

大型船舶航行による沈埋函影響について

ON THE STABILITY OF IMMERSED TUNNEL ELEMENT FOR THE NAVIGATION OF LARGE VESSEL

浦辺信一¹・轟正彦²・前幸地紀和²・白石悟³

小堀共生⁴・中屋行雄⁵

Shinichi URABE, Masahiko TODOROKI, Norikazu MAEKOUCHI, Satoru SHIRAIISHI
Tomoo KOBORI, Yukio NAKAYA

¹正会員 工修 内閣府 沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 (〒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・空港整備事務所 (〒900-0001 沖縄県那覇市港町2丁目6-11)

³正会員 博(工) 財団法人 沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

⁴工修 株式会社ドラムエンジニアリング 設計部 (〒102-0083 東京都千代田区麹町4丁目5番21号)

⁵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)

Naha immersed tunnel will cross under the port entrance of the Naha wharf, Okinawa, where large liner ships are in service. Fluid power caused by the large vessel was expected to influence strongly against the stability of the tunnel element during construction. In this report, the stability of the element is investigated through three-dimensional numerical simulation, in which speed of the large vessel is assumed to be constant. It is confirmed from the simulation that a large up-lift force is generated by the large vessel when it passes above the element, and that increase of navigation speed reduces the stability of the element against sliding.

Key Words: immersed tunnel, 3D numerical symulation, large vessel, up-lift force

1. はじめに

那覇沈埋トンネルは、那覇埠頭港口部を8函の沈埋函で横断する総延長約1.1kmの自動車専用トンネルである。沈埋函は、沈設後2週間程度は仮置状態となり、仮支承ジャッキによる支承期間、函底コンクリートの打設期間は、沈埋函水中重量が比較的軽くなるため、様々な外力の影響を受けやすくなる。著者らは、これまで波浪条件下に於ける沈埋函の早期安定化対策を検討し、水理実験および数値波動水路を用いて沈埋函の耐波特性を明らかにし、急速安定化施工の方法を検討した^{1),2)}。

一方、沈埋トンネルの設置海域は、大型の定期船が就航しており、沈埋トンネルの施工延長が延びるに従って航行船舶の流体力による函体への影響検討が必要となる。

図-1は、沈埋トンネルの断面を示したものである。施工は、定期船航路(航路幅130m)を横断する形で計画されており、沈埋トンネルの計画断面位置では、3号函の直上を定期船が航行することになる。このため、2, 3号函施工時は、施工途中段階に於いて、適切な航路切替時期の設定を行う必要があった。本論文は、施工途中の沈埋函上を大型船舶が航行する場合の沈埋函に作用する外力を推定し、沈埋函の滑動に対する安定検討を行ったものである。

2. 検討条件

(1) 沈埋函および大型航行船舶の諸元

那覇港(那覇ふ頭地区)を航行する大型船舶の諸元を表-1に示す。

表-1 航路航行船舶

船舶名	A	B	C	D
船種	フェリー	貨物船	フェリー	フェリー
総トン数(MT)	8,052	6,562	6,586	4,945
満載排水量(MT)	10,384	---	9,907	8,434
全長(m)	151.13	149.57	145.61	140.81
型幅(m)	23.00	23.00	22.00	20.50
型深(m)	13.67	7.35	14.00	14.00
満載吃水(m)	6.42	6.50	6.26	6.21
入港時速力(knot)	7	6	7	11
出港時速力(knot)	10	6	10	10

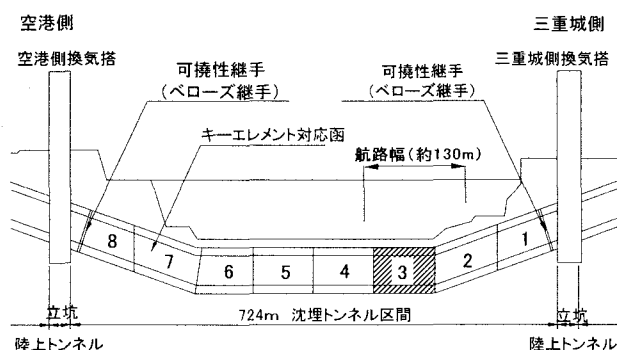


図-1 沈埋トンネル計画断面図

聞取調査によって得られた4隻の船舶は、全長140m～150mであり、港内航行速度6knot～10knotである。今回の検討では、『船舶A』が、全長、型幅および吃水ともに他の船舶に対して大きいため、この船舶が航行する場合を想定して各検討を実施している。

また、検討対象の沈埋函は、図- 1の断面図に示す3号函であり、函高さ8.9m（保護コンクリート厚含む）、函幅36.94m、函長90mの諸元を有するものである。

(2) 沈設作業フローおよび沈設後の安定重量

沈埋函の沈設作業フローを図- 2に示す。沈埋函は、沈設・水压接合完了後、函内外作業を行い、支承ジャッキダウン完了および側部埋戻しの実施後に安定化するものである。

本検討では、函外艀装品および主・副タワー撤去後の航路切替時における安定検討を想定している。表- 2は、沈設後の沈設工程計画に沿った沈埋函有効重量の推移を示している。沈埋函の安定性検討に必要なとなる数値は、各作業段階における沈埋函の有効重量である。

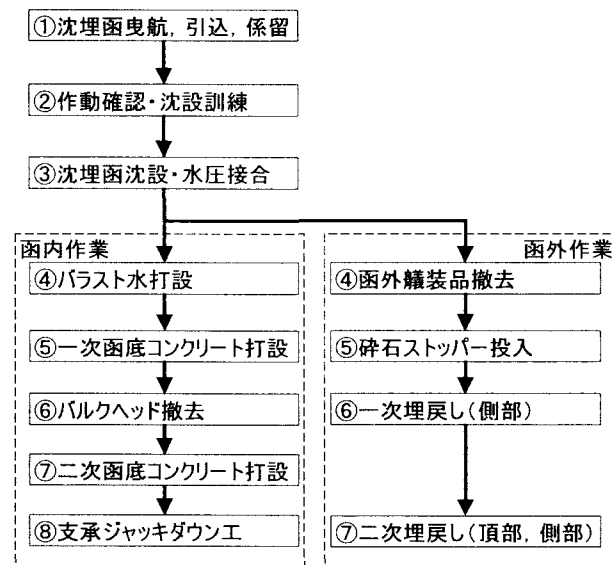


図- 2 施工フロー

表- 2 沈埋函有効重量の推移

沈設開始 後の日数	主要重量 (kN)				沈埋函 有効重量 (kN)
	沈埋函	艀装品	バラスト	浮力	
3日目※	283,304	3,628	12,160	-293,415	5,678
4日目※	283,304	3,628	23,889	-293,415	17,407
5日目※	283,304	3,236	23,889	-293,415	17,015
6日目※	283,304	2,177	23,889	-293,415	15,955
7日目※	283,304	1,275	23,889	-293,415	15,053

- ※ 3日目：沈埋函沈設後
- ※ 4日目：バラスト打設後
- ※ 5日目：函上艀装品撤去後
- ※ 6日目：主タワー撤去後
- ※ 7日目：副タワー撤去後

3. 沈埋函上を大型船舶が航行する場合の沈埋函安定検討

(1) 検討概要

沈埋函3号函沈設時において、主・副タワー撤去後を想定し、沈埋函直上部を大型船舶が航行する場合の沈埋函作用外力を解析するとともに、沈埋函の滑動安定性について検討を行ったものである。図- 3に検討フローを示す。

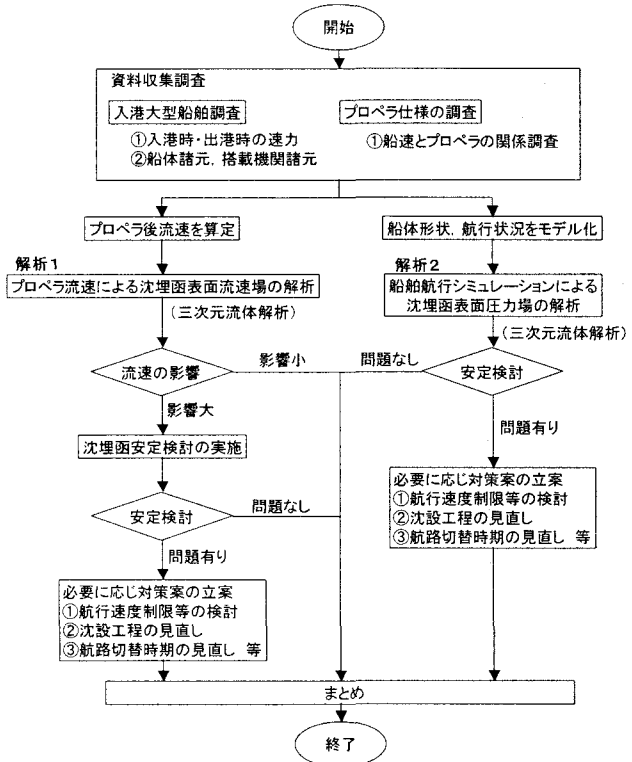


図- 3 検討フロー

本検討では、入港船舶調査およびプロペラ仕様の調査を実施し、航路航行時の船速およびプロペラ流速を求めた。本検討課題のような事象では、航行船舶が引き起こす流速場の変化を把握する必要がある。船舶形状と航行速度をパラメータとして船舶航行シミュレーションを行った。さらに、プロペラ流速が沈埋函の滑動安定性に及ぼす影響について確認した。なお、沈埋函直上を船舶が航行するため、航走波の影響はないものとして検討は省略した。

(2) プロペラ後流による影響

流速場の解析に用いるプロペラ後流速を算定し、三次元流体解析による流速場の解析を実施した。プロペラ後流速の算定結果を表- 3に示す。

表- 3 プロペラ後流速算定結果

船舶	状態	航行速度	プロペラ後流速
A	入港時	7 knot	5.44 m/s
	出港時	10 knot	6.37 m/s
B	入出港時	6 knot	3.09 m/s

a) 数値解析

流速場の計算は、三次元のNavier-Stokes方程式を用いて行った。乱流モデルは、 $k-\varepsilon$ 方程式を用いた。数値計算は、コントロールボリューム法を用いた。基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \\ &+ G_S + G_T - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (1c)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \\ C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_S + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (1d)$$

$$G_S = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (1e)$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (1f)$$

$$R_f = -\frac{G_T}{G_S + G_T} \quad (1g)$$

ここで、 X_i は位置座標、 u_i は X_i 方向の流体速度、 t は時間、 ρ は流体または固体の密度、 p は流体の圧力、 μ は粘性係数、 g_i は加速度、 β は体積膨張率、 T は流体または固体の温度、 k は乱流エネルギー、 ε は乱流消失率を表す。また、 σ_k 、 σ_ε 、および $C_1 \sim C_3$ は、経験定数である。

なお、解析モデルでは、自由表面を考慮していない。また、流体境界は自由透過に設定し、底面境界（固体境界）は、層流であればノースリップ条件、乱流であれば対数則となるように設定した。

解析入力条件は、プロペラ後流速とその発生位置となる。プロペラ後流速は、『船舶A』（表-1参照）出港時の数値6.4m/s（表-3参照）を用いた。プロペラの取付位置は、水面下5m位置において一様流が発生するものと仮定した。解析モデルではプロペラ位置を移動させることができないため、プロペラ位置を固定して流出条件を設定し、解析時間は流出開始から10秒間程度までとした。プロペラ位置は、港外側トレンチ法尻位置とトレンチ法肩位置の2ケース実施した。

b) 解析結果

図-4のグラフは、トレンチ法肩位置から一様流を噴出させた場合における、沈埋函表面の圧力変化

（水平力および鉛直力）を示したものである。

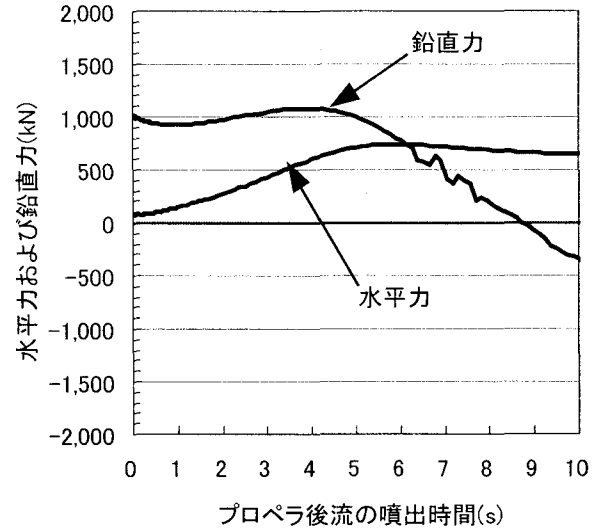


図-4 プロペラ流速による沈埋函表面の圧力変化

解析結果より、プロペラ後流による沈埋函滑動への影響は問題のないレベルであると判断できる。

- ① 作用水平力（最大750kN程度）は、艀装品撤去後の沈埋函水平抵抗力2,300kNと比較して小さく滑動に対して影響の小さいレベルである。
- ② 作用鉛直力は、そのほとんどが鉛直下向きに作用し、揚圧力方向には作用する可能性が低いことを確認した。
- ③ 沈埋函天端表面流速は、最大で0.5knot程度である。

(3) 船舶航行シミュレーションによる沈埋函表面圧力場の解析

航行船舶による沈埋函に作用する流体力は、鈴木³⁾および伊藤ら^{4),5)}によって研究が行われ作用外力の傾向が確認されている。鈴木³⁾によると、一様水深を等速で航行する船舶は、船首前面および船尾背面で正圧が発生し、船体下では負圧が生じていることを示している。

伊藤ら^{4),5)}は、沈埋函に作用する水平・鉛直力は、船の速度と吃水に大きく左右されることを確認している。航行速度の増加に伴い、船首・船尾の圧力が増加するため鉛直力・水平力が増加する。また、航行船舶の吃水が大きいほど鉛直力・水平力が大きいことが確認されている。

このような既往研究成果を踏まえて本検討においても、航行速度と吃水の影響を考慮できるように、船舶が航行する状況をモデル化してシミュレーションを実施した。

a) 解析条件

本検討では、大型船舶が沈埋函直上を通過するに伴い函体に作用する揚圧力、水平力を算定するために、三次元流体解析を用いた船舶航行シミュレーションを実施した。航行船舶は、一定速度で移動する移動浮体として取り扱った。移動浮体は、以下の

式で表現した。

$$\int_{V_i} \nabla v_f d^3x = - \int_{S_{bi}} v_B n_B d^2x \quad (2)$$

ここで、 V_i は要素*i*内の流体部分体積、 v_f は流体速度ベクトル、 v_B は物体移動速度、 n_B は外向を正とする単位法線ベクトル、 S_{bi} は要素*i*と物体表面の交わり部分の面積である。

流体境界は自由透過に設定し、底面および水面下部の移動浮体表面（固体境界）は、層流であればノースリップ条件、乱流であれば対数則を適用した。なお、本検討の解析モデルは、自由表面は考慮していない。船体形状は、船体排水量を考慮して図-5および表-4に示すような矩形形状を組合せた浮体としてモデル化を行った。

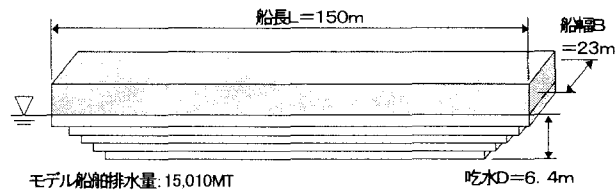


図-5 船舶形状のモデル化イメージ

表-4 移動浮体の解析条件

船舶形状	矩形形状組合せモデルを仮定
長さL	150m
幅B	23m
吃水D	6.4m
移動速度V	6, 8, 10knot

b) 解析結果

沈埋函に作用する水平方向および鉛直方向の圧力変動を図-6に示す。ここに示したケースは、船舶航行速度が最も大きい10knotの場合の解析結果である。図-7は、図-6に示した水平力および揚圧力をもとに、艀装品撤去後の沈埋函有効重量（表-2参照）に対する滑動安全率計算結果である。函体の滑動に対する安定性は、次式に示す安全率を算定して評価している。

$$F_s = \frac{(W - P_U) \times 0.15}{P_F} \quad (3)$$

ここで、 F_s は滑動安全率、 W は沈埋函の水中有効重量、 P_U および P_F は、数値解析によって得られた沈埋函に作用する揚圧力および水平力を表す。

図-6において、水平力は、沈埋函の港外側および港内側側面の外力差を算出したものである。大型船舶出港時を想定している現在のモデルでは、正值が港外側方向へ作用する外力を表している。変動鉛直力は、沈埋函上面に作用する外力を示しており、負の値が沈埋函に作用する揚圧力である。

この結果より、鉛直力は、船舶が港内側トレンチ法肩部に差し掛かったとき、下向きの大きな値を示し、沈埋函上を通り過ぎるまでは、大きな上向きの

力が作用している。水平力は、船首が沈埋函中心位置に差し掛かったとき最も大きくなると考えられる。この傾向は、既往知見と一致するところである。

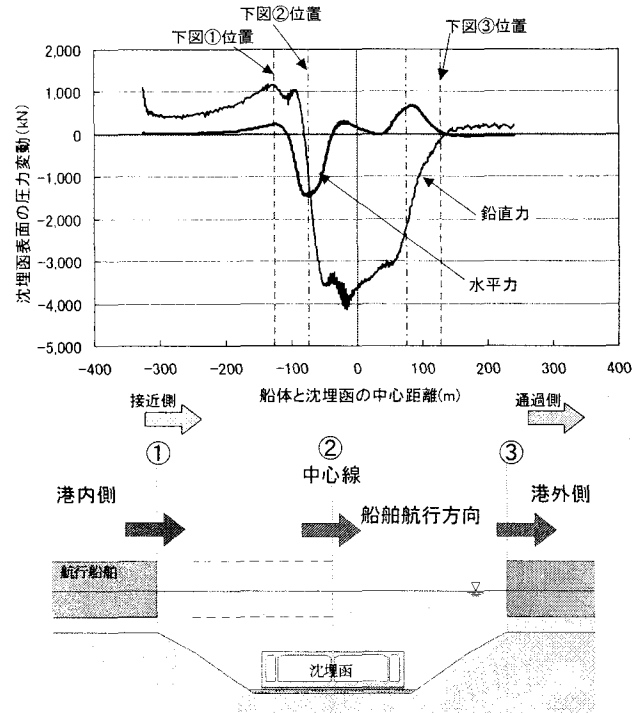


図-6 航行船舶に伴う沈埋函に作用する変動水平力および鉛直力（航行速度10knot時）

図-7では、沈設後の沈埋函滑動抵抗力は、自重による摩擦抵抗や水圧接合力による抵抗が考えられるが、ここでは、自重による摩擦抵抗のみを考慮して滑動安定性の評価を行った。函底面部の摩擦係数は、支承ジャッキ支持状態として0.15を用いている。

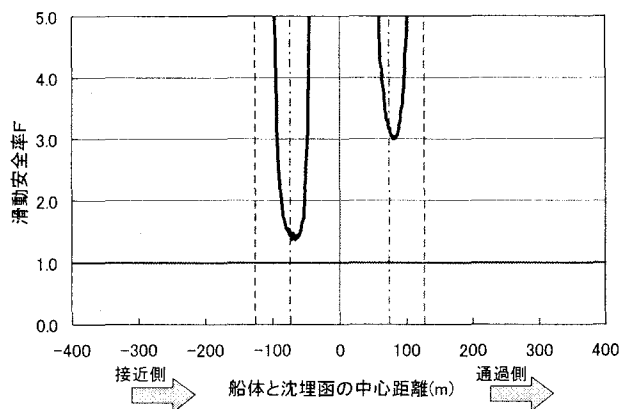


図-7 滑動安全率の変化（航行速度10knot時）

解析結果より、大型船舶が3号函直上を航行する速度が10knotの場合、船首が沈埋函中心位置に差し掛かる時に滑動安全率は1.38で最小値を示した。このときの水平力は1,373kN、揚圧力2,381kNである。

鈴木³⁾および伊藤ら^{4),5)}による研究から、一定速度で航行する船舶によって沈埋函に作用する水平力および揚圧力は、船体の吃水とともに船舶の航行速度

に大きく左右されることがわかっている。本検討では、那覇港（那覇ふ頭地区）に入出港する船舶の吃水には大きな変化がない（表- 1参照）ことから、解析で設定する船舶の航行速度を入出港船舶の最小航行速度6knotから最大航行速度10knotまで変化させて、航行速度と沈埋函滑動安全率の関係を検討した。図- 8は、船舶航行速度を6knot～10knotまで変化させて滑動安全率を計算した結果を示したものである。

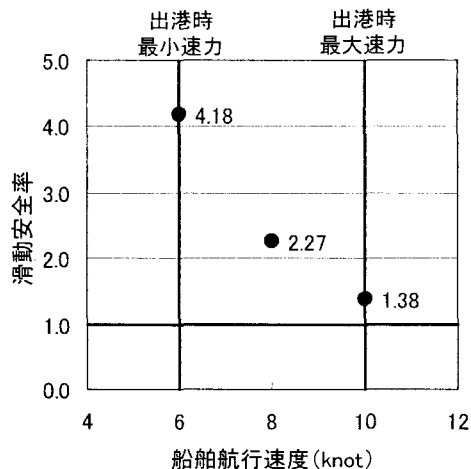


図- 8 航行速度と滑動安全率の関係

つぎに、船舶航行ルートが、沈埋函の中心位置から離れることによって、滑動安全率に及ぼす影響を示したものが図- 9である。なお、船舶航行位置と沈埋函施工位置に距離がある場合は、船舶の航走波による影響を確認する必要がある。本報告書には示していないが、航走波による作用外力は、三次元特異点分布法による流体力計算で算出しており、影響が小さいことを確認している。

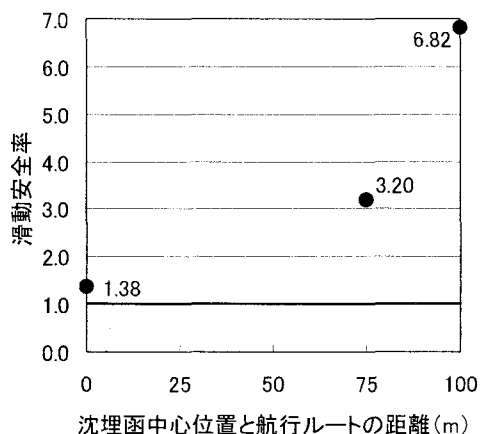


図- 9 航行ルートが沈埋函から離れることによる滑動安全率への影響

解析結果より、沈埋函の滑動安定性は、航行する船舶の速度と航行位置に大きく影響することが確認された。

4. まとめ

今回、大型船舶が沈埋函上を航行する場合を想定してプロペラ後流速による影響と移動船舶による影響について三次元流体解析を用いて検討した。

今回実施したシミュレーションでは、解析モデルの都合上以下に示す3点の仮定条件を設けている。

- ①航行船舶を矩形形状の組合せとする
- ②自由表面を未考慮
- ③船体表面は、層流であればノースリップ条件、乱流であれば対数則を適用する

これらの条件は、全て解析結果として安全側に作用するものと考えられる。特に①の仮定条件では、移動浮体の排水量は、航行船舶諸元の約1.5倍の数値（15,010MT）をとる。このように解析結果としての圧力変動値は、大きめの値を取るものと想定されるが、航行速度が最大レベルの10knotの場合においても滑動安全率は1.38である。

本検討結果を基に以下の方針を立案し現場施工管理へ適用させた。結果として、沈埋函3号函の築造工事は安全に施工を完了している。

- ①3号函直上の大型船舶航行は、碎石ストッパー完了まで（沈設開始から11日目迄）は不可とする。
- ②碎石ストッパーが完了し、支承ジャッキダウンが完了するまでは、最大船速6knot迄の航行速度制限を設けた方が望ましい。
- ③大型船舶の通常航行が可能（速度制限解除）となるのは、支承ジャッキダウン完了後（沈設開始から16日目以降）である。

参考文献

- 1) 住田公資，藤原隆一，鵜飼亮行，青野利夫，山村和弘，中屋行雄：沈埋函沈設時の急速施工，海洋開発論文集，第18巻，pp659-664，2002。
- 2) 住田公資，花城盛三，本庄隆宣，鵜飼亮行，山村和弘，中屋行雄：沈埋函仮置時の安定性について，海洋開発論文集，第18巻，pp665-670，2002。
- 3) 鈴木勝雄：航行船舶による海底圧力変化の推定，関西造船学会誌，第218号，pp181-191，1992
- 4) 伊藤一教，東江隆夫，織田幸信，勝井秀博，和田憲治：水底トンネル押出し工法施工時の函体に働く流体力，海岸工学論文集，第46巻，pp.836-840，1999。
- 5) 伊藤一教，東江隆夫，織田幸信，勝井秀博，和田憲治，内藤正光：水底トンネル押出し工法の開発，海洋開発論文集，第15巻，pp.195-200，1999。