

エア・カーテン法による水中圧力波の軽減に関する数値解析

花崎 紘一*・伊藤 一郎*

本研究においては、エア・チューブ（気柱）を用いたエア・カーテン法による水中圧力波の圧力軽減効果に関する実験および差分方程式による数値解析を行なった。その結果、両者の結果がほぼ一致することが確かめられたので、さらに一般化した条件のもとでのシミュレーションを行なって、エア・カーテン法による水中圧力波の軽減機構を究明し、つぎのような結果を得た。

- (1) 全体の空気量が同じであれば、重点的にまとめて気柱を配置するよりも、細かく分散させて配置した方がより効果的である。
- (2) 圧力波の波長によって圧力の軽減効果が異なってくるものと考えられる。

1. 結 言

近年海底の開発や利用がさかんに行なわれつつあり、水中爆破による作業についても各方面で研究されてきている。しかしながら、作業場の近くに、水中爆破により生ずる水中圧力波によって損傷を受ける構造物などが存在する場合、あるいは水産資源を保護するためには、水中圧力波を軽減しなければならない。この方法として、エア・カーテン法が効果的であるといわれ、実際にも行なわれつつある¹⁾²⁾。

しかし、現状では、このエア・カーテン法は主として経験にもとづく設計により実施されており、必ずしも効率のよい設計と実施が行なわれているとはいえないようである。そこで筆者らは、この方法を効率よく実施するための一資料にする目的でエア・カーテン法による水中圧力波の軽減効果について基礎的な研究を行なった。

すなわち、水槽の中の水を伝わる圧力波がエア・カーテンの存在によってどのような影響を受けるかを観測し、その結果と差分近似による波動方程式の数値解析法によりシミュレーションを行なった結果とを比較して、両者がかなりよく一致することを確かめた上で、さらに条件を一般化したシミュレーションを行ない、エア・カーテンの存在と圧力波の減衰性との定量的な関係を明らかにするよう努めた。そして、これらの結果を考慮して、実際の作業を効果的に行なうための設計に対する所見を述べた。

2. エア・カーテン法による水中圧力波の軽減効果に関する実験

2-1 実験方法

水槽中の水の中を伝搬する圧力波の経路上にエア・カーテンを設けることによって生じる圧力波の圧力軽減効果を観測した。

なお、エア・カーテンとしては、定量的な扱いを容易にするために、円筒状の気柱を圧力波の進行方向と垂直な直線上に等間隔に一列に並べたもの（以下気柱列と呼ぶ）を用いた。

2-2 実験装置

実験装置は水を満した水槽の中に圧力波の発信器として水中スピーカを、またピックアップとしてチタン酸バリウム磁器圧電体を Fig. 1 に示すように配置し、ピックアップ1とピックアップ2との間に気柱列

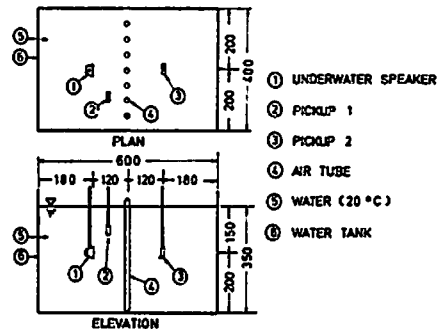


Fig. 1 General arrangement of measuring apparatus

昭和47年7月14日受理

* 京都大学工学部資源工学教室 京都市左京区吉田本町

を設けたものを用いた。したがって、ピックアップ1は気柱列の有無に無関係な圧力波を受信できる位置にセットされているので、これによって得られる圧力値を基準にしてピックアップ2で得られる気柱列を通過した圧力波の圧力値を比較することができる。

また、気柱列としては、厚さ 0.04 mm のポリエチレンフィルムを断面積 1cm^2 または 4cm^2 、長さ 40cm の円筒状の袋にし、その中へ空気を入れて密閉したものを、所定の等間隔で直線上に一列に並べたものを用いた。なお、計測回路のブロック図を Fig. 2 に示す。

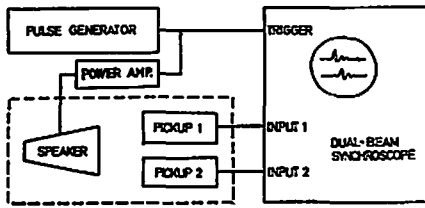


Fig. 2 Block diagram of the pressure measuring system.

2-3 実験結果

2-2 で述べた水中スピーカに矩形パルス発振器からの一定の波形の信号（パルス幅 1 msec の単一矩形波信号）を与え、気柱列がない場合および種々のパターンの気柱列が存在する場合について、ピックアップ2で得られる圧力波を観測した。

なお、気柱列としては Table 1 に示すような組合せのものについての実験を行なった。

Table 1 Coefficients of reduction of the pressure obtained by experiments with various conditions

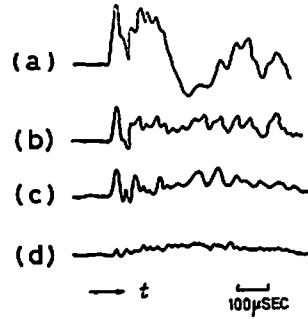
d : spacing of air tubes

a : area of the cross section of an air tube

d	a	1cm^2		4cm^2	
		1 ST PEAK	2 ND PEAK	1 ST PEAK	2 ND PEAK
22 cm		—	—	0.99	0.71
21 "		0.99	0.80	—	—
10 "		—	—	0.58	0.28
9 "		0.67	0.56	—	—
7 "		0.57	0.38	—	—
6 "		—	—	0.24	0.06
5 "		0.39	0.24	—	—
4 "		—	—	0.07	0.00
3 "		0.16	0.08	—	—

* Measurements under conditions marked by — were not carried out

Fig. 3 は、気柱断面積 a が 1cm^2 の場合のピックアップ2で得られた波形の一例を示したものであって、(a) 図は気柱列がない場合のもので、(b) 図、(c) 図および (d) 図はそれぞれ気柱列の間隔が 7cm, 5cm, 3 cm の場合に得られた波形である。



(a) without air tubes
(b) d (spacing of air tubes)=7 cm
(c) d = 5 cm
(d) d = 3 cm

Fig. 3 Typical records of pressure waves obtained by the experiment

Fig. 3 (a) から明らかなように、水中スピーカに与えた単一矩形波の電気信号と著しく異った波形が受信されているが、これは Fig. 2 に示す電力増幅器の電氣的周波数特性および水中スピーカの振動膜の機械的周波数特性の影響や、水中スピーカの振動膜と水との波動のカップリングの関係などの影響によるものと思われる。

しかし、本節の目的であるところの気柱列の有無や寸法の違いによる水中圧力波の軽減効果に関する解析や考察に際しては、スピーカに加える電氣的入力信号と圧力計による受信信号とが著しく異なることはなんら不都合を生じるものではなく、Fig. 3(a), (b), (c) および (d) などの波形のみを比較して論じることが可能である。

さて、Fig. 3 のそれぞれの図を比較してみると明らかなように、気柱間隔が狭くなるにつれてピックアップ2で受信された圧力波のピーク圧力値が小さくなっていくことがわかる。さらに、圧力波形の最初に現われる立ち上りの速い1次ピークと、それよりやや遅れて現われる立ち上りのゆるい2次ピークとに注目して細かく調べれば、気柱間隔が狭くなるにつれて、ピークの減衰する割合は2次ピークの方が1次ピークよりも大きいことがわかり、いいかえれば、波長の長い波は波長の短い波より減衰する割合が大きいことがわかる。このことは、Fig. 3 (a) および (c)

の波形についての周波数スペクトル分布を表わした Fig. 4 を見ればさらに明確になる。すなわち、気柱間の間隔が 5cm の場合の周波数スペクトル分布および気柱がない場合の周波数スペクトル分布を比較すると、周波数の低い部分のスペクトルの減少の割合が周波数の高いスペクトルの部分の減少の割合に比べてはるかに大きいことがわかる。なお、気柱間隔 5cm の

場合に、周波数の低いところのスペクトルが大きくなっているのは、後述するように気柱で回折した波の干渉により波長の長い波が合成されたことに起因するものと思われる。さらに、Table 1 には、各条件における 1 次ピークおよび 2 次ピークの減衰率 P_0/P_0 を求めた結果を示す。

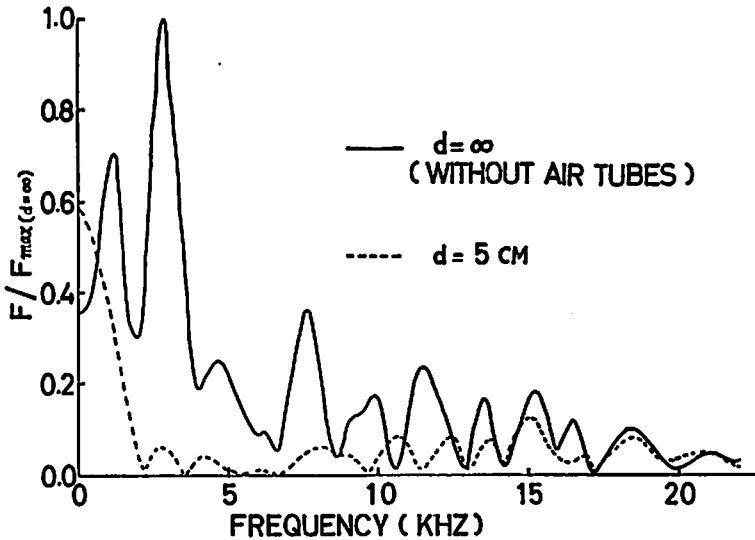


Fig. 4 Examples of frequency spectrum of the pressure wave obtained by the experiment

3. 数値解析による圧力軽減効果の検討

3-1 数値解析方法

一般に、無限の拡がりをもつ均質な媒質内を伝搬する波の解析は、比較的簡単に表わされる数式を用いて行なうことができるが、媒質が複雑な形状をなし、しかも有限の拡がりをもつ場合や、本研究における解析のように、空気と水とが混在しているというような不均質な媒質の場合には簡単な数式のみで解析することはできない。したがって、このような場合の解析には、電子計算機による数値解析を行なわざるを得ない。以下にその方法について簡単に述べる。

いま、水中を伝搬する波の波内圧力を p とし、粒子変位加速度の軸対称オイラー座標における r 方向および z 方向の成分を \dot{u} および \dot{v} とすれば、運動方程式は粘性を考慮しないとすればつぎようになる。

$$\dot{u} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \dots\dots\dots(1)$$

$$\dot{v} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 ρ は水の密度である。

つぎに、Fig. 5 に示すように、解析すべき材料を格

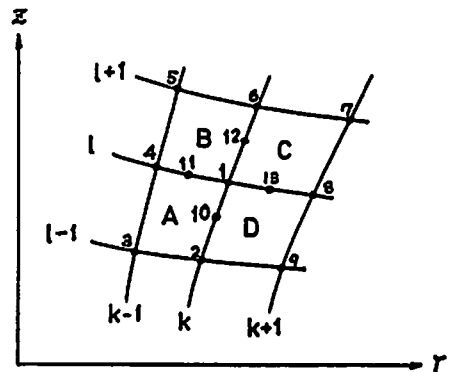


Fig. 5 Lagrangian coordinates and Eulerian coordinates in the finite difference method

子状に要素分割し、それぞれの格子点にラグランジュ座標 (k, θ, l) を対応させる。したがって、この座標は媒質の変形などに伴う移動とともに移動する。すなわち、この座標は媒質に固定されており、おのおのの分割された要素は質量が不変であることになる。

さて、軸対称問題では、一般に応力や変位などはオイラー座標 r, z および時間 t の関数であり、またオ

イラー座標 r , z はラグランジュ座標 k , l と時間 t との関数であるから、任意の関数を F とすると、

$$\frac{\partial F}{\partial k} = \frac{\partial F}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial k} + \frac{\partial F}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial k} \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial l} = \frac{\partial F}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial l} + \frac{\partial F}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial l} \dots\dots\dots(4)$$

となり、これらを解くことによりつぎの関係が得られる。

$$\frac{\partial F}{\partial r} = \frac{1}{J} \left(\frac{\partial F}{\partial k} \cdot \frac{\partial z}{\partial l} - \frac{\partial F}{\partial l} \cdot \frac{\partial z}{\partial k} \right) \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{-1}{J} \left(\frac{\partial F}{\partial k} \cdot \frac{\partial r}{\partial l} - \frac{\partial F}{\partial l} \cdot \frac{\partial r}{\partial k} \right) \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 J は座標変換のヤコビアンであり、

$$J = \frac{\partial r}{\partial k} \cdot \frac{\partial z}{\partial l} - \frac{\partial r}{\partial l} \cdot \frac{\partial z}{\partial k} \dots\dots\dots(7)$$

である。

したがって、オイラー座標系で表わされている運動方程式 (1), (2) の偏微分の項を (5) 式および (6) 式を用いてラグランジュ座標系で表わすことができる。その結果はつぎのとおりである。

$$\dot{u} = -\frac{1}{\rho J} \frac{\partial p}{\partial k} \cdot \frac{\partial z}{\partial l} + \frac{1}{\rho J} \frac{\partial p}{\partial l} \cdot \frac{\partial z}{\partial k} \dots\dots\dots(8)$$

$$\dot{v} = \frac{1}{\rho J} \frac{\partial p}{\partial k} \cdot \frac{\partial r}{\partial l} - \frac{1}{\rho J} \frac{\partial p}{\partial l} \cdot \frac{\partial r}{\partial k} \dots\dots\dots(9)$$

いま、Fig. 5 に示すように、ラグランジュ座標で区切られた要素内においては応力は一定であると考え、一つの格子点 (たとえば点 1 (k, l)) における加速度を差分で表示する方法を述べる。

さて、(8) 式および (9) 式に含まれている応力に関する偏微分は、互いに隣接する要素の境界線の中央 (たとえば点 10 ($k, l - \frac{1}{2}$) や点 11 ($k - \frac{1}{2}, l$) など) で定義されるものとする、要素内では応力が一定と考えているから、Fig. 5 に示す点 10 や点 12 などの点では、 k 微分のみが存在し、 l 微分は常に零であり、逆に点 11 や点 13 などの点では l 微分のみが存在し、 k 微分は常に零となる。たとえば、点 10 における圧力 p についてはつぎの関係が成立する。

$$\left[\frac{\partial p}{\partial k} \right]_{k, l - \frac{1}{2}} = [p]_{k + \frac{1}{2}, l - \frac{1}{2}} - [p]_{k - \frac{1}{2}, l - \frac{1}{2}} \\ = [p]_D - [p]_A \dots\dots\dots(10)$$

$$\left[\frac{\partial p}{\partial l} \right]_{k, l - \frac{1}{2}} = 0 \dots\dots\dots(11)$$

ただし、 $[p]_A$, $[p]_D$ などは Fig. 5 に示した A , D などのそれぞれの要素内での圧力を表わす。

このようにして、圧力の k および l に関する偏微分は互いに接している要素内の圧力の差で近似すること

ができる。

以上のようにすれば、ある時刻 t における水中のすべての格子点の加速度をそれをかこむ四つの要素内の圧力を用いて差分近似で求めることができる。

したがって、微小な時間 dt の間は、上記の圧力分布状態、いいかえれば加速度が保たれていると考えると、時刻 t における各点の加速度を dt なる微小な時間で積分することによって、容易に時刻 $t + dt$ における各点の変位速度を求めることができ、さらに dt なる微小な時間で積分することによって各点の変位を求めることができる。

このようにして、すべての格子点の変位速度および変位が求められると、四つの格子点に囲まれた要素内の新しい時刻での比体積を計算することができる。

つぎに比体積が求められれば、圧力と比体積との関係から圧力を求めることができる。今回の計算で用いた圧力と比体積との関係式としては、Bridgman が高圧下における水の圧縮率と圧力との関係⁹⁾ を求めた実験結果をもとにして筆者らが誘導したつぎの式を用いた。

$$\rho = \frac{b}{a} [\exp \{a(l - V)\} - 1] \dots\dots\dots(12)$$

ただし、比積体を $V(\text{cm}^3/\text{g})$ 、圧力を $p(\text{kg}/\text{cm}^2)$ で表わし、 a および b はつぎに示すような定数である。

$$a = 7.56(\text{g}/\text{cm}^3) \dots\dots\dots(13)$$

$$b = 2.22 \times 10^4 \left(\frac{\text{kg}/\text{cm}^2}{\text{cm}^3/\text{g}} \right) \dots\dots\dots(14)$$

以上に述べたようにして、すべての格子要素の新しい時刻における圧力を求めることができる。したがって、さらに dt だけ経過したつぎの時刻における圧力分布を求め得ることになり、このようになりかえしを順次行なうことによって、時刻の経過に伴う圧力などの変化状態を知ることができる。Fig. 6 にこの方法に関する流れ図の骨子を示してある。

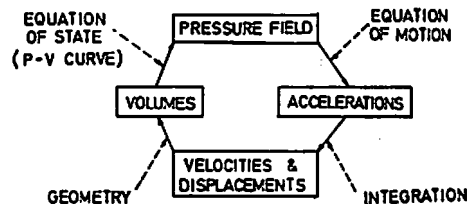


Fig. 6 General flow chart of the numerical analysis of pressure wave

3-2 数値解析用モデル

3-1 で述べた差分近似による波動方程式の解法を用いて、2節で述べた実験の条件をほぼ満すモデルにつ

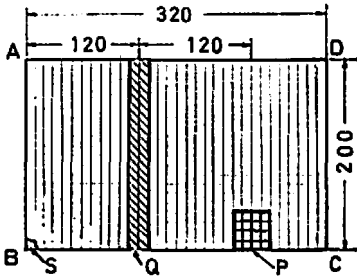


Fig. 7 Model of water medium with air tubes used for numerical analyses

いての解析を行なった。Fig. 7 は、その数値解析モデルを示している。すなわち、四辺形 ABCD の内部は Q の部分の一部を除いてすべて水とみなし、Q の部分には気柱の配列に応じたパターンで空気が存在するという条件を与え、さらに線分 AB を軸とする軸対称、および、線分 BC を含む線分 AB に垂直な面で面対称とする問題として解いた。したがって、気柱が線分を中心とする円環となることと、その断面が正方形であることを除けば 2 節で述べた実験条件と一致する。そこで Fig. 7 の S の部分に Fig. 8 に示すようなパルス幅 T をもった正弦波波形の圧力が加わった場合に、P

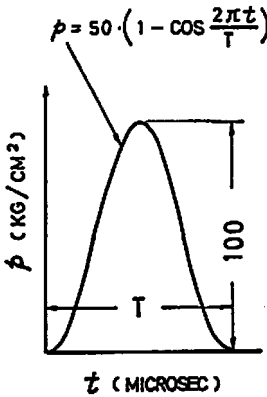


Fig. 8 Pressure wave form used for numerical analyses

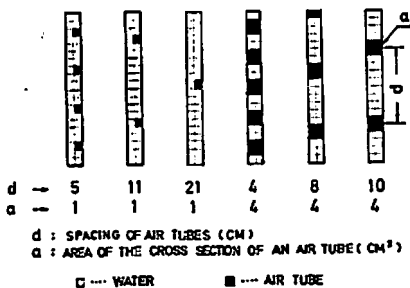


Fig. 9 Examples of the arrangement of air tubes

の部分で観測される圧力波形を求め、両者の圧力の大きさを比較した。なお、Fig. 9 に Q の部分に設けた気柱の具体的な配列と形状の例を示す。

3-3 解析結果および考察

Fig. 7 の Q の部分に気柱が存在しない場合の P におけるピーク値 p_0 と Fig. 9 の例に示したような配置など気柱が存在する場合の P におけるピーク値 p_a との比と気柱間隔との関係を Fig. 10 および Fig. 11 のそれぞれの曲線 1, 2 で示す。Fig. 10 は気柱断面積が 1cm^2 の場合であり、Fig. 11 は気柱断面積が 4cm^2

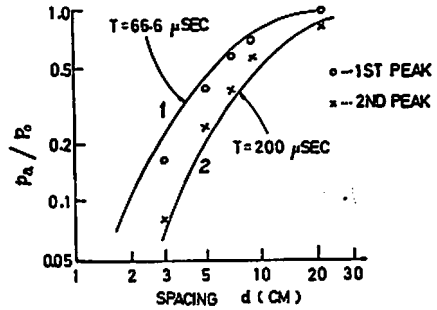


Fig. 10 Relations between the spacing of air tubes (d) and coefficient of reduction of the pressure p_a/p_0 obtained both by the experiment and by the numerical analysis (in case of the sectional area of an air tube (a) is 1cm^2)

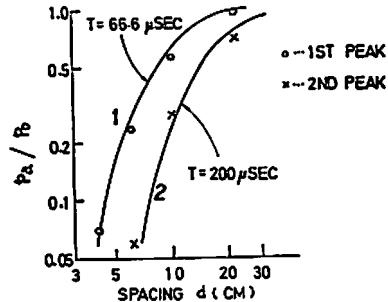


Fig. 11 Relations between the spacing of air tubes (d) and coefficient of reduction of the pressure p_a/p_0 obtained both by the experiment and by the numerical analysis (in case of the sectional area of an air tube (a) is 4cm^2)

の場合であって、曲線 1 および曲線 2 は Fig. 8 における圧力波形のパルス幅 T がそれぞれ $66.6\ \mu\text{sec}$ の場合および $200\ \mu\text{sec}$ の場合を示しており、実験の結果、すなわちに Table 1 に示した結果もあわせて示してある。

さて、Fig. 3 (a) から、1 次ピークが含まれている

パルス状の波形の持続時間はほぼ $50 \mu\text{sec}$ 前後とみなすことができ、また 2 次ピークが含まれている波形部分の波長を $200 \mu\text{sec}$ 前後とみなすことができることを考慮して、Fig. 10 および Fig. 11 に示した結果を検討してみると、数値解析の結果と実験結果とがかなりよく一致していることがわかる。したがって、3-1 で述べた差分近似を用いた数値解析によって、エア・カーテンによる水中圧力波の軽減効果について十分な検討が行なえるものと考えられるので、さらに一般的な平面波の伝搬についてのシミュレーションを行なうことにした。

4. 平面波に対するエア・カーテンの圧力軽減効果についてのシミュレーション

4-1 概 説

実際的な規模での水中爆破作業においては、エア・カーテンを設置する位置は爆薬の寸法に比べてかなり遠くはなれた場合が多いので、その位置では伝搬してくる波はほとんど平面波とみなせる場合が多い。

したがって、本節では平面波に対するエア・カーテンの圧力軽減効果についてのシミュレーションの結果について述べる。

4-2 数値解析用モデル

3-1 で述べた円筒座標による数値解析法を用いて平面波の解析を行なうには、シミュレーションに用いるモデルを半径方向の座標すなわち r 座標の充分大きいところで設定すればよい。すなわち、Fig. 12 に示す

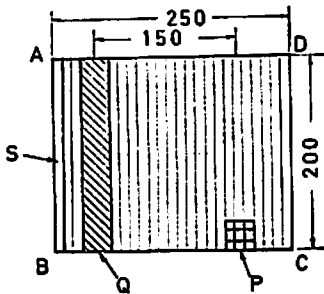


Fig. 12 Model of water medium with air tubes used for the simulation

ように、AおよびBの r 座標を線分ADまたは線分BCの長さに比べて充分大きくとり、線分ABに垂直な線分ADおよび線分BCを含む二平面を対称面とする条件のもとに、Sの部分に圧力を加えると、線分ABから線分DCに向かう平面波が伝搬する場合の解析を行なうことができる。

さて、Fig. 12 のQの部分に Fig. 13 に例示した配列と形状の種々の気柱列を設定すると、これらの気柱列はすべて平面波の波面に平行であるとみなすことが

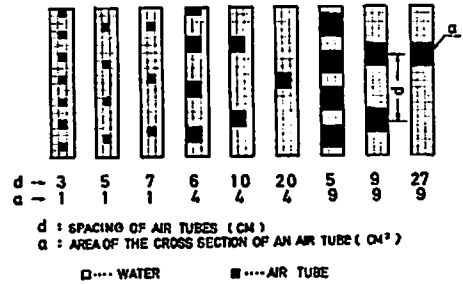


Fig. 13 Examples of the arrangement of air tubes

でき、水中圧力波の進行方向に垂直にエア・カーテンが設置された場合の解析を行なうことができる。

4-3 解析結果および考察

Fig. 12 に示すSの部分に Fig. 8 に示した正弦波パルスの波形をもつ圧力を加えた場合に、Fig. 12 に示すPの部分に伝搬してくる圧力波について、Qの部分に気柱が存在しないときのピーク値 p_a と、Qの部分に気柱が存在するときのピーク値 p_a を求め、 p_a/p_0 の値と気柱間隔との関係を求めて示したのが Fig. 14 ~ Fig. 16 であって、それぞれ気柱の断面が 1cm^2 、 4cm^2 および 9cm^2 の場合について得られた結果を示したものである。なお、いずれの場合も、Sに加えた圧力波形のパルス幅 T が $33.3\mu\text{sec}$ 、 $66.7\mu\text{sec}$ 、 $100\mu\text{sec}$ 、 $133.3\mu\text{sec}$ の 4 種類の場合についての解析結果を示しておいた。これらの図からつぎのことがわかる。

- (1) 同一気柱断面積の場合には、気柱間隔が狭くなるほど p_a/p_0 の値は小さくなっていく。
- (2) 同一気柱間隔の場合には、気柱断面積が大きくなるほど p_a/p_0 の値は小さくなっていく。
- (3) 伝搬する波のパルス幅 (波長) が長くなるほど

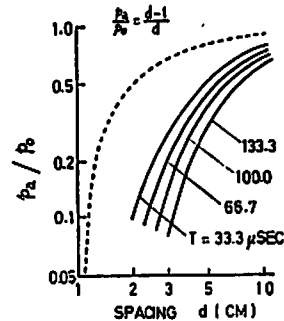


Fig. 14 Relations between the spacing of air tubes (d) and coefficient of reduction of the pressure p_a/p_0 obtained by the simulation (in case of the sectional area of an air tube (a) is 1cm^2)

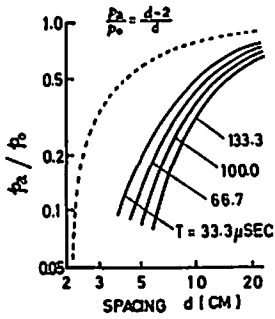


Fig. 15 Relations between the spacing of air tubes (d) and coefficient of reduction of the pressure p_a/p_0 obtained by the simulation (in case of the sectional area of an air tube (a) is 4 cm^2)

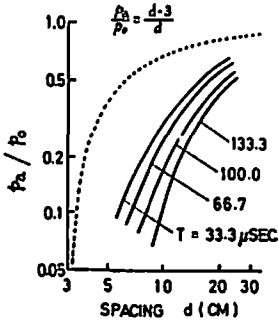


Fig. 16 Relations between the spacing of air tubes (d) and coefficient of reduction of the pressure p_a/p_0 obtained by the simulation (in case of the sectional area of an air tube (a) is 9 cm^2)

ど p_a/p_0 の値は小さくなっていく。

つぎに、上記のような特性が生ずる理由について考察してみる。まず(1)についてであるが、これは圧力波が空気層を通過するときはいちじるしくその圧力を減少することを考えれば、気柱間隔が狭くなって水の部分が少なくなり、空気の部分が多くなれば p_a/p_0 の値が小さくなることはよく理解できる。すなわち Fig. 14~Fig. 16 において点線で示した曲線はそれぞれ

$$p_a/p_0 = (d-1)/d \dots\dots\dots(15)$$

$$p_a/p_0 = (d-2)/d \dots\dots\dots(16)$$

$$p_a/p_0 = (d-3)/d \dots\dots\dots(17)$$

で表わされる関係を示したものである(ただし、 d は気柱間隔 (cm) を表わす)。これらの式の右辺で示される値は、それぞれの気柱間隔のもとで気柱列の中心を通る断面で水の占める部分の面積の割合を表わしている。したがって、上記の式で表わされる関係はエア・カーテンによる圧力軽減の割合が気柱列で占める水

の部分の面積の割合に比例することを示していることになる。このことを考慮して、解析結果を示した曲線の傾向とこれらの点線で示した曲線の傾向とを対比してみると、両者の傾向がかなりよく似ていることがわかるが、両者には定量的にはかなりの隔りがある。この理由は(3)の理由の考察で明らかになる。

つぎに、(2)で示した特性の生ずる理由についてであるが、これは(1)の場合と同じ理由にもとづくものと思われるが、Fig. 14 に示した解析結果のグラフを対数目盛で2倍および3倍の距離だけ右へ平行移動すれば、Fig. 15 および Fig. 16 に示した解析結果のグラフとほとんど一致することがわかる。これはとりもなおさず、Fig. 14 の横軸に示した気柱間隔の値を2および3倍にとり、気柱断面の一边も2倍および3倍、したがって断面積は4倍および9倍になるようにすれば、Fig. 15 および Fig. 16 に示した圧力軽減効果と同じ効果が得られることを示している。したがって、気柱間隔と気柱断面の寸法(たとえば、正方形なら一辺の長さ、円なら半径など)との比が同じであれば、圧力波の減衰については、ここで解析した波長に関しては、ほぼ同じ効果をもたらすといえることになる。このことは実際上の作業を行なうに当たっては注目すべきことである。たとえば、断面積 4 cm^2 の気柱を気柱間隔 10 cm でならべた場合の p_a/p_0 の値は $T=100 \mu\text{sec}$ のとき約 0.35 であるが、断面積 1 cm^2 の気柱列で同じ効果を得るためには気柱間隔 5 cm で並べればよいことになるから、必要な空気量は全体で約半分でよいことになり、より経済的な実施が可能となる。

つぎに(3)に示した特性の生ずる理由としては、波長の大小が影響していることから判断すれば、波の回折現象がその主な理由として挙げられるのではないかと思われる。一般に波長が長い波ほど回折現象が著しく現われて遮へい物体の背後にまわり込みやすい。したがって、波長が長い波ほど平面波として伝搬してきた波が遮へい物の間を通り抜けた後では球面波となりやすく、球面波として伝搬してきた波は遮へい物の間を通り抜けたあとさらに曲率半径の小さい球面波になりやすい。一方、球面波の圧力はその球面波の波源とみなされる点、すなわちその波面の曲率中心からの距離に反比例して小さくなってゆくため、いまかりに、遮へい物の間を通り抜けた直後の点における球面波の圧力が同じ大きさであるとすれば、その点から同じ距離だけ伝搬した点においては球面波の曲率半径が小さいほど球面波の圧力は、曲率半径が大きい場合に比べてより小さくなることになる。

また逆に波長の短い波の場合はあまり回折するこ

とがなく、平面波で伝搬してきた波は、ほぼ平面波の状態を保って遮へい物の間を通り抜けることができるものと思われる。したがって、上に述べた回折の影響による圧力の減衰は少なくなり、波長がさらに短くなってゆけば、Fig. 14~Fig. 16 に示すように、 p_a/p_0 と気柱間隔 d との関係は同図に表わした点線の曲線に近づいてゆくものと思われる。

5. エア・カーテン法の設計に関する所見

本研究では、エア・カーテンとしては細長い円筒状の空気袋を念頭においたが気泡を用いたエア・カーテンの場合にも、ある程度以上の量の気泡を噴出させればそれぞれの気泡が連続した気柱とみなせる状態を呈すると思われるので、本研究で得られた結果は気泡を用いたエア・カーテンに対しても定性的にあてはまるものと思われる。さて、本研究から得られた結果を考慮して実操業におけるエア・カーテン法の設計に対する所見を述べる。

(1) 気柱を気柱間隔を大きくして重点的に配置するよりも、細かく分散させて気柱間隔を小さくして配置した方がより経済的である。すなわち、4-3 の考察のところ述べてのように、同じ効果をもたらすのに、気柱を細かく分散させて配置した方が全体の空気量が少なくてすむので、空気袋を用いたエア・カーテンの場合では気柱の浮力が小さくなって扱いやすく、気泡を用いたエア・カーテンの場合では消費空気量が少なくてすみ、いずれにしてもより経済的である。

(2) 圧力波の波長によって圧力の軽減効果が異なってくるので、薬量、薬種、装薬状態などの差異によって生ずる水中圧力波の波長の長短に気を配る必要がある。

(3) エア・カーテンとしてどのようなものを選ぶかはその場の条件に左右されると思われるが、海底の凹凸のはげしいところや、潮流のきついところでは、空気袋によるエア・カーテンなども有効であるように

思われる。

6. 結 言

本研究においては、エア・カーテン法による水中圧力波の圧力軽減効果に関する基礎的な研究を行ない、効率よく水中圧力波を軽減するための最適設計を行なうに必要な資料を求めるよう努めた。すなわち、エア・カーテン法による水中圧力波の圧力軽減効果に関する実験の結果と数値解析の結果とがほぼ一致することを確めた上で、さらに一般化した条件のもとでのシミュレーションを行ない、エア・カーテン法による圧力波の軽減機構を究明し、4節で述べたような結果を得た。さらにその結果に基づきエア・カーテン法の最適設計に対する所見を述べたが、この研究はあくまで爆薬の爆発により水中に投げられる水中圧力波がほぼ平面波とみなせるまで伝搬してからの解析であるので、爆薬の至近距離でのエアカーテン法による圧力軽減効果についてはさらに検討が必要であるものとする。

なお、本研究におけるシミュレーションは京都大学大型計算機センターのオンライン・システム(FACOM 230-60-TSS) を使用して行なったものである。

参 考 文 献

- 1) 若園吉一, 小川輝繁, 沢田保夫, 阪口清次: 工業火薬協会誌, 31巻, 131号, 81頁, 1970
- 2) R. C. Jacobsen: Ontario Hydro Research News, vol. 6, No. 2, p. 14, 1954
- 3) G. Maenchen and S. Sack: Methods in Computational Physics, vol. 3, p. 181, Accademic Press, 1963
- 4) P. W. Bridgman: Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, vol. 48, p. 309, 1912
- 5) 小橋豊: 音と音波, 裳華房, 96頁, 1965
(昭和47年5月23日工業火薬協会昭和47年度年會にて発表)

Numerical Analyses on the Reduction of Hydraulic Pressure Wave by the Air Curtain

Kouichi HANASAKI and Ichiro ITO

The authors carried out the experiments and the numerical analyses using the finite differential method, to determine the effect of the air curtain (composed of air tubes) on the reduction of hydraulic pressure waves.

As we ascertained that results of the experiments agreed approximately with those of numerical analyses, we investigated further the mechanism of reduction of pressure wave by the air curtain, by means of the simulation method under the generalized condition.

The results obtained are briefly shown below:

(1) Considering the pattern of air tube arrangement, the reduction is more effective in the case that the arrangement is composed of many tubes with smaller sectional area than in the case that it is composed of few tubes with larger sectional area, under the condition that the total volume of air tubes is kept constant.

(2) The coefficient of reduction of pressure wave by the air curtain changes depending upon the length of the pressure wave.

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan)