

港内波浪の問題点について

港の形と静穏度との関係についての研究 一第2報一

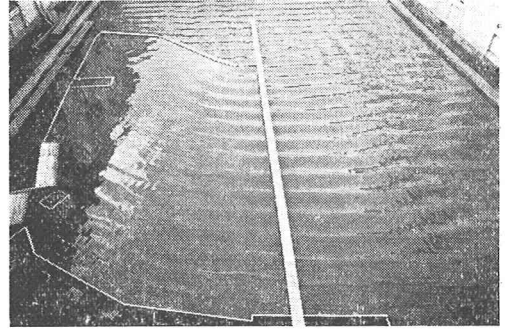
尾崎 晃*・猿川 弦**

1. 概 説

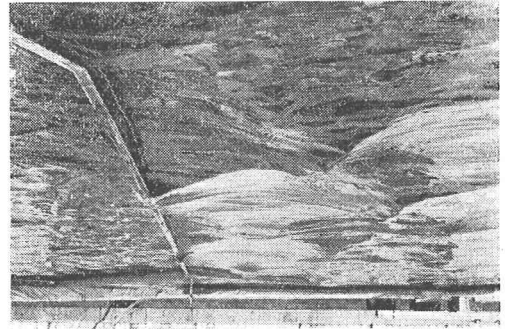
第9回海岸工学講演会において北海道の様似港に関する港内波浪の報告中に述べたように、港の形、岸壁、防波堤などの構造や配置のいかんによっては、幾何学的には完全にしゃへいされている泊地内にも大きな波が発生する場合があることがわかっている。港内の泊地、すなわち防波堤、防砂堤、導流堤などによって周囲を囲まれた水域は、本来静穏な水面を持たなくてはならない場所である。このような港内の泊地に生ずる波を特に港内波浪と呼ぶことにする。流体力学上の立場からいえば港内の波も外海の波も水面波として全く同じ性質を持つものであるが、外海の波は風浪またはうねりのいずれにしてもその波向はほぼ一定であり、特にうねりの場合には波峯線がだいたい規則正しくほとんど一定の間隔を保った平行線とみなし得る。これらに対して港内波はせまい港内水域に発生する波であって、外海の波と比較した場合、いっそう不規則な波であることが多い。ことに港内があまり広くない場合で、防波堤、岸壁が直立壁からできているような港においていちじるしい。

港内波浪の発生原因は大別して二つに分けられる。一つは港内において発生する風波である。特に港内面積が広い港、またはある特定の方向に細長い形をした港の場合には、港内の fetch のみによって発生する風浪も考慮しなくてはならないが、しかし単に風によって発生する波それ自体はあまり大きなものではないようである。つぎは港口から直進あるいは回折して進入する外海の波のエネルギーによって港内に発生する波である。これがのちに述べるようにいろいろ面倒な港内波浪の原因としては最も重要な意味を持つものと考えられる。港口その他防波堤の開口部より進入した波はその進行方向に直進すると同時に回折によって防波堤の陰の部分へも半円形状に伝播し²⁾、岸壁などの直立壁があるとほとんどエネルギーの損失なしに反射されて重複波を生ずる。また波が斜方向から直立壁に入射すると網目状の重複波³⁾を発生する。この種の波は港の外かく施設、埠頭などの構造、配置のいかんによっては回折、屈折、反射の組合せで

写真一 古平港模型における波の回折
 $T_m=0.7\text{sec}$



写真二 斜方向からの波による網目状重複波



思いがけぬような奥のほうまで侵入し、泊地内の静穏を乱す場合がある。第三には防波堤天端を越す波によって港内に発生する波であるが、特に天端が低くて高潮時に水面すれすれになるような場合を除けば、点を発生源とする周期の短い群波であって、あまり大きな困難の原因とはならない。港口をせまくすれば進入する外海のエネルギーはそれだけ阻止できるが、これは一方において船舶の要求と大きく矛盾する。港口幅をどこまで縮小すれば泊地の静穏がどれだけ良好になるかという問題を、単に港口幅のみならず、その位置、向き、さらに他の手段との組合せなどによって解決することが本研究の目的であった。港内面積がせまい漁港などの場合には防波堤の越波による影響のほうが港利用上の見地からは大きいのであるが、本文ではこのような場合は対象とせず、港口よりの進入波の影響のほうが大きい中程度以上の面積の港を対象とした。

* 正員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

** 正員 北海道開発局

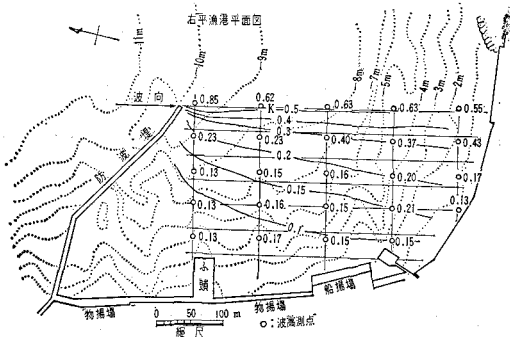
2. 回折波の影響について

半無限長で不透過性の防波堤による波の回折の問題は Penny および Price⁴⁾ によってくわしく研究され、さらに Putnum, Arthur⁵⁾ はこれらの理論を実用に便なように単純化し、近似解を導いて、それが実験値とよく合うことを示した。以上はいずれも一様水深という条件のもとにおける解であるが、実際の港における回折の問題を取り扱う場合は必ず水深の変化をとまなっている。また半無限長で直線という防波堤も実在しない。このような実際問題に以上の理論解が応用できるかどうか、またどの程度の範囲まで適用可能であるかを、実在の港の模型を用いて実験的に調べて見た。

(1) 古平港模型による実験

同港は北海道古平郡(積丹半島)にあり、日本海に面した第三種漁港である。図-1 は実験当時の港の形および水深を示すものであるが、現在、拡張工事がすでに開始されている。模型は縦横ともに $1/60$ の縮尺で $15\text{ m} \times 20\text{ m}$ の平面水槽内に作られた。防波堤に対して進行してくる波向は、半島堤の先端において 124° の角度をなすものとし(現地の観測ならびに資料より推定)、周期は $T_m = 1.3\text{ sec}, 1.0\text{ sec}, 0.7\text{ sec}$ の3種について実験した。波高は普通の抵抗式波高計、増幅器、ペン書きオシログラフを用いて同時に6点の測定を行ない、港内外をくまなくおおうように測点を配置した。一方、計算による推定には Putnum & Arthur の式

図-1 入射角 124° 、周期(模型の) $T_m = 0.7$ 秒の場合の回折係数実測値と計算値との比較



び水深を示すものであるが、現在、拡張工事がすでに開始されている。模型は縦横ともに $1/60$ の縮尺で $15\text{ m} \times 20\text{ m}$ の平面水槽内に作られた。防波堤に対して進行してくる波向は、半島堤の先端において 124° の角度をなすものとし(現地の観測ならびに資料より推定)、周期は $T_m = 1.3\text{ sec}, 1.0\text{ sec}, 0.7\text{ sec}$ の3種について実験した。波高は普通の抵抗式波高計、増幅器、ペン書きオシログラフを用いて同時に6点の測定を行ない、港内外をくまなくおおうように測点を配置した。一方、計算による推定には Putnum & Arthur の式

$$F(r, \theta) = \{ |f(u_1)| - (1/\pi\sqrt{2})u_2 \} e^{-2\pi i \{ (1/8)\theta + \phi(u_1) \}} \cdot e^{-2\pi i \{ (r/L) - \phi(u_1) \}} \dots \dots \dots (1)^{6)}$$

ここに $u_2 < -2$ として

$$u_1 = -\sqrt{8r/L} \sin[(\theta_0 - \theta)/2]$$

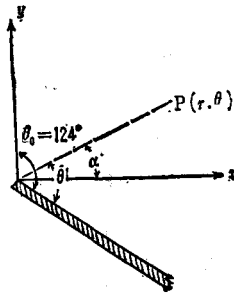
$$u_2 = -\sqrt{8r/L} \sin[(\theta_0 + \theta)/2]$$

$$\phi(u) = (u^2/4) + \{ APRf(u)/2\pi \}$$

を用いた。

なお $f(u_1)$ および $\phi(u)$ はグラフの形で与えられて

図-2 関係式



いる⁷⁾。
 図-2 の関係を用い、上式の u_1, u_2 を直角座標系に変換すると、 $\theta_0 = 124^\circ$ であるから $u_1 = -\sqrt{8r/L} \sin[(\theta_0 - \theta)/2]$
 $y = r \cos(\theta_0 - \theta), x^2 + r^2 = r^2 \sin^2[(\theta_0 - \theta)/2]$
 $= \frac{1}{2} \{ 1 - \cos(\theta_0 - \theta) \}$

したがって $u_1 = -2\sqrt{\left(\frac{x}{L}\right)^2 + \left(\frac{y}{L}\right)^2} - \frac{y}{L}$

つぎに $u_2 = -\sqrt{8r/L} \sin[(\theta_0 + \theta)/2]$ を変形する

いま $\alpha = \theta - 34^\circ$
 $\cos(\theta_0 + \theta) = \cos(\theta - 34^\circ + 158^\circ)$
 $= \cos(\alpha + 158^\circ)$
 $= -(\cos \alpha \cos 22^\circ + \sin \alpha \sin 22^\circ)$
 $= -(0.927x + 0.375y) / \sqrt{x^2 + y^2}$

また $\sin^2[(\theta_0 + \theta)/2] = \frac{1 - \cos(\theta_0 + \theta)}{2}$
 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

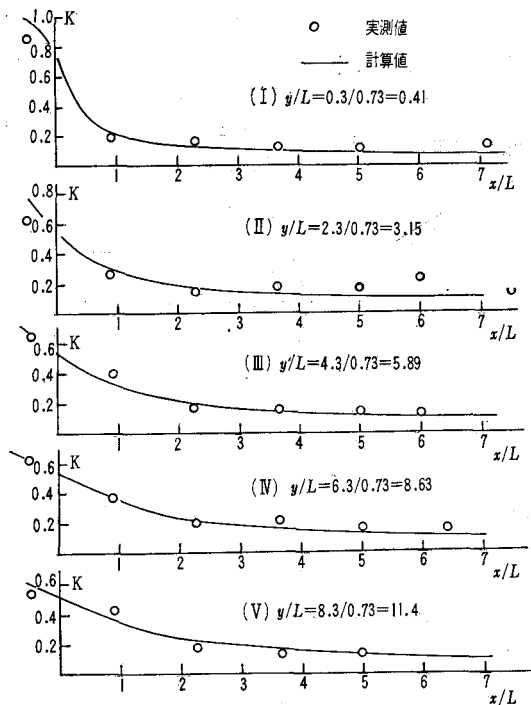
したがって

$$u_2 = -\frac{4}{L} (\sqrt{x^2 + y^2} + 0.927x + 0.375y)$$

模型における波高測定の x, y 座標の値から u_1, u_2 を計算し、それより $f(u_1)$ の関数値をグラフで求め、式(1)に入れると回折係数 K が求められる⁸⁾。

この模型実験の場合は、図-1 に見られるとおり、水深は港外から港内へ向かって次第に浅くなっているが、主として回折波の主要部分が通過する -9.0 m から -7.0 m あたりの海底勾配は変化が比較的緩慢である。入射波に対する水深は、港外の -13 m 付近を標準に取った、これは模型では 22 cm の水深である。一例として周期 5.4 sec (模型においては 0.7 sec)の場合の計算結果を示すと、図-1 および図-3 のようになる。このときの模型波の波長は $L_m = 0.73\text{ m}$ であった。理論式による計算値と実測値とはこの図で見ると、実用上の立場からは十分な程度によく一致している。一様水深という条件で導かれた式をこの模型のような海底変化のある場合に用いてもまず支障がないと考えられる。ただ、この港は水際線を直立壁により囲まれているため、その近くにおいては反射波の影響が現われ、また岸近くで水深が急に浅くなっているのもその影響も加わることが考えられるが、 x/L の大きいところでは計算値からのずれが目立つ。模型における周期 1.0 sec 、および 1.3 sec の場合についても実験したが、周期が大になるほどこの傾向がいちじるしくなった。しかし、いずれの場合においても $x/L, y/L$ の値の小さい部分では、実測値と計算値は比較的よく一致している。

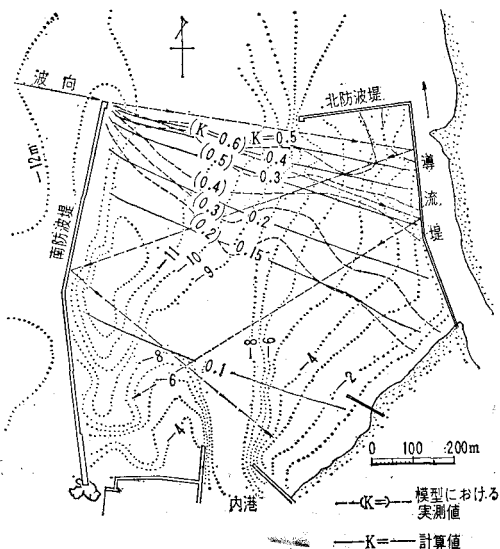
図-3 古平港模型 ($1/60$) による回折係数の計算値との比較



(2) 留萌港の模型による実験

留萌港は北海道中央部で日本海に面した重要港湾であつて、図-4はその外港部分を示すものである。この港に來襲するおもな波は、冬季の季節風による波高 3~4 mの波で、南防波堤の正面からくる西の波が最も多い。そのような波について(1)と同様の計算をすると以下のようなになる。いま、計算の便宜上、南防波堤先端部に対し 90° に入射する波を対象とする。実験結果により、水

図-4 留萌港における波の回折係数



深18m, 周期 9 sec を採用すると、浅海波の波長と周期との関係式より $L=107.2 \text{ m} \approx 100 \text{ m}$

古平港の場合と同様式(1)を用いることとし、 $x/L, y/L$ をそれぞれ適宜定めて、 u_1, u_2 を計算し、図表⁹⁾により $f(u_1)$ を求め、式(1)より回折係数 K を計算する。その結果を平面図で表わすと 図-4 のようになる。計算値は、留萌港の外港部を全部一様な水深と仮定した場合のものである。

これに対して実物の $1/100$ 縮尺(縦、横同じ、ひずみなし)模型による測定結果を重ねて記入すると同じく 図-4 に示す通りである。ただし、この実験値は後述するように北防波堤に接続している導流堤の全面に消波ブロックを配置し、この部分からの反射を消した場合の値であつて、実物の留萌港の現状に対する実験値とは多少ことなるものである。この場合、海底地形、北防波堤による再回折などいろいろ計算に乗らない要素が加わっているのであるが、計算値、実験値は大体において合つており、計画、設計に際してのデータとしてまず信頼しうる値を与えるものと考えてよい。なお、この留萌港外港部の模型も前の場合と同様 $15 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ の平面水槽中に作られ、模型における最も水深の浅い部分で 9 cm であつた、波高測定も前同様の方法によつた。

3. 防波堤、岸壁等による反射の影響

港内波浪の問題については港のいろいろな施設中の直立壁による反射波(特に周期の長いうねりなどの場合に顕著)の影響がゆるがせにできないものであることは昨年の報告中¹⁰⁾に述べた。すなわちしゃへい域内において外海からの入射波高よりも高い波高が観測されたのである。このような状態は上記の例のような特殊の港は別としても、将来、多くの港湾において港内水面をほとんどあますところなく利用するようにいろいろの施設が充実してくる場合にはよく注意しないと起こる可能性が大であらう。

反射波による影響が実際にどの程度現われるかを確かめるためにつぎの実験を行なつた。図-5のような防波堤と岸壁の配置を持つ港において岸壁に対して斜方向から波がくるようにし、さらに造波板の方向を二通りに変えて波を送り、岸壁前面における波高を測定した(この配置は様似港¹¹⁾の実例を取り入れたもので、造波板のところがオリビン埠頭に相当する)。図-6にその結果を示す。縦軸の波高は岸壁面の各位置における最高水面と最低水面の差を示す。横軸は岸壁右端からの距離を示す。ここに見られるように、岸壁前面においては波は完全に定常状態を呈し、その位置によって波高に極端な差を生ずることがわかる。造波板から直接入射する波だけによつては定常波は生じないから、これは右側の防波堤からの反射波が図中矢印の線のように岸壁に入射し、それら二波の合成によるものであることは明らかである。

図-5 岸壁と入射波高との関係

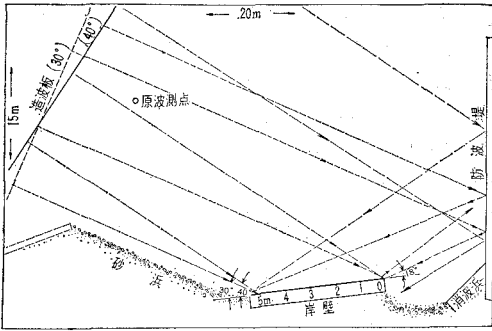
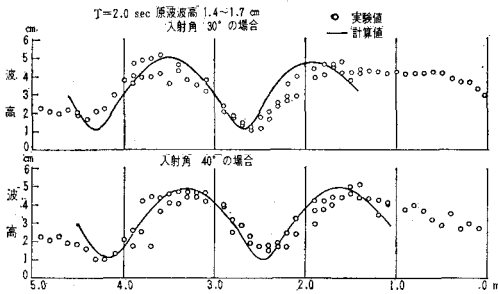


図-6 図-5の岸壁における波高



これを確かめるためつぎのような近似計算を行なった。
すなわち最も単純な場合として両方の波を正弦波と仮定し、平面図上から、波向、入射角、反射角を幾何学的に計算し、岸壁面に平行方向の波長を算出した。岸壁前面付近の水深は実物の港に合わせて作ってあったため完全に様でなく、沖側に向かって $1/10$ 程度の勾配を持ち、その他の部分は大体一様に $22\sim 23$ cm の水深であった。計算の一例を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} \text{正弦波の一般形は} \\ y &= a \sin(kx \pm nt) \\ k &= \frac{2\pi}{L}, \quad n = \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

いま、入射角 30° 、周期 $T_m = 2.0$ sec、原波(造波板から 3 m 進んだ地点で測定)の波高 $H = 1.4\sim 1.7$ cm、水深 $h = 22$ cm の場合を例に取れば、原波の波長は実測により $L = 285\sim 295$ cm、 $L/2 = 290/2 > h$ であるから、浅海波の周期と波長の関係

$$\frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \dots\dots\dots(3)$$

より $T_m = 2.0$ sec に対しては $h = 20$ cm のとき $L = 271$ cm、 $h = 25$ cm のとき $L = 300$ cm となる。いま $L = 287$ cm と仮定すると $L/T = 2.87/2.0 = 1.435$

一方、式(3)の右辺にそれぞれの数値を入れて計算すると、 1.42 となるから $L = 287$ cm。

入射角 α で岸壁にくる波は岸壁面においては波長 $L' = L \sec \alpha$ となる。したがって入射波の波長 $L_1' = 290 \cdot \sec 30^\circ = 340$ cm。また右側の防波堤に衝突してから反

射して岸壁にやってくる波の入射角は 18° であるから同様にして $L_2' = 290 \sec 18^\circ = 300$ cm となる。これらの関係を式(2)にあてはめると $k = 2\pi/L = 2\pi/340$ 、 $n = 2\pi/T = \pi$ 、 $a = 1.5/2$ より

$$y_1' = 0.75 \sin\left(\frac{2\pi}{340}x - \pi t\right) \dots\dots\dots(3)$$

ただし、この波は岸壁面上で重複波を生じ波高が2倍となるため

$$y_1 = 1.5 \sin\left(\frac{2\pi}{340}x - \pi t\right) \dots\dots\dots(4)$$

つぎに防波堤からの反射波については波長、周期はほとんど変化しないと考えられるが波高は反射後種々の原因によって相当減衰することが予想され、その正確な値はこの実験においては求められなかった。ここでは計算結果が実測値と合うような値を仮定し試算によることとした。その結果、反射して岸壁に到達した波の波高は 1 cm となり、 $a = 1.0/2$ である。前同様に岸壁においては重複波となるため、

$$y_2 = 1.0 \sin\left(\frac{2\pi}{300}x + \pi t\right) \dots\dots\dots(4)$$

となる。 y_1 、 y_2 を合成すると

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 = 1.5 \sin\left(\frac{2\pi}{340}x - \pi t\right) \\ &+ 1.0 \sin\left(\frac{2\pi}{300}x + \pi t\right) = \left(1.5 \sin \frac{2\pi}{340}x \right. \\ &+ \left. \sin \frac{2\pi}{300}x\right) \cos \pi t \\ &+ \left(\cos \frac{2\pi}{300}x - 1.5 \cos \frac{2\pi}{340}x\right) \sin \pi t \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

他の入射角、周期の場合についても、それぞれ同様に実測の原波波高を用い、反射波の波高を試算により推定して合成波を求めると、その結果は 図-6 の実線のようになる。周期 2 sec の場合は、こうして合成された定常波の形が、以上のような概略の方法を用いたにもかかわらず、実測値と良く合っている。入射角が 30° および 40° のそれぞれの場合において、岸壁の右端付近では定常波の波形が少しことなっているが、この現象は右の防波堤による反射波の通過経路がそれぞれの場合においてことなり、入射角 30° の場合の方が水深の浅い部分を長く通過し、したがって、波高、波長ともにいちじるしく減衰して岸壁右端付近に到達するためではないかと考える。

造波板を離れたところで測定された原波の波高は、周期 2 sec の場合はいずれも $H = 1.4\sim 1.7$ cm (平均 ≈ 1.5 cm) であったから、岸壁における波高 5 cm は原波の3倍以上に相当する。様似港の観測値によると港内しゃへい部に位置する物揚場前面における波高(ある特定位置の)のほうが直接外海からの進入波に直面しているオリビン埠頭の波高(観測値はいずれも重複波としての波高)よりも高く、しかもこのような現象が起こるときの港内

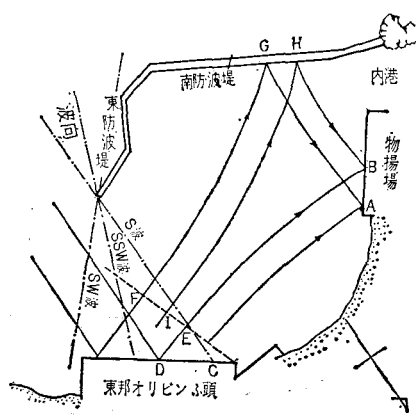
が起こる。このことは導流堤前面に消波ブロックを置いた実験と、これを取り去って直立壁のままとして行なった実験とを比較することにより明らかである。南防波堤先端からの回折による影響だけの場合(導流堤の反射を周期10sec前後の低いうねりで、比較的静穏に見えるような状態である。前記の模型で、規則正しい周期の波による実験の結果はこうした状況の典型的な場合をよく現わしている。すなわち外海から港内に入る波は一つであるが、それが岸壁、防波堤などによって反射されて、ある場所においては2方向からくる波となり、その合成によって原波の波高をはるかに越える局所的な波を発生する。先に述べた左右からの2つの波の合成は二次元の波としての計算であり、また非常に簡単に正弦波形と仮定した近似計算であって理論的には不完全なものであるが、実験結果とはかなりよく一致している。

4. 港の形と、回折、反射の影響

2.3.にそれぞれ回折と反射による影響を述べたが、実際問題としてはこれらは大い同一の港において同時に発生する現象である。たとえば様似港の場合は(図-7)東防波堤先端からの回折によってオリビン埠頭のほとんど全長に外海の波が衝突して反射し、一部が南防波堤から再反射されることによって3.において実験的に確かめられたとおりの現象が起こる。

つぎの例としては(図-4)留萌港外港部の状況をあげることができる。すなわち半島堤先端における回折の計算および実験の一例としてあげた同図は前にもふれておいたように、その回折波を正面から受ける導流堤のところに消波ブロックを配置して、ほとんど反射が起らないようにして実験した場合の結果である。実物の同港ではこの導流堤は直立堤であって反射波が生じている。ここではまだ現地の観測を行なってはいないが、 $1/100$ 縮尺模型によれば、導流堤からの反射波は外港の中を斜めに横断して南防波堤にあたり(図中に破線で示す経路)、

図-7 港内波の進行経路



ふたたび反射されて内港入口の波除堤付近に進む。これと、導流堤から直接進んで来た波とが合成されて、内港入口付近に他の場所よりも高い波

消した場合)には港内の波高分布は一様水深と見なした回折係数の計算値とほぼ一致し、内港入口波除堤付近の波高比(回折係数)は0.1以下となる。このような場合、港内静穏度を改善するための方法としては、いろいろ考えられるであろうが、実際の広い港を眺めているときにはややもすれば見落しがちな直立壁による反射の影響がゆるがせにできないものである点に注意する必要がある。したがって直立壁の法線を決定する際には幾何学的な入射、反射の各方向を作図し、さらに港内水深の変化による屈折の影響をも加味して、重要な地点にこれらの経路が集中しないよう考慮しなくてはならない。

5. あとがき

以上述べたことはいずれも現地観測、模型実験にもとづいて港内波の現象に考察を加えたものであるが、理論的にはまだ不備の点が多い。しかし従来、外かく施設、岸壁などの配置を計画するに際して一応考えられるとはいえ、具体的な問題としての回折波や反射波に対する認識が不足している場合が往々あったように思われる。実際の港における観測や模型実験が示すところによれば、周期が10 sec前後のかなり波長の長い波の場合にはそのエネルギーは反射では容易に衰えず、港の形によっては水深の浅い港奥まで到達する。これに対し回折波のほうは防波堤の陰の部分に入ると急に波高を減ずるから、回折係数が0.3程度以下になるまではその波の進路上に反射を生ずるような構造物を設けないようにすべきであって、港口から始めて順次このような組み合わせを考えて行けばよい。周期と、反射による energy loss との関係、波峯が斜に交さして互いに反対方向に進行する波における energy loss、海底地形の影響など未解決の問題が多く残っているが、それらについても、さらに研究を続けたいと考えている。

この報告中に実例としてあげた現地観測や模型実験は北海道開発局土木試験所、室蘭、小樽、留萌の各開発建設部のご厚意により筆者らが関係して行なったものである。ここに記して謝意を表す。なお、実験、観測には土木教室の小野敏行技官が多大の努力をほらわれた。深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 尾崎 晃・柳沢満夫: 様似港の港内波浪について一港の形と静穏度との関係に関する研究, 第1報, 第9回海岸工学講演会講演集, 1962.
- 2) Penny, W. G., Price, A. T.: The Diffraction Theory of Sea Waves and the Shelter afforded by Breakwater, Phil. Trans. of the Royal Soc. of London, Series A. Vol. 244, 1952.
- 3) 同上, p.246, および文献1)の中の図-9.
- 4) 文献2)に同じ.
- 5) Putnum, J. A., and Arthur, R. S.: Diffraction of Water Waves by Breakwaters, Trans. of A. G. U. Vol. 29, No. 4, 1948.
- 6), 7), 8) 同上 p.483.
- 9) 同上.
- 10) 11) 文献1)に同じ.