

那覇沈埋トンネルにおける沈埋函の耐波安定性の検討

Study on Stability of Immersed Tunnel against Waves

永井春生*・白石 悟**

NAGAI Haruo and SHIRAISHI Satoru

* (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

As the Naha immersed tunnel is planned to be settled at the place of relatively severe wave conditions from open sea, it is required to investigate the stability of immersed tunnel segment especially at the execution of settlement. The present paper describes the validity of a “numerical wave flume (CADMAS-SURF)” developed by CDIT to analyze the stability of an immersed tunnel against waves. The computed results show good agreement with the measured data.

Key Words : numerical wave flume , CADMAS-SURF , Naha Immersed Tunnel

1. はじめに

那覇沈埋トンネルは、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函直結させた延長約 1.1km の自動車専用道路トンネルである。このトンネルの完成により、那覇港と那覇空港間の慢性的な交通渋滞の解消が期待されている¹⁾。

図-1 に沈埋トンネルの位置図を示す。この図よりわかるように、那覇沈埋トンネルは、外洋波浪進入海域に位置している。従来の沈埋トンネルが、東京湾や大阪湾のような静穏な内湾で施工されている中で、那覇沈埋トンネルにおいては、沈埋函施工時の耐波安定が重要な検討項目になっている。

那覇沈埋トンネルの沈埋函に作用する外力の算定に数値波動水路と呼ばれる数値解析手法を適用し、現地での実測値により検証を行った。

本報告は、数値波動水路より算定した外力に基づく耐波安定について検討した結果を報告するものである。



図-1 那覇沈埋トンネル位置図

2. 沈埋函の耐波安定性の検討

2.1 外力の算定

(1) 沈埋函の概要

沈埋函は、長さ 90m、幅 37m、高さ 9m で函体重量は、29,900 t であるが、浮力が勝り (30,200t) 水バラストの重量で沈設することとなる。沈設は、タワーポンツーン方式であり、沈設時の有効重量は 500 t 程度である。波に対しては、非常に不安定な状態と言える。水中有効重量を増せば波浪に対する安定度は大きくなるが、沈設時の吊ワイヤー・吊金具の耐力、ポンツーンの浮力、ウインチ能力などの制約がある。沈設時のイメージ図を図-2 に示す。沈埋函の沈設から沈埋函の側部が埋戻される (安定断面) までの間は、波浪に対する安定が問題となる。

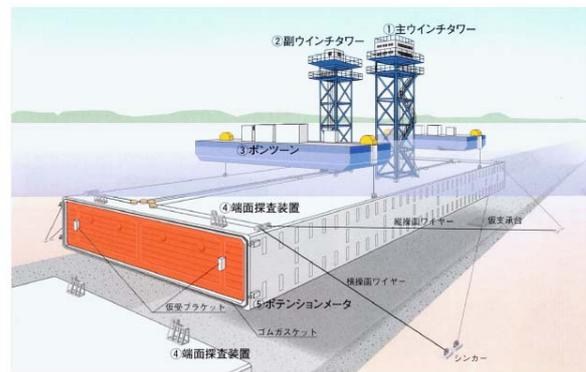


図-2 沈設時のイメージ図

(2) 数値波動水路の適用

ケーソンなどに作用する波力の算定には、一般に合田式が用いられる。しかし、沈埋函は、没水構造物であり、合田式を適用できない。ここでは、数値波動水路²⁾と呼ば

れる数値解析手法を用いて波力の算定を行った。数値波動水路は、従来の断面2次元造波水路の模型実験に代わり得る手法であり、自由表面や砕波の影響を考慮できるものである。住田ら³⁾は、現地の自然条件を水理模型実験で再現し、数値波動水路の算定結果と良好な相関が認められたと報告している。

図-3に断面二次元水路の概念図を示し、計算条件を表-1に示す。

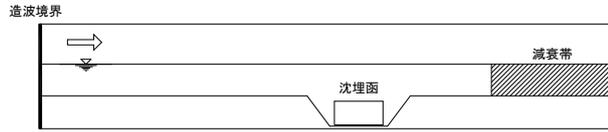


図-3 断面二次元水路概念図

表-1 断面二次元水路計算条件

ΔX (水平方向計算格子間隔)	1.0m	乱流エネルギー散逸の境界条件	FREE
ΔY (鉛直方向計算格子間隔)	0.5m	粘性	あり
Δt (計算時間間隔)	自動	流速・圧力境界条件	SLIP
水深	9.675m (2号函三重城側)	VOF関数Fの境界条件	FREE
	12.1m (2,3号函空港側)		
差分スキーム	DONOR-0.2	減衰領域の幅	300m
ポーラス下限値	0.001	減衰領域の水深	9.675m (2号函三重城側) 12.1m (2,3号函空港側)
造波モデル	造波境界条件	空隙率	0.43
乱流モデル	k- ϵ モデル	基礎捨石	抗力係数 1
乱流エネルギーの境界条件	FREE		慣性力係数 1.2

(3) 波力算定結果

数値波動水路により算定した沈埋函に作用する水平力および揚圧力について周期との関係を図-4、図-5に示す。

入射波高 H_{max} が大きくなると水平力、揚圧力ともが大きくなることと、周期に依存することがわかる。水平力は周期11秒でピークを迎え、揚圧力は、7~8秒でピークを示している。沈埋函の幅と波長の関係で水平力、揚圧力の最大値が決定されるものと思われる。図-6、図-7に各外力最大時の波面を示す。

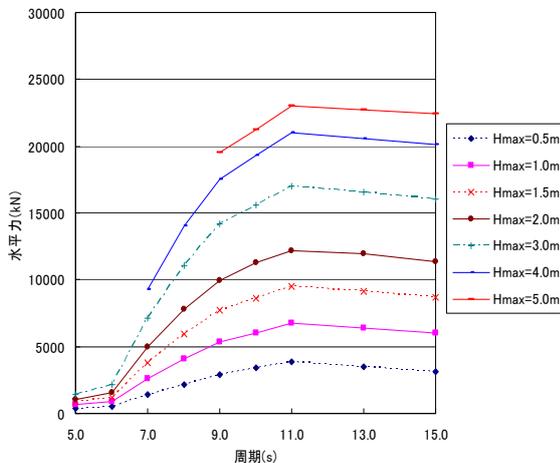


図-4 数値波動水路解析結果 (周期と水平力の関係)

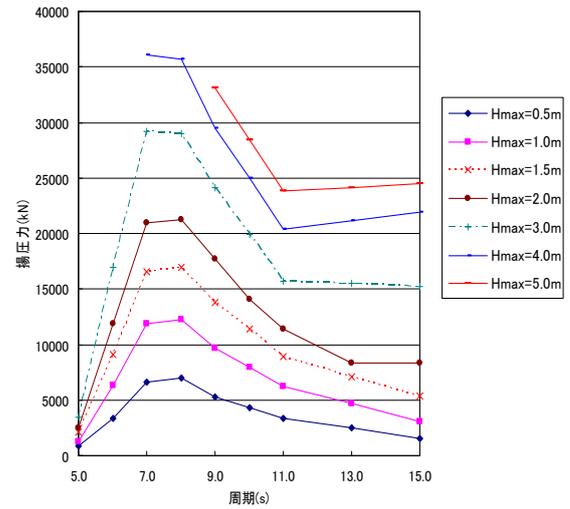


図-5 数値波動水路解析結果 (周期と揚圧力の関係)

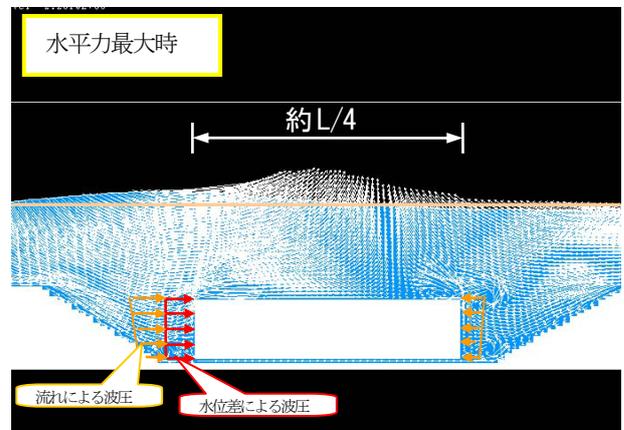


図-6 数値波動水路解析結果 (水平力最大時波面)

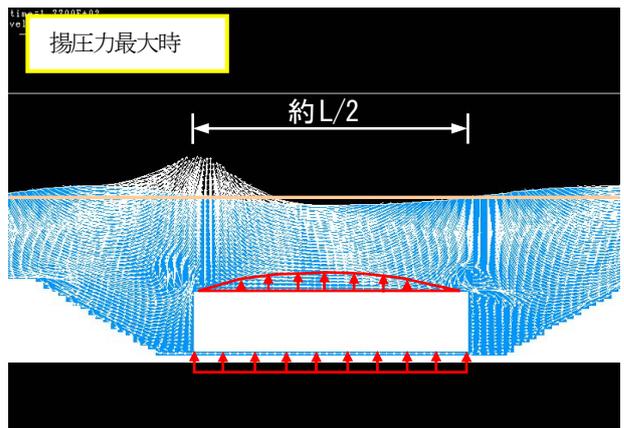


図-7 数値波動水路解析結果 (揚圧力最大時波面)

2.2 現地計測による解析値の検証

(4) 現地計測計画

現地においては、那覇港沖合いにNOWPHASによる波浪観測が実施されており、港内については、沈設個所のトレンチ港外側法肩部に水圧式波高計を設置している。港

内波高計のデータは事務所内に転送され、リアルタイムで最高波高、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統計処理が施され、ディスプレイに表示される。また、沈埋函側では、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た。図-8に現地計測計画概要図を示す。これらの計測データを用いて沈設地点における数値波動水路の適用に関する検証を行う。

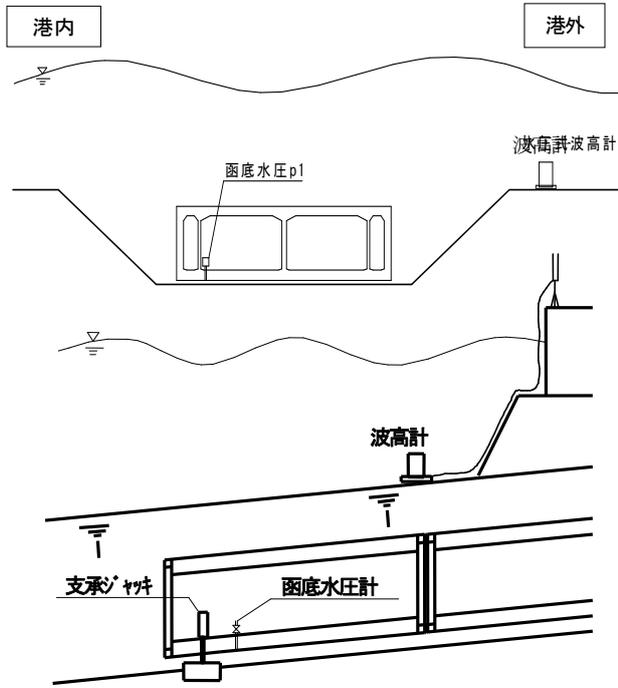


図-8 現地計測計画概要図

(5) 函底水圧と解析結果の比較

台風13号(2003.9.1)来襲時の函底水圧計データ、波浪観測データと、数値波動水路による解析結果(函底水圧)を比較する。

図-9は9月1日20時(19:50~20:10)の水圧式波高計の水圧データ(静水圧からの差圧:以下動水圧)と函底水圧計のデータ(動水圧)のスペクトル解析結果である。ピーク周期のずれは見られず、形状およびピークの大きさもほぼ一致している。

図-10は同時刻における水圧式波高計の水圧データのスペクトルと函底水圧計のデータの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による解析結果(函底水圧の動水圧/入射波の動水圧)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は差が認められるが、それ以外は良く一致している。図中の白丸は、2003年9月1日の19時~23時の毎正時における各20分間計測での函底水圧計の動水圧の最大値を用いて、最高波高での動水圧との比を取ったものである。9月1日の20時の実測結果(赤丸)を中心にばらつき結果になっており、数値波動水路による計算結果もばらつ

きの範囲内に入っている。

以上より、20時の時間のみでの比較では、5sおよび10s付近で計算と観測の差が認められるが、19時~23時の時間で比較すると、数値波動水路による計算結果は実測結果のばらつきの範囲内にあり、数値波動水路による計算で現地の状況を実用上十分に再現できていると考えられる。

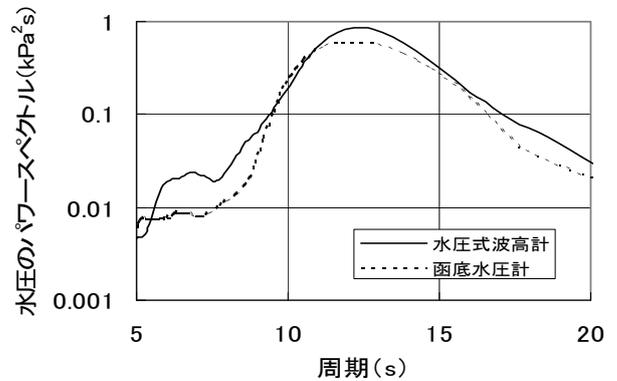


図-9 パワースペクトル図

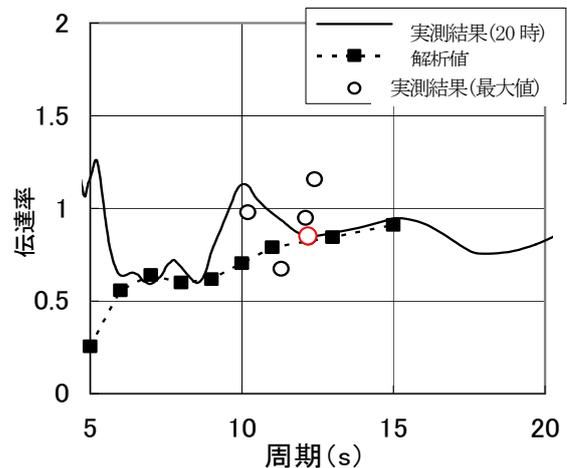


図-10 周期と伝達率

(6) 支承ジャッキ荷重と解析結果の比較

10月4日(3号函沈設時)の波浪データを表-2に、支承ジャッキの荷重データを図-11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(8.3秒)にはほぼ一致しており、荷重の振幅は、港内・港外ともに800kNを中心に±1500kNである。函尾で3000kNの揚圧力が作用していると想定され、函体全体では約6000kNの揚圧力が作用したと考えられる。表-3に数値波動水路による解析結果を示す。

表-2 波浪条件(3号函沈設時 2003年10月4日)

波浪条件 (2003年10月4日 15:00)	波高(m)	周期(s)
有義波	0.32	4.9
最高波	0.48	5.7
スペクトル解析	-	8.3

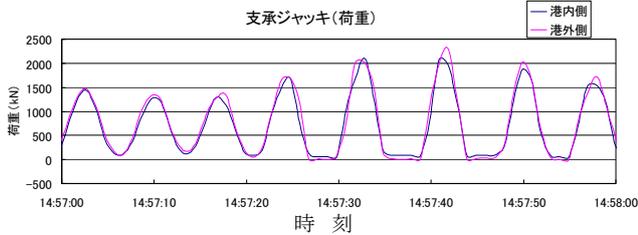


図-11 支承ジャッキ荷重計測結果

表-3 数値波動水路を用いた解析結果 (3号函)

最高波高(m)		周期(s)			
		5.0	6.0	7.0	8.0
0.20	水平波力	106	167	514	785
	揚圧力	246	1,176	1,692	1,645
0.30	水平波力	154	291	807	1,097
	揚圧力	414	1,906	2,763	3,006
0.40	水平波力	194	357	1,093	1,733
	揚圧力	773	2,259	4,097	4,519
0.50	水平波力	282	577	1,732	2,724
	揚圧力	745	4,355	7,300	7,784

解析から予測される揚圧力

沈設時の波高は表-2 より $H_{max}=0.5m$, $T=8.0s$ (スペクトルのピーク周期) 程度であり, 表-3 から数値解析上 7784kN の揚圧力が作用していると想定される. この値は, 支承ジャッキの荷重データから想定された揚圧力 6000kN とほぼ同レベルであり, 数値波動水路により, 実用上現地 の状況を十分に再現できているものと判断できる.

以上に示した函底水圧及び支承ジャッキ荷重データと数値解析の比較検証結果より, 沈設直後の沈埋函に作用する外力の算定手法として, 数値波動水路は実用的であると判断できる.

2.3 耐波安定検討照査

(1) 耐波安定検討照査式

那覇沈埋トンネルにおいて沈埋函据付直後から安定断面にいたるまでの耐波安定検討照査式を式(1), 式(2)に示す.

$$F_u = \frac{W'}{U} \geq 1.0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$F_s = \frac{(W'-U) \times \mu + R}{H} \geq 1.0 \quad \dots \dots (2)$$

ここに,

- W' : 沈埋函の有効水中重量
- U : 数値波動水路により算出された揚圧力
- H : 数値波動水路により算出された水平力
- μ : 摩擦係数 (支承条件による)
- R : ゴムガasketの水平方向復元力

波の位相差は考慮せず, 数値波動水路で算出された揚圧力と水平力の各最大値を同時に作用させて, 沈埋函の耐波安定照査を行うこととした. 支承ジャッキとブラケットで支持されている場合に摩擦係 $\mu=0.25$, 函底コンク

リートで支持されているとき $\mu=0.5$ とした.

水平力による滑動に対して, 水圧接合後のゴムガasket反力は滑動抵抗として作用する. 止水性が確保できる変位量 (10mm) に対するゴムガasketの復元力 R を抵抗力として考慮した.

(2) 施工ステップ毎の限界波浪算出

沈設直後から安定断面に至る各施工ステップにおいて, 沈埋函の支承条件 (摩擦係数), 対応できる有効水中重量, ゴムガasket反力が異なる. そのため, 施工ステップ毎に限界波浪条件を設定した. 表-4 は4号函の各施工ステップに対して算出した限界波浪条件を示す.

表-4 施工ステップ毎の限界波浪条件

施工ステップ	有効重量 t	最高波高	周期 (秒)		
ステップ0 : 沈降	500	規定せず	7秒	沈設当日	
着底後	ステップ1 : 引寄せロッド挿入	500 ~1200	0.25m 0.6m	7秒	沈設当日
	ステップ2 : 水圧接合	1200	0.6m	7秒	沈設当日
	ステップ3 : 一次函底コン打設まで	1200	1.0m	規定せず	
	ステップ4 : 安定断面確保まで	1200	1.25m	規定せず	

3. おわりに

本検討では, 沈埋函に作用する波力の算定を数値波動水路で行い, 沈設時の現場計測結果との比較をおこなった. その結果, 数値波動水路が実現象を再現する1手法として評価出来ると判断した. 数値波動水路で算出した外力に対して耐波安定照査を行い, 施工ステップ毎の限界波浪を設定した. この手法を用いることにより, 4号函~5号函の沈埋函の施工に反映させることが出来る.

しかし, 6号函~8号函の沈設場所においては, 近傍のリーフの影響を受け, 波浪が屈折, 浅水変形, 碎波しながら函体に対して斜めに入射するとともに, 平均水位上昇が起るなど非常に複雑な波浪場となる. 現地での波浪観測, 波高分布を考慮した作用外力の算定とその検証が今後の課題である.

最後に, 本報告は, 沖縄総合事務局那覇港湾空港事務所発注による「那覇港 (那覇ふ頭地区) 道路 (空港線) 技術検討調査委託」で検討した内容の一部をまとめたものであり, 技術検討委員会 (矢吹哲哉琉球大学教授) において様々なご助言ご指導を頂いた. ここに記し, 関係各位に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工事事務所: 那覇港臨港道路 空港線沈埋トンネル (パンフレット), 2000.
- 2) (財) 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発, 296p., 2002.10.
- 3) 住田公資他: 沈埋函沈設時の急速施工, 海洋開発論文集, Vol.18, pp.659~664, 2002.