

沈埋函沈設工事における簡易的周期予測の試み

WAVE PERIOD PREDICTION SYSTEM FOR CONSTRUCTION OF IMMERSED TUNNEL

浦辺信一¹・吉平健治²・後藤嘉雄³・森屋陽一⁴・大島香織⁵・羽田宏⁶
Shinichi URABE, Kenji YOSHIHARA, Yoshio GOTO, Yoichi MORIYA, Kaori Ohshima and
Hiroshi HANEDA

¹ 正会員 沖縄総合事務局 那覇港湾空港工事事務所 (〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-6-11)

² 沖縄総合事務局 那覇港湾空港工事事務所 (〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-6-11)

³ 国土交通省 北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011 新潟県新潟市入船町4-3778)

⁴ 正会員 工博 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

⁵ 正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

⁶ 正会員 五洋建設(株) 九州支店 (〒810-8580 福岡県福岡市中央区警固1-12-11)

Naha port road is under construction which cross under the harbor entrance of Naha-Futou area by the immersed tunnel and directly connect Naminoue area and Naha airport.

In the target construction site, wave heights and periods are larger and longer compared to those where the other immersed tunnels were constructed. Predict of wave climates at the target site is thus important to judge, if the construction works can be carried out.

In this study, we develop the wave prediction system (on the daily basis) for which forecasts wave climates from the observed wave conditions. The validity of the present system is examined by comparing predictions with observations measured at the construction site in 2003.

Key Words : Immersed tunnel, wave period prediction system

1. はじめに

那覇港(那覇ふ頭地区)道路(空港線)は、那覇港と那覇空港、本島南部との連絡を強化する目的で、那覇ふ頭地区港口部を沈埋函方式の海底トンネルで横断し、波之上地区と那覇空港を直接結びつけるための道路として建設中である。2003年末時点では、沈埋函全8函のうち、波之上地区側の1~3号函の沈設が終了している。

沈埋函の沈設工事においては、沈埋函の沈設作業自体は数時間であるが、沈埋後に函底コンクリートを打設するまで数日間は仮置き状態となり、低波浪でも滑動してしまう可能性があるため、バラスト注入等の判断も必要となる。1号函において検討した結果、仮置き状態にある沈埋函に作用する波力は波高だけでなく周期の影響も大きいことがわかっており¹⁾、2号函および3号函に対して検討した結果、水平力は周期11秒、揚圧力は周期7~8秒付近で作用波力が極大値を持つことがわかった²⁾。施工場所である那覇港は、従来の沈埋函の施工場所に比べて、来襲波浪の周期が比較的長い海域であるため、波浪観

測により来襲波浪をモニタリングしながら作業可否判断を行うと同時に、波高だけでなく周期の予測を行い、その結果を作業可否判断に利用することが有効である。

一般的に、波浪予測手法としては、大きく分けると統計モデルを用いる手法と物理モデルを用いる方法がある。統計モデルを用いる方法は、観測結果を説明変数として相関解析³⁾やカルマンフィルター⁴⁾により回帰係数を評価し、回帰式により波高や周期を予測するものである。この方法は、簡易であるためシステムの構築や変更が容易であり、各地で実際に適用されてきたが、適切な説明変数の選択やある程度の期間のデータの蓄積が必要であるとともに、予測結果が観測結果に対して時間遅れが生じる等の欠点がある。一方、物理モデルを用いる方法は、最近研究の進歩が著しい波浪推算法⁵⁾を予測に適用するものである。気象庁の週間アンサンブル予報資料を入力としたアンサンブル波浪予測の研究⁶⁾等も行われているが、システムの構築や変更が難しいだけでなく、当該地点のように港内に位置し、リーフの影響がある場合には、使用している物理モデルの適

用範囲の面から、精度が悪くなる可能性もある。

また、これまでの波浪予測は波高の予測を目的としたものが多く、物理モデルを用いて方向スペクトルを予測する場合には、周期の予測も行っているものの、その予測精度についての検討はほとんど行われていないようである。

本研究では、2003年に施工された2号函および3号函沈設工事において、沈埋函の沈設作業の可否判断に資するため、波浪観測結果の利用法について検討を行うと共に、上述した予測手法の特性の違いを考え、統計モデルによる常時波浪（有義波高50cm以下）を対象とした12時間後および24時間後の波高および周期を予測するシステムの構築を試みた。

2. 工事概要

(1) 沈設位置

2号函および3号函は、ほぼ同程度の諸元（長さ90m、幅37m、高さ9m）を有し、図-1に示す那覇ふ頭地区港口部の水深約11mの地点に水深約22mのトレンチを設け、図-2に示すようにトレンチ内に沈設された。

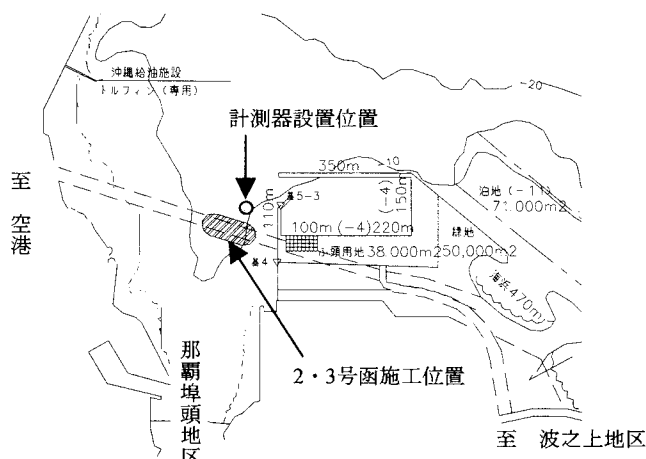


図-1 沈埋函沈設位置



図-2 沈埋函沈設状況

(2) 工事工程

2003年度は2号函と3号函の据付が行われた。7月5日に行われた2号函の沈設作業は、気象・海象条件に恵まれ、予定通りに曳航から埋め戻しまでの工程を完了できた。

3号函の沈設作業は、当初、9月17日を沈設予定と

していたが、台風14号および台風16号の発生・沖縄本島への接近や寒冷前線の通過などの影響により、延期、再延期となり、10月2日に仮置場所より曳航を実施した。10月2日～3日の海象条件は良好であり、無事に沈設場所に係留し、沈設作業のための設備の作動確認も無事終了した。

10月4日の早朝から冬型の気圧配置による北風が吹き始めた。水中重量を増すことで、沈設作業が可能であると判断し、沈設作業を開始した。沈埋函に若干の動揺が見られたが、沈設作業はそのまま進められた。しかし、着底後函体の滑動が発生し、2号函との接合作業が不可能となったため、沈埋函を再浮上させ波浪が減衰するまで待機することとした。

観測波浪を確認しながら、10月6日に再度沈設作業を実施し、無事3号函の沈設作業を終了した。

3. 波浪観測とその利用

(1) 観測システム

2003年4月1日から2004年2月26日まで、海底設置型の水圧センサー付超音波式波高計と電磁流速計により、沈設位置（トレンチの上）において水位、水圧、流速2成分、工事事務所屋上において風向、風速を測定した。計測器の設置状況図を図-3に示す。

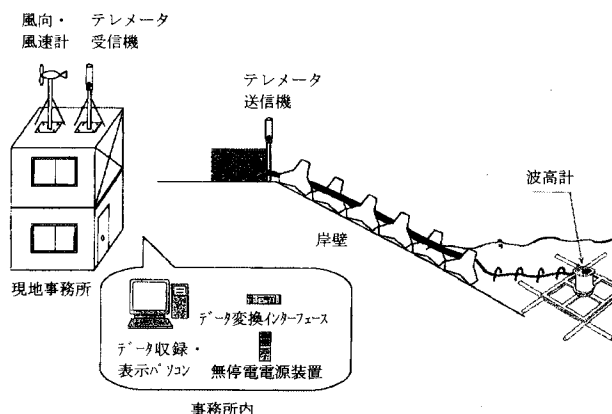


図-3 計測器の設置状況

観測データは、テレメータを用いて工事事務所のパソコンで受信すると共に、常時、モニターで最高波高、最高波周期および有義波高、有義波周期の経時変化を確認できるシステムとした。また、観測の結果より、風が強い場合などに有義波周期がエネルギーのピーク周期に比べてかなり小さくなる傾向があることがわかった。沈埋函への波浪の影響を考えた場合、有義波周期よりエネルギーのピーク周期の把握が有用であると判断されるが、リアルタイム処理でエネルギーのピーク周期を算出すると、非常に値がばらつくため、5ランクの周期帯毎（5s以下、5～7.7s、7.7～10.1s、10.1～15.5s、15.5s以上）の波高をリアルタイムで算定するようにシステムを改良

した。このランク毎の波高を比較することにより、エネルギーのピークがある周期帯の把握が可能である。ここで、周期帯のランクの分け方は、那覇港のNAWPHASで設定されている分け方に従った。

(2) 有義波高、有義波周期

図-3は10月4日～6日の3号函沈設時の沈設位置における有義波高、有義波周期の経時変化、図-4は同

期間同地点の周期帯毎の波高の経時変化である。

3号函は4日に沈設作業を始めたが、前述したように、着底直後に沈埋函の滑動が発生し位置誘導が困難になったために、4日15時に接合作業を見送り再浮上させ、6日に再度沈設作業を行い、6日16時に接合を完了した。

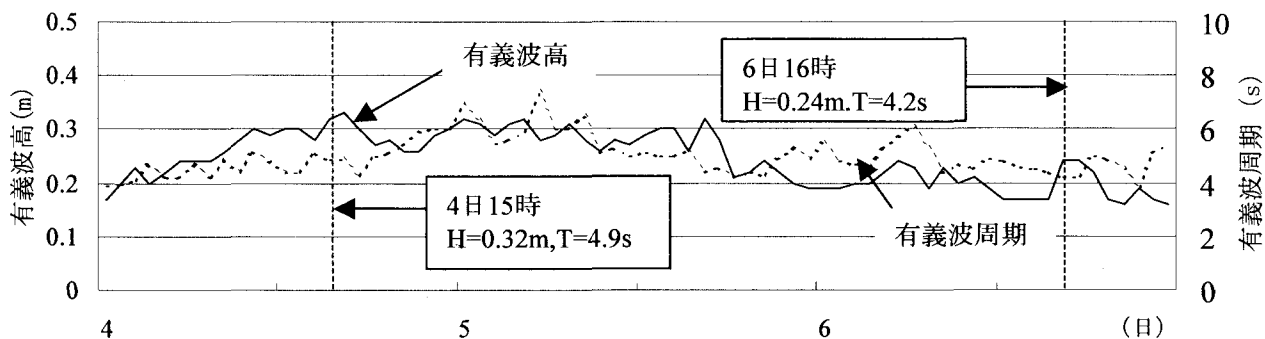


図-3 有義波高、有義波周期の経時変化（3号函沈設時）

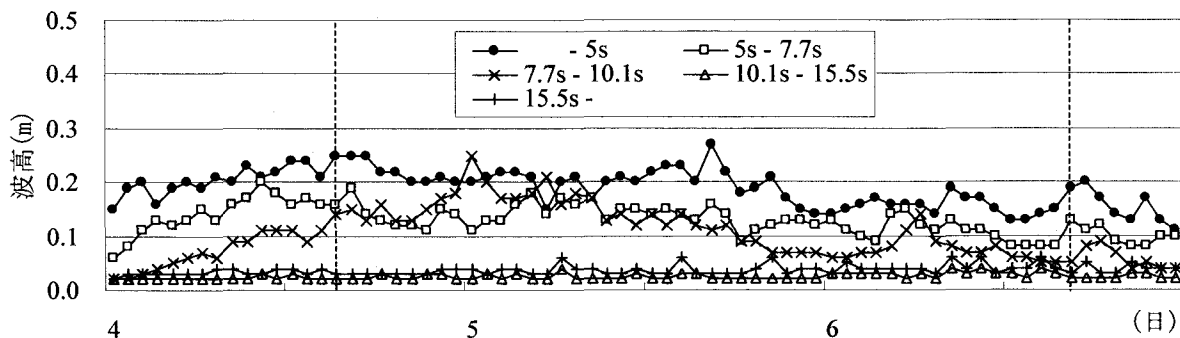


図-4 周期帯毎の波高の経時変化（3号函沈設時）

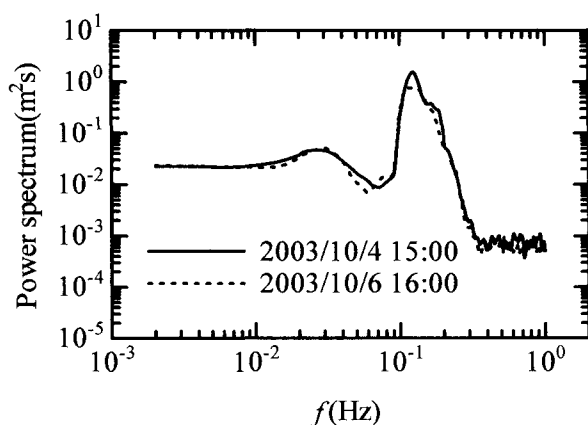


図-5 水位のパワースペクトル

図-3より4日15時の有義波周期は4.9秒であるが、図-4に示した周期帯毎の波高を比較すると7.7～10.1秒の成分の波高が大きくなってきており、沈埋函の滑動が生じたのは作用波力の応答が高くなる周期7秒～11秒の成分のエネルギーが大きかったためであ

ると考えられる。一方、作業を行うことができた6日は、4日と比べて有義波高は2割程度しか差はないが、作用波力の応答が高い成分の波高を見ると、7.7～10.1秒の成分の波高が0.14mから0.05mになっている。このことから、7.7～10.1秒の成分の波高が函の動揺に大きく影響していたと考えられる。

また、図-5に示した水位のパワースペクトルからは、4日15時と6日16時のスペクトルのピーク周期は、それぞれ8.1sと8.8s（周波数で0.123Hzと0.113Hz）であり、同時間の波浪の有義波周期（4.9sと4.2s）とは大きく異なっている。

沈埋函に作用する波力の周期特性を考えると、有義波高の変化よりも作用波力の応答が高い周期帯の波高の変化の方が動揺に影響を及ぼすと考えられ、実際の観測結果もそのことを裏付けるものであったことから、作業可否判断に用いる周期特性を表す指標としては、有義波周期ではなく、作用波力の応答が高い周期帯毎の波高を用いる方が望ましいと考えられる。

4. 周期予測システム

(1) 予測手法

構築する予測システムとしては、工事事務所で使用するため簡便性や改良の容易さを考慮し、重回帰式によるシステムとした。

有義波高，有義波周期，周期帯毎の波高の予測のための重回帰式は以下のように表される。

$$H(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n \{a_i P_i(t - \Delta t_i)\} + \varepsilon(t) \quad (1)$$

ここで， $H(t)$ は時刻 t の予測有義波高，有義波周期または周期帯毎の波高， $P_i(t - \Delta t_i)$ は時刻 t より Δt_i 時間だけ前の i 地点の観測データ（説明変数）， a_i は重回帰係数， $\varepsilon(t)$ は残差， n は説明変数の数である。(1)式中の重回帰係数は次の連立一次方程式の解として与えられる。

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N P_{1k} & \sum_{k=1}^N P_{1k}^2 & \cdots & \sum_{k=1}^N P_{1k} P_{nk} \\ \sum_{k=1}^N P_{2k} & \sum_{k=1}^N P_{2k}^2 & \cdots & \sum_{k=1}^N P_{2k} P_{nk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^N P_{nk} & \sum_{k=1}^N P_{nk} P_{1k} & \cdots & \sum_{k=1}^N P_{nk}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N H_k \\ \sum_{k=1}^N P_{1k} H_k \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^N P_{nk} H_k \end{bmatrix} \quad (k=1, 2, \cdots, N) \quad (2)$$

ここで， P は時間方向にも離散化された観測データ（説明変数）， H は時間方向にも離散化された有義波高，有義波周期または周期帯毎の波高， N は時間方向のデータ数である。青野ら³⁾にならい，(1)式はできるだけ対象地点から遠い地点のデータを採用するものとし，また，対象地点に比較的近いデータを用いて，(3)式により(1)式中の残差 $\varepsilon(t)$ も説明変数により予測する2段階の予測により予測誤差を低く抑えることとした。

$$\varepsilon(t) = b_0 + \sum_{i=1}^m \{b_i Q_i(t - \Delta t_i)\} + \delta(t) \quad (3)$$

ここで， $Q_i(t - \Delta t_i)$ は時刻 t より Δt_i 時間だけ前の i 地点の観測データ（説明変数）， b_i は重回帰係数， $\delta(t)$ は残差， m は説明変数の数である。

(1)式中の説明変数としては，データの入手しやすさや試行錯誤的な予備検討結果より，那覇，久米島，南大東島，西表島，名瀬の5地点の海面補正気圧データを用い，(3)式中の説明変数は対象地点の波浪データとした。5地点の海面補正気圧データは，気象庁のホームページ（<http://www.data.kishou.go.jp/>）より入手した。

説明変数とした5地点の気圧データと対象地点の有義波高，有義波周期，周期帯毎の波高を蓄積し，上述の相関解析により重回帰式の係数を評価することで12時間後および24時間後の有義波高，有義波周

期，周期帯毎の波高それぞれの予測式を構築した。また，観測期間が短く予測式構築のための学習期間を十分に長く取ることができなかったため，予測システムとしては自己学習型のシステムとし，予測開始前に過去のデータを用いて重回帰式の係数を再評価し，その係数を用いて予測を行った。

5. 予測システムの精度検証

精度の検証には，沈埋函の沈設作業が行われる可能性がある季節を考え，2003年4月1日～10月31日の7ヶ月間のデータを用いた。

作業の可否判断に利用することを考え，観測した有義波高が50cm以下の場合について，予測波浪と観測波浪との相関係数を算定した。

予測波浪と観測波浪の相関図の例を図-5～図-7に示す。また，相関係数の一覧を表-1に示す。

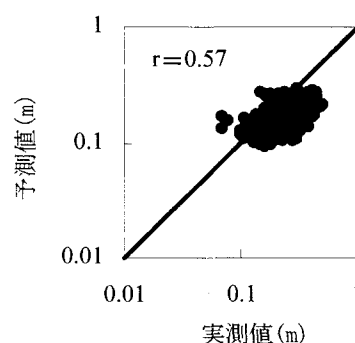


図-5 観測結果と予測結果の相関(12時間後有義波高)

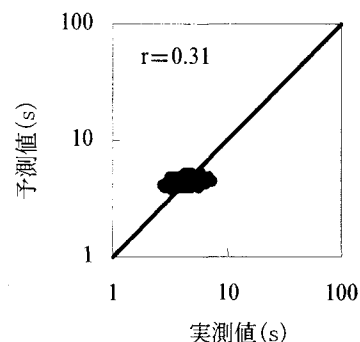


図-6 観測結果と予測結果の相関(12時間後有義波周期)

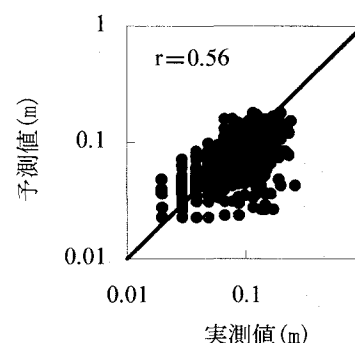


図-7 観測結果と予測結果の相関(12時間後5～7.7s波高)

表-1 相関係数

	12時間後	24時間後
有義波高	0.57	0.37
有義波周期	0.31	0.17
周期帯毎の波高	0.52~0.64	0.24~0.41

表-1からわかるように、重回帰式の相関係数は最も大きい場合でも0.64となっており、特に有義波周期に関しては、相関係数は0.31または0.17と非常に低く、構築したシステムによる予測結果を信じて施

工可否判断を行うことは難しい精度となっている。しかし、12時間後を対象にした場合も24時間後を対象にした場合も、有義波周期を予測した場合の相関係数よりも周期帯毎の波高を予測した場合の相関係数の方が大きくなり、周期帯毎の波高の相関係数の値は有義波高と同程度となる。

このことは、周辺の気圧などを説明変数として、波浪の周期特性を予測する場合に、有義波周期よりも周期帯毎の波高の方が有利であることを示している。

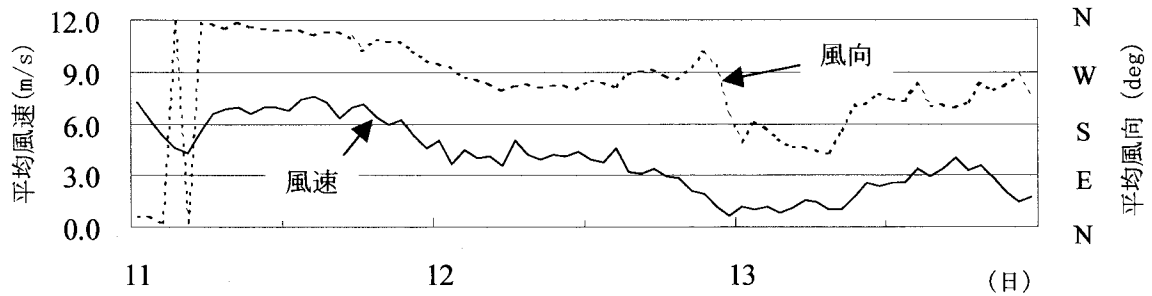


図-8 那覇の風速・風向の経時変化 (9月11日~13日)

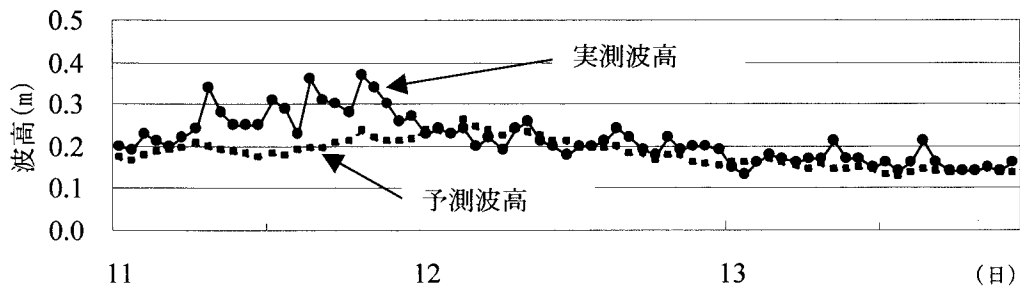


図-9 波高の実測結果と予測結果 (9月11日~13日)

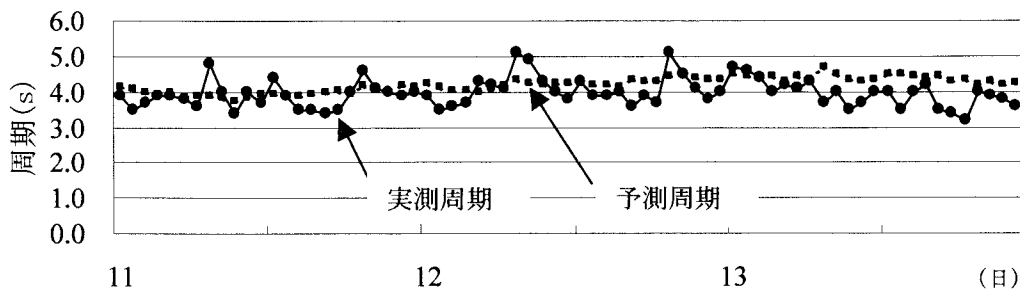


図-10 周期の実測結果と予測結果 (9月11日~13日)

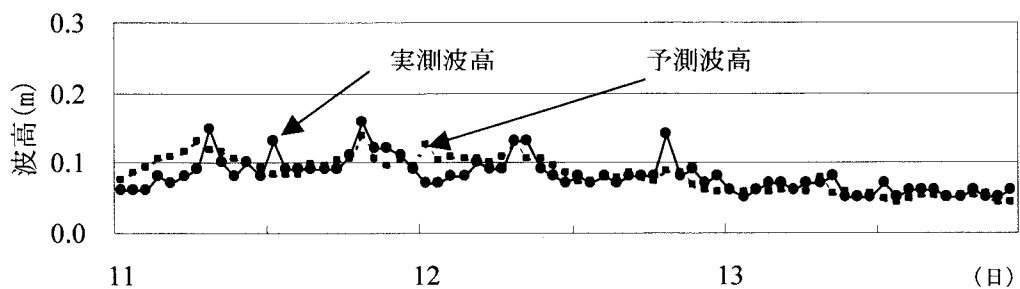


図-11 周期5s~7.7sの成分の波高の実測結果と予測結果 (9月11日~13日)

次に、観測結果と予測結果の時系列的な比較の例として、予測システムの特性が良く現れている9月11日～13日の3日間の風速や波浪の経時変化を図-8～図-11に示す。

図-8は風速と風向の経時変化の例である。9月11日～13日にかけて風速は小さくなっており、風向は北から南に変化していることがわかる。図-8は有義波高、図-9は有義波周期、図-10は5秒～7.7秒の周期帯の波高の経時変化である。

図-9に示した有義波高の経時変化を見ると、11日の予測結果は実測結果より小さくなっており、12日および13日の予測結果は実測結果とよく対応している。次に、図-10に示した有義波周期の経時変化を見ると、予測結果の有義波周期は実測結果のような変動が現れておらず、なめらかに変化している。

那覇港は南北に長く、対象地点是那覇港の南端に位置するため、北風で風速がある程度大きいときには、有義波高や有義波周期は港内で発達した風波の影響を受けている可能性がある。有義波高や有義波周期の予測結果が実測結果を十分に説明しきれないのは、本予測システムがある程度離れた海面補正気圧を説明変数としているので、港内で発生する風波に十分対応できないことが原因であると考えられる。

また、図-11に示した周期5秒～7.7秒の成分の波高の経時変化を見ると、実測波高と予測波高の相関は良いことが確認できる。これは、那覇港の規模から風により港内で発達する波の周期は5秒未満であり、5秒以上の周期帯は、港内で発生した風波の影響を直接的に受けていないためであると考えられる。

ここで、風向や風速を説明変数に取り入れることにより、予測精度向上が可能であると考え、本予測システムの説明変数に現在の風速や風向を用いて、12時間後および24時間後の波浪の予測を試みた。しかし、気圧のみを説明変数にした場合に比べて、風向・風速を説明変数にした場合および気圧・風向・風速を説明変数にした場合の予測結果と実測結果の相関は悪くなった。これは、気圧に比べて風速や風向は時間的な変化が激しく、12時間および24時間前の風向・風速は現在の波浪との相関が低いためであると考えられる。

6. おわりに

本研究では、2003年に施工された那覇沈埋トンネルの2号函および3号函沈設工事において、沈埋函の沈設作業の可否判断に資するため、波浪観測結果の利用法について検討を行うと共に、常時波浪を対象とした12時間後および24時間後の波高および周期を予測するシステムの構築を試みた。

得られた結論は、以下の通りである。

- ① 沈埋函の沈設作業可否判断に用いる周期としては、有義波周期ではなく、作用波力の応答が高い周期帯の波高を用いた方がよいと考えられる。
- ② 統計的手法により周期の予測を行う場合には、有義波周期を直接予測するよりも周期帯毎の波高を予測することにより、エネルギーの大きい周期帯を評価する方が予測精度は高くなることがわかった。

謝辞：最後に、本研究の実施に当たり、港湾空港技術研究所の永井紀彦氏、橋本典明氏に有益な意見をいただいた。また、沿岸開発技術研究センター調査部の永井春生氏、同センター波浪情報部の方々に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 住田公資・藤原隆一・鶴飼亮之・青野利夫・山村和弘・中屋行雄：沈埋函沈設時の急速施工，海洋開発論文集，第18巻，pp.659-664，2002。
- 2) 浦辺信一・高良哲治・伊是名興治・小崎正弘・新明克洋・羽田宏：外洋波浪侵入海域での沈埋函沈設の計画と施工，海洋開発論文集，第20巻，2003。
- 3) 青野利夫・後藤智明・佐藤典之：沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測，海岸工学論文集，第40巻，pp.156-160，1993。
- 4) 橋本典明・永井紀彦・清水勝義・菅原一晃・久高将信・田中聡：主成分分析とカルマンフィルタを用いた統計的波浪予測手法の適用性について，海岸工学論文集，第42巻，pp.336-340，1995。
- 5) 例えば，The WAMDI Group：The WAM model-A third generation ocean wave prediction model，*J. Phys. Oceanogr.*，18，pp.1775-1810，1998。
- 6) 森信人・平口博丸：アンサンブル波浪予測を用いた波浪予測特性について，海岸工学論文集，第50巻，pp.206-210，2003。