オーストラリア初の海底道路トンネルの建設

——シドニー・ハーバー・トンネル——

斎 藤 尚 武*

概要 オーストラリア初の海底道路トンネルである、シドニー・ハーバー・トンネルは、(株)熊谷組と地元の建設会社の共同事業体が建設し、1992年8月31日から供用を開始している。本トンネルは、美しい景観と住宅地域での建設であったため、従来の海底トンネルと比べ、広範囲な環境保全対策を構っている。また、港の横断部の沈埋トンネルでは、沈埋函の長距離外洋曳航、可撓構造をもつ最終継手などの新しい試みも行っている。本稿は、これらの概要を中心に、本工事を紹介するものである。

キーワード：環境アセスメント、労務契約、沈埋トンネル、外洋曳航、砂吹込み基礎、可撓性継手

1. はじめに

オーストラリアのシドニー港は、静穏な美しい港で、それを中心にしてこの国最大の都市シドニーが発展してきた。シドニーの商業・経済の中心地は港の南側であるが、その市街地と港の北側を結んでいるハーバー・ブリッジの朝夕の交通渋滞は慢性的になっていた。

このため、New South Wales 州政府は、2000年までの州内主要道路整備計画の一環として、第2の港の横断施設を企画していた。これに対し、(株)熊谷組と地元建設会社は、共同でこの計画の企業化可能性調査を実施、民生活業計画を州政府に提案した。このトンネル事業案は州政府の特別調査チームにより検討されたのちに、議会で承認され、1987年6月末から建設が開始された。

本民生活業は、トンネル・ルート選定、環境影響調査、基本・詳細設計、工事施工を行い、工事の完成後は30年間の運営を行うものである。トンネル位置を図-1に示す。

2. トンネル・ルートの選定

企業化可能性調査の段階で最重要視したのが、トンネル・ルートの選定で、トンネル建設が以下の諸条件をすべて満足させないと計画は採用されないと判断した。

- ① ハーバー・ブリッジの交通問題を解決できる。
- ② 路線沿いの地域社会に大きな問題を与えない。
- ③ 環境問題を生じさせない。

* さいとう・なおたけ／(株)熊谷組 豪州統括営業所 シドニー・ハーバー・トンネル工事所 所長

図-1 トンネル位置図

図-2 交通量調査結果

ハーバー・ブリッジの通行車両調査結果を図-2に示すが、ハーバー・ブリッジの北側最大のアプローチがF-1高速道路であるので、これとトンネルを結ぶことを前提として、ハーバー・ブリッジの東および西側のルートについて検討した。

写真-1 ハーバー・ブリッジ橋塔（北側）

その結果、ハーバー・ブリッジの東側で港を横断し、東または南部郊外へのバイパスとすべく、カーヒル高速道路と結ぶルートを選定したが、このルートでは、以下のように前記条件をすべて満足させることができた。

- ① ハーバー・ブリッジの交通量を約7万台/日減少できる。
- ② 港の北側でハーバー・ブリッジとその取付け道路下に、南側では王立植物園とオペラハウスの敷地下に建設するので、私有地の下を通過しない。
- ③ 換気所を地下に納め、内部を改造したハーバー・ブリッジの橋塔下と排気ダクト用トンネルで結び、橋塔内に設置する排風機で、海面上約90mの上端よりトンネルからの排気ガスを放出する。これは、港の景観保全と大気汚染防止に役立つ。

このトンネル・ルートの選定と橋塔（写真-1）を排気塔として使用する構想がなければ、この事業は実現しなかったと言っても過言ではない。

3. 環境保全対策

シドニー港のトンネルが横断する辺りは、ハーバー・

ブリッジとオペラハウスが紺碧の海に映え、美しい景観を形成しており、その北側地域は高級住宅街、そして港の南岸はフェリーや観光船の発着桟橋となっている。そのため、本工事の設計・施工では環境保全を優先し、関係諸官庁と協議しながらその対策に積極的に取り組んでいた。

企業化可能性調査段階では、事業の環境に及ぼす影響の内容および程度と環境破壊の防止策を各項目ごとに専門のコンサルタントに依頼し、調査・検討を行って環境影響評価準備書（EIS：Environment Impact Statement）としてまとめた。このEISに盛り込んだ項目は、景観、文化遺産、生物生態系、大気汚染、水質汚濁、騒音・振動など多岐にわたった。

本事業の所轄官庁である州道路局は、このEISを公共施設9か所に2か月間縦覧し、その間に、道路局には諸官庁、市民から463件の意見書が寄せられた。この意見書と環境保全局との協議を基に、道路局はEISに加筆・修正して環境影響評価書（アセスメント・EIA）を作成した。

EIAに則り実行したおもな環境保全対策を表-1に示す。

パイプ・ルーフィングにより、かぶりの小さいトンネル上の樹齢100年を超すイチジクの大木（写真-2）を保存したのも環境保全対策の一環であり、こうしたことに

表-1 トンネル概要

設計交通量	2 000台/時/レーン
車線数	往復分離 4車線
道路幅員	7.0 m × 2
設計速度	80 km/時
建築限界	4.6 m
換気方式	局所排気付き半横流方式
トンネル延長	2 280 m（うち沈埋部 960 m）

Australia's First Undersea Road Tunnel —The Sydney Harbour Tunnel—

By Naotake Saito

Concrete Journal, Vol. 30, No. 12, pp. 13~20, Dec. 1992

Synopsis The Sydney Harbour Tunnel, the first undersea road tunnel in Australia, has been constructed by a joint venture involving Kumagai Gumi and an Australian construction firm and opened on 31st of August 1992. As the Project has been undertaken in a particularly environmentally sensitive location, a wide range of special measures was taken to minimise environmental impact. In addition, new techniques have been employed for the immersed tube tunnel construction, such as a long ocean towing of tunnel units, a flexible final joint, etc. This report addresses the outline of the Project including the unique techniques employed.

Keywords : environment impact assessment, industrial agreement, immersed tube tunnel, ocean towing, pumped sand foundation, flexible joint

写真-2 イチジクの木

より、大きな環境問題は生じなかった。また、土捨て場海底調査では、人工礁の出現で以前より魚影が濃くなっている状況が、撮影したビデオで確認できたが、これも環境保全対策の成果であろう。

4. 労働問題対策

当地の建設工事の特徴の一つとして、労働組合が強く、ストライキにより工事が滞ることが多いことが挙げられる。

本工事でも、この労働問題の発生を最小限にとどめることが工程どおりに工事を進める大前提と認識し、州政府との事業契約締結直後から、本工事に関与する15の職種別組合(Trades Union)と8か月間の交渉の末、労務契約(Industrial Agreement)を結んだ。

この労務契約には、労働争議の解決法、雇用者と雇主の義務、組合員の賃金など細かい労働条件まで含めた。

また、労働問題は工事安全とも深くかかわっているため、本工事所と各協力会社よりなる安全委員会は、州労働安全局の意見を参考にし、重大災害の撲滅を図った。

実工事は4年半に及んだが、この間に全体工程に影響するようなストライキは皆無で、重大災害・事故も発生していない。これは、事業体とユニオンが労務契約を順守して工事を進めたことと、双方の強い信頼関係によるものである。

5. トンネルの施工

本トンネルは、4車線道路用で総延長2.28 kmのうち港を横断する960 mを沈埋工法で、その両側のアプローチは、開削工法とロードヘッダーおよび発破掘削による山岳トンネル工法(写真-3, 4)で施工した。

トンネル概要を表-2に、縦断図を図-3に示す。

5.1 沈埋函製作

沈埋函を製作するドライドックは、シドニー港およびその付近に適切な用地がなかったため、シドニー南方約70 kmのケンペラ港内埋立て地に建設した。

沈埋函の寸法は、幅26.1 m、高さ7.43 m(保護コンクリートを含まず)、長さ120 mの鉄筋コンクリート製で、標準函の重量は2万2950 tであった。全8函の沈埋函は、4函ずつ2回に分けて製作した(写真-5)。

写真-3 北側陸上トンネル貫通

写真-4 陸上トンネル内状況

写真-5 沈埋函製作状況

表-2 実施環境保全対策の概要

環境因子	環境影響要素	環境保全対策
景 観	施設の存在	・換気建物を地下式にし、地上に出さない
大 気 汚 染	トンネル換気	・排気ガスを海上 90 m のハーバー橋塔より放出 ・トンネル内一酸化炭素濃度を 100 ppm 以下に維持（運営時） ・トンネル掘削に伴う仮設換気はエアー・クリーナーで処理し大気中へ放出
文 化 遺 産	掘 削 / 浚 渫	・出現した文化遺産は、州政府文化遺産保存課の指示で処理 ・トンネルの南坑口の近くの樹齢 100 年の大木を保存
騒 音 ・ 振 動	掘 削	・換気建物現場に近接した学校に防音二重窓を設置 ・騒音の大きい掘削作業で移動式騒音防止壁を設置 ・北シドニー側のトンネル残土は、土運船で海上投棄 ・トンネル坑口に発破音規制用シャッターを設置 ・住宅地に接近する場所でのトンネル掘削にロードヘッダー工法を採用 ・トンネル掘削作業時間をその切羽位置により限定
	浚 渫	・平日の作業時間を 6～18 時に限定
生物の生態系	浚渫・埋戻し	・湾内で海草と藻の状況調査を 25 か所で毎月実施 ・土捨て場の海底生物、海草状況調査を 6 か月ごとに実施
水 質 汚 濁	工事現場の排水	・現場で発生する汚濁水は、浮遊物質濃度を 50 mg/l 以下にし海へ放出 ・海へ放出する水の油類の混入は 10 mg/l 以下
	浚渫・埋戻し	・ドラグサクション浚渫船と土運船からの余水のオーバーフロー禁止 ・グラブ浚渫船による浚渫と埋戻し作業で汚濁拡散防止膜使用 ・湾内で水質調査を 28 か所で毎月実施

図-3 トンネル縦断面図

沈埋トンネル基本設計条件を表-3 に、沈埋函横断面を図-4 に示す。

函体製作に使用した主要材料は、コンクリート 6 万 8 220 m³、鉄筋 1 万 960 t、防水シート 2 万 5 380 m²、吹付け防水 3 万 8 070 m²、ゴムガasket (65 m) 8 本などであった。

(1) コンクリート工

本トンネルの設計耐用期間を 100 年に設定していること、および沈埋トンネルはいったん劣化するとその修復は不可能に近いことから、函体の耐久性を最重視してコンクリートの使用材料、配合、施工法を決定した。

高炉スラグを結合材としたコンクリートは、フライアッシュの場合よりセメント量を減少できるため水和熱が小さく、かつ硫酸塩などの化学物質に対する抵抗力も大きいので採用した。高炉スラグ置換率は、結合材量 380 kg/m³ に対し、設計基準強度 400 kgf/cm² を満足

表-3 沈埋トンネル基本設計条件

沈埋函形式	矩形断面ドライドック方式
主航路条件	幅 360 m、水深 15 m
最小埋戻し厚	2.0 m
設計耐用期間	100 年
浮上り安全率	SF>1.20 埋戻し重量を含む SF>1.04 埋戻し重量を含まず
コンクリート強度	400 kgf/cm ²
許容クラック幅	<0.2 mm (構造) <0.3 mm (構造+温度)

する範囲内で最大であった 60 % とした (表-4)。

バッチャープラント (100 m³/h) は、ドライドック敷地内に設置し、練り上がったコンクリートはポンプにて打設場所まで最長 450 m 圧送した。そのため、スランプ 40 mm に練り上げられたものに流動化剤を添加し 150 mm とした。

函体製作は、軸方向の 1 ブロックを 15 m に分割し、

表-4 函体コンクリートの配合

設計強度 基準度 δ_{28} (kgf/cm ²)	最大寸法の 粗骨材 (mm)	スラン プ (cm)	空気 量 (%)	水結合材比	置換率	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
				$\frac{W}{(C+Sg)}$ (%)	$\frac{W}{(C+Sg)}$ (%)		水 W	結合材		細骨材 S	粗骨材 G		減水剤 (l)
								セメント C	高炉スラグ 微粉末 Sg				
400	20	4 ± 1	4	38	60	70.8	144.4	152	228	750	660	400	1.5

图-4 沈埋函横断面图

写真-6 沈埋函製作用型わく

かつ断面では下床版、側壁、上床版の3段階に分けて施工した(写真-6)。型わくは鋼製わくに合板を取り付けたもので、下床版と側壁には大パネル式を、上床版にはトラベラー・フォームを採用した。また、外壁部には合板にテキスタイルを貼った透水型わくを使用し、函体表面付近の密実性増加効果と織り目による防水膜の付着力増大効果による函体の耐久性の強化を図った。

コンクリートの品質管理は、函体製作で通常行われているスランプ、空気量、圧縮強度、比重などのほかに、乾燥収縮率についても実施した。乾燥収縮率は、材令54日での長さ変化率で 650×10^{-6} 以下を目標とした。

(2) 防水工

函底には厚さ 15 mm のリブ付き PVC 防水シート(写真-7)を設置し、外壁と上面にはエポキシタールとポリウレタンの混合物を厚さ 2 mm に吹き付けて防水膜とした。

写真-7 防水シートと透水型わく

PVCシートと吹付け防水工法を採用したおもな理由は、防水鋼板とした場合、鋼板と構造用鉄筋との絶縁がむずかしいこと、および外壁については、大きなひびわれがあればエポキシ注入などで対処できること、などであった。

吹付け防水工法は、コンクリート面に密着し、かつ継ぎ目のない良質な防水膜を形成できるが、防水鋼板に比べ強度が劣る。そのため、この工法を地震の多い所で使用する場合は、厚みを増したり、保護材を施す必要があらうと思われる。

5.2 海上工事

(1) トレンチ浚渫

沈埋物を沈設する場所のトレンチ浚渫は、岩盤を除いて上層の荒掘りと1.5 m 厚の仕上げ掘りの2段階に分けて行った。浚渫船は土質および深さによって、ポンプ式、ドラグサクソン、グラブ浚渫船(写真-8)を使い分けた。ポンプ式浚渫船は特殊カッターを取り付け、砂岩層(最大強度450 kgf/cm²)の切削のみに使用した。

この浚渫作業は、各種環境保全対策を構じながらの施工であったので予定工程内に完了できるよう、通常よりも大能力の浚渫船団を使用した。

(2) 沈埋函の外洋曳航

沈埋函のケンベラ港からシドニー港内係留地までの曳航距離は約 100 km で、そのうち 90 km は外洋であった。

今までは、矩形断面ドライドック方式のような乾舷の

写真-8 グラブ浚渫船と海水汚濁防止膜吊りわく

写真-9 沈埋函の外洋曳航状況

小さい沈埋函の外洋曳航は、波浪に対して函体の安定性、制御性に問題があるとされ、ドライドック用地が沈設場所付近で得られない場合は、鋼殻（シェル）方式を採用している。

この小乾舷沈埋函の外洋曳航の可能性と問題点を調査するため、水理模型実験を（株）熊谷組技術研究所とオランダで実施した。こうした実験結果や函体に作用する曲げモーメントの検討より、波浪が有義波高で3.5 m以内であれば、外洋曳航は十分に可能であることを確認した。

実際の外洋曳航では、気・海象条件を北東風7.5 m/秒、南東風5.0 m/秒、波およびうねり2.0 m（有義波）と設定し、この条件を満たすような予報が得られた場合に、作業を開始した。この外洋曳航は、3 600 BHP曳船を2隻使用して行い、当初の計画どおり24時間以内に完了できた（写真-9）。曳航ルートを図-5に示す。

（3）沈埋函の沈設

沈設方法は、操函が確実で、かつ経済的なポンツーンとアライメント・タワーによるものを採用した（写真-10）。吊降し水荷重は、港の潮流速および海水比重の変動が小さかったので、約300 tとし50 cm/分の速度で沈降させた。

この沈設作業に要した時間は、吊降し水荷重打設開始から継手の水圧圧接が完了し、函体安定のための追加水

図-5 曳航ルートおよびドライドック位置図

写真-10 沈埋函の沈設状況

荷重が打設完了するまでで、8～10時間であった。

沈設精度は、計画どおりトンネル・センターより50 mm以内に収めることができた。使用した沈設用諸設備を表-5に示す。

（4）基礎工

沈埋トンネルの最南端の8号函は、下方地盤が砂岩で、かつ陸上トンネルとの継手は剛結合としたため、モルタル注入基礎とし、ほかの7函には、砂吹込み基礎を採用した。これらの基礎をトンネル内から施工する方法では、沈埋函の下床版を多数のパイプが貫通するようになるが、これはトンネルの耐久性を考えた場合、好ましくないし、また工事中は函内への漏水の危険性もある。これら为了避免するため、パイプはすべて函体の中壁に配置し、基礎の施工はすべて海上から行った。

砂基礎の設計厚は80 cmで、1函当たりの設計量は2 500 m³であったが、260 kWのサンドポンプにより平均5日間で施工できた（写真-11）。

表-5 沈埋函沈設用設備一覧表

設 備	数 量	示 様
ボソツーン	2	4.5 m (W)×18.75 m (L)×3.0 m (H), 20 tダブルドラム・ウィンチ, 自重 120 t
主アライメント・タワー	1	コントロール・ルーム/アクセス・シャフト付き, 3 係留ウィンチ, 高さ 29 m
副アライメント・タワー	1	3 係留ウィンチ, 高さ 26 m
引寄せジャッキ	2	ロッド径 55 mm, 100 t×750 mm ストローク
鉛直ジャッキ	2	300 t (150 t×2)
TV モニター装置	1	TV スクリーン, カメラ 2
水バラスト・タンク	16	3 m (W)×90 m (L)×4 m (H), 1.8 kW 高揚程ポンプ (φ 150 mm)
係留アンカー	4	100 t コンクリート・シンカー

写真-11 砂吹込み状況

(5) 継手工

沈埋函の沈設は、南端の8号函を陸上トンネルと早期に接続させるため、1および2号函ののちに実施したほかは、北側から番号順に進めていった。そのため、最後に沈設した7号函と8号函の間は、継手の施工法が異なるため、最終継手と呼び、ほかの中間継手と区別している。

本沈埋トンネルでは8号函と陸上トンネル以外の継手は、温度変化や地盤沈下による断面力を低減させるため、すべて可撓性をもつ構造とした。この継手は、ゴムガスケットが一次止水と軸方向のパネ材として、また、中壁の鉛直せん断キーと下床部の水平せん断キーが函体相互のずれを防いでいる。

最終継手部は、ドライドック内で7号函の南端に、ゴムガスケットと鉛直せん断キーを取り付けた3.5 mのトンネルピースをPCケーブルで引き寄せ、さらに、ゴムガスケットに1 750 tの圧縮力を作用させた。この7号函の沈設により、ゴムガスケットに約1 200 tの圧縮力が追加され、最終継手は中間継手と同様な機能をもった。

トンネルピースと8号函の間隔2.5 mについては、止水パネルで囲んで排水し、鉄筋コンクリートで剛結した。最終継手構造概要を図-6に示す。

図-6 最終継手構造概要

写真-12 トンネルウォーク状況

写真-13 トンネル南側ポータル交通状況

この最終継手は、従来工法に比べ、水中作業は函体間の締切り作業のみで少なく、トンネル内作業も複雑でない、などの利点をもっている。

6. おわりに

シドニー・ハーバー・トンネル建設工事は、5年2か月の設計・建設期間を経て、当初の計画どおり、1992年8月31日に開通した(写真-12, 13)。

このうち、本工事業体は、トンネルの新技術を海外から移転し、かつ、それを当地の環境にあうよう改良し、工事を完成させたことなどが高く評価され、日本では土木学会に相当するオーストラリアの The Institution of Engineers より表彰されている。

このように、本建設が成功裏に完了できたのは、当地の高い土木技術環境に加え、NSW 州の道路局、港湾局、環境保全局や各労働組合の協力によるものであり、深く感謝している。

参 考 文 献

- 1) Saito, N. and Neilson, A.M.: Sydney Harbour Tunnel—influence of local conditions on the route and on the marine and land tunnels—, Immersed tunnel techniques, Proc. of the Conf. by Institution of Civil Engineers, pp. 97~109, 1989
- 2) 斎藤尚武・山崎 晶: シドニー・ハーバー・トンネルの沈埋函の外洋曳航, 土木学会論文集VI, No. 435, pp. 145~154, 1991.9

《お 知 ら せ》

「舗装の施工技術」に関する懸賞論文募集(第8回)

主催: (社) 日本道路建設業協会

後援: 建設省/協賛: (社) 日本道路協会

趣 旨: 道路舗装は、その上に直接自動車を走らせ、道路構造物の中で最も過酷な条件に耐えなければならないだけに、高度の施工技術を必要とします。舗装施工技術の向上を目指し、その振興をはかるために、舗装の施工技術についての論文を広く募集します。

テ ー マ: 舗装の施工技術に関するもの

——路床路盤, アスファルト舗装, セメントコンクリート舗装, 舗装材料, 舗装の維持修繕, 特殊舗装, 品質管理, 施工機械, 舗装工事報告, その他

応募条件: ①未発表の論文に限る。

②400字詰原稿用紙30~40枚程度(図版、写真等を含む)

③提出の際に400字詰原稿用紙3枚に論文要旨をまとめて添付する。

④応募原稿は返却しない。

⑤入選論文の著作権は(社)日本道路建設業協会に帰属する。

応募資格: 官公庁、公団公社、道路建設会社等の職員

賞 金: 1等50万円(1編)/2等30万円(1編)/3等10万円(3編)/佳作5万円(10編)

審査委員: 多田宏行(道路保全技術センター)ほか

締 切: 1993年1月末日必着

発 表: 『道路建設』'93年6月号で発表するとともに、直接、応募者に連絡する。

送 り 先: 〒100 東京都千代田区丸の内3-3-1/(社)日本道路建設業協会/☎(03) 3211-8876