

# 港 湾 技 研 資 料

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

No. 277    Sept. 1977

海中における鋼管矢板打込み時の振動測定

上	部	達	生
野	田	節	男
千	葉	忠	樹

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	3
2. 振動測定の概要 .....	4
2.1 測定地点 .....	4
2.2 測定計器 .....	4
2.3 測定方法 .....	5
3. 測定結果 .....	6
4. 測定結果の解析 .....	9
5. 養生中のコンクリートに及ぼす杭打ち振動の影響 .....	19
6. 結 論 .....	20
謝 辞 .....	21
参考文献 .....	21
記号表 .....	21

## Measurement of Vibration Due to Pile Driving at Sea

Tatsuo UWABE\*

Setsuo NODA\*\*

Tadaki CHIBA\*

### Synopsis

In case of that concrete placing is carried out simultaneously with pile driving at the same site, a concrete under curing is affected by shaking due to pile driving, and the effects of the vibration on a concrete strength become a subject of discussion. In order to study on this problem, it is necessary to know dynamic characteristics of a batter pile anchorage which supports forms of a coping concrete. In this purpose, the vibration due to pile driving is measured at a construction site of a quaywall in Chiba port. Main subject of this report is an analysis of the vibration induced by pile driving. Furthermore the effects of the vibration on the strength of the concrete is discussed based on related papers about strength of concrete vibrated under curing. The followings are made clear.

- i) A vertical component of the vibration due to pile driving is smaller than a horizontal component of that. And the horizontal component in parallel to a transmission direction is greater than that in orthogonal direction.
- ii) A predominant wave frequency of the horizontal component in parallel is 9 Hz, and that of the vertical component is almost the same as that of the horizontal component.
- iii) The maximum velocity decreases according to increase of the distance between a driving spot and a batter pile anchorage, especially it is remarkable within 50 meter's distance.
- iv) If an execution of a vertical construction joint is controlled carefully, and if forms and steel bars are fixed firmly on the batter pile anchorage in order that a concrete and a steel bar vibrate in a body, it is supposed that the vibration under curing has little influence upon the strength of the concrete.

---

\* Member of the Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structures Division

\*\* Chief of the Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structures Division

正 誤 表

頁	欄	行	誤	正
11	左	上から 14	……レーレー波……	……レーリー波……
12	右	上から 7	……支持層上到達する……	……支持層に到達する……
15	左	上から 16	……レーレー波……	……レーリー波……

# 海中における鋼管矢板打込み時の振動測定

上 部 達 生 \*  
野 田 節 男 \*\*  
千 葉 忠 樹 \*

## 要 旨

前面鋼管矢板の打込み作業と控えの上部工のコンクリート打設作業を並行して実施する場合には、コンクリートは養生中に杭の打込みによる振動を受けることになり、硬化後のコンクリートの各種強度に与える影響が問題となる。本報告はこの観点から杭の打込みによる振動を検討している。検討に際して、まず控えの上部工のコンクリートの型わくを支えている控え杭の振動性状を把握する必要がある。この目的で、第二港湾建設局千葉港工事事務所の鋼管矢板式岸壁の建設現場で前面鋼管矢板の打込みによる振動の測定を実施した。今回の報告はまず、杭の打込みによる振動の実測例を作るという目的をもっており、この振動測定の結果とその解析に主眼がおかれている。さらにこの振動測定の解析結果と養生中に振動を受けるコンクリートに関する過去の研究成果をふまえて、養生中に杭の打込みによる振動を受けたコンクリートの各種強度に与える振動の影響について検討を実施した。以下に明らかになった事項を列記する。

- i) 前面鋼管矢板の打込みによる控え杭の振動は上下方向の振動よりも水平方向の振動の方が大きい。また、打込み杭と測定している控え杭とを結ぶ方向に平行な方向の水平動成分の方がそれに直角な方向の水平動成分よりも大きい。
- ii) 打込み杭と測定している控え杭とを結ぶ方向に平行な水平動成分の速度波形は 9 Hz の振動数が卓越しており、上下動成分の速度波形の卓越振動数は水平動成分のそれとほぼ等しいかやや高くなっている。
- iii) 杭の打込みによる控え杭の振動速度は打込み杭との間の距離の増加とともに減衰しており、とくにこの距離が 50m 付近までの減少の割合が著しい。
- iv) 鉛直打継目を入念に処理し、型わくと鉄筋は既設部材、控え杭に剛結などして鉄筋とコンクリートが一体となって振動するように配慮し、かつ杭の打込み地点から 20m ほど離せば、前面鋼管矢板の打込みによる振動を養生中に受けても控え上部工のコンクリートの各種強度の低下はほとんどないものと考えられる。

## 1. はじめに

建設現場近くでは杭、矢板等の打込み時における騒音、地盤震動が公害として問題となることがままあるが、他方この杭の打込みによる振動等が危険物を内包した構造物（石油タンク等）に与える影響、他の建設工事に与える影響等が問題となる場合もある。杭の打込みによる振動が他の建設工事に与える影響としては、次のような例があげられる。コンクリートの打設作業と杭の打込み作業を並行して実施した場合に、コンクリートは養生中に杭の打込みによる振動を受けることになるが、こうした振動がコンクリートの各種最終強度を低下させることが懸念される。杭の打込みによる振動がコンクリート強度に及ぼす影響をやみくもに避けようとするれば、杭打ち作業をいたずらに遅らせることになるので、建設作業の能率の向上という点からみると、どの程度遅らせればよいのかメドが欲しいということになる。この現場の技術者の要請にこたえるべく、杭の打込み中における一連の振動現象を検討しようとするのが本報告である。

本報告のこうした問題意識は具体的には、第二港湾建設局千葉港工事事務所の鋼管矢板式岸壁の建設工事に際して提起されたものであり、くわしくは次に述べるとおりである。控えの上部工にコンクリートを打設すると同時にその近くで前面鋼管矢板の打込み作業を実施すれば建設作業の能率は向上するが、一方、コンクリートは養生中に杭の打込みによる振動を受けることになり、この振動が控えの上部工コンクリートの硬化後の各種強度に一体どのような影響を与えるのかという点が問題となる。この問題を検討するに際しては、まず打設しようとするコンクリートの型わくを支えている控え杭が前面鋼管矢板の打込みによってどのような振動を起こすのかという点を把握することが必要である。我々の手もとには杭を打込む際に近くの既設杭がどのように振動するかということに関する実測データがないので、千葉港工事事務所の鋼管矢板式岸壁の建設現場において、鋼管矢板を打込む時に既設控え杭の振動を測定して、その振動性状を把握しようとするのが本報告の主眼とするところである。したがって、現場技術者の要請に完

\* 構造部 地震防災研究室

\*\* 構造部 地震防災研究室長

全にこたえるためには、杭の打込み時の振動が硬化中のコンクリートにどのような影響を与えるかに関して別途の研究が必要であるが、ここではとりあえず養生中に振動を受けるコンクリートに関する過去の研究成果を参照して一応の検討を実施している。今後この分野における研究がまたれる次第である。

ここで解析した結果は、今回の問題に限らず今後の建設工事における建設機械等による振動が問題となった場合に、一つの振動測定データのデータを与えるものとしても利用価値があるものと思われる。

## 2. 振動測定の概要

### 2.1 測定地点

振動測定実施地点は千葉港船橋・市川地区の船橋中央埠頭の1号岸壁建設地点である。図-1には千葉港船橋・市川地区の概略図を測定地点とともに示す。1号岸壁は延長185m、前面水深-10.2mの鋼管矢板式岸壁で図-2にその標準断面図を示す。前面は鋼管矢板STK50で $\phi = 71.1.2\text{mm}$ 、 $t_0 = 1.2.7\text{mm}$ 、 $l = 2.6.0\text{m}$ 、控えは鋼管STK41で $\phi = 5.0.8\text{mm}$ 、 $t_0 = 9.5\text{mm}$ 、 $l = 2.9.3\text{m}$ の引抜杭と鋼管ST

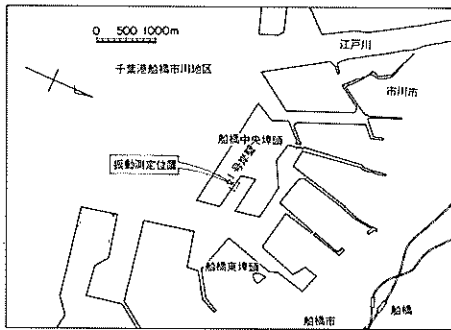


図-1 杭打ちによる振動測定地点位置図

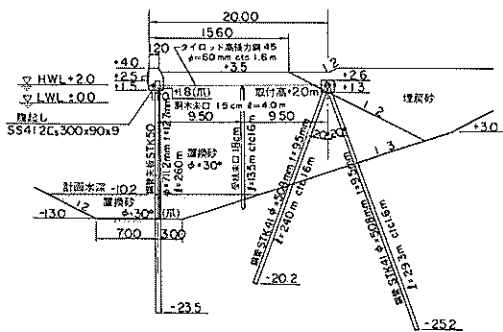


図-2 1号岸壁標準断面図

K41、 $\phi = 508\text{mm}$ 、 $t_0 = 9.5\text{mm}$ 、 $l = 24\text{m}$ の押込杭の組杭構造である。振動測定地点にもっとも近いと思われる地点の土質柱状図を図-3に示す。この位置は1号岸

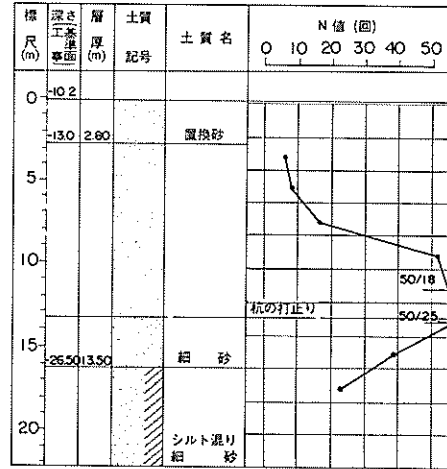


図-3 土質柱状図

壁のほぼ中間にあたる。海底面から2.8mまでは置換砂でその下の細砂層は洪積層の成田層で海底面下11m付近でN値50以上となっている。杭はこの細砂層の海底面下13mの位置まで打込まれる。

### 2.2 測定計器

今回の振動測定には港湾技術研究所耐震構造研究室所有の常時微動観測システムをそのまま利用した。図-4にその観測システムの測定器の構成を示す。振動を電流に変換

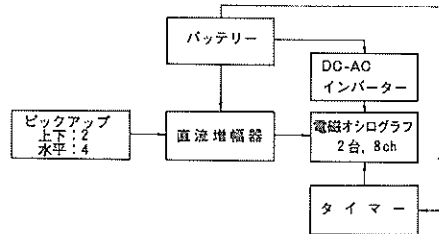


図-4 測定器構成図

するピックアップと増幅器と記録器および電源からなっている。ピックアップは振動の水平成分測定用が4台、上下成分測定用が2台である。今回の測定では記録器としてポータブルな電磁オシログラフを2台用いた。この2台の電磁オシログラフは1つのスイッチで同時に始動できるようになっている。個々の測定器の性能諸元を表-1に示す。図-5には測定器の総合感度を示す。予想される杭打ち時の振動の卓越振動数は10Hz前後と推定されるので、今回の測定器で特に問題はないものと思われる。

表-1 測定器の性能・仕様

性能・仕様	
ピックアップ	型式 可動線輪型 MTKH-1C, MTKV-1C 固有振動数 1 Hz 減衰定数 1.0 出力 速度に比例 ( 振動技研製 )
増幅器	直流増幅器 TA 406 記録倍率 $\times 1 \sim \times 200$ ( 12段切替 ) 出力 速度、変位 入力インピーダンス 500 k $\Omega$ 出力 # 85 $\Omega$ ( 振動技研製 )
電磁オン ログラフ	ポータブル電磁オンログラフ PR101型 エレメント数 6 光学系長 10 cm 光源 タングステンランプ 紙送り速度 10 cm/sec max. タイミング 0.1 sec ( 三菱測器製 )
	ガルバノメーター G-300 A型 周波数範囲 0 ~ 200 Hz 感度 10 mm/mA コイル低抗 約 20 $\Omega$ 制動抵抗 約 25 $\Omega$
DC-AC インバー ター	1G-100-0.5B型 入力電圧 DC 12V ( 6 A ) 出力 # 100V方形波 効率 50Hz $\pm 1\%$ 以内 70%以上 ( 三菱測器製 )

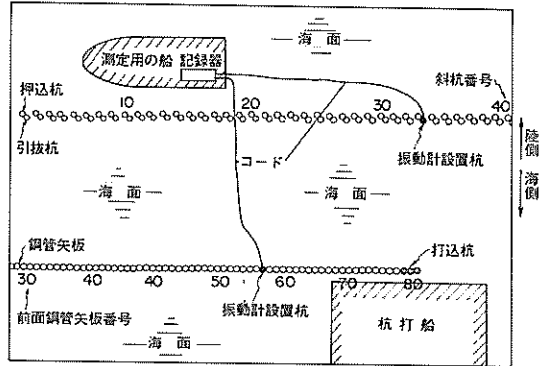


図-6 測定状況概略図



写真-1 測定現場

方からみたものである。写真の右側の杭が控えの斜組杭で、左側の杭が前面鋼管矢板である。右手奥に見えているのは、既に完成している2号岸壁である。写真-2は杭打船を正面からみたもので、建込まれた前面鋼管矢板とハンマーが認められる。ハンマーはディーゼルハンマーMB70型でハンマー重量は21tである。写真-3は作業船を杭に横付け

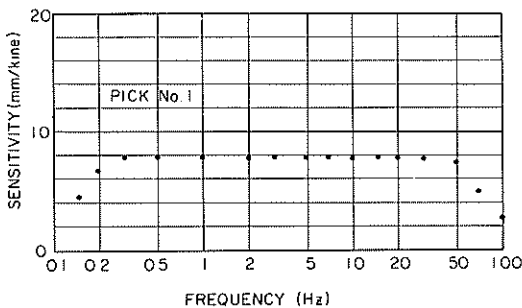


図-5 総合感度

### 2.3 測定方法

測定作業の状況を示す概略図を図-6に示す。測定現場は海上であるため、ピックアップの移動及び設置等の作業は小型の作業船を用いた。作業船を杭に横付けし、杭頭に固定した円形の取付板の上にピックアップを設置し、そこからコードを測定用の船に引込み、記録器に接続し、その船内で振動を記録した。写真-1は現場の状況を杭打船の

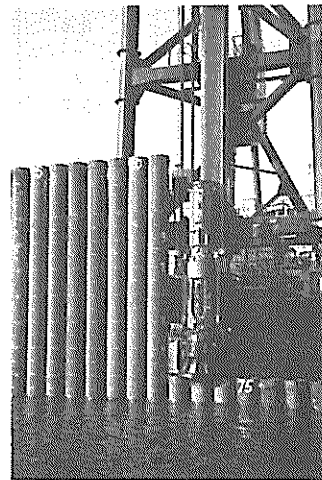


写真-2 杭打船



写真-3 ビックアップの設置作業

し、ビックアップを設置している状況を示す。左側に大きく写っている船が測定用の船である。写真-4はビックアップ設置後の状況を示す。写真に示すようにビックアップ

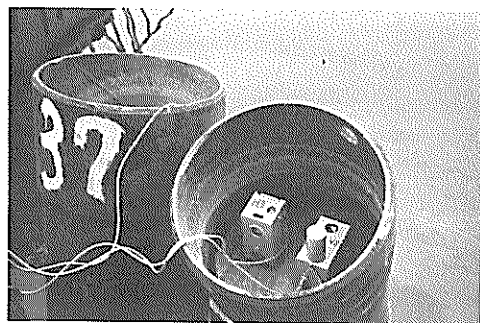


写真-4 ビックアップ

は鋼管杭の中に取り付けた円形の板の上に設置されている。

測定は打込み杭の近くにいる人の合図により、打込み深度が1m増加するごとに数回の打込み回数について記録を実施した。打止り付近では50~10cmごとに記録を行ない、打止り位置ではとくに記録時間を長くした。記録は速度を中心に行ない、いくつかのケースについては打止り位置において変位を記録した。測定は上下動成分と互いに直角な2方向の水平動成分の3成分について実施することが望ましい。しかしながら、今回の測定の場合にはビックアップの数に制限があったため、3成分同時測定は10ケースのうち3ケースだけとなった。水平動成分については振源方向に平行な水平動成分を主に測定を実施した。これは過去の測定結果より水平動2成分のうち振源方向に平行な方向の振動成分の方が振源方向に直角な振動成分よりも大きいことが予想されたからである。上下動成分についてはビックアップの数が水平動成分のビックアップの数よりも2個少ないため、適宜そのケースに応じてどれか2個の水平動成分のビックアップと合わせて同時測定を実施した。斜組杭の押込杭と引抜杭は接合されていたのを切断して測定を実施したが、ケース9、10については押込杭と引抜杭が接合されたままの状態での測定を実施している。

### 3. 測定結果

表-2に測定内容の一覧表を示す。ここでいう1ケースとは、1回の鋼管矢板の打込み開始から終了までの振動測定をいう。今回実施したのは10ケースである。それぞれの

表-2 測定内容一覧表(その1)

CASE No.	打込鋼管矢板番号	測定鋼管杭				
		鋼管杭番号	種類	振動計番号	振動方向	振源距離
1	79, 80, 81	3 4	斜杭、引抜杭	H 1	水平、振源方向平行	19. 10 (m)
		"	"	H 2	" 直角	
		"	"	V 1	上下	"
		5 7	鋼管矢板	H 3	水平、振源方向直角	18. 40
		"	"	H 4	" 平行	"
2	82, 83, 84	"	"	V 2	上下	"
		3 4	斜杭、押込杭	H 1	水平、振源方向直角	19. 10
		"	"	H 2	" 平行	"
		"	"	V 1	上下	"
		5 7	鋼管矢板	H 3	水平、振源方向直角	20. 80
3	85, 86, 87	"	"	H 4	" 平行	"
		"	"	V 2	上下	"
		3 6	斜杭、引抜杭	H 1	水平、振源方向平行	19. 0
		"	"	H 2	" 直角	"
		"	"	V 1	上下	"
"	斜杭、押込杭	H 3	水平、振源方向平行	19. 10		
"	"	H 4	" 直角	"		
"	"	V 2	上下	"		



表-2 測定内容一覧表(その2)

CASE No.	打込鋼管矢板番号	測定鋼管杭				
		鋼管杭番号	種類	振動計番号	振動方向	振源距離
4	88, 89, 90	3 8	斜杭、引抜杭	H 1	水平、振源方向平行	19.0 <sup>(m)</sup>
		#	#	V 1	上下	#
		#	斜杭、押込杭	H 2	水平、振源方向平行	#
		3 7	# 引抜杭	H 3	#	#
		#	#	V 2	上下	#
5	91, 92, 93	#	# 押込杭	H 4	水平、振源方向平行	#
		4 1	斜杭、引抜杭	H 1	水平、振源方向平行	19.2
		#	#	V 1	上下	#
		3 8	#	H 2	水平、振源方向平行	19.1
		#	#	V 2	上下	#
6	94, 95, 96	3 3	#	H 3	水平、振源方向平行	21.4
		2 8	#	H 4	#	26.0
		4 1	斜杭、押込杭	H 1	水平、振源方向平行	19.0
		#	#	V 1	上下	#
		3 8	#	H 2	水平、振源方向平行	19.6
7	97, 98, 99	#	#	V 2	上下	#
		8 9	鋼管矢板	H 1	水平、振源方向平行	7.2
		#	#	V 1	上下	#
		8 0	#	H 2	水平、振源方向平行	14.4
		#	#	V 2	上下	#
8	140,141,142	7 1	#	H 3	水平、振源方向平行	21.6
		6 2	#	H 4	#	28.8
		7 8	鋼管矢板	H 1	水平、振源方向平行	50.4
		#	#	V 1	上下	#
		6 6	#	H 2	水平、振源方向平行	60.0
9	143,144,145	2 8	#	H 3	#	90.4
		#	#	V 3	上下	#
		1 6	#	H 4	水平、振源方向平行	100.0
		3 4	斜杭、引抜杭	H 1	水平、振源方向平行	53.3
		#	#	V 1	上下	#
10	146,147,148	2 9	#	H 2	水平、振源方向平行	60.8
		1 0	#	H 3	#	90.2
		#	#	V 3	上下	#
		4	#	H 4	水平、振源方向平行	99.6
		3 4	斜杭、押込杭	H 1	水平、振源方向平行	56.0
		#	#	V 1	上下	#
		2 9	#	H 2	水平、振源方向平行	63.6
		1 0	#	H 3	#	93.0
		#	#	V 2	上下	#
		4	#	H 4	水平、振源方向平行	102.4

ケースに応じて、斜組杭(押込杭、引抜杭)あるいは前面鋼管矢板にピックアップを設置した。水平動用のピックアップにはH1~H4、上下動のピックアップにはV1、V2の番号を付け区別した。振動方向で振源方向平行というのはピックアップと打込みをする前面鋼管矢板とを結ぶ線に平行な振動方向をいい、振源方向直角というのはそれに直角な振動方向である。振源距離はピックアップと打込杭と

の直線距離である。この振源距離は19mから100m付近まで変化させた。ケース1は引抜杭と鋼管矢板にそれぞれ水平動用2台、上下動用1台のピックアップを設置したものの、ケース2は押込杭と鋼管矢板にケース1と同じようにピックアップを設置したものである。ケース3は押込杭と引抜杭にそれぞれ3台のピックアップを設置して同時に3方向の振動成分を測定したものである。以上3ケースは

3方向の振動成分についての同時測定である。ケース4は隣りあった斜組杭(押込杭と引抜杭とで1組と考える。)にピックアップを設置して2組の斜組杭の振動を同時測定したものである。ケース5~10は振源距離を種々かえて測定したものである。

図-7は杭打込み記録から杭の打込み深さと杭が50cm

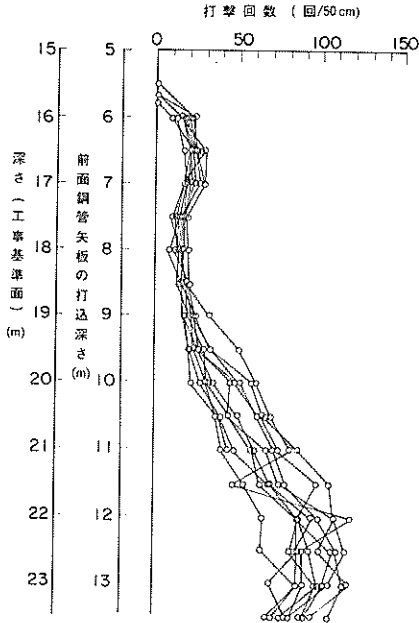


図-7 前面鋼管矢板の打込深さと打撃回数

侵入するのに要した打撃回数を示したものである。打込み深さと打撃回数の関係は各ケースでほぼ同じとなっている。この打込み深さと打撃回数の関係は図-3に示した土質柱状図のN値の深さ方向の分布とほぼ対応しているのがわかる。

測定後、記録波形を読み取った。読取は1回の打撃について記録された波形の振幅の最大値と、最大値を示す波の

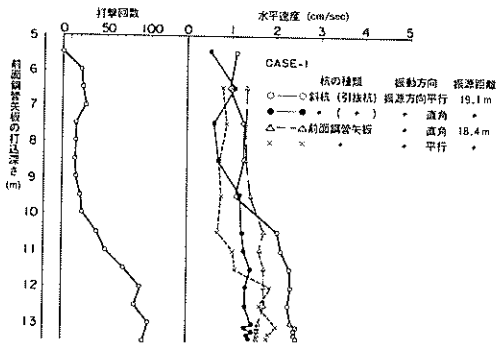


図-8 斜杭、前面鋼管矢板の水平速度と打込深さの関係(CASE 1)

周期について行ない、打込み杭の深度ごとに整理した。図-8~12はケース1から4について読取った水平速度、上下速度と打込み深さとの関係を示したものである。図-13はケース1について周期と打込み深さの関係を示したものである。図-14~18は打止り付近での速度波形を示す。これは記録波形を数値化し、自動化装置によって描かせたものである。図-19、20は打止り付近での変位

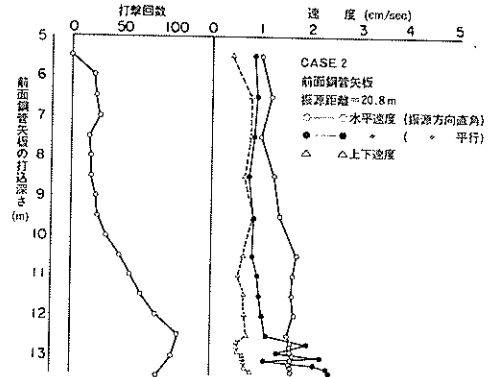


図-9 前面鋼管矢板の水平、上下速度と打込深さの関係(CASE 2)

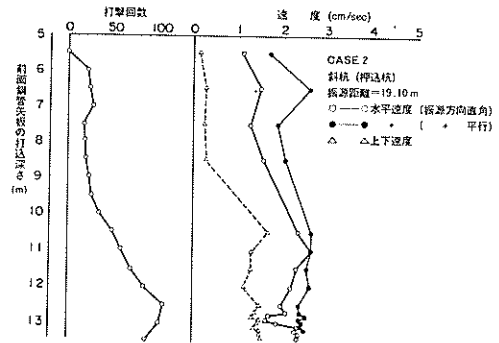


図-10 斜杭の水平、上下速度と打込深さの関係(CASE 2)

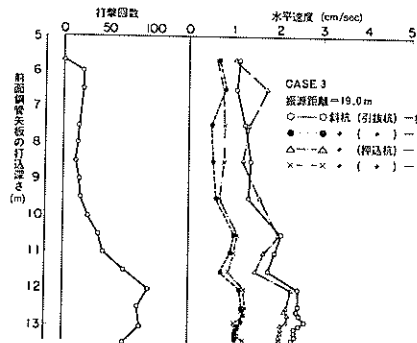


図-11 水平速度と打込深さの関係(CASE 3)

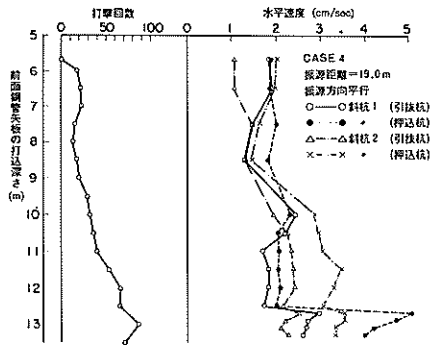


図-12 水平速度と打込深さの関係 (CASE 4)

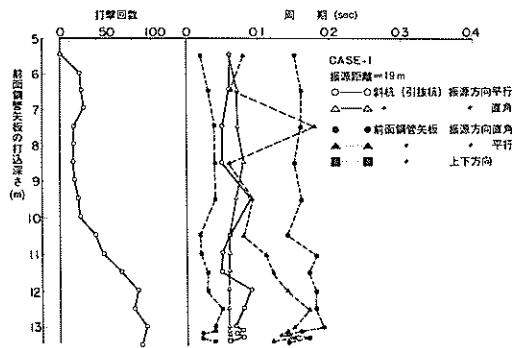


図-13 周期と打込深さの関係

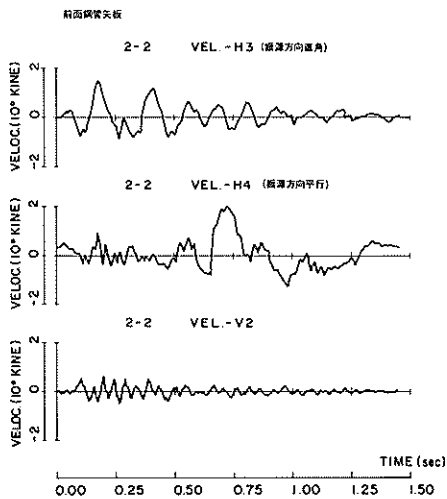


図-14 速度波形 (CASE 2、前面鋼管矢板)

波形を示す。この変位波形はケース 4 について記録したもので、図-18 のケース 4 の速度波形に対応している。

#### 4. 測定結果の解析

杭打込み時に打込み地点からある距離はなれた地点の地

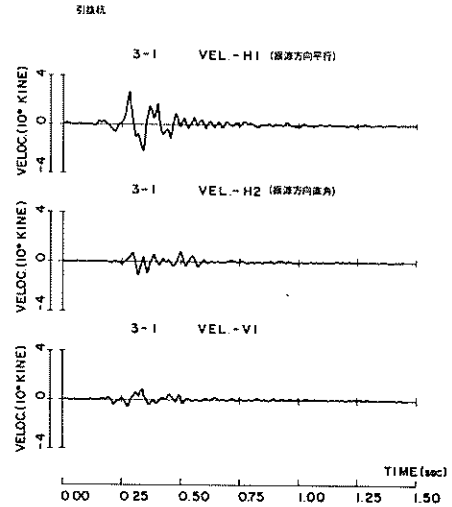


図-15 速度波形 (CASE 3、引抜杭)

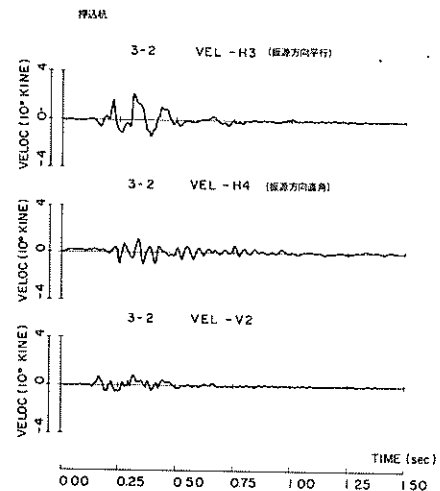


図-16 速度波形 (CASE 3、押込杭)

盤上の振動測定については、過去にいくつかの実施例がある<sup>1-5)</sup>。測定は振動の上下動成分あるいは水平動成分についてなされており、水平動成分についてはさらに振源方向と平行な振動方向と振源方向に直角な方向の 2 成分についてなされるのが一般的である。測定に際しては、地盤の変位あるいは速度が測定されるのが普通であり、加速度を測定するのはまれである。杭打込み時における振動の様子を把握するために、これら振動の変位、速度、加速度と各振動成分について以下に種々の検討をおこなった。

図-21、22 に振源方向に平行な方向と直角な方向のそれぞれの水平速度の比較を示す。ここで水平速度というのは個々の打撃の際に測定された各水平成分の速度波形の振幅の最大値を読取った値である。図-21 はケース 3 の斜

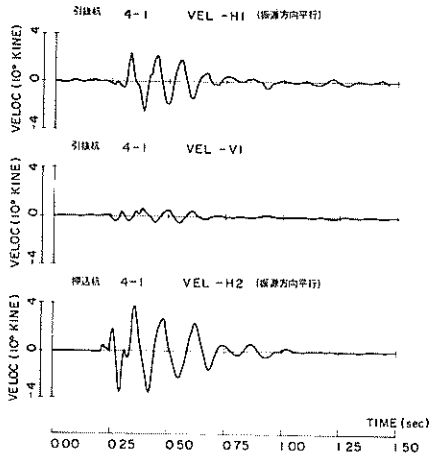


図-17 速度波形(CASE 4、斜杭)

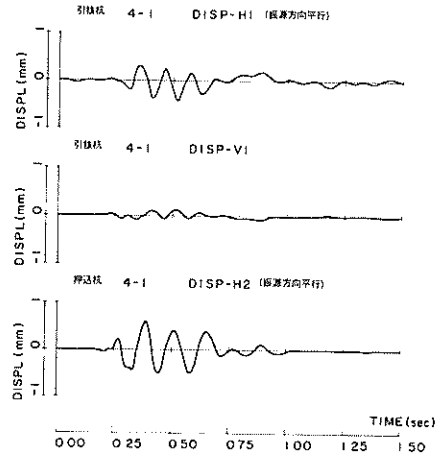


図-19 変位波形(CASE 4、斜杭)

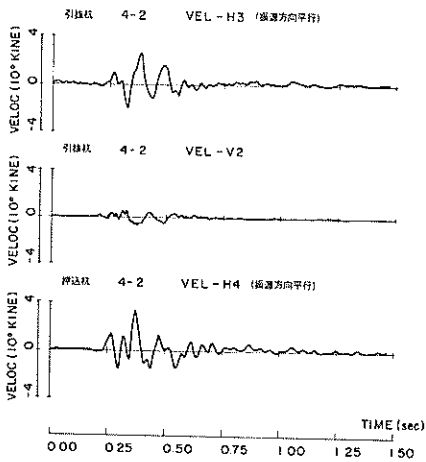


図-18 速度波形(CASE 4、斜杭)

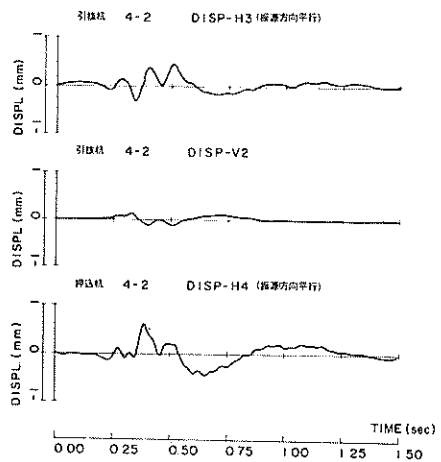


図-20 変位波形(CASE 4、斜杭)

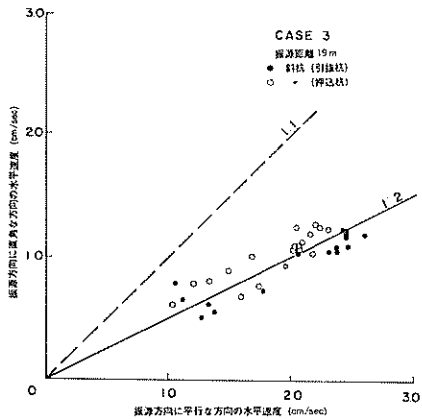


図-21 水平速度と振動方向の関係(斜杭)

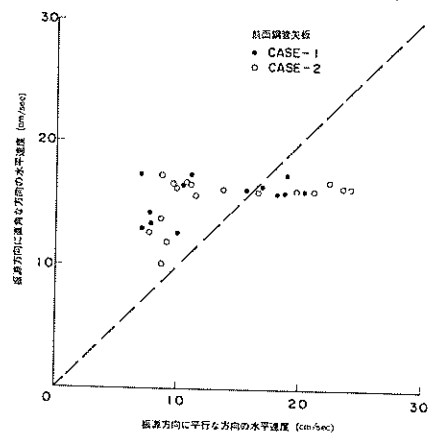


図-22 水平速度と振動方向の関係(前面鋼管矢板)

組杭について押込杭と引抜杭とを区別して示してある。振源距離は19mである。図-22はケース1、2の前面鋼管矢板について示したものである。図-21の斜杭についてみると明らかに振源方向に平行な水平動成分の速度が大きことがわかる。前面鋼管矢板については図-22に示すように振源方向に平行な水平動成分の速度の値のバラツキが大きく、特に一方が大きという関係が認められない。これは、押込杭あるいは引抜杭がそれぞれ独立した1本の杭であるのに対し、前面鋼管矢板の方は腹起しで連結されておりそれぞれの鋼管矢板が制動されるためであるように思われる。また、振源方向に平行な方向(波の進行方向)の水平動成分が大き(図-21参照)のは、杭打込みによる振動の最大振幅を与える波が、SV波あるいはレ-レ-波であるためと考えられる。図-23には周期につ

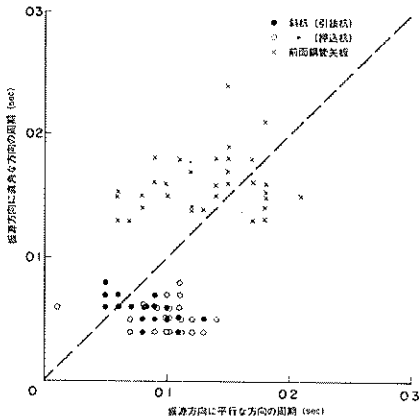


図-23 周期と振動方向の関係

いて振源方向に平行な方向と直角な方向の比較を示したものである。ここでいう周期とは個々の速度記録波形について振幅が最大値を示す波の周期をさす。この図によれば、斜杭についていえば振源方向に平行な方向の周期がやや長いようであり、前面鋼管矢板についていえば、振源方向に直角な方向の周期が長いようである。

図-24に水平最大速度と上下最大速度の関係を示す。ここで水平最大速度というのは各ケースの各打撃ごとに得られた記録の振幅の最大値を讀取って得られた振源方向に平行な水平動成分の速度のうちで最大のものをいう。したがって、最大速度は各ケースで測定した杭について各1個与えられる最大値である。上下最大速度は上下動成分の最大値である。図-24をみればわかるように、一般には上下最大速度は水平最大速度より小さくその値はほぼ2/3以下である。ただし、図にあるように上下最大速度が水平最大速度よりかなり大きい場合もある。ここで示される2例はそれぞれ前面鋼管矢板と引抜杭の場合で、振源距離は短く7.2mと19mである。図-25、26は上下動成分と水平動成

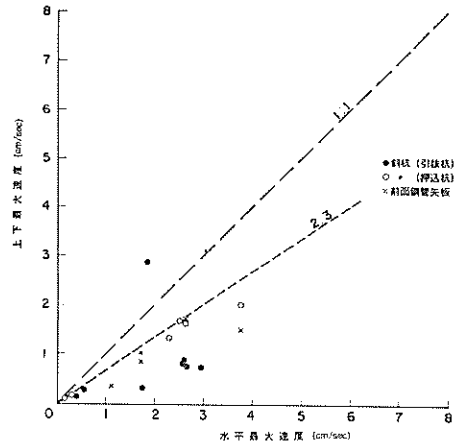


図-24 水平最大速度と上下最大速度

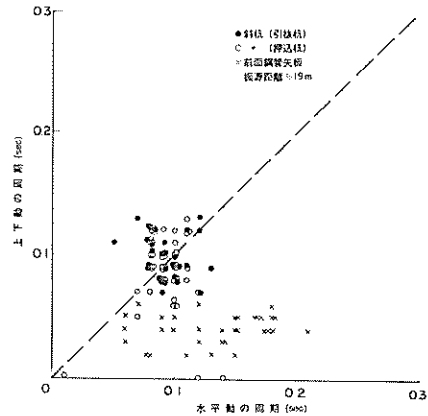


図-25 上下動と水平動の周期の比較(その1)

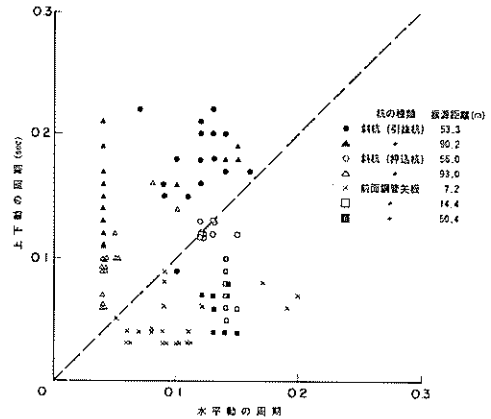


図-26 上下動と水平動の周期の比較(その2)

分の周期の比較を示す。水平動成分は振源方向に平行な振動方向である。斜杭と前面鋼管矢板を区別して示してある。図-25は振源距離がほぼ19mのもの、図-26はそれ以外の振源距離のものである。前面鋼管矢板についてみると水平動成分の周期の方が上下動成分の周期よりも大きいようである。斜杭についていうと、振源距離が19mでは特

に明瞭な関係は認められない。しかし、振源距離が長くなると、少数の例外は認められるが水平動成分の周期はほとんど変化しないのに対し、上下動成分の周期はのびて、水平動成分の周期と比較してもかなり大きいものとなるのがわかる。

図-27には斜杭の押込杭と引抜杭の最大速度の比較を示す。押込杭と引抜杭とにピックアップを設置し同時測定

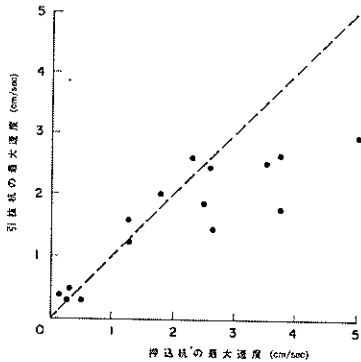


図-27 押込杭と引抜杭の最大速度の比較

したものについては振源距離は同じでありそれぞれの最大速度が示してある。そうでない場合については、ほぼ同じ振源距離の押込杭と引抜杭の最大速度をプロットしてある。この図によれば最大速度が約2 cm/sec までは押込杭と引抜杭の最大速度はほぼ同じであるが、最大速度が約2 cm/sec 以上になると押込杭の方が引抜杭に比べて最大速度が大きくなるのがわかる。最大速度が約2 cm/sec 以上のものは振源距離が短く19mである。押込杭と引抜杭を同時に測定しているのはケース3とケース4である。図-11、12にはこのケース3とケース4について打込深さと水平速度の関係を示したが、これによると打込深さが浅いところでは押込杭、引抜杭の水平速度はそれほど大きな差はないが打止まり付近になると押込杭の水平速度は引抜杭の水平速度より大きくなっているのがわかる。押込杭の下端は振源に近い方に傾いており、引抜杭の下端は振源に遠い方に傾いている。したがって、厳密に言えば押込杭の方が振源からの距離は引抜杭よりも短くなっている。振源距離が小さいとこの影響が大きく、これが1つの要因となって図-27のような結果となっているものと思われる。この報告では、振源距離は便宜的に打込み杭と斜組杭の頭部の直線距離としており、押込杭と引抜杭の振源距離は同じとしているが、上述の結果は今後の検討に際して頭に入れておく必要がある。

図-8~12に示した杭の打込み深さと水平速度の関係をみると、杭の打撃回数の深さ方向の変化と速度の深さ方向の変化はほぼ対応している。るにおいて述べたように打撃回数はN値とほぼ対応しており、したがって、N値と速

度の深さ方向の変化とはほぼ対応しているのがわかる。過去において実施された種々の杭打振動測定結果によれば、ある地盤のN値と杭打ちによる地盤振動の関係は振源距離あるいは地盤の成層状況により必ずしも単純ではないが、N値が大きい地盤ほどその地盤の振動も大きくなるようである。また、小林<sup>5)</sup>によれば、杭打ち振動によるある地盤の振動の卓越振動数は杭の先端が支持層上到達すると高くなるといわれている。この点に関しては今回の結果では、図-13に示したように周期の深さ方向の変化は少なく、打止り付近でやや周期が短くなるのが認められる程度である。

振動波形の振動数特性を検討する場合には、その振動波形のフーリエスペクトル、パワースペクトルを求めて行うことが一般的である。振動波形を波形読取機でデジタル化し、そのデジタルデータを用いてフーリエスペクトル、パワースペクトルは求められる。今回の場合はデータが多いため、振動の周期の検討には各波形で最大値を示す波の周期を採取して、それをその波形の主要な周期として用いている。ただし、るにおいて示したようにいくつかのケースについては波形を読取りデジタル化してあるので、これについてはフーリエスペクトルを計算した。図-28~34にこれらフーリエスペクトルを示す。各図には3種類のフーリエスペクトルが示してある。たとえば、図-28はケース2の前面鋼管矢板の打止まり付近の速度波形のフーリエスペクトルであり、実線は上下動成分、点線は振源方向に平行な水平動成分、一点鎖線は振源方向に直角な水平動成分である。

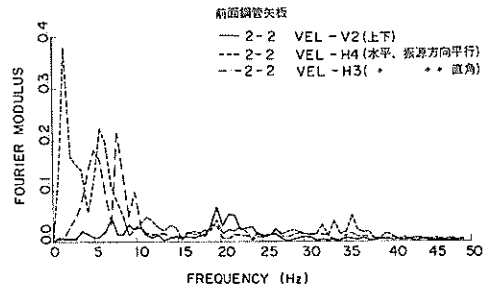


図-28 フーリエスペクトル(速度、CASE 2、前面鋼管矢板)

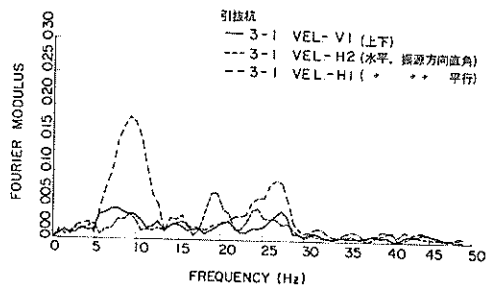


図-29 フーリエスペクトル(速度、CASE 3、引抜杭)

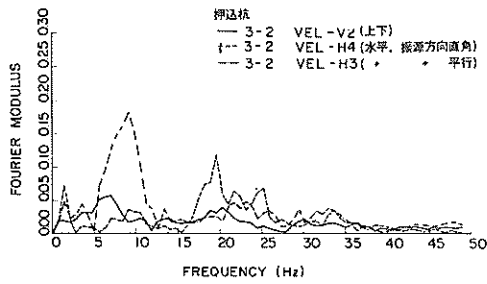


図-30 フーリエスペクトル(速度、CASE 3、押込杭)

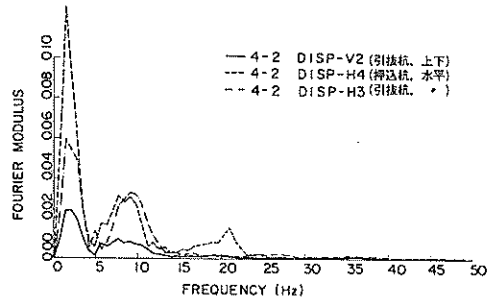


図-34 フーリエスペクトル(変位、CASE 4、斜杭)

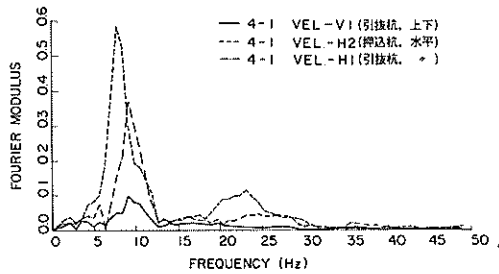


図-31 フーリエスペクトル(速度、CASE 4、斜杭)

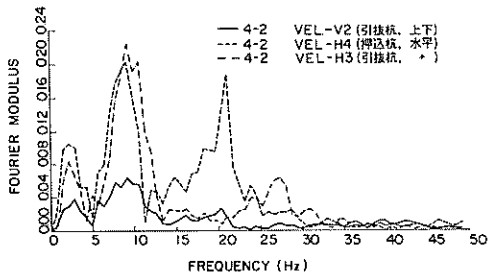


図-32 フーリエスペクトル(速度、CASE 4、斜杭)

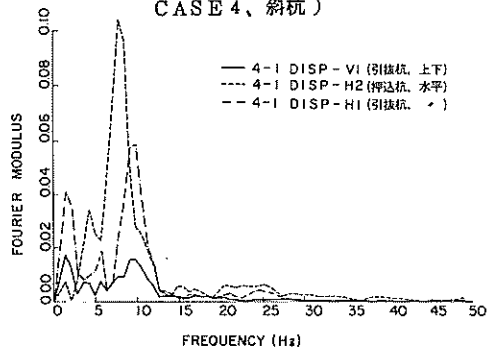


図-33 フーリエスペクトル(変位、CASE 4、斜杭)

図-28 の前面鋼管矢板の場合のフーリエスペクトルをみると、上下動成分は 19.6Hz のところにピークがある。水平動成分は両成分とも 2 つの大きなピークがあり、振源方向に平行な水平動成分の 2 つのピークは、振源方向に直角な水平動成分と比較して低い方にずれている。図-29 ~ 32 の斜杭の速度波形のフーリエスペクトルの場合は、点線が振源方向に直角、一点鎖線が振源方向に平行な水平動成分である。振源方向に平行な水平動成分の場合は 1 つ大きなピークが 9Hz にあり、振源方向に直角な水平動成分の場合にはさらに 20Hz 付近にもピークがみられ、場合によっては二つのピークのうち 20Hz のピークの方が 9Hz のピークより大きくなっている。上下動成分のフーリエスペクトルの場合は、水平動成分とほぼ同じところにピークがあるが、全体的に高いところのピークが大きくなっているのが目立つ。図-33、34 の斜杭の変位波形のフーリエスペクトルは、9Hz、20Hz 付近にもピークが認められるが、全体的に低い振動数のピークが大きくなっているのがわかる。

図-35 には水平速度と打込深さの関係をいくつかの振源距離について示したものである。振源方向に平行な水平動成分で押込杭について示してある。振源距離は 19m か

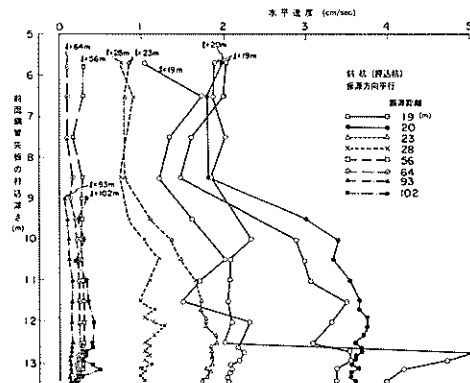


図-35 水平速度、打込深さ、振源距離の関係

ら102mまでである。図をみれば明らかなように振源距離が大きくなるにつれて水平速度は小さくなっているのがわかる。また、振源距離が小さい場合には水平速度の打込深さに対する変化は打撃回数に対応しており、打込深さの増大とともに大きくなっている。一方、振源距離が大きくなると水平速度の打込み深さに対する変化の割合は小さくなっているのがわかる。図-36には水平最大速度と振源距離の関係、図-37には上下最大速度と振源距離の関係を

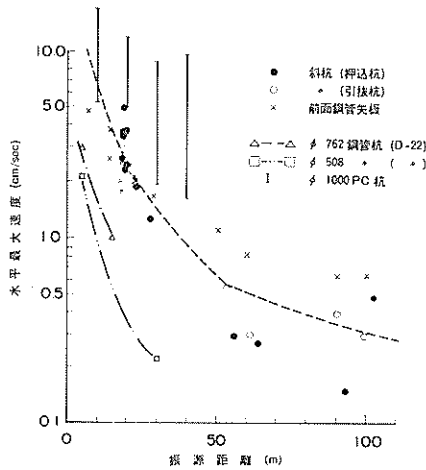


図-36 水平最大速度と振源距離の関係

定結果がほぼ同径の鋼管杭の振動測定結果よりも大きい値を示しているのは、杭打ち機械、地盤条件が異なること、今回の振動測定が地盤上で実施されているのではなくて、海上の杭上で実施されていることなどによるものと思われる。押込杭と引抜杭については前述したようにここで用いた振源距離は問題がありそうなので、斜杭の傾きを考慮して振源距離を修正したのが図-38、39である。横軸は修正振源距離である。図-36、37に比較して距離による減

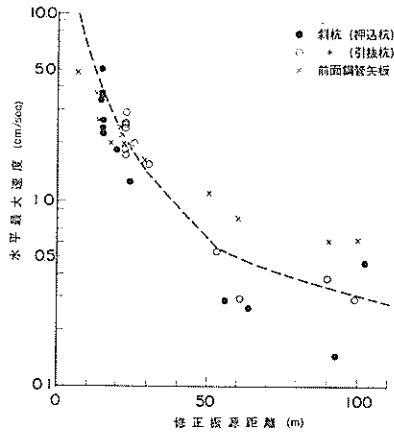


図-38 水平最大速度と修正振源距離の関係

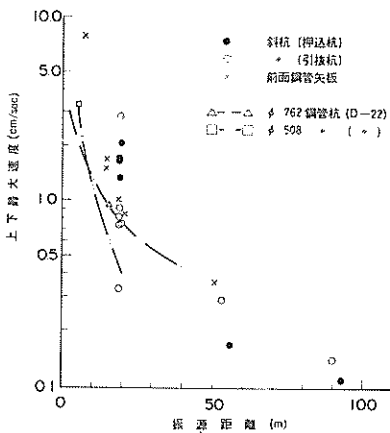


図-37 上下最大速度と振源距離の関係

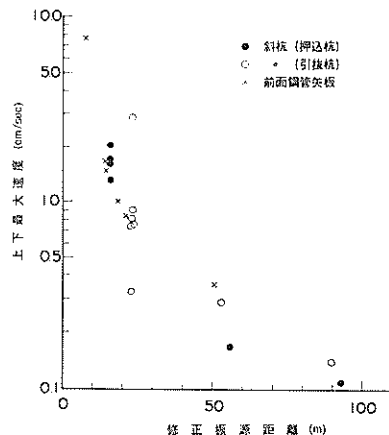


図-39 上下最大速度と修正振源距離の関係

示す。押込杭、引抜杭、前面鋼管矢板を区別して示してある。また、同図には過去に発表されている杭打ち振動測定の結果も示してある。ここで、φ762、φ508の鋼管杭の打設地点は軟弱な地盤であり、φ1000のPC杭の打設地点は一般的な地盤である<sup>4)</sup>。杭の打込みによる振動は杭の種類、寸法、地盤条件、くい打ち機械の種類によって異なることを考慮して、今回の結果と比較する必要がある。今回の測

衰の様子がはっきりわかる。ここで示すように水平最大速度は距離とともに急激に減少しており、振源距離50m付近までの減少の割合はそれ以上の振源距離の場合と比較して大きいのがわかる。上下最大速度と水平最大速度の振源距離による減少の割合は斜杭の場合ほぼ同じである。一方、前面鋼管矢板の場合は上下最大速度の方が水平最大速度より距離による減衰の割合はやや顕著のように思われる。杭



打ちによる地盤振動の距離減衰は幾何学的な減衰と内部減衰とを考慮して次のように表わされる<sup>3), 5)</sup>。

$$v = \frac{C}{r^m} \cdot \exp(-\alpha r) \quad (1)$$

ここで、 $v$  : 振 幅  
 $r$  : 距 離  
 $\alpha$  : 内部減衰 (  $m^{-1}$  )  
 $m$  : 球面波に対して 1  
         円筒波 # 0.5  
         平面波 # 0

この式を図-38の距離による減衰の図にあてはめてみる。杭打ち振動における最大振幅を与える波が実体波か表面波かという点は意見のわかれるところである。距離による減衰の様子が振源距離 50 m を境にして変わっているということ considering、ここでは、過去の研究成果から振源距離の短いところでは最大振幅を与える波は実体波、振源距離の長いところではレ-レ-波と考えた<sup>3)</sup>。このように考えて(1)式を今回得られた水平最大速度と振源距離の関係にあてはめた結果は次式となる。

$$v = \frac{7.5}{r} \cdot \exp(-0.01724r) \quad r \leq 50 \quad (2)$$

$$v = \frac{5.9}{\sqrt{r}} \cdot \exp(-0.006385r) \quad r > 50 \quad (3)$$

ここで、 $v$  : 速度振幅 (  $cm/sec$  )  
 $r$  : 振源距離 (  $m$  )

図-36、38にこの式を点線で示す。なお、この式は前面鋼管矢板、斜杭の区別なく振源距離に対して平均的な速度振幅を与えるものである。なお、これらの式は図-3の土質柱状図の地盤に対応するもので、あらゆる地盤に適用されるものではない。上下動成分については、振源距離が大きいところでのデータが不十分なため、距離による減衰特性を示す関係式についての詳しい検討は実施しなかった。図-40には上下水平最大速度比(上下最大速度を水平最

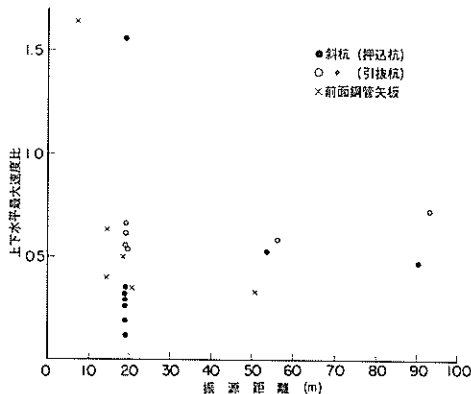


図-40 上下水平最大速度比と振源距離の関係

大速度で除した値)と振源距離の関係を示す。値がかなりばらついており、特に明確な上下水平最大速度比と振源距離の関係は認められない。ただし、振源距離の短いところで上下水平最大速度比の大きいものが認められる。図-41、42には周期と振源距離の関係を示す。図-41は水平動成分、図-42は上下動成分でそれぞれ押込杭、引抜杭、前面鋼管矢板について示してある。ここでいう周期とは最大速度を与える波の周期である。斜杭についてみると水平

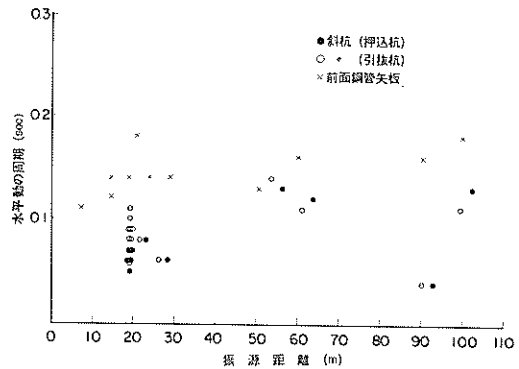


図-41 水平動の周期と振源距離の関係

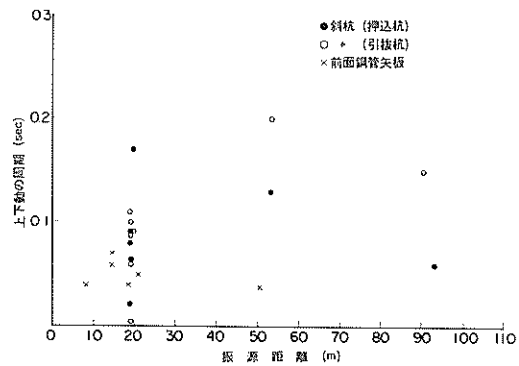


図-42 上下動の周期と振源距離の関係

動成分の周期の場合は振源距離が大きくなると周期はやや大きくなるのが認められるが、上下動成分の場合は特にその傾向は認められない。前面鋼管矢板の場合は今回のデータに関する限り振源距離による周期の変化はほとんどないようである。

杭打ち時の振動の様子を具体的に把握するには、杭の変位する様子を3次的にみるのがもっともわかりやすい。このために、測定した変位の軌跡を描いたのが図-43、44である。両図とも引抜杭の変位で横軸が振源方向に平行な水平動成分、縦軸が上下動成分である。変位の振動軌跡は横軸に対して約20度傾斜しているが、これは斜杭の傾斜角20度に対応している。図-43、44のケース4は変位を実測しているが、他のケースについては変位を実測していない。この場合には速度から変位を計算して変位の

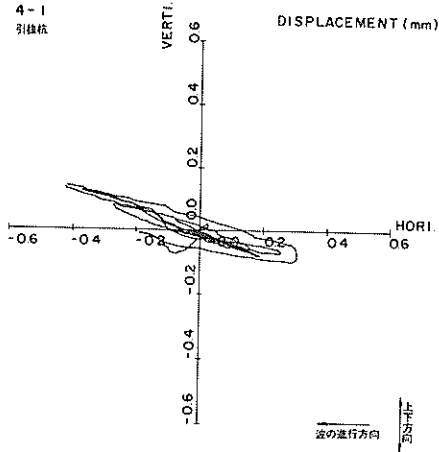


図-43 変位の振動軌跡 (CASE 4、引抜杭)

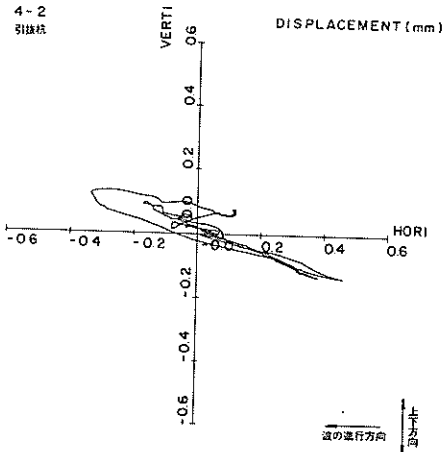


図-44 変位の振動軌跡 (CASE 4、引抜杭)

振動軌跡を求めた。速度を積分して変位を求める計算は次の手順によった。速度記録  $f(t)$  はつぎのように有限フーリエ級数に展開することができる。

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{N-1} \{A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t\} + \frac{A_N}{2} \cos \omega_n t \quad (4)$$

ここで、 $f(t)$  : 速度記録

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \omega_n t dt \quad (5)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \omega_n t dt \quad (6)$$

$$\omega_n = \frac{2n\pi}{T} \quad (7)$$

数値積分によって速度から変位を計算する場合、もとの速度記録に含まれている長周期成分あるいはゼロ線の位置が

積分された変位に非常に大きい影響を与える。ここでは、これについて特に検討しないが、この点を考慮して、もとの速度記録の波形  $f(t)$  の長周期成分および短周期成分を除去した。すなわち

$$f(t) = \sum_{n=n_l}^{n_u} \{A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t\} \quad (8)$$

ただし、 $n_u, n_l$  はバンドパスフィルターのそれぞれ上限値、下限値である。つぎに上式の両辺を積分すれば

$$\int_0^T f(t) dt = \sum_{n=n_l}^{n_u} \left\{ -\frac{B_n}{\omega_n} \cos \omega_n t + \frac{A_n}{\omega_n} \sin \omega_n t \right\} \quad (9)$$

となる。このフーリエ級数に関する数値計算はFFT (Fast Fourier Transform) を用いて行なった。今回の計算で用いたデータ数は1,300、時間間隔は0.0011秒である。また、フィルターの下限值は約1.4Hzとした。後述するように速度から加速度を求めているが、この場合の数値微分も上述の手法で行なっている。この手法の妥当性をみるために実測変位と計算変位とを比較したのが図-45である。両者の波形を比較すると部分的にやや異なっ

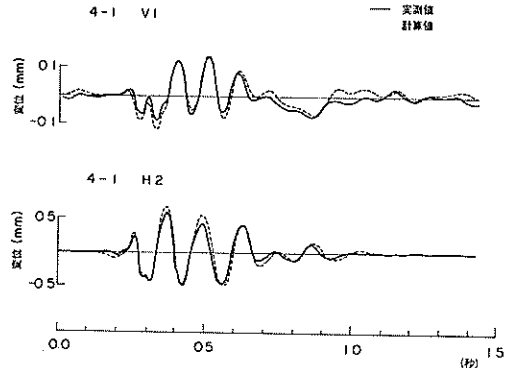


図-45 変位の実測値と計算値の比較

た点が見られるが、計算変位はほぼ妥当なものと思われる。デジタル化された速度記録について変位を計算した結果の最大値を表-3に示す。計算した変位の振動軌跡を示したのが図-46~51である。図-46、47は前面鋼管矢板の変位の振動軌跡である。図-46の横軸は振源方向直角、縦軸は振源方向平行で両方とも水平動成分であり、杭の振動の様子を平面的にみたものである。これを見ると振動は振源方向に平行な方向に主に振動しているのがわかる。図-47は上下動成分と水平動成分について示したもので、杭の動きを側方からみたものである。なお、この場合の水平動成分は振源方向に平行な方向である。図を見ると上下動

表-3 変位、速度、加速度

CASE	PICK UP No.	最大速度 (kine)	最大変位 (mm)		最大加速度 (gal) (計算値)
			実測値	計算値	
2	V 2	0.54	/	0.08	72
	H 4	1.96		0.98	175
	H 3	1.48		0.35	104
3	V 1	0.88	/	0.15	86
	H 2	1.07		0.12	148
	H 1	2.66		0.38	232
	V 2	0.80		0.18	88
	H 4	1.12		0.20	144
	H 3	2.10		0.41	266
4	V 1	0.70	0.14	0.14	55
	H 2	3.82	0.60	0.67	290
	H 1	2.49	0.43	0.38	197
	V 2	0.74	0.13	0.19	69
	H 4	3.36	0.62	0.70	257
	H 3	2.58	0.46	0.48	177

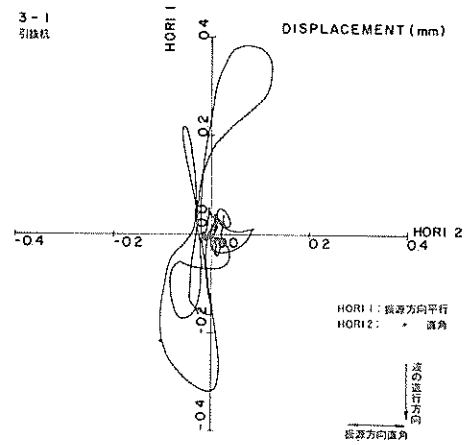


図-48 変位の振動軌跡 (CASE 3、引抜杭)

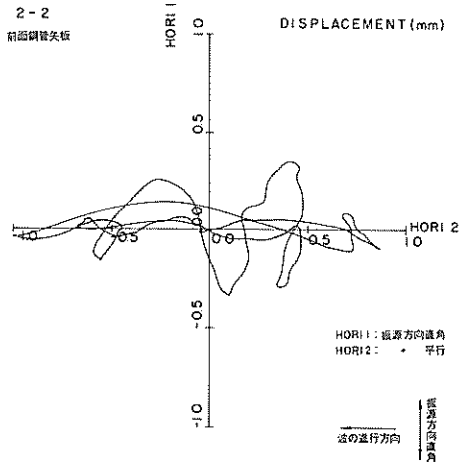


図-46 変位の振動軌跡 (CASE 2、前面鋼管矢板)

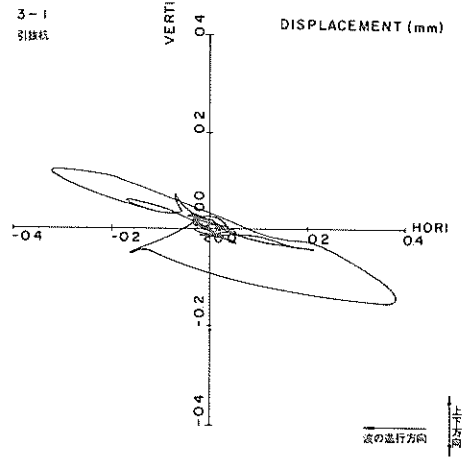


図-49 変位の振動軌跡 (CASE 3、引抜杭)

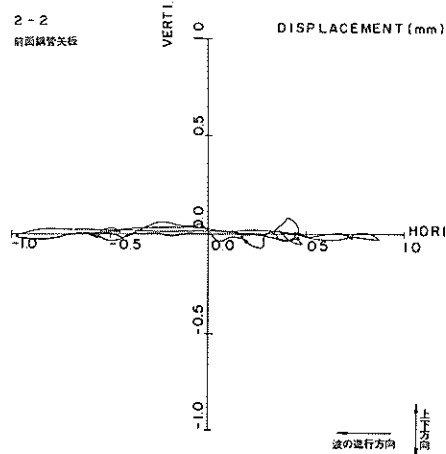


図-47 変位の振動軌跡 (CASE 2、前面鋼管矢板)

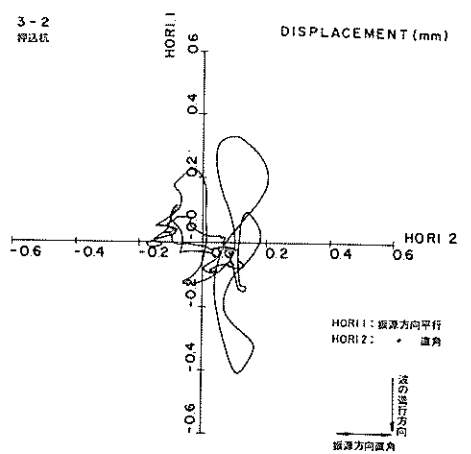


図-50 変位の振動軌跡 (CASE 3、押込杭)

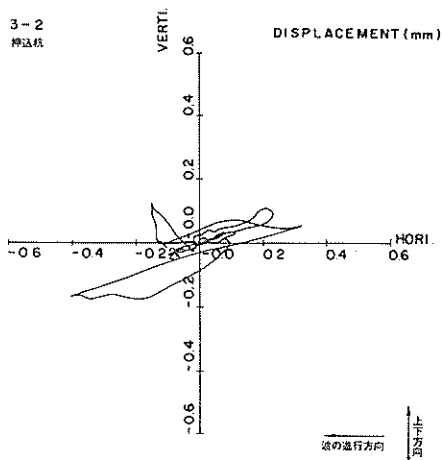


図-51 変位の振動軌跡 (CASE3、押込杭)

成分は非常に小さいのがわかる。図-48~51は斜杭の変位の振動軌跡を示したものである。図-48、49は引抜杭で図-50、51は押込杭である。図-48、50は水平動2成分についてみたものであるが、押込杭と引抜杭とも振源方向に平行な方向に大きく振動しているのがよくわかる。図-49、51は上下動成分と水平動成分についてみたもので、押込杭と引抜杭とも変位の振動軌跡は横軸に対して±20度傾斜しており、横軸に対して対照となっている。杭頭の振動の様子以上に示した変位の軸跡のとおりであるが、杭自体が地盤に対してどのような応答を示しているのかという点も興味ある問題である。この節の中ほどで杭頭で測定した記録波形のフーリエスペクトルを計算しその波形の卓越振動数を求めた結果を示しているが、この卓越振動数は杭の固有振動数とは直接的に結びつかない。地上に突出した杭の横振動に関しては複雑な問題を含んでいるため、この杭自体の応答に関しては稿を改めて検討したい。

それぞれの杭の振動の大きさを知ることが重要であるが、それぞれの杭の相対的な動きがどうなっているのかを見ることも重要である。そこで、実測変位について各杭間の相対変位を計算した。図-52にこれを示す。図中示してあるのはそれぞれ押込杭と引抜杭の相対変位であるが、図中上段と中段に示してあるのが対となっている押込杭と引抜杭の相対変位で、下段に示してあるのが隣り合った2つの斜組杭の片方の押込杭ともう一方の引抜杭について示したものである。それぞれの波形とも、もとの押込杭、引抜杭の波形の影響を受けている。相対変位の最大値はそれぞれの杭の変位の最大値の和とまではいかないが、両者の杭の変位の最大値より大きい値となっている。

速度を中心に変位についても検討を加えてきたが、以下には加速度の面から検討を加える。前述した速度から変位を

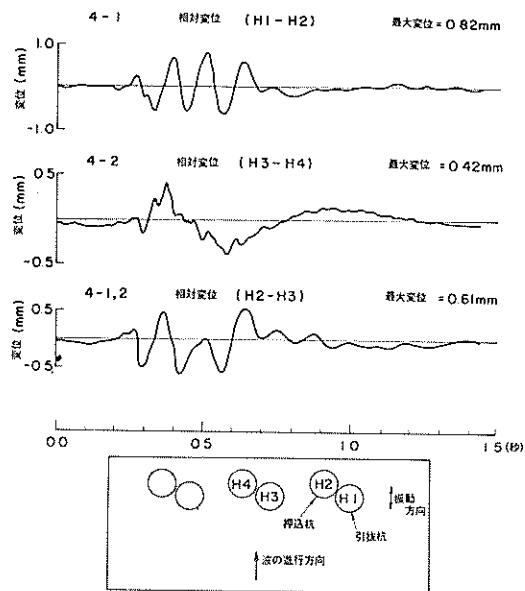


図-52 押込杭と引抜杭の相対変位

求める数値積分の手法と同様にして、速度から数値微分により加速度を計算した。計算に際しては測定計器の総合感度特性を考慮してフィルターの上限を50Hzとした。図-53に計算結果の一例を示す。同図には実測変位と速度も同時に示してある。デジタル化された速度記録のデータについて計算した結果を表-3に示す。表-3によれば上下動成分で大きいもので86gal、水平動成分の場合は290galとなっているのがわかる。加速度については実測値がないので、ここで計算した結果がどの程度実測値とあっている

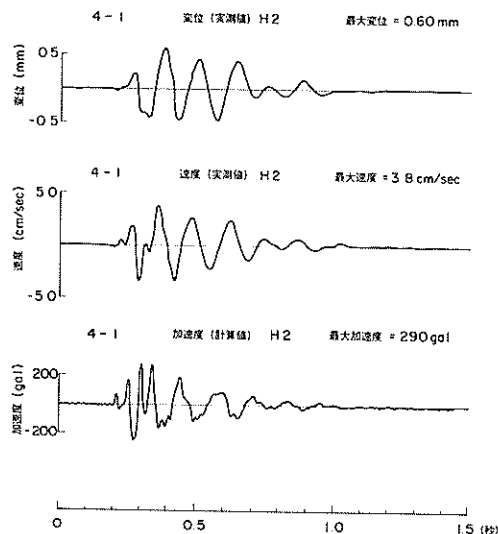


図-53 変位、速度、加速度の波形

るのかを検証するデータがない。ケース4のH2についてみると、速度波形の卓越振動数が7.69Hz、最大速度が3.82cm/secであるので、最大速度3.82cm/sec、振動数7.69Hzの正弦波として加速度を求めると、簡単な計算で185galとなる。これに対して数値微分により求めた最大加速度は290galであり、185galよりも大きくなっているが、実際の速度波形が高い振動数成分も含んでいることを考慮すればこの290galという値はほぼ妥当な値だと思われる。得られた加速度波形についてフーリエスペクトルを計算した結果では、加速度波形のフーリエスペクトルのピークを示す振動数は速度波形のフーリエスペクトルとほぼ同じであるが、20～30Hzの高い振動数のピーク値がいずれも大きくなっているのが認められた。図-54にその一例を示す。

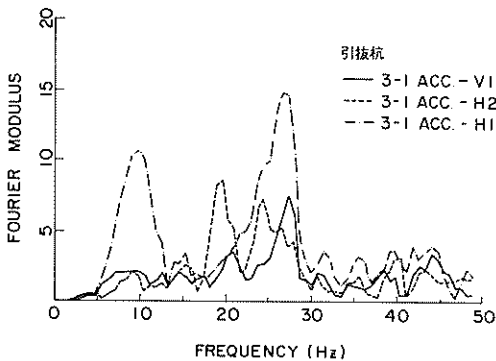


図-54 フーリエスペクトル(加速度、CASE 3、引抜杭)

表-3に示したように今回の振動測定の結果から計算された加速度はかなり大きい値を示しており、既設構造物に与える影響が懸念される。これに関しては、過去の地震被災例を参考にして検討した結果を以下に述べる。1968年3月30日和歌山市付近で発生した局発地震の際に、和歌山港で観測された強震記録は上下最大加速度が、405gal、水平最大加速度が253galで地盤加速度がかなり大きいものであったにもかかわらず、港湾施設の被害は皆無であった。これは地震の規模が小さかったこと、地震動の継続時間が短かったこと、地震動がかなり短周期成分の強いものであったことなどから構造物に与える地震動の影響が小さかったことが推定されている。杭打ち振動は卓越振動数が高く、振動も断続的であり、上述の和歌山港の例を考慮すると、ここで示したかなり大きな加速度をもつ杭打ち振動でも構造物に与える影響はそれほど大きくないことが推定される。

## 5. 養生中のコンクリートに及ぼす杭打ち振動の影響

4で解析した杭打ち込み時における既設杭の振動測定結果をふまえたうえで、次にコンクリートの養生中に与える杭打ち振動の影響について検討する。過去におけるコンクリート養生中に与える振動の影響に関する研究報告の数は非常に限られている。現在手もとにあるのは山下他<sup>6)</sup>の“養生中に継続振動をうけるコンクリートの諸性質”という報告のみである。これはテーブル振動機に標準供試体の型枠を固定して上下動振動を与える方法、あるいは繰り返し载荷装置を用いて特別に作った型枠にたわみ振動を与える方法によって凝結過程にあるコンクリートに継続的に振動を与えコンクリートの曲げ強度および圧縮強度、鉄筋との付着強度、打継目の強度に与える交通振動の影響について報告したものである。テーブル振動機の振動数は1,250rpm(約21Hz)、振幅は1.0mmである。この実験によると次のような結果がえられている。

(i) コンクリートの曲げおよび圧縮強度は、継続的な振動を加えても低下しないことが判明した。したがって継続的な振動を受ける場合に目標とするコンクリートの強度は、一般の工事の場合と同じとしてよい。

(ii) 鉄筋とコンクリートの付着強度は、鉄筋とコンクリートが一体となって振動する場合には、振動の悪影響をうけない。しかし、鉄筋のみがコンクリートの内部で振動する場合には、付着強度がいちじるしく低下することが明らかとなった。したがって、既設部分の鉄筋を延長して新設コンクリート内部に定着させる場合には、新設部分の型枠を既設部材に剛結するなどして、鉄筋とコンクリートが一体となって同一の振動をするように配慮することが必要である。

(iii) 鉛直打継ぎ目の強度は、新旧コンクリート間が鉄筋で結合されていても、振動をうけると低下するので、打継ぎ目の入念な処理や再振動締め固めなどによって、打継ぎ目のせん断抵抗を増加させる必要がある。また、鉛直打継ぎ目をせん断力の大きい個所に設けないようにしなければならない。

(iv) 水平打継ぎ目の強度は振動によってかなり増加するが、コンクリートの打設を逆打ちで行なうと、振動の有無に関係なく小さな値しかえられない。したがって、逆打ちでしか打設できないところでは、新旧コンクリートの合成作用を期待した設計は行なわないほうがよい。

(v) 超早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートが継続的な振動をうけたときの諸性状は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと差がないことが判明した。したがって、既設構造物と同等以上の性能を有する構造物をできるだけ早期につくる目的で、拡張工事に超早強セメントを用いることはさしつかえないものと思われる。

これらのことから判断すると、打継ぎ目については注意がいるがコンクリートと鉄筋が別々に振動しないように配慮しさえすれば、コンクリート養生中の振動はそれほど問題はなないように思われる。ただし、この結論は交通振動を対象としてなされた限られた振動条件下での実験結果から導びかれたものであり、今回の杭打ち振動の場合の振動条件との相異を検討しておく必要がある。まず、上記の実験は交通振動を対象としているため振動数は21Hz、振幅が1.0mmで振動継続時間は6時間である。杭打ち振動の測定結果をみると、変位振幅は振源距離によって異なるが振源距離20mで約1mm、卓越振動数は1.3Hz、9Hzである。両者を比較すると変位振幅についてはほぼ同じであるが、対象とする振動数は杭打ち振動の方が低い。また、杭打ち振動の場合は振動は断続的で、杭の打撃を1回の振動と考えれば一般的には交通振動を対象とするよりも振動継続時間が短かく条件としては緩和されたものと考えられる。山下他の実験の場合と杭打ち振動の場合とでは対象とした振動数が異なっているという点は問題点として残る。しかしながら、対象とする振動数が異なっても山下他の結論の定性的な傾向はほぼかわらないと考えてもよいと思われる。ただし、このことは今回の測定結果で振源距離20mでの変位振幅が1mmという振動条件で比較した結果である点注意を要する。これらのことから判断して、鉛直打継目を入念に処理し、型わくを既設部材、控え杭などに剛結して鉄筋とコンクリートが一体となって振動するように設計、施工を実施し、かつ杭の打込み地点から20mほど離せば、養生中に前面鋼管矢板の打込み振動を受けても、コンクリートの各種強度に与える杭の打込み振動の影響は小さいものと考えられる。

## 6. 結 論

控えの上部工のコンクリート打設作業と前面鋼管矢板の打込み作業を並行して実施した場合、控えの上部工のコンクリートは養生中に杭の打込みによる振動を受けることになり、硬化後のコンクリートの各種強度に与える振動の影響が問題となる。この点を明らかにしてゆくには、まず控えの上部工のコンクリートの型わくを支えている控え杭の振動性状を把握することが必要である。この目的で、千葉港工事事務所の鋼管矢板岸壁の建設現場において、前面鋼管矢板の打込みによる控え杭の振動の現場測定を実施した。本報告の内容の大部分はこの杭の打込みによる控え杭の振動に関するものである。

結論として検討結果を述べる前に杭の打込みによる振動の測定の内容、検討事項について簡単に述べる。杭の打込みは三本打でハンマーはディーゼルハンマーMB70型、ハンマー重量は21tである。振動測定は控え杭の頭部に振

動測定器を設置して、水平方向の振動と上下方向の振動の測定を行なった。水平方向の振動については打込み杭と測定を実施している控え杭とを結ぶ方向の水平振動（振源方向に平行な水平振動）と、それに直角な方向の水平振動（振源方向に直角な水平振動）の2つの水平振動成分について測定を実施した。振動をあらわすものとして、加速度、速度、変位があるが、今回は杭の打込みによる控え杭の振動の速度を記録した。加速度と変位については速度記録より数値計算により求め検討を加えた。杭の打込みによる振動の大きさを知ると同時に、どのくらいの振動数で振動しているのかを知ることも重要である。杭の打込みによる振動波形は単純な正弦波ではなく、さまざまな振動数の正弦波の重ねあわせた振動波形であるから、このうちでどの振動数をもっとも卓越している振動数（卓越振動数）かをもとめた。杭の打込みによる振動は杭の打込み地点から離れば当然その振幅は減衰していく。この距離による減衰の様子をみるために打込み杭と振動測定を行う控え杭との距離（振源距離）を種々かえて振動測定を実施した。この鋼管矢板の打込みによる控え杭の振動測定の結果及び解析結果と養生中に振動を受けるコンクリートに関する過去の研究成果をふまえて、養生中のコンクリートが杭の打込み時の振動によってうける影響について検討をおこなった。本報告で検討した結果明らかになった事項を以下に列記する。

(i) 前面鋼管矢板の打込みによる控え杭の振動は上下方向の振動よりも水平方向の振動の方が大きい（図-10、15～20、24、43、44、49、51参照）。また、打込み杭と測定している控え杭とを結ぶ方向に平行な方向の水平動成分の方がそれに直角な方向の水平動成分よりも大きい（図-11、15～21、46、48、50参照）。

(ii) 打込み開始から終了までの間における杭の打込みによる控え杭の振動の速度の分布、すなわち深さ方向の速度の分布（打込み杭の先端の深度で表示）とN値の深さ方向の分布とはほぼ対応している。つまり、打込み杭先端部の貫入抵抗に応じて控え杭の振動速度は増大する（図-3、7～13、35参照）。

(iii) 打込み杭と測定している控え杭とを結ぶ方向に平行な水平動成分の速度の波形は9Hzの振動数が卓越しており、打込み杭と測定している控え杭とを結ぶ方向に直角な水平動成分の速度波形は9Hzと20Hz付近の振動数が卓越している（図-29～32参照）。上下動成分の速度の波形の卓越振動数は水平動成分のそれとほぼ等しいかやや高くなっている。変位記録波形の卓越振動数は1.3Hzと9Hzとなっている（図-33、34参照）。

(iv) 杭の打込みによる控え杭の振動速度は打込み杭と測定している控え杭との間の距離の増加とともに減衰しており、とくにこの距離が50m付近以下の範囲においてはそ

の減少の割合が著しい(図-35~39参照)。打込み杭と測定している控え杭との間の距離が増大するにつれてその周期も変化する。水平方向の振動の場合には距離とともに周期がやや長くなっている(図-41, 42参照)。

(V) 控え杭の振動の変位については、速度記録から数値積分により算出した計算値より検討をおこなった。計算結果によると、打込み杭からの距離が20m程度の場合で最大速度が2~3.8cm/secの時に最大変位は0.4~1.0mmであった(表-3参照)。計算値の妥当性を検証するために測定した変位記録と比較した結果、計算結果は妥当なものだと判断された(図-45参照)。

(VI) 控え杭の振動の加速度の検討は速度記録から数値積分により算出した数値について実施した。計算結果によれば最大速度が2.0~3.8cm/secに対して最大加速度は180~290galであった(表-3参照)。加速度波形は、9Hz, 20~30Hz付近の振動数が卓越しているのが認められた(図-54参照)。

(VII) 前面鋼管矢板の打込みによる控え杭の振動測定の結果と関連研究の成果をふまえて検討した結果、千葉港での実施例のように突出した組杭群で型わくが支えられていて振動の影響を受けやすいコンクリート工事であっても、コンクリート工事を打込み杭から20m程度離せば、養生中に前面鋼管矢板の打込みによる振動を受けた控え上部工のコンクリートが硬化後の各種強度で問題となることはないものと考えられる。ただし、鉄筋のみがコンクリートの内部で振動するというような場合には鉄筋の付着強度に問題が生じる懸念があり、さらに鉛直打継目を仮に設けるとまた問題が起るため、鉛直打継目は入念に処理し、鉄筋とコンクリートが一体となって振動するように型わくと鉄筋は振動をうけてもずれないようにがっちり組立てると共に既設部材、控え杭に剛結などする配慮が必要である。

## 謝 辞

現場測定実験は1975年10月に港湾技術研究所と第二港湾建設局千葉港工事事務所が協同で実施し、その後の記録の読取および整理は千葉港工事事務所が担当し、結果の解析および報告のとりまとめは港湾技術研究所がおこなった。最後ではあるが、千葉港工事事務所の関係各位と本報告をとりまとめる際に貴重な助言を与えて下さった構造部の方々に対し、深く謝意を表わす次第である。

## 参考文献

- 1) 中川恭次、渡辺清治：振動公害とその対策(その1)、土と基礎、203号、1975年1月、pp. 65~71
- 2) 中川恭次、渡辺清治：振動公害とその対策(その2)、土と基礎、204号、1975年2月、pp. 76~83
- 3) 土木学会関西支部：騒音・振動公害、土木学会関西支部、1968年3月
- 4) 堀内考英、玉置英裕、加藤賢治：クイ打込み時の地盤振動、第6回土質工学研究発表会、1971年6月、pp. 675~678
- 5) 小林芳正：建設における地盤振動の影響と防止、鹿島出版会、1975年4月、pp. 84~87
- 6) 山下宜博、平野実、塚山隆一、神垣則明：養生中に継続振動をうけるコンクリートの諸性質について、セメントコンクリート、No. 287、1971年、pp. 30~38
- 7) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所：千葉港(船橋・市川地区)設計計算書 - 10m岸壁1・2・3バース及び取付(先端)、昭和49年11月

## 記号表

$A_n, B_n$	: 有限フーリエ係数
$f(t)$	: 速度データ
H1~H4	: 水平動用のピックアップ番号
$l$	: 鋼管の長さ
$m$	: 幾何学的な距離減衰を与える係数
$n_l, n_u$	: フィルターの上限、下限値
$r$	: 振源距離
$T$	: 振動継続時間
$t$	: 時間
$t_0$	: 鋼管の厚さ
V1, V2	: 上下動用のピックアップ番号
$v$	: 速度振幅
$\alpha$	: 内部減衰係数
$\phi$	: 鋼管の径
$\omega$	: 角振動数

