

杭の衝撃載荷試験における測定法の検証と波形マッチング解析の一考察

小嶋 英治¹, 桑山 晋一²

1 小嶋英治技術士事務所, 早稲田大学理工学術院総合研究所 (理工学研究所)

2 ジャパンパイル(株)関西支社 基礎設計部

概 要

杭の動的支持力の研究は、200年以上前の動的貫入から杭の支持力を得ようとする研究が始まりで、その後多くの研究が行われているが、衝撃載荷試験の波形マッチング解析に用いる入力波および対象波に関する研究等が稀有である。そこで本ノートは、杭の衝撃載荷試験に杭頭および杭先端以外で反射の生じない杭・地盤モデルを想定し、打撃力の算定法を検討する。このモデルを実杭で再現して打撃力を求め、この打撃力の一次元波動伝播をイメージして、波形マッチング解析に用いる対象波および入力波がどのような波動であるべきかを考察する。また、衝撃載荷試験の波形マッチング解析には順応答解析と逆応答解析があり、前者は順解析で後者は逆解析である。逆解析となる解析法では非適切性の問題が生じるので順応答解析を用いるべきと提言する。

キーワード：杭，鉛直方向，衝撃載荷試験，入力波，逆解析，解の非適切性

1. はじめに

杭の衝撃載荷試験は、Fytelwein(1808)による杭の動的貫入から杭の支持力を得ようとする研究が始まりで、その後 St. Venant(1867) による杭打ち現象を一次元波動理論の応力波で説明する研究があり、次に杭の動的載荷試験の支持力評価の研究に推移した¹⁾。その後、多くの研究者の努力と成果により、日本に衝撃載荷試験の技術が導入され、試験事例も増加し、地盤工学会基準 (2002) の杭の鉛直載荷試験方法・同解説²⁾ (以下、学会基準と称す) に試験法が追加され、現在に至っている。

本載荷試験は杭の鉛直方向の打撃を杭・地盤モデルを用いてシミュレートし、杭の諸元を既知とし、杭の地盤抵抗である杭周面および杭先端抵抗の諸元を未知のパラメータとして扱う。同モデルに入力波を応答させて求めた計算対象波と、それに対応する波形マッチング解析のための測定から求めた対象波 (以下、測定対象波と称す) とが合致するように、未知の地盤抵抗を同定する試験法である。なお、両方を総称する場合は、対象波と称することにする。

筆者らは、同載荷試験システムの開発³⁾にあたり、学会基準に記載されているセンサーの設置法、測定位置、データの評価法、杭体内の縦波の伝播速度 (以下、杭体の伝播速度と称す) および下降波と上昇波の分離等について、杭周面で地盤抵抗の作用しない杭単体の装置を用いた載荷試験を行い、検証を行っている。その過程で、打撃力が杭頭の軸方向力であることを確認し、測定した加速度およびひずみの時刻歴波形から打撃力を算定する方法を提案⁴⁾した。これ等の一連の考察から衝撃載荷試験の波形マッチング法に順応答解析および逆応答解析の二通りの方法のあ

ることが判り、筆者らは逆応答解析では非適切性⁵⁾の問題が生じるので順応答解析を用いるべきと提言する。

2. 杭の鉛直方向衝撃載荷試験

筆者ら³⁾は、鉛直打撃装置、計測システムおよび波形マッチング解析システムから構築されている杭の鉛直方向の衝撃載荷試験システム (HITTOP) を開発している。詳細は参考文献3を参照して頂きたい。

鉛直打撃装置は、杭体を打撃で施工できる装置であれば試験可能であるため、現地調達が容易である。ただし筆者らは、重錘質量 0.3t, 2.0t, 4.0t, 7.0t 等のモンケンの打撃装置を作成している。



写真1 衝撃載荷試験システム (HITTOP)

衝撃載荷試験システム (HITTOP) は、パソコン (写真1) をアンプ倍率およびセンサー感度の校正値等を入力できるコントローラとし、かつ測定および波形マッチング解析時の波のモニターとして用いている。

本システムの開発に当たり、データサンプリング時のエイリアシングを避けることおよび杭体の伝播速度を正確に

把握するため、サンプリングタイムを極力小さくし、かつデータ個数を多くすることを目指し、AD変換は1ch当たり、分解能12bit、サンプリングタイム15μsec～8msec、データ個数の最大値は65,536個とした。また、加速度計およびひずみゲージは、各4チャンネルの計8チャンネル仕様で、衝撃载荷試験は1台で試験可能である。ただし、複数のHITTOPを連動可能とし、鋼管杭2本を連結した鉛直方向の衝撃载荷試験⁶⁾および水平方向の動的载荷試験⁷⁾に活用している。なお、加速度計は±5,000g、±500g等を用意している。

図1に波形マッチングシステムの杭・地盤モデルを示す。図中の深緑の点線で囲まれた部分がシステム図⁸⁾で、杭周面および杭先端の地盤抵抗は完全弾塑性ばねおよび粘性減衰としてモデル化(Smithモデル⁹⁾)している。なお、杭体の波動伝播の減衰は、地盤抵抗の減衰に比べ極端に小さいことが試験³⁾より判明し0と評価した。衝撃载荷試験は、原因が重錘による杭頭の打撃で、結果が杭の応答である。解析では杭体の機械インピーダンスおよび杭周面の地盤抵抗の異なる箇所では杭体を分割する。ここで、杭体の杭長、断面積、ヤング係数、ポアソン比等が既知のため、杭体の剛性および質量を既知(黒線で明示)とし杭周面および杭先端の抵抗を未知(茶色で明示)として扱っている。

図2に波形マッチング解析プログラムのフローを示す。本解析システムの特徴は、計測システムから得た時系列データから鉛直方向の打撃力(原因)を求めて入力波として解析することにある。打撃力の算定法については、5章で説明する。解析プログラムのアルゴリズムは、分割した杭体の変位、沈下量およびひずみ量の連続性を基に、両側差分法を用いて構築している。HITTOPシステムの波形マッチング解析は、杭頭の打撃力(原因)を入力波とした順応解析で結果(応答)の計算対象波を求め、測定対象波と計算対象波が波形マッチングするように、未知である杭周面および先端の抵抗を解析し、小さい振幅で初期剛性を、大きい振幅で塑性域を同定する。対象波にどのような波が

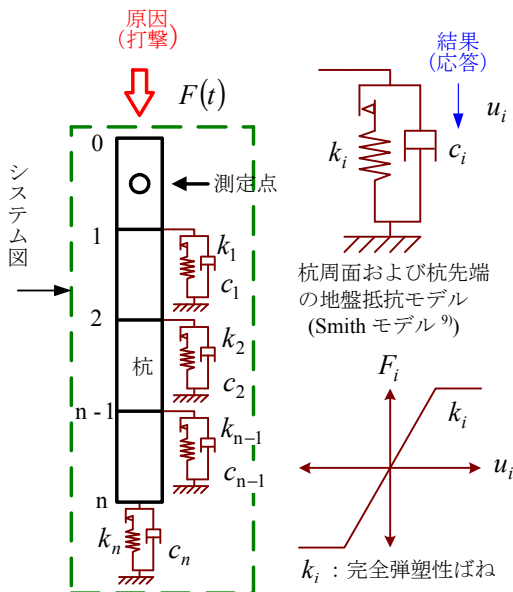


図1 衝撃载荷試験のシステムおよび原因・結果図

妥当かについては9章で検討する。杭の打撃力を打撃前から評価することで、杭の変位、速度、加速度およびひずみ等の初期条件は全て0としている。なお、杭の支持力等は、同定した杭・地盤モデルを用いて算定する。

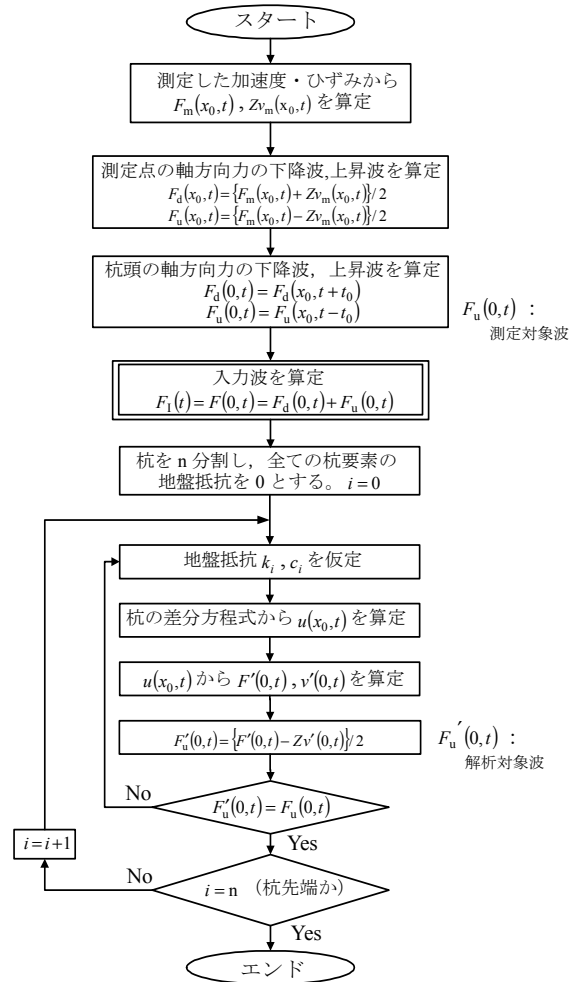


図2 波形マッチング解析プログラムのフロー

3. 地盤工学会基準の記載事項の検証

筆者らは、杭の衝撃载荷試験システムにおける、ソフトおよびハードの開発³⁾にあたり、学会基準²⁾に記載された以下の事項について、検証試験および検討を行った。

- (1) 「前進応力波と後退応力波」の語句。
- (2) センサーの取り付け方法は、杭に穴を開けボルトで固定する方法(図3参照)や、接着剤、溶接で固定する

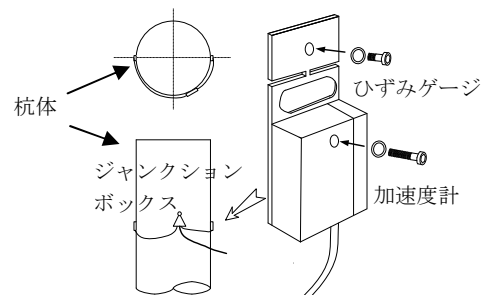


図3 センサー取り付け方法例²⁾

方法がある。

- (3) センサーは、杭頭からなるべく離れた位置に設置することが望ましい。これは、打撃位置（杭頭）直下の杭体の応力状態は乱れており、杭頭から離れるほど応力が安定するためである。本基準では、杭頭から杭径の1.5倍以上離れた位置に設置することとしたが、試験条件により、杭径の1.5倍以上の位置にセンサーの取り付けが困難な場合には、予備測定等により測定波形の確認を行い、センサーの取り付け位置を検討しておくことが望ましい。
- (4) センサーは2ヶ所の軸対称位置に設置する。これは、偏打の影響を確認できるとともに、その影響を相殺する平均値を使用することができるためである。
- (5) 軸対称に測定した同種波形の形状が相似であること。
- (6) 縦波伝播速度

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

(E , ρ : 測定位置での杭体のヤング係数および密度)
 なお、縦波伝播速度は杭体の材質により異なり、鋼管杭で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。

- (7) 測定のサンプリング時間間隔は、0.1ms以下とする。

$$(8) \text{ 入力波: } F_d(x_0, t) = \frac{1}{2} \{ F_m(x_0, t) + Z \cdot v_m(x_0, t) \} \quad (2)$$

$$\text{ 上昇波: } F_u(x_0, t) = \frac{1}{2} \{ F_m(x_0, t) - Z \cdot v_m(x_0, t) \} \quad (3)$$

(ここで m は測定位置の評価波であることを意味する添え字として用いた)

4. 検討と検証

(1)の前進応力波と後退応力波

学会基準の波動伝播の説明で、前進応力波と後退応力波、下降応力波と上昇応力波、透過波と反射波等の語句が用いられており、統一されていない。そこで本ノートでは、下に伝播する波を下降波、上に伝播する波を上昇波と称することにし、例えば、軸方向力の上昇波等と呼ぶことにした。

(2)の検証

学会基準では、3種類のセンサーの取り付け方法が挙げられている。特に杭体に穴を開け治具をボルトで固定する方法として図3が記載されている。筆者らは、杭に穴を開けることを避けたかったこと、治具にひずみゲージを貼りつける方法で杭体の正しいひずみが測定できるのか等の疑問が生じたことから、種々のセンサーの取り付け方法を検討した。この結果、加速度計の設置方法に、学会基準の記載以外の、両面テープを用いる方法(写真2, 白いテープが両面テープ)を採用することにした。加速度計の設置に両面テープを採用すると、フィルター効果が生じないかとの懸念が生じる。そこで実杭を用いて瞬間接着剤と両面テープの取り付け方法を比較し、フィルター効果の影響のない接着面の薄い両面テープを選択した。ただし太陽の直射日光の当たる時は覆いを掛けること、気温低下の生じる

時は投光機で温めること等の対策を行っている。なお、ひずみゲージは直接杭体に瞬間接着剤で張り付けている。

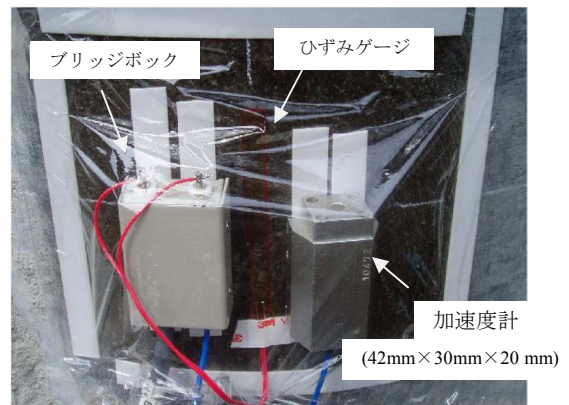


写真2 両面テープによる加速度計等の設置状況

(3), (4), (5)の検証

検証は、図4に示すように、杭立込み試験装置に杭を立てかけて衝撃载荷試験³⁾¹⁰⁾を行った。この試験装置は、杭長7m、杭径600mmの、杭先端を鉄板で閉塞した鋼管を打設したものである。本装置を用いた理由は、杭体を地表に自立させて衝撃载荷試験を行うと、全ての作業が高所作業となるためである。

この試験の目的は、杭単体の伝播速度の把握と、杭の衝撃载荷試験の明確な波動伝播を把握するためである。一連の試験では、重錘質量300kgを800mmの高さから自由落下させた。用いた試験杭は以下の通りである。

- ・直杭 (PHC 杭, 杭長 $L = 8\text{m}$, 杭径 400mm)
- ・節杭 (PHC 杭, 杭長 $L = 8\text{m}$, 杭径 400mm の直杭に 1m 毎に杭径 500mm の節を付けた杭)
- ・鋼管杭 (杭長 $L = 8\text{m}$, 杭径 400mm, 杭厚 12mm)

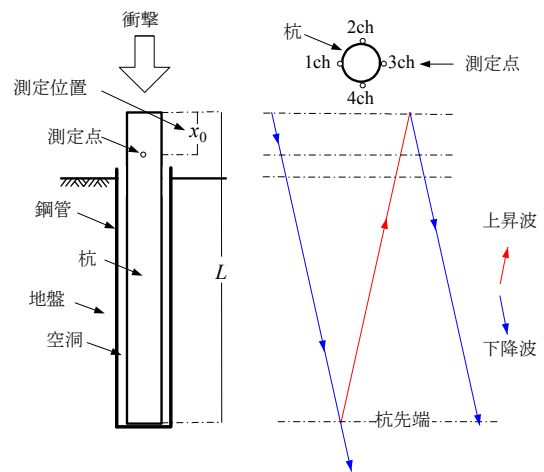


図4 実杭立込み試験装置

杭頭には、物理的にひずみゲージが設置できないことから、杭頭直下の加速度およびひずみを調査した。この結果、杭頭直下の応力状態の乱れを確認し、この原因を、重錘の偏打の影響等と推測した。そこで、偏打が生じてもそれを打ち消す評価方法を、学会基準を参考に模索した。杭周を細分割した調査(写真3)を経て、測定位置を杭頭から1D, 2D, 3D離れた個所(D:杭の直径, 写真4)とし、測

定点を測定位置の杭周4等分割(ch1~ch4)した4箇所の調査(図4, 写真4)を行った。なお, 加速度計およびひずみゲージは測定点のそれぞれに配置し, かつ同種のセンサーは杭周上で点对称の配置とした。

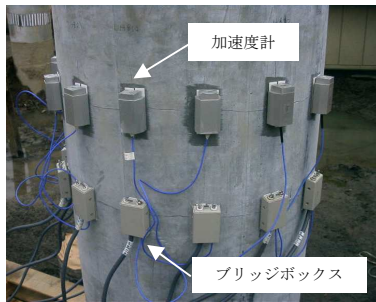


写真3 杭周面の加速度調査



写真4 節杭によるデータ評価法の調査

図5, 6に, 直杭を用いて, 杭頭から2D離れた箇所を測定位置とした測定点の加速度波形およびひずみ波形を示す。ここで測定点のch1とch3, ch2とch4が杭周上で点对称(図4)となっている。図5, 6の上の波は, 4波をそれぞれ示したもので, 加速度波形のばらつき小さいこと, ひずみ波形のばらつき大きいことが確認される。同図の下の波は, 測定位置の杭周4波の加算平均と点对称2波の加算平均を示したもので, この比較から杭周を2等分

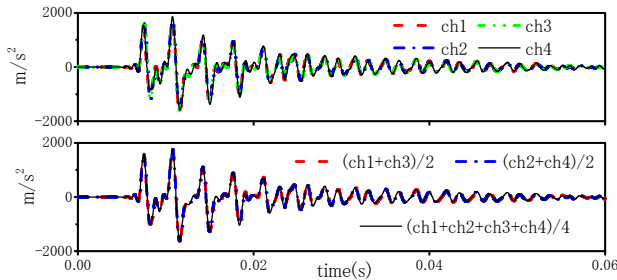


図5 直杭の加速度波形

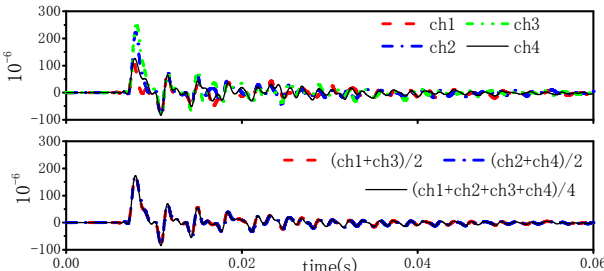


図6 直杭のひずみ波形

割した波の加算平均を行えば, 加速度およびひずみ波形のばらつきを修正できることを確認³⁾¹⁰⁾した。

筆者らは, 上記の実杭を用いた測定位置1Dおよび2Dで, 杭頭を打撃装置で可能な限り偏打させる試験を行った。この結果, (5)の同種波形の相似が測定されないばかりでなく, ひずみ波形の逆位相が測定された。しかし, 1D以上で, 杭周2等分の加算平均を行えば, 偏打の影響は除去できることを確認している。ただし, 筆者らは, 学会基準の測定位置を杭頭から1.5D以上離すことを基本とすることにし, 現場状況でこれが困難な場合は, 3章に示した学会基準の(3)に準ずることとした。以下, 測定点における点对称等のデータの加算平均で評価した波を, 測定位置の波と称することにする。なお, 写真4の節杭単体の調査から, 節部による波の反射の小さいことを確認¹⁰⁾し, 節杭は節部のない直杭でモデル化し, 節部の効果は地盤抵抗で評価することとした。

(6)の検証

図4の試験装置で, 杭単体の伝播速度を調査した。この結果, 杭の伝播速度は, 直杭(PHC杭)4,636m/s, 節杭(PHC杭)4,742m/sであった¹⁰⁾。なお筆者らは, この外の試験結果等を総合し, PHC杭4,600~4,800m/s, 鋼管杭5,400m/s程度, SC杭5,000~5,100m/sを用いている。学会基準の伝播速度の推奨値を, 式(1)を用いて検討すると, コンクリート杭の杭材の公称値は $E=40,000\text{N/mm}^2$, $\rho=2,400\text{kg/m}^3$ より $c=4,080\text{m/s}$ となり, 鋼管杭の杭材の公称値は, $E=205,000\text{N/mm}^2$, $\rho=7,850\text{kg/m}^3$ より $c=5,110\text{m/s}$ となる。この結果, 学会の推奨値の伝播速度は杭材の公称値を用いた値に近いことが確認¹¹⁾された。公称値のヤング係数は杭の静的設計に用いるためのもので, 筆者らは衝撃載荷試験のヤング係数として用いるのは不適切と考える。

式(1)は杭体単体の伝播速度であるが, 杭周面を完全に拘束されたと仮定すれば, 伝播速度 c は次式で与えられる。

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4)$$

式(4)より, 鋼管杭はポアソン比を $\nu=0.3$ とすれば $c=1.160\sqrt{E/\rho}$ であり, コンクリート既成杭はポアソン比を $\nu=0.2$ とすれば $c=1.054\sqrt{E/\rho}$ となる。地中の杭の伝播速度の確認のために, 筆者らは, 図4の装置で, 試験杭に直杭(PHC杭, 写真3), 節杭(PHC杭, 写真4)および鋼管杭(写真5)を用い, 杭体と試験杭の隙間に砂を詰めた試験を行った。この砂詰めでは十分な締め固め後, 養生期間2週間後の伝播速度を調査(写真5)したが, 杭単体と同じ伝播速度であった。そこで不連続部の反射を利用した, 実施工の不等厚の鋼管杭(杭径800mm, SKK400, 杭厚10mm, 9mm)および無溶接継ぎ手の既成コンクリート杭(直杭, PHC杭, 杭径800mm)の載荷試験¹¹⁾から地中の杭の伝播速度を調査した。この結果, 鋼管杭で5,400m/s, 既成コンクリート杭で4,800m/sであり, 砂詰め杭の伝播速度が杭単体と変わらないことを確認した。これは, 式(4)と矛盾する結果となった。この理由として, 杭は軟弱な地盤に施工されるため杭外面の地盤の拘束力が小さい, また既成杭の中心部は

空洞で杭打設時に杭中心部の空洞にソイルセメント等が充填されたとしてもこれらの拘束力は小さい、と推定した。

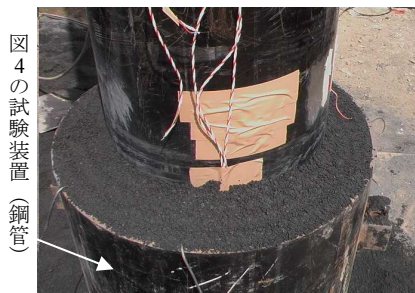


写真5 鋼管と鋼管杭の隙間に砂を詰めた試験

そこで筆者らは、地中に施工された杭体の伝播速度は杭単体とほぼ等価と判断し、杭の波形マッチング解析に用いるヤング係数 E は次式で求めるべきと結論¹¹⁾付けた。

$$E = c^2 \rho \tag{5}$$

ここで、伝播速度 c は杭単体の実測値の伝播速度を用い、密度 ρ には杭メーカーのカタログ値を採用するものとする。なお、杭単体の伝播速度の実測値は、杭体を横積みした木槌打撃試験で求められるので、載荷試験の一環として、杭単体の伝播速度を把握することをお勧めする。

(7)の検討

鋼管杭（伝播速度 5,400m/s）を想定すれば、1 サンプル時間間隔中に進む距離は、 $15\mu\text{s}$ が 81mm に対し、 0.1ms が 540mm である。杭の縦方向の一次固有モードを評価するには、 0.1ms では遅すぎると結論付け、計測器の開発のコストパフォーマンスを考慮し $15\mu\text{s}$ とした。

0.1ms のサンプリングでエリアジングを生じさせないためには測定時にアナログのハイカットフィルターが必要である。ところがアナログフィルターは振幅および位相フラットの理想フィルターは作れない。一方 $15\mu\text{s}$ は、杭の衝撃載荷試験で生じるエリアジングの振動数より高く、測定時に時間遅れの生じるアナログフィルターを必要としない。エリアジングの面からも 0.1ms は遅すぎると考えた。

(8)の検討

式(2), (3)の $F_m(x_0, t)$ および $v_m(x_0, t)$ は測定位置の軸方向力および粒子速度の評価波である。また、 x_0 は杭頭からの測定位置までの距離であり、 t は時間の関数で、 d および u は、下降波および上昇波を意味する添え字である。式(2), (3)の Z は機械インピーダンスで、次式で表される。ここで A は杭の断面積である。

$$Z = \rho \cdot c \cdot A = A \cdot E / c \tag{6}$$

なお、粒子速度は、波の伝播速度の語句と区別するために用いたものであり、測定した加速度を積分して求めた。詳細は学会基準²⁾を参照して頂きたい。

解析には順解析と逆解析があり、順解析は、原因から結果を求める解析で、逆解析は順解析以外の解析と定義されている。衝撃載荷試験に当てはめれば、順解析は、入力波を杭頭打撃力（原因）とし、杭・地盤モデルを仮定して解析対象波（結果）を求め、繰り返して計算で解析対象波が測定対象波に合致するように地盤抵抗を同定させる応答解析で、順応答解析である。逆解析は順解析以外の解析法で、

入力波に打撃力（原因）以外の波、例えば測定点の下降波（結果）を用いる応答解析で、逆応答解析である。

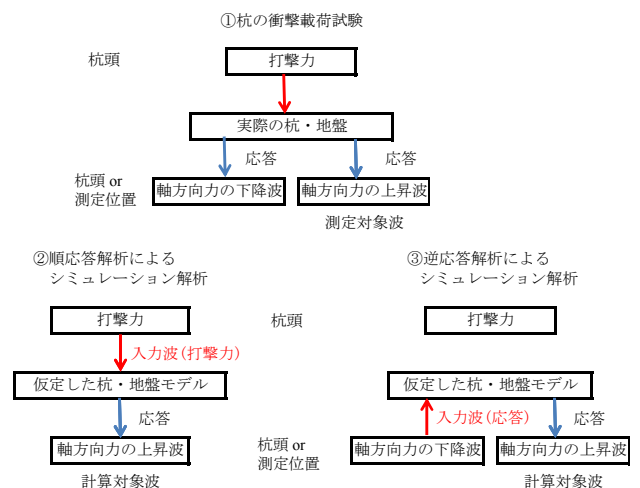


図7 杭の衝撃載荷試験と応答解析のブロック図

図7は、①杭の衝撃載荷試験、②順応答解析および③逆応答解析によるシミュレーション解析のブロック図である。①の衝撃載荷試験の応答の測定は、前記したように杭頭が測定不可のため、杭頭から 1.5D 以上離れた箇所を測定位置としている。波形マッチング解析は、測定位置（あるいは測定位置から求めた杭頭）の軸方向の上昇波である測定対象波と杭・地盤モデルのシミュレーションから求めた同計算上昇波とが波形マッチングするように、表層から杭先端に向かって地盤の諸元を同定するのだが、煩雑となるため図では省略した。

逆応答解析を用いた波形マッチング解析は逆解析で生じる、解の存在性、解の一意性および解の連続性等に関する非適切性⁴⁾の問題がある。その他には、①仮定した地盤抵抗で、入力波とした応答（結果）に対する打撃力（原因）が測定から求めた打撃力と適合するかを確認していない、②測定対象波と計算対象波が合致するように地盤諸元を同定するため、結果である入力波と境界条件が一致するのは、地盤抵抗が全て同定された時点で、それまでは入力波とした応答波と不一致の解析モデルで逆解析を行うことになる、③測定から求めた軸方向の下降波は、実地盤の地盤抵抗の影響を含んだ波であり、同定される前から、同定された時の地盤抵抗の影響を含む下降波を入力波とすることになる、等の問題が生じる。

従来の逆応答解析の特性曲線法を順応答解析とするには、入力波を杭頭の打撃力として再構築すれば容易に修正可能である。そこで筆者らは、従来の逆応答解析を用いた特性曲線法ではなく、順応答解析の特性曲線法を用いるべきと提言¹²⁾する。

波動伝播理論では、式(2)および式(3)は、測定位置の軸方向力を下降波 $F_d(x_0, t)$ と上昇波 $F_u(x_0, t)$ に分離する式である。学会基準の特性曲線法は、逆応答解析を用い、式(2)の軸方向力の下降波 $F_d(x_0, t)$ を入力波としている。学会基準ではこの説明を省略している。本ノートでは、波動論の原点に戻って、式(2), (3)を軸方向力の下降波および上昇波と定義する。

5. 打撃力の検証と入力波の検討

衝撃載荷試験の打撃力を考察する。打撃力を測定するには、以下の方法が考えられる。

- 杭頭に加速度計およびひずみゲージ等を設置する。
- 重錘に加速度計およびひずみゲージ等を設置する。
- 杭頭にロードセルを設置する。
- 杭頭から $1.5D$ 以上離れた測定位置の軸方向力を下降波および上昇波に分離し、この2波から杭頭の軸方向力を評価する。

(a)案の杭頭にセンサーを設置することは、上記したように不可能で、杭頭近辺も応力が安定せず測定不能である。

(b)案では、重錘の偏打の影響を考慮すれば、直径の3倍以上の長さの重錘を用い、重錘の中央の周囲を4等分割し、加速度計を4個設置して、加速度を正しく評価できているかを検証しながら試験を行う必要がある。この案では重錘にセンサーを設置するため、測定準備が大変である。また、重錘の打撃による載荷間に、重錘内を何往復もする波動伝播を補正し、重錘下端部の打撃力を正しく評価することは非現実的と考えた。衝撃載荷試験の打撃装置は、打撃工法であれば、杭打設の施工機械(例えば油圧ハンマー)をそのまま用いることが理想で、載荷試験専用の打撃装置を必要とすることはベストではないと考える。

(c)案の杭頭にロードセルを設置すれば容易に打撃力を測定できそうであるが、本システムの対象とする杭は様々で、当社の保有の数台の計測システムに、全ての打撃力に適合する多種のロードセルを数多く用意しなければならず不経済である。

筆者らの開発した計測システム³⁾は、センサーに加速度計およびひずみゲージを用いていることから、これ等のデータを用いて打撃力が算定できればベストである。また、質量の大きいロードセルが不要となれば、一人で手軽に持ち運び可能なシステムとなる。そこで筆者らは、(d)案を採用した。図8の、既成コンクリートの直杭(PHC杭、杭長8m、杭径400mm)を使用した衝撃載荷試験の測定波形を用いて打撃力の算定法を説明する。なおこのデータは図5, 6に示した、杭頭から $2D$ 離れた測定位置の加速度およびひずみ波形から求めたものである。この図の1番目および2番目の波が、測定位置の軸方向力 $F_m(x_0, t)$ および $Z \cdot v_m(x_0, t)$ で、 $x_0 = 2D = 800\text{mm}$ である。本ノートで、粒子速度に機械インピーダンスを掛けて表現している場合があるが、これは粒子速度を軸方向力と同じ次元の力で表現するためである。3番目および4番目の波は、式(2), (3)から求めた軸方向力の下降波 $F_d(x_0, t)$ および上昇波 $F_u(x_0, t)$ である。4番目の上昇波 $F_u(x_0, t)$ に杭体内の伝播速度と杭長から求めた杭一往復の時間を表示したが、この表示は、測定時に自動的に表示する計測システムになっている。これを目安に、測定中に周面抵抗が杭のどの位置で大きいのか、先端抵抗はどうか等を判断することができる。図中では、杭一往復の時間内に上昇波の生じていないことが確認できる。これは杭周面抵抗の無いモデルとし

ため、杭先端のみでしか上昇波が生じないからである。

図8の分離した軸方向力の下降波 $F_d(x_0, t)$ と上昇波 $F_u(x_0, t)$ を比較すると、下降波の2波目以降と上昇波全体の波が、位相が反転し、時間遅れが生じているが、同じ波であることに気付く。これは、上昇波が杭頭で位相を反転して反射したためである。したがって、測定位置の下降波および上昇波を杭頭に戻して、杭頭の下降波 $F_d(0, t)$ および上昇波 $F_u(0, t)$ を求め、この両波を加算すれば、杭頭の打撃力が求まることが判る。そこで小嶋は、杭頭の打撃力に次式を提案⁴⁾している。

$$F(0, t) = F_d(0, t) + F_u(0, t) = F_d(x_0, t + t_0) + F_u(x_0, t - t_0) \\ = \frac{F_m(x_0, t + t_0) + F_m(x_0, t - t_0) + Z \cdot \{v_m(x_0, t + t_0) - v_m(x_0, t - t_0)\}}{2} \quad (7)$$

図8の一番下の波形が式(7)から求めた、衝撃載荷試験の打撃力 $F(0, t)$ である。この打撃力が上から三番目の、測定位置の下降波の第1波であることから、式(7)の正しいこと、また $F_m(x_0, t)$ および $Z \cdot v_m(x_0, t)$ から測定位置の軸方向力の下降波と上昇波に分離した式(2), (3)が正しいことが証明されたと考える。ただし、この計算を可能としているのは、杭頭付近の応力の乱れを修正するデータの評価法にある。また、軸方向力を下降波と上昇波に正確に分離するためには、杭体の伝播速度を正確に把握する必要があり、本計測システムは $15\mu\text{s}$ のサンプリング時間間隔の高速化を行っている。なお、サンプリング時間間隔が充分小さいことから、データ補間は内分を用いる直線補間とした。

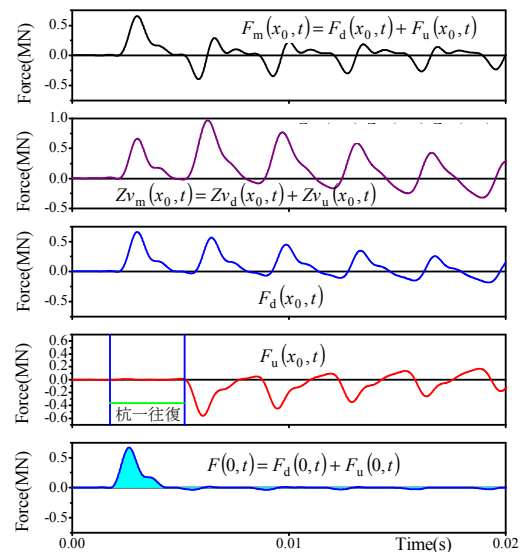


図8 直杭の衝撃載荷試験データ

6. 実地盤の衝撃載荷試験例

通常の地盤では、杭体の波動は複雑な重複反射を示すが、自由端である杭頭では、上昇波は位相を反転させて下降波となる。衝撃載荷試験は杭頭を露出させて行う試験であるので、杭頭の軸方向力は打撃力そのものとなる。すなわち、提案する打撃力の式(7)の算定式は、通常の杭・地盤にも適用できるということである。

5章で示した載荷試験は、杭の周面抵抗の無い特殊なモ

デルの地盤であるので、実際の地盤（土質柱状図：図9）で行った中掘りセメントミルク噴出攪拌工法の衝撃載荷試験¹³⁾（写真6）を紹介する。試験杭は鋼管杭で、杭径0.8m、杭長19.0m（上杭：杭長8.5m、杭厚13mm＋下杭：杭長10.5m、杭厚9mm）である。詳細は参考文献13を参照して頂きたい。

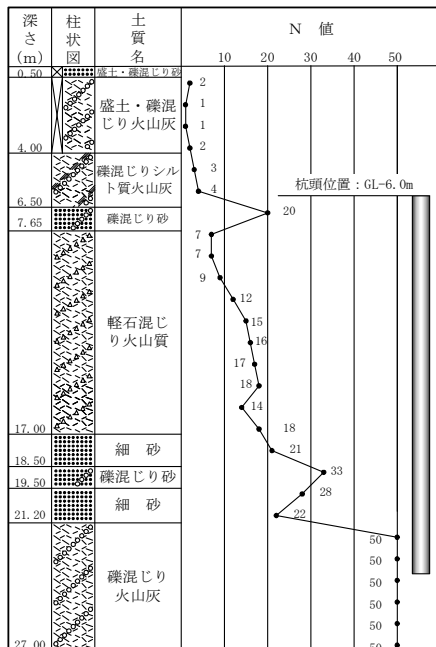


図9 土質柱状図・試験杭



写真6 クッション材を用いた衝撃載荷試験¹³⁾
（中掘りセメントミルク噴出攪拌工法杭）

本試験は、衝撃載荷試験としては、最大級の衝撃荷重を与える試験であるため、単なる衝撃載荷試験では杭先端および杭周面のセメントミルクを破壊する恐れがあるとして、相対載荷時間²⁾ T_r を3に設計したクッション材を杭頭に設置した。なお、図10に示す通り T_r の実測値は3.03であった。載荷試験は相対載荷時間で分類²⁾されており、相対載荷時間 T_r 500以上が静的載荷試験、500未満5以上が急速載荷試験、5未満が衝撃載荷試験で、本試験は衝撃

載荷試験に分類される。重錘質量7tで落下高さ0.2mの、クッション材の有無による軸方向力の比較から、クッション材の効果で、載荷時間は約2倍、打撃力のピーク値は34%減であった¹³⁾。測定中の上昇波を確認することで、杭周および杭先端のセメントミルクに異常の無いことを確認しながら載荷試験を行った。

図10に、重錘質量7tの落下高さ140cmにおける測定位置（杭頭から120cm下）の測定データを用いて算定した杭頭の軸方向力を示す。同図の青の一点破線が下降波で、赤の破線が上昇波で、この2波を合成した波が黒の実線で示す打撃力である。この波から、重錘が杭頭を打撃し、波の後半で跳ね上がり、その結果杭頭自由となり、杭頭の軸方向力の下降波と上昇波の位相が、逆転していることが確認できる。図10の赤線の破線は杭頭の軸方向力の上昇波で、杭頭の打撃力と比較すると、波の初めの部分に上昇波の無いことが確認できる。これは、杭頭が露出していること、地表付近の杭周面の地盤抵抗が小さいこと、等の理由により上昇波の生じないことを意味している。また、測定時に杭頭付近の軸方向力の上昇波を確認しながら載荷試験を行うことにより、杭体の伝播速度が正しく評価されているかどうかを判断することができる。

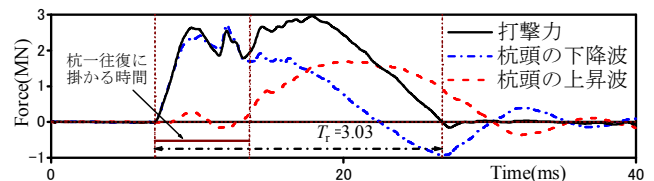


図10 中掘りセメントミルク噴出攪拌工法杭¹³⁾における衝撃載荷試験の杭頭の軸方向力

7. 軸方向力と粒子速度の波動伝播のイメージ¹²⁾

図4に示した既成コンクリート杭（PHC杭）の杭立込み試験で行った衝撃載荷試験結果を一次元波動伝播理論で考察¹²⁾する。杭の質量密度 ρ および断面積 A はカタログより、それぞれ $2,600\text{kg/m}^3$ 、 722.5cm^2 とした。杭の伝播速度 c は、実測値の $4,636\text{m/s}$ を用いた¹⁰⁾。図11, 12に示すように、式(7)で算定した打撃力（図8の一番下の波を最大値1MNで基準化）を杭頭に入射させた。なお図11, 12で打撃力は水色で塗りつぶした。実杭立込み試験は杭の周面に抵抗が無く、これは杭頭から先端まで軟弱地盤であることに相当する。ただし、杭先端は、自由端となる軟弱地盤のCASE1と固定端となる強固な地盤のCASE2を仮定した。自由端では、軸方向力は逆位相で反射し、粒子速度は同位相で全反射する。また、固定端では、軸方向力は同位相で全反射し、粒子速度は逆位相で反射する。以上を考慮すれば、CASE1 および CASE2 の波動伝播は、それぞれ図11および図12に示す通りである。

図の中央に、杭長8mを10分割した杭を示し、それに対応する波形を示した。したがって一番上の波が杭頭で、一番下が杭先端となり、測定位置（杭頭から0.8m下）の波は上から2番目の波である。なお、下降波を青の実線で、

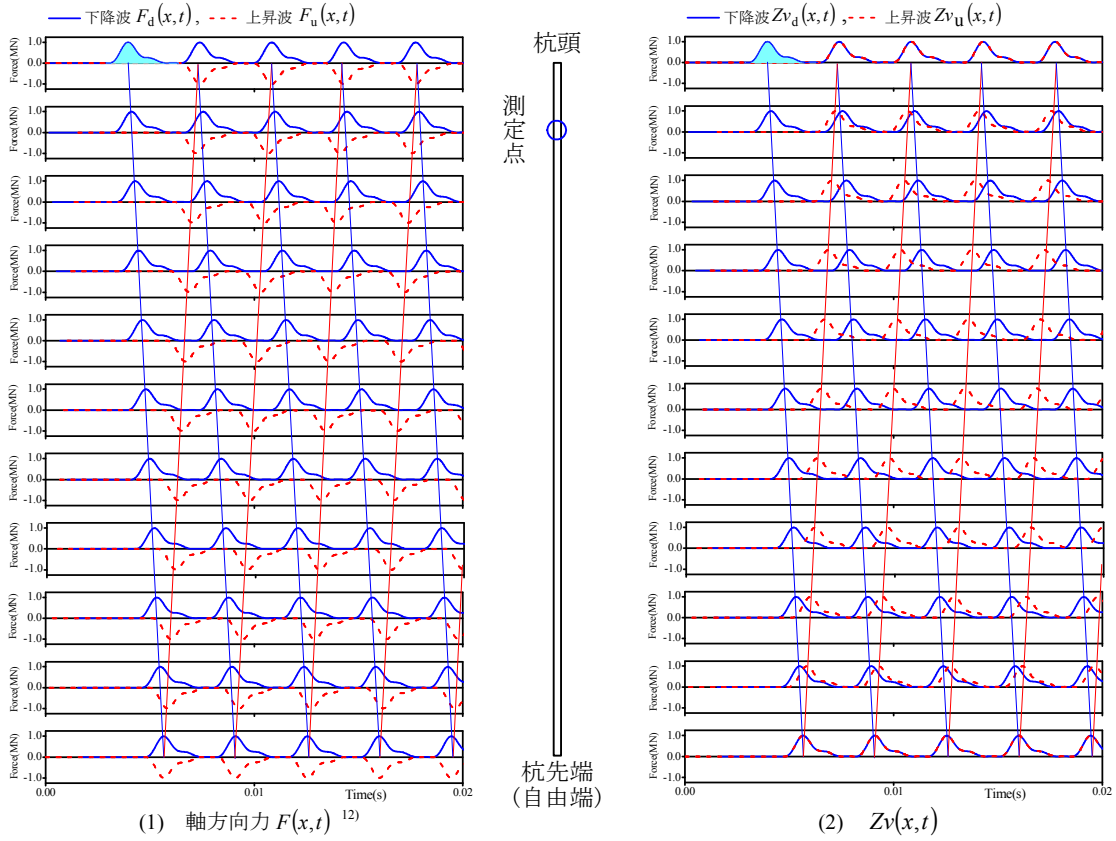


図 11 CASE1 (杭頭および杭先端：自由端) の波動伝播のイメージ

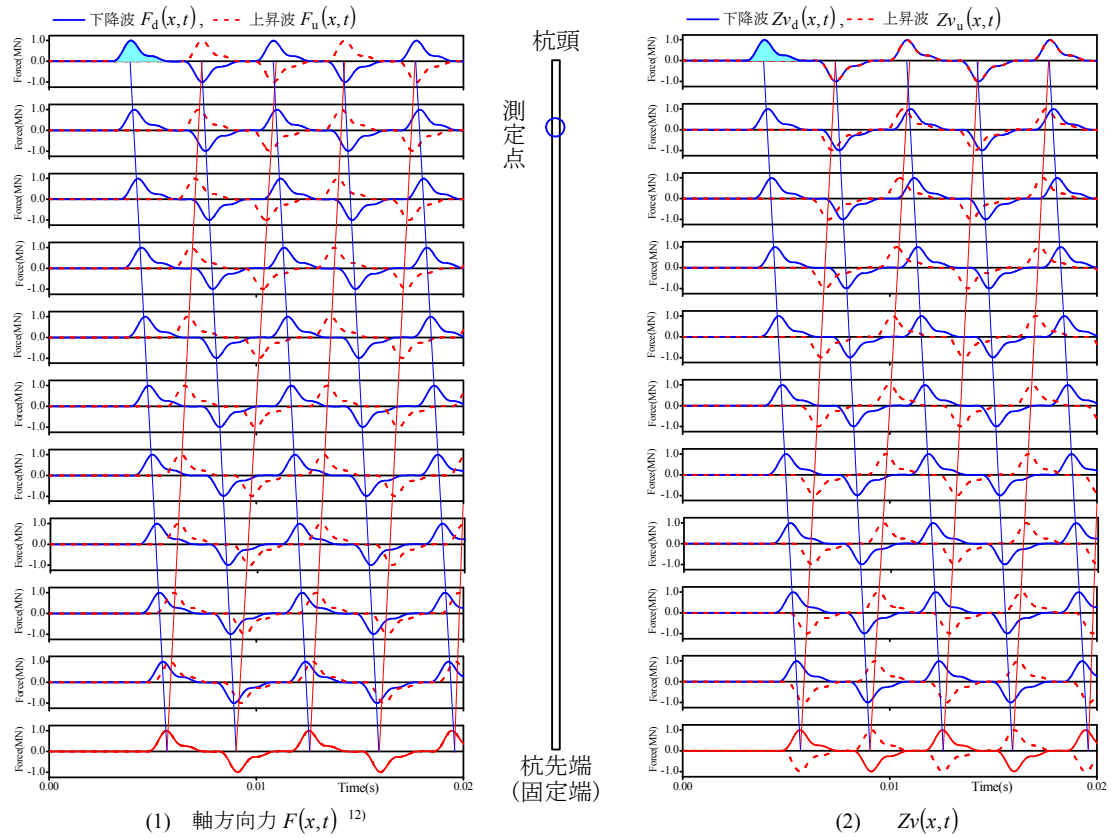


図 12 CASE2 (杭頭：自由端, 杭先端：固定端) の波動伝播のイメージ

上昇波を赤の破線で示した。鋼管杭内に杭を立てかけて衝撃載荷試験を行ったため、杭周面の地盤抵抗が無く、打撃力が下降波としてそのまま伝播し、杭先端および杭頭で反射が生じている。したがって、CASE1（杭先端自由端）の測定位置の軸方向力は、図 11(1)の上から 2 番目の青の実線（下降波 $F_d(x,t)$ ）と赤の破線（上昇波 $F_u(x,t)$ ）を加算した軸方向力で、図 13(1)に示す。同様に、CASE2（杭先端固定端）の測定位置の軸方向力は、図 12(1)の上から 2 番目の青の実線（下降波 $F_d(x,t)$ ）と赤の破線（上昇波 $F_u(x,t)$ ）を加算した軸方向力で、図 13(2)に示す。

図 8 の一番上の測定位置の軸方向力 $F_m(x_0,t)$ と上記のシミュレーション結果を、最大値を 1MN として基準化したのが図 13(1), (2)であるが、この結果、図 13(1)に示すように測定位置の軸方向力 $F_m(x_0,t)$ は CASE1 と一致することが確認できた。このことから、図 4 で示した装置の杭先端の境界条件は、自由端に近いことが確認される。この理由は、衝撃載荷試験の基礎研究のために、鋼管杭に立てこんだ試験杭を繰り返し打撃したことで、鋼管先端部のセメントミルクを破壊したためと推測する。実際に杭頭を重錘で打撃すると、杭の沈下が目視で確認できる状態であった。

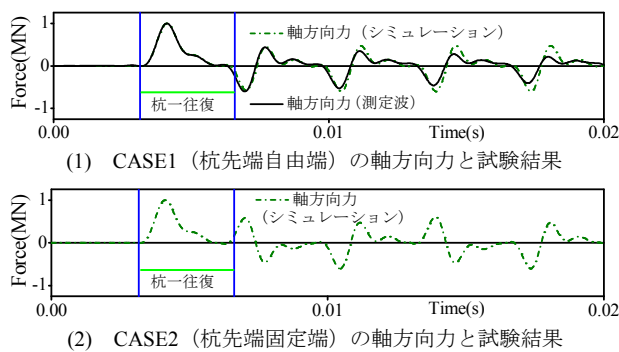


図 13 測定波とシミュレーション波との比較

図 8 に衝撃載荷試験データを示すが、一番上の軸方向力 $F_m(x_0,t)$ 、二番目の $Z \cdot v_m(x_0,t)$ および 3 番目の軸方向力の下降波 $F_d(x,t)$ の第一波は、一番下の打撃力そのものである。これは、図 11, 12 から判るのように、単杭の杭長を長くしたことおよび杭周面抵抗の無いモデルとしたことにより、測定位置の第一波で下降波と上昇波が重ならないためである。以上より、打撃力を求める式(7)の妥当性が確認できたと考える。

応答解析の繰り返し計算を行い、計算対象波が測定対象波に合致することで地盤抵抗を同定させるには、入力波は地盤抵抗に影響されない波でなければならない。図 11, 12 の比較より、打撃力は解析の境界条件に影響されない唯一の波であることが確認される。すなわち、入力波は打撃力でなければならないことになる。

8. 波形マッチング解析システムの比較

杭の鉛直載荷試験で、日本で開発された波形マッチング解析法の先駆者のソフトに、dWAVE¹⁴⁾および KWAVE¹⁵⁾がある。前者はマッチング解析に差分法を用いており、後者は、

特性曲線法¹²⁾¹⁵⁾、差分法¹⁶⁾およびマトリックス法 (Kwave-Hybrid)⁷⁾のバージョンがある。dWAVE と特性曲線法の KWAVE の入力波に違いがあり、前者は杭頭の打撃力（原因）であるが、後者は測定位置の下降波（結果）で、両者の入力波の違いが、順応答解析と逆応答解析の差になっている。両者はそれぞれの解法に対応したアルゴリズムが構築されている。ところが dWAVE は、杭頭の打撃力（軸方向力）を測定位置の軸方向力（下降波 + 上昇波）で代用して解析している。杭長に比べて測定位置の深さは無視できそうにも思えるが、図 11, 12 の杭頭の軸方向力（打撃力）と測定位置の軸方向力（下降波 + 上昇波）を比較すれば、この 2 波が等価でないことは明らかである。なお、筆者らの開発した、HITTOP³⁾、差分法の KWAVE¹⁶⁾およびマトリックス法の Kwave-Hybrid⁷⁾の入力波は、式(7)で算出した杭頭の打撃力を用いており、これ等の波形マッチング解析は順応答解析である。一方、前記した通り従来の特性曲線法、例えば特性曲線法の KWAVE、は逆応答解析であり、非適切性等の弊害の生じる恐れがある。

9. マッチングに用いる対象波

波形マッチング解析に用いる対象波には何を採用すべきかを考察する。解析の対象波としては、測定波の軸方向力または粒子速度、軸方向力の下降波または上昇波、粒子速度の下降波または上昇波の 6 種類、あるいはこれ等の複数個の波を用いること等が考えられる。図 11, 12 から、測定波の軸方向力または粒子速度は、下降波と上昇波が混在するために地盤抵抗の変化に敏感でないことが判る。すなわち、杭の機械インピーダンスおよび地盤抵抗の変化で生じる、軸方向力または粒子速度の上昇波を対象波とすることで、地盤抵抗の同定が容易となる。

一方、これらの上昇波には次の関係がある。

$$F_u(x,t) = -Z \cdot v_u(x,t) \quad (8)$$

式(8)より波形マッチングに用いる対象波は、軸方向力または粒子速度のどちらか一方の上昇波を選択すれば良いことになる。筆者らは、対象波に打撃力と同次元同位置の $F_u(0,t)$ を推奨する。

10. 衝撃載荷試験システムの検証

小嶋らは、図 4 の装置で試験杭の先端に弾性ゴムを敷き、押し込み試験および衝撃載荷試験の比較から、開発システム (HITTOP) の検証³⁾を行っている。

江川ら¹⁷⁾は、本システムを用いて、北海道の火山灰地盤の必要養生期間を砂質土地盤と同程度であると報告している。また、衝撃載荷試験と押し込み試験を同一地盤で行い、衝撃載荷試験でセットアップに十分な養生期間をとれば、両者の杭頭の荷重—変位量関係に良い一致が見られたと報告している。

富澤ら¹⁸⁾は、本システムの衝撃載荷試験と標準貫入試験および電気式コーン試験とを 8 現場で対比し、これらの試

験結果に高い相関性のあることを報告している。

筆者らは、本ノートで、開発したシステムを用いて、測定点の粒子速度およびひずみ波形から、測定点の軸方向力を下降波と上昇波に分離し、この両波を杭頭に戻すことで、杭頭の軸方向力すなわち打撃力を求めることを実証したと考えている。

11. おわりに

杭の衝撃載荷試験における波形マッチング解析法の杭・地盤モデルは、杭の諸元を既知とし、地盤抵抗を未知のパラメータとして扱っている。同解析法は、解析対象波が測定対象波とマッチングするように、地盤抵抗を同定させる手法である。筆者らは衝撃載荷試験のシステム開発のために検証試験を行い、以下のことを考察した。

- (1) 学会基準の測定位置は杭径の1.5倍以上とし、杭周上の点対称のデータを加算平均としているが、この評価方法を行えば重錘の偏打の影響を除去することが可能である。
- (2) 地中に施工された杭の伝播速度は、横積みされた杭単体とほぼ等価とみなして良い。
- (3) 打撃力は杭頭の軸方向力として算定可能である。測定した波動から打撃力を求めるには、測定位置の軸方向力を下降波と上昇波に分離し、これらの波から杭頭の軸方向力の下降波と上昇波を求め、これらを加算すれば良い。
- (4) 波形マッチング解析の入力波には、解析で地盤抵抗を変化させても不変である打撃力を用いるべきである。
- (5) 波形マッチング解析の応答解析には順応答解析と逆応答解析がある。順応答解析は未知の地盤抵抗を同定するため、逆解析的にみえるが、打撃力(原因)から応答の波動(結果)を求める順応答解析(順解析)を用いて地盤諸元を同定する解析である。しかし、特性曲線法のKWAVEは、応答の波動(結果)から別の応答の波動(結果)を求める逆応答解析(逆解析)を用いて地盤諸元を同定する解析で、解の存在性、解の一意性および解の連続性等に関する非適切性および波形マッチング解析に逆応答解析を用いることによる弊害の生じる恐れがある。
- (6) 従来の逆応答解析の特性曲線法は、入力波を杭頭の打撃力として構築すれば容易に順応答解析となる。そこで筆者らは、逆応答解析ではなく順応答解析の特性曲線法を用いるべきと提言¹²⁾する。
- (7) 筆者らは、対象波は地盤抵抗の変化に敏感な上昇波を用いるべきと考え、入力波と同じ力の次の $F_u(0, t)$ を推奨する。

謝 辞

本ノートをまとめるに当たり、早稲田大学理工学術院総合研究所(理工学研究所)山田真教授、土木研究所寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ寒地地盤チーム富澤幸一主任研究員には、非常に貴重なご意見を頂きました。末尾ながら、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松本樹典：鋼管杭の動的および静的支持力特性評価に関する研究，金沢大学学位論文，1988。
- 2) 地盤工学会：地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説(第1回改訂版)，pp.227-244，2002。
- 3) 小嶋英治，桑山晋一：杭の衝撃荷試験システム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。
- 4) 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(東海)，構造 B-1，pp.561-562，2003。
- 5) 土木学会 応用力学委員会 逆問題小委員会 委員長 村上章：土木工学における逆解析入門，丸善株，2000。
- 6) 富澤幸一，小嶋英治：衝撃載荷試験に基づく鋼管矢板の継ぎ手管特性，第38回地盤工学研究発表会講演集，pp.1613-1614，2003。
- 7) 小嶋英治，熊谷裕道，富澤幸一，松本樹典：動的水平載荷試験による鋼管杭の静的な荷重一変位関係の推定，地盤工学ジャーナル，vol.5，No.4，pp.555-568，1989。
- 8) 登坂宣好，大西和榮，山本昌宏，逆問題の数理と解法 偏微分方程式の逆解析，東京大学出版，1999。
- 9) Smith, E. A. L, Pile driving analysis by the wave equation, J. Soil Mech. Found., Div., ASCE, Vol. 86, No. SM4, pp.35-61, 1960。
- 10) 本間裕介，小嶋英治，桑山晋一，二見智子：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会講演集，pp.1925-1926，2003。
- 11) 山本辰則，桑山晋一，小嶋英治：衝撃載荷試験に用いる杭の縦波伝播速度に関する検討，第43回地盤工学研究発表会，pp.1161-1162，2008。
- 12) 小嶋英治，松本樹典：杭の衝撃載荷試験の波動解析に用いる入力波の検討(その2)，地盤工学研究発表会，pp.1157-1158，2008。
- 13) 小嶋英治，熊谷裕道，遠藤勝美，江川拓也，富澤幸一，宮坂享明：ハイブリッドクッションを用いた衝撃載荷試験例，土木学会第63回年次学術講演会，pp.275-276，2008。
- 14) 境友昭，西村真二，小山信夫，沖健，川端規之：杭の支持力の動的測定技術の開発(9) DWAVE 解析法の理論，第26回土質工学研究会講演集，2-2，pp.1319-1320，1991。
- 15) 松本樹典，西田義親，武井正孝：動的計測による杭の動的挙動の評価法と応力波動解析プログラム KWAKE，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，pp.107-110，1989。
- 16) 脇坂誉志，小嶋英治，松本樹典，桑山晋一：断面変化を考慮した一次元波動解析(その1:検証解析)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，pp.533-534，2004。
- 17) 江川拓也，西本聡，富澤幸一：打ち込み鋼管杭の動的・静的鉛直載荷試験結果の比較検証，第40回地盤工学研究発表会，pp.1531-1532，2005。
- 18) 富澤幸一，三浦清一：火山灰地盤における杭基礎の支持力特性に関する研究，土木学会論文集 C，土木学会，Vol.63 No.1，pp.115-139，2007。

(2011.12.16 受付)

Verification of Analysis of Signal Matching and Measuring Method on Dynamic Loading Test of Single Piles

Eiji KOJIMA¹ and Shinichi KUWAYAMA²

- 1 Kojima Eiji Consulting Engineer Office
Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
- 2 Foundation Structure Design, JAPAN PILE CORPORATION Kansai Office

Abstract

Studies of dynamic loading tests of single piles with many achievements have started for more than 200 year. However, researches on analysis of the signal matching on dynamic loading tests using input waves and object waves, have been so rarely presented till now. Therefore, this paper presents the study on calculation method of the striking force by using the pile and the soil model, on the assumption that there is no reaction force occurring except for the pile-head and the pile-end. The authors simulate this model by using real dimensions of piles to determine the propagation of one-dimensional waves of the striking force. After that the authors investigate what kinds of wave-forms are suitable between the input waves and the object waves for the signal matching analysis. Moreover, the signal matching analysis methods for the dynamic loading tests are classified into two types, the former, the ordinal response analysis method and the latter, the inverse one. So the authors suggest the ordinary response analysis method because there is a possibility of occurring a lot of ill-posed problems of a solution in the inverse response analysis method.

Key words: pile, vertical direction, dynamic load test, input wave, inverse analysis, ill-posedness of solution