

M.V.C.P. 工法のためのマルチバイブロハンマの開発について

木村 薫 平間 邦興
菱河 恭一 羽生田 吉也
(本社 機械部)

Trial Production and Application of Multi-Vibrohammer for M.V.C.P. Method

Kaoru Kimura Kunioki Hiramata
Kyoichi Hishikawa Yoshinari Hanyuda

Abstract

M.V.C.P. (Multi-Vibrohammer Compaction Piling) is a new method for improving loose sandy ground; shear waves are mainly generated and sand is fed into the soft ground under pressure simultaneously. The multi-vibrohammer which has new vibrational mechanisms was invented according to this purpose. It is capable of producing conventional vertical vibrations and also, independently, torsional twisting vibrations. Furthermore, a composite of the two, in which the ratio is changeable in accordance with the schemed working plan can be generated.

In the development of the trial vibrator, many improvements and contrivances were made from designing to performance tests and field application tests. In the middle of 1982 the method had come to a point that it could be applied in actual construction. This paper deals with the process of the development, the theory of the vibrator, and its problems and countermeasures.

概 要

M.V.C.P. 工法とは、ゆるい砂質地盤を対象とした新しい地盤改良工法である。すなわち、あらかじめ、地質地盤にせん断波を主体とする応力履歴の賦与と、同時に行なう砂の圧入とによって、軟弱な地盤を改良、造成する。マルチバイブロハンマ試作機は、この目的に沿って発明、製作された新規の発振機構を有する起振機である。従来の鉛直振動のほかにネジリ振動およびこれら二つを合成した複合振動を施工パターンに合わせて、地盤に加えることができる。主としてネジリ振動、複合振動がせん断波の発生源となる。

試作機の開発では、機械設計から性能試験および現場施工試験に至るまで、各機会を通して種々の改良、工夫がこらされ、昭和57年中頃には、現場の工事に適用される程となった。本報は、マルチバイブロハンマ試作機の発振原理、および開発上で発生した諸問題と対策について周辺機械を含めて述べたものである。

1. まえがき

M.V.C.P. 工法とは、地震発生時における砂質地盤の液状化に対する対策工法のひとつとして、当社が開発した工法である。すなわち、特殊な振動パイルドライバによって、あらかじめ地盤に強制振動を加えて、せん断波を主体とする応力履歴の賦与と、同時におこなう砂の補給と圧入とにより、軟弱な砂質地盤を耐震性のあるものに、改良造成する目的の工法である。

マルチバイブロハンマ試作機は、この目的に沿って考案、試作された振動パイルドライバ（バイブロと略称される）である¹⁾²⁾。従来のバイブロは、ソ連から技術導入されてから日本で普及されて30年近くなる。これは、偏心マスの回転による遠心力を、専ら、上下方向の振動に利用したものであった。これに対し、試作機では、偏心マスを全く異なった機構に構成し、鉛直方向の振動のほかに、鉛直軸まわりのネジリ振動を発振できる。更らに、これら二つの振動の比率を、施工パターンに沿って、随

意に切換え、選択することが可能である。

このマルチバイブロハンマ試作機の性能確認のために実験を数現場でおこない、所々に改善、工夫をこらし、昨年5月には、地盤改良工事に適用もできた。

本報は、M.V.C.P. 工法に用いられる砂杭打設装置とその主要機械であるマルチバイブロについて紹介し、特に、マルチバイブロについては、諸実験の結果とその際に出てきた問題と対策について述べる。

2. 砂杭打設装置全体について

M.V.C.P. 工法に用いる砂杭打設装置の一例とマルチバイブロ試作機を写真一に示す。

2.1. 杭打ちやぐら

クローラ本体にラチス構造の角型リーダを取付けたもので、リーダ下端部に30~40 ton程度の油圧ジャッキを有する。リーダは、2本のバックステーで各々バッファを介して後方への転倒防止がなされている。この杭打ちやぐらは、従来のサンドコンパクション工法にも利用されているもので、汎用性が高い。

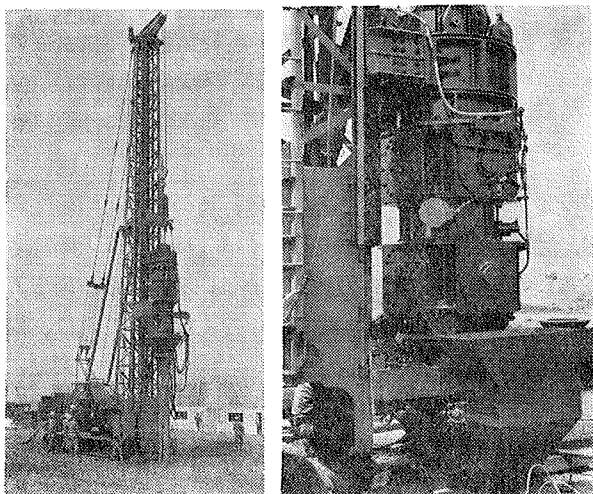
2.2. 振動体

起振機であるマルチバイブロ、摺動装置を含むシュート、円錐型ホッパ、さらに鋼製のケーシングなどで構成され、リーダのガイドに沿って上下する。マルチバイブロの頂部には、スプリングによる緩衝装置が付く。

振動体とリーダとの取合い関係は、極めて特徴がある。取合い部分を摺動部と称し、振動体の上下方向の鉛直振動、また鉛直軸まわりのネジリ振動あるいは複合振動、さらに後述の施回運動に対して、振動体とリーダとの縁切りの役目を果たす。この摺動部を2箇所設けている。

2.3. 周辺設備機械

マルチバイブロの電源となるジェネレータ、ケーシ



写真一 砂杭打設装置とマルチバイブロ試作機

ク内の砂の落下を促進する圧気および貫入補助のためのエアージェット源となるエアークンプレッサ、およびリーダ側面を上下する昇降ホッパと同内部に砂材料を運搬するためのドーザショベルなどがある。表一にその組み合わせの一例を示す。

3. マルチバイブロについて

3.1. 内部構造

図一に、試作機の内部構造の模式を示す。偏心マスを4軸2段に構え、中央部に位相変換装置を配列している図中の電動機は、堅軸型のもので、マルチバイブロ用に耐振仕様を備えて設計、開発されている。

3.2. 発振原理

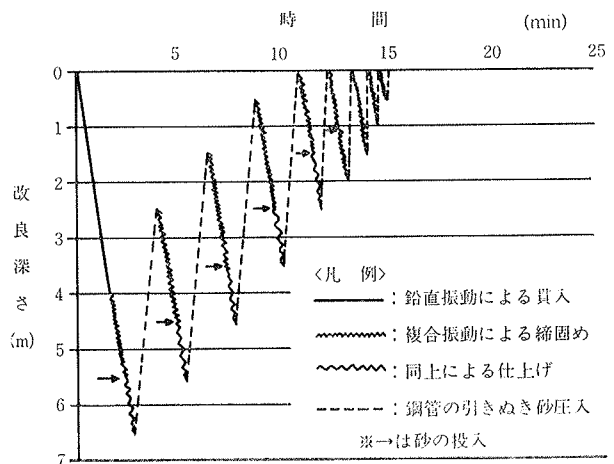
図一の状態では頂部の電動機を駆動すると鉛直振動だけが発生する。鉛直軸まわりの回転トルクは、上段と下段とで相殺するので、外部に出て来ない。機械構造内部の弾性ひずみエネルギーとして吸収される。

次に、ネジリ振動では、図一の状態では、機構学的に電動機および上段偏心マスの回転をのり付けして考え、ブレーキ付油圧モータを動かして位相変換装置内のドラムを回転させ、下段の偏心マスだけを回転してみる。

この上段偏心マスの相対的な静止のなかで、下段の偏心マスの回転角の進みあるいは遅れを偏心マスの位相差

名称	形式	仕様
エアークンプレッサ	北越PDR-370S	2段圧縮油冷, 7kgf/cm ² , 10.5m ³ /min 110PS/750rpm, オイルタンクMAX 155L
ゼネレータ	デンヨーパワ SS,DCA-200ss	200KVA, 246PS/60Hz, 乾燥重量4500kg
ドーザショベル	D-30S	55PS, 0.8m ³ バケット, 4385×1685mm 接地圧 0.55kgf/cm ²
昇降ホッパ エアレシーバ		0.55m ³ , エアースリンド閉 4 m ³ , 1500φ×2000L
管理記録計	F型, B108-2	AC200V, 6点入力
S.L.計		DC24V作動, 超音波型
電気溶接器		AC200V/300A

表一 周辺の使用設備例



図一 施工パターンの一例

と称するものとする。

偏心マスの位相差 180° にした後、ブレーキ付油圧モータを停止させ、電動機だけにより 8 個の偏心マスを回転している状態からは、ネジリ振動だけが発振される。

以上の鉛直振動とネジリ振動との間には、例えば表—2 のように、偏心マス位相差 ±45°, ±90°, ±135° のように中間的状态が存在する。これが複合振動である。

3.3. 加振モードの選択制御

加振モードとは、前述の偏心マス位相差の絶対値として定義する。鉛直からネジリ振動のモードに変換するには、約 6 秒弱の瞬時にできるが、基本的には、図—1 の施工パターン例のように、あらかじめ定めた計画に沿って、ケーシング貫入深度計指示値に運動させて行なう。

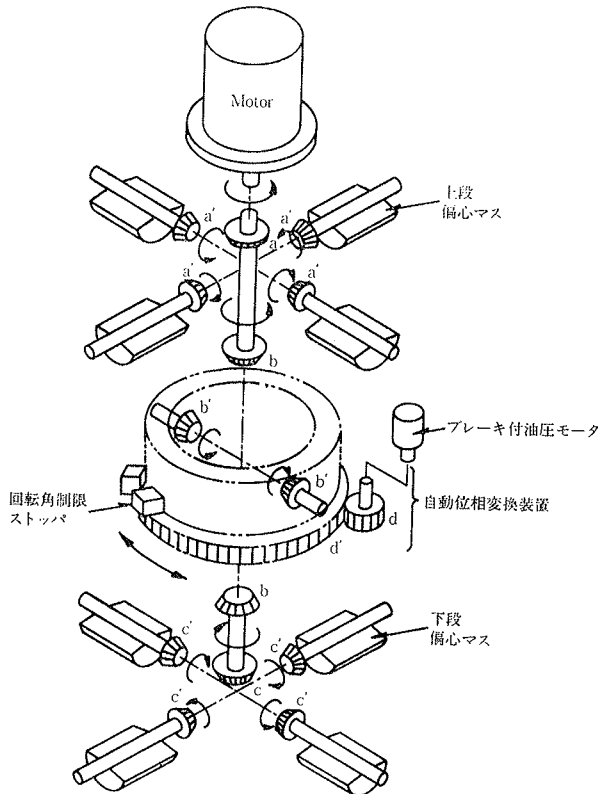
3.4. マルチバイブロ駆動のための機器

マルチバイブロを動かすための機器は、制御盤、操作盤、油圧ユニット、および指示盤からなる。なお、表—3 に、マルチバイブロの試作機についての仕様を示した。

4. 諸実験の結果と考察

4.1. マルチバイブロの性能確認実験

マルチバイブロの下部に、406.4 φ×12.7 tmm のケーシングで、長さ 8 m のものを取付けて振動体を構成した。この振動体を緩衝器を介して、クローラクレーンで



図—2 試作機の内部構造模式図

偏心マス位相差		0 deg	45deg	90deg	135deg	180deg	
出力	起振力	ton	35.9	33.2	25.4	13.7	0.0
		%	100	92.4	70.7	38.3	0
トルク	トルク	tf-m	0	4.87	9.00	11.8	12.7
		%	0	38.3	70.7	92.4	100

* %は、最大出力を100%として算出した値

表—2 試作機の振動モードと出力

起振機	種類 起動力伝達方式 潤滑方式 振動調節方式	複合振動発生形 4軸 2段 ギヤ—伝達 強制潤滑 (動力伝達部) オイルバス 油圧モータドライブ	
電動機	形式種類 出力 周波数 電圧	立型全閉屋外用特殊かごかた3相 誘導電動機 60KW-6P 50Hz/60Hz; 400V/440V	
制御装置	操作盤 操作方式 操作回路 油圧操作電圧	コンドルファースタータ リモートコントロール DC 24V AC200V/220V	
	油圧ユニット	常用圧力 電動機 形式種類 常用圧力 押のけ量 出力トルク ポンプ 形式種類 常用圧力 吐出量	100kgf/cm ² 2.2KW-4P, 50/60Hz; 200/ 220V メカニカルブレーキ付モータ 210kgf/cm ² 153cc/rev 46kg·m ピストンポンプ V-15A 140kg/cm ² 14.3cc/rev MAX13 ℓ /min
出力	鉛直	偏心モーメント 偏心マス回転数	9000kg-cm 600rev/60Hz
	ネジリ	起振力 理論振巾 理論加速度	35.9ton(MAX) 13.8mm 5.5G
トルク	トルク	回転トルク 理論振巾 理論加速度	12726kg·m(MAX) 10.0mm (400φパイプ表面) 4.0G

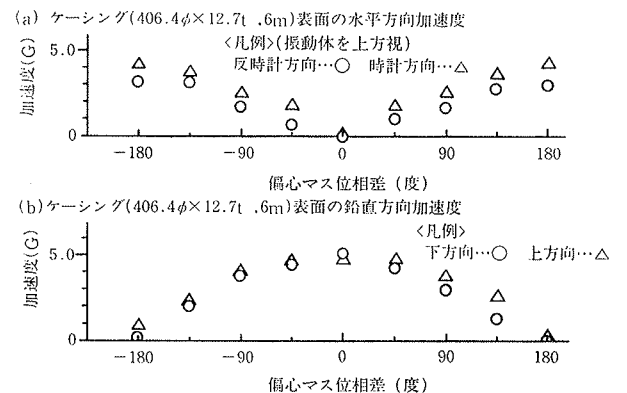
表—3 試作機の設計仕様

吊った。

振動体を貫入させた地盤は、横浜市南部に分布するローム系の富岡層で、深さ 7~8 m 付近までが N 値 5 程度である。

4.1.1. ケーシング表面加速度と振幅 図—3 にケーシング頂部付近でとらえた加速度を偏心マス位相差との関係で示す。この位相差に対し、全体的に、ケーシングの接線方向に当る水平方向の加速度についてみると、時計方向の値が反時計方向の値より大きめであるが、計測波形の歪によるものと考えられる。

他方、ケーシング表面の振幅を計測した際に、鉛直振



図—3 ケーシング表面加速度の測定結果

動時に 12 mm, ネジリ振動時に 9 mm を記録している。なお、この際には、振動体を宙吊りの状態でおこなった。

4.1.2. 振動レベル 図-4 に測定結果を示す。この結果からみると、ネジリ振動時には、接線方向(Y方向)の地表面の振動レベルが卓越し、他の加振モードのXおよびY方向に較べて、振動体に近い位置 L=5~6 m 付近でレベルが逆転して大きくなることが予想される。

一方、L=30 m 付近では、ネジリ振動時の振動レベルは 60 dB 未満で、他の加振モードにおける値に較べ、かなり小さい。

以上のことから、マルチバイブロを用いた方法は、締固めエネルギーが、ケーシング先端の4枚のウィングから比較的地盤に有効に伝播でき、振動公害の少ない工法であるものと考えられる。

4.1.3. マルチバイブロのハウジング表面応力 三軸

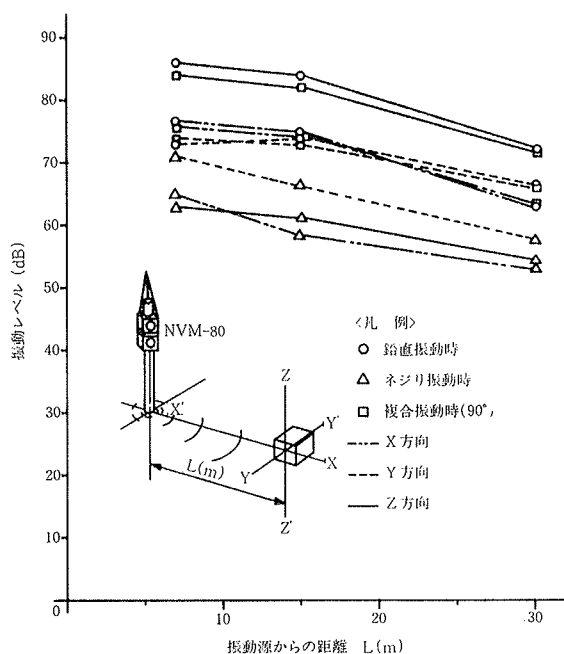


図-4 振動レベル測定例

ロゼットゲージを、自動位相変換装置部および下段偏心マスボックス直下部フレームの各表面に貼り付け、振動体の地盤貫入時におけるマルチバイブロのハウジング応力を調べた。この結果のうち、最大せん断応力を、加振モードごとに図-5 に表わす。

ハウジングの応力は、許容応力の11%程度で、測定位置以外の応力集中部分についても、許容内に納まっていると考えられる。また、荷重状態が変わって、衝撃的な力が短期的に作用しても、加速度レベルの実測値の比較から、2~3倍程度であることが分かっており、静的なせん断応力の許容値 1, 100 kgf/cm² 内には納まるものと測定される。従って、設計・製作されたハウジングは、耐久性のあるものとする。

また、各加振モードにおける応力の比較から、3.2. 節で述べた機械構造内部の弾性ひずみエネルギーの件を伺い知ることができる。すなわち、図中の丸印で示された位相変換装置部フレームの外表面応力で、 τ_{max} が、鉛直振動時に大きく、ネジリ振動時には小さく表われている。

4.2. 振動体の旋回運動と対策

前節の実験で、ネジリの回転を許された振動体が、徐々に、ある方向へ旋回していく現象が見られた。

これに対して、偏心マス位相差を進み、あるいは遅れにすることによって、旋回方向を切換えられないか調べた。表-4 は、その際の観察結果をまとめたものであるが、上記方法では、旋回方向を制御できなかった。

振動体をリーダに抱かせた実験では、600~800 kgf/mm のバネを振動体と下部摺動装置のリーダ固定側との間に設けたが、失敗した。ネジリ振動時の最大12.7 tf・m の回転トルクに旋回運動時の回転トルクが重ね合わされて作用するため、バネが完全に変形した。

次に、1対のエアシリンダによって、旋回運動がある限度に達したら復元トルクを発生させて自動調芯をかける方法を考察した。エアシリンダを下部摺動装置に

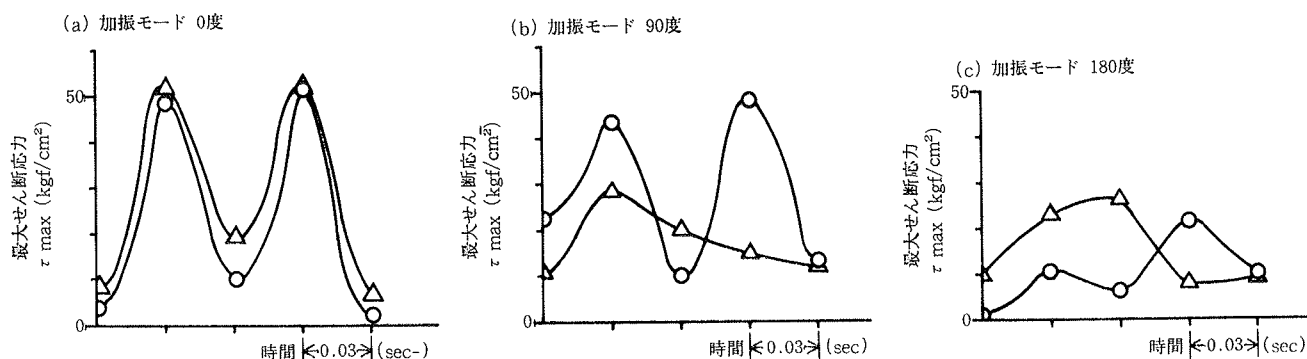


図-5 マルチバイブロ試作機のハウジング表面応力の測定結果

振動モード		鉛直振動		複合振動		ネジリ振動	
下段の上段偏心マスに対する位相		すすみ	おくれ	すすみ	おくれ	すすみ	おくれ
旋回運動	C.C.	5	4	11	8	1	2
	C.	2	0	7	10	5	4
	なし	0	1	5	3	1	0
旋回方向		反時計まわりが多い		どちらとも言えない		時計まわりが多い	

注記欄	(a) ケーシングの振動方向	(b) ケーシングの旋回運動(上方視)

表一4 振動体の旋回運動とその回数の観察結果

組み込むことで、問題は解決された(写真一2参照)。

4.3. 偏心マスシャフト履歴応力と耐久性

マルチパイプロの設計は、重量軽減による出力増加を期待し、各部の薄肉、軽量化を旨として行なわれた。従って、マルチパイプロの各部応力を調べ、実用上も問題がないかどうか調査する必要がある。マルチパイプロのハウジング表面応力については、小さく、許容できるものであることを、すでに述べた。ここでは、稼動中には測定しにくい偏心マスシャフトの応力などを A.E. (Acoustic Emission) 試験により調査した結果を述べる。

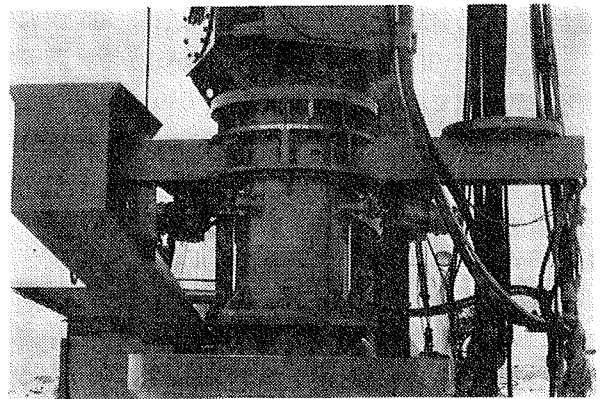
A.E. 試験とは、カイザ効果を利用して、材料の履歴応力を測定する方法である⁶⁾⁷⁾。本実験では、特に、弾性あるいは微塑性の領域での、A.E. の積極的な利用を試みた。

供試体は、シャフト材質 S25C と同質の処女材を含む4種類が用意された。それぞれ、使用時間が図一6のように異なる。試験片は、各供試体から5本切り出し、試験は主として、引張試験と併行して行なわれた。

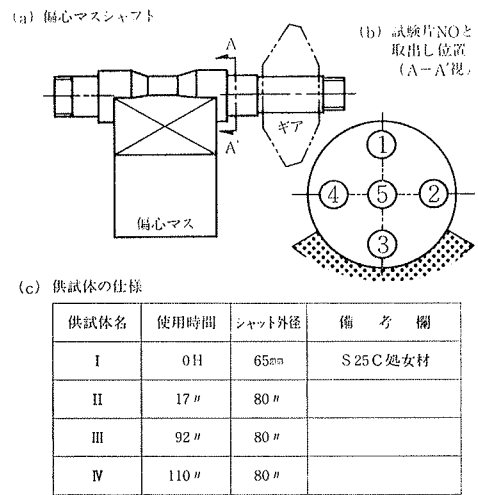
その結果、しきい値電圧 $63 \mu V$ を越える A.E. 波の数をカウントして積算したリングダウンカウント計数と試験片の載荷荷重から算出した応力との関係は、図一7のようになった。

同図では、A.E. 変換子の微妙な取付け、あるいはノイズによる誤差を少なくするため、 χ と λ の無次元量を定義して用いている。

各試験の履歴応力は、 $\lambda=0.2\sim 0.3$ ($\sigma_{y,p} \approx 33 \text{ kgf/cm}^2$: 下降伏応力) で、取り出し位置を考慮して、偏心マスシャフト表面の履歴応力を推定すると、平均値で約 $1,080 \text{ kgf/cm}^2$ になる。設計値としては、 600 kgf/cm^2 を見込んでおり、つねに上記応力が作用したとは、考えられないが、実測値は大きい。また供試体 II と供試体 IV との比較で、使用時間は将来的に見込まれる使用時間 5,000 H と較べて、ほとんど同じ程度少ないが、図一7 中の立上り勾配 λ/χ に差が見られる。すなわち、供試体 II が、

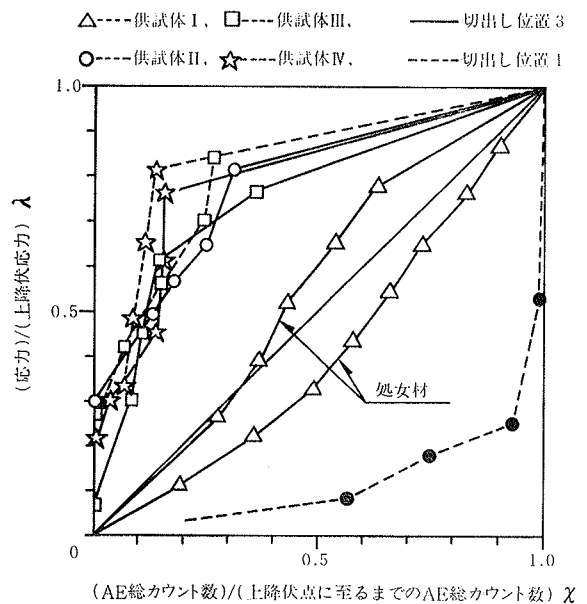


写真一2 下部摺動装置付近(改造後)



図一6 A.E. 試験用の供試体と試験片の切出し

引張試験*1におけるAE*2の発生状況
 供試体: 偏心マスシャフト(材質S25C)より切出した試験片、荷重集中部の直径5mm
 <凡例>



(AE総カウント数)/(下降伏点に至るまでのAE総カウント数) χ

(註) *1 圧縮試験も一部実施、記号を色塗
 *2 リングダウンカウント計数(AE総カウント数)、AE変換子NAIS F217A、共振周波数200KHz

図一7 A.E. 試験の結果

処女材のもつ勾配に近いのに比べ、IVでは、勾配が大き
く、A.E. を発生しにくくなったことが分かる。若干の
使用時間の差で、このような差が出るのは好ましくな
い。

そこで、偏心マスシャフトの耐久性を増し、材料強度
を改善するために、クロムモリブデン鋼に改造した。

4.4. マルチバイブロへの所要エネルギー

写真-1 に示した姿勢で、ケーシング (406.4 φ×14 t,
8 m) を取り付けて、N値 5~8 程度の地盤を、砂圧入を
併用して地盤改良実験をした際の、マルチバイブロの電
動機消費電力量によって、所要エネルギーを調査した。

図-8 は、この結果を、施工速度との対比で描いたも
のである。これより、7 m の改良深度で、時間当り 5~6
本以上施工すれば、6 kWh/本程度のエネルギーを消費す
る。この傾向から外れるのは、N値10近い区域における
値である。なお、プロットされた各点は、毎日のデータ
を日毎に平均した値である。これから、施工速度4.5本/
H以上のペースで施工しないと、所要エネルギー的に見
ると、大きくなって具合が悪いことが分かる。

5. おわりに

マルチバイブロハンマ試作機の出現によって、室内試
験による研究^{3)~5)}が、より具体的な新工法として現場施
工に適用される程に至った。

また、マルチバイブロハンマ開発の当初における幾多
の問題もほとんど解決されている。しかし、M.V.C.P.
工法全体から見ると、容量の大きな実用機の開発による
施工速度の増大を図って、今後より経済性の高いものに
していく必要がある。

謝 辞

M.V.C.P. 工法の開発は、当社の技術開発専門委員会
のテーマの一つとして実施されてきたもので、特に日平
産業(株)および三信建設(株)を含めた液状化対策小委員
会の各委員による協力と助言とを得て、マルチバイブロ
ハンマ試作機の各種実験が遂行されてきたことをここに
記し感謝の意を表する。

次に、材料の A.E. 試験に関して、東京大学工学部境界

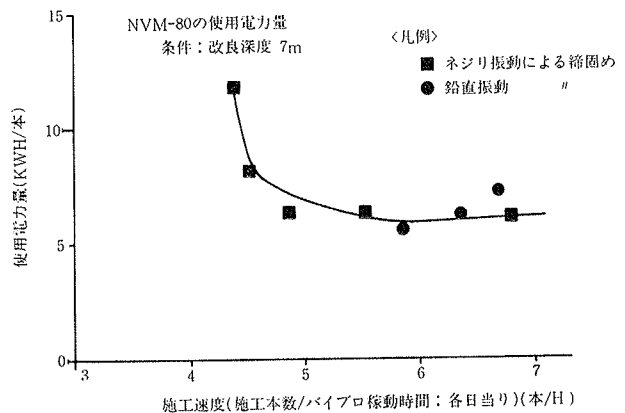


図-8 施工速度と所用エネルギー

領域施設の岸輝雄助教授、日本大学生産工学部機械工学
科の森康彦助教授および同助手である小幡義彦博士より
貴重な助言と御指導をいただいたことを記して、感謝の
念を表わしたい。

参考文献

- 1) 斎藤, 木村, 平間, 羽生田: ネジリ振動締固め装置
について, 大林組技術研究所報告書, (昭和55)
- 2) 木村, 平間, 羽生田: ネジリ振動締固め工法開発工
事のうちマルチバイブロハンマおよび周辺装置に関す
る報告, 大林組技術研究所報告書, (昭和57)
- 3) 斎藤, 木村, 岩本, 北村: ネジリ振動による砂質地
盤の締固め試験 (その1), 大林組技術研究所報, No.
15, (1977), pp. 68~73
- 4) 斎藤, 木村, 平間, 北村: ネジリ振動による砂質地
盤の締固め試験 (その2), 大林組技術研究所報, No.
17, (1978), pp. 39~44
- 5) 木村, 平間, 北村: 砂質土の液状化に関する研究,
大林組技術研究所報, No. 19, (1979), pp. 89~94
- 6) 岸, 栗林: アコースティックエミッションによる材
料評価, 日本金属学会会報, 第20巻, 第3号, (1981)
- 7) Y. Mori: Kaiser Effect of Acoustic Emission in
Metals and Alloys, proceedings of the Fourth
Acoustic Emission 1978 Tokyo, pp. 2-32~2-42