香港地下鉄海底トンネル工事

石川 浩*1・吉田 宏*2・岡崎俊吾*3・富岡寿男*4

概要 香港地下鉄海底トンネルは、香港島と九竜を結ぶ長さ 1400 m の沈埋トンネルで、日本の建設会社による外国での最初の沈埋トンネル工事として施工された。本工事の特色は、① 14 本のポストテンション式プレストレストコンクリート造沈埋函（幅 13.1 m、高さ 6.5 m、長さ 100 m、排水量 7800 t）による、② 半径 2800 m の曲線眼鏡型トンネルで、③ 両端の沈埋函に換気塔ケーソンを水中水平接合していること、などである。

キーワード：海底トンネル、沈埋函、プレストレストコンクリート、スライディングフォーム、ドライドック、コンクリートケーソン

1. ま え が き

東洋の真珠といわれる香港は、英国の統治下にある自由貿易港で、中国の玄関でもあるので、経済活動が活発で人口の集中も激しい。面積は東京 23 区くらいあるが、そのほとんどが岩山で海に面したわずかの平地と丘陵地に 500 万人も住んでいるため、交通渋滞の解決が香港政府の重要課題とされている。交通渋滞緩和の一策である地下鉄第一期工事は、香港島の商業・金融地区と、九竜の住宅・工業地区を結ぶ 15.6 km（図-1）で、国際入札により日本、イギリス、西ドイツ、フランス、スウェーデン、アメリカ、香港の 7 か国の建設業者が選定され

た。

1975 年 11 月に着工し 1980 年 2 月全線開通した地下鉄建設のハイライトは、香港島と九竜間のビクトリア港を横断する 1400 m の沈埋トンネル工事にあった。沈埋トンネルは我が国でも衣浦港、東京港、京葉線羽田、東京港第二、扇島連絡、川崎港の各海底トンネルなどかなりの実績があるが、香港地下鉄海底トンネル工事は、日本の沈埋トンネル技術を外国へ技術輸出する最初の工事であった。

なお、本工事の記録写真は、本誌 1979 年 4 月号の写真ニュースにも掲載されている。

2. 工 事

沈埋トンネルは全長 1400 m で、長さ 100 m のポストテンション式プレキャストコンクリート造沈埋函（かん）14 本を海底で接続するものである。各函はトンネル全線が半径 2800 m の曲線なので、同じ曲率をもっている。トンネル両端の函底部のレベルはそれぞれ海水面下 19.58 m、21.63 m、ビクトリア港の最深地点は 24.24 m である。縦断曲線は、各函の布設にわずかな傾斜をつけることによって解決した。沈埋函 14 本のうち 12 本は同一形状であるが、両端の函 2 本には換気塔ケーソンを水中水平接合するため函頂部に穴を設けている。工事概要を表-1、海底トンネルの平面・断面を図-2、トンネルの標準断面を図-3 に示す。

図-1 施工位置図

*1 (株) 熊谷組 海外工務部本部長付

*2 (株) 熊谷組 香港支店 103 工区長

*3 (株) 熊谷組 土木工務部課長

*4 正会員 (株) 熊谷組 技術研究所

表一 香港地下鉄海底トンネルの工事概要

概 要	香港島と九竜を結ぶ地下鉄海底トンネル 延長 1 400 m
鉄 道	複線眼鏡型, 曲率半径 2 800 m
沈 埋 函	構 造 PC造 (ドライドックで製作) 断 面 幅 13.1 m×高さ 6.5 m×長さ 100 m, 14 函 コンクリート 40 960 m ³ , 30 N/mm ² , W/C 0.5 鉄 筋 3 740 t P C 鋼 材 ストランド径 12.5 mm, 26 km 基 礎 工 砕石スクリード式 沈 設 カタマラン型 4 脚固定式作業台船, 半潜水 結 合 オメガ形シールによる止水と剛結
換 気 塔	1 号函, 14 号函上部に換気塔ケーソンを沈 設後圧接, 高さ 41 m
工 期	1976.3~1979.12, 192 週
発 注 者	香港地下鉄公司
コンサルタント	Per Hall, Freeman Fox & Partners
施 工 者	熊谷組

図一3 トンネル標準断面

3. ドライドック

沈埋函の製作はドライドック方式を採用した。香港は岩山が多く遊休地がないので、ドライドックの敷地は函沈設地点から 10 km も離れた埋立地となった。総計 14

図一2 海底トンネルの平面・断面

UNDERSEA SUBWAY TUNNEL FOR HONG KONG MASS TRANSIT RAILWAY SYSTEM

By Hiroshi Ishikawa, Hiroshi Yoshida, Shungo Okazaki and Toshio Tomioka

Concrete Journal, Vol. 18, No. 6, June 1980, pp. 26~32

Synopsis 1 400 m undersea railway tunnel to connect Hong Kong Island and Kowloon, laying immersed tubes across the seabed of Victoria Harbor has been constructed by Kumagai Gumi in Japan.

The undersea railway tunnel consists of fourteen 100 m long, precast element being a twin bore reinforced and longitudinally prestressed concrete unit. Characteristic of the tunnel is as follows : 1) Two 5.34 m internal diameter railway tunnels, giving overall external dimensions of 6.5 m high and 13.1 m wide. 2) Each precast tunnel element turns in a curve with a radius of 2 800 m. 3) The two ventilation buildings constructed as buoyant precast concrete caissons sunk into position on top of the two special end units previously placed in the pre-dredged trench.

Keywords : undersea railway tunnel, immersed tube, prestressed concrete, sliding form, dry dock, concrete caisson

写真-1 注水前のドライドック

の沈埋函は敷地が狭く、1回に4つの函しか製作できないため、4回に分けて製作することになった。軟弱な埋立地でのドライドック造成は、シートパイル打ち 3800枚、掘削土量 350 000 m³ で 11 箇月を要した。函製作後のドック内注水・水門撤去・函引き出し・水門設置・ドック内排水の1サイクルあたりの所要日数は、3週間であった。ドライドックの設計・施工では、特に次の点を考慮した(図-4、写真-1)。

① ドック周囲堤傾斜面には、ファゴットシート(透水性シート)張りの上に砕石を 10 cm 厚で敷き、ドック内排水時にはウェルポイントをかけて堤の崩壊を防止した。

② 水門は、コンクリート製ケーソン(幅 18 m、長さ 35 m、高さ 10 m、自重 3400 t)と Z 形鋼矢板の組

合せとした。水門の設置は、フローティングドック上で製作したケーソンを水門位置へ曳(えい)航し、水バラストで沈設したのちケーソンのすぐ海側を鋼矢板で締切の方法である。水門の撤去は、ドック内水面が海水面と同水位となるまでドック内へポンプで注水し、鋼矢板を引き抜いたのち水バラストを排水してケーソンを浮上させ、海へ曳航する方法である。

③ ドック内地盤は砕石を 2 m 厚で敷きならし転圧したが、地盤が軟弱で圧密沈下が大きく函製作工程に影響を及ぼした。ドックには作業台 4 台とスライディングフォーム 4 台を設置し、函 4 本を作業台上で同時製作できるようにした。

4. 沈埋函の製作

4.1 セメント

セメントは低熱耐硫酸塩セメントと規定されているため、改良型宇部耐硫酸塩セメントを用いた。これは ASTM の V 型(耐硫酸塩性)に相当するが、コンサルタントの承認を得るまで大量の試験練りを繰返した。セメントは防湿袋詰めし日本から海上輸送した。

4.2 配合

香港で入手できる骨材は花崗岩の碎石、砕砂で粒形が悪いため、仕様規定内ではコンクリートポンプ輸送できる配合を得ることができなかった。緩和された仕様規定による配合を表-2、コンクリートの強度、単位体積重量を表-3 に示す。試験結果は若干の規定外があるが、コンサルタントの承認を得ることができた。

表-2 コンクリートの配合

	スランプ (cm)	W/C	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	ダーレックス (cc/kg)
夏	8~12	0.5	200	400	679	1 018	2 680
冬	8~12	0.5	195	390	687	1 031	2 457

表-3 コンクリートの強度・単位体積重量

	仕 様	第1回	第2回	第3回	第4回
強 度 (N/mm ²)	30 以上	47.5	47.0	47.2	46.8
密 度 (kg/m ³)	2 290~2 370	2 380	2 364	2 377	2 378

4.3 練りませ

ミキサーは ELBA (15 m³/h) 2 台と ROSS (46 m³/h) を用いた。コンクリート工事で最も大きな問題となったのは、打設時のコンクリート温度を仕様規定により 24℃ 以下にすることであった。香港の夏期の月平均気温は 28℃ 前後で日較差は 4~5℃ であるため、骨材を直射日光から保護し、水を冷却機で冷却し、更に氷を加えて 3~4℃ としてほぼ規定温度を保たしめた。

4.4 型わく

外部型わくは、沈埋函の製品精度規定値 (±3 mm 以内) に抑えるため、スクリージャッキを介して剛性の大きい門形フレームに固定した。門形フレームは、トンネル壁を通してフォームタイを取付けることが禁止されているので、写真-2、3 のように巨大なものとなった。このフレームは作業台の両側に敷設したレール上を走行する。

内部型わくは 2 連の内径 5.34 m の管で、管の中心軸を貫通した管軸箱げたで支えられている。管軸箱げたの先端はレール上を走る台車の上に乘った管軸に直角な箱げたで支え、その後端は完成した沈埋函底部の上を走るゴム車輪を付けた台車に支えられている。

写真-2 鉄筋組立（後方はスライディングフォームと門形フレーム）

写真-3 スライディングフォーム

4.5 コンクリート打設

コンクリートは、ミキサーから作業台まで 4 m³ のトラックミキサーで運び、ブーム付きコンクリートポンプ車 (50 m³/h) で打設した。スライディングフォームの長さと同曲線のため、沈埋函は長さ 9 m の 11 区画に分割し、各区画は更に函底部 90 m³ と函アーチ部 180 m³ に分けた。ドライドックの地盤が軟弱で函重量による変位が規定の ±3 mm 以内に維持する必要から、函底部を函アーチ部より少なくとも 3 区画先行して打設し、その盤剛性を利用して変形を防止した。

内部型わくは 24 時間後に脱型して次の区画に移動し、配筋とプレストレスケーブル用シースを取付けたのち外部型わくを前進させる。養生はスプリンクラーで 4 日間散水養生した。

4.6 防 水

沈埋函底部の防水鋼板は、現場で切断、曲げ、溶接、スタッド溶着後、サンドブラストして防食塗装した。函アーチ部はアスファルト防水で施工した。

函内への海水浸入を防ぐための鋼製仮隔壁は、ドック内注水前に各函両端と換気塔ケーソンの取付く両端の函 2 本の頂部穴に設置した (写真-4)。

写真-4 換気塔の付く沈埋函（左は一般沈埋函、後方はスライディングフォームと門形フレーム）

4.7 プレストレス

各沈埋函にはその函軸方向に図-3 のように函底部 6 本、函アーチ部 12 本のケーブルで、総圧 7 860 t のポテンションを導入した。プレストレスをかけることにより長さ 100 m の函は平均 17 mm 縮まったが、ひびわれなどの異常はまったく生じなかった。ケーブル穴のグラウトには、水セメント比 50% のセメントミルクを用いた。

沈埋函の製作では最初の第 1 回は 25 週間を要したが、最終の第 4 回は 14 週間に短縮できた。これは労務者の熟練、一部施工機械の増強とともに日本の技術者と現地

の労務者が信頼で結ばれてはじめてできることである。

5. 海上工事

沈埋函沈設地点では、しゅんせつ、砕石敷き、沈埋函沈設、函接合、埋めもどし、函内仕上げなどの海上工事を行った。

5.1 海象・気象

海上工事では海象・気象によって工事の成否が大きく左右されるので、工事受注後ただちに海象・気象の調査を開始した。沈埋函の曳航・沈設には、海水比重・潮位・潮流が大きな影響を及ぼす。函沈設地点の調査結果を表—4 に示す。沈埋函を沈設した 1978 年には、台風警報が 8 回あり、そのうち 3 回が工事に大きな影響を及ぼした。10 月 27 日の台風襲来では函沈設作業直前であったため、沈埋函を海底に仮置きし作業台船を避難させた。海象・気象の予報には常時多大の関心をよせ、過去の記録などをよく調査したが、台風の発生から到達までの時間が日本より非常に早く、慎重な判断と勇気をもって決断をくだす必要があった。

表—4 海水の潮流・比重

潮 流		比 重	
水 面	-5~-15 m	20°C	27°C
1.8 ノット	1.2 ノット	1.023~1.024	1.016~1.020

5.2 作業台船

沈埋函基礎の砕石敷きと函布設のため、作業台船を新造し日本から曳航した。作業台船は図—5、写真—5、6 のように双胴で、海底基盤（最大水深 25 m）へ固定して半潜水や海面への上昇が自在にできるようになっている。本工事では任意の傾斜に設定できるガーターレールにより、函の基礎工精度を著しく向上させることができ

図—5 作業台船

写真—5 作業台船

写真—6 曳航中の換気塔の付く沈埋函と作業台船

た。

5.3 しゅんせつ

沈埋函沈設部のしゅんせつは、水面下 19 m まではチェーンバケットドレッジャー、所要深さより 1 m 上部まではグラブドレッジャーで掘った。最後の深さ 1 m のしゅんせつはヘドロのたい積を防ぐため、函基礎砕石敷き直前に小型グラブバケットで掘った。しゅんせつ部には多量の転石があり、水中発破 (30 000 m³) も必要であった。総しゅんせつ土量は 530 000 m³ であった。

5.4 曳航・沈設

ドライドックで沈埋函 4 本が完成すると 1 本は直接函沈設地点へ曳航し、残り 3 本は係留場へ曳航した。曳航は函前方にタグボード 2 隻、後方にコントロール用ポート 2 隻、函の周囲に警戒船 5 隻を配置し、平均速度 2.5 ノットであった。

沈埋函は沈設地点に待機する作業台船中にそう入し、函に水を入れて沈設される。既設沈埋函から 50 cm 離れて着底させた函をまず 200 t ジャッキで引き寄せ、図—6 のゴムガasket を介して圧力接合させる。これによって隔壁間と外部とを締切り、隔壁間の海水を函内部に排水させて隔壁間内の水圧を低下させ、今回沈設した函

図-6 沈埋函相互の接合部

図-7 トンネル両端のピンジョイント位置

図-8 ピンジョイント

図-9 仮設PCストランド縦断

図-10 換気塔ケーソンの築造

先端に加わる水圧 1400 t で更にガスケットを加圧し、止水が完了する。トンネル両端の沈埋函は図-7 のように函沈設後埋立て陸となる。函上部に設置する換気塔荷重が大きいため、トンネル基礎の砕石敷き層へ函内からグラウトして地盤改良するとともに不等沈下・回転・収縮に対する配慮からピンジョイントを設けている。ピンジョイントは図-8 のようなはめ込み式で構造継手とはなっていない。函の曳航・沈設・埋めもどしまでは一体の函でなければならないため、函の換気塔接合部と一般の函を図-9 をのように仮設の PC ストランドで緊結し、埋めもどし後ストレスを解放させた。

5.5 換気塔の築造

換気塔ケーソンの築造方法を図-10 に示す。

- ① 排水量 2500 t の浮きドック上で、換気塔ケーソンを高さ 9 m までスリップフォームでコンクリートを打設する。ケーソン下部の開口には鋼製仮隔壁を設ける。
- ② ケーソンを浮上させる。
- ③ ケーソンを沈埋函沈設地点へ曳航する。
- ④ 浮上状態で更にコンクリートを打設する。
- ⑤ ケーソンを水バラストで沈下させて沈埋函に接合させる。
- ⑥ ケーソンにコンクリートバラストを入れ、ケーソン下部・函上部の鋼製仮隔壁を撤去する。そして、換気塔の所要高さまでコンクリート打設して完成する。

ケーソンを沈埋函に接合する方法は、各函を接合する水圧圧接でなくケーソン重量による圧接方法によった。

5.6 埋めもどし

トンネル一般部の埋めもどしは、図-2 (A断面) の

ようにトンネル基礎の厚さ 0.8m を碎石敷き、トンネル中心以下の厚さ 3.3m を良質土または土袋積み、トンネル中心以上を一般土砂で埋めもどした。

沈埋函沈設地点は海上交通の最も激しい所であるため、航路を 10 回変更したが事故もなく完了した。

6. 海外工事の特色

香港の職制は非常にはっきりしている。コンクリートの打込みを例にとれば、コンクリートの締固めは専門職であるコンクリート工によって行われ、一般労務者はコンクリートを運搬するだけで、パイプレーターをもってコンクリートを打設するようなことはしない。季節労務者という未熟練工がおらず、各専門職によって施工されるので施工精度は非常に高い。しかし、彼らが未経験な工事では積極的に取り組もうとせず、責任負担させずに指導する必要があった。しかし、作業内容を理解すると実によく作業する。外国での建設事業では、いち早くその国情に応じた作業体制を確立することが大切である。

また、海外工事では国内工事と異なって発注者、コンサルタント、施工者の 3 者が工事遂行において対等の立場にたち、仕様書・文書記録による履行を重視している。

7. む す び

香港地下鉄海底トンネル工事は、沈埋函の最終接合部での誤差が 3cm 以内の高精度で予定工期より 7 週間短

写真-7 一番電車によるテープカット

縮させて完成した。工事中はオランダ、デンマーク、アメリカなど、沈埋トンネル先進国をはじめ諸外国のトンネル技術者が工事現場へ来訪し、日本技術への評価を高めた。総額 3000 億円をかけた香港地下鉄は、今予想以上の乗客を運んでいる（写真-7）。地下鉄第二期工事（長さ 10.9 km）は、第一期工事で示した工期厳守、高い施工精度などの実績による日本の建設業者への信頼からほとんどの工区を我が国の建設業者が受注することになった。本工事において筆者らは、日本の建設技術を再確認するとともに今後我が国の建設技術輸出が積極的に進められるであろう明るい見通しをもつことができた。

最後に工事で積極的な協力を得た宇部興産、日本車輛製造、三菱重工業をはじめとする協力業者に感謝する。

《図書案内》

コンクリート品質の早期判定に関するシンポジウム 発表論文集

B5判 107頁 定価 1300円（会員特価 1000円）送料 200円

プレキャストコンクリート製品を別にする、コンクリートが他の工業製品と基本的に異なる点は、購入時まで未完成品であり、硬化後の品質が直接的に保証されていないことである。打設コンクリートの品質をできるだけ早く把握することの必要性は、施工速度の著しくスピード化された今日いよいよ高まりつつあるといえる。

本シンポジウムは、（1）フレッシュコンクリートの単位セメント量、単位水量、水セメント比の早期判定、（2）コンクリート強度の早期判定、（3）コンクリートの諸性状の迅速判定（ワーカビリティ他）、（4）早期判定による品質管理・検査、（5）早期判定の現場実施例、をテーマに研究発表（27編）と討論を行ったものである。

●申込先：（社）日本コンクリート工学協会

〒102 千代田区麴町 5-7 TBR ビル 708 号

電話 東京 (03) 263-1571