

## 那覇沈埋トンネル函体据付時における港内波浪予測

## Harbour Basin Wave Forecasting for the Immersed Tunnel Installation

庄田明弘\*・成瀬英治\*\*

SHOUDA Akihiro and NARUSE Eiji

\* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

\*\* (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹兼第二調査部長

There is a reef in the vicinity of the installation site of Naha Immersed tunnel. As the waves are complicated there, it is necessary to forecast wave heights and periods at the settlement execution works of the tunnel segments. In the present study, a new wave forecasting system is developed using a non-linear Bossinesq model (NOWTPARI) combined with original Coastal Oceanographic and Meteorological Information System (COMEINS).

Key Words : COMEINS, NOWTPARI, Naha Immersed Tunnel

## 1. はじめに

那覇港沈埋トンネルは、那覇空港と波の上地区を結ぶ臨港道路の那覇ふ頭港口部に位置する海底トンネルであり、沈埋函を8函を直結させる延長 1.1km の自動車専用トンネルである。このトンネルの完成により、那覇港と那覇市内と那覇空港間の慢性的な交通渋滞の解消が期待されている<sup>1)</sup>。

図-1 に沈埋トンネルの位置図を示す。この図より解るように那覇港は外洋に面しているため、比較的周期の長い波浪成分が存在する可能性が指摘されていたが、既設函の設置工事で沈埋函共振周期に相当する 7～8 秒の波浪成分が確認された<sup>2)</sup>。また数値波動水路で沈埋函の耐波安定検討を行った結果、沈埋函の沈設時にはピーク周期 7 秒以下が制約条件になることが解った<sup>3)</sup>。

そこで、作業中の港内波浪場を予測することを目的として、非線形波浪変形モデルを用いて那覇港内の波浪変形特性をデータベース化し、港外での波浪予測をもとに沈埋トンネル設置位置での波浪を予測する方法について検討を行い、現場での運用システムを構築した。



図-1 那覇沈埋トンネル位置図

## 2. 港内波浪予測とその運用

## 2.1 港内波浪予測の必要性

これまでの沈設場所の波浪予測は、沿岸気象情報配信システム (COMEINS)、重回帰式ならびに気象予報士による情報を活用してきたが、沈設時に重要な沈埋函の据付時における波浪情報を精度よく提供するには到っていない。また、6～8号函沈設場所近傍はリーフ（浅瀬）があり、港内へ進入した波浪が屈折・浅水・碎波の変形を生じながら函体に対して斜めに入射するとともに、平均水位上昇（ウエーブセットアップ）が起こるため、3次元的な非常に複雑な波浪場となっている。

このため、これまでの波浪予測手法を今後そのまま適用することができない。そこで新たな予測システムを開発することが必要となった。

## 2.2 港内波浪検討

検討フローを図-2 に示す。検討事項の概要は以下のとおりである。

## (1) 港内港外波浪データの統計処理

港内波浪非線形解析シミュレーションに必要となるパラメータの特定および結果の妥当性の検証を目的として、那覇港内外における実際の波浪観測データを収集・整理し、パワースペクトルや有義値など、波浪特性を表現するための諸量を統計処理により求める。

## (2) プログラムの検証

港外波浪諸元から港内波浪諸元を精度良く推算するために、非線形波浪変形モデル(NOWTPARI Ver. 4.6β, 以下NOWTPARIと表記)（「独立行政法人港湾空港技術研究所」を用いるが、計算プログラム中には波浪条件以外に対象地

域の特性に応じたパラメータ（構造物による反射率等）が必要となる。また格子のサイズや計算領域の範囲によっても計算結果は異なる。そこで、現地観測に基づく港外波浪データを入力条件として港内波浪場のシミュレーションを行い、その結果を現地観測に基づく港内波浪データと比較することにより、パラメータや格子サイズを特定する。ここで、現地観測に基づく港内外の波浪データとしては、統計処理などを施すことにより、スペクトル有義波高（周期）などの代表値に加工した値を使用する。

次にパラメータの特定がある程度完了した後は、現地観測に基づく新たな港外波浪データを入力条件として港内波浪場のシミュレーションを行い、現地計測結果との比較によって計算結果の妥当性を検証するとともに、必要に応じてパラメータの修正を行い、計算精度の向上を図る。

### (3) 港内波浪データベースの構築

確定したパラメータを元に、標準的な港外波浪データ（波向き別に数種類）を入力条件として用いた港内波浪場のシミュレーションを行い、計算結果の代表値をデータベースとして蓄積する。

### (4) 港内波浪予測システムの構築

COMEINS のデータを港外波浪の予測値あるいは実況値として手入力し、港内波浪非線形解析により蓄積されたデータベースを用いて、港内波浪場の特性値を予測・出力するシステムを構築する。

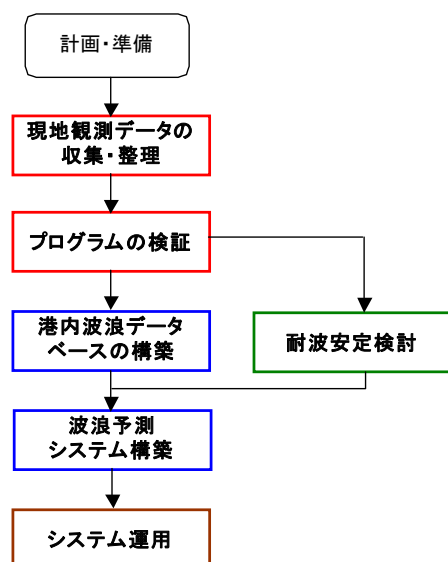


図-2 全体検討フロー

## 2.3 港内波浪の統計処理

### (1) 現地計測

平成 16 年 8 月～平成 16 年 10 月の 3 カ月間、港内の水

位変動ならびに風速を測定した。計測位置図を図-3 に示す。水位変動の測定では 3 つの波高計を設置し各位置ともサンプリング間隔を 0.5 秒とし、毎正時前後 10 分づつの合計 20 分間測定した。風向風速はサンプリング間隔 0.5 秒で測定期間中、継続して測定を行った。得られたデータは陸域との関係を考慮し、「北」「北北西」「西」「西南西」の 6 方位を対象として整理した。

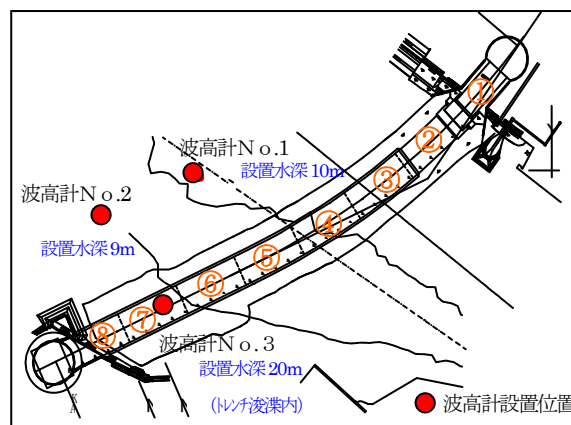


図-3 計測位置図

### (2) 港外波浪の標準化

沿岸波浪観測年報（(独)港湾空港技術研究所ホームページ：平成 13 年度および平成 14 年度分）および平成 16 年度 4 月から 10 月の全国港湾海洋波浪観測情報網（NOWPHAS）速報値を用いて、那覇港外波浪の標準スペクトル形状について確認した。その結果、次式に示される修正ブレットシュナイダー光易型スペクトル（以下、修正 BM スペクトルと表記）が適用可能である。

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^{-4}]$$

ここで、 $f$  (1/s) は周波数、 $S(f)$  ( $m^2/s$ ) は周波数スペクトル（あるいはパワースペクトル密度関数）であり、 $H_{1/3}$  (m) および  $T_{1/3}$  (s) は、対象とする不規則波の有義波高および有義波周期である。

NOWPHAS 実測値（速報値を含む）を確認の結果、NOWTPARI の入力データとしては、修正 BM スペクトルを仮定し、COMEINS により配信される那覇港 NOWPHAS 地点での有義波高および有義波周期の予測値を使用するものとした。ただし港内波浪場は港内での風浪の影響を受け、周波数スペクトルのピークが複数存在する可能性がある。

## 2.4 プログラムの検証

### (1) 計算格子

本検討で用いる NOWTPARI の基礎方程式は、水深を場所の関数とした修正ブシネスク方程式である。

連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

### x 方向運動量方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \nu \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + \varepsilon P + \frac{f}{2D^2} P \sqrt{P^2 + Q^2} \\ &= \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left( \frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right) + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \\ &+ h \frac{\partial h}{\partial x} \left( \frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left( \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} \right) + Bgh^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} \left( 2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} \\ &\dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

### y 方向運動量方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \nu \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) + \varepsilon Q + \frac{f}{2D^2} Q \sqrt{P^2 + Q^2} \\ &= \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left( \frac{\partial^3 Q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t} \right) + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} \right) \\ &+ h \frac{\partial h}{\partial y} \left( \frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} \right) + h \frac{\partial h}{\partial x} \left( \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} \right) + Bgh^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial y} \left( 2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} \\ &\dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 $x, y$  は平面座標、 $t$  は時間、 $\eta$  は水位、 $P$  は  $x$  方向線流量、 $Q$  は  $y$  方向線流量、 $h$  は静水深、 $D$  は全水深 ( $D = h + \eta$ )、 $f$  は底面摩擦係数である。 $\nu$  は碎波によって生じる乱れによる運動の混合を表す渦動粘性係数、 $\varepsilon$  はエネルギー吸収帯の吸収係数である。

NOWTPARI では差分法により基礎方程式を離散化し、ADI 法を用いて数値計算を行う。このとき、対象とする領域に矩形の計算領域を設定し、矩形領域の 1 辺（入射境界）から波浪を入射し、計算領域内に設定した水深や構造物などの影響による波浪変形を計算する。差分法により離散化された各格子点間の距離（格子サイズ）は、波長や計算時間などを考慮して設定する必要がある。また NOWTPARI では、入射波の主波向きは入射境界に直角方向が良いとされている。

そこで本検討では、次に示す 6 方位を対象に計算領域を設定した。

- ・ 対象方位：北、北北西、北西、西北西、西、西南西の 6 方位
- ・ 格子サイズ：10m×10m

図-4 に計算格子の一例を示す。

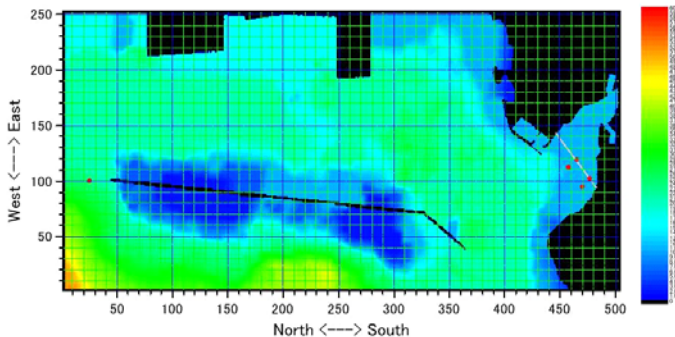


図-4 計算格子（波向；北）

## (2) 計算結果

波高計 No. 1～3 の設置位置で、同じ入射波に対する

計算結果と現地観測結果の比較を行った。結果の一例を図-5 に示す。ピーク周期を算定する上では妥当な結果となっており、那覇港内への NOWTPARI の適用性が確認できた。

なお、計算結果と現地観測結果を有義値で比較すると、例に示すように有義波周期が大きく異なる場合がある。これは、現地観測に含まれる港内で発生した風浪の影響と考えられる。この現象は、周波数スペクトル図のピークより高周波側で、数値計算と現地観測結果が異なることから確認できる。

港内で風浪が発達すると、波別解析時に小さな波が多く含まれるため、有義波周期が小さくなる傾向にある。

一方、スペクトル解析では、風浪成分は、沈埋函の共振周期に相当する 7～8 秒の成分より高周波側にピークを持つ傾向がある。本検討では、沈埋函共振周期に相当する波浪を予測することを目的としており、ピーク周期については、NOWTPARI を用いることで、実用上の問題は無いものと考えられる。

但し、港外から進入してきた波浪のピーク周期と風浪の周期がほぼ同じ場合には、波高が増大し、NOWTPARI 計算結果は過小評価となる危険性がある。そこで、波高については、観測風から SMB 法を用いて、港内で発生する風浪のエネルギーを、NOWTPARI 計算結果に加えることとした。

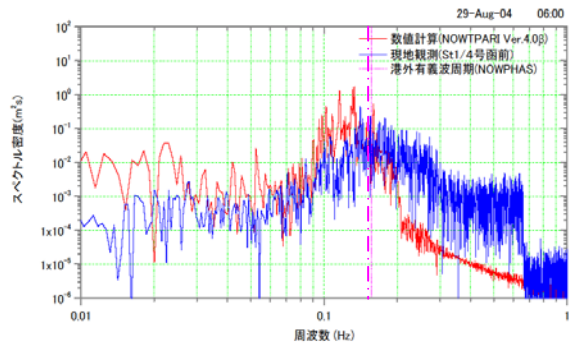


図-5 計算と実測のスペクトル比較例

(2004/ 8/ 29：4号函前面位置)

赤線：計算 青線：実測

## 2.5 港内波浪データベースの構築

データベース作成用の計算結果は、入力条件に用いた港外の有義波高および有義波周期に対して、計算で得られる港内の最大波高の比率（波高比）およびピーク周期の比率（周期比）で整理するものとする。航路中央に近い 4 号函前面位置および空港側リーフ端部に近い 7 号函前面位置で求めた波高比および周期比を図-6 に示す。図の横軸は港外有義波周期であり、波高比



および周期比ともに異なる有義波高で計算した結果を平均した。▲が波高比、●が周期比の計算結果で、点線は指数近似を示している。波浪予測システムにおいてはこの近似曲線を用いるものとする。

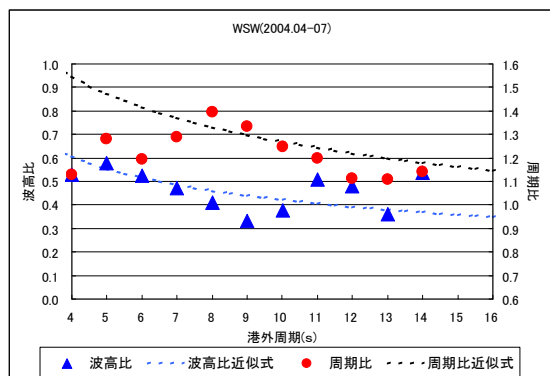


図-6 計算と実測の周期比、波高比比較例

## 2.6 港内波浪予測システムの検討

### (1) システムの概要

COMEINS で予測される那覇港港外の有義波高および有義波周期をエクセル形式で読み込み、港内最大波高およびピーク周期の予測値を時系列図で表示するとともに、港内波浪を修正BMスペクトルと仮定した場合の周期帯別波高および周期帯別の予測波高を図示するものとする。

### (2) 予測データの確認

沈設位置での波浪観測期間における港外 NOWPHAS 実測データの速報値を入力条件として用い、出力された結果と実測値の比較を行った。平成 16 年 6 月 5 日から 10 日にかけてのデータ比較を図-7 に示す。周期、波高ともに赤の実線が NOWPHAS 速報値を入力して出力された結果であり、ピンクの点が港内波浪観測結果を示す。また各グラフとも横軸は日時で、周期と記した上のグラフはピーク周期、波高と記した下のグラフは最大波高の時系列変動を示す。波高については、変動傾向を精度良く再現している。一方、周期については、実測値のうち、周期の長い側を包絡するような曲線を出力している。これは、実測値に含まれる港内での風浪成分の影響が考慮していないためと考えられる。港内で風による風浪が発生すると、港外から進入した波浪のスペクトルに、港内での風浪のスペクトルが加算される。この時、港内風浪のスペクトルピークは、概ね港外からの波浪のスペクトルピークと同等かそれより周期の短い側に位置する。港内風浪のエネルギーが卓越した条件では、実測値のスペクトル解析結果は、港内風浪のピークを出力することになるため、港外から進入する波浪成分より小さな値となる。そのため、NOWPHAS 速報値から出力される周期は港内の実測値より大きいものと思われる。

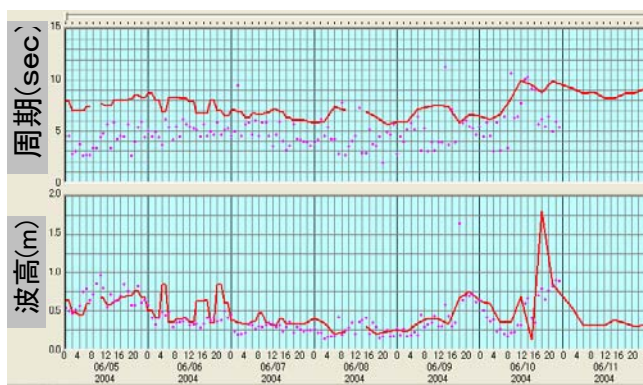


図-7 波浪予測データの確認

## 3. まとめ

本検討では、那覇沈埋トンネルの施工時の限界波浪条件を予測することを目的として、非線形波浪変形計算プログラム (NOWTPARI Ver4.6β) を用いて那覇港内外の波高比および周期比のデータベースを作成し、COMEINS 予測の波向きおよび港外有義波高、有義波周期から、港内の最大波高およびピーク周期を算出するシステムを構築した。港内で発生する風浪の影響は、SMB 法を用いてエネルギー加算した。この港内波浪予測システムを用いて、港外波浪に NOWPHAS 地点の実測値を入力し、沈埋函位置での実測値と比較したところ、ピーク周期は実測結果よりやや大きめの値を出力し、最大波高については、実測値の変動傾向を適切に評価することが分かった。このことから今回構築したシステムは、実用上十分な精度を有し、施工可否判断における沈埋函共振周期波浪の存在について重要な情報を提供することが可能と考えられる。但し、ピーク周期や周期帯別波高といった概念は、最大波や有義波のように直感的に認識できる現象ではないため、事前に十分な運用シミュレーションを重ねることによって経験的に情報の意味を理解しておくことが重要である。

最後に、本報告は沖縄総合事務局那覇港湾空港整備事務所発注による「那覇港 (那覇ふ頭地区) 道路 (空港湾) 技術検討調査業務の検討の一部を再度まとめたものであり、システムの構築に際しては、平石哲也 (独) 港湾技術研究所海洋・水工部波浪研究室長から様々なご助言ご指導を頂いた。ここに記し、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所、(財) 沿岸技術研究センター；平成 15 年度那覇港 (那覇ふ頭地区) 道路 (空港線) 技術検討調査委託報告書, 2004.
- 2) 沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所：那覇港臨港道路 空港線沈埋トンネル (パンフレット), 2000.
- 3) 永井春生・白石 悟；那覇沈埋トンネルにおける沈埋函の耐波安定性の検討, 沿岸センター論文集, No. 4 (2004), pp. 41 ~ 44, 2004.