

ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事の 施工支援ツールとしての 3次元流動シミュレーション

3D HYDRODYNAMIC SIMULATION FOR THE WORK OF RAILWAY BOSPHORUS TUBE CROSSING

織田幸伸¹・伊藤一教²・高山百合子³・上野成三¹・栄枝秀樹⁴

Yukinobu ODA, Kazunori ITO, Yuriko TAKAYAMA, Seizo UENO and Hideki SAKAEDA

¹正会員 工修 大成建設(株)技術センター土木技術研究所(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 工博 大成建設(株)ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事

³正会員 大成建設(株)技術センター土木技術研究所(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

⁴(株)パシフィックコンサルタンツインターナショナル プロジェクトマネジメント事業部
(〒206-8550 東京都多摩市関戸1丁目7番地5)

The immersed tunnel crossing the Bosphorus Strait located in Istanbul, Turkey, is under construction. It is known that the current field of the Bosphorus Strait is complicated. It has two-layer flow of surface southward and bottom northward. In this paper, the numerical hydrodynamic simulation, which is carried out to clarify the current structure, is described. This simulation results are used for construction assistance system.

For the simulation, the salinity and temperature boundary conditions of both northern and southern ends of the strait are vertically given as step function. The simulation results agree with monitoring results well. Through the simulation, following results are found out. Large water level difference between both ends of the strait causes the increase of the current speed of both surface and bottom layers. However, in one range of the water level difference, the maximum current speed of the surface layer reaches a constant value of 1.8 m/s approximately. The current structure is mainly ruled by the shape of the density interface.

Key Words : the Bosphorus Strait, hydrodynamic simulation, two-layer flow, stratification, density interface

1. 目的

現在, イスタンブールの中心部を東西に結ぶ鉄道専用トンネルを施工中であり(図-1), このうちボスポラス海峡を横断する部分を沈埋トンネルで施工する。

ボスポラス海峡は黒海とマルマラ海をつなぐ長さ約30kmの海峡であり, 黒海からマルマラ海へと流れる表層流と, マルマラ海から黒海へと逆流する塩水の底層流による2層流となっていることが知られている。表層の流れは最大4ktを超え, 施工の安全性, 効率性を確保するには, 流況を正確に把握することが重要となる。

本研究の最終目的は, 設計及び施工計画のための流況構造の解明と沈埋函設置時の流況を予測する流況予測モ

デルの構築であり, 本論では, その基礎となる海峡の流動構造を解明するために実施した数値シミュレーションについて述べる。

本研究は図-2に示す3つの技術要素からなっており, 本論に述べる数値シミュレーションはその構成要素の1つである。各要素技術の概要とそれらの関係については参考文献¹⁾に譲るが, 以下に述べる内挿関数の導出と流況予測モデル開発の2つの目的のために, 数値シミュレーションを行い, 流況構造を解明する。

・内挿関数の導出

本研究では, 流況構造の把握のために現地で流況モニタリングを実施している。流況観測は, 図-1に示すSt.A~Cの3点でADCPによる鉛直流速分布の定点連続観測と, 船舶搭載型ADCPによりトンネルライン上の断面流速計測を1.5ヶ月に1回行っている。設計及び施工に必要な情報

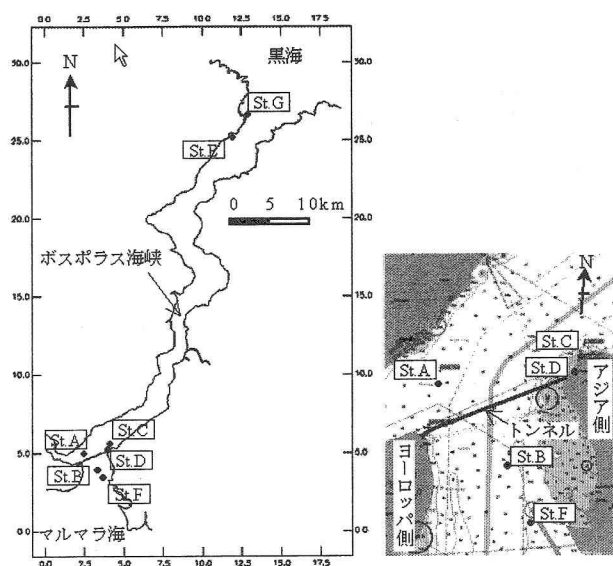


図-1 トンネル位置と観測点

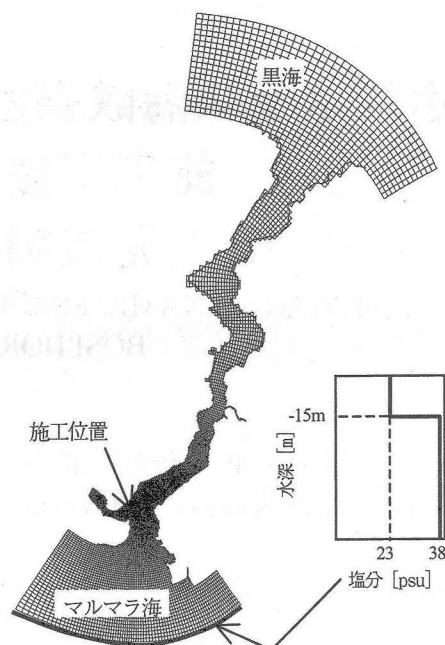


図-3 計算メッシュと塩分境界条件

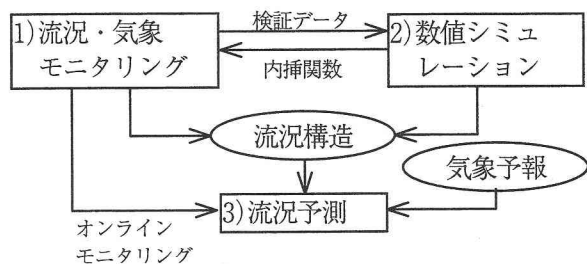


図-2 各要素技術の関係

は主にトンネルライン上の断面流速分布であるが、これを連続観測することは難しい。そこで本研究では、St.A～Cの連続観測結果から、数値シミュレーションの結果に基づきトンネルライン上の流速分布を算出する。

・流況予測モデル開発

沈埋函の沈設は、函体をドックより曳航してから48時間の連続作業となる。この際、沈設設備等は流速1.5m/sで設計されているため、48時間以上の流況予測によりあらかじめ流速1.5m/s以下であることを確認する必要がある。本研究では、オンラインモニタリングから取得する流況の現況データと、気象予報から取得する風速の予測データをインプットとする流況予測モデルを構築する。このモデル構築のために、数値シミュレーションによるパラメタスタディから流況構造を解明する。

2. 数値シミュレーション

(1) 計算モデル

計算は、デルフト水理研究所が開発したDelft3D-FLOWを使用した。本モデルは、座標系として水平方向は曲線座標系を、鉛直方向には σ 座標系を採用し、塩分や温度による密度分布の影響を取り込んだ3次元非定常解析を行うことが出来る。なお、乱流モデルは $k-\epsilon$ モデルを採用し、流れ及び密度に対する乱れの影響を考慮した。

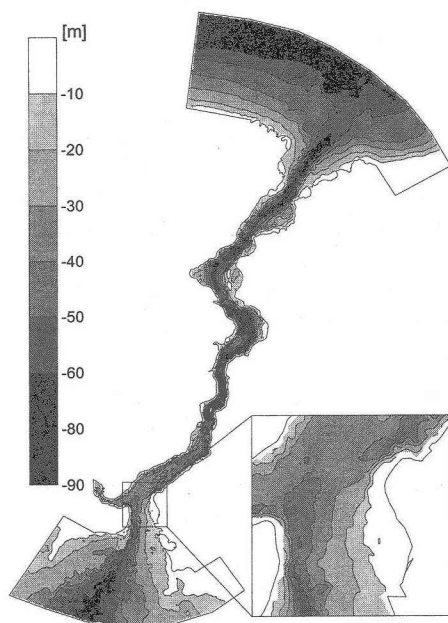


図-4 計算水深

(2) 計算条件

数値シミュレーションに使用した計算メッシュと境界条件を図-3に示す。メッシュサイズは、トンネル周辺を約80mと細かくし、その他では約400mとした。水平方向のメッシュ数は約6330であり、鉛直方向は10層である。計算メッシュのサイズは、トンネル周辺の流況がメッシュサイズの影響を受けない程度に十分細かいことを、予備計算を行い確認している。境界条件は、マルマラ海側境界の塩分の鉛直分布を図-3に示す様にステップ形状で与えた。水温の鉛直分布についても、塩分と同じ深さを境界とするステップ形状とし、表層20℃、底層15℃とした。黒海側は塩分18psu、水温20℃で鉛直方向に一定

とした。これらの境界条件は既往の観測結果及び現地観測の結果を参考に決定している²⁾。

計算に用いた水深条件を図-4に示す。海峡全体的水深は海図より入力したが、トンネル周辺については工事に先立ち実施した深浅測量の結果を使用している。

計算は、両端境界の水位差を変化させて、以下の3種類の計算を行った。

a) 定常計算

水位差と流況の基本的な関係を調べるため、南北両端境界の水位差を10cmから120cmの間で固定し、定常計算を実施した。計算は、海峡全体の水位、塩分、水温の初期条件をそれぞれ0m, 38psu, 15℃の一定値で与え、南北両端境界の水位を固定し、上述した計算条件のもとで定常状態となるまで計算を行った。計算結果は、3日間ではほぼ定常状態となっている。

b) 非定常計算 (直線変動)

水位差の時間変化と流況構造の変動の関係を調べるため、水位差を20cmから70cmに直線的に増加させた計算と、60cmから10cmに直線的に減少させた計算を行った。それぞれ20cmと60cmの定常計算の結果を初期値とし、南側の境界水位を直線的に変化させて計算した。また、水位の変動時間の影響を調べるため、1時間あたりの水位差の変化量 ($d\eta/dt$) を0.005, 0.001, 0.021, 0.041m/hrの4種類とした。これらはそれぞれ、変動時間96, 48, 24, 12時間に相当する。

c) 非定常計算 (周期変動)

潮汐に対する流速の変動特性を調べるため、12時間と24時間周期の水位変化を与えた。直線変動の計算と同様に南側境界の水位を変動させて水位差を変化させた。水位差は平均20cmに振幅10cmの周期関数を加えて与えており、水位差の最大が30cm, 最小が10cmとなる。3周期の連続計算ではほぼ計算は安定した。

3. 計算結果

(1) 定常計算

図-5, 6は南北両端の水位差を20, 40, 60, 100cmとした時の定常計算の結果である。図-5は海峡の最深部を通る縦断鉛直面の塩分の分布であり、図-6はトンネルライン上の横断鉛直面の流速分布である。また、図-6には、別途行った現地観測の結果を同時に示した。なお、現地観測結果の詳細については、別の機会に報告する予定である。ここで水位差は、観測結果を除き、計算領域の南北端の境界に与えた水位の差であり、北(黒海)側から南(マルマラ海)側の値を引いた値である。また、縦断図は全て左が南側、右が北側となるように示しており、断面流速は全て南側から見た断面(右がアジア側、左がヨーロッパ側)を示している。なお、ここで流速は、流速の絶対値に南北方向の流速成分をもとに北向きを+、南向きを-として正負の符号を付けたものであり、以降本論

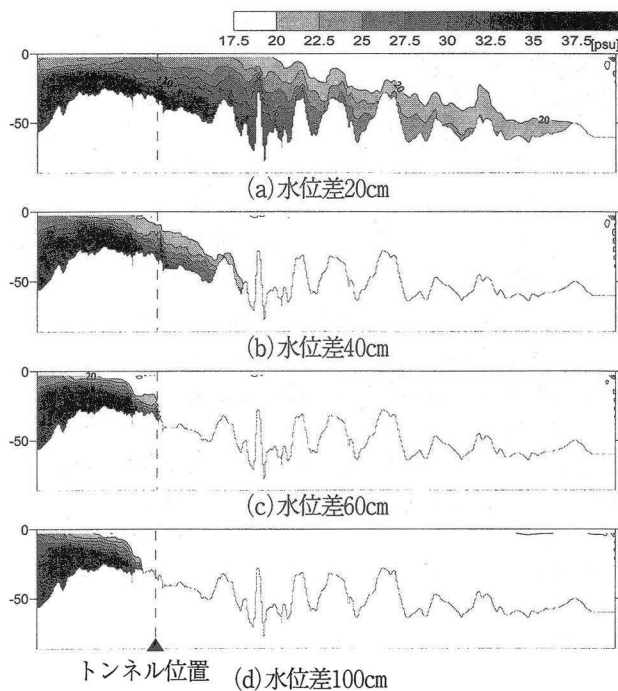


図-5 塩分の縦断面分布

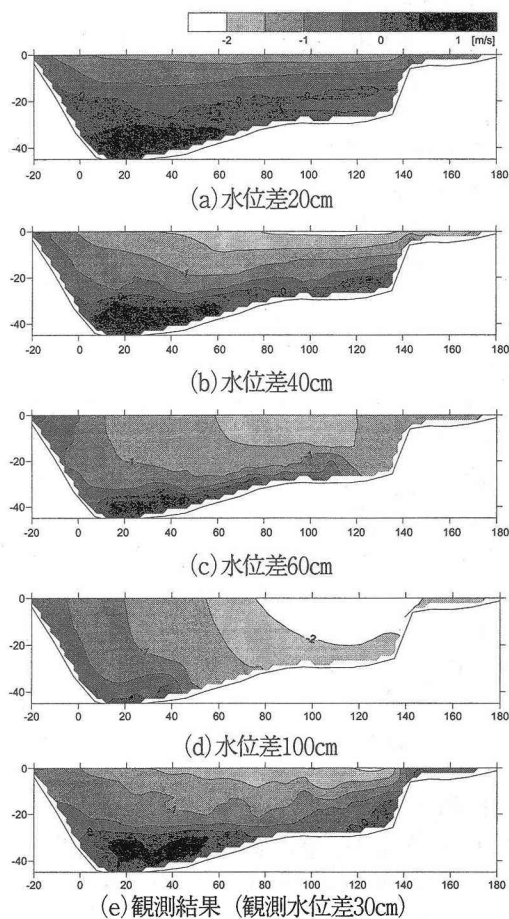


図-6 流速の横断面分布

では、流速はこの符号付の流速を意味するものとする。

ここで、図-6(e)の観測結果に示した水位差は、計算で定義している水位差と位置が違っている。計算結果について現地観測している位置での水位差を求めると、図-6(b)の水位差40cmとした場合が観測位置での水位差

が27.5cmとなり、図-6(e)の観測結果に近い値となっている。図-6(b)(e)を比較すると、両者は良く一致しており、本計算結果の妥当性が確認できる。

図-5によると、水位差が大きくなるにしたがって塩分フロントが南側に押し寄せられる。水位差が小さい場合は塩分が表層から底層に緩やかに変化しているため、密度境界の境界面がはっきりしないが、境界条件として与えた38psuと23psuの中間値である30.5psuを境界面であるとする、水位差60cmで、境界面の底端部がトンネル位置にはほぼ等しくなる。ただしこの時、塩分が20psuから35psuに遷移する遷移層が薄くなっているためにフロント面が南下しているように見えるが、塩分35psuのラインは変動していない。図-6においても同様の傾向が現れており、水位差の増大とともに表層側の南流の範囲が底のほうに広がっているように見えるが、水位差20cmと40cmを比較すると0.5m/s以上の逆流のコンターの大きさはほぼ等しい。水位差60cmでは小さくなっているものの、その流速の大きさは水位差に関係なく1m/s弱でほぼ一定の値となっている。また、水位差の増大とともに南流の範囲は広がるものの、その最大流速は、水位差40cmと60cmで同程度の値となっている。

図-7は、水位差と流速の関係を示したものであり、表層と底層の流速の最大値をそれぞれ示している。なお、表層は、一番上の第1層の値であり、また底層は、底面摩擦の影響で一番底の第10層の値よりも底から2層目の第9層の方が大きい値を示す場合があるため、第9,10層の値の大きいほうを示している。なお、表層流速は流速の絶対値の増減を表すため、縦軸を上下逆にしている。

表層の流速は、水位差が大きくなると水位差40cmまでは流速が大きくなるが、40cmから50cmの間で若干減少し、その後、水位差80cmまではほぼ1.8m/sで一定の値となる。さらに水位差が大きくなると、再び流速が水位差の増大とともに大きくなる。

水位差40cm以上で流速が一定となる理由として、次のことが考えられる。河川の河口部に発生する塩水楔の場合、鉛直二次元を対象とし、境界面より上の上層流速を一定と仮定して、境界面より下の下層流速を無視すると、河川の河口部に支配断面が発生する³⁾。このとき上層の層厚（限界水深） h_c と流速 v_c には以下の関係が成り立つ。

$$v_c = \sqrt{g h_c \Delta \rho / \rho} \quad , \quad \varepsilon = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1)$$

ここで $\Delta \rho$ は上層と下層の密度差、 ρ は上層の密度である。上層の塩分、水温を黒海の値18psu、20℃、下層をマルマラ海の下層の値38psu、15℃とし、上層の厚さを境界条件の15mとすると、式(1)の値は $v_c=1.5\text{m/s}$ となる。理論解は、いくつかの仮定に基づいているため厳密には今回の条件と一致しないが、オーダー的には上述の1.8m/sに近い値となっている。トンネル位置は海峡の南側端部に近いため、最大流速がこの v_c に近い値で一定値になるものと考えられる。

水位差40cmの時は、図-6(b)に示す様に、表面に近い

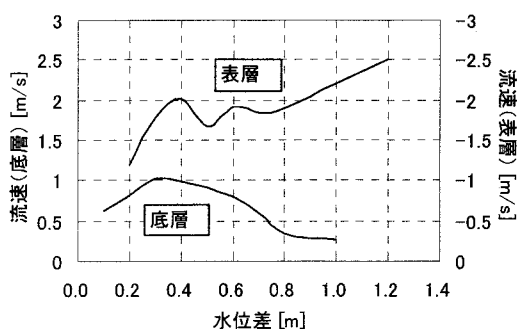


図-7 水位差と流速の関係

部分の流速が大きく、深くなるにしたがい徐々に流速が小さくなる。水位差が大きくなるにしたがい、南流の流速が全体に平均化し、比較的大きな勾配で流速が逆転している。水位差が80cmを超えると、南流全体の流速が v_c に近い値になり、フロント面が南に移動し境界面が押し下げられるために v_c が大きくなると考えられる。ただし、現在行っている現地観測では、100cm以上の水位差が生じた例は観測されていない。

底層の逆流については、水位差30cm以下では水位差の増大とともに流速が大きくなっている。図-5より、水位差の増大とともに境界面の勾配が大きくなるため、これに伴い下層の圧力勾配が大きくなり流速が増大するものと考えられる。水位差40cm～60cmの間は若干低下傾向にあるものの、流速の変動は小さい。図-5によれば、フロントは南下するものの、塩分35psuのラインの勾配を見るとその変化は小さいため、流速の変化も小さいと考えられる。なお、水位差80cm以上では下層の層厚は鉛直方向の計算層1層の厚さよりも薄くなっており、流速が平均化されたために流速が小さくなっていると考えられる。

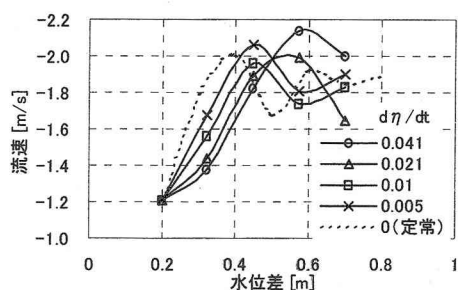
(2) 非定常計算（直線変動）

a) 水位差増加時

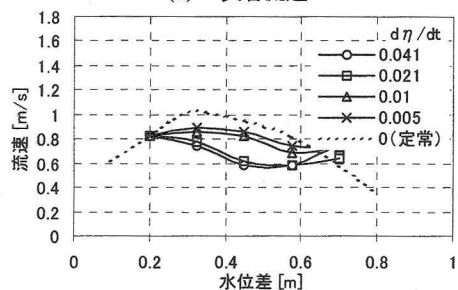
図-8は、水位差を直線的に増加させた場合の表層と底層の流速の最大値を示したものである。横軸は各時間における水位差であり、計算は水位差を0.2mから0.7mまで一定の割合で大きくしている。図中には、図-7に示した各水位差における定常計算の結果を同時に示している。

表層流速は、水位差60cm以下では水位差の増加とともに大きくなる。しかし、定常計算の結果と比較すると、流速の上昇量が小さく、時間的に遅れている。図-9は、 $d\eta/dt=0.021$ のケースにおける水位差0.45, 0.575mの時の塩分の縦断面分布であるが、水位差0.45mの時の塩分分布は定常計算に比べるとフロントが北上しており、境界面も不明瞭になっている。0.575mになると、フロントが南下し境界面もはっきりと現れ、定常計算の結果に近い分布となる。小さい水位差により一旦北側に広がって不明瞭となった境界面は、定常計算では水位差40cm程度で南下し明瞭化するが、水位が変動する場合には南下するまでに時間的な遅れが生じることが分かる。

底層流速については、水位差の増加にしたがって若干減少傾向にはあるが、その変化は小さい。図-9によれば

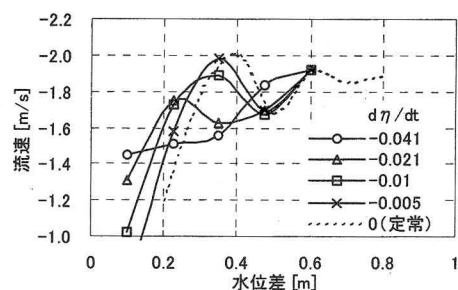


(a) 表層流速

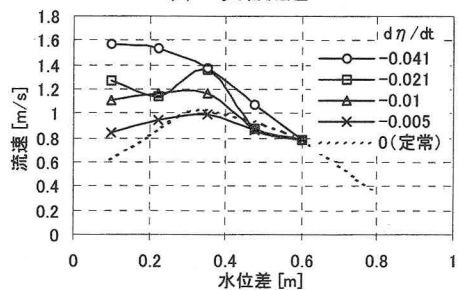


(b) 底層流速

図-8 水位差増加時の水位差と流速の関係

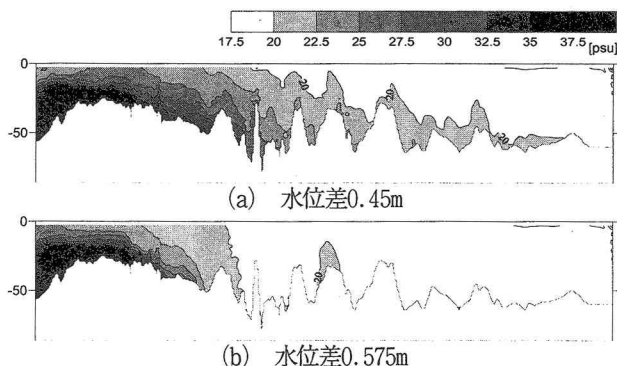


(a) 表層流速



(b) 底層流速

図-10 水位差減少時の水位差と流速の関係

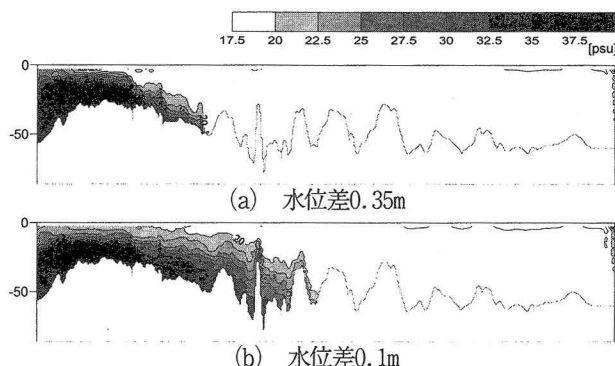


(a) 水位差0.45m

(b) 水位差0.575m

図-9 水位差増加時の縦断面塩分分布

($d\eta/dt=0.021\text{m/hr}$)



(a) 水位差0.35m

(b) 水位差0.1m

図-11 水位差減少時の縦断面塩分分布

($d\eta/dt=-0.021\text{m/hr}$)

水位差の変化による塩分30psu以上の下層の形状変化は小さいため、流速変動も小さいと考えられる。

a) 水位差減少時

図-10は、水位差を60cmから小さくしていった場合の水位差と流速の関係を、図-8と同様に示したものである。

表層流速は、水位差の減少とともに低下するが、底層流速は水位差の減少とともに大きくなっている。図-11は、 $d\eta/dt=-0.021$ のケースにおける水位差0.35, 0.1mの時の縦断面塩分分布である。水位差0.35mの時の塩分分布は、初期状態である図-5(c)の60cmの定常計算の結果からあまり変化していない。水位差0.1mの場合には、フロントが北に移動し始めているものの、定常計算に比べると南に位置している。図-9と比較すると、水位差の変動に対するフロント位置の反応が、水位差増加時よりも遅いことが分かる。これは、境界面の勾配の変化が小さいことを意味する。

底面の摩擦は境界面の摩擦よりも小さいと考えられるため、下層の流れを考えると境界面に働く摩擦は境界面の圧力勾配と同程度となる。したがって、水位差減少時は、境界面の圧力勾配の変化が小さいことから、境界面の摩擦の変化も小さいと考えられる。境界面の摩擦は、

上層と下層の相対流速によって決まるため、表層流速が水位差の減少とともに小さくなると、底層流速が大きくなると考えられる。

また、定常計算に比べフロントが南にあるため、境界面の水平距離が短く、全体の摩擦損失は定常計算よりも小さくなる。このため、平均流速は大きくなり、表層流速は定常計算に比べると大きくなっている。

(3) 非定常計算 (周期変動)

図-12, 13は、安定した状態の1周期分の計算結果である。図中の流速は、その時のトンネルライン上の表層および底層における流速の最大値を示しており、また水位は表層流速が最大の場所での水位を示している。水位差は、北側境界の水位を0とし、南側境界の水位を変動させて与えている。したがって、水位差は南側境界の水位の値に等しく、図中ではこの値を水位差として示している。図中に定常と示したものは、直線変動計算と同様に、その時の水位差に対する定常計算の結果を示している。

水位の位相は、境界条件の位相とほぼ同じであり、境界条件に対してほぼリニアに反応している。その値は、水位が上昇し水位差が小さい場合は、定常計算と同様に

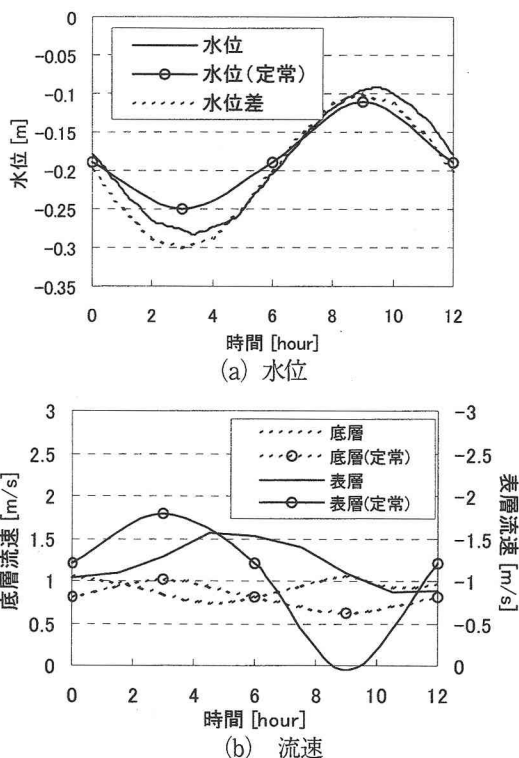


図-12 周期変動時の水位と流速の反応 (周期12時間)

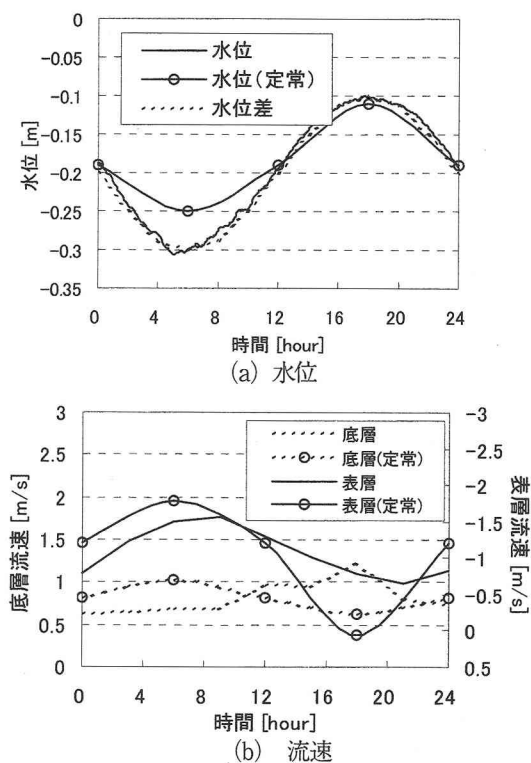


図-13 周期変動時の水位と流速の反応 (周期24時間)

南側境界と同程度の値となっている。一方で、水位差が大きく水位が低下している場合には、定常計算では水位が南側境界よりも高くなっているのに対し、周期変動計算では南側境界とほぼ同程度の値となっている。定常計算では、水位差が30cmになると塩分フロントがトンネル位置まで南下し、境界面がトンネルよりも南側にのみ発生する。このため、海峡全体のエネルギー損失がトンネルの南側に集中する。これに対し、周期変動計算を行う

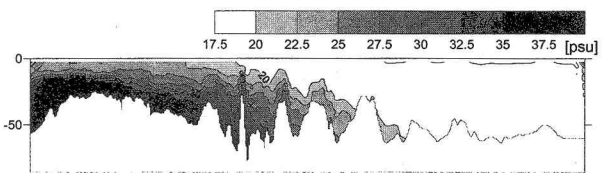


図-14 周期変動時の縦断面塩分分布 (周期12時間)

と、フロントが南側に移動せず、トンネルよりも北側にも境界面が分布する。したがって、トンネルよりも南側でのエネルギー損失が小さいために、トンネル位置での水位と南側境界の水位の差が小さいものと考えられる。

表層の流速は、定常計算に比べて位相が遅れており、その遅れは周期24時間よりも12時間の方が大きい。振幅は定常計算の半分以下であり、図-8(a)と同じ様に水位差の増加に対して流速の変動が小さくなることが分かる。

底層の流速は、表層と同様に位相が遅れているものの、変動の幅が小さく、その値は定常計算の値と同程度である。図-14は周期12時間の場合の0時における塩分の縦断面分布であるが、周期12時間の場合も24時間の場合も、全ての時間においてこの形状はほとんど同じであった。定常計算と同様に、下層の範囲がほとんど変化しないために、底層流速の変化が小さいものと考えられる。この結果から、周期24時間以内、振幅10cm以下の周期変動に対して、ほとんど境界面は変動しないことが分かる。

4. 結論

本論では、ボスボラス海峡横断鉄道トンネルの施工支援のための数値シミュレーションについて述べた。本論で得られた結果を以下に述べる。

- ・ 流況構造は境界面の形状の影響を大きく受ける。水位差の変動に対する表面水位の反応は速いが、境界面の反応が遅く、流況構造は水面形状よりもむしろ境界面形状により決定される。
- ・ 定常計算では、水位差40cm以下では、水位差が大きくなると断面流速も大きくなるが、水位差40cm～80cmの間は境界面の位置が変化せず、流速は約1.8m/sで一定となる。水位差が80cmを超えると塩分フロントがトンネルよりも南下し、境界層が深くなって流速は再び大きくなる。

参考文献

- 1) 織田幸伸, 伊藤一教, 上野成三, 小山文男, 栄枝秀樹: ボスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における流況解析とその予測について, 第60回年次学術講演会, 投稿中。
- 2) Ministry of Transport and Communication, Turkey: Feasibility Study and Preliminary Designs, Bosphorus Railroad Tunnel and Istanbul Metro System Project, Bosphorus Railroad Tunnel, Hydrographic survey, 1985, 1986.
- 3) 椿東一郎: 水理学Ⅱ, 森北出版, 1974