港内波高の観測結果に基づく 高知港長周期波予測システムの改良

小泉 勝彦¹・山下 学²・大村 厚夫³・窪田 和彦⁴

¹ 正会員 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所
(〒760-0017 香川県高松市番町 1-6-1 住友生命高松ビル 2F)
E-mail: koizumi-k88s3@mlit.go.jp

² 四国地方整備局 港湾空港部海洋環境・技術課 (〒760-8554 香川県高松市サンポート 3-33)

³ 正会員 (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 (〒105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2)

⁴ (一財) 沿岸技術研究センター 波浪情報部 (〒105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2)
E-mail: k_kubota@cdit.or.jp

太平洋に面した高知港三里地区の長周期波対策として、四国地方整備局は2010年度より「高知港長周期波予測システム」を運用している。本システムは長周期波高が有義波高と有義波周期の積に比例するという統計的な関係式を用いて長周期波高を予測しているため、長周期波のみが発達するような状況では予測することができないという問題が指摘されている。一方、本システムの運用開始とほぼ同時期に、三里地区の護岸に超音波式の波高計が設置された。本システムを構築した当時は波高計が港外にしかなく、港内の予測結果を観測値と比較検証することができなかったが、現在はそれが可能となっている。そこで、この観測データも使用して予測の妥当性を検証するとともに、その結果に基づいて本システムの改良を行った。

Key Words : long-period wave, forecasting system, observation data in harbor, verification of the accuracy of forecast, improvement

1. はじめに

高知港は、船舶の大型化やバース及びストックヤード不足等への対応が急務であるとともに、浦戸湾内における新たな港湾施設の整備に限界があるため、外洋に面した三里地区に国際物流ターミナルの整備が進められており、一部の供用が開始されている。しかし、三里地区では、防波堤の整備が完了していないことから、長周期波による荷役作業の中断や係留索の切断が発生しており、その対策が課題となっている。このため、四国地方整備局は、港内の静穏度を上げるための防波堤の延伸を進めており、さらにソフト的な対策として、2010年度より高知港長周期波予測システム¹⁾を運用している。

本システムは、(一財)沿岸技術研究センターのサーバ上で関係者が利用できるよう構築されており、港湾管理者、船社、船社代理店などに利用されている。しかしながら、(1)防波堤整備の進捗に伴って、システム構築時の港形と現在の港形が異なってきていること、(2)新たに供用開始された岸壁前面での予測がされていないことから、利用者から改善の要望が出されていた。このことから、荷役の障害となる長周期波が発生しないと予測され

ているにも関わらず、実際には長周期波が大きくなってしまいう「見逃し」の減少と予測精度の向上を図るとともに、先の2点の改良を行ったものである。

本システムが対象としている長周期波は、静穏度等で問題となる周期30~300秒の周期帯のもので、予測対象定点は三里地区の岸壁の前面である。予測計算は、「長周期波高は有義波高と有義波周期の積に比例する」という統計的な特性を利用している。このため、長周期波のみが発達するような事象は、予測することができないという問題が指摘されている。システムを構築した当時は、波高計は港外のナウファスのもの(以下、港外の波高計と記す。)しかなく、港内での観測データは存在しなかったため、港内の予測結果を観測値と比較して、その妥当性を確認することができなかったが、システムの運用を開始したのとほぼ同時期に、三里地区の護岸に超音波式の波高計(以下、港内の波高計と記す。)が設置され、それ以後は予測結果を観測値と比較することが可能となっている。そこで、護岸の前面で長周期波高の観測が開始されて以降のデータを使用して予測の妥当性を確認し、精度向上策の検討を行った。また、その結果に基づいて、本システムの予測精度の向上を図った。

2. 長周期波予測システムの概要

長周期波予測システムは、計算の初期時刻から72時間先までの、1時間ごと長周期波高、有義波高及び有義波周期を予測する。予測結果は毎日10時30分と16時30分の2回、発表しており、予測計算の初期時刻は10時30分発表の分が前日21時、16時30分発表の分は当日9時である。図-1は、長周期波予測システムによる予測情報の画面表示の例である。予測方法は港内長周期波影響評価マニュアル²⁾を参考にしている。予測計算のフローを図-2に示す。はじめに港外の波高計地点における有義波を予測し、これを基にその地点の長周期波高を予測する。更にブシネスクモデルによる長周期波の港内への伝播計

図-1 長周期波予測情報の画面表示例

図-2 長周期波予測計算のフロー

算によって予め作成しておいた関係式を用いて、岸壁前面の長周期波高の予測値を算出している。

港外の波高計地点における有義波の予測は、第三世代波浪推算モデルWAMに気象庁数値予報(GPV)の海上風を作用させて高知沖の沖波(有義波)を予測し、これにエネルギー平衡方程式により浅海域における波浪変形を施して計算している。WAMの計算領域は北太平洋のほぼ全域とし、日本の南の台風等からのうねりも計算に考慮されるようにしている。WAMの予測計算結果に対して高知港及びその周辺のナウファスの実況値を用いてデータ同化を行うとともに、浅海域の変形計算を施して算出した港外の波高計地点の予測計算結果に対して、予測計算の初期時刻から計算終了時までの誤差に応じて、それ以後の予測値を補正することにより、予測の精度を高めている。

有義波からの長周期波高の推定は渥美ほか³⁾に倣い、長周期波高が有義波高と有義波周期の積に比例すると仮定した式(1)を用いている。

$$H_{(L)Now} = r_{Now,wd} H_{1/3} T_{1/3} \quad (1)$$

ここで、 $H_{(L)Now}$ は港外の波高計地点の長周期波高 (cm)、 $r_{Now,wd}$ は波向別の比例定数、 $H_{1/3}$ 及び $T_{1/3}$ は港外の波高計地点の有義波高 (m) 及び有義波周期 (秒) である。

港外の波高計地点と港内の予測対象地点との長周期波高の関係式は、(独法)港湾空港技術研究所で開発され、公開されているブシネスクモデル (NOWT-PARI Ver.4.6) を用いて求めた。従来のシステムで変形計算の条件に使用している港形が実態と合わなくなっているため、本研究で最近の港形に改めた。入射波のスペクトル形状は周期30~300秒で等エネルギー密度を持つ水位変動を与えた。入射波向は南東、南南東、南及び南南西の4つである。計算された水位変動を解析する際には、ナウファスの観測データの処理の仕方に倣って30秒から60秒までの周期帯1と60秒から300秒までの周期帯2の2つに分け、港外の波高計地点及び各岸壁前面の長周期波増幅率(入射波に対する波高比)を求めた。長周期波高と増幅率との関係は式(2)で表される。

$$H_{(L)P}^2 = r_{P,T1}^2 (S \times \Delta f_1) + r_{P,T2}^2 (S \times \Delta f_2) \quad (2)$$

ここで、 $H_{(L)P}$ はP地点の長周期波高、 $r_{P,T1}$ 及び $r_{P,T2}$ はP地点における周期帯1と周期帯2の増幅率、Sは沖の長周期波スペクトル(一様密度)、 Δf_1 及び Δf_2 は周期帯1及び周期帯2の周波数幅である。

実際の予測では、式(1)で求めた港外の波高計地点の長

周期波高とその地点の増幅率から式(2)を逆に解いて沖のスペクトル S を求めた後、式(2)を用いて各岸壁前面の長周期波高を計算している。

3. 観測データ

港外と港内の波高計の観測データを解析した。波高計の位置を図-3に示す。解析の対象期間は、港内で波浪の観測が開始された2011年3月から2015年7月までであるが、港内では2013年2月から2014年5月までのデータが欠測であった。護岸の前面の長周期波と有義波は、生データ（0.1秒間隔で観測された水面の上下動のデータ）からナウファスと同等の処理を行って算定した。

4. 港外の長周期波高と有義波との関係

本システムの長周期波高の予測では、港外の波高計地点における長周期波高が有義波高と有義波周期の積に比例することを仮定している。しかし、本予測システムの運用開始前の試験運用時に実施した精度検証において、港外の波高計の観測データに、風波が大きくないのに長周期波高のみが大きくなっている事例が確認された¹⁾。この現象は、四国沖の海上が静穏で、北海道の北東側にのみ低気圧が存在するような場合に見られたが、発生のメカニズムは不詳である。そこで、本研究の対象期間の観測データにより、そのような現象の発生状況を調べた。

図-3 波高計と予測対象地点の位置

図-4は、対象期間中の観測データで、長周期波高と有義波高×有義波周期の対応をグラフにプロットしたものである。全体をみると、通常波浪の増大に伴い、長周期波高も増大していることが分かる。次に、港内の波高計で10 cm以上の長周期波高が観測された86事例について、港外における各ケースの期間内の最大長周期波高と、そのときの有義波高と有義波周期の積との関係をグラフにプロットしたものを図-5に示す。有義波高×有義波周期の増加とともに、長周期波高が大きくなっている。他から外れて有義波高×有義波周期が小さいのに長周期波高が大きかったのが1ケースあるが、これは東日本大震災の津波の際に発生したものである。従って、本研究の対象期間中の観測データには、本システムで予測する

図-4 港外の長周期波高と有義波高×有義波周期との関係

図-5 港内で長周期波高が10 cmとなった事例における港外の長周期波高と有義波高×有義波周期との関係

ことができないような、「港外において長周期波だけが発達し、それに伴って港内で長周期波高が大きくなる現象」は、津波を除いてなかったとみられる。

5. 港外の長周期波高の予測精度

前章の検討で、港外の長周期波高と有義波の観測データを基に、長周期波高の推定方法が妥当であることを確認した。本章では、従来の予測システムによる港外の長周期波高の予測結果と観測結果とを比較する。

本システムは1日2回、9時と21時の値を初期値として、それぞれ72時間先まで予測している。一般に、初期時刻からの時間（以下、予測時間またはFTと記す。）が長い予測ほど、様々な要因で予測精度が低下してゆくため、予測時間を12時間ごとに区切って検証した。図-6は港外の長周期波高の予測値と観測値との関係を示したものである。有義波高と有義波周期の結果についても併せて示す。図中の上段の長周期波高の図をみると、予測時間が13~24時間や25~36時間の場合と比べて、01~12時間の場合はばらつきが小さく精度が良い。予測時間01~12時間の誤差は、平均誤差（BIAS）が+1.3 cm、二乗平均平方根誤差が2.4 cmである。予測時間が13~24時間の図で、他の点から外れた赤色楕円で示したデータは、台風1204号時のデータある。中段の有義波高の図には相対的に外れた点が見あたらないが、下段の有義波周期の図には離れた点を確認できる。このデータは有義波周期

図-6 港外の予測値と観測値との相関

が大変長く、遠方からのうねりであったと想定される。予測時間01~12時間では大きく外れたデータがみられないことから、予測時間が長くなることに伴う予測精度の低下が原因であると思われる。また、有義波高の図と有義波周期の図を比較すると、有義波高は予測精度が非常に良いが、有義波周期はそれより劣っている。個別の予測事例を見てみると、有義波高が小さい場合に有義波周期のバラツキが大きくなる傾向があることがわかった。例示すると、有義波高の観測値が0.2~0.5 mの場合の有義波周期の誤差の標準偏差は±1.5秒程度、有義波高が4~5 mの場合の有義波周期の誤差の標準偏差は±1.1秒程度であった。この例で、長周期波高の有義波周期のよるばらつきを推定すると、波高0.2~0.5 mで1 cm程度、波高4~5 mで4 cm程度と推定された。長周期波高のバラツキが有義波周期と比較して小さいのはこのような要因によるものと考えられる。

港外で有義波周期が長い場合の有義波周期の予測精度を向上させることは、港外、ひいては港内の長周期波高の予測精度をさらに向上させるのに有用であると考えられる。港外の有義波高と有義波周期の予測計算にはWAMを使用しているが、うねり性波浪の周期の推算精度は、WAVEWATCH III（以下、WW3と記す。）の方が優れているとの報告もある⁴⁾。このようなモデルを波浪予測に導入することで、更なる精度向上が期待できる。

6. 港内に伝播する長周期波の変形計算

従来のシステムでの変形計算の条件に使用している港形が実態と合わなくなっているため、本研究で2016年3月末の港形による長周期波の変形係数を算出した。新しい変形係数の妥当性を確認するため、港外の波高計で観測された有義波高、有義波周期及び波向のデータを基に、従来の計算方法により港内の波高計地点の長周期波高を推算し、これを観測データと比較した。図-7は港内の長周期波高の推定値と観測値との関係を示したものである。港外の長周期波高の推定式（式(1)）の係数 r_{Nowwd} 及び港内に伝播する長周期波の変形係数が港外の波向きごとに異なるため、推定値と観測値の比較も波向き別に集計した。なお、東日本大震災の津波の影響があるデータは除外した。波向きによって異なるが、推定値が観測に比べて10~50%程度小さい値となっている。図-6を見ると、有義波高、有義波周期及び長周期波高のいずれの予測も回帰係数はほぼ1であることがわかる。このことから、有義波高と有義波周期の予測及びこれらの予測値から長周期波高を推定する部分では観測値に対する予測値の偏りは生じていないと考えられる。つまり、図-7で推算値が小さい傾向にあるのはブシネスクモデルの計算の過程で生じたものと思われる。ただし、図-7の推定値と観測

図-7 港内波高計地点の長周期波高の推定結果と観測値との相関

値との相関は高い。このため、推定値を補正する方法の一つとして、推定値に回帰係数の逆数を乗じて補正することが考えられる。もう一つの方法として、港外の長周期波高から港内の長周期波高へのブシネスクモデルによる長周期波の伝播計算を港内波高と一致するようモデルを調整して、再計算する方法も考えられる。二つの方法を比較すると、前者はより簡便であり、後者はより原理的ではあるがモデルの調整にかかる計算負荷及びコストの想定が困難であった。加えて、防波堤の整備はこれからも進捗することから、本システムの予測精度の向上は、今後も行っていく必要があるものと考えられる。そのことを考えた場合、計算負荷及びコストの想定が難しい後者の方法の採用には躊躇があった。このことから、システムの精度を向上させる手法としては、推定値に回帰係数の逆数を乗じて補正する手法を採用することとした。

7. 予測値の補正

前章の結果を受け、予測の際に、図-2の手順で計算された港内の長周期波高の予測値を、補正することとした。図-7で推定値を y 、観測値を x として求めた各波向きの回帰直線を $y=ax+b$ と表すとすると、予測値の補正の計算式は、次式で表される。

$$H_{L_NEW} = \frac{H_{L_OLD} - b}{a} \quad (3)$$

ここで、 H_{L_NEW} は補正後の長周期波高、 H_{L_OLD} は補正前の長周期波高である。

この方法により補正を行った場合の効果について、図

図-8 港内波高計地点の長周期波高の予測値と観測値の時間変化

予測の初期時刻：2012 年 8 月 22 日 21 時

表-1 港内の長周期波高の予測値を補正した場合としない場合の予測精度の比較

項目	補正	0.5日目予測 FT=01~12	1.0日目予測 FT=13~24	1.5日目予測 FT=25~36
相関係数	なし	0.911	0.882	0.864
	あり	0.935	0.907	0.885
回帰式	なし	$y=0.76x$	$y=0.71x$	$y=0.78x$
	あり	$y=1.15x$	$y=1.07x$	$y=1.14x$
適中率	なし	97.0%	95.7%	95.4%
	あり	94.4%	93.3%	92.9%
見逃し率	なし	1.9%	2.6%	2.7%
	あり	0.2%	0.7%	0.9%
空振り率	なし	1.1%	1.7%	1.9%
	あり	5.4%	5.9%	6.2%

適中率、見逃し率及び空振り率は、作業限界の基準波高を10 cmに設定して、これを上回るか下回るかを予測した場合を想定したものである。

-6で使用した港外の長周期波高の予測値を基に港内の長周期波高を計算して検証する。

図-8は、高知港三里地区の岸壁で長周期波の影響により荷役障害が発生した2012 年8 月24 日の港内の長周期波高の予測値と観測値の時間変化を比較したものである。予測値は、8 月23 日10 時発表(初期時刻は22 日21 時)の港外の長周期波高の予測値に、新しい変形係数を作用させて港内の波高計地点の長周期波高を求めたもので、補正した場合(青丸)としない場合(赤丸)のものを併せて示す。予測の対象時間は初期時刻の72 時間先の25 日21 時までである。観測値は、8 月23 日夕方から急速に大きくなり、夜には20 cmに達し、24 日午後から25 日にかけては25 cm程度で推移している。予測値は、23 日夕方の長周期波の増大を捉えており、23 日夜や24 日午後から25 日にかけての時間帯は、補正しない場合は観測値よりやや小さいのに対し、補正した場合は観測値に近い値を示している。

表-1は、港内の長周期波高の予測値を補正した場合としない場合の相関係数、回帰式、適中率、見逃し率及び空振り率を、図-6と同様に予測時間を12時間ごとに区切

って比較したものである。適中率、見逃し率及び空振り率は、作業限界の基準波高を10 cmに設定して、長周期波高がこれを上回るか下回るかを予測した場合を想定したものである。適中は、予測、観測ともに10 cm以下であった場合及び両者ともに10 cmより大きかった場合を言うものとする。見逃しは、予測が10 cm以下で作業が可能としたのに対し、観測値は10 cmより大きくなり作業できなかった場合を言い、空振りは、予測が10 cmより大きく作業ができないとしたのに対し、観測値は10 cm以下で作業が可能だった場合を言うことにする。単に係留できないだけであれば、船舶は沖で待てば良いが、接岸しているときに荷役障害が発生すると、動揺を抑制するためのタグボートの手配や、船舶をシフトするための係留員の手配といった、船舶以外の費用が発生することから、港湾利用者は、荷役途中での障害発生を非常に嫌う。補正した場合としない場合を比較すると、補正した場合の方が相関係数が大きく、回帰式の係数も1.0に近い。適中率は補正した場合の方がやや悪く、空振り率がやや増加するものの、係留途中での荷役障害につながる見逃し率は、やや減少し、改善している。以上のように、予測値を補正することにより、空振りがやや増えるものの、見逃しは減少し、相関係数と回帰係数も改善されることから、補正することは効果があると判断される。

この検討結果を踏まえて、高知港長周期波予測システムを改良し、2017 年2 月より運用開始している。

8. まとめ

高知港三里地区の長周期対策として運用されている長周期波予測システムについて、港内の観測データも使用して予測精度の検証を行った。その結果、次のことがわかった。

- 1) 港外における予測値と観測値の比較から、システムの港外の有義波の計算方法が概ね妥当であることが確認できた。
- 2) 港外の有義波周期の予測精度は、港外有義波高の予測精度に比較して低く、予測精度を更に向上させるためには、港外の有義波周期の予測精度を向上させることが有用であることが示唆される。港外の有義波高と有義波周期の予測計算に、WW3 のようなうねり性波浪の周期の推算精度が優れたモデルを導入することで、更なる精度向上が期待できる。
- 3) 港内長周期波の予測に関しては、港外の有義波から港内の長周期波高を計算する部分において、予測値が過小に計算される傾向があることが判った。そこで、従来の計算方法で算出された予測値に回帰直線を用いて補正するよう予測システムを改良した。

今後、他港でこのような長周期波予測システムを構築する場合には、短期間でも港内で波高の観測を行って、ブシネスクモデルによる長周期波の伝播計算のキャリブレーションを事前に行うことが予測精度の向上に資すると考えられる。

参考文献

- 1) 三村正樹, 石本真憲, 菊地洋二, 宇都宮好博:「高知港長周期波予測システム」の構築について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_161~I_165, 2011.
- 2) (財)沿岸技術研究センター編: 港内長周期波影響評価マニュアル, pp.29-52, 2004.
- 3) 渥美洋一, 若山義樹, 國田淳, 関口信一郎, 川口勉, 平石哲也, 青木伸一, 上田茂: 長周期波の港内侵入過程の現地観測と長周期波高予測式の検討, 海岸工学論文集, Vol.44, pp.221-225, 1997.
- 4) 鈴木善光, 高山知司, 吉永泰祐, 岡田弘三, 窪田和彦, 宇都宮好博, 松藤絵理子, 君塚政文: WAM と WAVEWATCH III による推算波浪の再現特性, 土木学会論文集(海洋開発), Vol.72, No.2, pp.I_265-I_270, 2016.

IMPROVEMENT OF THE LONG-PERIOD WAVE FORECASTING SYSTEM IN PORT OF KOCHI BASED ON OBSERVATION DATA

Katsuhiko KOIZUMI, Manabu YAMASHITA, Atsuo OMURA and Kazuhiko KUBOTA

Shikoku Regional Development Bureau has been operating the long-period wave height prediction system since fiscal 2010 as a countermeasure against long-period wave in the Port of Kochi facing the Pacific Ocean. It predicts long-period wave height by using a statistical relational ex-expression that long-period wave height is proportional to the product of significant wave height and significant wave period. So it is pointed out that it cannot predict that long-period wave height will increase when it only increase nevertheless significant wave do not develop. On the other hand, an ultrasonic wave height meter was installed at the revetment in the Misato area at approximately the same time as the operation of this system was started. At the time of construction of this system, there was a wave height meter only outside the port, and it was not possible to compare and verify the predicted result in-side the port with the actual measurement, but now it is possible. Therefore, this observation data was also used to verify the validity of the prediction, and this system was improved based on the result.