

地盤中に貫入される杭体の振動挙動のパターン化

小川充郎¹・坪井英夫²・松井 保³

¹正会員 不動産建設株式会社 (〒541 大阪市中央区平野町4-2-16)

²正会員 工修 不動産建設株式会社 (〒541 大阪市中央区平野町4-2-16)

³正会員 工博 大阪大学工学部教授 (〒565 吹田市山田丘2-1)

地盤中にケーシング等の杭体を振動貫入していく際の挙動について、従来、余り明確に議論されずに、実施工が行われている状況にある。本論文では、地盤改良用砂杭用閉端ケーシングを貫入杭体とみなし、これに先端反力計と振動加速度計を装着し、地盤に貫入した時の計測システムを開発した。さらに、種々の実地盤で実際に計測した事例を示すとともに、得られた計測結果に基づいて貫入杭体の振動挙動を検討した結果、地盤の特性に応じて反力波形の挙動が5つのパターンに大きく分類できることが判明した。

Key Words : bearing capacity, classification, penetration pile, vibrating motion, vibro penetration

1. はじめに

杭またはその類似物の振動による地盤中への打ち込みに関する研究は、1930年初頭にドイツの一企業の特許出願によって始まっている¹⁾。その後、振動を用いる基礎工事が広く知られるようになったのは、1957年の第4回国際土質基礎会議(ロンドン)において発表された旧ソ連の Barkan の論文²⁾である。すなわち、杭などの貫入体を地盤中に貫入させるために、振動力を利用する実用的研究は旧ソ連によって積極的になされ、Barkan²⁾は、実験に基づいて、貫入体の鉛直振動は周面摩擦を著しく低減させる効果があることを示している。

1960年代後半には、Schmidt and Hill³⁾、Bernhard⁴⁾、Schmidt and Geharamani⁵⁾らの振動杭打ち研究の一連の基礎実験がなされた。その後、1980年代には、Rodger and Littlejohn⁶⁾の粒状土に対する振動杭打ちの研究が実施され、また、O'Neill and Viplunandam⁷⁾は大規模な室内試験を行い、振動杭打ちと衝撃杭打ちとの比較を行っている。

一方、我国では、1959年の建設省建設工業技術研究所による振動機開発がスタートとなり、その後、旧ソ連より振動機が輸入され、新しい杭打ち工法として多くの振動機が開発された。1963年には、日本で最初の大口径鋼管杭(直径1m)の打ち込みが琵琶湖大橋の橋脚基礎の施工に採用された。その後、地盤中に砂材料を打設するサンドコンパクションパイルの造成の適用に主力がおかれ、高能率に実施工ができ、かつ耐久性のある振動機が開発されていった。しかしながら、これらの振動貫入体のメカニズム

については、詳細に議論することなく実施工に重点が置かれ、いかに耐振性と耐久性をもった機械を製作していくかという点がもっぱら開発の主眼となっている。したがって、振動貫入体の挙動を地盤との相互作用としてとらえた研究は、今のところ見あたらないのが現状である。

本論文は、このような状況の中で基本に立ち戻り、地盤中に貫入される杭体の振動挙動を体系化することを目標としている。すなわち、地盤中の振動貫入体の挙動を計測する技術システムを開発するとともに、貫入杭体に装着されたセンサー(地盤反力計、振動加速度計)から得られる膨大な時系列毎の計測結果を整理分析することによって、振動杭体(閉端ケーシング)の振動挙動を検討し、考察するものである。

2. 貫入杭体の振動挙動の計測システムの開発

ケーシングなどの貫入杭体を振動を利用して地盤中に貫入していく用途として、杭や矢板の打ち込み、地盤改良用ケーシングの打ち込み、あるいはセル体の打ち込みなどがある。ここでは、貫入杭体として地盤改良用閉端ケーシングを想定している。地盤改良用ケーシングの先端部分に、特に製作した外径の等しい薄厚の中空反力計を装着し、貫入時刻毎のケーシングの軌跡、先端反力波形、振動加速度、振動変位振幅、消費電力などを計測するシステムを開発した。本節では、これらの計測内容とその処理方法、および砂質地盤と粘性土地盤における計測事例について述べる。

(1) 計測方法とデータ処理

地盤中の貫入杭体の振動挙動の計測は、図-1に示すような地盤改良用閉端ケーシングの先端部分に、外径が等しい薄厚中空反力計を取り付け、各時間毎に荷重反力、振動加速度、貫入時間などを記録することによって行われる。計測システムの概要を図-2に示す。

最近のデジタル計測の進歩により、図-2に示すように、GL計 (Ground level meter, 管先端深度計)、管内充填砂のレベル計 (砂面計, SL計)、管内空気圧計、先端反力計、加速度計、振動ピックアップ (振幅計) などからくるアナログ信号は、A-D変換器によってデジタル信号に変換される。キャリブレーションにより物理量に校正し、すべてのデータを5 msec毎にハードディスク・メモリーに記憶させ、モニターに画面表示する。通常の解析では、10 cm 貫入毎の平均データが必要となるので、以下に示すように1次処理し、相互の相関性を分析するため、2次処理解析プログラムを介して、時間的経過記録を深さ当たりに対して記録表示する。

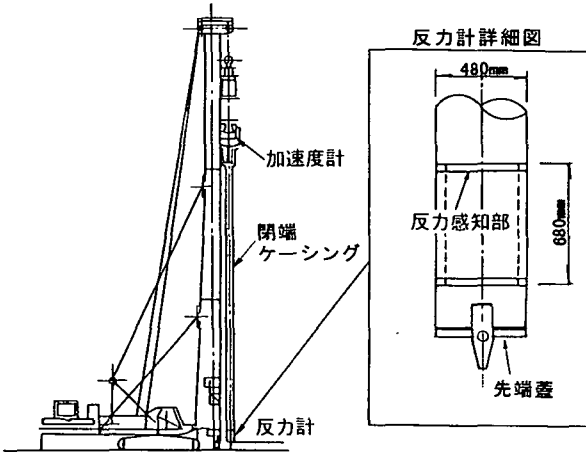


図-1 貫入杭体先端部の中空反力計

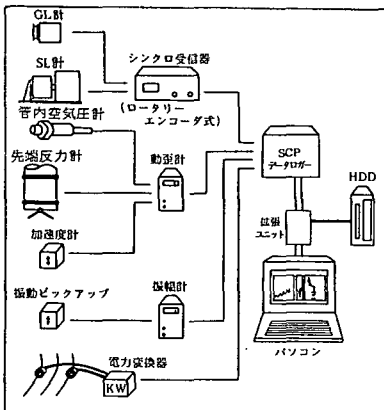


図-2 計測システムとデータ処理システム

a) 1次処理

計測システムにより収録した全てのデータ値 (以下因子と呼ぶ) を、深度 (GL) の指定間隔で加工し、フロッピー等に再度記録しておく。図-3に示すような基本因子 (SL, Fa, ...) はそれぞれの設定深度間隔 (例えば 10 cm) において、同図に示す処理パターンで処理される。さらに、設定深度区間での所要時間 (dt), 累積時間 (Σt), 平均速度 (v) などの加工因子を求めておき、記憶させておく。1次処理データから貫入 10 cm 区間毎の値として、ピーク値や平均値などの数値データとして同様に記憶させる。

b) 2次処理

1次処理されたデータから各種振動パラメータの深度解析図および相関解析図を作成する。貫入速度は、深度-時間曲線がGL計によって得られているので、この曲線の勾配より求める。この際、貫入量 Zi (cm) 毎に要する時間 Tzi (sec), すなわち時間・貫入比 Tzi/Zi (sec/cm) を定義する。したがって、貫入速度は時間・貫入比の逆数となる。なお本論文では、貫入 10cm 区間毎の値を数値データとして記憶しているため、10 cm 毎の貫入所要時間 T10 (sec) を用いることにする。

以下に、計測項目と計測方法を説明する。

- ①貫入速度：貫入杭体の上下運動に連動したワイヤのプリーによる回転量を深度と相関させて深さ毎に計測する。したがって、深度計より Zi (cm) を計測すれば次式によって求められる。

$$v = Zi / Tzi \text{ (cm/sec)}$$

本論文では、Zi=10 cm として次式を適用する。

$$v = 10 / T10 \text{ (cm/sec)}$$

- ②振動加速度：ピックアップ (圧電式加速度計) によりデジタル計測する。
- ③振動変位振幅：ピックアップによりデジタル計測する。
- ④消費電力：電流 I (アンペア), 電圧 V (ボルト) の測定値から、次式を用いて求める。

$$E = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cos \phi \text{ (kW)}$$

$$\phi : \text{位相差} (\cos \phi = 0.8)$$

- ⑤先端反力：貫入杭体先端部に取付けられた中空反力計 (容量 50 tf, 最大150 tf) により計測する。

その他、貫入杭体内に充填する砂の投入、排出に追従する砂面計、貫入杭体先端の軌跡を追従するGL計のデータがある。

なお、これらの計測値は、図-3に示す波形のよう

	基本因子					加工因子		
	SL	Fd	α	KW	A	dt	Σt	v
処理パターン	正ピークの最大値	○	○	○	○			
	負ピークの最大値	○	○	○	○			
	正負ピークの最大値	○	○	○	○			
	正ピークの平均値	○	○	○	○			
	負ピークの平均値	○	○	○	○			
	区間の積分	-	○	○	○	○		

GL : 深度
 SL : 砂面レベル
 Fd : 先端反力
 α : 加速度
 KW : 電力
 A : 振幅
 dt : 所要時間
 Σt : 累積時間
 v : 平均速度

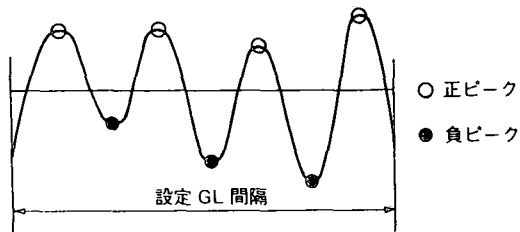


図-3 波形のピーク値の定義と各因子の処理パターン

に杭体の貫入に伴って時間的経過とともに変動するので、振動加速度については下向き最大の値、先端反力については最大正のピーク値を示すものとする。

(2) 砂質地盤への貫入計測事例

図-4に示す地盤特性を持つ砂質地盤(Site-A)に、直径 48 cm の貫入杭体が振動機タイプ V-75 (起振力 $F_0=39.4\text{tf}$) と V-150 (起振力 $F_0=67.6\text{tf}$) によって打込まれた。図-5に貫入・時間曲線を示す。表層約 4 m の比較的 N 値が大きい箇所 (図-4参照) では、貫入・時間曲線において、機械の容量の差が顕著に現れている。つまり、容量の小さい振動機 (V-75) では、地盤の抵抗が大きく、貫入時間は非常に大きくなる。一方、図-6は、杭貫入時の地盤の先端反力 (F_d) と振動加速度 (α) および 10 cm あたりの貫入時間すなわち時間・貫入比 T_{10} を比較して示したものである。両者は比較的良好に対応しており、N 値が大きい表層約 4 m ではともに大きな値を示すことが確認できる。図-7は、先端反力と振動加速度、先端反力と時間・貫入比 T_{10} および振動加速度と時間・貫入比 T_{10} の相関関係が振動機の容量によって大きく変わるが、各々は正の相関があることを示している。

図-8は、ほぼ同一とみなされる時間・貫入比を示す深度 7.5~10 m における先端反力と振動加速度の関係を示したものである。同図より、同一時点で同一時間・貫入比でも、先端反力および振動加速度が振動機の容量により大きく相違することがわかる。

図-9は、よく締まった砂質地盤(Site-B)に大型振動機 (V-150) によって直径 48 cm の貫入杭体を貫

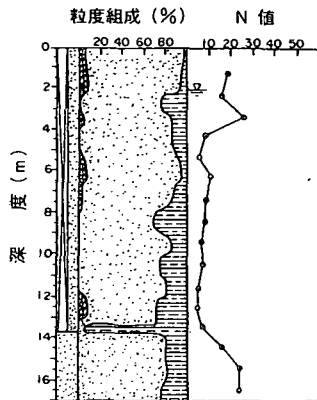


図-4 砂質地盤の粒度組成と柱状図(Site-A)

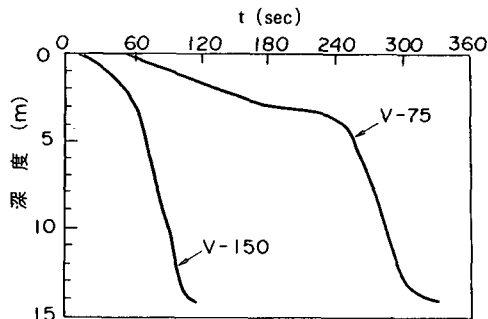


図-5 貫入・時間曲線(砂質地盤,V-75,V-150)

入させたときの 2 地点での記録である。ここでは、時間・貫入比および消費電力が計測された。

図-10は、シルト質細砂を含む埋立地盤(Site-C)の事例であり、直径 48 cm の貫入杭体を V-75 振動機で打ち込んだときの記録である。同図には、貫入・時間曲線および N 値と先端反力による推定 N 値 (N_F 値) を示している。なお、 N_F 値は先端反力 F_d の値に補正換算係数 $k=0.57$ を乗じて推定した N 値であり、 k の値はフィッティングによって求めた。図-11に、先端反力、振動加速度、消費電力および時間・貫入比 T_{10} の深度分布を示す。それぞれの深度分布は、パターン的に同一傾向を示していることが分かる。図-12は、深度 3~10 m 区間における先端反力と振動加速度との関係である。表-2は、各パラメータ間の相互相関分析結果を 4 深度区間について示したものである。同表によれば、細砂では先端反力と加速度の関係が比較的相関が良く、シルトなどはすべてのパラメータに対して相関が良い。シルト質細砂では先端反力と加速度、消費電力と相関が良い。これらより、同事例では先端反力と加速度の相関が良いことを示している。

したがって、このようなシルトを含む砂質地盤における先端反力が振動により大きく変化を受ける事例が多いことを示唆している。

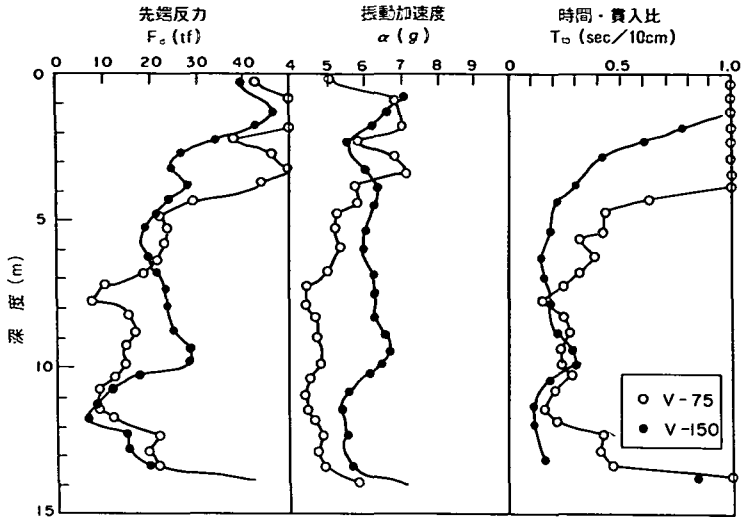


図-6 砂質地盤への貫入状況の比較(先端反力, 振動加速度, 時間・貫入比) (Site-A)

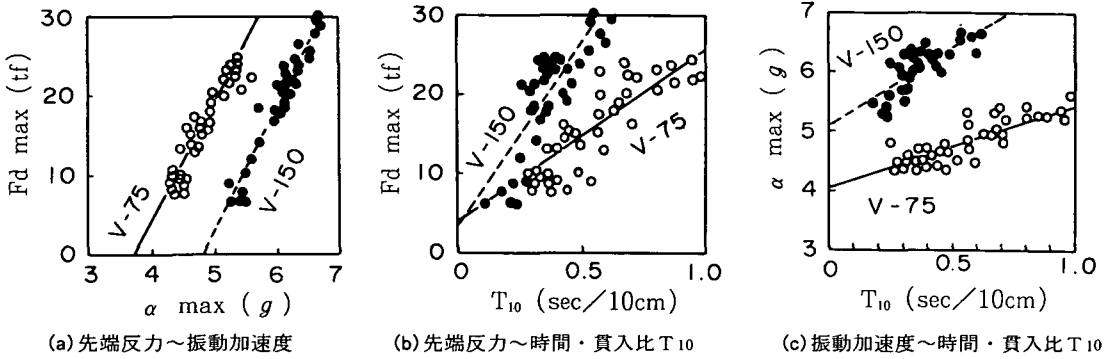


図-7 振動機の容量差による各相関関係の比較(V-75, V-150)

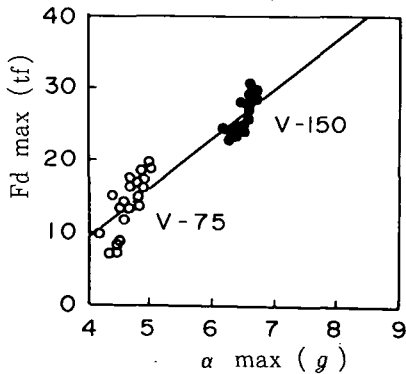


図-8 同一時間・貫入比における先端反力と振動加速度の関係(Site-A)

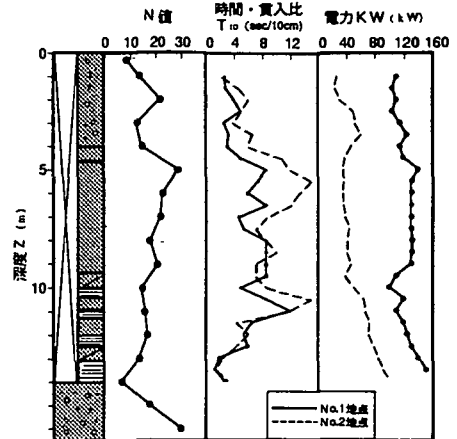


図-9 密な砂質地盤への貫入状況(Site-B)

(3) 粘性土地盤への貫入計測事例

粘性土地盤では、粘土の強度に比較して振動機の容量が大きいため、貫入杭体の自重以下の反力しか計測されない場合が大部分である。言い換えれば、

貫入杭体を鉛直上方に吊りながら貫入させる、いわゆる吊り規制貫入となるのが一般的である。これは、対象となる粘土層における一般的な静的接地圧が約

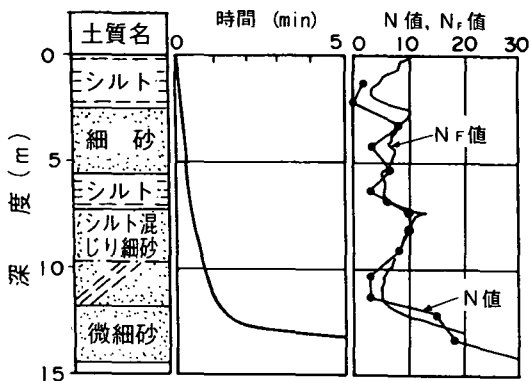


図-10 埋立地盤への貫入状況(Site-C)

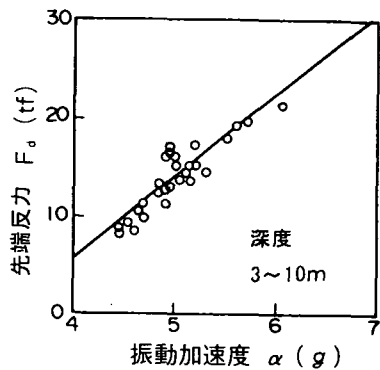


図-12 先端反力と振動加速度との関係(Site-C)

表-2 各パラメータの相関分析(Site-C)

深度(m)	土質	$(F_d \sim \alpha)$	$(F_d \sim KW)$	$(F_d \sim T_{10})$	$(\alpha \sim KW)$
2.5-5.5	細砂	0.802	0.767	0.707	0.537
5.5-7.5	シルト	0.850	0.943	0.950	0.953
7.5-11.5	シルト混じり細砂	0.850	0.862	0.425	0.581
11.5-14.0	微細砂	0.778	0.334	0.511	0.866

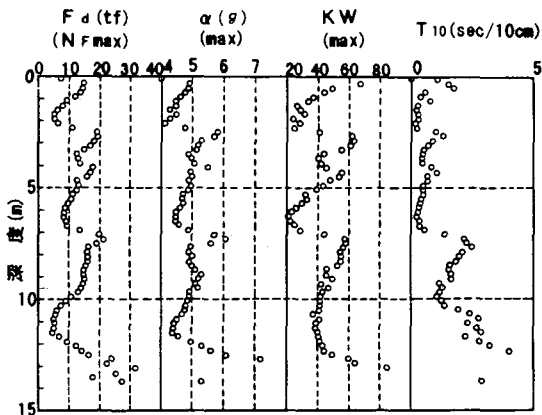


図-11 先端反力, 振動加速度, 消費電力および時間・貫入比 T_{10} の深度分布(Site-C)

5~15 kgf/cm² 程度であり, 一方, 動的先端応力が約 10~100 kgf/cm² 程度で静的な場合の10倍程度にもなることによっている. この為, 粘性土地盤のみによる計測反力は記録されないことになる. ここでは, 図-13に示すように, 表層に砂層を含む粘性土地盤への貫入計測事例を示す. 同図によると, 地表部の砂層以外の粘性土地盤では, 振動杭の自重以下の反力しか計測されず, 砂地盤と大きく異なっている.

3. 貫入杭体の振動挙動のパターン化

貫入杭体が地盤中に貫入していく場合, 杭に作用する先端反力は地盤の貫入変形に対する抵抗力としてあらわれる. 振動する杭体のもつエネルギーはこの変形のために費やされ, 変形に要する時間により衝突力, すなわち先端反力の大きさが決まる. つま

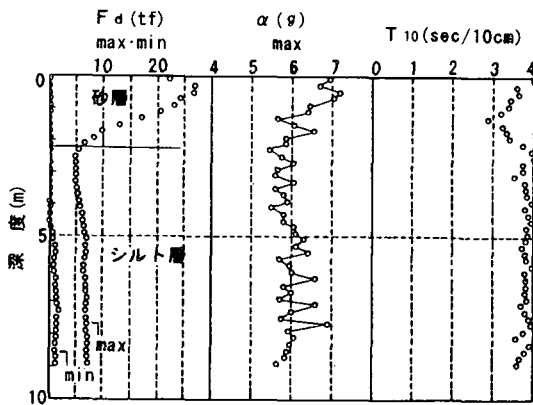


図-13 粘性土地盤への貫入状況(Site-D)

り, 衝突力は衝突時間と関係があるので, 貫入量が衝突力によって決まるのではなく, 貫入エネルギーによって決まる. したがって, 一般的に貫入に要する時間が決まれば, 最大先端反力が決定されることになる.

従来, このような振動中の杭体先端反力を詳細に調査した事例はなく, その波形自体について整理したものはないのが現状である. そこで, 前述した種々の地盤への貫入計測事例から, 地盤柱状図などを

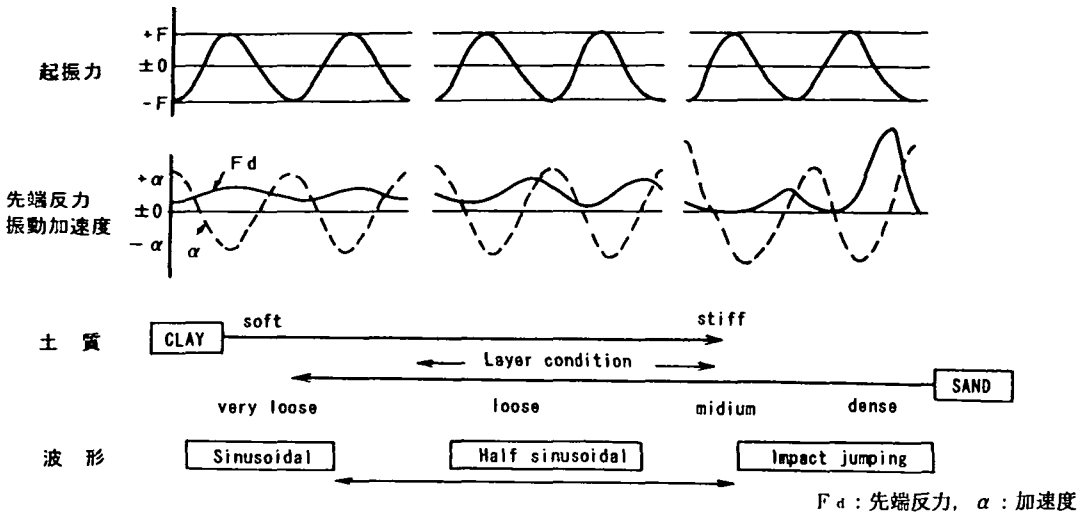


図-14 地盤と起振力波形および先端反力波形の位相との関係

参考にして杭体の先端反力波形の各土層毎のデータを分析することによって、起振力点の波形と先端反力波形の一般的な関係として図-14が得られる。同図から分かるように、先端反力波形は、地盤の種類および力学的特性により変化し、起振力により地盤の反発を受け、振動杭体には、振動加速度による慣性力が発生する。したがって、慣性重量、貫入速度、および地盤の抵抗により加速度波形における大きさと位相が変化し、その表れ方が変わること示している。先端反力波形のこれらの変化については、振動杭体が地盤中に貫入する際、図-15に示す5つの波形に大きく分類される。以下、それぞれについて説明する。

(1) 正弦波領域 (Sinusoidal force domain)

(図-15(a) 参照)

軟弱な粘土層や緩いシルト混じり砂層において記録されることが多く、正弦波の平均先端反力が自重を越えない場合がこれに相当する。このような場合、貫入速度が問題になり、自由落下に近い貫入状態になるので、貫入杭体を支える吊りワイヤーの巻き上げ抵抗を効かせるか、ブレーキを作動させ貫入を規制することになる。貫入規制が大きいほど振動体が空中で支持されるアイドリング状態に近い振動状態で杭体は降下する。このとき、振動杭体の変位振動と起振機の回転位相とはほぼ 180° ずれることになる。このとき、先端反力の最大値は下向き加速度の最大値と、先端反力の最小値は上向き加速度の最大値とそれぞれほぼ対応する。したがって、起振力と慣性力は相殺し、先端反力としては自重のみが残り、貫入速度の大きさにより地盤中に保有している粘性

抵抗分が現れる。

(2) 半正弦波領域 (Half-sinusoidal force domain)

(図-15(b) 参照)

地盤の抵抗が振動杭体の自重より大きくなる程、先端抵抗の最大値は徐々に大きくなり、最小値は漸次ゼロに近づく。粘性土または下層に粘性土がある時は、振動波形がより正弦波的になるが、最小値はゼロにはならない。振動杭体の先端影響範囲が砂質土の場合には限りなくゼロに近づくが、ある平均値までは最大値が均等波形になって上昇し、最小先端反力はゼロとなる。

(3) 衝撃跳躍領域 (Impact jumping domain)

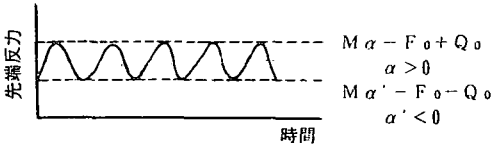
(図-15(c) 参照)

この領域では、最大先端反力がある値を越えると、図-15(b)で見られた均等波形に変化が見られる。これは、均等波形の最大値を中心にして小波形と大波形に交互に変化する。それぞれの波の位相時間に多少の変化が生じているためと考えられる。振動加速度波形も同様な挙動をするが、下向き加速度ほど変化はしない。この変化が始まる状態は、半正弦波振動が衝撃跳躍振動を始める閾値 (impact threshold value) であり、それ以後、貫入抵抗が大きくなると最大値と最小値の差が大きくなり、2~3サイクルを一对とする波形の反復となり、Hop-Step-Jump型の反力波形となる。

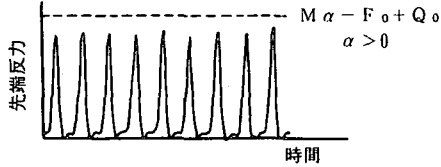
(4) 不安定跳躍領域 (Unstable jumping domain)

(図-15(d) 参照)

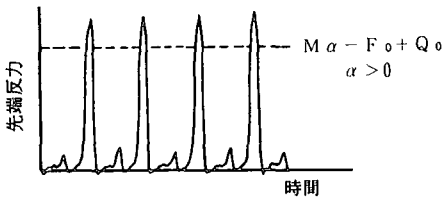
貫入時の抵抗がさらに大きくなると、Hop-Step-



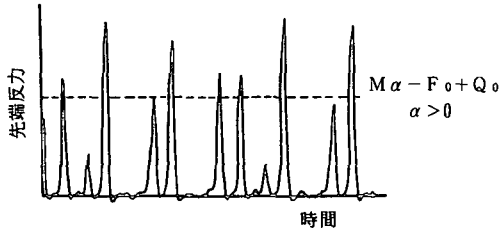
(a) 正弦波領域 (Sinusoidal force domain)



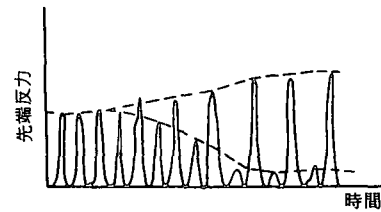
(b) 半正弦波領域 (Half-sinusoidal force domain)



(c) 衝撃跳躍領域 (Impact jumping domain)



(d) 不安定跳躍領域 (Unstable jumping domain)



(e) 転移領域 (Transition period domain)

$M\alpha$:慣性力, F_0 :起振力, Q_0 :杭体の総重量
 α :下向き加速度, α' :上向き加速度

図-15 先端反力波形の分類

Jump型が乱れ波形になり、不安定になる。さらに固い地盤になると、反発がより顕著になり、変位振動数と接地衝突数が1:1の反応をしない状態になる。地盤と振動杭体の衝突は数振動回数毎に発生するようになる周期的間欠衝突の状態になる。このよ

うな状態は、下限および上限衝撃閾値 (lower and upper threshold values) といえる。この領域は先端排除断面が大きい排除杭の場合にはほとんどみられないが、断面の比較的小さい開端鋼管杭やH杭などを軟岩へ貫入させる場合に見られる。

(5) 転移領域 (Transition period domain)

(図-15(e)参照)

先端反力波形応答が半正弦波～衝撃・跳躍から、衝撃・跳躍～半正弦波に転移する転移領域が見られる。これは、地層の変化や地盤強度の変化で先端の影響範囲が平均地盤強度の影響を受けてくることによるものと考えられる。先端反力の波形と振動加速度(慣性力)との位相差は砂層においてあまりなく、粘性土層では180°変化する。砂層から粘性土層への転移区間では、徐々に位相のずれが生じ、貫入抵抗との関係で貫入速度が決まり、正弦波的波形が生じる。

4. 貫入杭体の振動挙動の計測事例

前章で述べたように、貫入杭体の振動挙動は大きく5つに分類される。本章では、実際に砂質地盤における計測事例をもとに得られた振動波形を考察する。

図-16は衝撃閾値の始まる時点での先端反力、振動加速度および振動変位振幅の実測例である。まず、12 サイクルから変動が生じており、つぎに図-17および18に示すような Hop-Step 型や Hop-Step-Jump 型振動性状を示し、ついでには図-19で示すような不安定振動に至る。この状態では、先端反力ピーク値はもはや地盤強度と比例せず、大きく変動している。このような跳躍特性については、標準砂を用いた室内模型地盤における振幅の比較的小さい杭貫入実験⁵⁾によっても、Hop-Step 型の先端反力波形が得られるので、砂質地盤特有のものであると考えられる。

図-20は起振機 V-75 および V-150 によって実測した先端反力ピーク値 F_p と平均値 F_m との関係を示したものである。これらの実測例に基づいて模式的に示したものが図-21である。自重 Q_0 、起振力 F_0 とすれば、先端反力が $(F_0 - Q_0)$ の値まではピーク値 F_p と平均値 F_m は比例する。これは、先端反力 F_d が半正弦波的に均等に増加することを意味している。 $(F_0 - Q_0)$ 値を越える領域では一次ピーク値 F_p の増加にもかかわらず平均値 F_m は増加していない。なお、先端反力のピーク値 F_p と平均値 F_m の定義は図中に示されている。これと同様

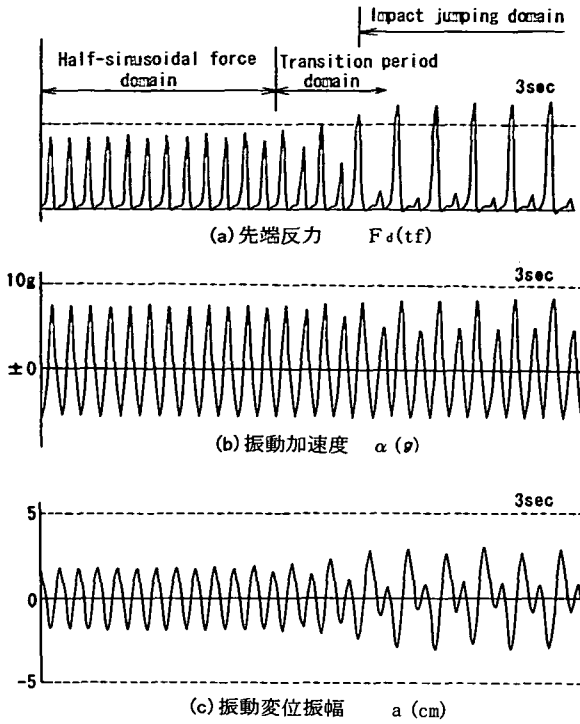


図-16 衝撃閾値前後における振動波形計測例
(先端反力, 振動加速度, 振動変位振幅)

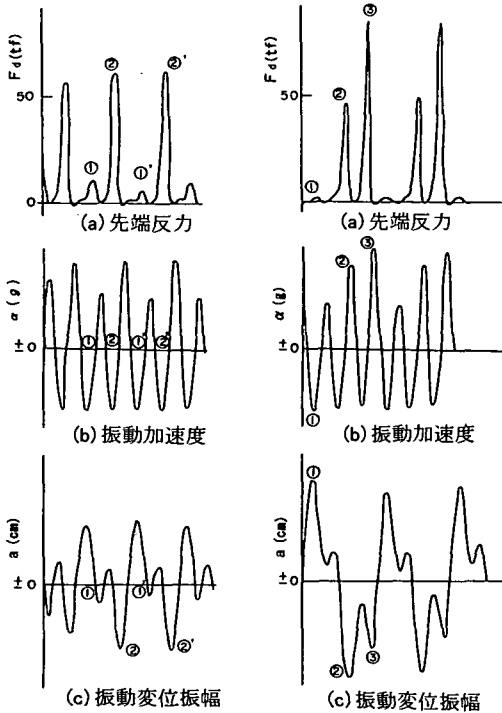


図-17 衝撃振動波形例(1) (Hop-Step型) 図-18 衝撃振動波形例(2) (Hop-Step-Jump型)

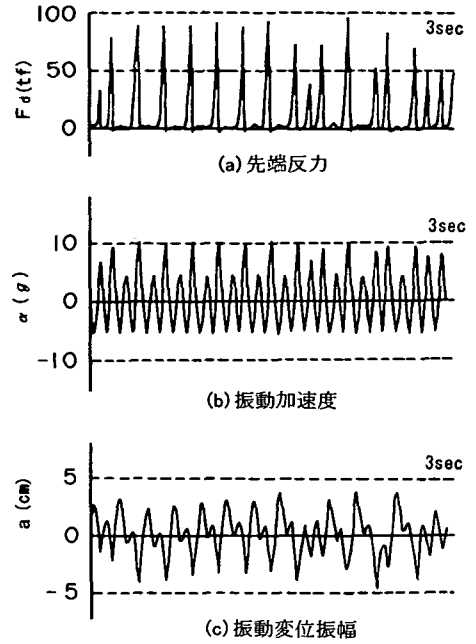


図-19 衝撃振動波形例 (不安定型)

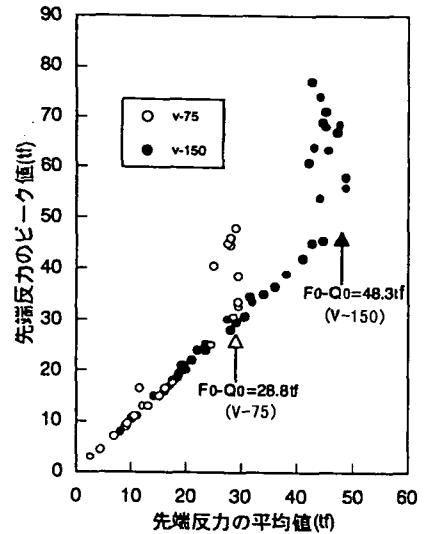


図-20 先端反力のピーク値と平均値との関係 (Site-A)

な変化は振動加速度および振動変位振幅についても見られ、平均値としてはその衝撃閾値でのそれぞれの値を超えていないことを示している。

衝撃閾値を越える値では、ピーク値は増加しても平均的力積量は増加せず、大きな抵抗に対しては貫入速度が低減し、時間をかけて貫入していくことになる。

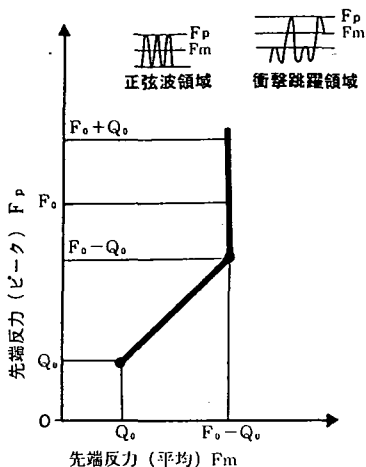


図-21 先端反力のピーク値と平均値の模式図

5. 結論

貫入杭体が地盤中に振動貫入する過程については、従来、その計測結果について明確に議論されることなく、実施工が先行してきたことは否めない事実である。本論文は、このような振動杭体の貫入時の計測事例を示すとともに、杭先端の反力波形がパターン化できることを示した。本論文の結論を以下に要約する。

- (1) 振動杭体の貫入時の計測方法について示し、貫入速度、振動加速度、振動変位振幅、消費電力、先端反力などの2次解析処理結果としてアウトプットする計測システムを開発した。
- (2) 上記計測システムを用いて、砂質地盤に対する計測事例を示し、先端反力が振動加速度と強い相関があることを明らかにした。
- (3) 粘性土地盤での計測事例では、貫入杭体自重が大きく、先端反力波形と振動加速度との相関は見いだせなかった。
- (4) 振動杭体の貫入時の先端反力波形により、その振動挙動は以下の5つのパターンに分類できることを明らかにした。

- ① 正弦領域 (Sinusoidal force domain)
- ② 半正弦波領域 (Half-sinusoidal force domain)
- ③ 衝撃跳躍領域 (Impact jumping domain)
- ④ 不安定跳躍領域 (Unstable jumping domain)
- ⑤ 転移領域 (Transition period domain)

謝辞：本論文は、著者の一人であり、志半ばにして1994年1月に急逝した小川充郎が1985年から1993年にかけて数々の現場計測結果を収集し、まとめたデータを再整理したものである。論文作成にあたり計測に協力された不動建設の各位に感謝する。

参考文献

- 1) U. K. Patent Specification 387, 473 : Improvements in relating to Methods and Apparatus for Driving Piles, Sheet Piling and the Like, 1933.
- 2) Barkan, D. D. : Foundation engineering and drilling by vibration method, *Proc. of 4th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering* (London), Vol. 2, pp. 3-7, 1957.
- 3) Schmidt, W. E. and Hill, H. T. : The Driving of Piles by Longitudinal Vibrations, *Princeton Soil Engineering Research Series No.4*, 1966.
- 4) Bernhard, B. K. : Fluidization phenomena in soils during vibro-compaction and vibro-pile-driving and -pulling, *Cold Regions Research and Engineering Laboratory Special Report 106*, (AD66D54), Oct. 1957.
- 5) Schmidt, W. E. and Geharamani, A. : Vibratory Pile Driving and Ultimate Penetration, *Princeton Soil Engineering Research Series No.4*, 1966.
- 6) Rodger, A. A. and Littlejohn, G. S. : A study of vibratory driving in granular soils, *Geotechnique* 30, No.3 pp.269-293, 1980.
- 7) O'Neill, M. W. and Vipulanandam, C. : Laboratory Evaluation of Piles Installed with Vibratory Drivers, Univ. of Houston, Texas, *NCHPP Report 316*, p.51, 1989.

(1996. 4. 3 受付)

CLASSIFICATION OF VIBRATION PERFORMANCE OF PENETRATION PILES INTO THE GROUND

Mitsuro OGAWA, Hideo Tsuboi and Tamotsu MATSUI

The vibration performance of penetration piles into the ground has not been discussed in detail so far. In this paper, monitoring of vibration performance of penetration piles — reaction force of pile tip and acceleration of pile top — is carried out at various grounds conditions. Analyzing the monitoring data, it is elucidated that the vibrating motion of reaction force of pile tip can be classified into such five categories as sinusoidal force domain, half-sinusoidal force domain, impact jumping domain, unstable jumping domain and transition period domain.