2山型スペクトルを考慮した港内静穏度解析の試みとその影響評価

Evaluation of Harbor Tranquility with Considering Effect of Double-peaked Offshore Spectrum

平山克也¹・加島寛章²・仲井圭二³・久高将信⁴

Katsuya HIRAYAMA, Hiroaki KASHIMA, Keiji NAKAI and Masanobu KUDAKA

Generally, a joint distribution of significant wave height, period and direction outside a harbor is analyzed with assumption that a single-peaked spectrum is observed in each time. However, the significant wave periods should be underestimated when double-peaked spectra are observed, and that seems to affect wave height exceedance within the harbor. In this paper, the occurrence frequency of the double-peaked spectrum is estimated by using newly proposed method. Moreover, the estimation of the probability of wave height exceedance within the harbor is carried out with considering both the separated significant periods of wind wave and swell from the double-peaked spectrum. On a berth in the target harbor, it reduces 0.1% when the number of underestimation of significant wave periods is 2% in whole observed spectra.

1. はじめに

港内静穏度解析に用いる沖波出現頻度分布は、各時刻に観測された波形記録から得られる代表波の諸元（波高、周期、波向き）をもとに、整理・作成されている。この場合、ある時刻に観測される波浪が風波とうねりを同時に含み、2山型スペクトルを成していると、この代表波の諸元は、結果的にこれらを合成したものになっていると考えられる。一方、標準解析法に基づく港内静穏度解析では、周期による荷役限界波高の違いを考慮している。したがって、2山型スペクトルの発生頻度が少ない場合には、このうち周期の長い成分波の影響が荷役稼働率算定時に過小評価されている恐れがある。また、これは、港内の海底地形が複雑で浅い場合ほど顕著になりやすい。

そこで本研究では、急峻な海底地形を介して東京湾口に面する久里浜港を対象とした港内静穏度解析を行い、外洋からのうねりと湾内発生波から成る2山型スペクトルの発生頻度を考慮した影響について、従来の沖波出現頻度分布を用いて算定した荷役稼働率と比較することにより明らかにする。なお、港内外の波浪変形計算のうち、周期6s未満の入射波に対しては、港内の相対水深が一定とみなせるとして高山法を、6s以上の入射波に対しては、港内の水深変化に伴う波浪変形を算定できるようブシネスクモデルをそれぞれ用い、荷役稼働率を算定する港内の各岸壁前面の波高比を算定した。特に、ブシネスクモデルによる波浪変形計算では代表波高を2種類設定し、

平山（2008）の方法にならない、港外波高による港内波高比の違いを考慮した荷役稼働率を算定した。

2. 2山型スペクトルの抽出

久里浜湾口に位置するアシカ島で2003～2007年に取得されたNOWPHAS波浪観測データをスペクトル解析し、式（1）に示す、高周波成分の影響を受けにくいスペクトル有義波周期 $T_{m-1,0}$ を算出した（合田，2008）。

$$T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0 \quad m_i = \int_0^\infty f^i S(f) df \quad (i=0, -1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、ここでは特に風波・うねりを対象としたので、式（1）を若干修正し、0.033Hz以上（30s未満）の波エネルギーに対するスペクトル周期を式（1）'により算出した。

$$T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0 \quad m_i = \int_{f_{min}}^\infty f^i S(f) df \quad (i=0, -1) \quad \dots\dots\dots (1)'$$

図-1 有義波周期とスペクトル周期との関係

1 正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 正会員 工修 (独) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
3 正会員 理修 (株) エコー、防災・水工部、部長
4 正会員 (株) エコー、参与

図-2 アシカ島観測データのスペクトル解析結果の例

ここで $f_{\min} = 0.033$ とした。一方、ゼロアップクロス法で算定される有義波周期 $T_{1/3}$ とこれらを比較し、図-1を得た。図中の破線は両者のばらつき範囲のうち下限を示し、上限を示す点線はこれを対称に折り返したものである。

これらの範囲にあるプロットが計算された時刻では1山型スペクトルが出現しているのに対し (図-2 (a)), この範囲から外れたほぼすべてのプロットでは、 $T_{1/3} \leq 6.2s$ のとき $T_{m-1,0} > 1.2T_{1/3}$ 、 $T_{1/3} > 6.2s$ のとき $T_{m-1,0} > T_{1/3} + 1.2s$ が成り立ち、このとき顕著な2山型スペクトルが出現している (図-2 (b))。そこで、この点線を境界線とし、これより左上方にあるプロットを2山型スペクトルとして抽出することとした。なお、図-2中の実線は観測スペクトル、破線は有義波諸元 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ に対する修正プレットシュナイダー型スペクトルである。この結果、アシカ島で5年間に観測された波スペクトルのうち、本研究で定義した方法により抽出された、2山型スペクトルが観測された時刻 (1969データ) は、有意な水位変動が観測された全時刻 (19073データ) のうち10.3%であった。ここで、有意な水位変動とは、対象期間に観測された全21912データのうち、欠測時および静穏時を除いたデータである。

3. 2山型スペクトルを考慮した港内静穏度解析

(1) 沖波出現頻度分布の再整理

上記の方法により分類した1山型および2山型スペクトルに対する代表波浪諸元は、図-3に示す整理手順に従い、次のように算定した。すなわち、あるしきい値を設けて2山型スペクトルを高周波成分と低周波成分に分離し、それぞれの波エネルギーに対応する有義波高、有義波周期を算定した。アシカ島データの場合、このしきい値は0.15Hzとした。これは、解析された多くの2山型スペクトルの形状を実際に確認して設定したものであるが、図-1で定義した範囲の上限および下限を示す点線に

おいて、それぞれの変曲点を結ぶ線分と対角線の交点が示す周期6.8s (0.147Hz) にほぼ対応している。

このようにして分離したそれぞれの波浪成分は、一般的な定義とは異なるが、本研究では便宜上、0.15Hz以上 (周期6.7s未満) を風波成分、0.15Hz未満 (周期6.7s以上) をうねり成分と呼ぶことにする。したがって、1山型スペクトルに対しても、その有義波周期が6.7s未満の場合には風波、6.7s以上の場合にはうねりと呼ぶ。

また、2山型スペクトルを分離して得たそれぞれの波浪成分に対する有義波相当波高およびスペクトル周期は、本研究での定義に従い境界周波数 $f_{\text{lim}} = 0.15\text{Hz}$ とし、次式により算定した。

$$\begin{cases} f \geq f_{\text{lim}} & H_{m-1,0,\text{wind}} = \alpha \sqrt{m_{0,\text{wind}}} \\ f < f_{\text{lim}} & H_{m-1,0,\text{swell}} = \alpha \sqrt{m_{0,\text{swell}}} \end{cases} \quad \alpha = H_{1/3} / \sqrt{m_0} \quad \dots (2)$$

$$\begin{cases} f \geq f_{\text{lim}} & T_{m-1,0,\text{wind}} = m_{-1,\text{wind}} / m_{0,\text{wind}} \\ f < f_{\text{lim}} & T_{m-1,0,\text{swell}} = m_{-1,\text{swell}} / m_{0,\text{swell}} \end{cases} \quad \dots (3)$$

ここで、

$$\begin{cases} m_{i,\text{wind}} = \int_{f_{\text{lim}}}^{\infty} f^i S(f) df & (i=0, -1) \\ m_{i,\text{swell}} = \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{lim}}} f^i S(f) df & (i=0, -1) \end{cases} \quad \dots (4)$$

ここに、 $H_{1/3}$ は2山型スペクトルが観測された時刻の水位変動データに対して、ゼロクロス解析を行い得られた有義波高、 $H_{m-1,0,\text{wind}}$ 、 $T_{m-1,0,\text{wind}}$ および $H_{m-1,0,\text{swell}}$ 、 $T_{m-1,0,\text{swell}}$ はそれぞれ、風波成分、うねり成分に対する有義波相当波高およびスペクトル周期である。

次に、波向き観測が実施されていないアシカ島における各時刻の代表波向きは、次のようにして設定した。す

観測期間の全ての時刻で繰り返し、それぞれの出現頻度表を作成

図-3 沖波出現頻度分布の再整理手順

図-4 アシカ島における波向別波高出現頻度分布（現行）

(a) 1山型スペクトルのみ抽出

(b) 2山型スペクトルから分離した風波成分

(c) 2山型スペクトルから分離したうねり成分

図-5 アシカ島における波向別波高出現頻度分布（再整理）

なわち、うねり成分に対しては70km沖合の波浮で観測された波向きをエネルギー平衡方程式法による波浪変形計算で補正して与え、風波成分に対してはアシカ島で観測された風向きと同様として与えた。

ただし、図-1により2山型と判定された時刻において、波浮における波向き、あるいはアシカ島における風向きのいずれか、もしくは両方が不明（欠測または静穏）のため、風波成分とうねり成分に分離できない場合には、いずれも欠測として取り扱った。このような時刻は238データあり、この結果、観測された2山型スペクトルを風波とうねりに分離できた時刻（1731データ）は、有意な水位変動が観測された全時刻のうち、9.1%であった。

このようにして得られたアシカ島における波向別波高出現頻度分布を、2山型スペクトルを考慮しない場合とともに、図-4および図-5に示す。なお、図-5では、先述したように、2山型と判定されたものの欠測として整理された時刻が1.2%存在するため、図-4に比べ、データ数が若干減少している。これらの図より、2山型と判定される波浪は、S系のうねりが来襲する台風等による擾乱時と、N系の風波が来襲する冬季風浪時に多く発生し、それぞれ前者が2%程度、後者が7%程度であることがわかる。

なお、図-5 (c) において、25cm未満のうねり波高が6%強を占めているのはこのためである。すなわち、冬季風浪時に観測された2山型スペクトルのうち多くで、それほど顕著なうねり成分が観測されなかったと推測される。しかし、2山型スペクトルを分離できなかった238データのうち、223データで波浮における波向きが欠測であったことを考慮すると、久里浜港における実際のうねり来襲頻度は、さらに1%程度高かった可能性が示唆される。

一方、2山型スペクトルを分離して得られた、0.15Hz未満のうねり成分（1731データ）の波向きのうち99%以上は、地形から予想された通り、16方位のうちSから来襲していることを確認した。なお、残り1%の波向きはすべてSSWと推定されたが、それらのうねり波高は最大

表-1 沖波波浪頻度分布に対する代表波浪（計算ケース）

波高[m]	周期[s]	波向	S_{max}	スペクトル	計算法
1	4	E	10	修正ブレット シュナイダー ・光易型スペ クトル	高山法
	5		25		ブシネスク モデル
2	6	SE	10		高山法
	5		25		ブシネスク モデル
2	6	S	10		高山法
	5		25		ブシネスク モデル
1	4	S	10	修正ブレット シュナイダー ・光易型スペ クトル	ブシネスク モデル
2	6		25		
1	9		25		
2	12		25		
1	14		25		
2	14		25

図-6 高山法に対して設定した計算領域

図-7 プシネスクモデルに対して設定した計算領域と計算結果の例

75cm程度であった。したがって、以下で行う港内静穏度解析では、作業の効率化のためこの影響は十分無視できると考え、図-5 (c) に示したように、うねり成分の波向きはすべてSとして取り扱った。

(2) 港内静穏度解析のための港内外波浪変形計算

このようにして得られたアシカ島における沖波波浪出現頻度分布を代表する波浪諸元を設定し、久里浜港内外の波浪変形計算を実施した。ここで、代表周期6s未満では港内の屈折・浅水変形が無視できるとして高山法を、6s以上では波の非線形性を考慮できるプシネスクモデルを用いた。さらに、プシネスクモデルによる波浪変形計算においては、高波浪時の碎波による港内波高比分布の変化も考慮できるよう、代表波高を2種類設定した。これらの計算ケースを表-1に示す。

まず、高山法に対して設定した計算領域を図-6に示す。この計算法では、港内水深を一定とみなして、港内の防波堤や護岸による波の回折や反射の状況を順次計算する。したがって、これらの波が港奥まで十分到達するように、港内を外側（代表水深12m）と内側（代表水深8m）に分け、内側港内の港口部（図の波高算定位置）で両者を接続している。また、外側港内の港口部における波浪諸元は、沖のアシカ島位置で設定された代表波浪諸元を、エネルギー平衡方程式法を用いた波浪変形計算により補正して与えた。なお、図中の番号は、荷役稼働率等を算定する代表地点を示す。また、コンター線は、外側港内に対して、高山法により算定した港内波高分布（波向SE、波高1m、周期4s）を示す。

次に、プシネスクモデルに対して設定した計算領域および計算結果の例を図-7に示す。この計算法では、水面波形の伝播過程を時間を追って解き、港内外で生じる様々な波浪変形を一度に考慮できる。しかし、対象とする波の波長の1/10程度に細かな計算格子を設定する必要があるため、特に、海底地形の影響を受けにくい周期の短い波に対しては、高山法を適用するほうが計算精度および計算コストの面で有利な場合もある。また、格子座標に対して斜めに進む波ほど計算誤差が大きくなる特性を有するため、計算に際しては、入射波向に応じて地形を回転させることとした。なお、図中の番号は水面波形を出力し、荷役稼働率等を算定する代表地点を示す。

以上のようにして得られた沖波（アシカ島地点）に対する港内波高比のうち、例えば、波向Sに対して、p.12, p.15, p.19で代表する各岸壁前面（図-7参照）での算定結果を、それぞれ図-8 (a) ~ (c) に示す。ここで、沖波の波高、周期による港内波高比の変化は、平山（2008）にならい、2次曲面で近似できるものと仮定した。図より、各地点ともに、同じ沖波波高に対しては、周期が長いほど波高比が増大する一方、プシネスクモデルで計算した6s以上の同じ周期に対しては、波高が大きいほど波高比が低減することがわかる（高山法では、周期が同じであれば、沖波波高による港内波高比の変化は現れない）。前者は浅水変形による波高増大や反射率の増大による多重反射、後者は碎波による波高減衰などの影響が考えられる。

ただし、高山法を用いて計算した周期4, 5sと、プシ

(a)-6.5m 岸壁(p.12) (b)-5.5m 岸壁(p.15) (c)-9m 岸壁(p.19)
図-8 沖波の波高と周期による港内波高比の変化

表-2 各岸壁における荷役稼働率算定結果の比較

船型	貨物船 3000DWT		フェリー 3000GRT		フェリー 10000GRT	
地点	P.11	P.12	P.14	P.15	P.18	P.19
現行法	99.7	99.8	100.0	99.8	100.0	99.8
提案法	99.7	99.8	100.0	99.7	100.0	99.8

図-9 各岸壁における荷役稼働率算定結果の比

ネスクモデルで計算した周期6sとの間で、周期による港内波高比の変化が一部逆転している (p.12, p.19)。この直接的な原因は、異なる計算法による計算特性の違いにあると考えられる。特に高山法では、港外 (エネルギー平衡方程式法)、外側港内、内側港内へと計算領域を接続するたびに入射波を与え直すが、このとき、複雑な港形の港奥に進むほど、成分波の方向分散性に偏りが生じることには注意しなければならない。一方、ブシネスモデルでは、周期が短くなるほど分散特性の近似精度が劣り、また差分誤差が大きくなりやすいことに注意が必要である。したがって、このような場合には、同じ入射条件に対して波浪変形計算を行い、両者の結果を比較することが有効と考えられるが、本研究においては、今後の課題として留意することとした。

最後に、各代表地点における波高出現頻度分布は、図-8等で近似される波高、周期に対する港内波高比に、図-4あるいは図-5に示す沖波波浪出現頻度分布を乗じることにより、それぞれ算定することができる。

(3) 荷役稼働率に対する2山型スペクトルの影響評価

荷役稼働率の算定には標準解析法を用い、特に、スペクトル形状が2山型と判定され、かつ風波・うねり成分

の代表諸元が算定された時刻では、それぞれの成分およびそれらの合成波に対して「稼働」、「不稼働」を判別し、そのすべてで「稼働」と判定された場合のみ、その時刻に稼働できるものとした。ここで、各対象岸壁における荷役限界波高は、「港内長周期波影響評価マニュアル」(財団法人沿岸技術研究センター、平成16年8月)に従い、船種、船型 (トン数)、相対波向および周期に応じて設定した。このようにして算定した各岸壁における荷役稼働率を、2山型スペクトルを考慮しない現行法による算定結果と合わせて、表-2および図-9に示す。

表および図より、従来の沖波出現頻度分布に対して2山型スペクトルを考慮した場合、久里浜港の稼働率に関しては、港奥のフェリー岸壁で0.1%低下するに留まり、顕著な影響は確認されなかった。これは、2山型と判定された時刻に限ると、本手法により算定される稼働率は0.5%低下するものの、アシカ島の場合、これは全波浪観測時刻の9.1%に過ぎず、さらに、そのうち有意なうねりが来襲していた割合は2%程度であったため、結果的に僅かな差しか生じなかったものと考えられる。しかし、うねりの来襲頻度が高い外洋に面した港湾などでは、このような2山型スペクトルが観測された際に、そのうねり周期を過小評価し、現状の荷役稼働率を実際よりも過大評価している可能性があるため、注意が必要である。

4. おわりに

本研究では、東京湾に面した久里浜港を対象として、外洋からのうねりと湾内発生波から成る2山型スペクトルの発生頻度を考慮した港内静穏度解析を行い、通常の沖波出現頻度分布を用いて算定した荷役稼働率と比較することにより、その影響について検討した。

今回の場合、久里浜港沖の沖波波浪頻度分布において、波高が比較的大きなうねりの周期を過小評価している割合は僅か2%程度であったため、港内静穏度に関して顕著な影響は確認されなかった。しかし、これを考慮することにより、港奥のフェリー岸壁で荷役稼働率が0.1%低下することを確認した。そこで今後は、風波とうねりが重畳して来襲する頻度の高い港湾とその地形・海象条件を整理するとともに、それらが港内静穏度に与える影響の有意性を検証するための事例を蓄積する必要がある。

参考文献

- 合田良実 (2008) ; 耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計, pp.31-32.
- 財団法人沿岸技術研究センター (2004) ; 港内長周期波影響評価マニュアル, p.86
- 平山克也 (2008) ; ブシネスモデルを活用した高精度港内静穏度解析法の提案, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.796-800.