

# 沈埋トンネル施工時の トレンチ埋戻り特性に関する検討

## STUDY ON SEDIMENTATION IN TRENCH FOR TUNNEL IMMERSION WORK

本田隆英<sup>1</sup>・伊藤一教<sup>1</sup>・織田幸伸<sup>1</sup>・上野成三<sup>2</sup>  
Takahide HONDA, Kazunori ITO, Yukinobu ODA and Seizo UENO

<sup>1</sup>正会員 博(工) 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 大成建設株式会社 国際事業本部 (〒163-6006 新宿区西新宿6-8-1)

The Immersed Tube Tunnel beneath the Bosphorus Strait is under construction in Istanbul, Turkey. When the tunnel element is immersed and set to the bottom in the trench, the sedimentation might be accelerated due to the converged current between the immersed tunnel element and the bottom. It affects the safety and the accuracy for the tunnel immersion work, significantly. In this study, the flow distributions around the tunnel element and the trench were obtained by the hydraulic physical model test at first. Then, the flow distribution and the sedimentation in the trench were calculated for the tunnel immersion work by using a numerical model. It is shown that the numerical model is capable of studying on the sedimentation for the tunnel immersion work. It is also confirmed that the immersed tunnel element is set to the bottom without the significant sedimentation in the case of the immersion work for the Bosphorus Tube Tunnel.

**Key Words :** Sedimentation, immersed tunnel, trench, flow

### 1. はじめに

現在、トルコのボスボラス海峡において全長 1.4 km の沈埋トンネルを施工中である(図-1)。ボスボラス海峡は長さ約 30km の海峡で、淡水系の表層流と塩水系の底層流による二層流になっており、しかも流況が非常に変わりやすい。安全かつ確実な施工を行うため、流況観測や流況予報システムの構築および水理模型実験による沈埋施工方法の検討が進められてきた<sup>1)~9)</sup>。厳しい潮流条件下での函体沈設において、トレンチに発生する埋戻りは手戻り工事につながるため、施工期間中に生じる地形変化の事前把握が重要となる。沈設時には、函体とトレンチ底面の間に流れが集中して埋戻りが発生し、函体の設置精度や安全性に大きな影響を及ぼすことが懸念される。また、一般にトレンチ形状の計画にあたっては、トレンチの埋戻り形状および埋戻り量を検討した上で、トレンチの寸法や形式が決定される。以上から、トレンチの埋戻りを事前に検討しておく必要がある。ただし、相似則の観点から室内移動床実験による検討は困難なことから、数値解析による検討が望ましい。

一方、2007年に「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>10)</sup>が改訂され、海浜変化予測に対する解析手法のひとつに、オランダのデルフト水理研究所で開発された Delft3D-FLOW が明記された。したがっ

て今後、同モデルを使用した地形変化予測の検討が増加することが予想される。そこで、ここでは Delft3D-FLOW を用いて、本工事に対する埋戻り検討を行った。なお、Delft3D-FLOW を用いてトレンチ周辺の地形変化を解析した例として、Klein (2003)<sup>11)</sup>は波・流れ共存場におけるトレンチの地形変化に対して、室内実験および現地実験を実施し、解析結果は実験結果をかなり良く再現できることを報告している。ただし、同検討はトレンチのほぼ全

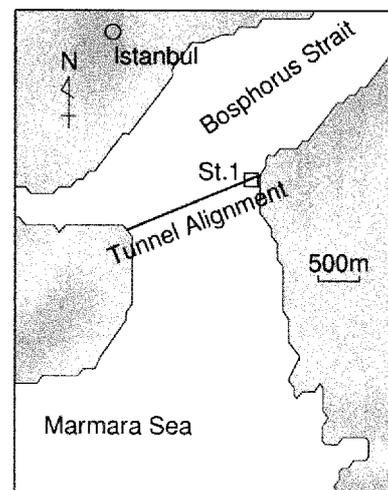


図-1 沈埋トンネル施工位置

体が埋戻りするような大規模な地形変化を対象としている。本工事のように沈設施工に影響を及ぼす小規模なトレンチ埋戻りの検討に対しては、Delft3D-FLOWの適用性を改めて確認する必要がある。

本検討では、まずトレンチおよび函体周辺の流れ場を水理模型実験により把握し、同流況をDelft3D-FLOWにより再現した。そして、Delft3D-FLOWにより地形変化解析を実施し、沈設施工に対する埋戻り検討を行った。埋戻り検討の手順は、まず現地で発生した埋戻りの前後に取得した現地測深データを利用して、Delft3D-FLOWによる埋戻り検討の適用性を確認した。次に、函体沈設時における埋戻り速度に関する検討を行った。

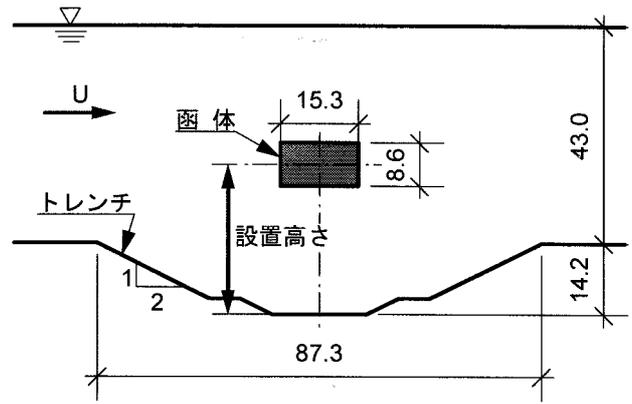


図-2 実験断面図 (単位：m, 実機)

## 2. 解析モデル

トレンチおよび函体周辺における流れ場および地形変化の解析には、オランダのデルフト水理研究所で開発された Delft3D-FLOW (Ver. 3.25.02) を用いた。

本モデルの座標系は、水平方向に直交直線座標系、鉛直方向にシグマ座標系である。流れ場解析の基礎方程式は、連続式と運動方程式である Navier Stokes 式から成る。地形変化解析では、浮遊砂および掃流砂に対して数種類の流砂量モデルが用意されており、Delft3D-FLOW において浮遊砂および掃流砂モデルのデフォルトはいずれも van Rijn モデル<sup>12), 13)</sup>となっている。流砂量は解析の1ステップごとに算出され、同時に地形も更新されるため、流れ場の解析には地形変化の影響が考慮されている。

## 3. トレンチ周辺の流況特性

### (1) 実験概要

まず、トレンチおよび函体周辺の流れ場を水理模型実験により把握した。実験は、二次元造波水路を用いて実施した。実験断面図を図-2 に示す。代表的な施工断面としてトレンチ (幅 87.3 m, 深さ 14.2 m) に函体 (幅 15.3 m, 高さ 8.6 m) を配置し、定常流 (平均流速  $U = 1.0, 1.3, 2.1$  m/s) を作用させ、トレンチ周辺の流速を電磁流速計により計測した。トレンチ外の水深は 43 m, 模型縮尺は 1/80 である。函体位置による函体およびトレンチ内の流況の違いを把握するため、函体の設置高さを 5.3 m, 14.2 m, 18.5 m, 30.2 m の 4 ケース設定した。また、トレンチ掘削から函体沈設までの期間を想定し、函体を設置しない場合の流況も計測した。埋戻り検討では底層流速の評価が重要となることから、流速計測点は底層を中心に図-3 のように設定した。

### (2) 解析条件

流れ場の解析は、鉛直二次元断面で実施した。実

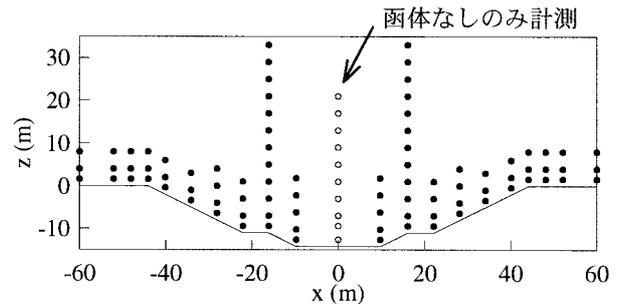


図-3 流速計測点

験と同様に図-2 のようにトレンチおよび函体を配置し、左側境界で  $U = 1.0, 1.3, 2.1$  m/s の定常流を与え、右側境界は水位一定とした。Delft3D-FLOW では水中に構造物を配置することが困難なため、函体範囲のグリッドに鉛直壁を配置した。

解析条件は、解析結果の収束性および実験結果との整合性の観点から試行計算を実施し、最適な解析パラメタを以下のとおり決定した。解析メッシュは水平方向 2 m とし、鉛直方向には底層で細かい 70 層のメッシュを設定した。解析時間間隔は 0.1 min とした。解析時間は、流況が十分定常に発達したと判断された 20 min とした。渦動粘性係数は、水平方向  $2 \text{ m}^2/\text{s}$ , 鉛直方向  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$  を与えた。底面摩擦は、Manning の粗度係数として 0.02 を与えた。

### (3) 結果

函体なしのケースおよび函体ありのケースに対して、実験結果および解析結果の流速断面分布および流速鉛直分布を図-4 に示す。実験結果の断面分布については、計測値を内挿して示している。

まず、函体なしのケースである図-4 (a) より、実験ではトレンチの上方で流れは停滞することなく一様に下流方向へ流れているが、トレンチ内のほぼ全域に時計回りの循環渦が形成されていることが確認された。一方、解析結果においては、実験結果と比較してトレンチ内への運動量の流入が顕著に現れている。これは、解析モデルの鉛直座標系にシグマ座標を用いているためと考えられる。ただし、一様水

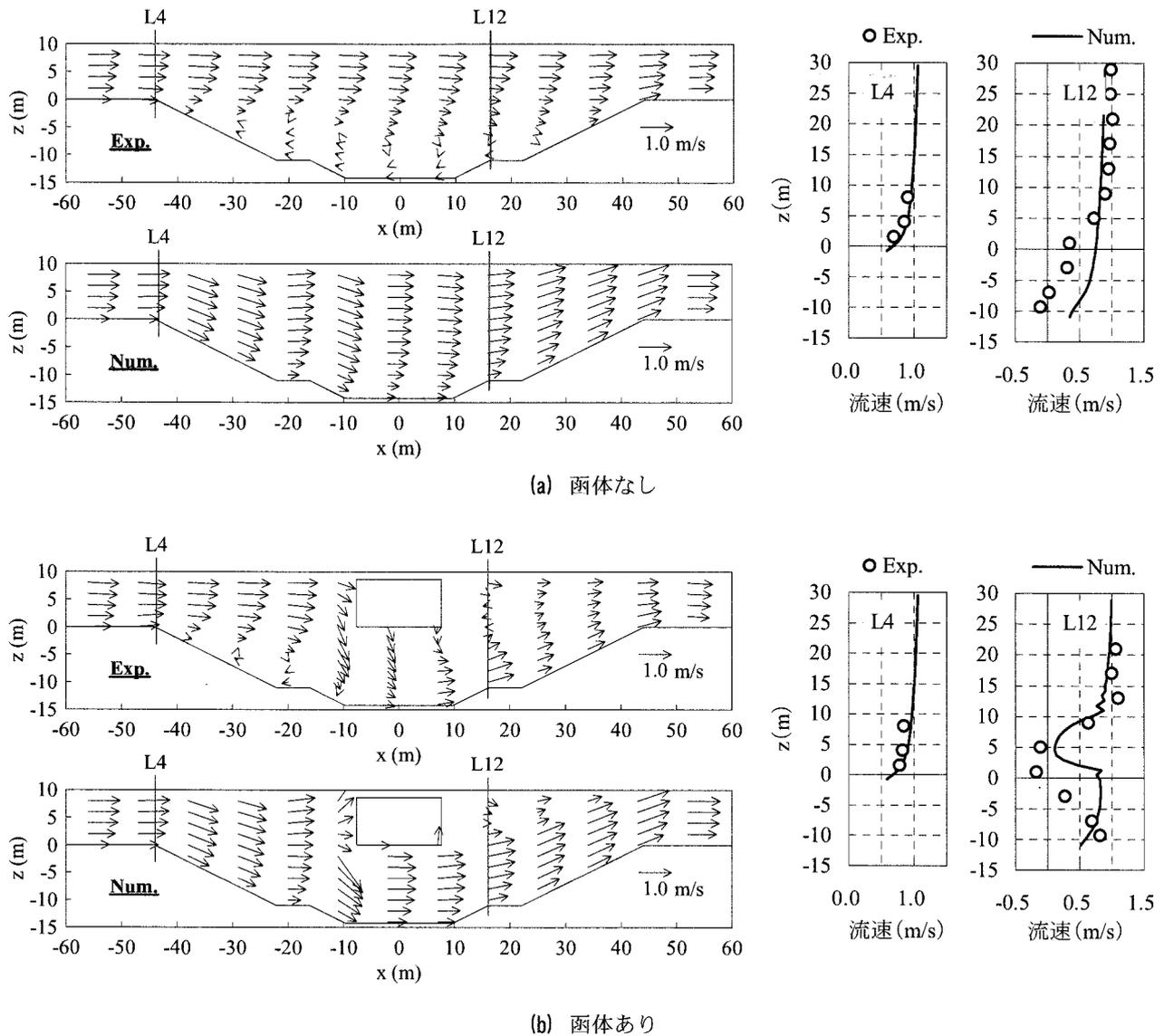


図-4 トレンチ周辺の流速分布 ( $U = 1.0 \text{ m/s}$ )

深部の L4 断面における解析結果は、底層付近における底面摩擦による流速の減衰を良好に再現しており、実験結果と良く一致している。

次に、トレンチ内に函体がある場合として、函体がトレンチに進入するケースを図-4 (b) に示す。実験では、函体下側に回りこむ流れや函体背後における流れの停滞、トレンチ内の上流側に発生する時計回りの循環渦などの流況特性が明確に捉えられた。これらの特性は、流速によらず一様に確認された。解析結果では、トレンチへの運動量の流入が過大であるため、函体下側に回りこむ流れが実験結果と比較して顕著に現れているが、函体背後の滞留域を良好に再現している。函体背後の L12 断面に着目すると、解析結果は、トレンチ下方の流速をやや過大に算出するものの、函体背後で流速が有意に低減する様子を良好に再現できていることが分かる。

以上より、トレンチ周辺の流速場を対象に Delft3D-FLOW を用いて流況解析を実施したところ、

トレンチへの運動量の流入をやや過大に算出するものの、函体背後の滞留域を良好に算出できることが示された。また、トレンチに流入する流砂量の外力となる一様床部の底層流速を精度良く算出できることが示された。ただし、解析結果は実験結果に比べてトレンチ内の底面近傍流速を過大に算出していることから、解析ではトレンチ内の流砂量を過大評価する傾向にあることに留意する。

#### 4. 掃流砂モデルの比較検討

Delft3D-FLOW では、流砂量モデルに van Rijn モデル<sup>13)</sup>がデフォルトとして準備されている。水理公式集<sup>14)</sup>では、代表的な掃流砂量式として芦田・道上モデル<sup>15)</sup>および Meyer-Peter Muller モデル<sup>16)</sup>が紹介されており、両モデルとも Delft3D-FLOW で使用することができる。使用する掃流砂モデルに

よって、埋戻り結果は大きく異なることが予想されるため、本検討においては以上の3モデルを対象に、無次元掃流砂量 $\Phi$ と無次元掃流力 $\tau_*$ の関係を比較検討し、埋戻り検討に有効な掃流砂モデルを選定する。

芦田・道上モデルは、次式で表される。

$$\Phi = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\tau_{*c}$ ：無次元限界掃流力である。

Meyer-Peter Muller モデルは、次式で表される。

$$\Phi = 8(\tau_* - 0.047)^{3/2} \quad (2)$$

van Rijn モデルは、次式で表される。

$$\Phi = \frac{0.006 \cdot w_s \cdot d \cdot M^{0.5} \cdot M_e^{0.7}}{\sqrt{(s \cdot g \cdot d^3)}} \quad (3)$$

$$M = \tau_* \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \left( 1 + \frac{H}{k_s/30} \right) \right\}^2 \quad (4)$$

$$M_e = (\sqrt{\tau_*} - \sqrt{\tau_{*c}})^2 \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \left( 1 + \frac{H}{k_s/30} \right) \right\}^2 \quad (5)$$

ここで、 $w_s$ ：底質の沈降速度、 $d$ ：底質の中央粒径、 $s$ ：底質の水中比重、 $g$ ：重力加速度、 $\kappa$ ：カルマン定数、 $H$ ：水深、 $k_s$ ：相当粗度である。

芦田・道上モデルおよび Meyer-Peter Muller モデルは、無次元掃流力が与えられれば、無次元流砂量が一意に求まる。一方、van Rijn モデルでは、無次元流砂量の算定に、対数則を仮定した断面平均流速を用いるため、無次元掃流力について他モデルと比較するには水深  $H$  や粗度  $k_s$  を仮定する必要がある。ここでは本検討条件である  $H = 43$  m、 $k_s = 0.2$  mm ( $= d$ ) を仮定し、3モデルの無次元掃流力と無次元流砂量の関係を図-5 に示した。ここで、無次元限界掃流力は  $\tau_{*c} = 0.05$  とした。

同図より、いずれのモデルもおおむね対数線形の傾向を示すが、無次元掃流力の大きさによって、各モデルによる流砂量の大小関係が異なる。本条件は  $U = 1.0$  m/s、 $d = 0.2$  mm、 $s = 1.65$ 、 $H = 43$  m であることから、対数則を用いて無次元掃流力  $\tau_* = 0.14$  が求められる。同条件では、流砂量は van Rijn、芦田・道上、Meyer-Peter Muller モデルの順に小さく算定される。そこで、埋戻りに使用する流砂量モデルは、安全側を考慮し van Rijn モデルを採用した。

## 5. 現地データに基づく地形変化解析の検討

### (1) 概要

函体沈設前の 2006 年 1 月に現地で底層流速 2.0 m/s 程度の強流が発生し、トレンチに有意な埋戻りが生じた。図-1 の St.1 において、埋戻り前後の 2005 年 11 月 2 日と 2006 年 2 月 2 日に現地測深が

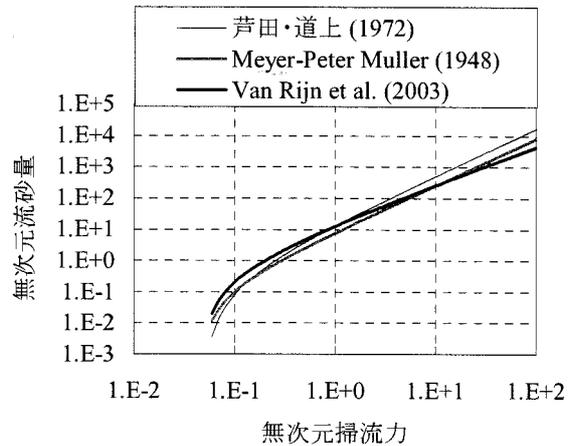


図-5 掃流砂モデルの比較

実施されており、あわせて流速の連続計測も実施されている。そこで、Delft3D-FLOW を用いて埋戻り発生前後の現地埋戻り再現計算を実施し、Delft3D-FLOW によるトレンチ周辺の埋戻り検討に対する適用性を検討した。

### (2) 現地計測データ

超音波ドップラー流速計 ADCP を船底に設置した小型作業船をトンネルライン上（トレンチ外）に走航させ、鉛直流速分布を鉛直方向 1 m 間隔で 1 日 2 回程度計測した。St.1 で取得した流速値に対して、ここでは底層 3 m 分の平均を底層流速とし、2005 年 12 月から 2006 年 1 月に取得した底層流速を図-6 に示す。同地点の底層では、通常 0.5 m/s 以下の北向き流れが卓越しているが、2006 年 1 月 24 日に南向き 1.8 m/s の強流が計測された。

### (3) 解析方法

図-6 に示した流速時系列を境界条件に与え、Delft3D-FLOW を用いてトレンチ周辺の地形変化解析を鉛直二次元断面で実施した。実際の現地海域では、表層と底層で流向が逆転する二層流となっているが、ここでは地形変化の外力となる底層流速に着目し、境界条件の流速は鉛直一様分布を仮定して与えた。初期地形は、2005 年 11 月 2 日に計測した測深結果とした。底質は、現地試料の粒度分析結果から中央粒径  $d = 0.2$  mm の一様砂とした。

強流発生時の流向とトレンチラインの関係を図-7 に示す。強流は、トレンチ横断方向に対して 35° 傾いて作用した。通常、流れによって生じる流砂量は流れと同じ方向に発生する。また、後述するように埋戻りは強流発生時に一度に発達し、通常時は現地で発生した埋戻りに寄与する地形変化はほとんど発生しないと推察された。そこで、ここではトレンチ横断面の二次元鉛直断面を解析対象としているため、強流によって生じた流砂量に  $\cos 35^\circ$  ( $= 0.82$ ) を乗じてトレンチ横断方向の流砂量とした。

現地流速計測は 1 日 2 回程度行われたが、強流時の流速時間変化は実測結果からは分からない。現地

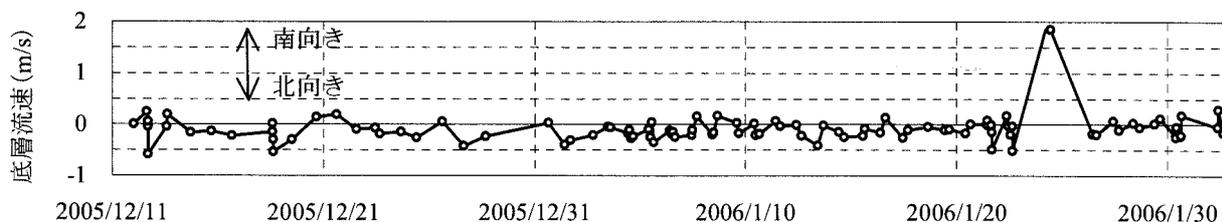


図-6 トレンチ外における底層平均流速（実測結果）

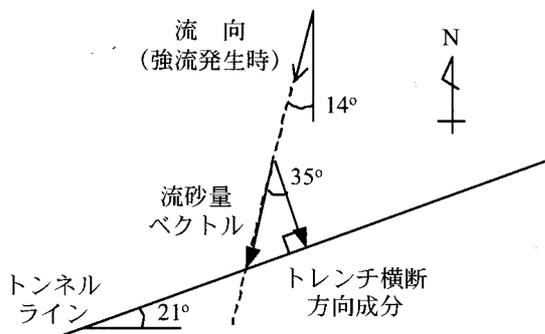


図-7 漂砂量に対する流向補正

での流況観察から、強流流速として 1.8 m/s を計測した時刻から少なくとも 6 時間前に強流が確認された。そこで、強流時の時系列流速に計測時刻の 6 時間前から強流流速 (1.8 m/s) を与えて、解析を実施した。

#### (4) 解析結果

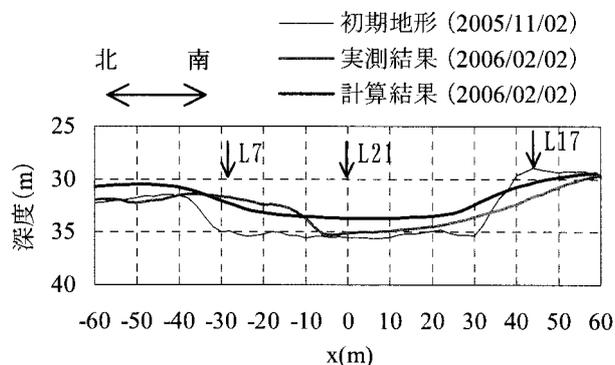
現地埋戻り再現解析結果を図-8 に示す。同図 (a) の地形変化形状より、現地ではトレンチ北側で 3 m 程度の堆積、トレンチ南側で 3 m 程度の侵食が発生しており、計算では北側の堆積は良好に再現されたもののトレンチ南側では実測結果に比べて 2 m 程度大きく堆積する結果が得られた。これは流れ場の計算で見られたように、トレンチへの運動量の流入が過大に算出されるためと考えられる。図-8 (b) にトレンチ北側法尻 (L7)、トレンチ中央 (L21)、トレンチ南側法尻 (L17) における地形変化の時系列結果を示す。いずれの地形変化も 2006 年 1 月 24 日に発生した強流の影響を受けて、一度に堆積および侵食が発生していることが分かる。また、南側法尻 (L17) については、一度 2 m 侵食した後 1 m の堆積が発生している。

計算結果が堆積傾向であることは埋戻り検討において安全側の判断となることに留意し、以降の検討を進めることとした。

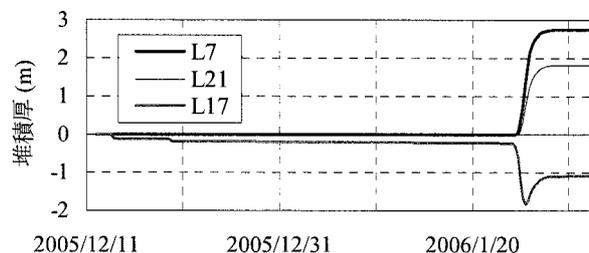
## 6. 沈設時に対する埋戻り速度の算定

### (1) 概要

函体沈設には、函体の係留および降下に約 18 時



(a) 地形変化形状



(b) 堆積厚の時系列変化

図-8 埋戻り再現計算結果

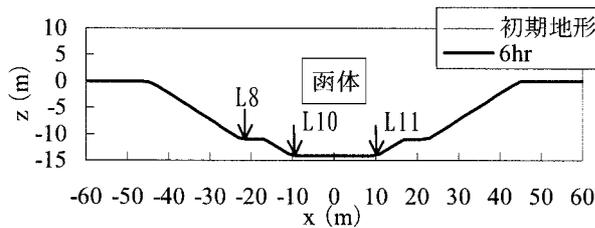
間を要する。そこで、この間のトレンチ埋戻り速度を Delft3D-FLOW により算出した。解析領域は水理模型実験と同様の図-2 に示す断面とし、函体位置を 4 ケース変化させ、 $U = 0.5, 1.0$  m/s の一様流を 18 時間与えて地形変化解析を実施し、各ケースで沈設位置付近の堆積速度を算出した。

### (2) 解析結果

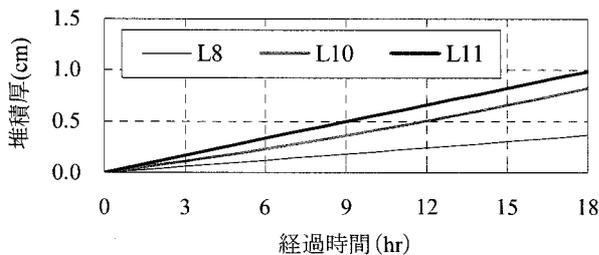
$U = 0.5$  m/s で函体のトレンチ進入時における地形変化形状および堆積厚の時系列変化を図-9 に示す。 $U = 0.5$  m/s の一様流が 18 時間作用しても、トレンチに顕著な埋戻りが発生することはない。堆積厚の時系列結果を見ると、流れの作用時間が增大するにつれ、堆積厚はほぼ単調に増加する。同結果から、1 時間あたりの堆積厚を算出し、函体沈設時における埋戻り速度を図-10 にまとめた。函体がトレンチに進入する時に堆積速度は大きくなるのが分かる。これは同条件でトレンチ下面の流れが加速することに対応している。一方、函体がトレンチ底

面付近まで降下すると、トレンチ下面を回り込む流れはなくなるため、埋戻りは比較的発生しにくい。以上の流況は水理模型実験からも確認された。今回の検討では、函体直下流のL11で堆積速度が大きく、 $U = 0.5 \text{ m/s}$  で最大で  $0.56 \text{ mm/hr}$  と算出された。これは工事に影響を及ぼす程度ではなく、実際の沈設では底層流速が  $0.5 \text{ m/s}$  程度に達する場合もあったが、有意な埋戻りは報告されておらず、検討結果の妥当性が示された。なお、 $U = 1.0 \text{ m/s}$  のケースでは、 $U = 1.0 \text{ m/s}$  に比べておよそ10倍の埋戻り速度が算出されており、函体がトレンチ上方に位置する場合にも大きな埋戻り速度が算出された。

トレンチ底面には敷均し厚  $80 \text{ cm}$  の捨石基礎が施工されるが、トレンチ両側に埋戻りに対する幅  $2 \text{ m}$  程度の余裕代が設けられている。よって、今回算出した埋戻り速度の程度を考慮すると、沈設時の埋戻りに問題はないと考えられる。



(a) 地形変化形状



(b) 堆積厚の時系列変化

図-9 沈設時埋戻り計算結果 ( $U = 0.5 \text{ m/s}$ )

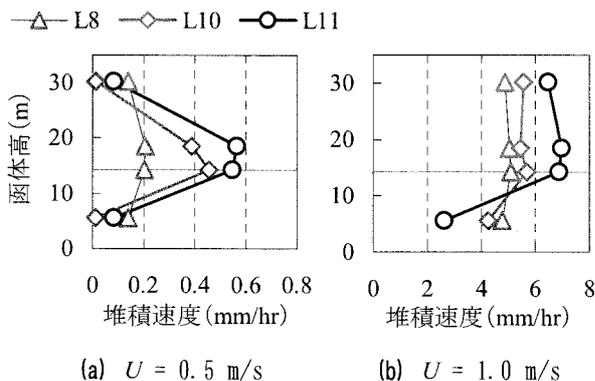


図-10 函体沈設時の法尻における堆積速度

## 7. まとめ

汎用水理計算プログラム Delft3D を用いてトレンチ周辺の流速場および地形変化の計算を行ったところ、運動量および底質のトレンチ流入をやや過大に算するものの、沈設施工に対する埋戻りを有効に検討できることが分かった。本工事のケースでは沈設時の埋戻りに問題はないことが確認された。

## 参考文献

- 1) 織田幸伸, 伊藤一教, 上野成三, 勝井秀博, 東江隆夫, 小山文男, 栄枝秀樹: ポスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における流況観測と流況解析, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1421-1425, 2005.
- 2) 織田幸伸, 伊藤一教, 高山百合子, 上野成三, 栄枝秀樹: ポスボ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, 海洋開発論文集, Vol. 21, pp. 903-908, 2005.
- 3) 本田隆英, 織田幸伸, 八重田義博, 伊藤一教: 捨石施工シミュレーションシステムの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 225-226, 2006.
- 4) 織田幸伸, 伊藤一教: 二層流場の動的変動を考慮した流況予測手法の開発, 沿岸域学会誌, Vol. 19, No. 4, pp. 13-24, 2007.
- 5) 本田隆英, 織田幸伸, 上野成三, 八重田義博, 伊藤一教: 大水深強潮流下における薄層捨石基礎の高精度施工, 海洋開発論文集, Vol. 23, pp. 339-344, 2007.
- 6) 織田幸伸, 伊藤一教, 上野成三, 小山文男, 栄枝秀樹: ポスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における流況予測モデルのシステム化と精度検証, 海洋開発論文集, Vol. 23, pp. 345-350, 2007.
- 7) 織田幸伸, 伊藤一教, 本田隆英, 上野成三, 小山文男, 栄枝秀樹: ポスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事での流況予測システムによる函体沈設の可否判断, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 941-945, 2007.
- 8) 本田隆英, 織田幸伸, 上野成三, 八重田義博, 伊藤一教: ポスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における沈設時の函体挙動に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, 2008. (印刷中)
- 9) 伊藤一教, 織田幸伸, 本田隆英, 小山文男: ポスボラス海峡沈埋トンネルの潮流予測システムの適用性, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, 2008. (印刷中)
- 10) 国土交通省港湾局: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, pp. 266-267, 2007.
- 11) Klein, J.A.: Verification of morphodynamic models on channels, trenches and pits, Report Z3079.40, Delft Hydraulics, 2003.
- 12) van Rijn, L.C.: Sediment transport: Part II, Suspended load transport, *J. Hydraulic Eng.*, Vol. 11, pp. 1613-1641, 1984.
- 13) van Rijn, L.C.: *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, Aqua Publications, 1993.
- 14) 土木学会編: 水理公式集, 丸善(株), 1999.
- 15) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp. 59-69, 1972.
- 16) Meyer-Peter, E. and Muller, R.: Formulas for bed-load transport, I.A.H.R., Stockholm, pp. 39-64, 1948.