

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

村上 仁士*・越 智 裕**

1. 緒 言

著者の一人は、1次元長方形港湾モデルにおける湾水振動問題を系統的に研究し^{1)~3)}、港湾モデルが与えられた場合、湾水振動の共振特性を規定するものは、流体振動系の damping factor であり、特に防波堤開口部から湾外へ逸散する波のエネルギーが内部粘性や境界摩擦に比べて重要であることを指摘した⁴⁾。しかし、それは防波堤開口部で生ずる渦や乱れによる波のエネルギー逸散量を直接求めたものではないので、どうしても外海から港湾内に波が侵入する場合および港湾内から外海へ波が放射する場合に、開口部で逸散される波のエネルギー量を明らかにしなければならない。

従来、外海から港湾内に波が侵入する場合の防波堤開口部における波のエネルギー逸散に関する研究は、主として開口部の流量係数をどのように評価するかに着目したものであり、津波、高潮のような長周期で開口部における波動がほぼ定常と仮定してもよい場合には、波のエネルギー逸散を流量係数で表現するのも有効な方法であるかもしれない。しかしながら、開口部の波の挙動は、厳密には非定常であって、定常流近似の流量係数で示すことには問題がある。さらに、流量係数として種々の値が得られているが^{5),6)}、この原因は外海条件、港湾幅などの相違によるものであって、それらの系統的な研究が必要であることを物語っている。その他、開口部における波のエネルギー逸散を、損失水頭で表示する方法も考えられているが^{7),8)}、損失係数自体の検討が詳細に行われなければならないように思われる。また、著者の一人は、開口部における波のエネルギー逸散量を反射率および透過率から間接的に求める方法によって、実験的な検討を行っているが²⁾、実験数が少なく、しかも実験精度においても若干の問題があり、波のエネルギー逸散量を過大に評価したようである。

一方、港湾内から外海へ波が放射する場合の防波堤開口部における波のエネルギー逸散は、前述した場合以上に大きくなると考えられ、それを明らかにすることは湾

水振動を議論するうえに特に重要であろう。このような立場から、波のエネルギー逸散を考慮した理論解をすでに発表した⁹⁾、解析には多くの仮定を含んでおり、必ずしも実際現象を十分説明しうるものではなかった。

本研究は、港湾内外の水深が等しいという状態で、まず、外海から港湾内に波が侵入する場合のように、断面が急縮するときの波のエネルギー逸散量と、港湾内から外海へ波が進行する場合のように断面が急拡するときの開口部での波のエネルギー逸散量を定量的に求める。さらに、以上の波のエネルギー逸散量を考慮して確立した湾水振動理論をもとに、湾水振動の制御について若干の考察を行う。

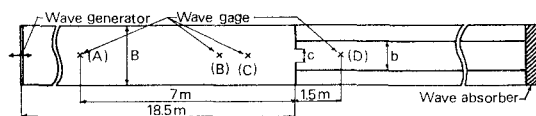
2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

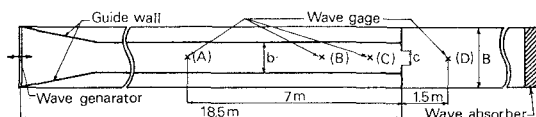
実験は、長さ 30m、幅 1m、深さ 90cm の片面ガラス張り 2次元造波水槽中に、図-1 に示すようなアクリル製の急縮および急拡水路を設置して、水路幅 b および開口幅 c を種々変化させて行った。波高の測定は電気抵抗線式波高計によったが、入射波検定用 (A)、反射率測定用 (B)、(C)、透過波測定用 (D) の計 4 本を用いた。なお、表-1 は、この実験に用いた実験諸元を示したものである。

(2) 実験方法

入射波高および反射波高は Healy の方法によって求め、合田ら¹⁰⁾が提案している方法で、それらを補正した。特に、入射波高については、反射率および透過率の値に



(1) 急縮断面



(2) 急拡断面

図-1 実験装置

* 正会員 工修 徳島大学講師 工業短期大学部土木工学教室
** 正会員 工修 徳島大学助手 工学部土木工学教室

表-1 実験諸元

(1) 急縮断面

Run No	B (cm)	b (cm)	c (cm)	T (sec)	h (cm)	H _I * (mm)	b/B	c/b	H _I /L
1-1	100	10	2	2	15	11.5	0.1	0.2	0.0049
2			4						
3			6						
4			8						
5			10						
2-1	100	20	4	2	15	11.5	0.2	0.2	0.0049
2			8						
3			12						
4			16						
5			20						
3-1	100	30	6	2	15	11.5	0.3	0.2	0.0049
2			12						
3			18						
4			24						
5			30						
4-1	100	50	10	2	15	11.5	0.5	0.2	0.0049
2			20						
3			30						
4			40						
5			50						
5-1	100	70	14	2	15	11.5	0.7	0.2	0.0049
2			28						
3			42						
4			56						
5			70						
6-1	100	100	20	2	15	11.5	1.0	0.2	0.0049
2			40						
3			60						
4			80						
5			100						

(2) 急拡断面

Run No	b (cm)	B (cm)	c (cm)	T (sec)	h (cm)	H _I * (mm)	b/B	c/b	H _I /L
1-1	10	100	2	2	15	22.6	0.1	0.2	0.0096
2			4						
3			6						
4			8						
5			10						
2-1	20	100	4	2	15	20.9	0.2	0.2	0.0089
2			8						
3			12						
4			16						
5			20						
3-1	30	100	6	2	15	18.1	0.3	0.2	0.0077
2			12						
3			18						
4			24						
5			30						
4-1	50	100	10	2	15	14.6	0.5	0.2	0.0062
2			20						
3			30						
4			40						
5			50						
5-1	70	100	14	2	15	13.5	0.7	0.2	0.0057
2			28						
3			42						
4			56						
5			70						

* H_I: incident wave height

大きな影響を与えるので、図-1に示したように(A)点でも波高を測定し、Healyの方法で求めた入射波高との誤差を最小限にするように努めた。透過波高については、水槽末端からの反射が入らない最初の数波をもって透過波高とした。

断面が急縮する場合については、すべての実験を通じて入射波高は一定であるが、断面が急拡する場合は、図

一(2)に示したように、造波板近くから導波壁をつけ、しかも造波板の振幅を一定にしているため、それぞれの港湾幅において入射波高が多少異なっている。しかし、著者の一人¹¹⁾は、断面が急縮する場合について、波形こう配 H/L が 0.002~0.014 の範囲での実験を行い、反射率および透過率の波形こう配による影響はほとんどないことを確認しており、断面が急拡する場合であっても入射波高そのものが小さいので、入射波高の相違による反射および透過特性は、本実験の範囲内ではほとんど変化しないものと思われる。

3. 断面急縮部における波のエネルギー逸散

図-2で、水槽IからIIへ波が進行するような、断面が急縮する場合の波のエネルギー保存則は、防波堤開口部における逸散エネルギーを P₁ とすると、次式で示される。

$$BW_I = BW_R + bW_T + P_1 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、

$$W = nCE \dots\dots\dots(2)$$

$$\left. \begin{aligned} n &= (1/2)(1 + 2kh / (\sinh 2kh)) \\ E &= \rho g H^2 / 8 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、W: エネルギーフラックス、C: 波速、E: 単位面積当りの波のエネルギー、ρ: 水の密度、g: 重力加速度、H: 波高、k=2π/L、L: 波長、h: 水深である。なお、式(1)に示した添字 I、R および T は、それぞれ入射波、反射波および透過波の特性を示すものである。

いま、式(2)にそれぞれの領域における値を代入し、式(1)を整理して、透過率および反射率をそれぞれ α₁ および β₁ とすると次式が得られる。

$$\beta_1^2 + AZ\alpha_1^2 + \epsilon_1 = 1 \dots\dots\dots(4)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} A &= n_2/n_1 = \{1 + 2k_2h_2 / (\sinh 2k_2h_2)\} \\ &\quad / \{1 + 2k_1h_1 / (\sinh 2k_1h_1)\} \\ Z &= bL_2 / BL_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

$$\epsilon_1 = P_1 / BW_I = P_1 / (\rho g H_1^2 n_1 C_1 B / 8) \dots\dots\dots(6)$$

すなわち、ε₁ は急縮断面における波のエネルギー逸散率を表わしている。

(1) 急縮断面における透過率

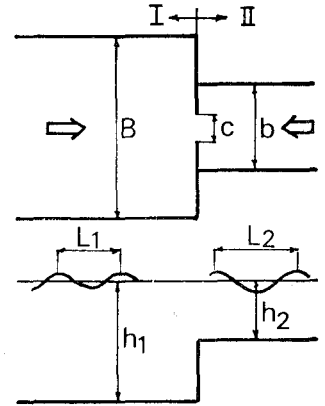


図-2 開口部モデル

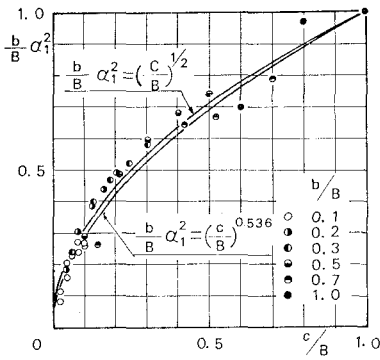


図-3 c/B と (b/B)α₁² との関係

まず、全領域が一様水深 ($h_1=h_2$) の場合について透過率に関する実験式を求め、LeMéhauté の実験式¹²⁾ と比較する。

入射波の全エネルギー BW_I と全透過エネルギー bW_T の比は次式で示される。

$$bW_T/BW_I = (b/B)\alpha_1^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ところで、入射波の全エネルギーは幅 c の防波堤開口部を通して水槽 II へ透過するので、入射波のエネルギーが透過する割合は c/B の関数で表わすことができるものと思われる。図-3 は、 c/B と $(b/B)\alpha_1^2$ との関係を示したもので、図中の実線は以下に述べるような方法で求めた。すなわち、 $c/B=0$ では、当然透過波は存在しないので $(b/B)\alpha_1^2=0$ となり、 $c/B=1$ では、入射波の全エネルギーが透過するので $(b/B)\alpha_1^2=1$ となるはずである。したがって、 $(b/B)\alpha_1^2$ と c/B との関係は比較的簡単な次式で表わすことができる。

$$(b/B)\alpha_1^2 = (c/B)^m \quad \dots\dots\dots (8)$$

実験値から、最小 2 乗法によって指数 m を求めると、 $m=0.536$ となる。しかし、実用に際して数値計算が困難となるので、簡単に $m=0.5$ として透過率 α_1 を求めると、次式が得られる。

$$\alpha_1 = (c/b)^{1/4}(B/b)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (9)$$

一方、LeMéhauté によって提案された実験式は、全領域で水深が一定とすると、次のように与えられる。

$$\alpha_1 = (c/b)^{1/2}(B/b)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (10)$$

図-4 は、式 (9) と式 (10) を比較するため、それぞれを実線および破線で示し、一点鎖線は次式で示す防波堤がない場合 ($c/b=1$) の Lamb の解¹³⁾ である。

$$\alpha_1 = 2 / \{1 + (b/B)\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

図から、LeMéhauté による式 (10) は式 (9) よりも α_1 が小さい値を示し、 c/b が小さくなるほどその差異は大きくなり、式 (10) は実験値と合わないことがわかる。また、同図には防波堤がない場合 ($c/b=1$) について、LeMéhauté¹²⁾ による周期を変化させた場合の実験値も併記しているが、若干のばらつきがあり、高精度の実験

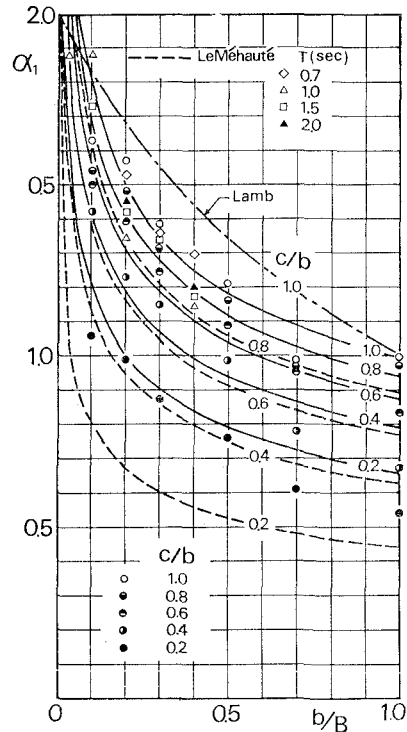


図-4 α₁ の特性

とは言い難い。LeMéhauté は提案した実験式 (10) と実験値は合っていると主張し、式 (9) と式 (10) とは $c/b=1$ の場合に全く一致するが、全般にわたって式 (9) の方がより妥当な実験式であるといえよう。なお、Lamb による式 (11) については、実験値と全く合わないことがわかる。

(2) 急縮断面における反射率

全領域で水深が一定とすると、急縮断面における反射率は式 (4) を変形して、次式で与えられる。

$$\beta_1 = \sqrt{1 - (b/B)\alpha_1^2 - \epsilon_1} \quad \dots\dots\dots (12)$$

一方、LeMéhauté は防波堤開口部で波のエネルギー逸散がないとして次式を導いている。

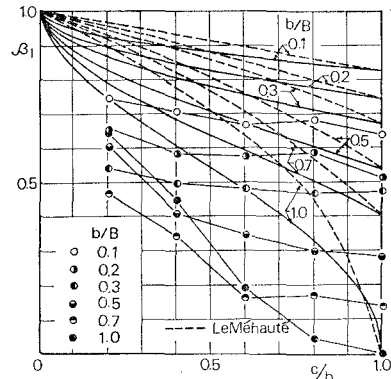


図-5 β₁ の特性

$$\beta_1 = \sqrt{1 - (c/b)(b/B)^2} \dots\dots\dots(13)$$

図-5 は、各種の b/B に対する β_1 と c/b との関係を示したもので、図中の実線は式(12)において、 α_1 を式(9)で与えて $\epsilon_1=0$ とした計算値で、破線は LeMéhauté による式(13)の計算値である。実験値をみると、 b/B が小さく、 c/b が小さくなるほど β_1 は増加し、図中に示した理論曲線と傾向は似ているが、 $\epsilon_1=0$ としたことから、いずれも実験値の方が計算値よりも小さくなっており、LeMéhauté による式(13)で表現するのは不適当であり、波のエネルギー逸散を表わす ϵ_1 が重要であることがわかる。

(3) 断面急縮部におけるエネルギー逸散率

エネルギー逸散率 ϵ_1 は透過率 α_1 および反射率 β_1 が与えられると、式(4)から求められる。図-6 は、 c/b をパラメーターにして、 b/B の変化に伴う ϵ_1 の変化を示したものである。図から、 b/B が一定の場合には、開口幅 c が小さくなるにつれて ϵ_1 が増加する傾向がわかる。また、防波堤がない場合 ($c/b=1$) をみると、 $b/B=1$ の場合を除いて、 b/B の変化による ϵ_1 の変化は小さく、入射波のエネルギーが 20~30% 程度湾口で逸散することがわかる。一方、防波堤を設け開口幅を十分小さくした場合 ($c/b=0.2$) も、 b/B の変化による ϵ_1 の変化は顕著でなく、入射波のエネルギーの最大 50% が開口部で逸散されることがわかる。

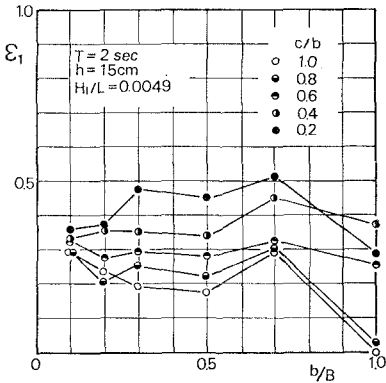


図-6 ϵ_1 の特性

4. 断面急拡部における波のエネルギー逸散

図-2 で、波が水槽 II から I へ進行するような断面が急拡する場合を考える。波のエネルギー保存則は、防波堤開口部における逸散エネルギーを P_2 とすると、次式で示される。

$$bW_I = bW_R + BW_T + P_2 \dots\dots\dots(14)$$

透過率を α_2 、反射率を β_2 とすると、上式は次のようになる。

$$\beta_2^2 + (1/AZ)\alpha_2^2 + \epsilon_2 = 1 \dots\dots\dots(15)$$

ただし、

$$\epsilon_2 = P_2 / (\rho g H_1^2 n_2 C_2 b / 8) \dots\dots\dots(16)$$

であり、 C_2 は領域 II における波速で、 ϵ_2 は急拡断面における波のエネルギー逸散率を表わしている。

以下、3. と同様、全領域で水深が一定の場合を考える。

(1) 急拡断面における透過率

Lamb¹³⁾ は、 $c/b=1$ の場合について、また、LeMéhauté¹²⁾ は、任意の c/b について、 α_1 と α_2 との間に次の関係があることを理論的に示した。

$$\alpha_2 = AZ\alpha_1 \dots\dots\dots(17)$$

上式は、図-2 に示したように水槽 I と II で水深が異なる場合であり、一般的であるが、波のエネルギー逸散を無視した理論から得られたもので全領域で水深が一定の場合についてこの関係を調べてみる。全領域で水深が一定の場合、式(17)は次のようになる。

$$\alpha_2 = (b/B)\alpha_1 \dots\dots\dots(18)$$

図-7 は、実験から得られた α_1 と α_2 の関係を点描したものであるが、式(18)の関係を満足していることがわかる。したがって、式(18)に式(9)を代入すると急拡する場合の透過率 α_1 が次式で求められる。

$$\alpha_2 = (c/b)^{1/4} (b/B)^{3/4} \dots\dots\dots(19)$$

一方、LeMéhauté の実験式(10)を用いた場合には次式となる。

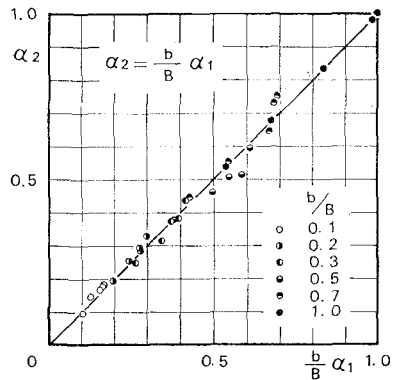


図-7 α_1 と α_2 との関係

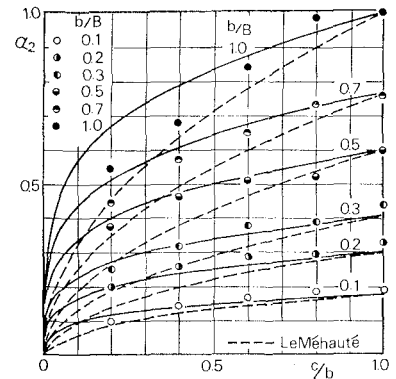


図-8 α_2 の特性

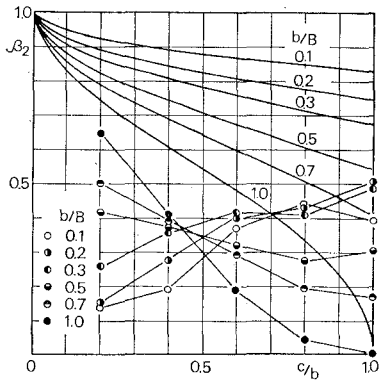


図-9 β_2 の特性

$$\alpha_2 = (c/b)^{1/2} (b/B)^{3/4} \dots\dots\dots (20)$$

図-8 は、 α_2 の特性を示したもので、図中の実線は式(19)、破線は LeMéhauté による式(20)を示している。図から、 b/B と c/b がともに小さくなるほど、 α_2 は減少すること、LeMéhauté の式(20)よりも式(19)が全体的によく一致することがわかる。

(2) 急拡断面における反射率

全領域で水深が一定の場合、反射率は次式となる。

$$\beta_2 = \sqrt{1 - (B/b)\alpha_2^2 - \epsilon_2} \dots\dots\dots (21)$$

図-9 は、 b/B をパラメータにして、 β_2 と c/b の関係を示したもので、図中の実線は式(21)において、 $\epsilon_2=0$ とし、 α_2 に式(19)を用いたときの計算値である。図から、実験値の全体的な傾向は、 b/B が 0.5 以上では c/b の増大に伴って β_2 は減少し、 b/B が 0.3, 0.2, 0.1 と順次小さくなるにつれて、 c/b が大きくなるとかえって β_2 は増加することがわかる。また、図中の計算結果と実験結果を比較すると、定量的な相違はもちろん、定性的にも両者は異なる傾向を示しており、この原因として計算結果は $\epsilon_2=0$ としたことによるものであり、波のエネルギー逸散を表わす ϵ_2 を明らかにしなければ、このような急拡断面における反射特性を解明することができないことがわかる。

(3) 断面急拡部におけるエネルギー逸散率

図-10 は、透過率 α_2 および反射率 β_2 の実験値を式(15)に代入して、エネルギー逸散率 ϵ_2 を求め、 b/B をパラメータとして ϵ_2 と c/b との関係を示したものである。 b/B も c/b も小さくなるほど ϵ_2 は増加することがわかる。特に、 $b/B=0.1$ で $c/b=0.2$ のような場合には、入射波の全エネルギーの 90% にもなるエネルギーが開口部で逸散し、 $c/b=1$ の場合でも急拡することによって 30% 程度の波のエネルギーが湾口で逸散することがわかる。

港湾についてみると、港湾内から外海へ向う波は、開口幅のみならず b/B の影響が大きくなるが、開口幅が大きくなると、かえって開口部で逸散するエネルギーは

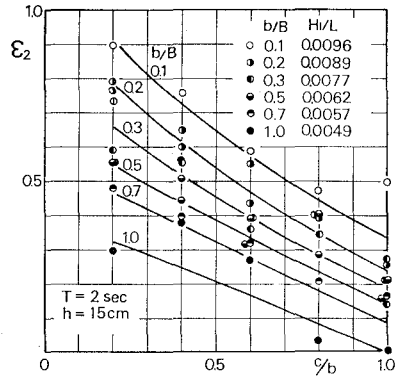


図-10 ϵ_2 の特性

減少することがわかる。

前報⁴⁾において、 $b/B=0.2\sim 0.5$ の港湾について、共振時に開口部から放出される波のエネルギーによる波高減衰を調べ、第2次モードでは開口幅を大きくすると、かえって港湾内の波高減衰が緩やかになることを指摘したが、上述のことからその原因がうまく説明できるであろう。

5. 湾水振動の制御

図-11 に示すような1次元港湾モデルについて、著者の一人は防波堤による波のエネルギー逸散を考慮した湾水振動に関する理論解を導き、詳細な検討を加えたが¹⁴⁾、ここでは、簡単にその解の妥当性について述べたあと、解析結果から湾水振動の制御について若干考察する。

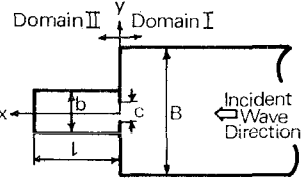


図-11 港湾モデル

波高増幅率 R を港湾内の波高と開口部を閉じたときの開口部外海側の波高(重複波高)との比と定義すれば、著者が求めた湾奥における波高増幅率は次式で示される。

$$R = \frac{r\alpha_1(1+p)}{2\sqrt{1+(\beta_2 r^2 p)^2 - 2\beta_2 r^2 p \cos(\hat{\beta}_2 + \hat{r})}} \dots\dots\dots (22)$$

ただし、

$$\hat{\beta}_2 = \cos^{-1} \frac{2 - \{1 + (b/B)\alpha_1^2 - \epsilon_2\}}{2\sqrt{1 - (b/B)\alpha_1^2 - \epsilon_2}} \dots\dots\dots (23)$$

$$\hat{r} = -2\pi l/L \dots\dots\dots (24)$$

ここに、 r : 境界摩擦による波高減衰率、 p : 湾奥における反射率、 $\hat{\beta}_2$: 湾奥から湾口へ向う波が開口部で反射するときを生ずる位相のずれ、 \hat{r} : 湾口と湾奥との間の波の位相差である。

式(22)の増幅率 R は、 α_1 を式(9)で、 β_2 を式(21)によって、式(23)の ϵ_2 は図-10の実験曲線より、港湾の

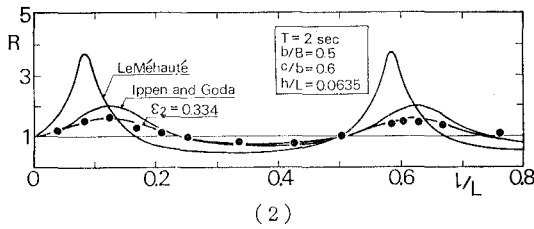
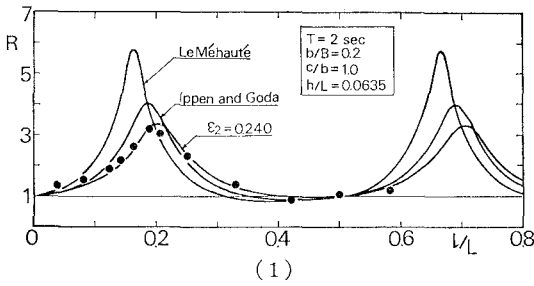


図-12 湾奥の振動特性

寸法が決まれば一義的に決定できる。

なお、式(22)の適用限界は、 $b/B \geq 0.2$ である¹⁴⁾。

図-12 は、入射波の周期を一定にして湾長を変化させた場合の、湾奥における振動特性の一例で、式(22)において、 $p=1, r=1$ として計算した解析結果を示している。同図には、Ippen-Goda の理論¹⁵⁾および LeMéhauté の理論¹⁶⁾による解析結果も併記している。図から、防波堤による波のエネルギー逸散を考慮した理論から得られた結果は、他の理論解に比べて実験値とよく一致することがわかる。

次に、湾水振動の制御の観点から、湾口に防波堤を設置して開口幅を小さくし、波のエネルギー逸散をうながすとともに、港湾内へ侵入する波のエネルギーを減少させた場合の防波堤の効果を共振時のみを対象として考察する。

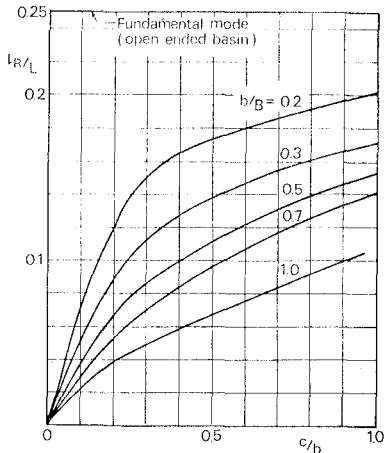


図-13 l_R/L と c/b との関係

(1) 開口比 c/b と共振時の湾長波長比 l_R/L との関係

図-13 は、式(22)から求められる l_R/L と c/b との関係を示したもので、共振湾長はいずれの港湾幅についても、防波堤がない場合 ($c/b=1$) に最大となり、港湾幅が小さく、開口幅が大きくなるほど共振湾長は長くなることがわかる。

(2) 開口比 c/b と共振時の波高増幅率 R_R との関係

図-14 は、 R_R と c/b との関係を示したもので、 b/B によって R_R の傾向が異なる。 $b/B=0.2 \sim 0.7$ の範囲では、開口幅が大きくなるにつれて R_R は大きくなり、港湾幅が小さいほどその増加の程度は大きくなる。一方、 $b/B=1$ の場合、開口幅が増加するにつれて極端ではないが R_R はかえって減少し、いわゆる harbor paradox¹⁷⁾ が成立する。また、 $c/b=0.2$ 程度にすれば、港湾幅のいかにかわらず共振波高を重複波の 1.2 倍程度、すなわち入射波高の 2.4 倍程度に制御しうることが興味深い。

次に、湾口に防波堤がなく共振現象が生じているとき、防波堤を設置することによって波高増幅率 R がどの程度制御できるかを考察したものが図-15 である。港湾幅が小さくなるほど防波堤による制御効果は顕著となり、 $b/B=0.2$ のとき、防波堤がない場合は入射波高の 7 倍近くにもなる波高が、 $c/b=0.2$ にすると、入射波高の 2 倍程度に制御することが可能であることがわかる。

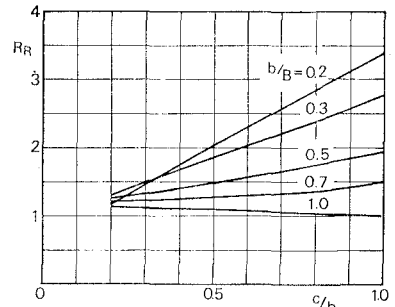


図-14 R_R と c/b との関係

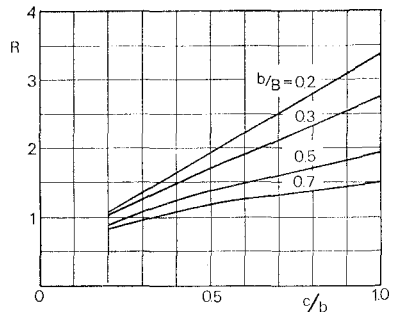


図-15 防波堤設置効果

6. 結 言

以上、防波堤開口部における波のエネルギー逸散および湾水振動の制御については詳細な検討を加えたが、得られた結果を要約すれば次のようになる。

(1) 断面が急縮する場合の波のエネルギー逸散量を求めるため、まず、透過率に関して新しく実験式 (9) を提案し、従来の LeMéhauté および Lamb が導いた透過率を与える式と比較して精度が高いことを実証した。また、反射率については、LeMéhauté が求めた式で表現できないことを指摘し、断面急縮部における波のエネルギー逸散の考慮が必要であることを強調した。次に、透過率および反射率の実験結果をもとに断面急縮部における波のエネルギー逸散量を求めた結果、防波堤がない場合 ($c/b=1$) でも、入射波のエネルギーに対し 20~30% 程度の波のエネルギーが湾口で逸散し、開口幅を十分小さくした場合 ($c/b=0.2$) には、入射波のエネルギーの最大 50% 程度が開口部で逸散されることを明らかにした。

(2) 断面が急拡する場合の波のエネルギー逸散量を求めるため、まず、透過率に関して式 (19) を導き、LeMéhauté の実験式よりも精度が高いことを確認した。反射率については、 b/B が 0.5 以上になると、 c/b が大きくなるにつれて反射率は減少し、 b/B が 0.3, 0.2, 0.1 と順次小さくなると、かえって反射率は大きくなるという興味ある結果を得た。ついで、断面急拡部における波のエネルギー逸散量を求めた結果、 b/B が小さく、 c/b が小さいほど、開口部で逸散される波のエネルギーが大きくなることを明らかにし、特に、 $b/B=0.1$ で $c/b=0.2$ のような場合には、入射波のエネルギーに対し、開口部で 90% にもなる波のエネルギーが逸散することを明らかにした。

(3) 防波堤による波のエネルギー逸散を考慮した理論解に基づき、防波堤による湾水振動の制御について検討した結果、港湾幅が小さく、開口幅が大きくなるほど共振湾長は長くなることを示した。また、ほとんどの場合、harbor paradox は成立しないが、 $b/B=1$ の場合には、それが成立する可能性のあることを示した。さらに、 $c/b=0.2$ 程度にすれば、港湾幅のいかにかわらわず、共振波高と入射波高の 2.4 倍程度に制御しようとともに、防波堤がない場合に共振現象が生じていても、 $c/b=0.2$ 程度にすれば、入射波高の 2 倍程度に湾奥の波高を減少させることができることを示した。

以上のような結果を得たが、防波堤による波のエネルギー逸散は、入射波の波形勾配、水深波長比などによっても変化することが予想され、すなわち非線形性が強くなると前述の要素の影響をうけるので、これらの影響を検討すること、また、それぞれの領域で水深が異なる場

合についての波の変形および波のエネルギー逸散に関する検討が残されており、今後これらの問題を明らかにする必要がある。

最後に、本研究にあたり終始御指導を賜った京都大学工学部岩垣雄一教授、御激励頂いている京都大学防災研究所土屋義人教授、徳島大学工学部三井宏教授、実験および資料整理に御協力頂いた徳島大学大学院生島田富美男君に謝意を表明するとともに、この研究は文部省科学研究費自然災害特別研究 (代表者: 岩垣雄一教授) による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・村上仁士: 合成波による長方形港湾泊地の振動特性について, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 235—239, 1971.
- 2) 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関する実験, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp. 221—225, 1972.
- 3) 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—194, 1973.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 岩崎敏夫・真野 明・長谷川明・前原隆生: 長周期波による矩形湾内の振動と湾口条件, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 167—171, 1973.
- 7) Ito, Y.: Head loss at tsunami breakwater opening, Proc. 12th Conf. on Coastal Eng., pp. 2123—2131, 1970.
- 8) Mei, C.C., Liu, P.L-F. and A.T. Ippen: Quadratic loss and scattering of long waves, Proc. ASCE, WW3, pp. 217—239, Aug., 1974.
- 9) 村上仁士: 湾水振動の制御に関する一考察, 土木学会第 29 回年次学術講演会講演概要集, 第 II 部, pp. 34—35, 1974.
- 10) 合田良実・阿部淑輝: 有限振幅波の部分反射に伴う見かけの反射率について, 港湾技術研究所報告, 第 7 巻, 第 3 号, pp. 1—53, 1968.
- 11) 岩垣雄一・村上仁士・鶴飼増由: 湾口における波のエネルギー損失に関する実験, 昭和 47 年度関西支部学術講演会講演概要, pp. II-36-1—II-36-2, 1972.
- 12) LeMéhauté, B.: Periodical gravity wave on a discontinuity, Proc. ASCE, HY9, pp. 11—41, 1960.
- 13) Lamb, H.: Hydrodynamics, 6th ed., p. 263, 1932.
- 14) 村上仁士: 波のエネルギー逸散を考慮した湾水振動の一般法, 土木学会論文報告集, (投稿中)
- 15) 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, 1963.
- 16) LeMéhauté, B.: Theory of wave agitation in a harbor, Proc. ASCE, HY2, pp. 31—50, March, 1961.
- 17) Miles, J. and W. Munk: Harbor paradox, Proc. ASCE, WW3, pp. 111—130, Aug., 1961.