「高知港長周期波予測システム」の構築について

A Long-period Wave Forecasting System in Kochi Harbor

三村正樹¹・石本真憲²・菊地洋二³・宇都宮好博⁴

Masaki MIMURA, Masanori ISHIMOTO, Youji KIKUCHI and Yoshihiro UTSUNOMIYA

The moored ship motion induced by the long-period waves causes troubles in the cargo handling before the completion of the breakwater at Misato district in Kochi port. The Takamatsu Research and Engineering office for Port and Airport has developed "Long-period wave forecasting system of Kochi port" to predict the long-period waves, which affect the cargo handling. To promote the accuracy of the prediction the system introduces the disaster prevention information of the Japan Meteorological Agency and accepts the opinion of cargo handling traders. A result of the test run could confirm the validity of the system in the long-period wave forecast.

1. はじめに

我が国の港湾においては、船舶の大型化あるいは輸送時間の短縮等の要請から、外洋に面した場所に港湾を立地することも必要となってきた。ところが、このような外洋性の港湾では、長周期波の影響による係留船舶の動揺が顕著となる場合があり、荷役障害、係留索の切断、防舷材あるいは船体の損傷等がしばしば指摘されている。このような問題を回避するために、港湾利用者から、防波堤や人工海浜による港内の静穏化、係留系の改良による船体動揺の低減対策等のハード的な対策が求められている。高知新港（高知港三里地区）においても、防波堤等の完成を待たずに一部供用を開始しているため、長周期波による船体動揺が見られ、パース運用が難しい状況にある。このため、ハード的な港湾整備及び船体動揺低減のための係留システムの開発等を継続して実施している。さらに、これらのハード的な長周期波対策を補完する方法として、パース前面の長周期波を事前に予測し、港湾利用者にリアルタイムで情報を提供するソフト的な対策も重要である。

そこで、本研究では、長周期波に対するソフト対策として、気象庁からの風の予測と高知港での波浪観測値等から高知新港沖合の波浪を予測し、ブシネスクモデル等による波浪変形計算結果を用いて、高知新港での各パースにおける長周期波を予測した。その予測値を港湾利用者が利用し易いように、Webで配信する「高知港長周期波予測システム」として構築した。なお、システムの構築にあたっては、港湾利用者に対する荷役作業中の船体

動揺や荷役障害等のアンケートを行い、荷役の実態を把握した。また、精度向上のため、過去の荷役障害事例に基づき、プロトタイプの長周期波予測システムの精度検証を行い、改良点を検討した。最後に、長周期波予測システムの試験運用を行い、荷役作業支援の視点で事例検証を行った。

2. 長周期波予測の概略

港内の長周期波を予測する手法としては、港外の有義波（波高・周期・波向）を予測し、過去の観測データの分析に基づいて長周期波高を推定する渥美ら（1997）の方法と、気圧及び風速の予測データから統計的手法により長周期波を推定する橋本ら（2001）の方法がある。本研究では、実際にリアルタイムで港湾利用者に情報を提供することが目的であるため、港内長周期波影響評価マニュアル（2004）を参考に、通常波の予測と渥美ら（1997）の方法を組合せて長周期波を予測した。長周期波予測のフローを図-1に示す。図-1の予測フローは、気象庁GPV（数値予報モデルによる予測結果の格子点値）

図-1 長周期波高及び通常波浪の予測フロー

1 正会員	前 高松港湾空港技術調査事務所
技術開発課長
2	高松港湾空港技術調査事務所
技術開発係長
3 正会員	(財)沿岸技術研究センター 調査役
4 正会員	博(工) 前(財)沿岸技術研究センター 業務課長

を入力し、高知港波高計地点の波浪予測結果から高知港内各岸壁前面の周期30秒以下の風波とうねり（以下、通常波浪という）を予測する部分と、高知港波高計地点の波浪予測結果から高知港波高計地点の長周期波高を推定し、高知港内各岸壁前面の長周期波高を予測する部分の二つに分けられる。

(1) 通常波浪の予測

周期30秒以下の通常波浪の予測は広く一般的に実施されているが、本研究の予測では、気象庁GPVの風データと港湾局のNOWPHAS（全国港湾海洋波浪情報網：ナウファス）をリアルタイムに入力し、波浪データ同化手法を用いて予測値を自動修正する（財）沿岸技術研究センターのCOMEINS（沿岸気象海象情報配信システム：カムインズ）を用いた（江口ら，2009）。COMEINSの通常波浪の予測フローを図-2に示す。本研究で対象としている高知新港は整備途中であり、年々港形が変化している（図-3参照）。本来COMEINS単独でも港内の通常波浪を予測することは可能であるが、変化し続ける港形に対応するために、COMEINSによる高知港波高計地点の波浪予測結果を入力とし、港口までエネルギー平衡方程式で計算し、港内は高山法で計算した。実際の予測では、予め図-3に示す港形（平成15年度の港形、途中港形及び完成港形）の波浪変形計算を実施し、入力波に対する各岸壁前面の波浪を係数表の形で準備し、高知港波高計地点の波浪予測結果に係数表を乗じることとした。

図-3 高知新港の位置と港湾形状

(2) 長周期波の予測

長周期波の予測は、図-1に示すように、COMEINS高知港波高計地点の波浪予測結果（有義波高及び有義波周期）から高知港波高計地点の長周期波高を推定した後、長周期波の伝播計算を実施して高知港内各岸壁前面の長周期波高を予測するものである。

a) 有義波からの長周期波高推定

高知港波高計地点における長周期波高を推定するため、NOWPHAS高知港で観測された有義波及び長周期波高を使用し、有義波から長周期波高を推定する式を作成した。推定式は渥美ら（1997）に倣い、有義波高（m）と有義波周期（秒）の積が長周期波高（cm）に比例すると仮定した式（1）を用いた。

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

ここで、 $H_{(L)Now}$ はNOWPHAS地点の有義波高（cm）、 $r_{Now,wd}$ は波向別の回帰係数、 $H_{1/3}$ 及び $T_{1/3}$ はNOWPHAS地点の有義波高（m）と有義波周期（秒）、である。2001年から2003年の3年間のNOWPHAS高知港の観測結果を用いて解析した結果を図-4に示す。波向は高知新港の形状を考慮し、南東、南南東、南及び南南西の4方位とした。解析結果を見ると、相関係数は0.75から0.94であり、十分予測の運用に使用できる。

b) 長周期波の伝播計算

港内における長周期波の変形計算は、（独法）港湾空港技術研究所で開発され公開されているビジネスモデルのNOWT-PARI Ver4.6（平山，2002）を使用した。計算にあたっては、船舶動揺に影響を与える30秒から300秒の周期帯に着目し、入射波のスペクトル形状は一律のエネルギー密度を持つ水位変動を与えた。計算された水位変動をスペクトル解析する際には、30秒から60秒までの周期帯1と60秒から300秒の周期帯2に分け、波高計地点及び各岸壁前面の長周期波高増幅率（入射に対する波

図-2 ナウファス地点における通常波浪の予測フロー

図-4 有義波と長周期波高との関係

高比)を求めた。長周期波高と増幅率の関係は式(2)で表される。

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

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及び周期帯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)で求めた波高計地点の長周期波高と波高計地点の長周期波増幅率から、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する。

3. システム構築にあたっての事前検討

「高知港長周期波予測システム」を構築するにあたって、高知新港を利用している船舶代理店及び荷役業者にアンケートを行うと共にヒアリングを行った。また、顕著な荷役障害事例に対してプロトタイプシステムを用いて検証を行い、精度向上のための改良を行った。

(1) アンケート・ヒアリング調査

平成20年8月～平成21年1月及び平成21年7月～平成22年1月に、高知新港を使用する船舶代理店及び港湾荷役業者に荷役作業時のアンケートを実施した。アンケートは、荷役作業期間、使用岸壁、船名・船種・大きさ、係留索の本数・材質、荷役障害の有無(有りの場合は、障害の種類・期間・船体動揺の種類・大きさ)を荷役作業毎に記入してもらった。このアンケート結果及び既往の調査報告書から高知新港における荷役障害事例を抽出し、顕著な荷役障害事例を表-1にまとめた。

また、船舶代理店及び港湾荷役業者を直接訪問し、荷役作業全体についてヒアリングを行った。その結果、沖防波堤を年々延伸することによって荷役障害は減ってきていること、南東からの波の侵入時に荷役困難であること、船体動揺については上下動30cm以上あるいは前後左右50cm以上を荷役中止の判断基準としていること、等の意見が出された。

(2) 荷役障害顕著事例の検証

表-1に示す14事例について精度検証を行った。図-5は事例14の再現結果である。図-5の下から2段目の図は-12m岸壁の長周期波高と荷役限界波高(上田ら, 1994)を示しているが、長周期波高が荷役限界波高を超えた期間で荷役障害が発生していた。このように、殆どの事例で、荷役障害が発生した期間と荷役限界波高を超える期間が一致することが確認された。

しかし、長周期波高の推定には有義波高と有義波周期の積を使用していることから、高知港波高計地点における通常波浪の有義波高の予測精度だけではなく、有義波周期及び波向の予測精度が重要になってくると考えられる。

(3) プロトタイプの改良

荷役障害顕著事例の精度検証で使用したプロトタイプの高知港長周期波予測システムを、検証結果及び港湾荷役業者等からのヒアリング結果を参考に改良を行った。

a) 波浪予測手法の高精度化

通常波浪の予測において、有義波高だけではなく有義波周期及び波向の精度も重要であることから、データ同化手法を取入れた波浪予測を使用した。その結果、高知港の波浪観測が欠測中であっても、上川口港及び室津港の観測値によってある程度の予測精度が確保されるよう

表-1 荷役障害事例

ケース	期間	備考
1	2008年8月21～24日	船舶動揺事例1, アンケートNo.5
2	2008年8月27～28日	船舶動揺事例2, アンケートNo.8
3	2008年8月31日	船舶動揺事例3, アンケートNo.9
4	2008年9月10日	船舶動揺事例4, アンケートNo.14
5	2008年11月12日	船舶動揺事例5, アンケートNo.35
6	2006年8月15～18日	荷役障害事例1
7	2006年9月2～7日	荷役障害事例2
8	2008年6月2～5日	荷役障害事例3
9	2007年7月12日21時	荷役障害事例4
10	2008年9月13日	現地観測事例1
11	2008年11月27日	現地観測事例2
12	2009年1月22日	現地観測事例3
13	2005年8月4日	既往調査の荷役障害事例1
14	2005年9月24～25日	既往調査の荷役障害事例2

図-5 事例14の検証結果

になった。また、波向も従来の16方位から360度の出力となった。

b) 長周期波高推定式の改良

長周期波高の推定において、プロトタイプでは式(1)を使用していた。図-6の左図は式(1)を使用した結果であり、右図は式(4)を使用した結果であるが、右図の方が精度が良いことがわかる。複数の推定式を検討した結果、RMS誤差が最も小さい推定式として、南東の波向では式(4)を使用し、南南東・南・南南西の波向きでは式(1)を基にした式(3)を使用することとした。

図-6 長周期波高推定式の改良

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

$$H_{(L)Now} = r_{Now,wd} H_{1/3}^2 T_{1/3}^2 + b_{Now,wd} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $b_{Now,wd}$ は係数(切片)である。

c) 港湾整備の進捗に合わせた港形の使用

プロトタイプは平成18年に作成したため、図-3(a)の平成15年度当時の港形を使用していた。整備途中である高知港は年々港形が変化し、整備の順番も変わる場合がある。そのため、全ての港形に対応することは現実的ではない。現在は図-3(b)の途中地形に近い港形となっていることから、図-3に示す3港形について、エネルギー平衡方程式、高山法及びブシネスクモデルによる計算結果を係数表として準備し、予測では適宜各港形における係数を入れ替えることとした。

4. システムの構築と試運用

(1) システムの構築

予測値と実況値を同時に見ることができ、さらには実況天気図及び予想天気図を見ることができる「高知港長周期波予測システム」を構築した。また、荷役業者等のヒアリングを踏まえ、バース前面だけではなく港外の風及び波浪の予測を追加すると共に、気象庁の新しい防災情報にも対応できるように全ての情報はXML形式と言われる形式に統一した。さらに、これらの情報をいつでも安定的に利用者が閲覧することが可能のようにWeb方式でシステムを構築した。「高知港長周期波予測システム」の主要な機能を図-7に示す。

(2) 試運用

「高知港長周期波予測システム」の試運用を行い、荷役作業支援の視点で事例解析を行った。その結果、(i) 本予測システムは「有義波が高い時に長周期波も高い」という統計的な特性を利用しているため、「有義波が高い時に長周期波も高い」事例の予測精度は良い。(ii) しかし、四国沖の海上が静穏であるにもかかわらず、北海道の北東側にしか低気圧が存在しないような場合に、「有義波は低い長周期波だけ高い」という事例が確認された。この様なこれまでの統計的理論からは予測が難しい長周期波を推定するため、「高知港長周期波予測システム」で閲覧できるNOWPHAS波高計のリアルタイム長周期波高を基に港内の長周期波を推定する換算表を作成した。(iii) 本システムを使用する上での注意点を記した操作マニュアルを作成し、船舶代理店及び港湾荷役業者に対して説明会を開催した。

6. まとめ

高知港三里地区における長周期波に対するソフト対策として、国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調