

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

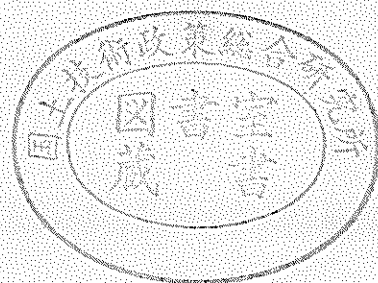
資料係
文献複写
禁止出

VOL. 9

NO. 2

JUNE 1970

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第9巻 第2号 (Vol. 9, No. 2), 1970年6月 (June 1970)

目 次 (CONTENTS)

1. 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算 (第6報)
——港口損失係数の影響——……………伊藤喜行・木原 力…… 3
(Digital Computation on the Effect of Breakwaters Against Long-period waves (6th
Report)—On the Head-loss Coefficient at the Tsunami-Breakwater Opening—
……………Yoshiyuki ITO and Tsutomu KIHARA)
2. 偏心傾斜荷重を受ける粘性土地盤上の基礎の支持力
……………中瀬明男・小林正樹…… 23
(Bearing Capacity of Foundation on Cohesive Soil under Eccentric and Inclined
Loads……………Akio NAKASE and Masaki KOBAYASHI)
3. 航空機タイヤの平均接地圧に関する一考察
……………須田 颯・佐藤勝久・阿部洋 …… 39
(A Study on the Average Contact Pressure of Airplane Tires
……………Hiroshi SUDA, Katsuhisa SATO and Yoichi ABE)
4. 海岸堤防の大型模型振動実験と円形すべり安定計算
……………土田 肇・野田節男・倉田栄 …… 61
(Vibration Test and Circular Arc Analysis for Full-scale Models of Levee
……………Hajime TSUCHIDA, Setsuo NODA and Eiichi KURATA)
5. 矢板壁の耐震性に関する研究 (第2報)
——矢板壁模型の振動数特性——…荒井秀夫・藤野芳明・坂井慧子……123
(On the Earthquake Resistance of Anchored Sheet-Pile Walls (2nd Report)—Fre-
quency Characteristics of Model Anchored Sheet-Pile Walls—
……………Hideo ARAI, Yoshiaki FUJINO and Keiko SAKAI)
6. 水噴流による水中の岩盤の掘削特性について
——ノズル移動時のモルタル試料掘削について——
……………藤井喜一郎・守口照明……147
(On the Excavation Characteristic of Rocks in the Water by Water-jets
……………Kiichiro FUJII and Teruaki MORIGUCHI)

1. 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算(第6報)

— 港口損失係数の影響 —

伊藤喜行*・木原力**

要 旨

われわれは、長周期波に対する防波堤の効果に関する計算を各種の港に対して実施してきた。これらに用いた基本方程式は港口において $fu^2/2g$ なる損失水頭を考慮する以外は高次の項を省略した線型微分方程式であった。

従来この計算ではこの港口損失係数として $f=1.5$ を採用してきたが、今回計算結果に対する係数値の影響を検討するため、大船渡湾における1968十勝沖地震津波を対象とし、 f を0から3まで変えて計算を行ない実測値と比較した。

その結果、これまでわれわれが用いてきた $f=1.5$ は、実用上の観点から十分妥当であることがわかった。

また、港口損失を考慮した一次元計算法を考案し、従来の二次元計算値および模型実験値との比較により、この計算法が十分実用的であることを明らかにした。

最後に大船渡津波防波堤における捨石マウンドからの浸透を考慮した計算を実施し、その影響を把握した。

* 水工部 防波堤研究室長

** 水工部 防波堤研究室

1. Digital Computation on the Effect of Breakwaters Against Long-period waves (6th Report)

—On the Head-loss Coefficient at the Tsunami-Breakwater Opening—

Yoshiyuki ITO*

Tsutomu KIHARA**

Synopsis

The authors have been studying the effect of breakwater against tsunami mainly by numerical calculation. The method of calculation and its application to Ofunato Harbor were described in previous papers.

In the equation of motion in our calculation, higher order terms for inertia and bottom friction are neglected. At the breakwater opening, however, a term representing head-loss $f \cdot u/2g$ is added to the equation of motion, where u is the velocity through the opening and f is a coefficient. The coefficient f of 1.5 has been adopted in our previous calculations.

In chapter one, the influence of the value of this coefficient is discussed. A series of calculation with the incident tsunami profile of 1968-tsunami for Ofunato Harbor was carried out with various value of f from 0 to 3.0 and computed water level was compared with the actual record. Although it is difficult to find out the most suitable value of f , the value of approximately 1.5 will be regarded quite reasonable for practical purpose.

In chapter two, one dimensional approximate method is discussed by assuming an equivalent linear head loss term $A \cdot u$. This method is found to be a good approximation by comparing with the previous two dimensional calculation and model experiments.

In chapter three, the effect of permeance through rubble mound is examined by two-dimensional calculation for Ofunato Harbor and is found not to play an important role.

* Chief of Breakwater Laboratory, Hydraulics Division

** Research Member of Breakwater Laboratory

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 二次元計算における港口損失係数値の影響	7
2.1 計 算 法	7
2.2 計 算 結 果	8
3. 港口損失を考慮した一次元計算法	10
3.1 概 要	10
3.2 損失係数の変換	12
3.3 港口の伝達率と反射率	12
3.4 定常状態に対する港口での関係	14
3.5 定常状態に対する湾口での関係	15
3.6 複合型の場合	16
3.7 湾口防波堤	17
3.8 模型実験値との比較	17
3.9 いわゆるハーバー・バラドックスについて	19
4. 堤体下部捨石マウンドの浸透を考慮した場合	20
4.1 概 要	20
4.2 計 算 法	20
4.3 計 算 結 果	21
5. あとがき	22
参考文献	22

1. まえがき

われわれは長周期波に対する防波堤の効果について、これまで第1報～第5報^{1)~5)}等を通じ種々の検討を加えてきた。すなわち第1報、第2報では流入方式にはじまり、二次元波動方式および一次元近似計算法の誘導とこれらの大船渡湾への適用を行ない、第3報では模型実験との比較により二次元計算法の妥当性を証明した。また、第4報では、1968十勝沖地震津波に対する大船渡津波防波堤の効果について不規則波を計算にとり入れて論じ、第5報では平面的な広がりをもった八戸港の津波の対する防波堤の効果に関して検討を加えた。このほか、松島湾、新潟港、名古屋港に関する計算も随時実施してきた^{6)~8)}。

二次元波動方式は長波の運動および連続の式を差分化して、電子計算機により水位と流速とを交互に計算してゆくもので、一般には慣性項、海底摩擦など高次の項を省略したが、防波堤開口部等においては、そこでの流速の2乗に比例する損失項を考慮してきた。

この港口損失係数 f は均一に1.5を採用してきたが、今回この係数値が、水位、流速の計算値に及ぼす影響を検討するため、第4報「1968十勝沖地震津波に対する大船渡津波防波堤の効果に関する計算」における入射波形、地形条件等をそのまま用い、港口損失係数を0から3までの範囲で変えて計算を行ない実測値と比較した。

また、上述のごとく第1報、第2報において横方向の変化を無視した一次元近似計算法を誘導したが、従来は港口損失を計算に直接とり入れていなかった。本報告では流速の2乗に比例する損失項を1乗に比例する形に置き換え、一周期間のエネルギー損失が等しくなるよう係数を求めて、各種の場合に対して計算式を誘導した。そして第3報で行なった模型実験値との照合によりこれら計算式の妥当性を証明した。

最後に、防波堤基部捨石マウンドからの浸透を考慮した計算を、1968十勝沖地震津波に対する大船渡津波防波堤を例にとって示し、その影響を求めた。

2. 二次元計算における港口損失係数値の影響

2.1 計算法

われわれはこれまで、長周期波に対する防波堤の効果に関する計算を、単一正弦波形のみならず不規則波形をも含めて各種の港に対して実施してきたが、そこに用いた二次元計算法は以下のとおりである。

まず、長波の運動および連続の方程式を高次の項を無視して(2.1)式で表わす。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= -h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ただし u, v : x および y 方向の流速

ζ : 水位

h : 水深

(2.1) 式を差分化して流速 u, v と水位 ζ とを step by step に計算してゆく。

図-2.1 に示すような港口部では断面急拡、急縮による水頭損失を考慮し、運動方程式を(2.2)式で表わす。

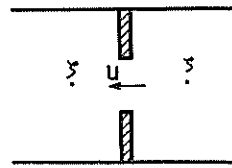


図-2.1 防波堤開口部

$$\begin{aligned} \frac{d u}{d t} &= -g \frac{d \zeta}{d x} - g \frac{d \zeta_e}{d x} \\ &= -g \frac{d \zeta}{d x} - \frac{f}{2 d x} u |u| \end{aligned} \quad (2.2)$$

ここに $d \zeta_e$: 損失水頭 $f \cdot u^2 / 2g$

f : 港口損失係数

u : 港口流速

従来は計算では港口損失係数は均一に $f=1.5$ を採用し、港口損失を全く考慮しない場合との比較は行なってきたが、適切な係数値についての検討はされていなかった。

今回、この損失係数を0から3.0まで0.5間隔に計7ケースの計算を行ない、この影響について検討を加えた。

計算は第4報で報告した1968十勝沖地震津波時の大船渡津波防波堤を対象とした。既報のとおり、このときは防波堤内外すなわち図-2.2に示す堤外の長崎漁港と堤内の大船渡港の両検潮所で津波の実測記録が得られているので、数値計算結果との直接の比較が可能である。

計算法および条件は、港口損失係数 f を変えた以外は第4報の不規則波の計算と全く同じである。すなわち、入射波形も第4報で長崎における実測記録を解析して求

めたものをそのまま用いたのであるが、そこに港口損失係数の影響が介入するので、厳密に言えば、各係数値に

ついて同様な解析を行ないあらためてそれぞれの入射波形を算出すべきである。しかし実際問題としては後の計算結果が示すように、長崎での計算値に対する港口損失係数の影響は小さいので、簡単のため全て同一の入射波形を用いることとした。

2.2 計算結果

図-2.3および2.4にそれぞれ大船渡および長崎における時間的な水位変動の実測値と計算値の比較を示す。ただし計算値は簡単のため $f=0, 1.5, 3.0$ の3種のみを画いた。図から港口損失係数の変化による計算水位変動の相違は、堤内大船渡ではかなり大きく、 $f=0$ の場合特に実測記録から大いに隔たっていることがわかる。そしてこの場合は単に山や谷における値のみでなく、波形そのものも異なっている。しかしながら堤外長崎においては係数間の変化はさ程顕著でなく、波形そのものも非常に似かよっている。

ここで、堤内の大船渡において、各係数別による計算水位と実測水位との比較を代表的なピークについて行なってみよう。表-2.1は港口損失係数 f が0から3.0までの各値に対する計算水位変動をそれと一致する実測値と比較したもので、実測値に最も近い値に*印をつけてあ

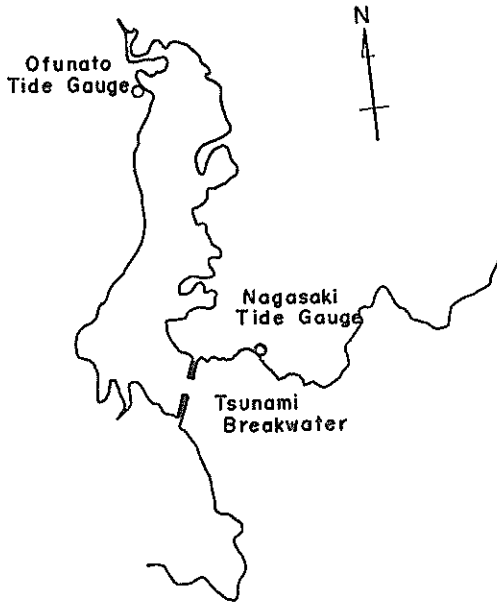


図-2.2 大船渡湾

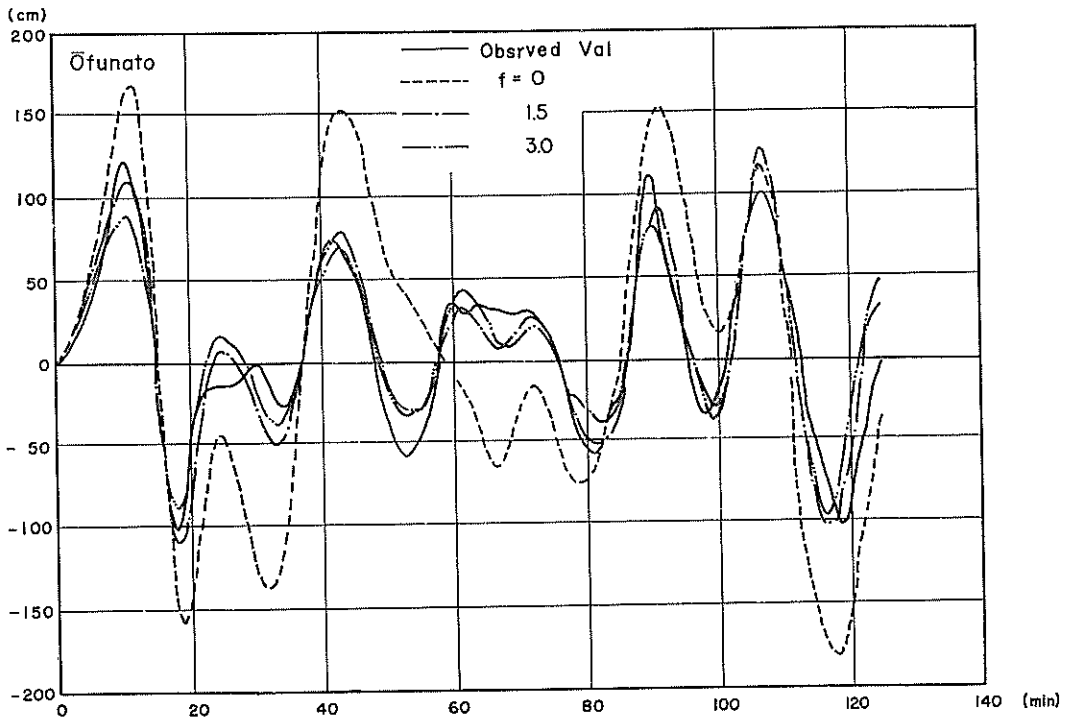


図-2.3 大船渡における時間的な計算水位変動と実測水位変動の比較

長周期波に対する防波堤の効果に関する計算

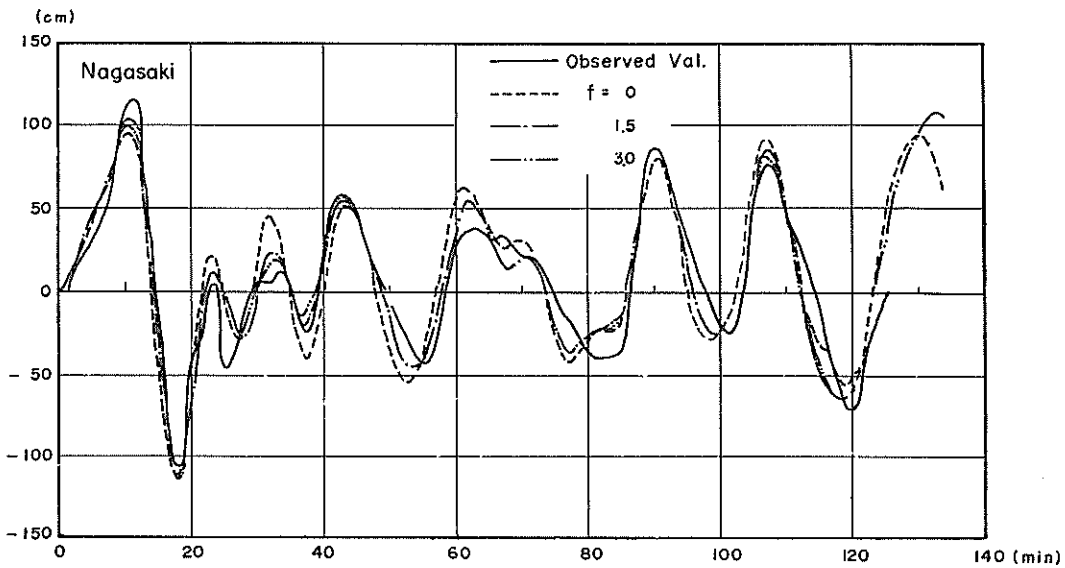


図-2.4 長崎における時間的な計算水位変動と実測水位変動の比較

表-2.1 代表的ピークにおける計算および実測水位の比較 (大船渡)

波 数	山・谷	実 測	港 口 損 失 係 数 (f)						
			0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
1	山	124	169	140	123*	111	103	96	91
"	谷	-102	-159	-137	-120	-108	-101*	-95	-90
3	山	74	153	104	88	80	75*	72	69
5	山	112	153	108*	100	94	90	85	81
6	山	102	119	138	134	129	123	119	115*
"	谷	-101	-180	-121	-111	-105	-102*	-99	-97

(単位: cm)

る。

表-2.1 から明らかなように、実測値に最も近い値を生ぜしむる港口損失係数は各ピークによって異なり、一律には決定することはできない。しかしながら、従来われわれが用いてきた港口損失係数値 $f=1.5$ は、これら * 印のほぼ中央に位置するため、全体的にみた場合は大体妥当な値であろう。

このような全体的な一致性を評価するため、以下のような表示を試みた。まず、計算および実測の120分間の水位変動記録に注目し、2分毎の計60の点について計算値の実測記録からの偏差 ϵ_i を次式により計算する。

$$\epsilon_i = (\zeta_o)_i - (\zeta_c)_i \quad (2.3)$$

ζ_c : 計算水位

ζ_o : 実測水位

図-2.5 は港口損失係数 $f=0, 0.5, 1.5, 2.5$ の各値に対し、長崎および大船渡における偏差を示したものである。

次に (2.3) 式の偏差 ϵ_i を用いて

$$\sigma = \sqrt{\frac{60}{\sum_{i=1}^{60} \epsilon_i^2 / 60}} \quad (2.4)$$

なる式で σ を定義し、この値の大小関係を比較した。

表-2.2 は各係数別に算出した長崎および大船渡における σ の値で、図-2.6 はこれを図化したものである。

これらの表および図からわかるとおり、堤外の長崎では係数の変化による計算水位変動の実測記録との適合性はほとんど同程度で、ただ港口損失を全く考慮しないケ

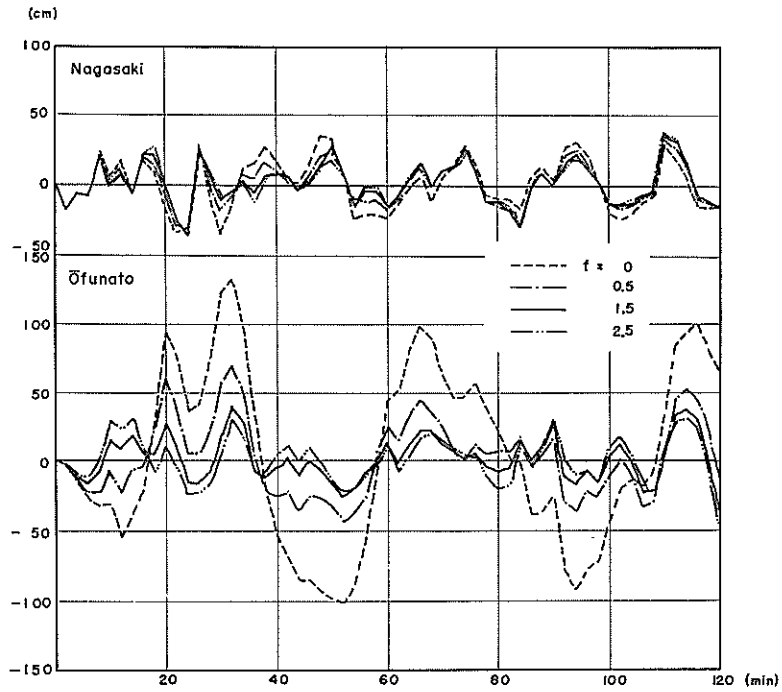


図-2.5 実測値からの偏差

表-2.2 各係数別の σ の値

地名	港口損失係数						
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
長崎	18.4	15.7	15.1	15.1	14.9	15.0	15.0
大船渡	64.8	28.0	19.8	17.1	16.4	16.7	17.6

(単位: cm)

ース $f=0$ がやや悪く、 $f=0.5$ から 3.0 の間ではほぼ同一の適合性といえよう。堤内の大船渡では、 $f=0$ の計算値は実測記録との適合性が特に悪く、 $f=0.5$ も他の係数に比して近似は悪い。 $f=1.0$ から 3.0 の間の各損失係数に対してはほとんど変化がなく、特定の最適値は見出し難い。

図-2.7 は損失係数の変化による港口流速の変動を示した図で、水位の場合と同様に、港口流速もまた $f=0$ の場合が損失考慮の他の 3 つのケースとかなり隔たった値をとることがわかる。

以上の検討は、あくまで港口の運動方程式を (2.2) 式の形で表現したときの係数値 f に関するものであり、ここに慣性項を考慮するなど式の形が変わればその影響も

異なり得る。また長崎における計算値と実測値の比較が示すように、入射波波形自身が必ずしも最適のものではない。しかしながら、1968 十勝沖地震波時の大船渡防波堤およびこれと同様な条件下でわれわれの計算方式を用いる限り、港口損失係数値 $f=1.5$ なる値は実用上十分な値といえよう。

3. 港口損失を考慮した一次元計算法

3.1 概要

第 1 報、第 2 報において、横方向の変化を無視した一次元近似計算法を誘導し、直接二次元計算を行なわなかった各ケースについて防波堤の効果を推定する試みを行った。この一次元計算では港口損失を無視しており、

長周期波に対する防波堤の効果に関する計算

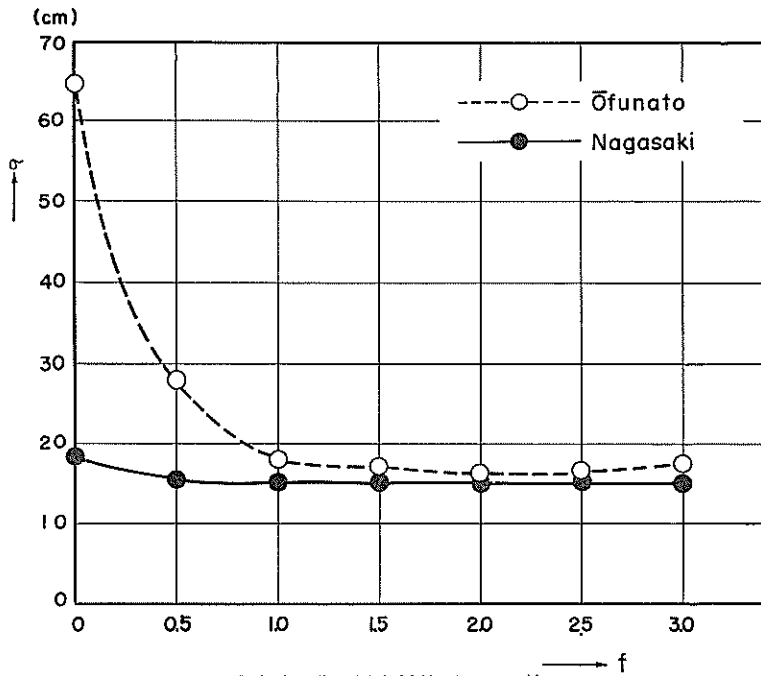


図-2.6 港口損失係数別による値 σ

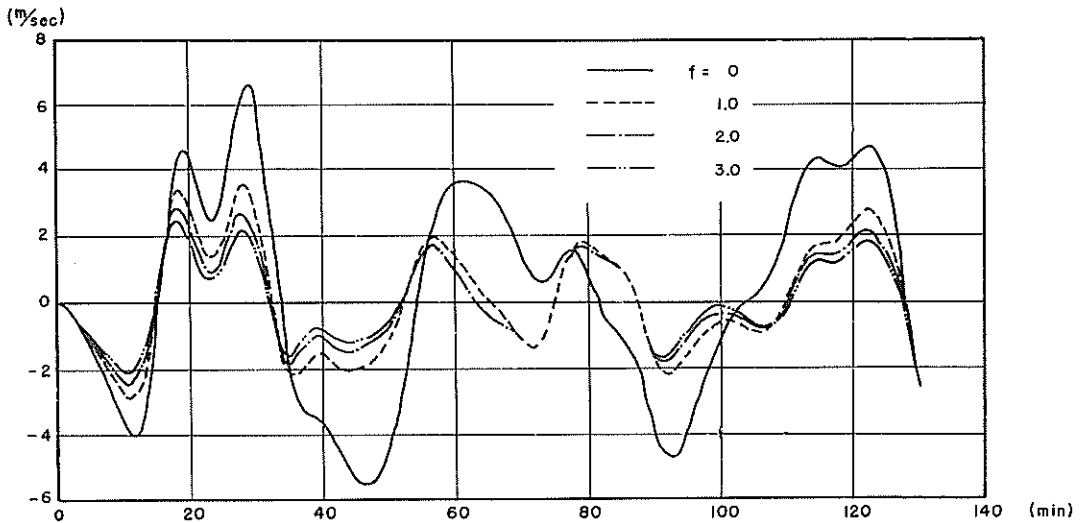


図-2.7 計算港口流速

その影響を考慮するにあたっては、二次元計算において港口損失を考慮した場合と無視した場合の水位、流速値の比率を参照して補正するという便法をとった。また、第3報では実験値と二次元および一次元計算値との比較を行ない、防波堤を有するケースについては、二次元計算では良好な近似を得たが、港口損失を無視した一次元

計算値は当然実験結果と異なった。

港口損失は流速の2乗に比例するものとしているため一次元計算で解析的に解くことができないが、流速の1乗に比例する形に置き換えればそれが可能になる。以下種々のケースについて港口損失を考慮した一次元計算法の誘導ならびにそれに基づく計算結果を掲げる。

3.2 損失係数の変換

港口流速に関する運動方程式は流速の2乗に比例する損失項を考慮した場合次のような形である。

$$\frac{du}{dt} = -g \frac{d\zeta}{dx} - \frac{f}{2dx} u|u| \quad (3.1)$$

流速の2乗に比例する損失項を1乗に比例する形に置き換えるときは、一周期間のエネルギー損失が等しくなるように係数を決める。すなわち、

$$\int_0^T \frac{f}{2} u|u| \cdot u dt = \int_0^T A u \cdot u dt$$

において、 $u = \bar{u} \sin \sigma t$ ($\sigma = 2\pi/T$) なる形を仮定すると、係数 A は (3.2) 式で与えられる。

$$A = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{f}{2} \bar{u} \quad (3.2)$$

これにより (3.1) 式右辺の損失項を置き換え、第2報と同様に無次元流速 $U = u / \sqrt{g/h} \cdot a$ を用いて無次元化すると、

$$d_t U = -\sqrt{gh} \cdot \frac{dt}{dx} \cdot \Delta_x \left(\frac{\zeta}{a} \right) - \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{f}{2dx} \cdot \Delta_t \sqrt{\frac{g}{h}} a \bar{U} \cdot U$$

となるが、一次元計算においては $dt/dx = 1/\sqrt{gh}$ とおけるから、この損失項の係数は

$$F = \frac{4}{3\pi} f \frac{1}{\sqrt{gh}} \sqrt{\frac{g}{h}} a \bar{U} = \frac{4}{3\pi} \frac{a}{h} f \bar{U} \quad (3.3)$$

ただし a : 入射波振幅

h : 水深

となる。

(3.3) 式 F は流速振幅 \bar{U} を含むので、予め一義的な決定はできず、算出された \bar{U} に対応する値となるまで試算を繰り返さなければならないが、定常波の場合の港口流速は第1報 (3.6) 式などの示すとおり

$$\bar{U} = \left| \frac{B}{b} r_0 \sin kl \right| \quad (3.4)$$

で表わされるから、ある種のケースにおいては、この r_0 を未知数とした代数方程式に帰す場合もある。

第1報のCケースでは

$$K = \frac{f}{2} \cdot \frac{a}{h} \quad (3.5)$$

を0.21として二次元計算を行なった。したがってこれに対応する F は (3.3) 式から次のように表わされる。

$$F = \frac{8}{3\pi} \times 0.21 \times \bar{U} \quad (3.6)$$

3.3 港口の伝達率と反射率

第2報と同様に、来襲波、反射波および通過波の無次元化された水位、流速を次のように考える。(図-3.1)

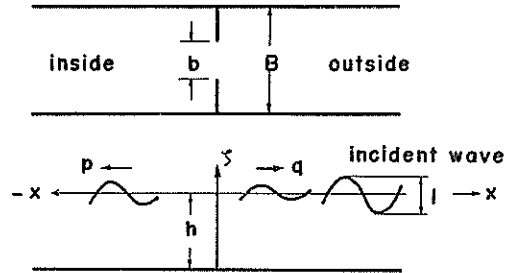


図-3.1 港口伝達率および反射率の説明図

来襲波:

水位; $\eta_i = \sin(kx + \sigma t)$

流速; $U_i = -\sin(kx + \sigma t)$

反射波:

水位; $\eta_r = q \sin(kx - \sigma t - \rho_1)$

流速; $U_r = q \sin(kx - \sigma t - \rho_1)$

通過波:

水位; $\eta_t = p \sin(kx + \sigma t - \rho_2)$

流速; $U_t = -p \sin(kx - \sigma t - \rho_2)$

ただし $k = \frac{2\pi}{L}$, $\sigma = \frac{2\pi}{T}$

(3.7)

ここで、 p, q は伝達率および反射率を、 ρ_1 および ρ_2 はそれぞれ反射および通過に伴う位相の変化を示す。

防波堤内外の水位および流速は

堤外: $\eta = \eta_i + \eta_r$, $U = U_i + U_r$

堤内: $\eta = \eta_t$, $U = U_t$

となる。

港口流速 $U(0, t)$ に対する差分された運動方程式と $U(0, t)$ を含む連続の方程式は $\sqrt{gh} (dt/dx) = 1$ とおいて簡単化すると次のようになる。

$$U(0, t + dt) - U(0, t) + FU\left(0, t + \frac{dt}{2}\right) = -\eta\left(\frac{\Delta x}{2}, t + \frac{dt}{2}\right) + \eta\left(-\frac{\Delta x}{2}, t + \frac{dt}{2}\right) \quad (3.8)$$

$$\eta\left(\frac{\Delta x}{2}, t + \frac{dt}{2}\right) - \eta\left(\frac{\Delta x}{2}, t - \frac{dt}{2}\right) = -U(\Delta x, t) + \frac{b}{B} U(0, t) \quad (3.9)$$

$$\eta\left(-\frac{\Delta x}{2}, t + \frac{dt}{2}\right) - \eta\left(-\frac{\Delta x}{2}, t - \frac{dt}{2}\right)$$

長周期波に対する防波堤の効果に関する計算

$$= -\frac{b}{B}U(0, t) + U(-\Delta x, t) \quad (3.10)$$

まず (3.9) 式に (3.7) 式を用いると、

$$\frac{b}{B}U(0, t) = -\sin \sigma t - q \sin(\sigma t + \rho_1) \quad (3.11)$$

同様に (3.10) 式に (3.7) 式を用いると、

$$\frac{b}{B}U(0, t) = -p \sin(\sigma t - \rho_2) \quad (3.12)$$

を得る。(3.11) および (3.12) 式の $\sin \sigma t$, $\cos \sigma t$ の項をそれぞれ等しいと置けば (3.13) 式を得る。

$$\left. \begin{aligned} p \cos \rho_2 &= 1 + q \cos \rho_1 \\ p \sin \rho_2 &= -q \sin \rho_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

次に (3.8) 式の左辺に (3.12) 式を、右辺には (3.7) 式を用いて変形し、両辺の $\sin \sigma t$, $\cos \sigma t$ の項を等値すると、

$$\left. \begin{aligned} &\frac{B}{b} \left(\sin \varphi + F \sin \frac{\varphi}{2} \right) p \cos \rho_2 + \left\{ \frac{B}{b} - 2 - \frac{B}{b} \right\} \\ &\quad \times \left(\cos \varphi + F \cos \frac{\varphi}{2} \right) p \sin \rho_2 = \sin \varphi \\ &\left\{ \frac{B}{b} - 2 - \frac{B}{b} \left(\cos \varphi + F \cos \frac{\varphi}{2} \right) \right\} p \cos \rho_2 \\ &\quad - \frac{B}{b} \left(\sin \varphi + F \sin \frac{\varphi}{2} \right) p \sin \rho_2 \\ &= -(1 + \cos \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

ただし $\varphi = k \Delta x = \sigma \Delta t$

となり、これを解くと

$$\left. \begin{aligned} p \cos \rho_2 &= \frac{1 + \frac{F}{2} \frac{B}{b} \sec \frac{\varphi}{2}}{1 + \left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2} + F \frac{B}{b} \left(\sec \frac{\varphi}{2} + \frac{F}{4} \frac{B}{b} \right)} \\ p \sin \rho_2 &= \frac{\left(\frac{B}{b} - 1 \right) \tan \frac{\varphi}{2}}{1 + \left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2} + F \frac{B}{b} \left(\sec \frac{\varphi}{2} + \frac{F}{4} \frac{B}{b} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

が得られる。

いま、 $\Delta x/L \ll 1$ として近似的に $\sec \frac{\varphi}{2} \rightarrow 1$ とおくと、

$$\left. \begin{aligned} p^2 &= \frac{1}{\left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2} + \left(1 + \frac{F}{2} \frac{B}{b} \right)^2} \\ q^2 &= \frac{\left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2} + \left(\frac{F}{2} \frac{B}{b} \right)^2}{\left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2} + \left(1 + \frac{F}{2} \frac{B}{b} \right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

となり、伝達率および反射率 p , q が求まる。

(3.12) より流速振幅 \bar{U} は

$$\bar{U} = \frac{B}{b} p \quad (3.17)$$

であるから、この関係を用いて p を求め、第1報ケース C に対する二次元計算結果による第1波伝達率と比較すると表-3.1 のようになる。ただし F は (3.6) 式 ($h = 0.21$) で与えた。

表-3.1 伝達率

Case	B/b	L/Δx	1次元計算		2次元計算
			損失なし	損失あり	
c-36	5	10	0.610	0.427	0.41
38	5	13	0.712	0.449	0.43
39	3	20	0.953	0.645	0.62
41	8	20	0.670	0.326	0.30
43	5	30	0.922	0.476	0.49

この表からわかるとおり、従来の損失無しの一次元計算値は二次元計算値に比べてはるかに大きい値を示すが、今回の港口損失を考慮した一次元計算値は非常に良好な近似を与えている。

ここで第2報、図2.2で行なった港口伝達率に関する検討を、港口損失を考慮した (3.16) 式を用いてあらためて行なってみる。図-3.2は横軸に湾幅と港口幅との比 B/b を、縦軸に港口伝達率 p をとって $L/\Delta x$ をパラメーターとして画いた図で、白丸は第2報で行なった港口損失無しの一次元計算値、黒丸は損失を考慮した一次元計算値である。第2報で述べたように、損失を考慮しない場合は $L/\Delta x$ の変化により伝達率もかなり異なり、 $L/\Delta x$ の増加とともに p は1に近づいてゆることがわかる。一方、港口損失を考慮した場合は、一般にこの変化は小さく、 $L/\Delta x$ が20以上の範囲であれば p はほぼ一定となることがわかる。

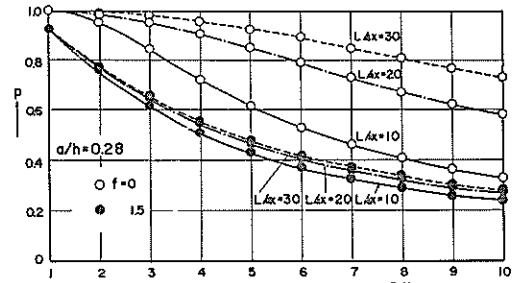


図-3.2 港口伝達率

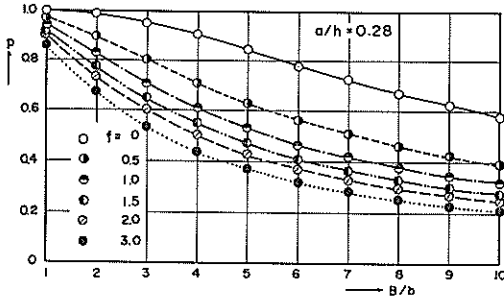


図-3.3 港口伝達率に及ぼす損失係数の影響

次に、港口損失係数値が港口伝達率にどう影響するかを検討してみよう。損失項の係数 F は (3.3) および (3.17) 式から

$$F = \frac{4}{3\pi} \frac{a}{h} f \cdot \frac{B}{b} p \quad (3.18)$$

で表わされる。

一方、第1報ケース c では (3.5) 式の k を 0.21 とし計算を行なった。よって今回の計算でも $f=1.5$ の場合に $k=0.21$ となるように $a/h=0.28$ を用い f を 0 から 3 まで変化させた。図-3.3 に計算結果を示す。この図から港口損失係数値 f の増加は伝達率 p の減少をもたらすこと、およびその減少の割合は f が 0 から 0.5 の間で最大で、除々にそれは小さくなるのがわかる。

3.4 定常状態に対する港口での関係

図-3.4 に示すような港口において、防波堤内外における定常波の水位および流速を次のようにおく。

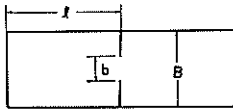


図-3.4 港口部

港内:

$$\begin{aligned} \text{水位;} & \eta = r_0 \cos kx \sin \sigma(t-t_0) \\ \text{流速;} & U = -r_0 \sin kx \cos \sigma(t-t_0) \end{aligned}$$

港外:

$$\begin{aligned} \text{水位;} & \eta = r_1 \cos k(x-x_0) \sin \sigma t \\ & + r_2 \sin k(x-x_0) \cos \sigma t \\ \text{流速;} & U = -r_1 \sin k(x-x_0) \cos \sigma t \\ & - r_2 \cos k(x-x_0) \sin \sigma t \end{aligned} \quad (3.19)$$

港口における方程式は次のとおりである。

$$U(l, t+\Delta t) - U(l, t) + FU\left(l, t + \frac{\Delta t}{2}\right)$$

$$= -\eta\left(l + \frac{\Delta x}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right) + \eta\left(l - \frac{\Delta x}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} & \eta\left(l + \frac{\Delta x}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right) - \eta\left(l + \frac{\Delta x}{2}, t - \frac{\Delta t}{2}\right) \\ & = -U(l+\Delta x, t) + \frac{b}{B}U(l, t) \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} & \eta\left(l - \frac{\Delta x}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right) - \eta\left(l - \frac{\Delta x}{2}, t - \frac{\Delta t}{2}\right) \\ & = -\frac{b}{B}U(l, t) + U(l-\Delta x, t) \end{aligned} \quad (3.22)$$

(3.21), (3.22) 式に (3.19) 式を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{b}{B}U(l, t) & = -r_1 \sin k(l-x_0) \cos \sigma t \\ & - r_2 \cos k(l-x_0) \sin \sigma t \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\frac{b}{B}U(l, t) = -r_0 \sin kl \cos \sigma(t-t_0) \quad (3.24)$$

この両式における $\sin \sigma t$, $\cos \sigma t$ の項をそれぞれ等しいと置くと

$$\left. \begin{aligned} r_1 \sin k(l-x_0) & = r_0 \sin kl \cos \sigma t_0 \\ r_2 \cos k(l-x_0) & = r_0 \sin kl \sin \sigma t_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

これより次の関係を得る。

$$r_0^2 \sin^2 kl = r_1^2 \sin^2 k(l-x_0) + r_2^2 \cos^2 k(l-x_0) \quad (3.26)$$

(3.24) 式を (3.20) 式の左辺に用いて整理すると

$$\begin{aligned} \text{左辺} & = -2r_1 \sin k(l-x_0) \sin \sigma\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \sin \frac{\sigma \Delta t}{2} \\ & + 2r_2 \cos k(l-x_0) \cos \sigma\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \sin \frac{\sigma \Delta t}{2} \\ & + Fr_1 \sin k(l-x_0) \cos \sigma\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \\ & + Fr_2 \cos k(l-x_0) \sin \sigma\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \end{aligned}$$

となる。(3.20) 式右辺には (3.19) 式を代入し、(3.25) 式を考慮して整理すると、

$$\begin{aligned} \text{右辺} & = -r_1 \left\{ \cos k(l-x_0) \cos \frac{k \Delta x}{2} - \sin k(l-x_0) \sin \frac{k \Delta x}{2} \right\} \\ & \times \sin \sigma\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - r_2 \left\{ \sin k(l-x_0) \cos \frac{k \Delta x}{2} \right. \\ & + \left. \cos k(l-x_0) \sin \frac{k \Delta x}{2} \right\} \cos \sigma\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \\ & + \frac{\cos k\left(l - \frac{\Delta x}{2}\right)}{\sin kl} \times \left\{ r_1 \sin k(l-x_0) \sin \sigma\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \right. \\ & \left. - r_2 \cos k(l-x_0) \cos \sigma\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \right\} \end{aligned}$$

長周期波に対する防波堤の効果に関する計算

が得られる。そこで両辺の $\sin\left(t + \frac{Dt}{2}\right)$, $\cos\left(t + \frac{Dt}{2}\right)$

の項をそれぞれ等置してまとめると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} Rr_1 \sin k(l-x_0) - S \sin kl \cdot r_2 \cos k(l-x_0) \\ + r_1 \sin kl \cos k(l-x_0) = 0 \\ Rr_2 \cos k(l-x_0) + S \sin kl \cdot r_1 \sin k(l-x_0) \\ - r_2 \sin kl \sin k(l-x_0) = 0 \end{aligned} \right\} (3.27)$$

ただし $R = 2\left(\frac{B}{b} - 1\right) \sin kl \tan \frac{\varphi}{2} - \cos kl$

$$S = \frac{B}{b} F \sec \frac{\varphi}{2}$$

さらに m を反射率として

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= (1+m)r_3 \\ r_2 &= (1-m)r_3 \end{aligned} \right\} (3.28)$$

と置いて演算を続けると、結局以下の関係式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} 2m \cos 2k(l-x_0) &= 2 \frac{(S^2-1) \sin^2 kl + R^2}{(S+1)^2 \sin^2 kl + R^2} \\ 2m \sin 2k(l-x_0) &= -4 \frac{R \sin kl}{(S+1)^2 \sin^2 kl + R^2} \end{aligned} \right\} (3.29)$$

$$m^2 = \frac{(S-1)^2 \sin^2 kl + R^2}{(S+1)^2 \sin^2 kl + R^2} (3.30)$$

$$4\left(\frac{r_3}{r_0}\right)^2 = (S+1)^2 \sin^2 kl + R^2 (3.31)$$

第1報ケース C [$K=0.21$, $r_3=1$] について、 r_0 および m を算出すると表-3.2 のようになり、やはり二次元計算値とかなり良好な一致を示す。

表-3.2 一次元および二次元計算の比較

ケース	B/b	L/l	L/Dx	一次元計算		二次元計算	
				r_0	m	r_0	m
c-36	5	2	10	2.0	1.0	2.2	1.0
38	5	2.6	13	0.69	0.75	0.64	0.81
39	3	4	20	0.83	0.30	0.78	0.48
41	8	4	20	0.36	0.69	0.33	0.77
43	5	6	30	0.65	0.44	0.68	0.30
45	5	10	30	0.96	0.45	0.99	0.35

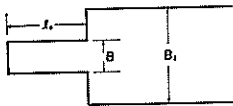


図-3.5 湾口部

3.5 定常状態に対する湾口での関係

次節の複合型の場合の関係式を導びくにあたり、先ず図-3.5の湾口の場合を求め、湾口の内外における水位

および流速を次のようにおく。

湾内:

$$\left. \begin{aligned} \text{水位: } \eta &= r_1 \cos k(x-x_0) \sin \sigma t \\ &\quad + r_2 \sin k(x-x_0) \cos \sigma t \\ \text{流速: } U &= -r_1 \sin k(x-x_0) \cos \sigma t \\ &\quad - r_2 \sin k(x-x_0) \cos \sigma t \end{aligned} \right\}$$

湾外:

$$\left. \begin{aligned} \text{水位: } \eta &= r_4(1+n) \cos k(x-x_1) \\ &\quad \times \sin \sigma(t-t_1) + r_4(1-n) \\ &\quad \times \sin k(x-x_1) \cos \sigma(t-t_1) \\ \text{流速: } U &= -r_4(1+n) \sin k(x-x_1) \\ &\quad \times \cos \sigma(t-t_1) - r_4(1-n) \\ &\quad \times \cos k(x-x_1) \sin \sigma(t-t_1) \end{aligned} \right\} (3.32)$$

湾口での運動および連続の方程式は次のとおりである。

$$\begin{aligned} U(l_0, t + Dt) - U(l_0, t) &= -\eta\left(l_0 + \frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2}\right) \\ &\quad + \eta\left(l_0 - \frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2}\right) \end{aligned} (3.33)$$

$$\begin{aligned} \eta\left(l_0 + \frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2}\right) - \eta\left(l_0 + \frac{Dx}{2}, t - \frac{Dt}{2}\right) \\ = -U(l_0 + Dx, t) + \frac{B}{B_1} U(l_0, t) \end{aligned} (3.34)$$

$$\begin{aligned} \eta\left(l_0 - \frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2}\right) - \eta\left(l_0 - \frac{Dx}{2}, t - \frac{Dt}{2}\right) \\ = -U(l_0, t) + U(l_0 - Dx, t) \end{aligned} (3.35)$$

これまでと同様 (3.32) 式を (3.34), (3.35) 式に代入し、 $U(l_0, t)$ を求め $\sin \sigma t$, $\cos \sigma t$ の項をそれぞれ等しいと置き、またそれらを (3.33) 式に代入して同様な手続を繰り返すと、結局次の諸関係を得る。

$$\left. \begin{aligned} r_1 \cos \sigma t_1 &= \frac{1}{A} \cdot \frac{B}{B_1} \{r_1(1+n) \sin k(l_0-x_0) \\ &\quad \times \sin k(l_0-x_1) + r_2(1-n) \cos k(l_0-x_0) \\ &\quad \times \cos k(l_0-x_1)\} \\ r_1 \sin \sigma t_1 &= \frac{1}{A} \cdot \frac{B}{B_1} \{-r_1(1-n) \sin k(l_0-x_0) \\ &\quad \times \cos k(l_0-x_1) + r_2(1+n) \cos k(l_0-x_0) \\ &\quad \times \sin k(l_0-x_1)\} \end{aligned} \right\} (3.36)$$

ただし $A = 1 + n^2 - 2n \cos 2k(l_0-x_1)$

$$\left. \begin{aligned} 2n \cos 2k(l_0-x_1) &= 1 + n^2 - \frac{B}{B_1} \frac{1-n^2}{1-m^2} \\ &\quad \times \{1 + m^2 - 2m \cos 2k(l_0-x_0)\} \\ 2n \sin 2k(l_0-x_1) &= \frac{1-n^2}{1-m^2} \left[2m \sin 2k(l_0-x_0) \right. \\ &\quad \left. + \{1 + m^2 - 2m \cos 2k(l_0-x_0)\} \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{B}{B_1} - 1\right) \tan \frac{\varphi}{2} \right] \end{aligned} \right\} (3.37)$$

$$\begin{aligned} \therefore n^2 = & \left[\left(1 - m^2 - \frac{B}{B_1} P \right)^2 + \left\{ 2m \sin 2k(l_0 - x_0) \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{B}{B_1} - 1 \right) P \tan \frac{\varphi}{2} \right\}^2 \right] / \left[\left(1 - m^2 - \frac{B}{B_1} P \right)^2 \right. \\ & \left. + \left\{ 2m \sin 2k(l_0 - x_1) + \left(\frac{B}{B_1} - 1 \right) P \tan \frac{\varphi}{2} \right\}^2 \right] \end{aligned} \quad (3.38)$$

ここで $P = 1 + m^2 - 2m \cos 2k(l_0 - x_0)$

$$\left(\frac{r_4}{r_3} \right)^2 = \frac{B}{B_1} \frac{1 - m^2}{1 - n^2} \quad (3.39)$$

この(3.39)式は、図-3.6に示すようにエネルギーの関係からも容易に得られる。

$$B_1(1 - n^2)r_4^2 = B(1 - m^2)r_3^2$$

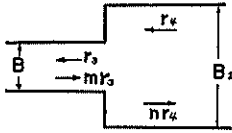


図-3.6 湾口での関係

3.6 複合型の場合

(3.4) および (3.5) の計算式を合成すれば複合型の計算式が得られる。図-3.7 から明らかなように

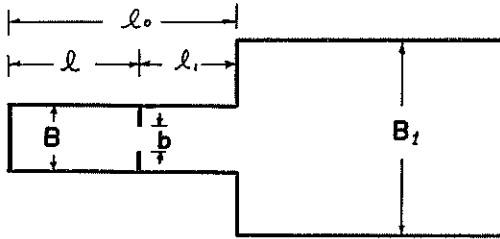


図-3.7 複合型

$$l_0 - x_0 = l_0 - l + l - x_0 = l_1 + l - x_0 \quad (3.40)$$

であるから、(3.38)式に(3.29)式を代入し、また(3.30)、(3.31)、(3.29)式より次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} 4 \left(\frac{r_4}{r_0} \right)^2 - 4 \left(\frac{r_4}{r_{00}} \right)^2 &= \left(\frac{B}{B_1} \right)^2 (S \sin kl \sin kl_1)^2 \\ &+ 2 \frac{B}{B_1} S \sin^2 kl + (S \sin kl)^2 \\ &\times \left\{ \cos kl_1 + \left(\frac{B}{B_1} - 1 \right) \tan \frac{\varphi}{2} \sin kl_1 \right\}^2 \end{aligned} \quad (3.41)$$

ただし、 r_{00} は港口損失を無視したときの港奥水位振

幅で次式により与えられる。

$$\begin{aligned} 4 \left(\frac{r_4}{r_{00}} \right)^2 &= \left(\frac{B}{B_1} \right)^2 (R_0 \sin kl \sin kl_1 - \sin kl_0)^2 \\ &+ \left\{ (R_0 \sin kl \cos kl_1 - \cos kl_0) + (R_0 \sin kl \sin kl_1 \right. \\ &\left. - \sin kl_0) \left(\frac{B}{B_1} - 1 \right) \tan \frac{\varphi}{2} \right\} \end{aligned} \quad (3.42)$$

で表わされる。ここに R_0 および S は

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= 2 \left(\frac{B}{b} - 1 \right) \tan \frac{\varphi}{2} \\ S &= \frac{B}{b} F \sec \frac{\varphi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

で与えられる。

ここで数値計算法について簡単に触れておこう。

(3.24)式から流速振幅 \bar{U} は

$$\bar{U} = \left| \frac{B}{b} r_0 \sin kl \right|$$

で表わされる。よって係数 F は(3.3)式から

$$F = \frac{4}{3\pi} \frac{a}{h} f \cdot \left| \frac{B}{b} r_0 \sin kl \right| \quad (3.44)$$

なる式で表わされる。(3.44)、(3.43)両式を(3.41)に代入し、未知数 r_0 のべき

$$G(r_0) = c_1 r_0^4 + c_2 r_0^3 + c_3 r_0^2 + c_4 \quad (3.45)$$

なる函数に展開すると、係数はそれぞれ次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \sin^2 kl \left[\left(\frac{B}{B_1} \sin kl_1 \right)^2 + \left\{ \cos kl_1 \right. \right. \\ &\left. \left. + \left(\frac{B}{B_1} - 1 \right) \tan \frac{\varphi}{2} \sin kl_1 \right\}^2 \right] A_1^2 \\ c_2 &= 2 \frac{B}{B_1} \sin^2 kl \cdot A_1 \\ c_3 &= 4 \left(\frac{r_4}{r_{00}} \right)^2 \dots \dots (3.42) \\ c_4 &= -4 r_4^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.46)$$

$$\text{ただし } A_1 = \left| \frac{4}{3\pi} \frac{a}{h} \left(\frac{B}{b} \right)^2 \sin kl \sec \frac{\varphi}{2} f \right|$$

ここで、Newtonの近似法を用いると近似解 $r_0^{(k+1)}$ は次式で与えられる。

$$r_0^{(k+1)} = r_0^{(k)} - \frac{G\{r_0^{(k)}\}}{G'\{r_0^{(k)}\}} \quad (3.47)$$

$G'\{r_0^{(k)}\}$; (3.45)式の導函数

計算は電子計算機により $G\{r_0^{(k)}\} < 10^{-4}$ を満足する r_0 を解として採用した。

図-3.8は $l/l_0 = 0.75$, $B/B_1 = 1/3$, $B/b = 5$ のケースについて、湾の固有周期 T_0 と入射波周期 T との比 T/T_0

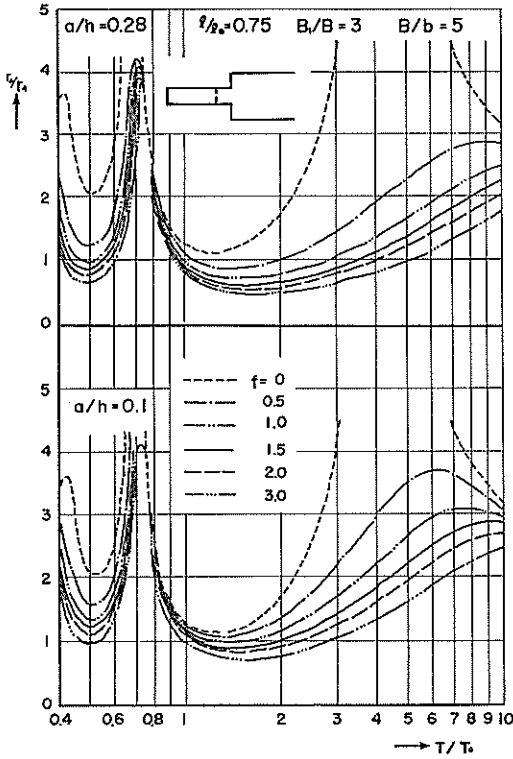


図-3.8 複合型に対する計算結果

を横軸に、入射波振幅に対する港奥振幅の比 r_0/r_1 を縦軸にとって、港口損失係数 f をパラメーターとして描いたもので $a/h=0.28, 0.10$ の両方の計算結果が示されている。

湾の固有周期 T_0 は、湾口が閉じたものとして

$$T_0 = \frac{2l_0}{c} = \frac{2l_0}{\sqrt{gh}}$$

で表わし

$$\frac{l_0}{L} = \frac{\frac{1}{2}cT_0}{cT} = \frac{1}{2} \frac{T}{T_0}$$

で関係づける。なお $L/\Delta x=20$ とおいた。

図-3.8 から、港口損失係数 f の増加により、相対振幅 r_0/r_1 は小さくなることおよび損失を考慮した場合は損失を考慮しない場合の共振周期で必ずしも共振しないことがわかる。

3.7 湾口防波堤

図-3.9 に示す湾口防波堤に対しては (3.41), (3.42) 式において、 $l_1=0, l=l_0$ とおくと

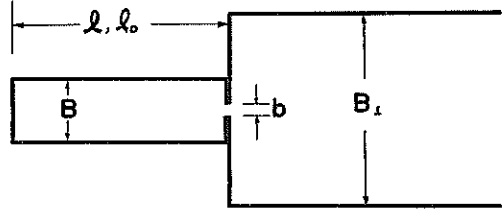


図-3.9 湾口防波堤

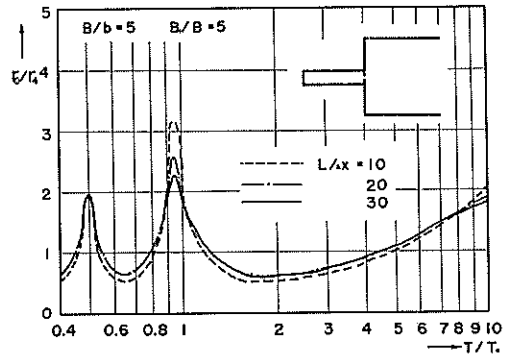


図-3.10 湾口防波堤に対する $L/\Delta x$ の影響

$$4\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 - 4\left(\frac{r_1}{r_{00}}\right)^2 = 2\frac{B}{B_1} S \sin^2 kl_0 + S^2 \sin^2 kl_0 \quad (3.48)$$

$$4\left(\frac{r_1}{r_{00}}\right)^2 = \left(\frac{B}{B_1}\right)^2 \sin^2 kl_0 + \left\{ (R_0 \sin kl_0 - \cos kl_0) - \sin kl_0 \left(\frac{B}{B_1} - 1\right) \tan \frac{\varphi}{2} \right\}^2 \quad (3.49)$$

と変形される。

図-3.10 は $L/\Delta x$ の変化による相対振幅 r_0/r_1 の影響を検討したものである。第1報、図6.7に示すように港口損失を考慮しない場合は $L/\Delta x$ の変化により相対振幅はかなりの相違を生じる。一方、損失を考慮した場合はピークで若干の相違が見られるが、全体的にみた場合 $L/\Delta x$ の変化による相違は非常に小さいといえよう。

3.8 模型実験値との比較

第3報で行なった模型実験〔波防堤を有するケース〕に対応する計算式は以下のとおりである。

湾外流速は (3.31) 式より

$$U = -r_1(1+n)\sin k(x-x_1)\cos \sigma(t-t_1) - r_1(1-n)\cos k(x-x_1)\sin \sigma(t-t_1) \quad (3.50)$$

で表わされる。

一方、 $x=l_0$ における造波板の変位を

$$\xi = e \sin \sigma(t - t_2) \quad (3.51)$$

とすると、その流速は

$$u = \sigma e \cos \sigma(t - t_2) \quad (3.52)$$

a の代わりに、造波板の偏心 e を用いて上式を無次元化すると、

$$U = \frac{u}{\sqrt{\frac{g}{h}} \cdot e} = \frac{\frac{2\pi}{T} \cdot e}{\sqrt{\frac{g}{h}} \cdot e} \cos \sigma(t - t_2) = kh \cos \sigma(t - t_2) \quad (3.53)$$

(3.50), (3.53) 両式の $\sin \sigma t$, $\cos \sigma t$ の項をそれぞれ等置してまとめると、

$$\left(\frac{kh}{r_1}\right)^2 = 1 + n^2 - 2n \cos 2k(l_3 - x_1) \quad (3.45)$$

となる。

$$l_3 - x_1 = l_3 - l_0 + l_0 - x_1 = l^2 + l_0 - x_1$$

であるから、(3.41), (3.42) 式から

$$\left(\frac{kh}{r_{00}}\right)^2 = \{R_0 \sin kl(Q \sin kl_1 + \cos kl_1 \sin kl_2) - (Q \sin kl_0 + \cos kl_0 \cdot \sin kl_0)\}^2 \quad (3.55)$$

$$\left(\frac{kh}{r_0}\right)^2 = \left(\frac{kh}{r_{00}}\right)^2 + S^2 \sin^2 kl(Q \sin kl_1 + \cos kl_1 \sin kl_2) \quad (3.56)$$

となる。ここに

$$Q = \frac{B}{B_1} \cos kl_2 + \left(\frac{B}{B_1} - 1\right) \sin kl_2 \tan \frac{\varphi}{2} \quad (3.57)$$

しかるに

$$S = \frac{B}{b} F \sec \frac{\varphi}{2} = \frac{4}{3\pi} \frac{e}{h} f \left(\frac{B}{b}\right)^2 \times r_0 |\sin kl| \sec \frac{\varphi}{2} = Cr_0 |\sin kl|$$

$$\text{ただし } C = \frac{4}{3\pi} \frac{e}{h} f \left(\frac{B}{b}\right)^2$$

であるから、(3.56) 式は

$$\left(\frac{kR}{r_0}\right)^2 = \left(\frac{kh}{r_{00}}\right)^2 + \left(\frac{C^2 k^2 h^2}{r_0}\right)^2 \times \sin^4 kl(Q \sin kl_1 + \cos kl_1 \sin kl_2)$$

となり、 $(kh/r_0)^2$ に関する二次方程式となるから、これを解きかつ正号をとって書き直すと結局

$$2\left(\frac{r_{00}}{r_0}\right)^2 = 1 + \sqrt{1 + \frac{2Ckh \cdot \sin^2 kl(Q \sin kl_1 + \cos kl_1 \cdot \sin kl_2)^2}{\left(\frac{kh}{r_{00}}\right)^2}} \quad (3.58)$$

なる式が得られる。

湾口防波堤に対するケースでは (3.58) 式の $l_1 \rightarrow 0$, $l \rightarrow l_0$ とおくと

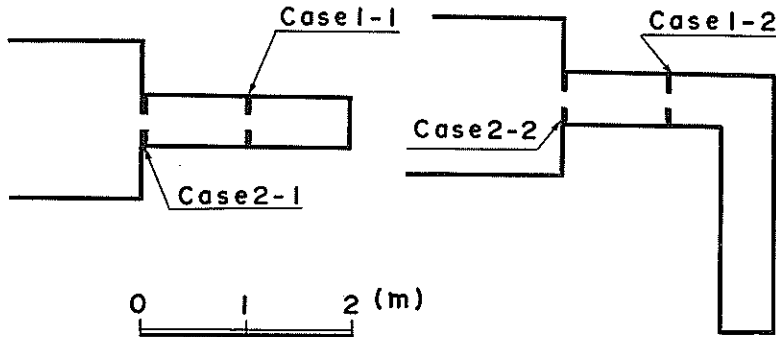


図-3.11 第3報で行なった模型実験ケース

表-3.3 実験定数

ケース	l_0	l	l_1	B/b	B_1/B	l_2	h	e	f	$4x$
1-1	cm 200	cm 100	cm 100	5	3	cm 968	cm 30	cm 5	1.5	cm 10
1-2	400	300	100	"	"	"	"	"	"	"
2-1	200	200	0	"	"	"	"	"	"	"
2-2	400	400	0	"	"	"	"	"	"	"

長周期波に対する防波堤の効果に関する計算

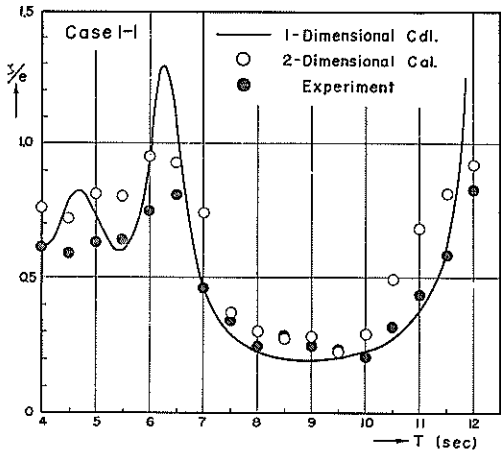


図-3.12 計算値と実験値の比較 [Case 1-1]

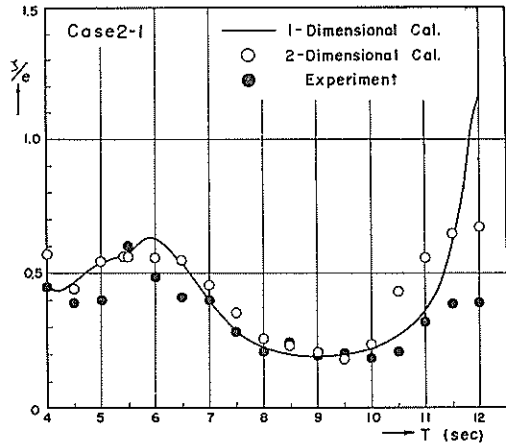


図-3.14 計算値と実験値の比較 [Case 2-1]

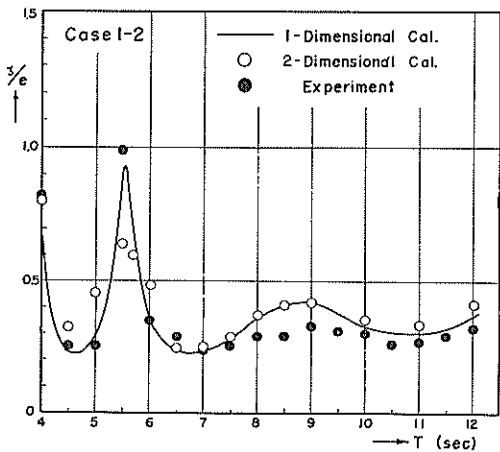


図-3.13 計算値と実験値の比較 [Case 1-2]

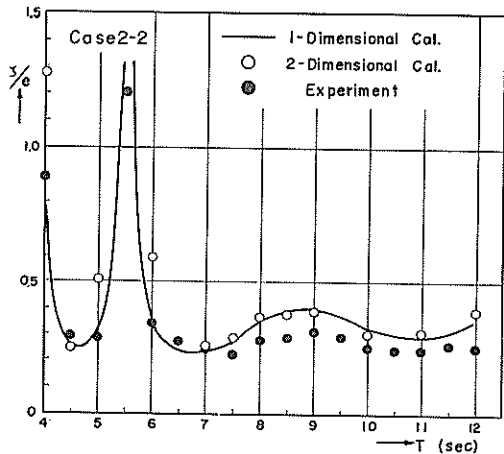


図-3.15 計算値と実験値の比較 [Case 2-2]

$$2\left(\frac{r_{00}}{r_0}\right)^2 = 1 + \sqrt{1 + \left\{ \frac{2Ckh \sin^2 kl_0 \sin kl_2}{\left(\frac{kh}{r_{00}}\right)^2} \right\}} \quad (3.59)$$

となる。

第3報で行なった実験ケースは図-3.11に示すとおりで、計算に必要な諸定数を表-3.3に示す。

図-3.12~15は一次元計算値と二次元計算値および実験値の比較を示したものである。これらの図から、港口損失を考慮した一次元計算値は二次元計算値および実験値に対して良い近似を与えることがわかる。

これらの比較において、港口損失を考慮した一次元計算式の妥当性は十分証せられたものといえよう。

3.9 いわゆるハーバー、パラドックスについて

いままでに述べてきた一次元計算式を用いてハーバーパラドックス⁹⁾について考察してみる。

図-3.16は防波堤がある場合のケースとして図-3.8の計算結果($a/h=0.28$)から、港口損失を考慮しない $f=0$ と損失考慮の $f=1.5$ とを選び、これに防波堤が無い場合の一次元計算結果を附加したものである。この図から、防波堤がある場合でも港口損失を考慮しないときは、例えば $0.65 < T/T_0 < 0.75$, $T/T_0 > 3$ のような入射波周期においては防波堤が無い場合よりかえって港奥水位が増大することがわかる。しかしながら、港口損失を考慮すれば一般に防波堤が無い場合より港奥水位は減少する。すなわち、港口での損失を考慮すればいわゆるハーバーパラドックスなる現象は生じない。

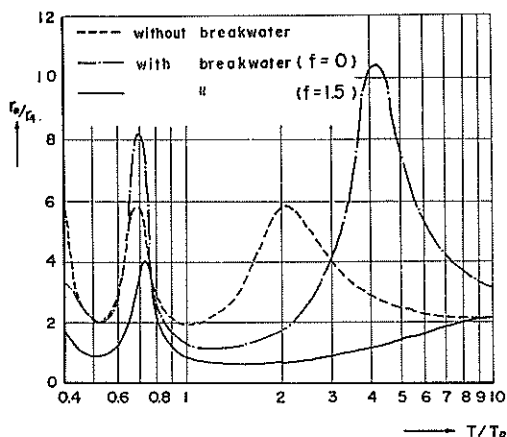


図-3.16 防波堤がある場合と無い場合の一次元計算結果の比較

4. 堤体下部捨石マウンドの浸透を考慮した場合

4.1 概 要

従来までに行なってきた計算では、津波は防波堤で完全反射するものと考え、防波堤法線に垂直方向の流速を0とおいた。しかしながら混成堤型式の防波堤においては、基礎捨石マウンドからの浸透が量の多少はともかく存在するに違いない。そこで浸透の影響のオーダー・エスティメットを行う目的で、2.と同様1968十勝沖地震津波に対する大船渡津波防波堤の捨石マウンドからの浸透を考慮した計算を行なった。

4.2 計 算 法

まず、捨石内を流れる水の透水係数を決定することが必要である。一般に土粒子内の浸透流は、粒子内の流れが層流であるか乱れた流れであるかによって図-4.1のように表わされる。

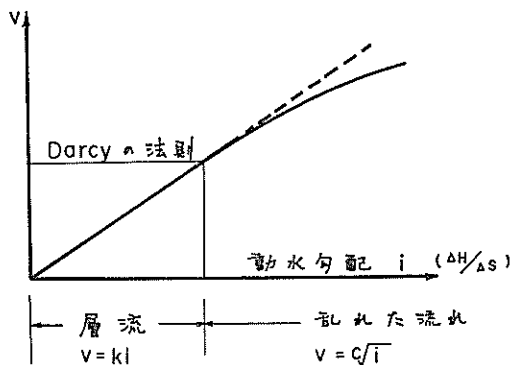


図-4.1 土粒子内の浸透流速

基礎捨石マウンドのように径の大きい石の場合はレイノルズ数の増加とともに捨石内の流れも乱れた状態となって、もはや Darcy の法則は適用できない。そこで一般には、管路の抵抗則と類似の式が捨石内の抵抗則を表わす式に拡張される。

管路の抵抗則は

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \xi \frac{V^2}{2gD} \quad (4.1)$$

ただし $\xi = \phi\left(Re, \frac{k}{D}\right)$

で表わされるが、これを捨石内の抵抗則に拡張すると、

$$\frac{\Delta H}{\Delta S} = \zeta \frac{U^2}{2gd} \quad (4.2)$$

ただし $\zeta = \phi\left(Re, \epsilon, \frac{k}{d}\right)$

また (4.1), (4.2) 式において

$\Delta H/\Delta S$; 動水勾配

ξ ; 係数

d ; 捨石粒径

D ; 管路の径

k ; 粗度の函数

ϵ ; 捨石の空隙率

となる。すなわち、捨石内の浸透流速 U は次式で与えられる。

$$U = \sqrt{2gd \cdot (\Delta H/\Delta S) / \zeta} \quad (4.3)$$

そこで第1の問題は係数 ζ を求めることである。基礎マウンドの捨石重量は -30.3m 以浅が 1t, 以深は 300kg である。よって計算には危険側を考え、全断面が 1t の捨石で構成されていると仮定する。この捨石の比重を 2.5 として換算球の直径 d を求めると、

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \times 2.5 = 1$$

$$\therefore d = 0.9 \text{ (m)}$$

となるが、計算では $d=1.0$ をとった。

次に、2, 3 の実験結果から係数 ζ を求めてみると次のようになる。

Le Mehauté によれば、Cohen de Lara は径がおよそ 20cm の石による実験を行ない次の抵抗則を得た¹⁰⁾。

$$\zeta = \frac{C(Ud/\nu)}{\epsilon^5} \quad (4.4)$$

ここで $C(Ud/\nu)$ はレイノルズ数の函数で図-4.2 に示される。今、仮りに $U=10$ cm/sec. 水の動粘性係数 $\nu=1.14 \times 10^{-2}$ cm²/sec として ζ を計算すると

長周期波に対する防波堤の効果に関する計算

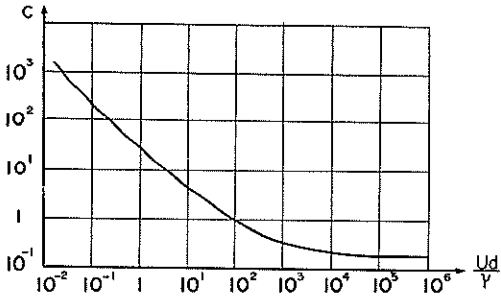


図-4.2 レイノルズ数による $c(Ud/\nu)$ の変化

$$Ud/\nu = \frac{1 \times 10^5}{1.14 \times 10^{-3}} \approx 1 \times 10^8$$

となり、およそ 10^8 のオーダーとなる。

図-4.2 から $c=0.2$ となり、捨石の空隙率 $\epsilon=40\%$ とすると、結局 (4.4) 式から係数 ζ は (4.6) の値をとる。

$$\zeta = \frac{0.2}{(0.4)^5} \approx 20 \quad (4.6)$$

富永、坂本¹¹⁾による実験では、抵抗係数のレイノルズ数による変化は (4.7) 式で与えられる。

$$\zeta = \left(\frac{10^3}{Re} + \frac{29.3}{\sqrt{Re}} + 4.3 \right) / \frac{\epsilon^3}{1-\epsilon} \quad (4.7)$$

ただし $Re = \frac{U \cdot d}{(1-\epsilon)\nu}$

先ほどと同様、 $\epsilon=0.4$ を代入すると Re は 10^5 のオーダーとなり、これを (4.7) 式に代入すると ζ は

$$\zeta \approx 40 \quad (4.8)$$

となる。

最後に運輸省第二港湾建設局、横浜調査設計事務所が行なった実験¹²⁾によると、係数 ζ は $Re > 10^4$ の範囲では空隙率に無関係に

$$\zeta = 20 \quad (4.9)$$

に収束するとしている。

以上の3つは、いずれも定常流による実験であって、津波の現象に直接この結果が使われ得るかどうか疑問であるが、津波の長周期性からそれが十分定常状態に近いと仮定し、かつ危険側を考慮して $\zeta=20$ を採用した。

なお、(4.3) 式における動水勾配 $\Delta H/\Delta S$ の ΔH は防波堤内外の水位差であるが、計算の都合上水位計算点における水位差で与え、 ΔS は堤体幅をとって 12 m とした。また、水深は防波堤設置部の約 2/3 が捨石層であると考て $h_u(17,14) = 20$ m, $h_u(19,14) = 8$ m を与えた。

よって (4.3) 式から、捨石内の浸透流速 u はそれぞれ次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} u(17,14) &= C \times \sqrt{\zeta(17,13) - \zeta(17,14)} \\ u(19,14) &= C \sqrt{\zeta(19,13) - \zeta(19,14)} \end{aligned} \right\} (4.10)$$

$$C = \sqrt{2gd/\Delta S \cdot \zeta} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 1/12 \times 20}$$

なお、防波堤開口部では港口損失は考慮するが、浸透は考慮せず、港口損失係数 f は 1.5 とした。

4.3 計算結果

港口損失係数の変化による港奥水位変動の影響を検討した 2. でも述べたように、港口部での変化は堤外水位にはほとんど影響を及ぼさない。このことは、浸透考慮の場合にもいえることであって、堤外の長崎では捨石からの浸透を考慮するか否かの差はほとんど生じなかった。

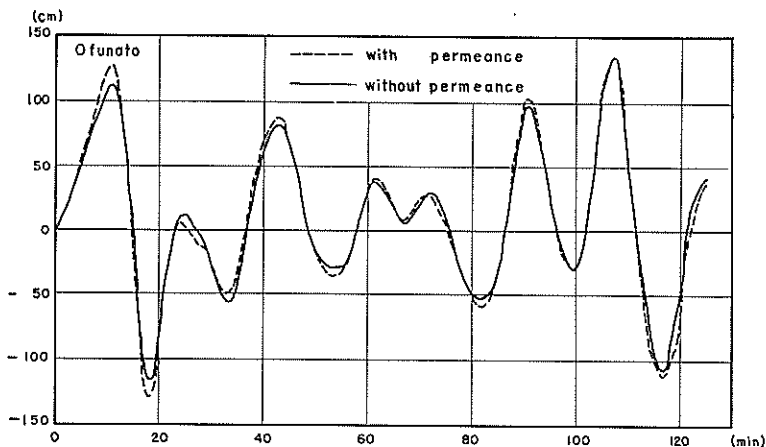


図-4.3 浸透考慮の有無による計算水位変動の比較

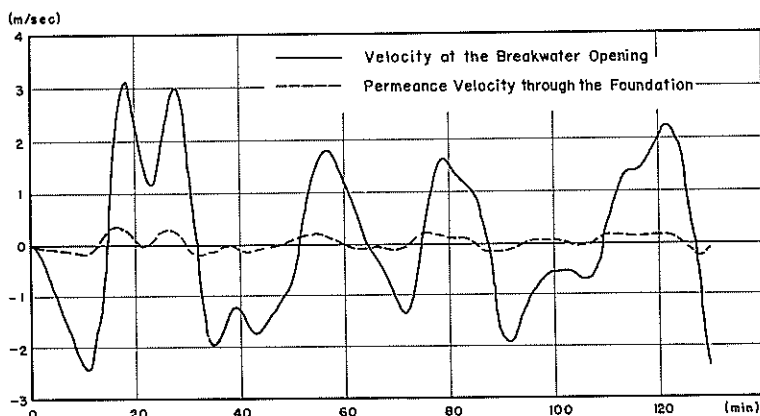


図-4.4 浸透流速と防波堤開口部流速の比較

一方、堤内の大船渡では、図-4.3に示すように水位が若干増大する傾向が見られる。例えば、第1波の山は浸透を考慮しない場合は1.12mであるが、浸透流を考慮した計算においては1.27mとおおよそ10%の増大をもたらす。

図-4.4に浸透流速と防波堤開口部流速との比較を示す。

以上の計算結果によれば、入射波形や港口損失係数などと併せて考えるとき、浸透流の影響は特に著しいものではなく、実用上は一般にこれを無視した計算を行なってさしつかえないであろう。

5. あとがき

以上に行ってきた検討により、二次元波動方式による計算法の港口損失係数値は、従来われわれが用いていた $f=1.5$ が、実用上十分妥当であること、および港口損失を考慮した一次元計算式は二次元計算式への良好な近似式となりうることがわかった。また、捨石マウンドからの浸透の影響は一応これを無視しても差支えないことが結論づけられた。

なお、図面作成に関しては、当研究室久保技官の手を煩わせた。

参考文献

- 1) 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算：運輸省港湾局調査設計室，昭和37年3月。
- 2) 伊藤喜行・土岐祥介・森平倫生：長周期波に対する防波堤の効果に関する計算（第2報），港湾技術研究所報告，Vol. 3, No. 7, 1967。

- 3) 伊藤喜行・木原 力：長周期波に対する防波堤の効果に関する計算（第3報），港湾技術研究所報告，Vol. 7, No. 4, 1968。
- 4) 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計算（第4報），港湾技術研究所報告，Vol. 7, No. 4, 1968。
- 5) 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計算（第5報），港湾技術研究所報告，Vol. 8, No. 3, 1969。
- 6) 松島湾の津波計算：防波堤研究室資料，1964年12月。
- 7) 新潟地震津波調査報告：運輸省港湾局，第一港湾建設局，港湾技術研究所，昭和39年8月。
- 8) 名古屋津波計算：受託試験報告，1966年3月。
- 9) Miles, J. and W. Munk: Harbor Paradox, J. Waterways and Harbors Div., ASCE, pp. 110-130, August 1961.
- 10) Le Méhauté: Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, Décembre, 1957.
- 11) 富永正照・坂本忠彦：透過性構造物による波の変形に関する研究(1)，第16回海岸工学講演会講演集 pp. 309-319, 1969.
- 12) 寺西弘治：伊勢湾長大防波堤の計画および設計上の諸問題に関する研究，昭和41年12月。

〔その他〕

H. Fukuuchi, Y. Ito: On the effect of breakwaters against tsunami: Proc. of 10th Conference on Coastal Engineering. pp. 821-829, September, 1966.

Yoshiyuki, Ito: On the effect of Otunato tsunami-breakwater against 1968 tsunami, Thirteenth Congress of the International Association for Hydraulic Research, 1969.

(1970.3.31 受付)