

音波モデルによる波浪しゃへい模型実験について

中 村 重 久*・高 下 雅 紀**

1. 緒 言

海学工学の主要な問題である波については、従来、実験的研究は主として水槽実験によって行なわれてきた。とくに、海岸・港湾の保全・防災に関連した問題については、水理模型実験による検証や予測が行なわれる例が多い。このような問題に関連して、海岸・港湾における波浪しゃへいの問題を処理し、そのための海岸構造物の適切規模や効果的配置を検討する必要がある。この計画の段階での、労力の軽減、時間の節約、および経費の有効利用を考慮にいれて、効果的な計画を導くひとつの方法として、ここでは音波モデルの導入を提案する。

音波モデルを海岸や港湾の問題に応用することが1963年 Morrow によって提案されたが、実際に応用されたのは1968年以降である (James, 1968²⁾; Shaw and Parvulescu, 1971³⁾). 著者らは Shaw の考え方を海岸工学的見地から検討した結果にもとづき、音波モデルが波浪しゃへい模型実験に応用できるかどうかを調べてきた。本文はその得られた成果である。

2. 相 似 律

水面波は空気と水との境界面を伝わる一種の表面波であり、音波は媒質内を伝わる疎密波である。したがって、両者は力学的にみて波の性質がまったく異なっている。しかし、この2種類の波を支配する力学的方程式系には形式的に対応している部分がある。これを利用して水面波を音波におきかえて検討する場合の相似律を考える際に必要な条件は次のようになる (高下, 1977⁴⁾).

音場が気体 (たとえば空気) の場合、状態方程式も考える必要がある。音波に関する現象は等温変化と考え、Boyl-Challs の法則が成立つとすると、気温はできるだけ高い方が望ましい。そして、音圧 p_s は気圧 p_0 にくらべて十分小さく、したがって、空気の密度の音による変動分は空気の平均密度に比べて十分小さくなくてはならない。水面での砕波は音の衝撃波に対応するが、この現象は非線型断熱変化であり、上述の十分小さい条件は

満されなくなってしまう。音波モデルの相似律が成立つためには、音場の気体は一樣 (密度一定) であり、水面波の場合としての水も一樣 (水深一定) でなくてはならない。また、水面波は2次元的存在であるので、3次元的な音波を2次元的な波として対応づけるための境界条件も設定する必要があるが、これについては後に詳しく検討する。

水面波に関するものに w 、音波に関するものに s を下付とする。このとき、運動方程式は

$$\frac{dv_w}{dt_w} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p_w}{\partial r_w} + \nabla_w (\nu_w \nabla_w v_w) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dv_s}{dt_s} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p_s}{\partial r_s} + \nabla_s (\nu_s \nabla_s v_s) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、波の伝播する面を $O-xy$ 面とすると、長さおよび時間についての相似比が

$$L_r = L_s/L_w = X_s/X_w = Y_s/Y_w; \quad t_r = t_s/t_w \quad \dots\dots\dots (3)$$

のとき、速度の相似比は

$$V_r = L_r/t_r = (L_s/L_w)/(t_s/t_w) \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、運動方程式の右辺第1項より

$$\rho_r = \rho_s/\rho_w; \quad p_r = p_s/p_w \quad \dots\dots\dots (5)$$

さらに、粘性項は、音波の場合微小項とみなされるので、これに対応する水面波の問題が検討できることになる。連続の方程式については、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t_w} + v_w \nabla_w \zeta = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t_s} + v_s \nabla_s p_s = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

のように、水面波の微小擾乱 ζ は音圧 p_s に対応させることができ、この相似比は

$$\zeta_r = p_s/\zeta \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $p = p_0 + p_s$, $H = h + \zeta$ とすると

$$p/H = (p_0 + p_s)/(h + \zeta) = \zeta_r \quad \dots\dots\dots (9)$$

したがって、

$$p_0/h = p_s/\zeta = \zeta_r \quad \dots\dots\dots (10)$$

このことより、音波モデルに対して水深・波高比の厳密な対応条件は

$$\zeta/h = p_s/p_0$$

でなくてはならない。しかし、一気圧常温の音場と水深

* 正 会 員 工博 京都大学助手 防災研究所

** 学生会員 京都大学大学院工学研究科

約 10 cm の実験水槽とを考えると, 等号を成立させることは大変難しく, ζ/h が p_s/p_0 よりも大きいのが普通である.

3. 実験装置

(1) 音波モデルの実験条件

水面波の音波モデルに対する実験上の長所として, 次のような点があげられる. すなわち, 可聴周波数帯の音波を用いることにすると, 市販のオーディオ装置を利用でき, これによって, 実験のための労力, 時間および経費の節約と効果的利用をはかることができる. 音波モデルは, 水深一定の掘込港湾などの波浪しゃへいの問題に関連した, 構造物の規模や配置に関する計画のための基礎的検討に有用であると考えられ, 必要に応じて, その後で, 水槽実験などによる詳細な検討をするのが能率的であると考えられる.

(2) 音波モデルのための実験装置

水槽実験と音波モデルとの実験装置の対応づけは, たとえば, 図-1 のようになる. ここでは, 音場として,

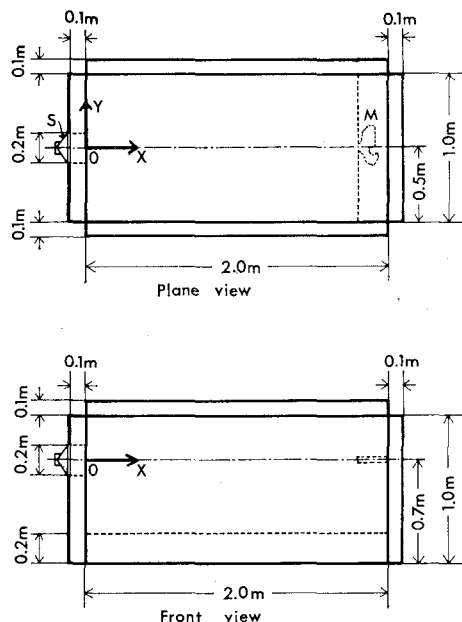


図-2 音 場

性の状態に設置し, 得られた信号はアンプを通してレコーダーへ導く. 本実験では, デジタル・ボルトメーターによって読みとり, シンクロスコープをモニターとして利用した.

(3) 装置の性能と音場の構成に関する検討

ここで用いた装置で形成される計測系が音場内でどのような特性を示すか, あらかじめ実験的に検討した. すなわち, 1) スピーカーからの信号の強さとマイクで検出される信号の強さとの関係は, 与えられた周波数の正弦波について比例関係にある. 2) 音場内でスピーカーからの距離に対するマイクの信号の強さの変化をみると, 図-3 のように, スピーカーからの距離 1.6~1.9 m では近似的に一樣な音場と考えてよい. 3) スピーカー前方約 1.6 m の距離で音場の幅方向には側壁付近以外は

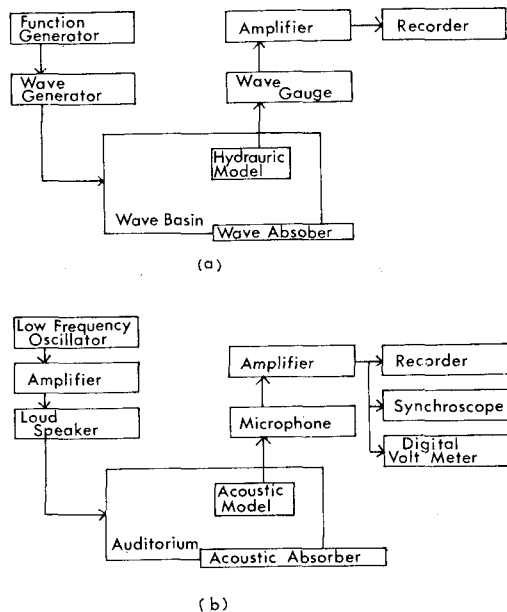


図-1 音波モデル実験のブロック・ダイアグラム

厚さ 0.1 m のウレタンフォームで囲まれた, 高さ 0.8 m, 幅 1.0 m および長さ 2.0 m の空間をとった (図-2). 側壁, 天井および底面にウレタンフォームを用いたのは, その材質からみて, 手近に得られるもので音波の反射し難いもののひとつと考えたからである. 音源としては口径 20 cm のスピーカーを用い, 図-2 のように一壁面に埋めた. 周波数の選択は低周波発振器で行ない, その信号を増幅してスピーカーへ導いた. 波型は正弦波とした. 音場での音波の計測のために, 小型マイクを無指向

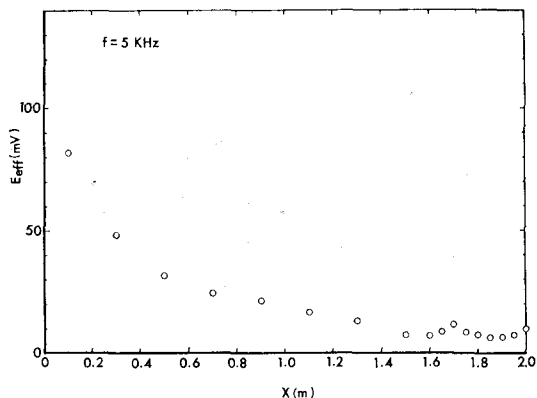


図-3 スピーカー前方距離に対する音波の強さの変化

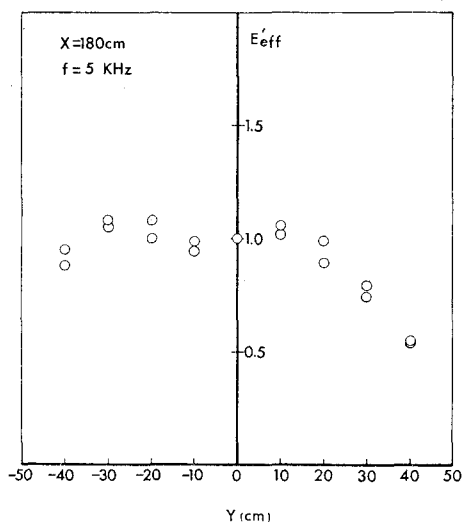


図-4 音場の横方向の一様性

ほぼ一様な音場であるとみなされる(図-4)。4) スピーカー前方 1.6m の位置のマイクについて計測系の周波数特性を調べた。5) 音場内ではスピーカーからの信号が正弦波ならば、マイクで得られる信号も同じ周期の正弦波であり、波高のみが変る。

海岸工学的には、一様な音場における音波モデルの実験で水槽実験に対応づけて利用できる。したがって、音波モデルの実験にさきだって、上述のような検討が必要である。

4. 音波モデル

ここでの目的は波浪しゃへい効果の検討に音波モデルを利用できるかどうかを明らかにすることである。これにさきだって、ロングビーチ港の港湾振動に関する理論および水槽実験の結果(Lee, 1971^{5),6)}; Hwang and Tuck, 1970⁷⁾)と音波モデルによる実験結果とが、どの

ような条件で対応づけできるかを調べた。音場内での実験条件を考慮して、港の音波モデルの平面形状は図-5のようにし、それを幅 1m, 長さ 0.2m, 厚さ 0.5cm のアクリライト板に切り込んで作成した。ここに、ロングビーチ港

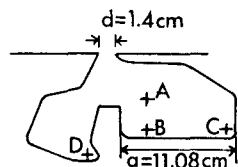


図-5 ロングビーチ港音波モデル

の音波モデルは Lee らの水槽モデルの 1/3.99, 実物の 1/18753 である。

このようにして用意された音波モデルでは、波長 L_s は音速 c_s と音波の周波数 f_s (または周期 T_s) によって

$$L_s = c_s T_s = c_s / f_s \quad (11)$$

ただし、地表面付近での気温 $\tau^\circ\text{C}$ における音速は m/s 単位で

$$c_s = 331.0 + 0.6\tau \quad (12)$$

これに対して、水槽モデルでは、実験波は長波近似で考えるものと考え、

$$c_w = \sqrt{gh} \quad (13)$$

を用いて波長 L_w の算出を行なった。この場合、

$$L_r = \frac{L_s}{L_w} = \frac{c_s T_s}{c_w T_w} = \left(\frac{c_s}{c_w} \right) \left(\frac{T_s}{T_w} \right) = c_r T_r \quad (14)$$

ここで、Lee の実験に対して、 $\tau = 15^\circ\text{C}$ および $h = 30\text{ cm}$ とすると、 $c_s = 340\text{ m/s}$, $c_w = 172.8\text{ cm/s}$ となり、したがって、 $c_r = 196.7$ となる。ロングビーチ港の平面形状について $L_r = 1/3.99$ であったから、

$$T_r = L_r / c_r = 1/784.8 = 1/f_r \quad (15)$$

水槽実験と音波モデルとで同じ無次元波数の実験波をとるためには、港の基準長 a に対して

$$k_w a_w = k_s a_s \quad (16)$$

でなくてはならない。したがって、この場合

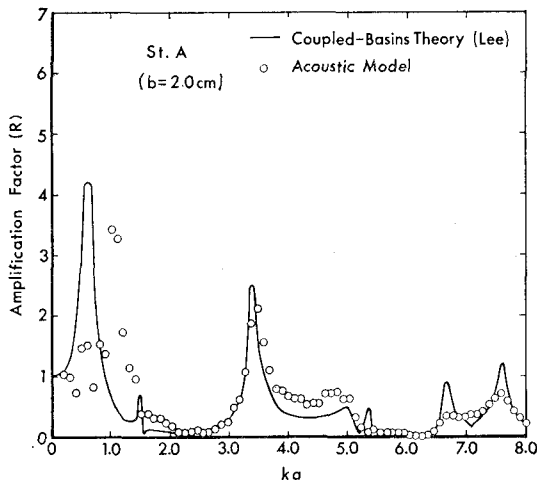
$$2\pi a_r / L_r = 2\pi a_r f_r / c_r = 1 \quad (17)$$

ところで、スピーカーからの音波は 3 次元的に球面波として伝わる。これを水面波と対応させるためには、音響工学的に考えて、音波の波長にくらべて音場の高さを十分小さくすることが必要と考えられる。この高さ b をどれだけにするのがよいかを調べるために、同様な板を 5 枚用意した。港に対応する音場をつくるために、幅 1m, 長さ 0.2m のアクリライト板を底板と天板とし、その 2 枚の板の間に港の切り込みをした板をはさみ、港口がスピーカーに相対するように音場内に設置した。はさむ板の枚数によって港の音場の高さ b を変えることができる。

図-5 の点 A, B, C および D における、理論および水槽実験による応答特性を音波モデルによるそれと比較するため、まず、港口が閉じた場合の、港口前面での音波の強さ I_0 を測定する。それぞれの測点での音波の強さの測定値を I_A , I_B , I_C および I_D とする。同じ周波数の音波に対して、たとえば、

$$R_A = I_A / I_0 \quad (18)$$

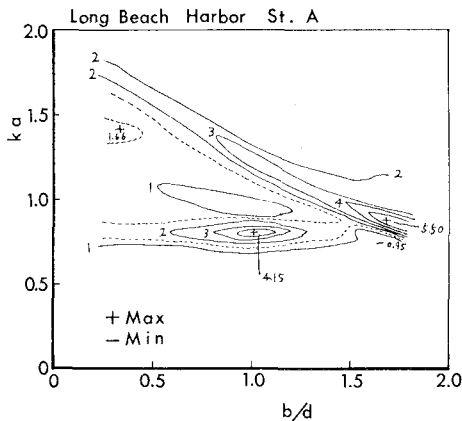
をとれば、点 A での増幅率がもとまる。とくに $b = 2.0\text{ cm}$ の場合について得られた結果を図-6 に示す。 b の値をパラメーターとして、0.5, 1.5, 2.0, 2.5 cm と変えて実験した結果、理論的予測と異なり、 $b = 2.0$ あるいは 2.5 cm の場合が、音波モデルは理論や水槽実験とよく対応することがわかった。ここで、図-6 を詳細にみると、音波モデルが理論とよく対応しない主な原因が 3 つあることがわかる。すなわち、1) $6.0 < ka < 8.0$ では共振点での応答が音波モデルではよくない。これは水槽での高周波側の波は深海波に近くなるにもかかわらず、音波モデルの相似を長波近似のもとで考えたことによる。2) ka が 1.5 以下の範囲で理論曲線と音波モデルの実験結



図—6 ロングビーチ港点Aの共振特性(曲線はLeeの理論値, 丸印は $b=2.0$ cm の場合の実験値)

果との一致が悪いのは, 境界条件が相互に完全に対応していないことによると考えられる. また, 3) 計測上の技術的問題として, たとえば, R_A をもとめる場合, I_A と I_0 との計測時の周波数の誤差も無視できない.

ここでは, とくに, 点Aでの音場のスケールによる現象をとらえるために, R_A をパラメーターとし, 図—7を作成した. この図をみると, b/d の値によって共振点



図—7 音場や音波モデルのスケールに関与する共振 (ロングビーチ港点Aの場合)

の ka が変わるものと, 音場全体の効果によるもの (ka の値が 0.7) とがあることがわかる.

同様な検討をその他の点についても行ない, また, 長方形港湾についても同様な実験を行なった. その結果, 開口幅 d のせまいロングビーチ港の例が, 音波モデルの実験結果と従来の理論や水槽実験の結果と, よりよく対

応することが明らかとなった.

5. 結 言

以上を要するに, 1) 一定水深の浅水長波について, 近似的に音波モデルのアナロジーが可能なことを, 水面波と音波との基礎方程式の対応によって示した. 2) 海岸工学的に必要な, 一様な波の場を音波モデルで得るための条件を音響工学理論および実験によって調べた. そして, 3) 波浪しゃへい効果の検討にさきだって, 従来の港湾振動の理論および水槽実験と音波モデルとの比較検討を行ない, とくに, ロングビーチ港について, Lee の計算値と音波モデルによる実験値とがかなりよく対応することを明らかにした. 4) そのほか, 音波モデルの適用条件や限界などについても検討した.

このようなことから, 海岸・港湾における波浪しゃへい効果の検討には音波モデルは有用であると考えられる. なお, 残された問題については今後検討の予定である.

最後に, 本研究を遂行するにあたり, 研究の方向づけと激励とをいただいた防災研究所土屋義人教授, 実験装置の音響工学的検討に有益な御助言をいただいた工学部電子工学教室川端昭教授に感謝の意を表す. また, 計測装置の製作と実験計測に際して藤本繁男技官の助力を得た.

参 考 文 献

- 1) Morrow, C. T.: The marina as a two dimensional auditorium, Jour. Acoustical Soc. Amer., Vol. 35, pp. 1169-1172, 1963.
- 2) James, W.: Rectangular resonators for harbour entrances, Proc. 11th Conf. Coastal Eng., Chap. 98, pp. 1512-1530, 1968.
- 3) Shaw, R. P. and Parvulescu, A.: An acoustic model for the experimental study of water wave problems, Jour. Acoustical Soc. Amer., Vol. 50, pp. 1443-1446, 1971.
- 4) 高下雅紀: 音波モデルによる波浪しゃへい模型実験の基礎的研究, 京都大学卒業論文, pp. 1-27, 1977.
- 5) Lee, J. J. and Raichlen, F.: Wave induced oscillations in harbours with connected basins, W. M. Keck Lab., Hydraulics and Water Resources, Div. Eng. and Appl. Sci., CIT, Rep. No. KH-R-26, pp. 1-135, 1971.
- 6) Lee, J. J.: Wave induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, Jour. Fluid Mech., Vol. 45, pp. 375-394, 1971.
- 7) Hwang, L. S. and Tuck, E. O.: On the oscillations of harbours of arbitrary shape, Jour. Fluid Mech., Vol. 42, pp. 447-467, 1970.