

# 魚雷の擦痕から推定される 1930年北伊豆地震の震源域での強震動特性

大町達夫<sup>1</sup>・大塚 勇<sup>2</sup>・年縄 巧<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東京工業大学総合理工学研究科 教授 (〒226 横浜市緑区長津田 4259)

<sup>2</sup>学生員 東京工業大学総合理工学研究科 修士課程

<sup>3</sup>正会員 工博 東京工業大学総合理工学研究科 助手

1930年北伊豆地震が展示中の魚雷に残した顕著な擦痕をもとに魚雷展示場所での強震動特性を推定した。まず現地調査を行い、魚雷の擦痕や台石との接触状況を明らかにした。次に模型振動実験やシミュレーション解析を実施した。その結果、主要動の最大速度は1.2~1.7 m/s、最大加速度は1.3~2.0 gに達し、10秒近くに及ぶその継続時間のうち0.7 m/s以上のピーク速度、0.8 g以上のピーク加速度が少なくとも7回出現したことが導かれた。

**Key Words :** the 1930 Northern Izu earthquake, near-field, strong motion, earthquake intensity

## 1. はじめに

重要構造物の耐震設計では建設敷地近傍に震源を持つ大地震が想定される場合があり、震源域における強震動特性の推定が不可欠となる。しかし、現在までに震源域で得られた強震記録は数少なく、大地震の震源域における強震動特性については多くの不明な点が残されている。

従来、地震動強さを物体の移動現象から推定することはよく行われており、墓石の転倒調査はその好例である。1930年北伊豆地震では、震央<sup>1)</sup>から約7.5 km離れた旧江間小学校校庭に展示されていた魚雷が地震で滑り、それによる擦痕が現在では天然記念物として保存されている。本論文は、その魚雷の擦痕をもとに1930年北伊豆地震の震源域における強震動の特性を推定したものである。

北伊豆地震は、1930年11月26日午前4時2分に、図-1に示す静岡県東部で発生した。マグニチュードは7.3、震源の深さは0.5 kmで、典型的な直下地震であった。この地震で、丹那断層は左横ずれの相対変位を生じ、当時建設中であった東海道線丹那トンネルには、延長7.8 kmのほぼ中央部分で、南北に約2.4 mの食い違いと18 cmの段差が発生した<sup>2)</sup>。地震による被害は伊豆半島北部で著しく、全体で死者272人、全壊家屋2165戸に達した。図-1の色を施した地域では全壊率が25%を越えた<sup>3)</sup>。図中の実線は、地表に現われた断層を結んだものである。図-1から、断層付近や魚雷の展示場所

付近で被害が大きかったことが分かる。

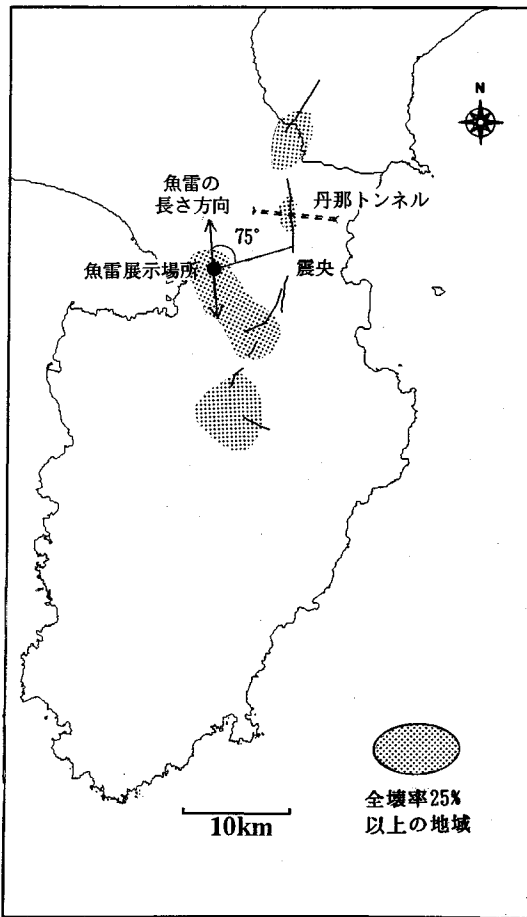
東京本郷での地震観測記録をもとに、今村は北伊豆地震の多重震源性に言及している<sup>3)</sup>。それによると、北伊豆地震の本震には4つのマルチプルショックが見いだされ、各ショックによるS波振幅は、最初のショックによるものを1とすれば、ほぼ1:5:8:7の割合であること、各ショックの時間間隔は1.6秒、2.1秒、3.8秒であること、などが指摘されている。

## 2. 北伊豆地震による魚雷の擦痕

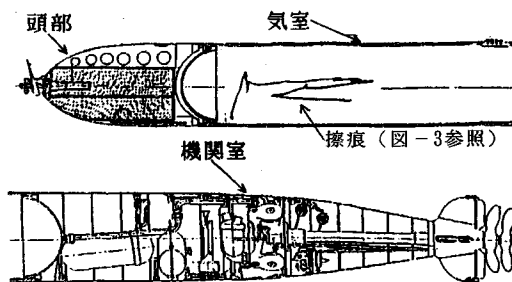
### (1) 展示魚雷の概要

魚雷は、図-2に示すように、炸薬が詰め込まれる頭部、燃料タンクの気室、エンジンなどの機械類を収納する機関室の3部分に大きく分けられる。北伊豆地震の際には、安全面から炸薬や燃料は抜かれていたと思われるが、それ以外は何も手を加えられず、魚雷は南5°東に傾けて展示されていた<sup>3)</sup>。

戦後、地震で擦痕の付いた気室部だけは天然記念物として保存された。現在の展示状況を写真-1に示す。写真左下の魚雷の左にある安山岩の台石が、北伊豆地震の時に魚雷をのせていたもので、現在の台石は当時のものとは異なる。寸法や作製年代から、この魚雷は四四式二号で直径45 cm、全長538.8 cm、重量719 kgと推測される。



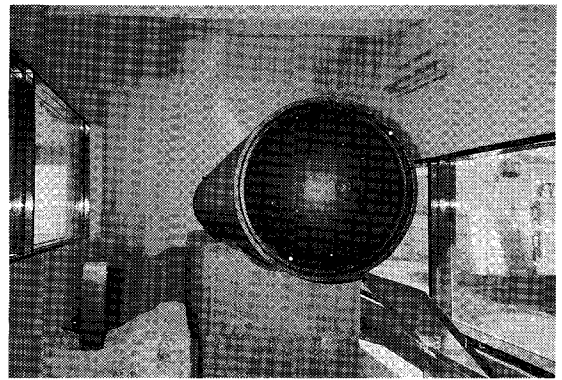
図一 北伊豆地震の被害状況図



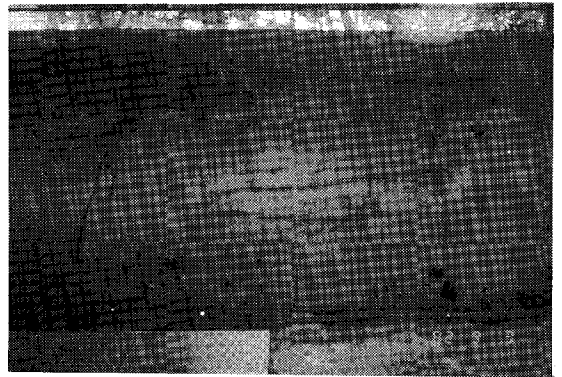
図二 魚雷の全体図

## (2) 魚雷に残された擦痕

魚雷の直径に合わせて鉄板で曲面を作り、それにカーボン紙を張り付け、台石に押しあてて魚雷と台石の接触状況を調べたところ、5つの点で接触した。このうちの3点には魚雷の塗料が付いていたので、魚雷はこれらの3点で支えられていたと思われる。そして実際、展示中の擦痕の逆側にも別の擦痕を見つけることができた。写真二に示すように傷の濃さに若干違いはあるが、2ヶ



写真一 現在展示されている魚雷と地震時に魚雷をのせていた台石(写真の左下)



(a) 展示されている魚雷の擦痕



(b) 魚雷裏側の擦痕

写真二 魚雷の擦痕

所の擦痕形状はよく類似している。3番目の擦痕は台石によって隠れる位置であるため、確認できなかった。

図三に示す魚雷側面の擦痕は、1993年1月に著者がトレースしたものである。これによれば、魚雷はまず円周方向に回転し、その後、長さ方向に7,8回大きく滑った。1回で最も長く滑った距離は、25.5 cmである。表一に各区间ごとの擦痕長を示す。

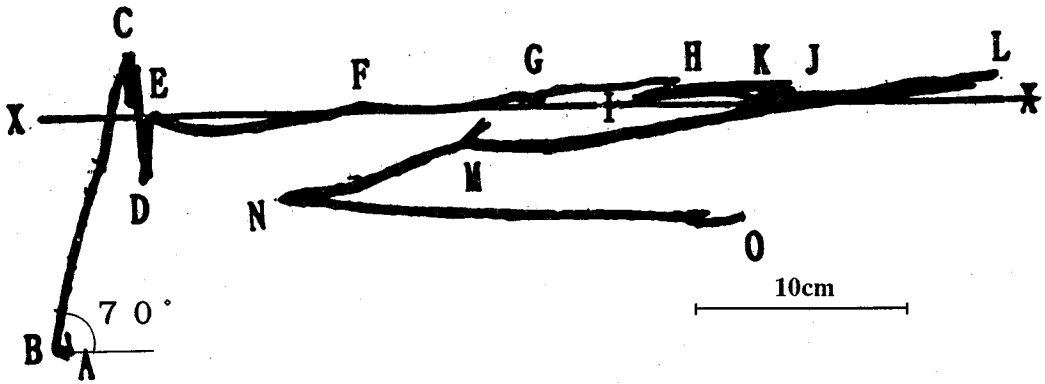


図-3 魚雷に残された擦痕

表-1 区間ごとの擦痕の長さ (図-3 参照)

単位: cm			
A→B	1.0	E→F	10.5
B→C	15.0	F→G	8.5
C→D	6.0	G→H	7.0
D→E	3.5	H→I	2.0
I→J	8.0	J→K	2.5
M→N	9.5	K→L	12.5
N→O	22.0	L→M	25.5

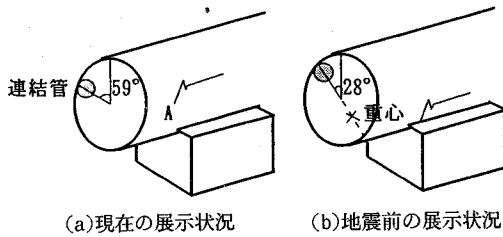


図-4 魚雷の展示状況

図-4 (a) に示すように現在の展示状況では、燃料をエンジンへ送る気室と機関室との連結管は天頂角  $59^\circ$  の位置にある。図-4 (b) に示すように、傷の始点 A を台石との接点まで  $31^\circ$  回転すると、他方の傷も逆側接点の位置にくる。したがって、地震が起きる前には連結管は  $28^\circ$  傾いていたと推察される。連結管は燃料を送るため通常は魚雷の下部に設定されるが、炸薬 (重量は  $110\text{ kg}$  で全重量の約  $1/7$ ) などが抜かれていれば下部は軽くなるので、図-4 (b) のように重心は連結管の反対側に偏心していたと考えられる。そこで、重心が安定する位置まで魚雷をさらに  $28^\circ$  回転すると、魚雷の長さ方向 (軸方向) の擦痕の大部分が図-3 のように直線 X-X にのる。これから、魚雷は重心が安定した状態で長さ方向に大きく滑ったものと推察される。

### (3) 表層地質と常時微動特性

魚雷展示場所は、狩野川が形成した平野内にあり、この平野は硬い固結堆積物と火山岩類で両側を挟まれている。関東地震の際も、この地域は半壊率  $3.3\%$  と比較的

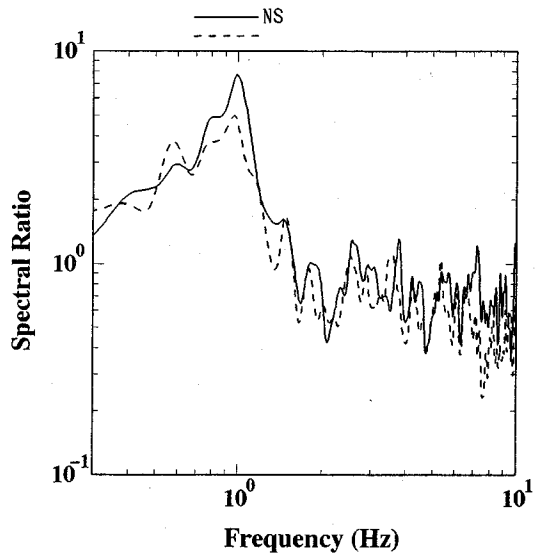


図-5 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比

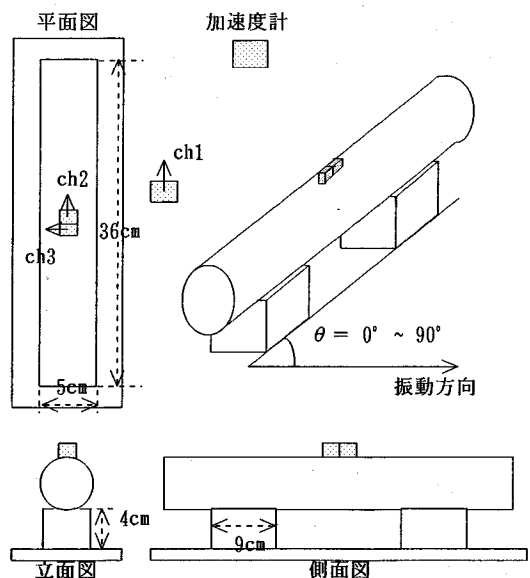


図-6 振動実験の概要

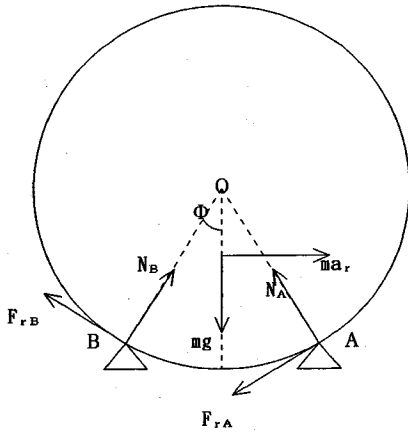


図-7 魚雷に働く力の関係

被害が大きく、地質学的にも興味深い<sup>4)</sup>とされている。

表層地質<sup>5)</sup>によると、魚雷展示場所の表層の厚さは約30mである。図-5は、この展示場所脇で測定した地盤の常時微動の、水平2成分と上下成分のスペクトル振幅比を示している。これから地盤の卓越周期は、約1秒と判読できる<sup>6)</sup>。

### 3. 振動台による円筒の滑動実験

#### (1) 実験方法

地震による魚雷の滑動状況を調べるため、簡単な模型振動実験を行った。魚雷の滑動は主として摩擦に支配され、摩擦係数は無次元であることを考慮して、次のような実験方法とした。

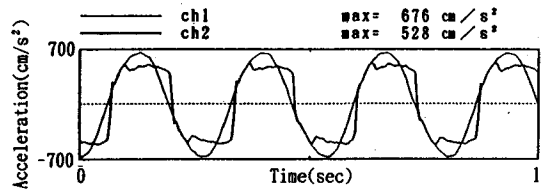
縮尺が約1/10の気室部模型の薄板アルミ円筒を、図-6のように振動台上の支持台に載せて水平一方向に正弦振動を加えた。円筒軸の向きを、振動方向に対して0°から90°まで15°刻みで変化させ、また重心の偏心距離も変化させて、これらが円筒の滑動に及ぼす影響を調べた。円筒の上部に小型加速度計を2個設置し、ch.2として長さ方向の加速度を、ch.3として円周方向の加速度をそれぞれ測定した。さらに振動台にも加速度計を設置し、ch.1として振動方向の加速度を測定した。

なお、後述する振動台と円筒の速度波形、円筒の相対変位は、FFTを使って、加速度波形を積分して求めている。

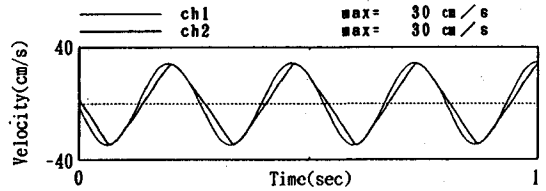
#### (2) 長さ方向の擦痕について

まず、重心が下方に偏心している場合の滑動について図-7のようなモデルを考えて、理論解析を行い、実験結果にも言及する。

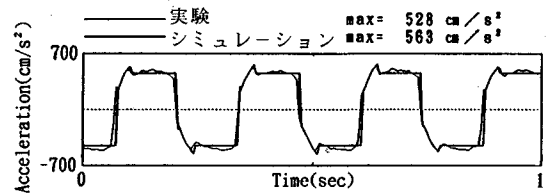
円筒軸が振動方向となす角 $\theta$ を変えれば、長さ方向と円周方向の滑りは同時に発生し、各方向の摩擦力の大き



(a)振動台と円筒の加速度波形



(b)振動台と円筒の速度波形



(c)実験およびシミュレーションによる加速度波形

図-8 実験波形およびシミュレーション波形

きさは変化する。そこで、摩擦係数を成分分解し長さ方向に対し $\mu_1 = \mu \cos \theta$ 、円周方向に対し $\mu_r = \mu \sin \theta$ とおく。また、円筒の単位長質量を $m$ 、軸方向の加速度を $a_l$ 、軸直交方向の加速度を $a_r$ とする。

図-7を参照すれば、クーロンの摩擦法則より

$$F_{rA} = \mu_r N_A \quad (1)$$

$$F_{rB} = \mu_r N_B \quad (2)$$

を得る。魚雷が台石から離れない状態を想定すれば、鉛直方向の釣り合い式は

$$N_A \cos \phi + N_B \cos \phi - F_{rA} \sin \phi + F_{rB} \sin \phi - mg = 0 \quad (3)$$

水平方向の釣り合い式は

$$-N_A \sin \phi + N_B \sin \phi - F_{rA} \cos \phi - F_{rB} \cos \phi + ma_r = 0 \quad (4)$$

である。ここに、台石との接触点どうしの中心角を $2\phi$ としている。実測から、 $\phi \approx 30^\circ$ として、 $N_A$ と $N_B$ について解くと次式を得る。

$$N_A = \frac{m \left\{ g \left( \frac{1}{\sqrt{3}} - \mu_r \right) + a_r \left( \frac{\mu_r}{\sqrt{3}} + 1 \right) \right\}}{1 + \mu_r^2} \quad (5)$$

$$N_B = \frac{m \left\{ g \left( \frac{1}{\sqrt{3}} + \mu_r \right) + a_r \left( \frac{\mu_r}{\sqrt{3}} - 1 \right) \right\}}{1 + \mu_r^2} \quad (6)$$

円筒を振動方向と平行に置いた( $\theta=0^\circ$ )場合の波形を図-8(a)に示す。この図の横軸は時間、縦軸は加

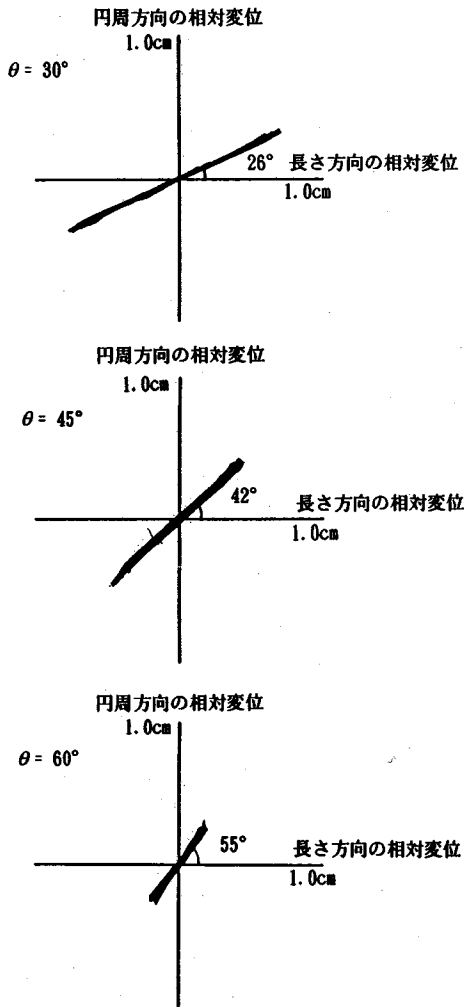


図-9 実験より求めた相対変位のオービット

速度であり、振動数は 3.75 Hz である。振動台の加速度がある限界を越えると円筒は滑り出す。滑り始めた円筒は相対速度が 0 になると再び振動台と一緒に振動する。 $\theta=0^\circ$  であるので、 $a_r=0$ 、 $\mu_r=0$  とおけば、円筒が滑り出す限界加速度は式 (5) と式 (6) から、 $a_l=2\mu_s g/\sqrt{3}$  となる<sup>7)</sup>。

$\theta \neq 0^\circ$  の場合、この限界加速度は円周方向の加速度の影響を受ける。式 (5) と式 (6) から次式を得る。

$$a_l = \frac{2\mu_l(g + \mu_r a_r)}{\sqrt{3}(1 + \mu^2)} \quad (7)$$

実験では、いずれの角度でも式 (7) が与える加速度付近で滑り始めること、またこの式が示すように、滑動開始時の加速度は偏心の影響を受けないこと、などが確認された。

### (3) 円周方向の擦痕について

重心を円筒軸に一致させて円周方向に回転させようとすると、円筒は図-7の接触点 A (又は B) を中心に回転し、接触点 B (又は A) は台石から浮き上がる。この場合、前章で述べたように接触点 A, B の 2 点で同じような傷がついたという事実が説明できない。

図-7のように重心を下げ偏心させると、円筒は軸の回りに回転する。この場合、円筒は台石から離れることなく滑るので魚雷上の傷の付き方と矛盾しない。そこで、重心を下げ偏心させて振動を加え、長さ方向と円周方向の各相対変位を求めた。そして両相対変位のオービットを描くと図-9のようになった。図-9から、オービットの描く角度は振動方向の角度  $\theta$  よりも小さく、円筒は円周方向には滑りにくいことが分かる。なお、重心位置を下げるほどオービットの角度は振動方向の角度に漸近する傾向が認められた。

図-3に示すように、BC間の擦痕は長さ方向に対して  $70^\circ$  傾いている。上述の滑動性状からは、初めに魚雷を円周方向に滑動させた波動の入射方向は  $70^\circ$  よりも若干大きいと推察される。南  $5^\circ$  東に向いていた魚雷の軸は図-1のように震央方向に対して  $75^\circ$  の角度となること、BC間の擦痕が全体の初め部分にあることなどから、この回転滑動を発生させた波動は、展示魚雷協の説明板に記されているように、震央方向からきた P 波である可能性が高い。

## 4. 数値シミュレーションによる検討

### (1) 予備解析

予備解析として、上述した模型滑動実験のシミュレーション解析を行った。模型を振動方向と平行に置いたときを想定し、振動台の水平加速度を入力した。解析は、 $\mu_s$  と  $\mu_d$  をそれぞれ静止摩擦係数と動摩擦係数とし

- ① 模型は、入力加速度が  $2\mu_s g/\sqrt{3}$  になると滑り出し、
  - ② その後、加速度  $2\mu_d g/\sqrt{3}$  で滑り続け、
  - ③ 相対速度が 0 になると振動台と一緒に振動する、
- という条件によって行った。

$\mu_s=0.5$ 、 $\mu_d=0.4$  として数値解析を行った結果と実験結果との比較を図-8(c)に示す。細い実線は実験により得られた模型の長さ方向の加速度、太い実線は数値解析によって求めた加速度であり、両者は良い対応を示している。また数値解析による相対変位量は、 $\mu_s=0.5$ 、 $\mu_d=0.4$  の場合と、 $\mu_s=\mu_d=0.4$  の場合とでは、数 mm しか差がないことが分かったので、以後の検討では  $\mu_s=\mu_d$  とした。

### (2) 正弦波入力による数値シミュレーション

入力地震動として、

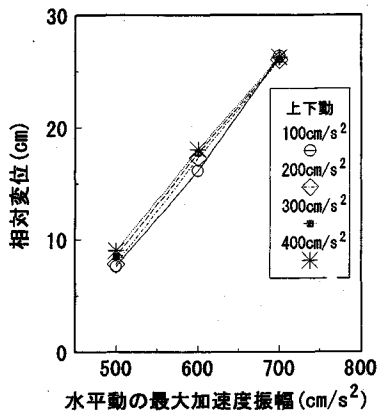


図-10 上下動を考慮したときの加速度振幅と相対変位の関係 ( $\mu=0.3$ )

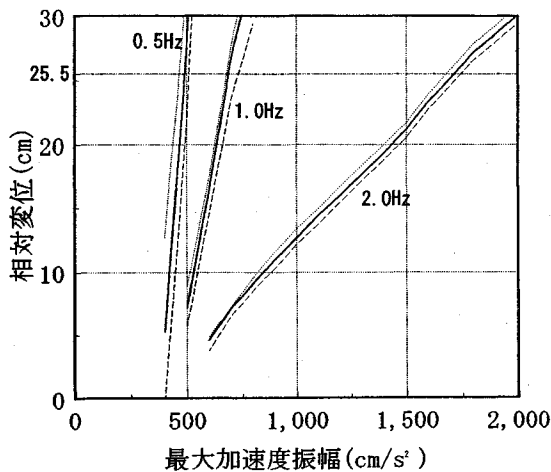


図-11 3つの水平振動数による最大加速度振幅と相対変位の関係 ( $\mu=0.3$ )

水平動  $a = A \sin 2\pi f_H t$

上下動  $u = U \sin (2\pi f_V t + \phi)$  (8)

で表される正弦的加速度を考え、

①魚雷は水平入力加速度が  $2\mu a(g+u)/\sqrt{3}$  で滑り出し、

②相対速度が0になると、再び地面と一緒に動く、

という条件でシミュレーション解析を行った。

解析上のパラメータは、水平動と上下動の加速度振幅  $A$  と  $U$ 、振動数  $f_H$  と  $f_V$ 、魚雷と台石の摩擦係数  $\mu$ 、および初期位相差  $\phi$  となる。このうち、 $\mu$  は実物で実測するわけにいかないため、他の例をもとに(補遺参照)、0.3、0.4 および 0.5 の値を使い、 $\phi$  は  $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $45^\circ$  ずつ変化させた。 $\mu$  の値の大小が地震動強度の推定結果に及ぼす影響については後述するが、以下では、小さめの強度を与える  $\mu=0.3$  の場合の結果を主に例示することにする。

図-10 は、1回の滑動量に及ぼす上下動の影響を示し

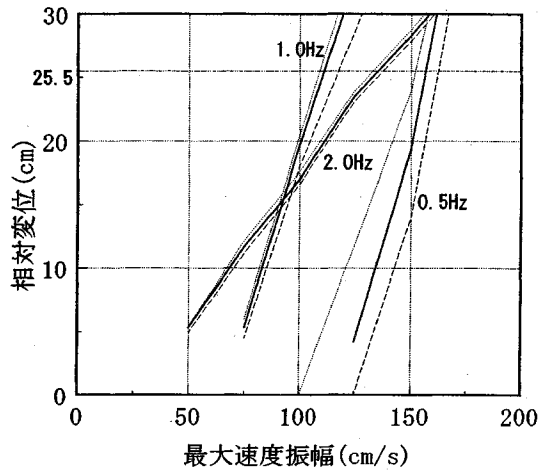


図-12 3つの水平振動数による最大速度振幅と相対変位の関係 ( $\mu=0.3$ )

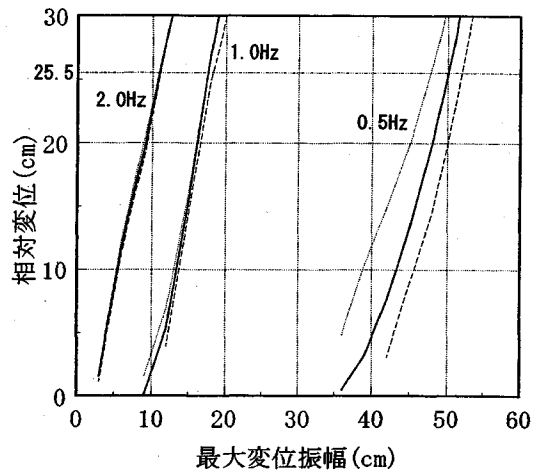


図-13 3つの水平振動数による最大変位振幅と相対変位の関係 ( $\mu=0.3$ )

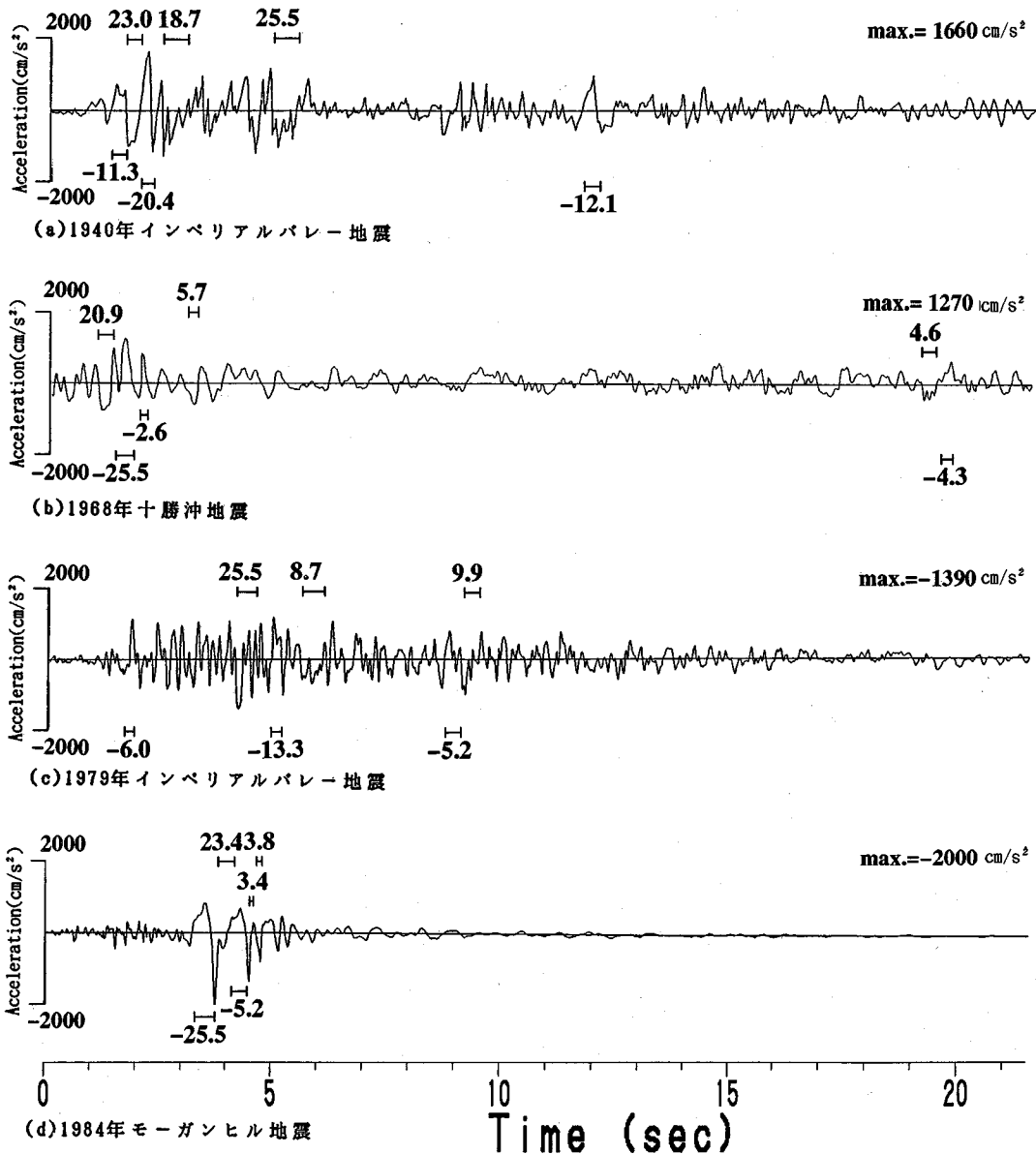
ている。加振振動数は、水平振動数  $f_H$  が 1.0 Hz、上下振動数  $f_V$  が 2.0 Hz である。この図のように、上下動の加速度振幅が変化しても滑り量にそれほど影響を及ぼさない。そこで以下の解析では上下動振幅を  $200 \text{ cm/s}^2$  に固定し、水平動振幅をパラメトリックに変化させた。

加振振動数については、魚雷展示場所での常時微動に約 1 Hz の成分が卓越していたことから、水平振動数  $f_H$  を 0.5 Hz、1 Hz、2 Hz の3段階で変化させ、上下振動数  $f_V$  は一般に  $f_H$  よりも大きく、現地での微動測定結果でも約 2 倍であったことから簡単に  $f_H$  の 2 倍とした。

図-11 は、水平動加速度振幅と1回の滑動量(相対変位量)の関係を示している。各実線は上下動を無視した場合、点線は上下動を考慮した場合の  $\phi$  の違いによる最大と最小の滑動量を示している。したがって、各振動数に対し、ある滑動量を得るためには点線で囲まれた

表—2 数値シミュレーションに用いた強震記録

記号	地震名	観測場所	成分	倍率	最大加速度	最大速度
(a)	1940年インベリアルバレー地震	エルセントロ変電所	NS	4.86	1660cm/s <sup>2</sup>	175cm/s
(b)	1968年十勝沖地震	八戸港	NS	5.46	1270cm/s <sup>2</sup>	165cm/s
(c)	1979年インベリアルバレー地震	カレキシコ	N315E	7.08	1390cm/s <sup>2</sup>	114cm/s
(d)	1984年モーガンヒル地震	コヨーテレイクダム	N285E	1.76	2000cm/s <sup>2</sup>	123cm/s

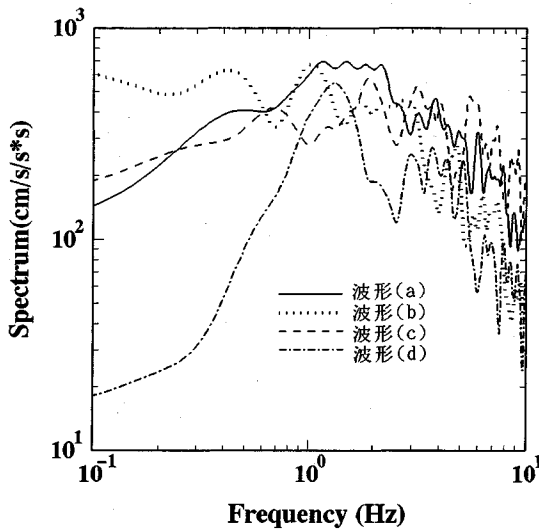


図—14 数値シミュレーションに用いた加速度波形 (人為的に振幅を拡大している)

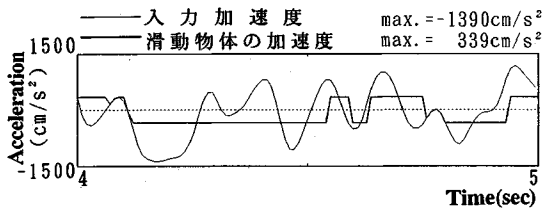
範囲の水平加速度振幅が必要である。例えば、 $\mu=0.3$  の場合、25.5 cm の滑動を生じるに必要な水平加速度は、0.5 Hz では 470~510 cm/s<sup>2</sup>、1 Hz では 680~730 cm/s<sup>2</sup>、2 Hz では 1650~1700 cm/s<sup>2</sup> である。これから、魚雷に

25.5 cm の擦痕を残した地震動の最大加速度は、振動数が 0.5~2.0 Hz の正弦の振動であれば 470~1700 cm/s<sup>2</sup> となる。

なお、摩擦係数  $\mu$  を 0.3 から 0.4、また 0.4 から 0.5



図一15 強震記録のフーリエ加速度スペクトル



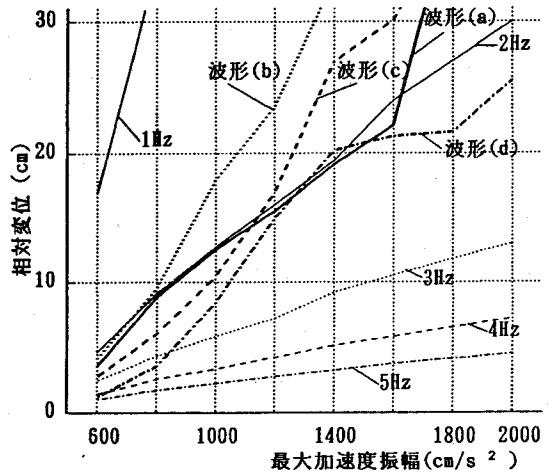
図一16 入力地震加速度波形と滑動物体の加速度波形 ( $\mu=0.3$ )

にと0.1ずつ増大させることは、図一11の各曲線の水平動振幅を、それぞれ100~150  $\text{cm/s}^2$ だけ増加させるように右方へ平行移動させることに対応することも分かった。したがってその場合には、上述の各加速度値を約100~150  $\text{cm/s}^2$ ずつ増大させればよい。

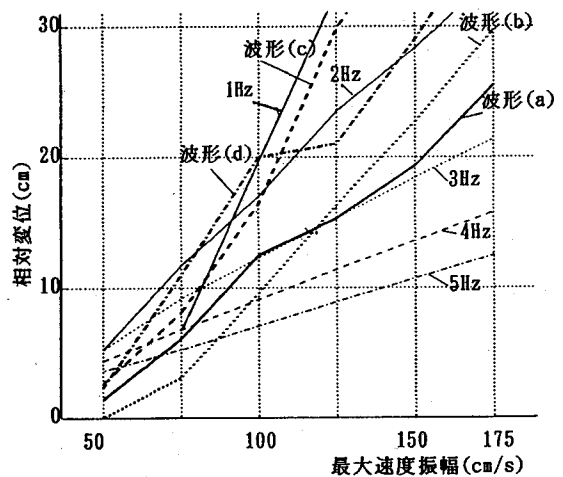
図一12、図一13の曲線は、図一11の曲線を水平最大速度と滑動量、水平最大変位と滑動量との関係に変換したものである。これらの図から $\mu=0.3$ で入力振動数が0.5~2.0 Hzのとき1回で25.5 cm滑るには110~170  $\text{cm/s}$ の最大速度、及び11~52 cmの最大変位が必要であることが分かる。同じ振動数範囲で最大加速度の推定値が470~1700  $\text{cm/s}^2$ であるのと比較すると、変動幅は最大速度の方が最大加速度、最大変位よりかなり狭いので、魚雷の滑動量からは速度の推定精度が高いことがうかがえる。

### (3) 既往の強震記録によるシミュレーション解析

地震動は不規則なので、前述の正弦波入力による検討だけでは不十分である。また魚雷には、一連の複数の擦痕が残っているので、それらに対する検討も行うことが望ましい。そこで、表一2に示す4つの強震記録を用いて、前節と同様に数値解析を行った。(a)と(b)の



図一17 強震記録を入力した際の最大加速度振幅と相対変位の関係



図一18 強震記録を入力した際の最大速度振幅と相対変位の関係

波形は構造物の耐震設計に多用され馴染み深い強震記録の代表例として、(c)と(d)は震源近傍で観測された強震記録の代表例として用いたもので、当該地点の地盤と断層特性との関連を考慮したものではない。前述のように上下動成分は滑動量にあまり影響を及ぼさないと考えられるので、ここでは水平動成分のみを用いた。また、各強震記録をそのまま入力しても滑動量が魚雷の擦痕長に至らないので、各時刻の加速度値にある倍率を乗じて振幅を人為的に拡大した。表一2に示す倍率は、各強震記録による1回の最大滑動量(相対変位)として魚雷の擦痕と同じ25.5 cmを与えるものであり、表中の最大加速度と最大速度はこれらの倍率を乗じた後の数値である。この倍率を乗じた後の各加速度波形とそれらのフーリエスペクトルを図一14、図一15に示す。各加速



度波形の上下に示した数値については、後述する。

図一16は、1979年インペリアルバレー地震のカレキシコで得られた強震記録の加速度振幅を7.08倍し波形(c)を入力したとき、最大滑動量を与える時刻前後の入力加速度と滑動物体の加速度を示している。地震波入力の場合には、このように複数の波を越えて滑動することが、正弦波入力の場合と基本的に異なる点である。

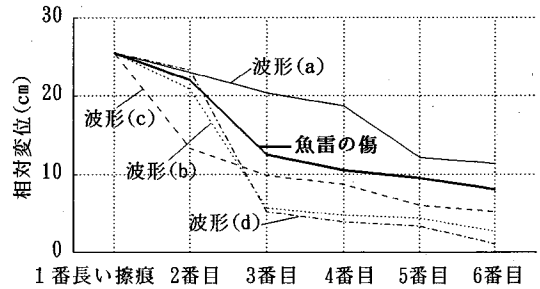
各強震記録に対する振幅倍率を変化させたときの、最大加速度値と1回の最大滑動量との関係を示すと、図一17の各折線のようになる。比較のため、図一17には同様に1~5 Hzの正弦波を入力した場合の両者の関係も示した。最大速度値と1回の最大滑動量との関係を同様に示したのが図一18である。正弦波入力の場合には、各曲線が直線的であるのに対して、地震波入力の場合には明らかに非線形的であると指摘できる。図一17では相対変位が5 cm以上となる範囲で各地震波形が1 Hzと3 Hzの正弦波形の中間に入っていること、図一18では各地震波形の勾配が1 Hzと3 Hzの正弦波形の中間的勾配となっていること、換言すれば、相対変位量が用いた入力地震動の特性にあまり依存しないことが注目される。

図一17と図一18から、各地震波形に対して相対変位が25.5 cmとなる最大加速度値と最大速度値を読み取り整理した結果が表一2右欄の数値である。これによれば、使用した4つの地震波形は最大加速度が1270~2000  $\text{cm/s}^2$ 、最大速度が114~175  $\text{cm/s}$ という範囲の数値を与える。これらを、0.5~2.0 Hzの正弦波形を使ったシミュレーション解析結果の470~1700  $\text{cm/s}^2$ および110~170  $\text{cm/s}$ と比較すると、最大速度値はほぼ同等であるが、最大加速度値はやや大きめで変動範囲は正弦波の場合よりかなり狭くなっていることが指摘できる。ところで、JoynerとBooreの距離減衰式<sup>8)</sup>から推定される魚雷展示位置での最大加速度は580  $\text{cm/s}^2$ 、最大速度は140  $\text{cm/s}$ 、福島・田中の距離減衰式<sup>9)</sup>では、最大加速度は490  $\text{cm/s}^2$ である。これらの数値に対しても表一2の数値は、最大速度は同等で、最大加速度はかなり大きい。

これらを総合すれば、魚雷展示場所での強震動の最大速度は120~170  $\text{cm/s}$ 程度と推定され、また最大加速度は1.3~2.0  $g$  ( $g$ は重力加速度)と推定されるが、この推定精度は最大速度のそれよりも劣る。

最後に、主要動の継続時間と全般的強さについて考察する。

前述の4つの地震波形を用いた滑動のシミュレーション解析において、主要な滑動が発生する時間とその滑動量を具体的に示したのが、図一14の各波形の上下に示す線分と数値(単位:cm)である。(c)、(d)の波形では、正方向と負方向の主要な滑動が交互に発生しているが、(a)、(b)の波形では正方向または負方向の主



図一19 強震記録から得られる一回の滑動量と魚雷の傷

要な滑動が2回連続して発生している。図一3の魚雷の擦痕では、区間E→Hで1方向へ数回連続して大きく滑動した後、区間H→Mでは両方向へ交互に滑動しているが、この状況は(a)、(b)の波形によるシミュレーション結果と類似性がある。したがって区間E→Mで、加速度の大きなピークが1方向だけに片寄って発生したと考える必要はない。

地震波形を用いたシミュレーション結果をもとに、滑動の方向を無視して上位6番目までの滑動量を比較すると図一19のようになる。図中の太い実線は、魚雷の擦痕を同様に示したものである。魚雷の擦痕長は波形(a)と(c)による相対変位量の中間的傾向を示し、3番目以降で相対変位が激減する波形(b)と(d)による結果とは明らかに異なる傾向を示す。図一14から明らかなように波形(a)と(c)には大きな加速度を示すピークが多数あるのに対し、波形(b)と(d)にはそれが数個しかない。表一1に示したように、魚雷には長さ方向に7 cm以上の擦痕が8本残されている。また、図一17と図一18によれば、7 cm以上の滑動を生じるには70  $\text{cm/s}$ 程度のピーク速度と0.8  $g$ 程度のピーク加速度が必要である。したがって、魚雷展示場所での強震動は、単発的に大きなピークが出現する(b)や(d)のような衝撃的波形ではなく、70  $\text{cm/s}$ 以上のピーク速度と0.8  $g$ 以上のピーク加速度をもつ振動が少なくとも8回は出現する(a)や(c)のような波形であったことが示唆される。

冒頭にも述べたが、今村は北伊豆地震の本震はマルチプルショックで、4つのショックによるS波振幅の割合は1:5:8:7、時間間隔は1.6秒、2.1秒、3.8秒と指摘している<sup>3)</sup>。今村説の信頼性は吟味する必要があるが、実際に魚雷の擦痕で最長区間(L→M)と2番目に長い区間(N→O)は全長の後半部分にある。そこで、これらを今村による第3ショックと第4ショックに対応させてみよう。表一1に示すように、区間E→Lの擦痕は7個の小区間から成り、この中に7 cm以上の同一方向への擦痕が5個ある。図一17に関する考察から、これら5本の滑動区間に1~3 Hzの正弦波形を1波ずつ対応さ

せると最低所要時間は1.7~5.0秒となる。第2ショックと第3ショックの時間間隔が2.1秒であることや、区間H→IとJ→Kの逆方向への擦痕の存在などを考えれば、区間E→Lは第1ショックと第2ショックによる擦痕と考えることができる。

いずれにしても、魚雷展示場所での主要動は、10秒近い継続時間を持ち、最初の数秒間で70 cm/s以上のピーク速度（ピーク加速度で0.8 g以上）を少なくとも5回記録した後、120~170 m/sの最大速度（最大加速度で1.3~2.0 g）に達し、その後少なくとも2回は70 cm/s以上のピーク速度（ピーク加速度で0.8 g以上）を示したことが推察される。

## 5. 結 論

本研究では、1930年北伊豆地震が展示中の魚雷に残した顕著な擦痕をもとに、それをもたらした強震動の特性解明を試みた。

まず現地調査を実施し、魚雷の擦痕を改めて詳細に計測するとともに魚雷と台石との接触状況を明かにした。続いて、展示魚雷を同定しその構造や重量分布を参考に模型振動実験を行い、魚雷の滑動性状を調べた。その結果、擦痕全長の頭部に見られる円周方向の傷はP波による可能性が高く、重心がやや上方に偏心していた魚雷が回転して安定化した際のものであろうと結論された。この部分の傷がP波によることは従来指摘されていた<sup>10)</sup>が、本研究はこの指摘に新たな根拠を与えたことになる。

さらに、模型振動実験と数値シミュレーション解析の結果および文献資料から、主要動の特性を推定した。その結果、魚雷の擦痕が示唆する主要動は、継続時間が10秒近くあるいはそれ以上に及ぶもので、最初の数秒間に速度で70 cm/s以上、加速度で0.8 g以上をもつピークが少なくとも5回出現した後、速度で120~170 cm/s、加速度で1.3~2.0 gの最大強度に達し、その後少なくとも2回は70 cm/s以上のピーク速度、0.8 g以上のピーク加速度を記録した歴史上まれにみる激烈な強震動であることが導かれた。

本研究による推定は、魚雷の擦痕を主な根拠としているので、本質的にぬぐいきれない曖昧さを含んでいるが、計器観測でも1971年サンフェルナンド地震(M=6.6)のパコイダム近傍の記録や1994年ノースリッジ地震(M=6.7)のタルサナでの記録などで同程度の強度の加速度や速度が得られていることを勘案すれば妥当な範囲内にあると思われる。このような研究手法によって震源近傍の強震動特性を解明することは、古来、多数の地震資料が蓄積されているわが国において、特に有効と考えられる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり静岡県伊豆長岡町教育委員会、愛媛大学工学部深川良一助教授、東京工業大学翠川三郎助教授をはじめ多くの方々や機関から資料の提供や有益な助言、格別の便宜を賜った。記して謝意を表する。

[補遺] シミュレーションに用いた動摩擦係数について

(1) 現在、石と金属材料との摩擦に関する研究例は数少ないが、砂と金属材料との摩擦については、土質工学の分野でかなり研究されている。それによれば、砂と鋼鉄との摩擦係数は、鋼鉄の表面粗さに大きく影響され、0.2~0.6の範囲をとる<sup>11)</sup>。

(2) 魚雷と台石との動摩擦係数を求めるために、模型実験を行った。円筒模型には、直径12.5 cm、長さ33.0 cm、重さ6.5 kgの塗装された鉄パイプ、及び直径5.0 cm、長さ50.0 cm、重さ1.0 kgの塗装されていない鉄パイプを用いた。台石模型については、傷の付いた台石側では角張った石を3つ、傷の付いていない方には丸い石を2つ、板に固定した。この時、円筒模型と台石との接触点の中心角は、展示されていた魚雷と同様に60°となるようにした。

実験方法は、台石を固定している板の傾斜角を一定にした状態で、円筒模型の上部を軽くハンマーでたたき、滑り出しても止まらないときの傾斜角を測定し、動摩擦係数を求めた。得られた動摩擦係数は、塗装された鉄パイプでは0.35、塗装されていない鉄パイプでは0.39であった。

## 参考文献

- 1) 宇佐美龍夫：日本被害地震総覧，東京大学出版会，pp.244-248，1987.
- 2) 鉄道省熱海建設事務所：丹那隧道工事誌，pp.421-432，1936.
- 3) 今村明恒：北伊豆地震の計測学的研究，地震3，1，pp.1-38，1931.
- 4) 震災予防調査会：関東地震被害調査報文（地震編），震災予防調査会報告第100号（甲），p.217，1925.
- 5) 静岡県：表層地質図（沼津），1977.
- 6) 大町達夫・紺野克明・遠藤達哉・年繩 巧：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定法の改良と適用，土木学会論文集 No.489，I-27，pp.251-260，1994.
- 7) Timoshenko, S. and D. H. Young : *Engineering Mechanics*, 4th edition, p.57, 1956.
- 8) Joyner, W. B. and D. M. Boore : Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.71, pp.2011-2038, 1981.
- 9) Fukushima, Y. and T. Tanaka : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*,

Vol.80, pp.757-783, 1990.

- 10) 天然記念物「地震動の擦痕」(展示魚雷脇の説明文), 1934.
- 11) 植木一志・岸田隆夫・吉見吉昭: 砂と金属材料との間の

摩擦抵抗 (その4), 第14回土質工学研究発表会, pp. 397-400, 1979.

(1994.3.9受付)

## NEAR-FIELD MOTION CHARACTERISTICS OF THE 1930 NORTHERN IZU EARTHQUAKE INFERRED FROM SCARS ON A TORPEDO

Tatsuo OHMACHI, Isamu OHTSUKA and Takumi TOSHINAWA

During the 1930 Northern Izu, Japan earthquake ( $M=7.3$ ), a torpedo exhibited at 7.5 km from the epicenter was forced to slide against supporting rocks. As a result, a series of remarkable scars was left on the painted face of the torpedo. Based on the scars, the near-field strong motion characteristics were estimated by using available documents, laboratory vibration experiments and numerical simulations.

The results showed that the maximum earthquake intensity was in the range of 1.2-1.7 m/s in velocity and 13-20 m/s/s in acceleration, and that duration of the strong motion was about 10 sec or more during which at least seven peaks exceeded 0.7 m/s and 8 m/s/s.