

日韓トンネル通信

編集/発行

特定非営利活動法人

日韓トンネル研究会

事務局：東京都千代田区飯田橋4-1-11

〒102-0072 信濃ビル6階

TEL 03-3265-8813 FAX 03-3237-1012

E-mail office@jk-tunnel.or.jp

九州事務所：佐賀県唐津市和多田2344-6

〒847-0000

TEL 0955-75-2930

☎0120-09-2188



(報 告)講演会

第16回通常総会を記念する講演会を2019年6月6日(木)、東京都千代田区のアルカディア市ヶ谷私学会館で行った。講師は岩野政浩氏(大成建設株式会社土木本部理事・土木企画部長)で、テーマは「クローズアップ・ボスポラス、トルコ150年の夢 アジアとヨーロッパを結ぶ海峡横断鉄道の建設」である。

日本で発展したトンネル技術の粋を集め、日本とトルコの協力により実現したこの鉄道トンネルは、トルコの経済発展に貢献すると共に、インフラ建設技術の海外輸出の成功例として建設事業の国際化にも寄与した。

【講演の概要】ボスポラ

ス海峡は黒海とマルマラ海を結ぶ長さ30kmの海峡で、トルコの商業都市イスタンブール市を東のアジア側と西のヨーロッパ側に分断している(図-1)。

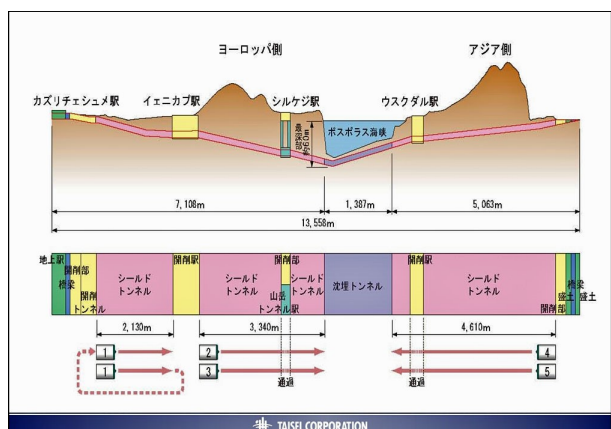


岩野政浩 講師

ボスポラス海峡横断鉄道は1984-1988年にマスタープランを作成、1996年にトルコ政府が円借款を要請、1999年に政府間の交換公文を締結、2004年5月に大成建設とトルコのGAMA/NUROL共同企業体が受注、2004年8月に着工、2013年10月に部分開通した(図-2)。



- 施主 : トルコ共和国
運輸通信省・鉄道・港湾・空港建設総局
- 施主代理人 : AVRASYA JV (オリエンタルコンサルタツツ他)
- 施 工 : 大成・Gama・Nurol 共同企業体
- 契 約 : 2004年5月6日 調印
- 着工日 : 2004年 8月27日
- 契約金額 : 約 1,023 億円 (JICA、環境円借款)
- 契約工期 : 56 ヶ月 (～2009年4月28日)
→ 122ヶ月 (～2014年10月28日)



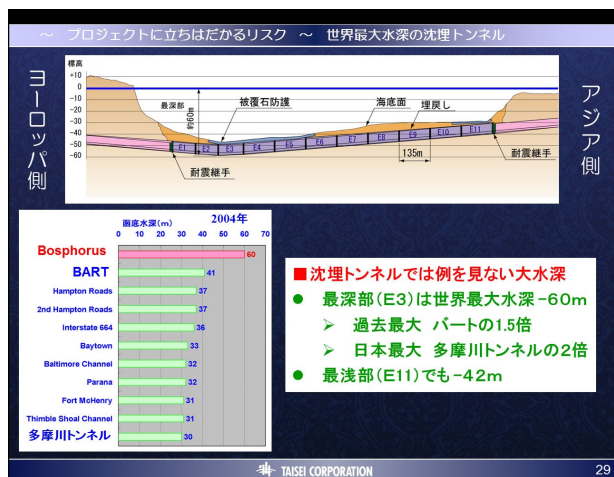


図-5 世界最大水深の沈埋トンネル

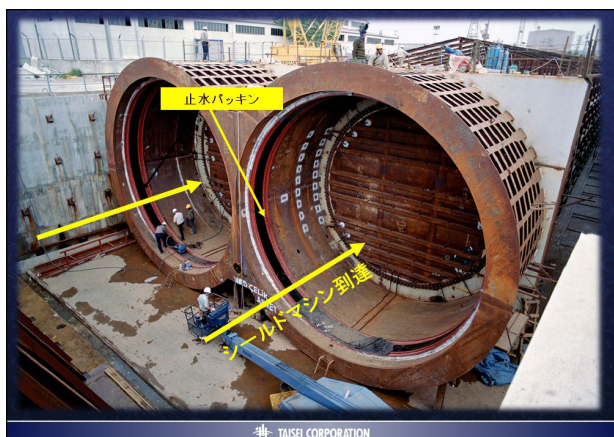


図-6 シールドマシン到達部のソケット

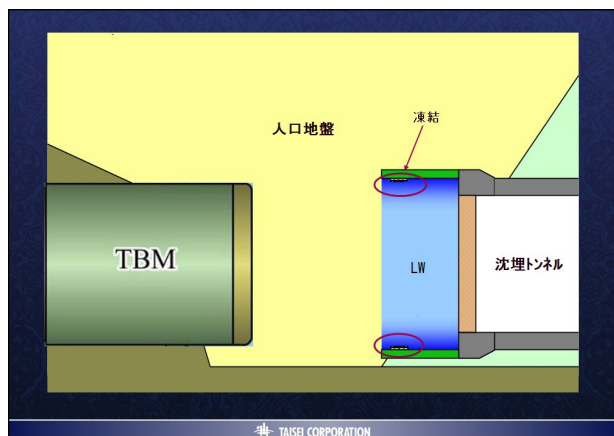


図-7 沈埋函とシールドトンネルの直接接合

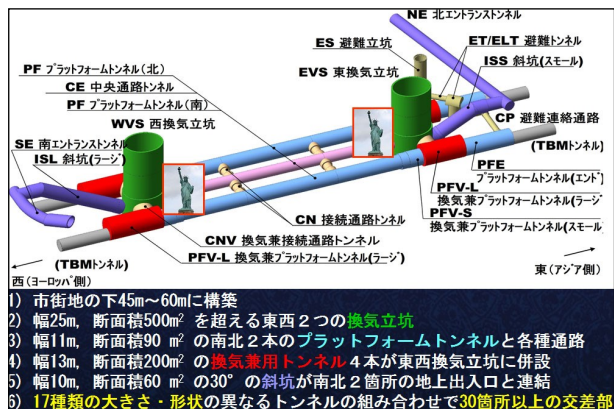


図-8 複雑な構造のシルケジ駅

3. 沈埋トンネルでの2つの世界初

ボスポラス海峡の沈埋トンネルは世界でも例のない最大水深60mに沈埋函11函を沈設して建設した。その最大水深は過去最深のバートトンネルの約2倍、日本最深の多摩川トンネルの約1.5倍である。この記録は現時点でも破られていない(図-5)。

また、世界で初めて沈埋函とシールドトンネルを直接接合した。沈埋函とシールドトンネルの接合は通常、陸上の立坑で行われる。しかし、遠浅な海底地形が広がる本プロジェクトの場合、莫大な量の岩盤浚渫が必要となる。そこで沈埋トンネルの両端とシールドトンネルを海中で直接接合することにし、両端部の沈埋函に接合用のソケットをつけた(図-6)。

シールドマシンは海中を進むことができない。そのため沈埋函の沈設後にソケット部を人工地盤で埋戻して凍結・止水し、シールドマシンを進入させて沈埋トンネルとシールドトンネルを接合した(図-7)。

この方式をアジア側2回、ヨーロッパ側2回の合計4回実施し、大水深の高水圧下であっても到達部周辺に確実な止水性を確保できることを実証した。

4. 市街地直下での大規模地下駅建設

海峡の西側にあるヨーロッパの終端シルケジ駅は、イスタンブールの旧市街地に位置する。その歴史・景観保存地区(世界遺産)の只中に地下駅を建設した。

景観保存などのため、シルケジ駅は市街地の地下45m～60mに構築された。駅は、幅25mで断面積500m²を越える東西2つの換気立坑、幅11mで断面積90m²の南北2本のプラットフォームトンネルと各種通路、幅13mで断面積200m²の換気兼用トンネル4本が南北2か所の地上出入口と併設、幅10mで断面積

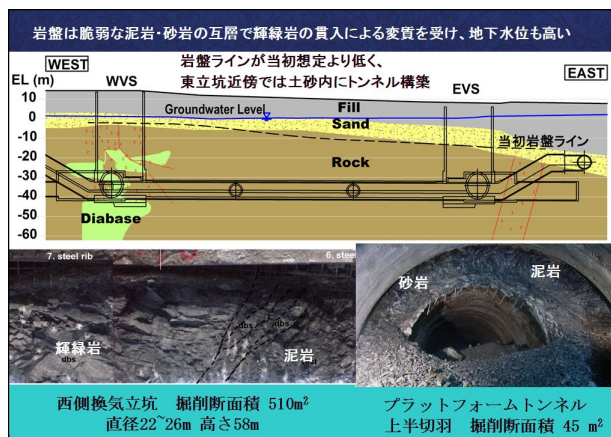


図-9 シルケジ駅の地質構造

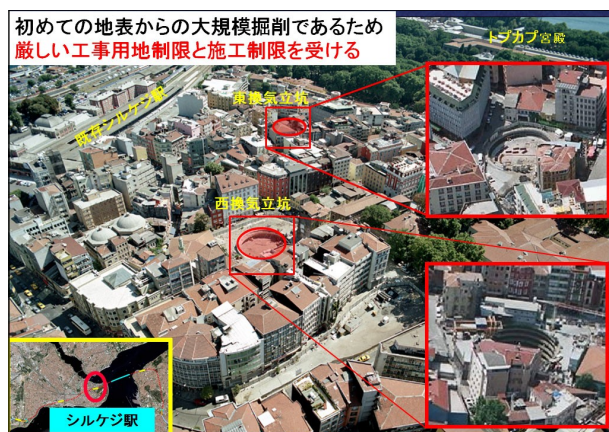


図-10 旧市街地にあるシルケジ駅

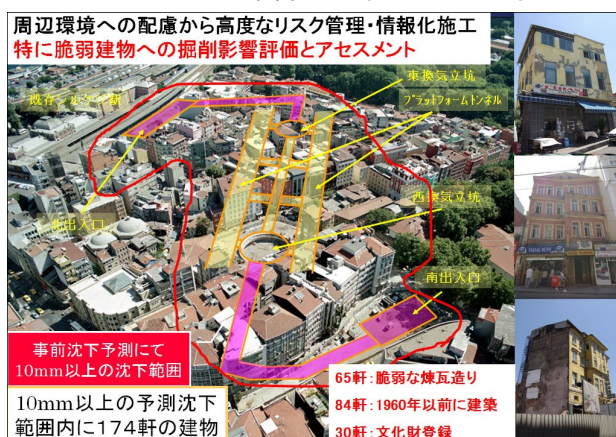


図-11 シルケジ駅周辺に林立する脆弱な建物



図-12 脆弱な建物への沈下対策

60 m²の 30 度の斜坑が南北 2 か所の地上出入口と連結するなど 17 種類の大きさと形状の異なるトンネルの組み合わせでできており、交差部は 30 か所以上という非常に複雑な構造の大規模地下駅となった（図-8）。

シルケジ駅の岩盤は、脆弱な砂岩・泥岩の互層で輝緑岩の貫入による変質を受け、亀裂が発達していた。また岩盤の出現深度は当初の想定よりも深く、東立坑付近では土砂内に斜坑を構築することになった（図-9）。

古い建物が密集する歴史・景観保存地区に大規模な地下駅を建設するため、施工には 3 つの大きな制約条件と要求事項があった。

- ① 厳しい工事用地制限と施工制限
- ② 脆弱建物への掘削影響評価とアセスメント
- ③ 埋蔵遺跡の出現による工程遅延による手順変更

4-1 厳しい工事用地制限と施工制限

イスタンブールの旧市街地での初めての地表からの大規模掘削であるため、厳しい工事用地制限と施工制限を受けた。地表からの掘削は東西の換気立坑に限定された。そのため当初の施工計画では東西立坑を掘削後、地下で水平坑を掘削する予定であった（図-10）。

4-2 脆弱な建物への掘削影響評価とアセスメント

シルケジ駅の周辺はレストランやホテルの密集地である。脆弱な煉瓦造りが 65 軒、1960 年以前の建築が 94 軒、文化財登録が 30 軒もある。周辺環境への配慮から高度なリスク管理・情報化施工を行い、脆弱建物への掘削影響評価とアセスメントを実施した（図-11）。

事前沈下予測で 10 mm以上の沈下範囲内に 174 軒の建物があることがわかり、建物の補強、建物下への地盤注入、トンネル坑内での沈下対策工を実施した。その結果、クラック等で建物を損傷することなく施工できた（図-12）。



図-13 東換気立坑での埋蔵遺跡により工事中断

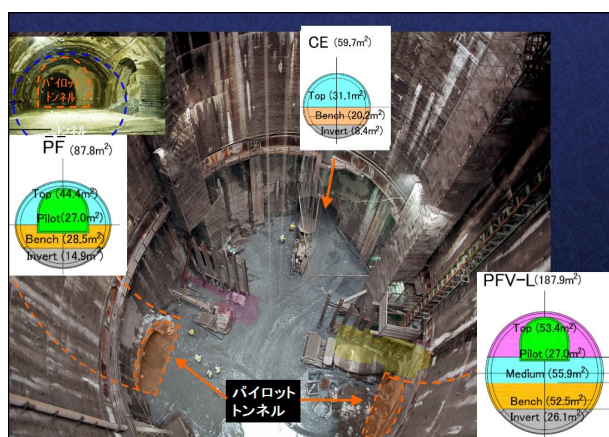


図-14 西換気立坑から東換気立坑側に水平掘削

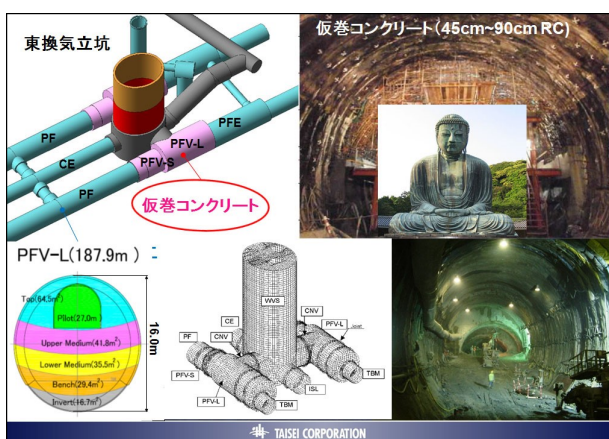


図-15 東換気立坑底の施工

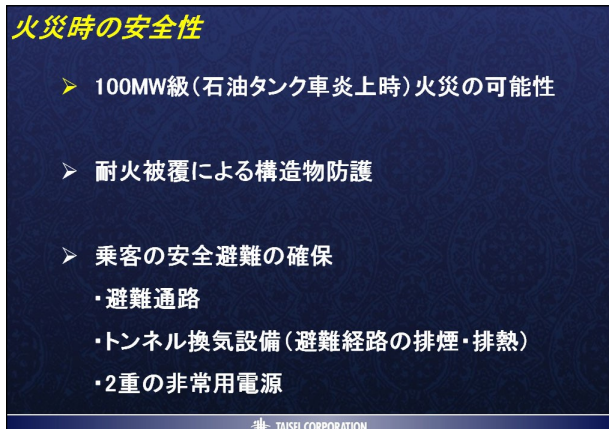


図-16 火災時の安全性

4-3 埋蔵遺跡の出現による工程遅延による手順変更

景観や埋蔵遺跡保護のため、地表からの掘削は東西の換気立坑に限定して始まった。しかし東換気立坑の掘削現場から厚さ 15m におよぶ埋蔵遺跡が出現した。埋蔵遺跡の出現で長期間にわたる遺跡調査が入り、大幅な工程遅延が生じたため、施工手順を大きく変更せざるを得なかった(図-13)。

東換気立坑の地表からの掘削が埋蔵遺跡の出現により中断したため、西換気立坑を掘削後、立坑底から東換気立坑に向けて水平坑を掘ることになった。水平坑の掘削は地盤沈下を確認するためパイロットトンネルを掘り、その後に NATM で幅 11m のプラットフォーム用のトンネルを 2 本掘った。地盤沈下を防ぐために薬液の注入やアンブレラ等の補助工法を用いた(図-14)。

東換気立坑は遺跡調査により地表からの掘削が中断したため、西換気立坑からの水平坑掘削を進め、東換気立坑の近傍両側の大断面トンネル(PFV-L)をまず掘削した。東換気立坑の掘削再開前に大断面トンネル(PFV-L)部には高度な構造設計に基づいて仮巻コンクリートを防護工として施工した。その後、東換気立坑掘削を進め、両者の連結を実施した(図-15)。

歴史景観保存地区での大断面地下空間構築の成功は、都市部での大規模地下空間開発における有効な手段として、都市 NATM 工法の適用範囲の拡大に貢献するものとなった。

5. 耐火・避難用設備・空調など

ボスプラス海峡横断鉄道は、夜間には貨物列車も走行する。そのため石油タンク車の炎上を想定した 100MW 級の火災でも被害が生じないように耐火被覆で構造物を防護した。耐

避難通路の規定

上下線連絡路

- ・沈埋部125m間隔、その他200m間隔
- ・耐火扉の設置(直近の安全地帯である反対車線への延焼防止)



図-17 火災時の安全性



- 換気ファン総数:30基
- 総出力:16,000kW

電気機関車 3台分

図-18 トンネル換気ファン



図-19 マルマライ路線計画

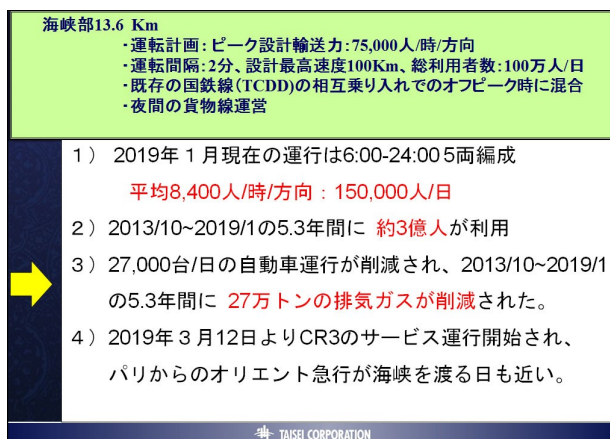


図-20 供用後の運行状況と効果

火被覆はバーミキュライトという鉱物をすりつぶしてセメントに混ぜたものを吹き付けて施工した(図-16)。

耐火施工する範囲は、ボスポラス海峡直下の全区間と土砂部のトンネルおよび構造物の損傷が大出水や人命の危機に繋がる全区間である。火災時のコンクリート表面温度が380℃以下、鋼材表面温度は250℃以下となるようにした。

避難通路は上下線の連絡路を結ぶもので、沈埋部では125m間隔、その他は200m間隔で設け、耐火扉を設置して直近の安全地帯である反対車線への延焼を防止した(図-17)。

換気装置は、トンネル換気ファンをシルケジ駅だけでも30基設置した。各ファンは全長17m、高さ4.8mで、総出力は30基合わせて16,000kWとなり、これは日本最強の電気機関車3台分に相当する(図-18)。

その他に洪水対策として洪水扉をアジア側(ウスクダル駅西側)に重量50tの垂直式洪水扉を2台、ヨーロッパ側(シルケジ駅東側)に重量30tの水平式洪水扉を2台設置した。

6. 海峡横断鉄道供用後の運行状況と効果

マルマライ路線計画は、ボスポラス海峡部の13.6kmを含む総延長76.6kmの広域鉄道の整備である(図-19)。

2013年10月に開通した海峡部は、ピーク時の設計輸送力が75,000人/時/方向、総利用者数は100万人/日を可能としている。

2013年10月から2019年1月の5.3年間に約3億人が利用し、27万トンの排気ガスが削減された。海峡トンネル部分開通後2019年1月の時点で午前6時から深夜0時まで5両編成で運行され、各方向平均8,400人/時で一日に両方向で約30万人が鉄道でボスポラス海峡を横断している(図-20)。

【質疑応答】

講演終了後に質疑応答があった。

質問 1 (会場から) プロジェクト全体として大成建設は採算がとれたか。

回答 (岩野講師) 土木工事としてはぎりぎりだった。換気装置や洪水扉等の特殊設備は欧米企業への設計・制作の発注となり、費用がかさみ厳しい結果となった。

質問 2 (会場から) ボスポラス海峡を渡る人とモノの動きをみるとトンネルの数は足りないと思う。再度発注があったら受注するか。

回答 (岩野講師) プロジェクト当初から「華は沈埋、儲け頭はシールド、爆弾は NATM」と言われていた。NATM 工事にて私と一緒に現地で苦労した者は、幾多の困難を乗り越えて工事を完成できたのは奇跡であり、二度目がうまくいくとは思えないので、できれば二度とやりたくないというのが素直な気持ちである。

質問 3 (会場から) 契約条件のリスク負担で「予見不能な物理条件、地盤条件等は請負者のリスクになる」とある。遺跡の出土による工期延長で発生した費用は発注者の負担か。

回答 (岩野講師) 契約時に 30 日程度とされた遺跡調査は実に 6 年もかかり、NATM 工事や駅部の工事遅延が発生し、それに伴うオペレーションコストや経費が大きく膨らんだ。そのため途中で大統領令の発行がなされて救済措置を受けることになり、トルコ政府から日本政府に対し追加の円借款の要請もなされた。

質問 4 (会場から) シルケジ駅での施工は地層が軟弱で地下水位レベルが高く止水に苦労したのではないか。

回答 (岩野講師) アジア側、ヨーロッパ側ともシールドトンネル間の連絡坑を NATM 工法にて 200m 間隔で計 36 箇所施工した。その内ウ

スクダル駅及びシルケジ駅から沈埋トンネルに向かう区間では海底下を掘削するので黒海から流れてきた低塩分の地下水が湧水として出水した。当初、日本の止水剤を注入したが水が止まらず、ヨーロッパの材料を調べ、低塩分の地下水に反応する止水剤を用いて止水注入を行い、掘削を完了した。

質問 5 (会場から) 出水対策以外での掘削上の困難はあったか。

回答 (岩野講師) 地盤と建物の沈下があった。当初は 10 mm 位の沈下を想定したが、地盤の緩い遺跡の層が 15m もあったため、その下にトンネルを掘ると実に 330 mm も沈下した。これはギネスブックものである。しかし地上の文化財など建物の傾斜や沈下を管理し、クラックなどが入らないように手当てしながら掘削を進め、建物を守ることができた。

質問 6 (会場から) NATM は発破か機械掘りか。

回答 (岩野講師) 市街地での掘削であり、また掘削対象岩盤が砂岩・泥岩の互層なので、機械掘削で全て実施した。トルコでは掘削に適した機械のリースが難しいため、日本からロードヘッダーやツインヘッダーを調達して利用した。

質問 7 (会場から) 英仏海峡トンネル内でカートレイン積載のトラックが炎上し、厚さ 40 cm のセグメントが焼損して地山が覗く事態になった。ボスポラス海峡横断鉄道トンネルでの耐火対策はどうか。

回答 (岩野講師) 元々の設計が可燃物を積載した貨物を通すことが前提だった。火災を想定したシミュレーションや耐火実験でコンクリートや鉄筋の表面温度や爆裂の有無などを調べ上げた。その結果、バーミキュライトの粉末をセメントに混ぜて吹付することで耐火被覆することにした。被覆の範囲は当初の計画より大幅に広がった。当初は沈埋トンネルと

シールドトンネルの土砂部つまり爆裂した時にトンネルが崩れる可能性のある場所だけだったが、岩盤部の場合も人の集中する駅部などは全て耐火被覆を施した。

質問 8 (会場から) 労務は現地の労働者か、それとも日本から大人数が行ったのか。

回答 (岩野講師) 施工は縦割りの工区割りとし、明かりの工事は現地の事情に明るい GAMA 社と NUROL 社が施工した。労務は殆どがトルコ側が集めた。トルコは NATM の専門工事業者が多く、またトルコ人はみな勤勉で、学んだ技術を活用して国外で仕事し外貨を稼いでいる。但し海底の地盤改良や液状化対策などは日本から連れて行った労務が全て行った。世界一の親日国で技術者として尊敬の念をもって迎えられた。

質問 9 (会場から) 韓国が施工したボスポラス海峡の道路トンネルは開通したか。

回答 (岩野講師) すでに開通し、これまでは橋経由のみだった自動車通行が、海峡を跨いで渡れるようになり、非常に便利になったと聞いている。

質問 10 (会場から) ボスポラス海峡の水深は 36m から 124m とあるが、日韓トンネルの水深はどれくらいか。

回答 (野澤太三会長) かつて対馬から韓国の間のルート案は A, B, C の 3 案があった。釜山に直行する C 案が一番水深が深く 200m を越える。現在一番可能性が高いとみている巨済島に渡る修正 B ルートでは 165m ほどとなる。水深と海底下距離は海底トンネルのルートを決める 2 大要素である。日韓両国とも海洋調査船を所有している。海底の地形と地質および断層の有無についての日韓両国による共同調査を一日も早く行い、共通の認識のもとで一緒に調査の結果を評価したいと思う。

質問 11 (会場から) 現時点で日韓トンネルは釜山直行なのか巨済島を経由するのか決まっているか。

回答 (野澤太三会長) 対馬の上島から巨済島に渡る修正 B ルートの可能性が高いとみている。ルート選定は海底の地形地質ならびに工事費や工期の算定結果をみての最終決定となる。ルートの決定は日韓両国の政府間で協定を結び、事業主体が決まってから最終的に決まる。今は仮定に基づき進めているが、その仮定が正しいかどうかを絶えず検証しながら進めていく。

(お知らせ)

◆ボスポラス海峡鉄道トンネルの沈埋トンネル施工のレポート

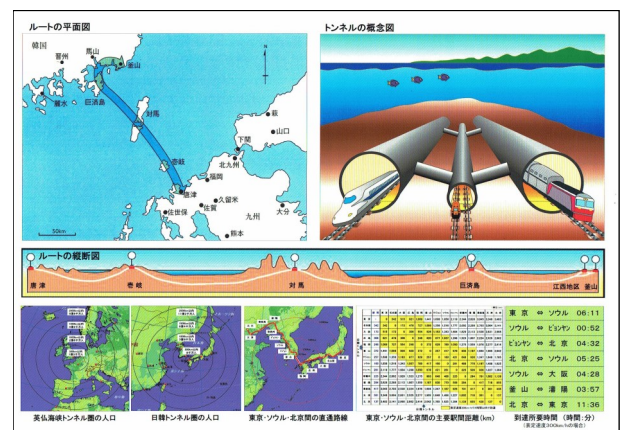
2014 年 6 月 18 日の当会総会で記念講演した小山文男氏 (大成建設株式会社) の講演レポートが「日韓トンネル通信」の No. 32 に載っている。

◆日韓トンネルのパンフレットの改訂版

改訂版には新たに次のことを載せた。

- ①英仏海峡圏と日韓トンネル圏の人口配置
- ②東京・ソウル・北京間の直通路線
- ③東京・ソウル・北京間の主要駅間距離
- ④主な駅間の到達所要時間

日本語・韓国語・英語・中国語版がある。お入り用の方は事務局にお問い合わせください。



日韓トンネルのパンフレット (改訂版) P. 2-3