

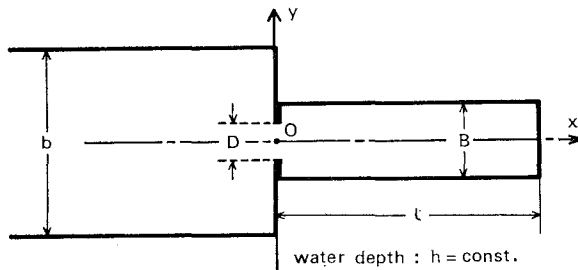
津波防波堤の効果について (2)

堀 川 清 司*・首 藤 伸 夫**・西 村 仁 嗣***

1. 緒 論

外海の長波が海岸線の湾入部に進入すると、顕著な変形を起こす。この波動現象は本来平面的な波高と位相の分布を有している。実際、ある特定の形状の港湾については二次元的な解析を行なった例もあるが¹⁾、そこでは湾口部におけるエネルギー損失が無視されている。したがってとくに湾口部に防波堤が存在するような場合には、解析の結果は実際の現象を十分に説明し得ていない。他に電子計算機を用いて数値計算を行なう方法も研究されている²⁾が、この種の方法は現象に対する理解を深め、それを解明して行くという目的には必ずしも適当でない。また、いずれの場合にも解を得るために相当複雑な過程を経るか、もしくは大量の計算を行なうことは避けられない。

本論文は一次元モデルによって湾内外の波動を近似し、湾口部における水理現象について考察を加えようとする一つの試みである。もとより湾幅が湾長に比して同程度であるか、あるいはそれより大きい場合には一次元的なモデルを設定することは不可能である。ここでは細長い形状の湾を考えることとし、しかも湾口部の水理に主眼を置いたので、湾幅は一樣とした。図—1のような地形モデルを考えるとき、第一の問題点は外海部の幅員 b をどのようにとるかということである。外海部の湾口から十分に離れた領域では、もはや湾内の振動の影響はないと考えられる。したがって実際には湾の存在が影響する限界というものが想定されるが、それをそのまま有

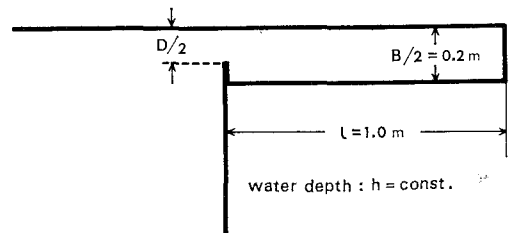


図—1 地形モデル

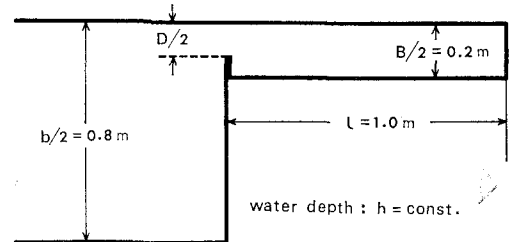
効幅員 b とすることはできない。すなわち一次元モデルにおいては、幅員方向には平均的な水位、ならびに流速を考えることになるので、 b はこの考え方に適合するようなさらに抽象的な量でなければならない。第二の問題点は湾口部において湾内の波動と湾外の波動を結びつける境界条件をいかに与えるかということである。この問題については後節であらためて検討するが、これに関連していわゆる湾口補正の問題が生じて来る。湾長をいかに評価するか、あるいはいかにえればどこを湾口部と考えるかということで、これが第三の問題点である。

2. 水理現象のモデル

まず、前節に述べた一次元モデルの妥当性について検討しておく必要がある。著者らは図—2(a)のような模型湾について実験を行ない、湾内外の水位および流速をくわしく測定した。これは当初幅員 40 cm の模型湾を想定したが、写真撮影の便宜のために現象の対称性に基づいて半分だけを模型化したものである。図—3 は水平方向の流速の鉛直分布の実測例であるが、いずれもほぼ一樣な分布となっており、長波近似の妥当性を示している。図—4 および図—5 は湾内の水位ならびに流速の水平分



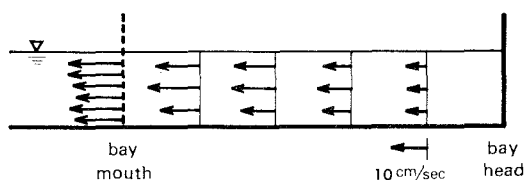
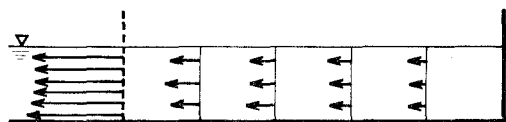
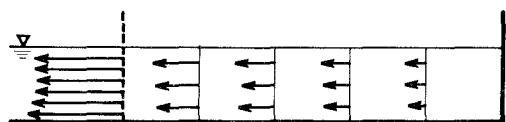
(a) Model-I



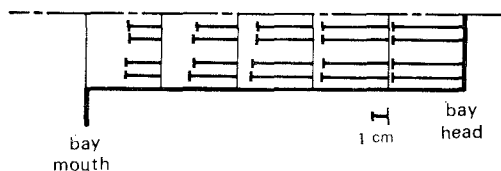
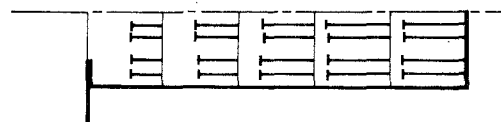
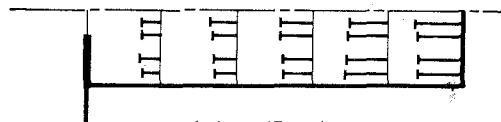
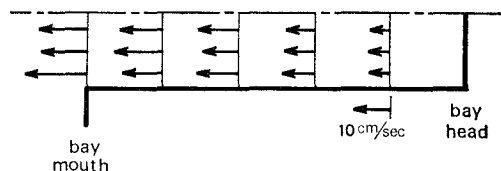
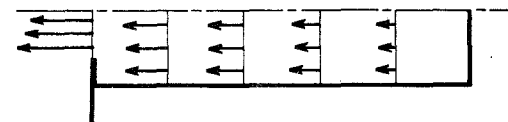
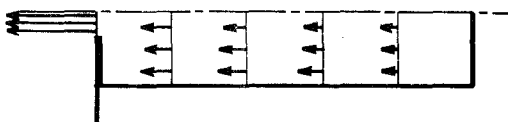
(b) Model-II

図—2 模型湾

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科
 *** 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

(a) $D/B=1$ (b) $D/B=2/3$ (c) $D/B=1/3$ 図-3 鉛直方向の流速分布 ($kl=0.434\pi$)

布であるが、これらの図から水位および流速の分布は湾口のごく近傍を除けば幅員方向にほぼ一様となっていることがわかる。ただし、図-3中の流速は幅員方向に、図-5中の流速は鉛直方向にそれぞれ平均した値である。外海部については図-2(b)に示したように外海部の幅員を湾幅の4倍とした模型で水位を調べた結果、やはり湾口からある程度離れると幅員方向の変化が見られなくなることが確認された。湾前部では図-2(b)中の点線付近を境界として明確な水位の段差が生じ、その両側の領域間に相当量の流れが見られる。したがって、この領域における実際の現象を一次元モデルで表現することは、幅員方向の平均値についてのみ可能である。

(a) $D/B=1$ (b) $D/B=2/3$ (c) $D/B=1/3$ 図-4 水平方向の水位分布 ($kl=0.434\pi$)(a) $D/B=1$ (b) $D/B=2/3$ (c) $D/B=1/3$ 図-5 水平方向の流速分布 ($kl=0.434\pi$)

湾内外の進行波および逆行波はいずれも微小振幅長波とし、速度ポテンシャルの存在を仮定する。沖から岸に向って進んだ波の一部は湾口部で反射し、一部は湾内に進入する。湾内に進入した波は湾奥で完全反射して湾口に向う。湾口部に達した波は一部反射し、一部は湾外に出て沖に向う。波が進行する間に底面の摩擦等によって減衰、もしくは変形することはなく、また、反射や透過を経てもやはり正弦波形が維持されるものとする。以上によって外海から与えられる波が単一周期の正弦波ならば、すべての波が同一周期の正弦波となる。

これらの仮定については実測値をもとに種々検討を加えた。まず、入射波の特性を明らかにするため、湾口部を完全に締め切って外海部各点の水位変動を測定した。その結果、湾前に到達した波はわずかに二次波成分を含んでいるが、湾前 10m の範囲でほとんど変形は見られず、これが壁面の位置で完全に反射していることがわかった。ただし、実験においては波高 1~2 cm, 周期 2~4 sec の入射波を与えた。次に湾口部を開放して湾内外の水位を測定した。この場合、外海部各点の時間的な水位変動は複雑な様相を呈する。岸から沖に向う波は、岸で反射された波と湾奥からの反射波の湾外に逸散する部分が合成されたものとなり、入射波の周期によっては顕著な倍周期数成分を含む。基本周期の 1/2 の周期をもった波は入射波中にわずかに認められるのみで、湾内にはほとんど見られない。したがって、このような波は湾口部で生起するものと推定され、すべての波を正弦波とする前記の仮定は実際の現象を正確に表現していないことになる。一方、湾内では湾奥を腹とする完全な重複波が生じ、水面振動は比較的単純な正弦波形になっている。これは湾水の振動特性によって周期の選択が行なわれた

ためと推定される。ここで、湾内の定常波の位相についてはいくぶん注意を要する。湾奥で反射した波は湾口部に達し、そこでまた一部が反射して再び湾奥に向う。この波の位相は一般には新たに湾外から湾内に進入してくる波の位相と異なるため、それらの合成波の位相も当然入射波のそれとは異なっている。このような位相差は湾長と波長の比によって、正負いずれの場合も考えられ、波長が湾長の整数倍になっている場合にはまったく存在しない。ところが実測によれば湾内の重複波は入射波の位相に対して常にある程度遅れている。目下のところ資料が不十分で量的に明確な議論はできないが、われわれの実験条件では周期によらず、あたかも湾長が3割ほど長くなったかのような位相関係が生じている。しかも、横方向から防波堤を突出させ、湾口部の開口面積を $2/3$ あるいは $1/3$ に減じた場合にも、同じことが起こっているようである。かりにそれが事実であれば、この位相差は湾固有の形状比、すなわち湾幅と湾長の比によって規定されることになり、湾口における境界条件の一部として考慮に入れる必要が生じて来る。

3. 湾口部の境界条件

湾口部では幅員の急激な変化があるため、現象が幅員方向に一様ではなく、一次元モデルで厳密な議論はできない。そこで幅員方向の平均的な水位もしくは流速を考えることによって実際の現象を近似する必要がある。この種の問題においては、湾口部の境界条件をいかに与えるかということが湾内外の波動を決定する最大の要点であり、同時にまたもっとも困難な点でもある。湾口部において流量が連続するという事は当然満たされねばならない条件であるが、この問題を解くためにはさらにもう一つの境界条件が必要である。ここで、水位の連続という条件を与えることは適当でない。この条件は湾口の開口部近傍においてのみ成立するものであって、幅員方向に平均して考えれば湾口部において湾内外の水位は一致するとは限らないからである。ただ、湾口部における水位の連続を条件とした解析で実際の現象に類似の共振特性が導かれる^{3), 4), 5)}ことは興味深い事実である。これはすなわち、湾口部における湾内外の水位の関係が湾内における波高増幅率を決定する1つの要因となることを示唆している。他に、湾口部における湾内外の水位差 $4\eta_0$ と流量 Q_0 の関係を与える公式

$$Q_0 = K S_0 \sqrt{2g4\eta_0} \dots\dots\dots (1)$$

を適用した解析例もある^{6), 7)}。ここに、 K は堰の形状によって決まる流量係数であり、 S_0 は開口部断面積である。各種形状の堰に対する K の値は実験的に検討されているが⁸⁾、それらの実験は緩勾配、一様幅の水路を流れる等流状態の流れの中に堰を置いた場合について行なわれたものである。したがってこれを幅員が変化する水

路中の非定常流にこのままの形で転用することについては検討の余地がある。 K は堰の部分で生じるエネルギー損失とともに、その前後の水位差によって生ずる速度水頭の変化をも含めて決定される係数であって、とくに後者に対しては堰の両側の水路幅員の差異が大きく影響すると思われる。また、非定常運動においては Q_0 と $4\eta_0$ の間の位相の差をも考えねばならない。湾内外の水位変動が緩慢で湾口部の流れの状況が準定常と考えられるような場合には流量係数 K を適宜に与えてこの公式を用いることも可能と思われるが、あらかじめその適用範囲を明らかにしておく必要があろう。実際の現象においては堰の両側で明確な水位差が生じているわけではないので、 Q_0 と $4\eta_0$ の関係を直接実験的に求めることは困難である。したがって、ここでは前述の一次元モデルにおける他の諸量を実験値で与え、湾口条件を逆算するという方法をとることにしよう。

4. 一次元解析

外海部の水位 η は、前節の仮定によって

$$\begin{aligned} \eta &= \hat{\eta} \sin(\theta_\eta - \sigma t) \\ &= a_1 \sin(kx - \sigma t) + a_2 \sin(kx + \sigma t + \pi - \theta) \\ &\dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここに、 a_1 および a_2 はそれぞれ進行波および逆行波の波高、 k は波数、 σ は角周波数である。

これに対して湾内の水位 H は

$$\begin{aligned} H &= \hat{H} \sin(\theta_H - \sigma t) \\ &= A \sin(kx - \sigma t + \theta) \\ &\quad + A \sin(kx + \sigma t + \pi - 2kl - \theta) \\ &= 2A \cos k(l - x) \sin(kl + \theta - \sigma t) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 A は進行波および逆行波の波高、 θ は外海における進行波と湾内進行波の位相差であり、湾奥では完全反射が仮定されている。これらの水位に対応する湾外および湾内の速度ポテンシャル ϕ および Φ はそれぞれ

$$\begin{aligned} \phi &= (2Ag/\sigma) \cos k(l - x) \cos(kl + \theta - \sigma t) \\ &\dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi &= (a_1 g/\sigma) \cos(kx - \sigma t) \\ &\quad - (a_2 g/\sigma) \cos(kx + \sigma t + \pi - \theta) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ただし、長波の領域を考えているので

$$\cosh k(h+z)/\cosh kh = 1$$

とした。

湾外および湾内における水平方向の流速 u および U は

$$\begin{aligned} u &= \hat{u} \sin(\theta_u - \sigma t) = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = (a_1 g k/\sigma) \sin(kx - \sigma t) \\ &\quad - (a_2 g k/\sigma) \sin(kx + \sigma t + \pi - \theta) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U &= \hat{U} \sin(\theta_U - \sigma t) = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \\ &= (2Agk/\sigma) \sin k(l - x) \sin(kl + \theta - \pi/2 - \sigma t) \\ &\dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

湾口部では流量が連続しなければならない。すなわち、湾内外の水深を h とすれば、

$$x=0 \text{ で } Q=Bh\hat{U}\sin(\theta_U-\sigma t) \\ =bh\hat{u}\sin(\theta_u-\sigma t)\dots\dots\dots(8)$$

上式は時刻 t に関係なく成立するので、式(6)および(7)を用いれば、次の関係式が得られる。

$$2BA\sin kl\cos(kl+\theta)=ba_2\sin\theta\dots\dots\dots(9)$$

$$2BA\sin kl\sin(kl+\theta)=ba_1-ba_2\cos\theta\dots\dots(10)$$

波高増幅率 A/a_1 および位相差 θ を与えれば、上式から反射率 a_2/a_1 および外海部の反射波の位相が定まり、結局すべての波動の振幅ならびに位相関係が定まることになる。こうして湾口部における流量 Q_0 と水位差 $\Delta\eta_0$ も容易に求められるが、逆に Q_0 と $\Delta\eta_0$ の関係を与えれば波高増幅率 A/a_1 が得られることは前節にも述べ

たとおりである。共振周期付近の入射波について実測した A/a_1 および θ の値を用い、式(2)および(9)、(10)から外海の波高分布を計算すると図-6のようになる。同図中には外海部側壁に沿った実測波高をも示したが、波高分布が湾口部付近で計算値とかなり様相を異にしているのは当然である。この図から、実際の反射波は計算値より小さいことがわかる。

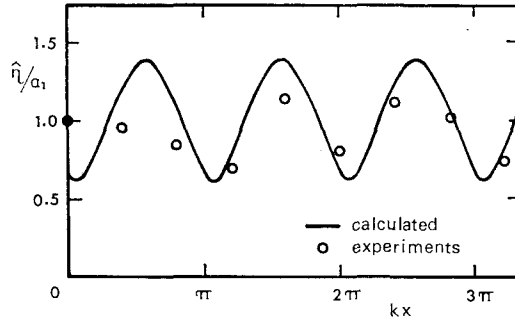
5. 湾口部における水位差と流量の関係

本節では湾口部における諸量の相関について考察を加える。湾口部外海側の水位 η_0 ならびに湾内側の水位 H_0 はそれぞれ式(2)、(3)において $x=0$ とすれば得られる。

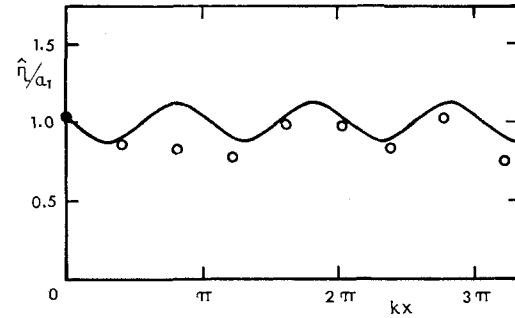
$$\eta_0=\hat{\eta}_0\sin(\theta_{\eta_0}-\sigma t) \\ =a_1\sin(-\sigma t)+a_2\sin(\sigma t+\pi-\theta)\dots\dots\dots(11)$$

$$H_0=\hat{H}_0\sin(\theta_{H_0}-\sigma t) \\ =2A\cos kl\sin(kl+\theta-\sigma t)\dots\dots\dots(12)$$

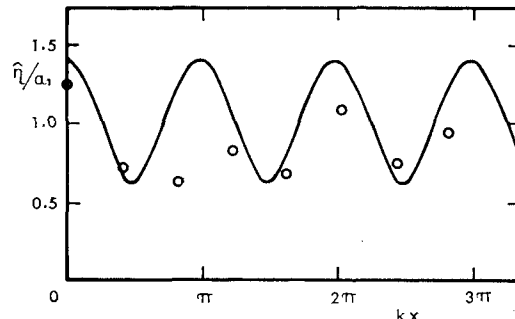
式(9)、(10)および(11)から湾外の反射波および合成波が求まるが、 $\theta/kl=0.3$ としてこれらを実際に計算した結果が図-7および図-8に示されている。湾外の振動は湾口部における流速変動によって定まるので、 $\theta\neq 0$ の場合には



(a) $D/B=1$

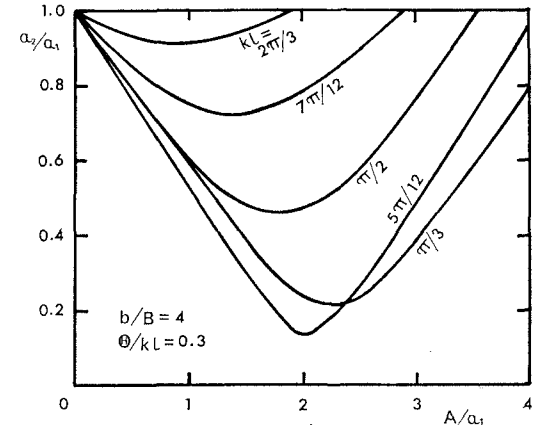


(b) $D/B=2/3$

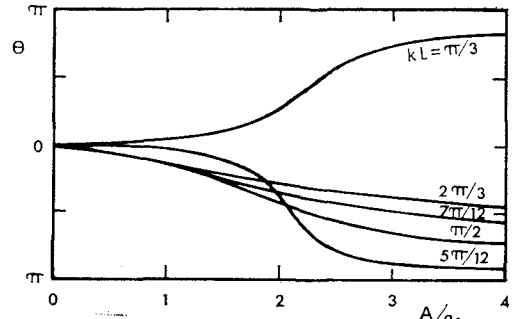


(c) $D/B=1/3$

図-6 外海部の波高分布($kl=0.397\pi$)



(a) 振幅



(b) 位相

図-7 外海部の逆行波(計算値)

あり、流量の方が常に遅れている。図—10 (b) を見ると $4t$ と 4η の間には相関があるように思われる。図—10 (a) に式(1)の関係を実線で示したが、ここで用いた $k=0.7$ という値はわれわれの実験で湾口部に置かれたような薄い板状の堰に対して妥当とされているものである。この図から見る限りでは、変動の最大値について式(1)で示されるような関係が認められる。

6. 結 論

港湾内の海水振動を一次元的にとり扱おうとすると、3つの問題点があることは序論においてすでに述べたところである。本論文ではそのうちの湾口条件の問題に主眼を置いて検討を加えて来たが、本来これらは別個に扱える性質のものではなく、相互に密接な関連性を持っていることは前節までの議論からも推測に難くない。湾口部の水理現象は当然平面的な拡がりをもっている、ここでは直接その状況を調べることを避け、実際に生じている湾内外の波動から湾口部における条件を逆に推測しようと試みた。その結果として湾口部の水位差と流量の相関を例示し、従来湾口部で与えられていた

境界条件が不十分であることを明らかにした。これらの関係を湾口補正もしくは外海領域の有効幅員の問題との関連においてさらに厳密に調べるためには、より多くの実測資料を積み重ねて行く必要がある。

なお、本実験に際しては中央大学大学院 村野忠夫氏の御協力を戴いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 合田良実：長方形および扇形の港の副振動について，第10回海岸工学講演会講演集(1963)
- 2) 伊藤喜行・谷本勝利・木原力：長周期波に対する防波堤の効果に関する研究(第4報)，港湾技術研究所報告，第7巻，第4号(1968)
- 3) Defant, A. : Physical Oceanography, Vol. II (1961).
- 4) Le Méhauté, B. : Theory of Wave Agitation in a Harbour, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of ASCE, Vol. 87, No. HY 2 (1961).
- 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(1969)
- 6) 梶浦欣二郎：湾水振動におよぼす防波堤の効果，東京大学地震研究所集報，第41号(1963)
- 7) Love, R. W. : Tidal Response of a Bay with a Constricted Opening to the Sea, Thesis for M. S., Texas A and M College Dept. of Oceanogr (1959).
- 8) Chow, V. T. : Open-channel Hydraulics (1959).