

---

波動理論による杭の支持力管理システム

Application of Wave Theory to the Evaluation of Bearing Capacity of Steel Pipe Pile

福若 雅一(Masakazu Fukuwaka) 橋本 修身(Osami Hashimoto) 脇屋 泰士  
(Yasushi Wakiya) 沖 健(Takeshi Oki) 四宮 秀夫(Hideo Shinomiya) 尾関 史  
洋(Fumihiro Ozeki)

---

要旨：

打込み杭の支持力を、打撃時の応力および速度をもとに波動理論を適用して評価する手法について報告した。1989年に当社が導入した計測システム PDA (Pole Driving Analyzer) は、杭頭部のひずみ計と加速度計により一打撃ごとの力と速度を計測するもので、CASE法あるいはCAPWAPC法による数値解析に基づき支持力が算定される。打込み鋼管杭に適用した結果、打撃エネルギーと再打撃時期を適切に選定することにより、再打撃試験から得られた動的貫入抵抗力は5～10%の誤差精度で静的載荷試験における極限支持力と一致した。また、鋼管杭の打設現場における支持力管理に適用した実施例から、地盤の回復挙動も考慮した支持力管理精度の向上に有用であることが明らかとなった。

---

Synopsis：

This paper describes the evaluation of the dynamic bearing capacity of a driven pile by application of the wave theory combined with site measuring of stress and velocity of the pile during installation. In 1989, Kawasaki Steel has introduced PDA (Pile Driving Analyzer; measuring and analysis device) and CASE and CAPWAPC (analysis software), and made continuous research of this system on the bearing capacity of the full scale steel pipe pile in various aspects. By selecting suitable redriving energy and timing, bearing capacities between values estimated by the PDA system and values obtained by the static loading test showed a good correspondence within an error range of 5 to 10%. Results of application to two actual construction sites proved good applicability as dynamic bearing capacity control system considering the recovery behavior of shaft resistance during the time elapsed.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

## Application of Wave Theory to the Evaluation of Bearing Capacity of Steel Pipe Pile



福若 雅一  
Masakazu Fukuwaka  
エンジニアリング事業  
部 土木技術部土木技  
術室 主査(課長)



橋本 修身  
Osami Hashimoto  
エンジニアリング事業  
部 鋼構造研究所土木  
建材研究室 主任研究  
員(課長補)



脇屋 泰士  
Yasushi Wakiya  
エンジニアリング事業  
部 鋼構造研究所土木  
建材研究室



沖 健  
Takeshi Oki  
エンジニアリング事業  
部 建材技術部



四宮 秀夫  
Hideo Shinomiya  
千葉製鉄所 土建技術  
部千葉土建技術室 主  
査(樹長)



尾関 史洋  
Fumihiko Ozeki  
川鉄テクノストラ  
クション(株) 技術本部  
設計技術室 主任

### 1 緒 言

杭の支持力を確認する方法として、実地盤に打設された杭に載荷してその静的支持挙動を評価する静的載荷試験が広く用いられている。しかし、載荷試験には多大の工期と費用を要するため、すべての杭についてこの方法で支持力管理を行うのは実用上不可能となる。これに対して、打込み時の杭の動的挙動に基づく動的支持力(動的貫入抵抗)評価は、その計測がはるかに容易であり場合によっては全数検査も可能であることを考えると、個々の支持力推定精度は静的載荷試験に比べて劣るとしても、相対的に支持力に問題のある杭を検出できるため、結果として基礎構造全体の信頼性向上につながるものと考えられる。

動的貫入抵抗による支持力の評価手法は、Hiley 式、建設省告示式などのいわゆる動的支持力公式と、CASE 法、CAPWAPC 法などに代表される波動理論に基づく方法とに大別される。前者は運動

### 要旨

打込み杭の支持力を、打撃時の応力および速度をもとに波動理論を適用して評価する手法について報告した。1989年に当社が導入した計測システム PDA (Pile Driving Analyzer) は、杭頭部のひずみ計と加速度計により一打撃ごとの力と速度を計測するもので、CASE 法あるいは CAPWAPC 法による数値解析に基づき支持力が算定される。打込み鋼管杭に適用した結果、打撃エネルギーと再打撃時期を適切に選定することにより、再打撃試験から得られた動的貫入抵抗力は 5~10% の誤差精度で静的載荷試験における極限支持力と一致した。また、鋼管杭の打設現場における支持力管理に適用した実施例から、地盤の回復挙動も考慮した支持力管理精度の向上に有用であることが明らかとなった。

### Synopsis:

This paper describes the evaluation of the dynamic bearing capacity of a driven pile by application of the wave theory combined with site measuring of stress and velocity of the pile during installation. In 1989, Kawasaki Steel has introduced PDA (Pile Driving Analyzer; measuring and analysis device) and CASE and CAPWAPC (analysis software), and made continuous research of this system on the bearing capacity of the full scale steel pipe pile in various aspects. By selecting suitable redriving energy and timing, bearing capacities between values estimated by the PDA system and values obtained by the static loading test showed a good correspondence within an error range of 5 to 10%. Results of application to two actual construction sites proved good applicability as a dynamic bearing capacity control system considering the recovery behavior of shaft resistance during the time elapsed.

エネルギー平衡論に基づき、打設時の貫入量やリバウンド量から質点系の衝突問題として動的支持力を得る方法であるが、載荷試験結果に対するばらつきが大きく<sup>1-3)</sup>、適用限界に関する問題が投げかけられている。後者は打撃時の杭のひずみ、加速度をもとに一次元波動方程式を適用して動的貫入抵抗を推定する方法であり、動的計測技術の進歩につれて近年急速に実用化が進んできたものである<sup>2,4-6)</sup>。

一次元波動方程式が杭の動的挙動をよく説明することは古くから明らかにされていたが<sup>7,8)</sup>、実用化に際しては Goble らの一連の研究<sup>9-11)</sup>が先駆的な役割を果たした。彼らは杭頭のひずみ、加速度を計測して動的支持力を算定する方法 (CASE 法、CAPWAPC 解析法) の理論を示し、計測装置として PDA (Pile Driving Analyzer)<sup>12)</sup>を開発した。その後、同様な計測システムとして、TNO<sup>13)</sup>、あるいはわが国における D-PAS<sup>14)</sup>、2点ゲージ法<sup>15)</sup>などが次々と開発

\* 平成4年4月7日原稿受付

されてきている。特に諸外国では、ASTM 規格化<sup>16)</sup>に伴いアメリカ圏を中心に実際の杭打ち工事における支持力管理法として利用される例も多い<sup>17-19)</sup>。一方、わが国では道路橋示方書や建築基礎構造設計指針の動的支持力公式の中に波動理論に基づく方法が取り入れられているが、以下の理由により確立された支持力評価手法としての一般化には至っていないのが現状である。

- (1) わが国では杭の支持力は静的載荷試験によって評価されるという考え方が一般的であるとともに、波動理論による支持力測定技術はまだ導入されたばかりであり、実績に乏しい。
- (2) 動的な手法によって得られた支持力(動的貫入抵抗力)と静的支持力との相互関係が明確化されていない。そのため、波動理論に基づいて推定した極限支持力が静的載荷試験の結果とほぼ一致するとした報告もある一方、その精度に疑問を投げかける報告<sup>20)</sup>もあり、支持力推定方法として確立されたものとはいえない。
- (3) 現在いくつかの解析プログラムが発表されているが、杭と土との相互作用に関して工学的関連性に乏しく、解析モデルや定数の決定方法など理論的に説明すべき問題が多く残されている。

このように波動理論を用いた支持力評価法はまだ多くの解決すべき問題を抱えている。しかしながら、その適用性については、特に臨海部や海洋における開発に用いられる長尺杭を対象に大きな可能性を秘めており、今後の開発が期待される。さらに、均質な材質の鋼管杭では波動エネルギーの減衰が小さいことから、コンクリート杭に比べて高精度に応力波の伝播を計測しうるため、本手法の有用性が特に高いものとなる。

このような背景のもと、当社では1988年に上述のPDAシステムを導入し、その適用性について実験的に検討を進めてきた。本報告では実鋼管杭を用いたPDA計測を通じて波動理論による支持力評価手法の適用性について述べるとともに、実工事における打止め管理への適用例を紹介する。

## 2 波動理論に基づく動的支持力の算定

Fig. 1にPDA計測システムを示す。本計測装置では、杭頭部に固定されたひずみ計と加速度計によりハンマの一打撃ごとの杭体のひずみと加速度が、PDA本体中の増幅器と積分回路でそれぞれ力と速度に変換され、オシロスコープに表示される。それと同時に、

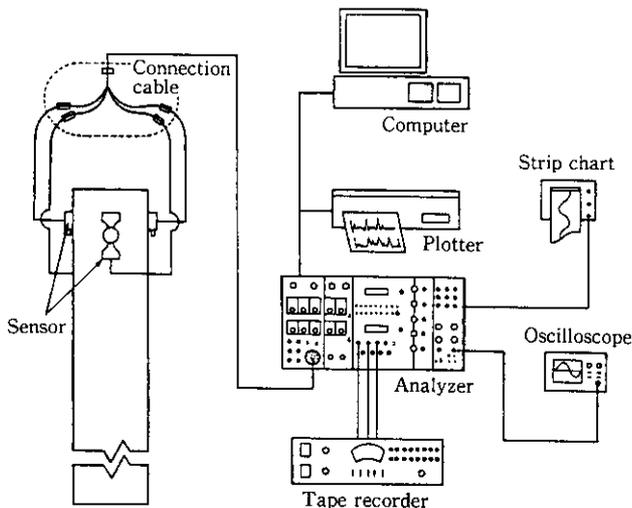


Fig. 1 PDA (pile driving analyzer) field testing system

本体に接続されたテープレコーダに、打撃一打ごとのアナログデータが時間の経過を追って記録される。その計測されたデータを用いてCASE法あるいはCAPWAPC法により杭の支持力の算定を行う。CASE法は簡易的な方法であり、各打撃ごとにPDA内部で実行され、チャート紙に出力される。より詳細な解析を行う場合にはCAPWAPC法を用いるが、これは、PDAを介してA/D変換されたデータを特性曲線法モデルを利用したプログラムを用いてコンピュータで解析を行い、支持力を算定する方法である。以下にCASE法およびCAPWAPC法の概要について述べる。

### 2.1 CASE法の概要

杭が貫入するときの地盤の抵抗力 $R$ は、杭体を剛体と仮定し、Newtonの第2法則に従うとして、式(1)で与えられる。

$$F(t) - R(t) = Ma(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $F$ は杭頭への打撃力、 $M$ は杭の重量、 $a$ は加速度、 $t$ は時間である。Fig. 2に杭頭で計測された力と速度を示す。時刻 $t_1$ で測定位置を通過した波動は杭先端で反射され、時刻 $t_1 + 2L/C$ に再び杭頭に戻ってくる。この波動理論の考え方に基づき、波動が杭を一往復する時間で式(1)を平均化し、この地盤の平均的な反力 $R$ を杭の支持力とする方法が、Gobleらによって式(2)で示された。

$$R = \{F(t_1) + F(t_1 + T)\} + \frac{Mg}{2L} \{v(t_1) - v(t_1 + T)\} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $T = 2L/C$

$$C = \sqrt{E/\rho}$$

$t_1$ : 打撃直後に波動が最大となる時刻

$T$ : 波動が杭を一往復する時間

$L$ : 杭先端からセンサー取付位置までの距離

$C$ : 応力波の伝播速度

$E$ : 杭のヤング率

$\rho$ : 杭の密度

また、地盤の静的な抵抗力 $R_s$ を求めるため、地盤の抵抗力 $R$ は静的抵抗力 $R_s$ と動的粘性抵抗力 $R_d$ の2成分からなると考えて、式(3)で表されるものとした。

$$R = R_s + R_d \dots \dots \dots (3)$$

$$R_d = j_c \frac{EA}{C} \left( 2V(t_1) - \frac{L}{MC} R \right)$$

ここで、

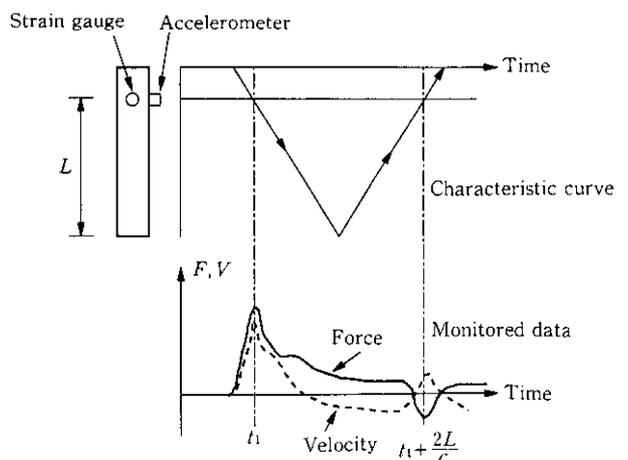


Fig. 2 Relation between monitored data and characteristic curve of CASE method

$f_0$ : 地盤の種類によって異なる無次元ダンピング定数

$V(t)$ : 打撃直後の速度の最大値

以上のように CASE 法では、杭頭において力と速度を測定することにより、容易に静的支持力を求めることができる。しかしながら、杭の静的な支持力を算定するためには、ダンピング定数  $f_0$  を仮定する必要があり、この値の設定により得られる支持力が異なるため、この取扱に関して疑問が投げかけられている<sup>21)</sup>。しかし、非常に簡易である点で優れており、現場における施工管理には有効に利用できると思われる。

2.2 CAPWAPC 法の概要

CAPWAPC (Case Pile Wave Analysis Program Continuous version) 法は、Fig. 3 に示すような、地盤をばねとダッシュポットによって仮定した特性曲線法モデルを用い、杭頭で計測された力または速度のデータを境界値として計算波形を算定し、その波形と実測波形の比較を行い、両者が一致するまで地盤特性パラメータを変化させながら計算を行う方法である。最終的には計算波形が実測波形に最も一致した時点で、そのとき仮定したパラメータによって地盤抵抗特性が評価され、杭の支持力が先端および周面抵抗力に分離した形で求めることが可能となる。

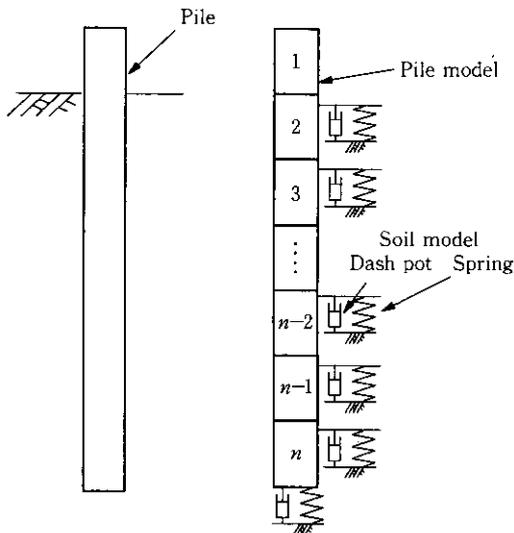


Fig. 3 CAPWAPC pile and soil model

3 波動理論に基づく支持力の評価

3.1 静的支持力との比較

当社千葉製鉄所において、PDA を用いた打撃計測と静的載荷試験を実施した。試験杭としては、試験 A では、杭径  $\phi=609.6$  mm、板厚  $t=12$  mm、杭長  $L=39$  m を、また試験 B では杭径、板厚が同じで杭長  $L=36$  m の鋼管を用い、ディーゼルハンマ (K-45、ラム重量 4.5 tf) により打設した。

通常、杭打設時に乱された地盤はその後の時間の経過にもとない回復し、それにもなって支持力が増加する。そのため、杭の極限支持力は杭打設時から十分な時間の経過後に発揮されるものである。しかし、PDA および CAPWAPC 法では杭を打撃した時点の地盤反力が動的貫入抵抗力として算定されるものであり、地盤の回復を考慮した値とはならない。よって、本実験では杭打設時に打止め時の計測と、杭打設後一定の放置期間をおいた再打撃計測を実施した。動的貫入抵抗力の算定は CAPWAPC 法により行った。その後、杭打設から試験 A では 31 日後に、試験 B では 49 日後に静的載荷試験を行った。なお、載荷方法は土質工学会編「クイの鉛直載荷試験基準・同解説」の多サイクル A 載荷法とし、静的載荷試験結果から極限支持力を求めるために Davisson の方法<sup>22)</sup> を用いた。

Table 1 に結果をまとめて示す。打止め時と再打撃時の抵抗力の増加率を比較すると、試験 A では 7.56 倍、試験 B では 4.66 倍となり、抵抗力が打止め時から大きく増加していることが分かる。次に、再打撃試験結果の静的載荷試験結果に対する比を求めると、試験 A では 105.7%、試験 B では 89.2% であり、本法による極限支持力の推定精度は実用的には十分に高いものであるといえる。また、参考として従来用いられている動的支持力公式 ((1)道示式、(2)建設省告示式) によって算定された値を表中に示した。

次に、周面抵抗力に関してより詳細な検討を行うため、CAPWAPC 法により算定された深度方向の周面抵抗力分布と載荷試験結果を Fig. 4 および 5 にそれぞれ示す。打止め時と再打撃時の比較をすると、再打撃時には摩擦抵抗がかなり大きくなっており、地盤が回復する状況をよく表わしている。また載荷試験の結果と再打撃時の結果を比較すると、その分布形状は試験 A および B ともに杭先端部以外ではほぼ一致した結果となった。

Table 1 Results of dynamic and static test

(tf)

		Total resistance	Shaft resistance	Toe resistance	Pile driving formulae	
					Formula (1) <sup>a</sup>	Formula (2) <sup>b</sup>
Test A	End of driving	66.4	47.4	19.0		
	Redriving (elapsed 115 h)	502.3	375.4	126.9		
	Static loading test (elapsed 31 day)	475.0	414.2	60.8	346.6	193.7
Test B	End of driving	106.8	64.8	42.0		
	Redriving (elapsed 400 h)	497.8	413.2	84.6		
	Static loading test (elapsed 49 day)	557.7	432.7	127.0	596.9	305.1

<sup>a</sup> Formula (1)  $R_d = \frac{AEK}{e_0 l} + \frac{NUI}{ef_0}$

<sup>b</sup> Formula (2)  $R_d = \frac{F}{5S+0.1}$

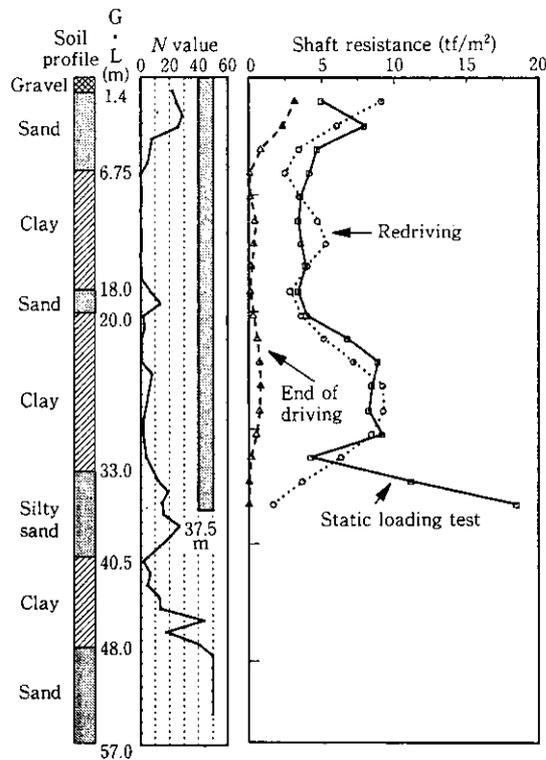


Fig. 4 Shaft resistances evaluated by CAPWAPC and static loading test (test A)

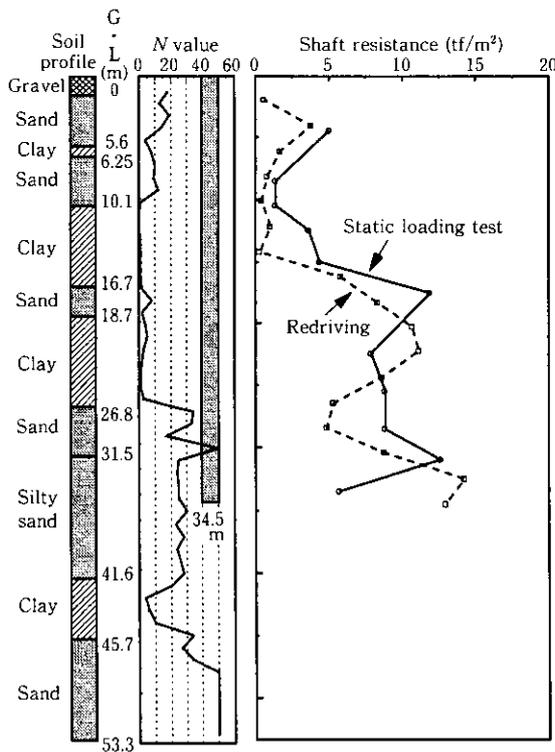


Fig. 5 Shaft resistances evaluated by CAPWAPC and static loading test (test B)

### 3.2 適用における検討課題

#### 3.2.1 杭打設後の経過時間ともなう支持力の増加

前述のように PDA を適用することにより、打設後の経過時間とともに変化する動的貫入抵抗が算定されることが明らかとなった

Table 2 CAPWAPC results (tf)

	Total resistance	Shaft resistance	Toe resistance
End of driving	863.2	688.2	175.0
Redriving 1 (elapsed 10 day)	1 326.7	1 141.2	185.5
Redriving 2 (elapsed 23 day)	1 483.6	1 290.8	192.8

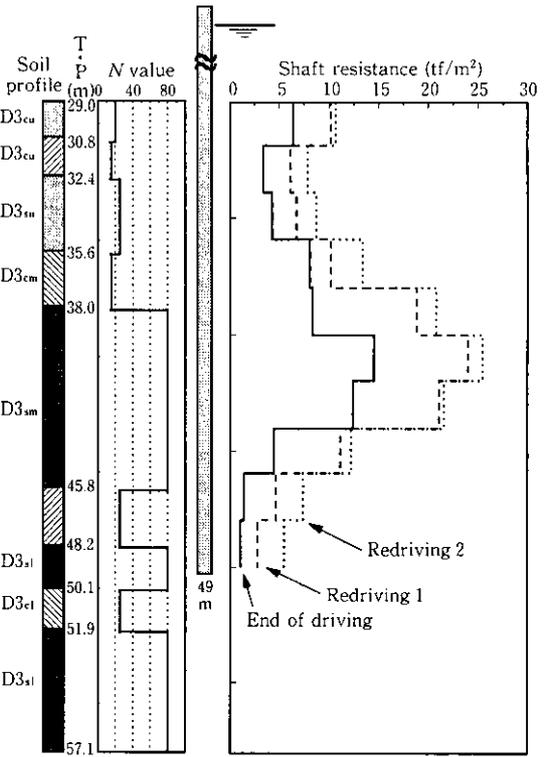


Fig. 6 Shaft resistance increase after pile installation

が、これをさらに詳細に検討するために、杭径  $\phi=1500$  mm、杭長  $L=56.8$  m の大口径鋼管杭を用いて、初日打止め時の計測および 10 日、23 日放置後の再打撃計測を実施した。計測杭の打設は油圧ハンマ (IHC-500, ラム重量 50 tf) を用い、動的貫入抵抗の算定は CAPWAPC 法によった。Table 2 に試験結果をまとめて示す。打止め時からの時間の経過ともない動的貫入抵抗は増加しているが、先端抵抗の変化は小さく、再打撃 2 回目までの放置期間 (23 日間) では、変化率は 10% 程度であり、動的貫入抵抗の回復現象は主に周面抵抗の増加として捉えることができる。周面抵抗の回復について検討を行うため、深度方向の周面抵抗分布を Fig. 6 に示す。再打撃時の結果では、抵抗はほぼ全深度にわたり打止め時の 2 倍程度に回復しているが、特に D3<sub>su</sub> の砂層での回復が大きい。回復速度に関してみれば、粘性土では再打撃 1 回目では再打撃 2 回目の半分程度の回復であるのに対して、砂層では再打撃 1 回目ではほとんど抵抗の増加が終了しており、打撃試験を行う時期によって算定される抵抗は大きく異なることが分かる。したがって、その杭の極限支持力を打撃試験によって推定しようとする場合、打設時からの放置期間を十分に取り、再打撃試験を行うことが重要であろう。再打撃を行う時期については、今後とも多くの再打撃試験を実施し、データを蓄積して打設後の経過時間と支持力の増加する関係を明らかにしていく必要がある。

3.2.2 打撃エネルギーの影響

打撃試験によって動的貫入抵抗力を算定するためには、試験時の打撃エネルギーが重要な要素である。本法は杭を打撃することによって達成される地盤の反力を動的貫入抵抗力として算定しようとするものであるから、打撃力が異なれば、その地盤の発揮する反力も異なることが予想される。ここでは打撃エネルギーの変化により、算定される抵抗力がどのように変化するかを検討するため、打撃力を調整できる油圧ハンマを使用して、Table 3 に示すように打撃エネルギー比（打止め時の打撃エネルギーに対する再打撃エネルギーの比）を0.5から2.0まで変化させながら、各5打撃ずつ計測を行った。

Table 3 Energy ratio and driving energy used for re-driving tests

Energy ratio*)		0.5	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
Driving energy (tf·m)	Redriving 1	5.7	11.0	15.9	18.2	20.9	
	Redriving 2	5.8	12.1	14.7	18.2	20.5	21.8

\*) Energy ratio:  $\frac{\text{Energy at re-driving}}{\text{Energy at end of driving}}$

解析結果を Fig. 7 に示す。どちらの計測においても、打撃エネルギーを増加するにしたがい、算定される動的貫入抵抗力も増加するが、打撃エネルギー比が1.75~2.0の場合では杭が大きく貫入を始めており、貫入抵抗力が減少している。算定された抵抗力は、打撃エネルギーの違いにより、再打撃試験1の場合15%、再打撃試験2の場合40%程度の差が生じており、打撃エネルギーの影響が大きいことを示している。本実験では、打撃エネルギーが大きくなるにしたがい総打撃数が増えるため、徐々に地盤が乱され、打撃エネルギー比が1.75~2.0以上の領域で貫入量が急増した。しかし、地盤性状が同一であれば、打撃エネルギーの増加にともない動的貫入抵抗力は一点破線で示すように、一定値に収束すると考えられる。したがって杭の極限の動的貫入抵抗を推定するためには、ある一定値以上の打撃エネルギーで計測を行う必要があると考えられる。

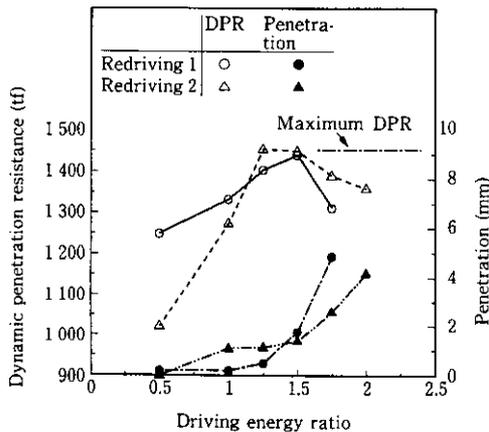


Fig. 7 Dynamic penetration resistance (DPR) and driving energy ratio (redriving/end of driving)

4 支持力管理手法への適用

4.1 杭の打止め管理手法の検討

杭打設における打止め管理手法として、従来は Hiley 式、道示式などの動的支持力公式を用いて、目標とすべき貫入量、リバウンド量をもとめ、それらを総合的に判断する手法が採用されてきた。しかしながら、動的支持力公式による極限支持力の推定上の適用限界を考慮すると、より合理的な管理手法の確立が必要と考えられる。その一手法として、現場での PDA 計測データを用いて波動理論に基づく動的貫入抵抗力と貫入量・リバウンド量の関係を算出し、打止め管理を行う方法を検討した。

Fig. 8 に本法による打止め管理の流れを示す。本法は波動理論を用いた杭打ち予測プログラムを適用し、実杭打撃における PDA 計測および CAPWAPC 解析結果をフィードバックすることを特徴としている。ここで杭打ち予測プログラムとは、ハンマの打撃エネルギーを仮定し、CAPWAPC 法と同様の地盤モデルを用いて打撃中の杭の挙動（貫入量、リバウンド量）等を予測するものである。CAPWAPC 解析から得られた杭先端および周面貫入抵抗力、周面抵抗力分布、地盤特性パラメータを入力し、動的貫入抵抗力に対応した貫入量およびリバウンド量を算定することで、実地盤におけるばらつきの影響を考慮することができる。ここで、静的極限支持力と動的貫入抵抗力との対応はセットアップ効率にて関係づけている。このように、本法では杭打撃時の実測データを貫入量の算定にフィードバックできるため、現地の影響を取り入れることができ、

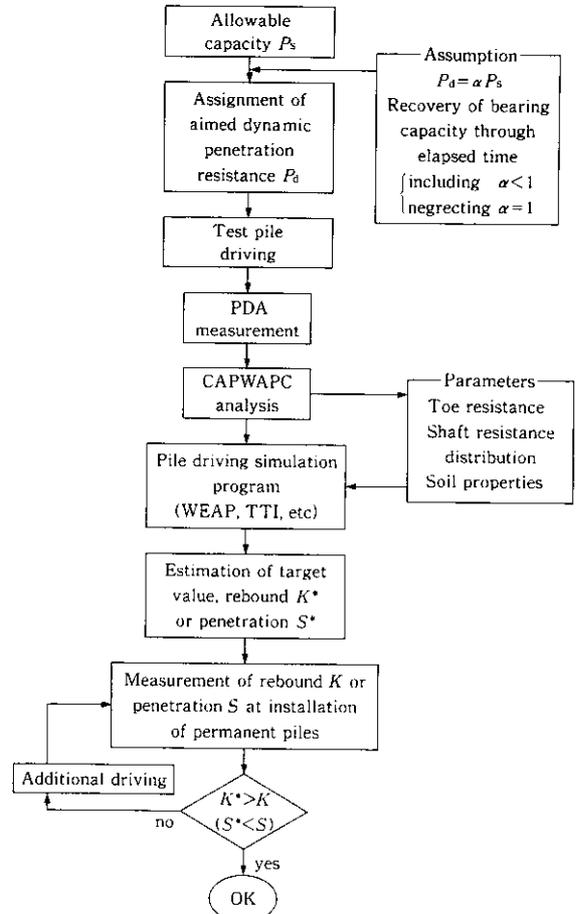


Fig. 8 Flow chart for driving control based on stress wave theory

より合理的な手法であると考えられる。

4.2 東京国際空港・立体駐車場（南棟）の例

現在運輸省により進められている東京国際空港の沖合展開工事に関連して、立体駐車場（南棟）の基礎として大径長尺鋼管杭が打撃工法により施工された。本工事に先立ち、打撃試験によって得られたリバウンド、貫入量等から、既往の動的力学公式による支持力算定結果と鉛直載荷試験結果の比較を行うとともに、CAPWAPC法により動的貫入抵抗力を推定し、次にそれらの結果から従来の打止め管理法と波動理論を用いた杭の打止め管理法との比較を行った。

Fig. 9 に示す地盤に、杭径  $\phi$  800 mm、板厚  $t$  22 mm、杭長  $L$  73 m

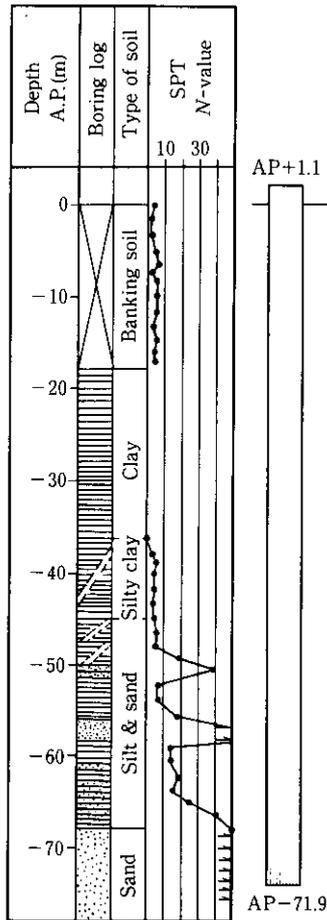


Fig. 9 Soil condition and test pile in final seating

の試験杭と杭径  $\phi$  800 mm、板厚  $t$  16 mm/12 mm、杭長  $L$  75 m の反力杭（圧密層下端まですべり層材料が塗布されている）を、ディーゼルハンマ（KB80；ラム重量 8 tf）によって打設した。打撃試験による測定項目は、打撃回数、リバウンド量、貫入量、ラム落下高およびひずみ（8断面）で、載荷試験杭と反力杭1本についてはPDA計測を行った。

その後、杭打設15日後に「タイの鉛直載荷試験・同基準」（土質工学会）に基づき静的載荷試験を実施した。

試験杭および反力杭の打止め時の測定結果を Table 4 に示す。載荷試験杭と反力杭のリバウンド量の差は両者の剛性の差によるものである。次に打止め時のデータより、動的力学公式（(1)道示式、(2)建設省告示式、(3)Hileyの式）から求めた極限支持力とCAPWAPC法による打止め時および再打撃時の動的貫入抵抗力の解析結果を Table 5 に示す。動的力学公式での算定値は載荷試験結果の0.75~1.17倍でいずれも設計極限支持力（939 tf）を満足する結果となった。また、CAPWAPC法による打止め時の動的貫入抵抗力は静的極限支持力の0.23倍となり、47時間後には打止め時の2.4倍、静的極限支持力の0.54倍となった。なお先端抵抗力が過小評価されているが、打撃エネルギー不足による影響であると考えられる。

従来は、杭打ち公式より設計値を満足する貫入量およびリバウンド量を逆算し、それらを総合的に判断して Table 6 に示すような基準により打止め管理を行っている。ここでは新しい提案としてCAPWAPC法の解析結果を利用して、波動理論を用いた杭打ち予測プログラムにより動的貫入抵抗力と貫入量の関係（Fig. 10）を算定した。この図を利用し、波動理論を用いた打止め管理法として、静的極限支持力と動的貫入抵抗力の比を本解析結果等から0.3と仮定し、設計極限支持力のこの比を乗じ、さらに地盤のばらつきを考慮して1.2の安全率を乗じた値を必要動的貫入抵抗力として必要貫入量（6.5 mm）を求めた。この結果は Table 6 に示した最終貫入量（6 mm）と同等の値であり、波動理論によって求めた打止め管理基準でも、従来の方法と同様の管理が可能であることが確認された。

Table 4 Driving data at the end of installation

	Penetration (mm)	Re-bound (mm)	Blow count	Ram height (m)	Max. stress at pile top (kg/cm <sup>2</sup> )
Test pile	3.6	18.0	3 938	2.6	1 446
Reaction pile	4.3	32.0	2 921	2.6	1 507

Table 5 Results of dynamic test

(tf)

		Total resistance	Shaft resistance	Toe resistance	Pile driving formulae		
					Formula (1) <sup>a</sup>	Formula (2) <sup>b</sup>	Formula (3) <sup>c</sup>
Testing pile	End of driving	323	278	45			
	Static loading test (elapsed 15 day)	1 400	890	510	1 473	1 059	1 650
Reaction pile	End of driving	317	278	36			
	Redriving (elapsed 47 h)	756	736	20	1 179	1 026	1 026

<sup>a</sup> Formula (1)  $R_d = \frac{AEK}{e_d} + \frac{NUI}{ef_0}$

<sup>b</sup> Formula (2)  $R_d = \frac{F}{5S+0.1}$

<sup>c</sup> Formula (3)  $R_d = \frac{ef \cdot W_H \cdot H}{S + (K/2)}$

Table 6 Proposed criterion for permanent pile installation

Penetration into bearing stratum	$l$	>4 times of pile diameter (3.2 m)
Final penetration	$S$	$\leq 6$ mm
Final rebound	$K$	$\geq 25$ mm
Blow count for last 1 m	$N$	$\geq 200$
Bearing capacity $R_d$ by pile dynamic formula		$R_d \geq P_s$

$$R_{d1} = \frac{1}{3} \times \frac{ef \cdot W_H \cdot H}{S + (K/2)}$$

$$R_{d2} = \frac{F}{5S + 0.1}$$

$P_s$ : Design allowable capacity

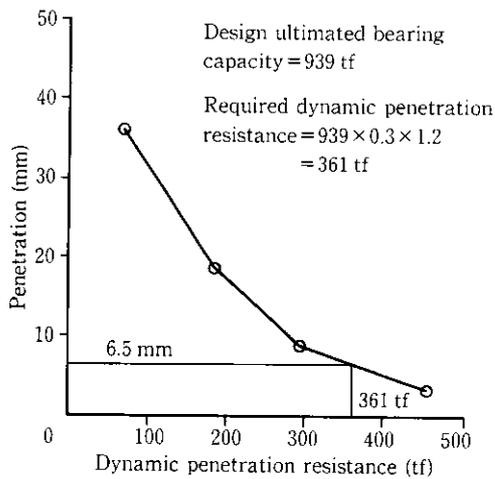


Fig. 10 Proposed criterion for permanent pile installation based on stress wave theory

4.3 大宮人工地盤構築工事の例

大宮人工地盤構築工事においては、建設地が遊水池の上という現場の特殊性から、STEP 工法<sup>23)</sup>を用いた杭打工事を一部実施した。STEP 工法とは、杭打装置自体が自ら打設した杭に上載し杭打施工を進行する工法であり、打設された杭はその施工サイクルの関係から打設後1日放置程度で総重量約 350 t の装置自重の分配載荷重を直接支持しなければならない。この現場では杭径  $\phi 600 \sim 800$  mm の鋼管杭を基礎杭として使用し、最も厳しいケースとして施工時の最大載荷重 122 t を  $\phi 600$  mm の杭で支持する必要があった。したがって、施工時の安全性を確認すべく、施工時荷重を上載する杭の1日放置後の支持力を適正に評価しておかなければならない。

従来実施されている現場支持力管理手法では、式自体が1日放置後の杭の支持力を推定するものではないため、本工事では前節で述べた“波動理論による杭打予測プログラム”と PDA 計測・解析を組み合わせ、貫入量と動的貫入抵抗力の関係図(支持力管理図)を作成し、1日放置後の杭の支持力を精度良く推定するよう試みた。支持力管理図の作成手順と現場における支持力管理の流れを Fig. 11 に示す。支持力管理図の例として、杭径  $\phi 600$  mm の場合を Fig. 12 に示す。従来の杭打予測プログラムによる解析では、入力パラメーターが経験的に設定され、管理図が作成される場合が多い。しかし本管理図の作成にあたっては、実際の打撃データの CAPWAPC 解

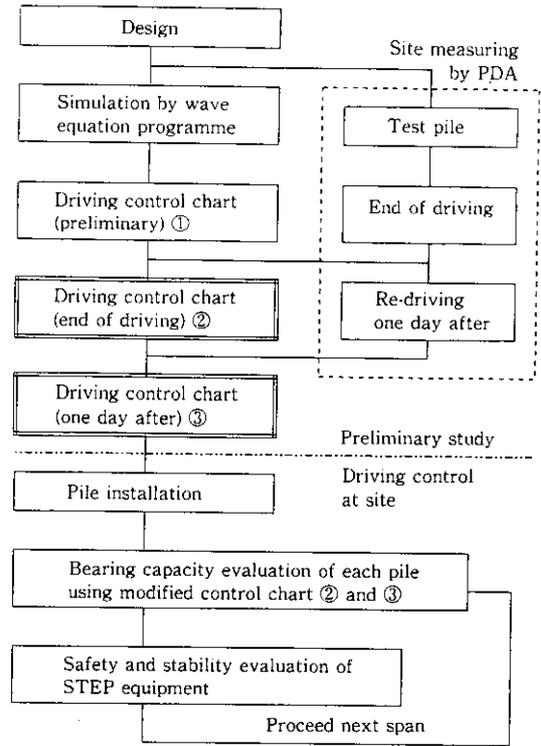


Fig. 11 Pile driving control flow chart for STEP

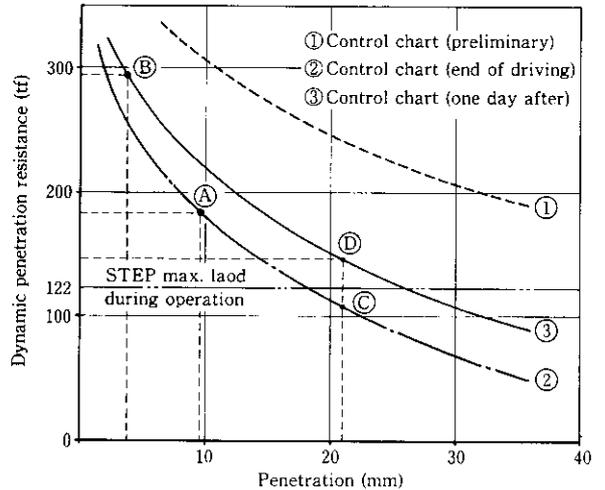


Fig. 12 Pile driving control chart

析結果から得られる動的貫入抵抗力や地盤特性パラメータ等の値を、入力データとしてフィードバックしており、従来の手法に比べて管理図自体の信頼性も向上している。

現場における支持力管理手法としては Fig. 12 における支持力管理グラフ②および③を使用する。例えば初日打止め時の打撃データによるグラフ②の支持力評価値③が STEP 施工時最大載荷重である 122 tf を下回った場合でも、グラフ③により1日放置後の経時支持力④を評価することができ、施工荷重に対する安全性を確認することができるという手法である。なお、この現場での PDA 適用については、先述の解析例と同様に現場にて実施した静的載荷試験と PDA 解析結果の比較を行い、当該地盤における解析の妥当性検証も実施している。

当社浦安岸壁工事の STEP 工法施工例では、1日放置後に鉛直

載荷試験を実施し経時的な支持力増加の確認を行ったが、今回の手法の採用により安全施工の信頼性を達成するとともに、経済面・工期面からも有効な手段として PDA の導入を図ることができた。

## 5 結 語

波動理論を適用した杭の支持力評価方法の一つである PDA の概要、適用性の検討および実際の杭打ち工事現場における支持力管理手法としての適用例について述べ、以下の結果を得た。

- (1) 再打撃により推定した動的貫入抵抗力和載荷試験結果による極限支持力とは 5~10% の誤差精度で一致した。他の同様の比較結果を考慮すると、再打撃を計画的に行うことにより誤差の少ない極限支持力の推定が可能である。
- (2) PDA により抵抗力を推定する場合は、入力エネルギーが小さい場合は支持力も小さく算定され、大きすぎると杭の新たな貫入が始まり動的貫入抵抗力が正確に算出できない。よって、適正な入力エネルギーの設定を行う必要がある。
- (3) 再打撃によって杭の支持力のセットアップを算出する場合、打撃後の放置期間に留意すべきであり、土質条件により適切な時期に再打撃を行わなければならない。

- (4) PDA システムを現場における支持力管理の手法として用いることは支持力管理精度の向上には有用である。特に、打設後数日で装置の荷重を受ける STEP 工法の場合は、工法の安全性・信頼性を向上させる上で有用な手法である。

PDA の特長は、現場計測作業・装置が簡易であり、特に海上の杭打では有効な手法であること、杭頭の計測のみで解析が行え抗体応力や周面・先端の地盤抵抗が推定できることなどがあげられる。しかし、波動理論による杭の支持力の評価は国内においては数々の研究が急速に進んできた分野であり、各種の手法が提案され研究が盛んに行われているのが現状である。これらの手法では解析に用いるパラメータと地盤の定数との関係が明確でなく、解析結果を土質工学的に評価することが困難な状況である。当社では杭周辺地盤に間隙水圧計を設置し間隙水圧の変化と周面摩擦力との関係に関する研究も別途行っている。今後、これらの研究を継続し鋼管杭の支持力を精度よく評価する手法を確立することにより、より安全で信頼性の高い基礎の構築に貢献していく所存である。最後に、本文を執筆するにあたり、各種の計測・解析に協力していただいた関係者の皆様およびデータの掲載を許可していただいた関係機関の皆様にお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 波田耕吉郎: 「クイ打公式 (動的支持力公式) の適用性」, 土と基礎, 21 (1973) 6, 5-8
- 2) 境 友昭: 「波動方程式の杭打ち問題への応用に関する研究」, 東北大学学位論文, (1990)
- 3) 本山 壽: 「海底軟弱地盤における大口径摩擦杭の設計・施工に関する研究」, 京都大学学位論文, (1988)
- 4) 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」, 京都大学学位論文, (1989)
- 5) 宇都一馬, 宮地明彦, 二宮康治, 岩下文彦, 大森 弘: 「加速度計による杭の打込み現象計測例」, 杭の打込み性および波動理論の杭への適用に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会 Pile Driving 国内委員会, (1989), 119-122
- 6) 藤田圭一, 新海 元, 本田幸一郎, 用松利雄, 植松慎一郎: 「波動理論における杭の貫入抵抗と静的支持力」, 第 25 回土質工学研究発表会, (1990), 1391-1392
- 7) D. V. Isaacs: "Reinforced Concrete Pile Formulas", *Trans. Inst. of Engineers, Australia XII*, (1931), 305-323
- 8) E. N. Fox: "Stress Phenomena Occuring in Pile Driving", *Engineering, Set. 2*, (1932), 236-265
- 9) G. G. Goble, J. J. Tomko, and F. Rausche: "Dynamic Studies on the Bearing Capacity of Piles", Phase I and II, (1968), [Case Western University]
- 10) G. G. Goble, F. Rausche, and F. Moses: "Dynamic Studies on the Bearing Capacity of Piles", Phase III, (1970), [Case Western University]
- 11) G. G. Goble, G. Likins, and F. Rausche: "Bearing Capacity of Piles from Dynamic Measurement", Final Report, (1975), [Case Western University]
- 12) G. Likins: "Field Measurements and Pile Driving Analyzer", 2nd. Intl. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm (Sweden), (1984), 126-133
- 13) H. Von Koten and P. Middendorp: "Equipment for Integrity Testing and Bearing Capacity of Piles," Intl. Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, (1980), 66-76
- 14) 建設省土木研究所および財団法人土木研究センター: 「杭の信頼性診断技術の開発に関する共同研究報告書」, DPAS プロジェクト, (1989)
- 15) 松本樹典: 「動的計測による杭の動的挙動の評価法と応力解析プログラム KWAVE」, 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 Pile Driving 国内委員会, (1989)
- 16) ASTM Standard D4945-89: Standard Test Method for High-strain Dynamic Testing of Piles," 87-93
- 17) J. L. R. Rocha, S. Niyama, A. B. Dasilva, S. Valverde, and De Mello J. R.: "Dynamic Measurement as a Control for Offshore Piling," Proc. of the XIth. ICSMFE., San Francisco (U.S.A.), 3 (1985), 1631-1634
- 18) K. W. Patrick: "The Use of Pile Driving Analyzer at a Hospital Complex in Malaysia", 3rd Intl. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Ottawa (Canada), (1988), 762-770
- 19) 奥村文直: 「打込み杭の支持力解析に関する日米比較調査(2)」, 第 24 回土質工学研究発表会, (1989)
- 20) B. H. Fellenius: "Variation of CAPWAP Results as a Function of Operator", 3rd. Intl. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Ottawa (Canada), (1988), 814-825
- 21) K. Fujita and O. Kusakabe: "On the evaluation of static bearing capacity", Proc. 3rd Intl. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Ottawa (Canada), (1988), 525-534
- 22) M. T. Davisson: "Static measurements of pile behavior", Design and Installation of Cellular Structures, (1970), 159-164, [Envo Publishing Co.]
- 23) 富永眞生, 源波修一郎, 小城 了: 「臨海杭打工法 (KST 工法) の開発」, 建設の機械化, No. 432 (1986), 21-26