

外洋波浪進入海域における沈埋函の沈設

CONSTRUCTION OF IMMERSED TUNNEL UNDER SEVERE WAVE CONDITION

浦辺信一¹・高良哲治²・伊是名興治²・

羽田宏³・小崎正弘⁴・新明克洋⁵

Shinichi URABE, Tetsuji TAKARA, Kouji IZENA,
Hiroshi HANEDA, Masahiro OZAKI and Katsuhiro SHIMMYO

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

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

³正会員 五洋建設株式会社 九州支店土木部 (〒810-0023 福岡県福岡市中央区警固1-12-11)

⁴五洋建設株式会社 九州支店那覇沈埋築造工事事務所 (〒901-0036 沖縄県那覇市西3-10-177)

⁵正会員 五洋建設株式会社 九州支店那覇沈埋築造工事事務所 (〒901-0036 沖縄県那覇市西3-10-177)

Conventionally, immersed tunnels have been constructed on inner bay with calm wave condition, such as Tokyo bay, Osaka bay, etc.. However, in the target construction site, Naha ports, wave heights and periods are larger and longer compared to those where other immersed tunnels were constructed.

We made a judgment plan for the construction works to waves conditions using by numerical simulation approach. Furthermore, wave heights, periods and wave spectra based on real-time observations were utilized on the judgment of the construction works.

In this paper, the validity of the judgment plan using by numerical simulation approach is verified based on the observations on waves, movements of the tunnel element and hydraulic pressures of the tunnel element bottom.

Key Words : *immersed tunnel , numerical simulation, CADAMAS-Surf*

1. はじめに

現在、那覇空港と那覇港・市街地を結ぶ道路は慢性的な渋滞状態を呈し、将来を見越しての輸送体系の整備が不可欠となっている。その解決策の一つとして那覇港臨港道路空港線の整備が進められている。従来、沈埋函沈設工事は東京湾、大阪湾などの静穏な内湾での施工が大部分を占める。本道路の沈埋トンネル部分は、図-1の施工位置図に示すように、過去の実績にはない外洋波浪進入海域での施工となり、施工時の函体に対する波浪の影響が懸念された。

本稿では、数値波動水路と呼ばれる数値解析を用いた波力の算定手法、波力の算定結果を活かした沈埋函沈設工事の施工計画とその実績を紹介する。その中でも、観測波浪のスペクトル解析結果をリアルタイムでモニタリングし、作業可否判断を実施した点について詳述する。また、沈設時の波浪観測、函体の動態観測により波力の算定手法の妥当性について検証を行った。

2. 波力の算定

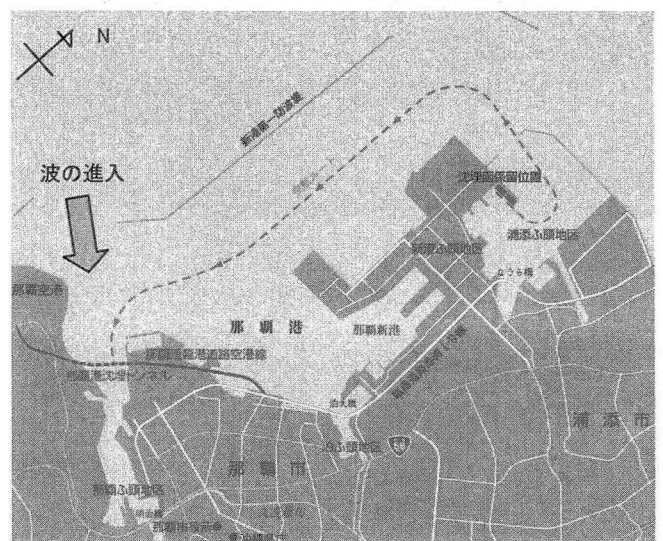


図-1 施工位置図

(1) 数値波動水路

防波堤等の港湾構造物に作用する波力を算定する場合、合田式を用いる方法が一般的である。しかし、

沈埋函は没水構造物であり、構造物上や背後の水面が変動するため、合田式を適用できない。ここでは、トレンチ等の海底面の形状も再現可能な数値波動水路¹⁾と呼ばれる数値解析手法を用いて波力の算定を行った。

波力の算定手法として数値波動水路を採用した理由は次の2点である。1点目は沈設位置での波浪の波向が沈埋函の軸方向に対してほぼ直角に作用する点、2点目は現地の自然条件を再現した水理模型実験と数値波動水路の算定結果の相関が良好である点²⁾である。さらに本稿では支承ジャッキの荷重計測や函底水圧計測を実施し、実海域での妥当性についても検証する。詳細は6. 計測結果で後述する。

図-2に解析で再現した断面二次元水路の概念図を示す。また、計算条件を表-1に示す。



図-2 断面二次元水路概念図

表-1 数値波動水路の計算条件

ΔX	1.0m	水路長	1250m
ΔY	0.5m	減衰領域の幅	300m
差分スキーム	DONOR-0.2	基礎捨石	空隙率 0.43
造波モデル	造波境界条件		抗力係数 1.0
乱流モデル	k-εモデル		慣性力係数 1.2

(2) 波力算定結果

沈埋函に作用する水平力と周期の関係を図-3に、揚圧力と周期の関係を図-4に示す。

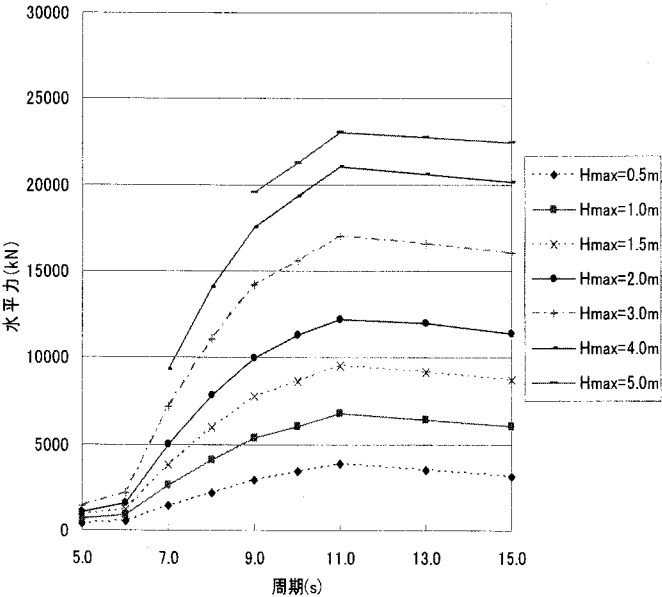


図-3 水平力と周期の関係

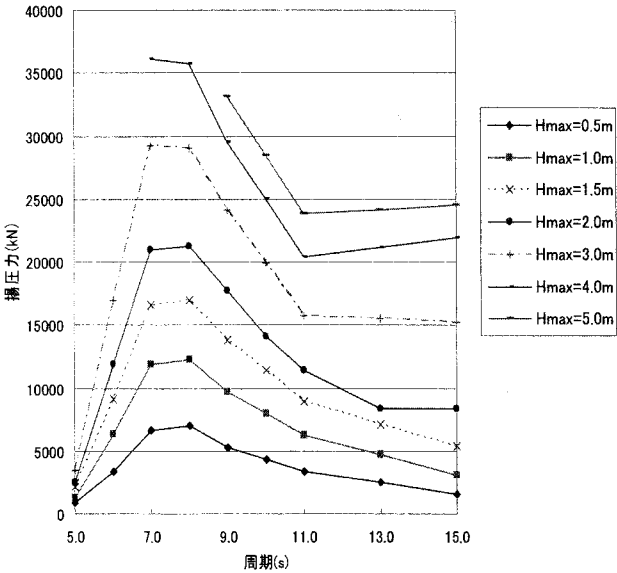


図-4 揚圧力と周期の関係

沈埋函に作用する波力は波浪周期に大きく依存し、水平波力は11秒でピークを迎え、揚圧力は7～8秒でピークとなる算定結果となった。

3. 耐波安定検討と施工計画

(1) 耐波安定検討

着底直後の沈埋函は仮受ブラケットと支承ジャッキでの4点支持状態である。また、ジャッキによる引寄せ作業が容易となるように塗装等の摩擦低減加工がなされており、摩擦係数は過去の施工実績より0.25程度であることが判明している。

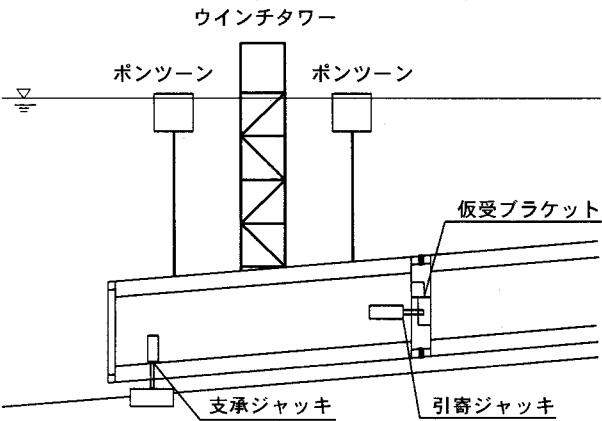


図-5 着底時の沈埋函の支持状態

水圧接合時に函体が滑動しないことが、作業の確実性、安全性において非常に重要である。滑動を防ぐ対策としては函体の水中重量を増やすことになるが、必要な水中重量は以下の算定式(1)にて設定した。

$$W = \frac{H}{\mu} - V \tag{1}$$

W : 必要な水中重量
 H : 水平力 (数値波動水路による算定値)
 V : 揚圧力 (数値波動水路による算定値)
 μ : 摩擦係数 (0.25に設定)

数式(1)を用い必要水中重量を算定した結果を表-2に示す。

表-2 波浪条件と必要水中重量の関係

Hmax(m)	周期(s)			
	5.0	6.0	7.0	8.0
0.20	5000	5000	5000	5000
0.30	5000	5000	6500	8000
0.40	5000	5000	9000	12000
0.50	5000	7000	14500	19000

単位 (kN)

(2) 施工計画

函体の水中重量はバラストタンクの容量の関係から、14000 kNで最大であり、このことからHmax=0.5m、T=7.0s以上の波浪条件の場合、滑動を抑える対策をとることができない。したがって、この波浪条件を沈設・接合作業の中止基準とすることとした。ちなみに、那覇港のNOWPHASの沖波データから沈設位置での波高を換算すると、作業中止基準以上の波浪が出現する確率は約30%程度である。このような作業可否判断を実施するため、沈設場所に波高計を設置し、最高波高、最高波周期、有義波高、有義波周期、スペクトル解析結果等の波浪統計処理データをリアルタイムで事務所内のディスプレイに表示可能なシステムを導入した。また、沈設時の波

浪観測、支承ジャッキの荷重計測、函底コン注入口を利用した函底水圧の計測を実施し、波力の算定手法の妥当性を検証する計画とした(図-6参照)。

5. 施工実績

2003年10月3日、沈埋函の仮置場から沈設場所への曳航作業を実施した(図-1参照)。当日の海象状況は良好であり、予定どおり沈埋函を沈設場所に係留した。曳航後、沈設訓練工も無事終了し、沈設日の10月4日を迎えた。早朝の段階で冬型の気圧配置に伴う北風の影響で、沈設場所の最高波高は0.4m程度であったが、接合時にバラストタンクに注水し、水中重量を増加させることで接合可能と判断し、作業を実施した。

沈埋函の若干の動揺は生じたが着底まで順調に作業は進められた。着底直後仮受ブラケットを支点として、支承ジャッキ側を30cm程度回転する函体の滑動が発生した。函体の位置誘導が困難となり、接合作業の続行が不可能となった。

図-7に波浪観測結果を示す。作業実施を決定した10月4日早期より着底した14:00にかけて、最高波高は0.5m前後で推移していたが、スペクトルピーク周期は長くなる傾向が見られた。作業実施を決定した早朝の段階でピーク周期は6s前後であったが、着底した14:00の段階では8s前後のピーク周期であった。波浪観測結果や当日の海象予報により、早期にピーク周期が短くなり、海象条件が改善の方向に向かうことはないものと判断し、作業中止を決定した。沈埋函の再浮上作業を実施し、次の機会を待つこととした。

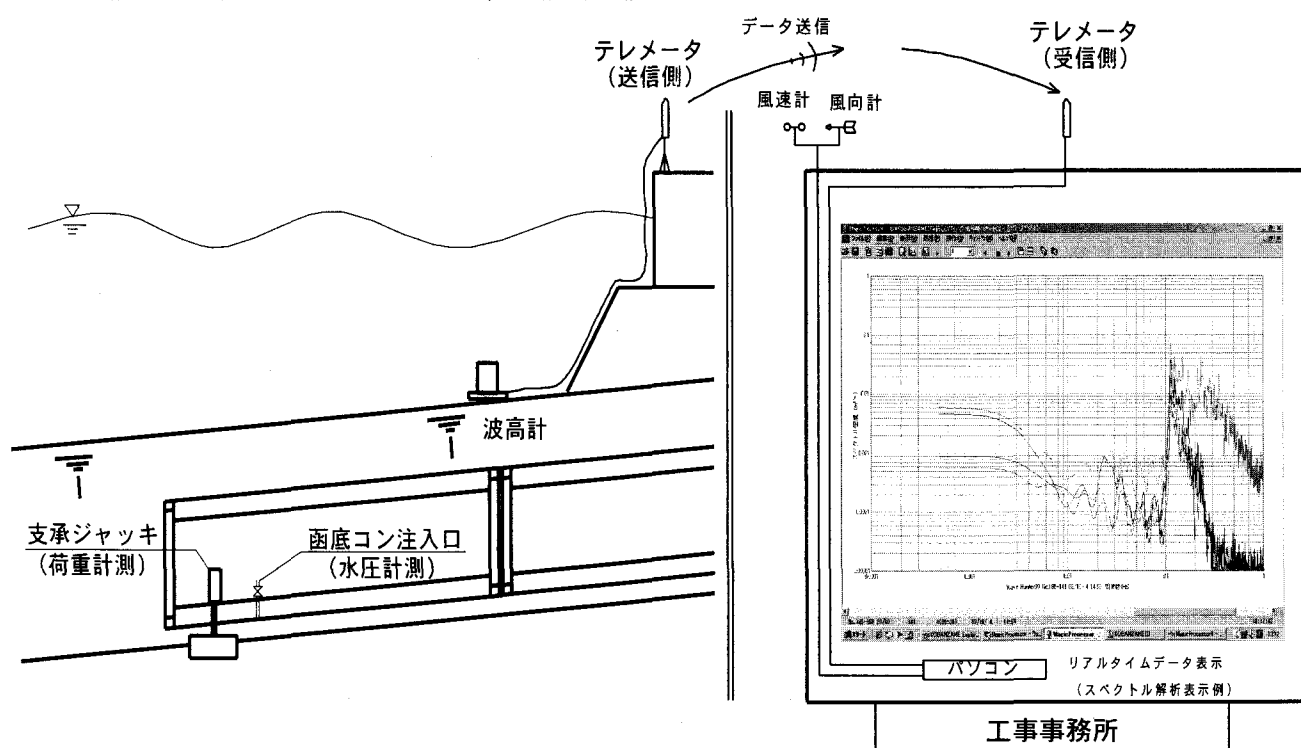


図-6 計測概要

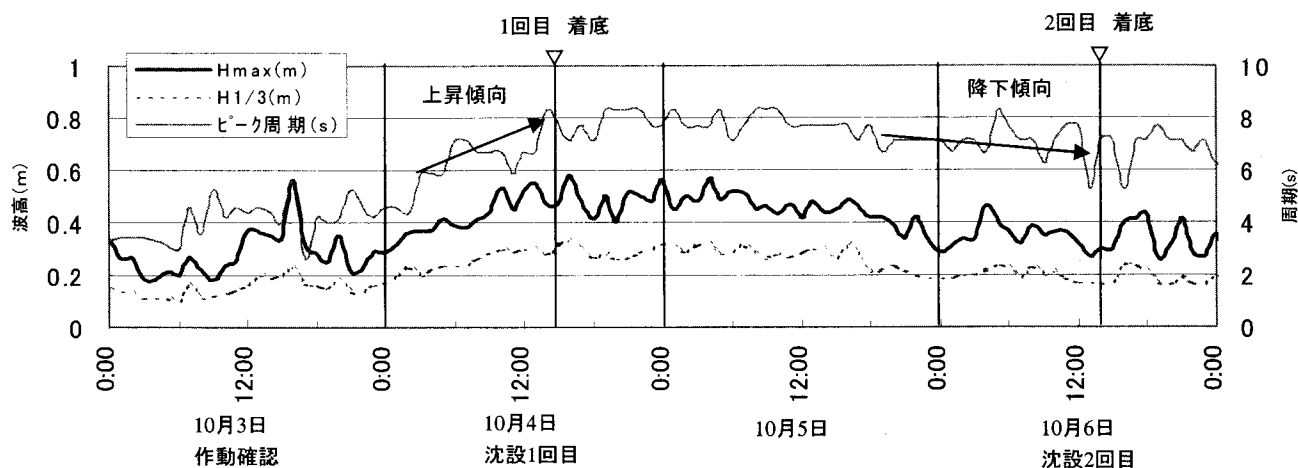


図-7 沈設場所波浪観測結果

10月5日から10月6日にかけてピーク周期が短くなる傾向を示したため、10月6日早朝に沈設作業の実施を決定した。着底時の函体の滑動も発生せず、3号函は無事に接合された。沈埋函着底時の波浪条件の比較を表-3に示す。

表-3 沈埋函着底時の波浪条件

	10/4 15:00 3号函沈設1回目		10/6 14:00 3号函沈設2回目	
	波高 (m)	周期 (s)	波高 (m)	周期 (s)
有義波	0.32	4.9	0.17	4.5
最高波	0.48	5.7	0.30	5.4
スペクトル 解析	—	8.1	—	7.4

風波とうねりの重なりあった波浪が沈設場所に進入してきているため、周期の短い風波成分に影響され、有義波周期、最高波周期がスペクトル解析のピーク周期よりも小さくなっている。10月4日の波浪条件で、最高波周期をもとに作業可否を判断した場合、作業中止基準 ($H_{max}=0.5m$, $T=7.0s$) を下回っており、作業実施可能と判断される。(表-2参照)。一方、スペクトル解析のピーク周期で判断した場合、作業中止と判断される波浪条件となる。滑動が発生し接合作業が不可能となった10月4日の沈設作業の実績から、スペクトル解析のピーク周期を用いて、水中重量の設定や作業可否判断を行うことが適切であると考えられる。

6. 計測結果

(1) 支承ジャッキ荷重計測

10月4日着底時の支承ジャッキの荷重データを図-8に示す。荷重は1分間に7.5回程度振動しており、周期は8秒程度である。周期はスペクトル解析のピーク周期にほぼ一致しており、荷重の振幅は、港

内・港外ともに800 kNを中心に±1500 kNである。沈設場所の波浪は沈埋函に対して直角に入射すること、着底時の沈埋函が4点支持であることより、沈埋函に作用した揚圧力は1500 kNの4倍の約6000 kNの揚圧力が函体に作用したことが予想される。

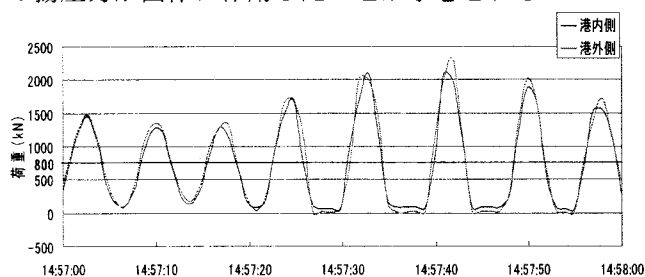


図-8 支承ジャッキ荷重データ (10月4日着底時)
(波浪条件: $H_{max}=0.48m$, $T_{max}=5.7s$)

数値波動水路による揚圧力の算定結果を図-9に示す。また、算定値と実測値の比較を表-4に示す。函体の動揺周期とスペクトル解析のピーク周期は沈設1回目、2回目ともに一致しており、算定値の周期はスペクトル解析のピーク周期を用いることとした。

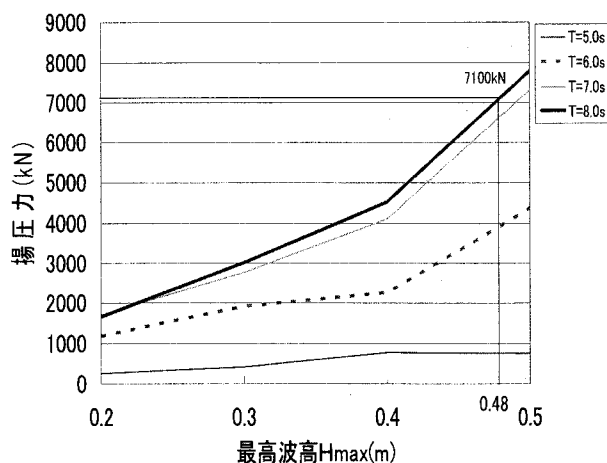


図-9 揚圧力算定結果

表-4 揚圧力算定値と実測値の比較

	10/4 15:00 沈設1回目
数値波動水路による算定値	7100 kN
実測値（観測期間中最大）	6000 kN
ピーク周期	8.1 s
実測値/算定値	0.85

実測値と算定値はほぼ同レベルの値である。数値波動水路は現地の現象を再現できていると考えられる。

(2) 函底水圧計測

図-10は台風13号来襲時の2003年9月11日20時の水圧式波高計の水圧データと函底水圧計p1のデータのスペクトル解析の結果である。ピーク周期等のズレは見られず、形状はほぼ一致している。水圧式波高計と函底水圧計設置位置を図-11に示す。

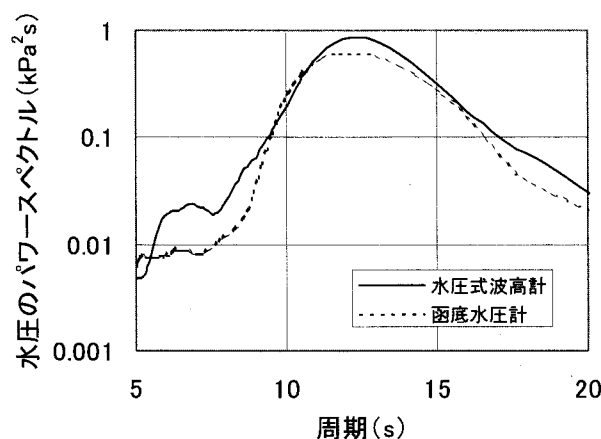


図-10 スペクトル解析結果

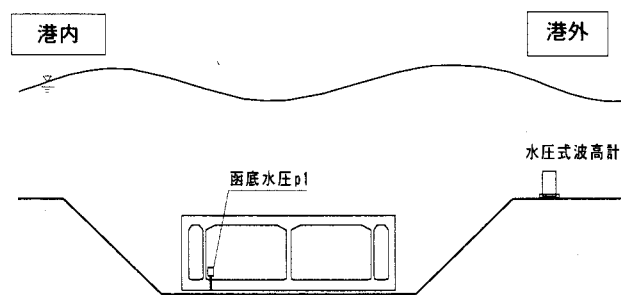


図-11 水圧式波高計・函底水圧計位置図

図-12は、2003年9月11日20時の水圧式波高計のパワースペクトルに対する函底水圧計のパワースペクトルの比の平方根を伝達率として示している。破線

は数値波動水路の解析結果である。5sおよび10s付近で実測結果と数値波動水路の結果に差が認められるが、それ以外は良く一致している。併せて図-12には、最高波高から換算した波高計位置での水圧に対するp1の函底水圧計の実測最大値の比をプロットしている（計測期間：2003年9月1日19時～23時）。数値波動水路の解析値を中心にばらつく結果になっており、誤差範囲に収まっているものとする。

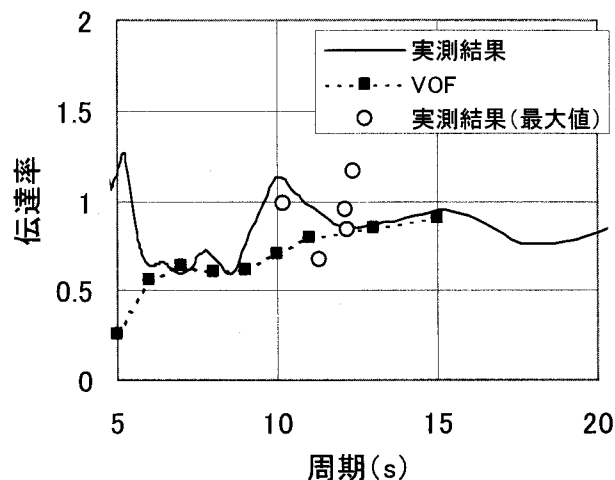


図-12 伝達率（函底水圧/波高計水圧）

6. おわりに

数値波動水路を用いて沈埋函に作用する波力を算定し、その結果をもとに施工計画を立案し、沈設工事を実施した。実施工で得られた結論は以下のとおりである。

沈設時の計測結果より、沈設時の作業可否判断や水中重量の設定はスペクトル解析のピーク周期を用いることが望ましいことが判明した。

また、支承ジャッキの荷重計測や函底水圧の現地観測結果より、波力の算定結果の妥当性が確認できた。本工事のように直入射波が卓越する条件下では、数値波動水路が実現象を再現する手法の一つとして評価できるものとする。

参考文献

- 1) 財団法人沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の開発・研究，2002。
- 2) 住田公資他：沈埋函沈設時の急速施工，海洋開発論文集，第18集，PP. 659～664，2002。