

固定式海洋構造物の地震応答に関する基礎的研究 (その1)

—実験報告および質点系による解析—

中 村 嶽 竹 本 靖
武 田 寿 一 安 楽 秀 嶽

Study on Fixed Offshore Structures Subjected to Earthquake Motion (Part 1)

—Report of Experiments and Analysis by a Lumped-Mass Model—

Takashi Nakamura Yasushi Takemoto
Toshikazu Takeda Hidetake Anraku

Abstract

This report concerns a fundamental study on fixed offshore structures subjected to earthquake motion. A one-mass model of a cylinder, a shape frequently used for marine structures and for which there is much hydraulic testing data available, was adopted, and the cylinder was made hollow in order that force due to added mass would be effective. There were three parameters used in the experiments—dimensions and shape of the testing tank, depth of water, and input force. In the analysis, an extension of the natural period of the model in water due to added mass and an increase in damping due to drag force of water were assumed, and an added mass coefficient was determined for the former and a drag coefficient for the latter. It was possible to confirm the properties of the former from data of water-pressure gages, but it was difficult for those of the latter to be grasped by experiments and this point is being further researched.

概 要

本論文は固定式海洋構造物の地震応答に関する基礎的資料を得る目的で、一質点モデルを用いて行なった振動実験および解析の結果の報告である。モデルは水理実験データが多く、しかも海洋構造物によく用いられる形状である円筒を採用し、水の質量効果を受け易いように中空とし、振動実験は水槽の大きさと形状、水深、入力をパラメーターとして行なって水中における振動特性を調べた。解析においては水の慣性力を付加質量とし、水の形状抗力と造波抗力をまとめて水の抗力として運動方程式をたて、固有周期の伸びより質量係数を、減衰の増大より抗力係数を求めた。この付加質量の考え方は振動実験の水圧計の記録により妥当性が確認できたが、減衰の増大に関しては実験的に把握するのが難しく、今後の問題として残されている。

1. 序

海洋開発の発展に伴ない海洋構造物の建設が盛んになるに従って、これ等構造物に作用する荷重、外力条件に関する研究も各方面で試みられてきている。海洋構造物は大別すると固定式と浮遊式に分類でき、両者に共通な波力やそれに伴う疲労等の問題を扱った研究は数多く見られる。固定式海洋構造物の場合には波力に加え、陸上構造物と同様に地震荷重が作用する。しかし我国の構造物の設計において地震荷重が支配的な要因であるにも拘らず、海洋構造物の地震時の挙動は必ずしも明らかにされていない。また通常の陸上構造物でも動的解析の結果、強震時には建築規準法による

震度以上の荷重が作用することが指摘されて在来の震度法による計算では安全性に疑問が残されており、特に海洋構造物で人間が居住する場合には、入念な設計が必要とされよう。当研究所においてはこのような固定式海洋構造物の地震時の挙動を明らかにするための一連の研究を行っており、その一環としてここでは基礎的な設計資料を得る目的で一質点モデルを用いて行なった振動実験および解析の結果を(その1)、(その2)の2報において報告する。

モデルは水理実験データが多く、海洋構造物によく用いられる円筒を採用し、水の質量効果を受け易いように中空として、水槽の大きさと形状、水深、入力をパラメーターとした振動実験を行なった。

(その1)では実験結果とシュミレーション解析結果を示す。すなわち水の慣性力を付加質量とし、水の形状抗力と造波抗力をまとめて水の抗力として運動方程式をたて、固有周期の伸びより質量係数を、減衰の増大より抗力係数を求め、実験の水圧計記録よりその考え方の妥当性を確認した。(その2)では動水圧に特に注目し、FEMによる解析と実験結果との比較検討を行なった。

2. 振動実験

2.1. 実験装置

実験装置は図-1、図-2に示すように、水槽、供試体、水平振動台、加振機で構成され、供試体基礎にのみ振動入力を与え、水槽や水に直接入力伝わらないようにした。すなわち水槽を架台に載せ、その下に加振機と連結した水平振動台を設置して、その水平振動台上に供試体を2枚の板ばね(供試体支持ばね)によって支持した。またこの供試体支持ばねを囲んで水槽と水平振動台の間を柔らかなゴムパイプで接続して漏水を防ぐとともに、加振機のパワーの水槽への伝達を防いだ。

2.1.1. 水槽 水槽は図-1、写真-1に示す長手方向3.7m、幅1.9m、深さ1.41mの鋼製船型水槽と、図-2、写真-2に示す直径4.0m、深さ1.5mの鋼製円形大型水槽の二種類を用いた。

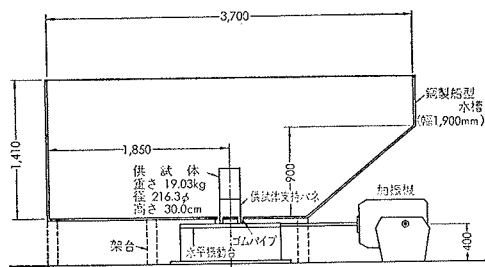


図-1 実験装置概略図(鋼製船型水槽)

- ② 供試体加速度計(東京測器AMS-5型)
- ③ 歪ゲージ(東京測器WFIA-3)
- ④ 供試体支持ばねの歪および供試体変位
- ⑤ 供試体水圧計(ST研究所FM10-05)
- ⑥ 液満計(計測技研SW-201型)
- ⑦ 水平振動台加速度計(東京測器AMS-2型)
- ⑧ 水平振動台駆動トランス(変換)(東京測器1000HPA)
- ⑨ 供試体水圧計(ST研究所FM10-05)
- ⑩ 液満計(計測技研SW-201型)

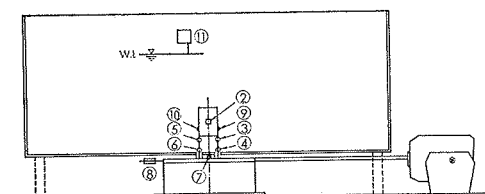


図-2 円形大型水槽と測定装置

2.1.2. 供試体 写真-3のように、供試体は直径216.3mm、高さ30.0cm、重さ19.03kgの中空の鋼製円筒で、内部の重心位置に加速度計を取り付けた。また水圧計を供試体の底から約 $1/8$ の高さの位置に2点取り付け、加振方向の動水圧を測定した。供試体支持ばねは、図-3に示す長さ約23cm、幅2.4cm、厚さ3.2mmの鋼製板ばね2枚より成る。供試体支持ばねに歪ゲージを貼り付け、振動中の歪を測定し、板ばねが弾性域内であることを調べるとともに、予備実験で得た変位-歪関係より供試体の変位を求めた。

2.1.3. 水平振動台 写真-4に示す水平振動台は長手方向100.0cm、幅34.0cm、厚さ3.2cm、重さ約99.2kgの鋼板から成り、4枚の鋼製板ばね(長さ35.0cm、幅4.0cm、厚さ2.0mm)で支持されている。自由振動より求めた水平振動台の固有周期は0.612秒(1.634Hz)で、供試体の固有周期(空気中で0.127秒~水中で0.154秒)と離れている。

2.1.4. 加振機 強制振動実験に用いた加振機は動電形加振機で次の示様となっている。

加振力：150 kg 周波数範囲：0~1000 Hz
 最大加速度：30 g 最大変位：20 mm

振動実験の入力の大きさは、供試体支持ばねが弾性域内に収まるように5~10galとし、振動数は水平振動

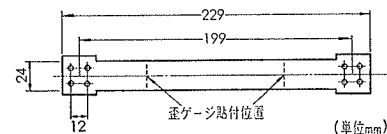


図-3 供試体支持ばね

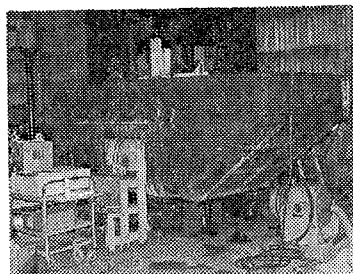


写真-1 鋼製船型水槽

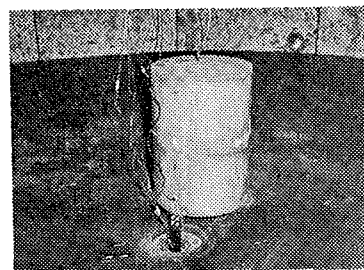


写真-3 供試体

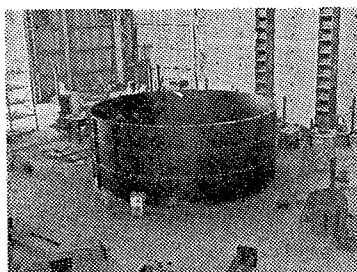


写真-2 円形大型水槽

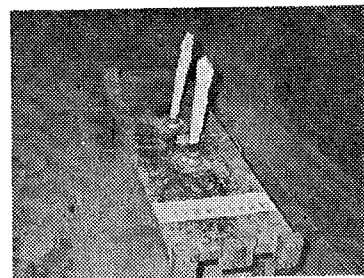


写真-4 水平振動台

台と供試体の固有周期を考慮して2.5~20Hzとした。

2.2. 測点および測定装置

振動実験における測点の位置を図一2に示す。実験データは全てデータレコーダーに記録し、電子計算機でデータ処理を行なった。

2.3. 実験パラメーター

- i) 鋼製船型水槽および円形大型水槽を用いた。
- ii) 水深を変化させ、供試体の水没体積を変えた。
- iii) 円形大型水槽では5gal および 8gal の正弦波一定加速度入力強制振動実験を行ない、鋼製船型水槽ではこれに更に自由振動をつけ加えた。

2.4. 実験方法

2.4.1. 強制振動実験 加振機を用いて 5gal および 8gal 一定加速度で振動数を約2.5Hzから20Hzまで変化させて入力を行ない共振曲線を求めた。

2.4.2. 自由振動実験 水平振動台を固定し、重錘で供試体を引張って初期変位を与えておき、針金を切断して自由振動を生ぜしめた。

3. 水中構造物の振動解析

水中構造物の動的解析法の1つとして、従来の空気中構造物の動的解析法を応用し、水中構造物を質点系として運動方程式をたて、振動解析を行なった。

水中で構造物が振動する場合に、構造物は流体の慣性力と、水の粘性による形状抗力、水面に波を造るために生じる造波抗力を受ける。従って流体の慣性力を付加質量 M_c として、また水の粘性による形状抗力と造波抗力を一緒にまとめて水の抗力として、水中構造物の運動方程式をたてた。

空気中の構造物の運動方程式は次式で表わされる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_A \cdot x = -F(t) \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{外力} : F(t) = M\ddot{y}(t) \dots\dots\dots(2)$$

ここに M : 構造物の質量, x, \dot{x}, \ddot{x} : 構造物の変位, 速度, 加速度, C : 減衰係数, K_A : 空気中のばね定数, $\ddot{y}(t)$: 地動加速度, $\dot{y}(t)$: 地動速度

$$\text{空気中固有円振動数} : \omega_A = \sqrt{M/K_A} \dots\dots\dots(3)$$

$C/M = 2h\omega_A$ (h : 減衰定数) とすれば、式(1)は次式で表わされる。

$$\ddot{x} + 2h\omega_A\dot{x} + \omega_A^2x = -\ddot{y}(t) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、供試体と支持ばねがボルト接合であるので減衰を履歴減衰として取り扱い、空気中も水中も同じ減衰定数を用いた。

水中における構造物は水の慣性力および水の抗力を受けるので、外力項 $F(t)$ は次式で表わされる。

$$F(t) = M\ddot{y}(t) + M_a\{\ddot{y}(t) + \ddot{x}\} + D|\dot{y}(t) + \dot{x}| \{\dot{y}(t) + \dot{x}\} \dots\dots\dots(5)$$

式(5)の右辺第2項は水の慣性力、第3項は水の抗力で、各係数は式(6)、式(7)で表わされる。

$$\text{付加質量} : M_c = C_M \cdot \rho \cdot V \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 C_M : 質量係数, ρ : 水の密度, V : 構造物の水没体積

$$D = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot A \dots\dots\dots(7)$$

ここに C_D : 抗力係数, A : 構造物の振動方向の水没投影面積

水中のばね定数 K_W は浮力の影響によって空気中のばね定数 K_A より強くなり、次式で表わされる。

$$K_W = K_A + \frac{\rho V g}{l} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 l : ばねの長さ, g : 重力加速度

従って水中構造物の運動方程式は、式(1)、(5)より

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_W x = -[M\ddot{y}(t) + M_a\{\ddot{y}(t) + \ddot{x}\} + D|\dot{y}(t) + \dot{x}| \{\dot{y}(t) + \dot{x}\}] \dots\dots\dots(9)$$

(9)式を変形して

$$(M + M_a)\ddot{x} + C\dot{x} + K_W x = -[(M + M_a)\ddot{y}(t) + D|\dot{y}(t) + \dot{x}| \{\dot{y}(t) + \dot{x}\}] \dots\dots\dots(10)$$

水中固有円振動数 :

$$\omega_W = \sqrt{K_W / (M + M_a)} \dots\dots\dots(11)$$

$C / (M + M_a) = 2h\omega_W$ とすれば、式(10)は次式となる。

$$\ddot{x} + 2h\omega_W\dot{x} + \omega_W^2x = -\left[\ddot{y}(t) + \frac{D}{M + M_a} |\dot{y}(t) + \dot{x}| \{\dot{y}(t) + \dot{x}\}\right] \dots\dots\dots(12)$$

水中構造物の振動特性である固有周期の伸びは付加質量 M_a により、減衰の増大は水の抗力によるものと考えられる。従って、空気中の振動実験より減衰定数を求めておき、水中の振動実験の固有周期の伸びより質量係数 C_M を求め、減衰の増大分に関して式(12)を用い、シュミレーション解析を行なって抗力係数 C_D を求めた。なお水中構造物の運動方程式(12)は右辺外力項に速度の自乗項を含んで非線形となるので、外力項の速度に一時刻前の値を代入することによって線形化し、近似解を求めた。

4. 実験および解析結果

鋼製船型水槽および円形大型水槽の実験および解析結果を以下の項目についてまとめた。

(1) 固有周期 図一4に示すように、供試体の水没体積に比例して固有周期が伸び、供試体が完没してほぼ一定値となった。水槽によって若干固有周期が異なるが、これは供試体が異なるためであり、固有周期の伸びの割合はほぼ等しく、この意味で水槽、入力による違いが固有周期に及ぼす影響は無視しうる。

(2) 質量係数 図一5に示すように、入力、水槽に関係なく供試体の水没体積に比例して質量係数 C_M の値は大きくなり、供試体が完没してからは(この場

合供試体の半径 $a=10.8\text{cm}$ 、高さ $H=30.0\text{cm}$ で $a/H=0.36$ となる) ほぼ一定の値 0.7 となった。質量係数 C_M の値は水の圧縮性の影響³⁾、物体の断面形状^{1), 2), 4)}、物体の細長比^{1), 2), 3), 4), 5)}、振動次数や振動モード³⁾等によって変わり、桜井²⁾が剛な円柱($a=3, 4$ および 5cm)を強制振動させて求めた C_M は、水没供試体の細長比が小さな場合($a=5\text{cm}$, $H=15\text{cm}$, $a/H=0.333$), 0.7 となり、本報告と同じ結果を得ている。

(3) 動水圧 図-7は水圧計によって測定した動水圧の共振曲線で、図-9の加速度共振曲線と共振点近傍では良く対応している。図-8は共振時における供試体の加速度、変位、動水圧を示したもので、各測定器具の特性等により正確な位相差は求められないが、動水圧の作用方向は構造物に働く慣性力の方向と一致

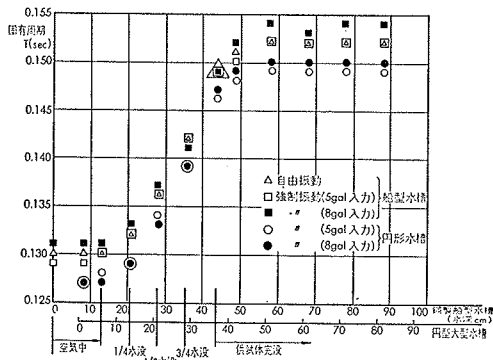


図-4 固有周期と水深との関係

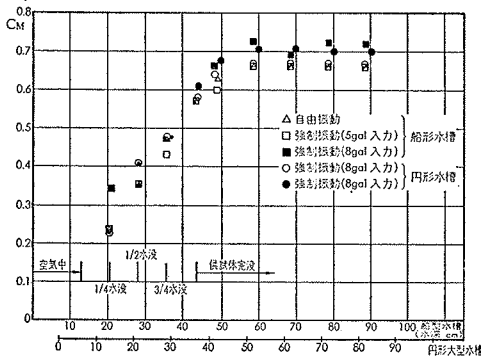


図-5 質量係数 C_M と水深との関係

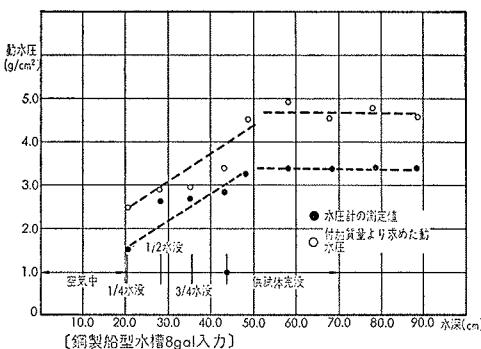


図-6 動水圧の比較 (実測値と計算値)

するのが分る。付加質量の考え方⁴⁾を用いると動水圧 P の大きさは次式で表わされる。

$$P = \frac{M_a \cdot \ddot{x}}{A} \dots \dots \dots (13)$$

図-6は鋼製船型水槽の8gal入力共振時における実測動水圧と、付加質量より式(13)を用いて求めた P を水深パラメーターとして示したもので、両者の傾向は良く類似しているが、その差は(その2)で述べるように動水圧の測定位置によるものと考えられる。

(4) 見掛けの減衰定数 空気中の振動実験においては減衰定数 h は、強制振動の場合は共振曲線の共振点での加速度応答倍率より、自由振動の場合は変位の対数減衰率より求めた。水中においては式(12)に含まれる速度の自乗に比例する水の抗力が有るが、見掛けの減衰定数として空気中の減衰定数を求めるのと同じ手法により求めた。図-10は水深をパラメーターとした見掛けの減衰定数を示したもので、見掛けの減衰定数は供試体の水没体積に比例して大きくなり、完没してほぼ一定となり、また入力が大きい場合には各水深においてその値は大きくなる。模型が若干異なるため空気中の減衰定数は円形水槽の方が船型水槽よりも大きい、水中における見掛けの減衰定数の増加の割合はほぼ等しい。

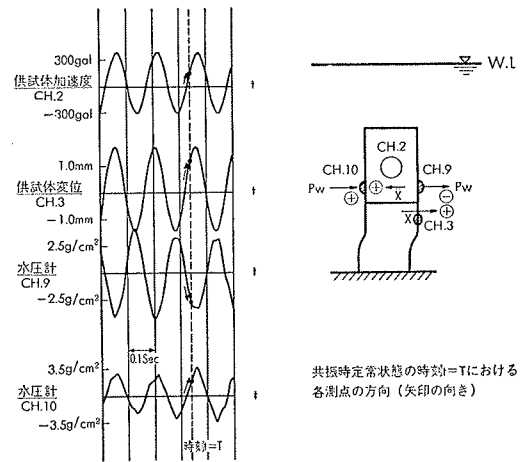


図-8 水中強制振動共振時の記録

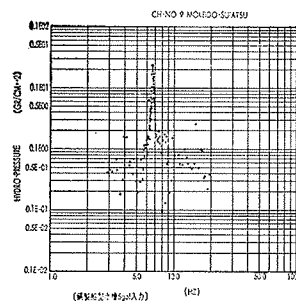


図-7 水圧計(船型水槽)

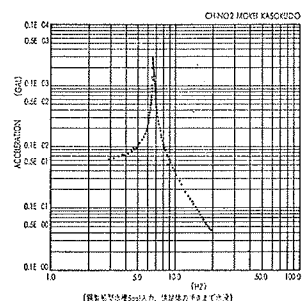


図-9 供試体加速度(船型水槽)

(5) 抗力係数 図-11に示すようにシュミレーション解析で求めた抗力係数 C_D は、供試体が水面上に出ている場合は波の発生等によってバラツキが有るが、完没してからは R_0 数 $10^3 \sim 10^5$ の範囲でほぼ1.5~2.5の値である。既往の研究で減衰に関して述べているのは少ないが、得られている抗力係数の質はバラツキが多い(1), (3), (4), (5), (6)。

(6) 水中振動実験において生じた波 強制振動においては、供試体が水面上に出ている状態では図-12のように、入力振動数が低い場合には周期の長く波高の小さな波が生じたが、共振振動数の近傍では供試体と同じ振動数の波紋状の波が生ずる(写真-5 船型水槽, 5gal 入力, 供試体 $1/4$ 水没時波高約2mm)。その波高は入力の大きさにほぼ比例し、見掛けの減衰定数に若干影響を与えているように思われるが、入力振動数が高くなれば波はほとんど生じなくなる。水深が大きくなって供試体が完没すれば、写真-6(船型水槽5gal 入力, 最大水深時)のように波はほとんど生じない。また水槽壁面による反射波は生じていない。

自由振動においては供試体が水面上に出ている場合には、供試体と同じ振動数の波を生ずるが、その波高は数mm程度で、供試体の減衰とともに治まる。また水深が大きくなり完没すれば、波はほとんど生じない。

5. おわりに

水槽、水深、入力をパラメーターとした円筒模型の

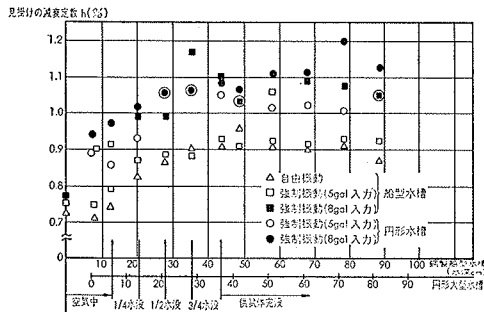


図-10 見掛けの減衰定数と水深との関係

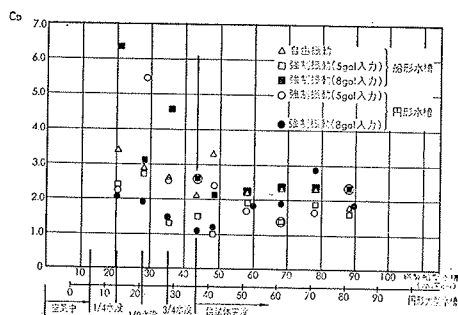


図-11 抗力係数 C_D と水深との関係

振動実験の結果を報告するとともに、質量係数、抗力係数の考え方を導入した振動解析を行ない、水中構造物の振動特性の1つである固有周期の増大を付加質量で表わすことの妥当性を確認することができた。またもう1つの特徴である減衰性の増大も、水の抗力によってある程度表現できることを示したが、減衰に関しては実験において把えるのが難しく、今後の問題として残されている。今後の研究としては、ランダム波入力の実験、更に構造物を多質点系にした場合の実験を行ない、固定式海洋構造物の振動特性を調べる計画である。最後に本研究を遂行するにあたり、御指導頂きました千葉工業大学園部泰寿教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) Ray. W. Clough : Effect of Earthquakes On Underwater Structures, 2nd, WCEE, Vol. II(1960)
- 2) 桜井彰雄：仮想質量と水中における柱の振動 35年度土木学会講演会梗概集III—29
- 3) 後藤尚男・土岐憲三：水中橋脚の振動と耐震設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第100号(昭38.12)
- 4) 岩崎敏男・三枚翹：水中にある柱状構造物の振動時仮想質量の実験, 土木技術資料(1968.2)
- 5) 武藤清, 太田多気晴, 安藤治彦, 越田洋：水中構造物の振動実験とその減衰特性について, 日本建築学会関東支部第43回学術研究発表会(47年度)
- 6) 岡本舜三, 加藤勝行, 伯野元彦：水中構造物の模型振動実験, 土木学会第17回年次学術講演会梗概集

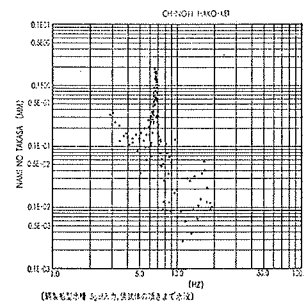


図-12 波高計(供試体頂きまで水沈)

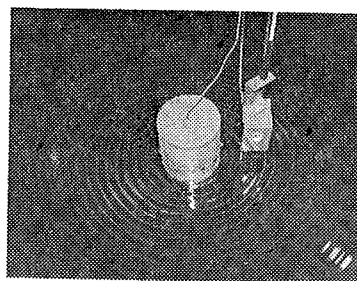


写真-5

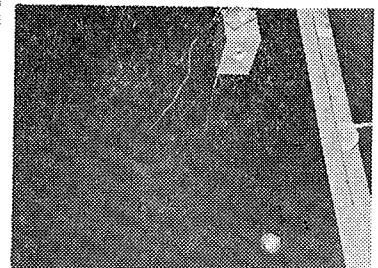


写真-6