

津軽海峡連絡橋への提案

— 浮体基礎を持つ斜張橋 —

Proposal for Bridge Across the Tsugaru Straits

宇野 名右衛門 物流・鉄構事業本部橋梁事業部 技師長 技術士（建設部門）

津軽海峡は水深が深く、潮流が速く、風の日が多く、霧の発生しやすい所である。また、この海峡は国際航路になっている。そのため、この海峡に橋を建設することには、数多くの障害がある。筆者は、この障害を解決するものとして、浮き基礎をもつ連続斜張橋を提案する。1単位の構造は、浮き基礎の上に、主塔と斜張ケーブルで吊られた500m長さの桁によって構成され、これは独立的に静水域で組み立てられる。40単位の構造を、順次現地に係留し組み立てられるため、現地の海象気象に左右されることが少なく橋梁を建設できる。筆者は、およそ6年で24kmの橋梁が完成できると考えている。

The Tsugaru Straits (24 km wide between Hokkaido and Honshu) is an international waterway, which features deep water, strong currents and winds, and thick fog. These conditions have prevented the construction of a bridge over the straits. This report proposes 40 tandem units forming a cable-stayed bridge on floating foundations. A single unit of the cable-stayed bridge consists of a tower on a floating foundation and cables, which stay a 500 m long bridge girder. The cable-stayed bridge unit will be built at a still water area. The 40 units constructed in advance will be joined one by one at the construction site. By optimizing construction procedures, this will shorten the construction period drastically, making it possible to build the bridge over the straits.

1. 緒 言

津軽海峡に橋を架け、本州と北海道を結びたいという要求は、北海道の人達にとっては大きなものがある。この海峡は水深が深く、潮流が速い。冬季も夏季も風が止むことなく、波が高い。しかも国際航路に指定されている。従来の提案されている橋梁の計画は、3000mを超える中央径間長をもつ連続吊橋で主塔の基礎を水深が深い地点に建設しなければならない。この規模の連続吊橋は世界的に例がなく、技術的困難さと施工上の困難さが考えられる。

本橋で提案する浮き基礎をもった斜張橋は、静水域で浮き基礎の上に主塔、桁、ケーブルを組み立て、現場に曳航し、あらかじめ海底に設置しておいたアンカーに係留しようという方法である。一つの基礎で橋長500mの長さになり、それを1組とし40組を並べて海峡部の水深40m以上の部分をカバーする。

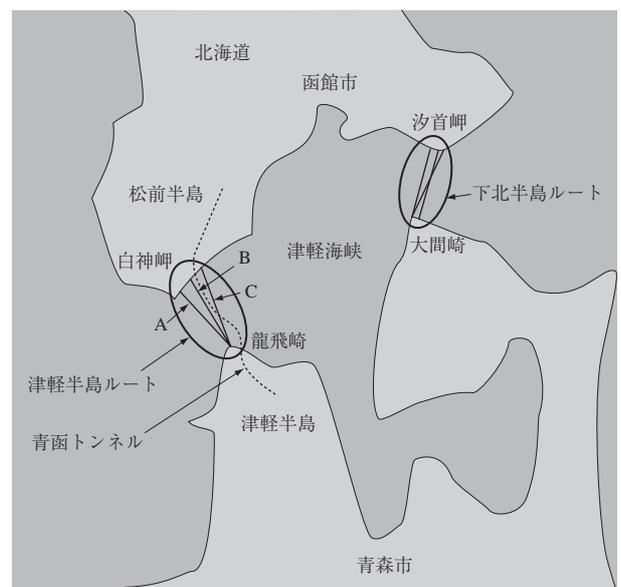
本提案は、工事のほとんどが海峡部以外の所で行われるため、厳しい海峡部の自然条件に左右されることがなく工事が進捗することから、工期を短縮できるのが特長である。工事開始から、およそ6年で開通することも可能と考えられる。

2. 計画概要

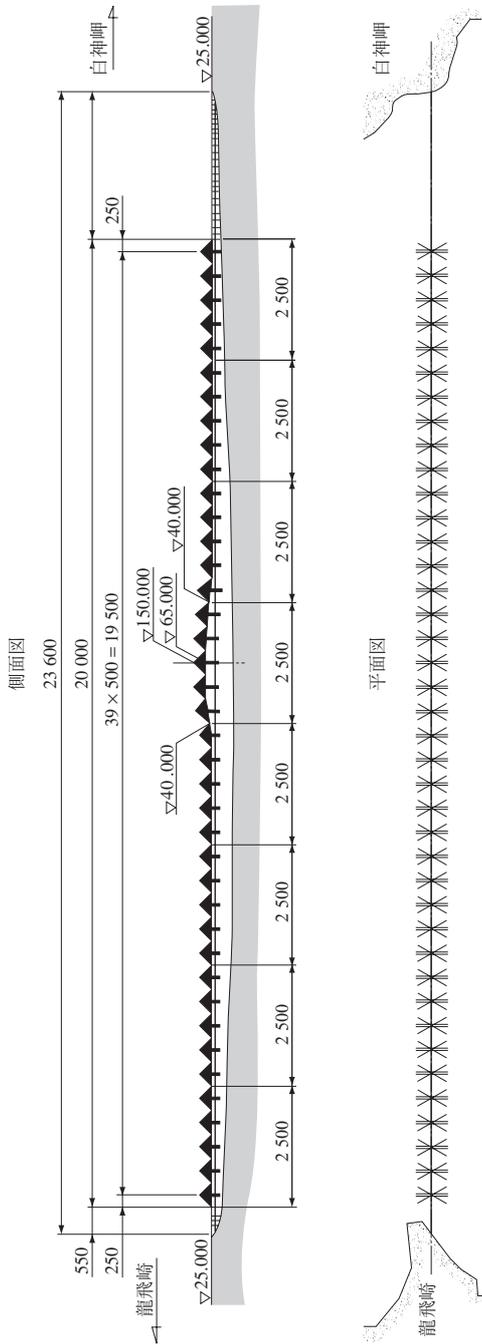
橋梁建設地点としては、津軽半島ルートと下北半島ルー

トがある。第1図に計画ルートを示す。ここに提案する橋梁は、基礎を浮体とすることによって、基礎工事を容易にしようとするものである。浮き基礎であるため、水中にアンカーが必要となる。このため、比較的水深が浅くなだらかな津軽半島ルートと下北半島ルートが好ましく、このルートで検討した。

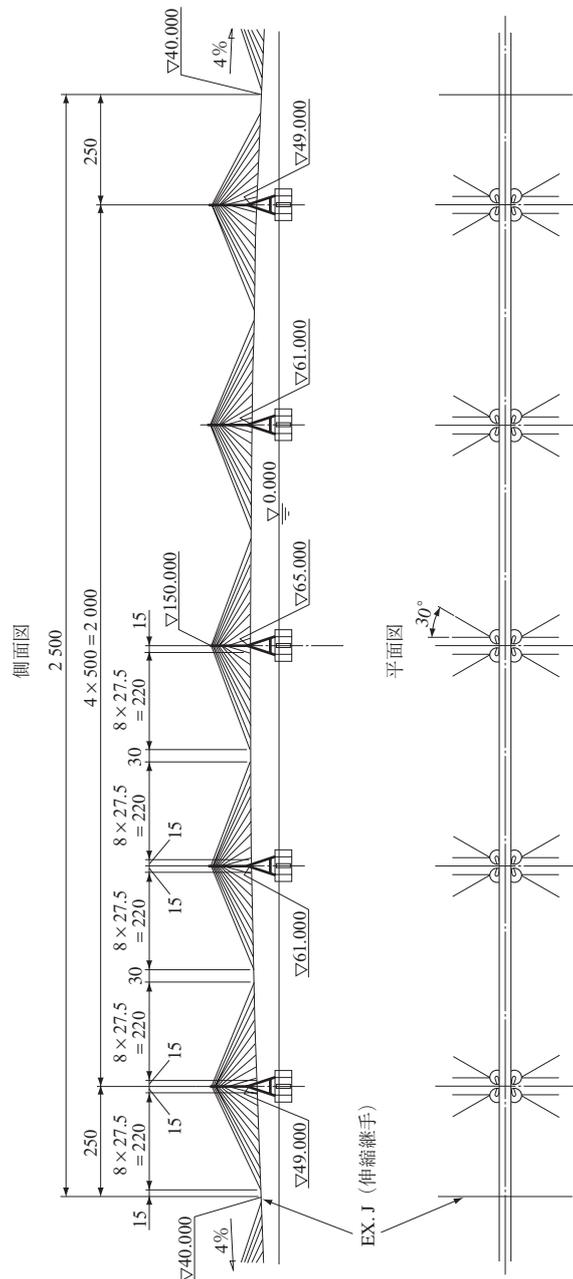
上部工の形式は、500mの支間をもつ連続斜張橋とした。第2図に橋梁全体図を、第3図に1単位橋梁一般図



第1図 計画ルート
Fig. 1 Planning route



第 2 図 桥梁全体図 (単位 : m)
Fig. 2 General arrangement of bridge (unit : m)

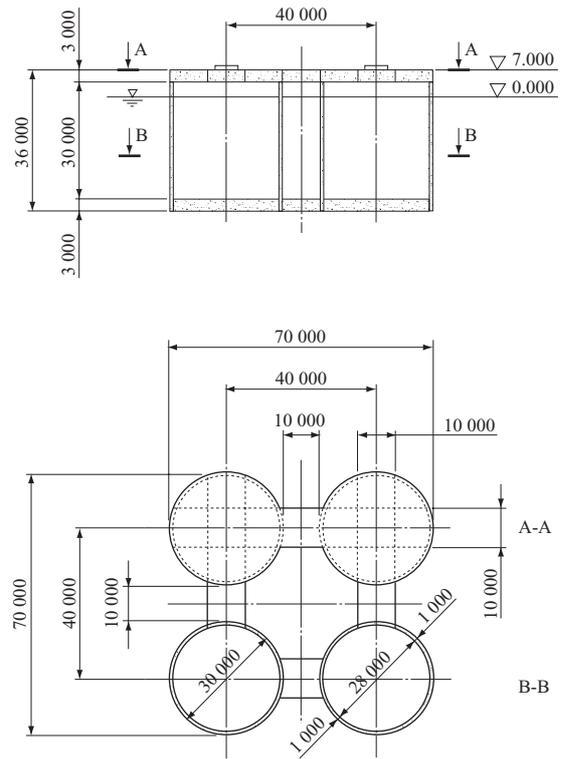


第 3 図 1 単位桥梁一般図 (単位 : m)
Fig. 3 General arrangement (per unit) (unit : m)

を示す。斜張橋は自定式であり、吊橋のようにアンカレッジを必要としないが、連続形式であるため、主塔の橋軸方向の剛性を大きくする必要がある。このため主塔は4本足とし、側面を逆Y型にし、橋軸方向に踏ん張るようにしている。第4図に浮き基礎と主塔を示す。架設時には塔が4本足であることから、それぞれ主塔から独立的に安定した形で桁の張出し架設ができる。1単位の斜張橋は5本の主塔をもち、両端は隣接する橋梁とは、EX.J（伸縮継手）で結合される。1単位の斜張橋の長さは2500mあり、これを8単位連ねて20kmの連続斜張橋とする。両岸の浅海部では、固定橋脚に連続桁を配置する。

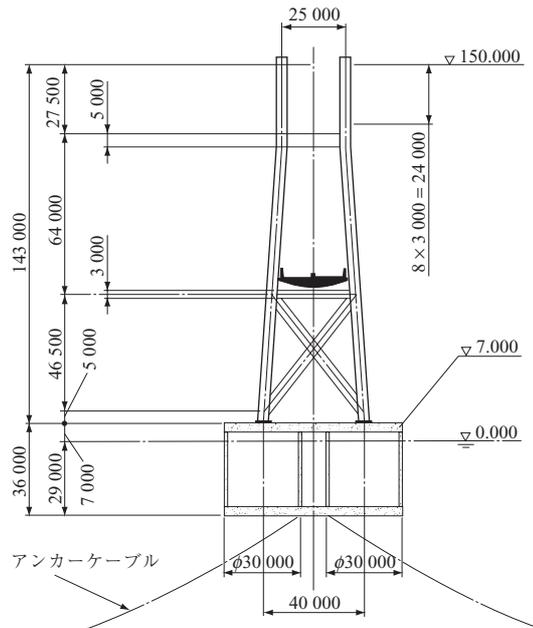
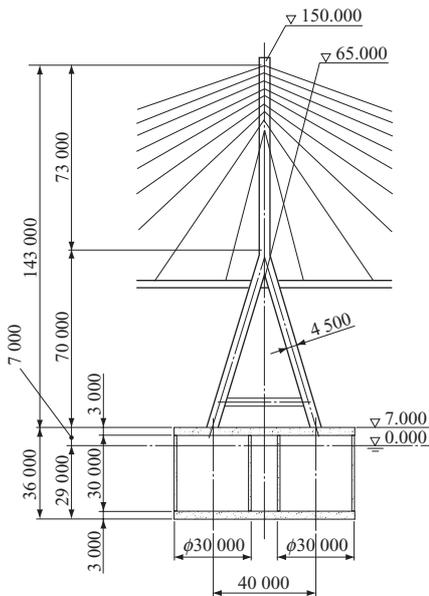
浮き基礎は、第5図に示すように四つの30m径の円筒を組合せた形状で、上部工を含めた転倒防止から、その間隔を40mとし、この円筒シェルの重量を約20000tとした。円筒シェルは、ダブル鋼殻で殻間と上下にコンクリートが打設された合成構造となっている。基礎を四つの円筒構造にして組合せた理由は、上部工の塔柱が4本足であることと、転倒安定性を確保するために、水面面積の断面2次モーメントを大きくし、重心を下に下げることにある。円筒とする理由は、水圧あるいはコンクリートの打設圧が単純なフープ引張あるいは圧縮となり、鋼殻の補強が簡略にできることにある。

係留力に対しては、潮流力および波と潮位の変化による



(注) ▽の指示寸法単位：m

第5図 浮体基礎構造（単位：mm）
Fig. 5 Floating foundation (unit : mm)



(注) ▽の指示寸法単位：m

第4図 浮き基礎と主塔（単位：mm）
Fig. 4 Floating foundation and main tower (unit : mm)

高低差を考慮している。係留力の確保はこの橋の生命線であり、特に長波長の波に対する実験的研究が必要である。

3. 縦断線形

津軽海峡は国際航路であることから、中央部においては、桁下空間 60 m を確保する構造とした。一方、大型の船舶がこの海峡を通過することは、それほど多くはないと考えられる。このため、本提案では主航路を四つ考え、中央の二つでは 60 × 400 m、両隣では 50 × 400 m とした。この中央航路部分 2 500 m では 4% の放物線とし、その先は直線的に 4% の縦断勾配で 25 m まで下ろすものとした。結果として、海峡部の 77% が路面高さを 25 m となる。この部分の桁下空間は 20 m 以上あり、この地域で一番多い漁船に対しては、通行の障害とはならない。

4. 塔構造

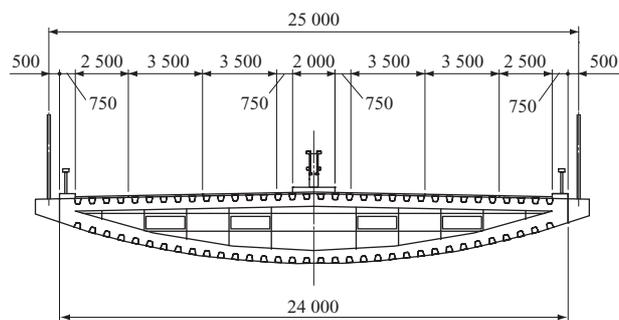
側面から見ると逆 Y 字形で人が踏ん張っているように見える。正面からは、H 形で、塔基部の塔柱間隔は 40 m、ケーブルが定着される部分の塔柱は、鉛直の 25 m 間隔で桁のケーブル定着間隔と一致している。桁下とケーブル定着部の下の部分に水平材がある。桁が高い所にある主塔については、桁下の水平材下に X 形の斜材が必要である。桁位置が低い主塔についてはハの字形の斜材になる。

塔に掛かる荷重はおよそ 90 000 kN である。塔柱の断面としては 0.4 m² くらい必要で、単位長さ当たりの鋼重はおよそ 4 t/m になる。以上から、主塔一基の鋼重はおよそ 2 500 t と推定できる。

5. 桁構造

環境が厳しい所であるため、塗装面積は極力少ない閉断面構造が望ましい。また、基礎を浮き構造としていることから、水平方向の風荷重が小さい断面形状が望ましい。第 6 図に桁断面を示す。下側に凸な魚腹断面で、抗力係数が巾に対して 0.06 と小さい。

鋼床版は 14 mm 厚の鋼板とし、ダイヤフラムを 5 m 間隔で配置し中間に横リブを置く。中間ウェブは使用しない。下フランジにも閉断面トラフリブを用いて、溶接量を軽減する。桁内は、湿度を 50% 以下にコントロールして内面塗装を省略する。この湿度コントロール装置は、乾燥した空気をつねに桁内に補給する機能をもっているため、暖かい空気を循環させる機能を付加すれば、凍結防止に使えると思われる。この断面の鋼重は約 11 t/m である。舗装、



第 6 図 桁断面 (単位: mm)
Fig. 6 Girder section (unit: mm)

高欄そのほかの死荷重を加えると、単位長さ当たりの重量は約 16 t/m になる。

桁は、主塔の部分で鉛直方向支承がなく、ほかの部分と同様に 25 m 間隔でケーブルで吊られている。この構造によって、塔の所で発生しやすい大きな負のモーメントを避けることができる。橋軸方向については、弾性的な支承によって、主塔と連結する。直角方向については、ウインドシユウによって桁に掛かる水平力を塔に伝える。

耐風安定性については、風洞実験を含む検討が必要である。冬期の季節風による、限定振動対策が重要と思われる。

6. ケーブル

斜材ケーブルには、プレファブのセミパラレルストランドケーブルを用いる。環境条件が厳しいため、架設が容易で、取替え可能なケーブルを選択する必要がある。

ケーブルの平均的張力は、死荷重分布 160 kN/m と活荷重分布 20 kN/m に T 荷重 2 台を考慮すると最大ケーブルで設計張力が 8 000 kN になり、安全率を 2 とすれば、素線数 265 本、外径が 145 mm ほどになる。最下段ケーブルでは、張力は 2 500 kN であり、素線数は 85 本で外径が 85 mm になる。よって、1 橋のケーブル重量は約 1 800 t になる。

7. 塔基礎浮体

海上交通を確保するために、桁は海面上 65 m の高さであり、主塔の高さは 155 m にもなる。基礎が浮体構造であるため、上部工の反力を支えるだけでなく、転倒に対して十分な安全が確保されなければならない。この地域は漁業の盛んな所であり、係留アンカーの設置範囲はできるだけ狭いことが望まれる。潮流の速さは、津軽半島 C ルートでは最大 5.5 kn ある。最大有義波高は 7.62 m で、この

時の周期は 12.5 s である。有義波高 0.75 m 以下の出現率は 49.1% であり、ほとんど静穏な状態はない環境条件下にある。

設計荷重としては、上部工の死荷重約 123 000 kN（桁 80 000 kN，塔 25 000 kN，ケーブル 18 000 kN）と係留索の初期引込み力 12 000 kN（1 本当たり 1 500 kN，8 本）を考える必要がある。計画地点の最大波浪は 6 m である。基礎は、波浪によって浮き沈みと横移動をする係留方法を採用し、係留索に掛かる力を軽減する。基礎天端の高さは、波しぶきから塔基礎を守るように海面上 7 m に設定する。

橋脚の大きさは、転倒に対する安定性と自重を支える浮力から決まる。転倒に対しては、水面面積が大きい方が有利であるが、上部工の反力は塔の基礎に集中するので、あまり大きくすると、曲げモーメントが大きくなる。重心はできるだけ低い方が安定する。海上交通や係留索の配置からはできるだけ、水面面積を小さくしたい。

以上の点を考慮して、塔基礎 4 本の円筒を組合わせた構造を考えた。第 5 図に浮体基礎構造を示す。円筒の直径を 30 m，高さを 36 m とし、2 重鋼殻構造とし殻間 0.9 m にコンクリートを充てんして合成構造とする。上下には、3 m 厚さの蓋を置く構造とした。円筒は上下で巾 10 m，高さ 3 m のコンクリート充てん梁で結合する。円筒の間隔は、40 m で中心に塔の基礎を配置する。

4 本を組合せた時の重量と喫水は次のようになる。

鋼	重	6 100 t
コンクリート		26 400 m ³ (63 360 t)
総	重 量	69 460 t
喫	水	23.54 m（底面から）

基礎単独での安定性は次のようになる。

重	心	$hg = 18.0$ m
浮	心	$hb = 11.32$ m
メタセンター		$hm = 18.61$ m
安	定 性	$hb + hm > hg$ 11.32 m + 18.61 m = 29.93 m > 18.0 m

上部工が基礎に載った時の安定性は、次のように計算される。上部工重量を 11 400 t とし、その喫水は、基礎内部に水を入れて 29 m に調整されているものとする。この時の水面下の体積は 83 200 m³ になる。この時の全体重量は、海水の比重を掛けると浮力になり 84 360 t になる。上部工と下部工の合計重量を 3 500 t 上回る。この上回り分は、

余裕代で基礎内に水を入れて調整する。基礎単独と同様に転倒安全性を検討すると次が得られる。上部工の重心は主塔の桁下フランジ位置にあるものとする。

重	心	$hg = 28.8$ m
浮	心	$hb = 14.5$ m
メタセンター		$hm = 15.68$ m
安	定 性	$hb + hm > hg$ 14.5 m + 15.68 m = 30.18 m > 28.8 m

したがって、完成時にも転倒することはない。風に対しては、設計風速を 50 m/s とすれば、基礎上面に掛かるモーメントは、160 000 kN・m であり、これによる基礎の傾き、喫水変化は ± 0.5 m である。基礎の巾 70 m から傾きは 1/70 になる。転倒に対しては、全く問題ないが、塔頂では 2 m 移動することになる。

8. 係留装置

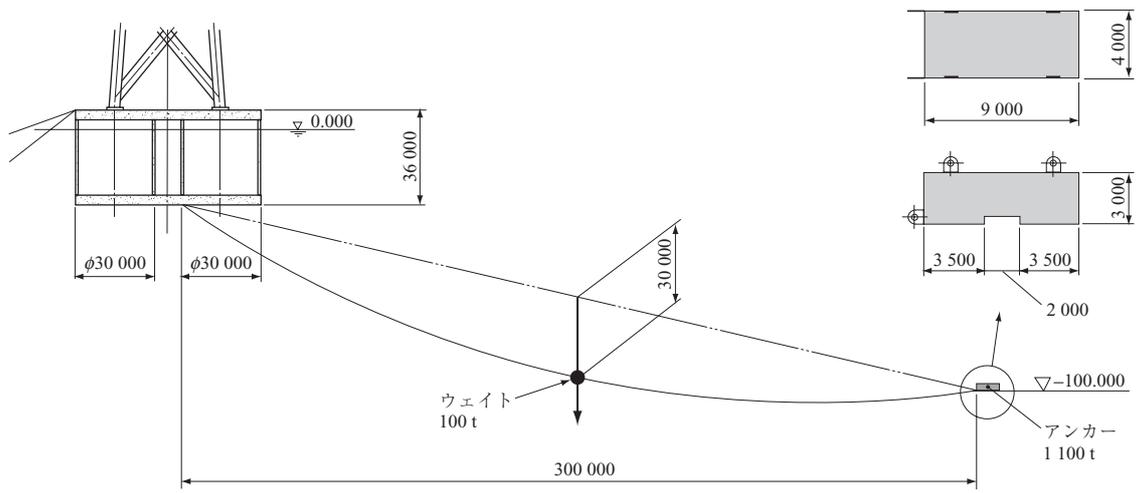
津軽海峡での係留装置で考慮しなければならないのは、大きな高波と速い潮流である。高波の影響は、水平方向の力よりも、水面が上がる方の影響が大きい。

計画に当たっては、係留アンカーケーブルの敷設範囲をできるだけ小さくすることと、高波による水面が高くなった時に、係留アンカーが持ち上げられないことを考慮した。基礎の水面断面積は 2 800 m² あり、1 m の水面高さ変動で 2 870 t の浮力が変動する。この力に抗して、橋脚を一定高さに保つことは困難であり、橋脚は水面の高さに応じて上下することを原則とする。

潮流による抗力は、基礎が 30 m 径の円筒を 10 m 間隔でつないでおり、この間を海水が流れる。安全をみて全体の幅 70 m で抗力を計算すると次が得られる。

潮流速度	6 kn（約 3 m/s）
見掛け幅	70 m
深 さ	29 m
海水の比重	1.025 t/m ³
抗力係数	1.0
潮流力	$F = 1/2 \times 1.025/9.8 \times 3.0 \times 3.0 \times 70 \times 29 \times 1.0 = 955$ tf (9 550 kN)

これを 4 本で係留するが、内 2 本は 30 度に開いているので効率から 3 本で受けもつものとする。1 本当たりの係留力は 3 200 kN になる。第 7 図に係留要領およびアンカーの状態を示す。初期状態を図のようにアンカー位置を 300 m とし、係留索の中央にサグ 30 m で 100 t のウエ



(注) ▽の指示寸法単位：m

第7図 係留要領およびアンカー (単位：mm)
 Fig. 7 Mooring system and sea anchor (unit : mm)

イトを吊るす。これによって、基礎は2500kNの水平力で8方向に固定されていることになる。これに潮流が作用すると潮流方向に3mほど移動し、抵抗する側の係留索の水平力が2500kN増加し、反対側の係留索の水平力が700kN減少して釣り合う。波高6mの波によって、海面が6m上昇した時にはサグが25.6mになり、係留水平力は400kNほど増加するのみである。

アンカーは浮力が小さい方が好ましく、比重が大きいほうが良い。ここでは、鋼製の箱の中に鉛を充てんした構造を考えている。鉄の比重は、7.85であるのに対し、鉛の比重は、11.36ある。全体体積の5%を鋼材とすれば比重10.5のアンカーが製作できる。水中重量1000tのアンカーの体積は97.7m³になる。このアンカーの製作は、岸壁に鋼製の箱を組立て、この中に解けた鉛を鑄込むことになる。鉛の融点は327度であり、現地に溶融鍋を据えて溶解し

鑄込むことになる。

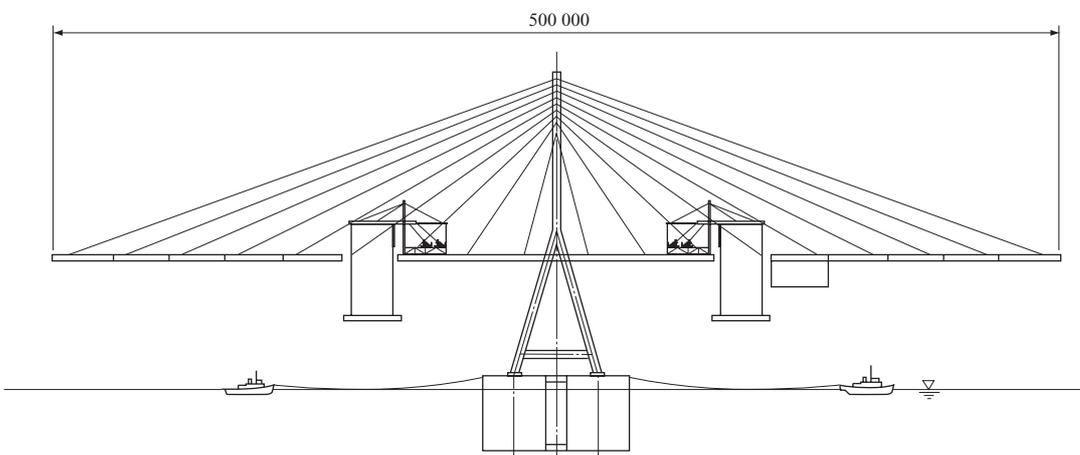
9. 架 設

気象条件の厳しい津軽海峡では、現地工事をできるだけ少なくすることが重要である。提案する橋梁は、橋脚の上に主塔を組み、桁を両側にやじろべえ状に250m張り出し、すべての桁を組み立てても、転倒安全は確保できる。

第8図に桁組立および現地曳航要領を示す。

工期については、主塔基礎が40個あり、これをいかに組立て仮置きするかがポイントになる。一組の占有面積を800×150mとすれば、480ha必要である。これは、4×1.2kmの水面になり、陸奥湾内に確保する必要がある。概略工程を第9図に示す。

この工程で建設するためには、8か所の組立場で、6か月ごとに一組を組み立てることが必要である。



第8図 桁組立および現地曳航要領 (単位：mm)
 Fig. 8 Erection and towing (unit : mm)

作業項目	1年	2年	3年	4年	5年	6年
アンカー工	■					
基礎工	■					
塔		■				
桁・ケーブル		■				
曳航・係留					■	
後工事						■

第9図 工程
Fig. 9 Construction schedule

10. 結 言

以上、浮体基礎の上に斜張橋を建設する構造を提案した。特長を列記すれば次のようになる。

- (1) 浮体基礎を4本の円筒を組み合わせた構造とする。これによって、基礎構造が十分な浮力もちながら、重心を低くすることができる。
- (2) 主塔の足を4本としたことで、一つの浮き基礎の上に、塔と500mの桁と斜張ケーブルで独立した構造で、現場架設地点以外の場所で組み立てが可能である。
- (3) 架設工事では、(2)の理由によって現地での組立

工事を減らすことが可能であり、現地の厳しい気象条件に左右される要素を少なくすることができる。

- (4) 提案する係留形式は、中間にウエイトを取り付ける。これによって、係留アンカーの位置を橋梁近くに置くことが可能になるとともに、潮流による移動量を少なくでき、高波にも対応できる。

残されている問題としては、耐風対策、高波への対応、係留ケーブルの疲労がある。基礎構造や上部工については、大きな問題はなく、現在の技術で十分建設可能と考えられる。

参 考 文 献

- (1) 宇野名右衛門：浮体基礎を持つ斜張橋 本州・北海道架橋シンポジウム「津軽海峡からのメッセージ2004」論文発表会 2004年6月
- (2) 96' 本州・北海道架橋シンポジウム論文集：津軽海峡からのメッセージ 本州・北海道架橋を考える会 1996年
- (3) 津軽海峡大橋事業可能性調査報告書：東日本交流調査 社団法人東北建設協会 2006年3月