

ボスポラス海峡沈埋トンネルにおける 仮設立坑の設計・施工技術

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE TEMPORARY ACCESS SHAFT FOR THE BOSPHORUS STRAIT IMMERSED TUNNEL IN TURKEY

外山雅昭¹・野勢辰也¹・林晋²・土屋正彦³・小山文男³

Masaaki TOYAMA, Tatsuya NOSE, Shin HAYASHI,
Masahiko TSUCHIYA, and Fumio KOYAMA

¹正会員 工修 大成建設株式会社 土木本部土木設計部（〒160-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1）

²正会員 工修 大成建設株式会社 九州支店土木工事作業所（〒810-8511 福岡市中央区大手町1-1-7）

³正会員 工修 大成建設株式会社 国際支店ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事作業所

The Railway Bosphorus Tube Crossing Tunnel across the Bosphorus Strait in Turkey connecting Europe and Asia consists of three sections: a immersed tunnel in the strait, and two bored tunnels linking the immersed tunnel to both sides of the strait. In this construction, the immersed tunnel is constructed first without using launching shafts. Then, the bored tunnels are advanced from the land, and the entire tunnel is completed by connecting the bored tunnels to the immersed tunnel. In order to secure an access route to the immersed tunnel until the bored tunnels are connected, a temporary access shaft was constructed over the immersed tunnel structure.

The environment at the construction point is very severe with the high current velocity always 1.5m/sec or higher, and the water depth of 31m, and it is required that construction should be carried out using only working vessels that can be procured locally. This paper briefly reports on the technical development of the design and construction of the temporary access shaft to be constructible under above severe conditions.

Key Words : Temporary access shaft, immersed tunnel, Bosphorus, Istanbul, Turkey, design, construction, in-situ bolt connection, positioning system

1. はじめに

トルコ共和国イスタンブールにて建設中のボスポラス海峡横断鉄道トンネルは、ボスポラス海峡兩岸間の交通渋滞の緩和を目的とする全長 13.6km の鉄道専用トンネルである（図-1）。陸上部にはTBM工法，NATM工法および開削トンネル工法が，海峡横断部中央には沈埋トンネル工法が，それぞれ採用された。延長が約1.4kmの沈埋トンネル工区は，全長が98mから135mの鉄筋コンクリート式沈埋両体11基により構成されている。



図-1 全体図

通常の沈埋トンネル工法では，横断する水路の片岸に発進立坑を，その反対岸に到達立坑を構築した後，トンネル線形に合わせて海底上に掘削したトレンチ内に，発進立坑側から到達立坑へ向けて沈埋両体を順次沈設，接合していくことによりトンネルを構築する。しかしながら，ボスポラス海峡は兩岸ともに水深5m程度の遠浅，かつ海底は岩層が露呈という条件であったため，通常工法を採用することは全体工程の観点から非現実的であった。

このため，十分な水深を有し，かつ海底に堆積層が現れる兩岸から約250m地点から沖合の区間のみを沈埋トンネル工法にて構築し，そのアジア側・ヨーロッパ側の両区間はTBM工法にて構築する工法が採用された（図-2）。海峡中央に位置する沈埋トンネル区間は，最初の両体：E11両体がアジア側岸から300m沖合地点に孤立した状態で沈設された後，通常の沈埋トンネル工法と同様にヨーロッパ側に向けて両体を順次沈設・接合させることにより，発進立坑を構築することなく構築される。一方で，アジア側・ヨーロッパ側兩岸から発進したTBMトンネルが，沈埋トンネル区間のアジア側・ヨーロッパ側そ

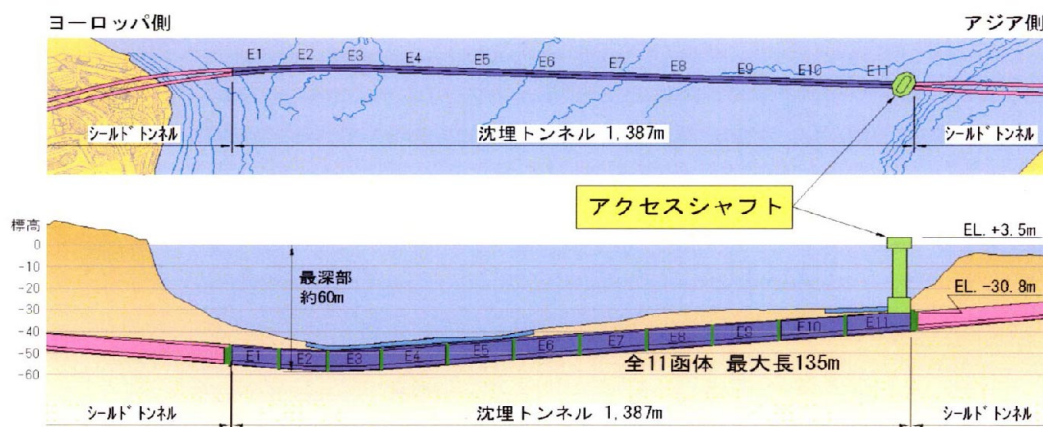


図-2 沈埋トンネル全体図

それぞれの端部に到達し、沈埋トンネルと結合することにより、海底トンネル部は完成する（図-3）。

発進立坑から順次沈埋両体を延伸させていく通常の工法では、最初の両体を沈設した直後からトンネル内部へのアクセスルートは確保されている。一方で海中に孤立した状態で沈埋トンネルの構築が進められる今回の工法の場合、TBM トンネルが沈埋トンネルに到達・結合するまでの間における沈埋トンネル両体内へのアクセスルートを別途確保することが必要となる。このため、E11 両体が沈設され次第、E11 両体の直上に仮設立坑：アクセスシャフト（以下、「AS」）を設置し、その仮設立坑とアジア側岸とを連絡栈橋にて結ぶことが計画された。

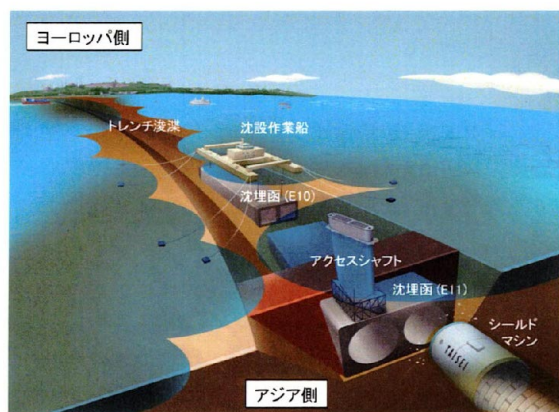


図-3 沈埋トンネル概念図

AS は TBM トンネル到達までにおける沈埋トンネル両体内への唯一のアクセスルートであり、工事全体におけるその重要性は極めて高い。一方で、沖合約 250m に位置する AS 設置地点は、常時 3kt を超える潮流、水深は 30m を超えるという厳しい環境下にあった。かつ、AS を運搬・設置するために利用可能な作業船も限定されていたため、この条件下で現地海中に設置可能な AS の構造形式および施工方法を開発した。本稿では AS の構造設計および現地海中における両体上への架設方法について報告する。

2. 自然条件の概要

(1) 潮流

ボスポラス海峡の潮流は、黒海との水位差および海峡周辺の風向および風速により変動する。現地観測記録（観測期間：2004. 9. 24～2005. 5. 28. 図-4）によると、AS 建設地点近傍における潮流の卓越方向（流下方向）は、南南西となっている。表層における流速は通常 1～2m/sec 程度であるが、最大で 2.5m/sec 程度の値も観測されている。深さ方向の流速分布は、水深：18m 程度までは比較的安定しているが、それ以深は暫減し、海底近傍では表層の約 1/2 となっている。

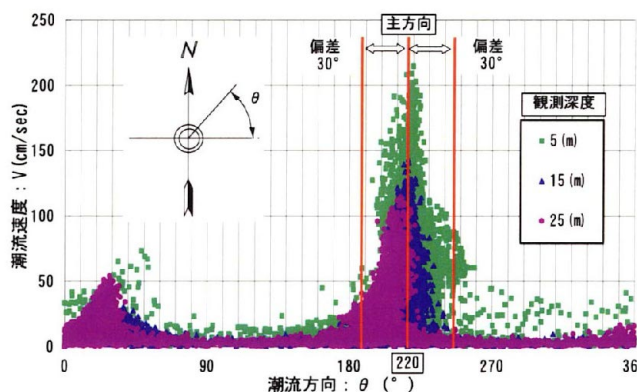


図-4 潮流観測記録

(2) 波浪

現地における有義波高および有義波周期は、アジア側護岸建設工事において実施された波浪推算の結果より、常時：0.6m・4sec、暴波浪時：1.6m・5sec（再現期間 30 年）と推定された。

(3) 地震

設計地震動については、対象構造物が仮設である事を鑑み、マルマラ海を震源とする M7.5 の大規模地震に基づく基盤加速度応答スペクトルの振幅を 1/2 に調整して用いることとした（図-5）。

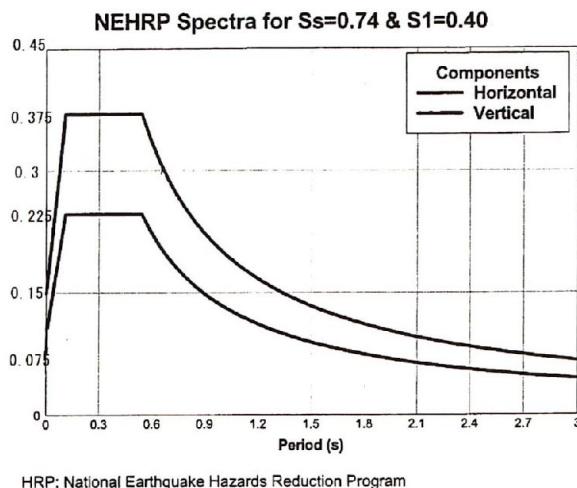


図-5 基盤加速度応答スペクトル（仮設構造物）

3. 仮設立坑に対する要求事項

AS に対する要求事項は、機能性、安全性および施工性の観点から以下のように設定した。

- ・機能性：両体内への唯一のアクセスルートとして、人員の昇降路、資機材の搬出入路、電気・通信等ライフラインの敷設経路、および両内換気経路を常時確保すること。
- ・安全性：AS の損傷は工事の中断に直結するため、潮流・波浪による流体力、地震力、さらには AS 近傍を錯綜する小型船舶の衝突に対しても、構造物の健全を確保すること。
- ・施工性：現地調達可能な起重機船（吊り能力：450tf）により設置可能であること。かつ、強潮流（3kt）下での沈設および E11 両体との接合が可能であること。

4. 仮設立坑の構造設計

(1) 構造形式

AS 本体の構造形式は、起重機船の吊り能力内にその重量を収めるために、鋼製メンブレンによる箱桁構造とし、鋼製骨組構造である AS 架台を介して E11 両体に固定することとした（図-6）。鋼製メンブレンは外周壁および 3 枚の内部隔壁から成り、それぞれが箱桁フランジプレート・ウェブプレートおよび立坑止水壁の 2 つの機能を有する（図-7）。鋼製メンブレンには、面内荷重（AS 全体が片持梁として挙動する際の曲げモーメント・せん断力等により発生）を受けるプレートの座屈防止および面外荷重（水圧等）に対するプレートの支持を目的として、鉛直・水平の双方向に補剛材を配置した（図-7）。

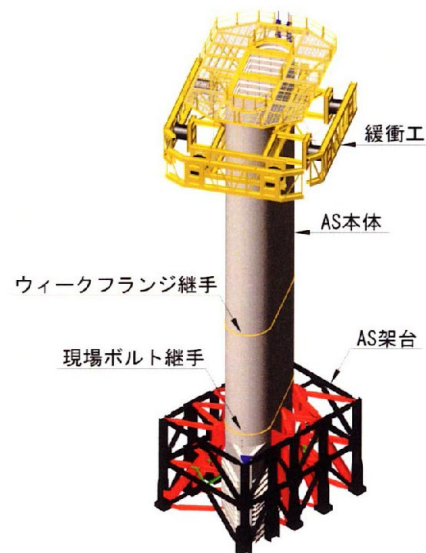


図-6 AS全体図

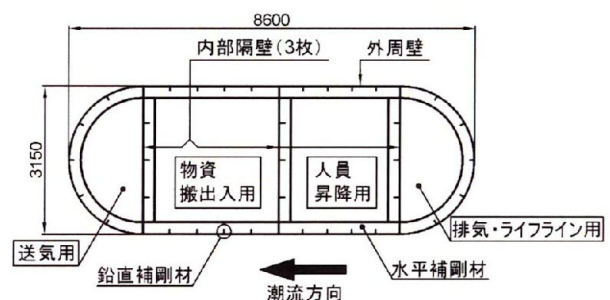


図-7 AS平面図

AS 上の平面形状は、潮流力の低減を目的として、長辺方向を潮流卓越方向と合致させた小判形（図-7）とした。

AS 本体内部は、3 枚の内部隔壁により機能を特化した 4 つの立坑（①人員昇降用立坑、②物資搬出入用立坑、③送気立坑、および④排気立坑兼ライフライン立坑）に分割することにより、効率的な供用を実現した（図-7）。

また、各立坑は互いに独立した水密構造とすることにより、ある立坑が損傷を受けて浸水した場合における他の立坑への浸水を防止した。

(2) 作用の評価

1) 流体力：AS 平面形状は流体力の低減を目的として小判型となっているため、流体力の評価には小判型断面に作用する流体力を評価し得る DnV 式¹⁾を用いた。

2) 地震力：AS は塔状構造物であるため、剛体を前提とする通常の静的震度法では地震作用の影響を過小評価する可能性がある。そのため、地震力の評価においては、AS を 2 次元弾性梁部材にてモデル化した上で固有値解析を実施し、その結果得られた固有周期・刺激関数を仮設用地震動応答スペクトルに当て嵌めることより、構造物各レベルにおける設計震

度を設定した。また、ASは海中構造物であるため、地震時には動水圧が作用する。本設計では、前述した固有値解析用2次元梁モデルに、地震時動水圧の影響をモデル化した海水質量を付加する手法を採用した。付加質量の評価には後藤・土岐の提案式²⁾を用いた。

3) 小型船舶の衝突：小型船舶の漂流衝突に対応するため、ASの海面近傍に空気式防舷材と鋼製フレームにより構成される緩衝工を設置した(図-6)。船舶衝突時には防舷材反力がAS頭部に作用する。

(3) 構造解析および部材照査

構造解析においては、断面形状の急変箇所およびAS 架台との接合箇所における応力集中の評価が必要であるため、メンブレン・補剛材を直接的に評価した3次元弾性シェルFEM要素を用いることにより、各部材の発生断面力を算定した。

AS メンブレンには、箱桁フランジプレート・ウェブプレートとしての面内力と、水平補剛材によって支持される一方向版としての面外力が発生する。本設計においては、メンブレンを曲げモーメントおよび軸力が同時に作用する梁として評価³⁾して部材照査を行った。梁の座屈長は水平補剛材間隔(500mm)とし、局部座屈の検討においては鉛直補剛材の効果を考慮した。

5. 仮設立坑の施工計画

ASの設置は沈埋トンネル工事を進める上で必須であり、万が一にもAS設置時に函体自体が損傷を受けた場合には、工事全体が致命的な影響を受ける。したがって、ASの現地設置方法は以下の4つの案について比較を行い決定した。

- ・案-1：AS全体をE11函体製作時に函体上に偽装、函体と共に現地に沈設する。
- ・案-2：AS全体を製作地点から現地まで浮上曳航、AS内に注水しながら姿勢制御ワイヤー等を用いて沈設することにより、先行設置したE11函体上に設置する。
- ・案-3：ASを数個のブロックに分割、各ブロックを起重機船にて順次沈設・接合していく。
- ・案-4：ASを上部ブロックと下部ブロックの2つに分割、下部は予め沈埋函に設置して共に沈設。上部は起重機船にて吊り運搬・沈設して下部ブロックと接合する。

案-1は海中接合作業がなくなるというメリットがあるものの、ASに作用する潮流力が大きいことから沈設中の函体安定が確保できないことが分かった。残る3案を比較した結果、現地海中作業が最も短く、潮流が一時的に遅くなった時期を狙うことにより施工時リスクを最小化とすることが出来る案-4を採用した。

6. 現地海中ボルト接合の設計

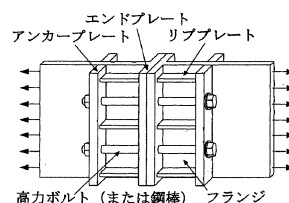
(1) 構造形式

AS上部は先行して設置されたAS下部と現地海中にて接合される。この現場継手部には、以下の条件を満たすことが求められた。

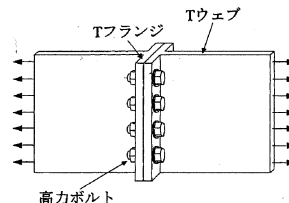
- ・AS本体作用曲げモーメント・せん断力の伝達。
- ・立坑としての水密性の確保。
- ・現地における急速施工。

水密性確保の観点からは継手部を溶接接合とすることが最も望ましいが、強潮流下での水中急速施工は極めて困難であるため、ボルト接合を採用した。

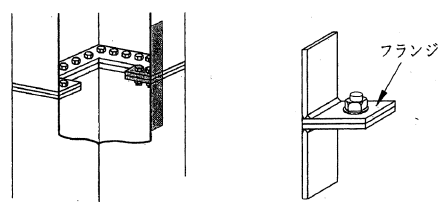
ボルト接合としては、連結する部材を跨ぐように配置した添接板をボルトにて締め付けるボルト摩擦接合もしくはボルト支圧接合が一般的であるが、これらの構造では水密性の確保が困難となる。したがって、本設計ではAS上部、AS下部それぞれの端面にフランジプレートを配置し、このフランジプレート同士を高力ボルトにて締め付けるボルト引張接合を採用した。



(a) 長締め方式 (T接合)



(b) 短締め方式 (T接合)



(c) 短締め方式 (L接合)

図-8 ボルト引張接合

ボルト引張接合には、長締め・短締めの2方式(図-8)があるが、ボルト締結作業が狭隘な空間でのダイバー作業であることを重視し、ボルト長を短くすることが可能な短締め方式を採用した。短締め方式はさらに、部材の内側・外側の双方に張り出したT型フランジプレートを用いるT接合と、片側のみに張り出したL型フランジを用いるL接合に分かれる(図-8)。ボルト発生張力を抑制するためには、てこ反力が発生しないT接合の方が有利であるが、ダイバーがAS本体外側にて強潮流に晒されながら

ボルトを締結することが必要となるため、施工速度および品質の確保が難しい。このため、フランジを全て内側に向けることにより潮流の影響を受けずに作業することが可能なし接合を採用した（図-9）。

継手部止水には、継手部に目開きが発生しないことより、水膨張ゴムを採用した（図-9）。本ゴムはAS 上部側フランジ外周に予め設置され、AS 上部とAS 下部の接合後に吸水・膨張し、所定の止水機能を発揮する。本ゴムの採用により、現地における止水構造設置作業が不要となるため、継手部接合作業の急速化が可能となる。

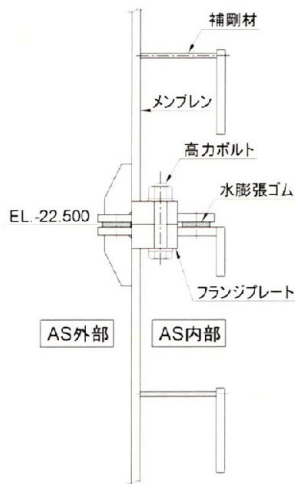


図-9 現場ボルト接合構造図

(4) 構造解析

引張接合指針には、T 接合の具体的な設計手法は明示されているが、L 接合については「T 接合の考え方を準用して設計することができる」との記述に留まっている。したがって、ボルトの仕様・配置・初期軸力等についてはT接合の規定を準用するが、ボルトおよびフランジプレートに発生する断面力については、継手部（フランジプレート・ボルトおよびメンブレン）を局所的にモデル化した2次元弾性FEM解析（図-10）にて評価した。解析は、ボルトに初期軸力を導入した後に、AS 全体解析にて得られた張力をメンブレンに作用させるステップ解析とした。

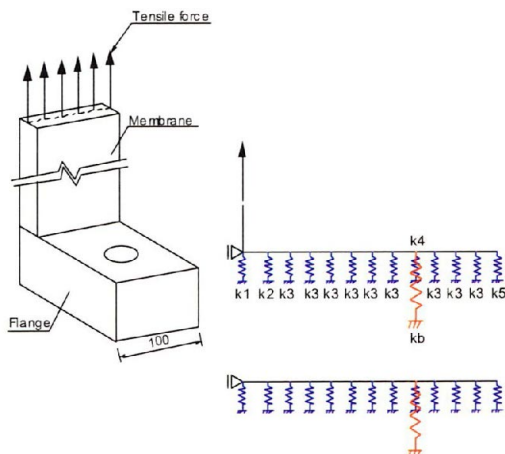


図-10 FEM解析モデル

7. 位置決めシステムの設計

(1) 基本コンセプト

AS 上部は姿勢制御ワイヤー等を用いずに天端のみを起重機船にて吊り下げられた状態にて沈設される（写真-1）。沈設中は、潮流等の影響により、長辺方向・短辺方向の双方に傾斜し、かつ鉛直軸回りに回転する。一方で現地ボルト接合を採用するためには、AS 上部をAS 下部上にミリ単位の精度で設置することが必要である。傾斜かつ回転したAS 上部をAS 下部上の所定位置にミリ単位の精度で設置するために、AS 架台天端上に沈設ガイド機構を配置した（写真-2）。



写真-1 AS沈設状況

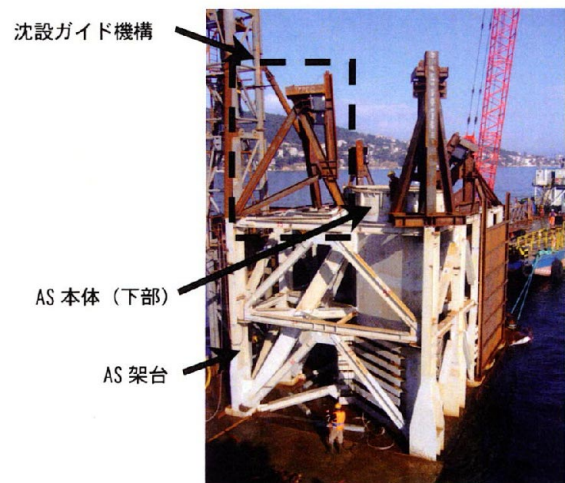


写真-2 沈設ガイド機構

AS 上部の位置決めは2段階方式とし、まず最初にセンチ単位の精度で位置決め（以下、「一次位置決め」）を行った後に、最終的なミリ単位の精度での位置決め（以下、「二次位置決め」）を行う。したがって、ガイド機構も一次ガイドおよび二次ガイドの2段階構成とした（図-11）。

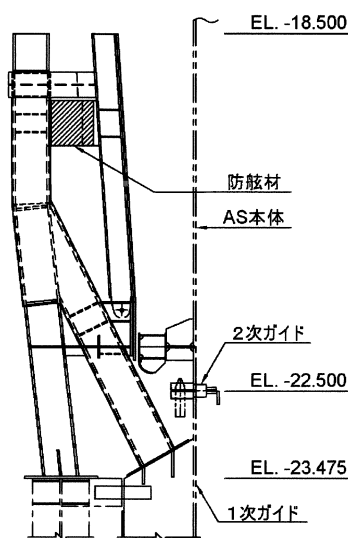


図-11 1次ガイドおよび2次ガイド

(2) 一次ガイド

一次ガイドは、AS 上部を一次ガイドの内面に沿って降下させることにより、一次位置決めが自動的に行われる機構であり、AS 上部を誘導するためのガイドビームと、それを支持する架台からなる構造とした。ガイドビームは上端から下端に向かって内側に傾斜しており、ガイド機構内へ AS 上部誘導作業は容易となる一方、最終的な位置決め精度は向上する。

また、沈設中の AS 上部は、波浪・潮流、さらには起重機船の操作の影響等により絶えず動揺した状態でガイド機構に接触するこの際に発生する衝突荷重を抑制するために、ガイド機構には緩衝機構を内蔵させた。ガイドビームが AS 上部メンブレンと直に接触することを避けるため、AS 上下端の外周には防舷材を配置した。

一次ガイドは AS 外周壁・内部隔壁の交点（全 5 箇所）および円弧部頂点（全 2 箇所）の全 7 箇所に配置した（図-12）。これにより、AS 上部は鉛直軸回りの回転を含めて確実に位置決めされる。

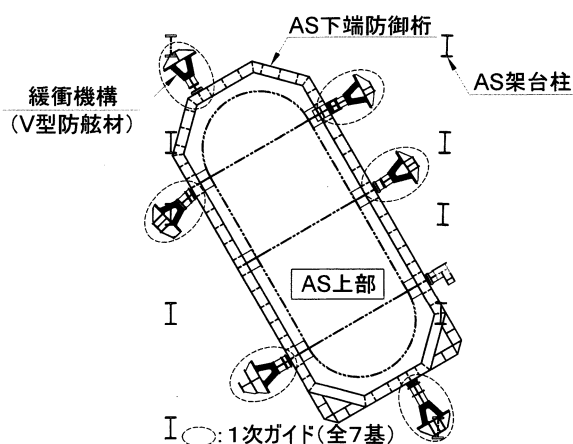


図-12 1次ガイド平面図

(3) 二次ガイド

二次ガイドは AS 下部側に配置する頭部が円錐形となった鋼棒（以下、「ガイドピン」）と、AS 上部フランジ内に開けた円孔からなる構造とする。AS 上部が降下するにしたがいガイドピンが円孔内に貫入し、最終的にガイドピン下方の円中部と円孔とが接触することにより、ミリ単位の位置決めを行う。この二次ガイドを AS メンブレン・隔壁の交点内の 2 箇所配置することにより、AS 上部を鉛直軸回りの回転を含めて確実に位置決めした。

8. おわりに

大水深・強潮流および限定された施工機械能力の下で塔状構造物を高精度に設置するため、その構造形式および施工方法について詳細な検討を実施し、現地施工に適用した。

2007 年 3 月に E11 函体沈設に引き続き、AS は同年 5 月に E11 函体上に設置された。本工事に向けて開発した潮流流況予測システムを用いて潮流速度が 1.0m/sec まで低下したタイミングを選んで施工したこともあり、AS は損傷することなく所定の精度で設置された。供用開始後 2 年以上が経過し冬季の荒天等も経験したが、AS は所要の耐力および水密性を維持し続けている。

本開発で得られた結論を以下に示す。

- ①海中孤立塔状構造物の構造形式として、鋼製箱桁構造を採用した。本構造は供用上十分な耐力を有しており、かつ RC 構造と比較した場合、大幅な軽量化により比較的能力の低い起重機船による施工が可能となる等、施工上優位な面がある。
- ②荷重伝達機能および水密機能の双方を有する水中継手方式として、L 型ボルト引張接合を採用した。その耐力評価の一つとして 2 次元弾性 FEM 解析を用いた解析手法を提案した。
- ③ボルト引張接合を採用するためには、接合する構造物同士をミリ単位で位置決めすることが必要となるが、これは本工事にて採用した複数の位置決め機構にて段階的に位置決め精度を上げることにより解決可能である。

これらの設計・施工技術は、大水深・強潮流域における海洋工事に適用可能な技術であると考えられる。

参考文献

- 1) DET NORSKE VERITAS: Structural Design General, Rules for Classification of Mobile Offshore Unit, pp.13-15, 1988.
- 2) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 社団法人日本道路協会, pp. 72, 2002
- 3) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 社団法人日本道路協会, pp. 151-180, 2002