

押出沈埋トンネル工法の開発

FEASIBILITY STUDY OF THE INCREMENTAL LAUNCHING METHOD FOR CONSTRUCTION OF AN IMMERSED TUNNEL

北澤杜介・田村保¹⁾・松木田正義・高久雅喜²⁾
Sosuke KITAZAWA, Tamotsu TAMURA, Masayoshi MATSUKIDA and Masaki TAKAKU

The result of feasibility study of the incremental launching method for construction of an immersed tunnel is described in this report. Incremental launching method was originally developed for the construction of bridges. Technical concept of this method is introduced to the construction of immersed tunnel underneath the fairway in the port. Technical issues are studied through the feasibility study on some immersed tunnel. The present study shows that this new method solves most of the construction problem for the conventional method in use and reduce the construction cost.

Key Word: Tunnel, Immersed tunnel, Launching method, Friction reducer

1 はじめに

従来工法による沈埋トンネルの建設においては、ドライドックなど広大な函体製作ヤードを必要とする、函体沈設時の航路制限等による航行船舶への影響が大きい、水深が浅い海域では函体曳航のための航路浚渫を必要とするなどの課題を有している。押出沈埋トンネル工法は、図-1に示すように、橋梁架設で多く採用されている押出工法を概念を導入した沈埋トンネルの新しい建設工法であり、従来工法の課題の多くを解決できるとともに、建設コストの削減が可能な工法であると考えられる。本報告は、港湾内の主航路を横断する道路トンネルを対象としてケーススタディを実施した成果を報告するものである。

2 工法の概要

押出沈埋トンネル工法は、トンネル計画線延長上の斜路部に設けた製作ヤードにおいて1ブロック10～15m程度の函体の製作を行ない、ブロック

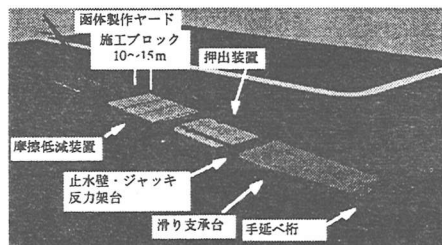


図-1 押出沈埋トンネル工法の技術概念

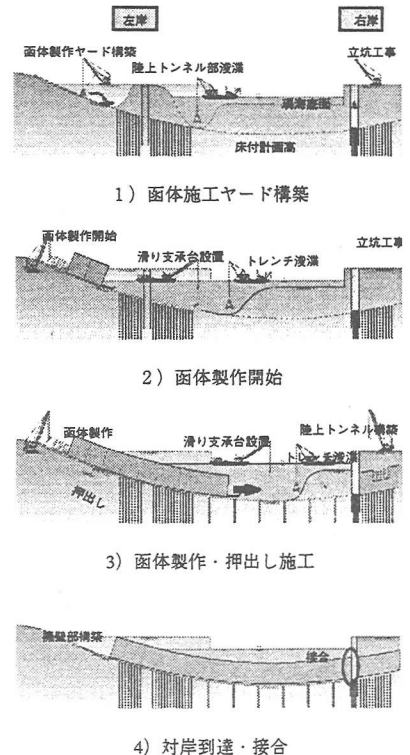


図-2 押出沈埋トンネルの施工手順

- 1) 正会員 (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部
- 2) 正会員 大成建設(株) 土木本部土木技術部

製作完了毎に押出装置により函体を押出し前進させることを繰り返してトンネルを構築する工法である。図-2に施工手順の概要を示す。本工法は沈埋トンネル工法における設計・施工に関する既存の技術要素と、橋梁の押出架設工法における押出装置、滑り支承、手延べ桁、方向制御装置等の既存の技術要素を応用・組み合わせたところに特徴があり、従来の沈埋トンネル工法と比較して、以下に示す利点があると考えられる。

- (1) ドライドック等の広大な函体製作ヤードを必要としない。
- (2) 函体の現場への曳航や沈設の工程がないため、そのための設備や仮装架橋が不要である。
- (3) 函体製作設備が小規模で済み、かつ型枠設備の多数回転用が可能である。

一方、トンネルの平面及び縦断の基本線形が単一円弧となり線形の柔軟性に欠ける、トンネル中央部の深度が大きくなる、海中部に押出しのための滑り支承を必要とする、トンネル全延長の押出が完了するまで埋め戻しができない等の特徴があり、現地条件によってはこれらが短所となる場合も考えられる。

3 検討条件及び技術課題

ケーススタディの検討条件を表-1に示す。本検討では、施工時の安全性の検討に当たって、外海からの進入波浪を考慮した。押出沈埋トンネル工法の採用に当たっての主要な技術課題として、以下の3項目が考えられる。本報告では、これらについての検討結果を中心に報告する。

- (1) 合理的な函体製作ヤードの計画
- (2) 合理的な函体押出システム
- (3) 施工時の波浪や航行船舶に対する函体の安全対策

4 トンネル線形及び構造断面

表-1の条件を考慮して設定したトンネル断面を図-3に示す。断面の基本形状は通常の沈埋トンネルと同様であるが、隅部の形状は走錨を考慮して曲面とし、底面には押出時の摩擦低減を目的として鋼板を配置することとした。トンネルの平面線形は直線とした。縦断線形については、左岸側の陸上トンネル部から函体を押出し、右岸側には到達立坑を配置することとして検討した。また、最小土被り2.7m（必要最小土被り厚1.5m、浚渫精度±0.6mを考慮）を確保することとした。その結果、縦断線形は図-4に示すとおりとなり、押出沈埋トンネル部の延長は1180mとなった。

5 函体製作ヤードの計画

函体製作のサイクルが全体工期へ大きな影響を与えるため、函体製作ヤードの計画において以下の点を考慮した。

- (1) 函体製作ヤードは陸上トンネル部斜路内に設ける。

表-1 検討条件（対象沈埋トンネル）

項目	条件
対象道路	: 港湾内の航路部横断トンネル
道路規格	: 第4種1級
車道部	: (3.25 m×2車線) ×2
航路水深	: 12.0 m
護岸間の距離	: 738 m
施工時波浪	: H1/3=2.7m Hmax=4.9m
(港内波浪)	: T1/3=13.0sec
地盤条件	: CDL-16m 以浅、砂質土(φ=30°)
	: CDL-16m 以深、粘性土(C=90kN/m ²)

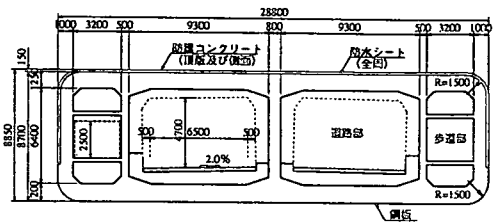


図-3 函体断面図

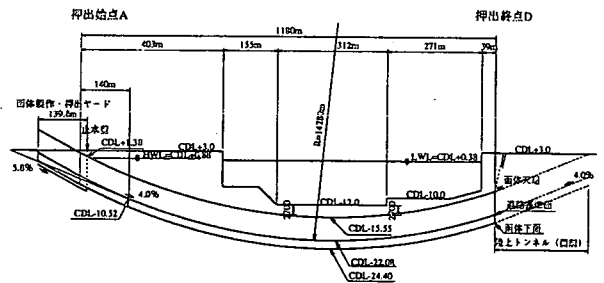


図-4 縦断図

- (2) ただし、躯体工事を気中作業とする。
- (3) 施工サイクルを7日とし、各工種の必要施工日数が7日以下となるようにする。
- (4) 同一ブロックに目的の異なる仮設備を配置しない。
- これらより、表-2、図-5に示すように以下の計画とした。

- (1) 施工ブロックは10ブロックで構成し、1ブロック当りの長さを10mとした。
- (2) 第8ブロック（側・頂部防水工ブロック）前から約60mを押出ヤードとした。今回の押出装置は函体上床版上に設置することとしたため、函体の上床版コンクリートの養生が終了したこの位置を押出開始点とした。
- (3) 函体の上床版がHHWL+0.50m（CDL+1.38m）の位置に止水壁を設けた。この位置への設置により、上床版部の止水工が基本的に不要となる。なお、止水壁の背面は完全なドライとはせず、水位をCDL-3.6mに保持することにより、止水工の仕様の軽減、浮力による函体底面摩擦力の低減を図ることとした。

6 函体押出システム

函体押出ヤードから到達立坑までの函体を押出ヤードのみで押出す必要があり、押出システムには以下のこと要求される。

- (1) 函体製作ブロック長さ（10m）を1日で押出可能であること。
- (2) 必要押出力に対し、確実に押出し得るジャッキ能力を有すること。
- (3) 押出時の函体の方向の制御が可能であること。
- (4) 押出時における函体の過大な移動を制御し得ること。
- (5) 函体の位置を把握できること。

本検討の結果、押出システムは以下の要素で構成するものとした。図-6に函体押出システムの概要を示す。

- (1) 押出ジャッキ：函体を押し出すジャッキ。
- (2) 摩擦低減装置（HYDRO SLIDER）：函体と施工ヤード部の支承との摩擦を低減する装置。
- (3) 滑り支承台：水中部において函体を支持し、線形を保持するもの。
- (4) 方向制御ジャッキ：函体の線形を許容値以内に制御するジャッキ。
- (5) 位置計測システム：函体の先端の位置を把握するシステム。

ここでは、本工法の技術要素として重要な押出ジャッキと摩擦低減装置について紹介する。

表-2 函体製作サイクル

工 種	1	2	3	4	5	6	7
下床版鋼板工	設置・固定	設置・固定	設置・固定	設置・固定	設置・固定	設置・固定	設置・固定
下床版防水工	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付
下床版鉄筋工	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置
下床版コンクリート工	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設
壁鉄筋工	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置
壁コンクリート工	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設
上床版鉄筋工	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置	鉄筋配置
上床版コンクリート工	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設
側・頂部防水工	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付	防水シート貼付
防護コンクリート工	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設	コンクリート打設

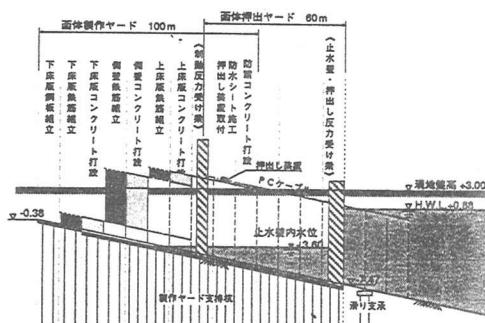


図-5 函体製作ヤード縦断面図

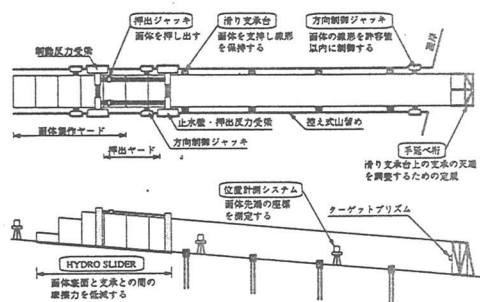


図-6 函体押出システムの概要

(1) 押出ジャッキ

押出ジャッキは必要押出力と作業性により以下のよう
に選定した。

必要押出力は函体重量の押出方向成分力、函体製作ヤード及び滑り支承設置位置での摩擦抵抗、止水壁部での水位差による抵抗力の和により算定できる。後述する摩擦低減装置設置範囲内では、押出力軽減のため摩擦低減装置の能力をフルに発揮させることで、理論的に摩擦抵抗を0とすることができる。その結果として算定された必要押出力は21.6MNとなり、必要ジャッキ能力を29.4MNとした。また、斜路において函体が暴走することを避けるため制動ジャッキも考慮することとした。この結果、押出ジャッキ：4.9MN ジャッキ×6台、制動ジャッキ：4.9MN ジャッキ×4台を配置する計画とした。

ジャッキの構造は押出時のストローク量及び橋梁の押出架設における実績からセンターホールジャッキ（VSLジャッキ）を採用することとした。押出及び制動ジャッキを順次作動させ、連続的に押し出すことは海底管の押し出などで既に実績がある。ジャッキの配置についてはジャッキの盛替えの容易さを考慮して、函体の上床版の上に配置することとした。押出ジャッキの作動概要、配置図を図-7に示す。

(2) 摩擦低減裝置 (HYDRO SLIDER)

函体製作ヤードにおける作業はドライワークが原則であり、本計画では函体の気中重量は1ブロック当り、約27.5MNと大きい。このため、函体を押出す際に生じる摩擦力は非常に大きくなる。よってこの摩擦力を低減することが現実的な押出システムを構築する上で重要となる。このシステムを計画する上で必要な機能として以下の項目を考慮した。a) 押出時の抵抗が小さい。b) 斜路部(最大5.8%)を暴走させない。c) 押出時以外の固定が容易。d) 函体重量の支持が可能。e) 管理及び制御が容易。これらの要求を満たす摩擦低減装置として図-8に示すハイドロスライダーを提案し、この装置を函体製作ヤードの全面(延長100m)に配置することとした。

ハイドロスライダは、摩擦係数を低減するのではなく、支承部が分担する見かけの重量をコントロールすることに特徴がある。本装置の原理及び特徴は以下の通りである。なお、この摩擦低減装置の原理は実験により確

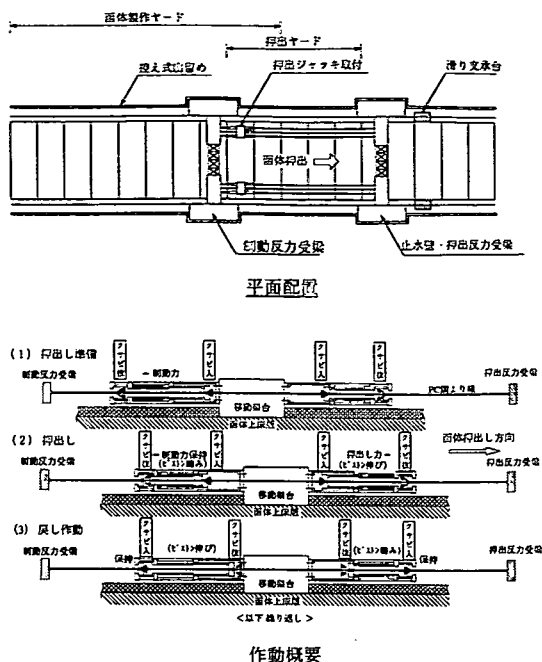


図-7 押出ジャッキの配置と作動概要

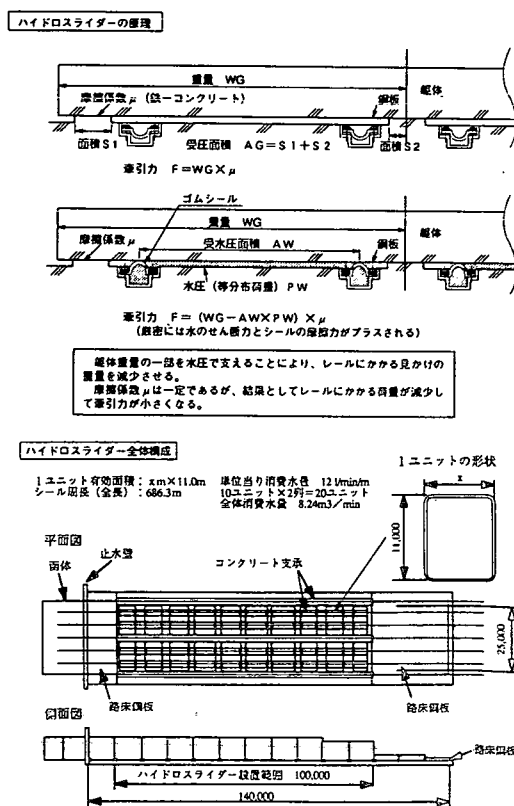


図-8 摩擦低減装置 (HYDRO SLIDER)

認されている。¹⁾

- (1) 函体は軸方向に断続したレール状の支承に支持される。
- (2) 支承間に各々が連続した半円形ゴムシールのユニットを配置する。ゴムシールはシール内部に水を注入すると膨らみ、内側に水を張った際に函体底面と接触し、ある程度の水密性を保持できるものである。同時にこれに囲まれたユニットの内側は連通しており、水を張れる構造となっている。
- (3) 押出時にはゴムシールの内側の水の水圧をあげる。函体底面は水圧をうけるため、支承部が負担する函体重量が低減される。全ての重量を水圧で支持した場合、見かけの摩擦力は0となる。なお、本計画では函体重量の全てを水圧で支持する場合に必要な最大水圧は0.13MPaとなった。(1ブロック当りの止水壁内水位を考慮した最大函体重量：26.0MN、ユニット面積：198.0m²)
- (4) 一方、静止時には水圧を低下させる。これにより見かけの摩擦力は大きくなり、函体が滑り出しにくくなる。
- (5) 水圧の管理を水位管理で行い、水位差を変化させることによって摩擦力の調整が可能となる。よって施工中の水圧管理は容易である。

7 施工中の函体の安全対策

押出沈埋トンネル工法では、函体全延長の押出が完了するまで函体の埋め戻しを行うことができないため、施工中の長期間にわたって函体が裸の状態で水中部に存在することとなる。このため、航行船舶の投錨・走錨対策、航行船舶による流体力に対する安定性、港内への進入波浪に対する安定性について検討した。

(1) 航行船舶に対する投錨・走錨対策

投錨、走錨に対する対策を以下のように計画した。

- ・投錨に対して：上床版に防護コンクリート 150mm を配置する。
- ・走錨に対して：躯体の隅角部の形状を半径 1500mm の曲面とする。

投錨対策については、文献2)の実験結果(コンクリートの最大破砕深さ：150mm)を参考に、防護コンクリート厚 150mm を選定した。港口部の航路内で大型船舶が直接投錨することは考え難いが、錨重量 0.10MN を想定した場合について、衝撃荷重に対する躯体の安全性を検討した結果を表-3に示す。この結果より、0.10MN 程度の錨重量であれば、防護コンクリート厚 150mm で十分対応できることが確認された。

走錨対策については、躯体の隅角部にアンカーヘッドが引掛からず滑る形状とする。重量 0.10MN 相当の錨に対して算定した結果、半径 1500mm の曲面を選定した。(図-9)

(2) 航行船舶による流体力に対する安定性

水理実験の結果³⁾、航行船舶による流体力はその影響範囲が狭く、波高 1m 程度の波浪の影響より小さいことが明らかとなった。よって後述の波浪対策に包括されるものと考えた。

表-3 CEB の方法による衝撃荷重算定及び耐力照査

コンクリートの弾性係数	E_c	2.4E+04 (MN/m ²)
錨の重量	W	0.10 (MN)
錨の衝突速度	V_i	7.0 (m/s) 等速度 2)
錨の貫入量	x	31 (mm) < 150(mm)
等価動的荷重	F_{dyn}	13.6 (MN)
等価静的荷重	F_{stat}	9.9 (MN)
上床版の押抜きせん断耐力	P_a	11.2 (MN) > F_{stat} O.K.
コンクリートの最大破砕深さ	d	150 (mm) 実験より 2)

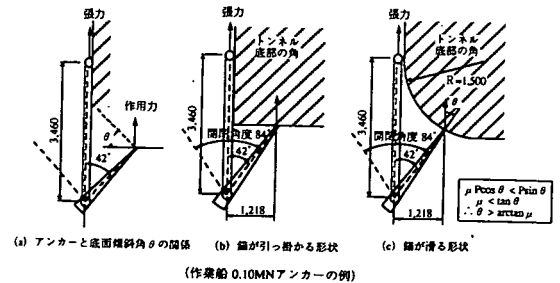


図-9 アンカーヘッドと函体底面の形状の関係

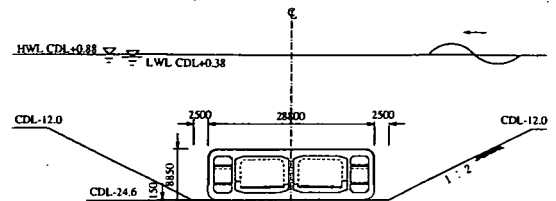


図-10 波力計算モデル

(3) 波浪に対する安定性

a) 函体に作用する波力

トレンチ内に設置された函体に作用する波力は、文献3)に従いポテンシャル理論に基づく境界要素法により算定した。波力算定モデルを図-10に、算定結果を図-11に示す。図-11は横軸に波の周期、縦軸に波高で正規化した波力(F_x :水平波力、 F_z :鉛直波力)を示す。この図より、 $H_{max}=4.9m$ 、 $T=13sec$ に対する波力を求めると、水平波力 $F_x=0.24MN/m$ 、鉛直波力 $F_z=0.12MN/m$ となる。

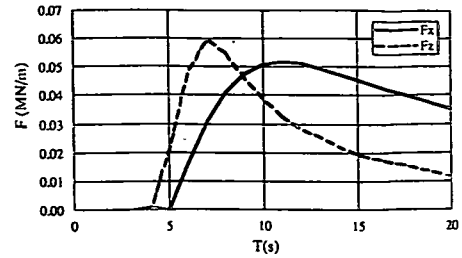


図-11 波力計算結果(波の周期と波力の関係)

b) 対策

鉛直波力対策としては、波浪時においても函体が高き上がらないようにすることとし、鉛直波力を考慮した函体の浮き上がり安全率が1.03を確保できるように、バラストの計画を行った。この結果、必要バラスト量は0.30MN/mとなり、鉛直波力が作用しない状態での浮き上がり安全率は1.08となった。なお、検討波浪条件を上回る波浪の来襲に備えて、函体内に緊急時調整バラスト用鋼製隔壁を設置することとした。一方、水平波力対策は図-12に示すように水中部に50m間隔で設置された滑り支承台の側部に設けられたストッパーで抵抗させることとした。滑り支承1基に作用する水平波力は、 $0.24MN/m \times 50m = 12.0MN$ となり、滑り支承架台及び杭の設計において考慮した。

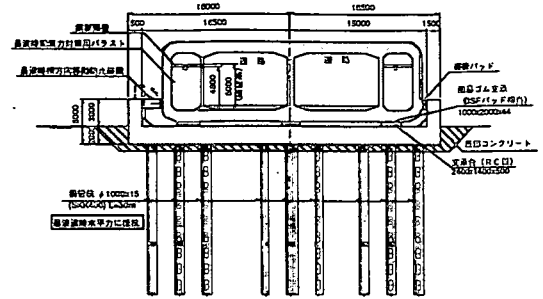


図-12 施工中の函体の安全対策

表-4 工程表

	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年
発着側陸上部							
山留・基礎工・掘削(陸上工事)							
山留・仮覆土・掘削(海上工事)							
函体製作ヤード敷設							
函体製作・押出工							
函体製作ヤード撤去・掘削部構築							
海上工事							
トレンチ設置							
滑り支承台工							
堀め戻し							
到達側陸上部							
立坑・陸上トンネル工事							
トンネル設置・構築							

8 工程及び工費

本ケーススタディにおける押出沈埋トンネル工法の概略工程を表4に示すが、全体工期は約6年であり、従来の沈埋トンネル工法とはほぼ同等となった。また、概略工費は、従来の沈埋トンネル工法の85%程度となった。

9 あとがき

本研究の結果、押出沈埋トンネル工法はその技術的課題に対して既存の技術の応用と組み合わせによって対応可能であり、工期や工費の点でも従来の沈埋トンネル工法と比べて同等あるいは有利になる可能性があると考えられる。今後は、実際の工事への適用に向けて、それぞれの現地条件に即した詳細検討が望まれる。

なお、本報告は(財)沿岸開発技術研究センター、大成建設(株)、五洋建設(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)の5社で実施している「押出工法による沈埋トンネルに関する共同技術開発」の研究成果をとりまとめたものである。

(参考文献)

- 1) 伊藤ら; 水底トンネル押出工法の開発、海洋開発論文集、Vol.15、1999
- 2) Immersed and Floating Tunnels Working Group STATE-OF-THE-ART-REPORT; ITA, 1997.4
- 3) 伊藤ら; 水底トンネル押出工法施工時の函体に働く流体力、海洋工学論文集、第46巻、1999