

# 水槽内爆発による地振動(第一報)

## —地中に埋設した水槽の地振動—

中山良男\*, 生沼仙三\*, 田中一三\*

直円筒形の地中設置型的水槽を用いて, 水中爆発による地振動を起し, 水槽の大きさの違いによる地振動の大きさを検討し, 次のような結果を得た。1) 地振動の最大速度振幅は, 水槽の大きさの違いによらず水平動が上下動よりも大きい。2) 地中型の速度振幅の測定距離に対する減衰指数は, 1.2であり, 従来得られている地中発破の減衰指数より小さく, 地振動は表面波に近い性質を持っている。3) 水槽の大きさ, 薬量を相似に変えた実験で地振動の速度振幅波形には, Hopkinsonのスケール法則が成立している。

### 1. 緒言

水中爆発を利用した水中爆力試験は, 爆薬のエネルギーを測定する有効な手段である。水中爆力試験では爆発音が非常に小さく, 爆発生成ガスが大気中に拡散しないという特徴がある。しかし, 水中爆発により地盤には振動が誘起される。この地振動は, 水中爆力試験においては二次的現象であるが, かなり強いために, 限られた敷地内にある水槽等を利用する時に問題となる。一般の発破振動については古くから研究されており, 振動振幅の実験式も数多く提出されている<sup>1)</sup>。しかし, 水槽内爆発による地振動については, 発表されたデータは極めて少ない<sup>2)</sup>。

筆者らは, 水槽内爆発による地振動の性質を調べるために, 大小, 二種類のモデル水槽を地表面あるいは地中に設置して水槽内で爆発を起し, 水槽の大きさ, その設置方法及び爆源の薬量を変化させた時の地振動について検討した。本報は二報よりなり, 第一報は主として地中に設置した水槽の地振動, 第二報はそれと地表に置いた水槽の地振動との比較について述べる。

### 2. 実験条件

実験場は, 化学技術研究所内の敷地を使用した。実験には, Fig. 1に示すような底面が平らな円筒形の小水槽(直径50cm, 高さ50cm, 板厚3mm)及び大水槽(直径1m, 高さ1.2m, 板厚5mm)を使用した。水槽

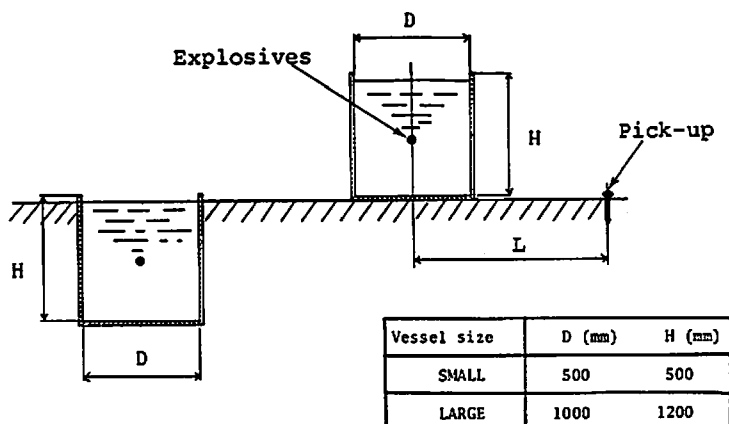


Fig. 1 Dimension of water vessels and installation of vibration pick-up

昭和62年7月1日受理

\*化学技術研究所 保安環境化学部  
〒305 茨城県つくば市東1-1  
TEL 0298-54-4792

の設置方法として, 水槽を地表面に置いた場合あるいは地中に設置した場合を検討した。前者の場合には, 地表面をならしたあと直接地表面に水槽を設置した。後者の場合には, 小水槽では地表に1cm, 大水槽で

は20cm程度の部分を残して水槽の大部分を地中に設置した。

爆薬は、感度試験用の0号電気雷管(装薬量0.2g)あるいは通常の6号電気雷管を一本または複数本を直列結線したものであり、水槽の中心軸上に吊り下ろして爆発させた。地振動の測定は、爆心から1m~18m離れた点で行った。使用した地振動測定用の加速度ピックアップは、1m~5m用がTEAC社製圧電型加速度トランスデューサー501型(直径7.9, 高さ10.7mm, 感度約10mV/G, 周波数応答性2~40kHz)であり、18m用が高感度の同707型(直径16.7, 高さ35mm, 感度約100mV/G), 周波数応答性3~10kHz)である。センサーアンプは同社製SA-6(周波数応答性0.2~20kHz)である。地振動は、上下動用および水平動用(半径方向)のピックアップにより地表面の振動を同時に測定した。ピックアップと地面との連結には、直径5mm長さ150mmのアンカーの上部にピックアップを接合し、アンカーを地中に差し込み固定する方法を用いた。測定した加速度信号と発破器の通電信号の記録には、データレコーダ(アンベックス社製FR2230, 周波数応答性DC~80kHz)を使用した。実験後、データレコーダに記録された信号を、デジタイザー(オートニクス社製S210, 12bit)によりA/D変換し、マイクロコンピュータ(アップル社製Apple II)をとおしてフロッピーディスクに記録・保存した。これらのデータ群を必要に応じてマイクロコンピュータにより解析・処理をした。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 地振動波形の概略

水槽を地表に置いた場合を地表設置型(on-ground), 地中に設置した場合を地中設置型(under-ground)と呼ぶことにする。Fig. 2に、大水槽を地中に設置して6号電気雷管を爆発させた時に発生した地振動の一例を示す。縦軸には加速度を、横軸には経過時間をとっている。時間軸の原点は発火信号になっている。測定距離 $L=2\text{m}$ で得られた振動波形では、波の立ち上がりは鋭く接続時間は短く衝撃的であり、一方、遠方の測定点( $L=5\text{m}\sim 18\text{m}$ )で得られた波形では、振幅は減衰し振動の持続時間は長くなっている。

以前に、文献(2)で行った測定では、今回に比べてピックアップ(ストレンゲージ型およびムービングコイル型)の時間応答性がかなり悪いものであった。今回の測定では、すべて周波数特性のよいピエゾ型ピックアップを用いて行ったが、得られた波形の特徴(周波数スペクトル等)に大きな差はみられなかった。

#### 3.2 スケール法則の確認

次に、大水槽と小水槽では水槽の形状が相似なの

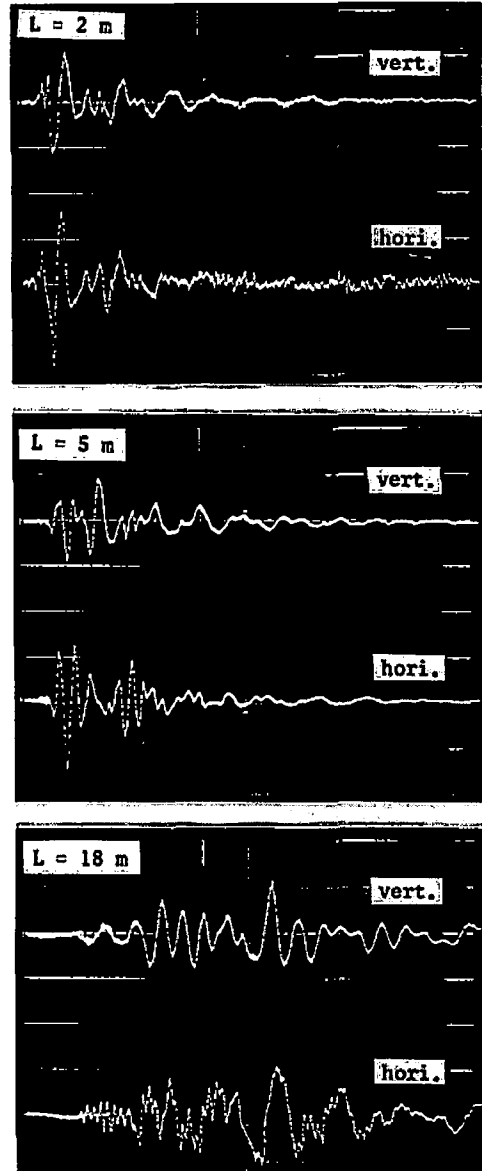


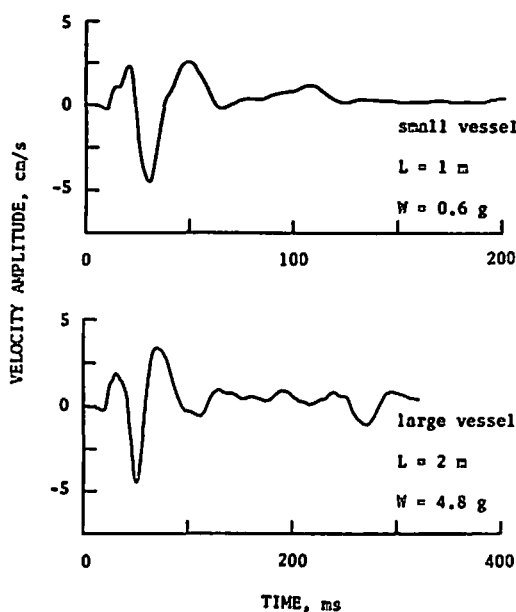
Fig. 2 Example of seismic vibration (acceleration); explosion of No. 6 detonator in large vessel (under-ground type); full scale of abscissa is 500 msec.; ordinate is in arbitrary unit.

で、小水槽と大水槽の大きさの比に応じて爆源の薬量及び測定位置を選んで、スケール法則を検討した。すなわち、Hopkinsonのスケール法則によるとエネルギーの比が $k^3:1$ の現象は、長さの比および時間の比を $k:1$ にとることによって相似になる。ここでは、水槽の大きさの比を $2:1$ にとっているのので、薬量を $2^3:1$ にとり、爆源からの距離が $2:1$ の点で得ら

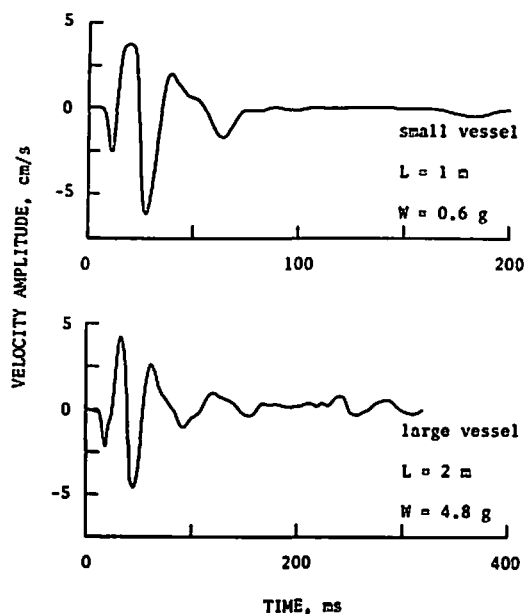
**Table 1** Comparison of seismic vibration parameters between small and large water vessel to check seismic vibration scaling ; vessel is on-ground type

VESSEL SIZE	L m	W g	W <sup>1/3</sup> g <sup>1/3</sup>	U <sub>m</sub>		T <sub>a</sub> ms	T <sub>d</sub> ms
				cm/s			
				vert.	hori.		
SMALL	1	0.6	0.84	7.2	9.9	9.6	59
LARGE	2	4.8	1.68	6.3	8.8	16.8	107

W : charge weight U<sub>m</sub>: maximum velocity amplitude T<sub>a</sub> : time of arrival of seismic vibration T<sub>d</sub> : time of duration of seismic vibration



**Fig. 3** Seismic vibration scaling between small and large water vessel ; vessel is on-ground type and direction of measurement is vertical. : W=weight of explosives



**Fig. 4** Seismic vibration scaling between small and large water vessel ; vessel is on-ground type and direction of measurement is horizontal. : W=weight of explosives

れた波形を比較した。この場合、実験は地上設置型の水槽で行った。得られた結果をFig. 3, Fig. 4に示す。この場合、縦軸には加速度波形を積分した速度振幅をとり、また横軸の時間は2 : 1にして両者を比較している。これらの図より、全体的な波の変化の様子は、よく似ていることがわかる。このことをさらに詳しく検討するため、Table 1に、到達時間、最大速度振幅及び持続時間を示した。到達時間は、発火時刻から地振動が開始するまでの時間であり、持続時間は、振動の開始から停止までの時間である。すでにのべたように、エネルギーの比を2<sup>3</sup> : 1、長さの比を2 : 1にとったので、スケール法則が成り立つならば、速度振幅は1 : 1、到達時間は2 : 1、持続時間は2 : 1に

なるはずである。Table 1とFig. 3, Fig. 4の波形から、実験の誤差および精度を考えると、地振動におけるスケール法則が成立していると思われる。

以上のことから、大小の水槽においてスケール法則が成立していることがわかった。そこで次に、地振動の距離による減衰について調べた。

### 3.3 地中設置型 (under-ground) 水槽内爆発による地振動の距離減衰について

地振動の一番基礎的なデータである、地振動の距離による減衰について検討した。縦軸に速度の最大振幅、横軸に換算距離をとり両対数グラフ上にプロットした。ここでいう最大速度振幅とは、引き続いた波の山から谷(または谷から山)までの最大値を指す。Fig. 5,

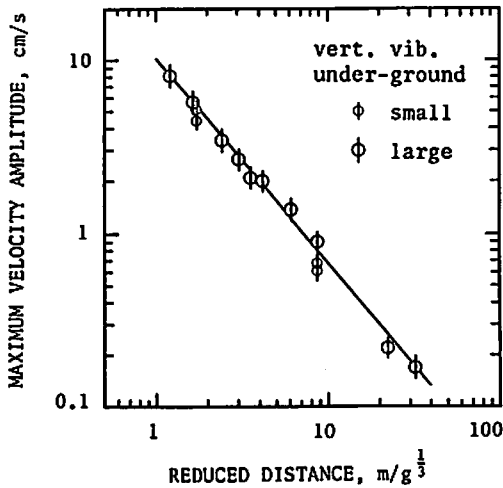


Fig. 5 Logarithmic relation between maximum velocity amplitude and reduced distance ; water vessel is under-ground type. : direction of measurement is vertical.

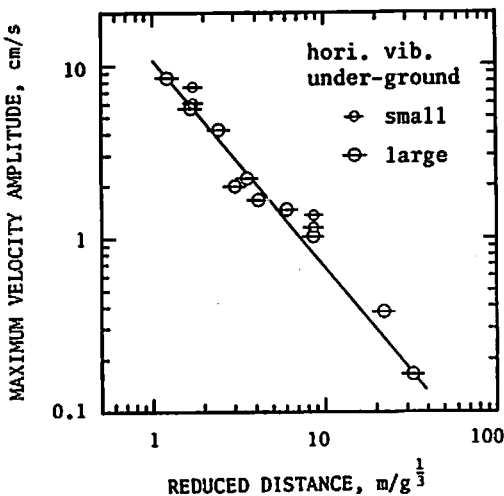


Fig. 6 Logarithmic relation between maximum velocity amplitude and reduced distance ; water vessel is under-ground type. : direction of measurement is horizontal.

Fig. 6に地中設置型水槽の場合の結果を示す。水槽の形状及び爆薬が変わるとスケール法則は厳密には成立しないが、上下・水平方向とも図中一本の直線上にデータがのることがわかる。文献(2)の結果では、同じ換算距離において大水槽の方が大きな振動を与えているが、それは大小の水槽が互いに相似でないことに関係していると思われる。また本実験では、水平動と上下動の大きさについては、水平動が上下動よりも大きい。文献(2)では換算距離 $R \leq 10\text{m/g}^{1/3}$ の範囲で、水平動が上下動より大きいと報告しているが、その結果と

も一致する。なお、水平動が上下動より大きい理由については、今後さらに検討をしていきたい。

さて、弾性波動論によれば、弾性地盤中を伝わる波にはP波とS波が存在するが、地表や地層の境界などの不連続面があると、地表面に沿う波、すなわち表面波が発生する。したがって、今回の実験において水槽内爆発によって開放されたエネルギーの一部は地盤に入射し、そのエネルギーは、P波、S波、および表面波の組み合わせとなって遠方へと伝わっていく。地振動は爆源から遠くへ伝わるにつれ、次第に減衰するが、その原因として、幾何学的な減衰と内部減衰が考えられる。幾何学的な減衰は、はじめある領域内にあった振動エネルギーがより広い領域に拡がり、単位体積あたりの振動エネルギーがうすめられるために起こる減衰である。一方、内部減衰は、振動が伝わっていく過程で媒質の内部摩擦のため振動エネルギーが熱エネルギーに転換するために起こる減衰である。内部減衰は土地の特性や振動周期等に左右されるが、幾何学的な減衰は、実体波(P波、S波)では $L^{-1}$ に、表面波では $L^{-2}$ に比例することが知られている。これより、表面波は、実体波より緩やかに減衰するのがわかる。そこで次に、地振動の波の性質を調べるために、距離による減衰について検討した。

Fig. 5, Fig. 6にプロットした点群を一本の直線で近似し、 $L$ を距離、 $W$ を薬量として最大速度振幅 $U_m$ を次の形の実験式で表す。

$$U_m = k(L/W^h)^{-n} \quad (1)$$

ここには、 $K$ 、 $n$ は実験から決まる定数である。指数 $n$ は、直線の勾配を表し、通常、距離減衰指数と呼ばれている。図より地中型では、距離減衰指数 $n \approx 1.2$ になっている。通常の発破振動の場合、畑中は変位振幅を $kW^hL^{-n}$ の実験式にまとめて、近距離(15~250m)では $n=2$ 、遠距離(250~1500m)では $n=1.2$ を提案している<sup>1)3)</sup>。そして、遠距離で指数が小さくなるのは、近距離では実体波と表面波の組み合った性質の波が、減衰がゆるやかな表面波成分が遠方で卓越するためであると考えている。今回の実験結果は、発破振動の立場から判断すると、遠距離での減衰特性に近い。本実験では、薬量が雷管程度と小規模であるため、規模効果の減衰指数への影響も考えられるが、薬量と距離を組合せた変数である換算距離で評価すると水槽内爆発による地振動は、水槽に近い点から表面波として発生していると考えられる。

#### 4. 結論

地中設置型水槽を用いて、水中爆発による地振動を起こし、水槽の大きさの違いによる地振動の大きさを

検討し、以下の結果を得た。1)水槽の大きさの違いによらず、水平動が上下動よりも大きい。2)振幅の測定距離に対する減衰指数は1.2であり、従来得られている地中発破の指数2よりかなり小さく、地振動は表面波の性質に近い。3)水槽の大きさ、薬量を相似的に変えた実験から、地振動の速度振幅波形にはHopkinsonのスケール法則が成り立っている。

#### 5. 謝 辞

本実験において、水槽の製作にあたり当研究所の飯

田城一氏のご協力を頂きました。厚く御恩礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) 工業火薬協会編,「発破ハンドブック」,山海堂(1976)
- 2) 田中一三,工業火薬,40,95(1979)
- 3) 畑中元弘,第2回岩の力学国内シンポジウム講演集(1967)

---

### Seismic vibration by the explosion in water vessel(1)

#### Seismic vibration by the under-ground type water vessel

by Yoshio Nakayama\*, Senzo Oinuma\* and Kazumi Tanaka\*

The seismic vibrations were measured by the explosion in cylindrical water vessels. To investigate the effects of vessel settlement, vessels were settled both on the ground and under the ground except the opening to air. The vessel size effects were also investigated by the small and large vessel. The results obtained were as follows.

(1) Maximum velocities of horizontal vibration were greater than those of vertical vibration on its magnitude, independent of vessel size and vessel settlement.

(2) Measurements of the attenuation of vibration by the distance were made and the exponential attenuation index was founded to be 1.2. This value indicated that the nature of seismic vibrations by the explosions in water vessels was to be that of the surface wave.

(3) Experiments revealed that Hopkinson scaling law was kept on the velocity amplitude of seismic vibration.

(\*National Chemical Laboratory for Industry, Higashi 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Japan)