

現地港内波浪観測による港内波高算定法の検討

高山 知 司*・西 田 一 彦**

1. ま え が き

新しい港の建設や既存の港の拡張あるいは改良の際に港湾技術者にとって重要な問題の一つは、港内に十分静穏な水域が確保できるか否かということである。水域の静穏の度合いを示す言葉として港内静穏度という言葉が用いられているが、港内静穏度の判定基準についてはいまだ十分な検討がなされているとはいえない。

港内静穏度を荷役という観点から考えてみると、係留船舶の動揺が港内静穏度を判定する重要な要素となる。係留船舶の動揺に影響する要素としては、波浪、風および係留船舶の諸元や係留状態がある。これらの要素のうち波浪が最も重要な要素であるが、一口に波浪といっても、港内には種々の原因で発生する波が複合している。これらを分類すると、i) 港口進入波、ii) 港内伝達波、iii) 航走波、iv) 港内発生波、v) 港内反射波、vi) 副振動となる。

i)~vi) の波によって港内の波浪状態が定まるが、港内波の算定に最も重要となるのが、i) と v) の波である。ii)~iv) の波については必要に応じて解析し、また、vi) については、他の波とその性質を異にするので、別途検討することが必要である。

著者らは、i) と v) の波を不規則波として解析する方法を既に発表している¹⁾。そこでは、模型実験値と比較を行って、港内波高計算法の精度を検討している。しかし、模型実験に用いた波は単一方向の不規則波であり、実際の海の波のような方向スペクトルを有する波ではない。そのため、この計算法の精度をさらに検討するためには、現地港内波浪観測値と比較することが重要になる。

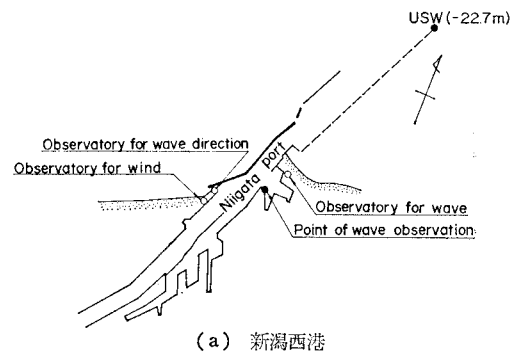
本論文では、新潟西港および秋田港で観測された港内波浪データを用いて、港内波高計算法の精度を検討し、実際の港に本計算を適用する場合の問題を調べている。

2. 港内波浪の観測地点

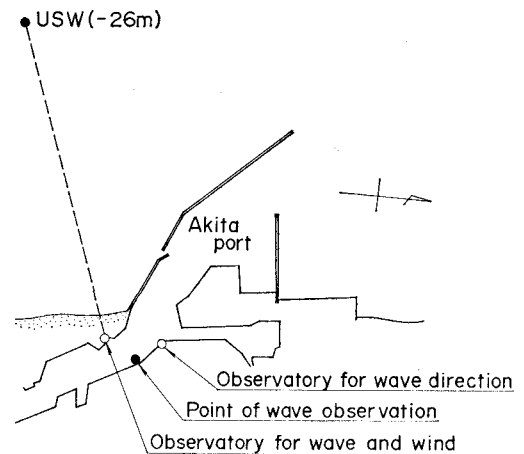
港内静穏度を確保するための各種計画の樹立に当たっては、港内波浪を的確に把握することが必要であるが、港

内波浪は前述のように種々の原因で発生する波が複合しているので、その実体は非常に複雑である。そこで、第一港湾建設局では、今後の港湾整備計画の策定に資する目的もあって、港内波浪の実体を把握するために港内波浪観測を実施し、その解析を行っている²⁾。

港内波浪の観測は、日本海側で波高の高くなる冬期が選ばれ、1979年12月~1980年1月の2ヶ月間、新潟西港と秋田港で行われた。港内波浪観測は、図-1(a)と(b)に示されているような港内中央部の岸壁前面から2m離れた地点で行われた。港内波浪は簡易型の容量式波高計を用いて観測され、港内波浪との比較に重要な港



(a) 新潟西港



(b) 秋田港

図-1 波浪観測地点

* 正 会 員 工 博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室長

** 学生会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室

外波浪としては、図-1に示すように、新潟西港では水深 22.7 m, 秋田港では水深 26 m の地点に設置されている超音波式波高計による観測値を用いた。また、港口付近における入射波の波向としては、両港で行われているミリ波レーダの観測値を採用した。波向観測は、毎日 10 時と 16 時の 2 回定常的に観測されているが、波向線が明瞭でない場合や天候が悪い場合には、読み取り誤差が大きくなると同時に読み取りが不可能になる場合もある。そのため、観測期間中の波向の測得率は低かった。

3. 波向および周期による港内波高の変化

港内波浪観測期間中の港外波浪の観測では、周期は 8 sec を中心にして、6~10 sec の間にあり、波高は荒天時に新潟西港で $H_{1/3}=5$ m, 秋田港で $H_{1/3}=6$ m に達する場合もあった。また、波向は新潟西港では NNW~NW, 秋田港では W~SW の範囲にほとんどの波が入っていた。

前述の著者らの計算法で港内波高を計算する場合、港外波浪、特に港口部における波浪の方向スペクトルを与えなければならない。周波数スペクトルとしては、実測値を用いればよいが、港内波浪には周波数スペクトルによる影響は小さい³⁾ので、実測の有義波高および周期から求めた Bretschneider 型のスペクトルを用いることにし、波浪の方向関数としては光易型の方向関数を用いることにした。方向関数における波向集中度パラメータ

S_{max} については明らかでないので、一応、沖波で $S_{max}=10$ を仮定し、水深が浅くなることによって方向集中度が増大することを考慮して、港口部では $S_{max}=25$ とした。港内の岸壁などによる反射回数、つまり反射回数は 4 とし、周波数および方向分割数はそれぞれ 5 と 30 にした。港内の水深は本計算法では一様水深を仮定しなければならないので、新潟西港では 10 m, 秋田港では 12 m の一様水深とした。港内を 100 m 間隔のメッシュで切り、その交点において計算値を求めた。

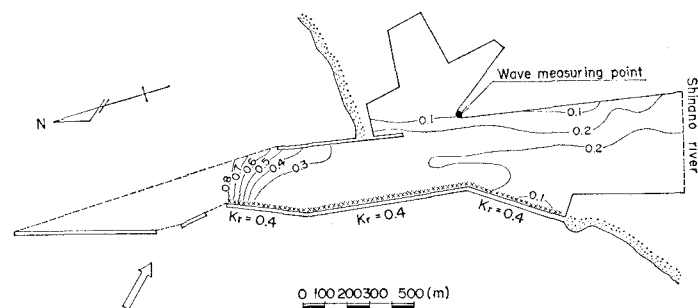
有義波周期 8 sec で、波向が新潟西港で NW, 秋田港で W の波に対する港内波高分布の計算結果が図-2(a)および(b)に示してある。岸壁の反射率は $K_r=0.8$ を標準とし、自然海浜や消波工が設置してある部分の反射率は図-2中に示してある値を用いた。

図-2(a)の新潟西港では、波向 NW の波は防波堤で強く遮蔽される状態にあるが、西防波堤の 2 箇所に約 70 m の開口部が存在しているため、港口付近の波高比は比較的大きい。一方、港内奥では $K_a<0.3$ で波高は小さくなっている。図-2(b)の秋田港では、波向 W の波は西防波堤で遮蔽されてはいるが、それほど強い遮蔽ではないため、 $K_a<0.4$ である。

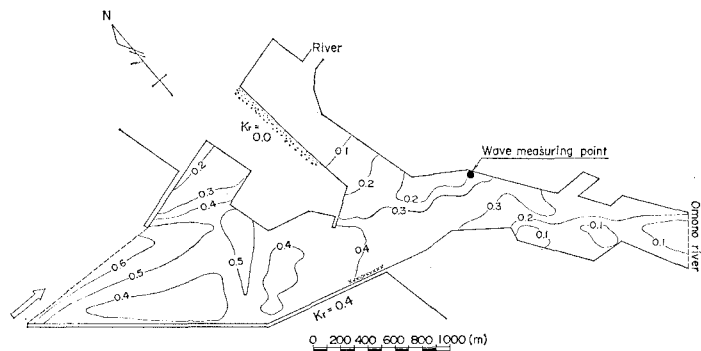
観測期間中の波は前述のように、新潟西港では NNW~NW, 秋田港では W~SW の波向で、周期は 8 sec 前後であるので、波向と周期の変化によって港内波浪観測地点の波高がどのように変化するか、数値計算によって

調べたのが図-3である。計算に用いた波の周期は 6, 8 と 10 sec の 3 種類、波向は新潟西港では NNW~W の 4 方向、秋田港では NNW~SSW の 7 方向である。方向集中度としては、 $S_{max}=25$ に加えて $S_{max}=75$ についても行っている。 $S_{max}=75$ も加えたのは、1973 年に秋田港において行った波浪観測データを第一港湾建設局が解析した結果によると、方向関数として $\cos^2 \theta$ 型のものを仮定すると、 $l=7$ の場合が最も観測値と適合性がよいという報告⁴⁾がなされており、 $l=7$ の値はほぼ $S_{max}=75$ に近い値になるためである。その他の計算条件は図-2の場合と同じである。波高比としては港内波浪観測点近傍の 3 点の平均値を用いた。

図-3(a)の新潟西港の場合、港口が NE 方向に開いているので、波向が北寄りになるほど港内波高比が大きくなる傾向を示しているのがわかる。周期の変化による波高比の変化はほとんどなく、6~10 sec の波ではほぼ同一の波高比を示

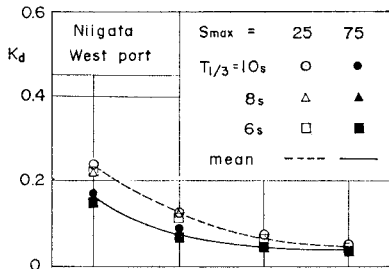


(a) 新潟西港 ($T_{1/3}=8$ sec, $S_{max}=25$, 波向 NW)

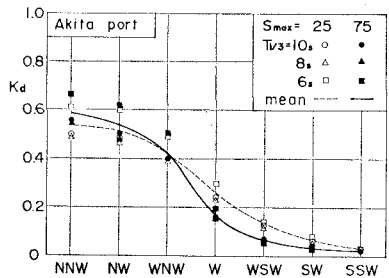


(b) 秋田港 ($T_{1/3}=8$ sec, $S_{max}=25$, 波向 W)

図-2 港内波高分布



(a) 新潟西港



(b) 秋田港

図-3 港外波浪の波向による波浪観測点での波高比の変化

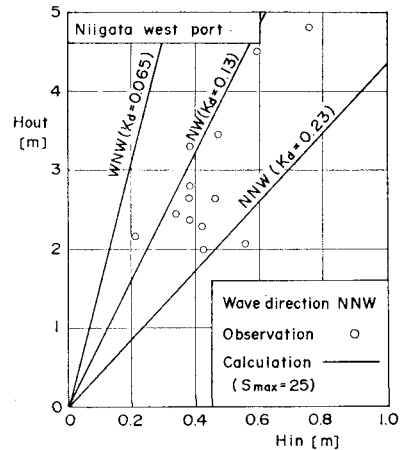
す。方向集中度 $S_{max}=25$ と 75 では、この計算の波向範囲においては、 $S_{max}=25$ の場合が大きな波高比を示し、 W から NNW に波向が変化するに従って、両波高比の差が開く。この差は W では 0.01 程度で非常に小さいが、 NNW では約 0.07 になる。

図-3 (b) の秋田港の場合、港口がほぼ NNW の方向にあるため、港内波浪観測点の波高比は NNW のときに最大で、 $S_{max}=75$ で $T_{1/3}=6$ sec の波では $K_d=0.67$ になる。波向が S に向うに従って港内波高比は小さくなり、 SSW では周期および S_{max} にほとんど関係なく、 $K_d=0.03$ と非常に小さくなる。港内波高比は $WNW \sim WSW$ の範囲で最も大きく変化し、この間で約 0.3 変化する。 WSW より S 寄りの波向では、周期による波高比の変化はほとんどないが、 W より N 寄りの波向では、 $S_{max}=25$ でも 75 でも、周期 6 sec の波の波高比が大きく、他の周期の波高比と大きい場合には 0.1 程度異なる。周期 8 sec と 10 sec では、 10 sec の波高比が大きい傾向は示すけれども、その差は小さく、両者の波高比はほとんど変わらない。 $S_{max}=25$ と 75 では、 WNW より N 寄りの波では $S_{max}=75$ 、これより S 寄りの波では $S_{max}=25$ の波高比が大きくなる。しかし、 SSW では S_{max} の値によって波高比はほとんど変わらない。この原因としては、方向集中度の高い波ほど波の直接進入領域で波高比が大きく、遮蔽域で小さくなるため、 N 寄りの波では $S_{max}=75$ の場合が港内の奥まで大きな波高の波が入り易くなるからだと考えられる。

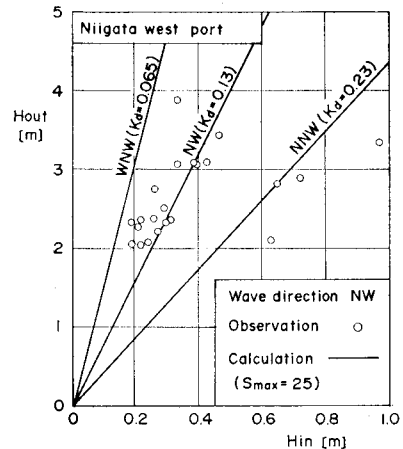
4. 港内波浪の観測値と計算値の比較

港内波浪は 1979 年 12 月から 1980 年 1 月までの 2 ヶ月間、毎日 2 時間ごとに観測されているが、港外波浪の波向が不明なものは除き、ミリ波レーダによる観測で波向が読み取れたものだけを取り出し、港内波浪と港外波浪の関係を調べてみた。港内波浪の計算結果も同時に示しているが、この計算では防波堤越波による港内伝達波や港域を吹く風による発生波は考慮されていない。計算値としては、方向集中度が $S_{max}=25$ で、周期 $6 \sim 10$ sec の波に対する平均的な波高比を用いている。しかし、計算値は港口部での波高に対する港内波高の比であるため、実測値とは直接比較できないことになるが、浅水変形や波の屈折を考慮しても、港外波浪観測点と港口部とでは波高の変化が小さいと考えられるので、港外波浪観測点の波高をそのまま港口部の波高と考えて、計算値と比較することにした。

新潟西港について整理したのが、図-4 である。図-



(a) 波向 NNW の場合



(b) 波向 NW の場合

図-4 新潟西港における港内外の波高の関係

4(a) は港外波浪が NNW の波向、図-4(b) は NW の波向に対するものである。NNW および NW の波向としては、N から W 方向に測って、波向がそれぞれ $20^\circ \sim 30^\circ$ と $30^\circ \sim 40^\circ$ の範囲にあるものを採用した。また、これらの図中には、港外波浪の波向が NNW および NW, WNW の 3 種類の波向に対する計算値が直線で示してある。計算は線型解であるため、港内波高は港外波高に比例することになる。図中の H_{out} と H_{in} はそれぞれ港外と港内の波高を示している。

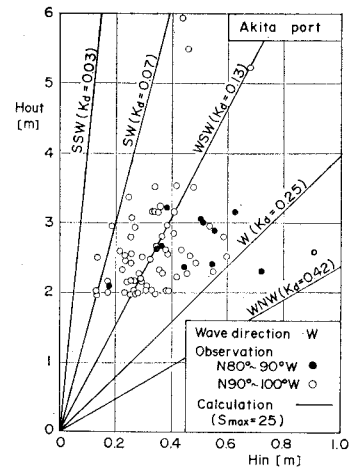
波向 NNW の図-4(a) の場合、大部分の観測値は NNW と NW の波向に対する計算値の間にあり、平均的にみると、WNW 方向となっている。N $20^\circ \sim 30^\circ$ W の波向を NW にとっていることを考えると、港外波浪の波向が NNW といっても NW 寄りの波が多くあったのかもわからない。

波向 NW の図-4(b) の場合、港内波高の観測値は、港内波高が大きく観測されている 4 点を除けば、NW の波向に対する計算値に近いけれども、港内外波高の平均的な関係は計算値の波向を NW より WNW 寄りにとるとよいようである。港内波高が大きく観測されている 4 点については、港外波高が $H_{out} < 3.3$ m とそれほど大きくないため、防波堤越波による港内伝達波の影響とは考えられず、港内発生波の影響ではないかと推定される。しかし、このときの港内での風速と風向が明らかでないので、港内発生波を定量的に見積ることができなかった。

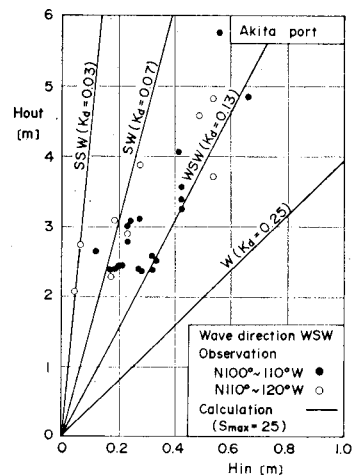
図-5(a), (b) および (c) は、港外波浪の波向がそれぞれ W, WSW, SW に対する、秋田港における港内外波高の関係を調べたものである。これらの図中には、WNW~SSW の 5 種類の波向に対して計算して求めた港内外波高の関係が直線で示してある。

図-5(a) の W 方向の波としては、港外波浪の波向が $N 80^\circ \sim 100^\circ$ W の範囲にある波を採用している。ただし、同じ W 方向の波であっても $N 80^\circ \sim 90^\circ$ W と $N 90^\circ \sim 100^\circ$ W の 2 つに分け、それぞれを黒丸と白丸で示している。黒丸は WNW に近い方位にあるため、平均的にみると、白丸より港内波高比が大きい傾向にあるが、この傾向は、白丸と黒丸が大きく入り混じっており、それほど明瞭ではない。観測値は大きくばらついてはいるけれども、W~SW の計算値の直線内にほとんどの点が入っており、港外波の波向を W 方向と考えるより WSW とした方が計算値は観測値の港内外波高の平均的な関係によく一致する。観測値が計算値の W~SW の範囲にあることは、観測値の波高比が $K_a = 0.07 \sim 0.25$ であることになり、かなり大きくばらついていることになる。

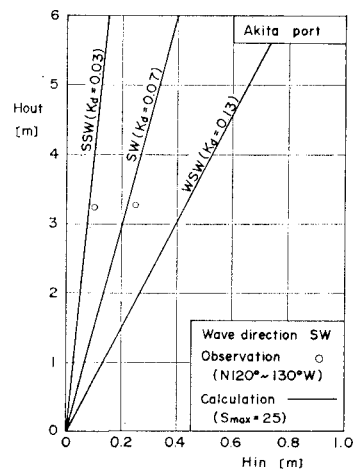
図-5(b) の WSW の波向としては、 $N 100^\circ \sim 120^\circ$ W



(a) 波向 W の場合



(b) 波向 WSW の場合



(c) 波向 SW の場合

図-5 秋田港における港内外の波高の関係

の範囲の波を用いている。同じ WSW でも $N 100^{\circ} \sim 110^{\circ} W$ は黒丸、 $N 110^{\circ} \sim 120^{\circ} W$ は白丸で示されている。黒丸は白丸より港内波高比が大きい傾向を示し、図-3(b)で示したように波向が N 方向に向うほど港内波高比が大きくなる傾向と一致している。しかし、観測値は全般に計算で求めた WSW の波向の港内波高比より小さく、WSW~SSW の範囲にある。波高比に直すと、観測値は $K_d=0.03 \sim 0.13$ の範囲にあることになる。この波高比は非常に小さいため、港内波高の測定値が 10 cm の誤差を含んでいるとすると、港外波高が 3 m の場合、波高比は 0.03 異なった値になり、波高比が 20~100% の誤差を含むことになる。観測値の平均的な関係を表わそうとすると、計算においては WSW の波向を用いるのではなく、WWSW 方向にとるのがよいようである。

図-5(c)の SW の波向としては、 $N 120^{\circ} \sim 130^{\circ} W$ の波が用いられている。この範囲の波向の波は少なく、2 点しかないのは、はっきりとはいえないが、比較的よく計算値と一致しているようである。

以上、新潟西港および秋田港について港内波浪観測値と計算値とを比較した結果では、計算値は両港ともに観測値より港内波高を大きめに見積っていることがわかった。この原因として、2 つのことが考えられる。一つは、ミリ波レーダで観測した波向が少しずれているのではないということである。合田および鈴木⁵⁾は、前述の 1973 年に観測した秋田港内の波浪の解析において、港外波浪の平均的な波向を $N 96^{\circ} W$ から $N 106^{\circ} W$ に 10° ずらしたときに計算値が観測値に比較的良好一致を示している。今回の比較においても、港外波浪の波の波向を波が防波堤で強く遮蔽される W あるいは S 方向に少しずらすのがよいようである。新潟西港の場合は約 $10^{\circ} W$ 方向に傾け、秋田港では $10^{\circ} \sim 20^{\circ} S$ 方向に傾けると、観測値と計算値は比較的良好一致する。ミリ波レーダによる波向観測では、ある瞬間のミリ波レーダの写真から波峯線を引き、その波峯線に直角な方向を波向としている。しかし、これだと、波向がある瞬間のものになってしまうため、数枚の写真に対する解析結果から波向を定めている。この場合、解析するレーダ写真としては、波峯線の明瞭なものが選ばれる可能性が強く、どうしても波峯線が長くなる周期の長い波の波向が主体になる。その結果、周期の長い波は、屈折の影響を強く受け、波峯線が等深線に平行に近くなり、波群全体としての波向からずれるのではないかと推定される。新潟西港や秋田港で波峯線が等深線に平行になることは、波向が N 方向に片寄ることになり、これが原因なのではないかと考えられる。

他の一つは、方向集中度パラメータ S_{max} の推定値の

問題である。本論文では、沖波の S_{max} を 10 と仮定し、屈折の効果を見込んで、港口部では $S_{max}=25$ としたが、この値は小さく見積り過ぎているのではないかという疑問である。前述のように、第一港湾建設局の解析では、 $S_{max}=75$ 程度が妥当な値であるという結果も得られている。今回も $S_{max}=75$ とすると、新潟西港において NNW の波向では、図-3(a)から $K_d=0.16$ となり、図-4(a)と比較すると、観測値とよく一致するようである。一方、秋田港における WSW の波向では、図-3(b)から $K_d=0.06$ となるが、図-5(b)の観測値と比較すると、この値は少し小さいようである。観測値の港内外波高の平均的な関係を与えるためには、 $S_{max}=25 \sim 75$ の間の適切な値に S_{max} を設定すればよい。

このように、波向を変えても、 S_{max} の値を変えても、観測値の港内外波高の平均的な関係を与えることができるため、どちらに問題があるのか、あるいは計算法そのものに問題があるのか明確にはできなかった。

5. あとがき

新潟西港および秋田港において港内波浪の観測値と計算値を比較した結果では、港外波浪の波向と方向集中度の指定に疑問があり、数値計算法の妥当性を詳細に検討するまでには至らなかった。しかしながら、計算値は、波向が N から W あるいは S 方向に傾くに従って港内波高比が小さくなるという観測値の変化傾向をよく表わしている。

今後、港内波高を測定する場合には、港外波浪の方向スペクトル形を正確に測定しておくことが重要である。また、港内波浪の観測では、単に一点で観測するのではなく、港外波浪の波向などの推定値を補うためにも、数点において観測することも必要で、できれば、港内波高分布が推定できる程度に観測点を多くとることも考える必要がある。

本研究を遂行するに当たり、第一港湾建設局には資料の提供などで御協力いただいた。ここに記して深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 高山知司・菊地 治: 港内波高分布の計算, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 103~107, 1978.
- 2) 運輸省第一港湾建設局企画課: 港内擾乱波要因分析調査報告書(新潟西港・秋田港), 115 p., 1980.
- 3) 高山知司・横田慎二・河内隆秀: 新しい波の回折計算法とスペクトルの最適分割数, 港湾技研資料, No. 303, 42 p., 1978.
- 4) 第一港湾建設局新潟調査設計事務所: 港内波高算定手法について, 37 p., 1976.
- 5) 合田良実・鈴木康正: 光型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 45 p., 1976.