

長周期波による矩形湾内の振動と湾口条件

岩崎 敏夫*・真野 明**・長谷川 明***・前原 隆生***

1. 緒 論

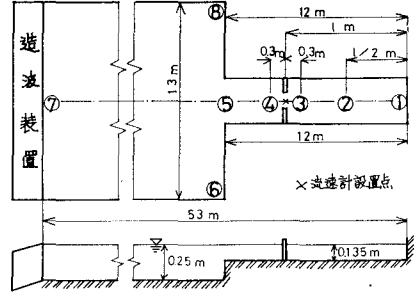
津波が矩形湾のような単純な形状の湾に侵入する場合の湾水振動については従来多くの理論的、あるいは実験的研究があるが、Helmholtz 方程式を用いる 2 次元問題では水深の影響が取扱えないので、むしろ幅の変化する 1 次元問題として適当な外洋および湾口条件、さらには防波堤効果を仮定し、梶浦の方法による特性曲線法を用いることが好ましいとされてきた。しかし湾口条件設定の場合の湾外有効幅、湾口補正に必要な湾長補正長さおよび防波堤の流量係数については実験によって正しく推定する根拠を与えるほかに方法がない。従来津波の実験は水深、周期、波形勾配において津波と考えられない程度のもので行なわれた例しかなく、上述の問題点の解析はできなかった。

東北大学ではこの点に着目して昭和 38 年以来長波の研究用造波装置の完成につとめていたが、現在幅 15 m、長さ 50 m の大型平面水槽による津波の実験が可能となり、周期が 10~60 秒であっても自動制御装置によって造波装置のところでの反射波を消去させることができ、かなり規則的な入射波をうることができるようになった^{1),2)}。

東北大ではこの装置を用いることによって物理実験を行ない、その成果をすでに発表した^{3),4)}、今回は梶浦の方法による 1 次元モデルの数値実験を行なうことによって、この実験結果と比較し上述の問題の解明につとめるとともに、防波堤の位置および開口幅による振動特性の変化ならびに防波堤外側領域の振動特性について研究を行ない、多くの興味ある結果をえたのでここに報告する。

2. 物理実験概要および数値実験方法

図—1 のように外湾を幅 13 m、水深 0.25 m、内湾を幅 $b_0=3$ m、水深 0.135 m、長さ $l_0=12$ m とし、湾内に防波堤を設け、その開口幅 a 、港の長さ（防波堤内側の部分の長さ） l とした場合、 l を 12 m（湾口）、10 m



図—1 実験水槽

8 m、6 m の 4 種類、開口比 a/b_0 を 0.5, 0.2, 0.1, 0.05 の 4 種類にとり都合 16 種類および防波堤のない場合の計 17 種類とした。図中 ①~⑧ に波高計を設置し、防波堤の開口部中央×点での流速を求めた。⑥または⑧での波高の 1/2 を外洋波とし周期 10~60 秒の 20 個の規則周期波を、外洋波の波高が 2 cm になるように造波し、振動特性を調べたものである。

一方数値実験は、一次元理論の基礎方程式より

$$\partial Q / \partial t + bgh \cdot \partial \zeta / \partial x = 0$$

$$\partial Q / \partial x + b \cdot \partial \zeta / \partial t = 0$$

ここで、 ζ は静水面上の水位、 Q は流量である。

特性曲線法より

$$dx/dt = c \text{ 上で } Z^+ = Q/bc + \zeta = \text{const.}$$

$$dx/dt = -c \text{ 上で } Z^- = Q/bc - \zeta = \text{const.}$$

の関係がある⁵⁾。ここで $c = \sqrt{gh}$ は長波の波速である。

境界条件として、沖（測点⑦）では $\zeta = \sin \omega t$ 、流速 $u = (c/h) \cdot \zeta$ を与えた。湾口条件としては、流量と波高の連続条件より、

$$Z_1^- = -\frac{1-\alpha}{1+\alpha} Z_1^+ + \frac{2\alpha}{1+\alpha} Z_2^-$$

$$Z_2^+ = \frac{2}{1+\alpha} Z_1^+ + \frac{1-\alpha}{1+\alpha} Z_2^-$$

ここで、添字 1, 2 はおのおの外湾、内湾を表わし、 $\alpha = b_2 c_2 / b_1 c_1$ である。

次に防波堤条件は、流量式を用いた。防波堤開口部での流速 U は

$$U = \pm k \sqrt{2g \Delta \zeta}$$

ここで、 k は流量係数、 $\Delta \zeta$ は防波堤前後の水位差で

* 正 会 員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 東北大学大学院学生 工学研究科

*** 東北大学研究生

ある。これを特性曲線を使って書きなおすと、

$$Z_4^* = \pm 4K(\sqrt{1 + |Z_3^* + Z_4^*|/K} - 1) / (1 + \alpha_1) - Z_4^*$$

$$Z_3^* = \pm 4K\alpha_1(\sqrt{1 + |Z_3^* + Z_4^*|/K} - 1) / (1 + \alpha_1) - Z_3^*$$

$$K = h_3 k^2 A_0^2 (1 + \alpha_1)^2 / 2 A_3^2 \alpha_1^2, \quad \alpha_1 = b_4 c_4 / b_3 c_3$$

ここで、添字 3, 4 はおのの堤外, 堤内を表わし, A_3 は堤外の断面積, A_0 は防波堤の開口面積である。

湾奥条件は $Q=0$ である。

計算は、東北大学大型電子計算機 NEAC-シリーズ 2200・モデル 700 によった。

3. 実験結果および考察

(1) 湾口条件の決定

湾奥(測点①)の波高(全振幅)をさきに説明した外洋波の波高で割った値を湾奥での増幅率 A とし、これを造波した規則周期波の周期 T に対しプロットして模型実験による振動特性を求め、これと、前節の方法による計算値のそれとを比較して、湾口条件を求める。なお計算値における外洋波としては、測点⑦での全振幅($H=2$ cm)を用いた。

図-2 は防波堤のない場合である。この中で特に興味のあるのは共振状態であるが、模型の湾長12mで計算すると実験値の共振周期 50 秒よりかなり短い周期にピークを生ずる。そこで次の Miles⁶⁾ らの補正式を用いた。

$$\Delta l_0 = [1.051 + \ln\left(\frac{l_0}{b_0}\right) + \ln\left\{\frac{b_0}{a} \operatorname{cosec}\left(\frac{\pi}{2} \frac{a}{b_0}\right)\right\}] \times \frac{b_0}{\pi} \dots\dots\dots (1)$$

その結果 $\Delta l_0 \approx 2$ m となるので、湾長を補正して 14m としたが、これによって 1 次モード, 2 次モードともよく一致することがわかる。しかし $T=30$ 秒~50 秒において

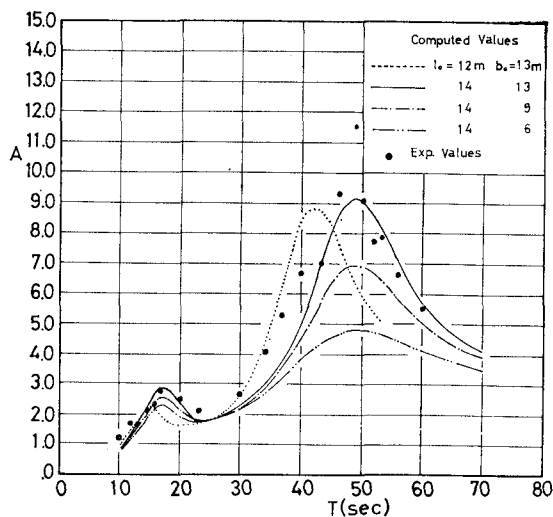


図-2 湾奥振動特性

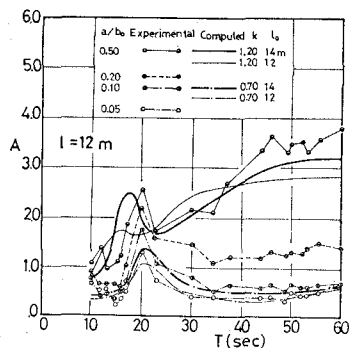


図-3 湾奥振動特性

は実験値が若干大きい A を与えた。

次に湾口での反射, 透過の条件を考える場合, 一次元理論では、幅方向の平均値を考えていることになるので外洋に対しては有効幅 b_e をいかにとるかが問題である。そこで、湾長 14 m の場合について、 $b_e=6$ m, 9 m, 13 m とかえて計算した結果、図-2 に示すようになり実際の模型の外洋幅 13 m が最も適当であることがわかった。ただし、われわれは別の実験では湾入の地形的影響によっては、湾口幅に等しくとらなければならないということを見いだしている⁷⁾。

(2) 防波堤の位置および開口比による振動特性の変化

図-3, 図-4(a)~(c)は湾口および湾内に防波堤を設置した場合の振動特性を示す。これを図-2 と比較すると、明らかに 1 次モード付近の増幅率は減少し、その程度は開口比 a/b_0 の値が小さくなるほど著しい。これに対し、2 次モード付近では変化が少なく、開口比を小さくしていくと 2 次ピークのみが識別できるようになる。

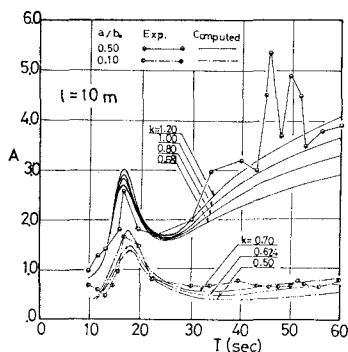


図-4(a) 湾奥振動特性

次に数値実験を行なうにあたり、式(1)は a/b_0 の関数でもあるので、開口比により種々変化させる必要があるが、計算のケースが非常にふえるので、今回はさきにえた $l_0=14$ m をすべての湾内防波堤のケースに仮定した。

図-3に、 $l=12\text{ m}$ の場合の、 $a/b_0=0.5, 0.1$ に対して、おのおの $k=1.2, 0.7$ として計算した結果を曲線で示す。このうち太線は $l_0=14\text{ m}$ と補正湾長を用いた場合であり、細線は $l_0=12\text{ m}$ の場合であるが明らかに $l_0=14\text{ m}$ とした方が実験値とよく合う。しかし2次ピークの共振周期が $a/b_0=0.5$ の場合に、実験値と2秒ほどずれてくるほか、計算では開口比により共振周期がずれており実験値との差異を示した。

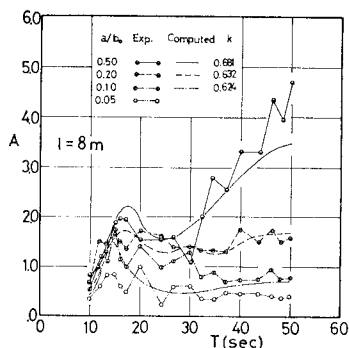


図-4(b) 湾奥振動特性

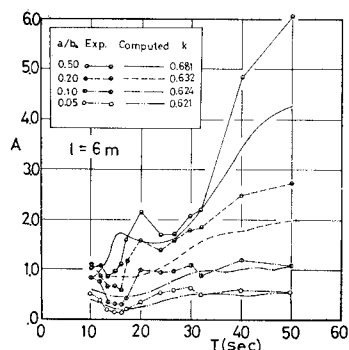


図-4(c) 湾奥振動特性

次に図-4(a)は $l=10\text{ m}$ の場合であるが、 k の値による、増幅率 A の変化を示した。 $a/b_0=0.5$ の場合、 $k=1.2, 1.0, 0.8, 0.681$ としたが、実験値の40~50秒のピークを除けば $k=1.2$ が適当と考えられる。また k の影響は40秒以後長周期のところで大きいことが注目される。 $a/b_0=0.1$ の場合には、 $k=0.7$ が適当な値であった。ここで $k=0.681, 0.624$ の値は Weisbach⁸⁾ の実験結果より得たものである。

図-4(b), (c)はおのおの $l=8\text{ m}, 6\text{ m}$ の場合であるが k はいずれも上記 Weisbach の表の値を用いた。 $l=8\text{ m}$ の場合には、2次モードのピークがほぼ一致する。 $l=6\text{ m}$ では $a/b_0=0.5$ のピークはずれるが、 $a/b_0=0.05$ では、よく実験値と合うことがわかる。

以上、同じ開口比でも、防波堤の位置により、実験値

に適合するような流量係数は変動するが、 $a/b_0=0.5$ の場合には1.0~1.2のオーダー、 a/b_0 が0.1以下では0.6~0.7のオーダーであるといえよう。

(3) 防波堤外側領域の振動特性

湾内に防波堤を設置した場合、防波堤の外側の領域は一つの振動系となっており、そこでの振動は防波堤内側の振動系、あるいは湾全体としての振動系の影響を受けるので興味深い問題である。そこで防波堤の外側30 cmでの波高記録(測点④)よりこの波を外海の波高でわって、それを防波堤外側の増幅率とした。図-5(a)は、 $l=6\text{ m}$ の場合であるが、開口比が大きいとき ($a/b_0=0.5$) は、防波堤における拘束が小さいので、湾全体としての振動が卓越し、防波堤のない場合の共振周期(50秒)付近の増幅率が高くなっており、開口比が小さくなると防波堤前面での反射率が高くなるので、防波堤を后背壁とする全開矩形湾の共振特性が、湾全体の振動特性に重なって周期28秒(実験では24秒)に6.1という高いピークを記録する。 $a/b_0=0.2$ はちょうどその中間で両者がつり合った状態といえよう。次に図-5(b)はこの外側領域がない場合 ($l_0=14\text{ m}$ では外側2 m) すなわち湾口防波堤の場合であって、開口比が変化しても増幅率は大きく変わらないことが確認された。

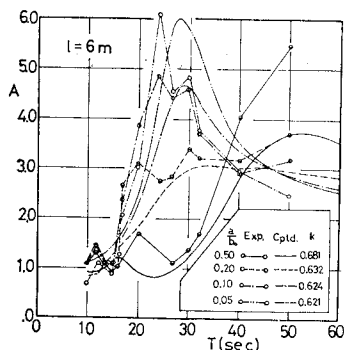


図-5(a) 堤外振動特性

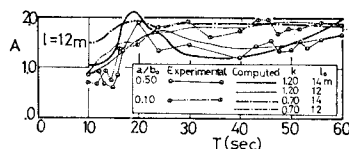
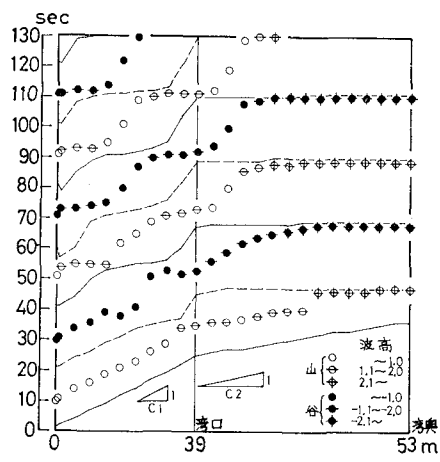


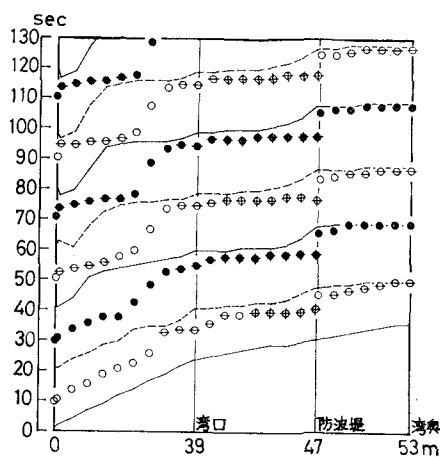
図-5(b) 堤外振動特性

(4) 水位および流速の伝播

これまで湾奥と防波堤の位置での振動特性を述べ、ほぼこの計算方式により妥当な結果をうることがわかったので、外湾内湾全体の水位および流速の伝播の様子を計算結果より図-6に示す。横軸には測点⑦からの距離を縦軸には時間を示してある。○印、●印はおのおの各点での時間波形の山および谷を表わし、実線は流速が正に

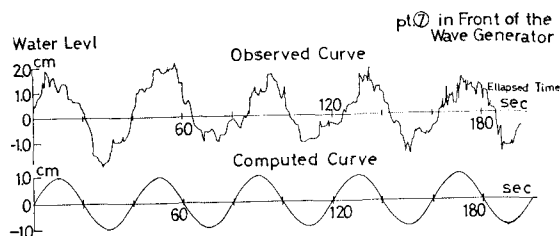
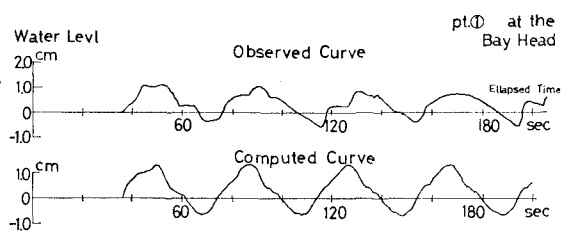
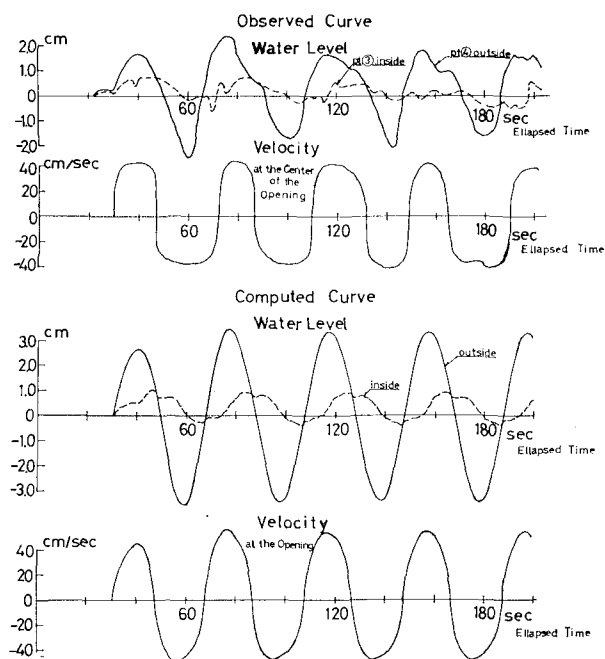


(a)



(b)

図-6 波高および流速の伝播

図-7 入射波形 ($T=40$ sec, $H=2$ cm, $l=6$ m, $a/b_0=0.10$)図-8 湾奥波形 ($T=40$ sec, $H=2$ cm, $l=6$ m, $a/b_0=0.10$)図-9 防波堤波形 ($T=40$ sec, $H=2$ cm, $l=6$ m, $a/b_0=0.10$)

変わる境を、破線は正から負に変わる境を示している。防波堤のない場合(図-6(a))は測点⑦で波高と流速を同位相で与えた波が、湾奥で反射して定常波を形成しており、湾奥付近では一様に流速の位相が、波高の位相に比べ1/4周期だけ遅れている様子がわかる。一方防波堤($l=6$ m, $a/b_0=0.1$)を設けた場合を図-6(b)に示すが、ここでは防波堤前面で反射した波が防波堤の外側領域で定常波を形成しているが、堤内での定常波と接続するために、防波堤の内外での波形が位相差を生じている。

この場合の入射地点(測点⑦)、湾奥部(測点①)、防波堤の内外(測点③、④)での時間波形を、実験値と計算値について、図-7~9に対比させたがいずれも実験値をよく表わしていることがわかる。すなわち防波堤部分においては、堤内外の波形の位相差が、両者とも10秒程度であること、流速の位相がほぼ堤内外の波高差45°と同位相であること、防波堤での開口比を小さくすると、湾奥での波形の振動レベルが上昇することなどが指摘

できる。

4. 結 論

本研究によって、有効幅、湾口条件、流量係数について役に立つ資料がえられ、1次元特性曲線法による計算がかなり有効なことがわかったが、また防波堤の存在や、湾内における水位、流速の伝播の仕方についても興味ある結果をうることができた。

しかし、詳細な論議を行なえば、流量係数についてなお検討を要するし、また反射波のための局所的擾乱の影響についても問題点が残っている。津波の湾内変形の問題は、その他にも分散効果や遡上があわせ考慮されるべきであろう。これらは今後の課題と考えられる。

最後に本研究を行なうにあたり、東北大学助手 佐藤道郎氏には研究遂行上種々の点で援助を受けた。また本研究は昭和47年度文部省科学研究費補助金「浅海域における長周期波の変形と陸上遡上に関する研究」(代表者 岩崎敏夫)に費用の一部の助成をうけた。ここに記して厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩崎敏夫・楊 沢民：長波の研究用造波装置とその特性について(1)，第13回海岸工学講演会講演集，1966
同 上(2)，第14回海岸工学講演会講演集，1967
- 2) 岩崎敏夫・富樫宏由・佐藤栄司：津波の汀線における水理特性と陸上遡上，第17回海岸工学講演会論文集，1970
- 3) 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集，1971
- 4) Toshio Iwasaki : Laboratory study on harbour oscillations due to tsunami wave, Abstracts of 13th Conf. on Coastal Engineerig, July, 1972
- 5) 梶浦欣二郎：湾水振動におよぼす防波堤の効果，地震研究所彙報，第41号，1963
- 6) Miles and Munk : Harbor Paradox, Proc. ASCE, Journal of Waterways and Harbors Division, 1961
- 7) 岩崎敏夫・森河久・真野明：津波の湾内変形に関する実験的研究，土木学会第28回年次学術講演会講演集，1973
- 8) 物部長穂：水理学，昭和25年版，p. 136