章で若干の解析を行い考察する。

### 4. 波形マッチングのソフト開発

図7に杭の微小領域 $\delta x$ におけるつり合いのモデルを示す。杭の微小領域のつり合いから次式を得る。

$$\rho \cdot A \cdot \delta x \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = F_1 - F_2 - f_r \cdot \delta x - q \cdot \delta x \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ 、 $A$ は杭の密度と断面積で、 $F_1$ および $F_2$ は微小領域の境界部に作用する力であり、 $f_r$ および $q$ は杭

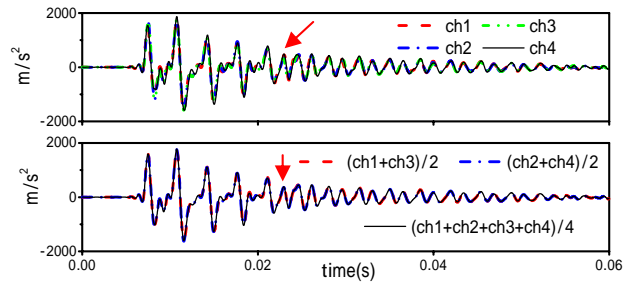


図3 直杭の加速度波形

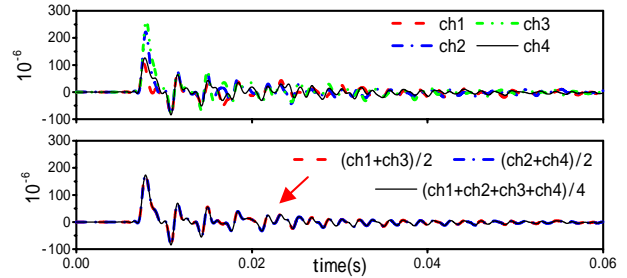


図4 直杭のひずみ波形

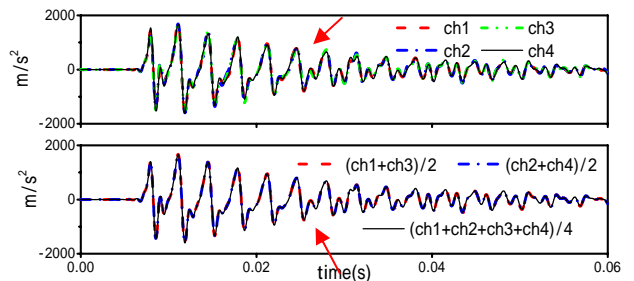


図5 節杭の加速度波形

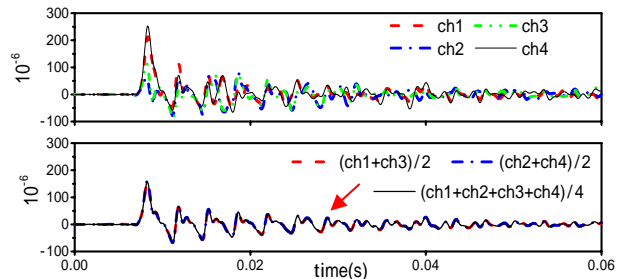


図6 節杭のひずみ波形

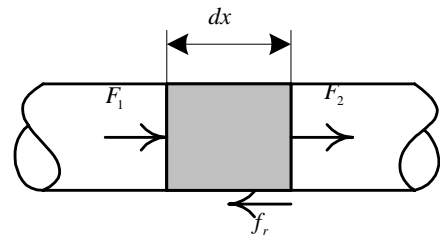


図7 杭における微小領域の釣合い

の単位長さ当たりの、地盤抵抗および粘性抵抗である。また、 $u$ 、 $x$ 、 $t$ は杭の軸方向の変位振幅、杭の軸方向の座標および時間である。杭の微小領域の $\delta x$ を充分小さくすれば、次式を得る。

$$F_2 = F_1 - A \cdot E \cdot \delta x \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

(1)、(2)式より次式を得る。

$$\rho \cdot A \cdot \delta x \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + A \cdot E \delta x \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + f_r \cdot \delta x + q \cdot \delta x \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $E$  は杭のヤング係数(3.92MN/cm<sup>2</sup>)であり、圧縮方向を正とした。開発したマッチング解析プログラムは、杭の周面および先端の地盤抵抗モデルに Smith モデル<sup>1),5),6)</sup>を採用し、(3)式の偏微分方程式を差分法で解いている。図8に杭・地盤におけるモデルを、図9に Smith の力学モデルを示す。

衝撃載荷試験の波形マッチング解析には、特性曲線法を用いる方法と差分法を用いる方法があり、両者では入力波の評価方法および入力位置が異なってくる。地盤工学会基準の入力波  $F_i(t)$  の評価式は同基準に明記されていないが、特性曲線法の入力波の評価式であることは明らかである。特性曲線法の入力位置は測定点の位置とし、入力波の評価式には測定点での下降波を用いれば良い。式で表せば次の通りである。

$$F_i(t) = \frac{1}{2} \{F_m(x_0, t) + Z \cdot v_m(x_0, t)\} \quad (4)$$

$$Z = A \cdot E / c = A \cdot c \cdot \rho \quad (5)$$

ここで、 $F_m(x_0, t)$ 、 $v_m(x_0, t)$  は、測定したひずみおよび加速度から求めた、測定点の軸方向力と速度

(粒子速度)の時刻歴  $\times Z$  である。また、 $Z$  は杭体の機械インピーダンスであり、 $c$  は杭の P 波の伝播速度である。なお、加速度から速度の変換は数値積分による。また、添え字の  $m$  は測定から求めたことを意味する添え字として用いた。ただし、(4)式は差分法の入力波の評価式には適用できない。そこで差分法に用いるべき入力波の評価方法を考察する。

杭頭のつり合いは次式で表される。

$$A \cdot E \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = F_i(t) \quad (6)$$

ここで、 $F_i(t)$  は杭頭の入力波すなわち打撃力である。ところが  $F_i(t)$  は杭頭の軸方向力  $F_m(0, t)$  と等しい。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いからである。そこで、 $F_m(0, t)$  を直接測定し、 $F_i(t) = F_m(0, t)$  とできれば問題はないのであるが、 $F_m(0, t)$  を直接測定することができない。この理由は、前述した通り、杭頭の軸方向力が乱れているためである。

実際に使用されている杭は杭径に比べ非常に長い。そこで、工学的に判断し、杭頭から離れた測定点のひずみから求められた軸方向力を入力波として評価する方法も

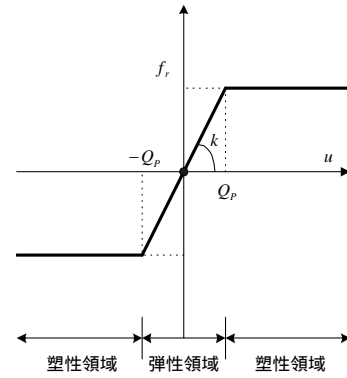


図9 Smith の力学モデル

ある。式で表せば次式となる。

$$F_i(t) = F_m(x_0, t) \quad (7)$$

3章で、杭頭から離れた同一円周上の四測定点のデータから、応力の乱れていないデータが評価できたのかどうかの確認を行っているが、応力の乱れないデータを評価できれば、杭頭の軸方向力を求めることは容易である。すなわち、杭頭から  $x_0$  離れた測定点の軸方向力を下降波・上昇波に分離し、分離した波を杭頭に戻して杭頭の軸方向力を求め、それを入力波と評価すればよい。式で表せば以下の通りである。

$$F_i(t) = F(0, t) = F_d(0, t) + F_u(0, t) = F_d(x_0, t + t_0) + F_u(x_0, t - t_0) \quad (8)$$

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

ここで、 $t_0 = x_0 / V_L$  ( $V_L$  : P 波の伝播速度) であり、 $F_d(x_0, t + t_0)$ 、 $F_u(x_0, t - t_0)$  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  $F_u(x_0, t)$  を杭頭にもどした波である。

図10に波形マッチング解析プログラムのフロを示す。まず、測定データから杭における軸方向力の下降波  $F_d(x_0, t)$  ・ 上昇波  $F_u(x_0, t)$  を分離する。

$$\text{下降波: } F_d(x_0, t) = \frac{1}{2} \{F_m(x_0, t) + Z \cdot v_m(x_0, t)\} \quad (9)$$

$$\text{上昇波: } F_u(x_0, t) = \frac{1}{2} \{F_m(x_0, t) - Z \cdot v_m(x_0, t)\} \quad (10)$$

(9)、(10)式は参考文献5では下降波・上昇波、参考文献6では進行波・後退波、地盤工学会基準<sup>1)</sup>および参考文献7では入力波・反射波としている。本論文は参考文献5に倣った。)

次に、杭頭の軸方向力の下降波  $F_d(0, t)$  ・ 上昇波  $F_u(0, t)$  を求め、更に入力波  $F_i(t)$  を評価する。以上が、マッチングする  $F_u(0, t)$  と入力波  $F_i(t)$  の算出である。

波形マッチングプログラムフローのマッチング解析部分 ( $i$  を 1 から  $n+1$  まで繰り返している部分) は、基本的には地盤工学会基準に記載してあるものと同じであるので簡略化して図10に示した。杭の断面積、密度、長さ、伝播速度は既知であり、マッチングで同定するのは、杭周面および杭先端の、抵抗および減衰である。杭の機械インピーダンスおよび杭周面の抵抗・減衰などと同じと



仮定できる単位で杭を分割する。この分割には地盤柱状図および求めた  $F_u(x_0, t)$  などを参考にすると良い。杭周面における抵抗および減衰の同定は、杭頭から順次行うものとする。初めに、分割した杭頭の要素の、杭の周面の抵抗および減衰を全て零とし、順次杭頭から分割した杭周面の抵抗および減衰を仮定し、入力波に  $F_i(t)$  を用いて差分解析を行い、杭頭の計算変位  $u(x, t)$  を求める。次に  $u(x, t)$  から杭頭の計算  $F'(0, t)$ 、 $v'(0, t)$  を求める。更に、軸方向力の上昇波  $F'_u(0, t)$  (計算軸方向力の上昇波と称す) を求め、測定から求めた  $F_u(0, t)$  と比較する。 $F'_u(0, t)$  と  $F_u(0, t)$  との合致が悪ければ、再度諸元を仮定しマッチングをやり直す。二波が合致すれば、杭周面の諸元が同定できたとして、次にその下の分割した杭周面の諸元を同定する。最後に杭先端の諸元を同定し、マッチングを終了する。ここで、波形マッチングに上昇波を用いるのは、上昇波に杭の抵抗および減衰の情報が含まれているからである。

### 5. 計測システムおよび波形マッチングソフトの妥当性の検討

3章では四測定点から軸対称の平均で評価した杭頭の軸方向力の乱れの補正方法が妥当であるかを検証した。この結果、本計測システムにおける加速度およびひずみの各チャンネル間のばらつきの小さいことが推定できた。ひずみゲージの較正は容易(ゲージにゲージファクターが添付されている)で、加速度計についてはメーカーからの較正值を用いれば良い。しかし、較正してから月日の経た場合の加速度計の較正は必要で、前述したように別系統の較正された加速度システムを本システムに組み込むように設計した。しかし、容易に計測器の精度をチェックできる方法があれば大変便利である。そこで、本章では衝撃載荷試験を用いて加速度から求めた速度の誤差を調べる方法を試みる。また、4章で述べた、入力波の評価方法を含む、差分法の波形マッチングの妥当性の確認を行った。以上の確認に3章の実験データを用いた。ただし、重錘の高さを一定にし、実験ごとに打撃の中心を杭芯に合わせて実験を行ったが、杭の浮き上がる時間に若干のばらつきなどが生じることがある。そこで、この章で用いたデータは、浮き上がりの遅いデータを使用した。また、波形マッチングの確認には、直杭の周面自由杭の先端にゴムを敷いた実験のデータを用いた。このゴム挿入の実験は、他の実験と同じ条件であるが、錘落下高さが 900mm であることおよび測定点が杭頭から 900mm であることの二点が異なっている。また、使用したゴムの剛性を把握するために押し込み試験を行った。この結果は図 11 に示す。

図 12 に、直杭における自由杭の衝撃載荷試験の軸方向力と波形マッチング結果を示す。図 12(a)が測定したひずみから求めた測定点の軸方向力(平均)である。差分法では工学的に判断し、入力波(7式)として用いる場合がある。図 12(b)が測定した加速度から求めた測定波  $Z \cdot v_m(x_0, t)$  (平均)である。図 12(c)が測定点の軸方向力

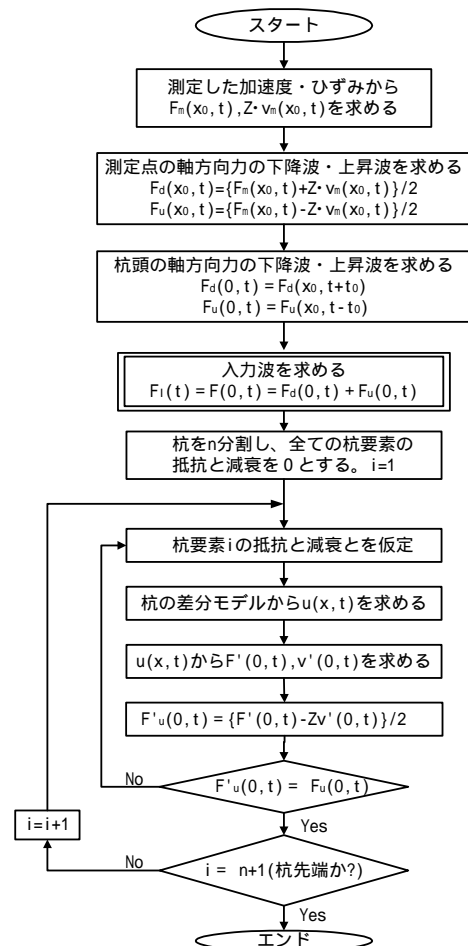


図 10 波形マッチング解析プログラムのフロー

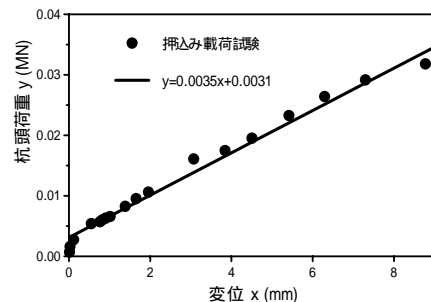


図 11 ゴムの押し込み載荷試験

の下降波で、特性曲線法の入力波(4式)である。図 12(d)が測定点の軸方向力の上昇波である。図 12(e)が(8式)で評価した入力波である。図 12(f)が、測定波から求めた杭頭の上昇波(直線、図 12(d)と同じ波)と(8式)で評価した入力波を用いてマッチングした杭頭の上昇波(点線)である。本実験が杭周面自由の実験であるため、上昇波は杭先端からの反射がなく、図中の下降波と上昇波を比較すると、下降波の第一波にあたるものが上昇波ではほぼ零である。別の観点から考察すると、 $F_m(x_0, t)$  と  $Z \cdot v_m(x_0, t)$  の第一波が一致しているからで、 $F_m(x_0, t)$  および  $Z \cdot v_m(x_0, t)$  の第一波がそれぞれ  $F_d(x_0, t)$  および  $Z \cdot v_d(x_0, t)$  であること、かつ、 $F_m(x_0, t)$  と  $Z \cdot v_m(x_0, t)$  の下降波と上昇波には、

$$F_d(x_0, t) = Z \cdot v_d(x_0, t) \quad (11)$$

$$F_u(x_0, t) = -Z \cdot v_u(x_0, t) \quad (12)$$

の関係のあることから、加速度を積分した速度の誤差の推定が行なえる。 $F_m(x_0, t)$ および $Z \cdot v_m(x_0, t)$ の第一波の最大値が、0.664MN、0.656MNであり、この結果、速度の誤差は約1%程度で、加速度の誤差も同程度と推定できる。また、(11)式の両辺を $Z$ で除せば次式となる。

$$c \cdot \varepsilon_d(x_0, t) = v_d(x_0, t) \quad (13)$$

ここに $\varepsilon_d(x_0, t)$ 、 $v_d(x_0, t)$ はひずみおよび速度の下降波で、上記の誤差は伝播速度を含めた誤差であり、3章で求めた伝播速度 $c$ の精度の良いことが判る。

また、下降波、上昇波を考察すると、杭の入力波が下降波 d1 となり、d1 が杭先端に伝播し位相を反転させて上昇波 u1 となり、杭頭でさらに位相を反転させ下降波 d2 となることが確認される。この d1 と入力波の I を比較すると、(8)式で評価した入力波が妥当であることが確認できる。直杭に用いたマッチングの諸元は、杭については、弾性係数 3.92MN/cm<sup>2</sup>、周面耐力 0.0MN、杭周面の減衰 0.8%/m で、杭の先端については、弾性範囲のみとして初期剛性 0.01MN/mm とし、減衰 6.4%とした。ただし、減衰は杭の単位長さ当たりの機械インピーダンス比で表し、伝播速度は実測で用いた値を使用した。

図 13 に節杭における自由杭の衝撃载荷試験の軸方向力と波形マッチング結果を示す。図の内容は、図 12 と同じである。節杭の上昇波と下降波の波形の相似性から、節杭のみでは節部で波の反射がほとんど生じていないことが確認できる。節杭に用いたマッチングの諸元は、直杭で用いた諸元と同じ諸元でマッチングした例である。また、 $F_m(x_0, t)$ および $Z \cdot v_m(x_0, t)$ の第一波の最大値を求めると、0.656MN、0.663MNで、この結果速度の誤差は約1%程度で、加速度の誤差も同程度であると推定できる。

図 14 に直杭の先端にゴムを挿入したモデルの衝撃载荷試験の入力波と波形マッチング結果を示す。ただし、図 14(e)は(8)式で評価した入力波であり、図 14(f)は測定波から求めた杭頭の上昇波（実線）とマッチング解析結果の杭頭の上昇波（点線）である。このゴムを挿入したモデルのマッチングの諸元は、直杭と同じ値を用いた。ただし、杭先端の剛性については、図 11 に示す、押込み試験から求めた初期剛性 0.0035MN/mm を用いた。また、杭先端の地盤の減衰は 10%とした。

図 12 ~ 14 における、おのおのの最下図のマッチング結果を見ると、一歩目は良好なマッチングであるが、二歩目、三歩目と少しずつマッチングがずれてくる。これは、図から判る通り、(8)式で評価した入力波に若干の誤差が含まれており、この誤差が繰り返し入力されるために生じたものと推定される。

以上から、本計測システムの精度の良いこと、差分法の波形マッチング解析には(8)式で評価した入力波が妥当なこと、および実験で用いた杭・地盤モデルでは杭先端の剛性は弾性範囲であり、かつ、杭周面自由のモデルでの実験であったが、波形マッチング解析と合致することを確認した。

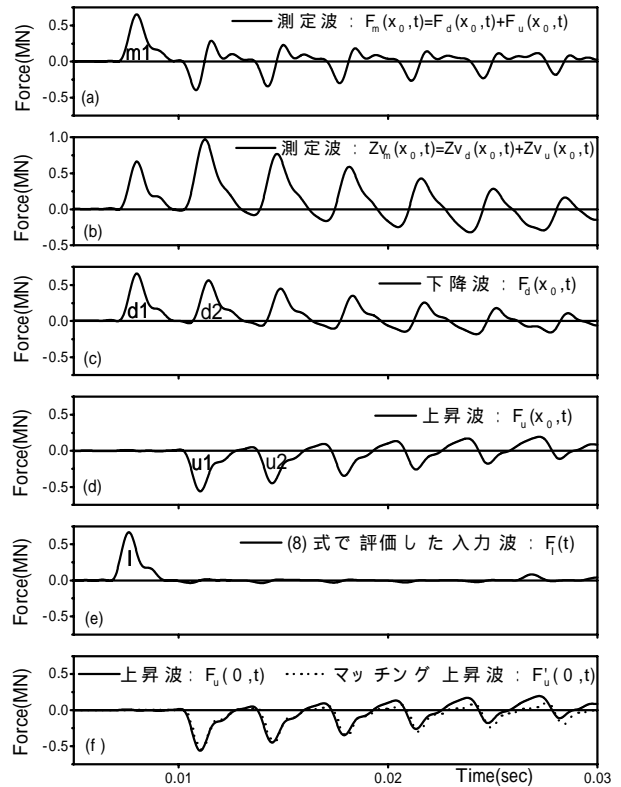


図 12 直杭における衝撃载荷試験の波形マッチング結果

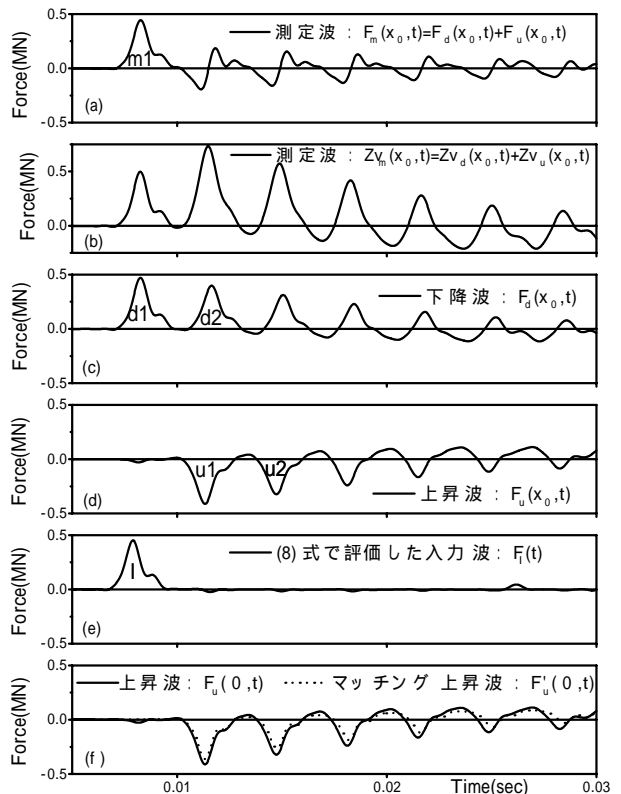


図 13 節杭における衝撃载荷試験の波形マッチング結果

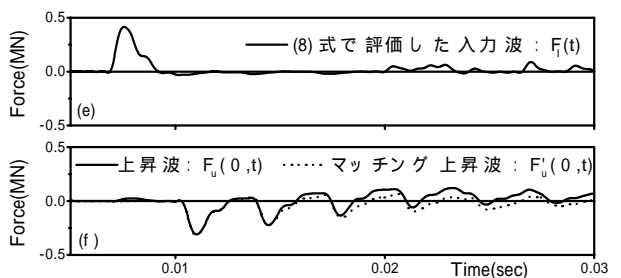


図 14 ゴム挿入の直杭における衝撃载荷試験の波形マッチング結果

## 6. 実杭の衝撃載荷試験例

### 6.1 杭種および施工法

スラグ充填埋込み工法およびスラグ充填打込み工法の二種類の工法について、衝撃載荷試験および押し込み試験を行った<sup>8)</sup>。杭は節杭 440-300 ( 300 の直杭に 1 m ピッチで直径 440mm の節付き杭 ) で、杭長 11m、杭断面積 464.4cm<sup>2</sup>、である。埋込み工法は、オーガーを用いて予め所定深度まで掘削し、排土を行ったのち節杭を入れ、杭の周面に製鋼スラグを特殊ケーシングによって回転させながら充填する工法である。また、打込み工法は油圧ハンマーで打撃しながら杭の周囲に製鋼スラグを充填する工法である。以下、前者および後者の工法の杭を埋込み杭、打込み杭と称す。施工した地盤は、図 15 の地盤柱状図に示す旧埋立て土層である。表層から 3m までは N 値 5 程度の砂層である。また、3 から 5m まではガラを含んだシルト層で、5 から 7m までは砂層で、7m から杭先端までは砂礫層で、これらの 3m から杭頭付近までの N 値は 10 から 15 程度である。押し込み試験は、杭の施工後一ヶ月養生後で行った。試験方法は、4 サイクル 8 段階の多段階方式で行い、埋込み杭が 1,667kN 時に杭頭の変位量 52.67mm、打込み杭が 2,059kN 時に 26.60mm となった。

衝撃載荷試験は、埋込み工法が押し込み試験実施の 7 日後、同様に打込み工法が 10 日後に行った。衝撃荷重は、重さ 20kN の重錘の自由落下方式とし、最大落下高さは埋込み杭 0.8m、打込み杭 1.6m で行った。

### 6.2 衝撃載荷試験と押し込み試験

図 16、17 に、埋込み工法および打込み工法の衝撃載荷試験の入力波とマッチング結果を示す。ただし、重錘の重量は 20kN で、落下高さは、埋込み杭が 80cm、打込み杭が 160cm である。測定点は両方の杭とも杭頭から 30cm 離れた箇所、施工上の関係で測定点が杭頭に非常に近い。そこで、3 章で行った方法を用いて、加速度・ひずみの軸対称の平均値が安定していることを確認して実験を行った。図 16、17 とも、上図が(8)式で求めた入力波で、下図が測定から求めた上昇波と波形マッチング波である。また、杭体の往復の波動伝播時間は、それぞれの波の下に横棒で示した。図 18、19 に埋込み工法、打込み工法の荷重-変位量曲線(測定場所は衝撃載荷試験と同じ)を示す。ただし、衝撃載荷試験の荷重-変位量曲線は、波形マッチング解析のパラメータから荷重伝達法を用いて求めた。図 18 の埋込み杭の衝撃載荷試験と押し込み試験の荷重-変位量曲線は、初期の勾配が押し込み試験結果と良く一致している。図 19 の打込み杭の荷重-変位量曲線では、衝撃載荷試験と押し込み試験の初期勾配は大きく異なっているが、二次勾配は良い一致を示す。初期勾配の違いは、詳細は不明であるが、衝撃載荷試験の波形マッチング結果が表層付近を硬い地層と評価したためである。この二例は、他の実験の関係で衝撃載荷試験方法の打撃力を充分に取るのでできない試験であったが、(8)式の入力波で評価した方法を用いて、押し込み試験の荷重-変位量曲線とよい整合性が得られた。

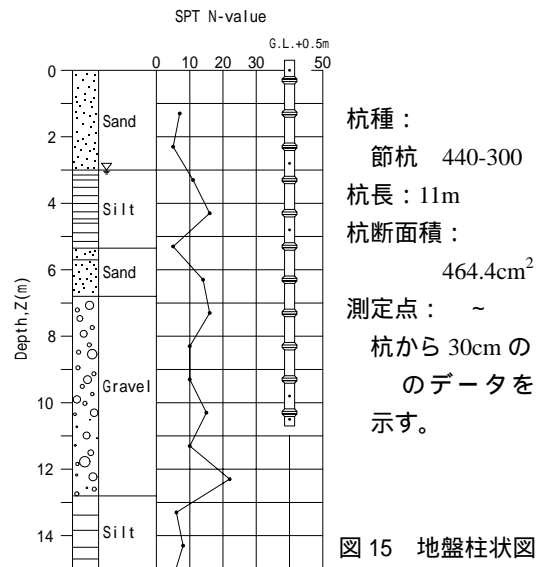


図 15 地盤柱状図

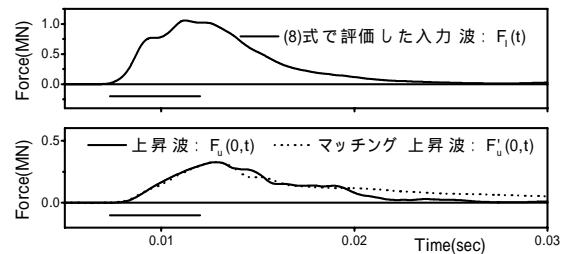


図 16 スラグ充填埋込み工法の入力波とマッチング結果(節杭( 440-300)、11m)

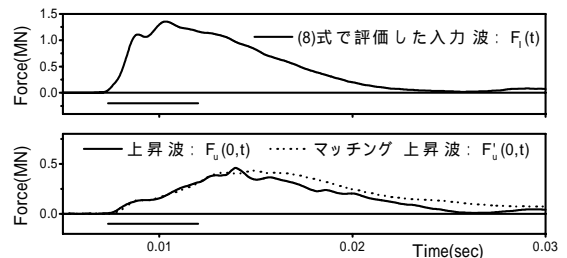


図 17 スラグ充填打込み工法の入力波とマッチング結果(節杭( 440-300)、11m)

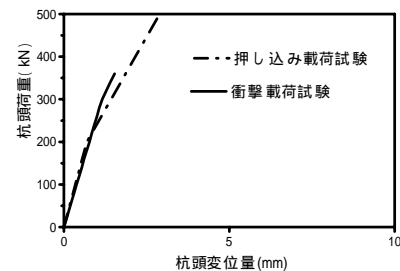


図 18 スラグ充填埋込み工法の荷重-変位量曲線(節杭( 440-300)、11m)

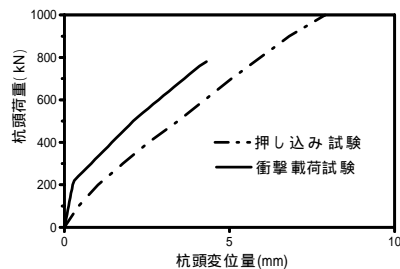


図 19 スラグ充填打込み工法の荷重-変位量曲線(節杭( 440-300)、11m)

## 7. まとめ

筆者らは衝撃載荷試験のハードおよびソフトの再開発を行うに当たり、杭頭で乱れた軸方向力などの評価方法の検討およびハードおよびソフトの検証を行う必要が生じた。本論文は、これらの三点について実大の杭を用いた衝撃載荷試験から検証を行うことを試みたものである。

杭の衝撃載荷試験では打撃時に杭頭の軸方向力が乱れることが知られており、地盤工学会基準では杭頭より杭径の 1.5 倍以上離すことを奨励している。しかし、筆者らは、杭径の 1.5 倍以上離してもひずみは杭周面で一様に分布しないことを経験している。そこで、今回行った杭周上で等分割した四点の測定データを用いて、四波の平均と二組の軸対称の平均を比較することにより軸対称の平均で分布の乱れたデータを修正する方法の妥当性を実験により検証した。なお、本論文で行った実験は、実大の杭を用いた、杭周面自由のシンプルな杭・地盤モデルで行った。

ハードには、加速度計に米国製の  $\pm 5,000G$  を使用している。納入時には較正済みであるが、その後の較正をどのように行うかの問題があった。そこで、本加速度システムを較正済みの別系統の加速度システムと比較できるシステムとした。しかし、容易に加速度計を較正できる方法があれば便利である。そこで、ひずみ計測システムの較正が容易であること、 $F_d(x_0, t)$  と  $Z \cdot v_d(x_0, t)$  とが等しいことを用いて、衝撃載荷試験から本システムの精度の検証を行った。この結果、加速度を積分した速度の誤差は約 1% 程度であることを確認した。以上の結果から本計測システムの精度の良いことが検証できたと考える。

開発した波形マッチングソフトには、杭の周面および先端の力学モデルに Smith モデルを、解析法に差分法を採用した。そこで、差分法における入力波の評価方法を含め波形マッチング解析ソフトの妥当性の検証を行う必要があった。差分法におけるマッチング解析において、杭頭の入力波には、杭頭の軸方向力を用いれば良いことを考察し、差分解析法を用いた場合の入力波について検討した。すなわち、杭頭から離れた測定点のデータを下降波・上昇波に分離し、分離した波から杭頭の軸方向力を逆算し、それを入力波と評価する方法である。この方法の妥当性を杭周面自由、杭先端弾性のシンプルなモデルの衝撃載荷試験から検証した。実験で検証したモデルはシンプルなモデルであるが、複雑なモデルはプログラ

ムのデバックで検証済みであるので、開発した波形マッチング解析法の検証が確認できたと考える。

また、埋込み工法と打込み工法の二種類の工法を用いた杭で、衝撃載荷試験と押込み試験の荷重 - 変位量曲線を比較した。この結果、二種類の工法を用いて、衝撃載荷試験と押込み試験の荷重 - 変位量曲線に良い整合性が得られた。以上の結果から、当初掲げた三点の検討項目が実験から検証できたと考える。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会(2002)：杭鉛直載荷試験方法・同解説
- 2) 小嶋英治・二見智子・本間裕介・桑山晋一・渡辺基弘(2003)：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 システムの再開発)、第 38 回地盤工学研究発表講演集、地盤工学会、pp1923-1924
- 3) 本間裕介・小嶋英治・桑山晋一・二見智子(2003)：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 2 ハードシステムの検討)、第 38 回地盤工学研究発表講演集、地盤工学会、pp1925-1926
- 4) 桑山晋一・小嶋英治・本間裕介(2003)：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 3 波形マッチングの検討)、第 38 回地盤工学研究発表講演集、地盤工学会、pp1927-1928
- 5) 松本樹典(1989)：波動理論の杭への応用における理論的背景、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、土質工学会、pp.7-21.
- 6) 境友昭(1989)：波動理論の基礎 杭打ち解析のプログラム 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、土質工学会、pp.23-33.
- 7) 西村真二(2001)：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講演集、地盤工学会、pp.1645-1646.
- 8) 藪内貞男・西脇醇・平尾幸太郎・吉川那穂・芝本真吾(2003)：各種地盤における鉄鋼スラグを用いた埋込み杭の支持力特性について、(社)日本鉄鋼協会社会鉄鋼学部会スラグ利用プレハブ構造研究会 第2回報告会、pp.33-42.

The authors redeveloped hardware and software for dynamic load test system on piles. Then, the verification of these hardware and software was necessary, and the verification of the large accelerometer system, as well as, the signal matching of an input wave by the difference method was performed. The authors confirmed the validity of the hardware-software by applying them in a soil-pile model, with piles of natural size. Finally, an example displays a comparison between the load-displacement curve obtained from the dynamic load test and the static axial compressive load test for the bored precast pile method and the driving pile method, confirming good compatibility between both.