

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

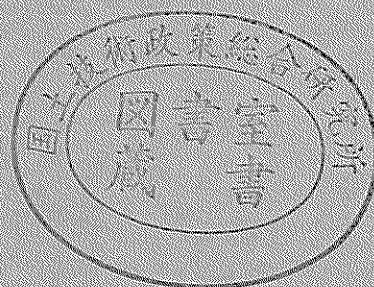
No. 841

June 1996

レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機の現地測定性能

石 塚 浩 次  
林 田 善 久  
永 野 亮

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

1. まえがき .....	4
2. レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機 .....	4
2.1 システムの概要 .....	4
2.2 レーザードップラ測定器 .....	4
2.3 データ処理の内容 .....	5
2.4 船体動揺処理ソフト .....	8
3. 陸上杭打ち工事における性能実験 .....	9
3.1 実験概要 .....	9
3.2 測定要領 .....	9
3.3 実験結果 .....	10
4. 海上杭打ち工事における性能実験 .....	12
4.1 実験概要 .....	12
4.2 測定要領 .....	12
4.3 実験結果 .....	13
5. レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機の現地測定精度 .....	16
5.1 陸上杭打ち工事における測定精度の比較結果 .....	16
5.2 海上杭打ち工事における測定精度の比較結果 .....	17
5.3 現地測定精度の評価 .....	19
6. 杭打ち施工管理の自動化 .....	23
6.1 杭打ち施工管理の自動化の概要 .....	23
6.2 機器設置上の対応 .....	24
6.3 データ処理の対応 .....	24
6.4 杭打ち施工管理基準に対する対応 .....	25
6.5 観測波形による杭打ち工事の施工管理 .....	26
7. まとめ .....	27
8. あとがき .....	28
参考文献 .....	28

# Field Performance Test Analysis of a Pile Driving Control System Using Laser Doppler Velocimeter

Koji ISHIZUKA\*

Yoshihisa HAYASHIDA\*\*

Akira NAGANO\*\*\*

## Synopsis

The 5th District Port Construction Bureau, Ministry of Transport has developed a practical control system of pile driving work which is able to measure the behaviour of pile under execution contactless by a laser Doppler velocimeter.

This paper describes the examined result of the measuring performance and accuracy based on the field data gained through on-land and offshore test. From the both side of equipments and data-processing, we estimated and investigated some problems in automating the control system of pile driving work.

- (1) The set measured by visual inspection in on-land work is accurate and stable. The error is within 1mm compared with the transit. The accuracy of the developed the control system is one-half of visual inspection.
- (2) The accuracy of visual inspection at sea work is half of that of on-land work. The accuracy of developed system at sea work is almost the same as visual inspection.
- (3) The set and elastic rebound measured by the developed system is larger than those of visual inspection. One of the reason is that the duration of the set calculation of the developed system is longer than actual hitting time. The other is that elastic rebound measured by visual inspection is smaller than the actual value because of traceability and read out accuracy.
- (4) The developed system is able to automate total process of the control of pile driving work from the beginning to the end.

Result of these tests, this pile driving control system using laser doppler velocimeter has enough performance to gather the all data of pile driving control. Also, this system is able to automate the total control of pile driving work.

**Key Words:** Pile driving, Execution control, Pile bearing capacity, Set and elastic rebound of pile, Laser Doppler velocimeter, Automate

---

\* Senior Research Engineer, Machinery Division

\*\* Member of Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division

\*\*\* Member of Machinery Section, The First District Port Construction Bureau, Ministry of Transport (Former Member of Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division)

# レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機 の現地測定性能

石 塚 浩 次\*  
林 田 善 久\*\*  
永 野 亮\*\*\*

## 要 旨

第五港湾建設局は非接触で杭の打ち込み挙動測定できるレーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機の実用機の開発を行った。本報告では、開発の中で行われた陸上および海上の杭打ち工事における現地実験データを基に測定性能、精度について評価検討を行ったものである。更に、杭打ち施工管理を自動化する上で問題となる諸課題について、機器およびデータ処理の対応内容についての評価検討も行った。

- (1) 陸上の杭打ち工事における人力測定による貫入量の測定精度は、トランシットによる貫入量の測定値を基準にして1 mm以下の高精度で安定した結果であった。開発された施工管理機の測定精度は、人力測定に対して1/2以下の精度であった。
- (2) 海上の杭打ち工事における人力測定の貫入量の測定精度は、陸上の工事に対して1/2以下であった。一方、開発された施工管理機の測定精度は、人力測定精度と同程度であった。
- (3) 人力測定値に対して、開発された施工管理機の貫入、リバウンド量の算出値は上回る。この要因として、貫入量を算出するための時間設定範囲が大きく、本来の打撃による貫入変位に対して大きく算出される。また、人力測定によるリバウンド量は、記録の追従性や読取り精度の低下により小さく算出される。
- (4) 開発された施工管理機は、杭の打設開始時より終了に至る全ての施工管理項目を自動的に行える。

今回の現地実験の結果、レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機は、杭打ち工事の施工管理に必要な各種データの測定について十分な性能を有している。また、これまで人力で行われていた施工管理作業を全て自動化できる。

キーワード：杭打ち施工管理，杭支持力，貫入・リバウンド，レーザードップラ測定器，自動化

---

\* 機械技術部 主任研究官  
\*\* 機械技術部 計測施工研究室  
\*\*\* 第一港湾建設局機械課（前：機械技術部計測施工研究室）

## 1. まえがき

杭打ち工事の施工管理は、打設途中および支持層付近における杭の支持力管理を含めて人力測定により行われている。特に、支持層付近における杭の支持力管理のための貫入、リバウンド量の測定は、杭に用紙を貼付して鉛筆等の筆記具で直接記録している。この記録作業はハンマー直下の作業となるため、作業の安全性等の観点からこれまで自動化等の改善が求められていた。

当計測施工研究室においては、このような杭打ち工事の施工管理の改善を図るため、非接触で杭の打ち込み挙動測定できるレーザードップラ測定器の測定性能、精度を明らかにして、杭打ち施工管理システムとして提案を行った。この提案を基に運輸省第五港湾建設局は、平成4年度からレーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機の実用機の開発を行っている。

開発された施工管理機は、打込み開始から打ち止めに至る杭の打ち込み挙動を計測し、施工管理に必要なデータをリアルタイムにCRT画面上に出力できる。そのため、現状人力で行われている施工管理の全てを自動化できると共に、打設途中、支持層付近の打ち込み状況も管理できる。また、海上において杭打ち船上から杭の打ち込み挙動を計測する場合の計測点の動揺補正は、1打撃毎の計測データに最小二乗法を適用して高精度に動揺成分の推定を行っている。

本報告では、実用機開発の中で行われた現地実験データを基にレーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機の現地測定性能、精度について評価検討を行ったものである。現地実験は、陸上の杭打ち工事と海上の杭打ち工事の中で行われ、従来の人力測定による貫入、リバウンド量および別途設置したトランシットによる打込み貫入量等との精度比較を行っている。本報告では、技術開発の最終段階で行われた陸上実験と海上実験結果により主に測定精度の評価を行っている。更に、レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機は、杭の支持力以外の管理項目（打込み深さ、打撃回数等）の測定も自動的に行える。そのため、杭打ち工事の施工管理を自動化する上で問題となる諸課題について、機器およびデータ処理の対応内容についての評価検討も行っている。

## 2. レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機

### 2.1 システム概要

レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機は、杭の打ち込み挙動を計測するレーザードップラ測定器

（プローブ部、信号処理部）計測されたデータを処理するデータ処理部（パーソナルコンピュータ、プリンター）から基本的に構成される。レーザードップラ測定器のプローブ部と信号処理部の設置距離が15m以上の場合には、信号ケーブルの中継器が必要となる。図-1にレーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機の全体システム構成を示す。また、以下に各構成機器の仕様を示す。

「レーザードップラ測定器」

- ①測定方式 : レーザドップラー方式
  - ②使用レーザー : 半導体レーザー、  
波長=約690nm、出力=30mW
  - ③速度測定範囲 : ±500 m/min
  - ④変位測定範囲 : ±500 mm（この範囲を超える場合はソフトウェアで連続性を確保）
  - ⑤測定距離 : 800 or 2,000 mm
  - ⑥測定距離許容範囲 : ±140 mm
  - ⑦サンプリングレート : 2.5 KHz
  - ⑧測定精度 : F.S 0.2%
  - ⑨寸法、重量
    - ・プローブ部 : 180W×450D×175H, 約15kg
    - ・信号処理部 : 350W×335D×120H, 約8kg
    - ・中継器 : 400W×200D×530H, 約21kg
- 「データ処理部」 : パーソナルコンピュータ+プリンター

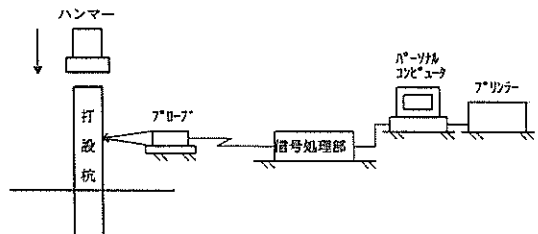


図-1 全体システム構成図

### 2.2 レーザードップラ測定器

#### (1) 速度および変位測定原理

レーザードップラ測定器は、レーザー光のドップラ効果を利用して速度を計測するもので、図-2にその原理図を示す。

レーザー光を移動物体に照射すると、その散乱光の波長（周波数）はドップラ効果によって照射光の元の周波数から移動物体の速度に応じて変化する。この周波数の変化量、すなわちドップラ周波数  $f_d$  は次式で与えられる。

$$f_d = (K_s - K_o) \cdot V / 2\pi \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $K_s$ ,  $K_o$ : 照射光, 散乱光の波数ベクトル

V : 物体の移動速度ベクトル

この  $f_d$  を測定することによって移動物体の速度 (V) を計測することができる。また、図-3にレーザードップラ測定器の基本光学構成を示す。分割された2本のレーザビームを移動物体の表面に互いに反対方向から交差するように照射する。この2本の照射光に対応した散乱光は、正負同じ量の周波数変化が生じることになる。これらの散乱光を受信光学系で重ね合わせることによる干渉によって、次式に示すドップラ周波数  $f_d$  が検出される。

$$f_d = 2V / \lambda \cdot \sin(\psi / 2) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、V : 物体の移動速度

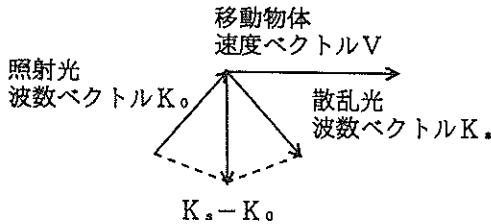
$\lambda$  : レーザ光の波長

$\psi$  : 2本のレーザ照射光の交差角

すなわち、ドップラ周波数  $f_d$  と物体の移動速度 V の関係は、プローブの光学配置で決定されるレーザビームの交差角  $\psi$  のみに依存したものとなる。

また、測定距離の許容範囲は、図-4に示すようにビームの幅と交差角によって決まる。

一方、変位の演算処理は、(2)式で得られたドップラ周波数を直接カウンターでカウント (積分) して求め



$$\text{波数遷移量} : f_d = (K_s - K_0) \cdot V / 2\pi$$

図-2 ドップラ効果の原理図

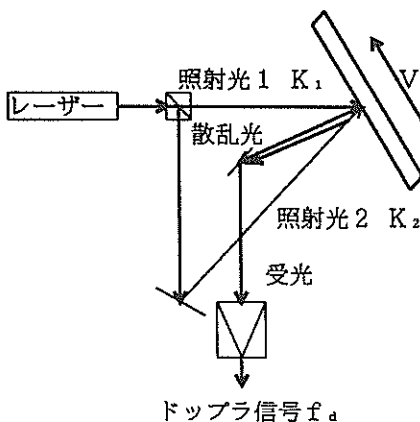


図-3 レーザードップラ測定器の基本光学構成

られる。

### 2.3 データ処理の内容

#### (1) 信号処理の内容

レーザ光が杭表面に照射中、常に速度および変位が計測され、杭打撃中の貫入速度及び変位波形がレーザードップラ測定器の信号として出力される。データ処理部では、速度信号の立ち上がり部で杭の打撃検出を行い、1打撃毎の貫入、リバウンド量を変位信号から求める。

図-5にレーザードップラ測定器から得られる杭の打撃中の速度、変位信号の模式図による信号処理内容を示す。打撃中の杭の貫入、リバウンド量は、速度波形の立ち上がり信号が設定レベルを越えた点を打撃検出点とし、その検出点より前の変位信号の一定な区間を0点とし、打撃後の一定な区間を貫入量として求めている。また、打撃中の変位の最大点を検出し、前記貫入量との差をリバウンド量としている。更に、打撃検出毎に打撃回数としてカウントし、打撃検出間隔をハンマーの打撃間隔 (時間) として求めている。

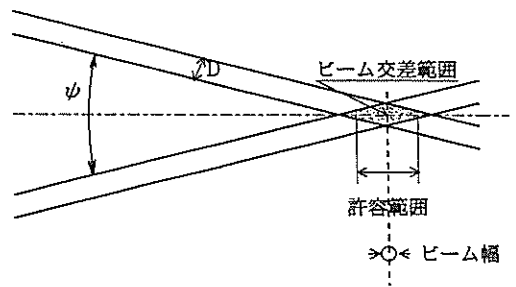


図-4 レーザードップラ測定器の測定距離許容範囲

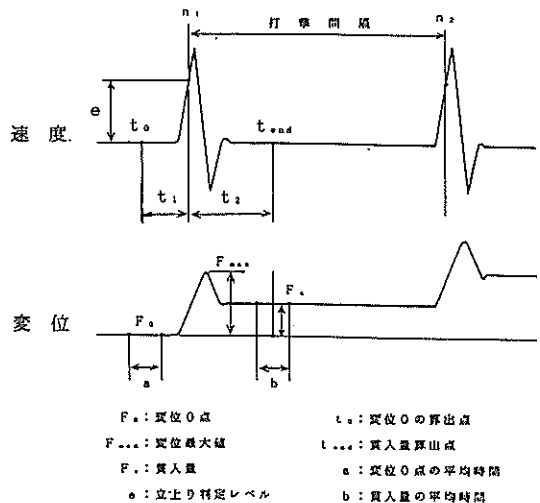


図-5 信号処理イメージ図

貫入、リバウンド量を算出するデータ処理の設定時間は、通常以下のような範囲に分けて設定している。

データ処理の設定時間

- ・打撃前設定時間： $t_b=10\text{ms}$ ，  
 $t_a=160\text{ms}$  (= 0 線)
- ・打撃中設定時間： $t_k=160\text{ms}$
- ・打撃後設定時間： $t_s=240\text{ms}$  (= 貫入量)

上記の設定時間の中で、打撃中の設定時間160msは、打ち込み初期のリバウンドがほとんど無い状態(打撃中時間150ms以下)から打ち止まり付近のリバウンド量が貫入量を上回る状態(打撃中時間70ms以下)まで対応できるものである。また、打撃前の設定時間 (= 0 線)、打撃後設定時間 (= 貫入量)は、後述する船体動揺補正処理からは短くすることが望ましいが、それぞれ安定して求められる範囲としている。

(2) データ処理の内容

図-6 にデータ処理フローを示す。測定開始前の情報の入力として、工事情報に加えて、貫入、リバウンド量を求めるための測定条件、ハンマーのラム重量を入力する。測定条件の入力項目として、図-5 に示した立ち上がり判定レベル、およびデータ処理のための各設定時間がある。これらの初期条件の入力後、測定中において、1 打撃毎に以下の施工管理項目や施工管理項目を算出する上で必要となる量が算出される。

- ① 打撃間隔
- ② 1 打撃毎のラム落下高さ (油圧ハンマーの場合は設定値)
- ③ 1 打撃毎の貫入量
- ④ 1 打撃毎のリバウンド量
- ⑤ 1 打撃毎の杭の支持力
- ⑥ 10打撃毎の杭の平均支持力
- ⑦ 50cm (打止まり付近は10cm) 毎の打撃回数および平均貫入量
- ⑧ 累積貫入量
- ⑨ 累積打撃回数

測定中のデータ出力として、表-1 に示す内容の各データが CRT 画面にリアルタイムに表示され、測定終了後には表-2 に示す港湾工事の施工管理基準に基づいた打ち込み記録が帳票として出力される。また、表示モードの切り替えによって、図-7 に示す計測された変位波形データと動揺補正処理された波形データおよび算出された貫入量がラインで表示される。ハンマーの打撃エネルギーを求めるためのラム落下高さは、打撃間隔から杭打ち機の機種に応じて以下のように算出処理される。

ディーゼルハンマー：  $H = c \cdot \frac{1}{2}gt^2$  (自由落下)

$c=0.9$  (過去の実験による実績)

油圧ハンマー： 予めラムストローク設定値とラム落下時間の関係を入力しておき、算出された打撃間隔の時間と照合して自由落下としてラムの落下高さを算出する。

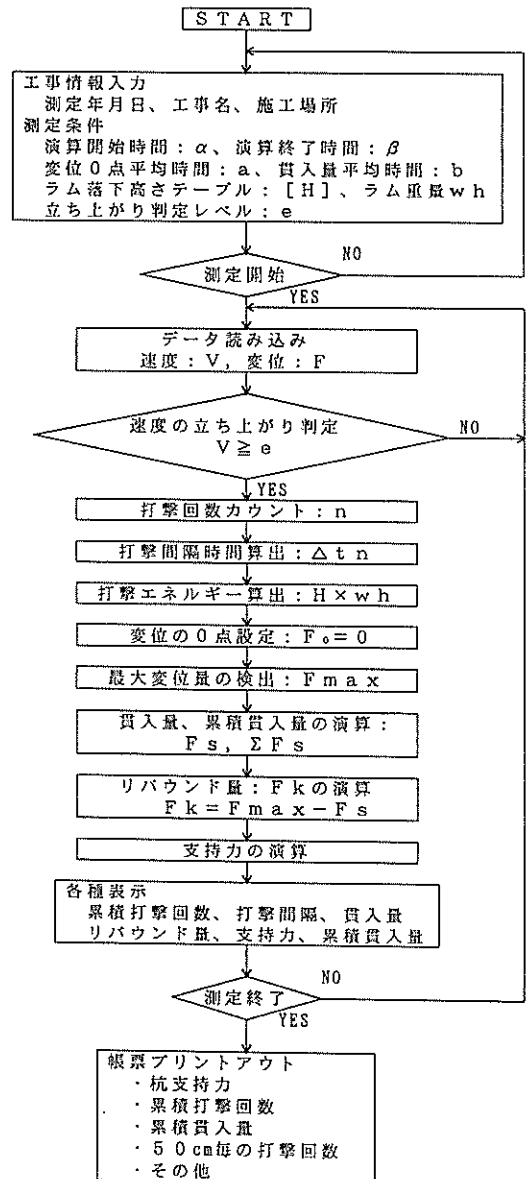


図-6 データ処理フロー

表-1 打撃中のCRT表示例

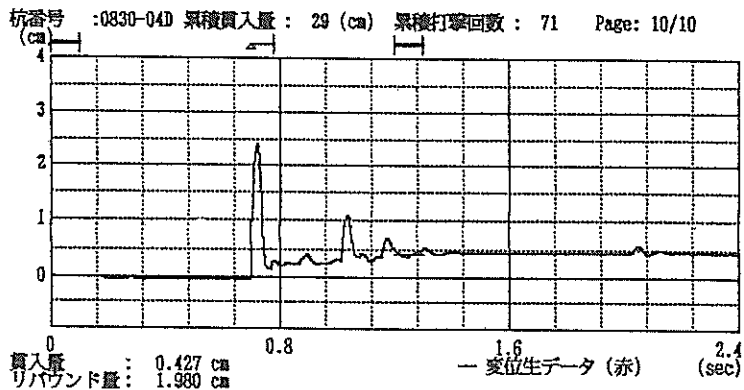
<<< 測定・結果出力 >>>						000001f1
杭番号 : 0830-04D 累積貫入量 : 15.1 (cm) 累積打撃回数 18						
打撃No.	打撃間隔(sec)	ラム落下高(m)	貫入量(cm)	リバウンド量(cm)	支持力(t)	
9	2.88	0.900	0.44	1.54	668	
10	2.88	0.900	0.40	1.56	685	
11	2.88	0.900	0.88	1.61	481	
12	2.86	0.900	0.86	1.61	488	
13	2.86	0.900	0.84	1.63	488	
14	2.87	0.900	0.73	1.75	505	
15	2.87	0.900	0.79	1.68	496	
16	2.86	0.900	0.65	1.80	524	
17	2.87	0.900	0.69	1.75	517	
18	2.86	0.900	0.67	1.74	524	
設計支持力[ 130.0t ]						
10打撃毎の平均支持力[ 537.5t ]						
測定中 !!						
F8 : 測定停止						

表-2 打込み記録帳票出力例

杭打込み測定結果										測定者 港湾技研			
杭施工管理プログラム													
運輸省港湾技術研究所													
PC-98XL													
A44-08-19B													
91/04/10 10:30:34													
杭 外 径 1,000 mm										杭長さ 40 m			
ラム 重 量 7.2 ton													
91/04/10 10:31:24													
平均 0.5m毎													
貫入量	の打撃	累積打	平均	平均	平均	貫入量	の打撃	累積打	平均	平均	ラム	落下	平均
[m]	[回]	[回]	貫入量	ラム	落下	[cm]	[回]	[回]	貫入量	ラム	高さ	高さ	支持力
			[cm]	[cm]	[m]	[t]			[cm]	[cm]	[m]	[m]	[t]
0.5	12	12	4.1	0.43	1.47	199							
1.0	12	24	4.1	0.43	1.53	208							
1.5	12	36	4.0	0.44	1.56	212							

<<< 変位データ表示 >>>

1996-03-04 10:58



F1:前画面 F2:後画面 F3:縮小 F4:拡大 F5:グラフメニュー F6~F10:時間軸変更

図-7 CRT 波形データ表示例



## 2.4 船体動揺処理ソフト

### (1) 杭打ち貫入, リバウンド記録と船体動揺

杭打ち船上にレーザードップラ測定器のプロープを設置して打設中の杭挙動を測定する場合、動揺自体によっても変位記録は変動し、動揺変動の中で杭の打ち込み挙動が計測される。波浪等による杭打船の上下動揺は、過去の実験では周期3～5秒、最大振幅6cm程度上下動する。この上下動の0-P(1/4周期)では、1cm/secの割合で変位出力が変動することになる。そのため、この上下動による杭打込み挙動の貫入量算出への影響は、1打撃のデータ処理時間を約0.5secとして5mm程度の誤差となっている。

### (2) 最小二乗法近似による船体動揺補正

動揺のある杭打ち込み変位記録の動揺補正は、図-8に示すように打撃前、打撃後の一定区間のデータに最小二乗法を適用してデータ処理区間の動揺成分を推

定し、打撃区間を含めて補正している。

打撃前、打撃後の一定区間のデータに最小二乗法を適用する場合、打撃による杭の貫入変位により一般的な関数としての連続性がなくなる。そのため、本動揺補正処理では、以下に示すような考え方で動揺成分の推定を行っている。

①動揺成分 $S(t)$ は、2次多項式で近似する。

$$S(t) = a_2 + a_3t + a_4t^2 \dots\dots\dots (3)$$

②打撃中の船体動揺を含む変位データを $Z(t)$ として、打撃前、打撃後のデータから以下の多項式で近似する。

$$Z(t) = a_1f(t) + a_2 + a_3t + a_4t^2 \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $f(t)$ は図-9に示すように、ある時刻 $t_k$ で1にジャンプする関数とする。

③打撃前、打撃後のデータ( $n$ 個)が(4)式を満足するものとして、最小二乗法を適用して各係数 $a_i$ ,

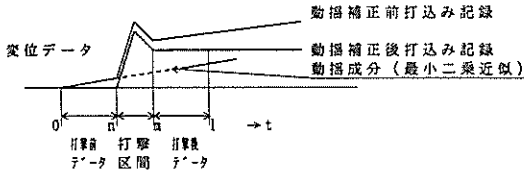


図-8 動揺補正処理イメージ図

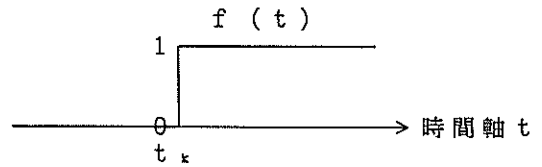


図-9 ジャンプ関数

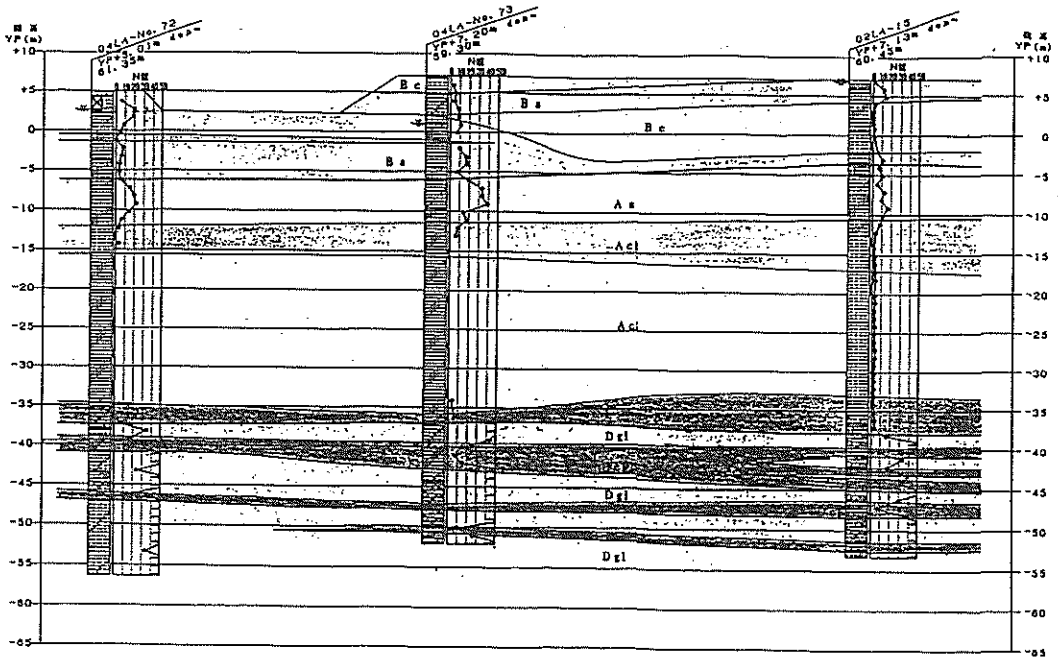


図-10 陸上杭打ち工事区域の土質柱状図

$a_2, a_3, a_4$ を求める。その結果、船体動揺成分  $S(t_i)$  を求める。

④杭の打撃による変位データ  $K(t_i)$  は、動揺を含む元の変位データ  $Z(t_i)$  から求める。

$$K(t_i) = Z(t_i) - S(t_i) \dots\dots\dots (5)$$

⑤杭の打撃貫入量は、(4)式の1にジャンプする関数の係数  $a_1$  から求める。

$$S = a_1$$

⑥リバウンド量の値は、以下のように求める。

$$R = K(t_i) \text{ の最大値} - a_1 \dots\dots\dots (6)$$

### 3. 陸上杭打ち工事における性能実験

#### 3.1 実験概要

##### (1) 実験内容

陸上の杭打ち工事における実験は、本施工管理機の陸上の杭打ち工事への適用性を明らかにするためのもので、杭の打設開始より打ち止めに至る間において、本施工管理機を陸上に設置して測定性能、測定精度の比較実験を行った。

##### 1) 実験場所

中部電力株式会社 川越火力発電所 (三重県三重郡川越町)

図-10に工事区域の土質柱状図を示す。

##### 2) 実験条件

実験時の打設杭および杭打機の仕様を表-3に示す。

##### 3) 機器の設置

レーザードップラ測定器のプロープは、打設杭から0.8mの地点の地盤上に設置した三脚上に設けて測定を行っている。写真-1にプロープの設置状況を示す。

#### 3.2 測定要領

本実験においては、従来から行われている人力測定結果 (杭に用紙を貼付して貫入、リバウンド量を記録) および別途設置したトランシットによる貫入量の測定結果と比較している。実験の測定要領は図-11に示す手順で

表-3 打設杭および杭打ち機の仕様

打設杭	材質 ; P H C 杭 長さ ; $\phi 0.6\text{m} \times 48\text{m}$ 、継ぎ杭 (上=9m、中上=12m、中下=12m、下=15m)
杭打機	型 式 ; DH608-120M ハンマー形式 ; HNC100 (油圧) ラ ム 重量 ; 10t o n

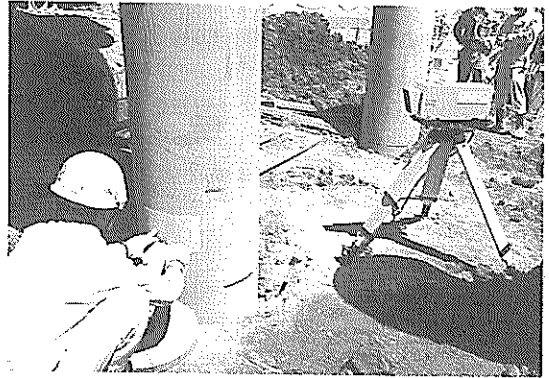


写真-1 陸上実験プロープ設置状況

行い、杭打設時の貫入、リバウンド量の測定は、人力測定と本施工管理機による測定 (以下機械測定とする) の記録のタイミングを合わせて行っている。各測定における打設杭の本数は、以下の通りである。

- ①「トランシット-人力」貫入量測定 = 7本
- ②「トランシット-機械」貫入量測定 = 27本
- ③「人力-機械」貫入、リバウンド量測定=21本

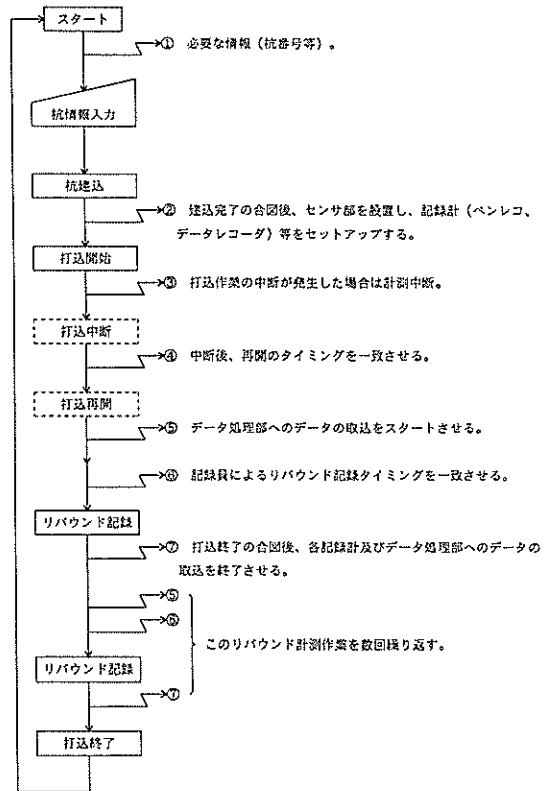


図-11 測定要領図

①～③の測定は、ほぼ杭の打止め付近で行っている。  
 ①～②の測定のトランシットは打設杭から約10mの地点に設置して、杭の表面に貼付したスケール（紙製）を読み取っている。また、打撃時の地盤振動によるプローブへの影響を明らかにするため、プローブの打撃振動加速度の測定を行っている。

### 3.3 実験結果

#### (1) 計測状況

陸上の杭打ち工事の実験におけるレーザードップラ測定器の計測状況、また計測データの特徴として、以下のことがらがあった。

①レーザードップラ測定器の測定は、杭の打設始めから打止まりまで行えた。

②打撃後の2度打ち、3度打ち現象が支持層付近の杭の支持力が大きくなるにたがって現れる。

③打撃前の微小区間で杭浮き現象（変位データはマイナス側に出力）が、杭の打始めから打止まり付近まで継続的に記録された。また、打撃後の2度打ち、3度打ち後にラムが杭に載荷したことによる杭の沈下現象が発生している。

#### (2) 測定結果

図-12, 13に人力および機械による貫入、リバウン

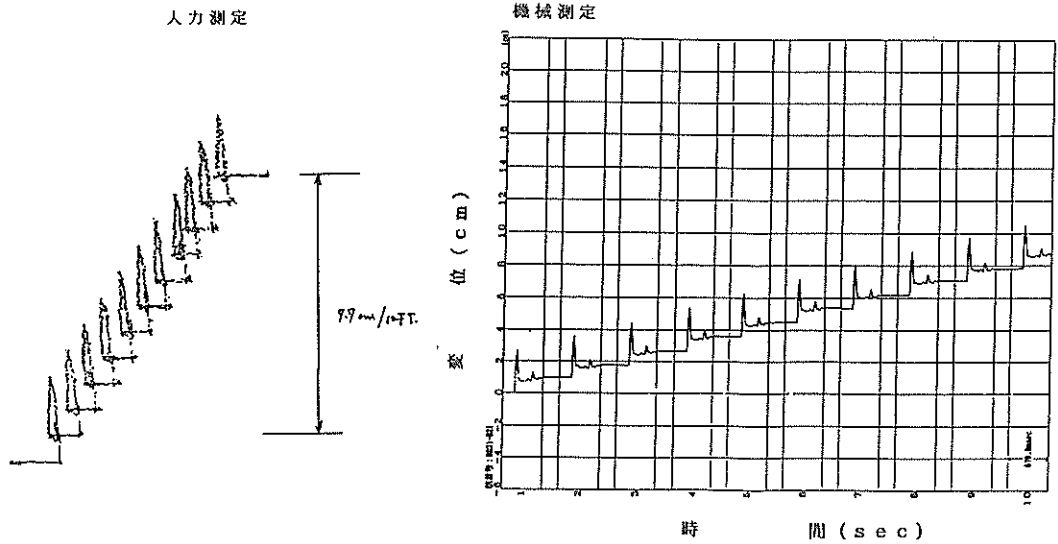


図-12 陸上杭打ち工事貫入、リバウンド量の測定記録例

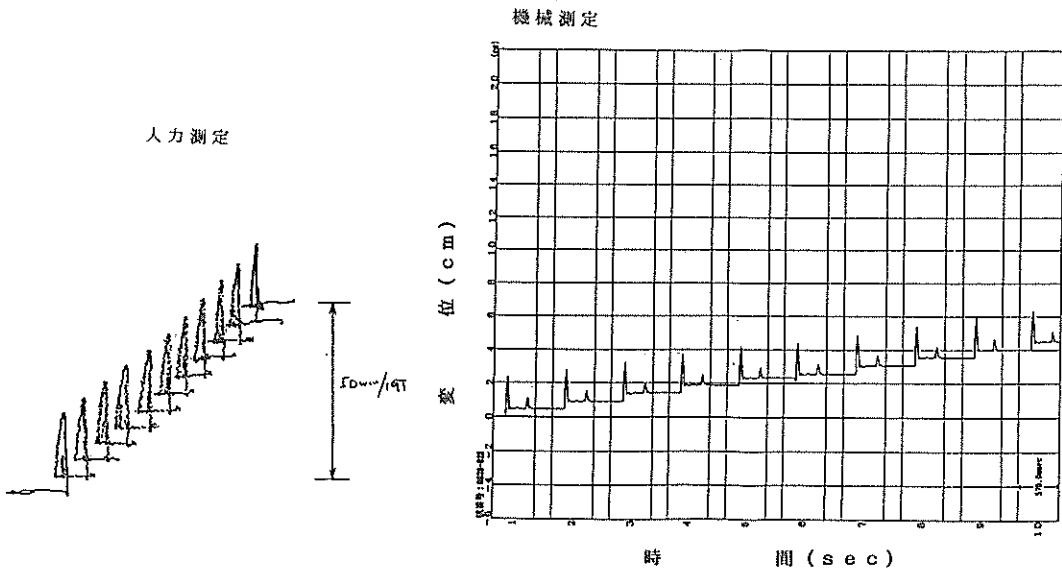


図-13 陸上杭打ち工事貫入、リバウンド量の測定記録例

ド量の測定記録例を示す。図に示した機械測定記録は、データを処理した後のもので、打撃前の杭浮き現象は現れていない。機械測定記録によれば、杭の打撃挙動を忠実に計測しているものと考えられ、リバウンド後の2度打による飛び跳ねと2度打後の僅かな貫入が記録されている。一方、人力測定記録は、リバウンド後の2度打等の上下動が1ヶ所に記録され、貫入量を記録する際の水平移動はその上下動の中間点および下端部から行われているケースがある。中間点からの場合は2度打による再貫入や打撃後にラムが杭に載荷したことによる杭の沈下現象が生じている場合で、下端部からの場合は2度打による再貫入が無い時に行われているものとする。また、貫入量を示すラインと次の打撃の記録開始点には変位量の差が見られ、打撃前の杭浮き現象が記録されている。

次に、陸上の杭打ち工事で特徴的に現れた打撃前の杭浮き現象、2度打、3度打現象について考察する。

### ①打撃前の杭浮き現象

図-14に打撃前の杭浮き現象が顕著な機械測定記録例を示す。杭浮き現象が現れるのは打撃前の約440～530msの時間で、最大2mm程度の量となっている。この杭浮き時間をラムの落下時間（自由落下として計算）と比較したものが図-15である。杭浮き時間は、ラム落下時間を上回っているものの、明らかな相関がみられる。杭の浮き現象が現れる理由は、油圧ハンマー特有の機構によるもので、打撃直前には杭に載荷されていたラム重量が自由落下に伴い開放されることによるものとする。したがって、杭の浮き量は、ラム重量による杭の弾性変形と地盤変形量に相当するものとする。

### ②打撃後の2度打、3度打現象

打止まり付近の2度打、3度打現象の大きい測定記録を図-16に示す。この現象は、過去において実験したディーゼルハンマーでは生じておらず、油圧ハンマーによる自由落下後の反発による跳ね上がり現象と考える。この2度打、3度打現象は、前年度に実施した鋼管杭（φ0.6m）においてより大きく現れていた。2度打、3度打現象が現れるような場合、最初の打撃のピークと2度打のピークの間は約0.2秒で、自由落下として跳ね上がり量に換算すると約5cmに相当する。更に、飛び跳ね量が大きい場合、その打撃によっても杭は貫入している。また、2度打、3度打後のラムの杭への載荷によって打撃前の杭浮き量とほぼ等しい沈み込み量がある。

以上の陸上杭打ち工事の実験で現れた各現象に対し

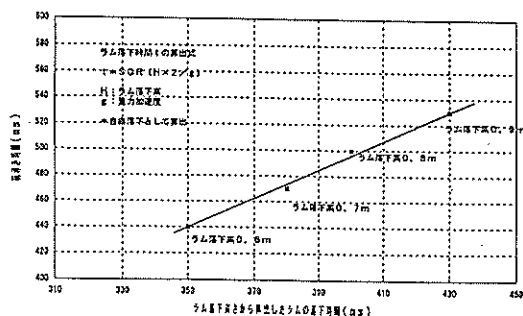


図-14 打撃前の杭浮き現象の測定記録例

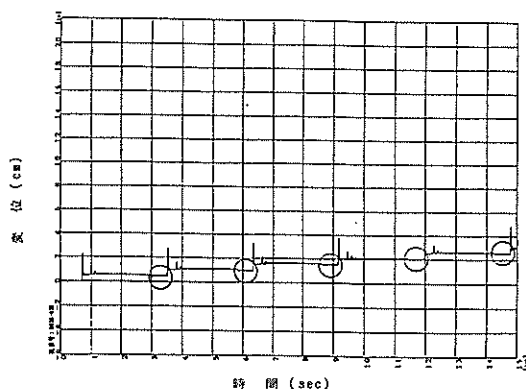


図-15 ラム落下時間と杭浮き時間の関係

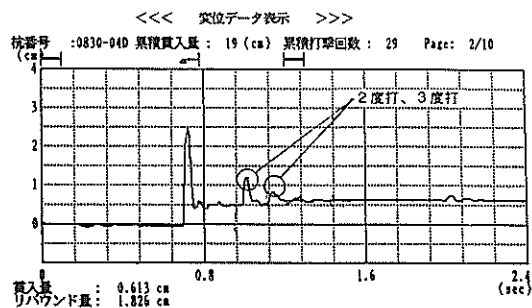


図-16 打撃後2度打ち、3度打ち現象の測定記録例

て、機械測定のデータ処理の対応内容を以下に示す。

①の打撃前の杭浮き現象に対しては、各打撃前のデータ長を160msとしている。そのため、杭浮き時間の中で各打撃の変位の0点として貫入、リバウンド量を算出している。

②打撃後の2度打、3度打現象に対して、貫入量の算出範囲は打撃開始から約160～400msで、2度打前のラムの無載荷状態、2度打中の飛び跳ね、2度

打後の再貫入，ラムの載荷による杭の沈み込み範囲に至る範囲の平均値として求めている。

一方，地盤上に三脚により設置されているレーザードップラ測定器のプロープの打撃中の振動は，最大加速度 $=0.3G_{p-p}$ で，最大振幅 $=0.3mm_{p-p}$ であった。

#### 4. 海上杭打ち工事における性能実験

##### 4. 1 実験概要

###### (1) 実験内容

海上の杭打ち工事における実験は，本施工管理機の海上の杭打ち工事への適用性を明らかにするためのもので，杭の打設開始より打ち止めに至る間において，本施工管理機を杭打ち船の船上に設置して測定性能，測定精度の比較実験を行った。

###### 1) 実験場所

名古屋港西4区岸壁-14m

杭打ち工事区域の土質柱状図を図-17に示す。

###### 2) 実験条件

実験時の打設杭および杭打ち船，杭打機の仕様を表-4に示す。

###### 3) 機器の設置

レーザードップラ測定器のプロープは，杭リーダ下部に設けた設置台（鋼板製，溶接構造）上に設置している。プロープから杭までの測定距離は0.8mである。写真-2にプロープの設置状況を示す。ま

表-4 打設杭および杭打ち船，杭打ち機の仕様

打設杭	材質：鋼管杭 形状、長さ： $\phi 1.3m \times 52m$
杭打ち船	旋回式、船体； $52 \times 25 \times 3.5m$
杭打機	型式；NH-115B 駆動方式；油圧駆動、タワールアクション ラム重量；11.5 ton

た，旋回式杭打ち船は，杭の建て込み作業を杭打ち部を旋回して行う。そのため，プロープと信号処理部間の信号ケーブルに中継ボックスを設け，全長 $=75m$ としている。

###### 4. 2 測定要領

海上工事における実験は，陸上実験と同様に人力測定による貫入，リバウンド量の測定結果およびトランシットによる貫入量測定結果との比較実験を行っている。測定手順も同じく，図-11に示した手順で行っている。また，本実験では，打設杭表面の0.5m間隔の杭長マークを目視により読み取り，機械測定の打設途中の貫入量の測定精度として比較を行っている。各測定における打設杭の本数は，以下の通りである。①「トランシット-人力」貫入量測定 = 9本  
②「トランシット-機械」貫入量測定 = 10本  
③「人力-機械」貫入，リバウンド量測定=10本

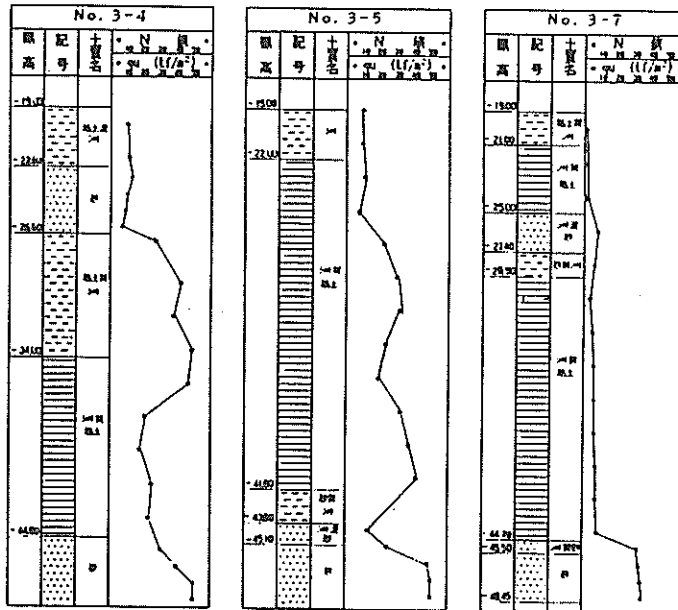


図-17 海上杭打ち工事区域の土質柱状図

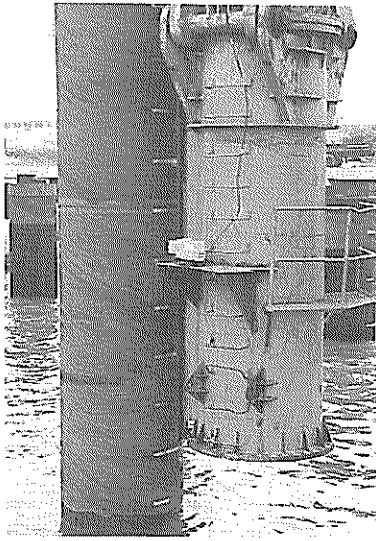


写真-2 海上実験プローブ設置状況

④「目視-機械」打設途中の貫入量測定 = 7本

①~③の測定は、主に杭の打止め付近で行っている。

①~②のトランシット測定は、既設の岸壁上に設置して、杭の表面に貼付したスケール（紙製）を読み取っている。

④の測定は、打設の途中から杭表面の50cm毎の杭長マークを船上から船体の一部をレベルにして目視により読取っている。また、プローブおよびプローブ設置台の打撃時の振動測定を加速度計により行っている。

#### 4.3 実験結果

##### (1) 計測状況

海上の杭打ち工事の実験におけるレーザドップラ測定器の計測状況、また計測データの特徴として、以下のことがらがあった。

①レーザドップラ測定器は、打始めの自沈現象から打止まり付近の貫入、リバウンド量の測定を安定して行えた。また、雨中でも正常に行えた。

②船体動揺等に伴い、変位記録への影響に加えて杭とプローブ間の距離変動があるが、杭とプローブの間隔が大きすぎれない範囲では正常に行えた。

③打撃後の2度打ち、3度打ち現象は、陸上工事に比較して顕著でないものの、支持層付近では2度打ちが発生している。

④打撃前の微小区間で杭浮き現象が、陸上の杭打ち工事と同様に打始めから打止まり付近まで継続的に確認された。

⑤杭の建込み時の自沈に加えて、打撃中にも杭の沈み込み現象があった。

##### (2) 測定結果

図-18, 19に人力および機械による貫入、リバウンド量測定記録例を示す。機械測定は、陸上杭打ち工事と同様に杭の打撃時の拳動を忠実に記録している。一方、海上杭打ち工事における人力測定の貫入量の水平移動の位置は、陸上杭打ち工事に比較してバラツキが大きい。更に、陸上杭打ち工事で記録されていた打撃前の杭浮き現象が、海上工事の人力測定記録では記録されていない。

以下に、海上の杭打ち工事の実験で特徴的に現れた船体動揺、打撃後の2度打現象、打撃前の杭浮き現象および打設中の杭の自沈現象について考察する。

##### ①船体動揺に伴うプローブの上下動

船上に設置されたプローブは船体動揺によって共に動揺し、レーザドップラ測定器の測定原理から上下動成分のみが記録される。図-20に船体動揺の記録例を示す。上下動は、平均振幅 = 2 ~ 3 cm<sub>r-p</sub>、最大振幅 = 6 cm<sub>r-p</sub>、周期 = 3 ~ 4 秒が観測されている。

##### ②打撃前の杭浮き現象

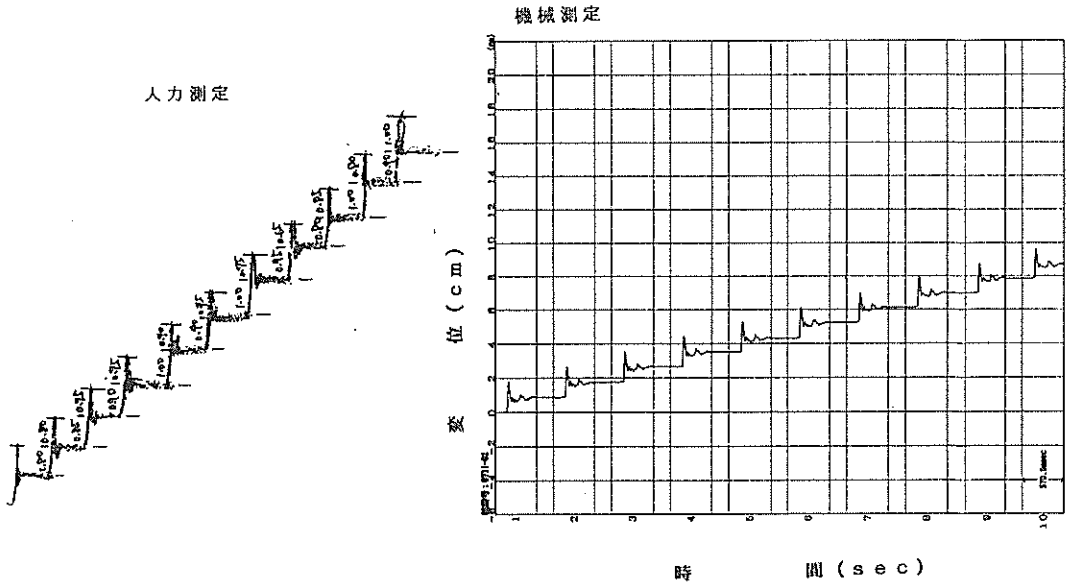
図-21に打撃前の杭浮き現象が顕著な機械測定による測定記録例を示す。杭浮き現象も陸上工事に全く同様に、打撃前約340ms~460msの時間で、最大2mm程度の量となって発生している。杭浮き時間をラムの落下高さから算出した落下時間（自由落下として計算）して比較したものが図-22である。杭浮き時間は、ラム落下時間を上回っているものの明らかに相関がみられる。

##### ③打撃後の2度打ち現象

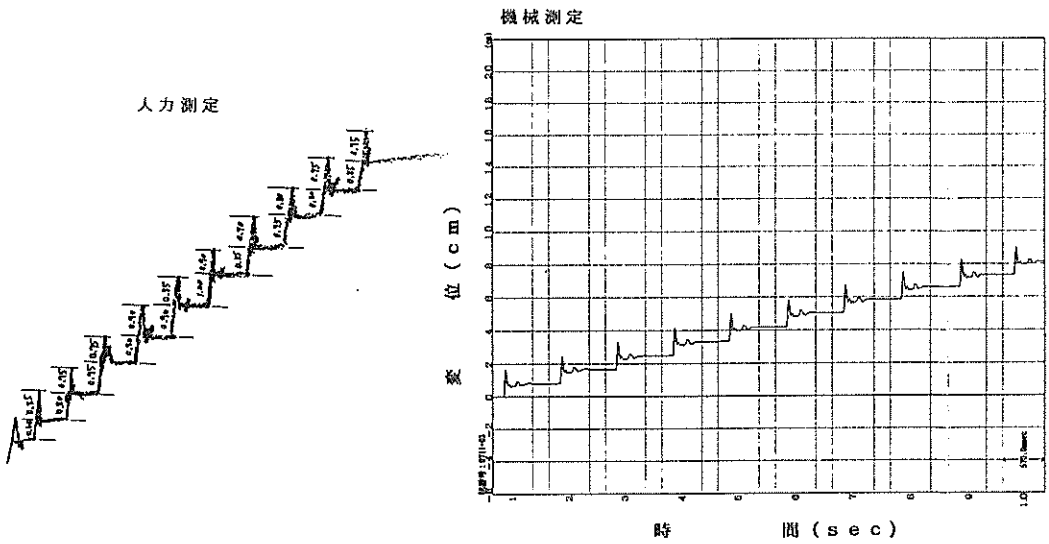
海上工事においても支持層付近においては、2度打による飛び跳ね量は小さいものの発生している。飛び跳ね量が小さい理由は、打設杭の杭径が陸上工事の2倍と、ラム重量に対する杭の弾性変形量が小さいことによるものと考えられる。発生位置は、陸上工事と同じく支持層付近では打撃後約200msである。また、2度打後のラムの載荷による再沈み込みも見られる。

##### ④打撃中の杭の自沈現象

杭の建て込み直後の地盤の軟らかい層における杭の自重、ハンマー重量の載荷による沈み込み以外にも、打撃開始後においても軟らかい地層ではハンマー打撃後に自沈する現象が起こる。図-23に打撃中の自沈現象の測定記録例を示す。この打撃中の杭の自沈は、通常の貫入、リバウンドの状態とは異なるため、杭の打ち込み長さの算出処理等に影響がでる。



図一18 海上杭打ち工事貫入, リバウンド量の測定記録例



図一19 海上杭打ち工事貫入, リバウンド量の測定記録例

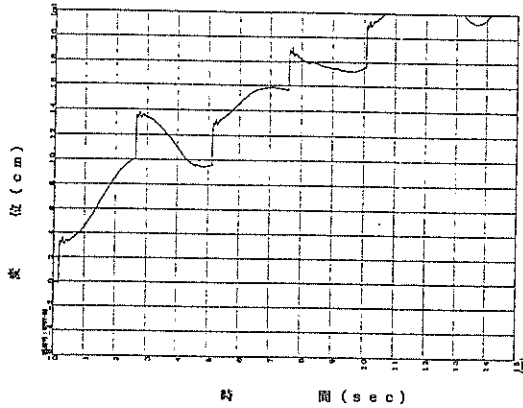


図-20 船体動揺中の測定記録例

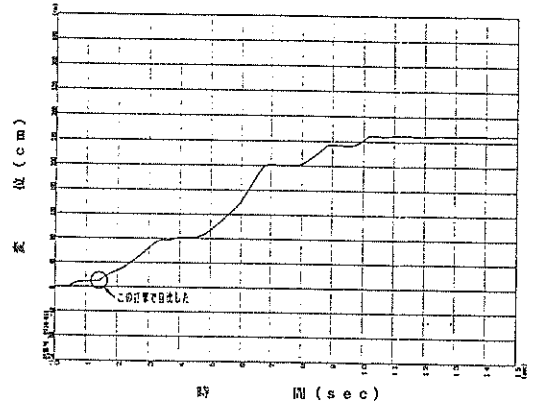


図-23 打撃中の杭自沈現象の測定記録例

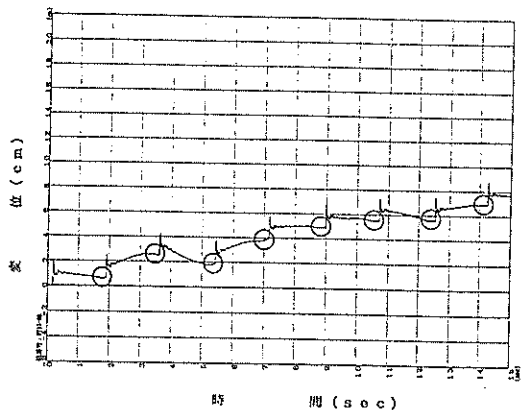


図-21 打撃前の杭浮き現象の測定記録例

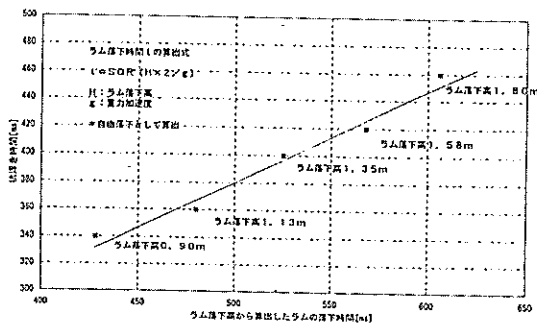


図-22 ラム落下時間と杭浮き時間の関係

以上の海上杭打ち工事の実験で現れた特徴的な各現象に対して、機械測定データの処理の対応内容を以下に示す。

①の船体動揺に対しては、前記の最小二乗法による

動揺補正プログラムにより変位データの補正処理を行っている。図-24に、本プログラムによる動揺中の打込み測定記録の処理結果を示す。

②、③の打撃前の杭浮き現象および打撃の2度打ち現象は、陸上の杭打ち工事とほぼ同じ発生時間である。したがって、陸上工事と同じ設定で、打撃前の杭浮き状態を変位の0線として打撃後に貫入量を算出している。

④の打撃中の杭の自沈の判定は、1打撃で10cm以上の変位があった場合としている。自沈のあった時の杭の貫入量および次のハンマー打撃による貫入量の算出は、図-25に示す処理方法により行っている。すなわち、自沈のあった打撃も動揺補正処理が行われ貫入量が求められる。自沈した量の算出は、レーザードップラ測定器のメモリーに記憶されているトータル変位データ  $F_m(n)$ 、 $F_m(n+1)$  が用いられる。しかし、自沈のある打撃を動揺補正した場合、動揺と同じように扱われて正常な波形が得られない。したがって、自沈のある打撃の貫入量 ( $=a(n)$ ) については、自沈した貫入変位の影響を受けやすい。

表-5には、杭リーダ部に設置したプローブ設置台およびプローブの打撃振動加速度、振幅量を示す。設置台の振動に対してプローブ自体の振動加速度は、設置部の防振ゴムの効果により1/5程度になっている。しかし、振幅はほぼ同程度な値となっており、高周波数成分はカットされているが、低周波数成分の振動はプローブに伝達されている。



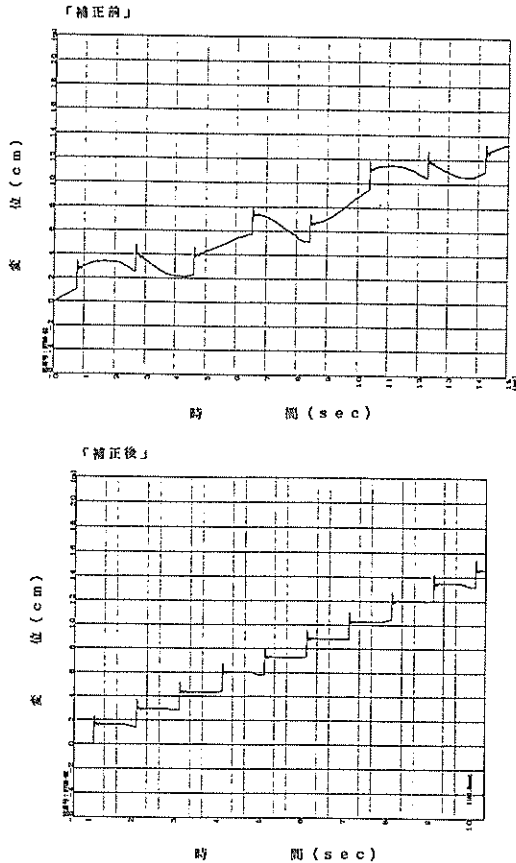


図-24 船体動揺補正処理結果

測定内容	プローブ	プローブ設置台
上下加速度	最大：10 G <sub>r-p</sub> 平均：1~2 <sub>r-p</sub>	最大：50 G <sub>r-p</sub> 平均：5~10 <sub>r-p</sub>
上下振幅	最大：0.3m <sub>r-p</sub> 平均：0.05~0.1m <sub>r-p</sub>	最大：0.4m <sub>r-p</sub> 平均：0.1~0.2m <sub>r-p</sub>

表-5 プローブ及びプローブ設置台の打撃振動測定結果

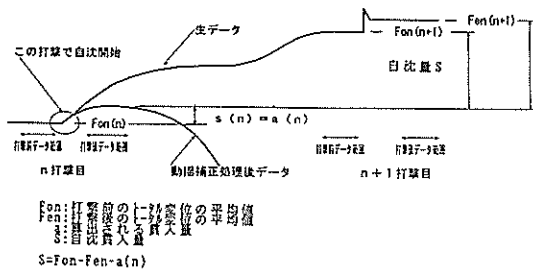


図-25 打撃中の杭自沈量のデータ処理方法

## 5. レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機現地測定精度

### 5.1 陸上杭打ち工事における測定精度の比較結果

#### (1) トランシット測定と人力測定および機械測定の精度比較

図-26にトランシット測定と人力測定による10打撃の平均貫入量の比較結果を示す。また、図-27に同一データの測定誤差分布を示す。

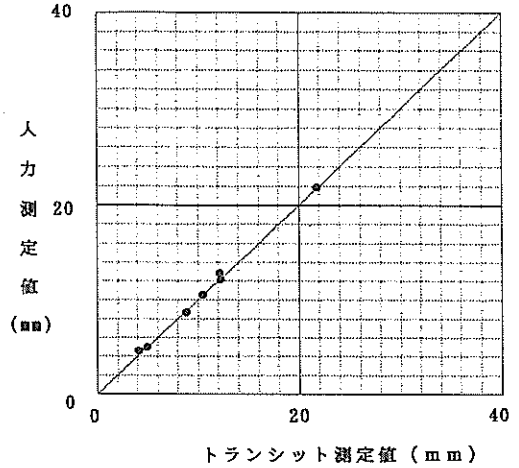


図-26 トランシット測定と人力測定の貫入量比較結果

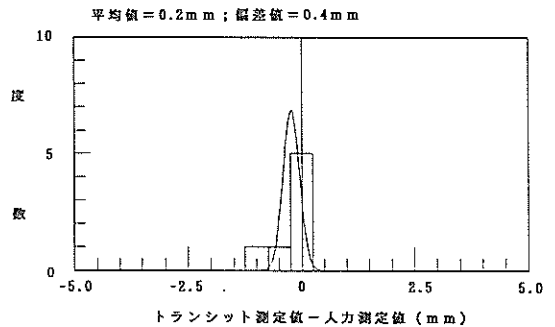


図-27 トランシット測定と人力測定の測定誤差分布

陸上の杭打ち工事における貫入、リバウンド量の人力測定は、地面が固定点となる水平定規をベースにして筆記具で記録している。この定規を用いることにより、貫入量を記録する際の筆記具の水平移動の手振れは、ほぼ無いものとする。この人力測定による貫入量の記録は、各打撃前に水平移動した線（基本的にはラムの荷荷状態）を0線として、打撃後の2度打ち、3度打ち後に水平移動をして行っている。図-26で比較した人力測定の平均貫入量は、10打撃分の平均値で

ある。一方、トランシット測定による平均貫入量は、10打撃の最初と最後の貫入量の差を10打撃で平均したものである。トランシットの測定結果と人力測定結果は良く一致し、高精度で安定した結果となっている。

測定誤差の平均値 =  $-0.2\text{mm}$  測定誤差の標準偏差値 ( $\sigma$ ) =  $0.4\text{mm}$

図-28にトランシット測定と機械測定の10打撃の平均貫入量の比較結果を示す。また、図-29に同一データの測定誤差の分布を示す。

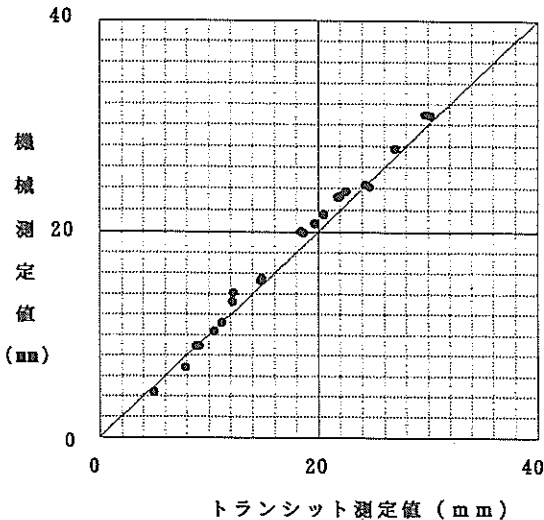


図-28 トランシット測定と機械測定の貫入量比較結果

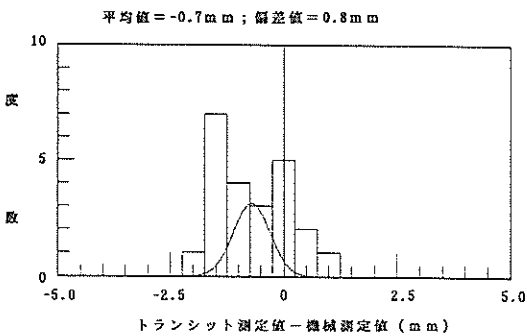


図-29 トランシット測定と機械測定の測定誤差分布

機械測定によるデータ処理は、動揺補正を“off”にして行っている。貫入量の算出は、打撃前のラムの無載荷状態を0線とし、打撃後約160~400msの範囲の平均値を算出して0点との差として求めている。また、10打撃の平均貫入量は、1打撃ごとに求めた貫入量の10打撃分の平均値である。

図-28から機械測定の貫入量の測定結果は、トラン

シット測定値を全体的に上回っている。機械測定の貫入量がトランシット測定値を上回る理由は、機械測定では2度打ち、3度打ちによる飛び跳ね量、再貫入、ラムの载荷による沈み込みを含めて平均（プラス側になる）していることによるものと考ええる。

トランシットと機械測定の貫入量の測定誤差は、人力測定と比べて2倍以上悪い結果となっている。

測定誤差の平均値 =  $-0.7\text{mm}$

測定誤差の標準偏差値 ( $\sigma$ ) =  $0.8\text{mm}$

## 2) 人力測定との貫入、リバウンド量測定精度比較

図-30に人力測定と機械測定による10打撃の平均貫入、リバウンド量の比較結果を示す。また、図-31に同一データの測定誤差分布を示す。この比較における人力測定の平均貫入量、リバウンド量は、1打撃毎に求めた10打撃分の平均値である。機械測定の貫入、リバウンド量の測定値は、人力測定値を全体的に上回っている。機械測定の貫入量が人力測定値を上回る理由の一つに、機械測定では2度打ちによる飛び跳ね量を含めて平均値として求めていることによるものと考ええる。リバウンド量が上回る理由としては、打撃時の最大変位点の記録性の違いが考えられる。すなわち、打撃時の最大変位点は高速挙動の変局点となるため、人力記録の記録性や記録紙からの読み取る際の精度が十分でないケースがあるものと考ええる。

人力測定値と機械測定の測定誤差は、以下の通りである。

### 「貫入量」

測定誤差の平均値 =  $-0.7\text{mm}$

測定誤差の標準偏差値 ( $\sigma$ ) =  $0.4\text{mm}$

### 「リバウンド量」

測定誤差の平均値 =  $-0.7\text{mm}$

測定誤差の標準偏差値

( $\sigma$ ) =  $0.3\text{mm}$

## 5. 2 海上杭打ち工事における測定精度の比較結果

### (1) トランシット測定との貫入量測定精度比較

図-32にトランシットと人力測定および機械測定による10打撃の平均貫入量による比較結果を示す。また、図-33, 34に同一データの測定誤差の分布を示す。トランシット測定と人力測定との比較のための測定杭数は少ないが、トランシット測定値に対して人力測定値は下回った値となっている。人力測定値がトランシット測定値を下回る理由は考えにくい、海上の杭打ち工事における人力測定は、陸上工事とは異なり、定規を用いずに筆記具をフリーな状態で記録している。そのため、貫入量の測定値は、陸上工事に比較して変動

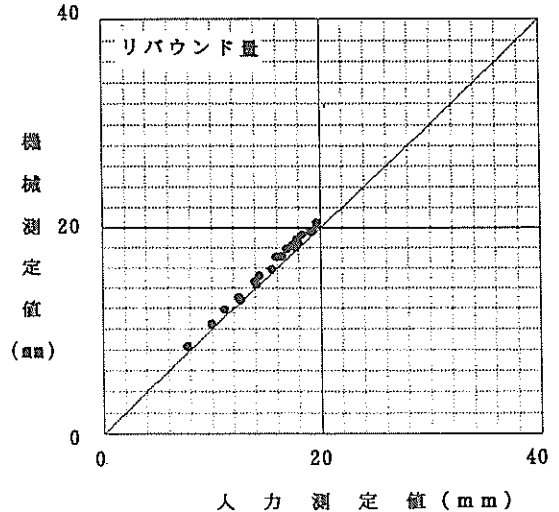
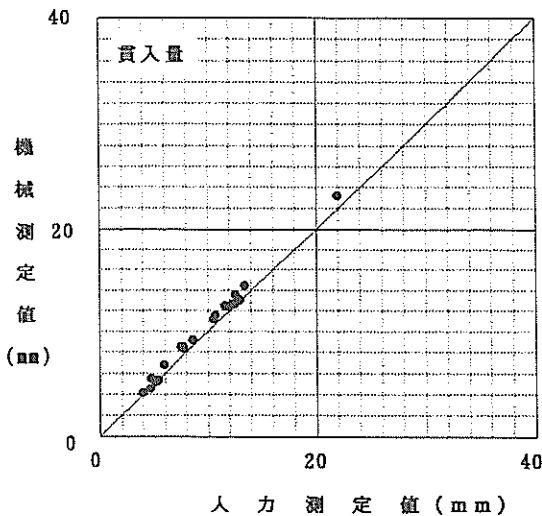


図-30 人力測定と機械測定の貫入、リバウンド量比較結果

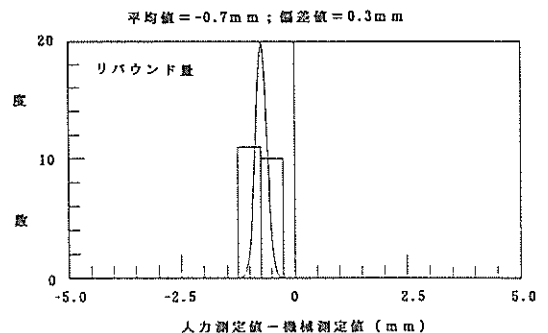
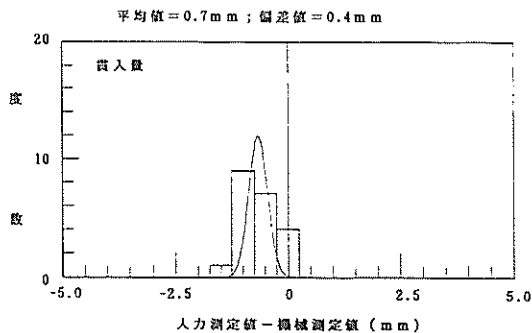


図-31 人力測定と機械測定の貫入、リバウンド量の測定誤差分布

が大きくなっていることが予想される。

一方、海上実験における機械測定は、動揺補正処理を“on”にしてデータ処理を行っている。その結果、貫入量の算出は、打撃前のデータと打撃後のデータで動揺補正されたデータから、陸上実験と同様に打撃前のラムの無載荷状態を0線として打撃後約160~400msの平均値との差として求めている。上記により求められた機械測定の平均貫入量は、人力測定とは反対にトランシット測定値を上回った結果となっている。

海上工事におけるトランシット測定と人力測定および機械測定の1打撃当たりの貫入量の測定誤差は、以下の通りである。

「人力測定」

測定誤差の平均値=0.6mm

測定誤差の標準偏差値 ( $\sigma$ )=0.6mm

「機械測定」

測定誤差の平均値=-0.5mm

測定誤差の標準偏差値 ( $\sigma$ )=0.6mm

(2) 人力測定との貫入、リバウンド量測定精度比較

図-35に人力測定と機械測定による貫入、リバウンド量の支持層付近の10打撃の平均貫入量とリバウンド量の比較結果を示す。また、図-36、37に同一データの測定誤差分布を示す。

図-35から機械測定は、貫入量、リバウンド量共に全体的には人力測定を陸上工事と同様に上回った値となっている。また、標準偏差値も大きい結果となっている。この要因は、陸上工事で述べた理由と同様に貫入量の算出方法や記録性の違いによるものと考えられる。

人力測定値と機械測定の貫入量およびリバウンド量の測定誤差は、以下の通りである。

「貫入量」

測定誤差の平均値=-0.9mm

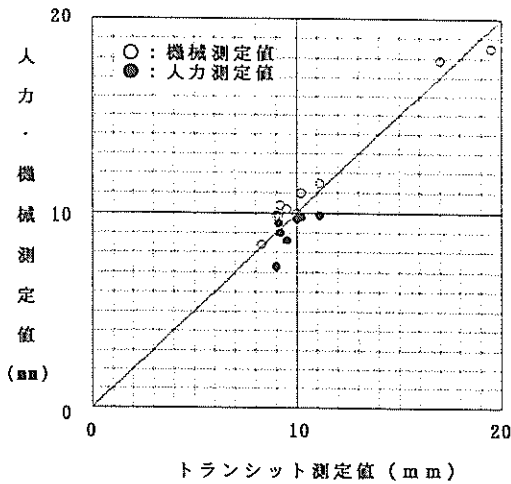


図-32 トランシット測定と人力測定、機械測定の貫入量比較結果

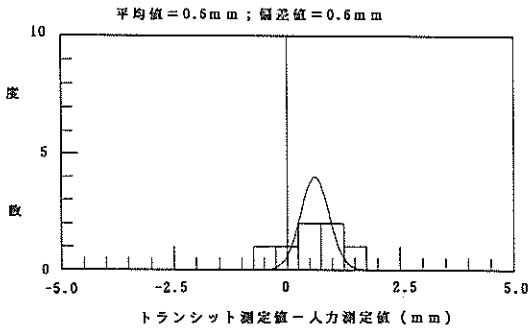


図-33 トランシット測定と人力測定の測定誤差分布

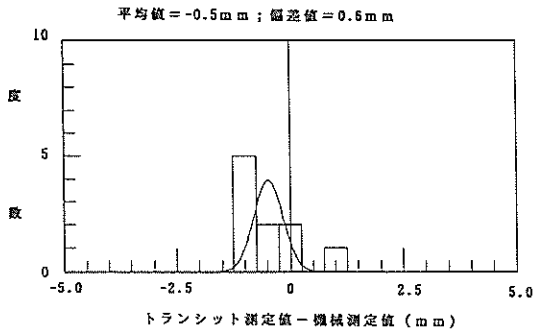


図-34 トランシット測定と機械測定の測定誤差分布

測定誤差の標準偏差値 ( $\sigma$ )=0.9mm

「リバウンド量」

測定誤差の平均値=-0.4mm

測定誤差の標準偏差値 ( $\sigma$ )=0.9mm

(3) 目視測定との打設途中の貫入量測定精度比較

図-38に各杭毎の目視測定と機械測定による杭の打設途中から終了に至るまでの貫入量の測定結果を示す。打設中の貫入量の測定は、最大20mまで行っている。

図-39に目視測定の1mまたは2m毎のデータと機械測定で求められる貫入量と比較した測定誤差の分布を示す。測定誤差は、以下の通りである。

測定誤差の平均値=-1.9cm

測定誤差の標準偏差値 ( $\sigma$ )=3.4cm

この測定における貫入量は打ち止まり以前のデータが多く含まれ、その時の1打撃当たりの貫入量は5~8cm程度であった。この貫入量の目視による読み取りは、船上から行っており、船体動揺量として $\pm 2 \sim \pm 3$ cmの上下動がある。したがって、2m毎の目視測定は、1打撃当たりの貫入量に船体上下動を加えたものが読み取り精度となっていたものと考えられる。

5.3 現地測定精度の評価

(1) 静的な貫入量測定精度は、スケールを自然落下させて測定した落下高さのレーザードップラ測定器の試験結果を表-6に示す。機械測定値はスケールの読み値に対して、約0.5mm程度上回った結果となっているが、スケールの目視読み取り精度を考慮すれば十分な精度を有している。

表-6 落下高さ測定精度試験結果

スケール読取値	測定値
5.0 cm	5.04 cm
4.0	4.07
3.0	3.07
2.0	2.05
1.0	1.05
0.5	0.55

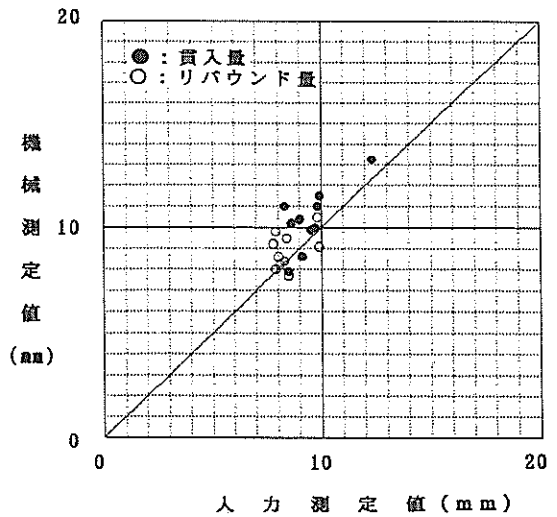
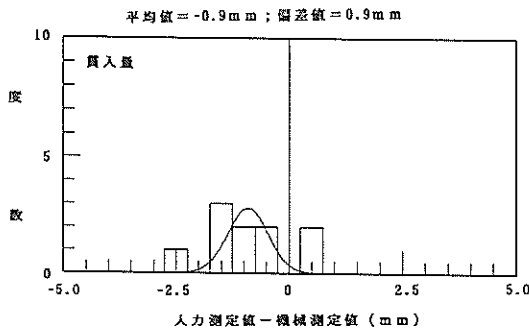
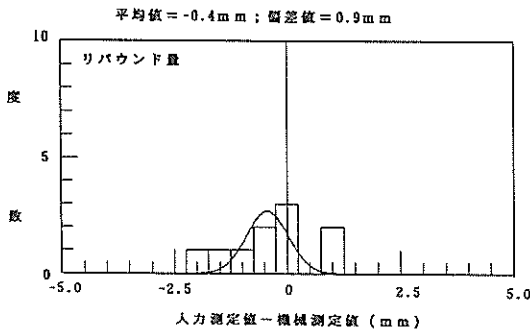


図-35 人力測定と機械測定の貫入、リバウンド量比較結果



図一36 人力測定と機械測定の貫入量の測定誤差分布



図一37 人力測定と機械測定のリバウンド量の測定誤差分布

(2) 陸上杭打ち工事における機械測定精度

測定精度は、一般的には測定の正確さ（真値と測定値の平均との一致の度合い）と測定の精密さ（測定値の一致の度合い）で表される。しかし、今回の実験では機械測定精度をトランシット測定値および人力測定値と比較しており、相対精度と考える必要がある。また、測定器の測定の精密さ、すなわち偏差値は通常95%の確率（ $= 2\sigma$ ）で評価することが行われている。以上のことから、今回の機械測定の貫入、リバウンド量の測定精度を〈測定誤差の平均値 $\pm 2\sigma$ 〉として評価する。

まず、地面を固定点に持つ定規を用いた人力測定による貫入量は、トランシット測定との比較結果においても良く一致し、ほぼ正確に杭の貫入量を記録していたものと考えられる。この理由として、人力測定の貫入量は、トランシット測定と同様に最初の打撃と最後の打撃の貫入量の差を打撃回数で平均して1打撃当たりの貫入量が求められるため、各打撃毎の測定誤差の影響を受けにくいことによるものと考えられる。したがって、この人力測定の貫入量の測定精度が、今回の現場実験で得られる基本的な測定精度と考える。すなわち、人力測定の測定精度は、以下のようになり、最大でも

約1mm以下の精度で測定が行えている。

トランシットに対する人力測定精度

測定誤差の平均値 $\pm 2\sigma = -1.0\text{mm} \sim 0.6\text{mm}$

一方、機械測定においては、1打撃毎に貫入、リバウンド量を測定している。1打撃毎に測定する場合、打撃前のラムの無載荷状態を変位の0線にして、打撃後の2度打ち前のラムの無載荷状態、2度打ちによる飛び跳ね変位、2度打ち後の再貫入およびラムの載荷状態にまたがる範囲を平均して貫入量を求めている。したがって、2度打ちによる飛び跳ね変位、2度打ちによる再貫入、ラム載荷による再沈込み量が本来の打撃の貫入量に対して加算されて算出される。機械測定の測定精度は以下ようになり、最大2.0mmを越えることがある。

トランシットに対する機械測定精度

測定誤差の平均値 $\pm 2\sigma = -2.3\text{mm} \sim 0.9\text{mm}$

次に、2度打ち等の影響を明らかにするため、貫入量を求める範囲の設定時間（打撃開始からの時間）を変えて処理したものが図一40であり、各事例の貫入量は以下のように算出される。

貫入量算出設定時間	事例1	事例2	事例3
「a」: 160ms~400ms (データ処理 a)	22.9	16.4	5.4mm
「b」: 70ms~310ms (データ処理 b)	22.9	15.7	4.4mm
「c」: 70ms~150ms (目視による設定)	22.8	14.5	3.7mm

上記の比較で用いた事例は、1→2→3の順に支持層付近に近づいた打込み記録である。また、「c」の設定時間は、作図した波形から目視により設定したもので、本来の打撃による貫入量が求められているものとする。考える。「c」を基準にした場合、「a」-「c」=0.1~1.9mm、「b」-「c」=0.1~1.2mmとなる。すなわち、2度打ちによる飛び跳ね変位の大きい場合の影響として事例3から「a」-「b」=0.7mm程度、ラム重量の載荷の有無の影響として事例2から「a」-「c」=1.9mm程度あるものと考えられる。

ここで、データ処理「b」で上記の各実験データを処理したトランシットおよび人力測定との比較は以下ようになる。

比較内容	測定内容	平均値	標準偏差値
トランシットと機械測定	貫入量	-0.3mm	1.0mm
人力測定と機械測定	貫入量	-0.3mm	1.0mm
	リバウンド量	-0.3mm	1.0mm

データ処理「b」で処理した場合でも、貫入量を求める範囲に2度打ちによる飛び跳ね変位が含まれるが、2度打ち前のラム無載荷状態の範囲の占める割合が大きくなる。すなわち、2度打ちによる飛び跳ね変位の

影響は変わらないが、再貫入やラムの載荷による再沈み込み量の影響が小さくなる。その結果、基準値（トランシット測定値）からの偏り量（測定誤差の平均値）が、改善されたものと考ええる。人力測定との比較でも貫入量の測定誤差の平均値は小さくなる。一方で、測定誤差の平均値が改善されるが、標準偏差値が大きくなる。データ処理「b」で処理した場合、データ処理「a」に対してバラツキが大きくなる要因として、次のように考える。図-40の事例1、2、3に示すように

杭番号	0710-05	杭番号	0710-06	杭番号	0711-06
杭目盛	機械測定値 (m)	杭目盛	機械測定値 (m)	杭目盛	機械測定値 (m)
25		25		25	
26		26		26	
27		27		27	
28		28		28	
29		29		29	
30		30		30	
31		31	1.83	31	
32		32	2.02	32	
33		33	1.97	33	
34		34	2.08	34	
35		35	1.96	35	
36		36	2.07	36	
37		37	1.98	37	
38		38	2.01	38	
39		39	1.98	39	
40		40	2.04	40	
41		41	1.97	41	
42		42	2.01	42	
43		43	1.98	43	
44		44	2.01	44	
45		45	1.98	45	
46		46	2.01	46	
47		47	1.98	47	
48		48	2.01	48	
49		49	1.98	49	
50		50	2.01	50	
51		51	1.98	51	

図-38 杭打込み途中の貫入量測定結果

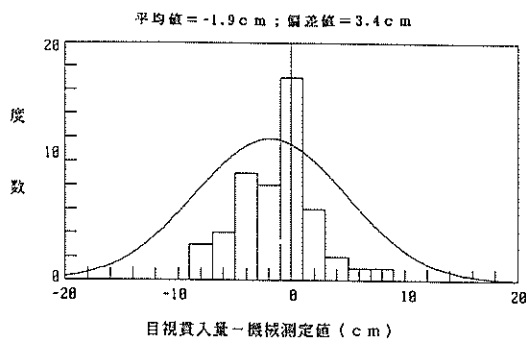


図-39 目視測定と機械測定の杭打込み途中貫入量の測定誤差分布

杭打ちの進展に伴って2度打ちの起こるタイミングと度合いが異なる。事例1では2度打ちはほぼ生じておらず、事例2、3に従って2度打ちが発生し、そのタイミングも後方に向かうようになる。データ処理「a」で算出される貫入量は、事例1、2、3共に2度打ち後の変位量（ラムの載荷状態）に等しい。一方、データ処理「b」の算出値は、2度打ちが大きい事例3では「c」に近づいた値となり、2度打ちが小さい事例2では「a」に近づいた値となる。更に、2度打ちの無い事例1では「b」=「a」となる。すなわち、データ処理「b」の貫入量の算出値は、2度打ちの度合いとタイミングによる影響を受けやすい結果となっている。

データ処理「b」による機械測定の貫入量測定精度は、トランシットおよび人力測定値に対して以下のようになる。

トランシットに対する機械測定精度（データ処理「b」）

測定誤差の平均値  $\pm 2\sigma = -2.2\text{mm} \sim 1.7\text{mm}$

人力測定に対する機械測定精度（データ処理「b」）

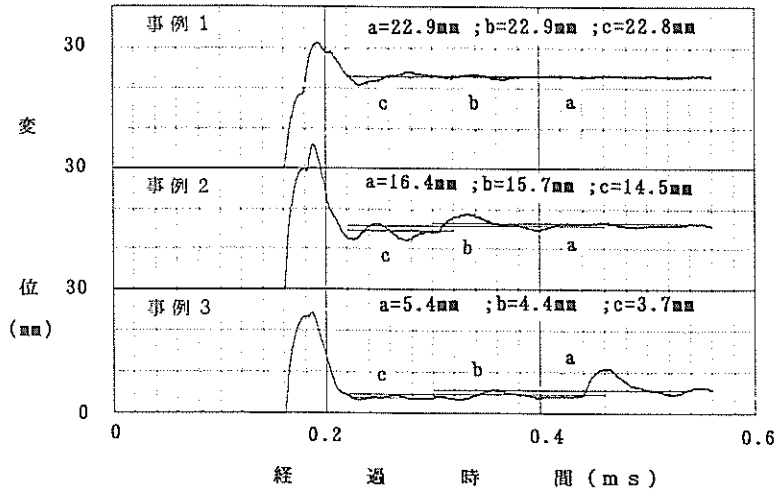
測定誤差の平均値  $\pm 2\sigma = -1.4\text{mm} \sim 1.1\text{mm}$

データ処理「b」では、測定誤差の平均値が改善され基準値に一致するようになるものの、測定のバラツキが多少大きくなる。また、人力測定比較との結果において、貫入量が改善された割合で（ $-0.5\text{mm} \rightarrow -0.2\text{mm}$ ）、リバウンド量の測定誤差の平均値（ $-0.8\text{mm} \rightarrow -1.1\text{mm}$ ）は結果として大きくなっていく。

以上のように機械測定精度は、トランシット測定値との比較の結果から、人力測定に対して2倍程度悪い結果となっている。この改善策として、1打毎に貫入、リバウンド量を算出する場合、本来の打撃による貫入量を求める上で、打撃前の0線と同じ条件となる2度打ち前で貫入量を算出処理するデータ処理「c」の範囲が望ましいものと考ええる。すなわち、支持層付近における図-40の事例3の波形データで、リバウンド後から2度打ち前にかけて非常に安定した領域となっている。しかし、事例2のようなケースでは、リバウンド後の波形が複雑であることや、2度打ちによる飛び跳変位の一部を含むため、多少不安定になりやすいものと考ええる。また、支持力を管理する前の事例1では、ラム載荷状態の変位量に近い値が算出されるようになる。

### (3) 海上杭打ち工事における機械測定精度

海上杭打ち工事の場合のトランシット測定と人力測定の貫入量は、陸上の杭打ち工事に比較して測定誤差の平均値で1/3、標準偏差値で2倍となっている。海上工事では、貫入量を記録する際の水平移動に定規を



図一40 算出設定範囲による貫入量（陸上実験）

用いないことや足場が不安定なことによるものと考えられる。海上の杭打ち工事における人力測定の測定精度は、以下のようになり、陸上的人力測定に比較して2倍程度低下している。

トランシットに対する人力測定精度

測定誤差の平均値  $\pm 2\sigma = -0.6\text{mm} \sim 1.8\text{mm}$

一方、海上工事における機械測定の精度をトランシット測定値との比較結果から評価すれば、測定誤差の平均値で  $-0.48\text{mm}$  と陸上実験に比べて良い結果となっている。海上工事においては、2度打ちによる飛び跳ね変位やラムの載荷による沈み込みが少ないため、その影響は陸上工事に比較して小さくなっているものと考えられる。海上の杭打ち工事における機械測定の測定精度は、以下のようになり、海上的人力測定精度とは反対に機械測定値を上回る傾向にあるが、精度としてはほぼ同程度となる。

トランシットに対する機械測定精度

測定誤差の平均値  $\pm 2\sigma = -1.7\text{mm} \sim 0.7\text{mm}$

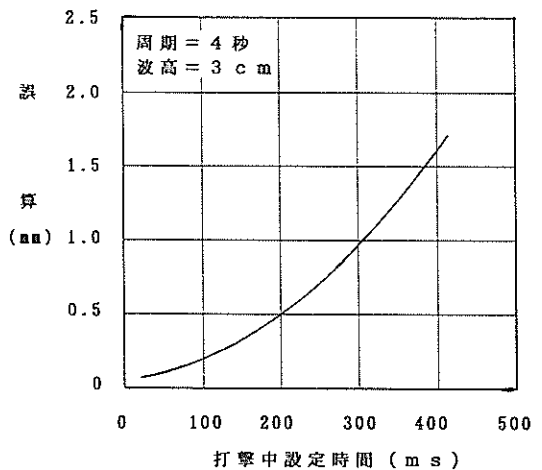
海上実験のデータ処理では、動揺補正処理を行った結果で比較したもので、この補正精度も影響しているものと考えられる。図一41に実験中の最大動揺波形である周期=4秒、振幅=3 cm<sub>0-p</sub> の場合の動揺補正プログラムのシミュレーション結果を示す。図のシミュレーション結果は、データ長を打撃前=160ms、打撃後=240msとして、打撃中のデータ長（時間）による補正精度を表している。本データ処理では打撃中の設定時間は160msで、補正精度は $\pm 0.4\text{mm}$ となる。

海上杭打ち工事における2度打ち等の影響を明らかにするため、陸上実験と同様に貫入量を求める範囲の

設定時間（打撃開始からの時間）を変えて処理したものが図一42であり、各事例の貫入量は以下のように算出される。

貫入量算出設定時間	事例1	事例2	事例3
「a」: 160ms~400ms (データ処理 a)	=17.8	13.8	13.1mm
「b」: 70ms~310ms (データ処理 b)	=18.1	13.6	12.8mm
「c」: 70ms~150ms (目視による設定)	=18.4	13.4	12.0mm

事例1, 2では、「a」、「b」、「c」ともほぼ等しい算出値となる。すなわち、海上工事においては、2度打ちによる飛び跳ね変位およびラム重量の載荷の有無の影響はそれ程大きくない。しかし、支持層付近の事例3では、その影響は「a」-「c」=0.9mm程度あったものと考えられる。



図一41 船体動揺補正処理シミュレーション結果

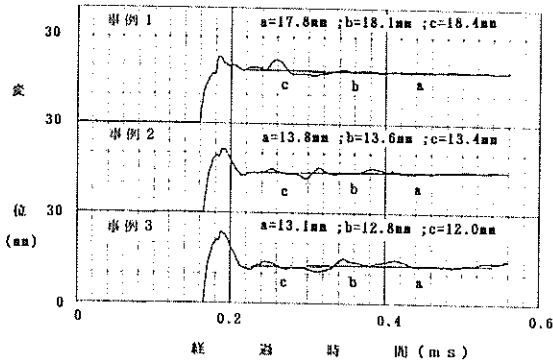


図-42 算出設定範囲による貫入量（海上実験）

ここで、陸上実験と同様にデータ処理「b」で処理した機械測定とトランシットおよび人力測定との比較結果は以下のようになる。

比較内容	測定内容	平均値	標準偏差値
トランシットと機械測定	貫入量	0.1mm	0.8mm
入力測定と機械測定	貫入量	-0.2mm	1.3mm
	リバウンド量	-1.3mm	1.0mm

トランシット測定との測定誤差の平均値で、0.1mmとほぼ一致した結果になる。更に、データ処理「a」で測定された貫入量はトランシット測定値を上回っているが、データ処理「b」では下回っている。データ処理「b」で下回る理由の一つとして、貫入量の算出範囲（打撃検出点から70ms～310ms）の後半の領域に2度打ちの飛び跳ね変位の部分が位置（打撃検出点から160ms～220ms）する。その結果、動揺として補正処理され、観入量の算出範囲の変位データが引き下げられ、貫入量は小さく算出される。すなわち、動揺補正処理によって、2度打ちの飛び跳ね変位がある場合、補正処理を行わないと大きく算出される貫入量を結果として小さくする。一方で、データ処理「b」で算出した場合、標準偏差値は0.76mmと多少大きくなっていく。更に、人力測定値との比較でも、誤差の平均値は大幅に改善されるが、標準偏差値は大きくなる。また、リバウンド量の測定誤差の平均値も1.0mmを越えた値となる。人力測定に対してリバウンド量の測定誤差の平均値が大きくなることは、陸上実験結果で述べたように、必ずしも機械測定の精度低下によるものではないものとする。データ処理「b」による機械測定の貫入量測定精度は、トランシットおよび人力測定値に対して以下のようになる。

トランシットに対する機械測定精度（データ処理「b」）

測定誤差の平均値±2σ=-1.4mm～1.6mm

人力測定に対する機械測定精度（データ処理「b」）

測定誤差の平均値±2σ=-2.4mm～2.8mm

すなわち、海上工事におけるデータ処理「b」では、測定のバラツキは多少大きくなるものの、測定誤差の平均値は大きく改善され、海上のトランシット測定値には近いものとなる。

以上の評価結果から、機械測定の貫入、リバウンド量の算出処理精度をより向上させる上で、海上工事においても貫入量の算出範囲は極力2度打ちの前の範囲で求めることが望ましいものとする。しかし、海上の杭打ち工事における支持層付近の打撃波形記録は、陸上工事に比較して多少複雑な波形となるため、杭打機の機種、杭の大きさ等による打撃波形の違いを十分見極めて設定する必要がある。

一方、杭の打ち込み量を管理するための打設中の貫入量の測定精度は、目視測定の1mおよび2m毎のデータで比較した測定誤差の平均値で2cm以下である。また、標準偏差値は3.4cmとなっている。ここで、目視による読取りの誤差を95%の確率で±5cm（2σ=5cm）であったと仮定すると、標準偏差値（σ）=2.5cmとなり、機械測定の標準偏差値はσ=3.4-2.5=0.9cmとなる。杭の打ち込み量の管理精度としては、十分なものとする。しかし、目視測定そのものが十分な精度を有していないため、今回の実験のみで厳密に評価することはできない。

## 6. 杭打ち施工管理の自動化

### 6.1 杭打ち施工管理の自動化の概要

杭打ち工事の施工管理は、港湾工事においては杭の打設位置、打込み角度および打込み記録によって行われている。打込み記録は、打設の途中および支持層付近の打込み状況を管理するため、それぞれ以下の測定が人間の直接作業により行われている。

#### ○打設途中の打込み状況管理

①打込み貫入量……………トランシット

②単位打込み長さ（50cm）の打撃回数…トランシットおよびカウンター

#### ○支持層付近の打込み状況管理

①支持力……………貫入、リバウンド記録

②単位打込み長さ（10cm）の打撃回数…トランシットおよびカウンター

③総打撃回数……………カウンター

レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機は、



以上の測定を全て自動化し、リアルタイムに測定結果を表示、出力することができる。自動化する上で、測定器としての測定精度が十分なことに加えて、実際の工事に用いられる杭打ち機の機種や杭打ち船の構造、また杭打ち工事、施工管理基準の多様性に十分対応できることが必要となる。

一方、レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機は、杭の打設開始より終了に至る間非接触状態で杭の打撃挙動を計測できるため、途中の地層変化の状況および最終の支持層に達したか否かを波形記録から判定することも可能となる。

## 6.2 機器設置上の対応

### (1) 機器の設置場所の対応

プローブと信号処理部間のケーブル長は基本的には15mであるが、中継ボックス+延長ケーブルによって、信号処理部、データ処理部は自由に設置場所を選べ、杭打ち船の操作室等への設置も可能である。

### (2) プローブ部の設置および防振対策

プローブは打設杭に対して極力直角 ( $V = V_0 \cos \Delta \theta$ ;  $V_0$ : 真値,  $\Delta \theta$ : 直角に対する取付誤差角) になるように設置する必要があるが、設置台を予め精度良く設けることで対応できる。また、可視光レーザーの採用により杭表面上の照射点が目視できるため、現場作業に対応しやすい。また、杭打撃時にプローブに加わる振動は、海上の工事の杭打ち船ではDC~1.5KHzにわたる広帯域な周波数成分を持っているが、プローブの設置部に高周波成分を除去する固有振動数の低い防振ゴムを採用している。そのため、プローブは打撃振動の最も大きい杭リダ部に設置することも可能である。

### (3) 杭までの測定距離と測定許容範囲

プローブと打設杭までの測定距離は、現在0.8mと2.0mに対応することができ、その許容範囲は±140mmである。杭打ち船の杭リダ部に設置する場合は0.8mのプローブ、陸上工事等で地盤上の三脚に設置する場合は2.0mのプローブで対応できる。

海上工事で杭打ち船にプローブを設置した場合、プローブと杭の船体動揺等による距離変動は最大でも±100mm程度であり、測定距離の許容範囲±140mmで対応できる。

## 6.3 データ処理の対応

### (1) グラフィック処理

機械測定で自動的に処理算出される貫入、リバウンド量および杭の支持力を確認するため、以下の内容が表示、出力がされる。

①波形データのCRT表示においては、データ処理範囲および打撃前、打撃中、打撃後等の設定範囲がライン表示される。また、データ処理範囲外のデータ表示も任意に設定できる。

②最終10打撃分の計測データと動揺補正処理後の波形データがプリンターに出力できる。

### (3) 打撃途中の自沈判定処理

1打撃の貫入量が10cmを越えた場合、自沈判定処理によって打撃貫入量に自沈量を加えて累積貫入量を算出する。

### (4) 船体動揺補正処理

船体の動揺補正処理の手法として、本データ処理で用いている最小二乗法による動揺成分を求める方法以外にも、以下のものがある。

①打撃前、打撃後の変位データの勾配から打撃中の船体動揺成分を求める方法

②打撃前、打撃後の速度データを直線近似し、台形積分により打撃中の船体動揺成分を求める方法

上記の2つの手法は、打撃前、打撃後の処理データ範囲を小さくすると、出力信号の乱れや杭の打撃振動による波形データの乱れの影響を受けやすい。また、処理データ範囲を長くすると、動揺周期との関係で補正精度が低下する。これらの2つ方法に対して、最小二乗法による動揺処理は、波形信号の乱れに対しても高精度に動揺成分を推定し、補正精度が優れている。

### (5) 打撃後の2度打ち、3度打ち対策

油圧ハンマーによる打撃後の2度打ち、3度打ちの発生する時間および大きさは、地盤性状、杭の材質、杭径、ハンマー重量等によって変化する。今回の実験の陸上の杭打ち工事の杭径はφ60cmと海上の杭打ち工事の杭径の約1/2であった。そのため顕著に現れたものと思われる。

2度打ち、3度打ちに対するデータ処理上の対応策として、2度打ちの起こる前で貫入量を求める方法がある。陸上杭打ち工事の支持層付近の打撃波形データから、打撃中の時間が60~80msに対して、2度打ちが発生する時間は支持層付近では180~200msである。そのため、貫入量の算出は、打撃後80~180msの100ms間の平均値として求めることができるものと考えられる。打撃後の波形が複雑な海上工事の杭打ち工事では算出値のバラツキ量が多少大きくなることが予想されるが、十分対応できるものと考えられる。

一方、ディーゼルハンマー杭打ち機では、図-43に示すように油圧ハンマーのようなラム重量の載荷の有無による打撃前の杭浮き現象、また2度打ち現象は無

い。そのため、本プログラムによるデータ処理設定範囲、また上記の設定範囲でも十分対応できるものと考ええる。

本データ処理プログラムにおけるデータ処理時間の設定は、初期情報入力の際で決定して入力できる。

#### 6.4 杭打ち施工管理基準に対する対応

##### (1) 杭打ち工事の支持力管理公式への対応

杭打ち工事に伴う杭の支持力管理のための式は、国内では以下の管理式が用いられている。

○ハイリーの式（港湾工事関係）

$$R_{du} = \frac{e_f F}{S + K/2}$$

$R_{du}$  : 杭の動的極限支持力     $S$  : 杭の貫入量

$e_f$  : ハンマーの効率     $K$  : 杭のリバウンド量

$F$  : 打撃エネルギー

○道路橋示方書の式

$$R_a = \frac{1}{3} \left( \frac{AEK}{e_0} + \frac{\bar{N}U}{e_f} \right)$$

$R_a$  : 杭の許容支持力     $l$  : 杭の長さ

$A$  : 杭の実断面積     $U$  : 杭の周長

$E$  : 杭のヤング係数     $\bar{N}$  : 杭の周面の平均  $N$  値

$K$  : 杭のリバウンド量     $e_0, e_f$  : 補正係数

○建設省告示式

$$R_a = \frac{F}{5S + 0.1}$$

$R_a$  : 杭の許容支持力     $F$  : 打撃エネルギー

$S$  : 杭の1打撃当たり貫入量

以上の3つの公式以外にも杭の動的支持力式は多く

のものがあるが、入力データとして貫入量、リバウンド量、または貫入量のみが用いられる。

データ処理プログラム上では適用式のテーブルを用意しておくか、また適用式の書き換えによって対応できる。

##### (2) 打ち止め管理への対応

杭の打ち止め管理は、一般的に下記を基準にして行われる。

①試験工事の結果で決定された深さの基準

②試験工事の結果から施工関係者による決定

③杭打ち公式による判定

杭の打ち止め管理は、基本的に①の「試験工事の結果決定で定された深さ」を基準としている。

②の「試験工事の結果から施工関係者による決定」する場合、以下の打ち込み記録を参考にして決められる。

- ・杭の根入れ深さ
- ・1打撃当たりの貫入量
- ・総打撃回数、最後の10m部分の総打撃回数

杭の根入れ深さは、杭径に応じて決められる。また、1打撃当たりの貫入量は、通常2～10mmを目安とされている。更に、総打撃回数および最後の10m部分の総打撃回数は、杭の材質によって目安が設けられている。

③の「杭打ち公式による判定」は、打設の打込み記録から前記の管理公式によって測定された杭の支持力を参考にして決定される。

本システムは、②、③による打ち止め管理を行う場合、杭の根入れ深さを知るための貫入量および1打撃当たりの貫入量がリアルタイムに表示される。また、打撃回数、杭の支持力等の測定結果も同時に表示される。

##### (3) 工事基準面に基づく杭打ち込み深さ処理への対応

杭の地盤への打込み深さは、工事基準面から処理する必要がある。そのため、以下の手順でデータを入力し、杭の地盤への打込み深さを処理している（図-44参照）。

「杭建込前のデータ入力作業」

①潮位 (H1) ……現場常設の潮位量水標より読取り（目視）、(B)とする。

[工事基準面と水面間の杭長]



②地盤高 (H2) ……工事設計書より読取り、(C)とする。

[工事基準面と地盤高間の杭長]

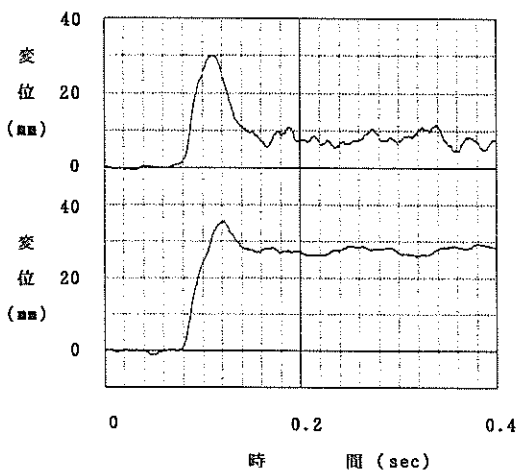


図-43 デーゼルハンマー杭打ち機杭打ち込み波形記録例

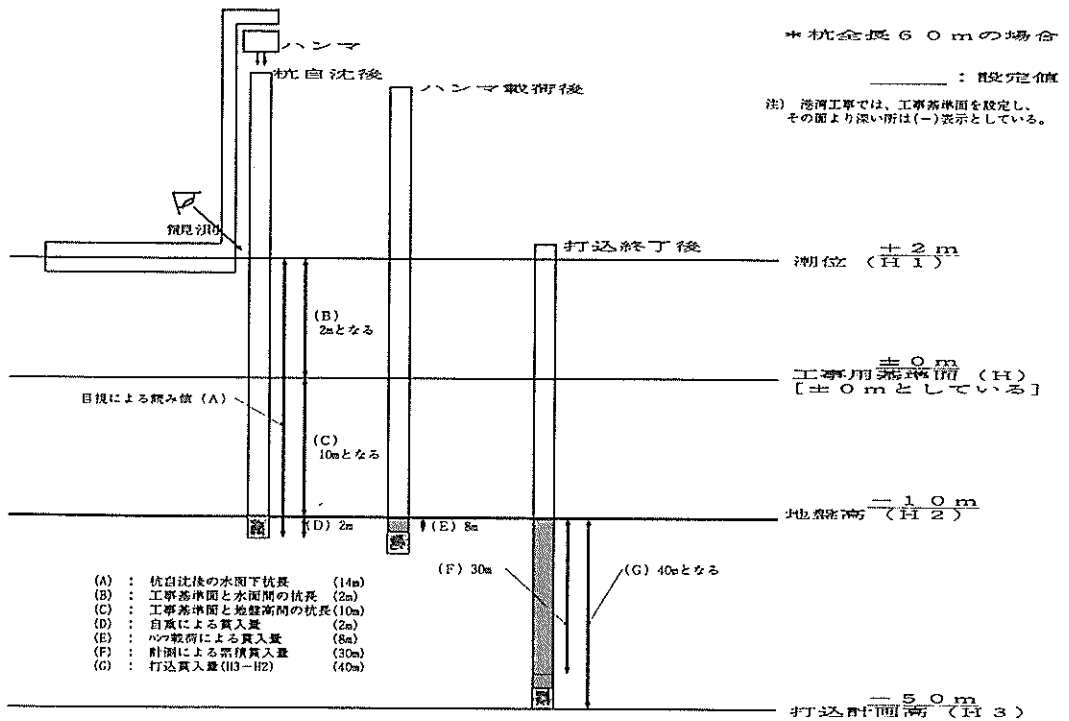


図-44 工事基準面からの地盤打込み深さ処理イメージ図

③打込計画高 (H3) …工事設計書より読取り, [H2-H3] より (G) を求める。

「打込貫入量」

「杭建込自沈後のデータ入力作業」

①建込自沈後の水面下の杭長を杭の目盛りで読取り入力し, (A) とする

↓

② [A-(B+C)] により [自重による貫入量] = (D) を求める。

陸上工事であれば (B), (C) は, 0 であるため (A) = (D) となる。

「打込終了後のデータ処理」

① [施工管理機累積貫入量] = (F), [自重による貫入量] = (D) から [G-(F+D)] により [杭打機の戴荷による貫入量] = (E) を求める。

②以上の処理によって求めた以下の値は、帳票の記録欄に表示する。

- ・地盤高 (H2)
- ・自重による貫入量 (D)
- ・杭打機の戴荷による貫入量 (E)

「地盤打込み深さの処理」

①貫入深さの工事基準面からの深さは、累積杭長

(C+D+E+F) とする。

②最終打込み深さの値を打込計画高 (H3) と, (F) + (E) + (D) + (C) の合計は一致させる。

③その場合, (E) は誤差修正分として, 最後に決定させる。

④最終打込み深さの最大値は 70m とする。

#### 6.5 観測波形による杭打ち工事の施工管理

レーザードップラ測定器の出力波形として, 速度および変位波形がある。速度波形の積分結果が変位波形であるが, 速度波形は変位波形に比べて杭の打撃状態や杭の先端の地盤状況に対する情報を多く含んでいる。図-45 は, ディーゼルハンマー杭打ち機のレーザードップラ測定器による速度および変位波形の記録例である。図ではからにかけて支持層に近づいた波形である。は, 杭先端がほぼ支持層に達した時の波形である。この速度波形について, 杭の波動理論から考察すると以下ようになる。

まず, 速度波形の立ち上がりから最大値までの速度値は, 杭の打撃応力に比例した下記に示す関係にあり, その最大値は打撃応力の最大値に対応する。

$$\sigma = E / c \cdot v$$

ここで,  $\sigma$ : 杭の応力, E: 杭の縦弾性係数, c: 杭の波動伝搬速度, v: 杭の粒子速度である。すなわち,

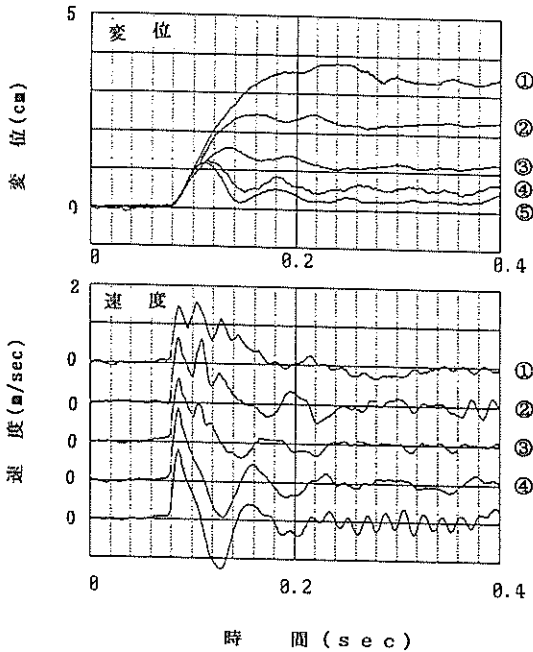


図-45 レーザードップラ測定器の変位、速度波形

粒子速度は、杭に対するハンマーの打撃力の大きさを示している。また、①、②、③の速度波形においては、最大値以降において3回～1回の再貫入している立ち上がり波形が見られる。再貫入した立ち上がり波形は、杭頭で計測すれば1波形毎に速度0になるが、レーザードップラ測定器では杭の中間で計測しているため速度0に達しない前に立ち上がっている。再貫入が起こる条件は、杭先端の抵抗が杭頭に発生した打撃力の $2/3$ 以下の場合に起こる。すなわち、この現象は④、⑤の波形には見られず、軟らかい地層において発生していることを示している。

一方、速度波形のマイナス側の値は、変位波形ではリバウンド量に相当するもので、杭先端の地盤抵抗の割合を示している。図の記録例では速度のマイナス側はの波形以降に見られる。⑤の支持層に達した波形では、マイナスの最大値はプラス側の最大値の $7$ 割程度に達している。

⑤の波形の貫入量を示す領域（図で $0.2\text{sec}$ 以後）で、波動の伝搬時間（約 $0.018\text{sec}$ ）に相当する振動波形が見られる。これは、杭先端が硬い支持層に達した結果、貫入による杭の打撃エネルギーの消費の割合が少なくなり、杭頭～杭先端間で波動が反射しているものと考えられる。すなわち、この速度波形の状態では、杭の先端部は十分支持層に達しているものと推定することができる。

## 7. まとめ

レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機は、従来人力で行われている施工管理作業を全て自動化できるもので、実用化が待たれているものである。今回の陸上および海上の杭打ち工事における現地実験によって貫入、リバウンド量の測定性能および自動化に対する対応性能が明らかになった。それを要約すると、以下の通りである。

①陸上の杭打ち工事における杭の貫入、リバウンド量の記録は、打撃前の杭浮き現象が打ち始めから終了に至るまで継続的に発生している。また、支持層付近では、打撃後にハンマーの飛び跳ねによる2度打ち、3度打ち現象がある。

以上のような陸上の杭打ち工事に対して、人力測定はトランシットによる貫入量の測定値を基準にして、 $1\text{mm}$ 以下の高精度で安定した結果であった。機械測定精度は、人力測定に対して $1/2$ 以下の結果であった。その要因として、前記打撃後の2度打ち、3度打ち現象等の影響がある。この改善策として、データ処理設定時間の改善によって、貫入量算出処理精度の向上が期待できる。

②海上の杭打ち工事における杭の貫入、リバウンド量の記録は、打撃前の杭浮き現象が陸上の杭打ち工事と同様に打ち始めから終了に至るまで継続的に発生している。また、打撃後にハンマーの飛び跳ねによる2度打ち現象は、陸上工事に比較して少ないものの発生している。

以上のような海上の杭打ち工事に対して、人力測定精度は、トランシットによる貫入量の測定値を基準にして、陸上工事の結果に対して $1/2$ 以下であった。一方、機械測定の精度は、ほぼ同程度であった。

③人力測定と機械測定の比較で、貫入量、リバウンド量共に機械測定値は人力測定値を上回っている。この要因として、機械測定では、貫入量を算出するための時間設定範囲によって、本来の打撃による貫入量が2度打ち等によって大きく算出される等の誤差要因がある。また、人力測定のリバウンド量は、最大変位点の記録の追従性や記録の読取り精度が低下し、小さく算出されることがある。

④レーザードップラ測定器は、杭に非接触状態で杭の打込み量を高精度に測定でき、打設途中の打込み貫入量の管理および打撃回数の管理にも十分対応できる。

⑤レーザードップラ測定器を用いた施工管理機は、杭の打設開始時より終了に至る施工管理項目に対して、

従来の人力測定による施工管理項目を自動的に行える。  
⑥レーザードップラ測定器の速度波形によって、杭の打設途中の地層、また支持層への打ち込み状況の判定がリアルタイムに行える。

以上の現地実験結果に基づいて、レーザードップラ測定器を用いた施工管理機を実用化の観点から評価すると、以下ようになる。

- (1) 打設中の支持力を管理するための貫入、リバウンド量の測定精度は、現状の人力測定と同程度であり実用に供することができる。陸上の杭打ち工事に見られた2度打ち等の現象がある場合、データ処理の設定時間を変える等の対応により高精度が期待できる。
- (2) 打設開始より終了に至るまで杭に非接触状態で貫入、リバウンド量、打撃回数等について測定し、施工管理データをリアルタイムに表示することができる。
- (3) 現地における杭打ち機の機種、杭打ち船の構造等の多様性、また各種の杭打ち工事の施工管理基準に対して、機器およびデータ処理ソフト共に十分対応できる。
- (4) レーザードップラ測定器の打ち込み波形記録から、打ち込み途中の地層判定および支持層における打ち止まり判定をリアルタイムに行える。
- (5) 杭の打ち込みに関する全施工管理データの蓄積が行え、より高質な施工管理が可能となる。

## 8. あとがき

レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機の開発は、打設杭に非接触で打ち込み挙動を計測してリアルタイムに施工管理データを表示できることが大きな特徴である。更に、これまで人力で行われていた全ての計測作業の自動化が可能なものである。

開発された施工管理機の測定性能、精度については、開発の最終年度に陸上および海上の杭打ち工事の中で行われた2つの現地実験によってほぼ明らかになった。杭の支持力を求めるための貫入、リバウンド量の測定精度は、従来の人力測定とほぼ同程度なものであった。また、打設中の杭の打ち込み長さの測定および打撃回数等の管理も十分な信頼性を持って行える。一方で、自動化する上で問題となる杭打ち船の構造、杭打ち機の機種および各種施工管理基準等への対応も十分なものと評価できた。

レーザードップラ測定器を用いた杭打ち施工管理機の自動化技術の開発は、港湾技術研究所における基礎研究を経て、今年度の第五港湾建設局の開発によってほぼ実用化がなされたものとする。今後は、開発された本施工管理機の実工事での適応性が明らかにされ、港湾等に

おける杭打ち工事の施工管理の改善に寄与できることを期待したい。

最後に、本論文は第五港湾建設局の行った2つの現地実験データを基に評価検討を行ったもので、データの提供等について多大な協力をいただいた第五港湾建設局の関係者および現地実験を行った本施工管理機の製作メーカーである三菱電機㈱の関係者、また本施工管理の開発に当たり適切な助言を得た土質部高橋基礎工研究室長に心より深甚なる感謝の意を表す。

(1996年3月29日受付)

## 参考文献

- 1) 石塚浩次・根本孝志・林田善久；杭打施工管理システムの開発，1992，9
- 2) 第五港湾建設局，平成7年度 杭打施工管理機実験報告書
- 3) 港湾設計指針（改訂）第I部，第5編 基礎，1989，3，P5-51
- 4) 日本道路協会，道路橋示方書・同解説，IV下部構造編，1980，P368-370
- 5) 境 友昭：波動方程式の杭打ち問題への応用に関する研究，1990，1

港湾技研資料 No.841

1996・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1996) by P.H.R.I

Allright reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。