

水底トンネル押し出し工法施工時の函体に働く流体力

伊藤一教*・東江隆夫**・織田幸伸*
勝井秀博***・和田憲治****

1. 緒 言

沈埋函工法に代わる海底トンネルの新しい工法として水底トンネル押し出し工法がある(伊藤ら, 1999)。この工法は、橋梁における押し出し工法を水底トンネルに適用したもので、連続体として構築した函体を、逐次陸上から海底へ押し出してトンネルを敷設する(図-1)。押し出しを容易にするには、函体と滑り支承台との摩擦力を低減する必要がある。函体の水中重量を海水と同程度にすることで摩擦力を低減できる。しかし、函体を軽くすると波力や航行船舶の流体力による函体の動揺、浮き上がりなどが懸念される。

波力の計算法は井島ら(1978)をはじめとして確立されているが、航行船舶による流体力については、鈴木(1992)の研究以外見当たらない。

本研究では、水底トンネル押し出し工法施工時の函体に働く波力と航行船舶による流体力を、模型実験と数値計算で明らかにし、特に航行船舶による流体力について実務的に簡便な算定法を提案した。

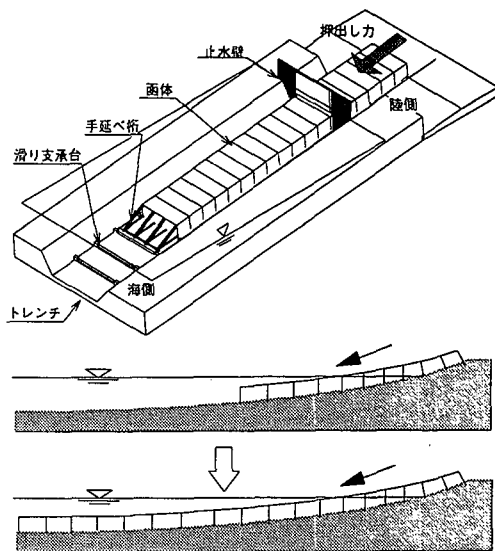


図-1 水底トンネル押し出し工法の概要

2. 函体に働く波力実験

(1) 実験条件と装置

波力実験は、長さ 46 m × 幅 0.8 m × 深さ 1.6 m の 2 次元水路内に、模型を設置して行った。模型断面を図-2 に示す。実験条件は、規則波で波高を 1, 2 m, 周期を 5, 6, 7, 8, 15 秒とし、模型縮尺は 1/100 とした。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-3 は、鉛直力 F_z の最大・最小値をまとめたものであり、図中の実線および破線は、図-2 の Case 1 を対象に境界要素法(井島ら, 1978)で計算した結果である。

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。鉛直力は波高の増加に伴って線形に増加する。また、この実験条件では鉛直力に及ぼすトレンチやクリアランス(函体下面とトレンチ

の間隔)の影響は明瞭ではない。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。

3. 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、船体模型を曳航して行った。水平力と鉛直力は函体に作用する圧力から算出し、上向きの力は負の鉛直力で、右向きの力が正の水平力である。図-4 は実験状況図で、水槽内に設置した 2 本のレールから船体模型を吊り下げ、曳航中の吃水を一定とした。実験条件は実スケールで通過速度を 2, 3, 4, 6, 10 m/s の 5 種類、吃水を 7, 12 m の 2 種類と変化させた。船体模型は 2.5 m × 0.42 m, 3.5 m × 0.67 m の 2 種類、船首・船尾の形状が異なる。対象断面は、図-2 の Case 1 および 2 である。

(2) 実験結果

図-5 は、図-2 の Case 1 の実験結果で、船体中央直下における函体天端中央の圧力変化を示す。横軸は函体

* 正会員 工 修 大成建設株式会社 技術研究所

** 正会員 M.S. 大成建設株式会社 技術研究所

*** 正会員 博(工) 大成建設株式会社 技術研究所

**** 大成建設株式会社 土木技術部

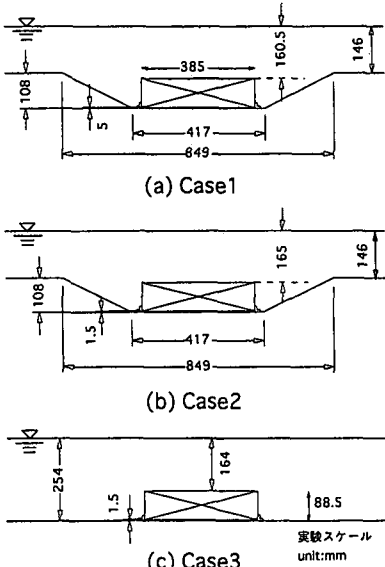


図-2 実験対象断面

と船の中心間距離である。船が接近すると正圧となり、船首位置が函体直前で正圧のピークとなる。その後から負圧になり、函体上に船体がある間は負圧が継続する。そして、船尾が函体を通過する際に負圧から正圧に転じ船尾が函体を通過した直後に再び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。また、横軸が-1.5~-1.25付近にみられる正圧のピークは速度および吃水が大きいほど急峻になる。また、速度、吃水、船形に関係無く正圧から負圧に転じるまでの長さ L_s はほぼ一定であった。

図-6は、船の速度と吃水が水平・鉛直力の最大値・最小値に及ぼす影響を示す。航行速度の増加に伴って船首船尾の圧力が増加するため、鉛直力・水平力も増加する。船の吃水が大きいほど鉛直力・水平力は大きい。この理由は、船舶と海底面までの距離が短く船舶による圧力の減衰が小さくなり、函体上面に作用する変動圧力大きくなるからである。また、本実験ではクリアランスおよび船のサイズの影響は、船の吃水に比べて小さかった。

(3) 航行船舶による流体力の数値計算

鈴木(1992)は船舶通過時の水底圧力の定常問題に対して3次元境界要素法を適用した。ここでは、ポテンシャル流の仮定と水面鏡像原理を用いて3次元ラプラス方程式を差分法で解き、圧力方程式によって圧力変動を算出する。水面鏡像原理により、船体は管路内の物体として扱うことができる。航行速度と等しい流れ場に物体が存在する場合の速度ポテンシャルを計算し、物体が無い場合の速度ポテンシャルを差し引くことで航行船舶による速度ポテンシャルが算出できる。函体やトレンチが存在

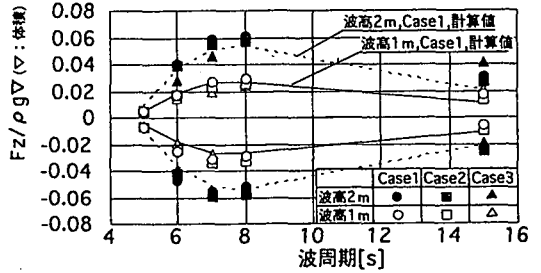


図-3 波力実験結果と計算結果の比較

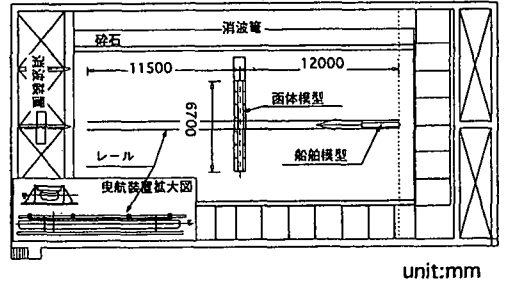


図-4 航行船舶による流体力実験状況

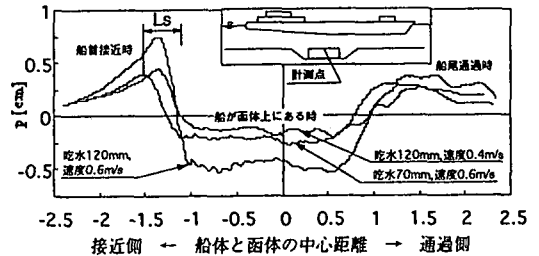
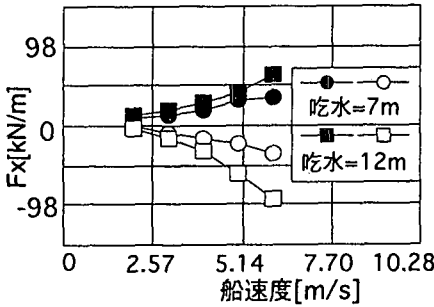


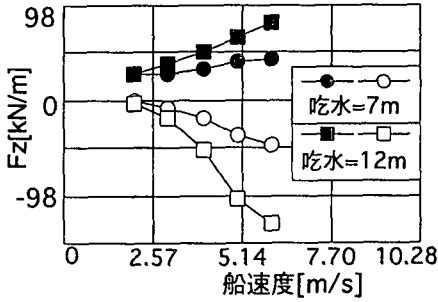
図-5 函体天端上に作用する変動圧力

する場合は非定常現象であるため、船体と函体の相対位置を変化させて速度ポテンシャルを求め、その速度ポテンシャルを差分した圧力方程式に代入し非定常圧力変動を求める。

図-7は、船体を長さ250 m、幅42 m、吃水7 mの矩形とし、トレンチも矩形とした簡易モデルの計算例である。図-5に示す函体天端上での圧力変化を計算は定性的に表すことができる。図-8は、船首が函体中央に位置する時の水平・鉛直力の空間分布で、水平力は船の直下で最大となり、鉛直力は船の側壁付近で最大となる。鉛直力の空間分布が2つのピークを示すのは、船体を矩形としたため函体側壁での流速が船底に比べて大きくなるため、滑らかな船体を詳細に再現した計算では1つのピークになる。



(a) 最大水平力



(b) 最大鉛直力

図-6 航行船舶による流体力の実験結果

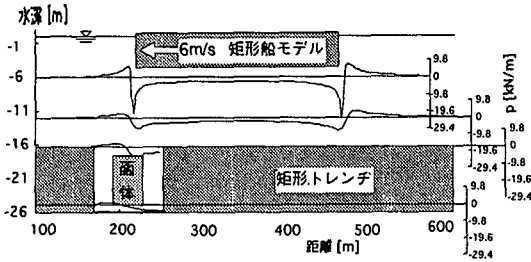


図-7 簡易モデルの3次元計算による圧力分布

図-9は、図-7の計算条件で函体の高さおよびトレンチの深さのみを変化させた場合の函体周囲における圧力分布の比較である。図より、函体上面のレベルが一定であれば、函体上面の圧力分布は函体の高さに影響されず、下面ではほぼ直線分布である。側面の圧力分布形状は、函体高さに関係無く深さ方向に減衰する。

4. 航行船舶による流体力の簡易計算法

航行船舶による流体力は、最大でも波高2mの波力と同程度である(伊藤ら, 1999)。そのため、航行船舶による流体力の算出に3次元数値計算で膨大な計算労力を費やすより、簡易計算によって算出することが実務的に有用である。ここでは、船体直下の航行船舶による流体力の簡易計算方法について検討する。

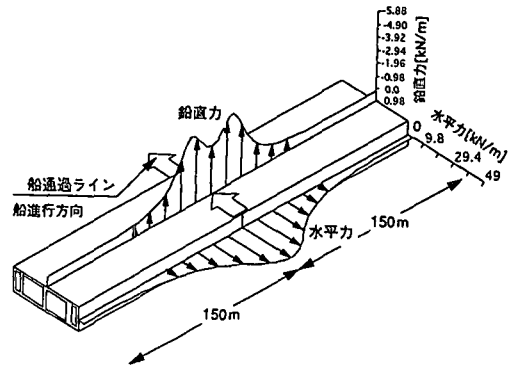


図-8 3次元計算による流体力の空間分布

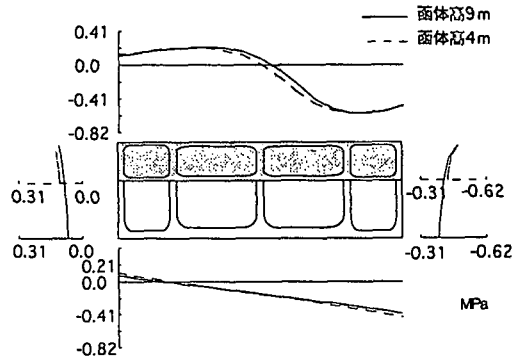


図-9 函体周囲の圧力分布の比較

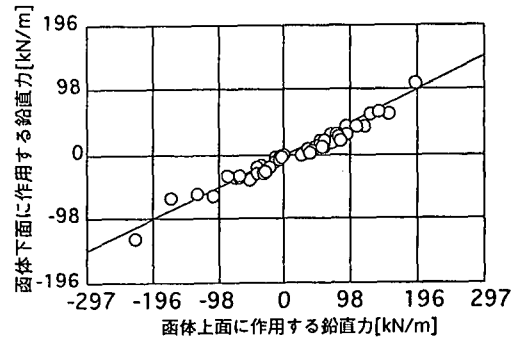


図-10 函体上面と下面に作用する鉛直力の関係

図-10は、船舶の速度が5.15 m/s(10 kt)以下の実験ケースについて、最大鉛直力発生時の函体上面下面に作用する鉛直力の関係を示した。函体上下面に作用する鉛直力には一定の関係がある。この結果を考察するため、例として函体に働く波力を考える。波力は波長と函体断面が一定であれば波高によって決まり、最大値を発生する位相やその時の圧力分布形は一定である。ゆえに、図-10の結果は船による流体力の場合も、波長に相当する物理量が存在することを意味する。船の速度や吃水は、圧力の絶対値に寄与し波高に相当する。図-5のLは船

とともに移動し、航行条件に依存しないことから波長に相当するとみなすことができる。

以上のことから、なんらかの方法で函体上面の圧力分布と L_s が算出できて、函体側面での分布形状を決定できれば、流体力を算出できる。

函体側面での分布形状は、図-9の函体側面での圧力分布形状と現象がポテンシャルで表現できるという考え方から、式(1)で近似し、函体底面は直線分布とする。

$$p(z) = p_b \times (\exp(z/L_s) / \exp(h_b/L_s)) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 p_b は函体天端隅角部の圧力、 h_b は函体高さ、 z は函体底板からの鉛直距離である。図-11は、図-9の函体側面の圧力分布と式(1)の結果を比較したもので、指数関数近似が妥当であることがわかる。

次に、函体上面に作用する変動圧力は一様水深における細長体理論を用いると、図-12に示す簡易モデルを提案することができる。このモデルは、函体上面での変動圧力を一様水深(函体天端水深)での細長体理論で算出する。ついで、函体側面の圧力は式(1)により算出し、函体下面は直線近似するもである。

細長体理論は、船長に比べて船幅と吃水は十分小さいと考え、船を水面上にある線として取り扱う。図-13に

示す座標系で船の断面積を $S(x)$ とすると、船からの湧き出し σ は

$$\sigma = -UdS/dx \dots\dots\dots (2)$$

で表わせる。 U は船の走行速度である。

流体内の任意点 (ξ, η, ζ) での速度ポテンシャル ϕ は、

$$\phi(\xi, \eta, \zeta) = -1/4/\pi \int_{-h/2}^{h/2} \sigma/R dx \dots\dots\dots (3)$$

である。 R は次式である。

$$R = \sqrt{((x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、水面と水底面の境界を鏡像で取り込むと水底面での速度ポテンシャル分布は次式となる。

$$\phi(\xi, \eta, \zeta) = -4 \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ϕ_i は次式となり、 h は水深である。

$$\phi_i = \phi(\xi, \eta, h_i), h_i = (2i-1)h; i=1 \sim \infty \dots (6)$$

ついで、速度 U で移動する座標系で考えると、速度ポテンシャル Φ は、

$$\Phi = \phi - Ux \dots\dots\dots (7)$$

となる。水底でのベルヌーイの式を考えると、

$$p/\rho g + 1/2g(\Phi_x^2 + \Phi_y^2) = p_0/\rho g + U^2/2g \text{ at } z = -h \dots\dots\dots (8)$$

となる。ただし、 p は船体周辺での圧力、 p_0 は無限遠での圧力である。式(8)に式(7)を代入し、 $\phi_x + \phi_y \ll U$ とすると、船舶による変動圧力 Δp は

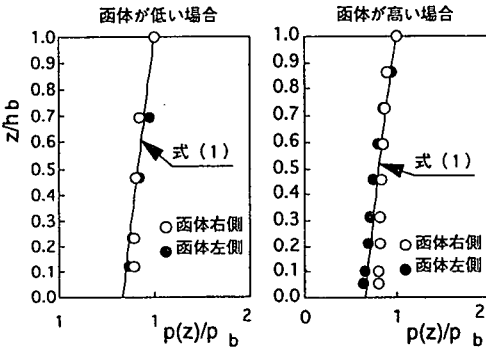


図-11 函体側面の圧力分布の比較

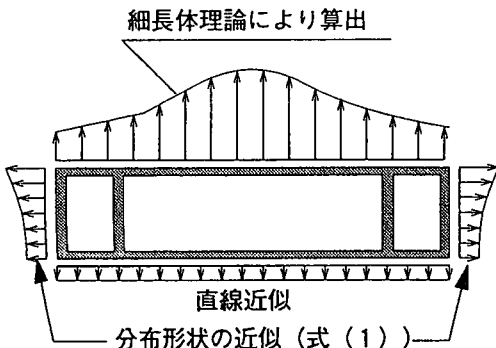


図-12 簡易計算モデルの説明図

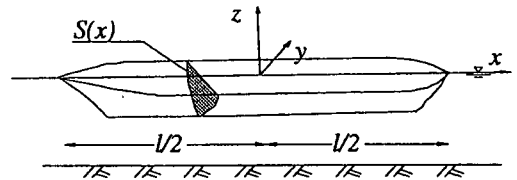


図-13 座標系

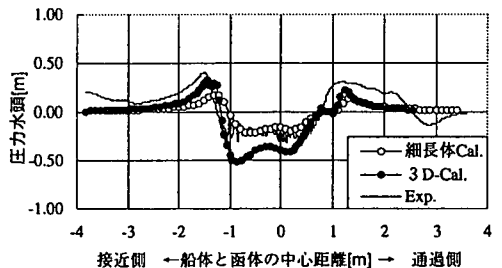
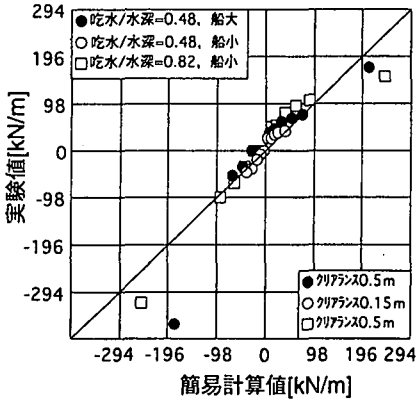
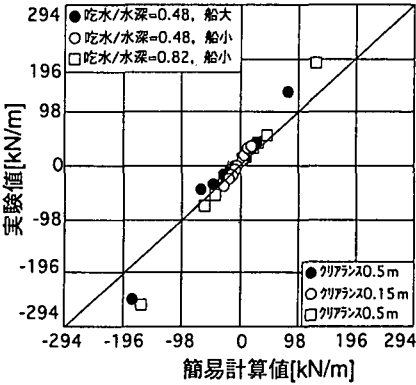


図-14 函体上面に作用する圧力の比較



(a) 水平力



(b) 鉛直力

図-15 実験値と簡易計算値の比較

$$\Delta p = (p - p_0) / \rho g = \phi_x U / g \dots\dots\dots (9)$$

となる。式(9)の計算結果から L_s を算出する。

図-14は、図-2のCase1で函体天端の圧力実験結果と、函体およびトレンチを無視した一様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比較したものである。実験条件を実機スケールで示すと、吃水は水深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6m/sのケースである。両計算値はトレンチや函体を無視しているにもかかわらず比較的一致し、細長体理論の結果は負圧で実験値と良く一致し正圧で過小になっている。一方3次元計算では正圧で実験値と良く一致し負圧で過大

になっている。この理由は、両者とも船体を十分再現できていないことによる。しかし、函体の浮き上がりを考えたと負圧が問題であるため、函体上面の変動圧力は一様水深での細長体理論を用いることで、函体上面の変動圧力を算出できることがわかる。

図-15は簡易計算法で算出した鉛直力および水平力の最大・最小値を実験結果と比較したものである。鉛直力と水平力のいずれも良く一致している。若干実験値の方が大きいデータもあるが、これは、図-14で示したように細長体理論では正圧を十分再現できないことによる。特に吃水が大きく、速度が速い場合には細長体理論の仮定が成立しないなどの理由から、函体上の圧力分布を再現できないため、実験値とあわなくなる。しかし、吃水が水深の1/2程度であれば、吃水や船形に関わらず細長体理論が適用可能であることが確認できた。

5. 結論

水底トンネル押出し工法施工時の函体に働く波力と航行船舶による流体力について、模型実験と数値計算で確認した。その結果、波力は境界要素法によって算定できることがわかった。航行船舶による流体力は、航行速度と船の吃水による影響が大きいことがわかった。実験結果を3次元計算によって考察した結果、圧力場に及ぼす函体の影響は小さいことがわかり、航行船舶による流体力の実務的に簡便な算定法を提案した。簡易計算法は細長体理論を用いたもので、実験結果を良く再現でき、実用的な精度を有することが確認できた。

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

井島武士・吉田明徳・山本啓夫(1978): 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.
 伊藤一教・東江隆夫・織田幸伸・勝井秀博・和田憲治・内藤正光(1999): 水底トンネル押出し工法の開発, 海洋開発論文集, Vol. 15, pp. 195-200.
 鈴木勝雄(1992): 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.