

浅海域における水中トンネルの開発 DEVELOPMENT OF SUBMERGED FLOATING TUNNELS IN SHALLOW WATER

藤田良一¹・三上 隆²・山下俊彦³
川合紀章⁴・佐々木秀郎⁵・峰友 博⁶
Ryoichi FUJITA, Takashi MIKAMI, Toshihiko YAMASHITA
Noriaki KAWAI, Hideo SASAKI, Hiroshi MINETOMO

¹正会員 工修 水中トンネル研究調査会<鹿島 土木技術本部> (〒107-8388 東京都港区元赤坂1-2-7)

²正会員 工博 北海道大学教授 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 工博 北海道大学助教授 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 工修 北海道開発局 局長官房 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

⁵正会員 北海道開発局 港湾部 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

⁶北海道開発局 建設機械工作所 (〒062-0052 札幌市豊平区月寒東2条西8丁目)

This paper describes the development process for tension legs type Submerged Floating tunnels (SFT) in shallow water. SFT is a completely new type of tunnels, unlike anything ever seen before. SFTs have attracted attentions as a new access to solve the problems not adequately dealt with by conventional structures. But, there are still many unknown factors, as no such structures.

Therefore, Hokkaido University, Hokkaido Development Bureau and the Society Submerged Floating Tunnel Technology Research have studied on SFT technology, such as, design methods, tunnel structure, mooring systems, foundations, its construction in this several years. So, we are able to develop the design and construction methods for tension legs type Submerged Floating tunnels in shallow water.

Key Words : *Submerged floating tunnels, shallow water, tension legs, design and construction
Methods, double hull steel structure*

1. はじめに

多くの港湾は、静穏度確保の観点から、自然の地形を利用して発展してきた。一方、周辺を利用する人々の立場でみると、アクセスが航路で寸断され、対岸まで大回りすることを余儀なくされている。計画的に建設された掘込み式の人工港湾でも、同じ現象が生じている。

地域住民の港湾湾口部を直接横断するという要望に対応し、横浜ベイブリッジ、呼子大橋、白鳥大橋等が建設され、各地で、夢が具体化してきた。湾口、海峡を横断する方法は、橋梁やシールドトンネル等が一般的であるが、航行船舶の航路を確保するために、取付部の距離が長くなるという問題がある。この課題を解決する方法として、沈埋トンネル工法が開発され、東京湾のような過密な地域で採用されている。また、距離が短い場合・規模が小さい場合等、橋梁や沈埋トンネルでは、高価になることがある。

これらの中間的な工法の一つとして「水中トンネ

ル」工法が提案されている。

これまで、わが国では、社団法人 水中トンネル研究調査会等が中心となり、比較的水深の深い海域でのアクセス法の一つとして、水中トンネルの技術開発¹⁾を行っている。これらの技術を応用して、浅海域における水中トンネルの可能性について、技術的な面から検討して得られた、一連の開発成果を報告する。

2. 水中トンネルとは

水中トンネルとは、チューブ状の函体を、何らかの方法で水中に支持した構造系であり、世界的に見ても事例は皆無である。空間の利用としては、橋梁と沈埋トンネルの中間に位置する工法の一つとして提案され、ノルウエー・日本²⁾で、技術開発が進められてきた。本来は、浮体を水中に係留する発想であるため、水深が深く、地形が急峻なフォールド等で有利とされる工法といえる。

大水深海域での水中トンネルの支持方法としては、函体を係留する方法が経済的で、更に、函体の動揺量を最少とするためには、緊張係留方式の採用が有力となる。緊張係留方式を採用した事例として、海底石油開発の分野で採用されている T L P (Tension Legs Platform) があり、既に、水深約 900m の過酷な波浪条件下でも実績がある。

まず、最適な緊張係留方式について検討を行い、図-1 に示すように、二組の「ハの字」型の係留索を用いることとした。浅海域に限定するのであれば、架台で支持する方式も有力といえるが、将来の大水深域への適用を考慮し、緊張係留方式の採用を前提とした。

新しい構造物特有の安全思想や関連法規、使用材料、維持管理等も大きな課題であるが、技術開発上の重要課題として、函体の構造と固定方法、両者を考慮した施工方法に着目し、研究開発を行った。

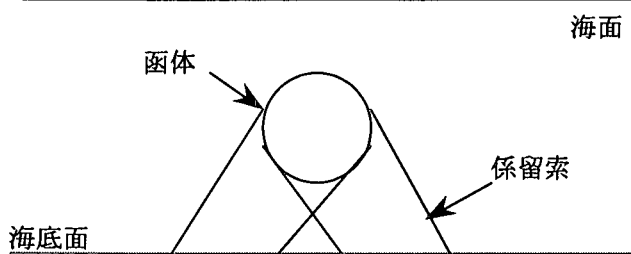


図-1 緊張係留方式

3. 浅海域での成立条件

本論文では、水深 20m までの浅海域を対象としている。浅海域では、まず、水深の制限を受けるため、大きな断面のトンネルは成立しずらく、利用目的は限定される。更に、トンネルの天端水深が浅くなると、波浪や潮流の影響等、水理的な荷重の評価が設計的に重要となる。また、反射波も起こりやすく、周辺構造物への影響・自然環境への影響が無視できなくなる。

水中トンネルは、まだ、実績のない構造物であるため、適用される法規・規準等が整備されておらず、実施にあたっては、類似のプロジェクトでの経緯を参考に、関係する諸機関の指導を受けながら、計画を進める必要がある。

技術的な面でみると、浅海域で水中トンネルを成立させるためには、以下の10項目をクリアするように、十分な検討を行わなければならない。

- ①水中トンネルの用途設定
- ②安全思想の整理
- ③自然・社会条件の整理
- ④設計条件の設定
- ⑤水中トンネルの仕様の設定
- ⑥函体の形状の検討
- ⑦函体の構造、材質の検討

⑧係留方法、係留索材料の検討

⑨施工方法の検討

⑩維持管理手法の整備

4. 設計手法の開発

函体の形状・材料・比重・外径、係留方法（係留索の取付方法、取付角度）、波浪・潮流条件をパラメータとした動揺解析を実施することにより、最適函体構造と係留方法を求める手法を開発した。

今回の開発では、函体の抗力係数、複数の函体を係留した水中トンネル全体系の挙動と係留力等、机上の検討で解決できない事項を、水理模型実験によって確認・把握し、設計手法に反映している。

(1) 解析手法の開発

前節で述べたように、浅海域に設置される水中トンネルは、波浪、潮流、津波等の海象条件や船舶衝突等の外力の影響を受けやすい。波浪に関しては、変形、不規則性の影響も加わる。これらの影響を把握するためには、完成後の水中トンネル全体系の動揺特性はもちろん、施工時の動揺特性も評価し、施工法に反映させる必要がある。

緊張係留方式の構造物は、スナップ荷重が発生することを避けなければならない。函体の概略設計を行い、艀装重量を含めた函体の単位重量を評価し、函体の浮力、断面、材料を検討するとともに、函体の抗力係数を把握し、最適な函体の形状を求め、この形状に基づく2次元動揺解析、3次元動揺解析で、係留力の確認を行うこととなる。

最適構造を求めるための手法（2次元動揺解析、3次元動揺解析）を確立したので、以下に、この手法の概要を紹介する。

a) 2次元動揺解析

この解析手法は、函体の最適形状を確認する段階で使用される。函体1函分の動揺を2次元平面問題として処理するが、函体軸方向の係留索本数を評価することができる。解析モデルは、図-2 に示すように、函体、係留索取付部、係留索で構成される。解析は、修正モリソン式に基づいて行われる。

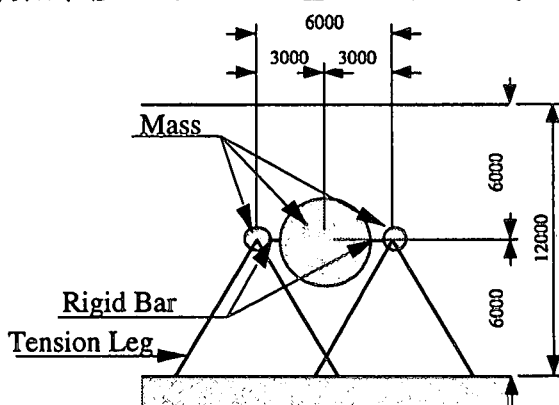


図-2 解析モデルのイメージ（単位：mm）

前述したように、緊張係留された構造物では、設計波浪が作用した時でも、係留索が緩む状態（スラック状態）を避けることが必要となる。スラック状態が生じると、係留索にスナッチ荷重が作用し、許容値以上の過大な張力が発生し、破断することになる。この手法で、パラメーターを変化させた解析を実施することにより、スラック状態が発生する限界波高を求めることができる。

図-3 は、M港の条件（水深12m、設計波高4.5 m）で、水中トンネルの限界波高を求めた一例である。パラメーターは、函体の外径、函体の比重、波浪条件である。これによると、M港の条件では、外径を 5m 前後、比重を0.3程度とすることで、限界波高が設計波高よりも大きくなり、緊張係留型的水中トンネルが成立することが判明した。

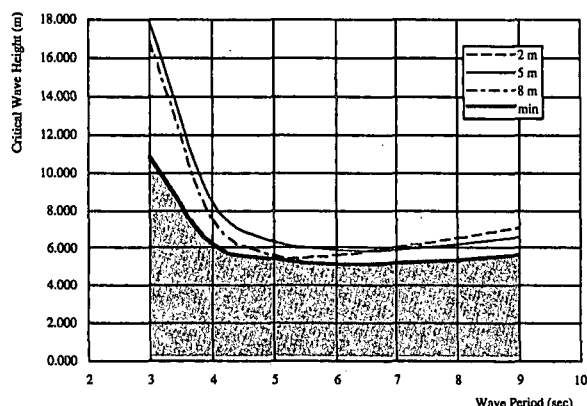


図-3 水中トンネルの限界波高

b) 3次元動揺解析

この解析手法は、水中トンネルの施工中の状態、完成後に想定される、函体の変位、動揺量、係留索張力等を求めることができる。解析モデルは、図-4 に示すように、トンネル1函体を、トンネルの外径にほぼ等しい長さで分割し、各々の要素を線形バネで連結された剛体で表現する。各剛体を連結するバネは、函体の有する断面剛性を反映するように設定し、係留索の取付部には、係留索の復元力を評価できるバネを導入する。函体間に設けられる接合部は、可撓性継手から剛性継手に相当するバネを入れることで評価することができる。なお、解析は、修正モリソン式に基づいて行う。

前項で求められた断面形状に基づき、水中トンネルの完成系の動揺解析を実施した。M港での実機を想定した水中トンネルの基本構造の主要な諸元、波浪条件は下記に示す通りである。

トンネルの延長	: 24m×5函=120m
函体の外径	: 4.50m
函体の構造	: 鋼製二重殻構造
函体の単位体積重量	: 2,940kN/空m ³
係留索の取付部	: 函体外部に直接固定
係留索の材料	: 炭素繊維ケーブル

設計波浪条件	: 波高 4.5m、周期 6秒
波入射角	: 函体に直角

係留索の本数は、主係留索が8本、軸方向係留索が4本とする。この場合の初期張力は、函体の浮力を配分することで決定され、主係留索が340kN、軸方向係留索が130kNとなる。

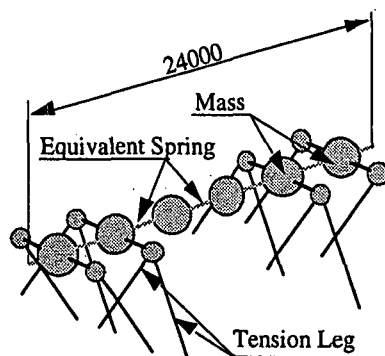


図-4 全体動揺解析モデル
(1 函体分、単位：mm)

図-5 は、完成系の水中トンネルに、設計波浪が作用した時の、トンネル軸に沿った主係留索の最大張力分布を示したものである。トンネル全長の中央部で最大値を取り、全て初期張力以下となっている。前項の2次元モデルとは、若干異なるため、張力の最大値は一致しないものの、両者とも、初期張力の約 80%のレベルである。

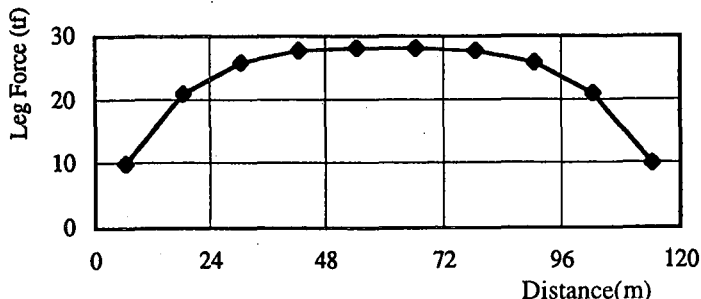


図-5 主係留索の最大張力分布

(2) 水理模型実験

前述したように、函体の抗力係数、複数の函体を係留した水中トンネル全体系の挙動と係留力等を、水理模型実験によって確認・把握した。

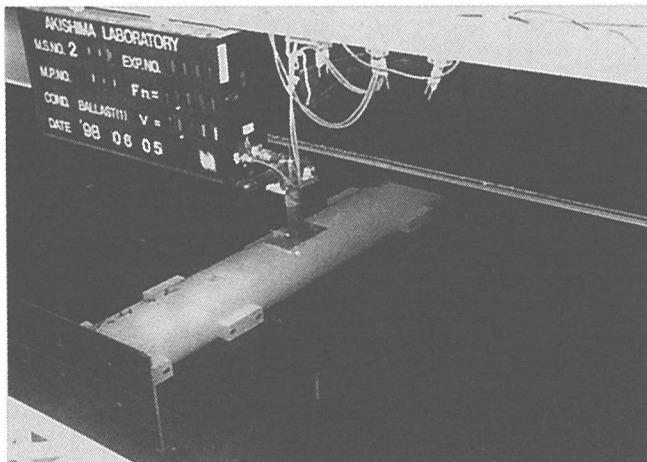
a) 抗力係数確認実験⁵⁾

係留用の突起物がついた水中トンネルの動揺解析の結果、函体の抗力成分が、全体の波力に占める割合が無視できないほどの量であることが明らかになった。特に、函体の上下方向の運動に関与する抗力成分が大きいといえる。

正確な波力を評価するために、函体の抗力係数を正しく把握しておく必要がある。このため、株式会

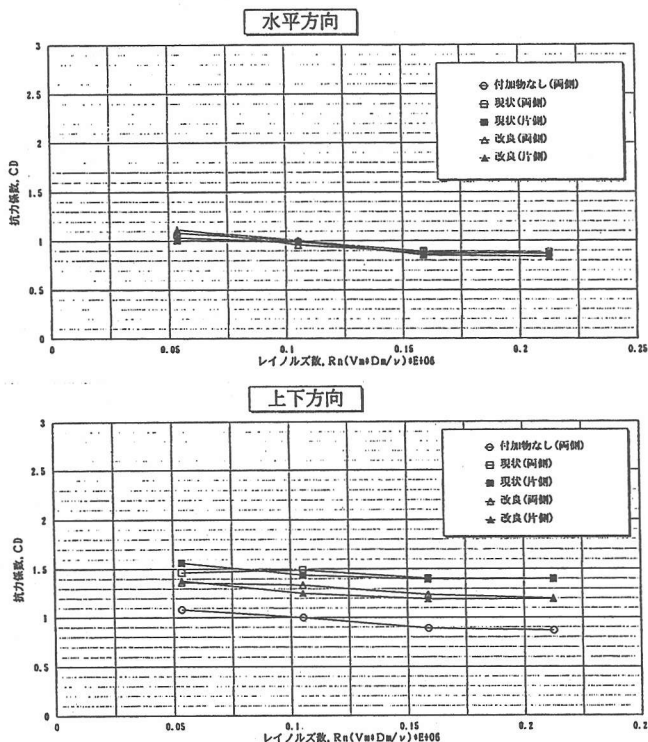
社 三井造船昭島研究所の潮流水槽を使用して実験を実施した。

実験は、写真－１に示すように、試験水槽の曳引車に検力計を介して函体の供試模型を所定の水深に固定し、曳引車により、供試模型を所定の速度で曳航し、函体に働く流向方向の抗力を測定することで行った。なお、上下方向の抗力係数は、供試模型を90度回転させた状態で検力計に取付け、同様の方法で計測した。また、供試模型の端部に、函体直径の約2倍の端板を取付けることにより、函体の設置直後と設置時の状態を想定した計測も行っている。



写真－１ 抗力確認実験の状況

突起物がついた円柱の抗力係数の結果（抗力係数は、実機ベースで整理）は、図－６に示す通りである。なお、抗力係数は、設計波浪時の波速に相当する領域（図－６の右側領域）の値である。



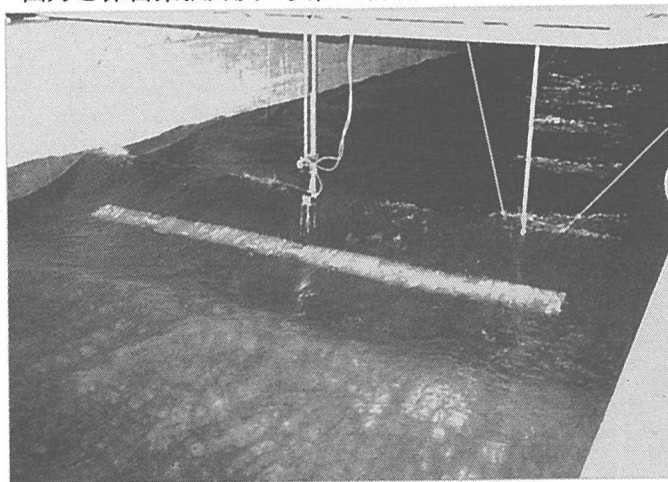
図－６ 実験で得られた抗力係数

抗力実験については、以下のような結果が得られた。

- ①水平方向の抗力係数については、突起物の影響は微少で、突起物の有無・形状の相違による抗力係数の変化はほとんど見られない
- ②水平方向の抗力係数（ $=0.87$ ）は、2次元円柱の抗力係数（ $=1.2$ ）よりも小さく、円柱の長さ（ $=0.76$ 、既往の研究）に近い値となった
- ③上下方向の抗力係数については、突起物の影響が顕著に見られた
- ④突起物のある断面での抗力係数は、突起物無しの円柱に比べ、基本形状の突起物の場合で約1.6、改良型の突起物の場合で約1.0の増加が見られた
- ⑤水中トンネル函体全体の上下方向の抗力係数でみると、突起物無しの円柱に比べ、基本形状の突起物の場合で約0.53、改良型の突起物の場合で約0.33の増加となった

b) 大波浪下での動揺実験⁸⁾

水中トンネルの函体に作用する断面力や係留力の特性を検証するために、写真－２に示すように、水中トンネル設置後の状態を実験水槽内に再現し、波浪および潮流中において、函体接続部に作用する断面力と係留索張力及び変位を計測した。



写真－２ 大波浪下での動揺実験の状況

大波浪下での動揺実験の結果は、下記に示す通りである。

- ①規則波中の変動張力は、函体数にかかわらず、波周期の増加とともに増加する
- ②1 函体の場合、係留索の変動張力は、取付け位置にかかわらず、ほぼ同じ値を示し、解析結果と良い一致をみた
- ③複数函の場合、変動張力は、取付け位置により差がみられた
- ④規則波中の断面力も、波周期の増加とともに増加する

- ⑤規則波中の水平モーメントは、函体数や波入射角にかかわらず、端部よりも中央部が大きくなった
- ⑥規則波中の上下モーメントは、水平モーメントほど計測位置による差は顕著でないが、中央部よりも端部が大きくなった
- ⑦規則波中の函体変位は、最大でも1mm程度で、波周期の増加とともに増加する傾向がみられた
- ⑧規則波に加えて潮流がある場合、波だけの場合に比べ、変動張力・断面力とも減少した
- ⑨不規則波でも、1函体の場合の係留索変動張力は、取付け位置にかかわらず、ほぼ同じ値を示したが、複数函の場合、変動張力は、取付け位置により差がみられた
- ⑩不規則波の水平モーメントも、端部よりも中央部が大きくなり、端部がフリー（施工中を想定）の場合に最大値を示した
- ⑪不規則波の上下モーメントは、水平モーメントほど計測位置による差は顕著でないが、施工状態よりも完成状態の方が大きな値を示した
- ⑫不規則波に加えて潮流がある場合も、波だけの場合に比べ、変動張力・断面力とも減少した

5. 許容値の検討⁹⁾

浅海域の水中トンネルの場合、係留索（テンション・レグ）の長さが短いため、製作時および施工時の誤差が、水中トンネルの安定性、安全性に大きな影響を与えることが懸念された。そこで、「レグ長さ」と「基礎の位置」の設計値からのズレが、水中トンネルの安定性に与える影響について定量的な評価を加え許容誤差の目安を得るために、製作、施工誤差に関する許容値の検討を実施した。

初期張力の算定にあたっては、施工誤差が無いという条件下で静的な釣合いを解いた後、目標誤差が生じるよう海底面側の係留索端部の位置を順次操作して再分配を行った。

係留索長さの製作誤差と初期張力の関係を整理すると、下記に示すようになる。なお、レグ長さが5cm内外変化しても、復元力バネ係数の変化は1%に満たず、動的挙動に与える影響は小さい。したがって、レグ長さの誤差が与える影響としては、初期張力への影響を考慮すればほぼ十分であると考えられる。

- ①取付前検査での許容最大誤差は、概ね±5cmである（安全率1.0の場合）
- ②安全率が3.0の場合は、許容最大誤差は、概ね±1.5cmとなる
- ③取付前検査での許容誤差が与えられれば、張力調整装置での調整代が推定できる

基礎位置が水平方向の誤差をもって施工されたとときの初期張力を検討した結果、基礎位置の誤差は、係留索の誤差ほど、初期張力の配分に大きな影響を

与えないことがわかった。例えば、2cmのずれで、初期張力に約15%のアンバランスが生じるが、予め、基礎位置のずれが把握できれば、係留索の長さを調整することで対応が可能といえる。

図-7は、製作や施工誤差が初期張力緩和に与える影響を表示したものである。この図は、設計時の基礎位置を中心（ $x = 0, y = 0$ ）に、施工位置のずれと初期張力の緩みの程度の関係を示している。係留索の長さに製作誤差があった場合も、基本的には基礎位置の施工誤差と同様の現象が発生する。例えば、係留索の長さが、製作誤差により変化した場合、下図の原点からレグの緊張方向に基礎がずれたものとして考えることができる。

この図によれば、初期張力の誤差を少なくとも図中の白いゾーンに入れることが重要となる。また、白いゾーンの中にあっても、水平方向のずれがあまり大きくなると、当該個所だけがトンネル軸から大きくずれることになるため、極力水平軸上の基準点（座標軸の原点）近傍に収めることが重要となる。

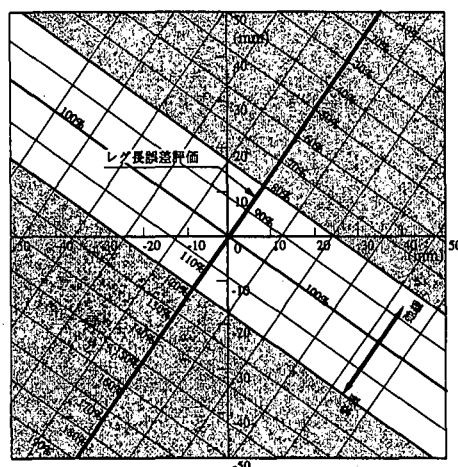


図-7 基礎位置の誤差と初期張力の関係

6. 施工技術の開発^{7) 8)}

(1) 係留技術

対象としている水中トンネルは、浅海域で緊張係留される構造系である。このため、張力の調整が可能な係留索の構造が求められた。これらの条件を前提に、係留装置の試設計を行った。係留外力は、単体函体の実験結果と解析結果（初期張力約350kN＋変動張力約294kN＝約686kN／本）を用いた。

係留索に求められる、強度・弾性・耐疲労性・重量・加工性・施工性・耐食性等を検討し、係留索の素材として、炭素繊維ケーブル（C.F.C.C: Carbon Fiber Composite Cable）を選定した。

(2) 引寄せ装置

浅海域における水中トンネルの函体接合を前提とし、函体引寄せ装置の試設計を行った。次項の接合装置の試設計を含め、水理模型実験⁷⁾ によつて、函体

の挙動、引寄力等を確認している。これらの結果は、下記に示すとおりである。

- ①水理模型実験等の結果を参考に、施工時における基本的な考え方を整理し、荷重条件を設定するとともに、他の装置との関連性も整理した
- ②実験結果に基づき、海象条件を主とした施工条件を検討し、これに従って接合装置の仕様を定めた
- ③また、接合装置の各要素について、必要機能・機構及び構造の検討を行った
- ④設定した仕様に基づき、下記の装置の試設計を実施した（引寄せ等に必要の動力ユニットを含む）
 - ・函体の位置保持装置
 - ・函体の引寄せ装置、位置決め装置
 - ・函体の一次接合装置
- ⑤引寄せは、引寄せウィンチ、及び、バルクヘッドに設けた嵌合ガイドと引寄せジャッキで行う

（３）接合装置

本論文で対象としている水中トンネルは、5 函体（24m×5 函＝120m）で構成される。水中トンネルは、立坑と立坑の間に設置されるとし、継手部の検討を行った。この場合、継手の種類と数は、函体と函体×4カ所、立坑と函体×2カ所となるが、立坑と函体の1カ所は、最終継手となる。これらの条件を前提に、継手構造の試設計を行った。

継手部の設計断面力は、完成系モデルの解析値（端部：約2,940kN-m、中央部：約1,470kN-m）を用い、これらの検討結果は、下記に示す通りである。

- ①継手部の形式として、函体と函体間は剛継手、立坑と函体間は可撓継手を選定した
- ②係留外力を抑制するために、継手部の構造的拡張は、トンネル内部で処理することとした
- ③一次止水材として、低バネ定数型のゴムガスケット（ジーナ型）を採用した、なお、ジーナ型ゴムガスケットの止水性に関しては、実験的に検討を行った
- ⑤最終継手は、ターミナルブロック工法を選定した
- ⑥バルクヘッドの構造、バラストタンクの形状、注排水設備の検討を行った

7. おわりに

平成7年度から、浅海域における水中トンネルの施工技術の検討を行い、函体の最適な形状と構造、係留索の構造、接合技術、継手部の構造、施工方法等の技術を開発することができた。

函体の基本形状を、外径4m・内径3.5mの鉄筋コンクリート製（函体比重＝0.4程度）とすることで検討を始めたが、抗力係数の検討～係留解析～最適函体の検討を実施し、M港を想定した水中トンネル（延長120mの遊歩道、24m×5 函）のケーススタディで、次の事項が確認できた。

- ①円筒形の採用；抗力係数をできるだけ小さくし、変動張力のレベルを低く抑える
- ②二重鋼殻構造；函体の比重を小さくすることで、係留索に導入する初期張力を大きくし、設計波浪が作用した時に、係留索がスラッグな状態になることを避ける
- ③外径4.5m；北海道M港を想定した設計波浪条件下で、所定の初期張力を導入するために必要な浮力を確保する
- ④係留索調整装置；函体の製作・基礎の施工時等に想定される誤差を吸収し、主係留索間の張力を同じレベルに調整する

この開発の集大成として、安全性・安全思想・適用法規・適用基準等の基本事項、耐用年数、使用材料、許容値等を再検討し、浅海域における緊張係留型水中トンネルの計画・施工を目的とした「マニユアル」⁶⁾を作成した。

謝辞：本論文は、北海道大学、北海道開発局の指導を受け、（社）水中トンネル研究調査会内に設けたワーキング・グループで取りまとめた報告書を基に作成したものである。ご指導をいただいた各位、WGに参画いただいた、鹿島・大成建設・五洋建設・清水建設・東亜建設工業・シバタ工業の各委員に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) （社）水中トンネル研究調査会：水中トンネル 第Ⅰ編 計画から設計施工まで、第Ⅱ編 ケーススタディ、1995
- 2) Proceeding of the 3rd Symposium on Strait Crossings, Alesund, Norway, 1994
- 3) 北海道開発局 港湾部港湾建設課、（社）水中トンネル研究調査会：水中トンネル調査検討業務 報告書、平成8年3月及び平成9年3月
- 4) 北海道開発局 港湾部、（社）水中トンネル研究調査会：浮体式構造物建設検討業務 報告書、平成10年3月
- 5) 北海道開発局 港湾部、（社）水中トンネル研究調査会：浮体式構造物建設検討業務 報告書、平成11年3月
- 6) 北海道開発局 港湾部、（社）水中トンネル研究調査会：浮体式構造物建設検討とりまとめ業務 報告書、平成12年3月
- 7) 北海道開発局 建設機械工作所、（社）水中トンネル研究調査会：水中トンネル施行技術開発調査業務 報告書、平成9年2月及び平成10年3月
- 8) 北海道開発局 建設機械工作所、（社）水中トンネル研究調査会：水中トンネル施行技術開発調査業務 報告書、平成11年3月
- 9) 北海道開発局 建設機械工作所、（社）水中トンネル研究調査会：水中トンネル施行技術開発調査業務 報告書、平成12年3月