

東京湾アクアライン

シールドトンネルの床版下空間の利用について

Utilizing the Space under the Carriageway Slab of Trans-Tokyo Bay Highway Tunnel

山田憲夫・楠本信司..

Norio Yamada and Shinji Kusumoto

Trans-Tokyo Bay Highway is a 15.1 km toll highway across Tokyo Bay. This highway consists of two 10 km shield tunnels, a 5 km bridge, and two artificial islands. Those shield tunnels have 14.14 m diameter, which is one of the largest in the world, and were constructed in the severe design conditions such as under high water pressure, in the soft ground, and under frequent earthquake occurrence.

Consequently, it is technically hard to construct the cross passages connecting two tubes, which are usual practice in the mountainous tunnels; therefore, instead of the cross passages, a new emergency system which utilizes the space under the carriageway slab is applied. This report introduces not only various studies on this emergency system, but also other new techniques such as ventilation systems.

1. まえがき

東京湾アクアライン（東京湾横断道路）は、東京湾の中央部を横断し、神奈川県川崎市と千葉県木更津市を結ぶ延長15.1kmの一般有料道路である。このうち船舶航行輻輳する川崎側の約10kmをシールドトンネル、船舶航行が比較的少なく、水深の浅い木更津側の5kmを橋梁とし、トンネル中央部とトンネル・橋梁の連結部に人工島が造られている。

東京湾アクアラインの工事は、9月末現在94%の進捗となっており昭和41年4月に建設省により調査が開始されてから30年8ヶ月の歳月、平成元年5月に海上工事に着手して以来8年7ヶ月をかけ、平成9年12月18日の供用を目指し、最終の調整段階に入っている。

本論文では、東京湾アクアラインのトンネルについて、沈埋トンネルからシールドトンネルへの変更、トンネルの換気方式もより経済的な観点から横流換気方式から電気集塵機を利用した縦流換気方式へ変更された。さらには、東京湾アクアラインの施工条件として大水深（60m）で軟弱地盤（N値0）の厳しい条件と合わせ、地震発生地域であること等技術的に非常に難しいことから、通常 mountainous

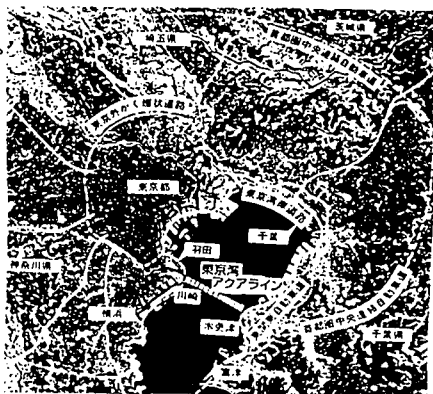


図-1 首都圏広域図

* 正会員 東京湾横断道路㈱技術部技術課長

* * 東京湾横断道路㈱施設部施設第一課長

トンネルで施工される上・下線を 750m 程度で結ぶ避難連絡坑を廃止し、これに替わる機能として床版した空間を利用して避難する防災システムを導入することになった。

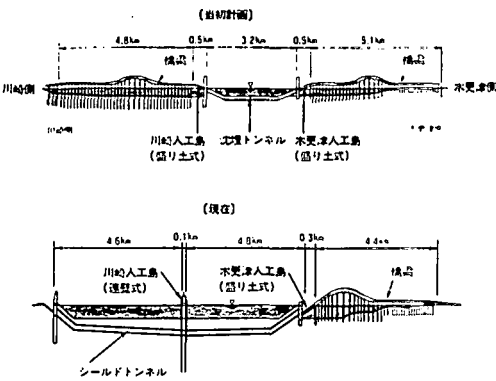
2. 事業の経緯（計画の変遷）

東京湾アクアラインの海底トンネル区間は、建設省から日本道路公団に引継がれた昭和51年8月時点では、図－2に示す当初計画を基本に比較検討され、両サイドが橋梁中央のトンネルは沈埋トンネルで計画されていた。しかし、東京湾における船舶の航行実態から、昭和58年度の調査では、1,300隻／日が東京湾を行き来しており、現在のトンネル区間が96%、木更津側の橋梁区間が4%の船が行き来している。また、トンネル区間の川崎側から川崎人工島区間を96%のうち70%が航行しているのが実態であった。

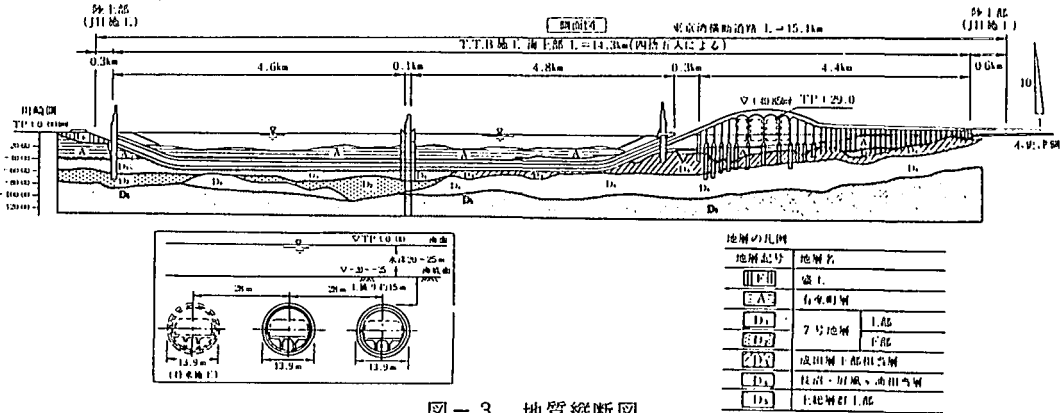
このような状況から、川崎側の橋梁部も船舶航行の確保と道路の保全上からもトンネル（案）が良いとされてきました。また、トンネル区間も当初沈埋トンネルで計画していましたが、沈埋トンネルの場合、ドッグで長さ 100m 内外の Box を作って、船で運び、海底に埋設するにも船舶航行の制御が必要で工事の安全上にも問題があった。さらに日本道路公団において、昭和50年頃から船舶の航行に影響のないシールド工法に着目し、調査研究を進め、シールド工法技術の飛躍的な進歩と、地中構造物で円形のシールドトンネルは耐震性も高いこと等から、沈理工法からシールド工法を採用することとなった。

3. 地形および地質

東京湾アクアラインの計画路線の水深は、川崎～木更津のほぼ中央で最大28.4mで、川崎側については水深20mを超える地形が海岸線近くまで続いている。これに対して、木更津側では海岸線から約 1.5kmの区間は2mより浅い干潟である。また、地質については川崎側から湾中央部にかけてはN値がゼロに近い軟弱沖積粘性土層が層厚20～30mで堆積している。浮島取付部は埋立地で、埋立て前の原地盤面はTP（東京湾平均海面）－18mで、TP－45m付近までは沖積粘性土層が厚く堆積している。その下に、砂質土と粘性土の互層である洪積土層がTP－80m付近まで続いている。川崎人工島付近の海底地盤面は、約TP－28mで、海底面下の土層はTP－55m付近までがN値ゼロの軟弱な沖積粘性土層、TP－70m付近までは砂質土と粘



図－2 当初計画との比較



図－3 地質縦断面図

性土の互層である洪積土層、それ以深はT P - 110 ~ 130 m 付近に層厚 1 ~ 3 m の粘性土の薄層を有するN 値50以上の砂質土層である。木更津人工島付近の海底地盤面は約T P - 20 m で、海底面下の土層は上層 0.5 ~ 3.0 m にはN 値ゼロの軟弱層がある。その下部は、沖積砂質土層で、N 値は3 ~ 22程度である。また、沖積層の下側には洪積層が砂とシルトの互層となり海底面下35 m まで続いている。砂層はN 値40 ~ 60 と比較的締っており、シルトのN 値も20以上とかなり高い値を示す。トンネルの掘削地盤は、川崎側が沖積層と洪積粘性土層を主体としており、木更津側ではこれに洪積砂質土層が混じっている。図- 3 に計画路線の地形地質図を示す。

4. 設計、施工上の特徴

東京湾アクアラインのシールドトンネルの設計・施工上の特徴は以下に示す通りである。

- ①道路構造から大口径シールド（外径 $\phi = 13.9$ m）となり、長距離掘削が必要である。
- ②軟弱地盤でかつ地震活動が活発な地質に建設される。
- ③水深が大きいため60 kg / cm²の高い水圧がかかる。
- ④海水の塩分による影響を受ける。
- ⑤併設トンネルで、その離隔距離が斜路部で 0.5 D ~ 1.0 D、海底部で1 D と小さく、隣接トンネルの影響を受けやすい。
- ⑥トンネル延長が長い為、工期短縮を図るため海底4ヶ所で

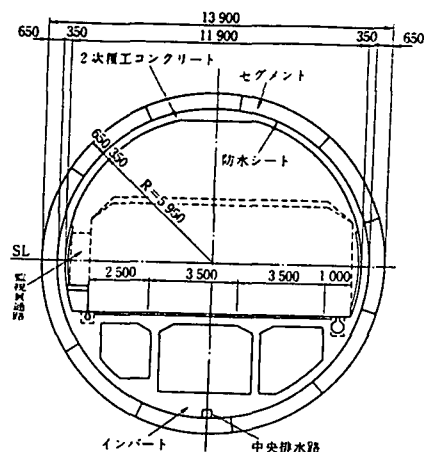


図- 4 トンネル基本構造

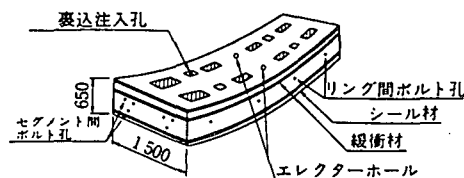


図- 5 セグメント構造

表- 1 シールドトンネル計画条件

仕上がり内径	11.9m
覆工	一次覆工（外径13.9m、内径12.6m、幅1.5m） 二次覆工（厚さ0.35m）
延長	9.1km（川崎側4.6km、木更津側4.5km）
線形	勾配：斜路部4%、平坦部0.2% 縦断：緩急接続R=10,000m（川崎、木更津側各1カ所） 平面：緩急接続R=1,650~2,500m
トンネル間隔距離	海底部1D（D：トンネル外径） 両斜路部0.5D~1D（立坑前面で0.5D）
浮上り安全率	完成時1.25以上、施工時1.1以上
土質	斜路部6.4~9.4m、平坦部15m（平均）
水深・水圧	水深は平均27.5m、水圧はトンネル底面で6kg/cm ²
掘削地盤	斜路部：改良粘土、深層混合処理地盤 平坦部：沖積および洪積の粘土層・砂層の互層

8基のマシンが地中接合を行う必要がある。

- ⑦施工の安全性、施工精度の向上を図るため掘削やセグメント組立てなど作業を自動化する必要がある。

以上、数多くのシールドトンネルの特徴に対して、次の基本方針に基づいて設計を行った。

- ①一次覆工は、全ての荷重に対して抵抗できるよう設計し、軟弱地盤における耐震性の面から横断面は剛性の高い構造とする。図- 5 にセグメント構造図を示す。
- ②トンネル全体の漏水対策としては、セグメント・シール材を基本とし、一次覆工と二次覆工の間にも防水シートを張り、バックアップ対策とした。

- ③二次覆工は、トンネル本体に働く浮力に対するカウンターウェイトと、坑内火災時の一次覆工を防護する目的で設計されている。さらに地震時には、二次覆工に鉄筋を縦断方向に連続させ、地震時のひび割れを分散させ、一次覆工の継手にひずみが集中することを防止している。

- ④構造物の寿命は 100年を目標とするため、耐震性の高い材料や腐食に強い材料とし、使用される鋼材の中で露出する部分に防食処理を施す。

なお、技術的な課題に対しては、学識経験者を含めた検討委員会を設置し、東京湾地域の特性を考慮し、

最適構造の選定、設計基準の作成、耐震検討や各種実験等を行進めてきた。

5. 設計・施工上の留意点

(1) 耐久性

トンネルの防水、防食対策としては、次のバックアップ体制を採用し、漏水に対して万全を期した。

- ① 裏込注入材は、最も信頼性の高いといわれている可塑系材料を使用し、短期的な止水対策と考えた。
- ② セグメントに取り付ける防水シールは、水に触れると約2倍程度に膨張する材料を使用した。
- ③ セグメントには、普通ポルトランドと高炉スラグをセメント重量比で50%ずつ配合し、耐海水腐食性を向上させた。
- ④ 露出する鋼材は腐食代を考慮し、セグメント締結ボルトは半永久的な耐久性を有する亜鉛末クロム酸化被膜処理、または、フッ素樹脂コーティングを施したものを使用した。
- ⑤ 漏水対策としては、一次覆工と二次覆工の間に導水型の防水シートを張り、すみやかにトンネル底部に導き排水できる構造とした。

(2) 耐震性

東京地域は、1868年以降に生じた被害を伴う地震が23回記録されており、1923年の関東大地震(M7.9)に代表されるようになり、大規模な地震が発生している地域である。

東京湾横断道路の各構造物の耐震設計に当っては、このような過去の地震の発生を考慮して行っている。

東京湾アクアラインの耐震設計は震度法による静的設計を基本として動的解析による照査を行っている。動的解析における耐震照査は、二つの異なる地震強度に基づいて行われている。水準-1は、 L_1 レベルで構造物の使用期間中に発生する可能性が比較的大きいと考えられる地震動で、構造物の耐用年数を100年とした場合、再来年数150年に相当するもので、構造物の損傷は受けないとされるものである。また、水準-2は L_2 レベルで、関東大地震よりさらに近くで発生した場合の地震動で、再来年数950年に相当するもので、復旧可能な程度の損傷は許すが、崩壊は防止するものである。図-6にこれらの地震の加速度応答スペクトルを示す。

また、平成7年1月17日に発生した「兵庫県南部地震」に対しても、地震発生直後から再度耐震性に関して検討を行ってきました。その結果、シールドトンネルの耐震性は、「兵庫県南部地震」で記録された地震波形を入力して動的解析を実施したが、耐震性に特に問題がないことを確認している。なお、東京湾アクアラインにおける耐震対策は、以下の通りである。

- ① リング間の連結に長ボルト（締結長500mm）を使用し、縦断方向の変形を吸収しやすい構造とする。
- ② 地盤強度やトンネル剛性が急変する箇所では、所要ひずみを吸収仕切れないおそれがあるため弾性ワッシャーを使用する。
- ③ 長ボルトや弾性ワッシャーによる柔構造化では所要ひずみを吸収しきれない立坑とトンネル接合部では、可撓セグメント

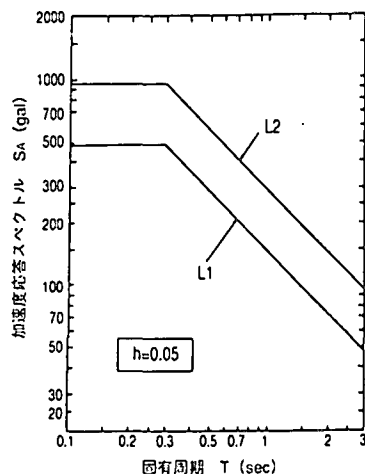


図-6 応答スペクトル特性

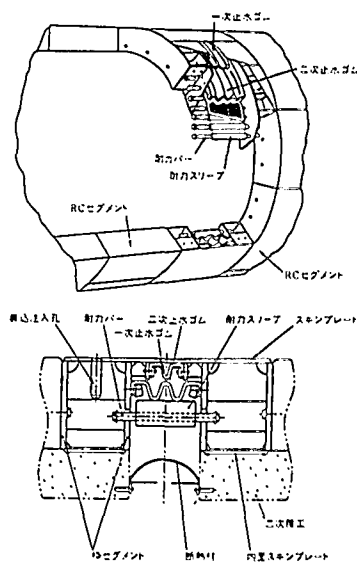


図-7 可撓セグメント

を使用して立坑とトンネルの相対変位を吸収する。

④二次覆工に鉄筋を縦断方向に連続に配置し、二次覆工に発生する軸方向のひび割れを分散させ、一次覆工の特定の継手にひずみが集中することを防ぐこととする。

図－７に可撓セグメントの構造を示す。

6. 東京湾アクアライントンネル防災システム（床版下空間利用システム）

6－1 検討の経緯

東京湾アクアライントンネルの防災対策については、「道路トンネル非常用施設設置基準（昭和56年4月、建設省通達・消防庁通知）」のトンネル等級AAの基準に基づき、当初連絡坑の設置を前提として、山岳トンネルに750m程度の間隔で上・下線を結ぶ連絡横坑の設置を前提として検討が進められてきた。その後平成2年度にトンネル構造の技術的な課題を検討している委員会において、連絡横坑の設置に関して、前述したような厳しい施工条件から、現在の技術水準から長期的安全性に問題があり、「他に代替する防災システムがあれば、構造技術的な面からは、連絡坑を設置しないことが望ましい」という見解が示された。

一方、平成2年度のトンネル防災対策検討において、連絡横坑の補完としての位置付けを検討していた床版下空間について、避難通路として活用することができる可能性が確認された。

これらを受けて、

①海底大水深下の軟弱地盤でかつ地震活発な地域に施工されるシールドトンネルである。

②トンネル断面が円形で、車道の下に空間（床版下空間）がある。

③非常駐車帯の部分拡巾による設置が困難で、左側路肩として全路肩（2.5m）を有している。

等の本トンネルが有している一般の山岳トンネル（長大トンネル）とは異なる特徴を踏まえて、構造的な課題を抱える連絡横坑に代わる床版下空間を活用した防災システムについて、平成3年度より検討が開始された。

検討に当たっては、適宜、設備の付加、設備機能の変更等を行うことにより、安全な空間に避難が行えるという機能、消火、救急活動の支援が図れるという機能について、従来の連絡横坑を代替しうる機能を確保することとし、学識経験者、関係消防機関からなる委員会を組織し、避難、消火、救急活動の両面から、検討が行なわれた。

その結果、平成4年3月に本トンネルの防災システムについては、床版下を活用した防災システムの導入（連絡横坑は設置しない）が決定された。

表－2 東京湾アクアライン防災設備

区 分	設 置 名	設 置 間 隔、位 置 等		備 考
		車 道 上	床 版 下	
火 災 の 検 知	非常電話	150m	避難連絡路付近	
	押しボタン直通警報装置	50m	—	消火栓に併設
	火災検知器	25m程度	—	
	トンネル内の状況監視装置（ITV）	150m程度	—	
初 期 消 火 設 備	消火器	50m	—	消火栓に併設
	消火栓	50m	—	
延 焼 広 大 の 制 御	水噴霧設備（泡機起付加）	有	—	
避難誘導	避難通路	避難通路（スベリ台）	300m	消防進入路と対に設置
	非常出口の 情報提供	トンネル入口情報板及び トンネル内情報板	出口付近及び 坑内	—
		ラジオ再放送設備（緊急時のみ放送）	有	—
		—	—	異性間給ケーブル
避難誘導 設 備	誘導表示板	150m	300m	非常出口表示板 非常口表示灯 床版下：避難連絡路付近に 設置
		拡声放送設備	避難連絡路付近	避難連絡路付近
		消防進入路	300m	避難連絡路と対に設置
		トンネル手前でトンネル内情報板を入手 できる設備	有	—
消防活動 支 援	進入路の 防 火	床版下を通行可能な移動手段 （資機材含む）	—	有
		ヘリコプターの離着陸スペース	川崎・不更澤人工島	
		船舶の操縦施設	川崎・不更澤人工島	
		給水栓	150m	消防進入路付近
	消防活動 支援設備	送水口	出口付近及び 川崎人工島	川崎人工島には、消防所から の送水可能な送水口を設置
		異性間連絡設備（坑内—出口）	有	有
通 信 明 確 確 保	誘導設備	誘導設備（泡機起動専用）	有	有
	照明設備	照明設備	有	有
停 電 時 等 の 対 策	停電時照明設備	有	有	
	非常用電源設備	有	有	

6-2 東京湾アクアラインの防災設備

東京湾アクアラインの防災設備は、床版下を活用することとして表-2に示す防災設備を設置することとした。

これらの中で、防災設備として主な設備の付加、設備機能の変更を以下に紹介する。

- ①車道と床版下との連絡通路；床版下を避難通路及び緊急活動用通路として使用するため、車道から床版下への避難連絡坑及び床版下から車道への進入路として消防通路を設置する。なお、避難通路及び消防隊進入路は対で設置し、その間隔を300m程度とした。図-8に連絡通路を示す。
- ②車道の横断勾配；当初の設計では、監視員通路側へ1.5%の横断勾配となっていたが、防災上（火災時、脱出シュート部に火の粉、及び泡消火水が飛散するのを防止する必要から）の理由から、追越し車線側への横断勾配とした。
- ③水噴霧設備；延焼防止設備の強化として、水噴霧設備に泡機能を付加することとした。
- ④給水栓；床版下から消防活動を行う場合、床版下から上って車道の給水栓が活用できるよう進入路と対に車道面の給水栓を150m程度の間隔で設置した。また、床版下からも消火活動ができるよう、床版下の給水栓を300m程度の間隔で消防進入路付近に設置することとした。
- ⑤誘導表示板；床版下を避難通路とするため、避難誘導用の表示板を300m程度の間隔で、避難連絡路付近に設置することとした。
- ⑥拡声放送；床版下避難者への情報提供の手段として、床版下に拡声放送設備を300m程度の間隔で、避難連絡路付近に設置することとした。
- ⑦非常電話；非常口を使った避難について、避難者からの問い合わせが予想されることから避難路に対して車道面の非常電話を150m程度の間隔で、非常口と対になるよう設置した。また、床版下に避難した人が、異常発生時に通報連絡ができるよう、床版下にも非常電話を300m程度の間隔で避難し連絡路降り口付近に設置することとした。
- ⑧I.T.V設備；非常口等の状況把握を効果的に行うため、非常口（進入口）と対にI.T.Vカメラを、150m程度の間隔で設置することとした。
- ⑨消防活動支援設備；災害時の初期活動の支援のため、本線外からの到達経路の確保として、川崎人工島、木更津人工島にヘリコプターの離発着場所を設置することとした。また、災害時の本格活動の支援のため、本線外からの到達経路の確保として、川崎人工島、木更津人工島に船舶の接岸施設を設置することとした。
- ⑩換気（車道面及び床版下）；床版下を避難、防災活動の空間として使用することに伴い、床版下を加圧して煙りの侵入しない安全空間を確保する必要があるが、床版下の加圧にあたっては、車道面の換気設備の運用（排煙運転）と密接な関係があり、これらについて総合的に検討を行った。

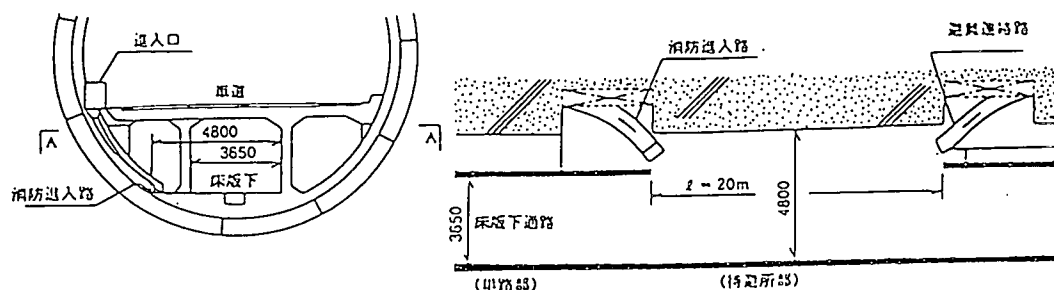


図-8 避難連絡坑構造図

7. 東京湾アクアライントンネル換気

7-1 検討経緯

東京湾アクアライントンネルの換気検討は、委員会において予備検討がなれ、昭和61年度から本格的な検討が始められた。

トンネルの換気方式としては、近年、長大トンネルで採用され実績を上げている電気集塵機付立坑送・排気縦流換気方式の適用を検討した。また、シールドトンネルという制限された天井スペースでの電気集塵機システム等の採用に際しては、維持管理、運用も含めた検討を行った上で判断すべきとして検討を進めた。

昭和63年度からは、天井設置型電気集塵機の換気効果等、トンネル換気設計に関する技術的問題について検討を行っている。また、東京湾アクアライントンネルの連絡横坑は、床版下空間を活用することとし、床版下空間の換気及び車道からの煙りの流入防止等、技術的問題が検討された。

7-2 換気方式の選定

東京湾アクアラインの換気方式として、①排気制限型横流式、②集塵機付送・排気縦流式、③組合せ式（集塵機付送・排気縦流式＋横流式）の3つの方式を比較した結果、経済的には②集塵機付送排気縦流式が、最も有利であり非常時及び異状時に対しても、一酸化炭素の許容値150ppm以下であり、煤煙濃度もほぼ $\tau=30\%$ を確保できた。また、縦流換気方式の問題点としてあげられる4%勾配に対する車速の低下に伴う煤煙発生量の増加、あるいはジェットファン、送気ノズルの昇圧力低下に対しても十分対応が可能である。さらには、縦流換気方式における一つの課題であった電気集塵装置の機器の配置、保守管理についても補機の小型化、専用車両を必要とするものの路肩を利用した保守管理が行えることが明らかになった。

以上の事項を合わせて、トンネル換気方式は、②集塵機付送排気縦流式の換気方式が有利であると判断した。表-3に換気的设计条件、図-9に本線換気システム系統図を示す。

7-3 車道空間非常時換気

道路トンネルでは火災時等の非常時には、避難を助けるために、換気設備を利用して排煙を行っている。

東京湾アクアラインのトンネルでは4%の斜路勾配を有する

表-3 換気設計条件

項目		設計条件
設計交通量		$N = 2,470$ 台/h
設計大型車混入率		$P_t = 28\%$
車道走行速度		$V_t = 50$ km/h
設計濃度	煤煙	$\tau = 40\%$
	CO	通常時 $K_{co} = 100$ ppm 渋滞時 $K_{co} = 150$ ppm
トンネル延長		$L_r = 9,607$ m
トンネル断面積		$A_r = 78.4$ m ² (7-6t部)
トンネル代表寸法		$D_r = 9.1$ m (7-6t部)
縦断勾配		川崎側 4.0% 木更津側 4.0% 0.2% 0.2% 977m 3755m 3663m 1212m 9607m

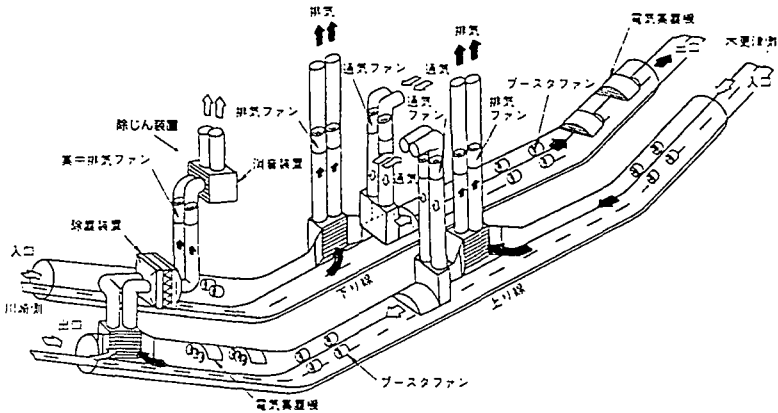


図-9 換気システム系統図

ことから、火災における熱気流に対するシュミレーションを行い、火災時の換気能力としては車道空間風速として 4.5m/s 程度以上を確保する必要がある。また、平坦部においても 2.5m/s 以上を確保することが望ましい結果となった。これらに基づき、非常時の換気運転として、

- ①換気方向は出口方向とする。
- ②目標風速を入口側 4.0%勾配部における火災では 4.5m/s、その他は、2.5m/s とする。
- ③火点と同じ火災区間の換気機は用いない。
- ④川崎換気所手前の火災の場合、煙りを立坑で排出し、川人より先の避難及び消火活動の環境を確保する。
- ⑤立坑を用いる場合は送気と排気を等風量で行い、立坑付近の圧力変動が大きくならないようにすることとしている。

火災区間としては、目標風速が異なる入口側 4 % 勾配部と、それ以外、また、川崎換気所の前後及び立坑送気ノズルの吹き出し部とに区分し、以下の 4 区間として換気運用を行うこととしている。
表－4 に火災区間と使用可能な換気機を示す。

表－4 火災位置と使用可能な換気機

ケース	火災位置	目標風速 [m/s]	使用換気機		
			入口側の 送気機	立坑の 排気機	出口側の 排気機
(a) 入口4%勾配部火災		4.5	×	○	○
(b) 入口0.2%勾配部火災		2.5	×	○	○
(c) 立坑前火災		2.5	○	×	×
(d) 出口部火災		2.5	○	○	×

○：使用、×：使用不可

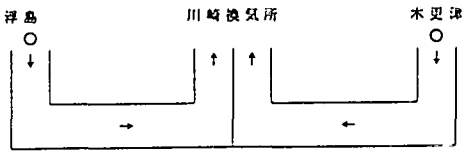
7-4 床版下換気システム

東京湾アクアラインの床版下通路と車道は 300m の間隔で結ばれており、車道部の監視員通路にあるスライドドアにより仕切られている。床版下通路はその使用目的から車道空間の空気の流入は好ましくないため、床版した通路の換気は通路の必要換気量を供給するとともに、車道の汚染空気が床版下に扉の隙間から浸入しないよう車道より内圧を高めている。また、非常時に避難扉を開けても煙り

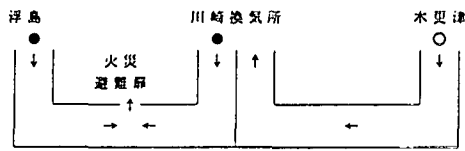
表－5 設計条件

項目	内容
延長 L	A 線 4667m、B 線 4614m
断面積 A および 代表寸法 D	管理用通路 $A=10[m^2]$ 、 $D=3.2[m]$
	東電用道 $A=3.7[m^2]$ 、 $D=1.3[m]$
車道と床版下差圧条件	30[mAq]
送気および排気等換気設備の能力	0.5[m ³ /s] 以内
送気および排気用車道換気設備の能力	10[m/s] 以内

(1) 通常時換気



(2) 非常時換気



○：ファン通常時運転 ●：ファン非常時運転

図－10 運転状況

が避難通路に浸入しないようにし、床版下管理通路を避難路として確保することとしている。表－5 に設計条件を示す。また、図－10 に換気の運転状況を示す。

8 . おわりに

東京湾アクアラインの特殊条件下におけるシールドトンネルについて、その技術的問題に対する考え方とそれに伴って床版下空間を利用することに着目して防災システムや換気方法等について報告してきましたが、現在もなお、これらの防災システムや運用面の問題、危険物輸送の禁止等も含め最終調査が行なわれている。