

湾水振動における波のエネルギー逸散について

村 上 仁 士*

1. 緒 言

海岸工学において、湾水の共振現象が問題となるのは、主として次の2点にあると考えられる。一つは、港湾に対するうねりとか高潮の resurgence などによる港湾水面の副振動とよばれる共振現象であり、他の一つは、自然地形の湾あるいは大規模港湾に対する津波などによる広域の湾水振動現象である。前者は、共振を生じたとしても比較的波高は小さく、共振波高よりも、むしろ共振周期を求めることが船舶や港湾施設にとっては重要で、後者は、共振周期のほか、湾内の波高増幅度も問題となるであろう。この種の問題は、いずれも振動系の damping factor に関係して変化するもので、港湾という振動系を考えると、この系における波のエネルギー逸散の度合を定量化すれば、共振特性は明らかになるものと思われる。著者は、このような観点から一連の研究を行って、湾水の共振現象を検討してきたが、それに伴ういろいろな問題点も新たに生じてきた^{1),2),3)}。

本研究は、共振時における湾水のエネルギー逸散量を把握することを主目的としたものであって、それに付随して、振動モードの相違による湾水の減衰特性についても詳細な実験的考察を行う。すなわち、まず、各種港湾幅、開口幅の共振モードにおける波高減衰特性を調べ、ついで、外海が有限幅の場合に港湾幅が比較的広くなると、2次の共振モードが閉領域の自由振動モードとほぼ等しくなる³⁾という事実、いいかえれば、共振時には開口部の存在の有無にかかわらず、振動モードがほとんど変わらないということから、共振時に開口部からの波のエネルギー逸散による波高減衰および開口部を閉じた場合の波高減衰を比較することによって、湾水振動におよぼす底面摩擦の効果を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

実験は、徳島大学工学部土木工学教室屋外に設けられ

た長さ 30 m, 幅 1 m, 深さ 90 cm の 2 次元造波水槽に、図-1 の記号で示すようなアクリル製長方形港湾模型

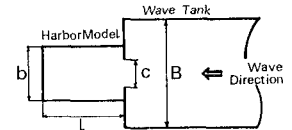


図-1 港湾模型

を、造波板から 18.5 m の位置に設置して行った。造波機は pendulum 型である。全実験を通じて、周期 T および水深 h は一定にして、湾長を自由に変えるようにした。なお、表-1 に、この実験に用いた実験諸元を示している。

表-1 実験諸元

Run No	B (cm)	b (cm)	c (cm)	T (sec)	h (cm)	Res. harbor length l (cm)		b/B	c/b
						fundamental	2nd		
1-1	100	10	2	2	15	10	0.1	0.2	0.2
2			4			30			
3			6			45			
4			8			47.5			
5			10			50			
2-1	100	20	4	2	15	10	0.2	0.2	0.2
2			8			30			
3			12			40			
4			16			42.5			
5			20			45			
3-1	100	30	6	2	15	20	0.3	0.2	0.2
2			12			24			
3			18			32.5			
4			24			40			
5			30			45			
4-1	100	50	10	2	15	10	0.5	0.2	0.2
2			20			20			
3			30			27.5			
4			40			40			
5			50			50			

(1) 実験手順

1) 各港湾幅について、それぞれの開口幅に対する基本モードおよび第2次モードに相当する共振湾長を実験的に求め、それらの湾長の場合についてののみ、以下の実験を行う。

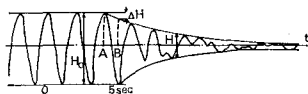
2) 造波板を7～8回作動させた後、造波板を停止する。波が港湾内で共振状態に達したあと、エネルギー供給がないため、港湾内の波高は減衰しはじめる。この間、湾口および湾奥での波形をペン書きオシログラフに記録する。なお、造波板停止はマーカーによって同紙に記録しておく。

3) 2)と同様な方法で、湾水が共振状態に達すると、ただちに開口部を閉じ、閉領域の減衰波形も記録する。

* 正会員 工修 徳島大学講師 工業短期大学部土木工学教室

(2) 減衰波高

開口部をもつ場合、外海からのエネルギー供給が断たれると、開口部からの波のエネルギー逸散および



図—2 減衰始点および減衰波高の取り方

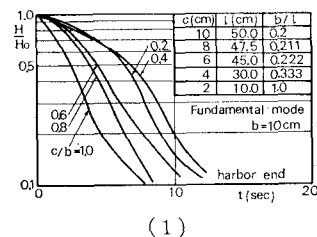
底面や側壁の摩擦によって、港湾内の波高は減衰しはじめる。ここで問題となるのは、波高減衰始点の判定で、図—2 に示すA点とB点では $T/2$ だけ位相がずれ、波高も ΔH の差が生ずる。そこで、まず、実験波の波速により造波板から港湾内の測点までの到達時間を求め、(1) で述べた造波板停止のマーク以後の時間内に含まれる波を除去することにした。しかし、造波板は電源スイッチを切ると、ただちに停止するわけではなく、わず

かではあるが、造波板がふれるので、その影響も考慮して、A点をもって減衰波高の始点とし、減衰波形には、かなりの乱れが生ずるため、その包絡線から波高を求めることにした。

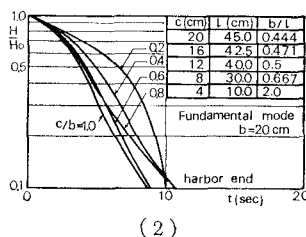
3. 開口部からの波のエネルギー逸散

(1) 基本モードの場合の波高減衰

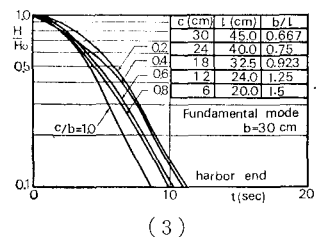
図—3(1)~(4) は、各港湾幅について、開口幅の変化により、湾奥の波高減衰の様相が時間的にどのように変化するかを調べたものである。縦軸は、減衰波高 H と共振波高 H_0 との比で、横軸は時間 t 、パラメータは開口比 c/b を示している。図から、各港湾について、開口



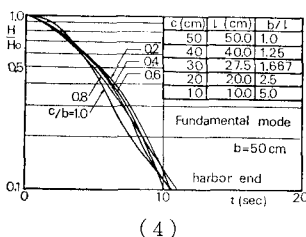
(1)



(2)



(3)



(4)

図—3 開口幅の変化にともなう波高減衰 (基本モードの場合)

幅が大きくなるほど波高減衰は速くなることがわかる。また、開口比による波高減衰の顕著な差異は、港湾幅が小さいほど鮮明であるが、港湾幅が大きくなるにつれて、明確でなくなる。

(2) 第2次モードの場合の波高減衰

図—4(1)~(3)は、前述と同様な方法で、第2次モードの波高減衰の様相を示している。各港湾幅について、多少の例外はあるが、開口幅が大きくなるにつれて、波高減衰は緩やかになり、基本モードの場合とは、全く逆の傾向を示す。

工学的に興味あることは、入射波として同一波高、同一周期の波が港湾内に進入して、共振を起こした場合、高次の共振モードをもつ波浪は、開口幅を大きくすると、かえって港湾内に蓄積されたエネルギーが逸散されなくなるおそれがあり、防波堤を設け開口幅を小さくすることが港湾にとって都合がよいことになる。

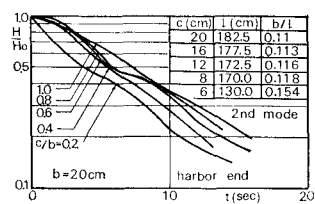
一方、波高減衰の速度は、基本モードに比べ、一段と緩やかになり、港湾内水面の擾乱の継続時間が長く、船舶などにとっては高次のモードの特性も十分把握しておかなければならないであろう。

振動モードの相違による波高減衰特性は、明らかに異なることがわかったが、その原因の究明は今後残された課題であらう。

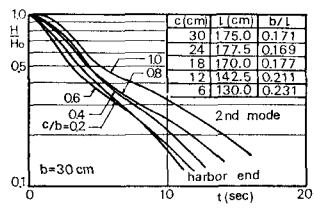
4. 底面摩擦による波のエネルギー逸散

(1) 底面摩擦による重複波の波高減衰

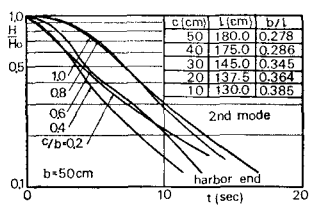
Keulegan は、水槽幅 b をもつ長方形水槽内の重複波の波高減衰を、底面および水槽壁面近くの層流境界層内の境界摩擦と内部粘性によるものであると考え、有限振幅波第2次近似解を用いて、次式のように表わした。



(1)



(2)



(3)

図—4 開口幅の変化にともなう波高減衰 (第2次モードの場合)

$$\left. \begin{aligned} H/H_0 &= \exp(-\alpha \cdot t/T) \\ \alpha &= (\nu T/\pi b^2)^{1/2} \{ (\pi + kb) + kb(\pi - 2kh) \} / \\ &\quad \sinh 2kh + 2(kb)^2 (\nu T/b^2) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

ここに、 H : 時刻 t における減衰波高、 H_0 : 初期重複波高、 α : 減衰係数、 ν : 動粘性係数、 h : 水深、 k : 波数 ($=2\pi/L$)、 L : 波長、である。なお、 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、底面摩擦を乱流境界層の場合の摩擦力が支配的であると考えられる場合について、微小振幅波理論を用いて重複波の波高減衰を調べてみる。

重複波の底面における水平速度を u_0 、底面の摩擦応力を τ_0 とすると、流体の密度を ρ 、摩擦係数を f で表わせば、次式の関係がある。

$$\tau_0 = f \rho u_0^2 \quad (4.2)$$

この摩擦応力によって、単位面積当たり、単位時間に失われる平均エネルギー量 $\bar{D}_f$ は次式で示される。

$$\bar{D}_f = \left(\frac{1}{TL} \right) \int_0^L \int_0^T |\tau_0 u_0| dx dt \quad (4.3)$$

座標を静水面に x 軸、それに鉛直上向きに z 軸をとる、重複波高を H で表わすと、波形 η は次のようになる。

$$\eta = (H/2) \cos kx \cos \sigma t \quad (4.4)$$

ここに、 $\sigma = 2\pi/T$ である。

また、底面の水平流速 u_0 は、

$$u_0 = (\pi H/T \sinh kh) \sin kx \sin \sigma t \quad (4.5)$$

となり、式 (4.2)、(4.5) を式 (4.3) に代入すると、 $\bar{D}_f$ が次式のように求められる。

$$\bar{D}_f = \frac{16}{9} f \rho \frac{\pi}{T^3} H^3 \frac{1}{\sinh^3 kh} \quad (4.6)$$

全エネルギーの時間的変化量が、底面における摩擦損失エネルギー $\bar{D}_f$ に等しいことから、次式が得られる。

$$dE/dt = -\bar{D}_f \quad (4.7)$$

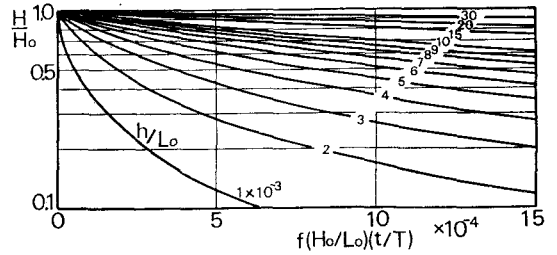
重複波の単位面積当たりの全平均エネルギー E は、

$$E = (1/16) \rho g H^2 \quad (4.8)$$

と表わすことができ、式 (4.6)、(4.8) を式 (4.7) に代入して積分し、初期重複波高を H_0 で表わすと、重複波の波高減衰に関する次式が求められる。

$$\frac{H}{H_0} = \left[1 + \frac{64}{9} f \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \left(\frac{t}{T} \right) \frac{1}{\sinh^3 kh} \right]^{-1} \quad (4.9)$$

図—5 は、 h/L_0 をパラメータとして、 $f(H_0/L_0)(t/T)$ に対する波高減衰を図表にして示したものである。図から、水深波長比が小さくなるにつれて、層流境界層理論から導かれる波高が指数関数的に減少するという変化特性から大きくずれてくることがわかる。また、この図表から、摩擦係数 f が与えられると任意時刻の減衰波高が容易に求められる。



図—5 底面摩擦による重複波の波高減衰率の計算図表

(2) 実験的考察

共振時に開口部を閉じた後の波高減衰は、次の2段階の過程を経るであろう。まず、その閉領域の水面変動は、波高を減じつつその領域固有の振動周期になろうとし、その後、固有周期を保ちながら波高は減衰する。本来、完全重複波の減衰を議論する上においては、固有振動になった後の段階を詳細に検討すべきであるが、前にも述べたように、開口部をもつ場合の共振時の振動特性は、2次の振動モードが、閉領域の自由振動モードに近いので、第1段階から周期は変化することがないと考えて議論を進めてもよいであろう。表—2 は、上述の検証をするために、開口部を閉じた直後の実験で得られた波形記録から、数波平均して周期を求めたものと、次式で示す固有周期の計算値とを比較したものである。

$$T_n = 2l / \sqrt{gh} \quad (4.10)$$

ここに、 l : 湾長、 g : 重力加速度、である。

この表から、上述の仮定をしてもさしつかえないことがわかる。

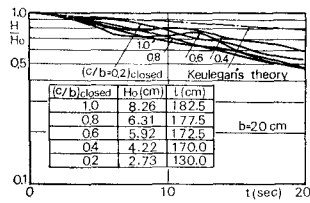
図—6(1)~(3) は、閉領域の波高減衰の様相を示したもので、湾長や初期波高の相違による減衰の特性は明確に現われていない。各港湾幅に関する全体的な減衰の傾向は、港湾幅が小さくなるほど減衰が速くなり、Keulegan の式から得られる傾向と一致する。しかし、図から明らかなように、実験値の方がかなり大きく減衰する。

次に、乱流境界層理論から得られる式 (4.9) を検討する。

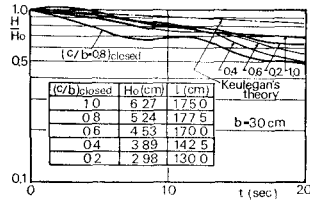
表—2 開口部を閉じた場合の理論固有周期と実験値との比較

Run No	l (cm)	Experimental (sec)	Theoretical (sec)
2-1	130	2.17	2.14
2	170	2.92	2.80
3	172.5	2.92	2.85
4	177.5	3.06	2.93
5	182.5	3.09	3.01
3-1	130	2.16	2.14
2	142.5	2.38	2.35
3	170	2.89	2.80
4	177.5	2.91	2.93
5	175	2.95	2.85
4-1	130	2.18	2.14
2	137.5	2.28	2.27
3	145	2.42	2.39
4	175	3.00	2.89
5	180	3.04	2.97

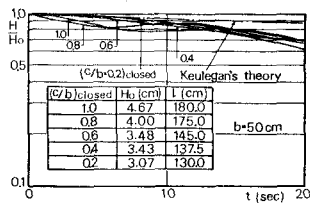
本実験の範囲では、 $h/L_0 \div 0.024$ で図5をみるとほぼ指数関数的に波高が減少することがわかるが、摩擦係数 f について若干の考察を行う必要があろう。進行波に関して、Bretschneider-Reid⁵⁾ が波高減衰式を求め、 f については、岩垣・柿沼^{6),7)} らが、詳細な検討を行っているが、重複波の場合にはそれがみあたらない。そこで、底面や側壁での境界層が乱流境界層にまでは発達していないと考えられるが、い



(1)



(2)



(3)

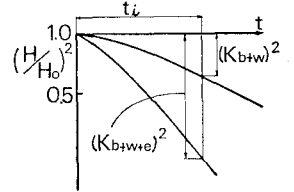
図—6 底面および側壁の摩擦による波高減衰

ちおう式(4.9)が適用できるとして、実験値に最も近いと思われる f の値から減衰曲線を求め、実験結果と比較したものが図—7(1)~(6)である。これらの図から、 f の値は、ほぼ 0.04~0.12 程度になることがわかる。しかし、現地における津波などでは、 h/L_0 の値が本実験の場合よりも、はるかに小さくなることは明らかであり、そのような場合には、波高減衰がさらに急激になり、 f の値について、いっそうの検討が必要となる。

5. damping factor の効果

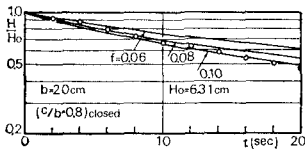
内部粘性の効果については、式(4.1)の α の第2項を

計算すれば求められるが、ほとんど無視できるので、ここでは考えないものとする。いままで、開口部からの波のエネルギー逸散による波高減衰および底面や側壁の摩擦による波高減衰の特性については、別個に述べてきた。それでは、それらのエネルギー逸散量が、港湾全体の

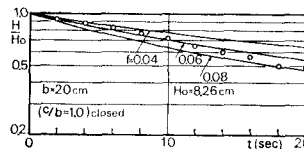


図—8 底面および側壁摩擦の効果を求めるための模式図

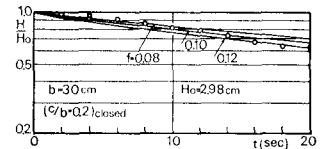
振動系における全逸散エネルギー量に対して、どの程度の割合を占めるかについて考察する。図—8は、第2次モードについて、底面および側壁摩擦の効果を求めるための模式図で、図—6に示した閉領域の波高減衰曲線および同条件での開口部をもつ場合の図—4の波高減衰曲線のそれぞれの縦軸 H/H_0 の代りに $(H/H_0)^2$ をとり、同一図面に描いたものである。図—8は、減衰始点よりの時間 t_i までの底面および側壁の摩擦による波のエネルギーの逸散量と初期波のエネルギーの比で、 K_{b+w+e}^2 は、同時刻までの開口部からの波のエネルギー逸散および底面や側壁の摩擦によるエネルギーの逸散量と初期波のエネルギーの比、すなわち t_i 時刻までの系全体の波のエネルギーの逸散量と初期波のエネルギーの比を表わすことになる。したがって、 $(K_{b+w}/K_{b+w+e})^2$ は系全体の逸散エネルギーに対する底面および側壁の摩擦によるエネルギー逸散の割合を表わす。図—9(1)~(3)は、上述の考え方にに基づき、開口比 c/b と $(K_{b+w}/K_{b+w+e})^2$ の関係を示したもので、図中のパラメータは減衰始点よりの時間 t を周期 T で除している。一部の例外はあるが、 t/T が大きくなり、波高が減少するにつれて、摩擦の効果が大きくなるようである。各港湾幅について $(K_{b+w}/K_{b+w+e})^2$ の値をみると、 $b=20$ cm の場合で、20~65%、 $b=30$ cm で、10~60%、 $b=50$ cm で12~50%である。また、 c/b が0.8で、いずれも極大値になっているが、



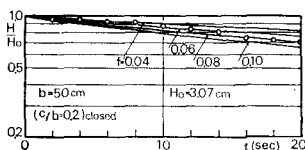
(1)



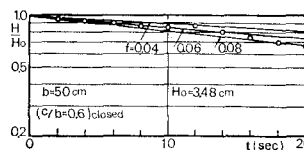
(2)



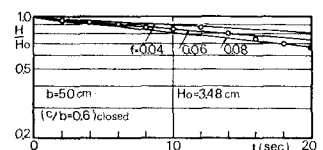
(3)



(4)



(5)



(6)

図—7 式(4.9)と実験値との比較

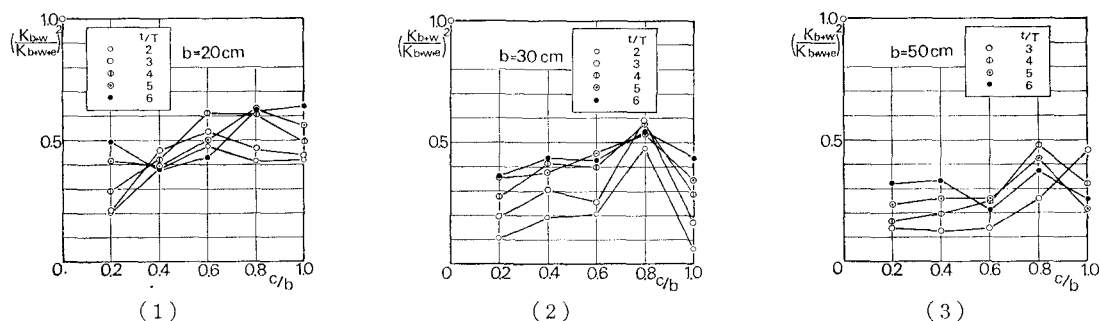


図-9 全逸散エネルギーに対する底面および側壁の摩擦によるエネルギー逸散の割合

この原因についてはよくわからない。

港湾幅が大きくなるにつれて、摩擦の効果は減少しているが、この傾向は Keulegan の式から求められる結果とも一致する。

6. 結 言

以上、波高減衰を種々の角度から考察することによって、湾水振動における波のエネルギー逸散について検討してきたが、得られた結果を要約すれば次のようになる。

(1) 共振時の波高減衰は、基本モードの場合、港湾幅が小さく、開口幅が大きくなるほど減衰が速く、第2次モードでは、逆に開口幅が大きくなると、かえって港湾内に蓄積されたエネルギーが逸散されなくなるおそれがある。

(2) 底面および側壁の摩擦による波高減衰は、港湾幅が小さくなるほど、減衰が大きくなる。また、乱流境界層を仮定した場合の底面摩擦による波高減衰の理論式を導き、水深波長比が小さくなると、波高減衰は指数関数的でなくなることを示した。なお、本実験における摩擦係数 f を調べた結果、0.04~0.12 程度であることがわかった。

(3) 系の全逸散エネルギーに対する底面および側壁の摩擦によるエネルギー逸散の割合は、10~65% 程度で、港湾幅が大きくなるにつれて、湾水の減衰特性は防波堤開口部からの波のエネルギー逸散が支配的となることがわかった。しかし、このような解析では、防波堤で逸散される渦や乱れによる波のエネルギーそのものは評価できないので、今後、直接それを求める方法を考えな

ければならない。

最後に、本研究にあたりご指導を頂いた京都大学工学部岩垣雄一教授、ご激励、ご討議頂いた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ご協力頂いた徳島大学大学院生越智裕、島田富美男両君、当時学部学生の板東政明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による研究の一部であることを明記する。

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. 179~184, 1973.
- 4) Keulegan, G.H.: Energy dissipation in standing waves in rectangular basins, J. Fluid Mech., Vol. 6, pp. 33~50, 1959.
- 5) Bretschneider, C.L. and R.O. Reid: Modification of wave height due to bottom friction, percolation and refraction, B.E.B., Tech. Memo., No. 45, pp. 1~36, 1954.
- 6) 岩垣雄一・柿沼忠雄・宮井 宏：現地海岸における海底摩擦係数について，第12回海岸工学講演会論文集，pp. 35~40, 1965.
- 7) 岩垣雄一・柿沼忠雄：現地海岸の海底摩擦係数について (2)，第13回海岸工学講演会論文集，pp. 21~29, 1966.