

土木研究所資料

超高周波杭打機の研究開発

昭和58年 3 月

建設省土木研究所

機 械 研 究 室

Copyright © 57年度 by P.W.R.I.

All rights 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 of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。
したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

まえがき

昭和40年代の後半における建設工事の騒音、振動に対する苦情の大半は、基礎工事用機械が原因となって発生しており、騒音規制法、振動規制法においても、これらの機械を使用して行う建設作業が規制の主な対象とされており、低騒音、低振動形の基礎工事用機械を開発することが強く要請されるようになった。

このような背景もあり、最近の基礎工事用機械は、騒音、振動対策形と称されるものが、昭和51年には、既に数十種類以上も開発されており、今日の市街地における基礎、土留工事は、この対策形の機械に頼って施工されていると言っても過言ではない。

しかし、表一1及び表一2に示すように、対策形工法、機械のほとんどは、従来形杭打機であるディーゼルパイルハンマや振動パイルドライバに比較して、騒音、振動の対策面での効果は確かに認められるものの、施工性、経済性、支持力の信頼性等の面では、かなり劣っているのが現状であり、今後の技術開発が強く望まれていた。

本研究開発は、これらの問題解決を図るべく従来形杭打機の優れた施工性を確保して、なおかつ低振動、低騒音での施工が可能な杭打機械として有望とされる超高周波杭打機と共振杭打機の実機開発を目指したものである。

表一1 各種既製杭工法相互比較

工 法 名 比較項目	従来工法 直 打 工 法	対 策 工 法		
		プレボーリング工法 根 固 め 方 式	中 掘 工 法	
			根 固 め 方 式	打 止 め 方 式
通常施工されるくい径	300~1,000 φ	300~600 φ	400~1,200 φ	400~1,200 φ
通常施工されるくい長	10~40 m	10~30 m	20~40 m	20~40 m
N値30程度 施工速度 φ500 l=20m(2本程)	12~13 本/日	3~5 本/日	4~5 本/日	5~6 本/日
N値30程度 施工単価 φ500 l=20m 100本施工時	1,300~1,600 円/m	4,500~6,000 円/m	4,500~6,000 円/m	4,000~5,000 円/m
許容支持力(Ru)の算定方式	Meyerhofの式を用いた場合 $\frac{1}{3} \{30N \cdot A_p + \frac{1}{5} N_s \cdot A_s + \frac{1}{2} N_c \cdot A_c\}$	東京都の指導基準案が通常使用されている。 $\frac{1}{3} \{20N \cdot A_p + \frac{1}{5} N_s \cdot A_s + \frac{1}{2} N_c \cdot A_c\}$		
騒 音 レ ベ ル	85~90 dB(A)/30m (全体カバーで70dB(A))	65~70 dB(A)/30m		80~85 dB(A)/30m
振 動 レ ベ ル	70~75 dB/20m	55~60 dB/20m		65~70 dB/20m
開 発 時 期	昭和5年(ドイツ) 昭和29年(国産)	昭和42~48年	昭和40~50年	昭和48~49年
そ の 他	中間層が硬い場合は施工が難しい	地盤によっては孔壁の崩壊、高止りの問題がある。	粘土、粘性土では、長尺ぐいの場合、内圧の上昇により破裂する危険がある。	

備考 1. 調査時期 昭和52年度に実施した。

2. 調査方法 企業の工法カタログ、電話による問合せ及び文献を参考としてとりまとめている。

表-2 各種鋼矢板工法相互比較

工 法 名 比較項目	従 来 工 法	対 策 工 法			簡易対策工法
	振動杭打工法	ウインチ圧入工法	油圧ジャッキ 圧入工法	アースオーガ 併用工法	ウォータージェット工法 LSV工法
通常施工されるくい単長	クレーンの容量、起振力で限定される	12~13m	くい単長は圧入・引抜力で制限される	18.5~24m	クレーンの容量で限定される
適 合 地 盤	一般的にN値30~40以下		一般的にN値40以下		一般的にN値50以下
施 工 速 度 N値20~30 SP-III $t=10m$	20~30枚/日	8~15枚/日	10~20枚/日	10~15枚/日	15~20枚/日
施 工 単 価 N値20~30 SP-III $t=10m$ 100枚施工	800~900円/m	1,500~2,500円/m	2,000~3,000円/m	3,000~4,000円/m	2,500~3,000円/m
騒 音 レ ベ ル	75~85 dB(A)/15m	60~75 dB(A)/15m			75~85 dB(A)/15m
振 動 レ ベ ル	70~80 dB/10m	50~60 dB/10m			65~75 dB/10m
開 発 時 期	昭和9年(ソビエト) 昭和34年(国産化)	昭和49~50年	昭和42~51年	昭和48~50年	昭和48~51年
そ の 他	—————	圧入時に、シートパイルの垂直精度が下り、反りを生ずる。既設のくいから反力をとるもの以外は足場に制限がある		機械が大がかりとなり、足場に制限がある	騒音・振動の対策効果が小さい

備考 1. 調査時期 昭和52年度に実施した。

2. 調査方法 企業の工法カタログ、電話による問合せ及び文献を参考としてとりまとめている。

超高周波杭打機の研究開発については、主に建設機械開発調査の一環として行ったものであり、昭和51年度から5ヶ年の歳月を要して、土留杭用杭打機（鋼矢板類の施工を対象とする。）の開発可能性等について調査し、これを踏まえて、実用機の開発に取り組んだものである。この結果、起振部の作動機構に油圧制御方式を利用することにより従来形振動杭打機より3倍高い起振周波数をもった杭打機を開発することができた。この杭打機の基本的性能については、土木研究所構内での性能確認試験結果から、従来形振動杭打機(40 kw クラス)と比較して、同等以上の杭打性能を発揮し、しかも地盤振動レベルを約15 dB(VL)/30 m、騒音レベルを5 dB(A)/30 m 低減できることが確認された。

共振杭打機の研究開発については、昭和52年度から5ヶ年計画でスタートした総合技術開発プロジェクト（以下、総プロという。）の一課題である「建設工事環境改善技術の開発」の中で、基礎工事用杭打機（鋼管杭の施工を対象とする。）の開発を目標に、取り組んだものである。成果としては、杭自体に共振現象を発生させ、この高周波振動力を利用して杭の打込みを行う共振杭打特性について理論的には、ほぼ解明することができ、共振杭打工法、機械の実用化に対して、一つの方向付けを与えることができた。しかし、本杭打機の性能確認試験結果からみれば打込能力、騒音レベルの大きさ、供給動力等の面でまだ十分なものではなく、実用機として完成させるまでには至っていない。

なお、これらの研究開発は、(社)日本建設機械化協会に委託して遂行してきたものであり、また、建設機械調査(株)及び(株)高橋エンジニアリングに共同研究の形で、杭打機等ハード面の技術開発を依頼し、土木研究所においては、理論解析、実験の実施とその解析等を主として行ったものである。

このように、多くの関係機関、また、関係者の長年に亘る協力の賜物である本研究開発の成果

が、基礎、土留工事を円滑に実施する上で、今後広く活用されて少しでも役立つことになれば幸いである。

昭和58年3月

機械研究室

主任研究員 北川原 徹

(現 九州地方建設局道路部機械課長)

原 誠

(現 関東技術事務所工務課)

樋野 親 俊

目 次

まえがき

I 研究開発の概要	1
II 成果報告	3
II-1 超高周波杭打機の研究開発	3
1. まえがき	3
2. 基本構想	3
2.1 高周波振動の地盤伝搬特性	3
2.2 高周波振動による杭の貫入特性	4
(1) 貫入理論	4
(2) 確認実験	6
2.3 開発の基本方針	7
(1) 必要動力	8
(2) 軸受部の耐久性	8
3. 超高周波杭打機的设计, 製作	8
3.1 作動原理	9
3.2 特長	9
4. 超高周波杭打機の性能	10
5. 今後の課題	12
II-2 共振杭打機の研究開発	13
1. まえがき	13
2. 杭の共振特性	13
2.1 杭の共振モデル解	14
2.2 波動方程式による数値解析	16
(1) 杭を宙吊りにした時の計算結果	16
(2) 杭の打込み時を想定した計算結果	17
(3) 数値解析結果のまとめ	20
3. 共振杭打実験	20
3.1 モデル実験	20
(1) 実験内容等	20
(2) 実験結果と考察	21

3.2 実大杭の共振杭打実験結果	23
(1) 実験Ⅰ	23
(2) 実験Ⅱ	25
4. まとめ	29

あ と が き
参 考 文 献
後 付 写 真

I 研究開発の概要

本研究開発の開発対象杭打機である超高周波杭打機と共振杭打機の起振部の作動機構については、基本的には同じ油圧制御方式を利用したものであり、また打込み工法から分類した場合には、振動力を利用して杭を打込む振動杭打工法の延長線上に位置付けられる工法と考えられる。ここで、振動杭打工法及び機械の現在までに至る開発経緯の概要について述べると、まず振動力を利用して杭を打込む振動杭打工法は、1934年にソ連において、モスクワ大学のデ・デ・バルカン教授が打込み実験に成功して以来、急激に全世界に広がったとされている。その後1959年にソ連からVP-1型の振動杭打機が70台輸入されたことが契機となり、国内の機械メーカーの手で国産化が図られ始めた。

しかし、当時の振動杭打機は、打込み、引抜き速度が速く、衝撃音がほとんど発生しないといった特長をもっていたものの、硬質地盤への打込み力不足や、チャック装置が不完全であったばかりか、杭打ち時の地盤振動が余りにも著しかったことなどのため、市街地工事での使用は困難となってしまった。このため、振動杭打機は、地盤振動が問題とならない臨海埋立地でのサンドドレーン工法、サンドパイル工法といった地盤改良用の機械として使われる程度であった。

一方、一旦市街地からは姿を消した振動杭打機は、その最大のネックであった地盤振動を軽減させるべく研究開発が機械メーカーの手で継続された結果、1964年に改良形なるものが再び世に出された。この杭打機は、従来のものが500~600 cpmの振動数を利用していたことに対し、1,100~1,200 cpmと振動数を高めることで地盤振動の軽減を図ったものであり、当時としては低騒音、低振動の杭打機として、かなりの評価を受けることができた。しかし、数年後には、この杭打機の振動も環境に対する住民の意識の変化に伴い、許容できないものとされ、騒音規制法、振動規制法において規制を受けるようになったばかりか、市街地工事では、ほとんど使用することが出来ない状況となってきた。

本研究開発の基本方針は、振動杭打工法で建設工事の施工上問題となっているこの地盤振動を低減させる対策として、従来形振動杭打機で通常使われている起振振動数(1,100~1,200 cpm)を現状の技術で可能な限り高めて、この高周波振動力により施工性を確保したまま、地盤振動を大巾に減少させようとするものである。

ここで、研究開発内容を分類してみると、①高周波、大起振力の油圧起振機の開発、②高周波振動の地盤伝搬特性の調査、研究、③高周波、微振幅での杭の貫入特性調査、研究、④杭の縦波共振現象の解明と共振杭打機の開発、⑤超高周波杭打機の開発である。

研究、開発を進める上でまず①を重点的に行い、これがある程度、実験に供し得るに至った段階から②~⑤についても同時並行的に行った。この結果、④を除いては、ほとんど所期の目標を達成することができ、ほぼ実用機として使用できる油圧式の超高周波杭打機を開発することができた。しかし、④については理論的にはかなり解明されたものの、それを実際に杭打ちへ応用す

る技術を確立させるまでには至っておらず、今後の研究課題として残っている。

以下に、成果報告として、超高周波杭打機及び共振杭打機の研究開発に要した5ヶ年分の実施内容について、総括的にとりまとめたものを紹介する。

II 成 果 報 告

II—1 超高周波杭打機の研究開発

1. ま え が き

ディーゼルバイルハンマや振動杭打機の騒音，振動は建設工事の施工において最も問題視されたものの一つであり，早くからそれに替わる対策技術の研究開発が行われ，数十種類もの対策工法，機械と称されるものが出現した。鋼矢板工法においては，以前は圧倒的に多く使用されていた従来の振動杭打工法に代るものとして対策工法である油圧ジャッキやウィンチを利用する圧入工法あるいはアースオーガ併用工法が出現した。これら工法の施工能力等を調べて，相互間の比較を行ったものが前記の表—2であり，対策工法は従来工法より騒音，振動の面では確かに優れているものの，施工速度，施工単価等についてはかなり劣っていることがわかる。また，施工できる現場条件が限定されたり，泥水泥土が発生し，これが2次公害となるといった問題もあり，現場技術者の間では，従来工法の優れた施工性能と対策工法の低騒音，低振動の両面を兼ね備えた新しい杭打機の出現を望む声が強かった。

本研究開発は，このような社会背景のもとで建設工事の環境改善の一環として，振動杭打工法の公害対策に取り組んだものである。

2. 基 本 構 想

振動杭打工法で特に問題となったのは，地盤振動である。この解決策の1つとして，高周波の振動を利用して杭を打込むことが考えられた。

これによりどの程度地盤振動が低減できるか，また杭打性能にどのような影響を及ぼすかをまず理論的に調べ，これを実験により確認した。

2.1 高周波振動の地盤伝搬特性

従来形振動杭打機の周波数10~20 Hzを更に高めた場合に，地盤振動の伝搬特性がどのようなかを検討してみた。仮定条件として，図—II・1・1に示すように，杭の打込深さが比較的浅く，表層部に振源があるとすれば，地表面を伝搬するレーリー波のみを考慮すればよい。この距離減衰量 ΔL は，(II・1・1)式により求められる。第1項はいわゆる幾何減衰量と言われるものであり，単に X_1 と X_2 の関係のみで決定され，倍距離($X_2/X_1=2$)で3 dB/DDの減衰となる。第2項は，振動が地盤を伝搬する過程で，粘性抵抗等によるエネルギーの内部減衰量であり， X_1 と X_2 の関係

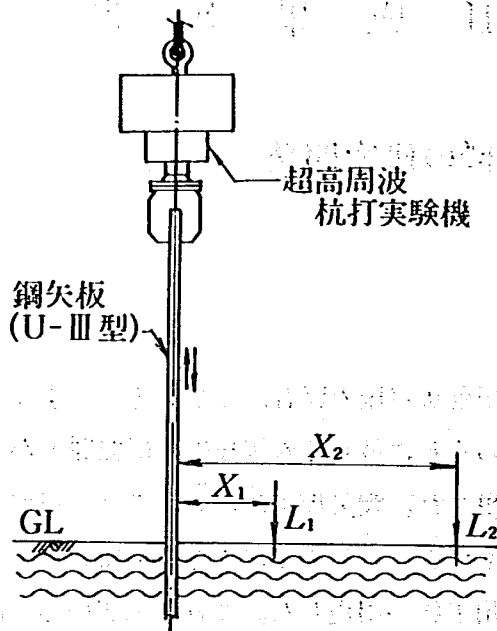


図-Ⅱ・1・1 杭打ちの振動モデル

以外に、地盤性状、周波数によって決定される。

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 10 \log \frac{X_2}{X_1} + 55 \frac{f \cdot \eta}{V_R} (X_2 - X_1) \quad \text{..... (Ⅱ・1・1)}$$

ただし

η : 地盤の損失係数 (通常 0.01~0.1)

V_R : レーリー波の伝搬速度 (通常 100~300 m/sec)

f : 周波数 (Hz)

とする。

ここで、 $X_1 = 7.5$ m, $\eta = 0.1$, $V_R = 240$ m/sec とした場合の各周波数ごとの数値計算結果を後述の確認実験による実測値と比較して図-Ⅱ・1・2 に示す。図からもわかるように、いずれも周波数を高めると減衰量は増大し、特に 15 m 以遠で急激に減衰している。

なお、高周波振動を利用することのメリットを別の観点から考慮した場合、地盤振動の計量単位である振動レベル(dB)は、人体感覚に合わせて 8~90 Hz 間で周波数の上昇に伴って +6 dB/oct の補正が加えられているので、この面からも高周波振動は有効であると考える。

2.2 高周波振動による杭の貫入特性

(1) 貫入理論

高周波振動を利用して、実際に杭の打込みが可能かどうかについて検討してみた。従来の振動杭打工法の貫入理論としては、定説として「振動が杭周面と先端地盤の摩擦力や

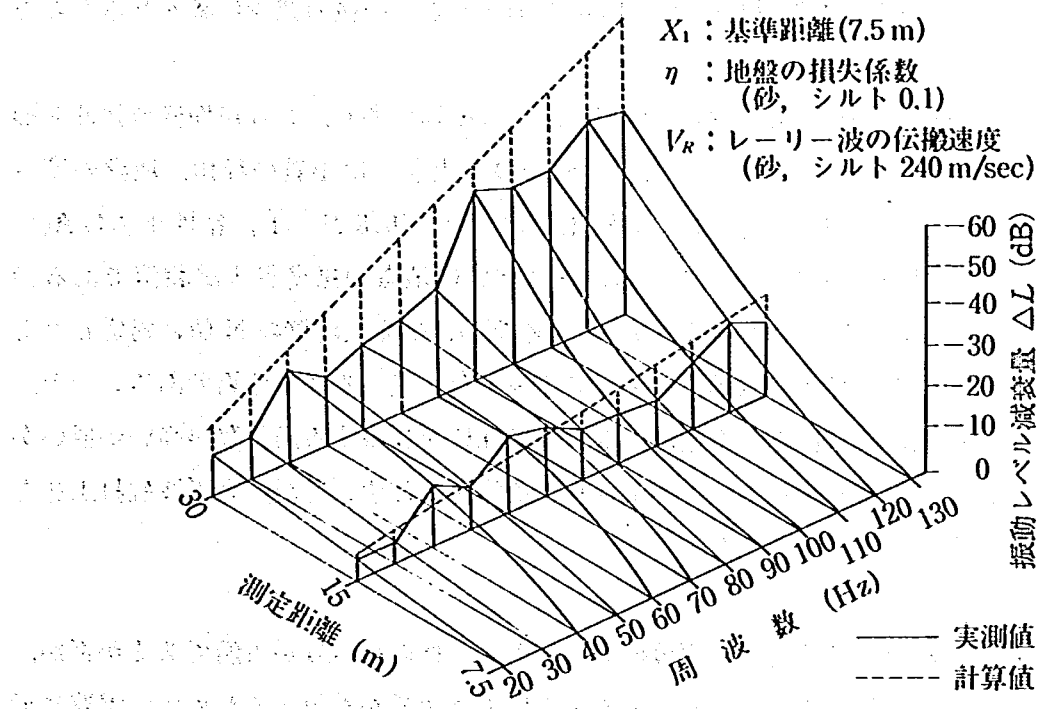


図-II・1・2 振動の距離減衰量

強度を低減させ、この減少した貫入抵抗力に対し、下向き方向の起振力と杭打機重量等の和が打ち勝った場合に杭は貫入する」と言われている。この摩擦力の減少は、まず第1に図-II・1・3に示すように、加えられた振動加速度の大きさに支配され、振動加速度が大きくなると急激に減少する。特に砂質土の場合はこの傾向が著しく、静摩擦時の1/20までも減少し粘性土でも3/20程

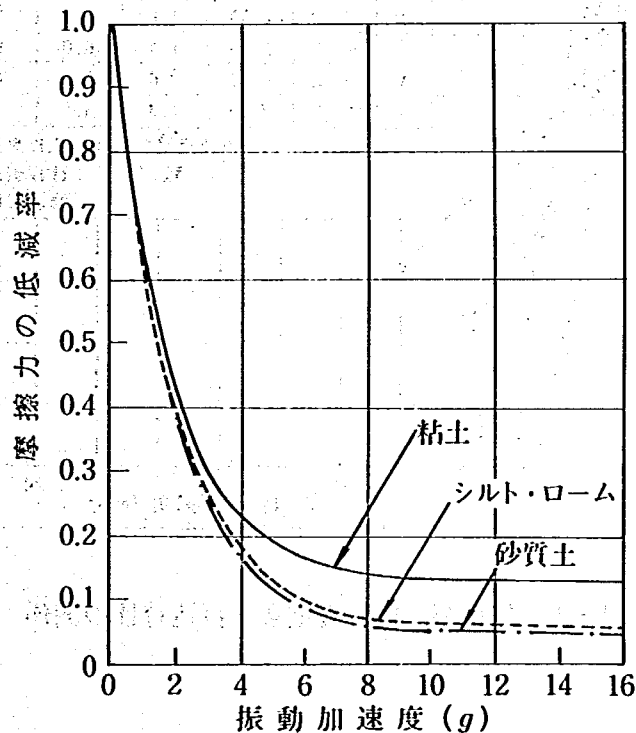


図-II・1・3 振動加速度と土の摩擦力の低減率

度まで減少するが、どちらの場合も振動加速度が $10g$ を越えるとその後の減少は微々たるものであるとされている。

また、振動杭打工法を成立させる第2番目の要因は、杭の振幅であり、これが地盤の弾性変形量よりも大きくなければならないとされている。この振幅の大きさは土質の種類、地盤の硬さ（通常N値）に関係し、最小必要振幅 A_0 として砂質土では $A_0 = \sqrt{0.8N + 1}$ 、粘性土では $A_0 = \sqrt{1.6N + 1}$ なるものが発表されている。（ただし、Nは杭先端地盤の標準貫入試験値である。）

第3番目の要因としては、杭打機の重量であり、杭の断面積、杭先端地盤のN値に対応したものが必要とされている。以上が従来の振動杭打工法で定説となっている基礎理論である。一方、高周波の振動杭打機と従来形杭打機との相違は、基本的には杭を加振する周波数が高いか低いかだけであることから、前述の振動杭打工法で要求される条件を満たすことが、高周波杭打工法を成立させるための必要条件であると考えた。

(2) 確認実験

前述の貫入理論の検討結果を踏まえて高周波振動を利用して杭の打込みが可能であるか否か、また、杭振幅と杭打機重量が杭打性能に対してどのように影響するかを調べるために、実際に従来形杭打機と超高周波杭打実験機を用いて、打込特性の確認実験を行った。この実験結果を図-II・

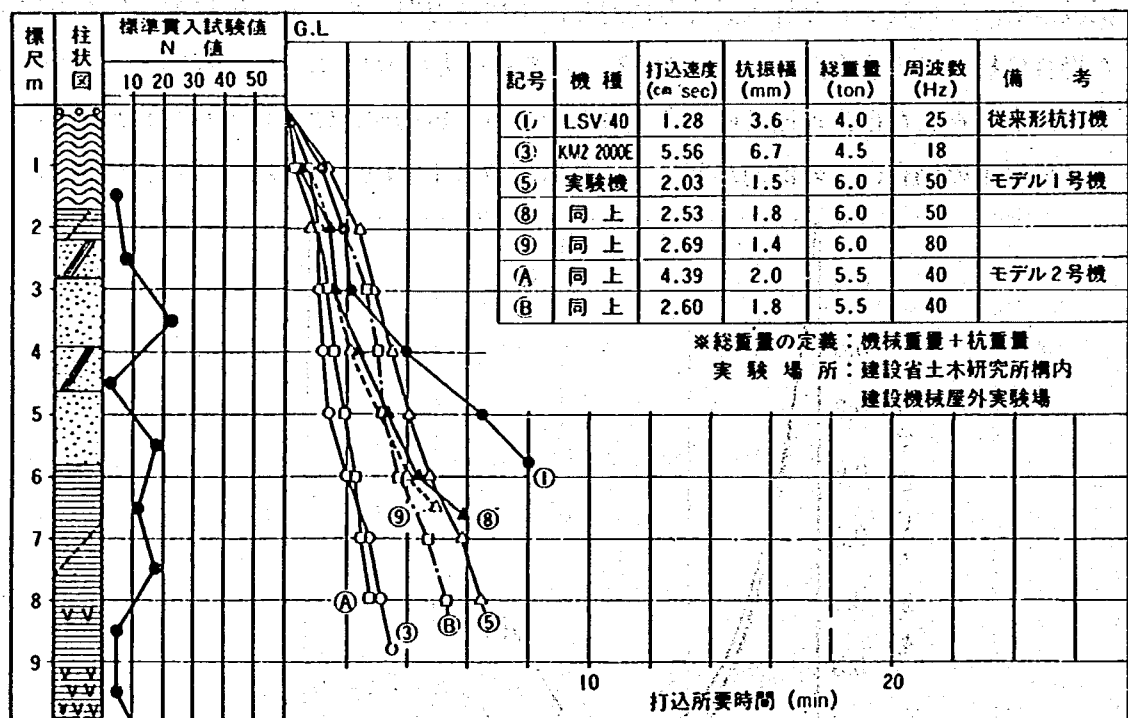


図-II・1・4 杭振幅、杭打機重量と打込特性の関係

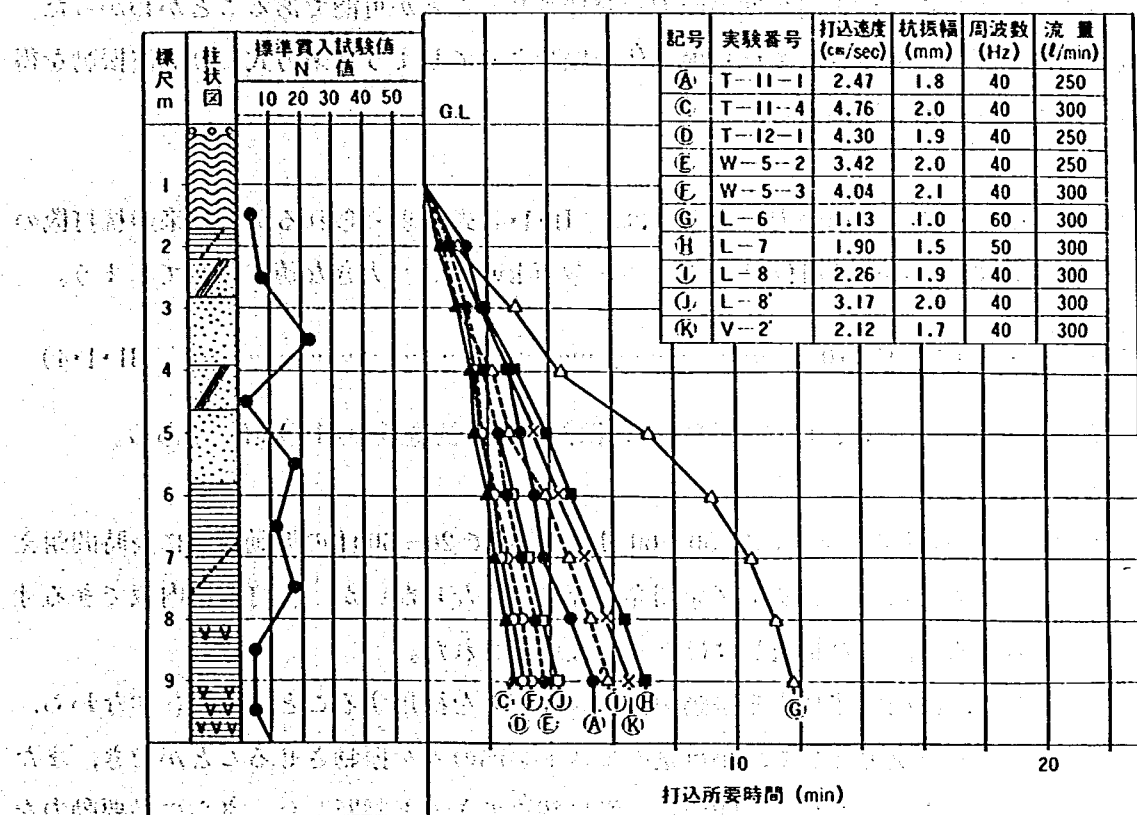


図-II・1・5 杭振幅と打込特性の関係

1・4, 図-II・1・5に示す。図-II・1・4は、杭振幅と重量の異なる4種類の杭打機による実験結果であり、これを杭振幅 $A(\text{mm})$ と杭打機重量 $Q(\text{tf})$ を変数に、杭深度 6 m までの平均打込速度 V (cm/sec) との関係重回帰直線式によって求めると (II・1・2) 式となる。

$$V = -7.51 + 0.94 A + 1.5 Q \quad (r \approx 0.8) \quad \text{..... (II・1・2)}$$

これからもわかるように、杭の打込速度は杭振幅のみではなく、杭打機重量にも関係しており、両者の組み合わせで、決定されている。なお両者単独での関係については、やはり杭振幅の方が高い相関を持っていることも確認されている。図-II・1・5は、超高周波杭打実験機で杭振幅を変化させて打込みを行った結果であり、これを杭振幅 $A(\text{mm})$ を変数に、杭深度 9 m までの平均打込速度 V (cm/sec) との関係を一次回帰式で表わすと (II・1・3) 式となる。

$$V = -2.12 + 2.84 A \quad (r \approx 0.8) \quad \text{..... (II・1・3)}$$

以上のことから、杭打機重量を約 5 tf とすれば、杭振幅は 1 ~ 2 mm でも杭打機として、十分成り立つと考えられた。

2.3 開発の基本方針

以上のことから明らかになったように、高周波振動を利用することで地盤振動はかなり低減で

き、杭打性能についても従来形と同程度の能力を発揮させることが可能であることがわかった。しかし、機械的に起振力を発生させて杭打機全体を振動させてしまう従来方式で高周波振動を得ようすると以下に述べる問題がある。

(1) 必要動力

杭打機を駆動させるための必要動力の大きさは、(II・1・4)式で求められるが、従来形杭打機の諸元を代入して、周波数を 50~60 Hz まで上げると数百 kw という大きな値となってしまう。

$$W_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{Q_0}{980} \cdot A^2 (2\pi f)^3 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (II \cdot 1 \cdot 4)$$

ただし、 W_0 ：必要動力 (kw)、 Q_0 ：杭打機の起振部重量と杭重量の和 (kgf) である。

(2) 軸受部の耐久性

現在、製品化されているベアリングには 50~60 Hz の高速で 20~30 tf の振動荷重に長時間耐えるものはない。このため新たにベアリングを開発しなければならないが、杭打機に内蔵できる寸法、重量の限界を考えると、この見通しはほとんどないとされた。

この解決方法として、油圧で作動する振動アクチュエータを採用することとした。すなわち、この方式ではシリンダ側を反力として、小重量のピストン部のみを振動させることができ、また振動荷重を軸受部で受けることもなく、問題は一挙に解決できると判断した。さらに必要動力を下げるために、振幅も多少小さくし、これによる杭打性能の低下分は杭打機の起振部以外の重量(シリンダや反力ウェイト等)を増大させて、この押込力でカバーすることとした。

3. 超高周波杭打機的设计, 製作

最終的に実用機を想定して設計、製作した超高周波杭打機の仕様を従来形杭打機と比較して表 II・1・1 に示す。この仕様に基づいて製作した杭打機の断面図を図 II・1・6 に、作動原理構造図

表-II・1・1 主要諸元比較

機 種		超 高 周 波 杭 打 機	従 来 形 振 動 杭 打 機 (KM2-2000E)
諸 元 名 称			
起 振 力	ton	0 ~ 25	28.3
動 力 源	PS	油圧ユニット 250kg/cm ² , 300 l/min (エンジン馬力) 220PS	ディーゼル発電機容量 120KVA (エンジン馬力) 180PS
無 負 荷 時 の 振 幅	mm	4.8 ~ 1.7 (20 ~ 60Hz)	7.6
回 転 数 (周 波 数)	rpm (Hz)	1,200 ~ 3,600 (20 ~ 60)	1,100 (18.3)
機 械 重 量 (起 振 部 重 量)	Kgf	5,500 (700)	3,334 (2,770)
全 高	mm	2,766	2,868
全 幅		1,130	1,176

を図-II・1・7に示す。杭打機の作動原理，特長については以下の通りである。

3.1 作動原理（図-II・1・7を参照）

- ① 振動シリンダの上下へ交互に高圧油 P を送り込むことで，ピストンロッドを振動させる。
- ② 振動数の調整は，回転形切替弁を駆動するための油圧モータの回転数を変えることにより行う。
- ③ 油圧モータの回転数制御は，電気油圧サーボ弁により油圧の流量調整で行う。
- ④ 電気油圧サーボ弁は，回転数指令電圧と回転形切替弁の駆動軸に取付けたタコメータジェネレータのフィードバック電圧により高精度で制御される。
- ⑤ 振幅の調整は，高圧油 P の流量を変えることにより行う。
- ⑥ ピストンが振動中心からドリフトした場合は，これを修正するために定位シリンダへ高圧油 P' を送り込み，常にピストンは振動中心へ押戻される。

3.2 特長

- ① 振動数は，20 Hz から最高 60 Hz までの範囲で，遠隔操作により任意に設定できる。
- ② 出力は，負荷に応じて油圧ポンプからの供給流量を遠隔操作で 2 段階（250, 300 l/min）に調整できる。
- ③ ①～②の特性を利用することで，地盤条件，周囲の環境条件に合わせた最適振動数，出力で杭打ちが行える。

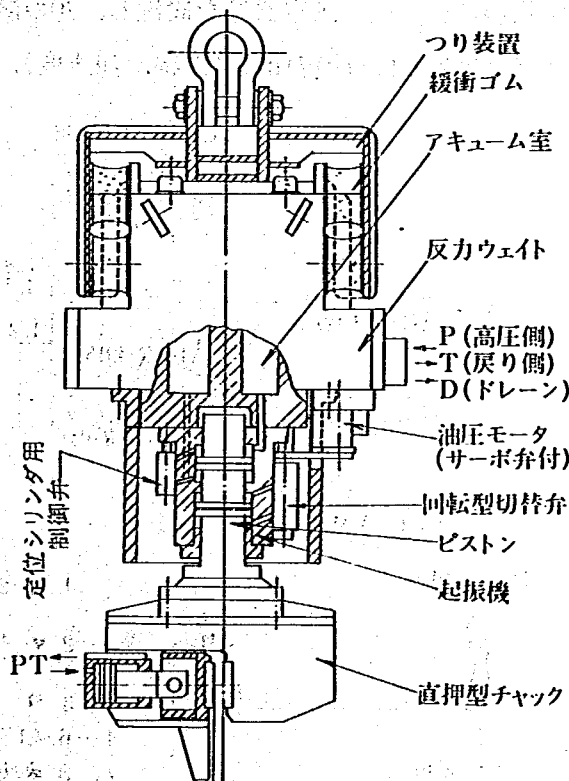


図-II・1・6 超高周波杭打機の断面図

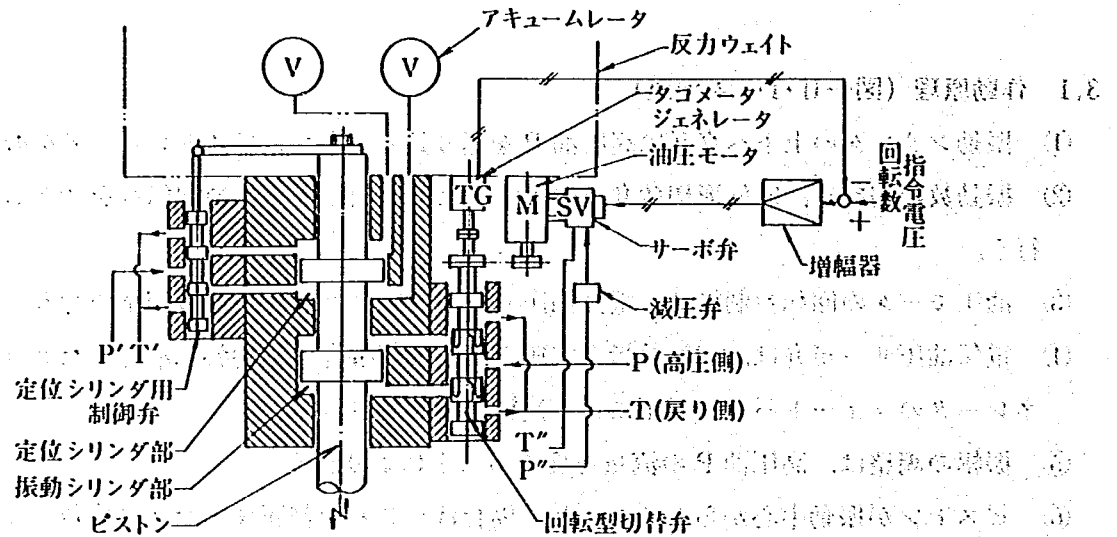


図-II・1・7 作動原理構造図

4. 超高周波杭打機の性能

杭打機の性能把握は、③杭打機の基本性能試験、⑥杭の打込み性能試験の2種類について行った。

試験は、図-II・1・8に示す状態に杭打機、測定器等を設置し、③の試験は油圧ユニットからの供給流量を変えて打込深さ毎の周波数と杭打機の出力(振幅、加速度)、騒音、地盤振動の関係を

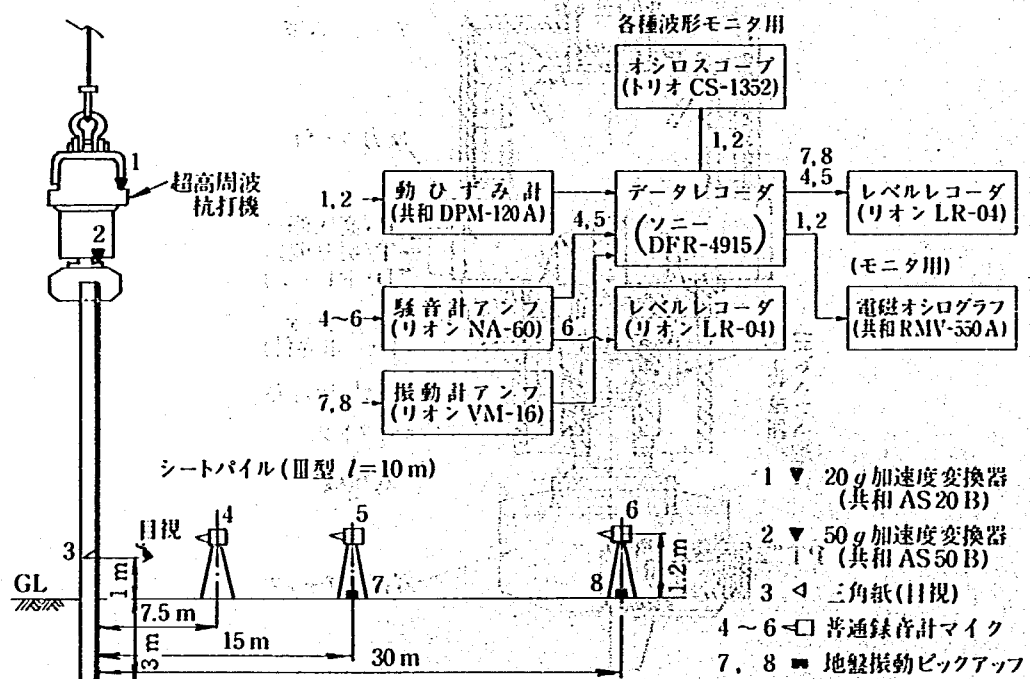
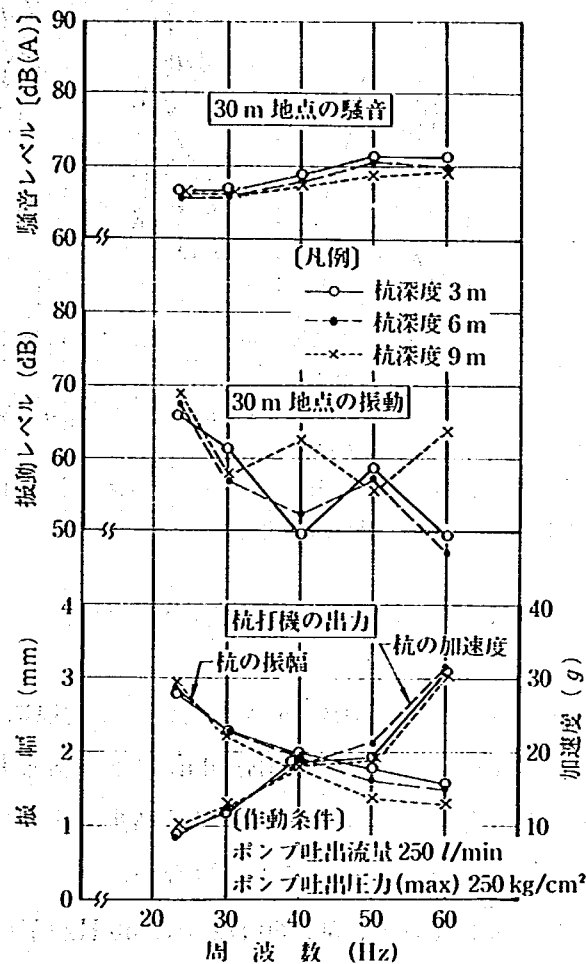


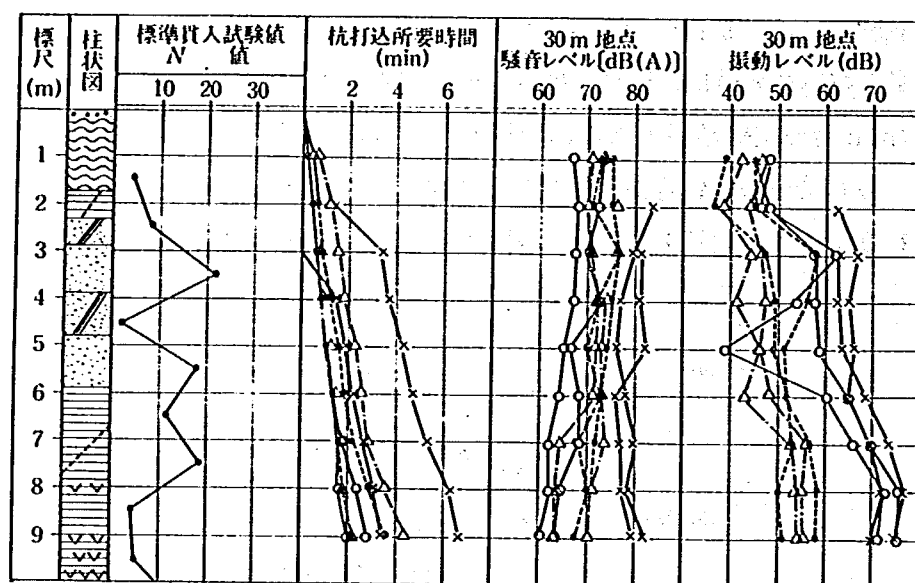
図-II・1・8 試験状況説明図

調べた。⑥の試験は、主に杭打性能をみるために、単独打ち、セクション打ちで杭を打込み、周波数、供給流量と打込所要時間、騒音、振動等の関係を調べた。図一Ⅱ・1・9は、⑥の代表的な供給流量 250 l/min 時の試験結果である。周波数と杭打機の出力の関係は、理論的に求められる計算結果とはほぼ一致している。騒音は、周波数に比例して増大する傾向にあり、50～60 Hz では 70 dB(A)/30 m 程度であり、打込み深さとの関係では、深い程低下する傾向が認められる。



図一Ⅱ・1・9 超高周波杭打機の基本性能

地盤振動は、打込み深さが 6 m までであれば、ほぼ理論通り、高周波になる程低減している。一方、打込み深さが 9 m になると 40 Hz、60 Hz の場合は急激に増大しており、60 dB/30 m を越えている。このように、振動に関しては、全体的には高周波振動による低減効果は認められるものの、打込み深さとの関係でかなり変動することがわかった。図一Ⅱ・1・10 は⑥の試験例であり、これは供給流量 300 l/min (最大出力) で周波数 40、50、60 Hz についてセクション打ちを行ったものである。また、比較のために以前に同一場所で行った超高周波杭打機と同等規格と思われる従来形杭打機 (KM 2-2000 E) の単独打ちデータも併記した。杭の打込み能力は、周波数による差はほとんど認められず、杭深度 9 m までを 2～4 分で打込んでいる。騒音は、40 Hz が 70～60 dB(A)/30 m であり、50、60 Hz では 75～65 dB(A)/30 m の範囲で変動しているものの、従来形よりは 5 dB(A) 程度小さい結果となっている。振動は、50、60 Hz の場合に 40～60 dB/30 m の範



凡例表

記号	杭打機名	周波数	流量	打込条件	起振力	機体重量
○—○	超高周波杭打機	40 Hz	300 l/min	セクション打	0~25 tf	5,500 kgf
△—△		50 Hz				
●—●		60 Hz				
×—×	従来型振動杭打機	18 Hz	—	単独打ち	28.3 tf	3,334 kgf

実験場所：土木研究所構内建設機械屋外実験場

図-II・1・10 超高周波杭打機の杭打性能

囲で打込みを完了しており、従来形の 60~75 dB/30 m と比較して大幅に小さくなっている。しかし、40 Hz では、打込み深さが浅い時点ではほぼ 60 dB/30 m 以下であるものの、杭深度が 6 m 以深では、従来形とほとんど同じ値を示している。以上の試験結果をまとめると次のようになる。

- ① 杭打能力は、同等規格の従来形杭打機に劣ることはない。
- ② 騒音は、周波数に比例して大きくなり、50, 60 Hz では 40 Hz 時より 5~10 dB(A) 大きい 65~75 dB(A)/30 m である。
- ③ 振動は、打込み深さによって大きく変動するものの、50, 60 Hz であれば、ほぼ 60 dB/30 m 以下であり、同等規格の従来形杭打機より 10~15 dB は低減している。

5. 今後の課題

以上、土木研究所構内での試験結果から判断すると、超高周波杭打機の性能は、打込能力、振動、騒音の何れも、従来形杭打機より優れていることから、所期の目的はこの段階で達成できたと考える。しかし、実用化させるには、各種地盤への適応性や杭打機としての信頼性を確認する必要がある。このため第1回目の試験施工を建設省の直轄現場（霞ヶ浦護岸補強工事）で実施したが、引続き数現場での試験施工を重ねて、超高周波杭打機の施工方法等を確立させしだい、一般に広く普及させたいと考えている。

II-2 共振杭打機の研究開発

1. ま え が き

共振杭打機とは、100 Hz 前後の高周波振動で杭頭部を加振して、杭体に縦波共振を発生させ、この振動で杭周面及び先端の地盤を緩めて杭を打込むものである。

杭打ち時に発生する高周波の地盤振動は、地盤を伝播する過程での内部減衰効果が著しく、杭打ち場所から少し離れると、ほとんど問題にならないまでに減衰してしまうことから、振動対策面で非常に有効な杭打機であると考えられている。

共振杭打機は、既に 22 年前 (1960 年) 米国で BRD-1000 と称されるものが製作され、一時期欧米でかなりの施工実績を上げたが、機械的なトラブルが多発し、この対策ができなかったためか、最近の施工報告はほとんど聞かれていない。トラブルの主な原因としては、杭打機の起振方式にあると言われている。

既ち、BRD-1000 は偏心体を高速で回転させることで大起振力を得ているが、この方式では偏心体を支える軸受部や動力伝達装置にも変動荷重が作用するために、疲労による破壊が問題となってしまう。

国内における共振杭打機に関する主な研究開発例としては、10 年前 (1972 年) BRD-1000 が輸入され、建設機械メーカーが建設省の研究補助金を受けて、性能試験を 2 年間にわたって行っている。この試験でも、機械のトラブルが何回か発生したため、共振杭打工法が、我が国の地盤でも適用できるか否かの結論を得る前に中止され、以来 BRD-1000 は幻の杭打機となってしまった。

しかし、当時、国内における杭打工事をとりまく環境は、振動、騒音公害問題の真っ只中であり、ディーゼルハンマに替わる低振動、低騒音形杭打機の出現が強く望まれていた。

このため、耐久性の優れた共振杭打機の開発を目指した研究開発が再度、企業や大学等で数多く試みられたものの、その多くは結論が出せないまま中断、あるいは中止されてしまっている。

一方最近では、油圧制御技術の進歩により、偏心体を回転させない油圧振動アクチュエータ方式でも、高周波の起振力を得ることが可能となったため、土木研究所においては、この油圧起振方式を利用した共振杭打機の開発可能性について数年間研究したので、ここに、その結果を報告する。

2. 杭の共振特性

振動を利用して杭を打込むには、杭先端部の振幅が地盤の弾性的に変形できる変位限界を上回る必要がある。

したがって、共振杭打工法が成立するか否かも、一般に N 値 30 前後の地盤で 1 ～ 2 mm と言われているこの変位限界値以上の振幅を、杭先端部に発生できるかどうかで決まると考えられるので、まず共振時の杭の挙動について調べる。

2.1 杭の共振モデル解

共振杭打ち時の力学モデルを図-Ⅱ・2・1 のように設定し、杭頭部を $F = F_0 \sin \omega t$ なる力で加振

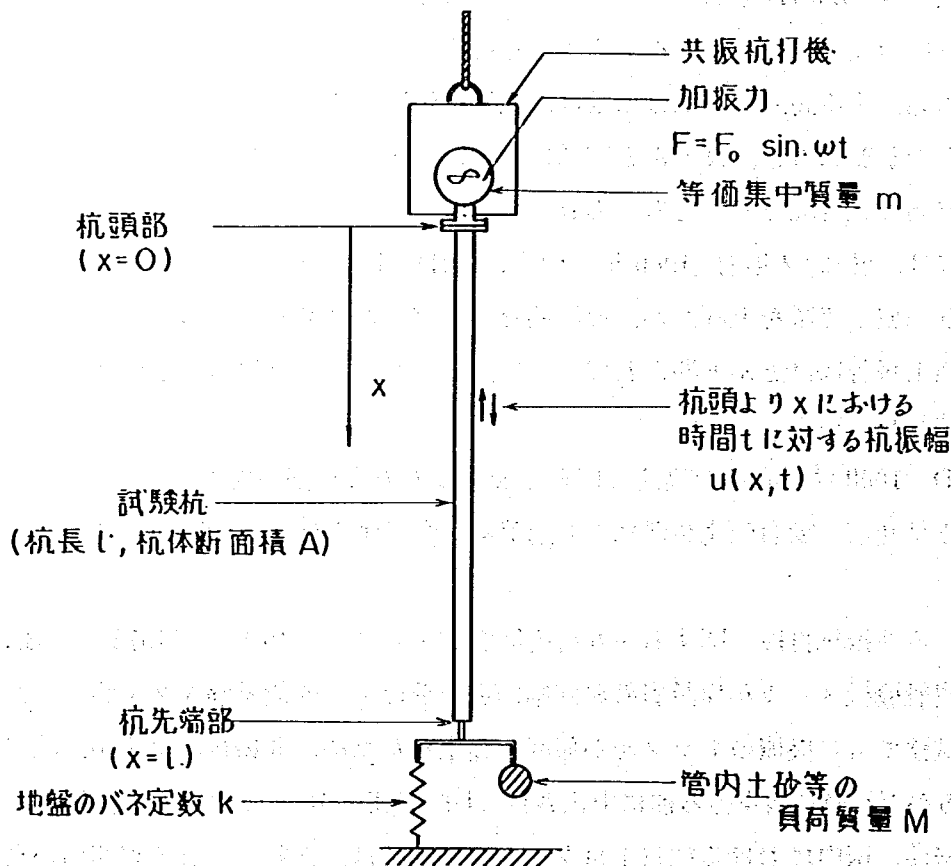


図-Ⅱ・2・1 共振杭打ちの力学モデル

させた時の杭各部の応答を調べる。なお一般に、振動杭打ち時における周面摩擦力は、無視できるまでに減少するとされているので、杭側の負荷としては、杭先端部の管内閉塞土砂等の質量負荷と地盤のバネ負荷のみを考慮することとし、粘性負荷及び乾性摩擦負荷については、現象解明が複雑化するので省略した。

ここで、杭体を伝わる縦波の波動方程式は、次式で示される。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{V_c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad V_c = \sqrt{\frac{E \cdot g}{r}} \quad r: \text{杭の単位体積重量}$$

このモデルの杭頭部（ $x=0$ ）と杭先端部（ $x=l$ ）における境界条件は、(Ⅱ・2・1)、(Ⅱ・2・2)

式でそれぞれ示すことができ、この最終解は、(II・2・3) 式として求められる。

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + AE \frac{\partial u}{\partial x} = F_0 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (II \cdot 2 \cdot 1)$$

(x=0)

$$M \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + Ku + AE \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (II \cdot 2 \cdot 2)$$

(x=ℓ)

ただし、

F：杭打機に加振力 (tf) であり、 $F = F_0 \sin \omega t$ とする。

m：杭打機のチャック等の質量を等価させた集中質量(t)である。

u：杭頭部から x(m)の時間 t(s)における変位量(m)であり $u = u(x, t)$ とする。

A：杭材の断面積(m²)

E：杭体のヤング率 鋼材とし $E = 2.1 \times 10^7$ (tf/m²) とする。

M：杭先端部の閉塞土砂等の負荷質量(t)

K：杭先端部に作用する地盤のバネ定数 (tf/m)

ω：加振角振動数 $\omega = 2\pi f$ (rad/s)

$$u(x, t) = \beta \sin\left(\frac{\omega_n}{V_c} x + \phi\right) \sin(\omega_n t + \psi) \\ + \frac{F_0 \cos\left(\frac{\omega}{V_c}(x - \ell) - \tan^{-1} \frac{V_c(M\omega^2 - K)}{AE\omega}\right) \sin \omega t}{\omega \sqrt{\left(\frac{AE}{V_c}\right)^2 + m^2 \omega^2} \sin\left(\frac{\omega \ell}{V_c} + \tan^{-1} \frac{V_c(M\omega^2 - K)}{AE\omega} - \tan^{-1} \frac{V_c m \omega}{AE}\right)} \quad \dots\dots\dots (II \cdot 2 \cdot 3)$$

ただし

V_c：杭体の応力伝搬速度 鋼材とし $V_c = 5.1 \times 10^3$ m/s とする。

ω_n：杭の固有角振動数 $\omega_n = C \frac{\pi \cdot V_c}{2\ell}$

φ・ψ・β：定数

(II・2・3) 式の第1項は、いわゆる自由振動項であり、通常は時間の経過に伴って減衰してしまう。

第2項が加振力に応答する強制振動項であり、これによって杭体の振幅モードを知ることができる。

しかし、この解は杭打機出力特性を力発生機とし、振動数に関係なく常に、一定の加振が得られるものとして求めてあるが、起振機に油圧式振動アクチュエータを使用すると、以下の補正が必要となる。既ち、杭打機が実際に発生できる振幅の大きさは、油圧ポンプからの供給流量とアクチュエータのピストン受圧面積との関係から決まる (II・2・4) 式の値を上回ることができない。

$$u_p = \frac{Q}{24sf} \quad \dots\dots\dots (II \cdot 2 \cdot 4)$$

ただし

u_p : アクチュエータの出力振幅(m)

S : アクチュエータのピストン受圧面積(cm^2)

Q : 油圧ポンプからの供給流量 (l/min)

f : 加振振動数 ($1/\text{s}$) であり, $f = \omega / 2\pi$ の関係にある。

したがって, (II・2・3) 式で求められる杭頭部の振幅 $u(0, t)$ の最大値は常に, (II・2・4) 式で与えられるアクチュエータの出力振幅 u_p を下回っていなければならないことを考慮すれば, 実際に杭各部に発生する振幅 $\bar{u}(x, t)$ は, (II・2・5-a), (II・2・5-b) 式で与えられる。

$u(0, t) \leq u_p$ ならば

$$\bar{u}(x, t) = u(x, t) \dots\dots\dots (\text{II} \cdot 2 \cdot 5 - a)$$

$u(0, t) > u_p$ ならば

$$\bar{u}(x, t) = \frac{u_p}{u(0, t)} u(x, t) \dots\dots\dots (\text{II} \cdot 2 \cdot 5 - b)$$

2.2 波動方程式による数値解析

ここでは, 後述する共振杭打実験 (モデル実験) で使用する杭打機, 試験杭等の諸元値を下記のごとく定め, (II・2・3), (II・2・4), (II・2・5) 式で数値解析を行う。

a. 杭打機の諸元

起振力 $F_0 = 28 \text{ tf}$

ピストン受圧面積 $S = 100 \text{ cm}^2$

油圧ポンプの供給流量 $Q = 300 \text{ l/min}$ ($P = 280 \text{ kgf/cm}^2$ 時)

b. 試験杭の諸元 (一般構造用炭素鋼鋼管)

杭体断面積 $A = 5.35 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ($\phi = 216, t = 9$)

杭長 $l = 12 \text{ m}$

c. その他

㊦ 杭打機と杭の接合は軽量化を図るため, フランジ接合とし, これらの等価集中質量 m の値としては, $0.001 \text{ tons}^2/\text{m}$ を採用する。

㊦ 杭の長さ l は, ピストンやフランジ部等の長さも考慮し, 補正杭長 2 m をプラスの 14 m として計算する。

(1) 杭を宙吊りにした時の計算結果

杭を空中に吊した状態 (図一II・2・1中の, 杭先端部の負荷をすべて0とした時) での杭頭部, 杭先端部に発生する振幅の最大値を求めた結果を図一II・2・2に示す。

杭先端部に着目すると, $50 \sim 70 \text{ Hz}$ で 3 mm の振幅が得られ, それ以上の振動数では減少し始め, $100 \sim 130 \text{ Hz}$ の間で約 2 mm である。 140 Hz 付近では多少増大するものの, 余り大きくならない。しかし, アクチュエータの振幅限界よりは常に大きく, かつ杭頭部の振幅と比較すると著

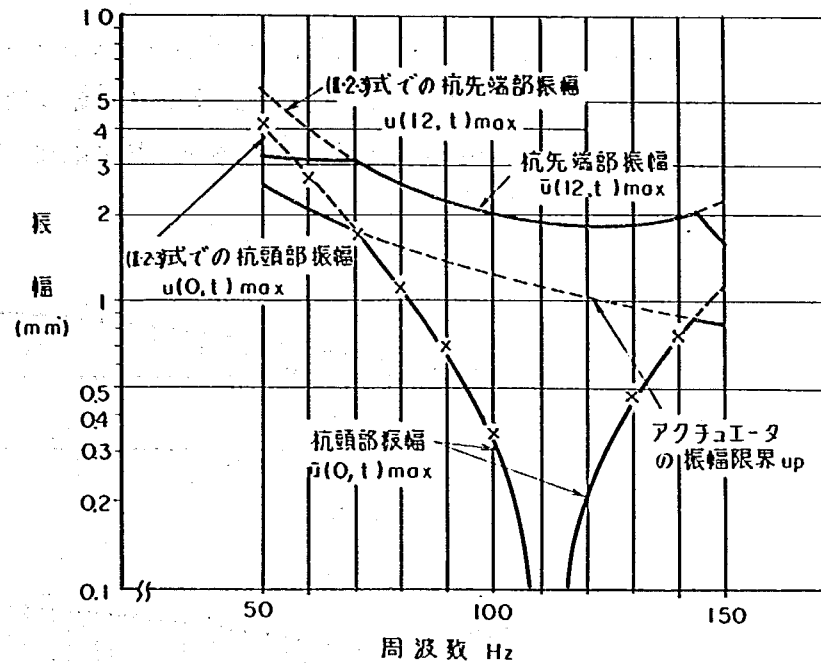


図-II・2・2 杭頭部と杭先端部の振幅

しく増幅している。この増幅度合を調べたのが図-II・2・3であり、100～120 Hz の間で杭先端部には杭頭部の 10 倍以上もの振幅が発生している。

(2) 杭の打込時を想定した計算結果

打込み時に杭先端部へ作用すると考えた負荷質量及びバネ負荷が、杭の共振に与える影響を調べた。まず、バネ負荷については、杭先端部の振幅が小さいため、ほとんど影響を与えないばかりか、逆に質量負荷の影響を軽減することが事前の調べでわかっているので、ここでは、負荷質量の大きさと杭の振動モードの関係について述べる。

図-II・2・3 より、今回のモデルにおける共振振動数はほぼ 110 Hz であるとし、この時の杭の振

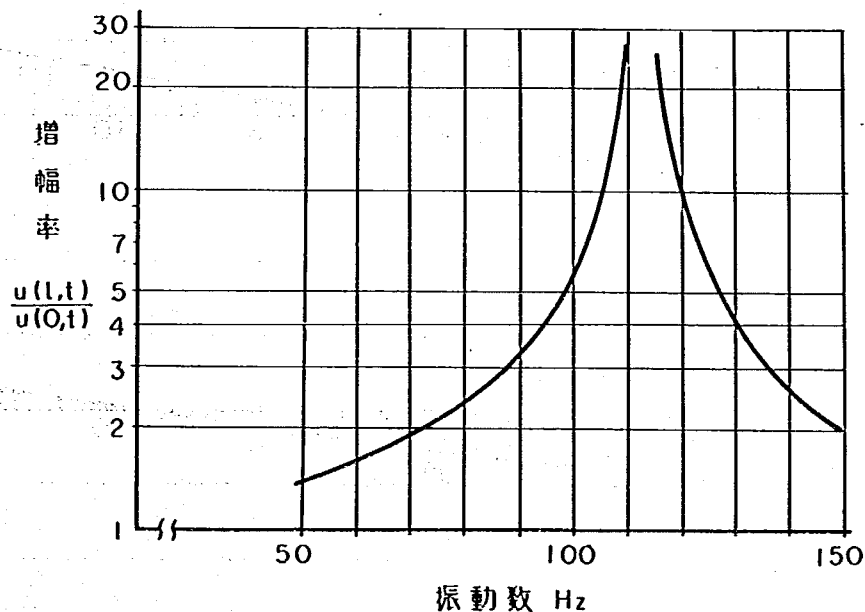


図-II・2・3 杭頭部と杭先端部振幅の増幅率

動モードを求めたのが図-II・2・4の①である。これに対し、負荷質量を増大させると図中の②～⑤のごとく振動モードは変化し、負荷質量が増大するにつれて杭先端部の振幅は減少し、逆に杭頭部の振幅が増大し始め、質量が $0.01 \text{ tons}^2/\text{m}$ (約 0.1 tf)を超えると、杭先端部の振幅は約 2 mm を維持できなくなることがわかる。

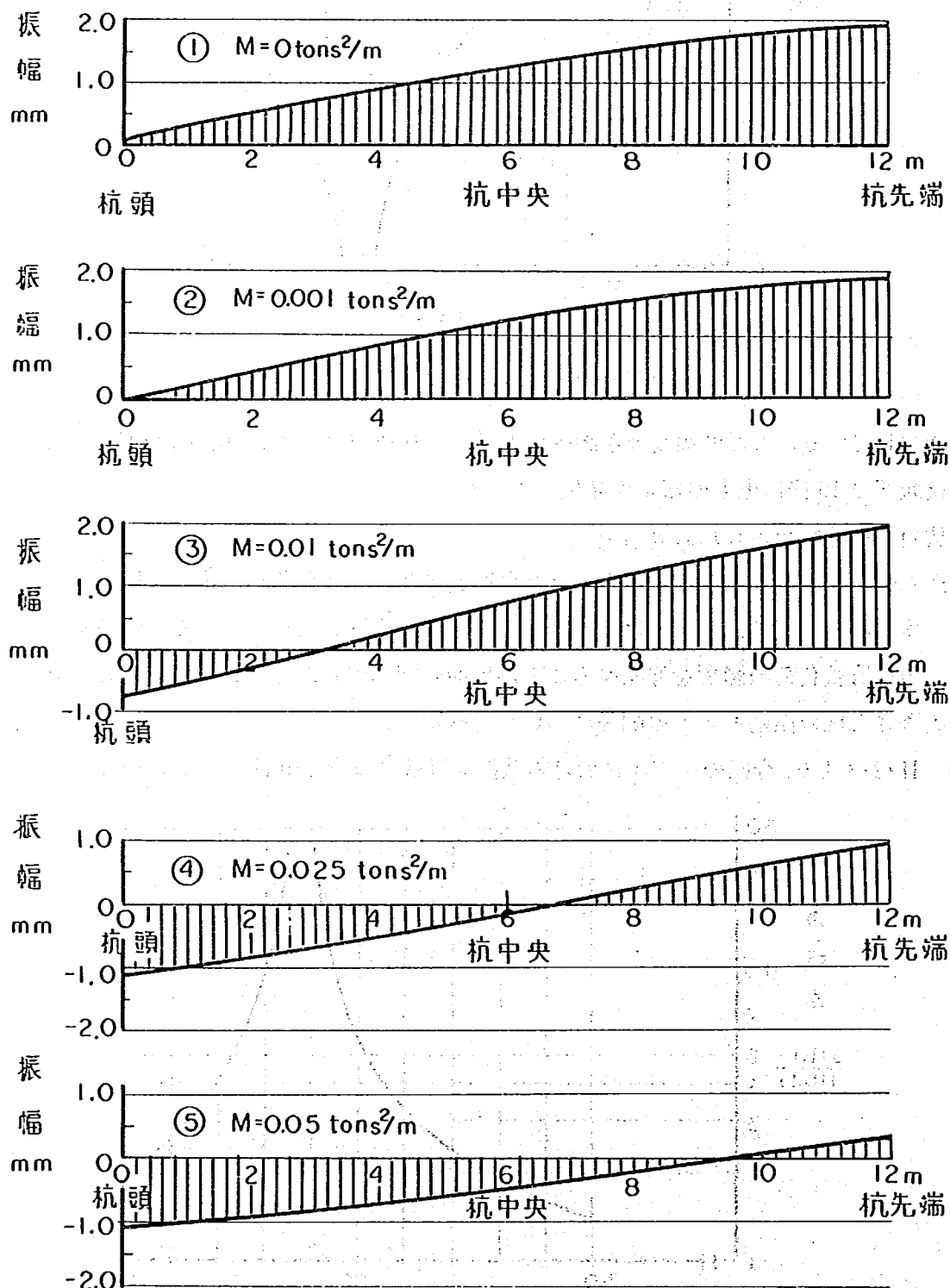


図-II・2・4 杭先端の負荷質量と振動モード (振動数 $f = 110 \text{ Hz}$)

注) 図の表示方法は杭各部の振動量(伸び縮び量)をY軸に示している。

次に図中の④のごとく杭先端部の負荷質量 $0.025 \text{ tons}^2/\text{m}$ (約 0.25 tf) を受けてくずれた振動モードが、振動数を変えるとどうなるかを調べたのが図-II・2・5である。図中③は、図-II・2・4の④の状態であり、②、①のごとく周波数を 130, 150 Hz と高めても、杭先端部の振幅を回復させることはできず、逆に減少してしまう。一方、④、⑤のごとく振動数を下げていくと、杭頭部の振幅は減少し始め、逆に杭先端部の振幅が増大し、70 Hz ではほぼ完全な共振モードを再現できる。以上のことから、共振を利用して杭の打込みを行う場合、加振振動数は、杭先端部の負荷条件に合わせて設定しなければならないことがわかる。

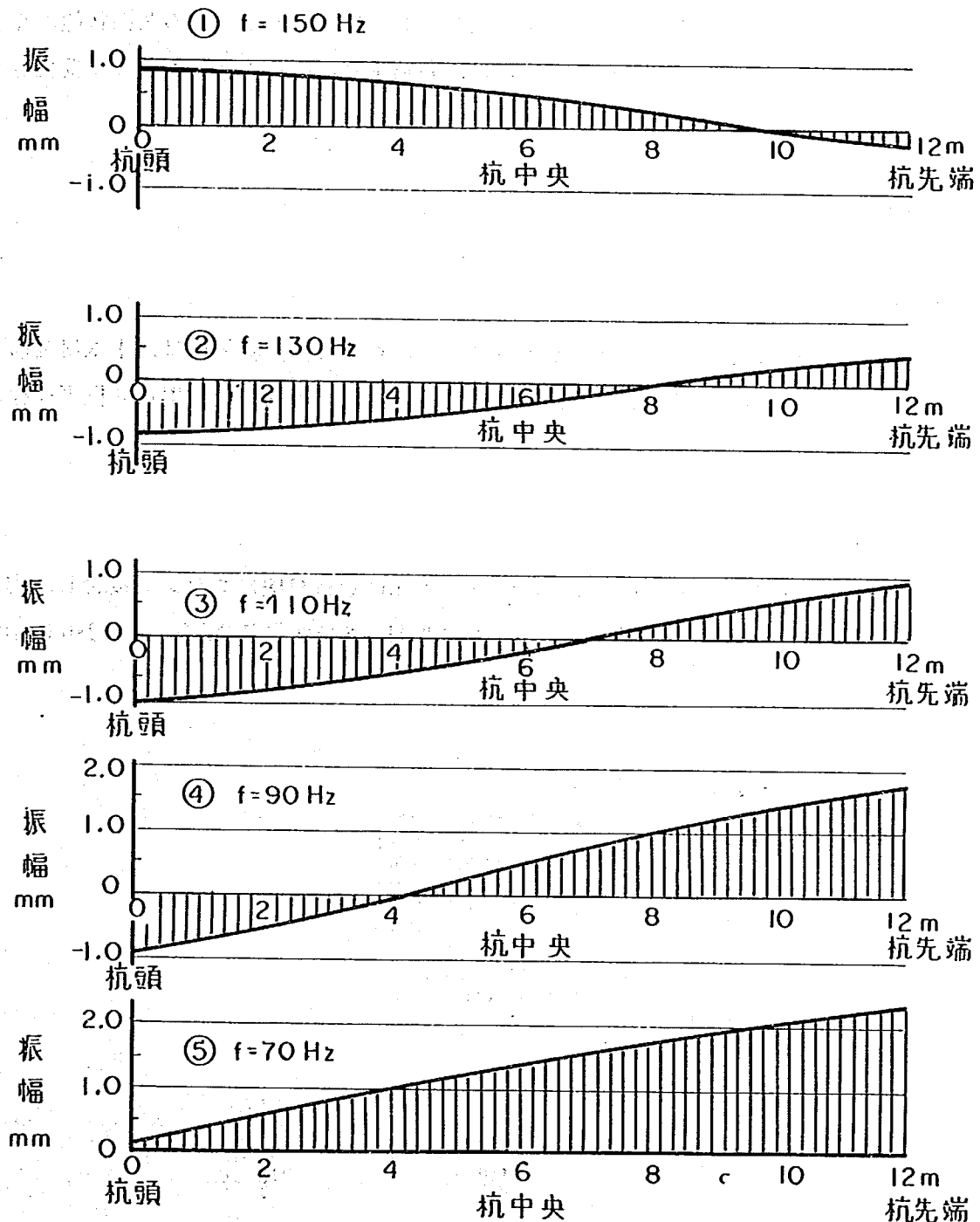


図-II・2・5 振動数と振動モード
(杭先端負荷質量 $M = 0.025 \text{ ton s}^2/\text{m}$)

(3) 数値解析結果のまとめ

- ① 杭頭部の等価質量 m を小さくした今回の共振モデルでも、これまで言われた通り、 $1/4$ 波長モードの共振振動数 ($f = Vc/4l$) 付近で図-II・2・3に示したように、確かに共振状態が得られ、杭先端部に杭頭部よりかなり大きな振幅を発生できる。

この現象を利用するのが共振杭打機の基本的原理であり、杭打能力が、杭先端部の振幅量に一義的に支配されるとすれば、杭頭部を微小振幅で加振することで、杭先端部の振幅を増幅させて杭を打込むことができることになる。

- ② しかし、杭先端部にある限度以上の質量が負荷として作用すると、この共振状態はくずれてしまうので、共振状態を維持させるためには、負荷条件に応じて加振振動数を変化させなければならない。

3. 共振杭打実験

3.1 モデル実験

この実験は、前述の理論解析結果の検証を主目的として行った。実験場所は、土木研究所構内の建設機械屋外実験場であり、杭打機は前記II-1に報告した超高周波杭打機を共振形仕様へ改造して使用した。

(1) 実験内容等

① 杭の共振モード実験

前記2.2で説明した杭 ($\phi 216.3$, $t=8.2$, $l=12$ m) を杭打機にフランジ接合し、宙吊り状態で、振動数を 50 Hz から 10 Hz ステップで 130 Hz まで変化させ、図-II・2・6に示すよ

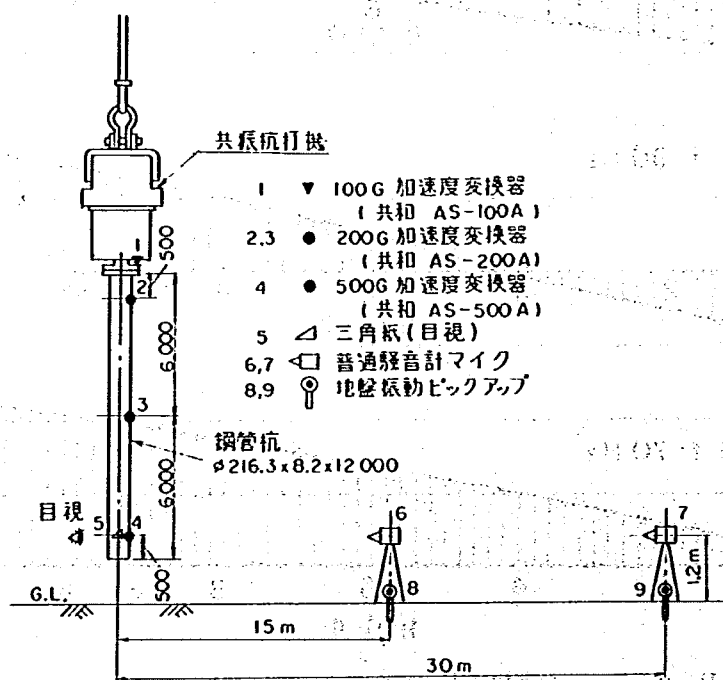


図-II・2・6 モデル実験の測定フロー

うな測定を行った。油圧ポンプの供給流量の設定は、200, 300 l/min の 2 通りとした。

② 共振杭打実験

共振モード実験結果から共振振動数を 120 Hz に決定し、この振動数で杭が貫入不能になるまで打込み、以後振動数を下げながら打込みを供給流量 200, 300 l/min の 2 通りについて行った。

(2) 実験結果と考察

① 杭の共振モード実験

図一Ⅱ・2・7 に杭先端部、杭頭部の振幅測定結果を図一Ⅱ・2・2 で求めた理論値と併記して示す。

杭先端部の振幅は、ほぼ理論値通りであり、杭頭部の振幅も 100~120 Hz で理論値を上回っ

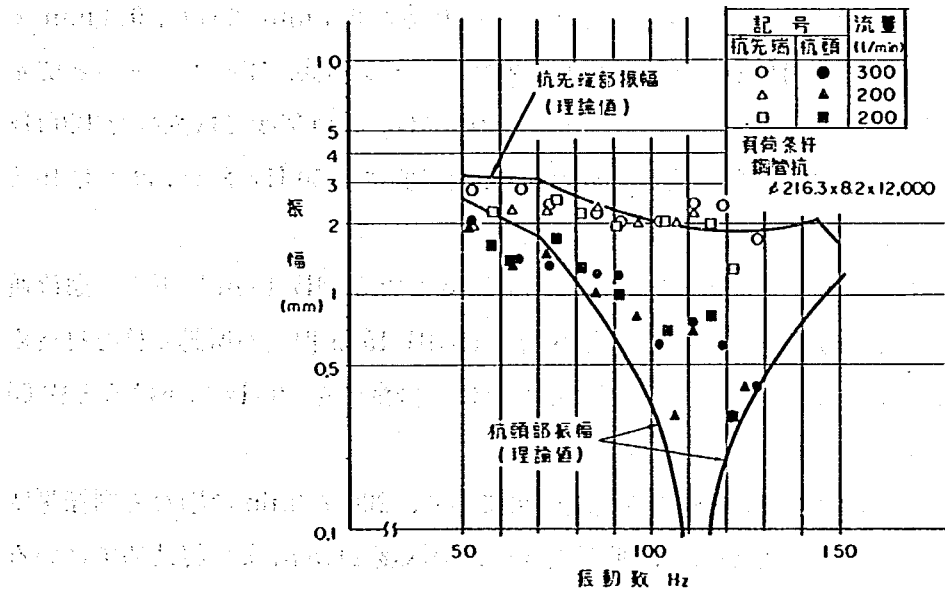


図-Ⅱ・2・7 杭宙吊り時での振幅測定結果

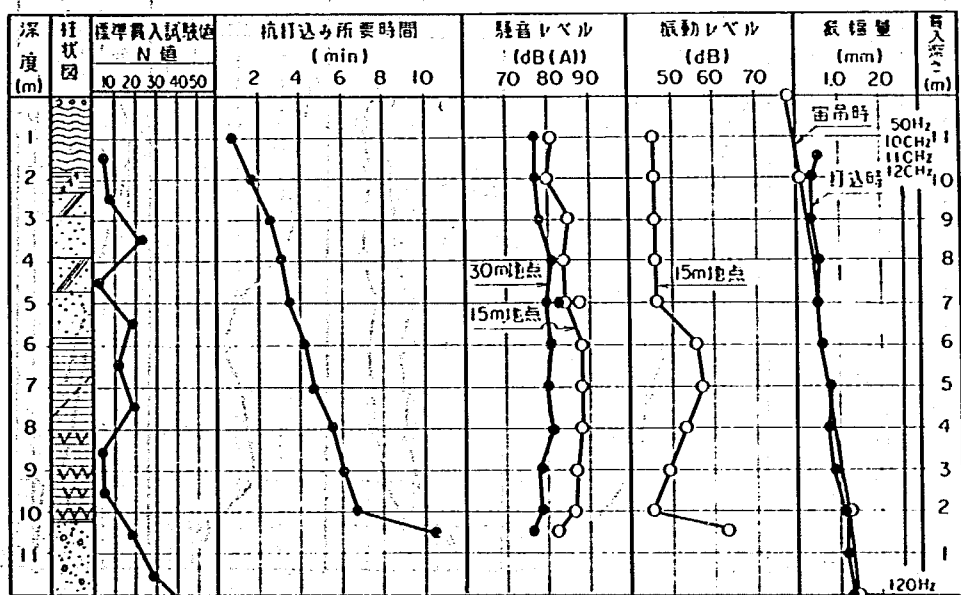


図-Ⅱ・2・8 共振打込実験結果 (供給流量 200 l/min 時)

ていることを除けば、杭先端部の振幅と同様に理論値に近い値が得られている。

なお、実験開始直後に杭先端部と杭中央部に取付けた加速度変換器のリード線が、振動により断線してしまったので、ここでは杭の振動モードを正確に把握することはできなかった。

② 共振杭打実験

図一II・2・8に供給流量 200 l/min での実験結果を示す。杭は深度 10 m まで一定速度で貫入し、それ以後で遅くなる。

ここまでの貫入深度毎に、地上部で三角紙を用いて計測した杭各部の振幅（測定方法は、図一II・2・6中の5による）の測定結果と、図中に示した宙吊り時の振動モード（理論値）を比較してみると、両者はかなり良く一致していることから、ほぼ完全な共振状態で杭は貫入していると考えられる。

しかし、深度 10 m では、杭頭から 2 m 点の振幅が宙吊り時の 0.1 mm に対し、0.4 mm まで増大している。これは、図一II・2・4で調べた①、②のモードから③、④のモードへと杭先端部が地盤に拘束されて移行したためと考えられる。実験では、この深度で振動数を 120 Hz から 110, 100 Hz へと下げることによって杭は貫入し続けたが、最終的には 50 Hz まで下げても 10.5 m 以深の打込みは不可能であった。

一方、地盤振動（振動レベル、以下同じ）は、深度 5 m まで 50 dB/15 m 以下と、期待通りの高周波振動による低減効果が著しく、それ以後でも 55 dB/15 m 程度の振動で杭を打込めるが、深度 10 m 付近では、共振モードを回復するために、振動数を 50 Hz に下げると約 65 dB/15 m まで大きくなっている。

図一II・2・9は、供給流量 300 l/min での実験結果であり、200 l/min の場合と同様深度 10 m から貫入状態は悪くなる。しかし、流量が大きいため深度 11.5 m まで打込めてはいる

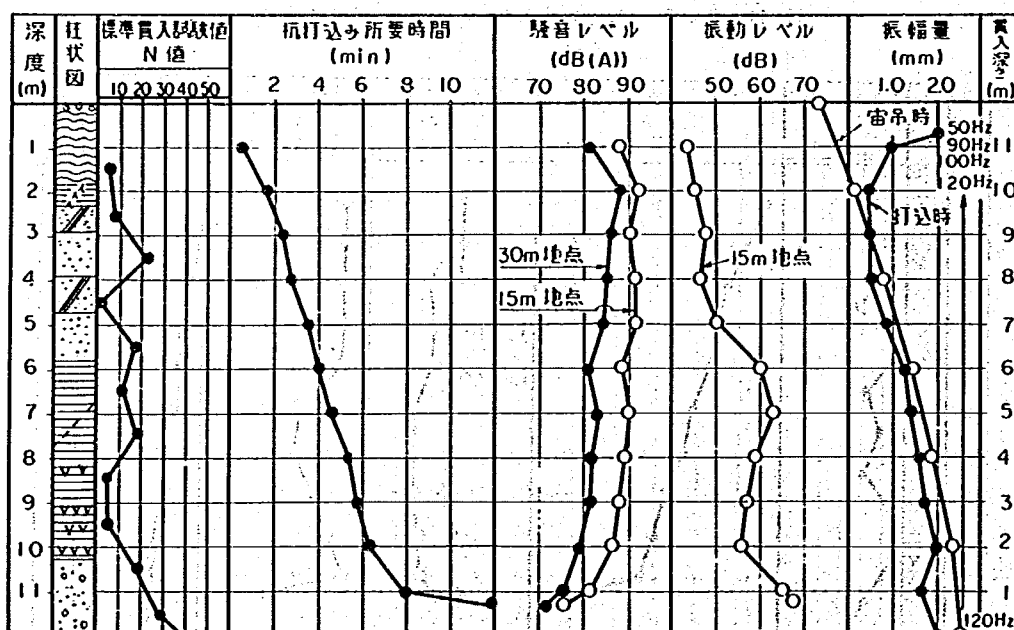


図-II・2・9 共振打込実験結果（供給流量 300 l/min 時）

ものの、N 値 30 以上の層への打込みは不可能であった。

③ モデル実験結果のまとめ

- a. 宙吊り状態で共振により杭先端部に発生する振幅は、ほぼ理論値と一致する。
- b. 深度10m付近では、杭を宙吊り状態で共振させたと同じモードのまま貫入するが、それ以深では、急激にこのモードはくずれてしまい、貫入速度は低下する。振動数を下げることで、多少回復させることはできるものの、深度11.5m以深への貫入は不可能であった。
- c. 共振杭打時の杭の挙動は、理論的にかなり良く説明づけられる。

3.2 実大杭の共振杭打実験結果

実際の杭打工事を想定し、実大杭を用いた共振杭打実験を、杭打機の起振特性、地盤条件を変えて数回実施した。このうち代表的な実験結果の一例を以下に報告する。

(1) 実験 I

この実験は、前述のモデル実験で使用した杭打機とほぼ同じ起振特性を持たせた（起振力は2倍としてある）杭打機を使用して、元土木研究所千葉支所の建設機械性能試験場（千葉市穴川）において実施した。

① 主な使用機械

① 共振杭打実験機（低インピーダンス形）

- ・起振振動数 50～150 Hz
- ・起振力 50 tf ($P=210 \text{ kgf/cm}^2$ 時)
- ・無負荷時振幅 0.5 mm (200 Hz 時), 2.5 mm (40 Hz 時)
- ・ピストン受圧面積 250 cm^2
- ・起振部重量 約 0.5 tf
- ・機械総重量 約 16 tf
- ・機械寸法 $1200(W) \times 2300(L) \times 2000(H)$

② 油圧ユニット

- ・ポンプ吐出量（最大） 800 l/min ($P=210 \text{ kgf/cm}^2$ 時)
- ・原動機出力（最大） 600IP

③ 試験杭 スパイラル鋼管 ($\phi 406.4$, $t=9$, $l=15 \text{ m} \times 2 \text{ 本継}$)

② 実験方法

下杭を 115 Hz で共振させて打込みを開始し、継杭の打込みは、その半分の振動数とするこを原則とした。測定項目等は、図一Ⅱ・2・10 の測定フローに示す。

③ 実験結果

図一Ⅱ・2・11 に打込実験結果を示す。下杭は深度 5 m, 10 m 付近で貫入速度が低下したため、共振させたままの状態に杭を上下させて、杭先端部に閉塞した土砂を排土してから深度 14 m まで連続的に貫入させた。次に、上杭を下杭に溶接後打込みを再開した結果、深度 20 m

までは2分たらずで貫入した。20 m以深から貫入速度は再び低下し、最終根入長29 mまでに約10分を要した。これまでに要した正味の打込み所要時間は18分であり、平均すると1.6 m/分の貫入速度である。

また、図からもわかるように、貫入所要時間線図と杭先端地盤のN値との関係は、よく一致している。

深度毎の加振振動数と、杭各部の振動加速度の測定結果について検討する。深度10 mまでは杭先端部が最大値を示していることから、図一II・2・4中の①、②に近い状態の振動モードが発生している。深度5 m付近で杭を上下させた直後の深度7～8 mでは、杭各部の振動加速度が著しく大きくなっているのは、杭先端部の閉塞土砂が排土された結果である。

次に、貫入速度が著しく低下し始めた20 m以深では、杭先端の振動加速度は杭頭部より、はるかに小さくなっており、これは図一II・2・4の⑤に近い状態の振動モードが発生している結果と考えられる。

今回の実験では、N値50以上の支持層まで杭の貫入は可能であったものの、杭頭部の振幅を杭先端部で増幅させる理想的な共振モードを利用して打込むことはできていない。

地盤振動は、図からもわかるように、115 Hzで打込んだ深度7 mまではモデル実験の場合と同様に高周波振動による低減効果が十分認められる。しかし、振動数を下げて打込んだ時は、約70 dB/15 mの大きな振動が測定されている。

④ 実験Iのまとめ

この実験現場におけるディーゼルハンマの施工例では、深度25 mまでの根入れが限度とされている。これに対し、完全な共振モードが得られなかったにもかかわらず、N値50以上の層を打ち抜いて深度29 mまで根入れが可能であった。このことから、今回のような地盤であれば、共振杭打機の貫入能力は、ディーゼルハンマを上回ることができる。

杭の貫入所要時間線図と杭先端地盤のN値とがよく対応することから、杭周面摩擦の影響はほとんど受けていない。このことから、共振杭打ちの可否を決める大きな要因は、杭先端部の拘束条件であるとした前述の理論解析の仮定は、正しいと考える。

(2) 実験II

モデル実験及び実験Iで使用した杭打機は、起振力を犠牲にして、発生できる振幅を優先させた仕様(以下、低インピーダンス形仕様という。)で設計されている。これに対し、起振力を優先させた仕様(以下、高インピーダンス形仕様という。)の杭打機では、共振杭打特性がどのようになるかを調べたのが、この実験IIである。実験場所は、前述のモデル実験と同じ土木研究所構内であり、実験方法は実験Iとはほぼ同様である。

① 主な使用機械

② 共振杭打実験機(高インピーダンス形)

・起振振動数 50～150 Hz

・起振力 100 tf (P=210 kgf/cm²時)

- ・無負荷時振幅 0.2 mm (150 Hz 時), 0.6 mm (50 Hz 時)
- ・ピストン受圧面積 500 cm²
- ・起振部重量 約 2.5 tf (鋼管用チャック重量 2.5 tf を含む。)
- ・機械総重量 約 16 tf
- ・機械寸法 $\phi 1,070 \times 3,010$ (H)

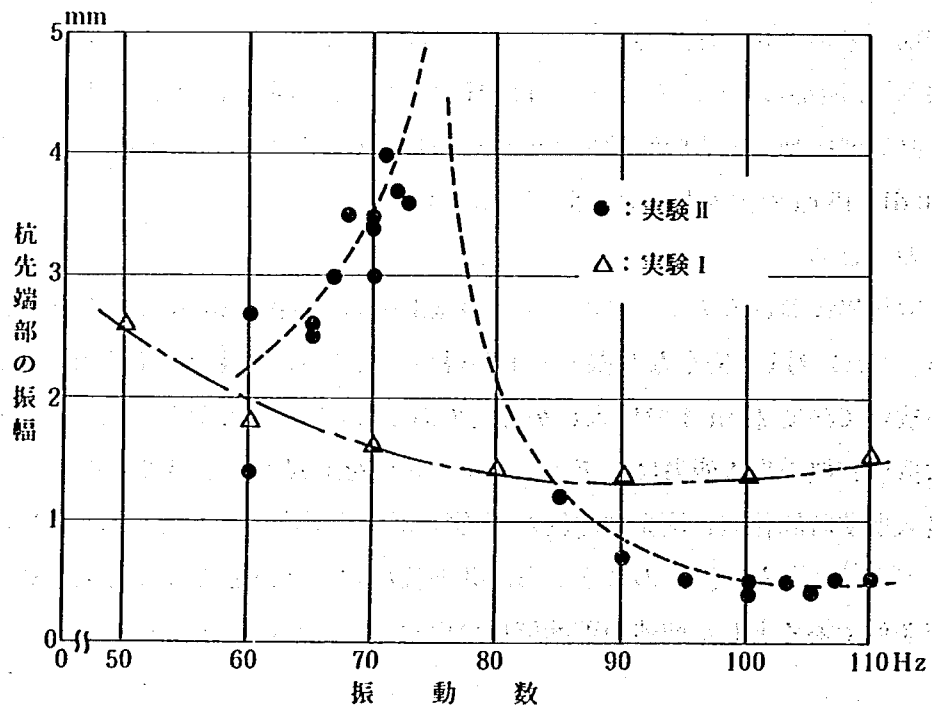
⑥ 油圧ユニット (実験 I と同じ)

⑦ 試験杭 スパイラル鋼管 ($\phi 406.4$, $t = 9$, $l = 17$ m)

② 実験結果

a. 共振モード実験

事前に実施した杭を宙吊り状態として行った共振モード実験では、図一Ⅱ・2・13 に示す結果が得られている。これは、これまでのモデル実験及び実験 I とは異なった共振特性である。即ち、図一Ⅱ・2・12 中に示した実験 I の結果や図一Ⅱ・2・7 のモデル実験結果等では、1/4 波長



図一Ⅱ・2・12 宙吊り時での杭先端振幅測定結果

共振モードで杭先端部の振幅は最大値を示すことがなかったのに対し、今回の実験では、明らかにこの振動数域で最大値となっている。この理由としては、起振部重量が大きいこと、高インピーダンス特性の影響で杭頭部の等価集中質量が増大した結果と考える。⁽¹⁾

図一Ⅱ・2・13 は、この振動加速度モードの測定結果であり、73 Hz では杭先端部に 80 g (振幅に換算すると約 4 mm) もの加速度が発生している。

b. 共振杭打実験

共振モード実験結果から、約 75 Hz を共振振動数と定め、打込みを開始した。この時の測

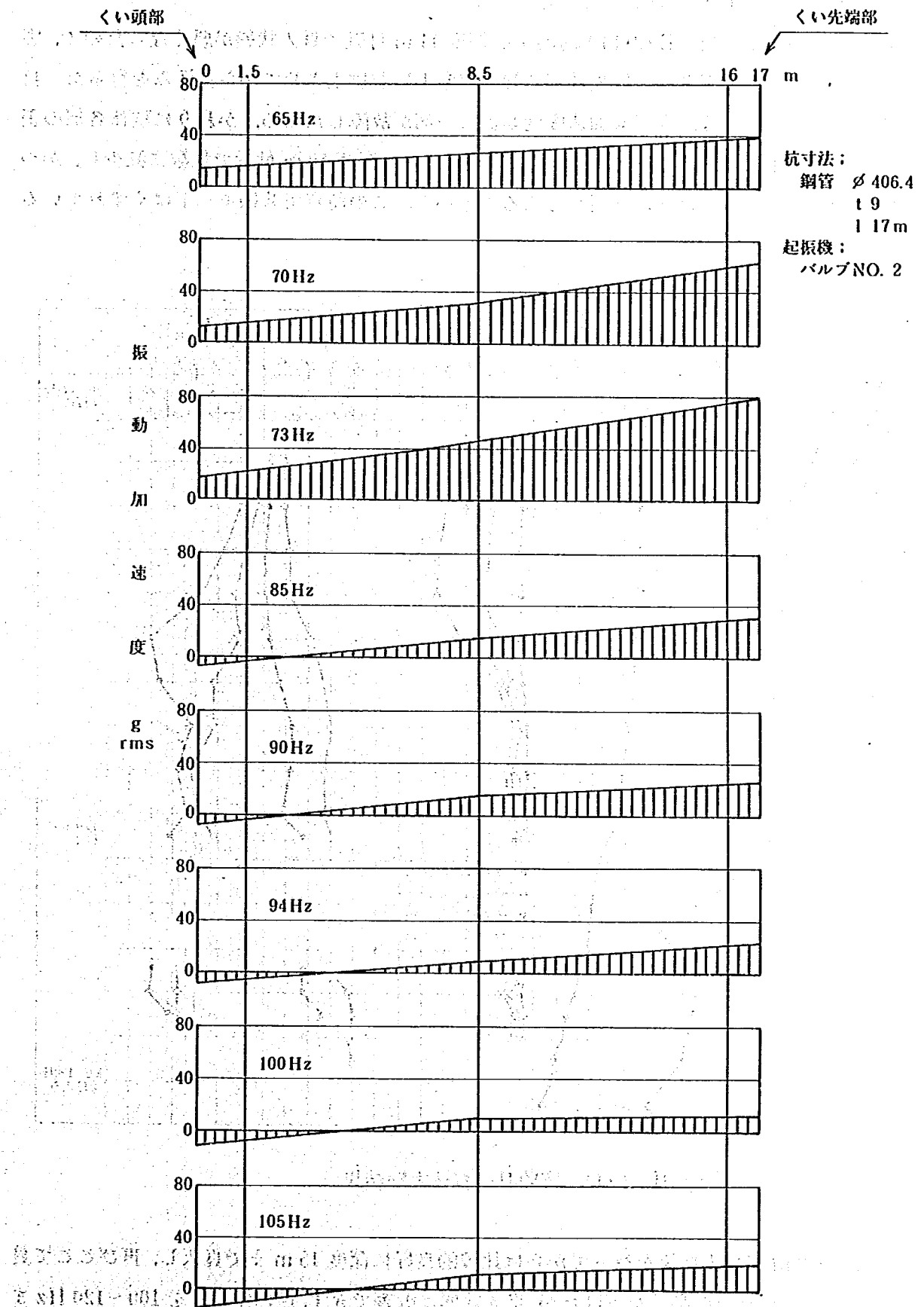


図-II・2・13 実験IIの振動加速度モード測定結果

定内容等は、実験Ⅰとはほぼ同じである。

打込み実験結果を図-II・2・14に示すが、深度11m付近で貫入状態が悪くなったので、実験Ⅰと同様に杭を上下させ、杭先端部の管内閉塞土砂を排土させてから打込みを行った。打込み時の振動モードは、今回も加速度変換器の一部が故障したため、かわりに杭体各部の歪測定結果を図中に表示した。杭頭部の歪に着目すると、深度10m付近で急激に減少し、かつ杭各部の歪の大きさとほとんど同じであることから、この時点で共振モードはくずれていると考える。^(注2)

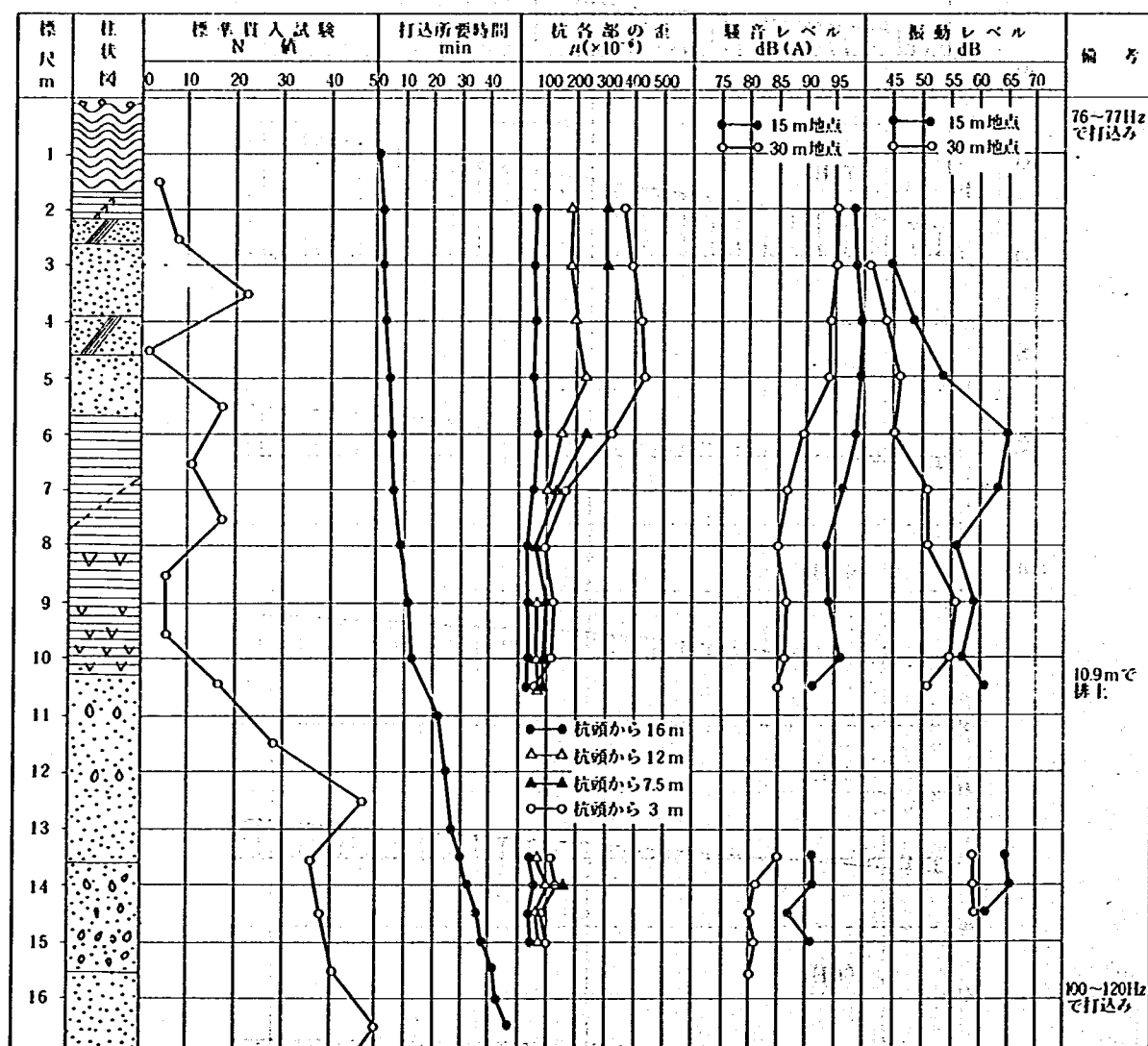


図-II・2・14 実験Ⅱの打込実験結果

深度10.9mで排土作業を行ってからは比較的良好に深度15mまで貫入し、再びここで貫入不良となったため振動数を下げたが、貫入状態は改善できず、逆に振動数を100~120Hzまで上げると貫入し始め、深度16.5mまで打込めた。ここまでの打込みに要した正味の時間は45分であり、平均すると約0.4m/分の打込み速度である。

打込み時の地盤振動は、これまでの実験結果と同様に、浅い根入れ時では非常に小さいものの、打込み深度とともに変化し、最大 65 dB/30 m の値が測定されている。

③ 実験Ⅱのまとめ

- a. この実験現場で別に行ったディーゼルハンマ(25形)の杭打ち結果では、同一規格の杭を約 15 分で深度 17 m まで打込んでいます。一方、共振杭打機では 45 分も要していることから、この打込性能は大幅にディーゼルハンマに劣る。
- b. 貫入状態が悪くなった時、この高インピーダンス形の杭打機では、振動数を高めることで改善できる。

4. ま と め

- ① 共振杭打時の杭の挙動は、(Ⅱ・2・5-a), (Ⅱ・2・5-b)式により、理論的にかなり良く説明づけることができる。
- ② 共振杭打機の打込能力は、N 値 50 前後の支持層への根入れが可能である。
- ③ 共振杭打機の起振特性としては、起振力より振幅を優先させた低インピーダンス形仕様の方が打込能力に優れる。
- ④ 地盤振動は、100 Hz 前後の振動数を利用して打込める地盤であれば十分低減できる。
- ⑤ 実用化を考えた場合、以下の問題点が残されている。
 - a. 杭先端部にある一定量以上の管内土砂が閉塞すると、共振モードがくずれてしまい、それ以上は振動数を変えても杭を貫入させることは不可能になる。

さらに深く打込むには、閉塞土砂を振動を利用して排土させなければならないが、このようにして施工された杭の支持力特性がどのようになるかに関しては、今後の検討課題である。
 - b. 比較的軟かい地盤であれば、地盤振動を十分低減できるものの、振動数を下げつつ共振モードを維持させなければならない程の硬い地盤では、前者の場合ほどの振動低減効果は期待できない。
 - c. 騒音については、今後、対策の余地があると判断し、言及しなかったが、現状では大きすぎる。
 - d. 共振杭打機を駆動させるための油圧ユニットは、数百馬力もの大きな動力が必要となる。

注 1)

大起振力の特性としてあることから、油圧アクチュエータ内の作動油が構成するバネ定数が大きく、かつ、鋼管用チャックの重量も大きいことから、(Ⅱ・2・3)式中の等価集中質量 m は、低インピーダンス形仕様に比較して著しく大きくなっている。したがって、(Ⅱ・2・3)式の分母に着目すると、 $f = V_c/4l$ で 0 に近い値を示すことになり、この振動数で振幅は最大値となる。

$$\omega \sqrt{\left(\frac{AE}{V_c}\right)^2 + m^2 \omega^2} \sin\left(\frac{\omega \ell}{V_c} + \tan^{-1} \frac{V_c(M\omega^2 - K)}{AE\omega} - \tan^{-1} \frac{V_c m \omega}{AE}\right)$$

$$\doteq \omega \sqrt{\left(\frac{AE}{V_c}\right)^2 + m^2 \omega^2} \sin\left(\frac{\omega \ell}{V_c} + 0 - \frac{\pi}{2}\right) \doteq 0$$

$$\therefore m \gg \text{であれば} \quad \tan^{-1} \frac{V_c m \omega}{AE} \doteq \frac{\pi}{2}$$

$$K \doteq M \doteq 0 \text{ であれば} \quad \tan^{-1} \frac{V_c(M\omega^2 - K)}{AE} \doteq 0$$

$$f \doteq V_c/4\ell \text{ であれば} \quad \frac{\omega \ell}{V_c} \doteq \frac{\pi}{2}$$

注 2)

杭の振幅と歪の関係は、以下の通りである。

(II・2・3) 式の強制振動項の係数部分を C と表示することにより、①式に変形できる。

$$u(x, t) = C \cos\left(\frac{\omega}{V_c} x + \phi''\right) \sin(\omega t + \phi'') \dots\dots\dots ①$$

歪は、これを微分して②式で示される。

$$\sigma(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = -C \frac{\omega}{V_c} \sin\left(\frac{\omega}{V_c} x + \phi''\right) \sin(\omega t + \phi'') \dots\dots\dots ②$$

したがって、振幅の絶対値が最大値となる杭の位置では、歪の絶対値は最小値を示すことになる。

この関係から、歪のモードが求められれば、振幅のモードを推定できる。

図 10-10 のように、杭の長さ L を 1 とし、その両端を固定したとき、第 1 モードの振幅の分布は、 $\sin(\pi x/2L)$ の形で表される。このとき、歪の分布は、 $\cos(\pi x/2L)$ の形で表される。

図 10-11 のように、杭の長さ L を 1 とし、その両端を自由としたとき、第 1 モードの振幅の分布は、 $\sin(\pi x/2L)$ の形で表される。

図 10-12 のように、杭の長さ L を 1 とし、その一端を固定、他端を自由としたとき、第 1 モードの振幅の分布は、 $\sin(\pi x/4L)$ の形で表される。

図 10-13 のように、杭の長さ L を 1 とし、その一端を固定、他端を固定としたとき、第 1 モードの振幅の分布は、 $\sin(\pi x/L)$ の形で表される。

図 10-14 のように、杭の長さ L を 1 とし、その両端を固定としたとき、第 2 モードの振幅の分布は、 $\sin(2\pi x/L)$ の形で表される。

(1) 杭

杭の長さ L を 1 とし、その両端を固定したとき、第 1 モードの振幅の分布は、 $\sin(\pi x/2L)$ の形で表される。このとき、歪の分布は、 $\cos(\pi x/2L)$ の形で表される。図 10-10 のように、杭の長さ L を 1 とし、その両端を自由としたとき、第 1 モードの振幅の分布は、 $\sin(\pi x/2L)$ の形で表される。このとき、歪の分布は、 $\cos(\pi x/2L)$ の形で表される。図 10-11 のように、杭の長さ L を 1 とし、その一端を固定、他端を自由としたとき、第 1 モードの振幅の分布は、 $\sin(\pi x/4L)$ の形で表される。このとき、歪の分布は、 $\cos(\pi x/4L)$ の形で表される。図 10-12 のように、杭の長さ L を 1 とし、その一端を固定、他端を固定としたとき、第 1 モードの振幅の分布は、 $\sin(\pi x/L)$ の形で表される。このとき、歪の分布は、 $\cos(\pi x/L)$ の形で表される。図 10-13 のように、杭の長さ L を 1 とし、その両端を固定としたとき、第 2 モードの振幅の分布は、 $\sin(2\pi x/L)$ の形で表される。このとき、歪の分布は、 $\cos(2\pi x/L)$ の形で表される。

あ　と　が　き

本報告書は、建設工事施工上問題となっている、従来形杭打機の主として地盤振動対策を図るべく、この杭打機が有する優れた施工性を確保して、なおかつ対策可能な杭打機械の開発を目標に、昭和51年度から5ヶ年に亘って、土留杭用杭打機を開発対象に実施した「超高周波杭打機の研究開発」と、昭和52年度から5ヶ年に亘って、基礎杭用杭打機を開発対象に実施した「共振杭打機の研究開発」に関する研究成果について、とりまとめたものである。

超高周波杭打機の研究開発については、最終的に実用機を完成させることに成功し、また、この成果により、第9回環境賞（日刊工業新聞社等主催、環境庁後援）を受賞するという誉れを得ることができた。なお、この杭打機の基本的性能は、振動杭打工法にとって関東地方では困難な地盤とされている筑波の土木研究所構内で、数十回に及ぶ杭打実験を行って確認されている。しかし、杭打性能と地盤性状は、常に表裏一体のものであるため、今後も関係機関の協力をいただき、各種地盤条件での試験施工を繰返し行った上で、超高周波杭打工法、機械の耐久性、信頼性等も含めた真の評価がなされるものと考えている。

共振杭打機の研究開発については、杭自体の縦波共振現象を利用した共振杭打特性は、理論上からはほぼ解明されたものの、実用機として完成させるまでには、現時点でまだ多くの問題点が残されている。しかし、共振杭打工法、機械の実用化に対して、一つの方向付けを示すことができたので、今後の研究開発に期待したいと思う。

なお、本報告書は、各研究開発に要した5ヶ年分の内容を総括的にとりまとめたものであるため、各年度ごとの実施内容及び詳細データ等に関しては、別冊として報告書にまとめる予定である。

最後に、本研究開発を遂行するにあたって御指導、御協力を戴いた総合技術開発プロジェクトの「騒音、振動対策専門部会技術開発委員会」の委員、幹事の方々、ならびに(社)日本建設機械化協会とその他多くの関係各位に対して、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 日本建設機械化協会：仮設鋼矢板施工ハンドブック，昭和47年10月
- (2) FE リチャード Jr, JR オール Jr, RD ウッズ：土と基礎の振動（地盤振動の基礎的知識），鹿島出版会
- (3) 本多弘吉：地震波動，岩波書店
- (4) 日本建設機械化協会：騒音振動対策工法及び対策機械の開発（基礎工事の騒音振動対策工法，機械の開発），昭和53年3月
- (5) 同 上，昭和54年3月
- (6) 同 上，昭和55年3月
- (7) 同 上，昭和56年3月
- (8) 同 上，昭和57年3月
- (9) 北川原・原・樋野：杭打ち機械の振動対策，土と基礎，VoL.27, No.4, 1979.8
- (10) 北川原・原・樋野：超高周波振動杭打機による鋼矢板打込試験，建設機械と施工法シンポジウム論文集（日本建設機械化協会），昭和54年10月
- (11) 樋野・川添・田崎：油圧式高周波杭打機の研究開発，建設機械と施工法シンポジウム論文集（日本建設機械化協会），昭和56年10月
- (12) 北川原 徹：低公害形杭打機械の研究開発，環境研究，第40号，1982.9
- (13) 北川原・樋野：低騒音，低振動形杭打機の研究開発，土木技術資料，VoL.24, No.9, 1982.9
- (14) 北川原・樋野：超高周波杭打機の研究開発，建設の機械化，第394号，1982.12
- (15) 北川原・樋野：油圧式共振杭打機の研究開発，土木技術資料，VoL.25, No.3, 1983.3

Ⅱ－１ 超高周波杭打機の研究開発 実験状況

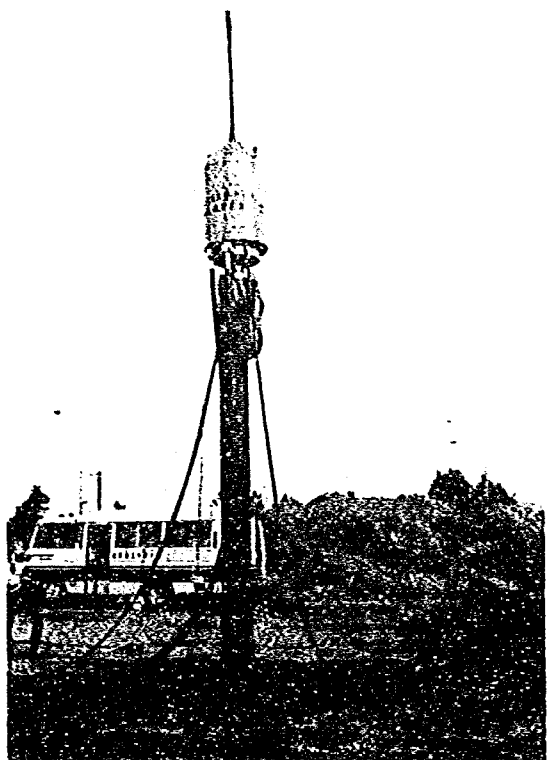


写真１ 超高周波杭打実験機（モデル１号機）
の打込特性確認実験

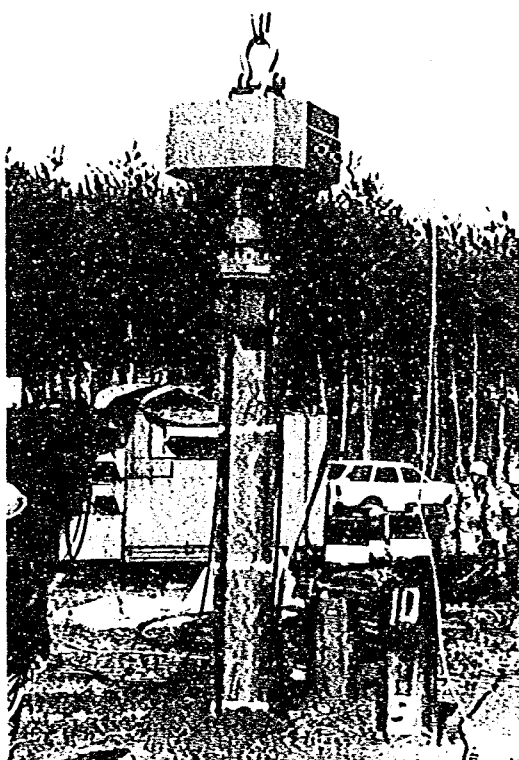


写真２ 超高周波杭打実験機（モデル２号機）
の打込特性確認実験

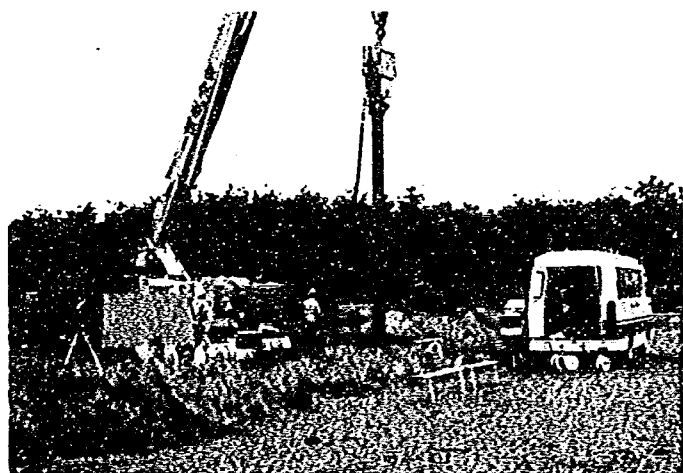


写真３ 超高周波杭打機の打込特性確認実験

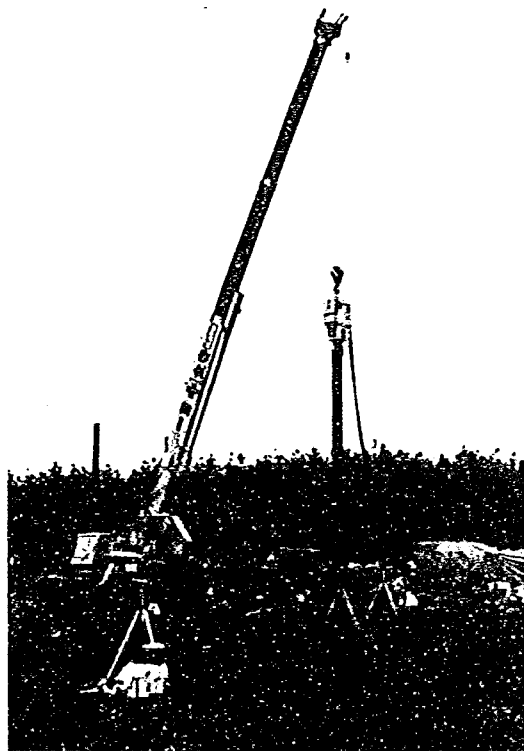


写真４ 超高周波杭打機の周波数スイープ試験



写真5 超高周波杭打機の側面状況
(油圧ホース配管側)

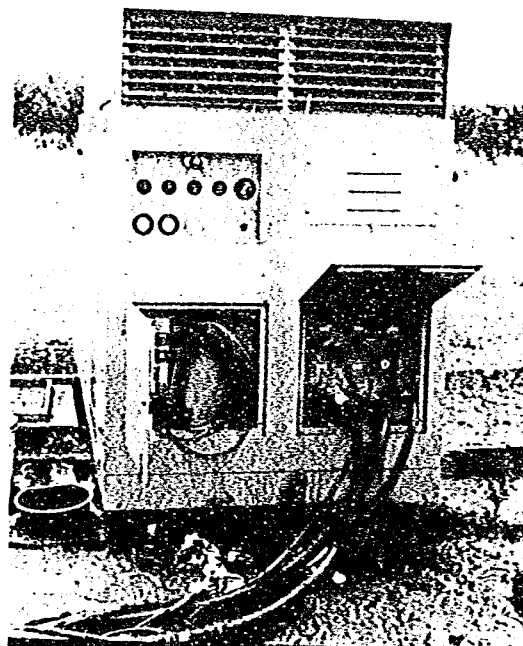


写真6 超高周波杭打機の油圧ユニット
(防音型)

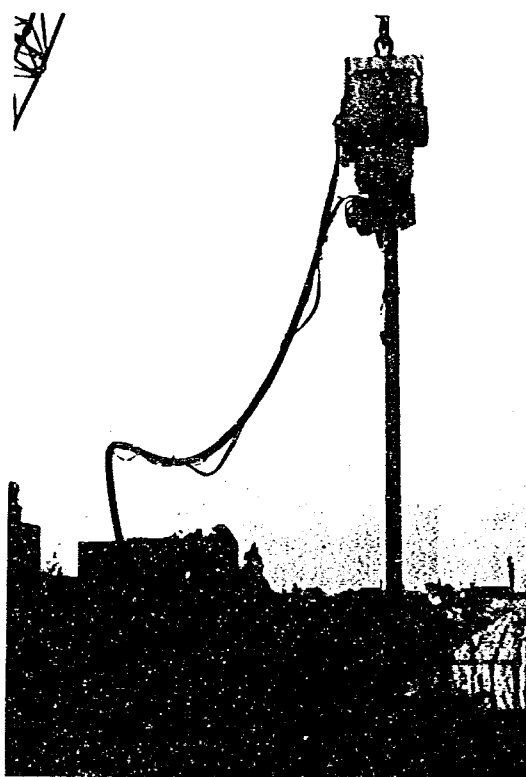


写真7 試験施工状況 その1
(鋼矢板セッティング完了時)

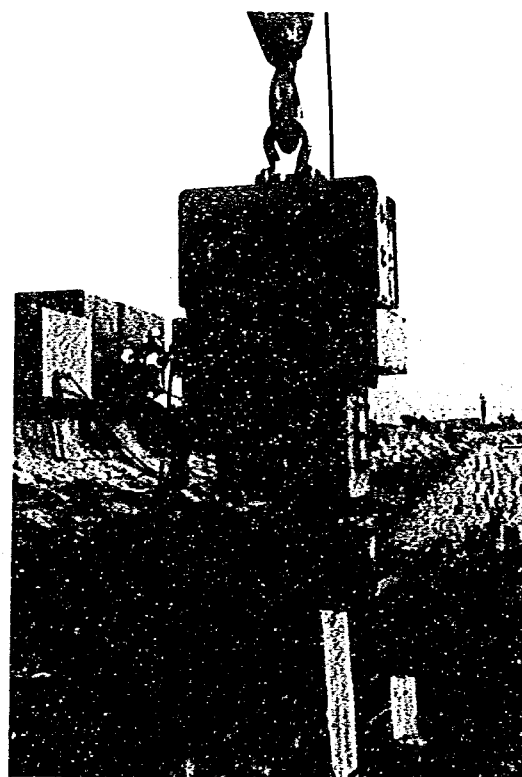


写真8 試験施工状況 その2
(打止め付近)

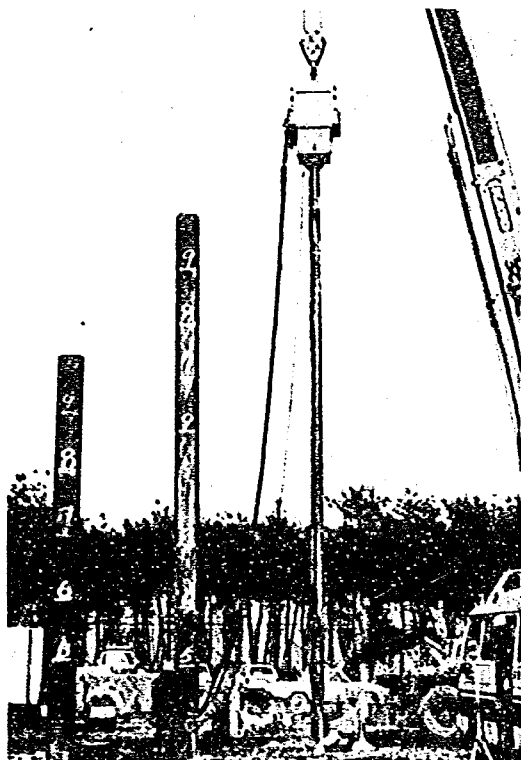


写真9 モデル実験機の共振杭打実験
その1 (打込み開始前)



写真10 モデル実験機の共振杭打実験
その2 (杭深度11m付近)

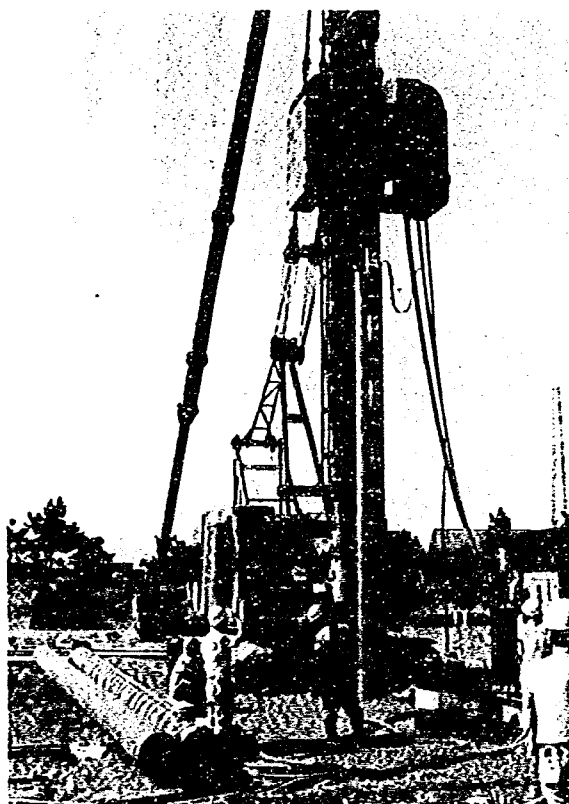


写真11 低インピーダンス形共振杭打
実験機の打込特性確認実験

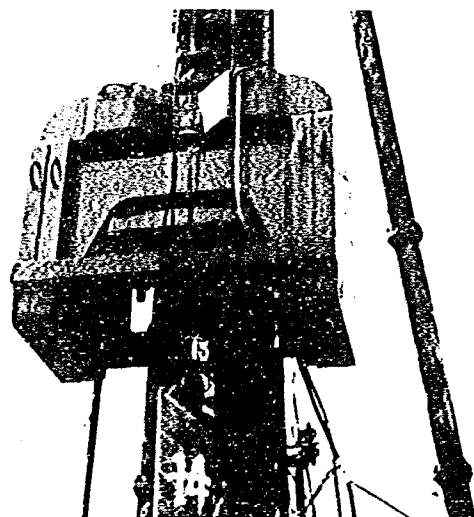


写真12 低インピーダンス形共振杭打
実験機の鋼管杭取付部状況

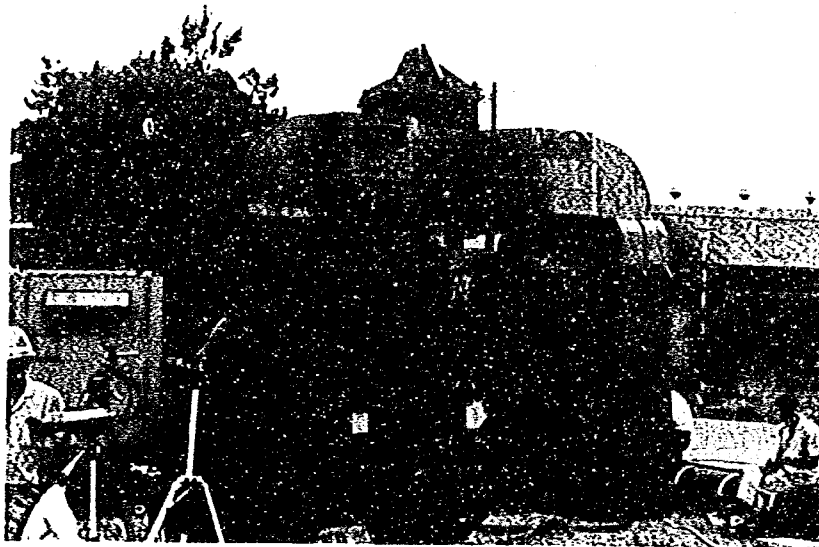


写真 13 低インピーダンス形共振杭打
実験機の近景状況

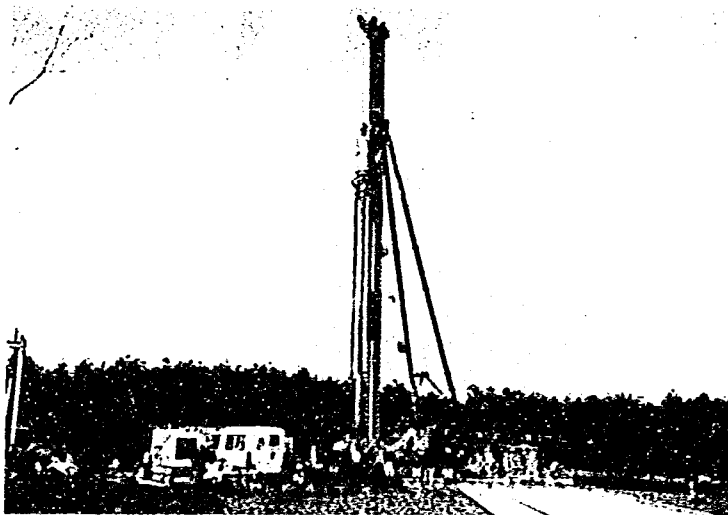


写真 14 高インピーダンス形共振杭打実験機の
共振杭打実験 その 1 (杭深度 1 m 付近)

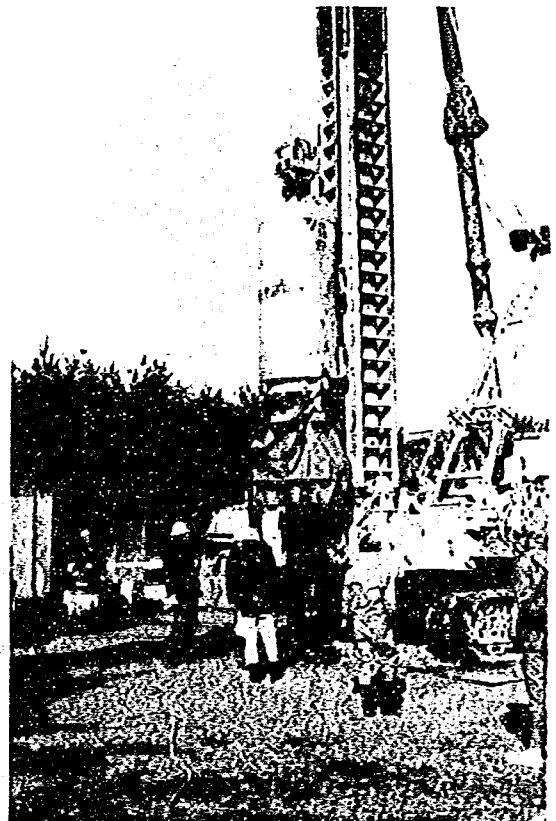


写真 15 高インピーダンス形共振杭
打実験機の共振杭打実験
その 2 (杭深度 15 m 付近)

超高周波杭打機の研究開発

土研資料第2003号

昭和58年3月

北川原 徹, 原 誠, 樋野 親俊

キーワード: 超高周波杭打機, 共振杭打機, 地盤振動対策,
縦波共振現象, 杭の貫入特性

要 旨

高周波振動を利用することにより, 施工性を確保しながら,
杭打ち時に発生する地盤振動を軽減することができる超高周波
杭打機及び共振杭打機の開発に関する研究成果をとりまとめた
ものである。

郵便はがき

3 0 5 - □ □

40円切手
をはって
下さい。

建設省土木研究所

機械研究室 御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. 49

No. 49

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2003号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

