

沈埋函仮置時の安定性について

STABILITY OF IMMERSED TUNNEL ELEMENT IN TEMPORARY PLACEMENT

住田公資¹・花城盛三²・本庄隆宣³・鵜飼亮行⁴
山村和弘⁵・中屋行雄⁶

Koushi SUMIDA, Seizo HANASHIRO, Takanobu HONSHO, Akiyuki UKAI
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内閣府 沖縄総合事務局 開発建設部 (〒900-8530 沖縄県那覇市前島2丁目21番7号)

³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)

⁴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)

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)

Numerical simulation and Hydraulic tests were conducted on the characteristics of motion of Immersed tunnel element to confirm the rational method that High-fluidity concrete is placed and outfits are rigged at the mooring pier while the tunnel elements are kept afloat in temporary placement. It was found that the necessity of increasing draft in steel plate shells and the necessity that it must landed on the rubble mound when approach of Large-scale typhoon is expected.

Key Words: submerged tunnel tube, CADMAS-surf, hydraulic test, numerical simulation

1. はじめに

現在, 那覇港(那覇ふ頭地区)道路(空港線)が建設中である。本工事は, 那覇港と那覇空港, 本島南部との連絡強化を図る目的で, 那覇ふ頭地区を沈埋トンネルで横断し, 波の上地区と那覇空港を直接結びつけるための道路として計画されたものである。

周期10sを越える波浪が日常的に発生する海域である。従来の沈埋函の製作・築造工事は, 東京湾や大阪湾・衣浦湾などの静穏な内湾での施工が殆どであり, 入射波の周期が長い海域における沈埋トンネルに関する工事の実績がない。また, 本工事で用いる沈埋函は, 全ての構造部材に鋼コンクリート構造(フルサンドイッチ構造)が採用されている。本土で鋼殻を製作し, 沖縄へ海上輸送されたのちに図-1, 図-2に示す係留・仮置場所でコンクリートを打設して製作するものである。このため, 鋼殻状態から沈設するまでの間, 係留および仮置が必要となる。

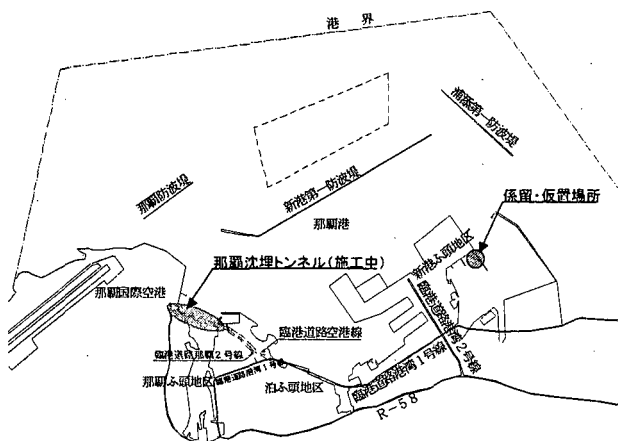


図-1 施工場所位置図(那覇港)

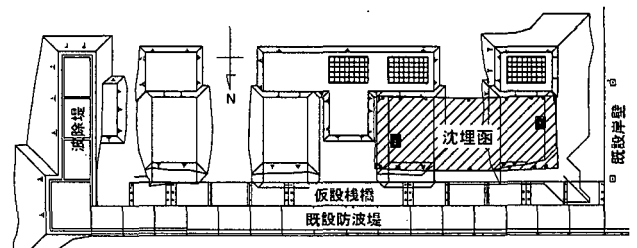


図-2 係留・仮置場所

那覇港を含む南西諸島は台風の常襲地域であり,

本報告は, 厳しい波浪条件下における沈埋函の耐波安定性を係留状態および着座仮置状態について検

討したものである。なお、図-2に示す係留場所は、波除堤を設置して静穏度を向上させ、2函同時に係留可能とする計画がなされている。ただし、本検討では、図中網掛部に仮置する場合を想定している。

2. 浮遊係留時の検討

(1) 検討概要

図-3に係留・仮置場所における沈埋函製作の施工フローを示す。当該工事の沈埋函は、製作完了後、着座仮置して出来形計測を行い、タワー、ポンツーン等の沈設用艀装のために再浮上させて係留する工程である。つまり係留状態にある沈埋函は、鋼殻状態（吃水1.0m）から艀装状態（吃水8.83m）へと吃水が推移するものである。このため、浮遊係留時は、鋼殻状態と二次艀装状態の2ケースについて耐波安定性の検討を実施した。

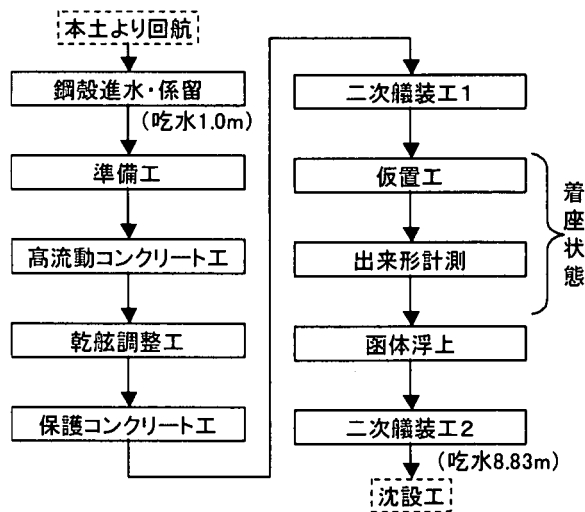


図-3 施工フロー図

浮遊状態の耐波安定性は、沈埋函の動揺解析を行い、波浪および風作用時の函体の動揺量を算出し、係留索および係船柱の安全性について評価するとともに、函体動揺時の岸壁やマウンドなどの周辺施設とのクリアランスについても検討した。動揺解析手法は、周波数毎に求められた流体力および波浪強制力をもとに、これらと非線形係留力とを運動方程式に代入し、時系列シミュレーションにより数値的に解く方法を使用し、解析に用いる流体力は、三次元特異点分布法により算出している。

(2) 解析条件

a) 沈埋函

動揺シミュレーションに用いた沈埋函諸元として二次艀装時を想定した値を表-1に示す。なお、当該工事において沈設される沈埋函は合計8函であり、各函の長さは90m~92mと多少の違いがある。ここでは、90mを条件とした場合を例として示す。

表-1 沈埋函諸元（2次艀装時）

沈埋函諸元	記号	単位	値
函長	L	m	90.00
幅	B	m	36.94
高さ	H	m	8.90
吃水	D	m	1.00
重心高さ	KG	m	4.45
排水量	Δ	kN	33,578
横メタセンター高さ	GMr	m	109.76
縦メタセンター高さ	GMp	m	671.05
ロール慣性モーメント	Ix	m	410,993
ピッチ慣性モーメント	Iy	kN・m ²	22,870,069
ヨー慣性モーメント	Iz	kN・m ²	26,321,794

b) 波浪および風

表-2および表-3には、沈埋函各状態の外力条件を示す。検討に用いた波浪および風条件は、那覇港の波浪観測データをもとにした極値解析結果より設定している。沈埋函は、当該海域の冬季風浪を避け11月以前に本土から回航して係留することを想定して、鋼殻状態の係留期間として9~10月期の確率波高とそれに対する周期を設定している。また、艀装状態の係留期間は、4~10月期の艀装・沈設計画時期を想定している。

表-2 鋼殻状態の外力条件

対象時期	風速	波高	周期	再現期間
	U_{10} (m/s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	
9~10月期	22.90	0.76	10.99	5年
	26.38	0.79	11.11	10年
	29.85	1.08	12.04	20年

表-3 二次艀装状態の外力条件

対象時期	風速	波高	周期	再現期間
	U_{10} (m/s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	
4~10月期	32.57	0.84	12.10	20年

図-4に動揺シミュレーションの座標系を示すが、入射波向および風向は、種々の方向についてチェックを行い、沈埋函の動揺に及ぼす影響が最も高い方向を設定した。

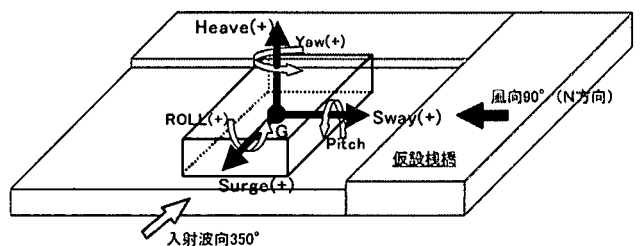


図-4 動揺シミュレーションの座標系

c) 係留システム

図-5および図-6に係留システム計画図を示す。図-5は、鋼殻状態の沈埋函を対象としており、万一

の沈埋函流出防止を考慮して、係留用ケーソンを3函使用して係留する。図-6は、二次艀装時であり、沈埋函の引出・曳航作業との関係から、係留用ケーソンを1函のみ使用して係留する。

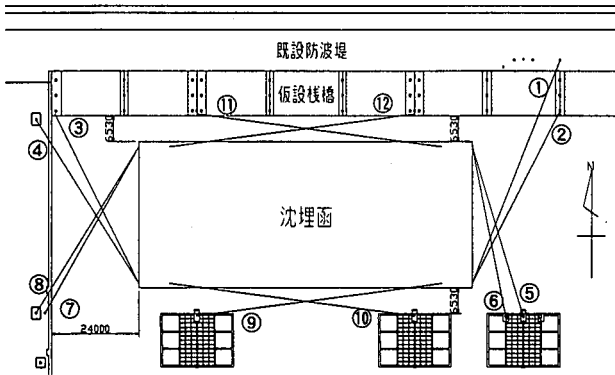


図-5 鋼殻状態の係留システム

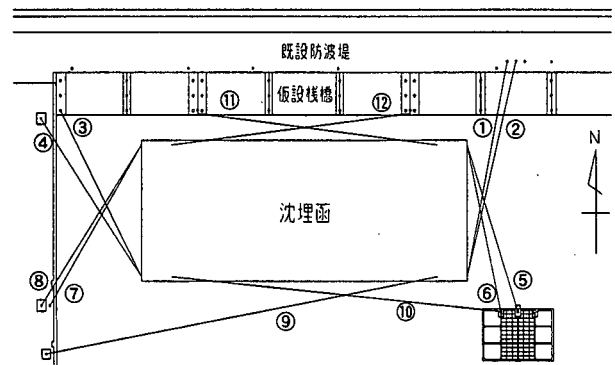


図-6 二次艀装状態の係留システム

d) 係留索

係留索は、プレテンション負荷後のナイロンロープを使用した。検討では、索径をφ60mm、φ80mm、φ100mmと変えて合理的なシステムの検討を実施した。図-7に係留索の性能曲線を示す。

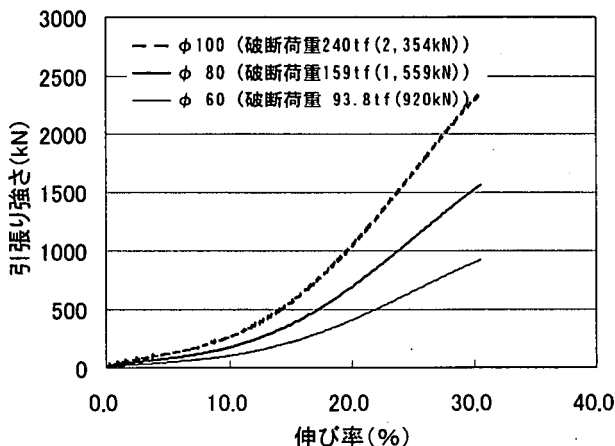


図-7 係留索の性能曲線

e) 安全性評価基準

係留システムの安全性評価基準を以下に示す。

- ・係船柱の耐力は、35tf (350kN) 未満
- ・沈埋函ピットの耐力は70tf (700kN) 未満

- ・係留索の破断荷重に対する安全率は5以上
- ・係留ケーソン、仮設棧橋とのクリアランスは1.0m以上 (図-5参照)
- ・底面マウンドとのクリアランスは0.5m以上 (二次艀装状態のみ) (図-8参照)

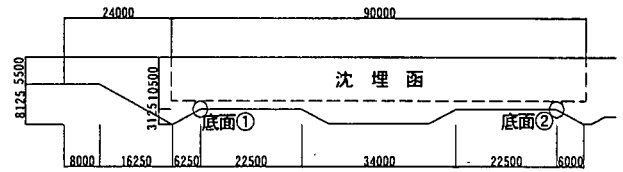


図-8 沈埋函係留位置断面図

(3) 解析結果

a) 鋼殻状態の耐波安定性

図-9、図-10に10年確率波および20年確率波の外力条件下における動揺解析結果として係留索張力の最大値を示す。図中に示す係留索番号は、図-5に示すとおりである。係留索番号①～④は、仮設棧橋からの風に対して抵抗する索であり、20年確率波では、係留索張力および係船柱の耐力から判断し、φ100mmが必要となることがわかった。このように鋼殻時は、波力よりも風荷重が沈埋函の動揺に影響を及ぼす。

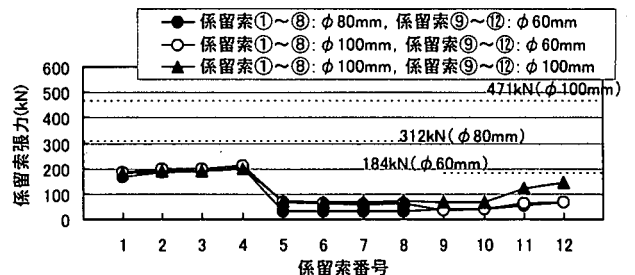


図-9 係留索張力の最大値 (10年確率波)

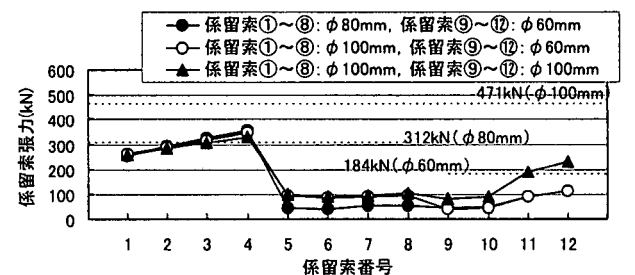


図-10 係留索張力の最大値 (20年確率波)

表-4には、20年確率波相当の外力に対する沈埋函動揺量の最大値を示す。表中には、高流動コンクリート打設によって、鋼殻状態から吃水が1.0m増加した場合 (吃水2.0m時) を想定した解析結果も示す。この結果、風荷重によるSway, Yaw動揺量が大きいことがわかる。また、吃水の増加によりその動揺量が減少するが、これは、吃水が増加することにより浮体の造波抵抗力が増加するためと考えられる。こ

れより、鋼殻状態で20年確率波の外力が来襲すると予想される場合は、緊急に鋼殻内部にコンクリート等を打設し、吃水を大きくする必要があると考えられる。

表-4 沈埋函の動揺量 (20年確率波)

係留索 番号	鋼殻状態 (吃水1.0m)			吃水 2.0m時
	φ80mm	φ100mm	φ100mm	
①~⑧	φ80mm	φ100mm	φ100mm	φ100mm
⑨~⑫	φ60mm	φ60mm	φ100mm	φ100mm
Surge(m)	-1.66	-1.77	-2.01	-2.12
Sway(m)	-4.72	-3.93	-3.93	-3.39
Heave(m)	-0.76	-0.76	-0.76	-0.76
Roll(°)	0.54	0.54	0.54	0.53
Pitch(°)	1.39	1.38	1.38	1.38
Yaw(°)	2.53	2.42	-2.33	-2.31

b) 二次艀装状態の耐波安定性

図-11に二次艀装状態の20年確率波に対する動揺解析結果として底面マウンドとのクリアランスを示す。このときの係留システムは、図-6に示す係留索番号①~⑫の全てにφ100mmを使用している。また、縦軸の底面とのクリアランスは、図-8に示すとおりである。図中の白丸は、20年確率波に対する結果であり、解析は、20年確率波高に対して周期を変化させて、周期と動揺量の関係について確認している。

この結果より、20年確率波の外力が作用した場合は、底面マウンドとの接触が起こることが予想されるため、その対策として、緊急にバラストを追加し着座仮置きさせる方法を提案した。

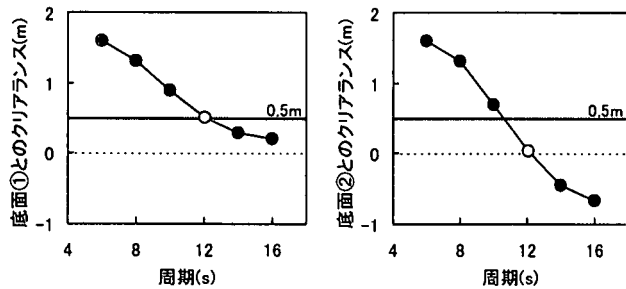


図-11 底面マウンドとのクリアランス

このことから、函体には三次元的に波力が作用することが予測される。そこで、①2次元断面モデルである数値波動水路 (VOF法) を用いた数値シミュレーション、②三次元的な波力特性が扱える特異点分布法による解析を行い、水理模型実験を実施して各解析手法を評価することとした。最終的な耐波安定性は、これらの結果を総合的に評価して滑動に対する安定性を検討している。

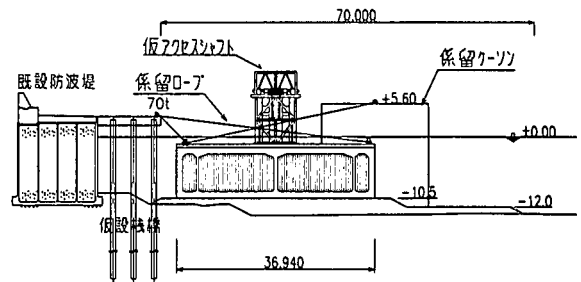


図-12 着座仮置き状況

(2) 検討条件

検討に用いた波浪条件を以下に示す。検討では、函体の安定性に及ぼす周期の影響が懸念されたことから、10年確率波を中心に、20年確率波レベルを含む±2.0sの周期について検討している。

- ・潮位：H.W.L.+2.10m, L.W.L.±0.0m
- ・水深：-13.3m
- ・波高： $H_{max}=1.78m$ ($H_{max}=1.8H_{1/3}$, $H_{1/3}=0.99m$ であり、 $H_{1/3}$ は仮置き場所に波除堤がない場合である。)
- ・周期： $T_{1/3}=11.2 \pm 2.0s$ (10年確率波周期は11.2s, 20年確率波周期は12.1s)

なお、三次元特異点分布法では、周期、波高に対する影響を検討する目的として、対象とする波浪条件をより幅広い範囲に設定した。表-5には、沈埋函の有効重量を示す。

表-5 沈埋函の有効重量

函体全重量	29,600tf (290,277kN)	空中重量 (保護コン、道床コン含む)
バラスト重量	2,082tf (20,417kN)	函内バラスト設備を全て使用した場合
浮力	30,509tf (299,191kN)	-----
有効重量	1,333tf (13,072kN)	函体全重量+バラスト重量-浮力

(3) 計算方法

a) 数値波動水路

数値波動水路は、「数値波動水路の耐波設計への適用性に関する研究会」において開発された波と構造物との相互干渉による非線形問題を迅速かつ容易に解析するための数値モデルである。解析手法としては、NASA-VOFを用いた流体運動のナビエ・ストークス方程式を直接解くものである。(磯部ら、1999¹⁾) 今回の検討でモデル化した計算領域を図-13に示す。数値波動水路における水平方向のメッ

シユ間隔は、波長の1/80~1/100程度を考慮して1.5mと設定した。鉛直方向のメッシュ間隔は、入射波高の1/5程度の大きさおよびマウンド等の影響を考慮して0.2mと設定した。モデルに用いる水路の高さは、波または飛び出した水塊の最高到達高さ確保しなければならないことから、波の峯が到達し得ないと考えられる+3.0m迄の領域に加えて、水塊の飛び出し防止対策として5.0mメッシュを1メッシュ分追加した。

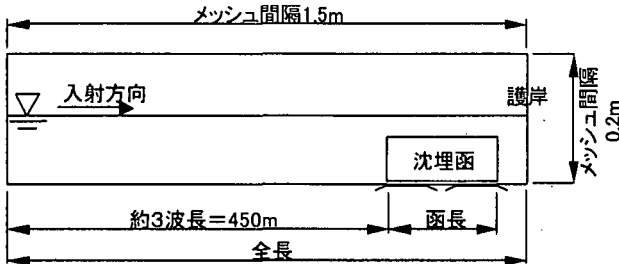


図-13 数値波動水路におけるモデルの構築

b) 三次元特異点分布法

三次元特異点分布法は、流体中の物体表面を要素分割し、グリーン関数を用いて要素内のわき出しを計算することにより速度ポテンシャルを求める計算手法である。速度ポテンシャルから物体表面の圧力を計算し、流体力、波力を求めることができる。しかし、ポテンシャル理論であるため、非線形性が強い現象には適用限界がある。ただし、本検討におけるモデルでは反射波の取り扱いが出来ない。

c) 計算結果の整理方法

数値シミュレーションにおいては、計算各点において時々刻々の水位変動、圧力等が計算される。本検討では、各点の圧力を加えあわせることで、1函あたりの波圧合力の時系列データを作成し、それを用いて水平波圧合力 F_H 、鉛直波圧合力 F_V を求めた。そして、函体の耐波安定性は、次式(1)に示す滑動合成波力 F_c を用いて検討した。

$$F_c = F_H + \mu \cdot F_V \quad (1)$$

ここに、 μ は摩擦係数である。本検討では、函体と捨石マウンドの間の μ として、鋼材と石材の摩擦係数である0.5を用いることとした。滑動限界重量 W は、この滑動合成波力から次式(2)のようにして求めた。

$$W = F_H / \mu + F_V \quad (2)$$

(4) 計算結果

数値波動水路によって得られた滑動合成波力から推定される滑動限界重量を図-14に示す。図中には、検討対象の沈埋函有効重量を破線にて併せて示した。この結果より、全ての検討ケースにおいて、計算で必要とされる函体重量が有効重量を上回っている。すなわち着座仮置のためにはさらに追加バラストの打設が必要である。

三次元特異点分布法による滑動限界重量を図-15

に示す。この結果よりH.W.L.時の周期8.2s~11.2sで滑動限界重量が設定した有効重量よりも大きくなる。これは、水平波力が周期8.0s~9.0sで極大となる周期特性が見られたことによるものであり、三次元計算の特性が表れたものと考えられる。

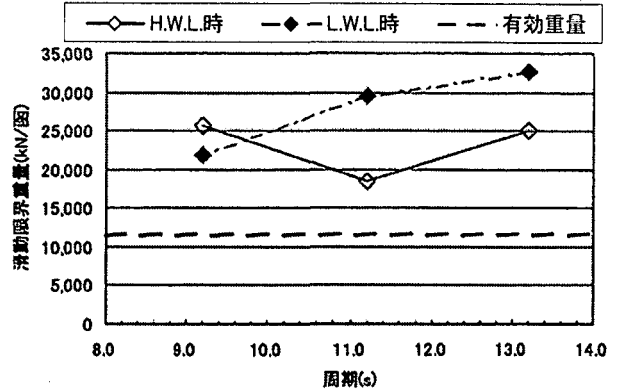


図-14 滑動限界重量 (数値波動水路結果)

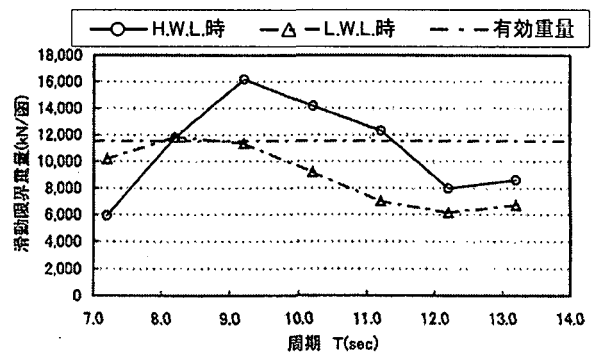


図-15 滑動限界重量 (三次元特異点分布法結果)

(5) 水理模型実験

a) 実験方法

実験は、長さ55m×幅1.0m×高さ2.0mの不規則波造波水路を用いて行った。実験は、模型函体の三次元性が耐波安定性にどのような影響を及ぼすかについて評価することが主たる目的であるため、水路側壁の影響を小さくする必要がある。そこで、水路幅と模型函体の大きさおよび縮尺効果を考慮して、模型縮尺を1/60に設定した。図-16に水路内模型配置を示す。

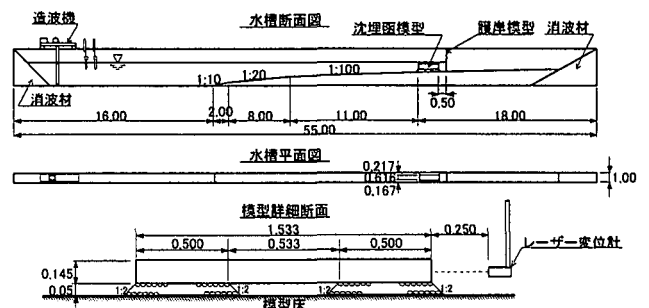


図-16 実験水槽模型配置

水路内には仮設床を設け、沈埋函模型はその仮設

床を海底と見なして設置した。沈埋函長辺方向の護岸は水路のガラス面が対応するものと考えて、模型の水路幅方向の位置を決めた。また、短辺方向の護岸は、検討対象沈埋函の仮置位置にあわせて反射壁を設置した。

実験に作用させた波浪は規則波であり、潮位はH.W.L.、L.W.L.の2通りとし $H_{1/3}=1.78\text{m}$ 、 $T_{1/3}=11.2\text{s}$ を使用した。波作用時の沈埋函模型の挙動は、レーザー式変位計によって水平方向の変位を測定するとともに、目視によって観察した。

b) 実験結果

水平変位の測定および目視観測の結果、沈埋函が実質移動するのは、函体が浮き上がることによって生じることが確認された。実質的な移動が発生する前は、非常に微小ではあるが、波による水粒子運動に応じた水平方向の振動が見られた。そこで、実質的な移動が発生するのは目視観察によって函体が浮き上がった時と定義し、函体の有効重量とその時の最終変位量の関係から滑動限界重量（安全率1.0）を定めた。水理模型実験によって得られた滑動限界重量は、H.W.L.時で2,680tf（26,589kN）、L.W.L.時で1,675tf（16,436kN）であった。

写真-1および写真-2は、H.W.L.時における波の作用状況を示している。波は写真の左側から右側に進行し、函体上および函体周辺で平面的な波高分布を持っていることがわかる。



写真-1 実験時の波浪作用状況（側面から撮影）

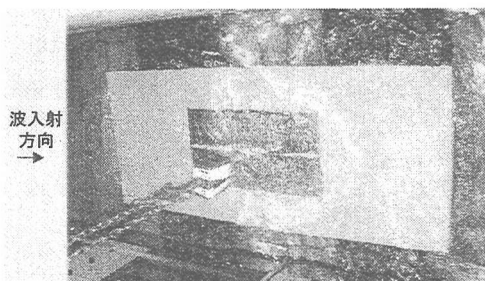


写真-2 実験時の波浪作用状況（上面から撮影）

(6) 検討結果のまとめ

数値シミュレーションおよび水理模型実験の結果を比較検証する。表-6は、10年確率波の外力に対する滑動限界重量を示している。この結果より、滑動限界重量および数値シミュレーションに関する評価を以下にまとめる。

表-6 滑動限界重量の比較

検討手法	H.W.L.時	L.W.L.時
数値波動水路	2,455tf (24,084kN)	3,000tf (29,434kN)
三次元特異点分布法	2,018tf (19,801kN)	714tf (7,003kN)
水理模型実験	2,680tf (26,589kN)	1,675tf (16,436kN)

- ・本検討で得られた滑動限界重量は、水理模型実験結果の2,680tf（26,589kN）である。
- ・水理模型実験では、滑動限界重量はH.W.L.時に大きくなる。3次元特異点分布法で得られた滑動限界重量は水理模型実験と同じ傾向を示すが、数値波動水路では逆にL.W.L.時の滑動限界重量が大きくなった。これは、函体に作用する波力特性が三次元特性を有していたことを反映したものと考えられる。
- ・三次元特異点分布法におけるL.W.L.時の算定結果がH.W.L.時に比べて相対的に実験結果と差異が大きくなることは、L.W.L.時では沈埋函の天端水深が1.7mとなり、入射波の非線形性を考慮できていないことに関連していると考えられる。
- ・本検討のような3次元性の強い現象に対しては、三次元特異点分布法の計算値を実験結果によって補正する（補正率1.3）ことで実用で用いることが可能であると考えられる。

これらを踏まえて1号函築造工事では、大型台風来襲による緊急着座仮置の対策として、既往最大波（ $H_{\max}=1.17\text{m}$ 、 $T=14.1\text{s}$ ）に対しても安定となる滑動限界重量を設定した。なお、実際の施工では、図-2に示すとおり係留・仮置場所に波除堤を設置して、耐波安定性を別途向上させることとした。1号函では、緊急追加バラストは沈埋函車道部へ打設する計画・準備を実施したが、異常気象に遭遇することなく平成13年10月に沈設を無事完了した。

4. 結論

鋼殻時および二次艀装時の合理的な浮遊係留方法を検討し、鋼殻時に大型台風（20年確率波相当）の接近が予想される場合は、早期に吃水の増大を図る必要がある。二次艀装時には、着座仮置が必要となることがわかった。

本検討結果は、当該事業における今後の2号函以降の施工へも反映させるものとする。

参考文献

- 1)磯部雅彦, 高橋重雄, 余 錫平, 榊山勉, 藤間功司, 川崎浩司, 蔣 勤, 秋山 実, 大山洋志: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究, 海岸海洋開発論文集, Vol.15, pp.321-326, 1999.
- 2)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.