

湾口部のエネルギー損失を考慮した湾水振動の解析

ANALYSIS OF HARBOR OSCILLATIONS WITH ENERGY LOSS AT A HARBOR ENTRANCE

村上 仁 士*・野 口 英 二**

By Hitoshi MURAKAMI and Eiji NOGUCHI

1. 緒 言

津波のような長周期の波が湾入部に侵入して湾水を共振させることになると、長時間にわたる海水の越流・浸水といった災害に直結する問題が生ずる。また津波以外でも常時観測される港湾の副振動によって荷物の積降しや船舶の航行に重大な支障をきたすことがある。こうした種々の被害を防止するには湾水振動の現象を把握して、それに対する十分な策を講ずる必要がある。近年、海洋開発の一環として海洋レジャー基地の建設が各所でマリーナという形で現実化しており、これらの小型船舶の停泊地では従来港湾で対象としていた長周期波よりも短い周期の波に対する湾水振動が重要な問題となることが予想される。

こうした湾水振動に関する研究は、従来から多くの研究者によってなされているが不明な点も少なくなく、ことに共振時の波高の定量的な評価に問題が残されている。このようなことから、著者の一人^{1)~3)}は、共振特性を規定する波のエネルギー損失、特に最も重要な防波堤開口部の波のエネルギー損失に注目して一連の研究を行ってきた。さらに、外海部の幅員が有限で一次的取り扱いができる場合について、一様水深の長方形港湾に対する波のエネルギー損失を考慮した湾水振動の解法を提案した^{4),5)}。その結果、湾水の振動特性を解明するに必要な種々の興味ある成果を得たが、上述の解法は外海部の幅員が有限であるという制約を受けるため、実際によくみられる半無限の外海に接続した湾に対してはその解法が適用できないという欠点があった。

近年、Ünlüata-Mei^{6),7)}は、外海が半無限であるような一様水深の長方形港湾について、開口部で港湾内外に水位差が生じ、それが開口部の流速の 2 乗に比例すると

いう条件を与え、エネルギー損失係数を理論に導入して波動方程式の解を得た。しかし解の実験的な検証はなされておらず、必ずしも理論の妥当性を明確にしたとはいえない。また、Ünlüata-Mei の理論に含まれる未知量であるエネルギー損失係数についても十分な検討がなされているとはいえない。

本研究では、共振時における湾奥の波高を定量的に評価しようとする観点から、まず半無限の外海に接続した一様水深の長方形港湾について波のエネルギー損失を考慮した湾水振動理論を導く。解法は、開口部からの散乱波を Fourier 変換法を用いて求めた Ippen-Goda⁸⁾の方法と同じで、湾口条件として港湾内外で流速の 2 乗に比例する水位差が生ずるという仮定がなされている。ついで、種々の開口幅に対する縮流係数を比較して防波堤開口部で生ずる波のエネルギー損失に関する考察が行われる。引き続き、理論解の実験的検証を行うとともに湾水振動を制御する立場から、防波堤、港内水深および入射波高の共振特性に及ぼす影響について考察する。最後に、理論解に基づき防波堤開口幅、港湾幅の変化に伴う共振時の波高増幅率および港湾の固有周期を求めた計算例を示し、長方形港湾の共振特性に関する若干の考察を行う。

2. 理論解^{注1)}

(1) 解 法

図-1 に示すような座標系をとり、湾口中心より鉛直上向きに z 軸をとる。計算にあたり次のような仮定を置く。

① 水の圧縮性は無視でき、流れはポテンシャル流として

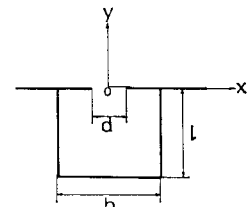


図-1 座標系および港湾モデルの記号の説明

* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部助教授

** 正会員 工修 鹿島建設(株)

注1) 一部第 23 回海岸工学講演会論文集(1976)に発表済。

取り扱うことができる。ただし、防波堤開口部でエネルギー損失が生ずる。② 水深は港湾内外を通じて一定である。③ 海岸線は直線状に左右無限遠方までのびており、入射波は海岸線に直角に進む微小振幅波である。④ 海岸線および港湾は鉛直壁面をもち、それらの境界線では完全反射が起こる。⑤ 開口幅は波長に比して小さい。⑥ 開口部は湾口の中央に位置している。

この場合、速度ポテンシャル ϕ は次式を満足する。

$$\partial^2 \phi / \partial x^2 + \partial^2 \phi / \partial y^2 + \partial^2 \phi / \partial z^2 = 0 \dots\dots\dots (1)$$

いま、速度ポテンシャル ϕ を、

$$\phi = (1/i\sigma) F(x, y) Z(z) e^{i\sigma t} \dots\dots\dots (2)$$
 と仮定すれば、 $F(x, y)$ および $Z(z)$ は次式を満足しなければならない。

$$\{1/F(x, y)\} \{\partial^2 F(x, y) / \partial x^2 + \partial^2 F(x, y) / \partial y^2\} + \{1/Z(z)\} \{d^2 Z(z) / dz^2\} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 T は周期、 $i = \sqrt{-1}$ である。

式 (3) における $Z(z)$ は底面での境界条件

$$\partial \phi / \partial z|_{z=-h} = 0$$

から簡単に求められ、

$$Z(z) = gH \cosh k(z+h) / \cosh kh \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここに、 H は入射波高、 g は重力加速度、 $k = 2\pi/L$ 、 L は波長である。

また、静水面からの水位変動 η は、

$$\eta = (1/g) \{\partial \phi / \partial t|_{z=0}\} = HF(x, y) e^{i\sigma t} \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。

水面での運動学的境界条件 $\partial \eta / \partial t = -\partial \phi / \partial z|_{z=0}$ から、次の関係を得る。

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \dots\dots\dots (6)$$

一方、波高分布関数 $F(x, y)$ は次式を満足しなければならない。

$$\partial^2 F / \partial x^2 + \partial^2 F / \partial y^2 + k^2 F = 0 \dots\dots\dots (7)$$

$F(x, y)$ に関する境界条件として、

$$\partial F / \partial n = 0 \dots\dots\dots (8.1)$$

$$F = \cos ky, \quad x^2 + y^2 \rightarrow \infty \dots\dots\dots (8.2)$$

が与えられる。ただし、 n は境界面への外向き法線方向を表わす。式 (8.1) は固定境界面で波が完全反射されることを示し、式 (8.2) は開口部から無限遠方で波高が完全重複波になることを意味している。

ここで、上述の境界条件のほかに港外および港内の二領域を接続するための開口部における境界条件を考える。

まず、その一つは港湾内外で水平流速が連続であるという条件で、次式で与えられる。

$$\partial F_1 / \partial y|_{y=0} = \partial F_2 / \partial y|_{y=0}, \quad |x| \leq d/2 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 d は防波堤開口幅である。添字 1 および 2 はそれぞれ港外および港内の波の特性を示す。

以上の境界条件は Ippen-Goda の方法とまったく同様

である。

もう一つの条件は開口部の水位の接続条件である。開口部において港湾内外の平均水位の差が開口部の流速の 2 乗に比例すると仮定する。すなわち、防波堤の存在によって開口部でエネルギー損失が生ずると考える。この場合、開口部の平均水位を $\bar{\eta}(x, 0)$ で表わすと次のように書ける。

$$\bar{\eta}_2(x, 0) - \bar{\eta}_1(x, 0) = (f/2g) \{v|_{y=0}\}, \quad |x| \leq d/2 \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 f は一種のエネルギー損失係数である。

上述したすべての境界条件を満足するように $F(x, y)$ を求めると、港湾内外の波の挙動が決定されることになる。

さて、港湾内の y 方向の流速は、

$$v = -\partial \phi_2 / \partial y = -(1/i\sigma) (\partial F_2 / \partial y) Z(z) e^{i\sigma t} \dots\dots\dots (11)$$

であり、開口部 ($y=0$) における流速は次式となる。

$$v|_{y=0} = -(1/i\sigma) Z(z) e^{i\sigma t} (\partial F_2 / \partial y)|_{y=0} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $Z(z)$ は式 (4) で与えられるが、湾水振動を議論する場合、波は長波として取り扱うことになるので、簡単に

$$Z(z) = gH \dots\dots\dots (13)$$

となる。開口部の流速は当然 x 軸方向にも変化するはずであるが、仮定 ⑤ によって幅員方向には一様であるとすれば、式 (12) における $\partial F_2 / \partial y|_{y=0}$ は次のように置くことができる。

$$\partial F_2 / \partial y|_{y=0} = kce^{i\omega} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 c および ω は、それぞれ流速の大きさを示す未知数および開口部振動流と港外完全重複波との間の位相差である。

式 (13)、(14) を式 (12) に代入すれば次式が得られる。

$$v|_{y=0} = -(gH/i\sigma) kce^{i(\sigma t + \omega)} \dots\dots\dots (15)$$

開口部において、港湾内外の平均水位 $\bar{\eta}_1(x, 0)$ および $\bar{\eta}_2(x, 0)$ は Ippen-Goda の理論と同一の式で示すことができ、それぞれ次のようになる。

$$\bar{\eta}_1(x, 0) = He^{i\sigma t} + cHe^{i(\sigma t + \omega)} [i\psi_1 - \psi_2] \dots\dots\dots (16)$$

$$\bar{\eta}_2(x, 0) = -(cdH/b) e^{i(\sigma t + \omega)} [\cot kl - S_1] \dots\dots\dots (17)$$

ただし、 ψ_1 、 ψ_2 および S_1 は次式で示される。

$$\psi_1 = \frac{kd}{\pi} \int_0^{kd/2} \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2 \sqrt{(kd/2)^2 - \alpha^2}} d\alpha \dots\dots\dots (18.1)$$

$$\psi_2 = \frac{kd}{\pi} \int_{kd/2}^{\infty} \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2 \sqrt{\alpha^2 - (kd/2)^2}} d\alpha \dots\dots\dots (18.2)$$

$$S_1 = 8(b/\pi d) \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin^2(n\pi d/2b) \cos^2(n\pi/2)}{n^2 \beta_n \tanh \beta_n kl} \right] \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 β_n は次式で表わされる。

$$\beta_n = \sqrt{(n\pi/kb)^2 - 1}, \quad n\pi \geq kb \dots\dots\dots (20.1)$$

$$\beta_n = i\beta_n' = i\sqrt{1 - (n\pi/kb)^2}, \quad n\pi < kb \dots\dots\dots (20.2)$$

式 (15), (16) および式 (17) を式 (10) に代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} & -(cdH/b) \{ \cot kl - S_1 \} \cos(\sigma t + \omega) \\ & - H \cos \sigma t + cH\psi_2 \cos(\sigma t + \omega) \\ & + cH\psi_1 \sin(\sigma t + \omega) \\ & = (f/2g) \{ -(gH/\sigma) kc \sin(\sigma t + \omega) \} \\ & \times | -(gH/\sigma) kc \sin(\sigma t + \omega) | \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

上式は非線形であるから高次の調和解が得られるが、基本調和解に比べ高次の調和解はその振幅が小さいと考えられるので⁹⁾、2次以上の項を無視すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} & -(cd/b) \{ \cot kl - S_1 \} \cos(\sigma t + \omega) \\ & - \cos \sigma t + c\psi_2 \cos(\sigma t + \omega) \\ & + c\psi_1 \sin(\sigma t + \omega) \\ & = -(fgk^2H/2\sigma^2) c|c| \{ (8/3\pi) \sin(\sigma t + \omega) \} \\ & \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

式 (22) が任意の時刻 t について成立することを考慮して、

$$\begin{aligned} & [-(cd/b) \{ \cot kl - S_1 \} + c\psi_2] \cos \omega \\ & + [c\psi_1 + (4fgk^2H/3\pi\sigma^2) c|c|] \sin \omega = 1 \\ & \dots\dots\dots (23.1) \end{aligned}$$

$$S(x, y) = \frac{4b \sin kl}{\pi d} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin(n\pi d/2b) \cos(n\pi/2) \cos\{(n\pi/b)(x-b/2)\} \cosh \beta_n k (y+l)}{n\beta_n \sinh \beta_n kl} \right] \dots\dots\dots (29)$$

である。

いま、波高増幅率を入射波高の2倍に対する港内の波高と定義すると、湾奥中央における波高増幅率 $R(0, -l)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} R(0, -l) &= \frac{2|\eta_2(0, -l)|}{2H} = \left| \left(\frac{d}{b} \right) \frac{1 - S(0, -l)}{\sin kl} c \right| \\ &= \left| \left(\frac{d}{b} \right) \frac{(1 - S_2)}{\sin kl} c \right| \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

ただし、

$$S_2 = \frac{4b}{\pi d} \sin kl \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(n\pi d/2b) \cos^2(n\pi/2)}{n\beta_n \sinh \beta_n kl} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

である。

なお、 $R(0, -l)$ の計算にあたり、式 (26) の c に関する解が必要であるが、 c の解は Ferrari の方法¹⁰⁾ を用いると容易に計算できる。また、未知数 ω の解は式 (23) から求められる。

この解析法によれば、エネルギー損失係数 f 、入射波高 H および港内水深 h を含んだパラメーター λ に応じて応答振動特性が求められる。

以上は港内の波の特性について述べてきたが、外海の

$$\begin{aligned} & [-(cd/b) \{ \cot kl - S_1 \} + c\psi_2] \sin \omega \\ & - [c\psi_1 + (4fgk^2H/3\pi\sigma^2) c|c|] \cos \omega = 0 \\ & \dots\dots\dots (23.2) \end{aligned}$$

を得る。

上式を整理すると、未知数 c に関する4次方程式が次のように求められる。

$$\begin{aligned} & (4fgk^2H/3\pi\sigma^2) c^4 + (8fgk^2H\psi_1/3\pi\sigma^2) c^3 |c| \\ & + [\{ \psi_2 - (d/b) (\cot kl - S_1) \}^2 + \psi_1^2] c^2 - 1 \\ & = 0 \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

ところで、式 (6) は長波の場合

$$\sigma^2/k^2 = gh \dots\dots\dots (25)$$

の関係にあるので、上式を式 (24) に代入すると

$$\begin{aligned} & \lambda^2 c^4 + 2\lambda\psi_1 c^2 |c| + [\{ \psi_2 - (d/b) (\cot kl - S_1) \}^2 \\ & + \psi_1^2] c^2 - 1 = 0 \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

となる。ただし、

$$\lambda = 4fH/3\pi h \dots\dots\dots (27)$$

である。なお、 $f=0$ の場合、すなわち $\lambda=0$ の場合に対する式 (26) の c の解が Ippen-Goda の解と等しくなる。

港内の水位変動 η_2 は、Ippen-Goda の解析におけると同様の式で示され

$$\begin{aligned} \eta_2 &= -(cdH/b \sin kl) e^{i(\sigma t + \omega)} \\ & \cdot \{ \cos k(y+l) - S(x, y) \} \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

となる。ただし、

水位変動 η_1 は Ippen-Goda の解析から得られる式と同様の式で表現され、次式となることを付記しておく。

$$\eta_1 = H \cos ky \cdot e^{i\sigma t} + kcH [iI_1 - I_2] e^{i(\sigma t + \omega)} \dots (32)$$

ただし、

$$I_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^k \frac{\sin(ud/2)}{u\sqrt{k^2 - u^2}} \cos ux \cdot e^{-i\sqrt{k^2 - u^2}y} du \dots\dots\dots (33.1)$$

$$I_2 = \frac{2}{\pi} \int_k^\infty \frac{\sin(ud/2)}{u\sqrt{u^2 - k^2}} \cos ux \cdot e^{-\sqrt{u^2 - k^2}y} du \dots\dots\dots (33.2)$$

である。

(2) Ünlüata-Mei の解

Ünlüata-Mei は、2.(1) で述べたと同様な一様水深の長方形港湾が半無限の外海に連なる場合について、著者らと同様の表示による波のエネルギー損失を考慮した湾水振動の解を求めている。著者らが散乱波の解を Fourier 変換法で求めているのに対し、Ünlüata-Mei はそれを点源法 (point source method) で求めている点に両者の違いがある。詳細は原論文^{6), 7)} にゆずり、2.(1) と同

様の座標系について港内の波高増幅率 $R(x, y)$ に関する結果のみを示すと次のとおりである。

$$R(x, y) = \frac{F_*(x, y)}{\sqrt{[G_{11}^R - J_1]^2 + [1/2 + \{2\delta|\mu|/(kd)\}]^2}} \quad \dots\dots\dots (34)$$

ただし、

$$F_*(x, y) = \frac{\cos k(y+l)}{kb \sin kl} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\cos\{K_{1n}(y+l)\} \cos\{(2n\pi/b)x\} \sin(n\pi d/b)}{(n\pi d/b) K_{1n} b \sin(K_{1n}l)} \right] \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$G_{11}^R = \frac{1}{kb} \cot kl + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left\{ \frac{\pi d \sin(n\pi d/b)}{nb} \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{1}{K_{1n}b} \cot(K_{1n}l) + \frac{1}{2n\pi} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$J_1 = -(1/\pi) \{ \ln(\gamma\pi kd^2/16b) + \ln 16 - 3 \} \quad \dots\dots\dots (37)$$

$$\delta = fH/3\pi h \quad \dots\dots\dots (38)$$

で、 μ は次式の解として与えられる。

$$\delta^2|\mu|^4 + 2\delta\bar{P}_1^{(R)}|\mu|^3 + |\bar{P}_1^{(R)}|^2|\mu|^2 - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (39)$$

ただし、

$$\bar{P}_1 = -(1/2)ikdD_1(k) \quad \dots\dots\dots (40)$$

で、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $\bar{P}_1^{(R)}$ は \bar{P}_1 の実部である。なお、 $D_1(k)$ は次式で示される。

$$D_1(k) = i/2 + G_{11}^R - J_1 \quad \dots\dots\dots (41)$$

式 (35)~(38) において、 H は入射波高、 h は水深、 f は式 (10) と同様に表示したときのエネルギー損失係数であり、 $\gamma = 0.5772$ (Euler 定数) である。さらに、 K_{1n} は次式で与えられる。

$$K_{1n} = \sqrt{k^2 - (2n\pi/b)^2} \quad \dots\dots\dots (42)$$

以上の諸式を用いて、湾奥中央における波高増幅率 $R(0, -l)$ を求めるには、式 (34) の分子の $F_*(x, y)$ を $F_*(0, -l)$ として計算すればよい。

3. 湾口部のエネルギー損失に関する考察

2. で用いた港湾内外二領域の接続条件式 (10) という仮定はこの種の問題でよく用いられる手法であり、その妥当性については多くの研究者によって種々の検討が行われている。すなわち、式 (10) を

$$v = C' \sqrt{2g|4\eta|} \quad \dots\dots\dots (43)$$

と表現し、流速係数 $C' (= 1/\sqrt{f})$ を論じて湾水振動の問題にエネルギー損失という要素を導入し、防波堤の効果を評価しようとするものである。

式 (43) は本来定常流について与えられた経験公式であり、波動のような非定常現象に適用するには十分な吟味が必要である。宇野木・磯崎¹³⁾によれば、高潮が湾内に侵入する場合のように、波動が準定常と考えられるときには、式 (43) を用いた解析でも十分現象が説明でき

るようで、その場合、 $C' = 0.7 \sim 0.8$ 程度とすればよいと述べている。しかし、湾水振動を取り扱うにあたり、開口部の流れの様相を一概に準定常とみなすことには多くの場合疑問が残る。堀川ら^{12), 13)}は、湾水振動の問題に式 (43) を用いる際に生ずる問題点を指摘しており、特に開口部の両側で明確な水位差が生じているわけではないので、 v と 4η との関係を直接実験的に求めることは困難であることを強調している。一方、岩崎ら¹⁴⁾は、防波堤内外の水位変動の差 4η および開口部の流速 v を直接同時に測定して、 4η の最大値に対する C' の値を求めるという方法をとっている。岩崎らの方法の問題点としては、防波堤内外の水位測定点をどこにとるかによって 4η が変わり、それに伴って C' の値が変化すること、さらに v と 4η との間に位相差があり、どの位相で v と 4η とを対応づけるかによって C' の値が変化することなどが考えられる。

v と 4η との間に位相差があれば非定常な波動に對し、 v が 0 となる瞬間では C' は 0 でなければならないことになり、厳密には式 (43)、したがって式 (10) も使用できないことになる。しかしながら、伊藤・木原¹⁵⁾は、大船渡湾での十勝沖地震津波の実測波形と式 (10) を用いて数値計算より求めた計算波形とを比較して、 $f = 1.5 (C' = 0.82)$ とすれば両者が比較的良好に一致することを示している。このことから、式 (10) すなわち式 (43) という経験公式が港湾の水位変化を論ずるような場合の開口部における便宜上のモデルとして有効であると考えられる。

いずれにしても、開口部におけるエネルギー損失が湾水振動の共振特性に大きく影響を及ぼすことは周知の事実であり、開口部の波動現象の明確な把握とそれをモデル化することは今後の研究の重要な課題であるといえよう。

ここでは、長方形港湾の開口部で発生する渦の挙動に注目してエネルギー損失に関する考察を行う。開口部でのエネルギー損失は渦や乱れによるもので、渦の大きさやその動きを測定してエネルギー損失量を求めるといった方法¹⁶⁾も考えられるが、渦の速度分布を求めることは容易でなく厳密に渦の大きさを決定するわけにはいかない。そこで、渦自体を測定しないで防波堤突端で発生する渦による縮流を観測し、縮流係数を求めることにした。この方法では渦や乱れによるエネルギー損失量を直接求めたことにはならないが、渦が大きくなると縮流係数は小さくなり、開口部におけるエネルギー損失の定性的な特性が把握できる。渦による縮流によって開口部の実質的な幅員が減ぜられ、こうした現象は湾水振動の共振特性にも当然大きく影響を及ぼすはずである。このようなことから、種々の開口幅について縮流係数の特性を

ここで検討する。

(1) 実験装置および実験方法

実験には徳島大学工学部土木工学教室屋外の平面造波水槽を用いた。水槽の長さは 30 m, 幅は 15 m, 深さは 60 cm である。水槽の一端にフラップ型造波機が設置されており, 水槽中心線上, 造波板から 20 m の位置に湾口をもつアクリル製長方形港湾模型を設置した。周期 T および水深 h は全実験を通して一定で, それぞれ 1.94 sec および 15 cm である。用いた模型の港湾幅 b は 20 cm ($b/L=0.087$) および 50 cm ($b/L=0.22$) の 2 種類, 開口幅 d はそれぞれの港湾幅に対して $d/b=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ および 1.0 なる 5 種類とした。このような長方形港湾について, あらかじめ湾水が共振状態となるように湾長を設定し, 共振時についてのみ以下のような手法で防波堤開口部で発生する渦に伴う縮流の様相を観測した。共振時についてのみ実験を行った理由は, 後に示す応答振動曲線(図-6)をみてもわかるように, 応答振動に及ぼすエネルギー損失の影響は共振時に特に重要となるためである。

開口部で生ずる渦の可視化にあたりアルミ粉を用いた。アルミ粉を使用する際に, あらかじめ少量の石けん水をアルミ粉に混ぜて, それを開口部に散布すると渦の様相をかなり鮮明に可視化できる。さらに, 写真撮影による影像を鮮明にするために開口部の底面に厚さ 0.5 mm, 広さ 1 m × 1 m の黒色ペークライト板を敷いた。

開口部の渦の撮影は, 35 mm 連動カメラ(ニコン F2, Photomic, MD-2, MF-1) により 1 秒間に 3.5 コマの速度で行われた。

ついで, 防波堤開口部を通過する流れの最小幅を調べるために, ネガフィルムの画像をそのままスライド映写機によって拡大し, 各コマごとに最小幅 d' を読み取った。写真-1 は港内に生ずる渦による縮流の様相を例示したもので, フィルム解析時の状況を再現する意図で明暗が反転させてある。得られた最小幅 d' と防波堤開口



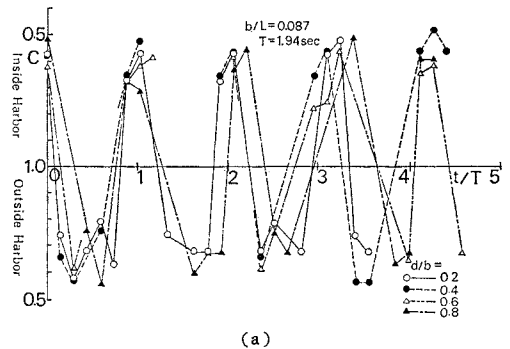
写真-1 港内の縮流状況

幅 d との比 d'/d を縮流係数 C と定義する。

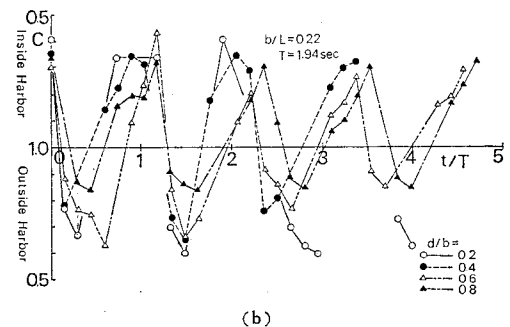
(2) 実験結果

図-2 は, 種々の開口比 d/b に対する縮流係数 C の時間変化を示したもので, 図-2 (a) は港湾幅が比較的狭い場合 ($b/L=0.087$), 図-2 (b) はそれが比較的広い場合 ($b/L=0.22$) である。縦軸の表示法は変則的であるが, 縮流が生じない $C=1$ を基準点にとり, 港内で縮流が発生した場合をそれより上側に, 港外での場合を下側に点描することにした。横軸は時間 t を周期 T で無次元化して表わし, 港内側に向う流れの縮流幅が極小となる時刻を $t/T=0$ とした。なお, 開口比 d/b によって共振時の湾長および湾奥の波高はそれぞれ異なっている。これらの図から, 縮流係数は周期的に変化し, みかけ上開口部の幅員は大きく減ぜられることがわかる。また, 図中には時々刻々の縮流幅の読み取りができなくて観測値間を結んでいないところもあるが, これは流れが逆転するとき激しく乱れることによるものである。なお, 防波堤がない場合 ($d/b=1.0$) については, 湾口部に散布されたアルミ粉が港外へ流出するとき激しく散乱してしまい, 縮流幅が極小となる時刻で読み取りがほとんどできなかったため, ここには記されていない。

図-3 は, 縮流の特性を詳細に調べるために各開口比について図-2 に示した港内側および港外側での C の極小値を取り出したもので, ○ 印および ● 印はそれぞれ港湾幅が比較的狭い場合 ($b/L=0.087$) およびそれが比



(a)



(b)

図-2 縮流係数 C の時間特性

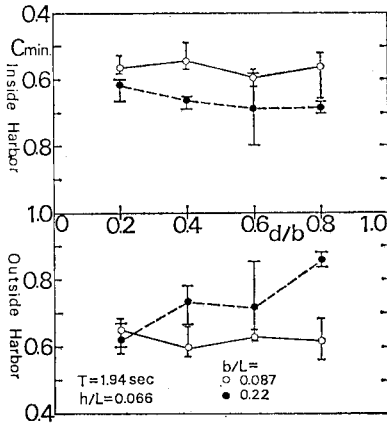


図-3 C_{min} と d/b との関係

較的広い場合 ($b/L=0.22$) に対する値を示している。まず、 $b/L=0.087$ の場合をみると、開口幅の変化によって C_{min} の変化はほとんどない。この場合、縮流による幅員の減少の程度は大きく、港内側で開口幅の 55% 程度に、港外側でもそれが 60% 程度にまで減ずる。もちろんみかけ上の縮流が直接現実の防波堤による幅員の減少というわけではないが、こうした縮流によってかなり実質的な幅員が減少すると考えられる。一方、 $b/L=0.22$ の場合、開口幅が大きくなるにつれて縮流による幅員の減少の程度も小さくなる。この場合には、開口比 d/b が大きくなるに伴い、渦は防波堤突端のごく近傍のみに発生し、その渦は湾奥部まで到達しないことが観測されている。

次に、図-2 に示した縮流係数の時間変化を一周期にわたり積分し、その平均値が開口比によってどのように変化するかを示したものが図-4 である。港湾幅および開口比が減ずるにつれて縮流係数は小さくなる。特に、 $d/b=0.2$ の場合についてみると、 $b/L=0.087$ では開口幅の 70% 程度に、 $b/L=0.22$ では 80% 程度まで幅員が減ぜられる。こうした現象は、港湾幅が狭く、開口幅が小さくなるに伴い開口部での波のエネルギー損失が大きくなるという結果⁹⁾と対応しており、縮流係数とエネルギー損失とが関係づけられよう。しかしながら、縮流係数 C_{mean} がこの実験の範囲内で 0.7~0.8 であって宇野木らが妥当であるとした流速係数 $C'(=1/\sqrt{f})$ が同程度の値をとるとしても、このことからただちにエネ

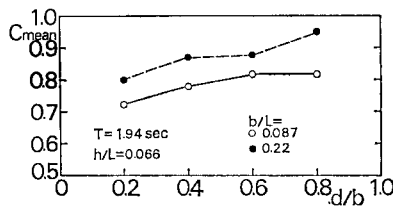


図-4 C_{mean} と d/b との関係

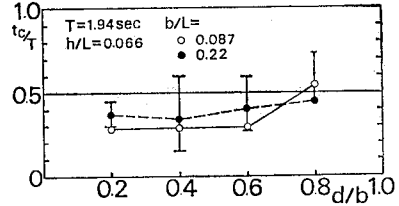


図-5 t_c/T と d/b との関係

ルギー損失係数 f を評価できるわけではない。

引き続き、一周期間の渦による縮流の時間変化を詳細に調べるために、各開口比について C の時間波形のひずみを示したものが図-5 である。港内側で縮流係数が極小となる時刻から、ついで港外側でそれが極小値をとるまでの時間を t_c と定義する。したがって、もし C の時間波形が対称でひずみがなければ t_c/T は 0.5 となるはずである。図によれば、 $b/L=0.087$ であつ $d/b=0.8$ 以外では t_c/T の値は 0.5 以下で、ことに港湾幅が狭い方がこのような傾向が顕著となる。すなわち、流れが港内へ向うときには緩やかに渦を大きく成長させつつ侵入し、流れが港外へ向うときには速やかに湾水を放出する。特に、港湾幅が狭くなると噴流のような状態で湾水を放出することが観測でみうけられた。 $b/L=0.087$ であつ $d/b=0.8$ の場合、 t_c/T がほぼ 0.5 となり波形が対称となっているがこの原因については不明である。

4. 理論解の検討および共振特性

3. で求めた縮流係数 C からエネルギー損失係数 f を評価しようとする試みも考えられるが¹⁰⁾、非定常な波動に適用するにはやはり問題があると思われる。ここでは、2. で示した理論解の実験的な検証を行い、エネルギー損失係数 f を種々の値にとって計算した結果と実験結果を比較することによって f のとるべき値を検討するとともに、あわせて湾水の共振特性を考察する。

(1) 実験方法

実験装置は、3. で述べたものと同じである。湾水振動の実験を行う場合、港湾の寸法を固定して周期を変えらるいわゆる周期応答特性を調べるのが現実的であるが、ここでは造波機の発生可能な最大周期が 1.94 sec という制約があることおよび解の検証を主たる目的とすることから、周期を一定にして湾長を変化させるいわゆる形状応答特性を調べた。本理論によれば、港内水深および入射波高の変化が共振特性に及ぼす影響もある程度考察できるので、水深および入射波高を変えながら実験を行った。波高は容量式波高計によって測定し、ペン書きオシログラフに記録した波形の山と谷の高低差を読

表-1 実験諸元

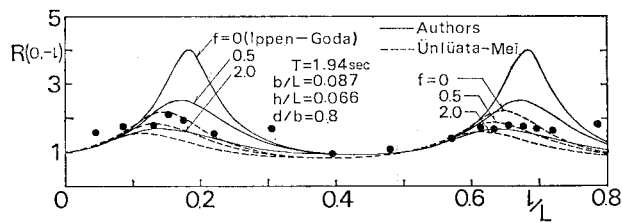
Run No.	b (cm)	d (cm)	T (sec)	b/L	h/L	H/L
1	50	5~50	1.94	0.22	0.066	0.0096
2	20	2~20	1.94	0.087	0.066	0.0096
3-1	50	10, 50	1.94	0.19	0.078	0.0043
2	20	4, 20	1.94	0.075	0.078	0.0043
4-1	50	10, 50	1.94	0.2	0.072	0.0045
2	20	4, 20	1.94	0.08	0.072	0.0045
5-1	50	10, 50	1.94	0.22	0.066	0.005
2	20	4, 20	1.94	0.087	0.066	0.005
6-1	50	10, 50	1.94	0.24	0.058	0.005
2	20	4, 20	1.94	0.097	0.058	0.005
7-1	50	10	1.94	0.22	0.066	0.0022~0.0087
2	50	50	1.94	0.22	0.066	0.0020~0.0087
8-1	20	4	1.94	0.087	0.066	0.0022~0.0087
2	20	20	1.94	0.087	0.066	0.0022~0.0087

み取ってその点の波高とした。

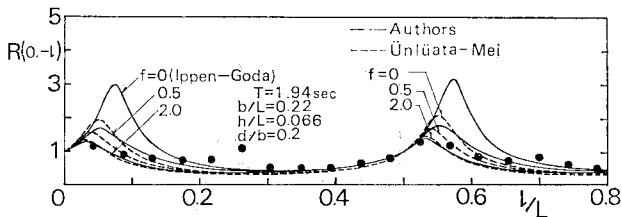
表-1 に、この実験に用いた実験諸元が示されている。

(2) 湾奥における応答振動特性

図-6 は、湾奥における波高増幅率 $R(0, -l)$ と湾長・波長比 l/L との関係を示したものの一例で、実線は著者らによる式 (30)、破線は Ünlüata-Mei による式 (34) に対応し、●印が実験値を表わしている。図から、エネルギー損失を考慮すれば共振点の近傍で急激に増幅率が低減し、 f の増幅率に及ぼす影響は特に共振点付近で顕著となることがわかる。しかし、共振点から離れるにつれて f の増幅率に及ぼす効果は急激に減少するようである。実験値と計算結果を比較すると、明らかに f は 0 ではなくて、ある値をもっており、エネルギー損失を無視した理論 ($f=0$) では現象を説明しえないことがわ

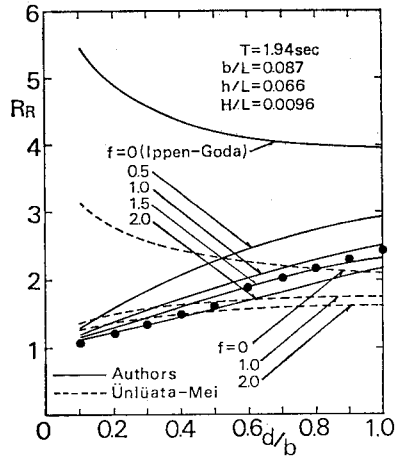


(a)

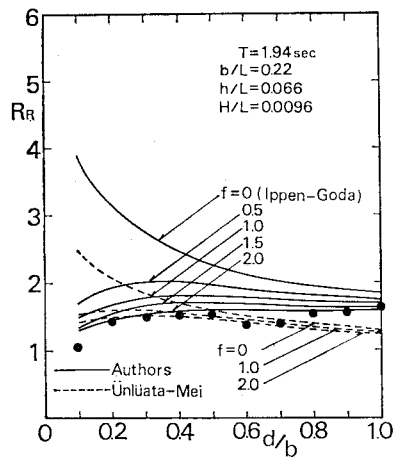


(b)

図-6 $R(0, -l)$ と l/L との関係



(a)



(b)

図-7 R_R と d/b との関係

かる。

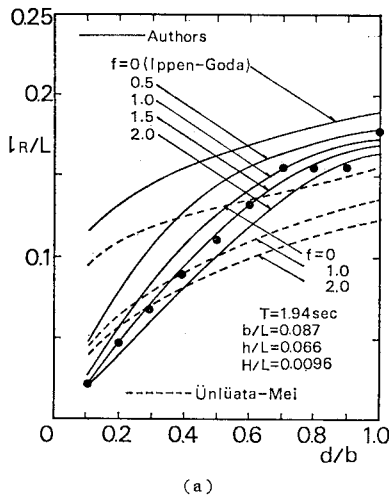
ここでは形状応答を考えているので基本モードと高次のモードに対する増幅率の値は等しく、応答振動曲線は l/L 軸方向に周期的な形状となるので、基本モードのみを論ずることにする。なお、以下においては添字 R によって共振時の諸量を表示する。

(3) 防波堤の影響

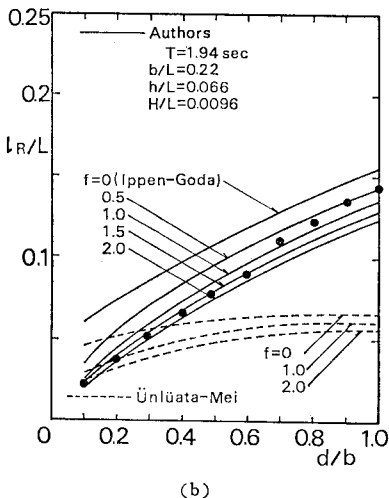
図-7 は、共振時の波高増幅率 R_R と開口比 d/b との関係を示すものであるが、 $f \neq 0$ の場合、図-7 (a) で示した港湾幅が比較的狭いとき ($b/L=0.087$) には harbor paradox¹⁸⁾ が成立せず、開口幅が小さくなるに伴って R_R が減少する。一方、港湾幅が比較的広く ($b/L=0.22$) になると、その paradox の可能性もうかがえる。ただし、その場合でも開口幅を小さくしたために

R_R が急激に増大するということはありえないようである。著者らの解析結果と Ünlüata-Mei のそれを比較すると、概して後者の方が小さな R_R の値を与えるようである。また実験値は、 $b/L=0.087$ の場合、 $f=1\sim 2$ の範囲で著者らの解析結果とほぼ合うといえよう。 $b/L=0.22$ の場合、 f が2かあるいは若干それよりも大きい値になるが、 f の増大が R_R に及ぼす影響は港湾幅が狭い場合に比べて小さいようである。したがって、港湾幅が広がると工学的には f の値が相対的に重要でなくなる。Ünlüata-Mei の解析結果では一概に f の値を決めがたい。

図-8 は、開口幅の変化に伴う共振湾長 l_R の変化を調べたもので、開口幅が小さく、 f が大きくなるほど l_R/L の値は小さくなり港湾幅が狭いほど d/b に対する l_R/L の変化が顕著となる。実験値にもばらつきがあるものの Ünlüata-Mei の理論では、前に述べたと同様実験値を適切に表現し得ないようである。一方、著者らの



(a)



(b)

図-8 l_R/L と d/b との関係

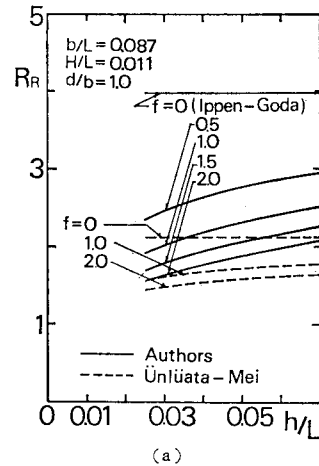
解析結果によれば、 $b/L=0.087$ の場合で f はほぼ 1.5、 $b/L=0.22$ の場合で f は 0.5~2 程度となる。

以上の考察結果から、 b/L が小さいときに f が大きな値をとるといことは必ずしも結論できない。しかしながら、 b/L が大きくなれば f の共振特性に及ぼす影響は小さくなり、工学的には f を 1~2 とするのが妥当なように思われる。

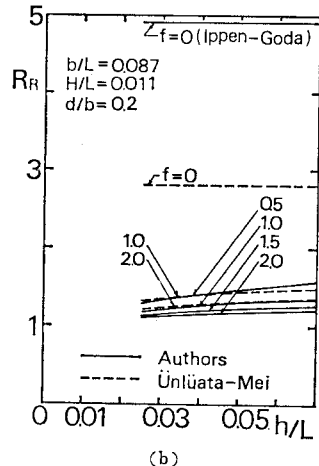
(4) 港内水深の影響

図-9 は、波形勾配 H/L および b/L が等しく、開口幅が異なる二つの場合に、水深の相違によって増幅率 R_R がどのように変化するか、また同時に水深の相違、防波堤の有無によって f の効果がどのように変化するかを表わしたものである。

$f \approx 0$ の場合、 h/L が大きくなれば R_R も増大するが、 $0.5 < f \leq 2$ の範囲では h/L の R_R に及ぼす影響は $d/b=1.0$ の場合より $d/b=0.2$ の場合の方が小さい。

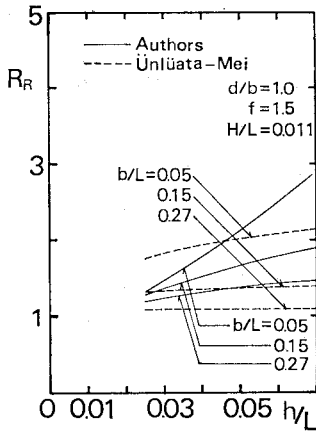


(a)

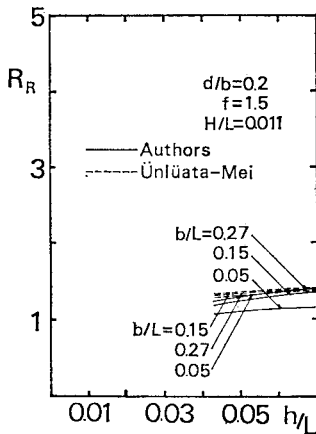


(b)

図-9 R_R と h/L との関係 (f の影響)



(a)



(b)

図-10 R_R と h/L との関係 (b/L の影響)

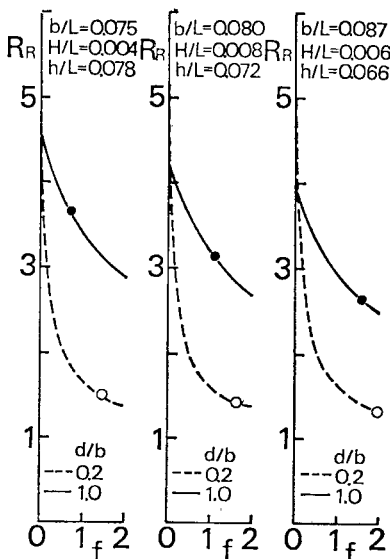


図-11 R_R と f との関係 (h/L の影響)

図-10 は、 H/L および f を一定にして R_R と h/L との関係を示したもので、 b/L がパラメーターにとられている。

$d/b=1.0$ の場合、 b/L が大きくなるほど R_R に及ぼす水深の影響は小さく、 $d/b=0.2$ では逆のことがいえる。もっとも、 d/b が小さい場合には R_R の値も小さい。したがって、水深の増加に伴う R_R の増大は港湾幅が比較的狭く、しかも開口部が十分開いた場合に生ずると解釈すればよいであろう。

図-11 は、水深を種々に変えた実験から得られた R_R の実験値が著者らの解析でどの程度の f の値をとるかについて調べたものの若干例で、 f はやはり 1~2 程度と考えてよいようである。

(5) 入射波高の影響

図-12 は、共振時の波高増幅率 R_R と入射波の波形勾配 H/L との関係を示したものである。まず港湾幅が比較的狭い図-12(a), (b) について著者らの解析結果をみると、防波堤がない場合 ($d/b=1.0$) には、 H/L の R_R に及ぼす影響は大きい、 $d/b=0.2$ の場合にはその影響は比較的小さい。一方、港湾幅が比較的広い図-12(c), (d) では逆の傾向がみられ、港湾幅の共振特性に及ぼす影響についてはさらに考察を加える必要がある。いずれにしても、 H/L が大きくなるに伴って R_R は低減し、入射波高を正確に制御しなければ共振特性を正しく評価することができないことがわかる。

(6) 港湾幅の影響

図-13 は、開口比 d/b を一定にした場合、港湾幅の変化が共振時の波高増幅率 R_R に及ぼす影響を調べたもので、理論解としては著者らによるもののみが示されている。防波堤がない場合 ($d/b=1.0$)、港湾幅が広がるほど R_R は低減するが、港湾幅がある程度以上に広がると f の値にかかわらず R_R の値はほとんど変化しない。一方、 $d/b=0.2$ の場合エネルギー損失がないとき ($f=0$) には、港湾幅が広がるほど R_R は低減するが、計算に用いた f の範囲では港湾幅が広がるほど $d/b=1.0$ の場合とは逆に R_R は増大する。

さらに港湾幅の影響を詳細にみるために、 f の値を 1.5 に固定し、 d/b をパラメーターとして R_R と b/L との関係を図-14 に示した。図から、 b/L が 0.2 程度以上とそれ以下では d/b に対する R_R の特性が大きく異なることがわかる。 b/L が 0.2 程度では、防波堤がない場合 ($d/b=1.0$) も開口幅を港湾幅の 30% に閉じた場合 ($d/b=0.3$) も R_R の値はほとんど変化しない。 b/L が 0.2 程度からさらに大きくなると harbor paradox が生ずるようになるが、 $d/b=0.2$ および 0.1 では

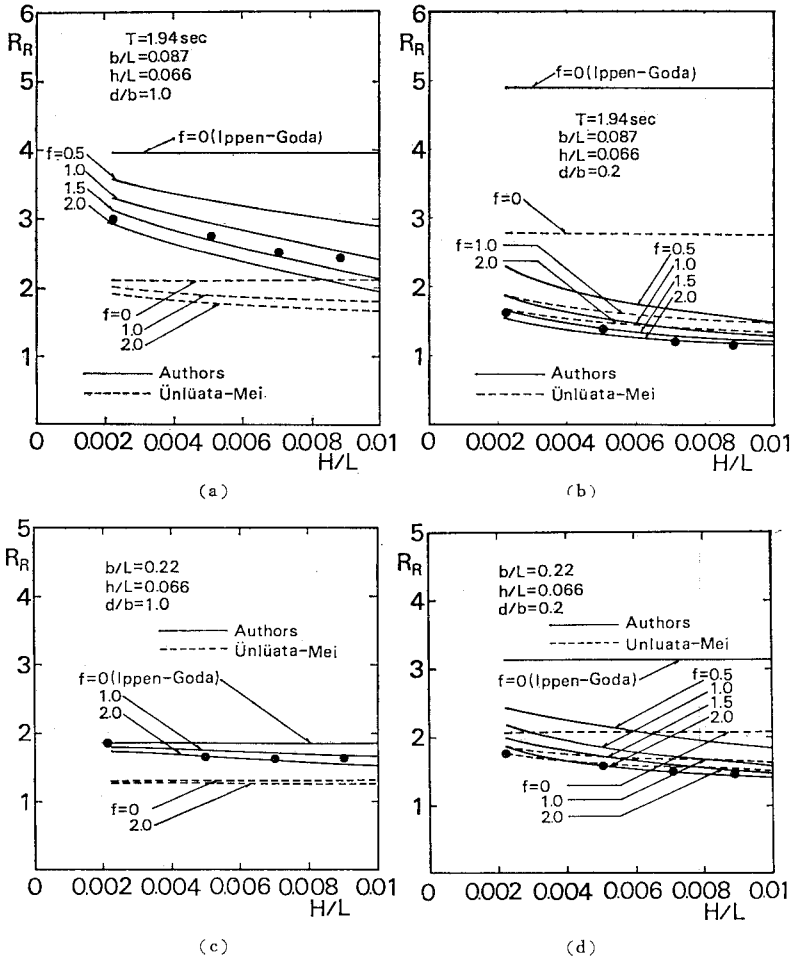


図-12 R_R と H/L との関係

b/L が大きくなるに伴いつねに R_R は増大する傾向がある。これは波高増幅を抑制するには、ある港湾幅に対して防波堤の効果を十分期待し得る開口比を見出す必要があり、また図-14 のような図を描くことによってそれが可能であることを示唆している。

5. 計算例

これまでの考察結果から、開口比 d/b にかかわらず伊藤らが示した $f=1.5$ という f の値は工学的にはほぼ妥当であると考えられよう。 f の値が決まり、繋港湾諸元が与えられると共振特性が求められる。これまで港湾の形状応答に関して述べてきたが、理論において f を 1~2 として求めた解析結果が実験結果とかなりよく一致するので、ここではより現実的な周期応答の計算例を示すことにする。

与えられた港湾諸元をもつ長方形港湾の共振特性を求めるには、式 (30) を計算すればよいが、そのためには

としてよいので式 (27) から明らかなように、結局 H/h によって共振特性が定まる。

Ippen-Goda は、すでに港湾幅・湾長比 b/l および開口比 d/b をパラメータにして共振時の

波高増幅率 R_R および共振相対湾長 $k_R l$ を求める図表を作成しているが、この場合は前に述べた H/h が共振特性に影響を及ぼさないので計算が比較的簡単である。

ここでは、 λ によって共振特性が変化するので、計算の一例をあげるにとどめ

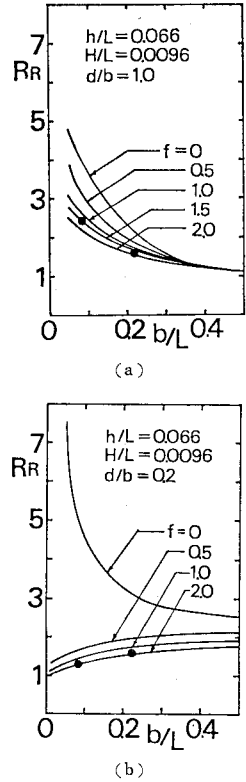


図-13 R_R と b/L との関係 (f の影響)

式 (26) の解である c を計算する必要がある。 c は式 (27) で示される λ の関数である。ここで、 f は 1.5 という値をとると

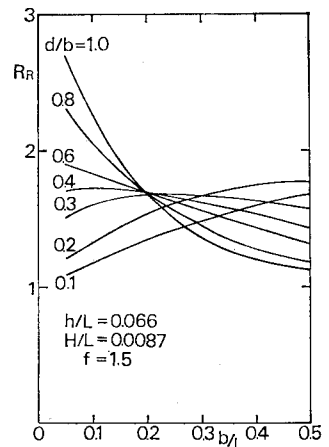
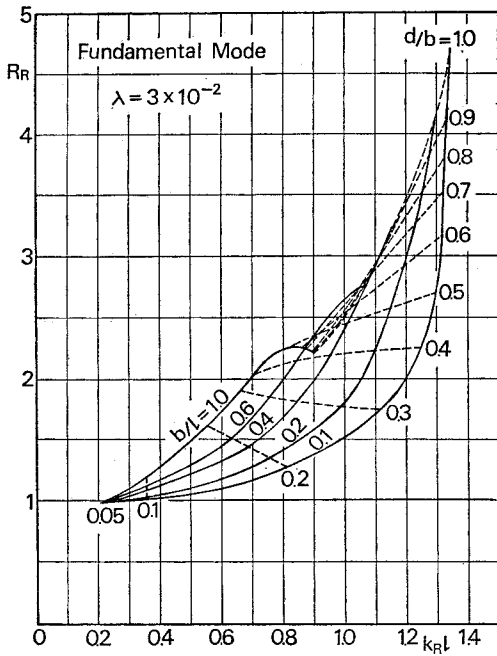
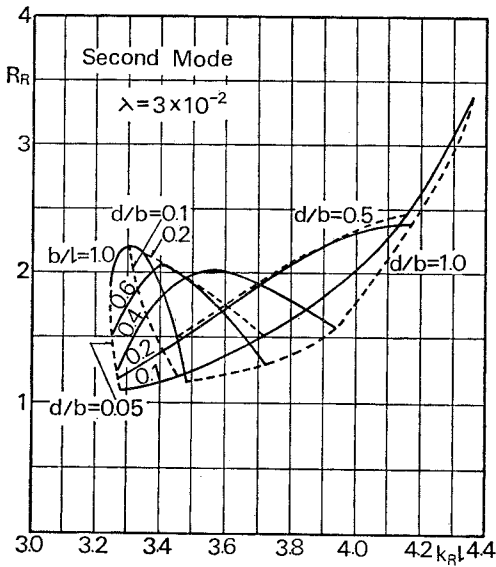


図-14 R_R と b/L との関係 (d/b の影響)



(a)



(b)

図-15 b/l および d/b の変化に伴う、 R_R と $k_R l$ との関係

る。図-15 は、 $\lambda=3 \times 10^{-2}$ の場合の共振特性を示したもので、Ippen-Goda の図におけると同様 b/l (実線) および d/b (破線) がパラメーターにとられている。たとえば、 $b/l=0.1$ なる細長い港湾で、防波堤がない場合 ($d/b=1.0$) には、基本モードにおける共振時の増幅率 R_R は 4.7 となる。入射波高の 9.4 倍にも増幅されるわけで、その場合の $k_R l$ は 1.35 となる。これから港

湾の固有周期を算定することができる。 $d/b=0.1$ と開口幅を小さくすると、 R_R は 1 程度となり入射波高の 2 倍、すなわち通常の重複波高程度に低減できる。一方、同じ港湾について 2 次モードを考えると、 $d/b=1.0$ で R_R は 3.4、 $d/b=0.1$ の場合で R_R は 1.2 となり、2 次モードについては防波堤開口幅を減少させるとわずかながら R_R は増大する。

次に、 $b/l=1.0$ と港湾幅が比較的広い港湾を考える。まず基本モードでは R_R が $d/b=1.0$ ではなく、 $d/b=0.5$ 程度のときに最大となり、 d/b がそれよりも小さくなるにつれて次第に R_R が低減する。一方、2 次モードでは $d/b=0.1$ 程度で R_R が最大となり、 d/b がその値以上あるいは以下になっても R_R は低減する。基本モードと 2 次モードの R_R の値を比較すると、 $d/b=1.0$ の場合それぞれ 2.2 および 1.15、 $d/b=0.1$ の場合それぞれ 1.2 および 2.2 となる。

ここでは示さなかったが、 λ が 10^{-3} 程度になると、基本モードでも、 R_R の値は必ずしも $d/b=1.0$ で最大とならず、上述のような極値が存在して d/b をある値以下にするとかえって R_R が増大する可能性があることは注意を要する。

6. 結 言

本研究は一様水深の長方形港湾が半無限の外海に接続している場合の湾水振動を理論的かつ実験的に取り扱ったものである。まず、湾口部におけるエネルギー損失を考慮した湾水振動理論が導かれ、入射波高 H 、水深 h およびエネルギー損失係数 f からなる λ に応じて共振特性は変化することが示された。ついで、共振特性に大きな影響を及ぼす湾口部でのエネルギー損失を実験的に調べるにあたり、防波堤開口部で生ずる渦による縮流を観測して、縮流係数の特性が考察された。その結果、縮流の特性についてはある程度把握し得たが、展開した理論に含まれるエネルギー損失係数 f と縮流係数との関係については明確にし得なかった。引き続き、理論解の妥当性を検証するため実験的に港湾の応答振動を求め、その結果と理論解析結果を比較して、エネルギー損失係数 f を評価するとともに、理論解に基づき湾水振動の制御に関して若干の考察が試みられた。

得られた主な結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 港湾幅および開口比 d/b が減ずるに伴い縮流係数は小さくなる。縮流係数は周期的に変化するが、港外よりも港内側でそれはより小さくなり、港湾幅が比較的狭い $b/L=0.087$ かつ開口比 $d/b=0.2$ の場合、最大約 55% 程度に実質的な幅員が減少する。またこの場合、一周期間の縮流係数の平均値は 0.7 程度になる。

(2) 理論解析結果と実験結果との比較から、エネルギー損失係数 f は $1 \sim 2$ とすればよく、伊藤らが示した $f=1.5$ という値は工学的には妥当な値であることがわかった。一方、Ünlüata-Mei の解では実験値と一致するような適当な f を与えることが困難であり、必ずしも現象を説明し得ない。

(3) 水深・波長比 h/L が大きくなるほど共振時の波高増幅率 R_R は増大する。また、水深の共振特性に及ぼす影響は、港湾幅が比較的狭く、しかも防波堤開口幅が十分大きい場合に顕著にあらわれる。

(4) 入射波高が大きくなるほど共振時の波高増幅率 R_R は低減する。したがって、模型実験においては入射波高を正確に制御しなければ、共振特性の評価を誤るおそれがある。

(5) 港湾幅の相違によって共振特性が著しく異なる可能性があり、防波堤開口幅を単純に小さくすると、共振時の波高増幅率 R_R が低減できるとはいえない。本理論によれば、ある港湾幅をもつ港湾に対し、湾奥の波高を最小にするための最適な開口幅を予測することができる。

最後に、本研究にあたりご助言を賜った京都大学工学部 岩垣雄一教授、徳島大学工学部 三井 宏教授、実験および資料整理にご助力をいただいた徳島大学大学院生 鈴木一光氏および三井不動産建設(元学部学生) 網内博之氏に深謝の意を表す。また、本研究は昭和 50 年度文部省科学研究費自然災害特別研究、昭和 51 年度試験研究(いずれも代表者岩垣雄一教授)による研究費の補助を受けて行われたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 岩垣雄一・村上仁士：防波堤開口部における波のエネルギー損失について、第 19 回海岸工学講演会論文集，pp. 221~225, 1972.
- 2) 岩垣雄一・村上仁士：共振時における港内波浪の諸特性について、第 20 回海岸工学講演会論文集，pp. 179~184, 1973.
- 3) 村上仁士：湾水振動における波のエネルギー逸散について、第 21 回海岸工学講演会論文集，pp. 97~101, 1974.
- 4) 村上仁士・越智 裕：防波堤による波のエネルギー逸散および湾水振動の制御について、第 22 回海岸工学講演会論文集，pp. 271~277, 1975.
- 5) 村上仁士：波のエネルギー逸散を考慮した湾水振動の一解法、土木学会論文報告集，No. 247，pp. 71~81, 1976.
- 6) Ünlüata, Ü. and C.C. Mei: Long wave excitation in harbors -an analytical study-, Tech. Rep. No. 171, Parson Lab., MIT, Oct., 1973.
- 7) Ünlüata, Ü. and C.C. Mei: Effects of entrance loss on harbor oscillations, Proc. ASCE, Vol. 101, WW 2, pp. 161~180, May, 1975.
- 8) Ippen, A.T. and Y. Goda: Wave induced oscillations in harbors; the solution for a rectangular harbor connected to the open sea, Rep. No. 59, Hydrodynamics Lab., MIT, July, 1953.
- 9) 梶浦欣二郎：湾水振動に及ぼす防波堤の効果，東京大学地震研究所彙報，第 41 号，pp. 403~418, 1963.
- 10) たとえば，淡中忠郎：代数学演習，朝倉書店，pp. 70~72, 1969.
- 11) 宇野木早苗・磯崎一郎：防波堤開口部の流速計算についての一考察，第 9 回海岸工学講演会講演集，pp. 7~11, 1962.
- 12) 堀川清司・西村仁嗣：津波防波堤の効果について，第 16 回海岸工学講演会講演集，pp. 365~369, 1969.
- 13) 堀川清司・首藤伸夫・西村仁嗣：津波防波堤の効果について(2)，第 17 回海岸工学講演会論文集，pp. 421~426, 1970.
- 14) 岩崎敏夫・楊 沢民・佐藤栄司・新井新一・板橋勝一郎：矩形湾の波高増幅率に関する研究，土木学会第 26 回年次学術講演会講演概要集，第 2 部，pp. 33~36, 1971.
- 15) 伊藤喜行・木原 力：長周期波に対する防波堤の効果に関する計算(第 6 報)(港口損失係数の影響)，運輸省港湾技術研究所報告，第 9 卷，第 2 号，pp. 3~22, 1970.
- 16) 日野幹雄・山崎丈夫：波による鉛直板よりの渦の形成とエネルギー逸散，第 18 回海岸工学講演会論文集，pp. 61~65, 1971.
- 17) Mei, C.C., P. L-F., Liu and A.T. Ippen: Quadratic loss and scattering of long waves, Proc. ASCE, Vol. 100, WW 3, pp. 217~238, Aug., 1974.
- 18) Miles, J. and W. Munk: Harbor paradox, Proc. ASCE, Vol. 87, WW 3, pp. 111~130, Aug., 1961.

(1977.4.18・受付)