

地盤中に貫入される杭体の振動特性の研究

坪井英夫¹・小川充郎²・松井 保³

¹正会員 工博 不動建設株式会社 (〒110 東京都台東区台東1-2-1)

²正会員 不動建設株式会社 (〒541 大阪市中央区平野町4-2-16)

³フェロー会員 工博 大阪大学工学部教授 (〒565 吹田市山田丘2-1)

地盤中に貫入される閉端ケーシングを杭貫入体とみなせば、杭体が振動貫入していく挙動は、地盤との相互作用により、その振動波形を計測することにより把握できる。本論文では、杭体の貫入時の振動波形を検出する目的で、地盤改良砂杭用閉端ケーシングに先端反力計と振動加速度計を装着し、実際の地盤で計測した。これらの実測データに基づいて、先端反力、振動加速度および貫入時間が振動体の起振力と自重の項で系統的に表現できることを示した。さらに、これらの貫入杭体の振動特性の工学的適用についても示した。

Key Words : *vibro penetration, soil improvement, vibro pile, reaction*

1. はじめに

杭あるいはその類似物を振動を用いて地盤中へ打ち込む際の挙動の研究は、Barkan ら (1957)¹⁾をはじめ旧ソ連を中心に積極的になされ、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が判っている。杭の振動貫入に対するモデル化は、Neimark (1953)²⁾によって提案され、定常振動モデルとして提案されている。さらに、Ocmakob³⁾が、振動杭による破壊時の地盤に及ぼす杭体の力を求めるモデル式を提案している。その後、Dodger and Littlejohn (1980)⁴⁾および Wong ら (1992)⁵⁾は振動杭打ちに対するモデル解を分類し、振動挙動の説明を試みている。Chua ら (1987)⁶⁾および Jonker (1987)⁷⁾は振動機・杭・地盤の系に波動方程式を適用している。北川ら (1983)⁸⁾は加振力を杭頭から杭体に伝播させ、先端部で地盤に作用する共振杭打ち力学モデルを提案している。高井ら (1990)⁹⁾はセル体の振動沈下に対し、地盤ばねと粘性抵抗を考慮した簡易なモデルを考え、実測値と比較している。

これらのモデルはいずれも地盤が均一な物理特性を有するものとして解を与えているが、振動杭体に及ぼす外力の取り方が明確でなかったり、地盤と接したり離れたりする杭体の挙動を統一的に説明するには困難なところがある。振動挙動を明確にするには杭体の応力、特に杭の先端反力と起振力との関係を明確にし、地盤に対する作用力を見出す必要がある。また、比較的硬い地盤に杭を貫入する時に観察される跳躍現象、つまり、地盤と接したり離れたたり

する現象を単一な仮定の下に成立するモデルでシミュレーションすることは非常に困難であり、まず、現象論的にその振動特性を把握することが不可欠である。

筆者ら (1996)¹⁰⁾は、種々の実地盤で、地盤改良砂杭用閉端ケーシングを貫入体とみなし、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、計測事例を示した。さらに、地盤の特性に応じて反力波形が5つの挙動パターンに分類できることを示している。本論文では、これらのパターン化された反力波形から得られたピーク値に着目し、このピーク値と地盤特性との間の定量的関係を検討するため、貫入杭体の支持状態を分析する。さらに、先端反力と振動加速度との関係、先端反力と10 cmの貫入に要する時間との関係、先端反力と振動振幅との関係を考察し、これらの相互関係の系統的表現について検討する。また、先端反力、振動加速度および貫入時間の相互関係に着目し、貫入杭体の振動特性を明らかにするとともに、その工学的適用について検討する。

2. 貫入杭体における計測方法

貫入杭体における計測方法の詳細は、筆者ら (1996)¹⁰⁾の文献に示されているが、その概要は以下の通りである。

地盤改良用閉端ケーシングの先端付近に写真-1に示すケーシング外径 (480 mm) と等しい薄厚の中空反力計を装着し、貫入時間毎のケーシングの軌跡、

中空反力計

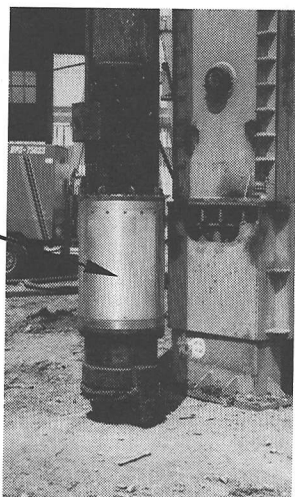


写真-1 貫入杭体先端部の中空反力計

先端反力、振動加速度および消費電力を計測した。各時刻毎のデータはA/D変換し、デジタル化して記録した。これらの計測システムに収録したデータは、貫入深度と貫入時刻毎に記憶させ、設定深度区間での所要時間、累積時間、平均速度などを求め、得られる振動波形よりピーク値あるいはピーク値の平均値などの数値データとして記憶させる。

これらの計測システムとデータ処理システムを図-1に示す。以下に、計測項目と計測方法を示す。なお、振動加速度、振動変位振幅ともに鉛直方向成分のみを対象としている。

- ①貫入速度：貫入杭体の上下運動に連動したワイヤープーリーによる回転量を深度と相関させて深度毎に記録する。本論文では、10 cm 毎の貫入所要時間 T_{10} (sec) を求めることにより、次式より貫入速度が求められる。

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

- ②振動加速度：圧電式加速度計により計測する。
(α)
- ③振動変位振幅：圧電式加速度計より積分回路を
(a) 通して計測する。
- ④消費電力：電流と電圧より、積算して求める。
(E)
- ⑤先端反力：貫入杭体先端部に取付けられた中空
(F_d) 反力計(最大容量 1,470kN)により計測する。

これらの計測値は、杭体の貫入に伴って時間的に変動するため、一定時間内の最大ピーク値を計測時に出力できるようにしておく。

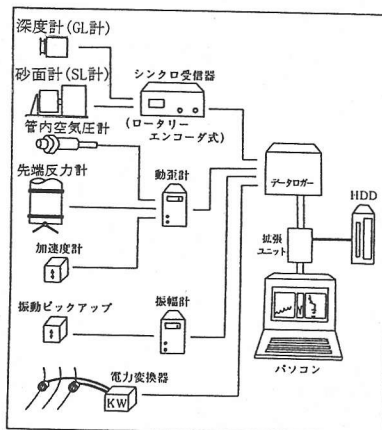


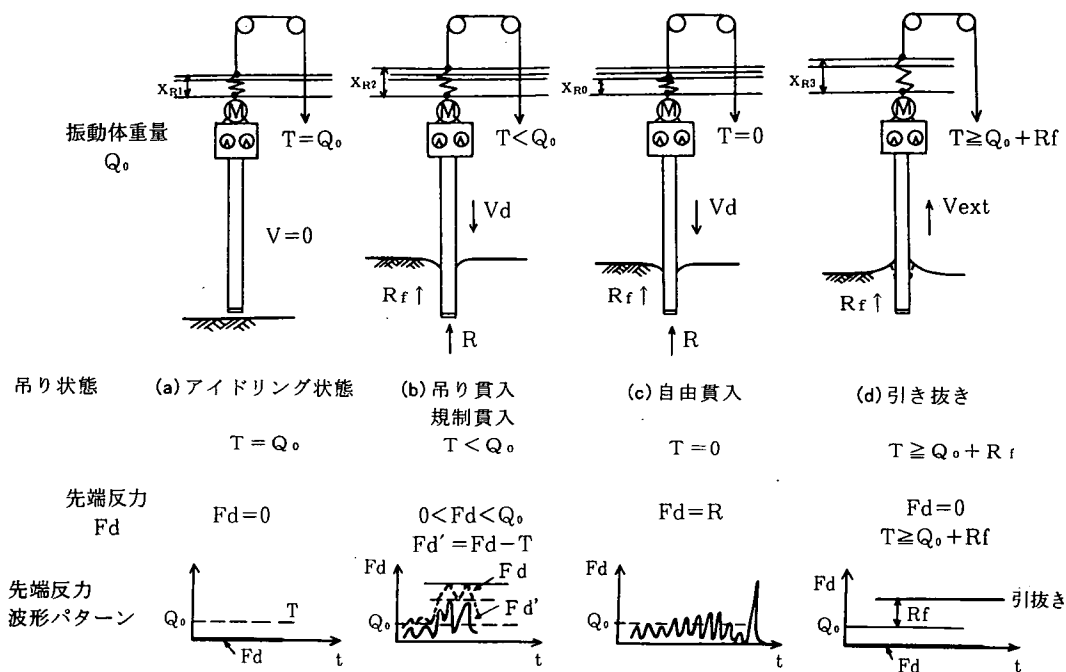
図-1 計測システムとデータ処理システム

3. 貫入杭体の支持状態と先端反力

振動機を装着した貫入杭体は、貫入時と引き抜き時とも緩衝ばねを介してクレーンのワイヤーで吊り下げられている。ここでは、貫入時に吊り影響が全くない時を「自由貫入」、吊り影響が少しでも存在する時を「吊り貫入」もしくは「規制貫入」と呼ぶ。また、引き抜き時には、自重以上の引き抜き力が振動杭に加わり、その振動挙動も地盤特性に大きく影響される。

図-2は振動時の貫入杭体の支持状態と先端反力の関係を模式的に示したものである。振動杭を地表上で吊り下げ状態で起振すると、起振機の回転数が上がるに応じて、緩衝ばねの共振点を越えて振動変位振幅と振動加速度とも安定した値を示してアイドリング状態の図-2(a)になる。地表面に接地し起振すると、地盤の支持力が接地圧より大きい時は、地盤の反発を受けて振動変位振幅が大きくなり、アイドリング時の2倍以上の跳躍変位振幅を伴い、振動加速度も倍加し、図-2(b)の規制貫入の状態になる。吊りワイヤーをゆるめると振動杭が地中に貫入沈下を始める。地盤抵抗 (R) が先端反力 (F_d) より小さいと、図-2(c)のように振動杭は自由に貫入沈下する。貫入速度が大きい時は規制貫入となる。引き抜き時には、自重と振動杭の地中側面の抵抗以上の引張力により、図-2(d)のように振動杭は上方に引き上げられる。

一般に、貫入抵抗が大きい地盤では、貫入速度が小さいため、規制貫入となる場合が少ないが、貫入抵抗が小さい地盤では支持力も小さく、貫入降下速度を規制して施工するため、先端反力が地盤の影響を受けるというよりも貫入時の速度に左右されることになる。



$\left[\begin{array}{l} F_d; \text{先端反力, } Q_0; \text{振動体重量, } T; \text{吊り力, } V; \text{杭体のみかけ速度} \\ V_d; \text{貫入速度, } V_{ext}; \text{引き抜き速度, } R; \text{先端抵抗, } R_f; \text{側面抵抗, } X_R; \text{振動変位} \end{array} \right]$

図-2 振動時の貫入杭体の支持状態と先端反力

これらのことより、地盤の特性との関係で貫入杭体の振動時の挙動を定量的に把握するには、図-2 (c)の自由貫入時の先端反力に着目する必要がある。したがって、自由貫入時の振動挙動に着目した実測事例¹⁰⁾に基づき、以下に貫入杭体の振動特性を明らかにする。

4. 貫入杭体の振動特性

(1) 先端反力と振動加速度との関係

図-3は貫入杭体を小さい振動機 (V-75; 起振力 $F_0=386\text{kN}$) と大きい振動機 (V-150; 起振力 $F_0=662\text{kN}$) で砂質地盤に貫入した時の先端反力 (F_d) と振動加速度 (α) の代表値を示す深度方向分布である。なお、この貫入はすべて自由貫入で行われた。図-4に図-3に基づいて求めた先端反力のピーク値と振動加速度のピーク値との関係を示す。この計測では、縦軸の先端反力は自由貫入時のピーク値の大きさを示し、横軸は対応する下向きの振動加速度のピーク値である。図-4よりピーク先端反力とピーク振動加速度がアイドリング加速度の交点を起点としてほぼ直線関係にあることがわかる。

図-5は、振動杭の変位と振動機の回転位相を考慮して先端反力と振動加速度の関係を模式的に示した

ものである。自重 Q_0 における振動加速度は α_0 である。ここに α_0 はアイドリング加速度である。図-2より自重 Q_0 より小さい反力値においては「規制貫入」状態となる。これは相対的に中立静止状態になり、貫入時には振動加速度はあまり変わらず、地盤強度や貫入速度 (吊り状態の降下速度または規制速度) によって、反力の大きさは杭体と地盤間の抵抗の影響を受けるものと考えられる。なお、図-5中には慣性力に相当する関係を破線で示し、また、西村による¹¹⁾ 動的先端力の最大値は、静圧力の 2π 倍であることより、 $2\pi Q_0$ を図中に含めた。

先端反力 (F_d) が自重 (Q_0) を越える抵抗を受けると、振動加速度は抵抗の増加に応じて増大し、 $(F_d - Q_0)$ の反力 (衝撃閾値と呼ぶ) を越え、実測ではアイドリング加速度 (α_0) の2.2倍程度のピーク先端反力を示すまで直線的に増大する。この間の直線性は、図-4にみられるように自由貫入の場合に高い相関性が認められる。

この直線関係は振動杭のアイドリング状態、すなわち全自重を吊っている状態から、振動杭先端が地盤に接地し、先端の地盤を貫入沈下し始めると生じる。このことは、先端反力と振動加速度の直線関係は下方への杭体の慣性力から起振力を差引き自重を加えた力として与えられることを意味している。

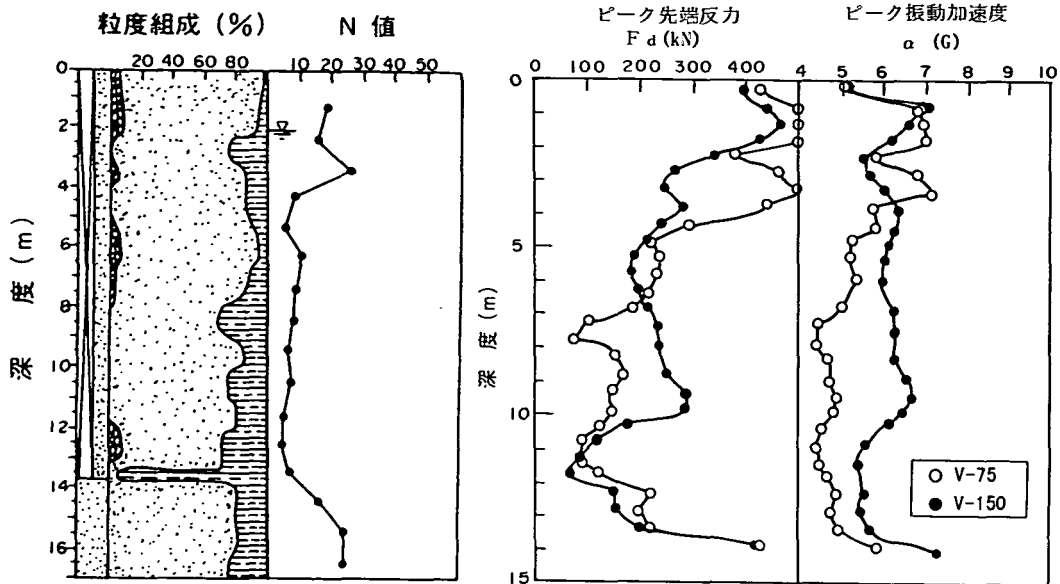


図-3 先端反力および振動加速度の深度方向分布

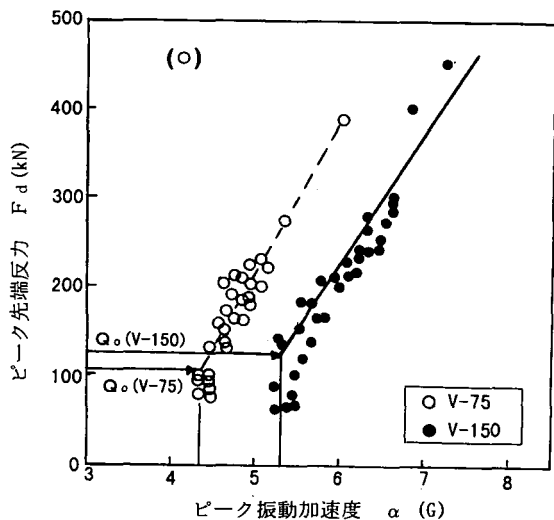


図-4 先端反力と振動加速度との関係

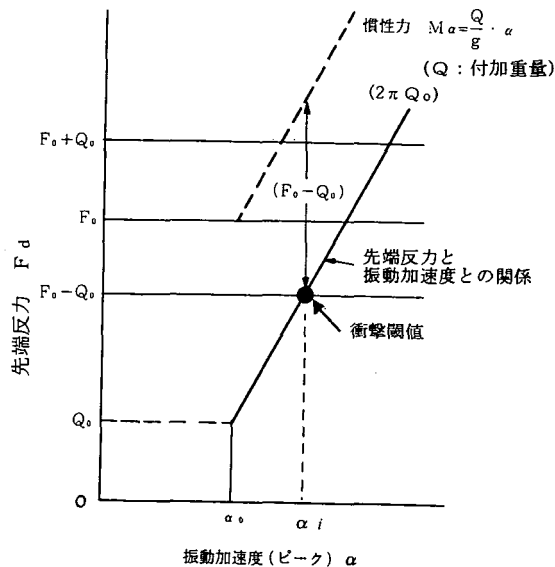


図-5 先端反力と振動加速度の模式図

先端反力 F_d と振動加速度 α との関係は、アイドリング時の振動加速度を α_0 として以下のように表される。

a) $\alpha > \alpha_0, F_d > Q_0$ のとき

$$F_d = M \cdot \alpha - F_0 + Q_0 \quad (1)$$

b) $\alpha < \alpha_0, F_d < Q_0$ のとき

$$M \cdot \alpha < F_0 \quad (2)$$

$$F_d = F_0 - M \cdot \alpha + Q_0 \quad (3)$$

$$F_d' = F_0 + M \cdot \alpha' + Q_0 \quad (4)$$

ここに、 F_0 : 起振力 (kN)

Q_0 : 振動杭の自重 (kN)

M : 振動杭の質量 (t)

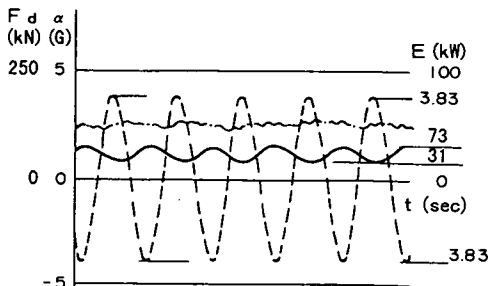
α : 下向きの振動加速度 (G)

α' : 上向きの振動加速度 (G)

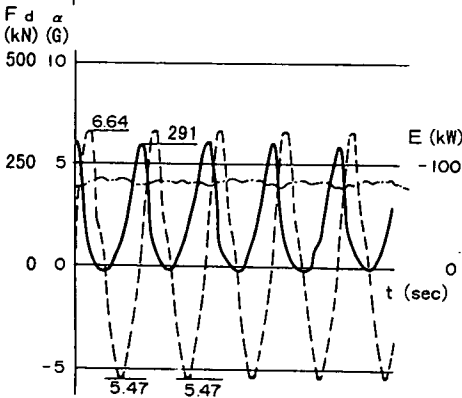
また、これらの直線性を考慮すると、式(5)が得られる。

$$F_d = Q_0 + \mu (\alpha - \alpha_0) \quad (5)$$

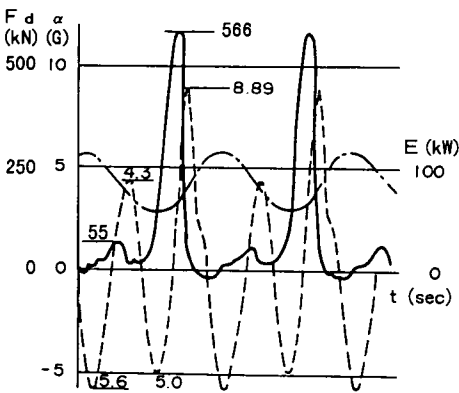
ここに、 μ は振動杭の特性係数であり、式(6)で表される。



(a)シルト層での波形



(b)砂質シルト層での波形



(c)砂層での波形

—— 先端反力 (F_d)
 - - - 振動加速度 (α)
 - - - 消費電力 (kW)

図-6 代表的な先端反力、振動加速度および消費電力の波形時間記録

$$\mu = \frac{F_0 - 2Q_0}{\alpha_i - \alpha_0} \quad (6)$$

ここに、 α_0 ：アイドリング時の振動加速度

α_i ：衝撃閾値の振動加速度(図-5参照)

一般に、起振力(F_0)は回転数(n)および偏心モーメント(k)により表示でき、式(7)により与え

表-1 先端反力の実測値と計算値の比較

$F_0=221kN$ $Q_0=96kN$

測定 No.	深 度 (m) 土 質	実測加速度 (G) $+ \alpha$ $- \alpha$	先端反力 F_d (kN) 最大 最小	先端反力の計算値(kN)		備考 図 -
				慣性力	F_d ($Ma - F_0 + Q_0$) 最大 最小	
S-2	4.3m 砂	8.89 4.30	566 55	854 413	563 123	図-6 (c)
S-2	5.3m 砂	8.59 4.69	537 109	825 450	535 160	
S-3	4.0m 砂	6.88 —	368 —	661 —	370 —	
S-3	5.2m 砂 質 シルト	6.64 —	291 —	638 —	347 —	図-6 (b)
S-4	3.83m シルト	3.98 3.98	73 31	368 —	77 —	図-6 (a)
S-5	8.0m 砂	7.93 5.08	466 155	703 488	471 197	

られる。

$$F_0 = \pm \frac{2m \cdot r \cdot \omega^2}{g} \quad (N) \quad (7)$$

$$\text{ここに、} \omega = 2\pi f, \quad f = \frac{n}{60} \quad (Hz) \quad (8)$$

$$k = 2m \cdot r \quad (N \cdot cm) \quad (9)$$

m ：偏心重量 (N)

n ：回転数 (cpm)

r ：偏心距離 (cm)

k ：偏心モーメント ($N \cdot cm$)

f ：振動数 (Hz)

ω ：角速度 (sec^{-1})

g ：重力加速度 (cm/sec^2)

したがって、起振機、杭体および地盤条件より、 k 、 ω 、 Q_0 、 α_0 、 α_i を与え、式(6)および式(7)を用いれば、式(5)より F_d と α との関係が求められる。

一般に k 、 ω 、 Q_0 および α_0 の値は、起振機と杭体条件が決まれば与えられる。しかし、 α_i 値として個々の地盤での実測値を用いることにすれば、 F_d と α との関係が具体的に与えられる。図-4には、図-3の実地盤において実測された α_i 値を用いて求めた F_d と α との関係が実線(V-150)と破線(V-75)として示されている。両線とそれぞれのデータポイントがほぼ対応していることから式(5)の妥当性が確認できる。

さらに、以上の点を具体的に示すため、図-6に、先端反力(F_d)、振動加速度(α)および消費電力(E)の波形時間記録を示した。表-1にこれらの波形から得られた各数値と式(1)の計算結果を示した。同表によれば先端反力 F_d の最大値は杭体および起振機の条件から得られる先端反力の計算値にほぼ近似し、式(5)の妥当性を再確認できる。

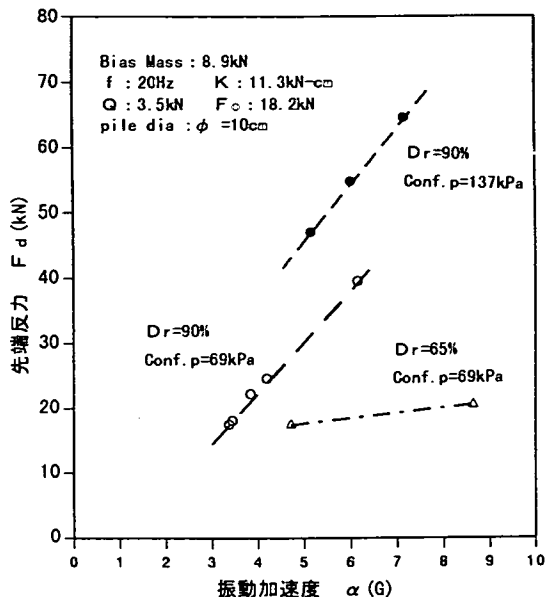


図-7 異なる拘束圧下における先端反力と振動加速度との関係 (O'Neill et al の実験^{1,2)}より再整理)

先端反力と振動加速度の関係は振動機の諸元、地盤の種類、強度、拘束圧など種々の影響を受けるものと考えられる。O'Neill et al (1989)^{1,2)}の行った相対密度と拘束圧の異なる砂土槽での振動杭打ち室内実験の結果より、先端反力と振動加速度との関係を解析し再整理すると図-7のようになる。同図より、両者は地盤の状態により影響を受けるが、同一の拘束圧と相対密度では直線関係を示している。これは、現場計測事例結果の傾向を裏付けている。

(2) 先端反力と貫入時間との関係

図-8は図-3に示す砂質地盤中に貫入される振動杭の先端反力と時間・貫入比 T_{10} (sec/10cm) の実測事例を、それぞれ V-75 と V-150 の振動機に対して示している。図中には、自重 Q_0 および衝撃閾値反力 ($F_0 - Q_0$) も併記している。同図では、容量の大きい V-150 では直線になっているが、容量の小さい V-75 の起振機では、ピークが観測される。

図-9は図-8の実測結果をもとに、 F_d と T_{10} の関係を模式的に整理したものである。同図で T_0 は振動杭の自重 Q_0 に相当する先端反力が現れる初期貫入時における時間・貫入比である。また、起振機が大きい場合、先端反力の限界値 ($2\pi Q_0$) まで直線的に延びるものとしている。実線①は先端抵抗が支配的な場合であり、破線①'は側面摩擦が影響する場合である。起振力が小さく、側面摩擦が無視できない場合の挙動と考えられる。破線②は、先端反

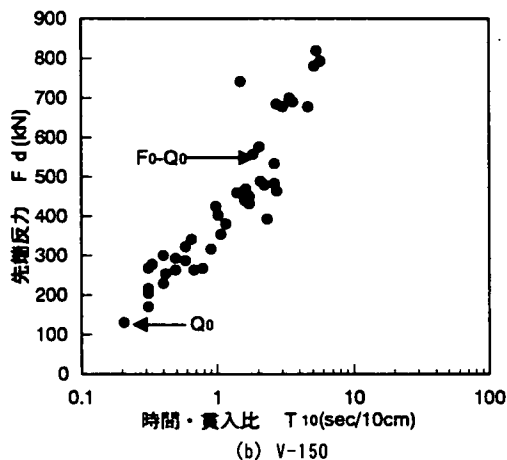
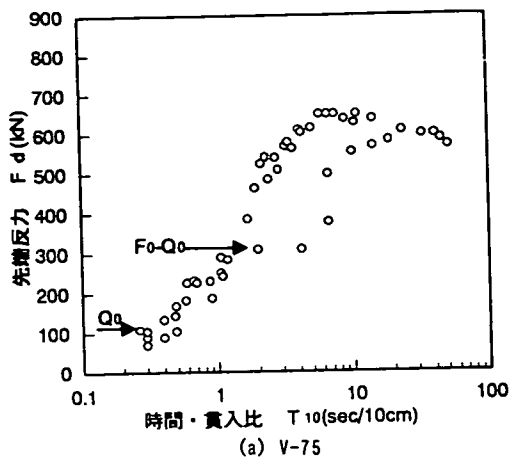


図-8 先端反力と時間・貫入比との関係 (実測結果)

力が衝撃閾値を越えるが、力積が変わらない場合と考えられる関係を示している。破線③は先端反力が上限値の跳躍限界に達し、貫入時間が急激に増大していく領域である。

実線①の領域を一般式で表すと、先端反力 F_d と時間・貫入比 T_{10} との関係は、式(10)あるいは式(11)のようになる。

$$F_d = Q_0 + \frac{F_0 - 2Q_0}{\text{Log}((T_i/T_0))} \text{Log}(T_{10}/T_0) \quad (10)$$

$$= Q_0 + \beta \cdot \text{Log}((T_{10}/T_0)) \quad (11)$$

ここに、 F_d : 先端反力 (kN)

T_{10} : 貫入・時間比 (sec/10cm)

T_i : 衝撃閾値における貫入・時間比 (sec/10cm)

T_0 : 初期貫入時における時間・貫入比 (sec/10cm)

$$\beta = \frac{F_0 - 2Q_0}{\text{Log}(T_i/T_0)} > 0 \quad (12)$$

図-8(a)に示す V-75 の起振機に対しては、

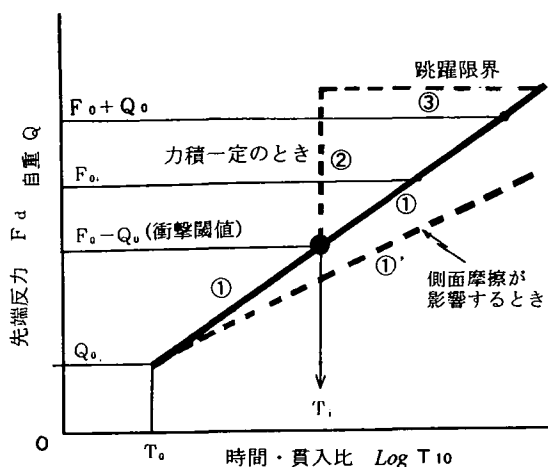


図-9 先端反力と時間・貫入比の模式図

$Q_0 = 104 \text{ kN}$ では、 $T_0 = 0.3 \text{ (sec/10cm)}$ 、 $T_i = 1.5 \text{ (sec/10cm)}$

であり、次式が得られる。

$$F_d = 104 + 256 \cdot \log(T_{10}/T_0) \text{ (kN)} \quad (13)$$

図-8(b)に示す V-150 の起振機に対しては、

$Q_0 = 126 \text{ kN}$ では、 $T_0 = 0.2 \text{ (sec/10cm)}$ 、 $T_i = 2.05 \text{ (sec/10cm)}$

であり、次式が得られる。

$$F_d = 126 + 410 \cdot \log(T_{10}/T_0) \quad (14)$$

式(12)での β は、起振機の諸元、振動杭の重量などにより、値が異なる係数である。

貫入速度は地盤の抵抗の大きさのほか、様々な条件により影響を受ける。自由貫入で先端反力 F_d が自重 Q_0 に近くなると、ある一定の貫入速度に収束するが、これは起振力、重量および先端接地面積に依存する。ここで、初期時間・貫入比 (T_0) は振動杭の静的自重が地盤の極限支持力と平衡状態にある貫入速度の逆数と定義する。この時間 (T_0) より小さい値については自重沈下に近い状態であり、重力加速度の影響を受けて貫入時間の経過とともに加速的に貫入速度は増加する。

図-9に示すように、自由貫入状態での先端反力と時間・貫入比の対数つまり $\log T_{10}$ は衝撃閾値 (T_i に相当) までは、線型的な関係になる。しかし、V-75 の施工機では衝撃閾値 ($F_0 - Q_0$) を越える先端反力になると跳躍現象が始まり、貫入効率が悪くなる。このとき最大ピーク先端反力は直線的に増大するが、その反面 2 番目のピーク値が減少する。これは、平均的な振動変位振幅が一定値になり、振動杭の力積量が減少して貫入効率が悪くなると考えられる。深さ方向に周面抵抗の増加を伴う時は、一定貫入速度で貫入する。

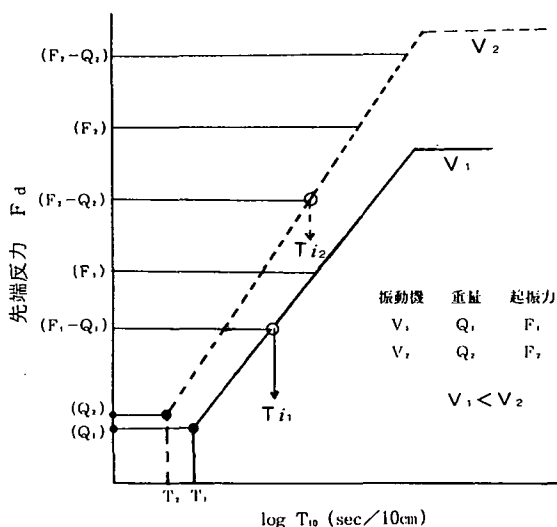


図-10 起振力の違いによる F_d と $\log T_{10}$ の模式図

つぎに、貫入時間に及ぼす影響を a) 起振力、b) 振動効果および c) 振動数について考察すると、以下ようになる。

a) 起振力の影響

通常、振動数を同じにして起振力を大きくすることは偏心モーメントを大きくすることになり、振動機自体の重量も大きくなり、同一の重量を維持できないため、実質的な起振力一定の比較は実用上難しい。図-10は、同一地盤に貫入した起振力の異なる振動機での貫入時の計測結果である図-8を模式的に図示したものである。同図より起振力が大きいほど衝撃閾値が相対的に大きくなることを示している。

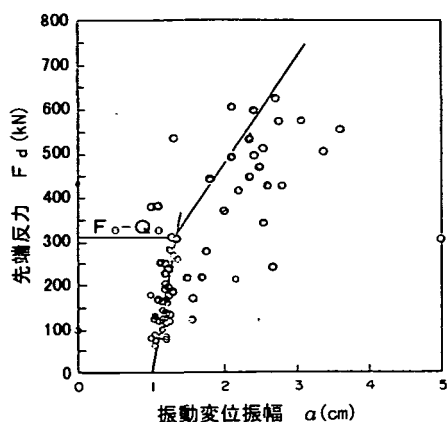
先端反力が大きくなると、振動貫入により地盤は締固め状態になり、地盤の締固めとともに貫入に要する時間が長くなる。

b) 振動効果の影響

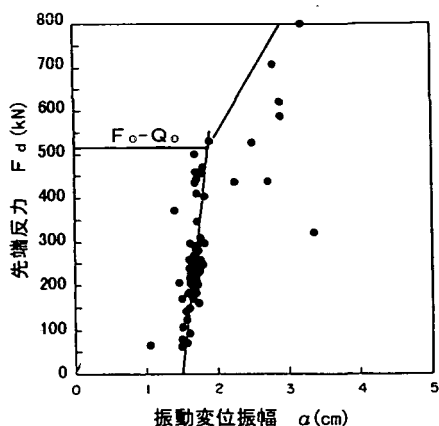
N 値が小さく、緩い砂質地盤の場合、振動杭が地盤に与える振動加速度により、土粒子間の摩擦がなくなる。飽和されている場合は液化化が発生し、貫入抵抗は極端に低下する。また、側面摩擦も減じて貫入速度は大きくなる。これらの現象はシートパイル、H杭または開端鋼管杭のように先端断面の小さな杭で見ることができる。なお、先端断面が大きな排除杭では、先端部は杭体積に等しい土の排除置換でかなりの抵抗が生じ、貫入速度は小さくなり、貫入に要する時間が長くなる。

c) 振動数の影響

偏心モーメント一定で振動数を上げると、式(7)より明らかなように起振力が回転数の 2 乗に比例して増大する。重量が一定で、起振力が上昇すると、衝撃閾値が上昇する。先端反力波形は衝撃閾値まで



(a) V-75



(b) V-150

図-11 先端反力と振動変位振幅との関係（実測結果）

は比較的均等な正弦波形になる¹¹⁾。振動数を上げることはa)で述べた起振力を上げたことと同等になる。

(3) 先端反力と振動変位振幅との関係

図-11は同一地盤で起振力を変えた場合の実測事例の比較である。衝撃閾値の位置がそれぞれの $(F_0 - Q_0)$ の位置とよく対応していることが確認できる。

先端反力と振動変位振幅との関係を図-11を参照して、模式的に示せば、図-12のようになる。ばね支承によるアイドリング時での振動変位振幅から、先端が接地し、その抵抗が全静的荷重より大きくなる場合は、振動杭の振動変位振幅は抵抗の大きさに比例して徐々に直線的に増大していく。先端反力が衝撃閾値 $(F_0 - Q_0)$ に達すると、この関係に変化が見られるようになる。すなわち、衝撃閾値以下では、先端反力と半振幅はほぼ正比例する。これは、先端反力のピーク値と振動杭の力積量が比例していることを示している。アイドリングから衝撃閾値までの特性は、貫入速度を規制するような振動杭への吊り影響が含まれているためと考えられる。吊り影響がほとんどないと考えられる衝撃閾値以上の貫入状態では、先端反力と振動変位振幅は直線関係にある。この振動変位振幅は、跳躍量が加味された振幅量である。

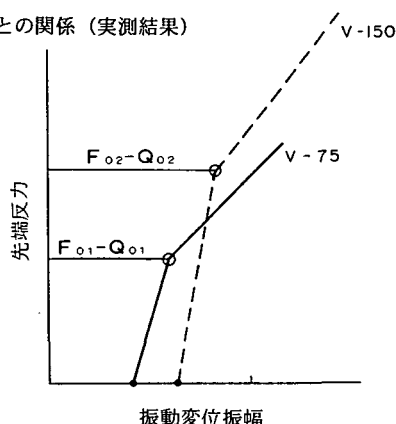


図-12 先端反力と振動変位振幅の模式図

の関係は式(5)および式(11)より以下のように表される。

$$\mu (\alpha - \alpha_0) = \beta \cdot \text{Log}(T_{10}/T_0) \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\mu} \text{Log}(T_{10}/T_0) + \alpha_0 \quad (16)$$

$$\text{Log} T_{10} = \frac{\beta}{\mu} (\alpha - \alpha_0) + \text{Log} T_0 \quad (17)$$

したがって、振動加速度 α_0 および時間・貫入比 T_{10} を代表地盤であらかじめ測定しておけば、係数 μ および β を決定できるので、式(5)により先端反力を、式(17)により貫入時間を得ることができる。

5. 地盤特性を考慮した振動特性の工学的適用

図-14は先端反力とN値との関係を示しているが、図-3より、N値の対応箇所毎に整理したものである。同図より、先端反力は地盤のN値と強い相関があり、

(4) 先端反力、振動加速度および貫入速度の相互関係

以上の考察により、図-13に示すような先端反力、振動加速度および貫入速度の基本的関係を示すことができる。すなわち、先端反力を介して振動加速度および貫入速度を得ることができる。

振動加速度 α と時間・貫入比 T_{10} (sec/10cm) と

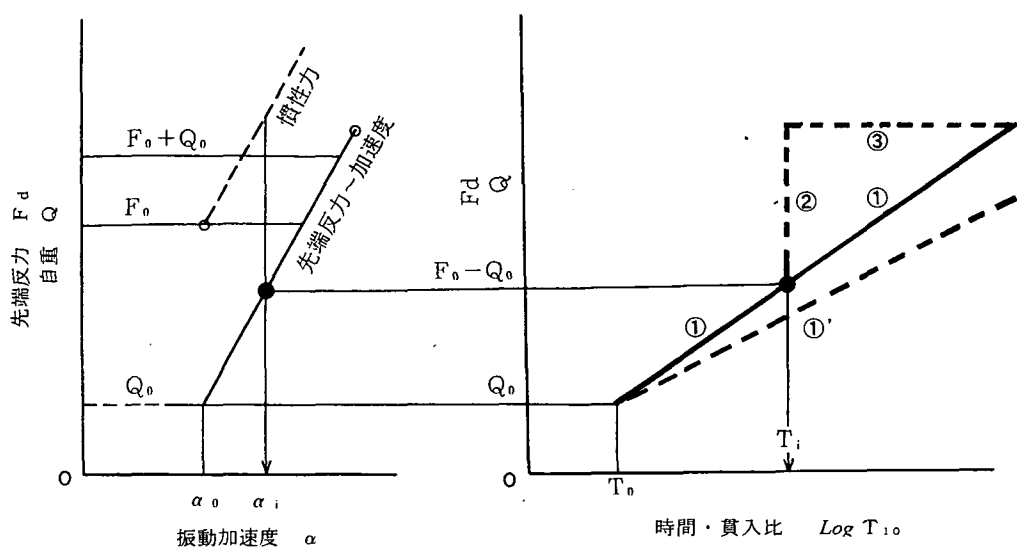


図-13 先端反力，振動加速度および貫入時間の関係

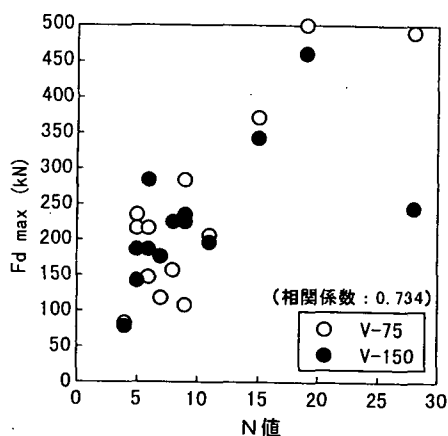


図-14 先端反力とN値との関係

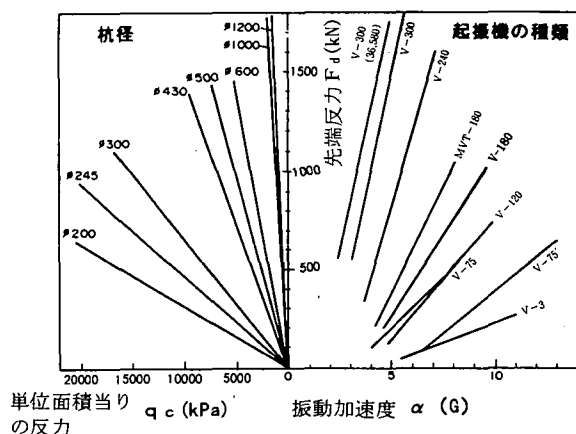


図-15 各起振機の仕様と $\alpha \sim F_d \sim q_c$ との関係

また地盤の特性を反映した指標であると言えよう。

図-15は各起振機の仕様と、加速度(α)、先端反力(F_d)および単位面積当りの反力(q_c)との関係を示している。同図中の $F_d \sim q_c$ の関係は単位面積当りの F_d が q_c に相当するとして求められる。一方、 $F_d \sim \alpha$ の関係は、それぞれの起振機仕様に基づく特性値(F_d と α_0)と杭体の自重(Q_0)を与えれば、式(5)より α との関係を求めることができる。式(5)において μ を求めるには、実際には α_i を現地で求めることになるが、概略的に求める方法として西村らの解析¹¹⁾により、衝撃圧力の最大値は $2\pi Q_0$ となり、また一方、加速度は $2.2\alpha_0$ まで大きくなる。これらを利用すれば、図-15に示したように、 $\alpha \sim F_d \sim q_c$ の関係を模式的に示すことができる。同図では、最大先端反力が

$F_d + Q_0$ のとき、 $2\alpha_0$ の加速度を保有するものとして算出したものである。同図と図-13を適用することにより、各起振力および自重の項を考慮し、対応する地盤に対し、適切な起振機の仕様を決定することが可能となる。また、貫入杭体の施工能率を加味した適切な限界施工速度を知ることができる。

6. 結論

杭貫入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。本論文では、振動杭の貫入時の計測事例に基づき、その振動特性を系統的に検討した。すなわち、

計測された結果のうち、先端反力、振動加速度および貫入時間に着目して貫入杭体の振動特性を明らかにするとともに、これらの統一的表現を示した。この結果に基づけば、地盤に応じた適切な起振機の仕様を決めることができ、また貫入杭体の施工能率を加味した適切な施工限界を設定できるなど、その工学的適用について示した。本論文の結果を具体的に要約すれば、以下の通りである。

- (1) 振動杭体の支持状態と先端反力について考察し、貫入時の挙動を定量的に検討するためには自由貫入時の先端反力に着目すべきことを示した。
- (2) 砂質地盤中に振動杭を貫入させるとき、先端反力と振動加速度は、アイドリング状態より地盤中に貫入されると両者は線型関係になる。つまり、杭体の自重以上の抵抗を示す地盤では、先端反力と振動加速度は線型関係で表すことができる。
- (3) 先端反力と時間貫入比の対数は線型関係になる。
- (4) 先端反力、振動加速度および時間貫入比は統一的に関係づけることができる。
- (5) 地盤特性・起振力・自重項を考慮することにより、適切な起振機の仕様を決めることができ、施工能率を加味した適切な施工限界を知ることができる。

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、まとめたデータと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) 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.

- 2) Neimark, U. I. : *Theory of Penetration and Extracting of Piles* (in Russian), 1953.
- 3) Осмаков, С. А. : Определение давления вибрирующей сваины грунт при учете явления отрыва, pp. 21-23, 1954.
- 4) Rodger, A. A. and Littlejohn, G. S. : A study of vibratory driving in granular soils, *Geotechnique* 30, No.3 pp.269-293, 1980.
- 5) Wong, D., O'Neill, M. and Vipulanandan, C. : Modelling of vibratory driving in sand, *Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.16, pp.189-210, 1992.
- 6) Chua, K. M., Lowery, L. L. and Gardrer, S. : Wave equation analysis of vibratory hammer driven pile, Proc. 19th Offshore Tech. Conf. (U.S.A.), pp.339-345, 1987.
- 7) Jonker, G. : Vibratory pile driving hammer for pile installations and soil improvement projects, Proc. of 19th Offshore Tech. Conf. (U.S.A.), pp.549-560, 1987.
- 8) 北川徹, 樋野親俊 : 油圧式共振杭打機の研究開発, 土木技術資料, Vol.25, No.3, pp.141-146, 1983.
- 9) 高井俊郎, 今野建太郎, 荻野秀雄, 中村正邦 : セル体の振動貫入に関する研究, 土木学会論文集, No. 41 5/Ⅱ-12, pp.53-62, 1990.
- 10) 小川充郎, 坪井英夫, 松井保 : 地盤中に貫入される杭体の振動挙動のパターン化, 土木学会論文集, No.561/Ⅲ-38, pp.141-149, 1997.
- 11) 西村源六郎 : 振動工学, 誠文堂新光社, p. 1107, 1969.
- 12) O'Neill, M. W. and Vipulanandan, C. : Laboratory evaluation of piles installed with vibratory drivers, Univ. of Houston, Texas, *NCHPP Report* 316, p.51, 1989.

(1996. 11. 26 受付)

VIBRATION CHARACTERISTICS OF PENETRATION PILES INTO THE GROUND

Hideo TSUBOI, Mitsuro OGAWA and Tamotsu MATSUI

The vibration characteristics of penetration piles into the ground has not been discussed systematically in detail so far. As for the vibration performance of penetration piles into the ground, it has been elucidated that the vibrating motion of reaction force of pile tip can be classified into five categories. In this paper, in order to estimate the peak value of the classified vibrating motion, monitoring of vibration performance — reaction force of pile tip and acceleration of pile top — was carried out in sandy grounds, by means of the reaction force meter and acceleration meter attached at around the tip and the top of casing pile for the installation of sand compaction pile. Based on the monitoring data, it was elucidated that reaction force, acceleration and penetration time were systematically represented by dynamic force and mass weight of vibrator and piles. Furthermore, engineering application of the vibration characteristics of the penetration piles was presented.