

小名浜港における港内波の解析方法について

赤塚雄三*・砂金益実**
進藤勉***・矢木秀雄***

1. ま え が き

小名浜港は福島県南部のいわき市にあり、新産都市郡山・常磐地区を含む東北地方南部を背後圏として近年急速に発展している同地方屈指の重要港湾である。

しかし、その地形的な立地条件は良好とはいいがたく、起伏の乏しい海岸線からわずかに突出した岬（三崎と八崎）を利用し、海岸線にはほぼ平行に長大な防波堤を築いて泊地と水際線を遮蔽する基本方針に沿って防波堤建設が進められている（図-1）。

本港のように外海に直面している港では、防波堤計画が未完成の段階では外海の波浪によって港の機能が阻害される機会が多いだけでなく、防波堤の施工自体が著しく制約される。このため、防波堤築造にあたっては入念な調査結果に基づいた波浪予測を導入して施工計画をたて、能率向上と災害防止をはかっているが、予測しに

くい波浪によって被災することもまれではない。

小名浜港では 1958 年 4 月以来波浪観測を継続し、それらの結果は随時に取りまとめ、すでに 6 回にわたって報告書の形式で公表し、本港の港湾計画や施工計画の策定、実施に当って基本的な資料として活用してきた。

本報告もそれらの一環をなすものであって、三号、四号埠頭周辺の港内波におよぼす西防波堤の遮蔽効果を調べ、あわせて港内波推定の手法について検討したものである。

港内波の推定には模型実験あるいは回折法などが多く用いられているが、小名浜港内のような自然状態の波に対しては角分散法が有効であると考えられる。本文では角分散法および回折法により小名浜港内の波高解析を行ない両方法の比較をなし、さらに四号埠頭周辺の実測値と両方法による推定値との相関を比較することによって角分散法が港内波の推定に有効であることを示した。

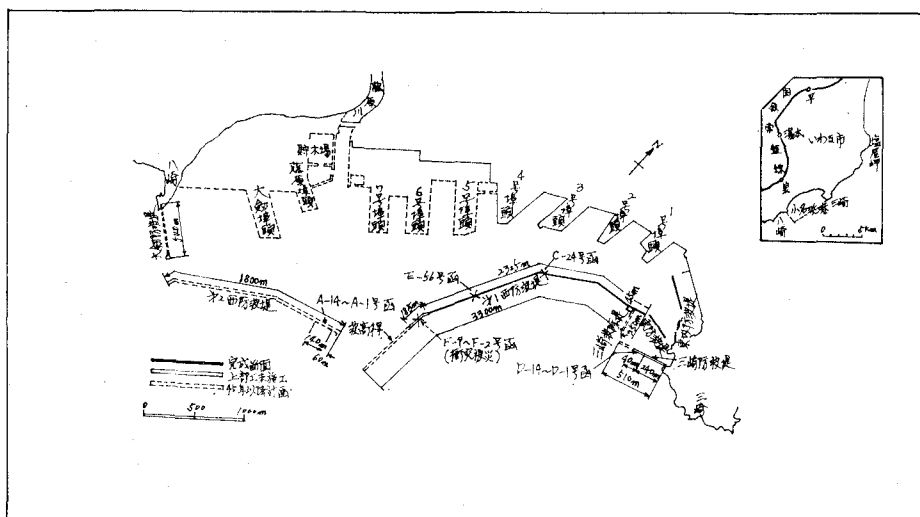


図-1 小名浜港防波堤計画と被災ケーソン位置図

2. 港内波の推定

波が進行中に障害物に出会うと、その陰の部分では波高が減衰し、その波高減衰率は場所によって異なること

はよく知られているが、実際の波は現象が複雑なために遮蔽効果の正確な計算が非常にむずかしい。現在実用的には、防波堤などの小規模な障害物に対しては回折法が用いられ、また島崎や半島などによる大規模な遮蔽効果に対しては角分散（方向分散、角伝播などの呼称あり）法が用いられている。

回折法はブットナムおよびアーサーが微小振幅波の理

*正会員 工博 運輸省第二港建小名浜港工事事務所長

** 運輸省第二港建小名浜港工事事務所次長

***新日本気象海洋（株）

論解を発展させたもので、この方法の妥当性は実験的にも確かめられている。しかし微小振幅の単一波の理論が、模型実験や開口部の狭い港に対してはよいとしても、港口の広い港や半無限防波堤の場合にも適用できるかどうかは観測によって確かめる必要がある。

角分散法は P-N-J 法²⁾におけるうねりの計算、ワルデンによる風場変化の場合の相当波高の計算、また島岬の遮蔽によるエネルギー損失計算などに利用されている。この方法は“波のエネルギーはその進行前方のあらゆる方向に分散され、各方向に伝わるエネルギーは進行方向から測った角度を θ とすると $\cos^2 \theta$ に比例する”，という考えを基礎にしているので、理論的には回折にくらべてはるかに簡明であり、計算も容易である。したがってもし角分散法が浅海の小規模な障害物の遮蔽効果の計算に回折法よりも有効であるとなれば非常に便利なかたである。

本文の目的も角分散が港内波の解析に有効であるかどうかを調べることにあるが、幸い小名浜港には、港口と岸壁近くの4地点に波高桿を設けて同時観測をした記録があるので、上記の両方法の精度を比較することができる。

推定値と実測値の相関を見るために、まず両方法によって、港口の波高と観測点の波高の比を計算する。

回折法の計算要領は港湾構造物設計基準および水理公式集などに詳述されているので省略する。

角分散法による計算には、図-2の角分散係数の累積曲線を用いた。図-2の鎖線は波のエネルギーを1としたときの方向によるエネルギー分布を表わす。したがって波の方向を 0° とし、調査点からの方角 θ_1 と θ_2 の間が障害物で陰になる場合には図のハッチ部分のエネルギーが失われることになる。しかし面積では計算がやっかいなので実線のような角分散係数(単位エネルギーに対する比率)累積曲線で示した。この図から港内の調査地点に達するエネルギーが容易に計算され、これの平方根をとれば港口に対するその点の波高比が求まる。

まず角分散法と回折法の相違を見るために、小名浜港内 200 m 間隔の格子点について、波高 SSE の場合の波高比を角分散法で求めて解析し、回折法によるものと比較した。図-3は両方法で計算した港内の波高比分布である。なお回折法では、小名浜港の卓越周期 10 sec に対

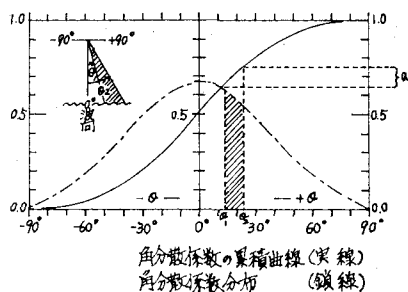


図-2 エネルギー角分散係数

する波長 100 m を用いた。また港口の水深は 16 m, 四号岸壁, 三号岸壁付近の水深は 10 m で、等深線がほぼ岸壁に平行しているため、浅海係数と屈折係数の効果は小さい。したがって波高比の計算にはそれらを考慮に入れていない。

図-3を見ると両方法による計算値には大きな相違があり、特に四号岸壁付近や第二西防波堤の陰の部分でその差が著しく、第二西防波堤が延長されても、角分散法による計算ではなおかなりの波が港内に侵入することになる。しかし両方法のどちらが実際に適しているかは実測値との相関を見て判断しなければならない。

3. 港口波と港内波の観測結果

小名浜港では 1958 年 4 月以来波浪観測を継続して来ましたが、第一、第二西防波堤について、その効果を調べるために港内の四号埠頭の周辺に波高桿を設置して、1969 年 7 月から 1970 年 3 月までの 9 か月間にわたり、港口波との比較観測を行なった。波高桿の位置は図-3に見られるように三号埠頭と四号埠頭の間に(A点)、四号埠頭先端(B点)、四号埠頭西側(C点)で、港口観測点

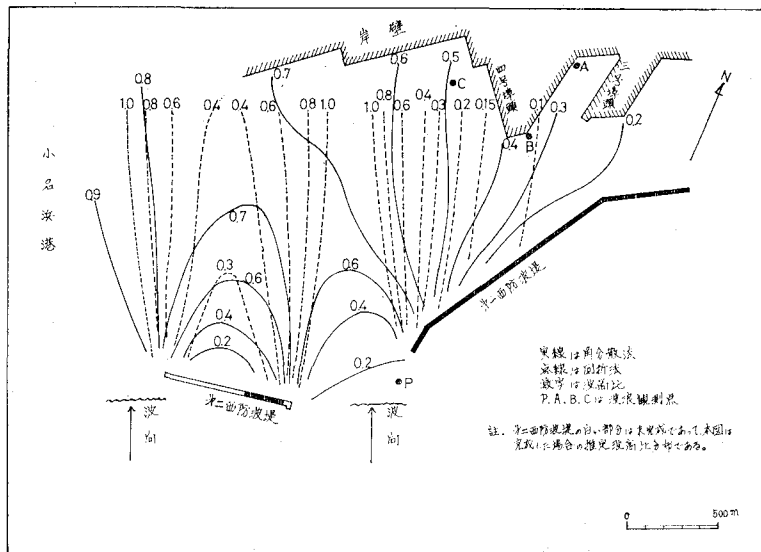


図-3 角分散法と回折法による波高比分布の相違

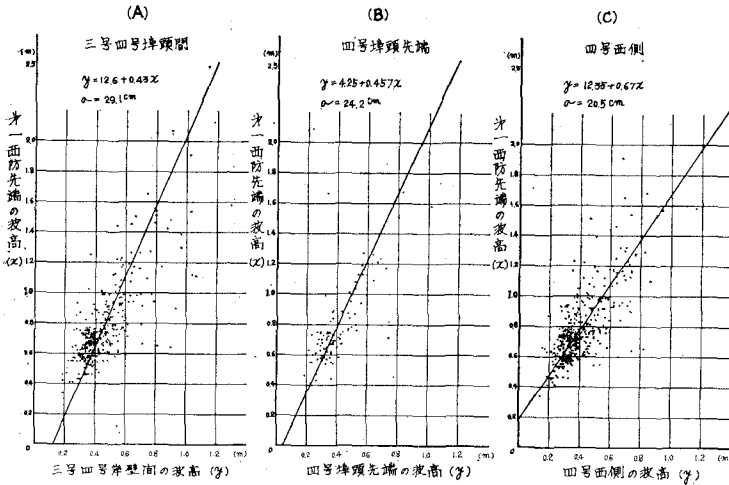


図-4 港口波と港内波の相関

は P で示した位置である。

観測は1日4回実施し、毎回20分間の目視観測によって有義波高と周期を求め、4回のうちの波高の大きいものをもって日最大波高と見做した。これらの観測結果は運輸省小名浜港工事事務所の報告“小名浜港の波浪解析”に掲載公表されているので、割愛することにする。

防波堤の遮蔽効果は沖波の波向に左右されることはいうまでもない。そのため小名浜港では波向の目視観測を行なうほかに、波高1mを越えると思われる波についてはミリ波レーダーによって波向観測を実施し、その成果についてはすでに数回にわたって報告されている。これらの目視およびレーダー観測の結果によると港口における波向はほとんどが SSE~ESE の範囲で、最も多いのは SSE~SE となっている。したがって四号埠頭は卓越波向に対しては第一西防波堤の陰になるわけで、かなり遮蔽の影響があるはずである。その程度を調べるために港口の波高と四号埠頭周辺の A, B, C 点における波高との相関図を作った。それが図-4 である。

図-4 は波向には関係なくすべての値をプロットしたものであるが、それにもかかわらずかなりよい相関があることがわかる。波高比の最も大きいのは四号西側(C)の約0.57で防波堤の遮蔽効果が小さいが、これは港口との相対位置から見ても当然であろう。また波高比が0.8以上の大きなものが目につくが、これは波向がSの場合やSWの風による風浪がはいっているためと思われる。

四号埠頭先端(B)の波高比は約0.5であるが、三号四号埠頭間(A)では約0.55でやや大きい。しかしAでは点のバラツキが大きい。これはSE風で風浪が立ちやすい地形にもよるが、埠頭岸壁による反射波が混在しているためと思われる。B点では、風の吹走距離の関係でNEおよびSWの風のときに港内の風浪が発達する

が、観測回数が少なかった所以他们の影響は(B)図にはいていない。Bで点のバラツキが少ないのはそのためと思われる。それにしても四号埠頭先端で0.5という波高比はかなり大きい値で、ある程度岸壁による反射波も含まれているように思われるが、これについては次節において考察することにする。

4. 港内波の推定値と観測値との比較

図-3 に港口波の波向が SSE の場合を例にとって、角分散法と回折法による港内波高比分布を示

したが、波高比は港口の波向によって大きな違いがあるもので、ことに回折法は波向の変化に敏感である。したがって港内波の実測値と推定値を比較するには波向の観測が必要である。小名浜港では1m以上の波、または波向が明瞭なものについては10度単位で観測しているが、沖の風浪や小さい波については観測誤差が大きいので特に定量的な観測はしていない。しかし港内波の推定値を算出するには角度を与えなければならない。そこでこのような波については卓越波向の平均的な波向 SE~SSE を考え波向はすべて150度とした。

また回折法には波長を与えなければならないが、ここには比較観測期間中の波の周期が8sec~11secであったので、最多出現頻度10secに対する波長を用いることにした。

観測点BおよびCにおける波高比を角分散法および回折法によって方位別に推定した結果を表-1に示す。

表-1 角分散法および回折法による推定波高

観測点	港口の波向	130°	140°	150°	160°	170°	175°	180°
四号埠頭西側(C)	角分散法	0.26	0.40	0.50	0.60	0.68		0.71
	回折法	0.07	0.10	0.15	0.30	0.65	0.90	
四号埠頭先端(B)	角分散法	0.17	0.26	0.34	0.41	0.49		0.54
	回折法	0.03	0.06	0.10	0.12	0.16		0.33

表-1 のそれぞれの波高比と港口における毎日の実測波高とから推定した波高とCおよびB点における実測波高との相関図をそれぞれ図-5ないし図-8に示す。各図とも横軸に推定波高、縦軸に実測波高をとってある。

図-5 は四号埠頭西側(C)における角分散法による推定と実測の関係を示したもので、かなりよい相関があることがわかる。波高の小さい領域で多少偏差が大きくなっているが、港内で発生する風浪の影響や港口における波向を同じにしたことにも関係があるようである。

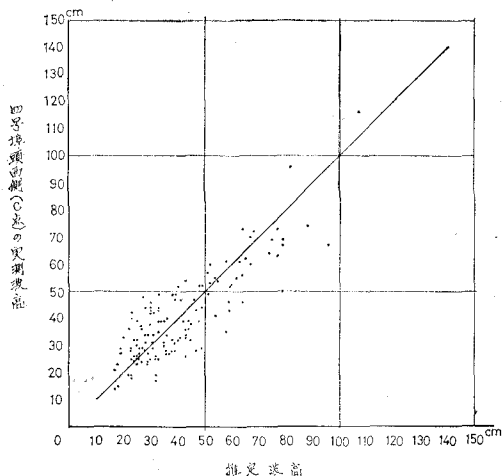


図-5 角分散法による推定波高と実測波高との相関 (C 点)

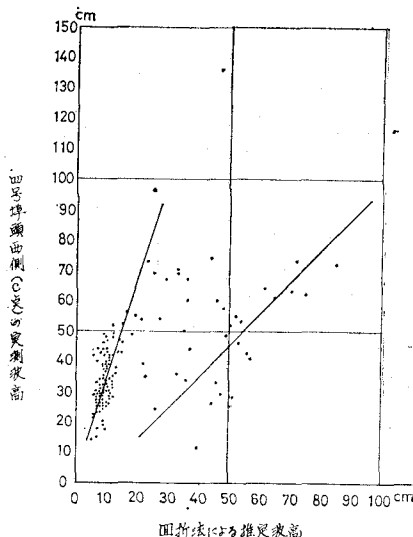


図-6 回折法による推定波高と実測波高との相関 (C 点)

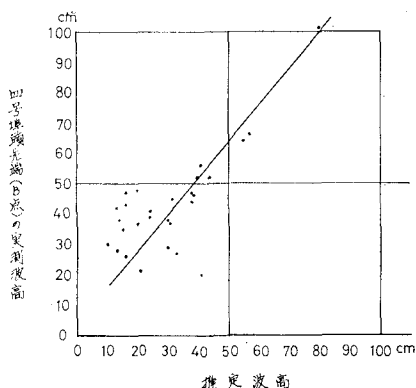


図-7 角分散法による推定波高と実測波高との相関

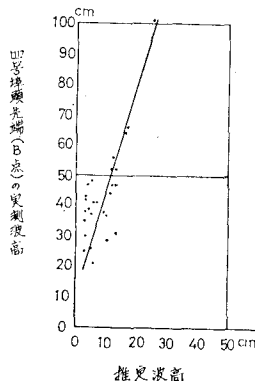


図-8 回折法による推定波高と実測波高との相関 (B 点)

図-6 は四号埠頭西側 (C) における回折による推定と実測の関係を示したものであるが、点のバラツキは著しい。しいていえば図の2本の線に点群が分けられるが、これは回折法が波向に対して非常に敏感だからである。表-1 からわかるように波向175度では波高比は0.9であるが、170度では0.65と急に減衰してしまう。したがってある波向に対してはよく合うが、その他の波向では合わないことになる。相関図を見るとこの性質がよく現われている。このことは四号埠頭先端 (B) の相関図 (図-8) にも見られ、B点における推定には回折法が適用できないことを示している。

四号埠頭先端 (B) における角分散法による推定と実測の関係は図-7 に示される。図を見るとB点の資料は少ないが、かなりの相関があることが認められる。しかし実測値は推定値にくらべて20%くらい大きくなっている。また推定波高の小さいところで実測波高が大きくなっているが、これは港口波高が小さいときに、波向を

すべて150度としたことが影響しているものと思われる。

ところで四号埠頭先端において実測波高が推定波高より大きい理由であるが、まず考えられるのは埠頭先端の岸壁による反射波である。しかし開口岸壁の重複波を厳密に計算することはむずかしいので、ここではミッシェの式³⁾を修正した次式によって荒っぽい計算を行なってみよう。

$$H_t = H_i \sqrt{\sin^2 \theta + \left(\frac{2C_1 B_1}{C_1 B_1 + C_2 B_2} \right)^2 \cos^2 \theta} \quad (1)$$

H_t : 反射波を加味した波高, H_i : 入射波の波高

C_1 : 入射波の群速度, C_2 : 岸壁間を進む波の群速度

B_1 : 入射波側の海面の幅, B_2 : 埠頭岸壁間の幅

θ : 入射波の波峰線と岸壁のなす角。

式(1)で $\theta=0$ とするとミッシェの式になる。

三号、四号埠頭間の入口における波を考える場合には水深が一定と見做せるので、式(1)は次のようになる。

$$H_t = H_i \sqrt{\sin^2 \theta + \left(\frac{2B_1}{B_1 + B_2} \right)^2 \cos^2 \theta} \dots (2)$$

いま $B_1 = 2B_2$ とし (これには問題があるが, 大よその見当をつける意味で, このように仮定した), 波向を SSE ($\theta = 22^\circ$), および S ($\theta = 45^\circ$) とすると次の関係が得られる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{波向 SSE : } H_t = 1.29 H_i \\ \text{波向 S : } H_t = 1.18 H_i \end{array} \right\} \dots (3)$$

式 (3) の関係は 図-7 の実測値と推定値の比約 1.2 とよく一致している。

なお参考までに三号, 四号埠頭間 (A) の実測波高と四号埠頭先端 (B) の推定値との相関を図-9 に示した。

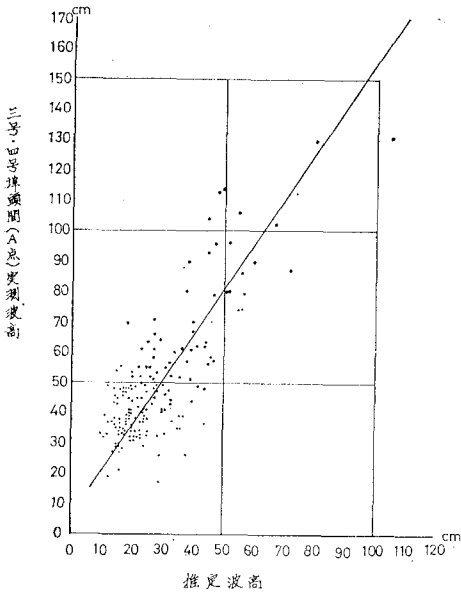


図-9 角分散法による推定波高と実測波高の相関 (A 点)

この図を見ると実測波高と推定波高の比は図-7 以上に大きく 1.5 くらいとなっている。これは A 点が埠頭の奥にあるために埠頭岸壁による複雑な反射波が重畳する結果と思われるが, これについてはさらに詳細な観測によって調べなければならない。

以上の結果から, 小名浜港内の波の推定には角分散法が有効で, 回折法よりはるかに良く, さらに岸壁近くで

は反射波を考慮することにより良い推定値が得られることがわかる。

終りに第二西防波堤延長による B 点および C 点の波高比の変化を角分散法で計算した結果を表-2 に掲げる。

表-2 第二西防波堤延長による波高比の変化

港口における波向	SSE		SE	
	B 点	C 点	B 点	C 点
現在の防波堤の場合	0.48	0.57	0.26	0.32
第二西防波堤 500 m 延長の場合	0.40	0.50	0.24	0.26

注: B 点は反射波の影響として 1.2 倍してある。

この表から第二西防波堤が 500 m 延長すれば波高比は約 7% 減少することがわかる。

5. あとがき

港内波の解析は模型実験や回折法で行なわれることが多いが, 自然の波は多種多様の集合であるから港口が広い場合にはエネルギーの角分散によって扱う方がより自然であり, 本調査で角分散法による推定が実測と良い相関を示したのも当然であろう。なお本文ではその信頼度については議論しなかったが, その理由は波向が観測されず一律に 150 度とした回数が半数もあったのと, 港内で生じる風浪を無視しているからである。しかし前節の相関図を見ただけでも推定波高 50 cm 以上の波に対しては角分散法が十分に実用に供しうることが推察できると思う。

今後の問題としては港内の風浪をどのように扱い, また埠頭や岸壁における反射波をどのように見積るかということになるが, これらについては資料の集積をまって研究を進めるつもりである。

参 考 文 献

- 1) Putnam, J.A. and R.S. Arthur : Diffraction of Water Waves by Breakwaters, Trans. AGU., 29(4), Pt. 1, 1948.
- 2) Pierson, Neuman, James : Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics. Hydrographic Publication No. 603, U.S. Navy, 1955.
- 3) Ippen, A.T. : Estuary and Coastline Hydrodynamics. Chapt. 1, 1966.
- 4) 運輸省小名浜港工事事務所 : 小名浜港の波浪解析, 1970.