

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 31 NO. 3 Sept. 1992

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第31巻 第3号 (Vol.31, No.3) 1992年9月 (Sept.1992)

目次 (CONTENTS)

1. Planning and Technology for lock Canal upon History
— From Medieval Canal to the Panama Canal —
.....Masataka NAGANO..... 3
(運河計画論史 —中世の運河からパナマ運河までの閘門式運河—
.....長野正孝)
2. 我国沿岸の潮位と平均海面の変動の解析
.....村上和男・山田邦明.....37
(Analysis of tide gauge records and sea-level change around Japanese coast
.....Kazuo MURAKAMI and Kuniaki YAMADA)
3. 円筒構造物のコンクリート打設直後の温度応力解析
.....清宮 理・山田昌郎・長廻幹彦.....71
(Thermal Stress Analysis for Cylindrical Concrete Structures
.....Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA and Mikihiko NAGASAKO)
4. 水平管における空気混入軟泥の流動特性 (第二報)
.....岡山義邦・鮎貝基和・鈴木 誠・福本裕哉.....97
(Fluidity Characteristics of Muddy Slurry with Compressed Air in Horizontal Pipe
(2nd report)
.....Yoshikuni OKAYAMA, Motokazu AYUGAI, Makoto SUZUKI and Hiroya FUKUMOTO)
5. 杭打施工管理システムの開発
.....石塚浩次・根本孝志・林田善久127
(Developent of Execution Control System for Pipe Driving
.....Koji ISIZUKA, Takashi NEMOTO and Yoshihisa HAYASIDA)

5. 杭打施工管理システムの開発

石塚浩次*

根本孝志**

林田善久***

要 旨

本開発においては、人力によって行われている杭打工事の施工管理を自動化するシステムを明らかにした。開発した施工管理システムは、レーザドップラ測定器とパーソナルコンピュータから構成される。杭の打込み挙動は、レーザドップラ測定器によって杭表面にレーザ光を直接照射して測定される。その測定性能、精度は模型実験および実杭打工事の現地実験により明らかにしている。レーザドップラ測定器によって測定されたデータは、パーソナルコンピュータによって処理され、以下の施工管理データが算出される。

- (1) 打設開始から終了までの全打撃回数の算出および50cm貫入毎の打撃回数
- (2) 打設開始から終了に至る全貫入量の算出
- (3) 杭の動的支持力の算出
- (4) (1)~(3)の施工管理データの帳票出力

以上の施工管理データを算出するため、基本的なデータ処理方法、ラムの落下高さの算出および船体動揺の打込み変位の測定値に対する補正処理方法を明らかにしている。

この開発されたシステムによって、杭打工事の打設中の施工管理が全て自動化される。

キーワード：杭打工事、施工管理、杭支持力、自動化、安全化、レーザドップラ測定器、船体動揺

*機械技術部 主任研究官

**機械技術部 計測施工研究室 (現第四港湾建設局)

***機械技術部 計測施工研究室

5. Development of Execution Control System for Pile Driving

Koji ISIZUKA*

Takashi NEMOTO**

Yoshihisa HAYASIDA***

Synopsis

This paper describes the development of a new system which can automate the execution control of pile driving work which have been done by man power. The new system is composed of a laser Doppler velocimeter and a personal computer. The driving displacement of a pile is measured by direct radiation of laser to the surface of the pile using a laser Doppler velocimeter.

The measuring performance and precision were clarified through model experiments and field tests in pile driving works.

The data obtained from the laser Doppler velocimeter are processed by a personal computer to be calculated the following data for the execution control;

- 1) Total number of drivings from the beginning to the end and the number every 50cm driving
- 2) Total amount of driving from the beginning to the end
- 3) Dynamic bearing capacity of a pile
- 4) Book-style outputs of the above data

In order to calculate the above data for execution control, this paper explains the fundamental data processing, the calculation of dropping heights of the ram, and corrective method of measured value of driving displacement affected by heaving of the pile driving barge on which the measuring instruments are mounted.

The newly developed system can make all the execution control of pile driving works automatic.

Key Words : Pile driving, Execution control, Pile bearing capacity, Automation, Safety, Laser Doppler velocimeter, Heaving of ship

*Senior Research Engineer, Machinery Division

**Member of Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

***Member of Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

目 次

要旨	127
1. まえがき	131
2. 杭打工事の施工管理内容	132
3. リバウンド量測定技術の開発	132
3. 1 リバウンド量測定技術	132
3. 2 レーザドップラ測定器	133
4. 模型実験におけるリバウンド量測定性能	134
4. 1 模型実験装置	134
4. 2 模型実験結果	134
5. 現地実験におけるリバウンド量測定性能	136
5. 1 現地実験内容	136
5. 2 現地実験結果	137
5. 3 支持層付近におけるリバウンド量測定記録	138
6. 杭打施工管理システムの開発	138
6. 1 杭打施工管理システムの内容	138
6. 2 施工管理データ処理内容	139
6. 3 施工管理データ処理プログラム	141
6. 4 システム機器構成	142
7. あとがき	144
参考文献	144

1. まえがき

港湾工事における杭打工事の多くは、杭打船によって行われている。その杭打工事の施工管理には、打設位置等に関するものと杭の支持力等に関するものがある。打設位置等に関する施工管理は、通常陸上からトランシット等により視準され、打設位置、杭の傾斜の測定が行われている。一方、杭の支持力等に関する施工管理は、船上または陸上の2名の計測員によって、それぞれ杭の貫入量、リバウンド量の測定、また打撃回数、ラム落下高さの測定が行われている。これらの施工管理の中で、船上の計測員によって行われる杭の貫入量、リバウンド量（以下リバウンド量とする）の測定は、杭の動的極限支持力としての打止まりを管理するものである。しかし、杭の動的極限支持力を求めるためのリバウンド量の測定作業は、ハンマー直下において杭に用紙を貼付し直接記録しているため、落下物による作業の安全性、測定作業の熟練、また測定の個人差が問題となっている。更に、杭の動的極限支持力を算出する上で必要になるラム落下高さの測定と打設中の全打撃回数についても、陸上もしくは船上からの計測員の視準作業によって行われている。したがって、杭の動的極限支持力管理のための各測定作業は、安全性や省力化の面および測定精度の面からも自動化技術が必要となっている。

しかし、杭打施工管理の自動化技術の開発は、これまで多くの試みがなされているが実用化に至っていない現状である。その理由の1つとして、杭打設時のリバウンド量の測定技術そのものの開発が困難であったことによるものと考えられる。すなわち、杭のリバウンド量の測定技術は、ハンマー落下による衝撃挙動を計測できることと併せて、船上から計測する場合においては動揺の補正対策が必要となる。杭の打ち込み挙動は、最大2~3m/secの速度で振幅し、その上下挙動を高精度に測定する必要がある。更に、船上から計測する場合、船体動揺によってセンサー等の設置点が動揺するため、杭のリバウンド量の記録原点自体が上下する。波等による船体の上下動は、最終の打止まり付近における1打撃毎のリバウンド量を大きく上回ることもある。このような技術課題に加えて、より経済的なものが求められていることもあり、技術開発の進展が見られなかったものと考えられる。

最近、以上のような杭打施工管理の自動化の要請に対して、加速度センサー¹⁾やCCDカメラ²⁾を用いた杭のリバウンド量の測定技術の開発が行われている。その測定方法は、先ず加速度センサーを用いたものは打設中の杭にセンサーを取付けて杭の上下加速度を測定し、2回の積

分により打ち込み挙動を測定する。CCDカメラを用いたものは、打設中の杭にCCDカメラ用の小片のターゲットシートを貼付し、そのシートを船上に固定されたカメラで撮影して杭の挙動を測定する。そのため、この2つの方式は、実際測定作業においては杭打作業を途中で停止してセンサー、シートの取り付け、取り外しを行う必要がある。また、ラムの落下高さは別途測定する必要があるため、動的極限支持力の算出を現場でリアルタイムで処理しにくいシステムとなっている。

一方、杭の動的極限支持力以外の管理項目である打設中の全打撃回数の測定技術に関しては、ハンマーの打撃音でカウントする方法の開発が試みられているが、実用化されたものはない。更に、ラムの落下高さの測定技術の開発は全くなされていない状況にある。この2つの測定技術の開発は、それほど主要なものでなかったことや、前述のリバウンド量の測定技術に付随するものであったため、その開発の進展がみられなかったものとする。

本開発においては、杭打船の杭打工事を対象として、これまで人力で行われていたリバウンド量の測定による杭の動的極限支持力管理および打設中の全打撃回数等の施工管理を全て自動化する施工管理システムを明らかにした。開発した施工管理システムは、レーザドップラ測定器を用いて杭の打ち込み挙動を測定し、その測定データから現行の港湾工事施工管理基準に従って施工管理データを算出するものである。システムの中心となるレーザドップラ測定器は、杭打船上に設置されたブローブから打設杭の表面にレーザ光を直接照射し、杭の打ち込み挙動を非接触状態で測定するものである。杭打船上から測定する場合問題となる杭打船の船体動揺の影響については、レーザドップラ測定器の速度データを用いて高精度な補正処理を行っている。データ処理プログラムは、レーザドップラ測定器で測定された速度、変位データから1打撃毎に貫入量、リバウンド量およびラム落下高さを求め、動的極限支持力を算出する。更に、打設中の全打撃回数および貫入量50cm毎の打撃回数の算出も行える内容になっている。

本報告においては、先ず杭打施工管理システムの開発の中心となるリバウンド量の変位測定技術として、レーザドップラ測定器の選定を行い、模型実験、現地実験における測定性能の実験結果を述べている。更に、レーザドップラ測定器を用いたシステム内容と動的極限支持力等を算出するデータ処理内容について述べ、現地杭打工事の実験データを用いた検証結果を明らかにしている。また、データ処理においては、船体動揺によるリバウンド量のデータの補正方法について述べ、その補正精度を

明らかにしている。

杭打船の場合、港湾工事においては下記の公式が用いられている。

2. 杭打工事の施工管理内容³⁾

港湾工事における杭打工事の打設中の施工管理として、以下の内容の各測定が行われている。

「打ち込み途中の施工管理」

- ①50cm貫入毎の打撃回数の測定
- ②全打撃回数の測定

「打設終了時付近の杭の支持力管理」

- ①貫入量，リバウンド量の測定
- ②ラムの落下高さの測定

杭の動的支持力の管理は、支持層における打止まり付近において通常10～20回のリバウンド量が測定され、その平均値によって求められる。写真-1にディーゼルハンマー杭打船の人力によるリバウンド量の測定状況を示す。また、図-1にその測定記録の1例を示す。

杭の打設中の動的極限支持力は、ディーゼルハンマー

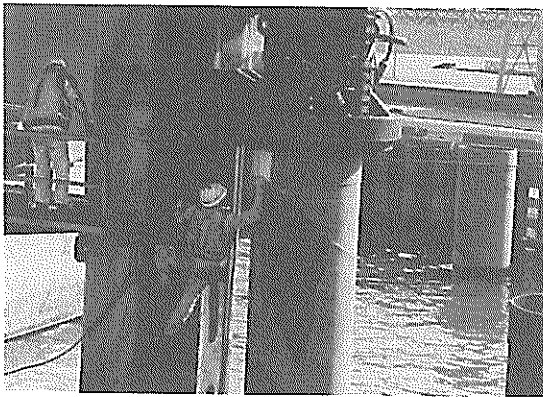


写真-1 人力によるリバウンド量測定状況

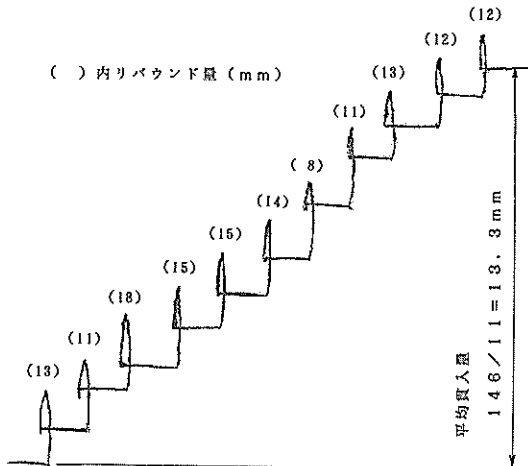


図-1 人力によるリバウンド量測定記録例

$$R_u = \frac{e_f \cdot 2W_H \cdot H}{S + \frac{K}{2}}$$

ここで、 R_u : 動的極限支持力 (tf) S : 貫入量 (cm)
 e_f : 機械効率 K : リバウンド量 (cm)
 W_H : ラム重量 (tf) H : ラム落下高さ (cm)

杭打工事の施工管理項目の中で自動化等の改善は、上記に掲げた「打ち込み途中の管理」、「打設終了時付近の杭の支持力管理」の①、②の各測定に対して必要となっている。すなわち、「打ち込み途中の管理」は、専任の計測員による単純計測作業からの解放、また「打設終了時付近の杭の支持力管理」の測定に対しては人間の直接作業の安全性と目視観測に対する精度の向上が求められている。

3. リバウンド量測定技術の開発

3.1 リバウンド量測定技術

杭打船の杭打工事を対象にしたリバウンド測定技術として、以下の性能、精度が必要になる。

- ①杭の動的支持力を測定する付近のリバウンド量は、おおよそ0.3～0.4sec間の±20mmの上下動であり、その挙動を1mm以下の精度で測定できること。
- ②杭打船上から測定する場合、船体動揺による記録原点の影響がないこと。
- ③更に、杭打作業の中断を伴わない非接触状態による計測技術が望ましいこと。

すなわち、①の測定精度については、現状の人力による直接記録方式と同程度以上であること。②は杭打船上からリバウンド量を測定する場合最も問題となるもので、数mm程度の杭の貫入量に対して波等による船体上下動は大きく上回ることがある。そのため、この船体上下動を含む貫入量、リバウンド量のデータは、補正が必要となる。③の目標は、打設中の杭にセンサーを設置して測定する方式では、杭打作業を停止してセンサーを取付け、測定後に取外すことになる。

杭のリバウンド量の測定は、基本的には変位の測定技術であり、機械的に直接記録する方法、また電気的な測定原理に基づく方法、更に加速度センサーを始めとする

表-1 各種のリバウンド量測定方式

方法	方式	測定原理	記録原点の支持方法
変位測定	機械方式	現在の人力による記録方式の機械化。記録ペンを杭に沿って自動的に横送りし、杭に貼付けした用紙にリバウンドを記録する。	記録部を上下動方向に回転するマグネットローラより杭に吸着し、更に全体を浮体、シンカーにより支持する。(図-2(a)参照)
	渦電流方式	既在の渦電流方式の変位計を用いて、杭に取付けた単一勾配のブロックとセンサー間の距離変化によりリバウンドを測定する。(図-2(b)参照)	上記機械方式の記録原点の支持方式により、記録部の代わりに渦電流方式のセンサーを取付ける。
速度測定	電磁誘導方式	杭の円周部にコイルを設置し、そのコイル上下端に設けた磁石により杭を磁化させ、杭の上下動速度に比例する誘導起電力を測定し、1回の積分により変位を求める。(図-2(c)参照)	コイルを船上に設ける場合は、船体動揺速度と杭の打込み速度の差が大きいことを利用し、データ処理段階で記録原点を求める。
	レーザドップラ方式	杭と直角方向から2本のレーザ光をある照射角で照射し、照射角の方向余弦分のドップラシフト量から杭の上下速度を求め、1回の積分により変位を算出する。(図-2(d)参照)	電磁誘導方式に同じ。
加速度測定	加速度方式	打設中の杭に加速度センサーを取付け、杭上下動の加速度を測定し、2回の積分により変位を求める。	杭に加速度センサーを設けることにより、記録原点は確保される。

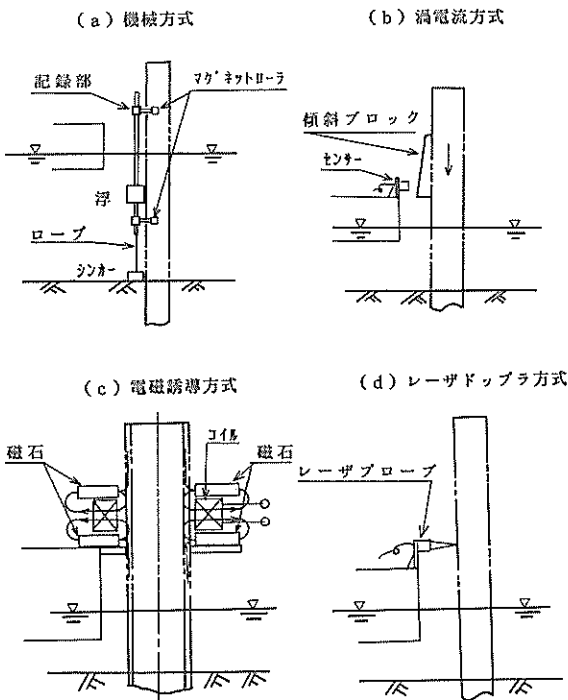


図-2 各種のリバウンド量測定方式

各種のセンサーを用いた多くの方法がある。本開発においても、表-1、図-2に示す各種の方式について模型実験および実杭打工事の現地実験を行っている。これらの方式の中で、渦電流方式、電磁誘導方式、加速度センサ

一方式については、模型実験のみを行っている。模型実験結果からこれらの3つの方式は、測定精度および安定性について十分でなかった。

機械方式、レーザドップラ方式は、模型実験、現地実験を行い、それぞれ実杭打工事におけるリバウンド量の測定を行っている。しかし、機械方式は装置本体を打設杭に取付た状態でリバウンド量を杭に貼付した用紙に記録するもので、システム化に適したものではない。そのため、本開発においては、これらの実験結果と上記に掲げた3つの条件を満足するものとして、打設杭に非接触状態で杭の打ち込み挙動を測定できるレーザドップラ測定器を選定している。

3.2 レーザドップラ測定器

レーザドップラ測定器は、三菱電気(株)製のもので、その測定原理を図-3に示す。その測定原理は、レーザ光をプローブの両端から被測定物の表面で1点交わるように直接照射し、被測定物の横移動速度に応じて発生する照射角の $\sin(\phi/2)$ 成分のドップラシフト量を検出し速度を測定する。すなわち、被測定物の横移動速度Vの時、杭表面から反射した2つの照射レーザ光のドップラシフト量を検出し、各々のシフト量を加えて速度を算出する。この2つの照射レーザ光のドップラシフト量を加えることによって、プローブと被測定物の遠近方向の速度変動成分は相殺され、横移動速度のみが測定できる。杭等の被測定物の横移動速度に伴うドップラ周波数(f_d)は、以

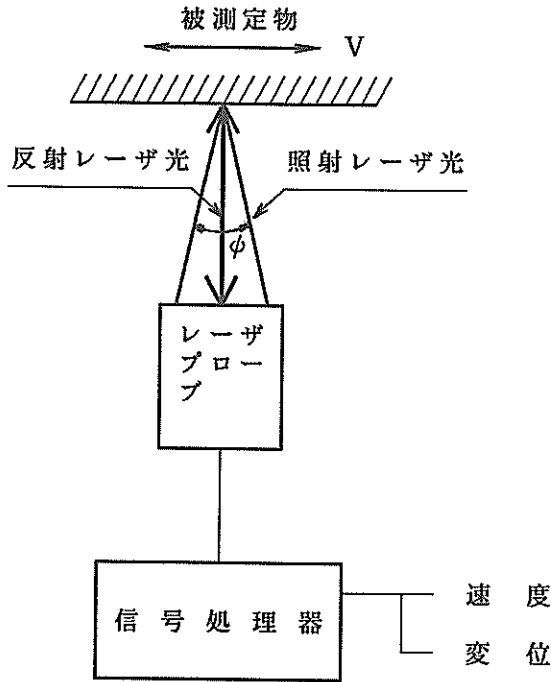


図-3 レーザドップラ測定器の測定原理

下の式により求められる。

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cdot \sin(\phi/2)$$

ここで、 V ：被測定物の移動速度
 λ ：レーザー光の波長
 ϕ ：2本のビームの交差角

レーザドップラ測定器は、基本的には速度を測定するが、信号処理器によって速度のデジタル積分が行われ同時に変位量も出力される。この測定器の速度から変位の出力は、周波数/電圧変換器によってデジタル変換処理されているために、アナログ変換処理に比べて0点の安定性が良いとされる。

4. 模型実験におけるリバウンド量測定性能

4.1 杭打模型実験装置

図-4は、杭の打ち込み挙動を模型的に再現した模型実験装置である。杭の打ち込み挙動は、ハンマーの落下エネルギーによる杭の地盤への貫入と杭および地盤等の弾性変形によりリバウンドする現象であり、模型実験装置においては杭支持材の梁の部分地盤に相当する。すなわち、この部分で杭は締め付けられ、同時に弾性梁とし

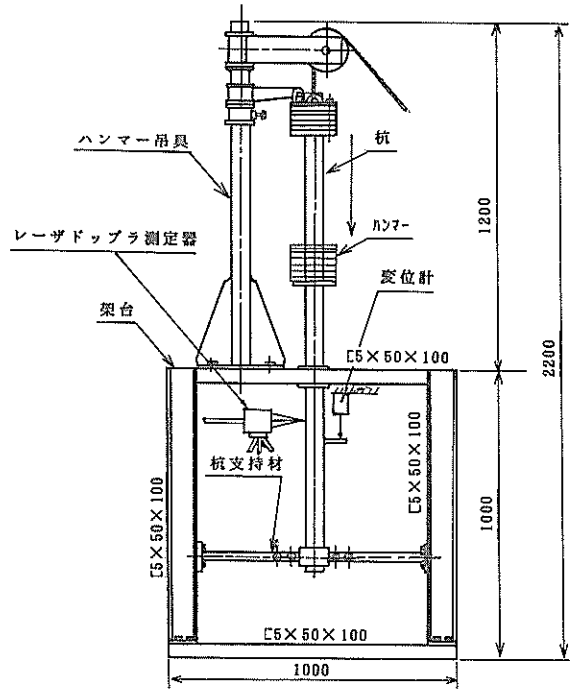


図-4 杭打模型実験装置

て支持されている。ハンマーの落下エネルギーによって、杭は締め付け部の摩擦抵抗に応じて貫入し、梁の弾性変形に比例してリバウンドする。杭打模型実験装置の主な仕様を以下に示す。

- ①模型杭 : 径=60.5mmφ、長さ=1.7m
- ②ハンマー重量 : 20kgf
- ③ハンマー落下高さ : 最大50cm (自由落下)
- ④杭支持材のたわみ : ハンマー落下高さ50cmのとき約5mm

模型実験装置の杭の打ち込み挙動は、鋼製ハンマーとストッパーの直接衝撃等のこともあり、実工事のディーゼルハンマー形式の杭打船の打ち込み挙動に対して多少高い周波数の振動状態であった。模型実験においては、この装置によってレーザドップラ測定器の測定精度の把握を行っている。測定精度の比較は、図-4に示したようにレーザドップラ測定器と別途高精度な変位計を用いて杭の打ち込み挙動を同時に測定して行っている。

4.2 模型実験結果

模型実験時のレーザドップラ測定器の測定性能は、以下の通りである。模型実験に用いたレーザドップラ測定器は、杭の打ち込み挙動の測定に始めて適用したもので、変位の測定範囲、プローブ先端からの測定距離の2つの

表-2 レーザ照射面のS/N比測定結果

測定対象物	測定距離	レーザー照射角	測定結果 S/N(dB)	測定対象物	測定距離	レーザー照射角	測定結果 S/N(dB)
平鋼 赤錆び面	300mm	0°	37.3/59.9	鋼パイプ 黒皮面 (78mmφ)	300mm	0°	37.4/58.9
	310	0	39.9/60.3		310	0	44.8/60.0
	320	0	35.8/58.9		320	0	45.4/60.0
	326	0	45.0/60.2		324	0	43.8/60.0
	300	1	42.6/59.1		300	1	38.0/59.7
	310	1	45.6/58.9		310	1	44.8/60.0
	320	1	36.2/60.0		320	1	45.4/60.0
	326	1	(測定不能)		324	1	44.8/60.0
	300	2.5	40.3/58.8				
	310	3	39.8/60.0				
	320	8	45.3/60.8				
	平鋼 黒皮面	300mm	0°		38.8/60.3	アルミ筒 光沢面 (60mmφ)	300mm
303		0	33.7/58.7				
308		0	41.2/60.9				
318		0	40.6/60.5				
328		0	37.6/59.5				
330		0	40.0/60.6				
300		5	40.1/58.2				
303		10.5	43.3/61.3				
308		10.5	38.7/60.7				
318		10	40.2/60.7				

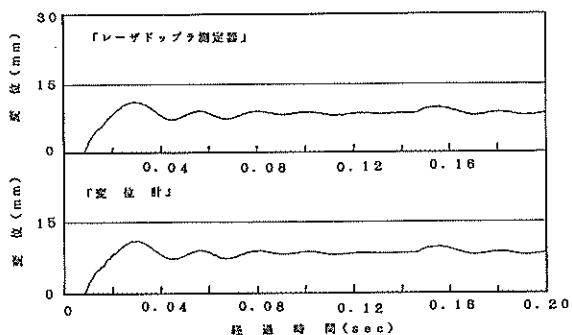


図-5 模型実験結果

測定性能は実杭打工事の杭の打ち込み挙動の測定には不足しているものである。

「レーザードップラ測定器の測定性能」

- ・使用レーザー : 半導体レーザー
- 波長=750nm, 出力=20mW

- ・レーザー交差角: 約6度
- ・測定範囲 : 速度測定範囲=-60~+180m/min
変位測定範囲=-0.1~+0.1mの繰り返し出力
- ・測定距離 : プローブ先端から300±10mm
- ・測定精度 : ±0.2%FS

レーザードップラ測定器の実験結果を図-5に示す。図に示したレーザードップラ測定器と変位センサーの測定値は全く一致した結果が得られており、400μsecでサンプリングしたA/D変換データと比較しても約1%以下の精度であった。また、0点の安定性も十分優れた結果が得られている。

一方、レーザー光の被測定物の反射面の影響については、表-2に示すような金属の表面状態、形状に対して測定距離、レーザー光の照射角を変えてS/N比(S, Nの差15dB

以上でほぼ測定可)を測定している。なお、測定距離は、上記の仕様に対して $310 \pm 10\text{mm}$ と 10mm 程度ずれたものになっている。測定結果は、アルミの光沢面において最も大きなS/N比の差となり安定した測定が行える。黒皮面、赤錆面は、測定距離の $\pm 10\text{mm}$ 範囲内ではほぼ同様な値であり、十分なS/N比が得られている。また、表面形状の影響は、レーザ光の照射角に大きく影響し、パイプ径 $\phi 78\text{mm}$ においては $0^\circ \sim 1^\circ$ の測定範囲であるが、平板の場合は $\pm 5^\circ$ 程度の斜めから照射しても測定が可能である。したがって、実工事の杭表面が直径 1000mm 前後の曲率であれば、黒皮面や赤錆面また海水に濡れた状態も予想されるものの十分に対応できるものと考えられる。

5. 現地実験におけるリバウンド量測定性能

5.1 現地実験内容

実杭打工事の現地実験は、レーザドップラ測定器の測定性能を変えて2回行っている。現地実験を2回行った理由は、主に1回目実験においてレーザプローブと杭表面までの測定距離性能が不足していたことによる。すなわち、1回目の実験においては測定距離は $600 \pm 20\text{mm}$ に対して、船体動揺等によって打設杭の表面とレーザプローブの取付場所の距離変動が大きい場合 $\pm 50\text{mm}$ 程度あった。そのため、2回目の実験においては、測定距離を $900 \pm 50\text{mm}$ としている。このプローブからの測定範囲は、プローブの取付場所の選定、また船体動揺等によるプローブと杭間の距離変動に対応する測定性能である。このレーザプローブと杭表面までの測定距離は、レーザの照射角によって決り、模型実験に用いたものに対して2倍以上の性能になっている。

また、2回目の東京港における実験においては、杭の上部付近にゴムライニングが施されており、この実験を通じてレーザ光の最も反射特性の悪い黒色の表面に対する測定性能を明らかにすることができた。以下に各実験の実験条件およびレーザドップラ測定器の性能を示す。

「第1回目実験」

- ①実験場所 : 横浜港大棧橋埠頭前面
- ②打設杭 : 鋼管, 径= $\phi 1000\text{mm}$, 長さ=40m
- ③杭打船
 - ・船体部 : $L \times B \times D = 50\text{m} \times 24\text{m} \times 4.5\text{m}$
 - ・ハンマー : ディーゼルハンマー, KB-80
- ④レーザドップラ測定器
 - ・使用レーザ : 半導体レーザ, 波長=750nm, 出力=20mW
 - ・レーザ交差角: 約3度

- ・測定範囲 : 速度測定範囲= $-100 \sim +200\text{m/min}$
変位測定範囲= $-1 \sim +1\text{m}$ の繰り返し出力
- ・測定距離 : プローブ先端から $600 \pm 20\text{cm}$
- ・測定精度 : $\pm 0.2\%FS$

「第2回目実験」

- ①実験場所 : 東京港大井埠頭前面
- ②打設杭 : 鋼管, 径= $\phi 1000\text{mm}$, 長さ=60.5m (継ぎ杭)
腐食防止ゴムライニング付き (杭上端部, 長さ=7.6m)

③杭打船

- ・船体部 : $L \times B \times D = 36\text{m} \times 18\text{m} \times 3.2\text{m}$
- ・ハンマー : ディーゼルハンマー, MB-40

④レーザドップラ測定器

- ・使用レーザ : 半導体レーザ, 波長=750nm, 出力=20mW
- ・レーザ交差角: 約2度
- ・測定範囲 : 速度測定範囲= $-60 \sim +180\text{m/min}$
変位測定範囲= $-1 \sim +1\text{m}$ の繰り返し出力
- ・測定距離 : プローブ先端から $900 \pm 50\text{mm}$
- ・測定精度 : $\pm 0.2\%FS$

2回の現地実験は、杭の自沈した後のハンマー打撃開始より支持層付近の終了に至るまで連続してリバウンド量を測定している。なお、データの記録は、データレコーダとアナログ記録器により行っている。

図-6、写真-2にレーザプローブの取付け状況を示す。横浜港の実験時のレーザプローブの取付けは、杭のリーダ部および船体の作業足場を利用して行っている。また、東京港においては、杭のリーダ部にレーザプローブの取付ベースを設けて行っている。杭のリーダ部は、レーザプローブの設置場所として測定距離の面からは適した場所であるが、支持層付近の打設時には船体に設けてある作業足場に比べて大きな衝撃振動が生じる。支持層付近の打込み時の杭リーダ部における振動は、水平方向に約20g, 上下方向に約5g程度あった。実験においては、レーザプローブへの下部に防震ゴムを設けて測定している。すなわち、レーザプローブが振動することは、測定精度等にも悪影響になるため十分な防震対策を必要とする。写真-2の東京港における実験の取り付け状態を示すので、アクリルのボックス内に防震ゴム(スポンジゴム)を設けてプローブを設置している。この防震ゴムによ

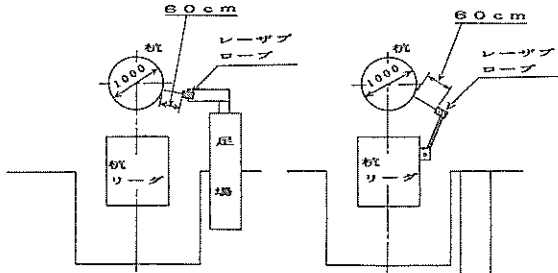


図-6 レーザプローブの設置図 (横浜港実験)

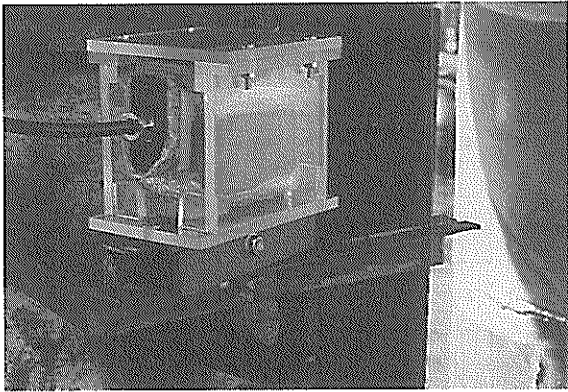


写真-2 レーザプローブの設置状況 (東京港実験)

て、低い周波数の振動は残るものの高い周波数の振動は減少させることができた。

5.2 現地実験結果

第1回目の横浜港において行った実験の杭の打ち込み開始から終了に至る測定記録を図-7に示す。図の(a)は吊りウインチによる杭の吊り降ろし状況の測定記録で、ほぼ一定な速度(約16m/min)で吊り降ろされている。なお、変位の記録は最大±1mでフルスケールのため、2m毎に繰り返して記録している。図の(b)は打ち込みの中間付近の測定記録で、図の(c)は施工管理のリバウンド量の測定が行われる打ち込み終了付近の記録である。打ち込み終了付近においては、変位の記録感度を大きくしているため、船体動揺による記録原点の上下動が現れている。レーザドップラ測定器の測定状態は、ほぼ打始めから打止まりまで連続して行えたが、途中1箇所程度プローブと杭間の距離変動が船体動揺により大きくなり欠測がみられた。これは打設の中間付近において、杭打リグ下部に設けてある杭を固定するパイルキーパが外された後に船体動揺によって、測定距離の範囲を越えて杭とプローブの間が変動したことによる。

図-8は東京港の実験における杭の貫入変位をレーザ

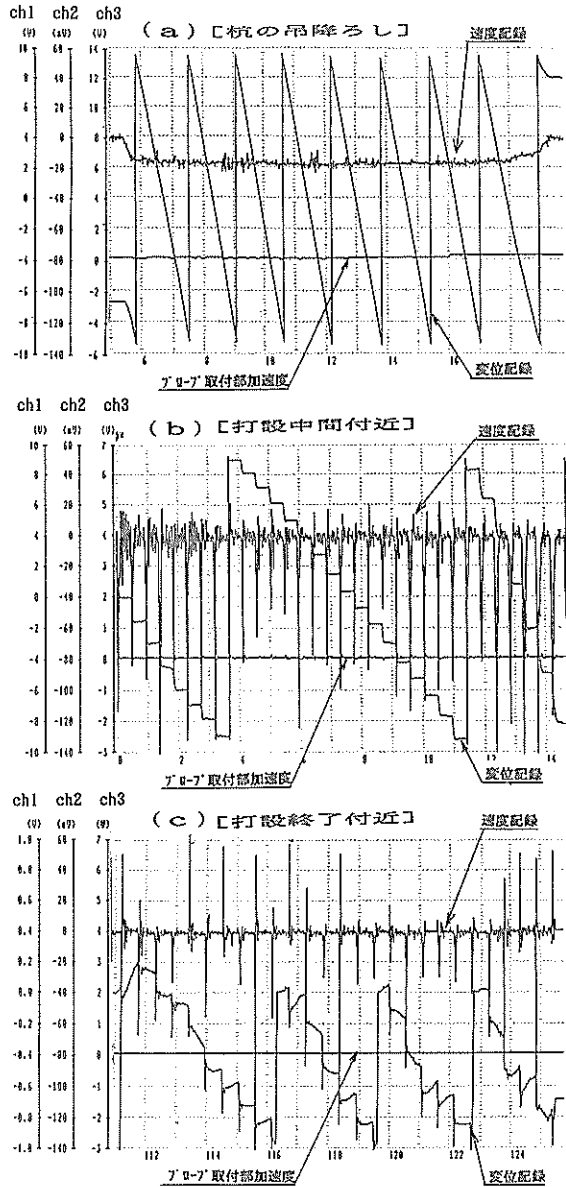


図-7 現地実験測定結果 (横浜港実験)

ドップラ測定器の変位データの貫入量によって求めて示したものである。杭の貫入変位は、上部継ぎ杭(杭長=30.5m)の打ち始めから終了までで示している。図中の最終打ち込み長さの測定結果は、レーザドップラ測定器の測定値と杭に50cm毎にマークされたラインを観測した結果と比較したものである。マークの観測値は、レーザプローブの取付位置から杭のマークに長尺な棒を当て目視観測したものである。レーザドップラ測定器の測定結果は、マーク観測値を少し上回った値であったが、杭の打

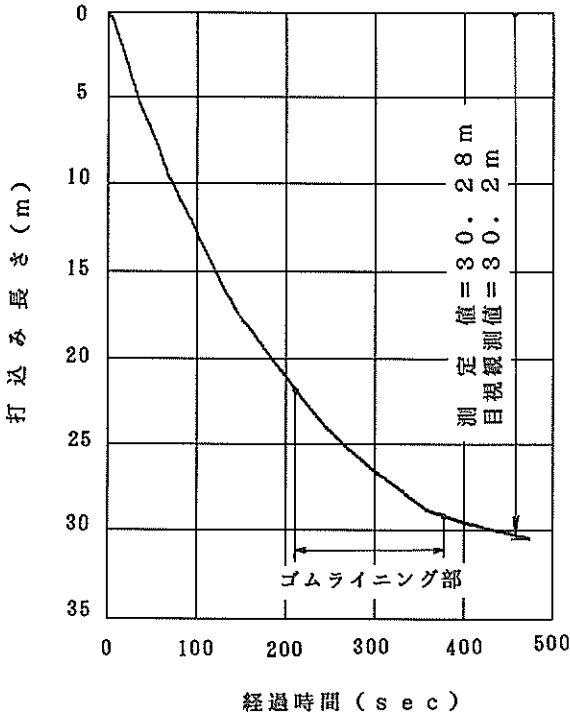


図-8 現地実験測定結果 (東京港実験)

打ち込み長さ約30mに対してほぼ一致している。また、東京港の実験においては、杭打船の船体が比較的小さく大きな船体動揺等があったものの、レーザドップラ測定器の測定距離を大きくしたことによりほぼ欠測はみられなかった。更に、レーザ光の反射特性の悪い杭上端部のゴムライニング部分においても測定が正常に行えている。

5.3 支持層付近におけるリバウンド量測定記録

図-9, 10は、横浜港および東京港の実験の支持層付近のリバウンド量の測定データをサンプリングタイム400 μ secで表したものである。なお、測定データは、データレコーダ収録時にノイズ信号が含まれたため、平滑化点数10点で移動平均処理を行っている。測定された杭の打ち込み挙動は、横浜港の実験においては全体変位12~13mmに対してリバウンド量10mm、貫入量は3mm程度である。一方、東京港の実験においては、全体変位約32mmに対して、リバウンド量20mm、貫入量は12mm程度であった。時系列的にみた打ち込み挙動は、ラム落下後約0.03secで最大変位点に達し、リバウンドした後に小さな再振動を伴いながら0.14~0.15sec後に貫入量を示す状態になる。しかし、その後も0.26sec以後に再び小さな振動が見られることがあり、最終的に安定するのはラムの落下から約0.26sec後になる。この時系列的にみた打

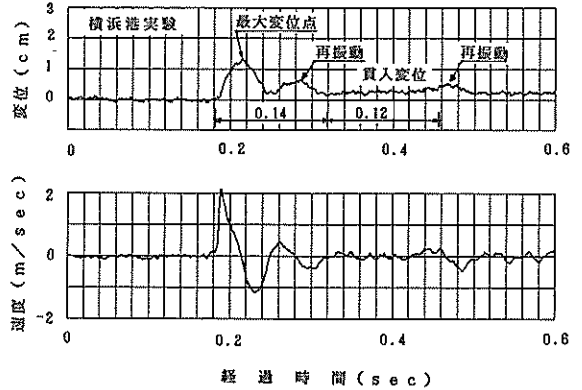


図-9 支持層付近のリバウンド量記録例 (横浜港実験)

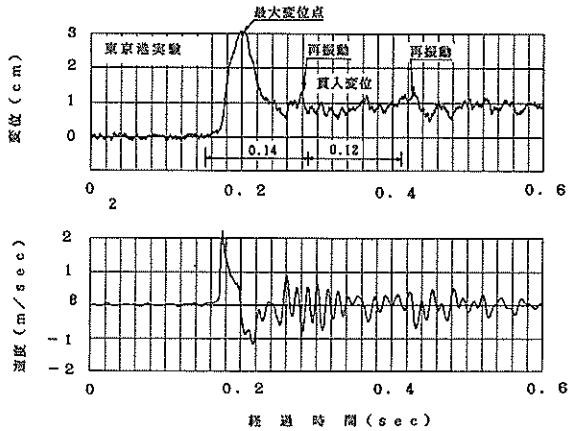


図-10 支持層付近のリバウンド量記録例 (東京港実験)

ち込み挙動は、横浜港と東京港の実験では貫入量、リバウンド量が2~3倍異なるものの、ほとんど同様なものであった。

一方、打ち込み時の最大速度は、横浜港および東京港の実験ともに平滑化点数10点では約2m/sec程度であるが、平滑化を行わない場合は約2.8m/secに達している。また、東京港の速度データでは、貫入後においても比較的大きな振動が続いている。

6. 杭打施工管理システムの開発

6.1 施工管理システムの内容

現地実験等の結果から、レーザドップラ測定器を用いることによって非接触状態で杭の打ち始めから打止まりまでの打ち込み挙動が測定できることが明らかになった。このレーザドップラ測定器により杭打施工管理のシステム化を図ることによって、現行の港湾工事の施工管理基準で定められている次の施工管理データを得ることが

できる。

- (1)打設開始から終了までの全打撃回数の算出および50cm貫入毎の打撃回数の算出
- (2)打設開始から終了に至る全貫入量の算出
- (3)貫入量、リバウンド量およびラムの落下高さを求め杭の動的極限支持力の算出
- (4)(1)~(3)の施工管理記録の帳票出力

上記のシステム化の内容は、現在人力によって行われている杭の打設中の施工管理内容を全て自動化できるものである。

6.2 データ処理の内容

(1) データ処理の基本的な考え方

レーザドップラ測定器を用いた杭打ち施工管理システムのデータ処理の基本的な考え方を図-11に示す。杭の動的支持力算出等のためのデータ処理は、各打撃毎に打撃開始前の変位の0点(=F₀)、最大値(=F_{max})、打撃後の止まりの値(=F_s)を算出する必要がある。すなわち、1打撃毎に変位のこれらの3点を算出し、貫入量、リバウンド量を求める。まず、各打撃の検出は、速度データの立ち上がり判定レベルe=1m/secとして行っている。変位の0点および貫入量の検出点は、速度データの検出点からt₁=0.08sec戻った点、t₂=0.24sec経過した点の平均値として求めている。各々の平均時間は、F₀はa=±0.04sec、F_sはb=±0.12secの区間の平均値として算出している。すなわち、測定精度に影響する貫入量を求める点およびその範囲は、図-9、10の支持層付近のリバウンド量の変位記録に見られる打撃開始から0.14sec経過後の貫入量を示す状態以後の0.24sec間の平均値として求めている。これらの各区間の設定は、2回の現地実験結果を参考に決定したものである。しかし、杭打船の構造および杭打機の型式、また杭の打設位置の地盤によって多少変更することも必要なものとする。また、貫入量を求める点と平均区間の設定は、後述する船体動揺の補正精度にも関係するものである。そのため、今後各種の杭打船、地盤条件のもとで行われる実工事における運用の中で特に見極める必要がある。

一方、打撃回数(n₁, n₂...n_n)の算出は、各打撃の検出点(e=1m/sec)をカウントするものである。また、ラムの落下高さは、この検出点と次の打撃の検出点までの時間間隔を算出し、自然落下の式により算出している。

(2) ラム落下高さの算出

杭の支持力の算出に必要なラムの落下高さの算出は、別途計器を用いて測定することが最も確実なものとなるが、本システムにおいては前述の図-11に示した速度の

立ち上がり信号を利用して打撃時間間隔を求めて行っている。図-12は歪ゲージを杭に貼付し杭の打撃応力を測定した記録で、この測定結果からハンマーの打撃間隔を求めたものである。図の打撃間隔の平均値は約1.446msecであり、ラムの落下、飛上り過程を自由落下の方程式により落下高さを計算すると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{ラム落下高さ} &= \frac{1}{2}gt^2 \\ &= \frac{1}{2}980\text{cm}/\text{sec}^2 \times (1.446/2\text{sec})^2 \\ &\approx 256\text{cm} \end{aligned}$$

上記の計算結果は、施工管理データの目視記録の230cmに対して約10%上回った値であった。ハンマーのラムの飛び上がり、落下過程は、必ずしも燃料ガスの圧縮、シリンダー摩擦等により減速されてるため、自由落下状態とならないが、それ程大きく異なる要素はない。したがって、ラムの落下高さは、打撃間隔から自由落下の計算値に90%の値を乗じて算出するものとした。この目視

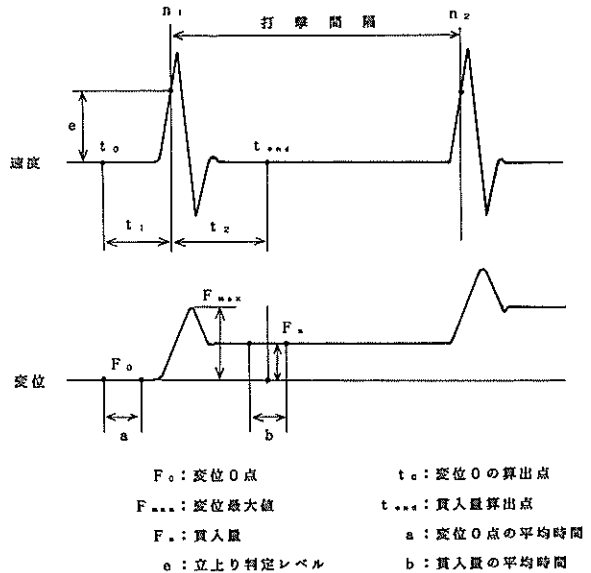


図-11 データ処理の基本的な考え方

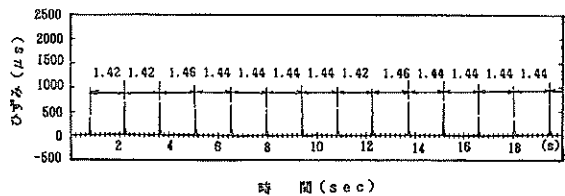


図-12 打撃間隔の測定記録例

観測値との差90%の値については、各杭打船のディーゼルハンマーの構造は基本的に同じであるため、この値が適用できるものとする。しかし、今回の実験のラム落下高さの測定値が目視による観測値であったこともあり、今後各杭打船毎に詳細な調査等を行い確認する必要がある。

(3) 船体動揺の補正

船体動揺に伴うプローブ取付位置の上下変動（変位の0点変動）は、横浜港の実験においては最大約10mm/sec、東京港の実験においては比較的小さな杭打船であったこともあり30mm/sec程度の変動速度になることがある。したがって、次の打撃までの1.3~1.5sec間で約4~4.5cmプローブの設置点が上下動することになる。この船体動揺に伴う変位の測定誤差は、1打撃毎の貫入量が数mmに対して相当大きな量であり、その補正を必要とする。杭打船上から杭の打ち込み挙動を測定する場合の船体動揺に伴う変位データの補正は、測定された速度および変位データを用いて行うことができる。その補正方法には、以下の3つの方法がある。

- ①変位データの打撃開始前の船体動揺量の勾配、もしくは打設終了後との平均勾配により、打撃中の変位データの動揺成分を補正する方法。
- ②船体動揺に相当する低速度成分をカットした速度データを積分して変位データを算出する方法。
- ③打撃開始前、終了後の速度データを直線近似による台形積分により船体動揺成分を求め、変位データを補正する方法。

①の補正方法は比較的簡単補正手法であるが、単一勾配の直線補正となるため、曲線的な船体動揺に対して補正精度が低下することがある。また、②の方法は、杭の打ち込み速度が最大で約300cm/secに達するのに対して、船体動揺の上下動は最大でも3cm/sec程度と1%以下のため、低速度の速度データをカット(=0m/sec)して積分するものである。この方法は船体動揺は基本的に無くすることができるが、リバウンド量の測定データの一部もカットすることになり、船体動揺が大きくなるにしたがって精度が低下する。そのため、本データ処理においては、③に示した方法により行っている。すなわち、図-13に示すように各打撃の開始前と終了後の速度データの値を直線で近似し、それを台形積分して変位データの動揺成分を補正するものである。この補正は2次曲線となるため、船体動揺に対して比較的スムーズな補正が行える。また、この補正手法を用いたのは、船体の上下動の最大値とリバウンド量の最大値の比が1%程度に対

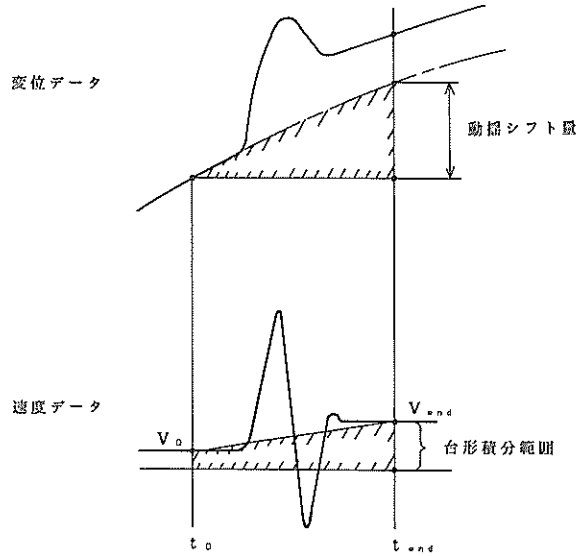


図-13 速度データによる船体動揺の補正方法

して、レーザドップラ測定器の速度測定精度が0.2%であり、十分船体動揺を検出できることによる。

図-14, 15は、東京港における打設停止時に得られた比較的大きな船体動揺に対して、図-13に示した補正手法によってシミュレーション計算したものである。図には船体動揺の変位の測定データと速度データを用いてシミュレーション計算した曲線を0線を中心にプラス側マイナス側に同じ量ずらして作図している。シミュレーション計算は、約8sec間の動揺データを図-9に示したデータ処理間隔($t_1+t_2=0.32\text{sec}$)毎のスタート点と終了点の速度データを直線近似して台形積分を行い、同一区間の変位データのスタート点の変位を基点として作図している。したがって、補正誤差は各区間のスタート点では一致する。スタート点以後の誤差は本手法の補正精度を表している。この手法の補正結果は、図-14の比較的小さくスムーズな船体動揺に対しては±0.5mm以内の補正精度となっている。しかし、動揺量が大きく補正処理区間内においても変動的な動揺が見られる図-15の場合は、±1.0mm程度になり精度が低下することがある。

図-16は、東京港における支持層付近の船体動揺の見られるリバウンド量の測定記録を示したものである。すなわち、リバウンド量は船体動揺の最大振幅10cm程度の中で記録されている。図-17は、本補正手法により図-16に示した船体動揺を補正した結果(図-16, 17の①②・⑤は同一記録を示す)を示したものである。補正の効果は、船体動揺によるシフトが多少残るケースもあるが、補正後は変位の0線と平行になりほぼ船体動揺は取り除かれ

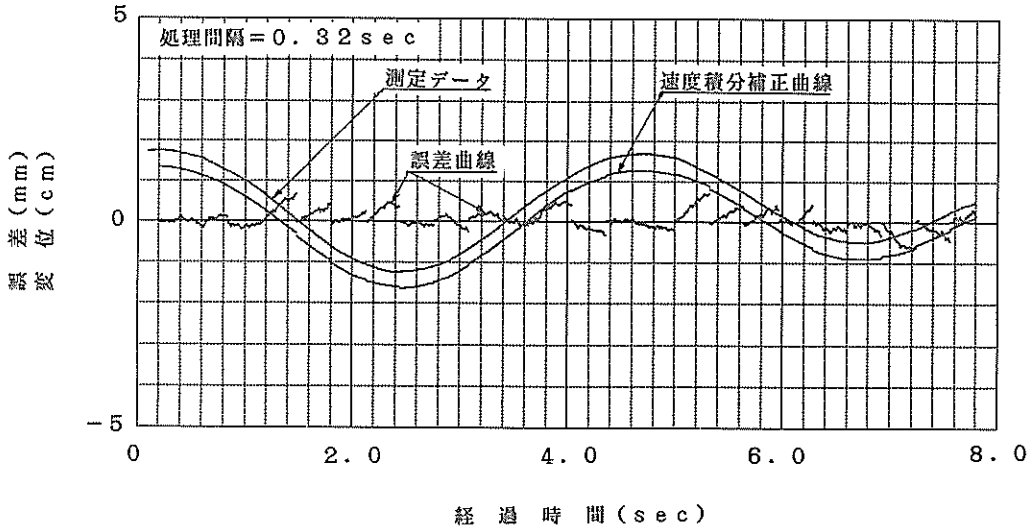


図-14 船体動揺補正シミュレーション計算

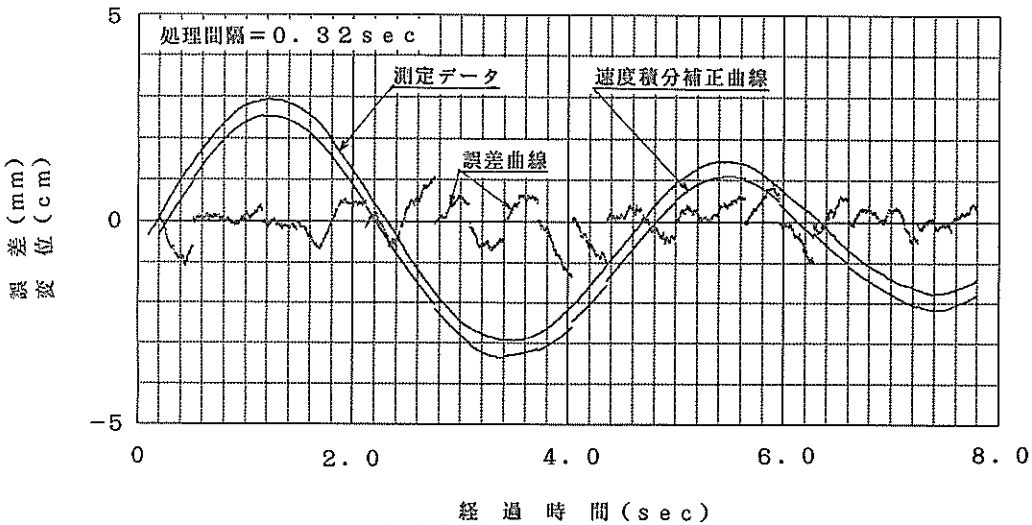


図-15 船体動揺補正シミュレーション計算

ている。図中の貫入量を示す直線は、補正後の貫入量の算出値を示したもので、直線の長さは算出範囲を示している。

6.3 施工管理データ処理プログラム

図-18に本データ処理プログラムのフロー図を示す。データ処理プログラムは、施工内容、ラム重量等が初期設定された後に、図-11のデータ処理方法に従って打撃回数および杭の動的極限支持力等が連続して処理される。処理されたデータは、パーソナルコンピュータのCRT上に表示され、更に施工管理帳票の出力に必要なデータはコンピュータのメモリー内に取り込まれる。なお、本デー

タ処理プログラムにおいては、杭の動的極限支持力が杭の打設開始より終了まで全て算出処理されている。杭の動的極限支持力は打設の間では必要としないものの、打止まり付近でその要否判定の操作を行うと現場での作業が煩雑になる。しかし、支持層付近の打止まりにおいては、杭の動的極限支持力の算出の平均回数の設定および打撃回数の50cm毎の算出が10cm毎になることもあり、今後検討を必要とする。また、本プログラム処理では、打込み途中の50cmの毎の打撃回数の算出のため、打込み開始時の杭高さ（基準面から高さ）を陸上からのトランシット等により測定して入力する必要がある。しかし、この打ち込み開始時の杭長の入力は、煩雑な杭打作業中

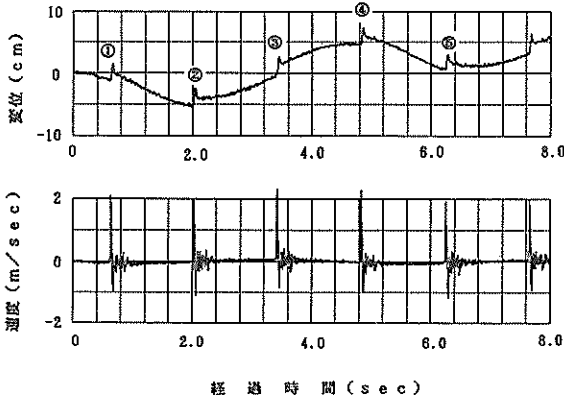


図-16 リバウンド量測定時の船体動揺

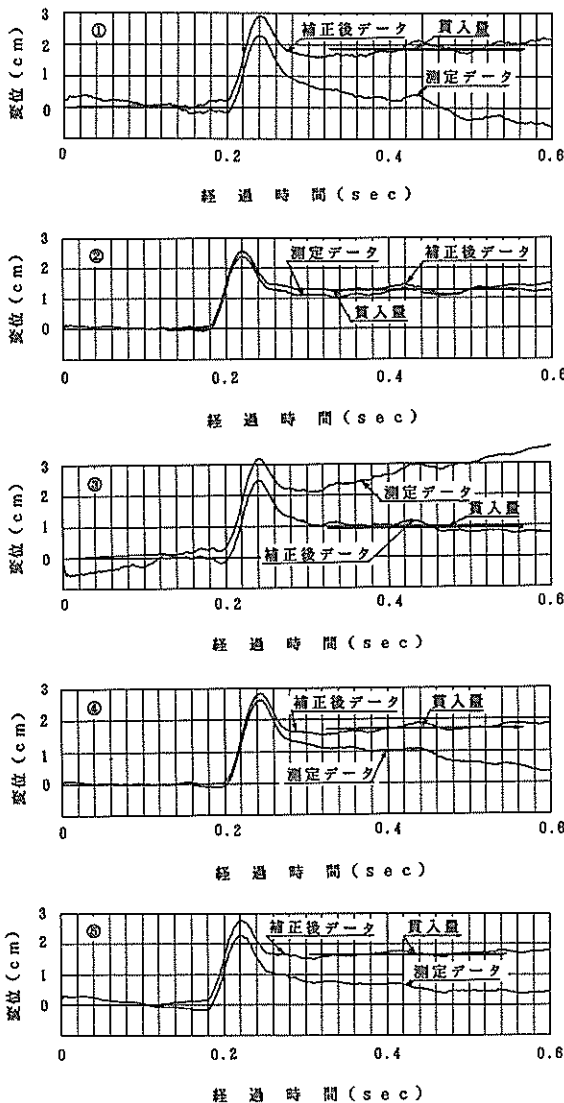


図-17 船体動揺補正結果

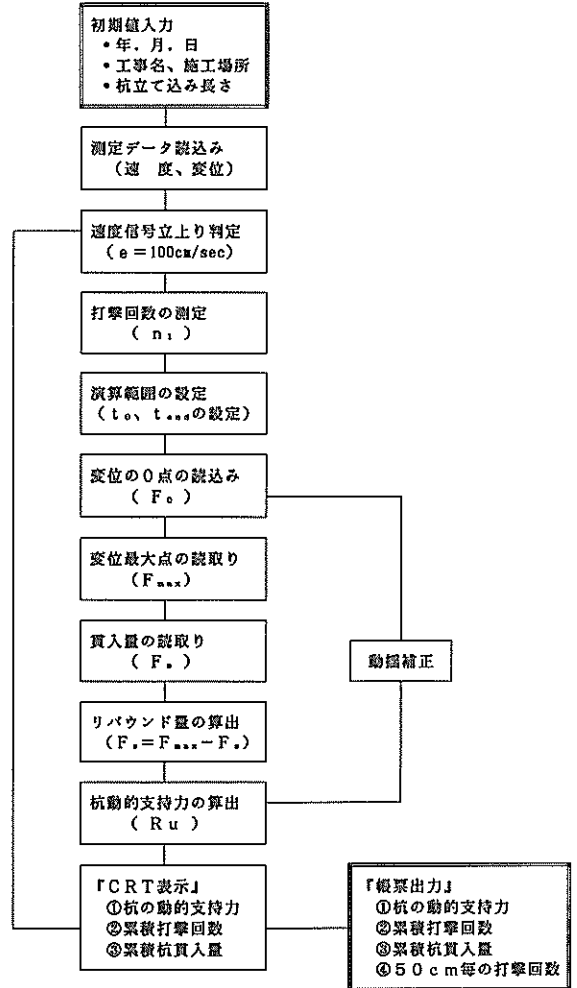


図-18 データ処理プログラムフロー

に行うことになるため、打設終了後に計測される杭天端高さから逆算して求めることも必要になるものとする。

本プログラムによるデータ処理のCRT画面での表示および施工管理帳票出力結果を表-3、4に示す。

6.4 システム機器構成

レーザドップラ測定器を用いた杭打施工管理システムの機器構成を図-19に示す。システム全体は、レーザドップラ測定器とパーソナルコンピュータと付属機器としてのレーザプローブの取付用のオートステージによって構成されている。データ処理パーソナルコンピュータは、NEC(株)PC-9801FAクラスを対象としている。データ処理は、このクラスのパーソナルコンピュータを用い、機械言語のプログラムによって各打撃毎の動的支持力等がリアルタイムで算出、表示することが可能である。

表-3 データ処理中のCRT表示内容

杭番号 : PC-98XL		測定結果表示				91/04/10	10:41
打撃NO.	打撃間隔(sec)	累積貫入量(ram)	貫入高さ(m)	貫入量(cm)	累積打撃回数	リバウンド量(cm)	支持力(t)
21	1.3	1.575	4.3	0.49	201		
22	1.2	1.528	3.8	0.38	218		
23	1.3	1.563	4.0	0.42	214		
24	1.3	1.573	3.9	0.50	219		
25	1.3	1.558	3.5	0.47	240		
26	1.3	1.565	3.3	0.63	252		
27	1.3	1.561	4.6	0.00	194		
28	1.6	2.022	4.8	0.52	232		
29	1.3	1.563	4.8	0.40	180		
30	1.3	1.558	3.9	0.46	216		
31	1.3	1.575	4.3	0.49	201		
32	1.2	1.528	3.8	0.38	218		
33	1.3	1.563	4.0	0.42	214		
34	1.3	1.573	3.9	0.50	219		
35	1.3	1.558	3.5	0.47	240		
36	1.3	1.565	3.3	0.63	252		
37	1.3	1.561	4.6	0.00	194		

表-4 データ処理後の施工管理データ出力内容

杭打ち管理プログラム							測定者 港湾技研						
運輸省港湾技術研究所							杭打込み測定結果						
PC-98XL							杭外径 1,000 mm						
A44-08-19B							ラム重 7.2 ton						
91/04/10 10:30:34							91/04/10 10:31:24						
貫入量 [m]	0.5m毎の打撃回数 [回]	累積打撃回数 [回]	平均貫入量 [cm]	平均ラム重 [cm]	平均落下高さ [m]	平均支持力 [t]	貫入量 [m]	0.5m毎の打撃回数 [回]	累積打撃回数 [回]	平均貫入量 [cm]	平均ラム重 [cm]	平均落下高さ [m]	平均支持力 [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							

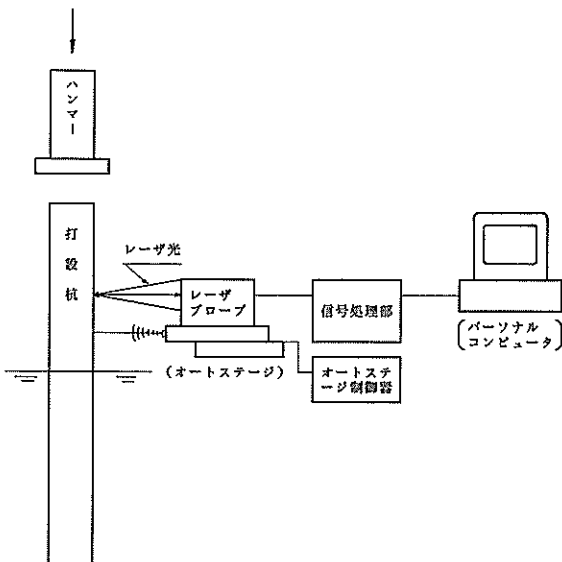


図-19 システムの機器構成

港の現地実験の測定性能に相当する。

「レーザドップラ測定器の測定性能」

- ・使用レーザ : 半導体レーザ, 波長=750nm, 出力=20mW
- ・レーザ交差角: 約2度
- ・測定範囲 : 速度測定範囲=-60~+180m/min
変位測定範囲=-1~+1mの繰り返し出力
- ・測定距離 : プロープ先端から900±50mm
- ・変位表示 : デジタル, 5桁
- ・出力 : アナログ出力=±1000mm/±10V
- ・速度表示 : デジタル, 5桁
- ・出力 : アナログ出力=±200m/min/±10V
- ・測定精度 : ±0.2%FS

また、レーザプローブを取付けるオートステージは、プローブと杭の距離変動の大きい場合の欠測を防止のためのものである。その機能として、超音波センサーによってプローブと杭の距離を検出し、レーザドップラ測定器の測定距離(プローブ先端から900±50mm)以内にプローブを絶えず保持するものである。特に、パイルキー

以下に本開発によって明らかになったレーザドップラ測定器の基本的な性能を示す。これらの性能は、模型実験と2回の現地実験を通じて確立を図った結果で、東京

バを取り外した後の船体動揺が大きい場合に有効なものとなる。しかし、プローブの設置を杭リーダ部のセンター等に設けられる場合、プローブと杭の距離変動はおおむね±50mm以内にあり、このオートステージは必ずしも必要としないものとする。

7. あとがき

本開発においては、現在人力によってほとんど行われている杭打工事の施工管理の作業の安全化、省力化を図るためリバウンド量の測定技術を中心としたシステム開発に取り組んだ。システムの開発は、主に実杭打工事の現地実験等を通じてシステムの基本的な機器構成、測定性能、またデータ処理方法等について明らかにした。

開発した施工管理システムは、主にレーザドップラ測定器とパーソナルコンピュータから構成され、杭のリバウンド量の測定はこのレーザドップラ測定器によって杭表面にレーザ光を直接照射して非接触状態で測定される。測定されたデータは、パーソナルコンピュータによって処理され、杭打工事の施工管理に必要な杭の動的極限支持力、全打撃回数等がリアルタイムに算出される。また、船体動揺のリバウンド量測定値に対する補正も高精度に行っている。このシステムによって、これまで人間の直接作業として行われていた杭の打込み開始からの施工管理が全て自動化できた。

杭打工事の施工管理の自動化等の要請は、作業の安全

性および省力化の観点から従来より現場担当者から強く求められていたもので、その要請に対して開発したシステムは基本的に応えることができたものとする。また、従来の人力による杭打施工管理がシステム化されることによって、高質な施工管理データが提供できることも期待するものである。

なお、今回の開発によって明らかになった杭打施工管理システムは、第五港湾建設局において平成4年度よりプロトタイプの開発が予定されており、実用化が図られる。

最後に、本システム開発にあたり2回の現地実験に際し御協力をいただいた第二港湾建設局京浜港工事事務所、東京都東京港建設事務所および杭打工事を行った東亜建設工業(株)、東洋建設(株)の関係者、更に本システムの開発に適切な助言をいただいた土質部基礎工高橋室長に深甚なる敬意を表す。
(1992年6月30日受付)

参考文献

- 1) 二宮康治：加速度計による打ち込み杭の貫入変位計測システム(その1)、日本国土開発技術研究報告、No8, 1988, pp. 55-64
- 2) 城原修、田中潔：杭リバウンド量計測装置の開発、五洋建設技術研究年報、Vol19, 1990, pp. 89-94
- 3) 港湾工事共通仕様書、運輸省港湾局編集、1991.3, pp. 224-225