

港 湾 技 研 資 料

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

No. 786 Sept 1994

弾性波地盤探査用電磁誘導型震源の開発

石	塚	浩	次
林	田	善	久
永	野		亮

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 電磁誘導型震源	4
(1) 電磁誘導型震源の構造	4
(2) 電磁誘導型震源の発生打撃力と振動数	4
3. 円形フーチング基礎から発生する波動	6
4. 振動板の打撃力測定結果	6
(1) 電磁誘導型震源の電気回路特性	6
(2) 振動板の打撃力測定結果	7
(3) 地盤上の挙動および打撃力	7
(4) 振動板打撃力および振動数の計算値と実測値の比較	9
5. 電磁誘導型震源による地盤探査実験結果	10
(1) 実験場所の地層	10
(2) 電磁誘導型震源の地盤表面波動特性実験結果	10
(3) P S 速度検層実験結果	11
(4) 浅層反射法地盤探査実験結果	14
6. 電磁誘導型震源の地盤探査実用装置の検討	17
7. まとめ	19

Development of an Artificial Seismic Source Driven by Electromagnetic Induction for Stratum Investigation

Koji ISHIZUKA*
Yoshihisa HAYASHIDA**
Akira NAGANO**

Synopsis

An artificial seismic source should generate an appropriate earthquake with high frequencies to guarantee precise solutions of ground investigation. This paper deals with theoretical and experimental characteristics, i. e. magnitude and frequencies, of originally generated oscillations in this new device. And then, the result of a field test to which the new equipment was applied as a seismic source will be referred. This field experiment proves that the device is very helpful for stratum investigation such as PS wave velocity logging and stratum reflection method. Major conclusions are as follows.

- ① The magnitude of the force of a blow by the artificial seismic source is directly proportional to total energy which is accumulated in condenser and frequency of the generated force is inversely proportional to the square root of the product of total inductance of installed coils and condenser capacity.
- ② Although the magnitude of the force of a blow is smaller than the one which is acquired by another traditional method (a free fall of a heavy material), the new device can provide an oscillation with higher frequencies than the free fall method.
- ③ New device produces both P and S wave with frequencies of 80~90 Hz. in real stratum. The frequencies are almost the same oscillations which are generated in the device originally.
- ④ The earthquake provoked by the new source can be considered almost mono pulse with 1.5~2 wave lengths.
- ⑤ Some practical ideas to improve the availability of the new device are suggested.

Key Words: Wave motion, Ground investigation, Artificial seismic source, Mono-pulse, Horizontal plank hammering method, Electromagnetic induction type source

* Senoa Research Engineer Machinery Division

** Member of Working Craft Development, Machinery Division

弾性波地盤探査用電磁誘導型震源の開発

石塚 浩 次*
林 田 善 久**
永 野 亮**

要 旨

波動を利用した地盤探査においては、地層探査の分解能や探査深度の観点から高周波数で高出力の波動を発生する震源が必要とされている。開発した地盤探査用の電磁誘導型震源は、高周波数でモノパルスの波形を発生するものである。

本論文では、地盤探査を目的として開発した電磁誘導型震源の打撃力、振動数について理論および実験による検討を行っている。また、電磁誘導型震源を用いて現地盤で行った地盤探査実験結果をもとに、P S速度検層および浅層反射法のS波探査、P波探査の震源に有効なことを明らかにした。主要な結論は、以下のとおりである。

- (1) 電磁誘導型震源の振動板の発生する打撃力は、コイルに供給される蓄積エネルギーに比例し、コイルの全インダクタンスに反比例する。また、打撃振動数は、コイルの全インダクタンスと電源部のコンデンサー容量の積の平方根に反比例する。
- (2) 従来の小型重錘落下震源に対して打撃エネルギーは小さいが、高周波数な波動が得られる。
- (3) 電磁誘導型震源はS波、P波が発生し、P S速度検層および浅層反射法のS波探査、P波探査震源に有効である。伝搬波動の周波数は80~90Hzで、ほぼ振動板の振動数に等しい。
- (4) 地盤上に設置した時の打撃振動数は1.5~2波長程度で、ほぼモノパルス振動の震源である。
- (5) 実用的な打撃力を発生させる小型軽量の電源装置(全体重量約60kg)が明らかになった。

キーワード：波動伝搬、地盤探査、震源、板たたき法、電磁誘導、モノパルス

1. まえがき

波動を利用した地盤探査は、地下資源等の探査や地盤内部の地質や地層を調査する手法として古くから行われている。特に、地質が複雑な場合やボーリングによるサンプリングが困難な場合に有用なものとして行われている。弾性波地盤探査においては、波動の高密度な計測技術、計測データの高度処理技術と併せて波動を発生させる震源の高性能化が求められている。

地盤探査の震源には火薬や圧縮空気等による爆発力を利用した方法、起震機等を利用した機械的な方法、重錘を落下させる方法と人力による板たたき法がある。港湾分野等における比較的浅い地質調査においては起震機による震源、重錘落下震源および板たたき法による震源が用いられている。これらの従来の震源では、起震機を利用した震源については発生波が連続波となるため、地層探査に用いる場合には起震機の振動がランダムであるこ

とやデータ解析段階において特殊処理が必要になっている。また、重錘落下震源については比較的low周波数の波動しか得にくい問題がある。更に、板たたき震源は人力作業によって行われているため、打撃が一定しないことや苛酷な作業の改善が求められている。

このため、地盤に波動を発生させる震源として、高周波数で高出力のものが地層探査の分解能や探査深度の観点から必要とされている。電磁誘導型震源は偏平うず巻きコイルに発生する磁力によって、振動板に打撃力を発生させるものである。この電磁誘導型震源の振動板はモノパルスの打撃となり、更に振動板の打撃力、打撃振動数を電氣的に制御することができる。本開発では、電磁誘導の発生原理に基づいた震源を開発し、波動を利用した地盤探査への適用を図っている。

本報告においては、地盤探査用として開発した電磁誘導型震源の発生波動の基本的な特性と現地盤で行った地盤探査性能の結果について述べている。更に、震源の打

* 機械技術部 主任研究官

** 機械技術部 計測施工研究室

撃力を高出力にする検討結果についても述べている。

2. 電磁誘導型震源

(1) 電磁誘導型震源の構造

電磁誘導型震源の基本原理を図-1に示す。震源部は偏平うず巻きコイルと薄い絶縁シートを挟んで密着した振動板から構成され、また電源部は高圧電源とコンデンサーから構成されている。電源部からパルス電流を供給されたコイルには磁力線がコイルと直角方向に高密度で発生し、密着した振動板を前方に瞬間的に押し機械的な

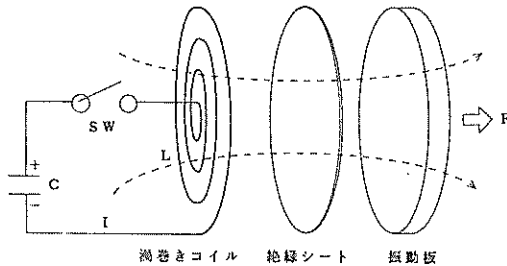


図-1 電磁誘導型震源の基本構成

打撃力を発生させる。

今回地盤探査用として開発した電磁誘導型震源の構造は図-2に示すもので、主な仕様は以下の通りである。

- ①全体重量 : 19.0 kg
- ②振動板
 - ・材質, 大きさ : アルミ, 外径=26cm φ, 厚さ=5cm
 - ・重量 : 7.4 kg
 - ・振幅ストローク : 10 mm
- ③コイル
 - ・コイル素線 : 銅線 (1 mm×2.5 mmの平角線)
 - ・コイル巻数 : 127巻, 2段重ね
 - ・コイル径 : 内径=2.2 cm φ, 外径=29.5 cm φ
- ④絶縁シート : マイラー紙, 厚さ=0.127 mm
- ⑤導線 : 長さ=19 m×2本

この震源ではスパイクの付いた円形の振動板が地盤を打撃し、地盤に波動を発生させる。振動板と取り付け枠の可動範囲は、約10mmである。コイルが2段になっているのは、地盤探査に適した波動の周波数にするためコイルのインダクタンスを調整したことによるものである。装置全体としては、これらの他に震源に電気エネルギーを供給する電源装置（高圧電源部+コンデンサー部）がある。

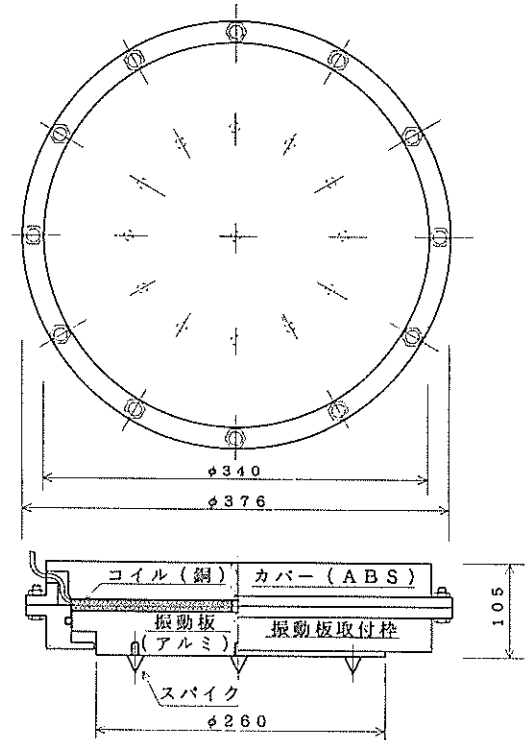


図-2 電磁誘導型震源の構造

(2) 電磁誘導型震源の発生打撃力と振動数

電磁誘導型震源の発生打撃力は、うず巻きコイルに流れる電流とコイルのインダクタンスによって決まる。うず巻きコイルのインダクタンスは、振動板がコイルに密着状態の時、変圧器の漏洩インダクタンスと同様にコイルと振動板の空間距離の関数となる。すなわち、振動板が発生する力は、以下の式によって一般的に表される。

$$P = \frac{I^2}{2} \frac{dL_s(a)}{da} \quad (1)$$

ここで、 P : 振動板に発生する打撃力

I : コイルに流れる電流

L_s : コイルのインダクタンス

a : コイルと振動板の間隔

コイルの電流と振動板の電流がそれぞれ表面に集中して流れ、両電流の間隔が空間距離 a に等しいと仮定すると、コイルのインダクタンスは、

$$L_s(a) = \mu_0 n^2 a \pi \quad (2)$$

ここで、 μ_0 : 真空透磁率 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

n : コイルの巻数

これを(1)式に入れると、振動板が発生する力は以下のようになる。

$$P = \frac{\mu_0 \pi n^2}{2} I^2 \quad (3)$$

振動板に流れる電流の電気抵抗を無視すると、これと全く同じ形の環状電流が逆向きに流れ、(3)式と同一の力が発生している。すなわち、電磁誘導型震源の振動板に発生する打撃力は、コイルの巻数とコイルに流れる電流の2乗に比例する。

無損失の状態では、パルス電流放電開始後、回路のインダクタンスとコンデンサー容量Cとで決まる周期の1/4を経過したとき電流は最大値となる。

$$I_0 = V (C/L_0)^{1/2}$$

ここで、V：印加電圧

これを(3)式に入れると、最大打撃力 P_0 は、

$$P_0 = \frac{CV^2}{2} \frac{1}{a} \quad (4)$$

となり、蓄積エネルギー $CV^2/2$ に比例し、コイルと振動板の空間距離 a に反比例する。

一方、電源部、震源部の全体系で考えた場合の電気的な等価回路は、図-3に示すようになる。すなわち、導線部のインダクタンス L_s 、コイルの抵抗 R_1 、また振動板には一次側からみた等価抵抗 R_2 を考慮する必要がある。図において L_0 は振動板が密着したときのインダクタンスであり、 L は振動板が無い状態のインダクタンスである。抵抗 R_1 と等価抵抗 R_2 は、表皮効果を考えると以下のようなになる。

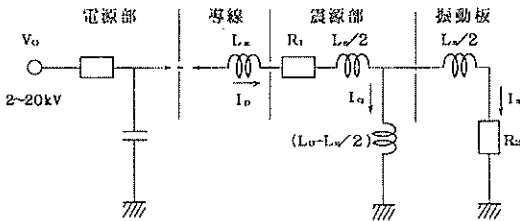


図-3 電磁誘導型震源電気等価回路

$$R_1 = \frac{\pi n^2}{\sigma \delta} m, \quad R_2 = \frac{\pi n^2}{\rho \delta} \quad (5)$$

ここで、 $m=2$ ：コイルが円形断面の絶縁線の場合の断面減少を表す係数

σ ：コイルの材質による導電率

δ は電流が流れる表皮の厚さで、振動板の厚さが十分に厚い場合、下記の理論式によって求められる。

$$\sigma = (\pi f \sigma \mu_0)^{-1/2}$$

ここで、 f ：コイルに流れる電流の周波数

振動板の厚さ(d)が δ より薄い場合と厚い場合の両方を一括して表現すると、 R_2 は以下の式になる。

$$R_2 = \frac{\pi n^2}{\sigma \delta} \coth \frac{d}{\delta}$$

これらの電気抵抗を考慮すると、電流が最大になる時刻 τ_0 における電流値 I_0 は、以下の式になる。

$$I_0 = V \sqrt{C/L} \exp(-\beta \tau_0) \quad (6)$$

ここで、 L ：全インダクタンス ($L=L_s+L_2$)

$$\beta = R/2L, \quad (R=R_1+R_2)$$

(6)式を(3)式に代入すると、振動板に発生する最大の打撃力が以下の式によって求められる。

$$P_0 = \frac{N_0 \mu_0 \pi n^2}{L} \exp \left[-\frac{\pi \tau_0}{\sigma \delta} \left(m + \coth \frac{d}{\delta} \right) \frac{n^2}{L} \right] \quad (7)$$

ここで、 $N_0 = CV^2/2$ ：電源部の蓄積エネルギー (ジュール)

また、電気回路の固有振動数は、電流が最大になる時刻の $1/4 \tau_0$ を周期とする周波数として、振動板が無い状態のコイルのインダクタンス L_0 を用いて以下の式によって求められる。

$$\frac{1}{4 \tau_0} = f = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L_0 C}} \quad (8)$$

一方、振動板の振動数 f_d は、(8)式 L_0 の代わりに

振動板がある状態の全インダクタンス L を入れて求められる。すなわち、

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

3. 円形フーチング基礎から発生する波動

地表面の点振動した時に発生する波動および伝搬特性については、古くから理論研究が行われている。半無限地盤表面の点振動が短時間であれば、遠方においては図-4 (a) に示す3つの波動が伝搬する。すなわち、P波、S波およびレイリー波の順に到着する。P波、S波は振幅が小さく、レイリー波の振幅は大きい。これらの波は、震源から距離が離れるにしたがってこれらの波の到着する時間間隔は大きくなり、振幅は小さくなる。図-4 (a), (b) に示す①から始まる粒子運動の水平成分と垂直成分を合成すると、図-4 (c) に示すようなレイリー波に対応する表面運動の粒子運動の軌跡は逆戻りする楕円となる。

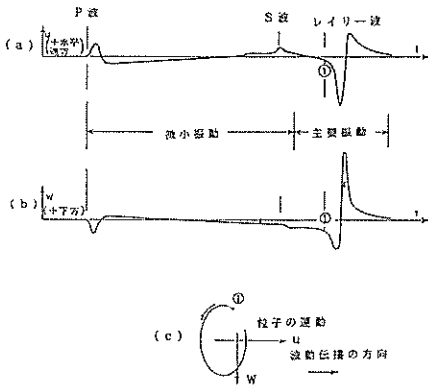


図-4 表面点源による理想半無限媒体内の波動 (Lam, 1904による)

更に、震源が円形フーチング基礎の場合でも点震源と同様に、P波、S波およびレイリー波が伝搬する。また、震源から十分遠方の地盤内部の波動の伝搬は図-5に示すようなる。レイリー波は表面近くを円筒状の波頭となって伝搬し、P波は波動の進行方向に押しと引きの粒子運動で伝搬する。更に、S波は波頭の運動に直角な横方向の粒子運動で伝搬する。レイリー波が表面近くを伝搬するのに対して、P波、S波は地表面より内部により多く伝搬する。図においてP波、S波の波頭に沿った網掛け部の範囲は粒子振幅の相対変位を表しており、特にS波

は振幅が大きくなるせん断窓と呼ばれる範囲がある。また、震源からの距離 r の指数は、伝搬エネルギーの減衰の割合を示している。P波、S波の減衰は、表面近くでは距離の2乗に反比例して減衰するが、地盤内部では距離に反比例して減衰する。

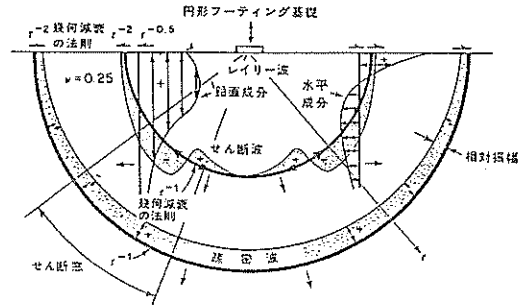


図-5 円形フーチング基礎から発生する波動の変位分布

4. 振動板の打撃力測定結果

(1) 電磁誘導型震源の電気回路特性

振動板の打撃力を求める(7)式の中で全インダクタンス L は、コイルに流れる電流の周波数によって支配される。ファンクション・ジェネレータを用いてsin波の電源電流周波数を変化させ、導線部を含む震源の全インダクタンスの測定結果を図-6に示す。測定は図-6の付図に示すように導線部とコイルをL回路として測定している。実際には図-3に示した R_1 、 R_2 の抵抗もあるが、導線とコイルの直流抵抗の測定結果は約 2Ω と小さく、全インダクタンスの測定値にそれ程影響を与えないものとする。測定の結果、電磁誘導型震源の全インダクタンスは電流周波数にほぼ反比例して小さくなっている。

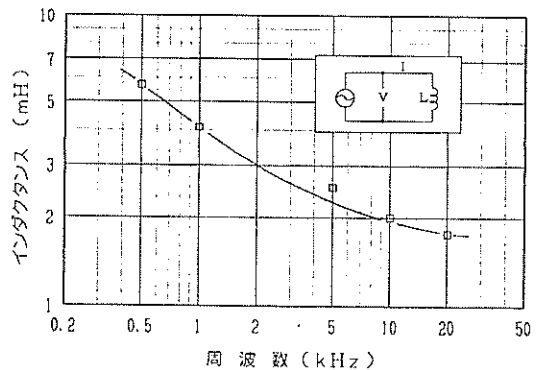


図-6 全インダクタンス測定結果

また、図-7は電源部でパルス電流を流した時のコイルに流れる電流波形を電圧測定により示したものである。コイルに流れる電流は、最大の電流に達してその後放出される波形となっている。この電流波形の最大電流になる立ち上がり時間 τ 。および放出までの時間 τ_0 は、コンデンサー容量によって決まる。図-8は図-7の測定結果から、コイルに流れる最大電流になる時間および放出までの時間のコンデンサー容量による変化を示す。すなわち、 τ 。および τ_0 は、(8)式と同様にLの平方根に比例する。

(2) 振動板打撃力の測定結果

振動板に発生する打撃力は、ロードセルを用いて測定を行っている。測定の方法は、ロードセルの軸上に震源の振動板の中心部を載せた状態で打撃を行っている。すなわち、この測定では振動板に発生する全打撃力をロー

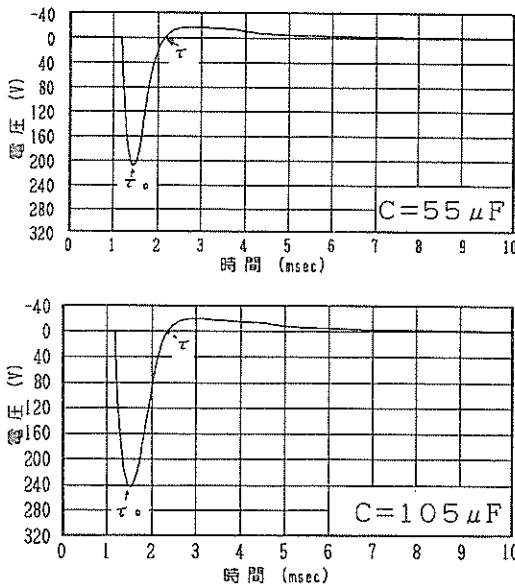


図-7 コイルに流れる電流波形

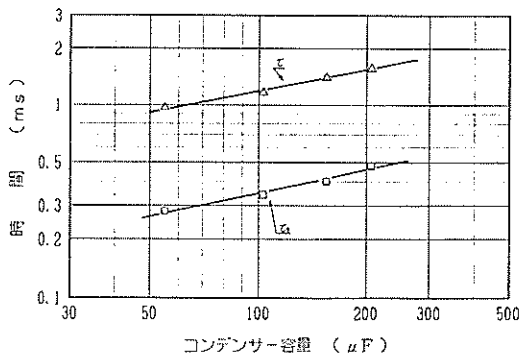
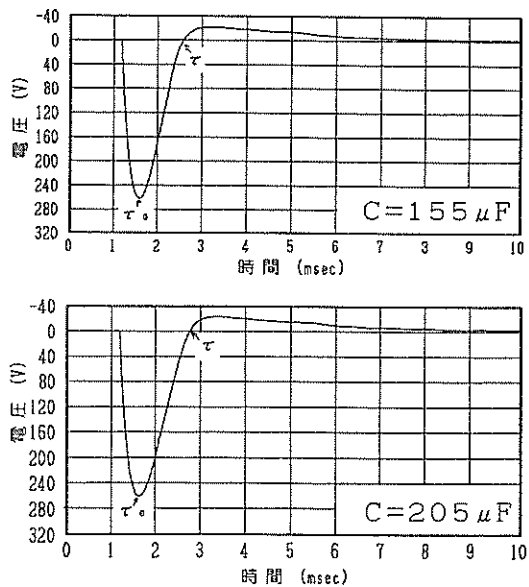


図-8 コイルに流れる電流の立ち上がり、放出時間

ドセルの軸上の一点で測定している。また、震源の上には上載荷重として砂袋を載せた状態で打撃力を測定している。砂袋は10kg/袋で、合計30kgまで変化させている。

図-9, 10は印加電圧およびコンデンサー容量と打撃力の関係を示したもので、ほぼ(7)式の理論式に示される関係と同様になっている。すなわち、印加電圧の2乗に比例し、コンデンサー容量にほぼ比例した関係となっている。測定範囲の最大打撃力は約400kg・f程度であった。

図-11は、上載荷重(砂袋の個数)を変えた場合の打撃力測定波形の一例を示したものである。打撃波形はパルス状になっているが、打撃後に震源が飛び上がることによるリバウンド打撃が発生している。リバウンド打撃の周期は上載荷重によって短くなっており、荷重30kgで



は最大打撃の波形に連続した状態になる。この震源上に荷重を載せることによる最大打撃力の変化は小さく、ほぼ一定であった。更に、鋼板等の上載荷重に対して砂を使用した場合には、振動板とコイルの反発後の細かい機械的な振動を吸収し、打撃波形を整形する効果が見られる。

(3) 地盤上の挙動および打撃力

震源を現地盤上に設置した時の振動板の挙動および打撃力の測定は、地盤上に震源を設置した状態で振動板の中心部に加速度センサーを設けて行っている。図-12は加速度データを積分して求めた振動板の挙動を示したものである。振動板の振動波形はsin波であり、打撃力の

最大値を示す最大振幅後にも最大振幅の60~80%の振動が0.5~1.0波長程度ある。すなわち、電磁誘導型震源の打撃波形はほぼsin波であり、1.5~2波長程度のモノパルスに近い波形である。

一方、震源上の荷重の影響を加速度波形から比較すると、砂の重量によって打撃発生に伴う高周波な振動が吸

収されることが分かる。また、重量によって変位の最大振幅および振動周期も小さくなる傾向が見られる。荷重30kgの打撃振動は1.5波長程度で、震源単体の状態に対して0.5波長程度少なくなりsin波に近い打撃振動波形となっている。

図-13は振動板の最大変位の時の加速度値と振動板の

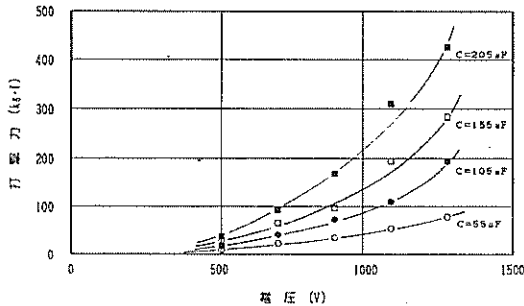


図-9 印可電圧と打撃力の関係

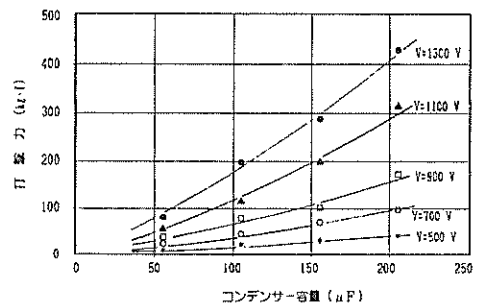


図-10 コンデンサー容量と打撃力の関係

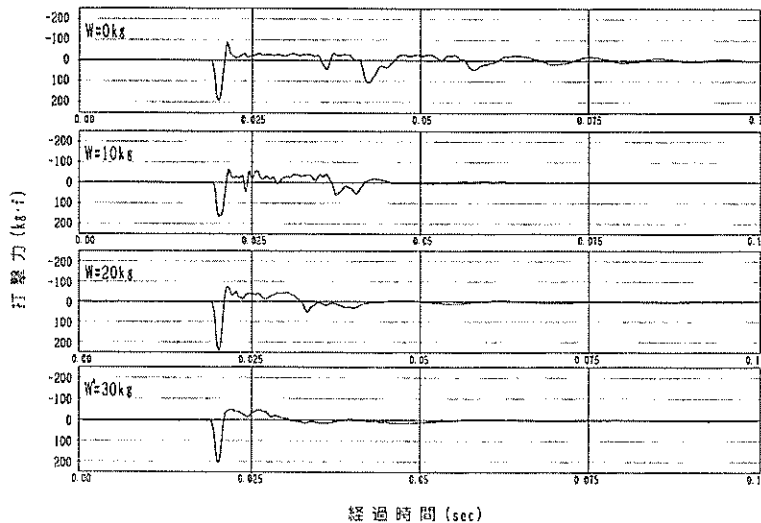


図-11 震源上載荷重による打撃力の変化

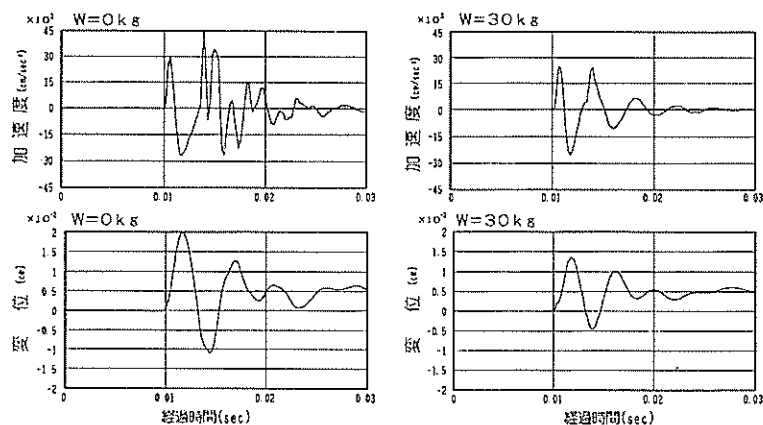


図-12 地盤上における打撃波形

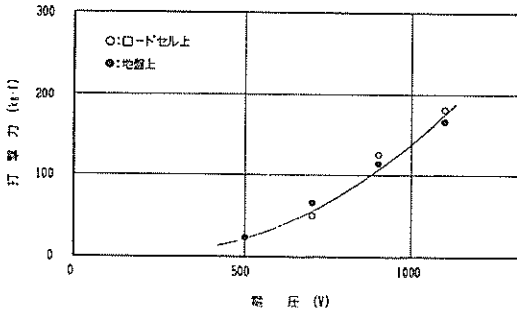


図-13 地盤上の打撃力の比較

質量との積から求めた打撃力とロードセルによって求めた打撃力を比較したもので、ほぼ等しい値になっている。したがって、地盤上でもロードセルで求めた打撃力と同様の打撃力が発生しているものと考えられる。

(4) 振動板打撃力および振動数の計算値と実測値の比較

電磁誘導型震源の打撃力は、(7)式に示した計算式によって求めることができる。ここでは、打撃力計算値と実測値の比較を行う。(7)式を再掲すれば、次のようになる。

$$P_0 = \frac{N_0 \mu_0 \pi n^2}{L} \exp \left[-\frac{\pi \tau_0}{\sigma \delta} \left(m + \coth \frac{d}{\delta} \right) \frac{n^2}{L} \right]$$

上式各係数を本開発の震源の設計値を当てはめてみると以下ようになる。

- 蓄積エネルギー : $N_0 = CV^2 / 2$
- コイルの巻数 : $n^2 = 127^2 \times 2$ (コイル2段重ねとして2倍した)
- 全インダクタンス : $L = 3.75 \sim 4.90 \times 10^{-3}$ ($C = 5 \sim 205 \mu F$)
- 銅線コイルの抵抗率 : $\rho = 1 / \sigma = 1.69 \times 10^{-8} \Omega m$ ($20^\circ c$)
- " 表皮厚さ : $\delta = (\pi f \sigma \mu_0)^{-1/2}$
- 振動板厚さ : $d = 5 \text{ cm}$
- 最大電流の時間 : $\tau_0 = 0.28 \sim 0.48 \text{ msec}$ ($C = 55 \sim 205 \mu F$)
- 断面減少係数 : $m = 2$ (コイルは矩形であるが円形断面と同様とした)

上記の各値の中で、 τ_0 は図-7に示した電流波形の

測定結果から求め、 L は求めた τ_0 から $f = 1/4\tau_0$ の周波数を求めて図-8の測定結果に当てはめて算出している。上記の各数値を入れた自然対数部の計算値は、実験のコンデンサー容量の範囲では約0.985でほぼ一定な値であった。

図-14は(7)式に上記の各数値を入れて求めた打撃力の計算値とロードセルで測定した実測値の比を表したもので、蓄積エネルギーが大きくなるにしたがって計算値に近い値となっている。蓄積エネルギーの小さい範囲では、計算値の50%程度になるが、これはコイルが2段重ねになっているためのものと考えられる。すなわち、振動板に発生する打撃力はコイルと振動板の距離に反比例するため、蓄積エネルギーの小さい範囲ではその影響が大きく、結果としてコイル1段分に近い打撃力となっているものと考えられる。

また、振動板の振動数は、(9)式に示した計算式によって求められる。(7)式の打撃力の計算と同様に求めた L を用いて計算した値とロードセル上の打撃振動数の測定結果を図-15に示す。コンデンサー容量の大きい

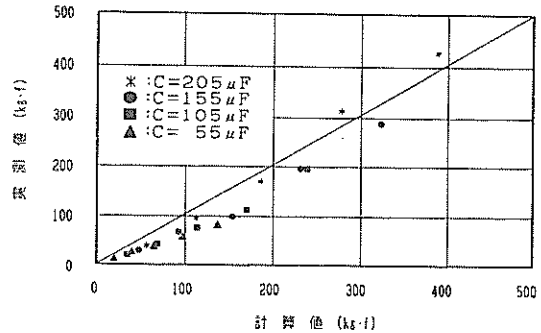


図-14 打撃力の計算値と実測値の比較

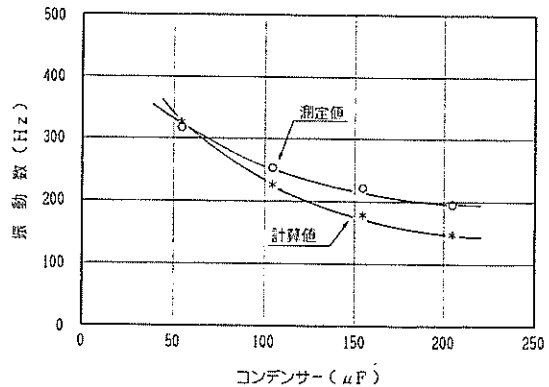


図-15 打撃振動振動数の計算値と実測値の比較

範囲では計算値を上回り、小さい範囲では下回った測定結果となっている。なお、地盤上で行った実験の振動板の振動数は、 $C=205\mu F$ のコンデンサー容量で約150 Hzとほぼ計算値に等しい結果であった。

5. 電磁誘導型震源による地盤探査実験結果

(1) 実験場所の地層

電磁誘導型震源による地盤探査の各実験は、三浦半島に位置する当所の研修センター構内で実施する。図-16には、2箇所の機械ボーリング等のデータによる実験場所の推定地層断面図を示し、表-1には層序表を示す。15mまでの地層は5層構造であり、以下の各実験は埋土の地表面に震源を設置して行っている。

(2) 電磁誘導型震源の地盤表面波動特性実験結果

電磁誘導型震源の現地盤表面の波動特性を調べるために、図-17に示す震源、受信センサーの配置により行った。電磁誘導型震源の実験条件は以下の通りである。

電磁誘導型震源：印可電圧=1500V

：コンデンサー容量=512 μF

上記の印加電圧およびコンデンサー容量による(7)、

(9)式による打撃力、振動板の振動数の計算値は、打撃力=935kg $\cdot f$ 、振動数=約80Hzとなる。

更に、本実験では、P波による浅層反射法等の地盤探査に用いられている小型重錘落下震源と比較を行っている。重錘落下震源は、50kgのウェートを1mの高さから鉄プレート上に自然落下させるものである。また、受信センサーは、3成分の加速度センサーおよび速度センサーを用いている。加速度センサーおよび速度センサーの仕様を下記に示す。

加速度センサー：圧電型加速度センサー；上下1成分、水平直交2成分

周波数特性=3~5000 Hz、最大出力=15 G

速度センサー：動コイル速度計；上下1成分、水平直交2成分

固有周波数=28 Hz

図-18、19は電磁誘導型震源および重錘落下震源の速度センサーによる受信波形を示したもので、電磁誘導型震源の波動は重錘落下震源に比較して震源の近傍において高周波数な波動が伝搬している。波形の初動の見掛け

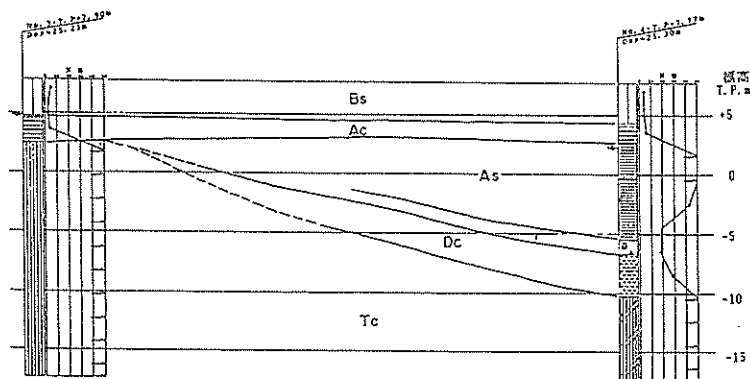


図-16 地盤探査実験場所の地層図

表-1 層序表

時代	地質名	記号	層厚(m)	記 事
第四紀	埋 土	Bs	3.20 ~3.50	粘性土・砂・泥岩塊による盛土である。
	沖積粘性土層	Ac	1.60 ~2.20	含水比は中位で、粘性は高い固結シルト混入。
	沖積砂質土層	As	9.40	粒徑均一、所々小礫・貝殻混入。No.3では欠落。
	洪積粘性土層	Dc	3.55	砂分混入、硬質。
第三紀	泥 岩 層 (三浦層群)	Tc	-	含水比少なく、硬質。17は20cm程度の棒状となる。所々砂分が優勢となる。

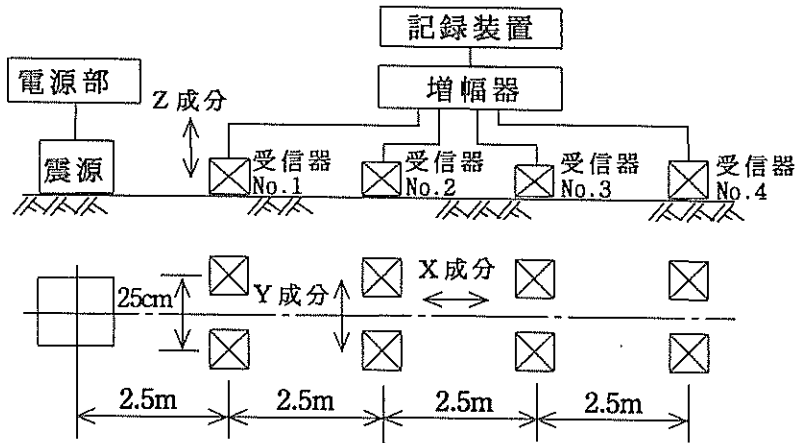


図-17 表面波動特性測定の機器配置

速度は約500m/secであり、後に述べるP S速度検層結果から得られてた速度からP波に相当している。また、振幅卓越付近の見掛け速度は、約200m/secとS波に相当している。

図-20はS波付近の振幅の卓越付近のオービット解析結果を示したもので、鉛直方向成分(z)と進行方向成分(x)粒子軌跡は後戻りする楕円となっており、レイリー波の特徴を示している。すなわち、最大振幅の受信波形はレイリー波であり、S波はそのレイリー波の直前波形と考えられる。

図-21は加速度センサーによる伝搬波動の振動波形をフーリエスペクトル解析を行い、各測定点における卓越成分波の周波数を求め、震源からの距離による振動加速度の大きさを示したものである。電磁誘導型震源の場合、各測定点の振動周波数および加速度の大きさは、震源からの距離によって大きく変化している。X,Y,Z成分によって振動周波数は多少異なるが、震源から2.5mでは200Hz前後であるが、10mでは100Hz前後になっている。振動加速度の大きさは、ほぼ距離の2乗に反比例して減衰している。重錘落下震源の各測定点の周波数は、Y成分を除けば100Hz付近にあり、ほぼ一定であった。また、図には示していないが、電磁誘導型震源の速度センサーで受信した振動周波数は各測定点で等しく、80~100Hzの範囲であった。

一方、電磁誘導型震源の各測定点の受信加速度の大きさは、重錘落下震源の1/10程度であった。

(3) P S速度検層実験結果

P S速度検層実験は同一場所内の15mのボーリング孔を利用して行っている。実験条件は以下の通りである。

- 電磁誘導型震源：印加電圧=1500V、コンデンサー

容量=512 μ F

震源アダプター (図-22)

- 板たたき震源：長さ=150cm、幅=30cm、厚さ=10cm
- 震源位置：調査孔より1m
- 受信器：孔内用受信器
動コイル速度計；上下1成分，水平直交2成分，固有周波数=28Hz
- 測定孔：No.3孔
- 受信器深度：2,4,6,8,10,12,15m

上記の電磁誘導型震源の印加電圧およびコンデンサー容量による(7)、(9)式による打撃力、振動板の振動数の計算値は、前記実験と同様に打撃力=935kg \cdot f、振動数=約80Hzとなる。

本試験に用いた震源は図-2に示した震源の改造前のもので、コイルは同一仕様である。しかし、図-2に示した震源とは振動板の構造が異なり、厚さ約5mmの振動板の周辺がボルトによって取り付け枠に固定されている。したがって、この場合の震源では振動板が膜の状態で振動し打撃する。また、この実験では図-22に示したアルミ製のアダプターを用いている。このアダプターの上部に電磁誘導型震源を設置して地盤を打撃している。アダプターの底面は、三角刃(頂角約82°)になっている。これは、アダプター上部の震源の垂直打撃力を三角刃の食い込みによってせん断力が発生しやすいうにしたものである。

図-23は電磁誘導型震源のP S速度検層結果を示したものである。受信点の間隔が2mであったため、速度検層の地層分解能は十分でないものの、各受信点の波形においてはP波、S波が比較的明瞭に記録されている。こ

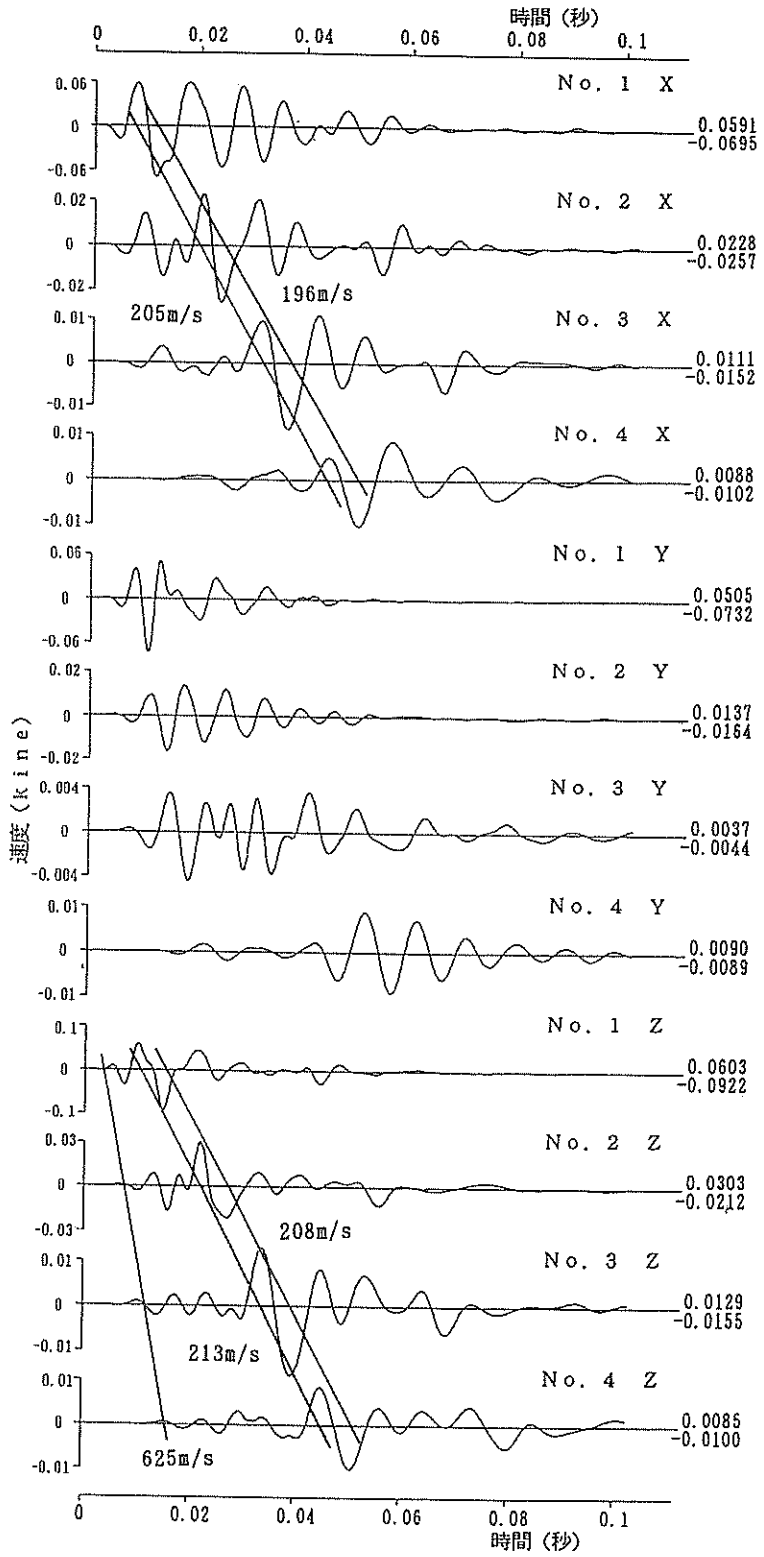


図-18 電磁誘導型震源による表面波の記録波形

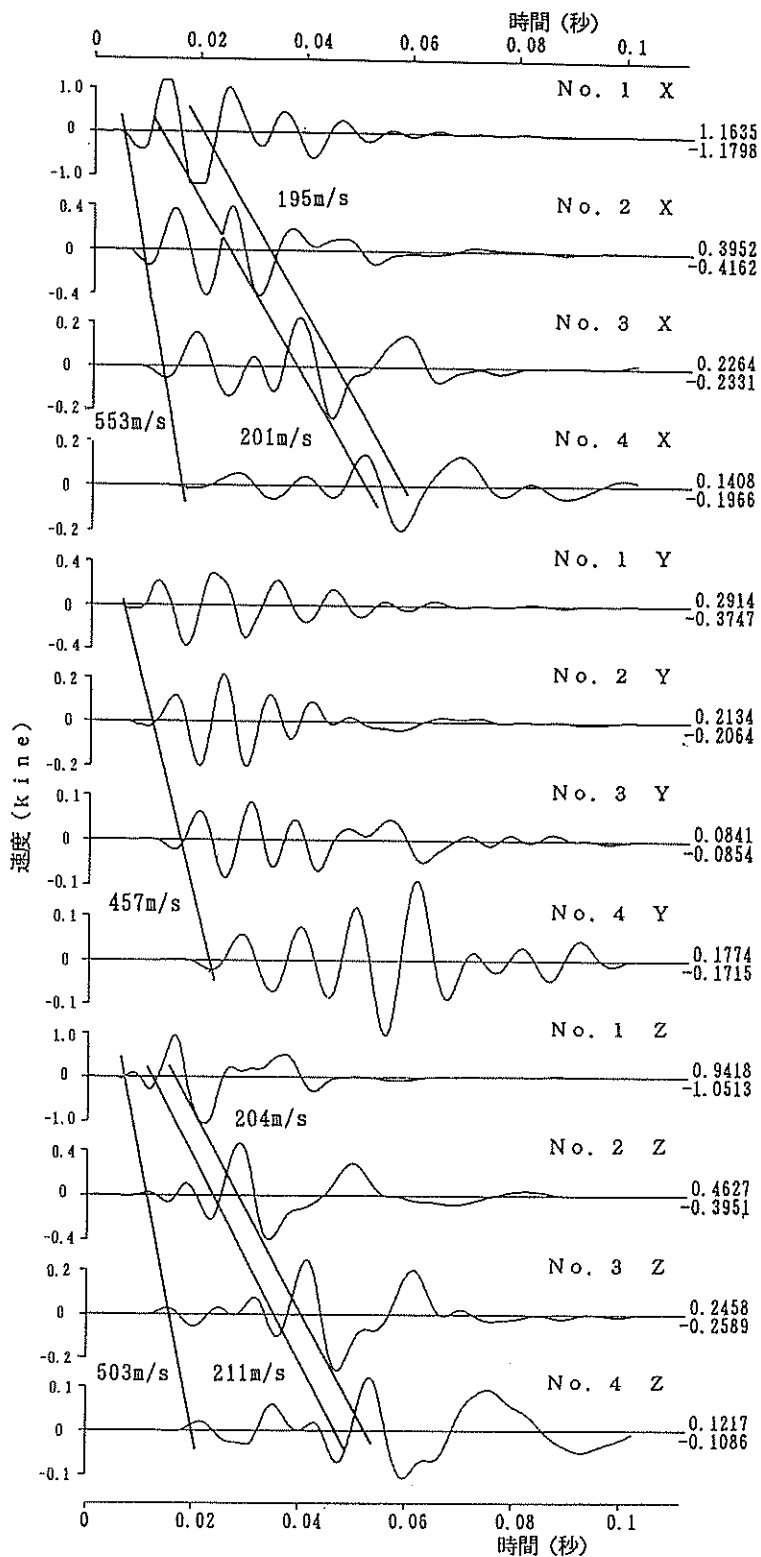


図-19 重錘落下震源による表面波の記録波形

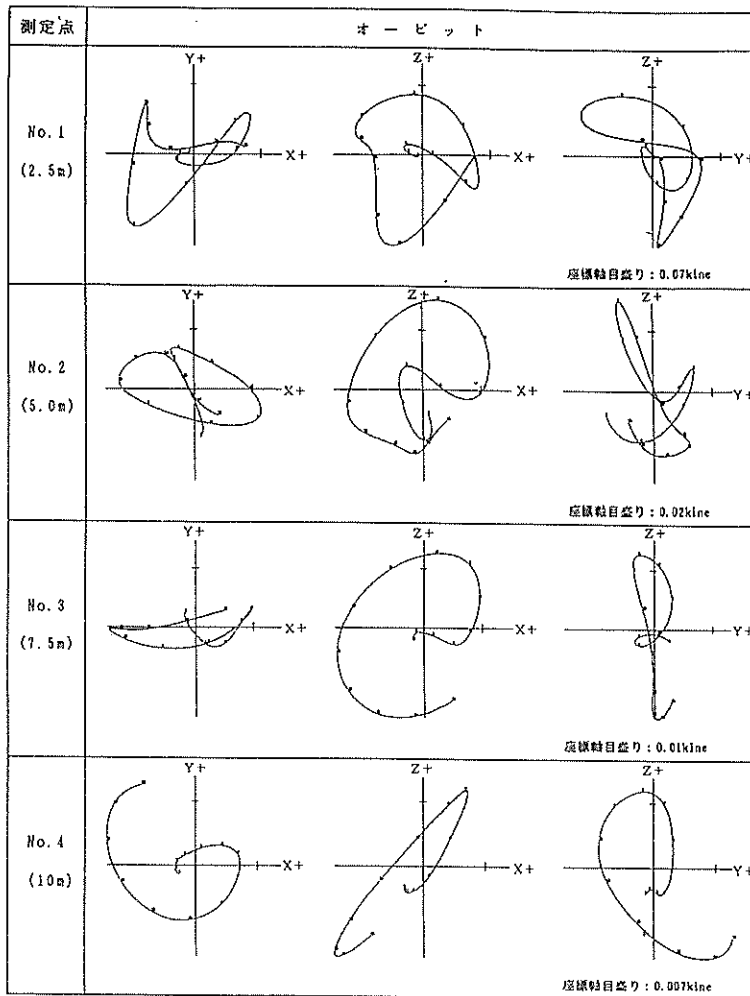


図-20 振幅卓越波付近のオービット解析結果

のP S速度検層結果から得られたP波、S波の速度は、同じく行った板たたき震源（P波：垂直打撃、S波：水平打撃）と同一の結果であった。

（4）浅層反射法地盤探査実験結果

浅層反射法地盤探査は、P S速度検層実験と同一の震源とアダプターの組み合わせによるS波の地盤探査、また図-2に示した改造後の震源によるP波の地盤探査を行っている。この2つの実験は同一場所で行っている。

S波探査の実験条件

- 電磁誘導型震源 : 印加電圧=1800V, コンデンサー容量=512 μ F
- 震源アダプター : 図-2 2のアダプター
- 板たたき震源 : 長さ=150 cm, 幅=30 cm, 厚さ=10 cm, 上載荷重=480 kg, カケヤによる打撃

• 測線長 : 100m \times 1測線

• 受信点間隔 : 1 m

• スタッキング回数: 4回

• 受信器 : 勁コイル型速度計, 固有振動数=40Hz

• 成分数 : 48

• 水平重合数 : 最大24

• サンプルング間隔: 1 ms

P波探査の実験条件

• 電磁誘導型震源 : 印加電圧=1800V, コンデンサー容量=505 μ F

• 測線長さ以下の各条件は、S波探査の実験条件に同じ

上記の電磁誘導型震源の印加電圧およびコンデンサー容量による(7), (9)式による打撃力, 振動板の振動

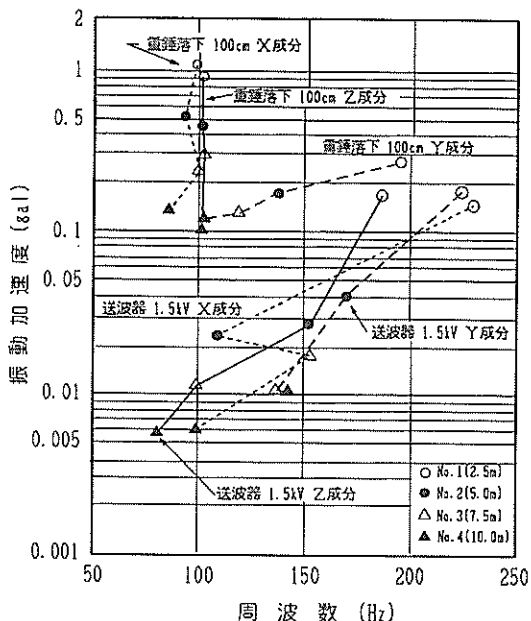


図-21 フーリエスペクトルによる卓越成分波の振動数と振動加速度

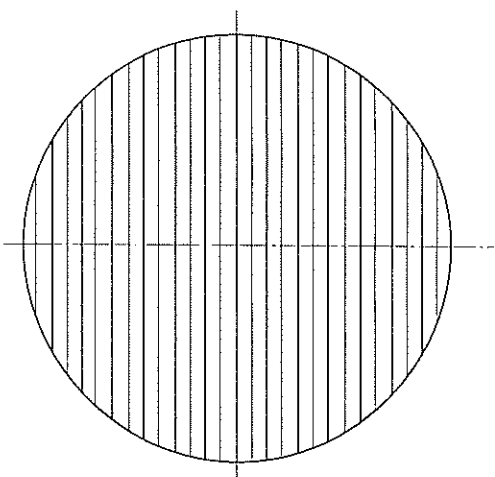
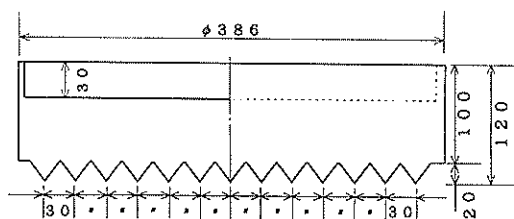


図-22 電磁誘導型震源用アダプター

数の計算値は、打撃力=1,346kg・f、振動数=約80Hzとなる。

図-24はS波探査の実験における電磁誘導型震源と板たたき震源のショットレコードの例を示したものである。なお、受信記録は測線に対して直角方向の水平動の波動

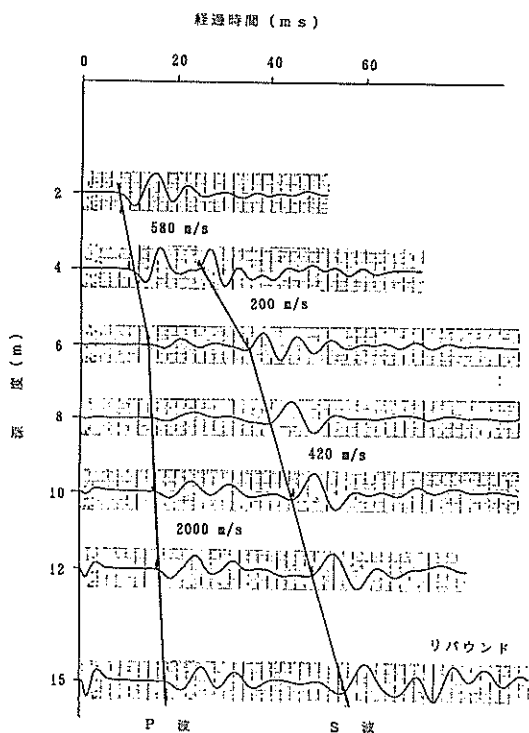


図-23 P S速度検層結果

を記録している。図のショットレコードから板たたき震源と電磁誘導型震源を比較すると、以下の特徴がある。

- ①両方の記録とも24ch以後は波の減衰が大きくノイズが目立つようになる。
- ②24chまでの波の周波数は、板たたき法では80~90Hzが卓越し、電磁誘導震源では80~90Hzの周波数に加えて130Hz程度の周波数も現れ、全体的に高い周波数である。
- ③板たたき法の記録の初動の見掛け速度は、約490m/secでP S速度検層で得られた泥岩層のS波に近い速度で、S波の屈折波と考えられる。
- ④電磁誘導震源の記録の初動の見掛け速度も約490m/secで板たたき法と同じである。しかし、初動に重なるように8~16chの0.04秒付近にかなり傾斜のゆるい波列があり、この波列の見掛け速度は1700m/secで泥岩層のP波速度に近く、泥岩層のP波の屈折波と考えられる。
- ⑤電磁誘導型震源は実験の範囲では打撃エネルギーが小さく、記録の明瞭性は板たたき法が優れている。

図-25、26にS波探査、P波探査による反射法の地盤探査結果を示す。図-25のS波探査結果は、図-16に示した5層の地層が探査されている。この電磁誘導型震源(アダプター付)を用いたS波の地盤探査結果は、板た

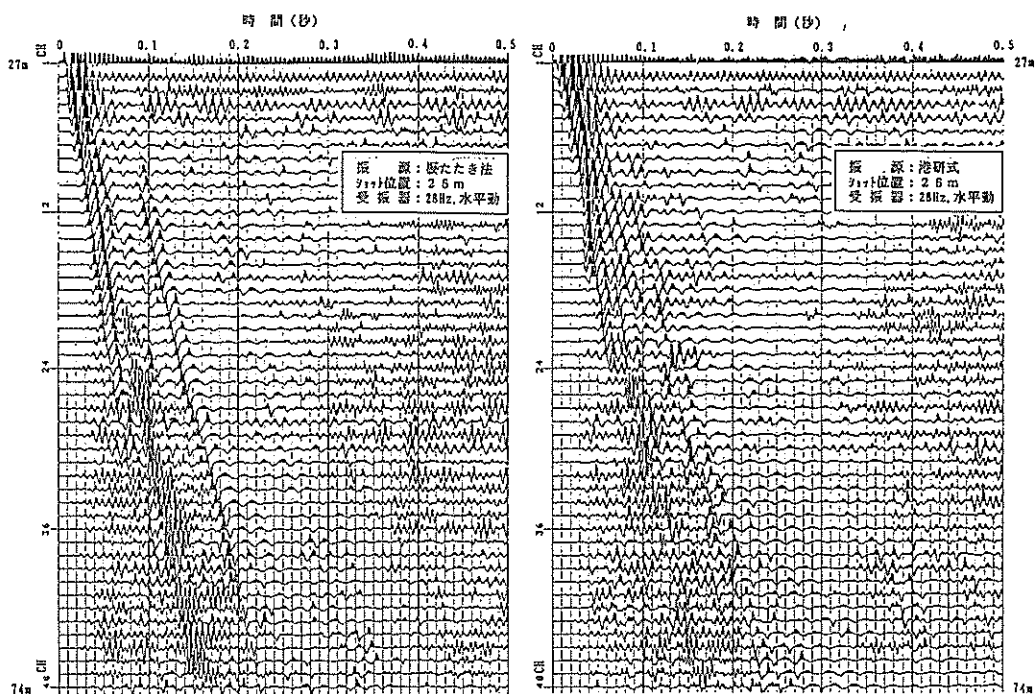
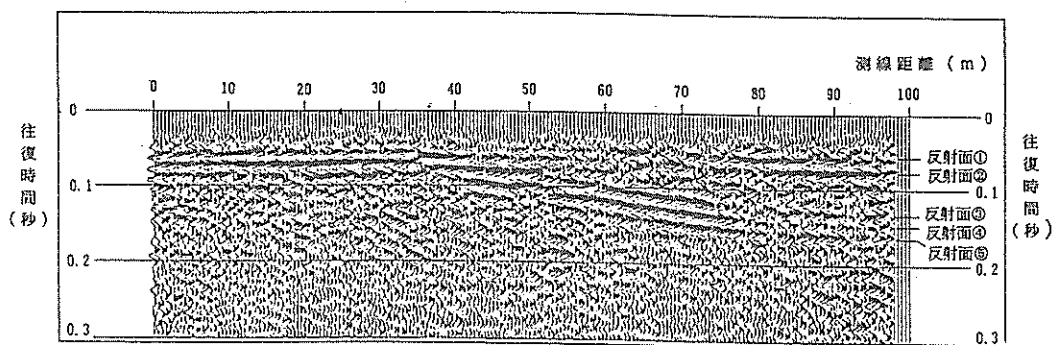
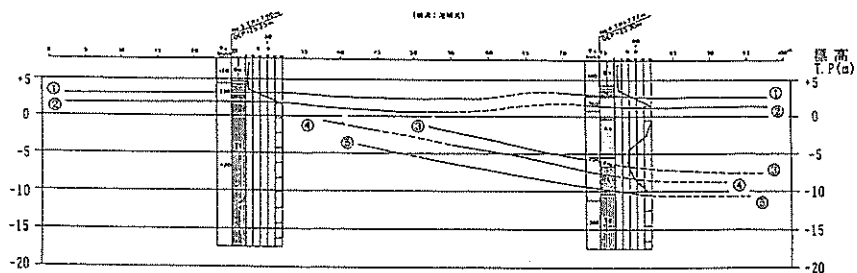


図-24 S波探査ショットレコード

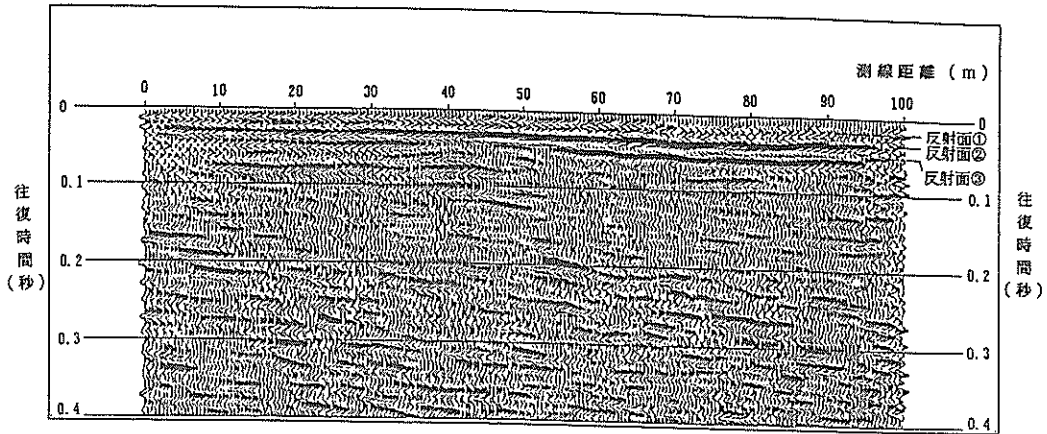


【S波時間断面図】

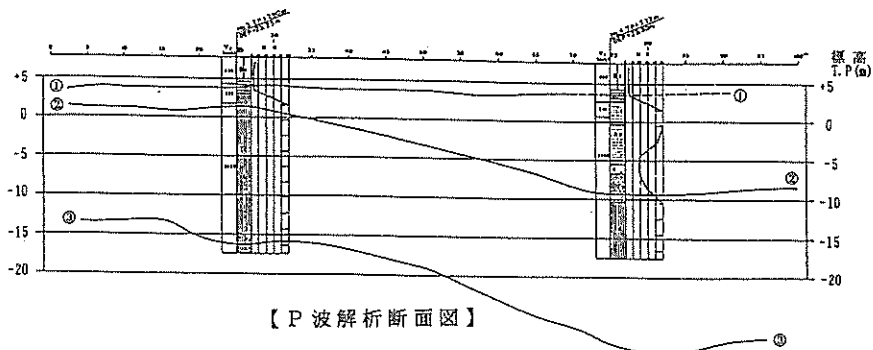


【S波解析断面図】

図-25 電磁誘導型震源によるS波地盤探査結果



【 P 波時間断面図 】



【 P 波解析断面図 】

図-26 電磁誘導型震源によるP波地盤探査結果

たき震源の探査結果と比較して、反射断面の連続性に一部不明瞭な箇所も見られるが、ほぼ同様な探査結果であった。

一方、P波探査結果では、3層の地層構造が得られている。探査結果の1層目は、図-16に示した実験場所の地層図から沖積粘土層のもので、2層目は泥岩層に相当している。また、3層目は図-16の地層図より深い地層からのもので、最大30mの深さの地層であった。

また、S波探査とP波探査の探査地層の構造の違いは、実験場所ではP波とS波の速度が数倍違うことによるものと考えられる。なお、S波およびP波探査のデータ処理は、図-27に示すフローにより行っている。

6. 電磁誘導型震源の地盤探査実用装置の検討

電磁誘導型震源は、従来の板たたき法によるS波震源および重錘落下のP波震源と比較して、高周波数な波動が得られる反面、受信強度は実験の範囲では小さかった。実験に用いた電源装置の印可電圧およびコンデンサー容量は、最大で2KVと約500 μ Fの小規模な装置であった。そのため、電磁誘導型震源の打撃エネルギーを大きくする方策を検討する。

電磁誘導型震源の打撃力は(7)式に示したように、コイルに供給する蓄積エネルギーに比例し、全インダクタンスに反比例する。本検討では、(7)式で計算される打撃力の自然対数部が本開発の震源では0.985とほぼ1に近いので、蓄積エネルギーを大きくする方策を検討する。打撃エネルギーの目標値は、5. (2)の実験に用いた小型重錘落下震源と同様なエネルギーとするため、蓄積エネルギーを約10倍程度の大きくするものとした。これは、同実験において、震源から地表面の直線上に配置した各受信器点の受信波形の大きさが1/10になっていたことによる。

蓄積エネルギーを大きくするためには、印加電圧およびコンデンサー容量を大きくすることになるが、式からも明らかのようにコンデンサー容量には直線比例し、印加電圧には2乗に比例して大きくなる。一方で、印加電圧およびコンデンサー容量を大きくする場合、機器重量が増えるためフィールドでの取り扱いから装置重量を軽量化することを考慮する必要がある。高圧電源トランスやコンデンサーの機器重量は重く、特に、コンデンサーは機器単体重量が大きいことと、容量に応じて個数が増え重量が増加する。5. の各実験で用いた高圧電源装置は

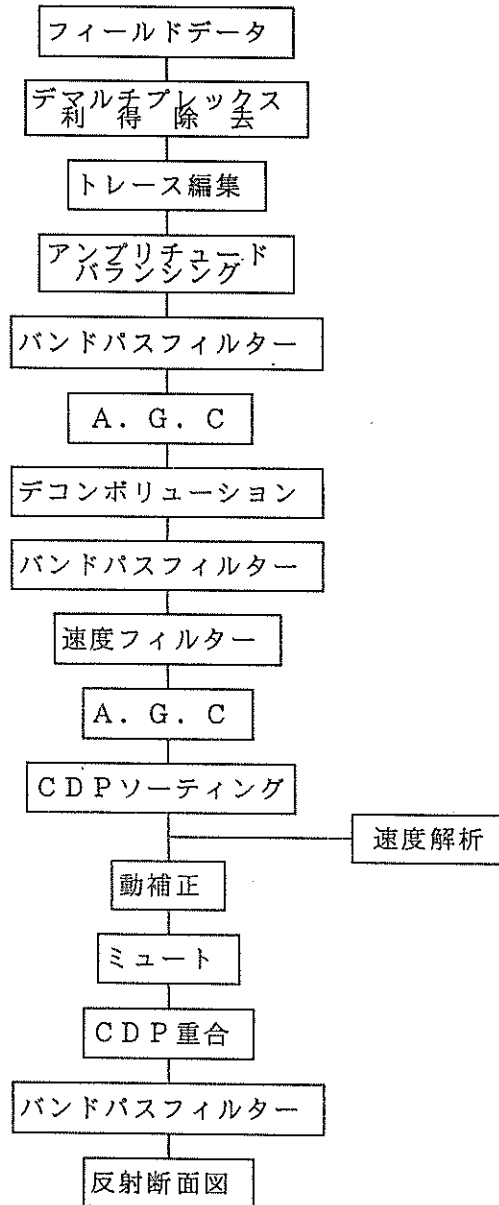


図-27 浅層反射法データ処理流れ図

58Kg, 増設コンデンサーは500 μ Fで112.5Kgで, 全体重量は約160Kgであった。そのため, 現地盤で行った反射法の地盤探査実験では台車を用いて移動をしている。

5. (2) の実験では $C = 505 \mu F$, $V = 1.5KV$ であり, 蓄積エネルギー10倍にする印加電圧 V' , コンデンサー容量 C' とすれば,

$$(C' / 505) \times (V' / 1.5)^2 = 10$$

としてコンデンサー容量または印加電圧を設定できる。市販されているコンデンサーで耐電圧7.5KV, 容量70

μF のものを3個用い, $C' = 210 \mu F$ とすれば $V' = 7.3KV$ となる。この電圧はコンデンサーの耐電圧も満たす。このときの電源装置の仕様は以下ようになる。

- ・印加電圧 : 7.5 KV
- ・駆動電流 : 1.5 A以下
- ・コンデンサー容量 : $70 \times 3 = 210 \mu F$
- ・パルス発生方式 : マニュアル発信
- ・パルス発生間隔 : 10秒以上
- ・高圧電源装置 : 大きさ = $300mm \times 250mm \times$

200mm, 重量=15kg

- ・コンデンサーボックス：大きさ=600mm×300mm×250mm, 重量=45kg

上記の全体システムは、高圧電源、コンデンサーボックス、震源の3つの機器によって構成される。これらの機器の中で、コンデンサーボックスは実際のフィールドで2人で扱う程度の重さとなっている。そのため、コンデンサーボックスを3個（15kg/個）分けて接続して使用することも現実的な方策と考える。3個とすることによって、振動板の振動数もコンデンサー容量の変化分として変えることができる。また、上記の印加電圧、コンデンサー容量による打撃力および振動数を（7）式、（9）式で計算すれば、打撃力=12,553kg・f, 振動数=160Hzとなる。

一方、図-2に示した震源は直径約38cmφ、重量約19kgであり、地盤探査用震源としては適度な大きさと重量と考える。また、フィールドでの取り扱いも容易に行えている。図-28には、図-2に示した震源と上記検討結果による電源装置の全体機器構成図を示す。

7. まとめ

地盤探査を目的として開発した電磁誘導型震源の理論的検討および実験の解析結果をまとめると以下のようになる。

- ①電磁誘導型震源の振動板に発生する打撃力および振動数は、計算式によって求められることが確認できた。その結果、打撃力はほぼコイルに供給される蓄積エネルギーに比例し、コイルの全インダクタンスに反比例する。また、打撃振動数は、コイルの全インダクタンスと電源部コンデンサー容量の積の平方根に反比例する。
- ②電磁誘導型震源を地盤上に設置した時の打撃振動は、1.5~2波長程度でほぼモノパルスである。
- ③震源の上載荷重によって打撃の振幅は小さくなるが、打撃力に対する影響は小さい。また、荷重30kgで全体の打撃振動は1.5波長程度になり、震源単体

の状態に比較して0.5波長程度少ない振動となる。

- ④現地盤上で表面波動伝搬実験では、従来の小型重錘落下震源に対して打撃エネルギーは約1/10程度であったが、高周波数な波動が得られている。
- ⑤電磁誘導型震源の振動板は円形フォーミング基礎の上下振動として、S波、P波が発生し、PS速度検層および浅層反射法のS波探査、P波探査震源に有効である。伝搬波動の周波数は、80~90Hzでほぼ振動板の振動数に等しい。
- ⑥実用的な打撃力、またフィールドでの取り扱いが容易な小型軽量の電源装置（全体重量約60Kg）が明らかになった。

今回開発した電磁誘導型震源は、円形な振動板が上下に地盤を打撃すもので、基本的にはP波、S波およびレイリー波が地盤内を波動伝搬する。そのため、伝搬波動の初動解析による反射法等の地盤探査においてはP波の震源として用いることが望ましいものとする。しかし、今回の現地盤実験において円形アダプター（図-22）を用いた場合には、板たたき震源と同様なS波の地盤探査結果を得られており、S波震源としても有効なものとする。本震源を用いてS波をより卓越して発生させるための方策として、図-22に示したようなアダプターまたは地盤に対して斜め方向および水平に打撃できるアダプターを用いることも有効なものとする。

地盤探査に用いる場合の打撃エネルギーの向上方策として、報告書の中では蓄積エネルギーを10倍した電源装置を提案した。提案した電源装置によれば、打撃エネルギーは従来の震源と同程度に成るものと考えられ、更に振動板の振動数も約160Hzで今回の実験に対して約2倍となり高周波数な波動の発生が期待できる。更に、電磁誘導型震源は、モノパルスな波動に加えて打撃力や振動数を電気的に制御することが可能なもので、港湾の岸壁裏埋め空隙およびコンクリート路盤の空隙等の弾性波探査震源としても適用可能なものとする。

今後は、本開発により得られた成果を基に、波動を利用した各種の地盤探査および裏埋め空隙等探査の高性能

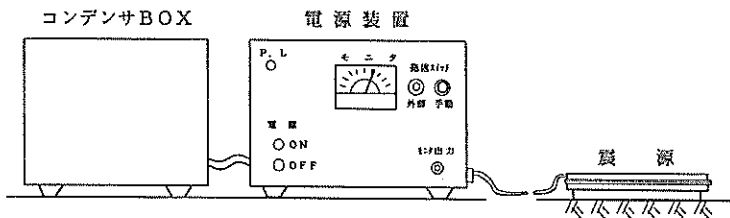


図-28 電磁誘導型震源の実用的な機器構成図

化に資するための震源として適用を図って行きたい。

最後に、電磁誘導型震源の開発は、波動を利用した地盤探査技術の開発の一環として行ったもので、本技術開発について当所土質部動土質研究室善室長よりご指導、助言を得ている。また、現地盤で行った各種の実験は(株)ダイヤコンサルタントによって実施しており、地盤探査のノウハウまた情報等の提供を受けている。電磁誘導型震源の製作は東和製作所(株)によって行っており、電磁誘導方式の震源に関する各種の情報提供を受けている。ここに記して関係者各位に深甚なる感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 佐々宏一, 芦田譲, 菅野強: 建設防災技術者のための物理探査, 盛北出版(株), P66~70
- 2) 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社発行, P1540~1544
- 3) F・E・リチャート jr、J・R・ホールjr、R・D・ウッズ 共著: 土と基礎の振動鹿島出版会, P92~96
- 4) 本岡誠一, 奥島基良: 地下埋設物探査用電磁誘導形送波器, 日本音響学会誌, 29巻7号, 1973, P404~405

港湾技研資料 No.786

1994・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 有限会社 つばき印刷技研

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

Copyright © (1994) by P.H.R.I.

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

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