

港の水位上昇に関する実験的研究

神 瀬 哲*・菅 原 輝 男**

1. 緒 言

砕波や風の吹き寄せ現象によって港内の平均水位の上昇現象が起こることがある。実際に小型漁船の利用するような小漁港において港内水位の異常な上昇によって岸壁が洗われるような場合もある(写真—1)。単に岸壁が洗われないようにするためには岸壁の天端を高くすればよいが、反面それは漁船の利用上からみると好ましくない。したがって、適切な岸壁天端高を決定するためには港内水位上昇量の把握が必要である。そこで、このような観点から砕波による港内水位上昇現象について実験的研究を行った。



写真—1

Longuet-Higgins & Stewart¹⁾ は radiation stress の効果によって砕波点より陸側では平均水位の上昇 (wave set-up) が起こることを理論的に示している。その後、一様斜面上の平均水位の上昇に関する研究には Bowen²⁾、豊島ら³⁾、佐伯ら⁴⁾、三井ら⁵⁾の研究がある。砕波帯内にある港の水位上昇もこの radiation stress の効果によって起こるものと考えられる。そこで、従来の wave set-up に関する研究成果と今回の港内水位上昇の実験結果とを比較検討し、港内水位上昇特性

を明らかにした。

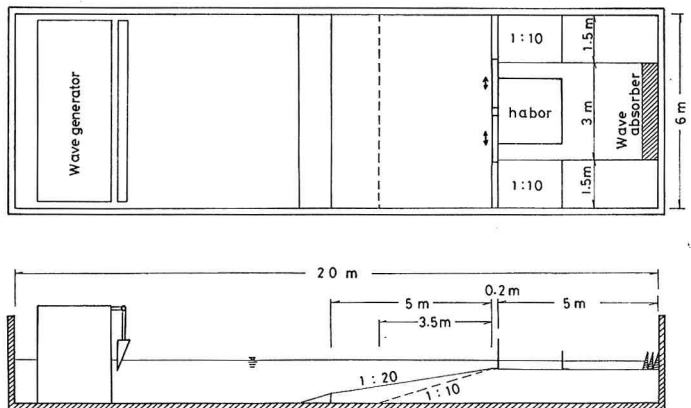
また、波浪の不規則性などのため港内水位上昇現象に伴い港口での急激な戻り流れや港内水位の振動現象が起こることがある。このため漁船の艦綱が切れ漁船が損傷することもある。これらの現象は港外のエネルギーが急変するために起こるもので、港外エネルギーの変化に対する港内水位の応答特性に関係する。そこで、水位差による港内水位の振動実験から港内水位の応答特性と港の形状特性との関係について検討した。

本報では、砕波による港内水位上昇の特性と港内水位の応答特性とについて報告する。

2. 実験装置と実験方法

実験は、図—1 に示すような長さ 20 m、幅 6 m、深さ 0.8 m の平面水槽を使用して行った。この水槽の一端には港の模型(鋼製L型アングル)を設置するための水平床とその前面に勾配が 1/20 および 1/10 の斜路とをモルタルで製作した。なお他端にはプランジャー式造波機が設置されている。

砕波による港内水位上昇実験(実験 I)は、波を起こす前の水位を基準として波を起こしたときの港内水位の変化を測定した。波高の測定は容量式波高計を用い砕波点より沖側で移動測定し微小振幅波理論に基づいて沖波波高 H_0 に換算した。港内水位の測定はサーボ式水位計



図—1 実験施設

* 水産庁漁港部建設課

** 正会員 農林省農業土木試験場水産土木部

を用い港の隅角部の2点で測定した。なお、波動による水面変動を除去するため水位計の回りをサンフレックスを詰めた消波カゴでとり囲んだ。

水位差による港内水位振動実験(実験II)は、港口をふさぎ港内水位を所定の水位差 η_0 まで上昇させ、その後港口を開放したときの港内水位の変化を測定した。

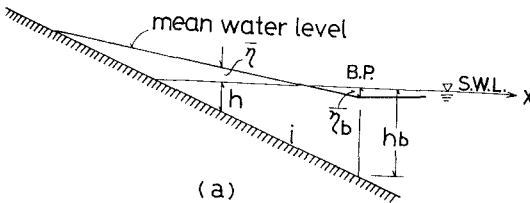
実験条件を表一に示す。

表一 実験条件

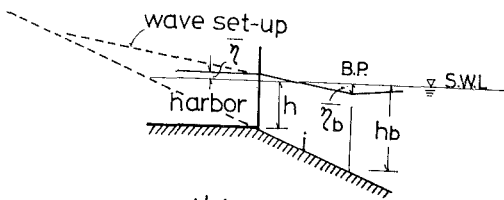
| | | |
|----------------|--------------|--|
| 実験 I | 港内形状 | 200×200, 100×100 cm |
| | 港口幅 | 20 cm |
| | 水底勾配 | 1:20, 1:10 |
| | 港内水深 | 2, 4, 6, 8 cm |
| 波条件 | 周期 | 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4 sec |
| | 波高 H_0 | 1~12 cm, (5~8 step) |
| 実験 II | 港内形状 | 200×200, 150×150, 100×100, 200×100, 100×200, 150×100, 100×150 cm |
| | 港口幅 | 10, 20, 30, 40, 50 cm |
| | 港口厚 | 1, 10, 20, 40, 100 cm |
| | 港内水深 | 4, 8, 12 cm |
| 初期水位差 η_0 | 5, 10, 15 mm | |

3. 港内水位上昇について

Longuet-Higgins & Stewart は radiation stress の効果によって平均水位の変化が起こることを理論的に示している。いま、図一2(a)に示すような一様勾配の斜面に波が進行する場合には、沖から砕波点に近づくにつれて radiation stress は増大し、それ以後岸に近づくにつれて radiation stress は減少する。その結果、砕波点では平均水位の下降(wave set-down)が起こり、砕波点以浅では平均水位の上昇(wave set-up)が起こる。そこで、図一2(b)に示すような斜面上の水深 h のところに港がある場合の港内水位上昇量は港がない場合の斜面



(a)



(b)

図一2 座標系

の同じ水深での wave set-up で説明できるものと考えられる。

従来の wave set-up に関する研究成果については、図一2(a)に示す座標系において Longuet-Higgins は砕波点以浅での水面勾配として次式を示している。

$$d\bar{\eta}/dx = -K \cdot dh/dx \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\bar{\eta}$: wave set-up, h : 静水面下の水深, K : 海底勾配や波の諸元に関係する係数である。この K の値については、Longuet-Higgins は砕波後の波高 H と水深 h とに孤立波理論による $h=1.3H$ の関係から $K=0.22$ を得ている。Bowen は砕波後の波高 H が水深 $(h+\bar{\eta})$ と比例するという仮定、すなわち、 $H=\gamma(h+\bar{\eta})$ から係数 K に対して次式を導いた。

$$K=1/(1+8/3\gamma^2) \dots\dots\dots (2)$$

上式の係数 γ については、三井らが Bowen, Putnum の実験結果から次の2式を求めている。

$$\gamma=0.90 H_0/(\bar{\eta}_b+h_b)-0.06 \dots\dots\dots (3. a)$$

$$\gamma=1.03 H_0/(\bar{\eta}_b+h_b)-0.08 \dots\dots\dots (3. b)$$

豊島らの水底勾配が 1/20 および 1/30 の実験結果によれば K の値としてそれぞれ 0.084 および 0.108 となっている。また、佐伯らによれば K の値は H_0/L_0 に比べ水底勾配の効果が非常に大きいとし、次式を示している。

$$K=3.85S+0.015 \dots\dots\dots (4)$$

wave set-up $\bar{\eta}$ は式(1)を積分して次式を得る。

$$\bar{\eta} = -Kh + \bar{\eta}_s \dots\dots\dots (5)$$

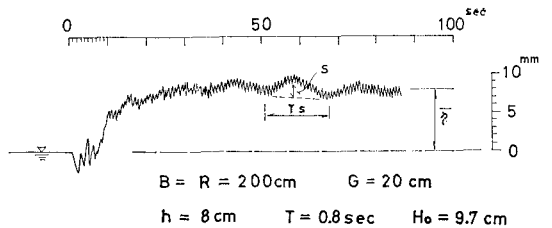
ここに、 $\bar{\eta}_s$ は静水時の汀線における wave set-up を示し、砕波点での値、 $h=h_b$, $\bar{\eta}=\bar{\eta}_b$ から $\bar{\eta}_s=\bar{\eta}_b+Kh_b$ となる。したがって、 $\bar{\eta}$ は次式で表わすことができる。

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}_b + K(h_b - h) \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\bar{\eta}}{H_b} = \frac{\bar{\eta}_b}{H_b} + K \left(1 - \frac{h}{h_b}\right) \left(\frac{h_b}{H_0}\right) \left(\frac{H_b}{H_0}\right)^{-1} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、set-down $\bar{\eta}_b$ は次式となる。

$$\frac{\bar{\eta}_b}{H_b} = -\frac{1}{32\sqrt{2}\pi} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1/2} \left(\frac{h_b}{H_0}\right)^{-2/3} \left(\frac{H_b}{H_0}\right)^{-1} \dots\dots\dots (8)$$



図一3 測定記録の一例

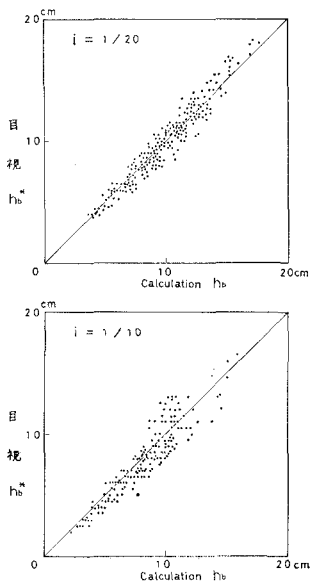


図-4 砕波水深の比較

今回の実験では、波の周期 T および波高 H_0 、港内水位変化に対して定常状態時の上昇量 \bar{h} 、振動振幅 S 、振動周期 T_s を求めた (図-3)。砕波点での諸量については砕波点の目視観測結果から砕波水深 h_b^* を求めた。この h_b^* と新砕波指標⁹⁾ から求まる h_b とを比較してみると 図-4 に示すようにほぼ h_b と h_b^* とは一致しているため、以下の考察において砕波点での水深 h_b 、波高 H_b は新砕波指標の値を使用する。

港内水位の変化、すなわち定常状態での水位上昇量は港の形状条件にはあまり関係せず波の諸元によって変化する。一般に波高が小さく非砕波のときには港内水位は下降し、港の前方で砕波するようになると波高とともに港内水位は上昇する。そこで、港内水位が下降から上昇

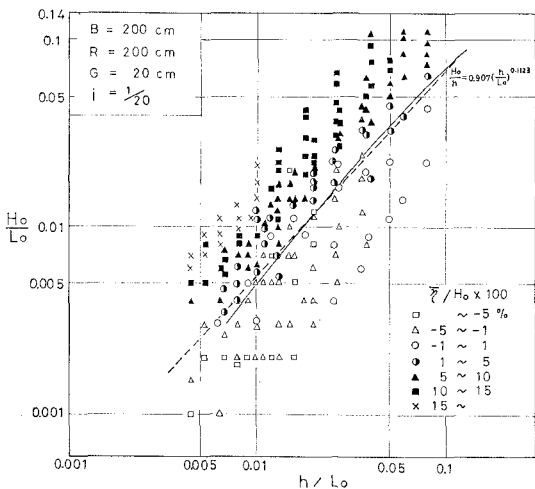


図-5 港内水位上昇限界

に移る境界を港内水位上昇限界と定義すると、これは波の周期 T 、波高 H_0 、港内水深 h などによって異なる。これを示したものが 図-5 である。これから明らかなように港内水位が上昇する場合と下降する場合はほぼ図中の破線のように一つの直線を境に二領域に分けられる。これに新砕波指標から求めた砕波点での値を入れたのが図中の実線でほぼ前出の破線と一致している。したがって、砕波点が港内水位上昇限界であるといえる。

次に、今回の港内水位上昇量と従来の wave set-up に関する研究成果とを比較したものが 図-6 である。これによると測定値にばらつきはあるが、岸に近づくにつれてほぼ直線的に港内水位上昇量が増大する傾向は

- Experiment $i = 1/20$
- Higgins et al. $K = 0.22$
- - - Mitsui et al.
- · - Saeki et al. $K = 3.85S + 0.015$
- Toyoshima et al. $K = 0.084$

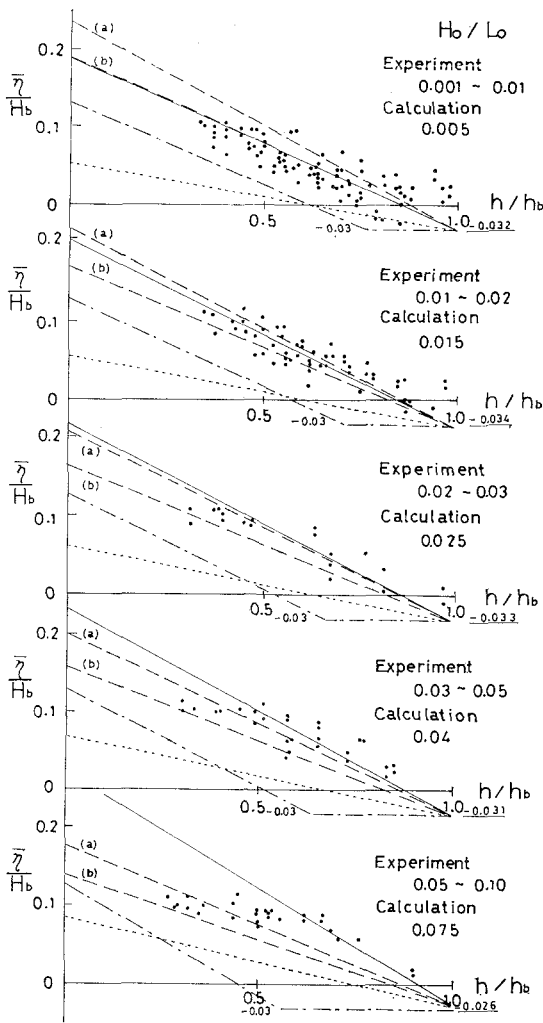


図-6 (a) Wave set-up との比較

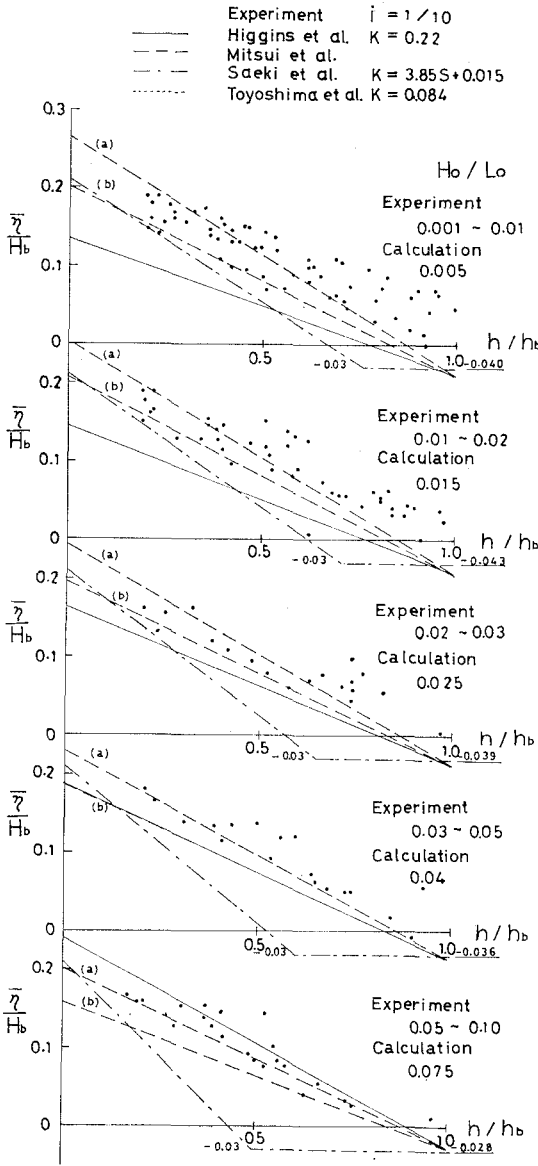


図-6 (b) Wave set-up との比較

wave set-up の傾向と一致している。しかし、上昇する位置や上昇量は一致しているとはいえない。一般に港内水位上昇量の方が若干大きな値となり、砕波点で set down は起こらない。

図-7 は 図-6 の H_0/L_0 別の測定結果を水底勾配ごとにまとめたもので、 H_0/L_0 に関係なくほぼ一致して水底勾配の急な方が港内水位上昇量は大きくなっている。すなわち、 $\bar{\eta}/H_b$ は波の諸元には関係せず水底勾配のみに関係し、 h/h_b によって直線に変化するといえる。図中の破線は港内水位上昇は砕波点から起こるとして最小二乗法によって求めたものである。

したがって、一般に $\bar{\eta}/H_b$ は次式で表わせる。

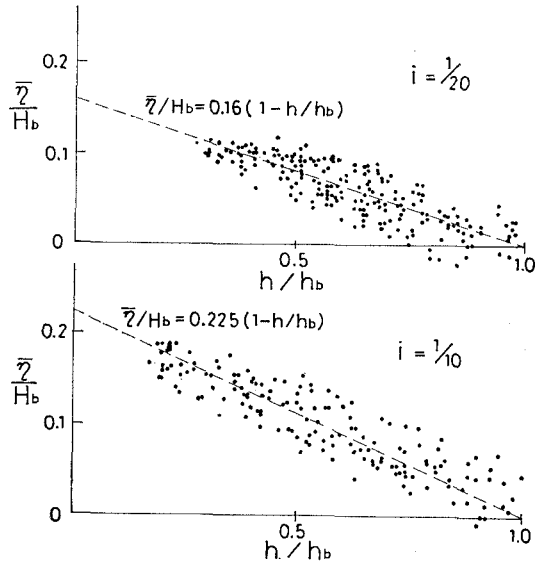


図-7 港内水位上昇

$$\bar{\eta}/H_b = C(1-h/h_b) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 C は水底勾配に関する係数で、今回の実験では、水底勾配 1/20, 1/10 に対してそれぞれ 0.16, 0.225 となった。

汀線では、式 (9) において $h=0$ として次式を得る。

$$\bar{\eta}_s/H_b = C \dots\dots\dots (10)$$

また、式 (7) において $\bar{\eta}_b=0, h=0$ とおけば、

$$\bar{\eta}_s/H_b = K (h_b/H_0) (H_b/H_0)^{-1} \dots\dots\dots (11)$$

となる。式 (10), (11) より係数 K は

$$K = C(H_b/H_0) (h_b/H_0)^{-1} = C(H_b/h_b) \dots\dots\dots (12)$$

となり、 H_0/L_0 によって変化することになる。すなわち H_0/L_0 が大きくなると K の値は小さくなる。

4. 港内水位の応答特性について

波の不規則性などのため砕波帯内の平均水位が変動することはサーフピットとして知られている。港内水位上昇現象においても波の不規則性などのため港内水位と港外水位とにエネルギー差が生じ港内水位の振動現象が起こる。この運動は港内の海水全体の運動となるため港口において大きな流れとなり、このため漁船が損傷する場合がある。この振動現象は港外のエネルギー変化に対する港内水位の応答特性に関する。そこで、港内水位の応答特性と港の形状特性との関係について検討する。

いま、図-8 に示すような座標系に対して、ある時刻 ($t=0$) で港の内外の水位に η_0 の水位差があるとし、その後の港内水位の変化について考える。

そこで、港外の海水の運動は港内および港口の海水の

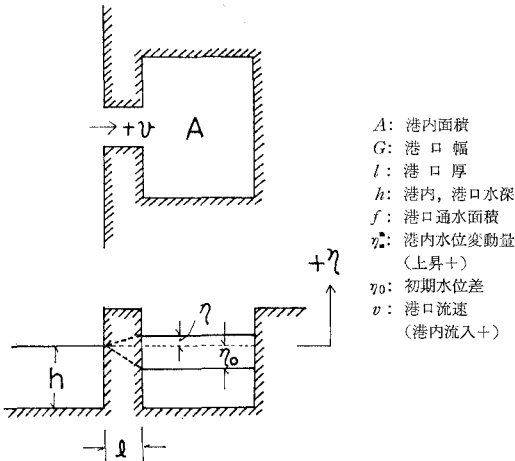


図-8 座標系

ここに、 $\theta = \sin^{-1}(\sqrt{n^2 - m^2}/n)$ 、 T_s : 振動周期である。
 $m^2 \geq n^2$ の場合は港内水位は振動せず、指数関数的に変化する。減衰振動となる場合の減衰の程度を表わす減衰定数を ε とすれば、

$$\varepsilon = m/n = \alpha \sqrt{gA/4f(h+l)} \dots \dots \dots (21)$$

となる。 ε は 0 から 1 の間の値となり、 ε が小さいほど水位振動は減衰せず、大きいほど減衰することを示す。したがって港内水位の応答特性は ε で表現できる。

水位差による港内水位振動実験においては 図-9 に示すように減衰振動となる。そこで、水位振動の振幅は指数関数的に減衰するものと仮定して最小二乗法によって ε を計算した。これらの ε と港の形状特性との関係については、港口通水面積 f と港内面積 A との影響が大きく、 図-10 に示すように、 ε は f/A によって変化する。すなわち、港内水位の応答特性は f/A と関係し、 f/A が小さくなるほど応答特性は低くなり振動現象など起こりにくくなるといえる。実験 I での振動振幅 S の大きさを比較してみると、水深が浅いほどまた港内面積が大きいほど振幅 S は小さく、以上の結果とも一致している。

運動に比して微小であるためこれを見捨てる、また港内水位変化 η は水深 h に比して微小であるとし $h + \eta \approx h$ とすれば、港口前面での力のつり合いから運動方程式は、

$$-\rho Ah \frac{d^2\eta}{dt^2} - \rho fl \frac{dv}{dt} = \rho gf(\eta - h_e) \dots \dots (13)$$

となる。ここに、 h_e は海水が港口を流出入する場合の損失水頭である。初期条件および港口流速 v は次の式 (14) および (15) で表わすことができる。

$$\eta = \eta_0, \quad d\eta/dt = 0, \quad \text{at } t = 0 \dots \dots \dots (14)$$

$$v = (A/f) d\eta/dt \dots \dots \dots (15)$$

損失水頭 h_e は港口流速 v 、港の形状特性に関係する。もし h_e が無視できるとすればこの運動は単振動となる。ここでは、 h_e が v の 1 乗に比例すると仮定する場合について考える。すなわち、

$$h_e = -\alpha v \dots \dots \dots (16)$$

ここに、 α は港の形状特性に関係する係数である。

式 (13), (15), (16) より運動方程式は、

$$\frac{d^2\eta}{dt^2} + \frac{\alpha g}{h+l} \frac{d\eta}{dt} + \frac{gf}{A(h+l)} \eta = 0 \dots \dots \dots (17)$$

となる。ここで、 $\alpha g/(h+l) = 2m$ 、 $gf/A(h+l) = n^2$ とおけば、上式は、

$$\frac{d^2\eta}{dt^2} + 2m \frac{d\eta}{dt} + n^2\eta = 0 \dots \dots \dots (18)$$

となり、これは減衰振動の微分方程式である。そこで、 $m^2 < n^2$ 、すなわち $\alpha^2 g^2/4(h+l)^2 < gf/A(h+l)$ の場合は減衰振動となり、解は次式となる。

$$\eta = \eta_0 \frac{ne^{-mt}}{\sqrt{n^2 - m^2}} \sin(\sqrt{n^2 - m^2} t + \theta) \dots \dots \dots (19)$$

$$T_s = 2\pi/\sqrt{n^2 - m^2} \dots \dots \dots (20)$$

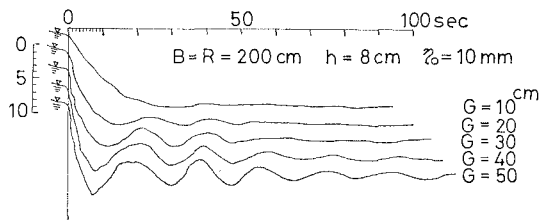


図-9 測定記録の一例

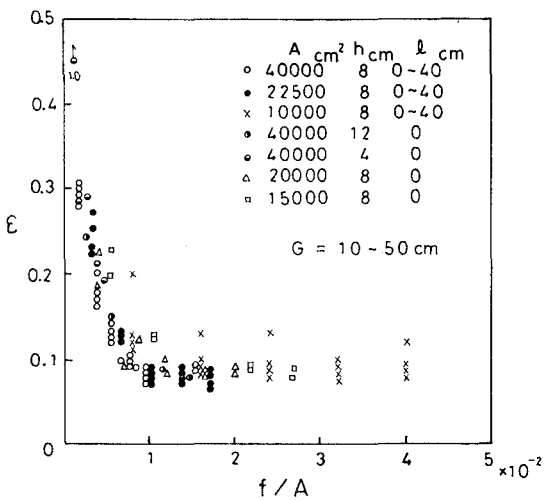


図-10 ε と f/A の関係

5. 結 言

主な結論を要約すると次のようになる。

(1) 砕波による港内水位上昇は港が砕波点より陸側にある場合に起こる。

(2) 港内水位上昇量 $\bar{\eta}$ は次式で表わすことができる。

$$\bar{\eta} = CH_b(1 - h/h_b)$$

ここに、 C は水底勾配によって定まる定数で、勾配が急になるほど C の値は大きい。

(3) 港外の急激なエネルギー変化に対する港内水位の応答特性は、港口通水面積 f と港内面積 A との比 f/A と関係し、 f/A が小さいほど応答特性は低い。

参 考 文 献

- 1) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart: Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', Jour. Fluid Mech., Vol. 13, Part 4, pp. 481-504, 1962.
- 2) Bowen, A.J., Inman, D.L. and V.P. Simmons: Wave 'set down' and set-up, Jour. Geophysical Res. Vol. 73, pp. 2569-2576, 1968.
- 3) 豊島・富永・橋本: 砕波後の波の変形に関する研究, 土木研究所報告, 133号, pp. 1-9, 昭43年.
- 4) 佐々木・佐伯: 砕波後の波の変形に関する研究(2). 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 39-44, 1974.
- 5) 三井・筒井・亀川: 埋立地造成に伴ううちあげ高, 沿岸流の変化(第2報), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 127-134, 1973.
- 6) 土木学会編: 水理公式集, pp. 506.