

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

Estimation of Transmitted Waves by Overtopping Based on Field Observation and Model Experiment and Simple Approach in Numerical Simulation

平山克也¹・長谷川準三²・長谷川巖³・平石哲也¹

Katsuya HIRAYAMA, Junzo HASEGAWA, Iwao HASEGAWA, Tetsuya HIRAIISHI

Transmitted waves by overtopping over a breakwater sometimes affect safe navigation and mooring of a ship. In this paper, they are evaluated by wave data analysis in a field observation provided at both inside and outside of the breakwater where the wave overtopping is frequently observed. And their significant heights can be estimated by the approximate formula obtained in the model experiment conducted with a thin vertical breakwater in section. On the other hand, the results of the model experiment are reproduced by numerical simulation using the Boussinesq-type wave transformation model equipped the wave overtopping model proposed by Hirayama et al (2006). Therefore, their spreading on Sakata port is calculated by the Boussinesq model with an assumption the offshore breakwater is thin.

1. はじめに

防波堤などを越波した水塊が、港内に流入して越波伝達波（以下、簡単に伝達波という）を発生させ、港内を航行する船舶や岸壁に係留された船舶の安全性に影響を及ぼすことが懸念される。また、港口からの進入波と伝達波が重畳することで港内波高が増大し、港内静穏度を悪化させる原因となることも考えられる。

本研究は、越波が頻発する防波堤の港内外で得られた現地波浪観測データを解析して、港内伝達波の定量把握を試みるとともに、堤体幅が薄く越波水塊が直立堤背後の水域に直接突入する場合を対象とした断面模型実験を行い、越波量と伝達波を計測した。そして、これらの再現性が検証された計算モデルを用いて、越波が直接港内に流入する波浪変形計算を実施し、伝達波が港内波高に与える影響を考察した。

2. 越波伝達波の現地観測

酒田港北防波堤のうち未消波区間では、越波水塊が港内水域に突入する状況が度々観察され、この結果生じる伝達波が、背後のコンテナバースにおいて荷役障害を誘発しているのではないかと指摘もある。そこで本研究では、荒天時に陸上からビデオ撮影して越波状況を観察するとともに、未消波区間の港内外側それぞれ 50 m 離れた地点 (St.1: 水深 15.9 m, St.2: 水深 11.6 m) に流速計付波高計を設置して、伝達波の挙動を直接観測することを試みた (図-1)。

観測期間は 2006 年 2 月 1 日から 3 月 10 日であり、水位、水圧、2 成分の水平流速について、0.5 秒間隔で連続観測を実施した。これらの水面波形記録から得た 20

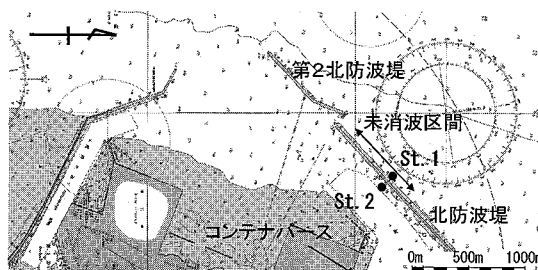


図-1 酒田港における波浪観測位置

分間隔の有義波高と、約 6 km 沖の NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS) 波浪観測地点 (水深 45.1 m) で同期間に観測された有義波高の経時変化を、合わせて図-2 に示す。概観すると、酒田港沖で観測された入射波高に対し、St.1 では防波堤からの反射波による重複波高が、St.2 では防波堤による回折波高がそれぞれ観測されていると推測できる。

また、■印はビデオ撮影が実施された時間帯を示す。ビデオ撮影は観測期間中の主要な高波浪時に実施され、防波堤を越波する水塊の挙動を撮影することに成功した。このビデオ画像是酒田港事務所の屋上から撮影されたものであるが、同時に観測した波形記録を解析して越波や伝達波を抽出する際には、実際に越波が発生した時刻やその状況の確認などに大いに利用できるものであった。さらに、酒田港に隣接する展望台から波浪観測終了後に

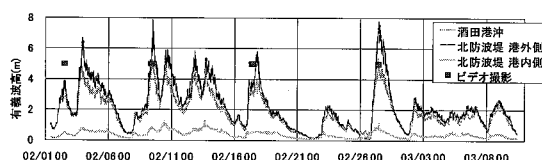


図-2 酒田港北防波堤周辺での越波伝達波記録

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 正会員 (独法)港湾空港技術研究所研修生
3 正会員 (株)エコー水理実験部

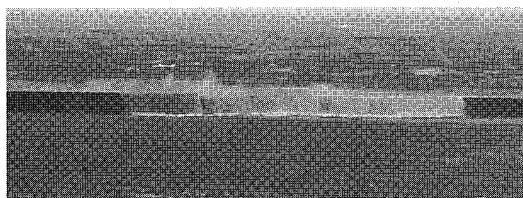


写真-1 波浪観測地点付近の越波状況 (3月29日撮影)

撮影したビデオ画像は、越波発生状況のより詳細な検討に利用された。写真-1はそのスナップ写真である。なお、これらのビデオ画像では、ある区間で同時に越波する状況のほか、沖側から順に、または断続的に越波する状況などが確認された。

波浪観測期間中に撮影したビデオ画像で越波が確認できた2006年2月9日12時頃、および越波が発生しなかった2006年2月17日10時頃に観測された、港内外での波浪データに対し方向スペクトルを算定した結果を、図-3に示す。両時刻ともに、それぞれ上段に示す港外側では入射波(波向WNW)と反射波(波向SSE)、下段に示す港内側では港口からの回折波(波向SW)と思われるスペクトルピークが見られた。しかし、越波が観測された時刻においてのみ、港内側で港外側の入射波と同じピーク波向を有するスペクトルが確認できた。これらには防波堤マウンドからの透過波も含まれていると考えられるが、入射波のピーク周波数と同程度、あるいはその倍周波数成分などは、ほぼ伝達波によるものと考えてよいであろう。

そこで、越波が観測された時間帯の方向スペクトルから伝達波を抽出し、相対天端高(天端高と入射波高の

比)と波高伝達率(伝達波高と入射波高の比)の関係を整理する。まず、港外の入射波高と港内の伝達波高は、方向スペクトルからそれぞれ以下のように求めた。すなわち、港外の入射波高は、そのエネルギーに反射波の成分や長周期波成分を含まないよう、方向に関して $\theta_{\min}=\theta_p-90$ 度から $\theta_{\max}=\theta_p+90$ 度(θ_p は主波向、方向角は北から時計回りを正とする)、周波数に関して $f_{\min}=0.05\text{Hz}\sim f_{\max}=\infty$ (周期20s以下)の範囲に分布すると仮定し、式(1)を用いて算定する。

$$H_{1/3}=4.004\sqrt{m_0}\cdots\cdots(1)$$

$$m_0=\int_{f_{\min}}^{f_{\max}}\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}}S(f,\theta)d\theta df$$

ここに、 $S(f,\theta)$:方向スペクトル、 f :周波数、 θ :方向角
一方、港内の伝達波高は、そのエネルギーに港口部からの回折波成分を含まないよう、方向に関して $\theta_{\min}=\theta_p-22.5$ 度から $\theta_{\max}=\theta_p+67.5$ 度、周波数に関しては入射波と同様に $f_{\min}=0.05\text{Hz}\sim f_{\max}=\infty$ (周期20s以下)の範囲に分布すると仮定し、同様に式(1)を用いて算定する。

これらの算定結果を用いて整理した波高伝達率と相対天端高の関係を図-4に示す。観測期間中に越波が観測されたときの相対天端高は1.0~1.8程度であり、このとき得られた波高伝達率は0.09程度であった。これらは合田ら(1974)が模型実験結果から得た相対天端高と波高伝達率の関係とほぼ一致しているが、現地観測結果から算定された波高伝達率は、相対天端高の増加に伴って僅かに増加する傾向にある。この理由について、著者らは、打ち上げられた越波水塊が防波堤背後の水域に直接突入せず、天端上に落下することが影響していると推測している。すなわち、幅の広い防波堤による波高伝達率

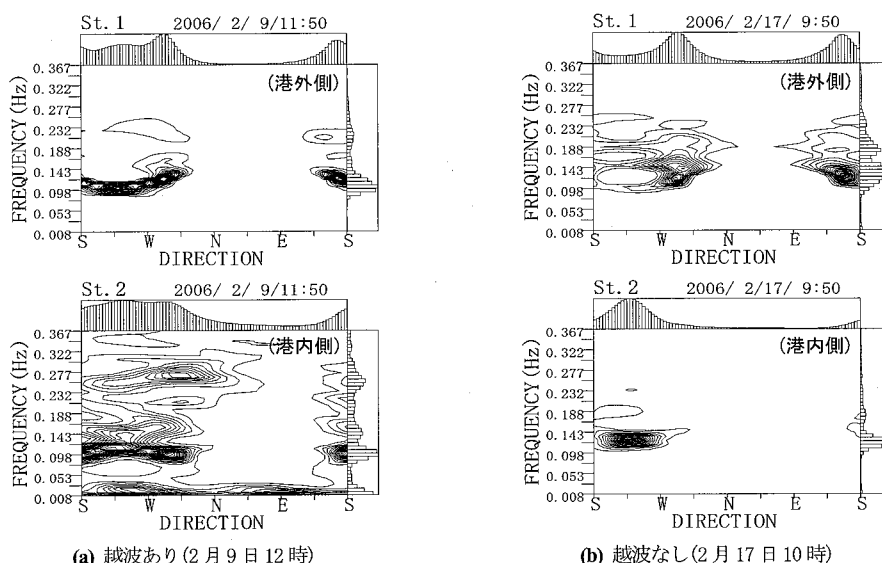
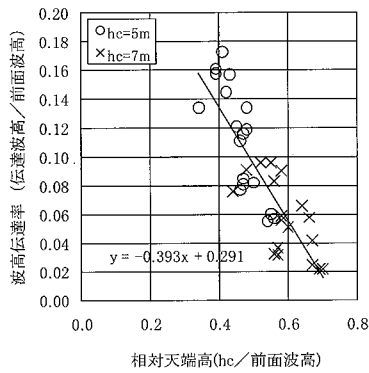
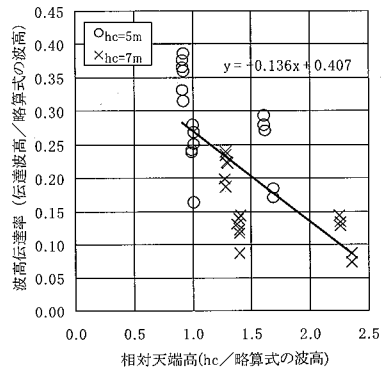


図-3 越波の有無による方向スペクトル解析結果の比較



(a) 前面計測波高（重複波）による無次元化



(b) 前面算定波高（入射波）による無次元化

図-6 断面模型実験による波高伝達率

越波水塊の流入によって発生する伝達波の再現計算を試みた。すなわち、波の遡上計算と同様な考え方で行う越流計算において、越波水塊が背後の水域へ流入する過程で波の発生が計算されると考えた。そのため、計算条件は越波計算時のものと同様とし、格子幅 $\Delta x = 4\text{ m}$ 、差分時間間隔 $\Delta t = 0.016\text{ s}$ ($T = 8.9\text{ s}$ のとき) または $\Delta t = 0.022\text{ s}$ ($T = 12\text{ s}$ のとき) とした。また、港内外の水域を仕切る薄い直立堤は1格子のみで表現した。なお、ブシネスクモデルの詳細は、平山ら (2006) を参照されたい。

このようにして実施した越波伝達波の再現計算の結果を図-7に示す。実験結果と同様に整理して得られた近似式は図-6(b)によるものとほぼ一致しており、実験結果をよく再現していることがわかる。なお、図-7の各プロットのばらつきが小さい原因は、もともとブシネスクモデルでは水塊が水面から飛び出す現象を計算できないために、越波水塊の打ち上げ高さによる波高伝達率の違いが表現されなかったためと考えられる。

4. 越波伝達波を考慮した波浪変形計算

断面1次元の越波伝達波計算への適用性が確認されたブシネスクモデルを平面波浪場へ適用して、酒田港で越波が観測された2月9日12時頃の港内波高分布を推定

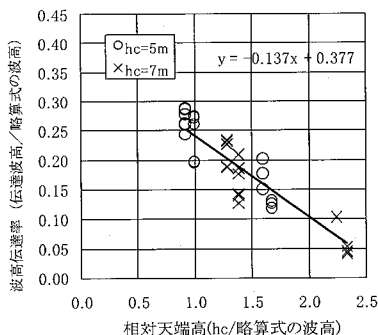


図-7 越波伝達波モデルによる再現計算

することを試みた。ただし、いまのところ本計算モデルは、天端幅が1格子で表現される薄い直立堤の背後で生じる伝達波に対してのみ、その適用性が検証されている。そこで、越波計算を行う第2北防波堤と北防波堤は、実際の天端幅 (20 m 程度) に関係なく、便宜上、1格子分の幅で設定した。

波浪変形計算は、酒田港沖の波浪観測地点を含む大領域ではエネルギー平衡方程式法を、酒田港を含む小領域ではブシネスクモデルをそれぞれ用いて実施した。大領域では、酒田港沖の波浪観測地点で有義波高5 m、有義波周期9 s、波向WNWの波浪諸元が得られるよう計算条件を設定した。そして、小領域の沖側境界地点で計算される波浪諸元を出力して、これを小領域への入射波条件とした。なお、小領域の波浪変形計算で設定した格子幅は $\Delta x = 5\text{ m}$ 、差分時間間隔は $\Delta t = 0.025\text{ s}$ (= 周期 $T/356$) である。

港内波高分布 (有義波) の算定結果を図-8に示す。未消波区間である北防波堤中央部と第2北防波堤の港外側では、反射波のために周辺海域に比べ波高が大きくなっている。

次に、北防波堤の港内側で算定された有義波高と有義波周期の断面分布を、観測結果とともに図-9に示す。図中に示す13個の観測値は、計算に用いた酒田港沖の入射波と同様な波浪が観測された2月9日10:20から14:20までの間に得られたものである。波高の計算結果はこれらの観測値と比べて若干小さいものの概ね一致したが、周期に関して、計算値は観測値よりも2s程度長く算定された。そこで、この計算結果を解析して方向スペクトルを求め、図-3(a)下段に示した港内側での観測方向スペクトルと比較して、この原因を調べた (計算結果の方向スペクトル図は省略した)。その結果、今回実施した越波計算は、入射波と同じ周期帯では観測結果と同様な伝達波を再現できていることを確認した。しかし、周期3~4s程度の高周波数帯では、観測結果に見られるような伝達波の発生は十分に再現できていなかった。この原因の1

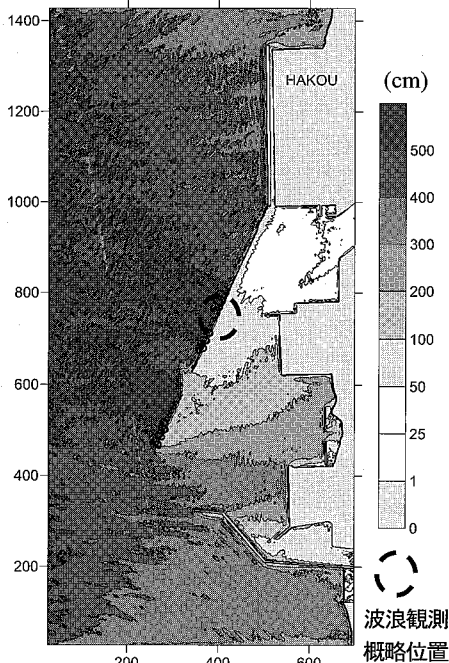


図-8 越波時の酒田港港内波高分布

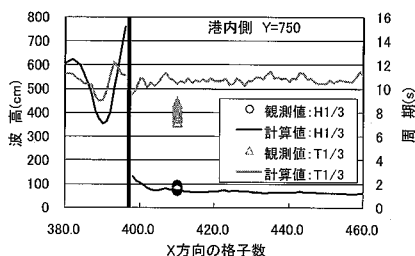
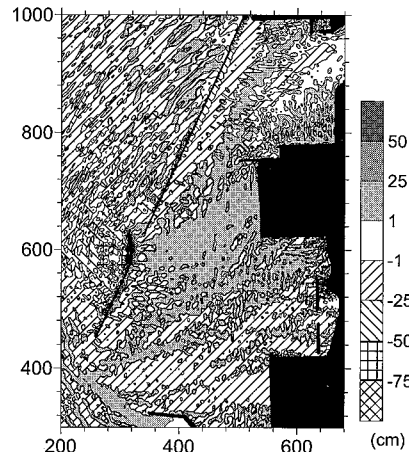


図-9 北防波堤背後の波高・周期分布

つには、このような短周期の波の伝播計算に対して、 $\Delta x = 5\text{ m}$ とした計算格子が大き過ぎたために、数値分散による波高減衰が生じたことが挙げられる。

図-10は、図-8を得た波浪条件に対し、越波を許さない計算を行って算定した有義波高分布(越波なし)を、図-8の有義波高分布(越波あり)から差し引いたものである。例えば、港内での正值は伝達波による波高の増大を示す。これによると、暫定天端高で整備された第2北防波堤の沖側では、波が防波堤を越えることで沖への反射が減少して波高が低下している。これに対し、港内側では伝達波による波高が増大し、伝達波がコンテナベース周辺にまで伝播している様子が伺える。一方、越波量の少ない北防波堤の未消波区間の直背後では、波エネルギーの代表値で見ると、発生した伝達波よりも回折散乱波の沿い波による波高増大のほうが有意であった。しかしながら、この付近で計算された周波数スペクトルでは、0.25 Hz付近に伝達波の発生によると思われる小

図-10 越波の有無による有義波高の差分
(越波あり-越波なし)

さなエネルギーピークが確認できた。

5. おわりに

本研究では、現地波浪観測データを整理・解析して港内伝達波の定量把握を試みるとともに、天端幅の薄い直立堤を対象とした断面模型実験を行い、越波量と伝達波を計測した。これらの再現精度が検証された計算モデルによる波浪変形計算を実施し、伝達波が港内波高に与える影響を把握した。得られた成果は以下のである。

- (1) 現地波浪観測データを用いて、伝達波を定量的に把握する解析手法を提案した。
- (2) 断面模型実験を行い、薄い直立堤を越波する波高伝達率の推定式を提案するとともに、越流計算が可能なブシネスクモデルでこれを再現できることを確認した。
- (3) 平面2次元場を対象とした波浪変形計算を行い、越波により造波される短周期波の伝播計算には、通常よりも細かな計算格子を用いる必要性が示唆された。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省東北地方整備局酒田港湾事務所からは越波観測で得た貴重なデータ等をご貸与いただいた。ここに記し深甚の謝意を表します。

参考文献

- 合田良実・鈴木康正・岸良安治(1974)：不規則波浪実験とその特性について，海工論文集，第21巻，pp. 237-242。
 合田良実(1975)：浅海域における波浪の碎波変形，港研報告，第14巻，第3号，pp. 59-106。
 高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982)：各種消波工による越波流量の減少効果，港研報告，第21巻，第2号，pp. 151-205。
 平山克也・長谷川準三・長谷川巖(2006)：越流を考慮したブシネスクモデルによる不規則波の越波量に関する数値計算：海工論文集，第53巻，pp. 706-710。