拘束波由来の港内長周期波を考慮した 港内静穏度解析

平山 克也¹・加島 寛章²・長沼 淳也³・宇野 喜之⁴

¹正会員 (独)港湾空港技術研究所 海洋研究領域波浪研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail:hirayama@pari.go.jp

²正会員 (独)港湾空港技術研究所 海洋研究領域波浪研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail:kashima@pari.go.jp

³(独)港湾空港技術研究所 海洋研究領域波浪研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail:naganuma-j84q8@pari.go.jp

⁴正会員 (株)エコー 調査・解析部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)
E-mail: yoshiyuki_uno@ecoh.co.jp

港口を構成する防波堤(西)(東)近傍にそれぞれ浅瀬が存在する日本海側のA港では、港内に侵入する風波やうねりの波群の回折・砕波が同時に発生し、港外から来襲する自由波とともに、拘束波に由来する港内長周期波の発生が顕著になる。ブシネスクモデルにより算定したこの両者はそれぞれ港内の観測波高と比較的よく一致するため、この理由を考察するとともに、岸壁前面での波高出現頻度及び稼働率について従来の自由波に加え、港内波及びこれらの合成波に対するものをそれぞれ算定して比較した。なお、有義波高3m以上の沖波の出現頻度が1%にも満たないA港に対しても港外の自由波を適切に推定できるよう、風波に対するアーセル数をパラメータとする α の推定式を新たに提案して用いた。これらの結果、成分波の波向分布がより適切であると期待される港内波では、自由波に比べ、より小さな稼働率が算定された。

Key Words : free long waves, bouded long waves, Boussinesq model, harbor tranquility

1. はじめに

港内や海岸でみられる長周期波は、海域に存在する自由波として沖から来襲する成分と、風波やうねりの波群とともに伝播する拘束波が波群の回折、砕波変形等により解放された成分から成ると考えられる。永井ら¹⁾は、観測データの解析結果より、実海域ではこのうち自由波成分が卓越することを示した。したがって長周期波に対する港内静穏度解析は、一般に、港外に存在する自由長周期波が港内に侵入したときの港内波高分布を算定することにより実施される。

しかし、関本ら²⁾によって説明される長周期波の発生メカニズムによると、本研究で対象とした日本海側のA港では、港口を構成する防波堤(西)(東)の端部にそれぞれ浅瀬が存在するため、港内に侵入する風波やうねりの波群の回折・砕波が同時に発生し、拘束波に由来する港内長周期波の発生が顕著になることが懸念される。

そこで本研究では、港外から侵入する自由長周期波とは別に港口付近で発生する拘束波由来の港内長周期波を

考慮する港内静穏度解析手法を提案するとともに、岸壁前面で算定される港内波高頻度及び荷役稼働率に及ぼす影響について考察した。なお、有義波高3m以上の沖波の出現頻度が1%にも満たないA港に対して港外長周期波の波高出現頻度を推定するために、風波と長周期波の波高比を決定する係数 α (平石ら³⁾)には、風波諸元をパラメータとする推定式を新たに提案して用いた。

2. 港内静穏度解析の概要

(1) 対象としたA港及び港内静穏度解析手順の概要

図-1に示すA港は、島々が点在する湾奥に位置し、荷役稼働率を算定する岸壁② (P3-P5) 及び現在整備中の岸壁① (P1-P2) も港内の島影を利用して整備されている。また、港奥部の東側から先には長い自然海浜が続いている。なお、現在の港口を構成する防波堤(西)(東)の端部(港口とは反対側)には島周辺の浅瀬が存在する。

ところで、このA港では、NOWPHASによる沖波波浪

図-1 対象としたA港の概要及び波浪観測・推算点の位置

観測は実施されていない。しかし、最寄りのNOWPHAS地点で観測された波浪台帳を検証データとした波浪推算が実施され、B点において最近5年間(2007年～2011年)の風波の沖波波浪出現頻度が得られている。また、2013年2月1日～2013年2月28日の冬季1ヵ月間に実施された波浪観測のうち、隣接するNo.2点で得られた連続観測データに対する再現計算も合わせて実施され、周辺地形による極地風場の影響を受けながらも、波高、周期ともに相関係数で0.8～0.9程度の推算精度が確認されている。なお、このときの波浪観測はP1(No.3)点でも同様に実施された。

一方、港外長周期波の波高出現頻度は、これらの推算波浪に対し長周期波の標準スペクトル(平石ら³⁾)を適用して推定した。また、このとき用いる係数 α はNo.2点における1ヵ月間の観測スペクトルから算定することとしたが、この観測期間には α の算定に通常用いる有義波高3m以上の沖波が観測されず、また隣接するB点でもその出現頻度が1%にも満たないため、本研究では後述する α の新たな算定法を提案して用いた。なお、これらを港外から来襲する自由長周期波と仮定し、港内波浪変形計算を行って得られる岸壁前面の波高出現頻度から対象船舶の荷役稼働率を算定する方法は、従来と全く同様である。

また、拘束波由来の港内長周期波高は、風波を対象として別途実施した港内波浪変形計算において、岸壁前面で算定される水面波形の長周期波成分として算定した。

(2) 港外の自由長周期波に対する港内静穏度解析

(a) 港外長周期波の波高出現頻度の推定

風波と長周期波の波高比を決定する係数 α は、定義に従い、港外(No.2)における観測スペクトルの総エネルギー m_0 に対する長周期波エネルギー m_{0L} の比の平方根 $R_L=(m_{0L}/m_0)^{0.5}$ と関係づけて図-2のように算定される。

 図-2 α と U_r の関係

 図-3 α と R_L の関係(BS型)

すなわち、各日時の観測スペクトルに対する α は、後述する式(2)を代入した境界周波数 $f_{ba}=f_b/\alpha$ (ここで、 f_b は風波スペクトルのピーク周波数)を境に観測スペクトルを風波と長周期波に分離し、これらを周波数積分することによりそれぞれ算定される。さらに、これらを波浪統計量の観測値から得たアーセル数 $U_r=H_{1/3}L_{1/3}^2/h^3$ (ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $L_{1/3}$ は有義波周期 $T_{1/3}$ に対する波長、 h は潮位を含めたNo.2点の水深)に対して整理した。なお、これらの整理は $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ 、 $H_{1/3}*T_{1/3}$ などに対しても実施したが、 U_r に対する相関が最も高かった。また、○囲いの各プロットは、観測スペクトルがそれぞれ、風波に対しては1山型(BS: プレットシュナイダー・光易型)、長周期波に対しては直線型で近似できるものを目視で抽出して示した。すると、これらの近似直線として次のような α と U_r の関係式が得られる。

$$\alpha = -0.0088U_r + 1.6621 \quad (1)$$

一方、 f_{ba} を境に風波及び長周期波の関数スペクトルとして設定したBS型及び直線型スペクトルを周波数積分し、 $\alpha=2.0$ から0.05刻みで降順に算定した α に対する R_L のプロットを図-3に示す。さらに、これらの近似式として係数A、Bが未知の式(2)を仮定し、 R_L が長周期波の波高比を表すことを考慮して、 $0.0 \approx 10^{-4} \leq R_L \leq 0.5$ の範囲で両

者の差が十分小さくなるまで収束計算を行うことにより係数 A , B を決定した. 式(2)は, R_L が大きくなる少なくとも $\alpha \leq 1.75$ の範囲で, α と R_L の関係をよく近似している.

$$R_L = \exp[-A\alpha^B] \quad A=0.1227, B=6.3206 \quad (2)$$

なお, 平石ら³⁾が示したプロットは $1.50 \leq \alpha \leq 1.75$ の範囲のみであり, 片対数グラフで例示したこれらの近似直線(黒線)は, この範囲外の α に対する R_L を過大評価する.

したがって, B点における港外長周期波の波高出現頻度は, 式(1)を代入した式(2)が風波と長周期波の波高比を表すことを利用して, 波浪推算された5年間分の風波の沖波波浪出現頻度から推定できる. 結果を図-4に示す. ただし, 自由長周期波の波向きは風波と同様と仮定した.

(b) 自由長周期波の港内波浪変形計算

港内に侵入する港外長周期波の波浪変形計算は図-1に示すB点から岸側を対象とした. すなわち, 港外長周期波を代表する波高0.1m, 周期30-300sの直線スペクトルを波向毎(3波向; N, NNE, NE)に設定し, B点を入射境界としたブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver4.6d8a)を用いて, 潮位M.W.L.=D.L.+1.18mに対する港内の対象岸壁(岸壁①及び岸壁②)前面での港内波高比及び港内波高頻度を算出した. ここで, 計算格子幅は10m, 計算時間間隔は0.05sとし, 計算領域内の最小水深は2.0mとした. また,

図-4 港外長周期波の波高出現頻度(B点)

水陸境界は基本的に完全反射境界(反射率1.0)としたが, 浅瀬に面する島周辺及び港奥東側の海浜ではスポンジ層による部分反射境界(反射率0.7)とした. さらに, 透過境界を実現する計算領域の外周スポンジ層幅は, 直線スペクトルの代表周期54.5sの2波長分(1130m)とした.

このようにして計算した港内外の自由長周期波の波高比分布を図-5に示す. 各波向とも, 島や海浜, 防波堤や護岸の前面では反射波との重畳及び浅水変形による波高比の増大がみられるが, 島及び防波堤による遮蔽域では比較的静穏であり, 港奥の隅角部を除き, 港内での長周期波高比の増幅もほとんどみられない. また, 対象岸壁前面の各地点(P1-P5)におけるB点に対する波高比を波向毎に図-6に示す. いずれの波向とも, 各岸壁前面での波高比の空間分布に大きな違いは見られないが, 港奥の隅角部による波高増大の影響が及んでいると考えられる岸壁②(P3-P5)では, 岸壁①(P1-P2)に比べて波高比が大きい.

(3) 拘束波由来の港内長周期波に対する静穏度解析

拘束波由来の港内長周期波は, 別途実施した風波のみに対する港内静穏度解析において同時に算定されたものを用いた. 風波の代表波浪は図-1のB点における2波高($H_{1/3}=0.5\text{m}$, 2.6m) $\times$ 4周期($T_{1/3}=6\text{s}$, 8s , 10s , 12s) $\times$ 3波向(N, NNE, NE)とし, 潮位M.W.L.=D.L.+1.18mに対するこれらの港内波浪変形計算には, $H_{1/3}=2.6\text{m}$ のとき防波堤上の越波とその背後への越波水塊の流入も計算されるブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver5.3)を用いた(平山ら⁴⁾). ここで, 計算格子幅は2.5m, 計算時間間隔は $T_{1/3}/1000$ とし, 港内外の消波工は透水層境界, 島周辺の浅瀬や海浜は遡上境界として, 波浪諸元に応じそれぞれ部分反射する波が自動的に算定されるよう配慮した. さらに, 透過境界を実現す

図-6 B点に対する港内各地点の波高比 (自由長周期波)

図-5 自由長周期波の港内外波高比分布(直線型スペクトル($H_{1/3}=0.10\text{m}$, $T=30\sim 300\text{s}$), $S_{max}=999$)

図-7 風波の港内波高分布(BS型スペクトル($H_{1/3}=2.6\text{m}$, $T_{1/3}=12.0\text{s}$, $S_{max}=75$))

図-8 風波の波高(B点)に対する拘束波由来の長周期波高(港内各地点)の比

る計算領域の外周スポンジ層幅は、周期12sの波に対しても反射が生じないよう200mとした。ただし、計算効率を高めるために、B点から島背後にかけての浅海変形計算にはエネルギー平衡方程式法を用い、平山ら⁵⁾の方法に従い、島背後に設けた接続境界上の複数地点で出力される各方向スペクトルをブシネスクモデルに入力することで、両モデルの片方向接続を実施した。

このようにして計算した風波の波高分布のうち、 $H_{1/3}=2.6\text{m}$, $T_{1/3}=12\text{s}$, 波向N, NNE, NEに対する結果を図-7に示す。各波向とも、防波堤(西)(東)からなる港口に加え、それぞれの端部からも風波が港内に侵入する様子が確認できる。また、対象岸壁前面の各地点(P1～P5)で出力した水面波形をスペクトル解析し、得られた周波数スペクトルから周期30s～300sの長周期波成分を抽出することにより、拘束波由来の港内長周期波高を算定した。B点における風波の波高に対する港内各地点の長周期波高(拘束波由来)の比を、波高、周期及び波向毎に図-8に示す。風波の周期が長く、また波高が大きいほど、拘束波由来の港内波が発生し易いことが確認できる。

3. 自由波及び拘束波に対する荷役稼働率の算定

(1) 対象岸壁前面の長周期波高出現頻度

上述のように、A港で想定される拘束波由来の港内波高は、港外から伝播する自由波に対し有意となる結果が

得られた。そこで、対象岸壁前面の長周期波高出現頻度は、この両者及び合成波に対して得ることを考える。

自由波の港内波高出現頻度は、図-4に示す港外長周期波の波高出現頻度(推定した長周期波台帳)に対し、図-6に示す港内波高比を周期及び波向に関して線形補間しながら乗じて得ることができる。また、拘束波由来の港内波の波高出現頻度は、B点で推算された風波の港外波高出現頻度(波浪推算台帳)に対し、図-8に示す波高比を波高、周期及び波向に関して線形補間しながら乗じて得ることができる。ただし波向について、NよりもW側では波向N、NEよりもE側では波向NE、の波高比をそのまま準用した。さらに、これらの港内波高出現頻度に対応する各台帳時刻での長周期波高(自由波、港内波)をそれぞれエネルギー合成し、合成波に対する港内波高出現頻度を得た。P2点(岸壁①中央)、P4(岸壁②中央)における推定結果をそれぞれ、図-9～図-11に示す。

港外から侵入した自由波、拘束波に由来する港内波はともに風波諸元に依存し高波浪時に卓越することから、各地点における両者の港内波高出現頻度は同じ波向で卓越することになる。しかし、島や防波堤の遮蔽効果を受ける自由波に比べ、遮蔽や砕波による風波の減衰に伴って発生する港内波では、波高ランクの大きな波ほど、各地点での出現率は相対的に大きくなっている。

同じ港内長周期波においてこのような違いが生じた原因として、筆者らは次のように推測している。すなわち、港内各地点に伝播する自由波は回折時の波長(周期)に応

図-9 自由長周期波の港内波高出現頻度 図-10 拘束波由来の港内波高出現頻度 図-11 合成長周期波の港内波高出現頻度

じて選別され易いのに対し、回折・碎波時に波群から解放された港内波にはさまざまな周期が含まれるため、狭帯域となった自由波に比べ、港内各地点に伝播し易いと考えられる。また、岸壁法線の向きは異なるが隣接するP2点とP4点で得られる波高出現頻度の比較において、拘束波由来の港内波ではほとんどみられない違いが自由波では僅かにみられるのも、このためと考えられる。

ここで、No.2点とB点における風波及び自由長周期波の波高が同様と仮定し、図-6、図-8の波高比を用いてそれぞれ推定したP1(No.3)点での自由波、港内波及びこれらの合成波を、先述した1ヵ月間の波浪観測で得られたNo.3点での長周期波高の観測値と比較した結果を図-12に示す。図より、港外から伝播する自由波、及び拘束波由来の港内波の波高はそれぞれ、A港港内における観測長周期波高と良い相関が認められる。しかし、両者を考慮した合成波の波高は、観測波高に比べ過大である。

すなわち、これらの結果は、ブシネスクモデルが自由波及び拘束波の波浪変形を適切に算定できることを示すとともに、もし港内長周期波の成因として港口付近での拘束波の解放が支配的であるならば、ブシネスクモデルはこの過程をも適切に算定できることを示している。

また、この場合には、長周期波に対する港内静穏度解析において、式(2)を用いて推定される港外長周期波高を岸側へ向かう自由波と仮定することは、拘束波が港口付近で解放されることを想定したことにはほぼ対応すると解釈できる。すると、港内長周期波としては、このどちらか一方を対象とすべきであり、少なくともこの両者を合成することは適切でないと思われる。

ただし、この両者はそれぞれ観測波高に対して若干過小であることから、より精緻には、例えば拘束波由来の港内波に対し、何らかの方法で見積もられた港外から伝

図-12 ブシネスクモデルによる港内長周期波の算定精度

播する真の自由波を加える必要があるのかもしれない。その場合、風波の港内波浪変形計算ではBS型等の関数スペクトル、港外から来襲する真の自由波の港内波浪変形計算では何らかの新たな長周期波スペクトルをそれぞれ造波することになるが、本研究で用いた港内長周期波のエネルギー合成によらずこれを実現するためには、風波諸元に対応した差分条件で長周期波に対応した計算範囲を確保するための演算の効率化(例えば、平山ら⁹⁾や開境界処理の工夫(例えば、清川ら⁷⁾)などが不可欠であると思われる。

(2) 対象岸壁における長周期波に対する荷役稼働率

港内長周期波に対する荷役限界波高として岸壁①で0.15m、岸壁②で0.20mを設定した場合に、これらを示した図-9～図-11から算定される自由波、港内波、合成波に対する荷役稼働率を表-1及び図-13に示す。

自由波に対する荷役稼働率はこれまでの通常の港内静穏度解析で算定されるものと全く同じであり、いずれの

表-1 各長周期波に対する荷役稼働率の算定結果

施設	岸壁①			岸壁②	
	P1(No. 3)	P2(中央)	P3(代表点)	P4(中央)	P5(端部)
長周期波					
自由波	98.430	98.690	98.649	98.991	98.364
港内波	97.134	97.059	98.156	98.282	97.860
合成波	95.525	95.619	96.461	96.805	95.927

(単位: %)

図-13 各長周期波に対する荷役稼働率の比較

岸壁とも目標稼働率97.5%を満足していることがわかる。しかし、港内波では岸壁①で目標稼働率を僅かに下回り、さらに合成波では両岸壁ともに目標稼働率を1~2%下回る結果が得られた。ただし、図-12で考察された港外長周期波高の成因によれば、合成波に対する稼働率を考えることは適切でないため、ここでは自由波、港内波のうちいずれの稼働率がより確からしいかについて考察する。

推定された5年間の荷役稼働率を比較すると、いずれの岸壁でも、自由波に比べ港内波に対する稼働率が低い。ここで、港外長周期波の成因に関する仮定に基づき、港口から港内に広がる長周期波のエネルギーが両者で等しいと考えると、これらの稼働率の違いは、前述した成分波の波向分布に起因する両者の伝播特性によるものと推測される。また、この波向分布としては、港口付近で拘束が解放される過程が実際に算定された港内波のほうが、岸に向かう自由波と仮定した長周期波が回折したものに比べ、より妥当と思われる。したがって、長周期波の波向分布に関する検討を今後さらに進める必要があるものの、間もなく供用される岸壁①の運用に当たっては、拘束波由来の港内波に対して推定された稼働率が目標値を下回っていることに十分留意する必要があると思われる。

4. おわりに

本研究では、港外から来襲する自由長周期波のほかに、港口付近で発生する拘束波由来の港内長周期波を考慮する港内静穏度解析手法を提案し、岸壁前面で算定される港内波高頻度及び荷役稼働率に及ぼす影響を考察した。その結果、港外から伝播する自由波と同様に、港内での観測波高をよく説明する拘束波由来の港内波に基づくA港の静穏度解析では、成分波の波向分布をより適切に考慮していると期待できるため、自由波に基づく従来の手法に比べより適切な稼働率を算定できると推測された。

謝辞： 結果の考察では、高山知司京都大学名誉教授より貴重なご助言を賜りました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 永井紀彦, 橋本典明, 白石 悟, 川口浩二, 清水勝義, 上野成三, 小林昭男, 東江隆夫, 柴田孝雄: 現地連続観測による沖合長周期波の発達・減衰過程と港内係留船舶の動揺, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.226-230, 1997.
- 2) 関本恒浩, 森屋陽一, 水口 優: 自由長周期波の発生とその定量的評価に関する理論的考察, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.236-240, 2000.
- 3) 平石哲也, 河野信二, 玉城重則, 長谷川準三: 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 第44巻, pp.246-250, 1997.
- 4) 平山克也, 加島寛章, 林健太郎, 五十嵐雄介: 越波伝達波を含む港内波浪観測データの再現計算, 土木学会論文集 B3(海洋開発)特集号, Vol.69, No.4, 2013.
- 5) 平山克也, 岩瀬浩之, 加島寛章: 任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.11-15, 2010.
- 6) 平山克也, 岩瀬浩之: プシネスクモデルに導入したネステイング計算の適用性, 土木学会論文集B3(海洋開発)特集号, Vol.70, No.4, 2014(印刷中).
- 7) 清川哲志, 灘岡和夫, Sendar Beji: 非線形波動伝播シミュレーションにおける開境界処理の一方法, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.6-10, 1996.

HARBOR TRANQUILITY ANALYSIS FOR LONG PERIOD WAVES PROPAGATED FROM OFFSHORE AND GENERATED ON HARBOR ENTRANCE

Katsuya HIRAYAMA, Hiroaki KASHIMA, Junya NAGANUMA and Yoshiyuki UNO

The long period waves observed in harbor inside may consist of free waves not only propagated from offshore but also generated on harbor entrance due to reduction of wave groups by diffraction and breaking. In this study, a harbor tranquility analysis for long period waves is conducted by using Boussinesq-type wave transformation model with model verifications. The offshore long wave heights are estimated from wind waves with a newly proposed relationship of them, and the generated long wave heights on harbor entrance are estimated from the results of calculation for wind wave transformation. A harbor tranquility analysis for the generated long waves on harbor entrance is more appropriate because the directional spreading of their component waves may be reproduced in calculation of wave transformations.