

水槽中の爆発による地震動

田 中 一 三

水中爆発を使って爆薬のエネルギー測定を行う際、かなり強い地震動が発生するので、その性質を知るため地面に埋めた円筒形水槽による地震動を測定した。地震動の距離による減衰は、通常の地中発破よりゆるやかで、従って振動が遠くまで伝わることを知った。また水槽壁の動きを測定したところ、爆発時とガス球収縮時の2度にわたって、強い下向きの衝撃が作用していることがわかった。これから振動波の主体は、水槽の上下運動にもとづく表面波のように思われた。

水棺の底面にかかる衝撃を緩和するため、底にクッションを敷いてみると、地震動は著しく軽減された。

1. 緒言

爆薬のエネルギー測定のために、水中爆発実験¹²⁾を行うことが多くなった。水中爆発では爆発音をほとんど生じない利点があるが、限られた用地内に設けた水槽等を利用すると、地震動が意外に大きいのに悩まされる。

この研究は、その防震対策のため、所内の爆発実験用水槽を使って、地震動の測定ならびに解析を行い、地震動の発生機構が通常の発破と異った点のあることをたしかめるとともに、それに対する防震対策を行った結果について述べたものである。

2. 地震動測定

実験には Fig. 1 に示した大水槽（直径4m、深さ4m）と小水槽（直径1.8m、深さ2.4m）を使用した。大水槽は底面の平らな円筒形であるが、小水槽は底が丸味を帯びている。どちらも大部分地中に埋め込まれており、地表に出ている高さは、大水槽で0.8m、小水槽で0.4mであった。

煙草はいつも満水した水槽の中心に吊して爆発させ

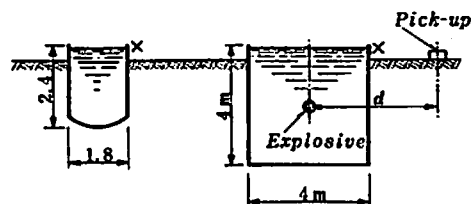


Fig. 1 Dimension of water vessels and installation of vibration pick-up.

た（爆心の位置は、従って大水槽のときの方が若干低いことになった）。薬量は TNT の 5~10g である。

振動計には、明石製作所のムービングコイル型 (V 261)、または共和電業のストレングージ型 (超小型加速度計 AS-20B, AS-50B) を使った。前者は回路の切換で、振幅を変位、速度、加速度のうちから選択できるようにになっている。ここでは速度振幅で測定した。後者の加速度計は、前者の振動計の許容範囲 (3 kine, 1000gal) を超えるおそれのある近距離測定に使用した (許容加速度 20G, 50G)。その場合データは電算機処理により積分し、速度振幅として前者と比較した。同一条件で二つを並行的に使用したとき、両者の波形の一致は良好であった (周波数成分が 100Hz 以下と思われる地震波について)。

これらの振動計は、爆心からの水平距離 d が 10~100 m の範囲の地表に設置した。ムービングコイル型のもはそのまま平らな場所に置き、ストレインゲージ型のは小型なので、10×10×4cm の鉛ブロックに接着して、ブロックごと地表に設置した。

得られた地震動波形の例を Fig. 2 に示す。これらは大水棺で TNT 10g を爆発させたときの、いろいろな距離での水平動である。 $d=10\text{m}$ のものは、加速度振幅からの積分波形である(波形の後方がやや持ち上がった形になったのは、デジタル化の際に、最初のゼロレベルで切捨てられた微小量が、積分で累殺された効果による)。図からわかるように、振動波形は近距離では衝撃的であるが、距離が遠くなると振幅は小さくなるものの、持続時間がかなり長くなる。

速度波形からとった最大振幅（全振幅）を、換算距離 ($d/W^{1/3}$) との関係で両対数グラフにプロットする

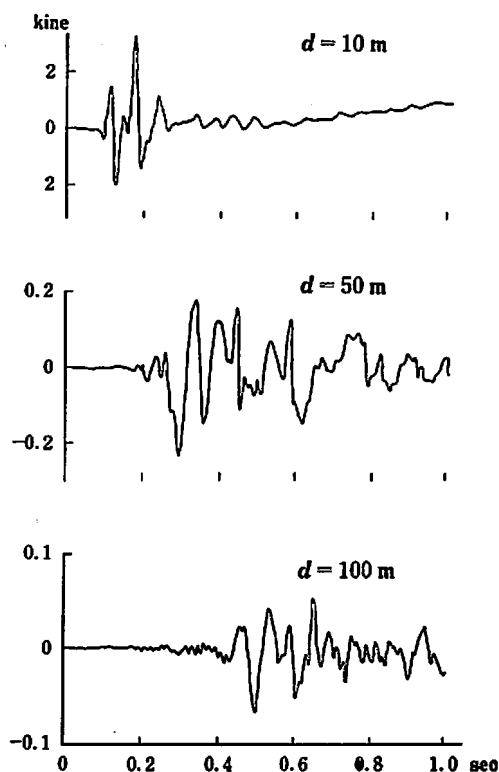


Fig. 2 Examples of seismic vibration (TNT 10g in large vessel, horizontal).

と、Fig. 3 が得られた。

水平動と上下動の比較は、近距離でのみ行っている。水平動はすべて、波の進行方向への成分を測ったものである。その結果、図にプロットしたように水平動の方がやや大きかったので、遠距離の測定は水平動のみとした。水槽の大小の比較では、大水槽の方が大きな振動を与えることがわかった。

水平動の測定値について、プロットされた点を直線で近似すると、大小の水槽ごとに図のようになり、その傾きはほぼ 1.3 となった。通常の発破地震動では、振幅を、

$$U_m = k \left(\frac{W^{1/3}}{d} \right)^n$$

の形の実験式で表わしたとき $n=2$ とされている¹⁾。ここでの n はそれより小さい。畑中氏が発破地震動の変位振幅を $k W^{1/3} d^{-n}$ の実験式にまとめられた結果では²⁾、近距離で $n=2$ 、遠距離で $n=1.2$ となっており、遠距離で指数が減少するのは、波の性質が表面波に移行するためと考えられている。上の水槽実験は、薬量を 5~10kg に換算すると、距離 100~1000m での測定にあたり、通常発破のスケールからいえば近距離である。それにもかかわらず距離減衰指数が小さいのは、

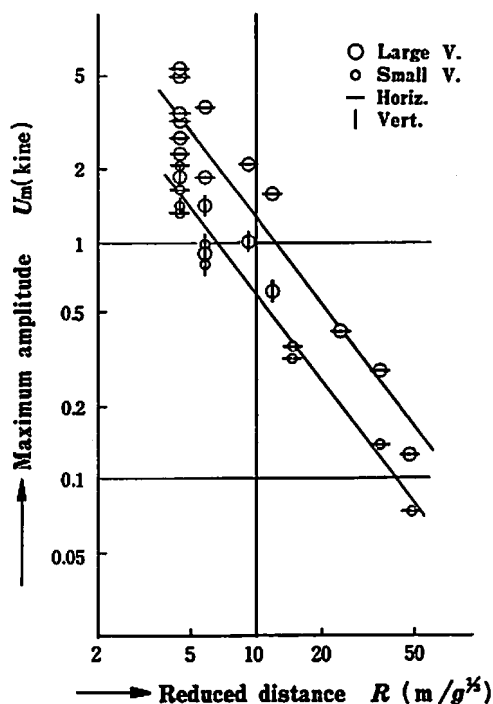


Fig. 3 Logarithmic relation between maximum amplitude (velocity) and reduced distance. Solid lines fit approximately to horizontal vibration of each vessel.

地震動が最初から表面波として発生しているかのようにみえる。

3. 水中ガス球挙動との関係

Fig. 4 上図は、Fig. 2 で $d=10m$ の波形のはじめの部分拡大したものである。次の波形は積分する前の加速度振幅による波形、そして下図はこれの Fourier スペクトルを求め、各周波数成分がどれだけ含まれているかをグラフにしたものである。

このスペクトルは周期的なピークを持っている。ピークの位置は $f_0 \approx 17Hz$ を基本周期として、その整数倍のところにある。この特徴は、もとの波形が $\tau = 1/f_0$ の間隔を持った二つの波から成るときに現われるものである。

Fig. 5 でそれを説明した。図の上は、適当な衝撃波形を作って、50msec 間隔に二つ重ね合わせたものである。図の下はその Fourier スペクトルの計算結果である。 $f_0=20Hz$ を基本周期として、その整数倍の周波数ごとにピークのあることがわかる。

Fig. 4 のスペクトルが $f_0=17Hz$ の整数倍にピークを持つことは、もとの地震動波形が $\tau = 1/f_0 \approx 60msec$ 間隔の二つの波から成ることを示唆している。そう思えば、Fig. 4 上の速度振幅の波形など、その

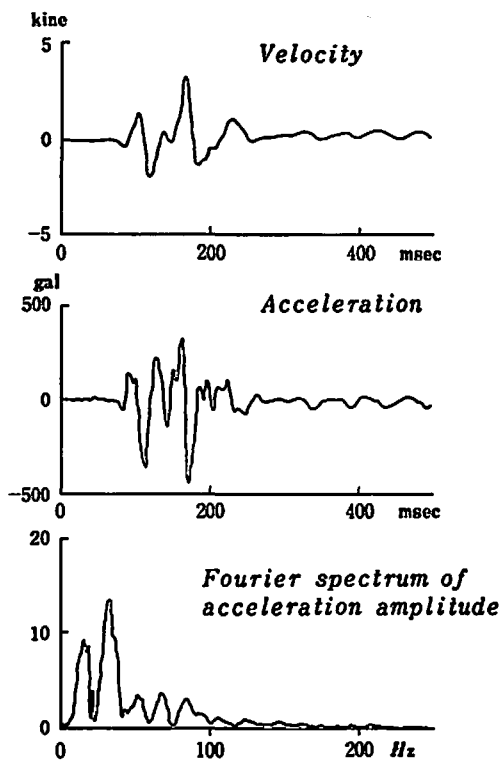


Fig. 4 Seismic vibration and its Fourier spectrum (TNT 10g in large vessel, $d=10\text{m}$, horizontal).

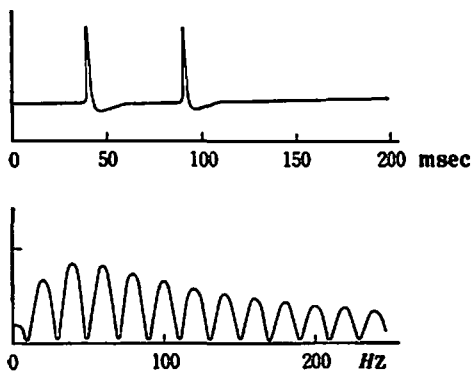


Fig. 5 Double signal and its Fourier spectrum.

ように眺められる。60msec という時間は、TNT 10g を水中爆発させたときのガス球脈動周期に等しい。この周期は薬量が違えば変ってくるはずであるが、地震動波形を上のように解析すると、たしかに脈動周期との関係が認められた。

爆発時にこのような2度の衝撃が発生するならば、水櫃の動きにもそれが現われるはずである。そこで水

櫃の地表に出ている部分の壁 (Fig. 1 の×印) に、前述のストレインゲージ型加速度計 (高周波応答は約1kHzまで) を貼付けた測定を行った。Fig. 6 にその記録波形を示す。加速度振幅の波形は一見不規則に見えるが、積分して速度振幅にすると現象がはっきりするので、図はその変換を行った後の波形である。

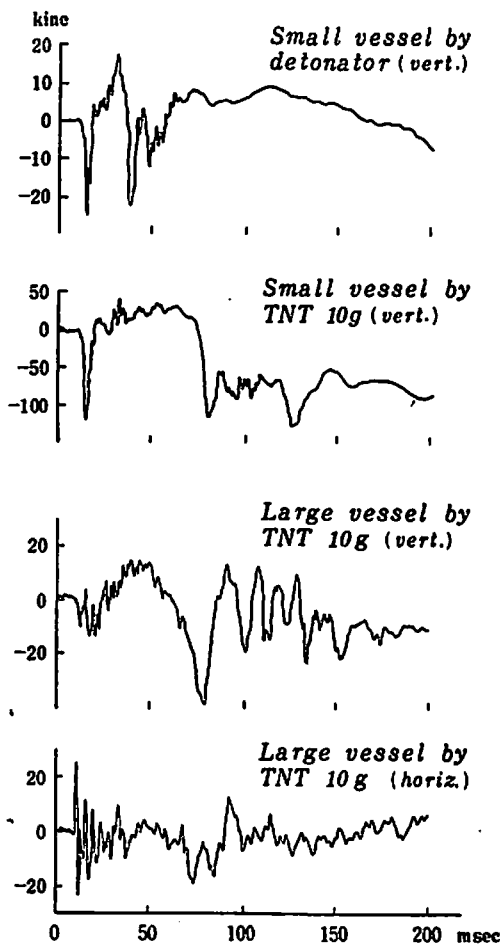


Fig. 6 Vibration of vessel walls.

図で上の二つは、小水櫃中で雷管および TNT 10g を爆発させたときの、水櫃壁の上下動である。爆発時の鋭い下向きのピークのあと、しばらくしてもう一度同じような動きがある。その時間間隔は約 20msec および 60msec で、雷管単体および TNT 10g のガス球脈動周期に一致する³⁾。下の二つは、大水櫃中で TNT 10g を爆発させたときの、水櫃壁の上下動と水平動である。上下動については、小水櫃と同じ 60msec 間隔の下向きの動きがある。水平動の方は上下動にくらべて不規則である。

通常の岩石発破では、地震動の原因は爆発時の衝撃波が主体と思われる。それに対して水櫃中の爆発で

は、水槽の動きに Fig. 6 のような上下動のある点が大いに異っている。ガス球の脈動、すなわち膨張したガス球が収縮するときに2度目の衝撃波が発生することはよく知られているが、波の圧力値は、最初の爆発衝撃波の1/5~1/10に過ぎない¹⁾。Fig. 6 で最初のピークは爆発衝撃波によると考えられるが、第2のピークは、ガス球収縮時の衝撃波のみを原因とみなすには異常に大き過ぎる。

Fig. 6 に得られた振動は、水槽壁の部分的な動きではなく、少くとも上下動については、水槽容器全体が一体となつての動きを表わしていると考えられる。その場合、水槽全体が下向きに動く原因は、水槽の底面に力がかかったためであろう。そして第2のピークは、ガス球の膨張で上昇した水面が、収縮時には急激に落下するので、その衝撃が水槽の底を叩きつける効果で生じたものと思われる。水面の上昇は、直径の小さい水槽の方が大きい、Fig. 6 でも同一薬量で比較すると小水槽の方がピークは大きい。

第1のピークは、爆発時の水中衝撃波が、やはり水槽の底面に達したときに与えた衝撃力によるものと思われる。これについても小水槽の方が大きいのは、爆発源から底までの距離が短いことのほかに、直径が小さいことも影響している。円筒形容器内の水中爆発では、底面に達する衝撃波は、爆発からの直接波のほかに、器壁で一たん反射してから到達するものがある⁹⁾。直径の大きい水槽では、こうした反射波を含めて考えたときに、底面に達する波が時間的に分散して鋭いピークを作りにくくなる。Fig. 6 の波形には、そのような効果も見ることができる。

4. 上下動の抑制

Fig. 6 から、水槽中の爆発では、上下動の効果が意外に大きいことがわかった。少くとも通常発破ではありえない第2波の上下動が異常に大きいことは、それだけでも水槽中の爆発地震動が、通常発破より大きいことの説明になる。さらに加えて、水槽のこのような上下動は、震源の性格として実体波⁷⁾の発生源というより、杭打ち機などと同様な表面波の発生源に近い可能性を持っている。通常の岩石発破等の地震動は、三次元的に拡がる実体波であるから、距離の減衰効果が大きい。二次元的な表面波は、距離減衰が小さいことになるが、Fig. 3 で得た減衰指数の通常発破との差異は、こうした説明と合致する。

そこで水槽の上下動を抑制するため、水槽の底にクッションを敷きつめることを試みた。底面の平らな大型水槽について、10cm 厚さのポリウレタンフォーム（独立気泡）を一面に接着した。これによって上下動の原因となる水槽底面への力を緩和し、一方側壁はも

とのままとした。

こうして得られた地震動波形を Fig. 7 に示す。Fig. 2 にくらべて振幅が1/10 近くに減っていることがわかる。Fig. 8 には、クッションを敷いた水槽壁の上下動速度波形を示した。Fig. 6 に見られた下向きのピークは、はっきりしなくなり、高周波の不規則振動に変わっている。

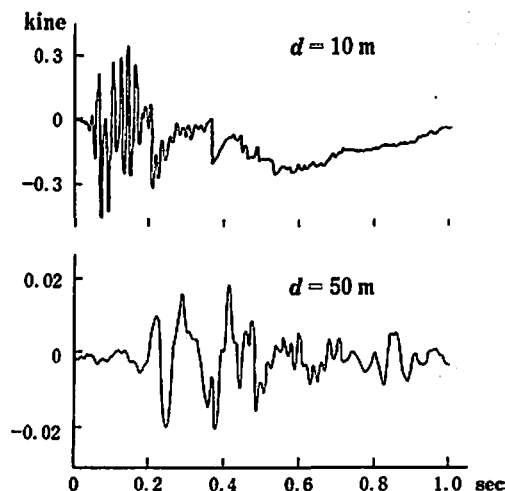


Fig. 7 Seismic vibration after the setting of shock absorber at vessel bottom (TNT 10g in large vessel, horizontal).

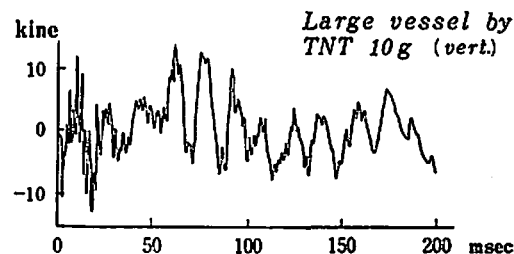


Fig. 8 Vibration of vessel wall after the setting of shock absorber.

Fig. 9 は、クッションを敷いた大型水槽の地震動振幅を、処置をする以前のデータと比較したもので、直線は Fig. 3 中のものに対応する。爆発の近くで上下動が非常に小さいのは当然として、水平動について引いた点線の勾配が、通常発破の持つ $n=2.0$ に近くなったのは興味深い。(クッションを敷いた場合の測定値が少いのは、接着剤で貼りつけた材料が翌週にははがれ始めたためである。比重が水より小さい材料は莫大な浮力を受けるので固定するのがむづかしい。少くともクッションの効果は確認できたと考えて実験を打ち切った)。

水槽の側壁には手を加えず、底面にクッションを敷

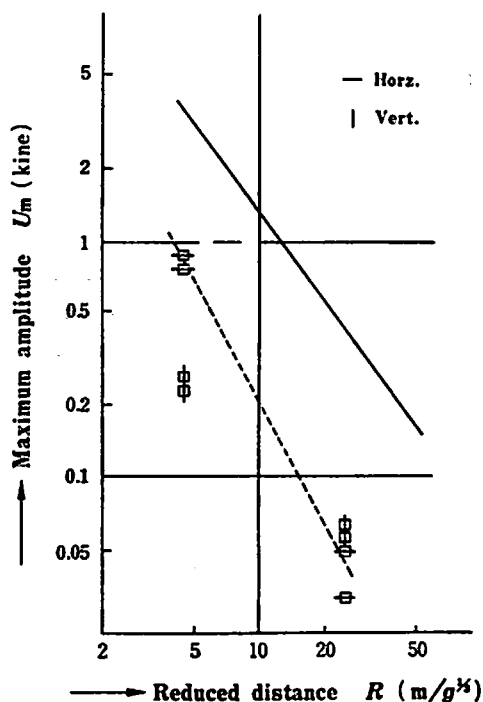


Fig. 9 Effect of shock absorber (large vessel). Solid and broken lines fit to horizontal vibration before and after the setting of absorber.

ただで、爆源に比較的近いところの水平動まで小さくなったことは、もともと水槽中爆発の地震動では、側壁を通過して出る実体波の成分は小さかったためと考えられる。Fig. 3 のプロットの傾きからみても、地震動の性質は主として表面波であり、その発生源はFig. 6 のような水槽の上下動にあったと思われる。

厳密な検証には、水槽の側壁の水平動を爆源の深さで測り、側壁を通過して出る水平動の大きさを求めてみればよい。この実験では既設の水槽を使ったので、それができなかった。Fig. 6 下図の水平動の測定は、それに似た試みとして行ったものであるが、水槽の上端の動きだけを見ている形なので、あまり参考にならない。

5. 結 論

地中に大部分を埋めた円筒形水槽中で爆薬を爆発させたとき、発生する地震波の性質を調べた。

地震波の大きさを速度振幅で整理して、距離による減衰指数 n は、通常の岩石発破で 2 付近にあるものが、ここでは 1.2 程度に小さく得られた。また近距離での波形は、震源で 2 度の衝撃が加わったことを示しており、その時間間隔は、爆発ガスの中脈動周期に一致した。

水槽壁の上部に加速度計を取り付け、爆発時の水槽の上下動を測定した。その結果、爆発時の衝撃圧のほか、ガス収縮時に同等以上の衝撃圧が、下向きに働いていることを知った。

このような水槽の動きは、震源の性質として、杭打ち機等と同様、上下動による表面波の発生源となることを示している。

水槽の底面にかかる上下動の原因となる力を除くため、水槽の底にのみクッションを内張りして爆発地震動を測定したところ、振幅はもとの数分の一に減少した。また距離による減衰指数も、通常発破の値に近くなった。

以上の結果から、このような水槽中の爆発地震動は、通常発破と違って表面波が主体となること。その軽減には、水槽の上下動を抑制することが有効であることを知った。

文 献

- 1) R. H. Cole, "Underwater Explosions", Dover Publ. Inc. (1965)
- 2) 田中・清水・田中・疋田, 工火誌, 36, 76 (1975)
- 3) 工業火薬協会編, 「発破ハンドブック」, 山海堂 (1966)
- 4) 畑中元弘, 第 2 回岩の力学国内シンポジウム講演集 (1967)
- 5) 田中一三, 工火誌, 投稿中
- 6) 田中, 大久保, 疋田, 工火誌, 30, 233 (1969)
- 7) 小林直太, 工火誌, 38, 321 (1977)

付 記

本研究にあたって、法政大学土木工学科横山勝信教授、ならびに同科学学生諸氏の御協力を得たことを深謝する。

Seismic vibration by the explosion in water vessel

by Kazumi Tanaka*

Measurement of gas energy of explosive can be made by underwater method. The trouble of this method may be the seismic vibration, which becomes significant in the case of artificial pond constructed on land.

Here, the seismic vibration was measured by the explosion in cylindrical water vessels, which were settled into the ground except the opening to air. Results showed that the attenuation by the distance was not so rapid as that of ordinary underground explosions. Measurement of vessel wall movement revealed that the vessel had sustained downward shocks twice, firstly at the instant of explosion and secondly at the time of contraction of gas bubble. These suggested the observed vibration to be the surface wave generated by the vertical movement of water vessel.

To suppress the downward shocks and vertical movement of the vessel, a kind of shock absorber was spread on the bottom surface. After this treatment, the seismic vibration became distinctly small.

(*National Chemical Laboratory, Hiratsuka-branch, 1-3-4, Nishi-yahata, Hiratsuka-shi)

ニ ュ ー ス

事故情報——ペントライト製造用溶融鋼の底面 にとりつけた取り出し用バルブの 爆発事故

ノルウェー、ディーノ・インダストリヤー会社グルラーグ製造工場（ライヤー市）、ブースター製造工場で、1978年10月27日0730、ペントライト溶融鋼の底部にある、薬取り出し用バルブをあけたり閉めたり繰返しているうちにバルブに付着していた少量のペントライトが爆発した。当日の天候快晴で、気温は-9℃であった。

バルブの周囲にはマントルピースがあり、バルブのパッキングはペントライトがしみ込んで固まっていたらしく、あけたり閉めたりして働きを確めているとき、爆発があった。マントルピースの外側

はアスベストのロープがついていた。これが爆発のためバラバラになって飛んでゆき作業員の顔及び腕に当たって軽傷を受けた。もう1人の作業員は彼の後方1.5mの所にいたが被害はなかった。バルブは3～4個に砕けて床面上に落ちた。

爆発の原因は、パッキングが固化し、バルブの中の摩擦が高まってゆきこれにより少量のペントライトが起爆された。

今後の処置としては(1)混合爆薬をとり出す装置については他の新しいタイプの設計を取り入れた。(2)危険な摩擦も衝撃もバルブの中で発生しないようにした。

出典：国際事故情報交換会 No. 339

(田中俊二)