越波伝達波を含む港内波浪観測データの 再現計算

平山 克也¹・加島 寛章²・林 健太郎³・五十嵐 雄介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正会員 (株)アルファ水工コンサルタンツ 東京本部技術部 (〒101-0031 東京都千代田区東神田2-7-9)
E-mail:k-hayashi@ahec.jp

⁴(株)アルファ水工コンサルタンツ 東京本部技術部 (〒101-0031 東京都千代田区東神田2-7-9)
E-mail:igarashi@ahec.jp

わが国の港湾における防波堤の多くは越波を許容しているため、港内静穏度解析においては必要に応じて越波伝達波の発生・伝播状況を正しく把握し、港内岸壁における荷役稼働率の算定に反映させることが求められる。そこで、港内波浪変形計算に近年多用されるブシネスクモデルを用いて、防波堤上の越波量を算定すると同時にこれが堤体上を移動して港内側に流入する過程を解き、越波伝達波を算定する手法を示した。さらに、この計算モデルを越波が頻発する金沢港に適用し、港内外で観測された複数の波浪データに対する再現計算を行い、それらの計算精度を検証した。その結果、金沢港内の観測波高は防波堤端部からの回折波と風場による港内発生波が支配的であるが、高波浪時には少なくとも0.2~0.4Hzの越波伝達波が発生していることを確認した。

Key Words : *transmitted waves, wave overtopping, Boussinesq model, harbor tranquility, breakwater*

1. はじめに

わが国の港湾における防波堤の多くは越波を許容しているため、特に冬季に高波浪が来襲する日本海側の各港湾では、防波堤に乗り上げた波が港内側に落下する様子がしばしば観測される。その中には、計算された岸壁での港内波高値をみる限りでは静穏と思われる場合であっても、船舶航行や荷役作業に何らかの支障をきたしている事象があり、港内側に発生した越波伝達波の影響が疑われている。また、港湾の技術基準(日本港湾協会¹⁾)においては、必要に応じて越波伝達波を考慮した港内静穏度解析を行うなど、越波伝達波の発生・伝播状況を正しく把握することが求められている。

越波伝達波を考慮して港内波浪場を算定する試みは、すでに数多く実施されている。例えば、実務において多用される高山法を用いた港内波高分布計算では、越波が生じる防波堤部分のみを仮想的な開口部とみなし、Goda²⁾による波高伝達率から周波数スペクトルの大きさを決定した方向スペクトルを入射させて、越波伝達波の

みによる港内波高分布を別途算定する方法がよく用いられる。また、平口ら³⁾はこの方法において、越波伝達波の周波数スペクトルのうち基本周波数とその倍周波数のエネルギーが顕著になること、及び周波数に対して2山型の方向関数となる方向分散性を考慮する方法を提案した。さらに、平口ら⁴⁾は、少なくとも彼らが行った実験の範囲内では、防波堤からの越波流量と越波伝達率との間にかなり密接な関係があることを示した。

一方、西受・水口⁵⁾や森屋・水口⁶⁾は、防波堤からの越波量を越流公式を用いて算定し、防波堤背後への越波量の割り込みを造波板による押し出しに置き換える、あるいは越波量を線流量として与えて越波伝達波を再現することを試みている。また、織田ら⁷⁾は、越波伝達波の物理的機構に基づき、質量と運動量の流入としてブシネスクモデルに取り込むことを提案している。

このうち本研究では、平山・長谷川⁸⁾による越波モデルを応用してブシネスクモデルによる越波伝達波計算を行い、防波堤からの越波発生時に港内の複数地点で観測された波浪データに対する再現精度を検証した。

2. 港内波浪観測データの概要

(1) 波浪観測データの取得と抽出

本研究で対象とした金沢港では、冬季に防波堤からの越波が頻発し、港内での越波伝達波の影響が懸念されている。そこで、2011/10/29～2012/3/15の期間には、図-1に示す各地点において、水位変動の連続観測（サンプリングタイム0.5s）が実施された。本研究では、このうち、港口沖に位置するSt.0での有義波高・有義波周期がそれぞれ $H_{1/3}=3\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8\text{s}$ 程度のとき防波堤で越波がみられるようになることに着目して、波向きが異なる4波浪（W, WNW, NW, NNW）を抽出するとともに、より激しく越波する $H_{1/3}=4.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10\text{s}$ 程度、及び越波が生じない $H_{1/3}=1.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=6\text{s}$ 程度の波浪（WNW, NW）をそれぞれ2つずつ抽出した。これらをまとめて表-1に示す。

ここで、港口沖のSt.0、航路内のSt.1及び岸壁前面のSt.2における水面変動は超音波式波高計により直接計測された。一方、西防波堤からの越波水塊の打ち込みによる水面変動の計測を目的としたSt.A、St.Bでは、水面の気泡による欠測を避けるため水圧式波高計が設置され、橋本ら⁹⁾による簡便法を用いて水圧波から表面波へと換算した。この方法では、水面変動の高周波数成分もある程度計測することが可能であるが、顕著な二方向波浪に対しては、水圧波の周波数スペクトルのうちピーク周波数の1.3～5倍の範囲を一次式及び二次式で近似する際、誤差の分散を最小とする境界周波数 f_B が大きめに推定さ

れる。そこで、これに対処するための f_B の上限値について、本観測データに対しては0.2Hzと設定された。なお、越波伝達波はまさにこのような二方向波浪の特性を有するため（平口ら³⁾）、ピーク周波数0.1Hzの水圧波の周波数スペクトルに対して0.13～0.5Hzの区間を近似し、線形波理論を用いて、 f_B よりも高周波数側の周波数応答関数の値を一定（ただし、0.5Hzはカット）として、水圧波から表面波へほぼ妥当に変換できるものと仮定した。

以下では、港内外で観測された水位変動の周波数スペクトルを波浪条件毎に比較し、港口からの回折波や西防波堤からの越波伝達波の影響などについて考察した。

(2) 波向きによる港内波高分布の違い

西防波堤で越波が発生する $H_{1/3}=3\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8\text{s}$ 程度の波浪3, 4, 5, 6について、港内外の各地点で観測された周波数スペクトル及びSt.0に対する有義波高比を重ねて図-2に示す。なお、図中の縦破線は、沖から来襲する風波の有義波高を算定するために設定した周波数帯の上限値（0.25Hz=4s）及び下限値（0.033Hz=30s）を示す。

まず、港外のSt.0で観測された周波数スペクトルについて、これらの差異はほとんどみられない。なお、これらの波形勾配は0.031～0.040であり、代表波の波長に起因する方向集中度もほぼ同様と推測される。

次に、港内のSt.1, 2及びSt.A, Bで観測された周波数スペクトルの差異のうち多くは、各波浪における防波堤端部からの回折状況の違いによるものと推測される。すなわち、港内での有義波高比の変化からも確認されるように、西防波堤に対しほぼ直入射する波向きWの波浪3から順にNよりの波向きとなる波浪4, 5, 6へと移るにつれて、港内へと波が侵入しやすくなっている。一方、波浪3に対しSt.1, 2で観測された0.25Hzよりも高周波数側の波エネルギー増大は、風場による港内発生波に加え、西防波堤からの越波伝達波の発生によるものと推測されるが、この詳細は後述する再現計算において考察する。なお、St.A, Bの観測スペクトルにみられる0.5Hzよりも高周波数側の急激なエネルギー減衰は、上述した通り、水圧波を表面波へ換算する際に設定した周波数応答関数のカット周波数の影響によるものである。

図-1 金沢港における港内波浪観測地点

（観測期間：2011/10/29～2012/3/15）

表-1 対象とした波浪諸元（St.0における観測値）

ケース名	観測日時	波高[m]	周期[s]	波向き	潮位[m] CDL基準	越波の程度
波浪1	2012/03/07 00:10	1.54	5.5	WNW	0.18	小
波浪2	2012/02/23 18:10	1.49	5.6	NW	0.10	小
波浪3	2011/12/10 22:30	3.04	7.8	W	0.33	中
波浪4	2012/02/09 16:30	3.00	7.7	WNW	0.17	中
波浪5	2012/02/12 04:50	3.02	7.7	NW	0.21	中
波浪6	2011/12/04 03:30	3.04	7.8	NNW	0.22	中
波浪7	2011/12/22 21:30	4.42	9.7	WNW	0.33	大
波浪8	2011/12/23 02:10	4.31	9.5	NW	0.28	大

(3) 波高・周期による港内波高分布の違い

波向きNWの波浪2, 5, 8について、港内外の各地点で観測された周波数スペクトルを重ねて図-3に示す。

まず、港外のSt.0で観測された周波数スペクトルについて、ピーク周波数及びそのピーク値の差異は、各波浪の代表波高・周期の違いによるものである。また、波浪8において概ね0.25Hzよりも高周波数側でみられる差は、この風場での発生波の違いによるものと推測される。なお、各波浪の平均波向きは 307° ～ 313° （Nを 0° とし時

図-2 波向きによる観測スペクトルの違い

図-3 波高・周期による観測スペクトルの違い

計回りを正), 沖での波形勾配は0.025~0.040であった。

次に, 港内のSt.1, 2及びSt.A, Bで観測された周波数スペクトルの差異のうち多くは, 前項と同様, 各波浪における防波堤端部からの回折状況の違いによるものと推測される。すなわち, St.0における代表波の波長及び方向集中度の違いが, 港内波高分布の違いとして現れている。また, 港内での有義波高比は, 周期が長くなる波浪2, 5, 8の順に高くなり, 西防波堤端部からの回折が顕著となる。一方, 港内で観測された少なくとも0.25Hz以上の高周波数成分には風場による港内発生波や波高の違いによる越波伝達波の影響も含まれているが, この詳細は, 同様に後述する再現計算において考察する。

3. ブシネスクモデルを用いた再現計算

(1) 越波伝達波の計算法とその計算精度

前章で示した港内外の観測波浪に対する再現計算には, 空間分布する1波毎の越波量を算定可能な平面2次元ブシネスクモデルを用いた。特に, 防波堤背後で発生する越波伝達波は, 平山ら¹⁰⁾と同様, 天端上に乗り上げた越波

水塊が港内に流入する過程を運動方程式で解くことで算定されたと考えた。ただし後述するように, 防波堤幅は2つ以上の計算格子で表現するものとした。

越波伝達波に対するこのような計算手順による基本的な計算精度を確認しておくために, 混成防波堤の波高伝達率の推定式 (Goda²⁾) に対する再現計算を実施した。再現計算では, この推定式のもとになった規則波の実験結果に習い, 周期を $T=1.8s$ に固定し, 入射波高 H_i , 堤体の天端高 R , マウンド上水深 d を変化させた。また, マウンド部を除く水深 h_l は0.5mで一定としたが, 堤体幅 B は, 実験で用いた防波堤幅と同じ $B=0.4m$ に加えて, $B=0.2m$ とした計算も実施した。なお, 差分計算の格子幅は0.1m, 時間間隔は0.2~0.5msとした。結果を図-4に示す。

図より, 白抜印でプロットした伝達率の計算結果は, 相対天端高 R/H_i が低いほど, また, 相対マウンド水深 d/h が浅いほど大きく, これらは未だかなり過小評価ながら実線で描いた推定式の傾向とよく一致している。また, 塗潰した印でプロットした反射率の計算結果では, 伝達率の増加に相反して減少する傾向がよく再現されている。

一方, 合田・竹田¹¹⁾は, 堤体の幅が広くなると波高伝達率は小さくなることを指摘しているが, 防波堤幅を半

(a) 防波堤幅 $B=0.4\text{m}$ (4格子)

(b) 防波堤幅 $B=0.2\text{m}$ (2格子)

図-4 混成防波堤の波高伝達率 (Goda²⁾) の再現計算

分にした計算結果は、元の幅の場合とほぼ同じであった。これは、彼らが確認した堤幅の影響は相対堤幅 B/h をほぼゼロとみなせる薄い直立壁 ($B=0.009\text{m}$) との比較においてであり、この場合には越波水塊が背後水面に直接落下する状況であったのに対し、 $B=0.4\text{m}$ (4格子) 及び 0.2m (2格子) とした計算では、越波水塊は一度、堤体上に落下して (乗り上げて) から背後水面に流入するようモデル化されているためである。なお、図には示していないが、 $B=0.1\text{m}$ に対して得た伝達率の計算結果は、推定式と比べてやや大きく、薄い直立壁に対する実験結果と同じ傾向を示した。これは、防波堤幅を1格子で表現した場合には、越流フラックスがほぼそのまま背後水面に流入するよう計算されたためと推測される。

(2) 波浪観測データの再現計算

金沢港の沖側境界で与える入射波は、St0での観測スペクトルをよく再現する沖波スペクトル (ただし方向集中度は $S_{max}=10$ と仮定) を逆推定したうえで、平山ら¹²⁾の方法にならない、エネルギー平衡方程式法で得られる沖側境界上の複数の異なる方向スペクトルを用いて造波した。また、潮位は、対象波浪の観測時刻に対応する金沢港での推算潮位を与えた。なお、差分計算に用いた格子幅は 5m 、時間間隔は周期の $1/200 \sim 1/600$ とした。

一方、波浪条件に応じて越波が発生する西防波堤の堤体高、堤体幅及び前面消波の状況を図-5に示す。計算に

図-5 西防波堤の堤体高・堤体幅、前面消波の状況

おいては、消波ブロック被覆工による波高低減を透水層モデル (平山ら¹³⁾) で再現し、防波堤先端から約 1km の未消波区間 (不完全消波を含む) の波浪状況も消波工天端高を適切に設定することで対応した (特に、未消波部分の消波工天端高は海底面とした)。なお、西防波堤の堤体幅 $6.5 \sim 19\text{m}$ 及び堤体高 $\text{CDL}+3.5 \sim 6\text{m}$ は、2~4つ並びの陸域格子 (完全反射・越波境界) として表現した。

(3) 波浪観測データの再現精度

西防波堤から越波が生じた波浪3, 8の観測スペクトルに対する再現計算結果を図-6, 8に示す。ブシネスクモデルでは計算領域内の風場による発生波は考慮されず、また、波長が計算格子の概ね10倍未満の波の伝播計算には大きな誤差を伴うため、このいずれか、または両者が該当する概ね 0.25Hz 以上の波エネルギー分布は再現できない。しかし、各地点ともに、 0.25Hz 未満の風波の波エネルギーの再現性は比較的良好であり、この様子は周期 $4 \sim 30\text{s}$ の成分波からなる港内波高比の比較図からも確認できる。なお、これらの図では、波浪3と同様な有義波高・有義波周期の波がNよりから入射する波浪5、または波浪8よりも小さい有義波高・有義波周期の波が同じ波向きから入射する波浪2、に対する港内波高比の比較結果を合わせて示しているが、それぞれ同様な再現性を有していることが確認できる。

さらに、周波数スペクトルの比較図には合わせて、越波させないよう防波堤天端高を十分高くして計算した結果を点線で示している。これと越波を考慮した計算結果を比較すると、波浪3, 8ともにそれぞれ $0.2 \sim 0.4\text{Hz}$ の

図-6 観測スペクトルの再現性 (波浪3)

図-8 観測スペクトルの再現性 (波浪8)

図-7 西防波堤からの越波量の空間分布 (波浪3)

図-9 西防波堤からの越波量の空間分布 (波浪8)

範囲において、港内各地点で越波伝達波によるものと思われる波エネルギーの増大が確認できる（一方、港口沖のSt.0では、防波堤端部からの回折散乱波の違いによる影響が若干みられるが、両者はほぼ一致している）。

ここで、西防波堤からの越波量及びその空間分布を示した図-7, 9をみると、波浪3ではSt.A近傍の未消波区間とそれに隣接する消波区間、波浪8ではSt.A, B近傍の全区間でそれぞれ $10^{-3} \sim 10^{-4}$ オーダーの越波量が発生していることがわかる。これらにSt.1を加えた各波浪観測地点はいずれも越波伝達波の発生源に近く、したがって、本計算において大きな差分誤差が生じる0.25Hzを超える周波数帯であっても、越波伝達波の発生が算定されたものと考えられる。

最後に、波浪8に対し越波あり／なしとして計算した港内外波高分布の差分図を図-10に示す。図より、越波が生じた防波堤の直背後で越波伝達波が発生し、その前

図-10 港内外波高分布の越波の有無による差 (波浪8)

面では反射波の低減がみられる。また、これに起因すると思われる防波堤端部からの回折波の低減や防波堤港内側の沿い波の低減もみられるが、越波伝達波の港内分布はほとんど確認されない。これは、越波伝達波の伝播が港内に広がることによる波高減衰に加え、概ね0.25Hzを超える周波数帯において、差分誤差による著しい波高減衰が生じているためと考えられる。したがって前述の図-6, 8において、特に港奥のSt2でみられた高周波数の波エネルギーに対する再現性の低下は、風場による港内発生波を考慮できないことに加え、この影響も少なからず含まれていると思われる。この結果、越波伝達波の発生・伝播を考慮した港内静穏度解析においては、港内波高を逆に過小評価しないためにも、港内の空間解像度を従来よりも高める必要があることが改めて確認された。

なお、計算効率を高めつつこれを実現するべく、現在、ブシネスクモデルに対するネスティング処理の導入を進めている。この成果は、より細かな計算格子を用いた再現計算結果とともに、いずれ機会を改めて発表したい。

4. おわりに

本研究では、護岸越波量の空間分布を算定可能なブシネスクモデルを応用して防波堤からの越波伝達波計算を行い、現地観測データを用いた計算精度の検証を通じて、その妥当性や問題点を議論した。主な結論を以下に示す。

- ・越波水塊が防波堤背後に流入する過程を運動方程式で解くことにより、過小評価ではあるが、推定式と同様な変化傾向を示す混成防波堤の波高伝達率を再現した。
- ・金沢港内の観測波高は防波堤端部からの回折波と風場による港内発生波が支配的であるが、高波浪時には少なくとも0.2~0.4Hzの越波伝達波が発生していることが、ブシネスクモデルによる再現計算で確認された。

謝辞：本研究の実施に当たっては、国土交通省北陸地方整備局金沢港湾・空港整備事務所から波浪観測データを

ご貸与いただきました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p.181，2007.
- 2) Goda: Re-analysis of Laboratory Data on Wave Transmission over Breakwaters, *Rept. of Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.8, No.3, pp.3-18, 1969.
- 3) 平口博丸，池野正明，井上素行，柏木洋之，阿部光信：越波直後の伝達波の方向スペクトルを考慮した港内波の算定法，*海岸工学論文集*，第38巻，pp.531-535，1991.
- 4) 平口博丸，池野正明，大橋裕寿，柏木洋之，樋口豊久：防波堤越波後の波の波高・周期・スペクトル特性，*海岸工学論文集*，第38巻，pp.506-510，1991.
- 5) 西受由裕，水口優：越波による伝達波について，*海岸工学論文集*，第43巻，pp.726-730，1996.
- 6) 森屋陽一，水口優：回折散乱波を考慮した越波問題，*海岸工学論文集*，第43巻，pp.711-715，1996.
- 7) 織田幸伸，東江隆夫，灘岡和夫：運動量を考慮した越波伝達波の算定法，*海岸工学論文集*，第44巻，pp.751-755，1997.
- 8) 平山克也，長谷川巖：ブシネスクモデルによる護岸越波・浸水過程に関する再現計算，*土木学会論文集B3(海洋開発)特集号*，Vol.67, No.4, 2011.
- 9) 橋本典明，永井紀彦，菅原一晃・浅井正，朴慶寿：波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について，*港研報告*，第32巻，第1号，pp.27-51，1993.
- 10) 平山克也，長谷川準三，長谷川巖，平石哲也：現地観測と模型実験に基づく越波伝達波の推定とその再現計算の試み，*海岸工学論文集*，第54巻，pp.76-80，2007.
- 11) 合田良実，竹田英章：越波による防波堤背後への波高伝達率，第13回海岸工学講演会講演集，pp.87-92，1966.
- 12) 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.
- 13) 平山克也：透水層を用いた任意反射境界処理法の高精度化と遡上計算への適用，*海洋開発論文集*，第22巻，pp.241-246，2006.

NUMERICAL CALCULATION OF OBSERVED TRANSMITTED WAVES BY USING BOUSSINESQ-TYPE WAVE TRANSFORMATION MODEL

Katsuya HIRAYAMA, Hiroaki KASHIMA, Kentaro HAYASHI and Yusuke IGARASHI

In a harbor tranquility analysis, transmitted waves sometimes should be considered to estimate a cargo handling operation rate in a berth because wave overtopping is usually permitted in the design of breakwaters. A Boussinesq model equipped a calculation technique of wave overtopping can be expanded to calculation for generation and propagation of transmitted waves in a harbor inside with a flooding calculation technique on the top of breakwater. By using this expanded model, transmitted waves observed at several station in Kanazawa port are reproduced and accuracy of these calculations would be verified. These results indicate that high-frequency waves from 0.2 to 0.4 Hz are generated by inflow of wave overtopping volume behind of the breakwater.