

共振時における港内波浪の諸特性について

岩 垣 雄 一*・村 上 仁 士**

1. 緒 言

湾水の共振現象の解明にあたり、防波堤開口部における波のエネルギー逸散を明確にすることは、任意港湾の固有周期や共振波高を推算する上に欠くことができない重要な問題である。著者ら¹⁾は湾奥から反射波がない場合について、防波堤開口部における波のエネルギー損失について実験し、多くの興味ある成果を得た。しかし実際の港湾では湾奥からの反射波があるため、波の挙動はさらに複雑になり取扱いが困難となる。

本研究は、港湾幅が極端に異なる2種類の長方形港湾モデルについて、港湾にとって最悪の共振状態を設定し、防波堤開口部における波のエネルギー逸散を明らかにするために必要な諸要素を詳細に検討したものである。まず開口幅の変化による湾奥および湾口における波高変化の状況から共振特性について述べ、ついで共振時の港内波浪の波高分布および流速分布を重複波理論と比較し、その相違点から開口部の存在の影響を見出そうとした。また、共振時の港内波浪の減衰についても若干の実験を行ない、開口部が波高減衰におよぼす影響を考察した。

2. 実験装置および実験方法

実験は、京都大学工学部土木工学教室地下実験室に設けられた長さ27 m、幅50 cm、深さ70 cmの両面ガラス張り水槽に、図-1に示すような長方形港湾模型を造

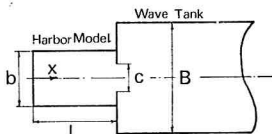


図-1 港湾模型

波板から約20 mの位置に設置して行なった。造波機は合成波発生機²⁾を単一波発生機として使用し、港湾模型は湾長を自由に变化できるようにしたアクリル製のものをを用いた。なお表-1にこの実験に用いた実験諸元を示している。

(1) 波高測定

港湾内外の波高は電気抵抗線式波高計を用いてペン書きオシログラフに記録し、波高を読みとった。後述する重複波の減衰波高は、湾水が共振状態になったのち造波板を停止し、そのあと停止直前に発生し港湾に到達した波を除いて波高を測定し、順次読みとった。

(2) 流速測定

湾軸沿いの流速は羽根の径が約20 mmのプロペラ式流速計を用い、積分回路を通し流速の時間変化をペン書きオシログラフに記録して解析した。流速計の検定は、プローブを台車に固定し、静水中をけん引する方法によってあらかじめ検定曲線を求めた。

また開口部には渦その他の乱れが発生するが、湾軸方向以外の速度成分を除去するために円筒状のカバーを取り付けた。一方この流速計はプロペラの回転方向による流速の正負の判別が不可能であり、写真-1に示すように波高計を直前に取り付け、その位相関係から流速の正負を判別した。なお流速計

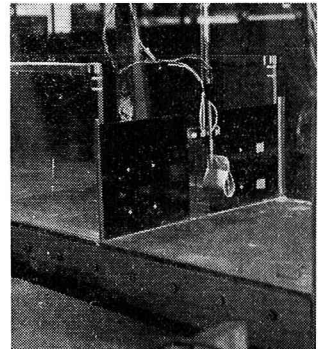


写真-1 プロペラ式流速計および位相測定用波高計

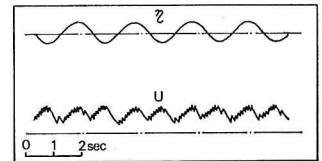


図-2 流速記録および流速計直前の波形記録

は静水面下3 cmに保ち、その位置の平均流速とした¹⁾。図-2に流速と波形の位相関係の一例を示す。

3. 共振特性

(1) 波高増幅率 R および共振湾長 l_R

湾軸沿いの任意点の波高と湾口を閉じたときの湾口位置における重複波高との比を波高増幅率 R (以下増幅率と呼ぶ)と定義する。図-3 (1)~(4)は $T=2$ sec の場合の湾奥および湾口における振動特性の若干例を示したもの

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 徳島大学講師 工業短期大学部土木工学教室

表-1 実 験 諸 元

Run No.	B (cm)	b (cm)	c (cm)	T (sec)	h (cm)	H_0 (mm)	l_R (cm)	b/B	c/b	l_R/L
1-1	50	47	5.5	1	10	11.2	48.5	0.94	0.117	0.526
2			10.0			12.6	50.0		0.213	0.542
3			15.0			14.4	51.0		0.319	0.553
4			20.0			12.1	52.5		0.426	0.569
2-1	50	47	5.5	2	10	4.3	103.5	0.94	0.117	0.531
2			10.0			5.2	105.5		0.213	0.541
3			15.0			5.0	107.5		0.319	0.551
4			20.0			5.0	109.5		0.426	0.562
3-1	50	10	5.0	1	10	7.9	62.5	0.20	0.500	0.677
2			10.0			7.7	66.0		1.000	0.715
4-1	50	10	5.0	2	10	4.0	40.0	0.20	0.500	0.205
2			10.0			4.0	42.5		1.000	0.218

• H_0 は入射波高であり重複波高の $1/2$ としている。

で、横軸に湾長 l と波長 L との比、縦軸に増幅率 R をとっている。図中には、代表的な理論の計算結果も併記した。各理論の詳細は原論文^{3), 4), 5)}にゆずり、ここでは省略する。しかし、たとえば Miles ら³⁾ および Ippen ら⁵⁾ の理論のように実験条件と理論の仮定とが厳密には異なるが、それらも参考のために記しておいた。なお図-3(4)の O. D. A は一次元解析 (One dimensional analysis) の略号である。

理論解析結果と実験結果を比較すると、増幅率の極大値は大体理論値の方がはるかに大きく、極小値は概して理論値の方が小さくなっており、エネルギー損失に関する評価が理論では適当でないことがわかる。港湾幅 b が水槽幅 B にほぼ等しい ($b/B=0.94$) 場合には、ある湾長のとき、湾奥よりもむしろ湾口の波高が大きくなることもあり、さらに湾奥の波高が極大のときには湾口でも極大値をとり、しかも両者の値がほぼ同程度になる。このような場合には、水面は閉領域の自由振動に似た振動を起こす

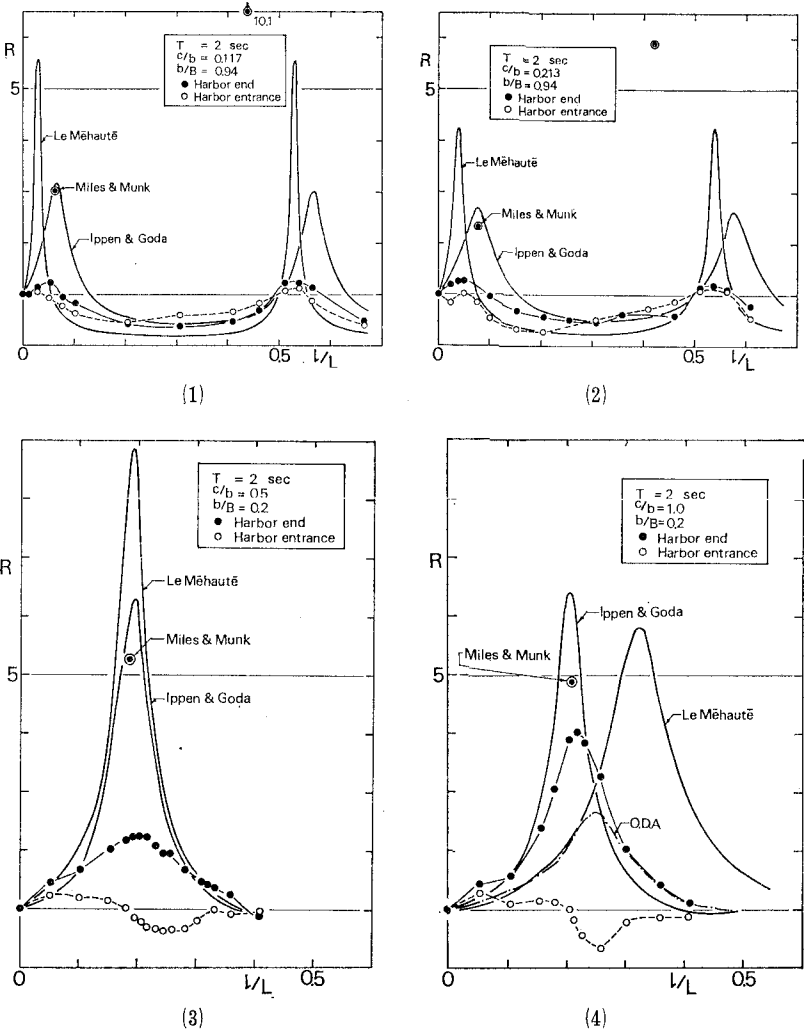


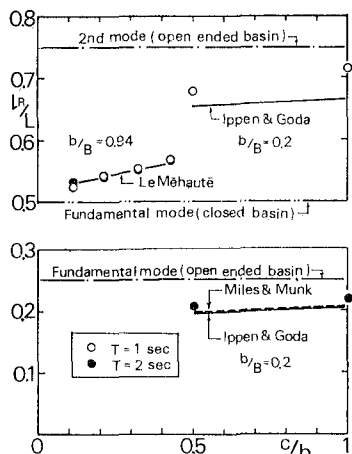
図-3 湾水の振動特性

ようである。Run No. 4-1, 2 以外は湾奥の第 1 次極大値は湾水全体が昇降する pumping 現象が起こるため、

第2次極大値が生ずる湾長を共振湾長 l_R とし, Run No. 4-1, 2 については第1次極大値が生ずる湾長を共振湾長 l_R とした。なお表—1 に実験的に求めた共振湾長 l_R も記入してある。

(2) 開口幅 c と共振湾長 l_R との関係

図—4 は開口幅 c と共振湾長 l_R との関係をそれぞれ

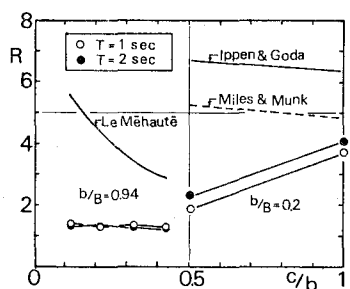


図—4 c/b と l_R/L との関係

れ港湾幅 b および波長 L で無次元化して示したものであり, 開口部が大きくなるにつれ共振湾長がいくぶん長くなる。同図には理論解の一部も示しているが, 細長い湾の中に防波堤を設けるような場合 ($b/B=0.94$) には Le Méhauté の理論から共振湾長が推測し得る。一方, 水槽幅に比べて港湾幅がはるかに小さい場合 ($b/B=0.2$) で比較的長周期になると, Ippen ら⁵⁾, および Miles ら⁶⁾ の理論から共振湾長を推測し得ることは, 理論の仮定を考えれば明らかであろう。また同図には Merian 公式など⁶⁾ から得られる共振モードも示しているが, 実験値はいずれもそれらのモードよりも小さく, 港湾幅が水槽幅に比べて広がるほどその差が大きくなる。特に, $b/B=0.94$ の場合には, 2nd mode よりもむしろ閉鎖域の Fundamental mode に近いことがこの図からもわかる。

(3) 開口幅 c と増幅率 R との関係

図—5 は開口比 (c/b) と増幅率 R との関係を示して



図—5 c/b と R との関係

おり, $b/B=0.94$ の場合, 増幅率は概して小さく開口幅の影響はほとんどないが, $b/B=0.2$ の場合には開口幅が小さくなると急激に増幅率が低下し, 防波堤の効果が顕著になる。同図に示した理論曲線は, 開口幅を小さくするとかえって増幅率が増すという, いわゆる harbor paradox³⁾ を示しているが, この実験からは港湾幅が小さい場合には, そのような現象は見られない。しかし, 港湾幅が大きくなるとこの paradox が成立するようになる可能性もあることが同図からうかがえる。

4. 共振時の港内の波高特性および流速特性

(1) 共振時の波高分布および流速分布

湾水が共振状態になると, 港湾内の波は重複波となるので湾奥の波高が推算される場合には, 港湾内の波の特性を重複波理論から把握できるであろう。

微小振幅重複波理論を用いれば水位変動 η および水平水粒子速度 u は, 座標原点を湾奥静水面上にとり, 湾軸方向に x 軸, それに鉛直上向きに z 軸をとると, それぞれ次式のようになる。

$$\eta = (H/2) \cos kx \cdot \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

$$u = -(\sigma H/2) \cdot \cosh k(h+z) \cdot \sin kx \cdot \cos \sigma t / \sinh kh \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ここに, H ; 湾奥の波高, h ; 水深, $k=2\pi/L$, $\sigma=2\pi/T$, L および T はそれぞれ波長および周期である。

一方, 有限振幅重複波理論として Tadjbaksh と Kleiler⁷⁾ による第3次近似解から, η および u は次式で示される。

$$\eta = a \sin \sigma t \cdot \cos kx + (ka^2/8) \{ \omega^{1/2} + \omega^{-1/2} + (\omega^{-1/2} - 3\omega^{-3/2}) \cos 2\sigma t \} \cos 2kx + k^2 a^3 \times \{ b_{11} \sin \sigma t \cos kx + b_{13} \sin \sigma t \cos 3kx + b_{31} \sin 3\sigma t \cos kx + b_{33} \sin 3\sigma t \cos 3kx \} \quad (4.3)$$

$$\left. \begin{aligned} b_{11} &= (1/32) (3\omega^{-2} + 6\omega^{-1} - 5 + 2\omega), \\ b_{13} &= (3/128) (9\omega^{-2} + 27\omega^{-1} - 15 + \omega + 2\omega^2), \\ b_{31} &= (1/128) (3\omega^{-2} + 18\omega^{-1} - 5), \\ b_{33} &= (3/128) (-9\omega^{-3} + 3\omega^{-2} - 3\omega^{-1} + 1) \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

$$k = gT^2 \omega^{1/2} [1 + (1/16) (ka/2)^2 \times \{ 9\omega^{-2} - 12\omega^{-1} - 3 - 2\omega \}] \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

$$a = (H/2) - (H^3/1024) (k/2)^2 (27\omega^{-3} + 27\omega^{-2} + 96\omega^{-1} - 63 + 11\omega + 6\omega^2) \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

$$u = -ka(g/k)^{1/2} \omega^{-1/4} \cosh k(h+z) \cos \sigma t \times \sin kx / \sinh kh + (3/2) (ka/2)^2 (g/k)^{1/2} \omega^{-1/4} \times \{ \cosh 2k(h+z) / \cosh 2kh \} (1 - \omega^{-2}) \sin 2\sigma t \times \sin 2kx - (ka)^3 (g/k)^{1/2} \{ 3\beta_{13} \cos \sigma t \sin 3kx \times \cosh 3k(h+z) + \beta_{31} \cos 3\sigma t \sin kx \times \cosh k(h+z) + 3\beta_{33} \cos 3\sigma t \sin 3kx \times \cosh 3k(h+z) \} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

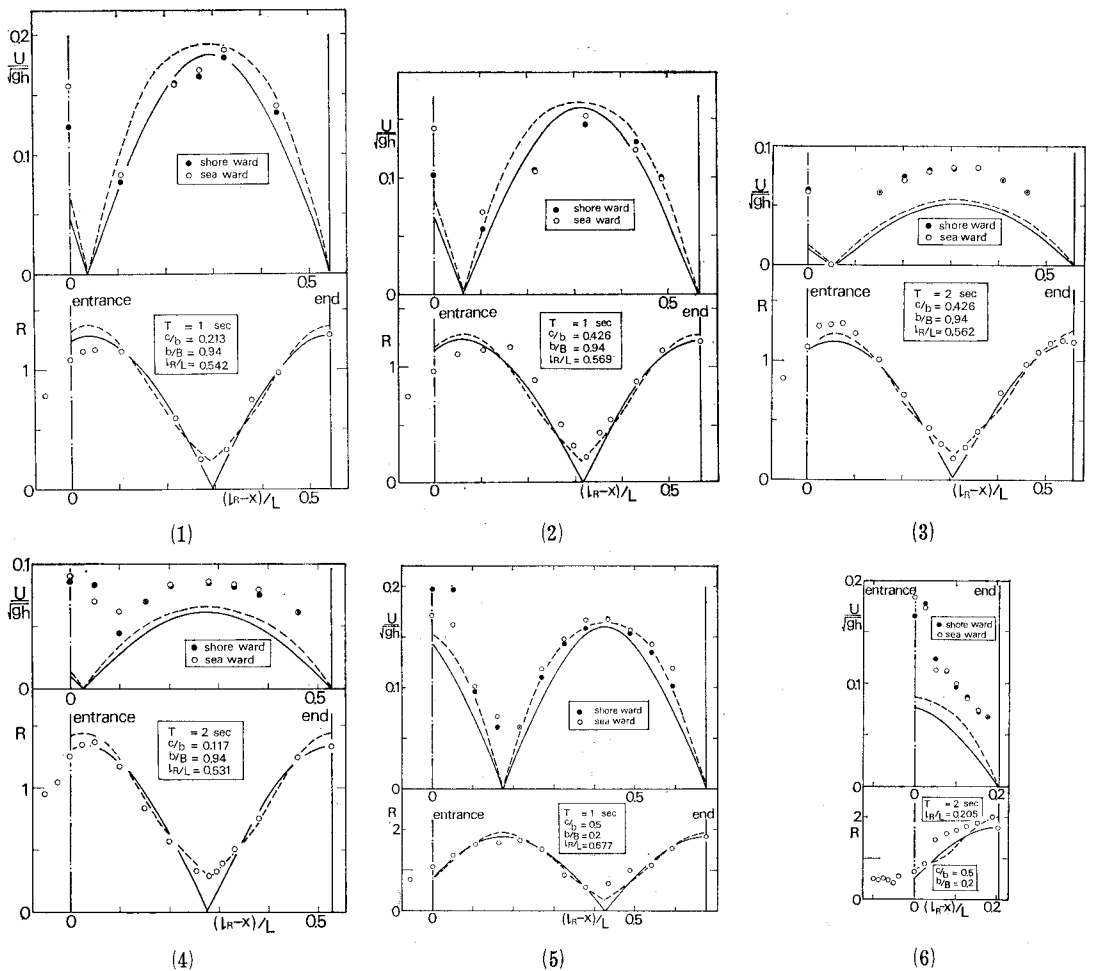


図-6 共振時の波高分布および流速分布

$$\left. \begin{aligned}
 \beta_{13} &= (1+3\omega)(3\omega^{-9/4}-5\omega^{-1/4}+2\omega^{3/4}) \\
 &\quad / (128\cosh 3kh) \\
 \beta_{31} &= (9\omega^{-9/4}+62\omega^{-5/4}-31\omega^{-1/4}) \\
 &\quad / (128\cosh kh) \\
 \beta_{33} &= (1+3\omega^2)(-9\omega^{-13/4}+22\omega^{-9/4} \\
 &\quad -13\omega^{-5/4}) / (128\cosh 3kh) \\
 \omega &= \tanh^2 kh \dots\dots\dots (4.9)
 \end{aligned} \right\} (4.8)$$

ここに、 H は湾奥の波高、 g は重力加速度である。

図-6 (1)~(6)は共振時の港内の波高分布(下図)および流速分布(上図)を無次元化して示したものの若干例であり、図中の実線および破線はそれぞれ微小振幅重複波および有限振幅重複波理論による計算値である。流速分布の○印および●印はそれぞれ沖向きおよび岸向き流速を示している。まず波高分布を見ると、各周期の場合とも開口部近傍を除けば全般的に有限振幅波理論とよく一致することがわかる。また有限振幅波理論では、湾奥から1/4波長の位置の節のところで波高は0とならず、上記の記号を使えば

$$H_{\min} = (ka^2/4)(3\omega^{-3/2} - \omega^{-1/2}) \dots\dots\dots (4.10)$$

の波高をもち、かつ実験結果も波高が0とならないことから、実験に用いた入射波が微小振幅波理論で近似できる波であっても、共振時にはその理論では十分説明しない現象が現われることがわかる。

一方、流速分布をみると、 $T=1$ secの場合は開口部以外ほぼ実験値と計算値は同程度の値になるが、 $T=2$ secの場合には実験値の方が一様にかなり大きくなっている。この原因として、流速計の検定のとき流速が約7cm/sec ($U/\sqrt{gh} \approx 0.07$) 以下では検定できなかったため、流速がそれよりも大きい場合の検定曲線から外挿して流速を求めたこと、その結果記録紙上に流速の変化が現われない場合でも外挿した検定曲線からは約3cm/sec ($U/\sqrt{gh} \approx 0.03$) 程度の値を示すことなどの流速計自体の限界によるものであろう。しかし、絶対値は異なっても同一実験の範囲では定性的な傾向をみるには不都合を生じない。図から、開口部近傍以外は沖向きおよび

岸向き流速はほぼ等しいことがわかる。いずれにしても開口部の流速は理論の傾向と一致しない。この問題については後述するが、興味あることは、波高変化は開口部近傍でもほぼ重複波理論に従うにもかかわらず、流速変化はその理論を開口部にまで拡張できないことであり、開口部近傍の波の特性を水位変化だけでなく内部機構についても明らかにしなければ、開口部の水理特性は把握できないことを物語るものであるといえよう。

(2) 湾奥波形の時間変化

前項で港内波高は有限振幅波で近似できることを述べた。そこで、湾奥の時間波形を調べたものの一例を図-7(1)および図-7(2)に示した。横軸は時間 t と周期 T の比、縦軸は静水面からの変位 η と湾奥の波高 H_{st} との

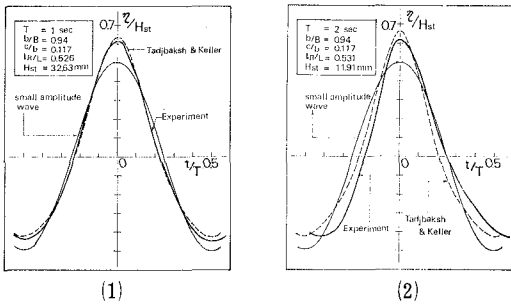


図-7 共振時の湾奥波形

比で無次元量にて示している。実測波形は若干非対称になる場合もあるが、この実験の範囲内では、港内の波の特性は Tadibaksh と Keller による第3次近似解で取扱ってもよいことがわかる。

(3) 開口部の流速特性

図-8 は開口幅の変化に伴う開口部の流速変化を沖向きおよび岸向きに分類して比較したものであり、重複波理論から得られる開口部の流速も参考のため記した。(1)で述べたように、理論よりも実験値の方がはるかに大きく、開口幅の変化による流速の変化の傾向はほぼ逆になる。いま、岸向き流速を考え、一例として $b/B=0.94$, $T=1$ sec の場合をみると、重複波理論では開口幅が小さ

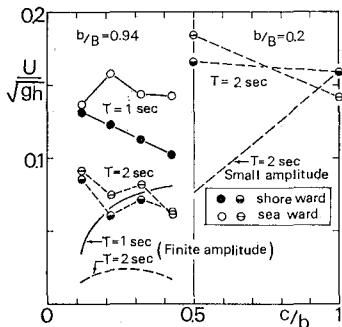


図-8 c/b と $U/\sqrt{gh}$ との関係

い方が流速も小さくなるが、実験値は全く逆の傾向を示す。このようなことから、開口幅が小さくなると開口部を通過する波は、湾内外の水位差による流れの状態で港内に進入し、流速が大きくなったと考えてもよいであろう。開口幅が大きくなるにしたがい、流れよりも波としての効果が支配的になるものと思われる。その他の例からもおおよそ上述の考え方が裏付けされる。特に $b/B=0.2$, $T=2$ sec の場合には、開口部近傍で節に近い状態となり波の水平流速も大きくなるが、開口幅が小さくなると前述の流れの効果も加わって理論値よりも極端に大きくなる。一方、開口部にアルミ箔を散布し、その挙動を調べた結果、港内から外海へ噴出する現象がみられ、したがって流速は進入時よりも湾外へ出る場合の方が大きくなるものと思われる。

5. 港内波高の減衰特性

Keulegan⁸⁾ は、水槽幅 b をもつ長方形水槽内の重複波の波高減衰は底面および水槽壁面近くの層流境界層内の境界摩擦と内部粘性によるものであると考え、有限振幅波の第2次近似解を用いて波高減衰を次式で表わした。

$$\left. \begin{aligned} H/H_0 &= \exp(-\alpha \cdot t/T) \\ \alpha &= (\nu T/\pi b^2)^{1/2} \{ (\pi + kb) + kb(\pi - 2kh) \} \\ &\quad / \sinh 2kh + 2(kb)^2 (\nu T/b^2) \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

ここに、 H : 減衰波高, H_0 : 初期重複波高, α : 減衰係数, ν : 動粘性係数, h : 水深である。

α の第1項および第2項はそれぞれ境界摩擦および内部粘性による減衰項を表わしている。

一方、共振時の港内波浪の波高減衰は開口部から波のエネルギーが放出されるために式(5.1)で示される閉領域の波高減衰と違った特性を示すものと思われる。

図-9(1)~(4)は2.で述べた方法で湾奥の波高減衰を実験的に調べたものであり、式(5.1)の計算結果も示している。閉領域の波高減衰は、長周期波ほど減衰が大きく、その程度は港湾幅 b が小さいほど大きくなる。同様の傾向は開口部をもつ場合にも言えるが、その場合の波高減衰は閉領域の場合よりもはるかに大きく、両者の差が開口部から外海へ出てゆく波のエネルギーによる波高減衰であることを示している。しかし、実験から開口部の変化にともなう減衰効果の差異を見出すことはできなかった。また α を任意に変えたときの関係も併記したが、開口幅の変化によって一定の α を決定することができず、開口部をもつ場合の波高減衰は、むしろ閉領域のように指数関数として表わすことができないと考える方が妥当のように思われる。

以上は、外海から波のエネルギーが供給されない場合

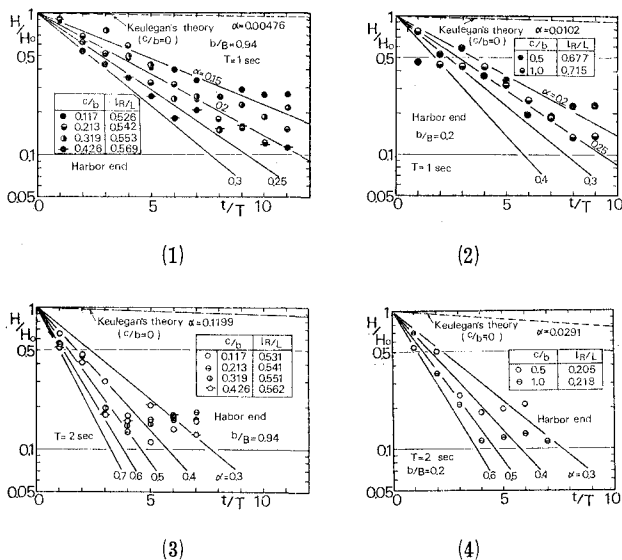


図-9 湾奥の波高減衰

の議論であり、実際は開口部を通して港湾内外に絶えず波のエネルギーの授受が行なわれているので、それらの相互作用を明確にする必要があろう。

6. 結 言

共振時の港内波浪の特性について考察したが、得られた結論を要約すれば次のとおりである。

(1) 細長い湾内に防波堤を設置する場合には、共振時に湾口で節に近い状態にならないで、むしろ湾奥と同程度の波高が生じ、自由振動に似た共振モードとなって、防波堤の効果はほとんどなくなる。このような場合の共振湾長と開口幅の関係は Le Méhauté の理論¹⁾を用いて推測することができる。水槽幅に比べ港湾幅が小さくなると、Miles と Munk の理論³⁾ および Ippen と合田の理論⁵⁾ から共振湾長と開口幅との関係を推測することができる。

(2) harbor paradox は、 b/B が小さい場合には成立しなくなり、共振時に開口部幅を小さくすることによる防波堤の波高減少効果があらわれるが、 b/B が大きくなると、harbor paradox が成立するようになる可能性があることがわかった。

(3) 共振時の港内の波高分布は開口部近傍までは有限振幅重複波理論で近似できることがわかった。しかし流速分布については開口部近傍はその理論が適用できなくなることから、開口部における波の特性を水位変化だけで議論することは問題があり、内部機構を十分把握しなければならない。

(4) 開口部の流速は開口幅が小さい場合には、湾内外の水位差による流れに支配され、開口幅が大きくなると波の効果が支配的となる。特に、 b/B が小さく、しかも開口幅が小さくて開口部で節に近い共振モードをつくる場合には、波による水平水粒子速度が大きい上に、さらに湾内外の水位差による流れの効果が加算される。

(5) 港内の波高減衰は、長周期かつ港湾幅が小さいほど大きくなる。閉領域の場合と開口部をもつ港湾における波高減衰の比較によって、開口部から外海に逸散される波のエネルギーを定性的に求め、開口部をもつ場合の波高減衰は指数関数表示ができないことがわかった。

なお、外海から進入する波のエネルギーと港内から逸散される波のエネルギーの相互関係、および開口幅の変化に伴う港内の波高減衰に与える影響についても今後明らかにする必要がある。

最後に本研究にあたり、実験に協力して頂いた当時京都大学工学部学生の浜野哲夫君に深謝の意を表するとともに、この研究は文部省科学研究費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：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.
- 2) 岩垣雄一・石田 昭：波起し機によって起した不規則波の特性，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 29—34, 1969.
- 3) Miles, J. and W. Munk : Harbor paradox, J. Waterways and Harbors Div., A. S. C. E., pp. 111—130, Aug. 1961.
- 4) Le Méhauté, B.: Theory of wave agitation in a harbor, J. Hydraulics Div., A. S. C. E., pp. 31—50, March, 1961.
- 5) Ippen, A. T. and Y. Goda : "Wave induced oscillation in harbors; The solution for a rectangular harbor connected to the open sea.", Rep. No. 59, Hydrodynamics Lab., M. I. T., July, 1963.
- 6) たとえば Ippen, A. T.: Estuary and Coastline Hydrodynamics, Chap. 7, p. 287.
- 7) Tadjbaksh, I. and J. B. Keller; Standing surface waves of finite amplitude, J. Fluid Mech., Vol. 8, Part 3, pp. 442—451, 1960.
- 8) Keulegan, G. H.: Energy dissipation in standing waves in rectangular basins, J. Fluid Mech. Vol. 6, pp. 33—50, 1959.