

DEVELOPMENT OF A DYNAMIC LOAD TEST SYSTEM ON PILES

小嶋 英治 (ジャパンパイル株式会社) 桑山 晋一 (株式会社ジオトップ)

Eiji KOJIMA, Japan Pile Corporation, Shinkawa1-17-18, Chuo-ku, Tokyo
 Shinichi KUWAYAMA, Geotop Corporation, Shinkawa1-16-3, Chuo-ku, Tokyo

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.

Key Words : 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

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(平成14年5月)」が発行された。これには新たな試験方法として、衝撃載荷試験が加えられた。これを受けて、筆者らは杭の鉛直衝撃載荷試験システムを開発した。

ハードの面では、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を多チャンネル化することを目指した。また、加速度計には米国製で、測定範囲±5,000Gのものを使用した。ただし、この加速度計は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が問題であった。そこで、本加速度システムを較正済みである別システムの加速度システムと比較できるシステムとした(Fig.A1参照)。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、実際の衝撃載荷試験から本システムの精度を検証した。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。

ソフトの面では、波形マッチングソフトを開発した。このソフトでは、杭周面・杭先端の地盤抵抗モデルにSmithモデルを用い、解析法には差分法を採用している。そこで、差分法における入力波の評価方法を含め、このソフトの妥当性を実際の衝撃載荷試験から検証した。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、特性曲線法の場合とは異なり、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、杭頭から離れた計測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(Fig.A2参照)。

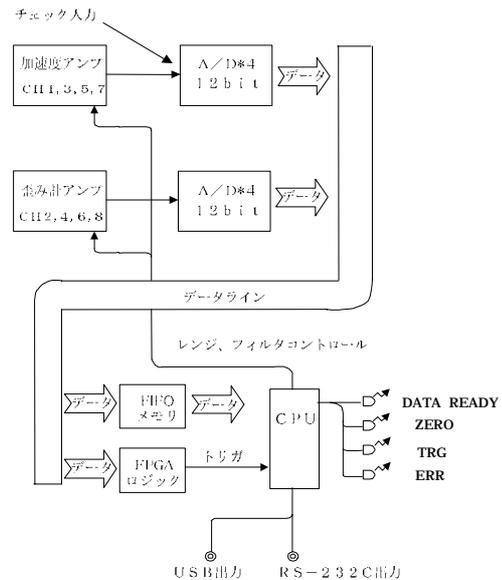


Fig.A1. Mechanism of measurement system for dynamic load test

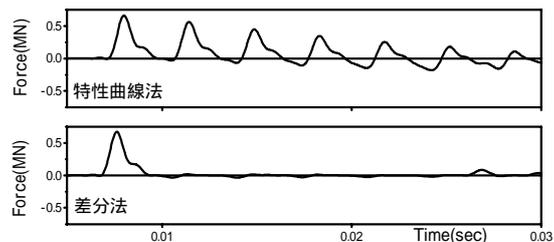


Fig.A2. Input wave for signal matching analysis

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(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、従来の試験方法の他に、新たに3つの試験方法が加えられた。本論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。これは、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行う試験方法である。この解析法には波形マッチング解析があり、杭と地盤をモデル化し、杭先端や杭周囲の静的抵抗などを求めて杭の支持力を算定する。

このような背景のもと、筆者らは衝撃載荷試験システムの開発⁽²⁾⁻⁽⁵⁾を行った。開発した波形マッチングソフトには杭周囲・杭先端の地盤抵抗モデルにSmithモデル⁽⁴⁾を用い、解析法には差分法を採用している。この開発で、以下の3点について解決しなければならない検討項目があった。

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一樣にならず、どのように計測値を評価すればよいのか。

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囲自由の杭・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。

2. ハードの開発

開発した衝撃載荷試験の計測システムをPhoto1に示す。回路ブロック図をFig.1に示す。本システムの開発では、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を使用しており、センサー感度のばらつきは、チャンネルごとに較正值で補正できる。加速度計・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、大加速度が必要で、 $\pm 5,000G$ の米国製を採用したため、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、図1に示すチェック入力から、較正された別系統の加速度計測システムが使えるようにすることで、本加速度計システムの較正が容易にできるように設計⁽²⁾した。



Photo1. Measurement system for dynamic load test

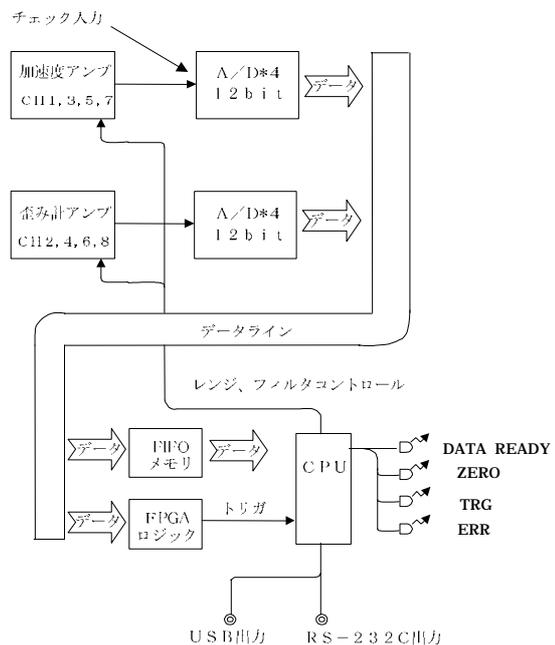


Fig.1. Mechanism of measurement system

3. 加速度・ひずみの基礎的実験

衝撃載荷試験では杭頭付近の加速度、ひずみを計測し、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樣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箇所を設置すること、また適切な計測波形の条件として、「軸対称に計測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、偏打しないように充分に気をつけても、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4,000m/s程度の値を用いることが多い」とあるが、筆者らは4,000m/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、実大の杭を用いて実験を行った。

3.1 実験概要

実験に用いた杭・地盤は、Fig.2 に示すような波動伝播をイメージとする簡易なモデルとした。以下に実験条件を示す。

杭種：直杭（400）で、杭長は8m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面を自由面とした。自由面を設定するため、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。

計測箇所：計測箇所は、杭頭からの距離を800mmとした。計測点ch1～4は杭周を4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：15μsec

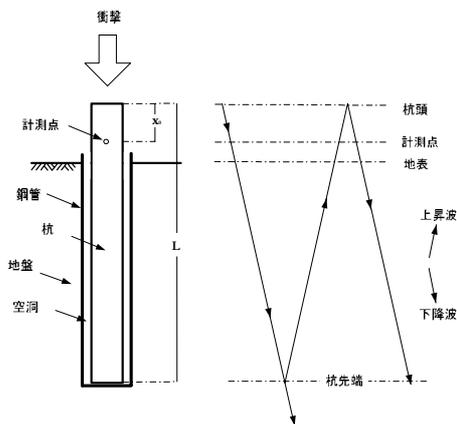


Fig.2. Experiment model

3.2 実験結果

試験杭の杭頭付近の加速度およびひずみ波形を計測した。Fig.3、4 に加速度波形およびひずみ波形を示す。Fig.3、4 とも、上図に杭の円周上四点の波形を、下図に軸対称の2波平均波形（2対）および四波平均波形を示す。下図に示した3組の平均波形はいずれもほぼ一致し、見分けが付かない。

試験杭では、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4波の平均を基準とした場合の2組の2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4波の平均を基準とした場合の2組の2波の平均のばらつきは±0.3%以内であった。

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载荷試験を行っている。このため、衝撃载荷試験時に杭の浮き上がる現象が生じている。加速度波形を見ると、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。Fig.3では5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。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、4,636m/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。

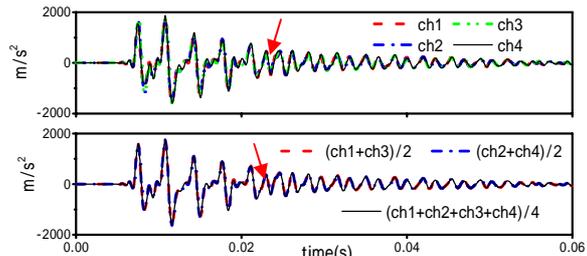


Fig.3. Wave shape of acceleration at the pile head

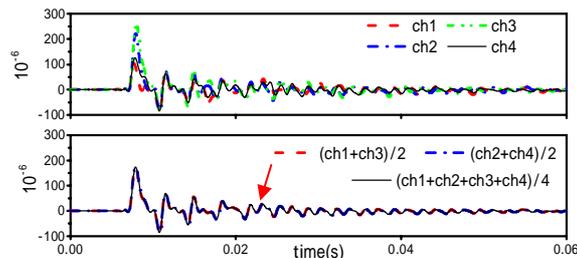


Fig.4. Wave shape of strain at the pile head

4. 波形マッチングのソフト開発

4.1 基本方程式

Fig.5 に杭の微小領域 δx における力のつり合いのモデルを示す。杭の微小領域の力のつり合いから次式を得る。

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

ここで、 ρ 、 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、 \mathbf{u} 、 \mathbf{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 δx を充分小さくすれば、次式を得る。

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

(1)、(2)式より次式を得る。

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

ここで、 E は杭のヤング係数(3.92MN/cm^2)であり、圧縮方向を正とした。開発した波形マッチング解析ソフトは、杭の周囲および先端の地盤抵抗モデルに Smith モデル⁽¹⁾を採用し、(3)式の偏微分方程式を差分法で解いている。Fig.6 に杭・地盤におけるモデルを、Fig.7 に Smith の力学モデルを示す。

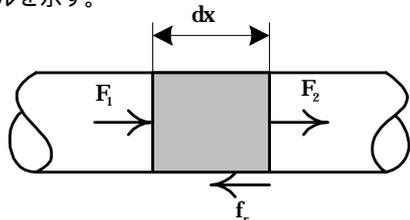


Fig.5. Force equilibrium at a small part of a pile

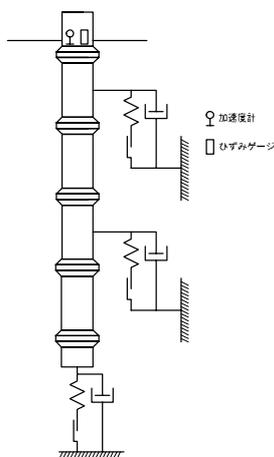


Fig.6. Model for signal matching analysis

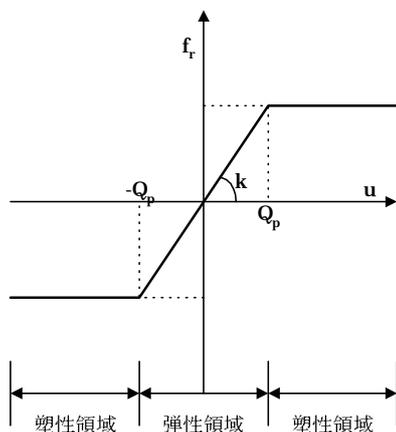


Fig.7. Smith model

4.2 入力波の評価

衝撃载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る。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 $F_1(t)$ 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計測点の位置とし、入力波の評価式には計測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。

$$F_1(t) = \frac{1}{2} \{ F_m(x_0, t) + Z \cdot v_m(x_0, t) \} \quad (4)$$

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

ここで、 $F_m(x_0, t)$ は測定したひずみから求めた計測点の軸方向力、 $Z \cdot v_m(x_0, t)$ は測定した加速度から求めた速度(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 m は計測から求めたことを意味する。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。

杭頭における力のつり合いは次式で表される。

$$A \cdot E \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = F_1(t) \quad (6)$$

ここで、 $F_1(t)$ は杭頭の入力波すなわち打撃力である。ところが、 $F_1(t)$ 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て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、 $F_m(0, t)$ を直接計測し、 $F_1(t) = F_m(0, t)$ とできれば問題はないのであるが、 $F_m(0, t)$ を直接計測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、杭頭から離れた計測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ある。式で表せば次式となる。

$$F_1(t) = F_m(x_0, t) \quad (7)$$

3章で、杭頭から離れた同一円周上の 4 計測点のデータから、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 離れた計測点の軸方向力を、下降波と上昇波に分離し、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。

$$F_1(t) = F(0, t) = F_d(0, t) + F_u(0, t) = F_d(x_0, t + t_0) + F_u(x_0, t - t_0) \\ = \frac{F_m(x_0, t + t_0) + F_m(x_0, t - t_0) + Z \cdot \{ v_m(x_0, t + t_0) - v_m(x_0, t - t_0) \}}{2} \quad (8)$$

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。

なお、杭における軸方向力の下降波 $F_d(x_0, t)$ と上昇波 $F_u(x_0, t)$ は計測データを用いて、次式に従って分離する。

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

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

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 $F_I(t)$ の算出方法である。

差分法の波形マッチング解析ソフトに関しては、参考文献(5)を参照していただきたい

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

5.1 検討方法

3章では4計測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が小さいことが推定できた。ひずみゲージの較正は容易で、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を確認した。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したが、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、周面自由とした試験杭の先端にゴムを敷いた実験データを用いた。このゴム挿入の実験は、錘落下高さが900mmであることおよび計測点が杭頭から900mmであることの2点で、「3.1 実験概要」で述べた実験条件と異なっている。また、使用したゴムの剛性を把握するために押込み試験を行った。この結果を Fig.8 に示す

5.2 検討結果

Fig.9 に、周面自由とした試験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。Fig.9(a)が計測したひずみから求めた計測点の軸方向力(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。Fig.9(b)が計測した加速度から求めた計測波

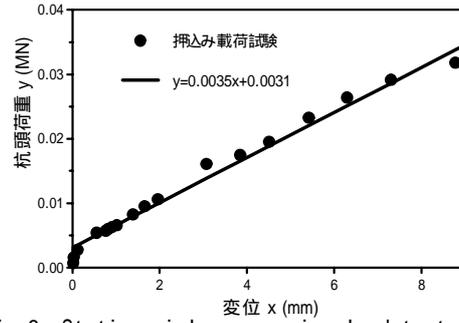


Fig.8. Static axial compressive load test result of gum which sets under the pile-toe

$Z \cdot v_m(x_0, t)$ (平均)である。Fig.9(c)が計測点の軸方向力の下降波で、特性曲線法の入力波(4式)である。Fig.9(d)が計測点の軸方向力の上昇波である。Fig.9(e)が(8)式で評価した入力波である。Fig.9(f)が、計測波から求めた杭頭の上昇波(直線、Fig.9(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。本実験では杭周面自由としているため、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1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1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1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、

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

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

の関係があることから、加速度を積分した速度の誤差が推定できる。 $F_m(x_0, t)$ および $Z \cdot v_m(x_0, t)$ の第1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で除すと次式となる。

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

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、下降波と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て下降波 $d2$ となることを確認される。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。なお、マッチングの諸元は、杭については、弾性係数 3.92MN/cm^2 、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。

Fig.10 に試験杭の先端にゴムを挿入したモデルの衝撃載荷試験の入力波と波形マッチング結果を示す。ただし、

Fig.10(a)は(8)式で評価した入力波であり、Fig.10(b)は計測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、Fig.9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。

Fig.9とFig.10における、おのおのの最下図の波形マッチング解析結果を見ると、1波目は良好なマッチングであるが、2波目、3波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。

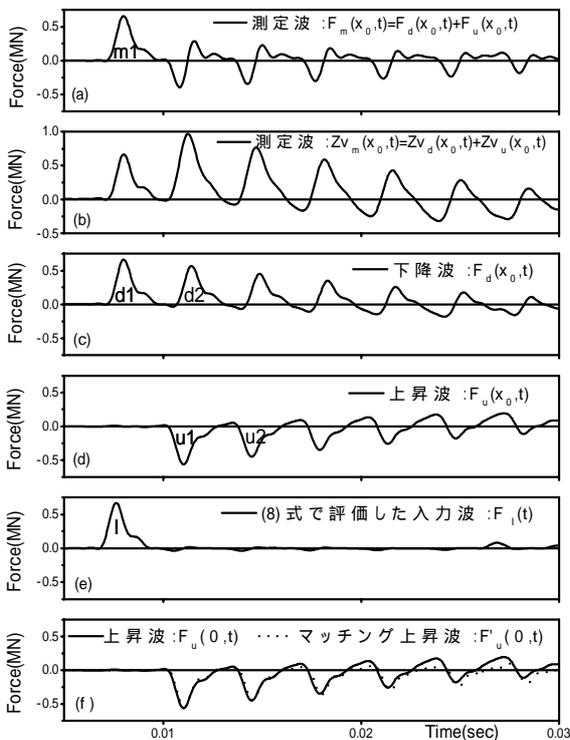


Fig.9. Result of signal matching analysis (without gum)

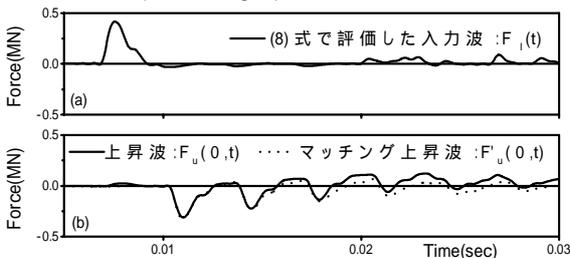


Fig.10. Result of signal matching analysis (with gum)

6. まとめ

筆者らは衝撃載荷試験システムを開発するにあたり、杭頭で乱れた軸方向力などの評価方法・ハード・ソフトの3点について、実大杭による実験により検証した。

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から、地盤工学会基準では計測点を杭頭より杭径の1.5倍以上離すことを推奨している。しかし、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。そこで、杭周上で等分割した4点の計測データを用いて、4波の平均と2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検証した。

ハードには、加速度計に米国製の±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を検証した。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。

開発した波形マッチングソフトには、地盤抵抗モデルに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、波形マッチングソフトの妥当性を検証した。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、杭頭から離れた計測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。

参考文献

- (1) 地盤工学会(2002): 杭の鉛直載荷試験方法・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) 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