

水底トンネル押出し工法の開発

NEW LAUNCHING ERECTION METHOD FOR SUBMARGED TUNNELE

伊藤一教¹・東江隆夫²・織田幸伸¹・勝井秀博³・和田憲治⁴・内藤正光⁵

Kazunori ITO, Takao TOUE, Nobuyuki ODA,
Hidehiro KATSUI, Kenji WADA, Masamitsu NAITOU

- ¹正会員 工修 大成建設(株)技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
²正会員 M.S 大成建設(株)技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
³正会員 工博 大成建設(株)技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
⁴大成建設(株)土木技術部 (〒163-0690 東京都新宿区西新宿1-25-1)
⁵大成建設(株)技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

A new construction method for a submerged tunnel has been developed. The new method is an application of the launching erection method for a bridge construction technique. Caissons that is an element of a tunnel are constructed at the tunnel entrance, and then they are pushed into the sea. Thus the method does not need huge construction space and navigation restriction. The technical subject of the new method is reduction of launching force. We developed the machine 'HYDRO SLIDER' to cut off the friction force. We carried out small and large scale experiments to investigate the problems in practical use of HYDRO SLIDER. The experiments show that HYDRO SLIDER makes possible to reduce the friction force. We also carried out experiments to investigate the wave forces and the fluid forces caused by a cruising a ship. The results show that the wave forces are larger than the fluid forces caused by ship. Finally, the motion of the caissons caused by waves are simulated numerically, and it was found that the motions are negligibly small.

Key Words : Submerged tunnel, launching erection method, friction cut off machine, HYDRO SLIDER, wave force, fluid force

1. はじめに

海底トンネルの新しい工法として水底トンネル押出し工法を提案し、施工時に必要となる摩擦低減装置を提案するとともに、施工中のトンネルに作用する流体力について検討した。

2. 水底トンネル押出し工法の概要

(1) 従来工法の問題点

従来、海上施工による海底トンネルは沈埋函工法で施工される。沈埋函工法は、ドライドックなどであらかじめ函体を製作した後、設置地点まで函体を曳航し沈設する。そのため、函体製作時には広いヤードを必要とし、海上施工時は航行制限を必要とする。また、建設地点の水深が函体の高さに比べて浅い場合には、曳航のための仮浚渫を必要とする。

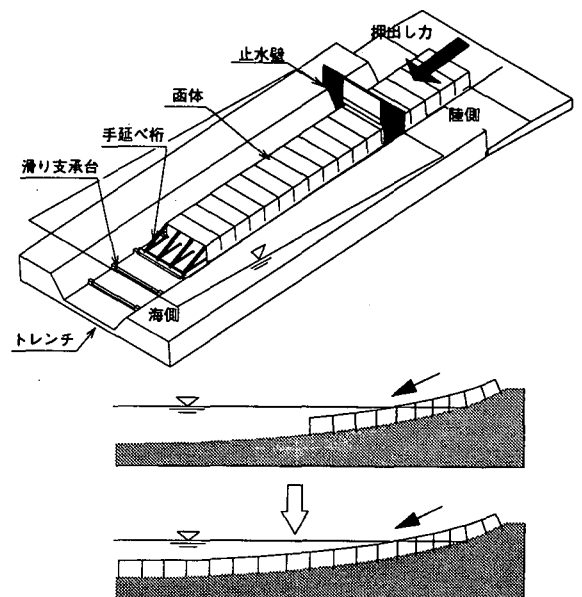


図-1 水底トンネル押出し工法の説明概要図

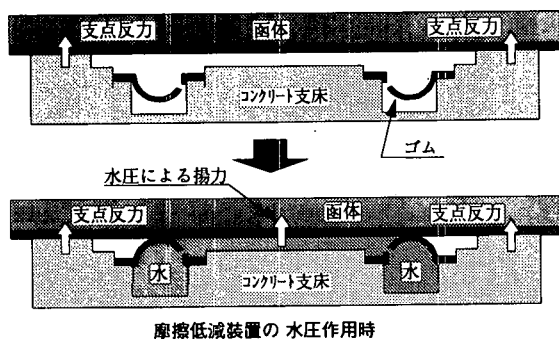


図-2 摩擦低減装置の原理

(2) 水底トンネル押出し工法の特徴

水底トンネル押出し工法は、橋梁における押出し工法を、水底トンネルに適用したもので、トンネルを陸上部から押し出して施工するところに特徴がある。図-1は、水底トンネルを押し出し工法で施工している状況を示した図である。既設の函体と連続体構造となるように陸上部で長さ10～15m程度の函体を構築し、逐次陸上から海底へ函体を押し出してトンネルを敷設する。そのため、函体製作ヤードを広くする必要がない。また、図-1のようなケースでは、水底トンネル完成後にトンネルへのアプローチ道路となる部分が函体製作ヤードとなるため、製作ヤードを別途用意する必要がない。

次に、水中に押し出された函体は、トレンチ内にあらかじめ設置された滑り支承台上を移動し、浚渫後の不陸による摩擦抵抗の増加を抑制する。また、トンネル先端の函体には手延べ桁が取り付けられ、センサーによって海底面の高低を測定し、障害となる部分は同じく手延べ桁に取り付けてあるブレード等により排除する。手延べ桁は滑り支承の位置計測の基準値を示す定規になっており、従来、精度向上が困難な海中測量を容易にしている。

(3) 水底トンネル押出し工法の課題

本工法は、陸上部からの押し出しによって函体を敷設するため、押し出し力を小さくすることが課題である。押し出し力を小さくするため、陸上部では函体とヤード底面の摩擦力を低減する必要があり、水中部では函体と滑り支承台の摩擦力低減が必要である。

函体とヤードの摩擦力低減については、後述の摩擦低減装置を開発した。ついで、水中部については、函体の比重を水と同程度にすることで摩擦力を低減することができる。しかし、函体を軽くすると波力や航行船舶による流体力によって函体が動揺し、浮き上がりなどが懸念される。そこで、動揺の外力となる波力実験と船舶航行に伴う流体力を明らかにする実験を実施した。

3. 摩擦低減装置の開発

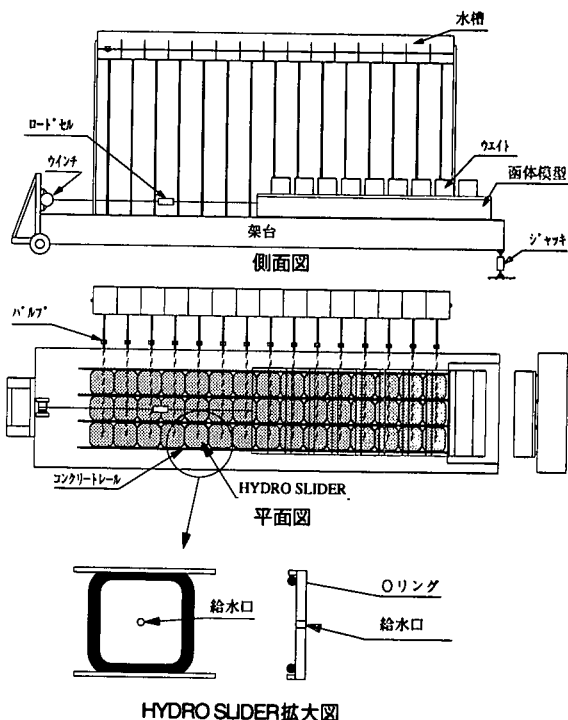


図-3 HYDRO SLIDER実験装置の概要

(1) 摩擦低減装置の説明

ここで開発した摩擦低減装置は函体製作ヤードで用いるものである。装置の原理は水圧を利用して鉛直抗力を軽減し摩擦力を低減するものであり、摩擦抵抗の少ない素材を用いて摩擦抵抗係数を小さくするのではない。この装置（以下、HYDRO SLIDERと呼ぶ）を、図-2で説明する。摩擦力（ F_w ）は式（1）によって表現できる。函体とコンクリート支床との間に水圧 P を作用させると、支点反力が N から $(N-P)$ と小さくなる。摩擦係数 μ は接触する材料によって決まるので、支点反力 $(N-P)$ を小さくすることによって F_w を小さくできる。

$$F_w = \mu (N - P) \quad (1)$$

ここに、 F_w ：摩擦力、 μ ：摩擦係数、 N ：垂直抗力、 P ：揚力（水圧）である。

本工法で構築する函体は連続体構造であるため、施工時に余分なせん断力を作用させないことが望ましい。そのため、本装置は式（1）の右边が正の条件で使用することで、常に函体に上下変位を与えることなく牽引力を小さくできる点に特徴がある。

(2) 原理確認実験

ここでは、HYDRO SLIDERの原理確認実験を実施した。図-3は実験装置の概要図である。架台上にアクリル板をはり、函体模型を支持するコンクリートレールを設置した。摩擦低減装置であるHYDRO SLIDERの模型は、Oリングによって作製しコンクリートレール内に規則的に配置した。水圧は、Oリングに囲まれた範囲の中央に配置した給水口から水槽内の水を流すことで水槽の

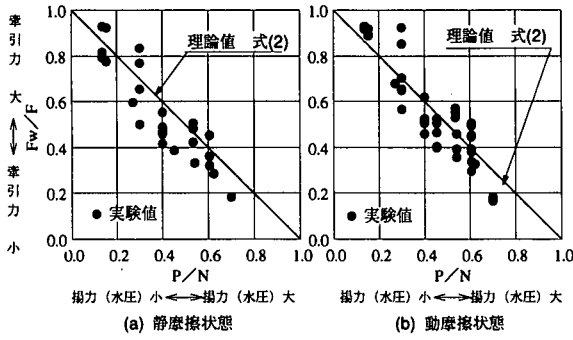


図-4 HYDRO SLIDERの原理確認実験結果

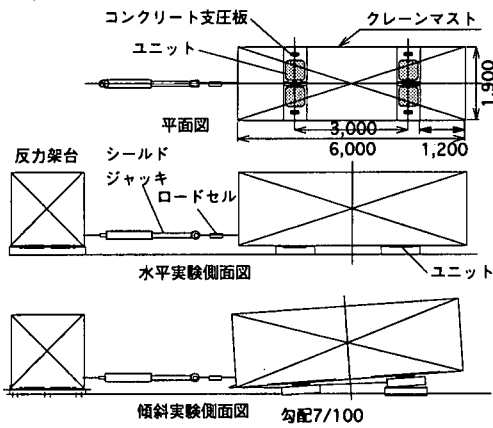


図-5 実スケール実験概要図

ヘッド分の水圧を作用させ、水槽内の水は一定に保つようにした。つまり、HYDRO SLIDERに水圧を作用させない時は、函体重量をコンクリートレールが支持し、給水口から水圧を作用させることによってコンクリートレールが受け持つ支点反力が減少する仕組みである。函体模型はウインチを制御して牽引し、この牽引力をロードセルで計測した。また、装置端部にジャッキを取り付け、実機を想定して7%の傾斜をつけた。実験条件は、縮尺1/100とし、荷重条件3種類、水圧条件6種類、函体勾配2種類、牽引速度2種類と変化させた。

図-4は実験結果である。図中の直線は式(2)による直線である。

$$F_w/F = 1 - P/N \quad (2)$$

ここで、 $F_w (= \mu(N-P))$ は水圧作用時の牽引力、 $F (= \mu N)$ は水圧無の牽引力である。

この式(2)は、水圧が大きくなるにしたがって小さな牽引力で函体模型を移動させることができることを示すもので、図-4の静止摩擦状態、動摩擦状態ともにバラツキはあるものの実験値は式(2)と一致しており、水圧が大きくなるに従って牽引力が小さくなっている。

(3) 実スケール実験

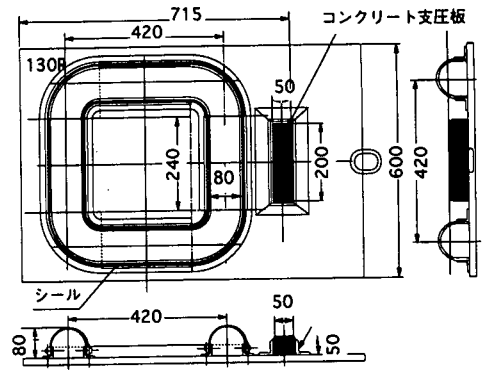


図-6 ユニットの構造図

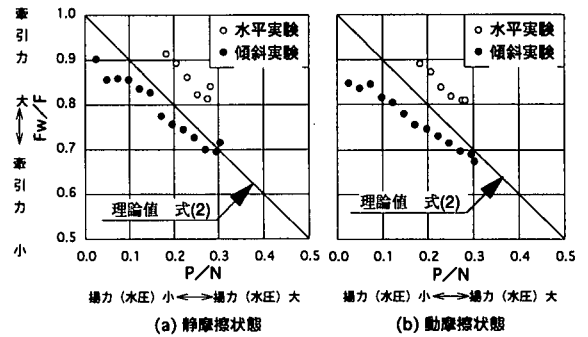


図-7 実スケール実験の結果

次に、HYDRO SLIDERの実スケール実験を実施した。図-5は実験装置の概要図である。実スケール実験では、HYDRO SLIDERのシール1個あたりに作用する荷重と支圧板の面圧が実機と等しくなるようにした。函体模型は、長さ6m、重量5,923kg(タワークレーンマスト)とした。水圧を作用させない場合のコンクリート製支圧板は支圧面積が50mm×200mmとなるように配置した。ユニットは図-6に示す形状である。1ユニットの加圧面積は1,694.47cm²で、シールユニット数4基で実施した。シール材は、ガラスクロス2層にウレタンゴムを含浸させたものを用いた。シール材としてこの材料を選択した理由は、ウレタンゴムが耐摩耗性に優れていること、ガラスクロスで内圧による引張り力に対抗し、材質そのものが伸びないようにするためである。水圧作用の仕組みは、シール材内部に水を供給することによって、シール材に設けた穴から加圧部に水が供給されて加圧される仕組みである。実験条件は、函体勾配2種類で水圧条件を変化させた。

図-7は実験結果で、図中の直線は式(2)による直線である。実験結果は、静止摩擦状態、動摩擦状態ともにバラツキはあるものの実験値は式(2)と一致しており、水圧が大きくなるに従って牽引力が小さくなっている。水平実験では全体的に理論値より上側にシフトし、

傾斜実験では水圧作用が小さいときに理論値より小さい牽引力となった。この理由は明確ではないが、マストクレーンに取り付けた鉄板の錆や表面状況、シール材の膨らみに依存する漏水などによると思われる。

この実験により、HYDRO SLIDERが摩擦低減装置として実用可能であることが明らかとなった。本装置は水圧を作用させるというシンプルな原理である。したがって、実構造もタンクをヤード床面より高い位置に設置し、そこから配管によってシール材内へ水を供給する構造でよい。作用水圧の大きさがヘッド差のみで決定されるため、式(1)の右辺が正の範囲となるように設備を設計することができ、制御もバルブ操作程度の簡単なものができる。そして、最大水圧が作用しても支圧板に荷重が作用する設定にしておくことで、ハイドロプレーニング的な函体の暴走などに対する安全装置となる。

実験終了後に計測したコンクリート製支圧板の摩耗度は、実験の初期値に対して、全摺動距離20mについて平均すると、0.387mmで、最も摩耗の激しいところでは1.05mmであった。摩耗状況を観察すると、実験当初の牽引によるコンクリート製支圧板の摩耗が支配的で、その後の実験ではコンクリートの摩耗は殆ど見られなかった。また、シール材の摩耗はほとんど確認できなかった。

4. 函体に働く流体力実験

4. 1 波力実験

(1) 実験条件と装置

波力実験は、長46m×幅0.8m×深さ1.6mの2次元水槽内に、模型を配置し実験を行った(図-8)。対象とした断面は図-9(a) Case1を基本とし、これよりも函体下のクリアランスを大きくした(b)Case2と、トレンチなしの(c)Case3の合計3ケースの形状について実験した。実験条件は、図-9の各断面に対して、波高1, 2m, 周期を5, 6, 7, 8, 15秒を設定した。模型縮尺は1/100である。また、波力は函体表面に設置した圧力計から算出した。

(2) 実験結果と考察

図-10は、水平力 F_x と鉛直力 F_z の最大値をまとめたものであり、図中の実線は境界要素法¹⁾による計算結果を示す。水平力は、入射波の周期の増加に伴って増加し、波高の増加に伴って線形的に増加する。トレンチと函体のクリアランスが水平力に与える影響は少なく、トレンチの有無が水平力に及ぼす影響は、トレンチの無い場合の方が水平力が小さくなる。

鉛直力は、入射波の周期依存性が強く、函体幅が波長の1/2程度の条件で最も大きい。また、波高の増加に伴って線形的に増加する。鉛直力に及ぼすトレンチやクリアランスの影響は明確でないが、トレンチ有りの場合では、クリアランスが小さいほど正の鉛直力が大きい傾向

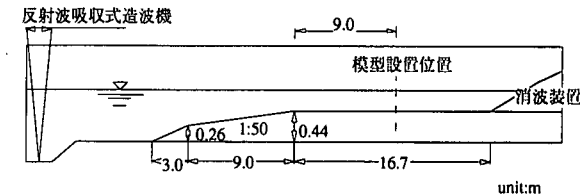


図-8 波力実験装置の概要

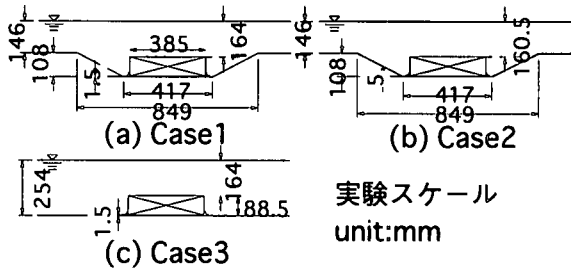


図-9 対象断面

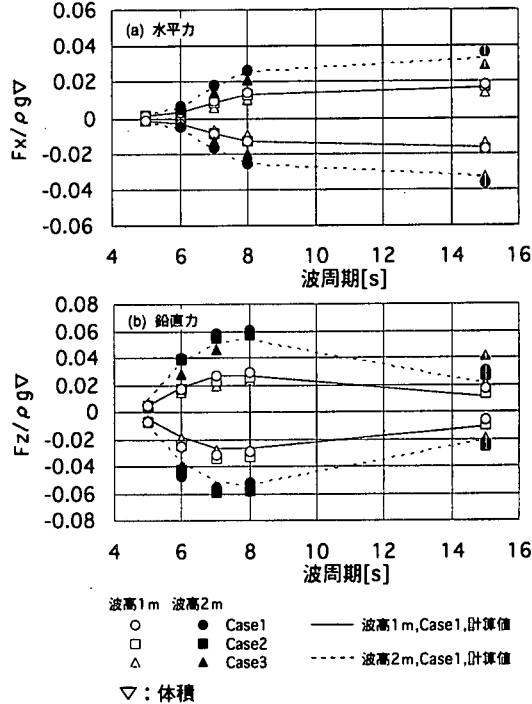


図-10 波力実験結果

にある。計算値は、実験結果と良く一致しており、境界要素法によって函体に働く波力を算出できることがわかる。

4. 2 航行船舶による流体力実験

(1) 実験条件と装置

航行船舶による流体力実験は模型縮尺を1/100とし、船模型の曳航実験を行い、函体に作用する圧力変動を計測し水平力と鉛直力を算出した。図-11は実験状況図であり、水槽内に設置した2本のレール上にのせた曳航台車に船舶模型を吊り下げ、曳航中の船舶の吃水が一定となるようにした。船舶模型は、函体模型の中央部を通過させ、圧力は船舶通過線から片側半分について計測した。実験条件は、図-9の各断面に対して船舶模型を2

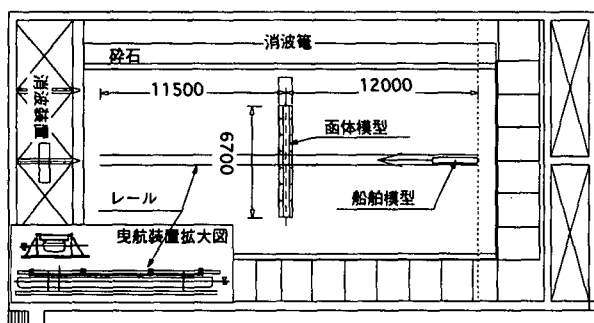


図-11 平面実験状況図 unit:mm

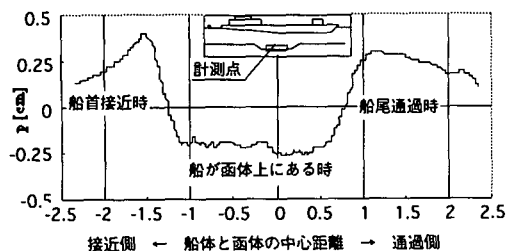


図-12 圧力の時系列 (実験結果)

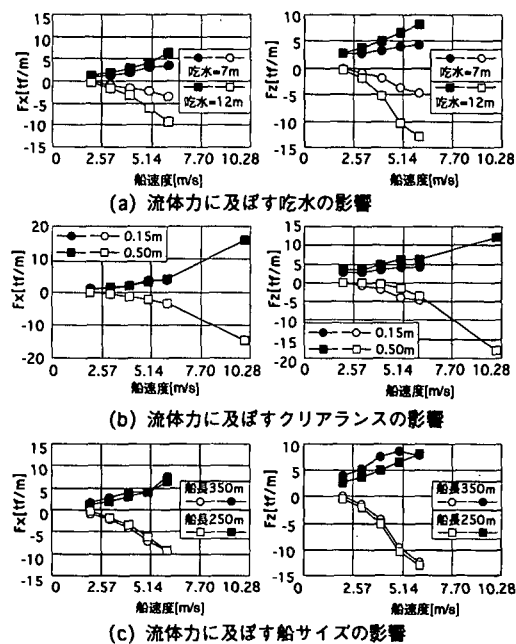


図-13 船舶による流体力の実験結果 (実スケール)

種類, 通過速度を5種類, 吃水を2種類と変化させた。船模型の諸元は, 1/100スケールで2.5m×0.42m, 3.5m×0.67mである。

(2) 実験結果と考察

図-12は, 標準断面である図-9のCase1に対する圧力変化の時系列実験結果で, 船直下における函体天端中央の圧力変化の時系列を, 横軸を函体と船の中心間距離にして示している。船が接近するにしたがって正圧となり, 船首が函体直前に位置するときに正圧のピークとなる。そして, その直後から負圧に変化し, 函体上に船体

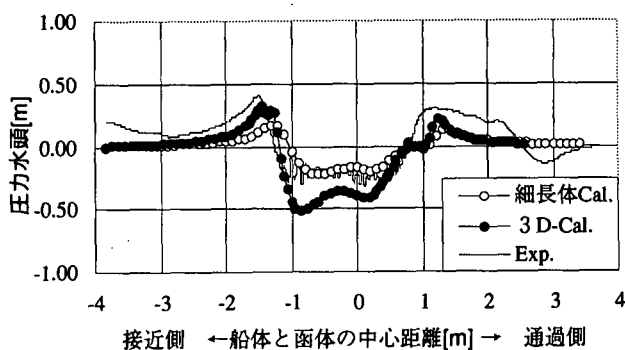


図-14 圧力時系列のの比較 (実スケール)

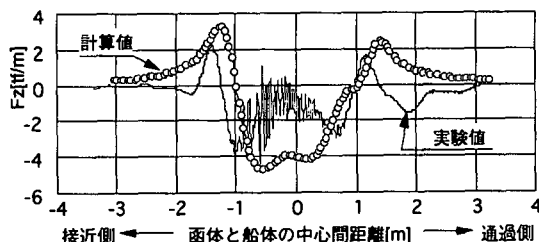


図-15 鉛直力のの比較 (実スケール)

が有る時には負圧が継続する。そして, 船尾が函体を通る際に負圧から正圧に転じ船尾が函体を通り直後に正圧のピークとなる。この傾向は断面の違いなどによらない。一樣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鈴木²⁾が示している。圧力場に与える函体やトレンチの影響が小さい条件では, この航行船舶に伴う圧力変動が直接函体天端面に作用した結果, 図-12の示す圧力変動が現れた。

図-13は, 船の吃水, クリアランス, 船のサイズが鉛直力・水平力の最大値に及ぼす影響をみたものである。鉛直力・水平力ともに, 船の進行速度の増加に伴って増加し, 船の吃水が大きくなるほど両者ともに大きくなる。函体とトレンチ間のクリアランスが, 鉛直力・水平力に及ぼす影響は小さい。鉛直力・水平力に及ぼす船のサイズの影響は, 船の吃水に比べれば小さい。

このような航行船舶による流体力は, 3次元境界要素法やVOF法など3次元数値シミュレーションで算出できるが, 計算労力は膨大なものになる。ここでは函体の鉛直力について簡易に算出することを試みる。対象は, 標準断面の図-9 case1とし, 吃水は実機スケールで水深14.6mに対して7m, 函体とトレンチのクリアランスは実機スケールで0.5m, 航行速度は実機で11.7ktとした。まず, 函体天端に作用する圧力変動を, 一樣水深における細長体理論と3次元ポテンシャル流による計算結果を実験値とともに図-14に示す。両計算値はトレンチや函体の影響を無視しているにもかかわらず, 比較的良く一致し, 負圧については細長体理論の結果が実験値と良く一致している。実験結果から函体下面に作用す

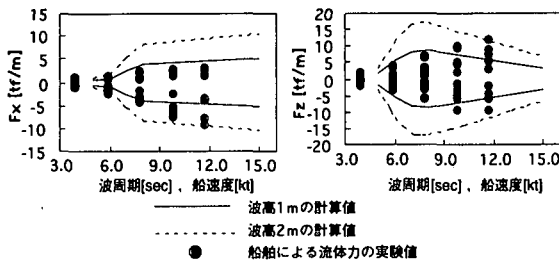


図-16 波力と船による流体力の比較（実スケール）

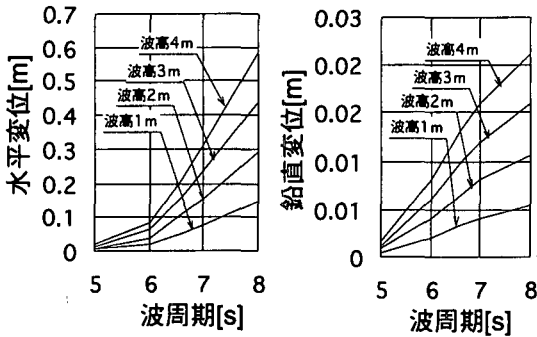


図-17 波力による動揺量の計算結果（実スケール）

る圧力は小さかったため、函体下面の圧力はゼロとして函体天端上に作用する圧力変動のみから函体に働く鉛直力を算出する。具体的には、一樣水深を函体天端レベルとし、函体天端上の圧力変動を細長体理論で算出する。図-15は鉛直力の比較で、実験値と計算値は比較的一致している。

ここで対象としたケースは、船の速度が比較的速く、吃水も深いが、実際港内を考えれば航行速度は2.57m/s(5kt)程度が、吃水も数mが一般的と想定できる。それゆえ、水底に作用する圧力変動は対象としたケースよりさらに小さく、トレンチ内の圧力分布も函体天端に比べてさらに小さくなると考えられる。したがって、一般的な港内では、このような簡易な方法で鉛直力を算出しても十分である。ただし、船舶による流体力については、細長体理論や3次元ポテンシャル流計算およびメカニズムについて別の機会に詳しく報告する。

(3) 波力と航行船舶による流体力の関係

図-16は、波力と航行船舶による流体力の関係を比較したもので、波力については図-10に示した計算値を、航行船舶による流体力については、図-9のcase1,2の実験結果をプロットした。この図より、航行船舶による流体力は、最大でも波高2m程度の波力に相当することがわかる。現実的に水底トンネルを施工するサイトと

して港内を考えれば、船舶の速度は5.15m/s(10kt)以下と考えられ、この範囲であれば波高1mの波力程度である。この結果より、水底トンネル押し出し工法の施工時の設計外力としては波外力が支配的であることがわかる。そこで、波による施工時の動揺量について考察する。ここでは、施工時の函体を自由浮体として線型動揺解析を実施した。その結果を図-17に示す。計算結果より、鉛直変位量は十分小さいと判断できるが、水平変位は波高4mのときに約0.6mで十分小さくはない。しかし、この計算では、施工時の函体を自由浮体としており、実際、陸上部から押し出された長大な函体は連続体としての剛性を有しているため、この計算結果より小さい値と考えられる。また、水平方向には滑り支承台などにストッパーの機能を付加して変位を拘束することができるので、水平変位についても現実的には問題ないと判断できる。

5. あとがき

海底トンネルの新しい工法である水底トンネル押し出し工法を提案し、施工時に必要となる摩擦低減装置を提案するとともに、施工中のトンネルに作用する流体力について検討した。その結果、摩擦低減装置（HYDRO SLIDER）は、実用的な摩擦低減装置であることが確認できた。また、施工中のトンネルに作用する流体力については、航行船舶による流体力は、波高1～2mの波力に相当し、現実的な設計外力としては波力が支配的であることが確認できた。また、施工中の函体に流体力が作用した場合の動揺量は、鉛直方向にはほとんど動揺することがなく、水平変位についても十分施工可能な程度であることがわかった。

現在、（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）で実施している「押し出し工法による沈埋トンネルの共同研究」において、本工法の具現化に向けてコスト、技術課題について検討中である。

参考文献

- 1) 井島武士，吉田明德，山本督夫：任意断面浮体の2次元係留運動と波の変形，土木学会論文報告集，No.272, pp.53-62, 1978
- 2) 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, pp.181-191, 1992

（1999.4.19受付）