

沈埋函沈設時の急速施工

RAPID EMPLACEMENT OF IMMERSSED TUNNEL ELEMENT

住田公資¹・藤原隆一²・鵜飼亮行³・青野利夫⁴
 山村和弘⁵・中屋行雄⁶
 Koushi SUMIDA, Ryuichi Fujiwara, Akiyuki UKAI, Toshio AONO
 Kazuhiro YAMAMURA, Yukio NAKAYA

- ¹正会員 工修 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正会員 博(工) 社団法人 日本埋立浚渫協会 (〒107-0052 東京都港区赤坂3丁目3番5号 国際山王ビル8F)
- ³正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野四区町1534-1)
- ⁴正会員 工博 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)
- ⁵正会員 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)
- ⁶東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

Structural resistiveness against wave action of immersed tunnel element that is constructed at Naha Port is investigated. Hydraulic tests and numerical simulation (CADAMAS-Surf) are conducted on the characteristics of motion of a immersed tunnel element. It is found that the required weight for stability of immersed tunnel element, and that the motion of the tube is stopped by reclamation of the sidewall. Using these results, a rapid emplacement method is developed and No.1 tube's emplacement was done using this method.

Key Words: immersed tunnel element, CADAMAS-surf, rapid emplacement

1. はじめに

那覇沈埋トンネルは、那覇ふ頭港口部を海底トンネルで横断し、波の上地区と那覇空港を8函の沈埋函で直結させる延長約1.1kmの自動車専用道路トンネルである。沈埋函は、沈設後最低でも1週間程度仮置状態となり、仮支承ジャッキによる支承期間、函底コンクリート打設の期間は、沈埋函の水中重量が比較的軽く、低波浪でも滑動する可能性がある。

施工場所の那覇港を含む南西諸島は、台風の常襲地帯であるとともに比較的波周期の長い海域であり、従来の沈埋工事実績からもこのような海域における沈設工事の実績はない。

本検討は、1号函の沈設工事において、台風時期の気象・海象条件下における沈埋函沈設後早期に沈埋函が耐波安定化する工法を構築する目的で実施したものである。

2. 検討概要

実施した検討フローを図-2に示す。

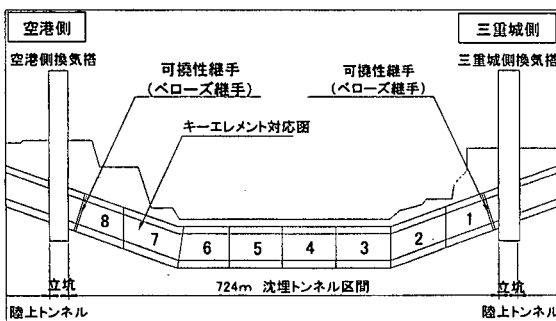


図-1 沈埋トンネル計画断面図

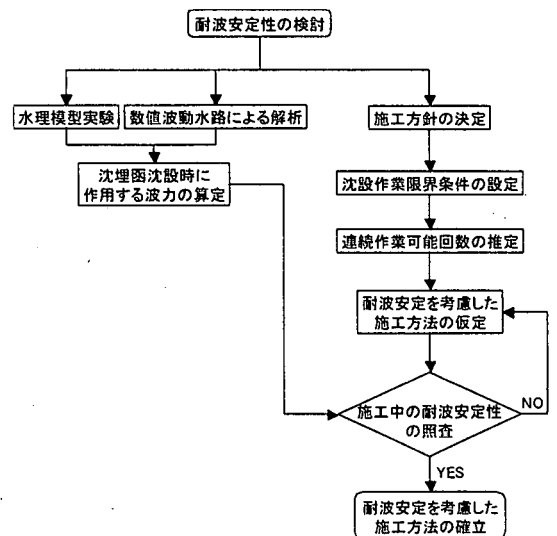


図-2 検討フロー

早期安定化工程の検討を実施するにあたり、沈設場所において想定される種々の波浪条件に対して、数値波動水路を用いた沈埋函動揺解析を実施し、沈設後着底状態の沈埋函に作用する外力（揚圧力・水平力）を算出し、外力の最大値から函体が滑動に対して安定となる必要追加バラスト重量を算出した。さらに、水理模型実験を実施して台風時の10年、20年確率波および既往最大波に対する耐波安定性の検討を行うとともに、数値波動水路による解析結果の妥当性を確認した。

2. 水理模型実験

(1) 実験概要

沈埋函の沈設後の耐波安定性について、水理実験によって検討した。具体的には、水理模型を使用した滑動実験によって想定した波浪条件に対する耐波安定性を検討した。検討対象の沈埋函要目を表-1に示す。表-2および表-3には、実験条件を示すが、表中括弧内の数値は実験スケールである。解析に用いた入射波高は、確率解析によって得られた入射波高から静穏度解析を実施し通過波高を算定し、1.8倍して最大波に換算してある。実験対象の工程は、沈設直後の仮支承ジャッキによる支承期間および函底コンクリート打設から埋戻しまでの期間を想定している。

表-1 検討対象沈埋函の要目

全長	92.00m
幅	36.94m
高さ	8.90m
空中重量	29,898tf (293,000kN)
バラスト重量	2,096tf (20,541kN)
浮力	30,715tf (301,007kN)
水中重量	1,279tf (12,534kN)

表-2 実験条件 (4~10月期)

波浪条件	周期	最大波高	摩擦係数	模型水中重量
10年確率波	11.2s (1.12s)	7.0m (7.0cm)	0.15, 0.50	14,896kN (14,896N)
20年確率波	12.1s (1.21s)	7.8m (7.8cm)		
既往最大波	14.1s (1.41s)	9.6m (9.6cm)	0.50	

表-3 実験条件 (4~6月期)

波浪条件	周期	最大波高	摩擦係数	模型水中重量
10年確率波	9.1s (0.91s)	4.1m (4.1cm)	0.15, 0.50	12,543kN (12,543N)
20年確率波	9.4s (0.94s)	4.39m (4.39cm)		

実験は50m×1.5m×1mの二次元造波水路で行い模型縮尺は1/100とした。水路形状と模型断面を図-3

に示す。海底地形は簡略化して、現地スケールで水深9.6mの一定水深部に法勾配1:1.5のトレンチ浚渫部を構築し、沈埋函の模型を設置した。トレンチ浚渫部沖側は海底勾配1/20の斜路を設け、沖側の一定水深部に擦り付けた。実験では、1号函の沈設位置を想定して掘割部（図中斜線部）を取付けた場合と、次号函の沈設位置を想定して掘割部を設けない場合とで実験を実施した。模型はアクリル板で作成し、内部空洞に鉛塊等を詰め水中重量を調整した。検討対象の沈埋函は曲函で、縦断勾配5%で据付けられるが、ここでは水平に設置された直方体（91cm×37cm×9cm）として模式化した。

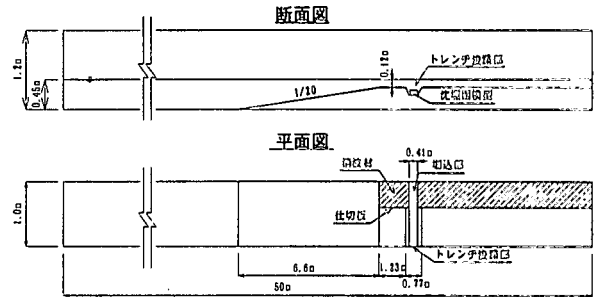


図-3 模型装置

(2) 沈埋函安定重量

沈埋函が滑動安定性を確保するために必要な水中重量を検討した。図-4に沈埋函の水中重量と滑動量の計測結果を示す。滑動量は1回の造波による全滑動量を示している。函底コンクリート打設後を想定し、摩擦係数は0.50である。安定重量と安定のために必要となる追加バラスト重量を表-4にまとめる。

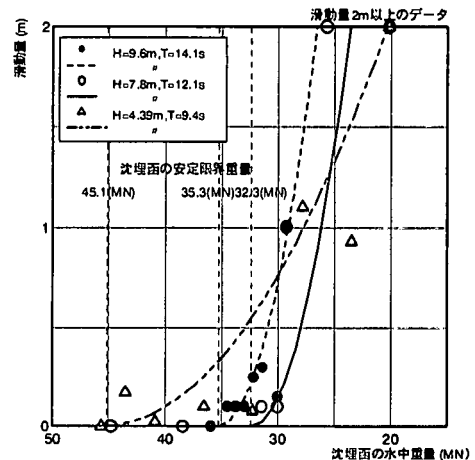


図-4 実験結果

表-4 実験結果

入射波	対象期間	安定重量	追加バラスト重量	備考
10年確率	4~6月	47,072kN	34,323kN	-----
20年確率		49,033kN	36,285kN	-----
		45,111kN	30,401kN	掘割部
既往最大		4~10月	32,362kN	17,652kN
既往最大	-----	3,600tf	20,594kN	掘割部

表-4の結果は、滑動限界の最大値が非碎波時に発生していることを示している。台風来襲を想定した4~10月期の波浪条件は、碎波によりトレンチを通過する波高は低くなっている。それに対して、4~6月期の波浪は碎波せず、トレンチ通過波高は台風期よりも大きくなる。そのため作用波力としては、4月~6月の静穏時が大きい。ただし、これらの結果は設計波に基づくもので、4月~6月では、10年、20年確率波となるが、台風期では、これと同程度の波高が遙かに高い頻度で来襲することになる。

掘割部の有無についてその効果を調べたが、安定重量に大差がないことから、掘割部の効果は考慮しない方が望ましいと考えられる。

(3) 計画重量に対する耐波高

仮支承ジャッキによる支承時（摩擦係数0.15）と函底コンクリート打設後（摩擦係数0.50）に対して、沈埋函が滑動安定性を確保可能な限界波高を推定した。滑動安定性の検証実験で取得された時系列データを波別解析法によって解析した。

沈埋函部の水面変位と沈埋函の滑動量の時系列データを個別の波に区分し、小さい波高の波を含む波別の波高と対応する1波当たりの滑動の振幅値を算定した。

図-5に波別の波高と沈埋函の滑動量を示す。本検討ケースの結果および考察は以下の通りである。

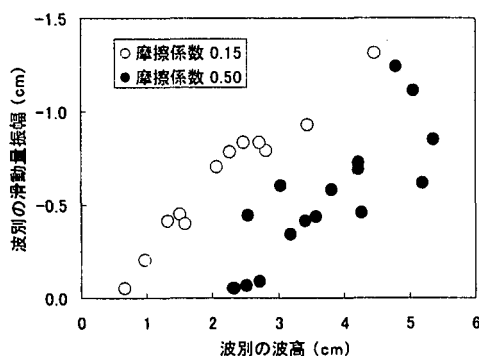


図-5 波高と滑動量の関係（実験スケール）

①仮支承ジャッキによる支承時（摩擦係数0.15）では沈埋函が安定となる波高は、現地スケールで50cmである。

②函底コンクリート打設後（摩擦係数0.50）では、沈埋函が安定となる波高は現地スケールで2mである。

ただし、これは沈埋函が滑動を始めた後のデータであり、動摩擦係数に対応するものである。沈埋函の滑動安定性は静止摩擦に対応するものであるため、滑動安定性を確保可能な限界波高はさらに小さい波高となることに注意が必要である。

(4) 沈埋函側部埋戻し

水理実験結果から明らかなように、摩擦係数が低い期間での沈埋函の滑動に対する安定性が非常に低

く、追加バラスト重量が数千トンの大きさになる。この結果は、施工性の面から大きな問題があるため、沈埋函側部に対する埋戻しを実施した場合の安定性について検討した。

沖波条件として既往最大波と20年確率波（4月~6月）の2種類の波を作用させた。沈埋函底部から3.5cm埋戻した場合、沈埋函は変位しなかった。また、埋戻し高さを1cm低くした場合、3.5cmの場合に比べて沈埋函に若干の振動があった。このことより、沈埋函の側部を埋戻すことにより沈埋間の耐波安定性が大きく向上し、埋戻し高さを3.5cmにすれば沈埋函は完全に安定することが明らかとなった。

3. 数値波動水路による解析

(1) 計算概要

沈埋函に作用する外力を把握し、沈埋函耐波安定重量を算出する目的で、水理実験では検討していない種々の波浪条件に対して、数値波動水路による解析を実施した。

数値波動水路は、ナビア・ストークス方程式を直接数値積分することにより流体解析を行うモデルである。自由水面の解析は、VOF（Volume of Fluid）法を用いて行い、二次元断面に対する解析では、高精度で波浪、波圧の解析を行うことが可能である。

本検討に数値波動水路を選定した理由は、以下に示すとおりである。

- ① 沈設位置での波浪の波向が沈埋函の軸方向に対して直角に作用すること。
- ② 沈埋函の軸方向の延長が100m程度あるため、軸方向の変化が少ない。

なお、解析結果を同一条件下の水理模型実験結果と比較することで、数値波動水路の解析手法の適用性についても検討した。

数値波動水路の計算条件を表-5に示す。計算周期は、各確率波高に対する周期の前後1.0sについても実施している。

表-5 計算条件

対象期間	波浪条件	波高(m) (LWL/HWL)	周期 (s)
4~10月期	10年確率	7.00/7.11	10.2,11.2,12.2
	20年確率	8.00/7.83	11.1,12.1,13.1
	既往最大	10.82/9.31	14.1
4~6月期	10年確率	3.98/4.12	8.1,9.1,10.1
	20年確率	4.46/4.39	8.4,9.4,10.4
確率波、最大波に含まれる波浪成分		0.5,1.0,2.0,3.0, 4.0,5.0,6.0	5.0,7.0,9.0, 11.0,13.0,15.0

数値波動水路の計算条件を表-6に、模式図を図-6に示す。解析モデルの水路長は1,120mとし、造波境界モデルから所要の規則波を130秒から160秒間造波して沈埋函に作用する波圧を計算した。造波境界の

反対側には減衰帯を設置して反射波の影響を取り除いた。また、沈埋函下部には用圧力が計算できるように捨石マウンドを設置した。水路はトレンチ部を再現するため、図-6に示すように1/20の一樣勾配斜面を取付けてある。

表-6 数値波動水路の計算条件

プログラム	ver.3.1	減衰帯	DEGREE	2
$\Delta X(m)$	2.00		PARAM-X	0.6
$\Delta Z(m)$	0.50		PARAM-Z	0.6
$\Delta X/L0$	0.006~0.015	捨石マウンド	WIDHT	100
差分スキーム	DONOR-0.4		空隙率	0.43
ポーラス下限値	0.001		C_D	1.0
造波モデル	造波境界条件		C_M	1.2

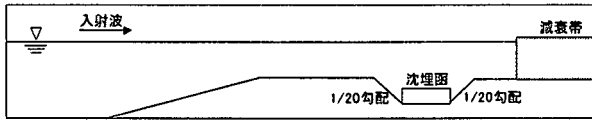


図-6 数値波動水路模式図

(2) 追加バラスト重量と滑动安全率の関係

図-7は、1号函の10年確率波の解析結果例で波浪場の空間分布を示したものである。図中のベクトルは水粒子速度ベクトルを示し流体内部の濃淡は圧力分布を示している(単位はPa)。

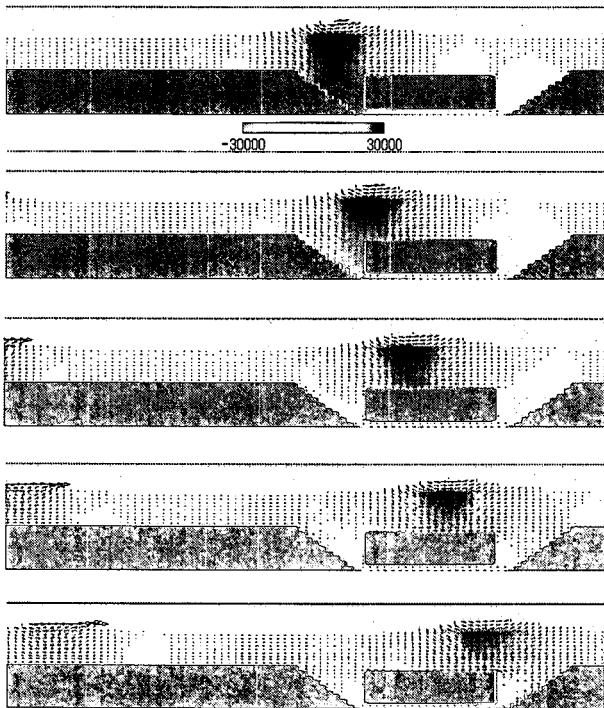


図-7 解析計算例(4~10月期, 10年確率波)

図-8および図-9は、摩擦係数0.15, 0.5の各ケースにおける数値波動水路より得られる追加バラスト量

と滑动安全率の関係を示したもので、図中には水理実験結果によって得られた追加バラスト重量が示されている。

追加バラスト重量の算定では、沈埋函の作用外力として水平力と揚圧力を分離して考え、波浪条件に対する各外力の最大値を算出している。図中の実線が水理実験結果に対応する解析結果を示している。数値波動水路による計算結果から、滑动安全率1.0とするための追加バラスト量と水理実験結果との対応関係は比較的良好である。

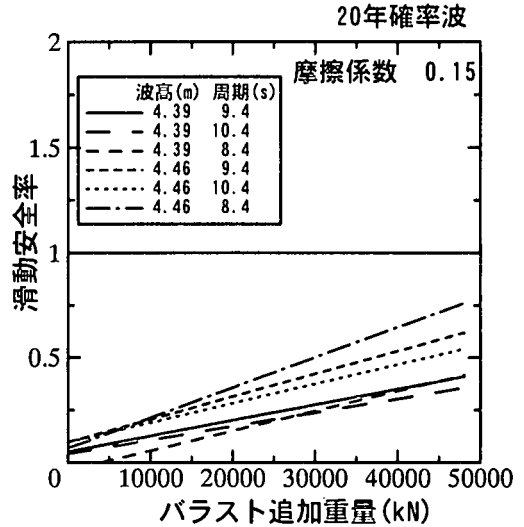


図-8 追加バラストと滑动安全率(摩擦係数0.15)

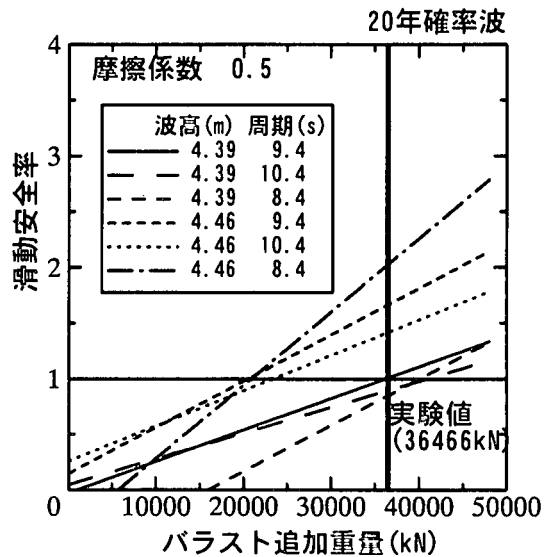


図-9 追加バラストと滑动安全率(摩擦係数0.5)

(3) 沈埋函に作用する外力の算出

沈埋函沈設時の水理模型実験および数値波動水路を用いた動揺解析の結果より、沈設直後の沈埋函は波浪により滑动する可能性が高い状態にあることが分った。ここでは、数値波動水路を用いて入射波と沈埋函に作用する波力の関係を検討した。作用波力に関しては、水理実験結果を参考に水平力と揚力を分離して解析を実施した。

図-10は、数値波動水路より得られる水平力、揚力と入射波高の関係を示したもので、波高が10月期

確率波相当の大きさになると、沈設場所で砕波し水平力および揚圧力ともに減少する傾向にある。また、4m付近で水平力および揚圧力ともに最大となる傾向にある。

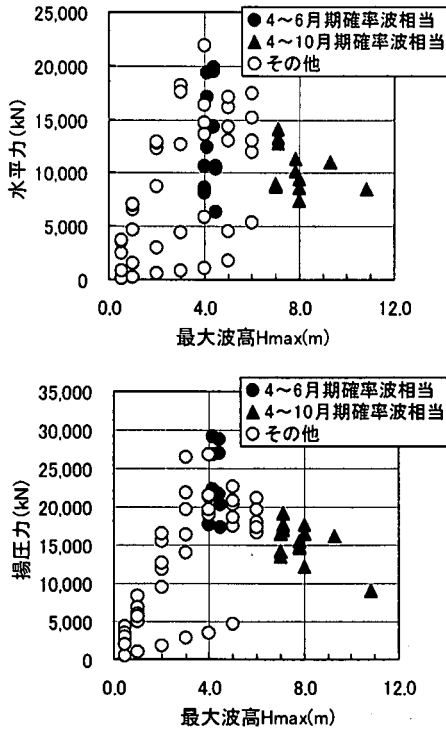


図-10 水平力・揚圧力と入射波高の関係

図-11は、周期と数値波動水路より得られる水平力、揚力の関係を示したもので、水平力は、周期11s付近で最大となり、揚圧力は、周期9s付近で最大となる傾向にある。

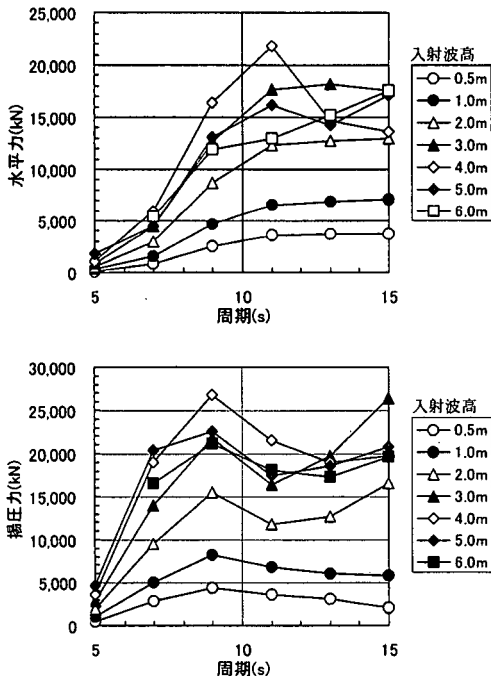


図-11 水平力・揚圧力と入射波周期の関係

4. 急速安定化工法の検討および実施

(1) 早期沈埋函耐波安定化対策の立案

沈埋函沈設時の水理模型実験および動揺解析の結果より、沈設直後の沈埋函は波浪により滑動する可能性が高い状態にあり、早期に沈埋函の耐波安定対策を施すことが必要であることが分った。図-12に早期耐波安定化を考慮したフローを示す。

なお、フロー図には示していないが、異常気象(予測外の台風発生等)が起こった場合は、沈埋函の鉛直重量を緊急に増大させるために、車道部への追加バラストを計画した。

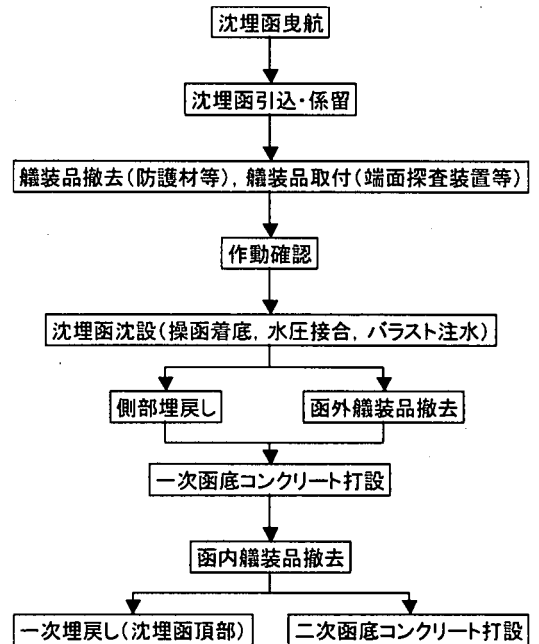


図-12 早期耐波安定化フロー

曳航および沈設作業における作業中止基準は、従来の沈埋工事の施工実績を踏まえて以下の通り設定した。作業開始の判断は、事前の気象海象予測結果に基づいて行うこととした。

表-7 作業中止基準

項目	曳航作業	沈設作業
波高	1.0m以下	0.5m以下
周期	7秒	7秒
潮流	-----	0.35m/s以下
風速	10m/s以下	10m/s以下
視程	1,000m以上	1,000m以上

(2) 早期沈埋函耐波安定化対策の実施

1号函の沈設作業は、事前の台風対策の検討並びに急速安定化対策の実施により、平成13年9月29日に曳航を開始し、所要日数8日間で平成13年10月6日に耐波安定化を無事完了した。図-13に沈設時期の港内波浪経時変化の実測値を示す。

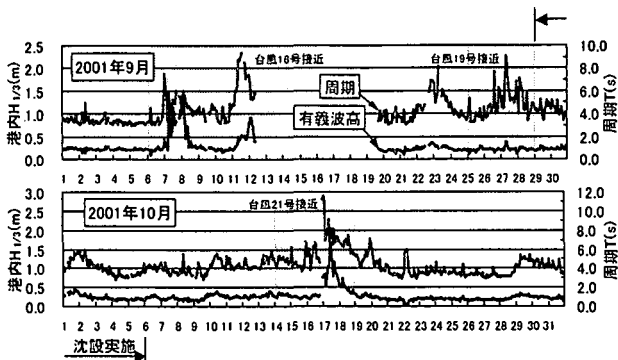


図-13 沈設作業時の港内波浪経時変化

以下に実施した急速安定化対策の概要を説明する。

①沈埋函側部の早期埋戻し（側面土圧抵抗）：曳航開始から3日後完了

函底コンクリートを早期に打設するための側部ストッパーとして、沈設機装品撤去後、直ちに夜間作業で碎石投入を陸上から実施した。また、これは掘割部の形状を考慮して沈埋函の早期滑動防止を期待したものである。

②函底コンクリートの早期打設とジャッキダウン（摩擦係数の増大）：曳航開始から6日後完了

沈設直後は、沈埋函の有効重量は極めて小さく、支承ジャッキ（摩擦係数0.15）に支持された状態ある。この状態では、滑動の危険性が高いことを水理模型実験で確認していたため、側部埋戻し完了後直ちに昼夜間作業で函底コンクリートを打設し、ジャッキダウンによる摩擦係数の増大（0.15→0.50）を図った。

③沈設ポンツーン・コントロールタワーの早期撤去（風荷重の減少）：曳航開始から5日後完了

函外機装品に作用する風荷重や波力も沈埋函の安定性に影響を及ぼすため、早期に取り外す必要があった。1号函では、1次函底コンクリート打設時に同時並行作業で函外機装品の撤去作業を実施した。

④沈埋函頂部の早期埋戻し（鉛直重量の増大）：曳航開始から8日後完了

沈設直後の沈埋函に作用する水平波力は、数値波動水路による解析結果より、周期5s以上となると急激に増大する傾向にあることを確認していた。那覇港における過去の波浪観測記録では、10月期の周期5s以上の超過確率が80%程度であり、沈埋函有効重量を増加させる目的で、支承ジャッキダウン後、直ちに頂部埋戻し（1,124m³）を実施した。

上記①～④の各作業を、気象予測と波浪観測をしながら昼夜間連続作業（曳航開始から5日間）により、沈設作業を実施した。1日目曳航直後には、翌日直ちに作動確認作業が可能となるべく、夜間作業で曳航用機装品の撤去および沈設機器類の設置を実施した。3日目沈設直後は、早急に側部埋戻しを可能とするように、夜間作業で操函ワイヤー、端面探查装置等の沈設機装品を撤去した。また、バルクヘッド等函内作業に障害となる設備の撤去時期については、沈埋函を早期に安定化させることを優先として、一次頂部埋戻し等の安定化対策完了後に実施した。

なお、異常波浪時における沈埋函内の海水緊急注水計画をたてたが、結果的に耐波安定化完了までに異常気象に遭遇することがなく、緊急追加バラストは未実施であった。

5. 結論

那覇沈埋トンネル沈設工事において早期耐波安定化対策を検討し、水理実験および数値波動水路から、沈埋函の耐波特性を明らかにした。その結果をもとに、台風時期の気象・海象条件下における1号函沈設後早期に沈埋函が耐波安定化する工法を検討した。

1号函の沈設作業は、事前の台風対策の検討並びに急速安定化対策の実施により所要日数8日間で耐波安定化を無事完了した。

参考文献

- 1) 数値波動水路の研究・開発，財団法人 沿岸開発技術研究センター，2001.