

シンガポール水道配管工事 ——大口径海底パイプラインの設計と施工*

川崎製鉄技報
20 (1988) 4, 299-307

Planning and Construction of Large Diameter Submarine Pipeline between Singapore and Malaysia



加藤 誠一
Seiichi Kato

エンジニアリング事業
部 パイプライン技術
部パイプライン技術室
主査(課長)



寺本 正
Tadashi Teramoto

エンジニアリング事業
部 パイプライン技術
部水道・環境技術室
主査(課長補)



菅原 敏明
Toshiaki Sugawara

エンジニアリング事業
部 パイプライン技術
部水道・環境技術室
主査(掛長)



前田 諭
Satoshi Maeda

エンジニアリング事業
部 パイプライン技術
部パイプライン技術室
主査(掛長)



米田 正彦
Masahiko Yoneta

川鉄工事(株) 技術本
部設計室 掛長

1 まえがき

川崎製鉄エンジニアリング事業部は、1986年3月から1年半で、世界最大の口径を有する海底水道配管をシンガポールの建設会社と共同で敷設した。本工事はシンガポールの上水の需要増に対処すべく、マレーシアから導水する計画の一部で、シンガポールとマレーシアの間の1.6 kmの海峡を横断する海底配管敷設工事である。

通常、上水道を対象とした海底配管は直径1 000 mm程度までであるが、今回の工事では直径が2 200 mmと従来規模をはるかに上まわるものである。このため、厚さ238 mmの鋼管外面コンクリート施工および品質管理、45 m長さで270 tという超重量長尺管の製作と移動方法、剛性の非常に高いパイプの曳航工法および施工時線形管理等につき技術的な解決を図る必要があった。実際の施工にあ

要旨

口径としては世界最大の海底水道配管2条を海底トレンチ内に敷設した。使用した管は口径2 200 mmの鋼管の外面に厚さ238 mmの鉄筋コンクリート被覆を施したものでその延長は1条当たり2.5 kmであった。

設計に際してはパイプに過度の応力が発生しないようパイプラインの線形、支点ローラーの耐力、配置を決定した。

施工に際しては、長く重いパイプの搬送設備、進水設備等の大型仮設備を工夫するとともに、曳航中はダイバーチェック、ワイヤー張力の測定およびコンピュータシミュレーションによりパイプラインの線形管理、水中重量調整を行った。

Synopsis:

The largest diameter twin submarine pipeline was constructed and laid for a length of 2.5 km. This 2 200-mm-diameter pipeline was clad throughout its length with reinforced concrete of 238 mm in thickness.

The surface tow method was adopted for the first straight section and the bottom pull method for the major straight section. These two sections were then connected into a bend at a dry pit.

As part of the design, the pipeline profile and the bearing strength and spacing of the rollers were determined to ensure that the pipeline was not over-stressed during installation. Also equipment of various types to handle and launch the long and heavy pipe were carefully considered and designed.

During pipe-laying the pipeline profile was checked and controlled by divers and computer simulation. The submerged weight was monitored by computer simulation and measurement of the tensile force of the pulling wire during each pulling operation.

たつては、コンクリートの試験打設の実施、長尺管の製作・移動設備の開発、コンピュータシミュレーションによる検討等を進めることで、施工難易度の高い本プロジェクトを無事に完成させることが出来た。

以下、この大口径海底配管敷設工事について設計・施工の要点について述べる。

2 工事概要

使用した管は口径2 200 mmの鋼管の外面に厚さ238 mmのコンクリートクラッド(コンクリート巻立て)を施したもので、延長2.5 km 2条を平行に敷設した。

工事分担は、現地建設会社が主に海底掘削、埋戻し等の土木工

* 昭和63年7月28日原稿受付

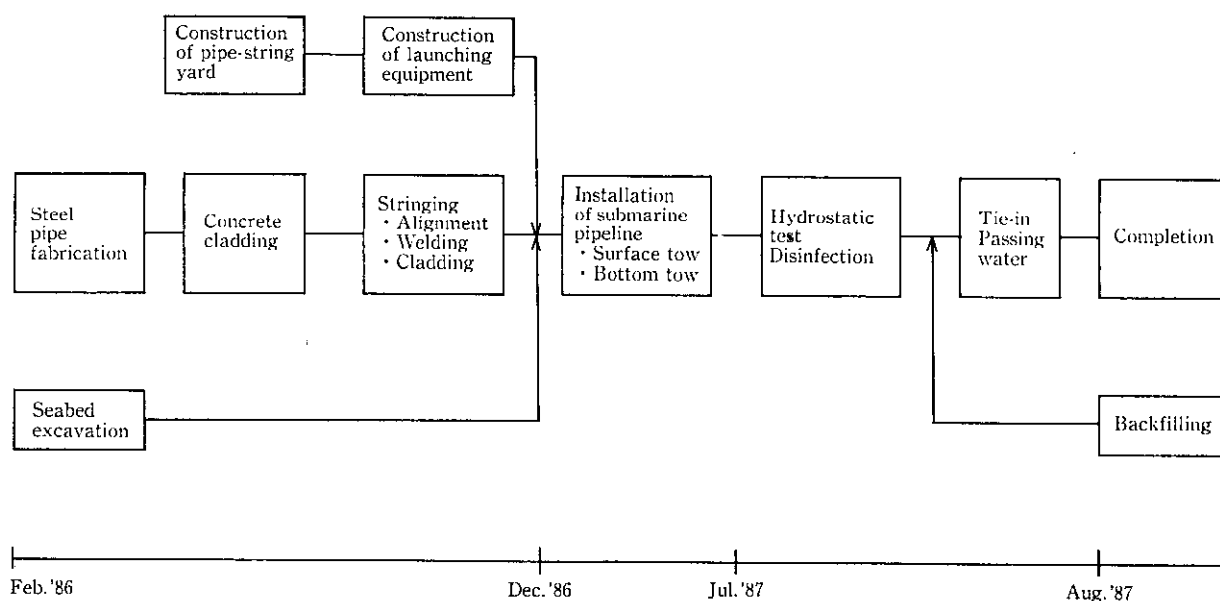


Fig. 1 Work flow and schedule

事、当社が仮設備を含めた敷設・配管工事を担当した。

2.1 施工順序

本工事の施工順序の概要は下記のとおりである。

- (1) 長さ7.5mの塗覆装鋼管を現場に搬入し、その中央部5.6mにコンクリートクラッドを施す。
- (2) (1)のコンクリートクラッド管6本を溶接接合、ジョイント部の防食及びコンクリートクラッドを行い45mの長尺管を製作する。
- (3) 45m長尺管2本をランチングウェイへ搬入し、ランチングウェイ内で接合し90mの長尺管を製作する。
- (4) 90m長尺管を海へ引き出し、その長尺管に(3)と同様に次の90m長尺管を接続する。
- (5) 上述の(3)と(4)の作業を繰り返し所定位置までパイプを曳航する。
- (6) 水圧テスト、管内消毒を行った後、既設管と接続する。

Fig. 1に工事の流れおよび工程の概要を示す。

2.2 工事数量

使用した鋼管は5500t、鉄筋1300t、コンクリート9600m³であった。その他主な項目の工事数量をTable 1に示す。

Table 1 Work quantity (permanent work)

Item	Description	Quantity
Steel pipe	API 5L-X52 2 200 ϕ $\times$ 19 t $\times$ 7 500 L	5 500 t
Concrete cladding		
High yield deformed bar	16 mm ϕ	1 300 t
Sulfate resistant cement	Grade 40	9 600 m ³
Joint protective coating	Heat shrinkable sheet	1 390 rolls
Seabed excavation	Marine clay, sand, rock	390 000 m ³
Backfilling	Sand	300 000 m ³

3 コンクリートクラッド

3.1 概要

施工時の重量調整、外力や衝撃力に対する防護および構造体の一部としてコンクリートクラッド(コンクリート被覆)を行った。

円形横置型枠を用いて管の外面にコンクリートを打設する場合のコンクリートの性状、バイブレーターの能力、数量、振動締固め時間およびコンクリートの仕上り状態を確認するために事前に試験打設を行った。

クラッドは、まず長さ7.5mの塗覆装鋼管の両端部それぞれ0.95mを残した管の中央部分5.6mに施工した。次に、コンクリートの養生完了後、コンクリートクラッド管を溶接ヤードへ移動し、鋼管の溶接接合、X線検査、水圧テストを実施したのち熱収縮シートによるジョイント部の防食措置をほどこし、ジョイント部にコンクリートクラッド(ジョイントクラッド)を打設した。

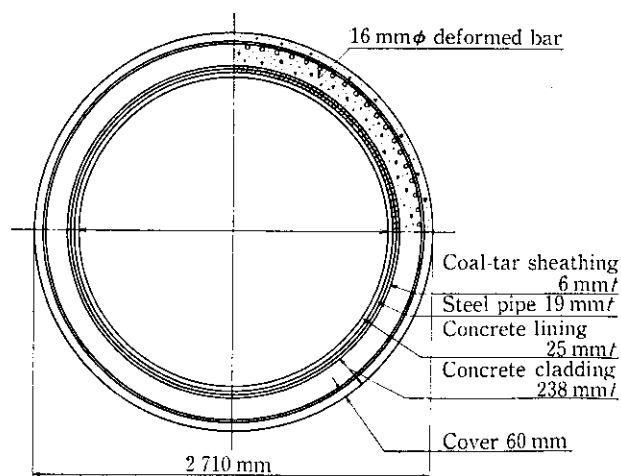


Fig. 2 Cross-section of concrete cladded pipe

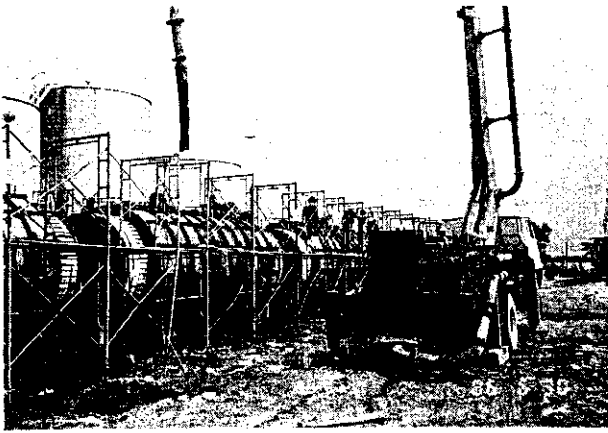


Photo 1 Concrete cladding

使用した材料、施工方法は本管クラッドおよびジョイントクラッドとも基本的には同じである。Fig. 2 にコンクリートクラッド管の断面を示す。

使用した鉄筋コンクリートの仕様は下記のとおりである。

セメント：耐硫酸塩セメント

水セメント比：0.4

粗骨材：20 mm

圧縮強度： $\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$ 以上

鉄筋：16 mm ϕ 異形鉄筋

現場で使用したパッチャープラントはドライミックスタイプで練混ぜはミキサー車でいった。

また、打設方法は円形横置鋼製型枠を用い、下半分は管中央部の打設口より、上半分は管頂部の打設口より型枠パイププレートおよび棒状パイププレートを併用してポンプ車にてコンクリートを打設した。Photo 1 にコンクリートの打設状況を示す。

3.2 試験打設

実際の工事に先立ち 2 200 mm ϕ ×2.4 mL の鋼管を 3 本用いて試験打設を行った。その結果を Table 2 に示す。

本試験に基づき、コンクリート配合は、下記の組成のものを採用することにした^{1,2)}。

対硫酸塩セメント：380 kg/m³

細骨材（砂）：800 kg/m³

Table 2 Result of trial casting

Item	Trial 1	Trial 2	Trial 3
Slump (mm)	180	220	155
Vibration time (min)	8	1	4
Pouring time (min)	25	15	60
Vibrator (kW×unit)	1.5×2	1.5×2	0.7×2
Surface finish	Bleed marks at top half	Air-holes at top half	Honeycomb
Concrete strength (kg/cm ²)			
1 day	197	127	170
3 day	512	328	369
7 day	575	468	484
Concrete density (kg/m ³)	2 412	2 379	2 439

粗骨材（20 mm）：1 050 kg/m³

水：152 l/m³

混和剤（減水剤）：3.8 l/m³（対セメント 1%）

スランプ：180 mm

また、打設方法および順序は次のように決定された。

- (1) 型枠中央部の打設口より管の下半分にコンクリートを打設する。コンクリートの流動をよくするため、打設口から棒状パイププレートを挿入し振動を与えると同時に、適宜下側の型枠パイププレートをかける。
- (2) 管中央部までの打設が完了したら 1～2 分下側の型枠パイププレートをかけ締める。
- (3) 中央部の打設口にふたをする。
- (4) 上部打設口より棒状パイププレート、上側型枠パイププレートを併用して管の上半分にコンクリートを打設する。
- (5) コンクリート打設完了後、1 分間上側パイププレートをかける。
- (6) ブリージング跡、気泡の減少等コンクリート表面の仕上りをよくするため、上記作業完了 1 時間後に 1 分間再度型枠パイププレートをかける。

3.3 コンクリートの品質管理

3.3.1 コンクリートの強度分布

減水剤として当初は Masterbuilder 社の TB1-M を使用したが、パイプ移動に必要な初期強度の発現を早くして工程を短縮するため、いくつかの減水剤についてテストし途中から Fosroc 社の Conplast 430 に変更した。

TB1-M を使用した場合はパイプ移動に必要な強度 120 kg/cm² を得るのに 16～20 時間を要したが、Conplast 430 の場合は 10～12 時間で得られた。

Fig. 3 に上記 2 種類の減水剤を用いた材齢 2、7 および 28 日の強

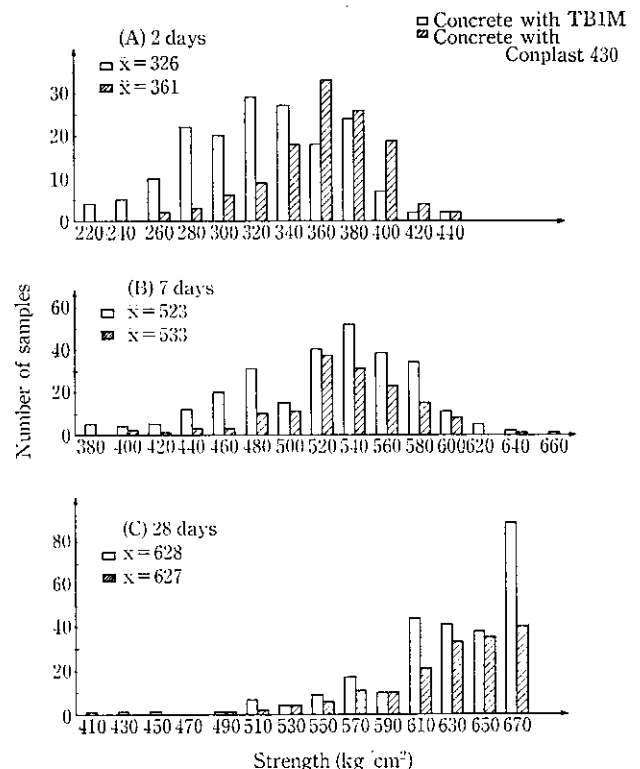


Fig. 3 Concrete cube strength with age using different admixture (TB1-M and Conplast 430)

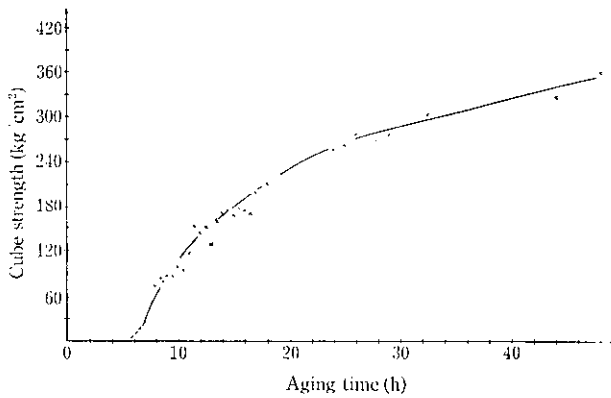


Fig. 4 Cube strength development with Conplast 430 by aging time

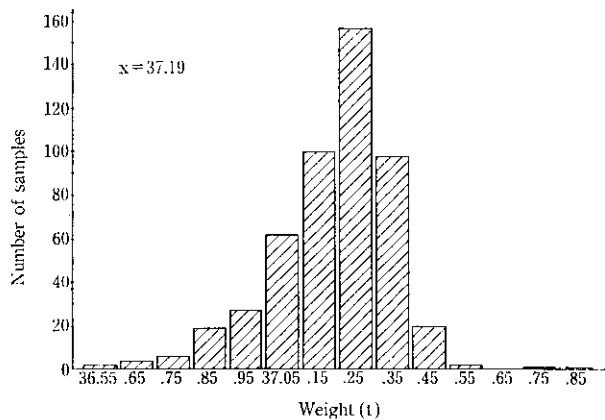


Fig. 5 Weight of individual concrete clad pipe

Table 3 Absorption test results

	Cube	Cylinder	
	Below surface 0.5 m deep	Below surface 0.5 m deep	At seabottom 15 m deep
Soaking time (d)	30	31	28 50
Fresh water (%)	0.90	0.12	— —
Seawater (%)	1.14	0.25	0.27 0.34

度分布を示す。また、Fig. 4にConplast 430を使用した場合の0～48時間の強度変化を示す。

3.3.2 コンクリートクラッド管の重量分布

Fig. 5にコンクリートクラッド管の重量分布を示す。

全体平均重量は37.19tであるが、最初にコンクリートを打設した50本の平均は37.07t、また最後の50本の平均は37.29tであった。

これは同じ鋼製型枠を60回以上繰り返し使用したため、型枠が変形しコンクリートの周長が大きくなったためと思われる。

3.3.3 コンクリートの吸水率

コンクリートクラッド管の水中重量に影響を与える因子の1つとしてコンクリートの吸水率を測定した。

供試体は1辺150mmのコンクリートの立方体と150mmφ×238mm高さのシリンダーの2種類を用いた。

立方体では6面全面から水が浸透する。そこでシリンダーサンプルでは、実際のコンクリートクラッド管により近い条件を得るため

高さを管のコンクリート厚と同じ238mmとし、またプラスチック製の型枠を付けたまま浸漬し、一面からのみ水が浸透するようにした。

その結果は、Table 3のとおりで、立方体の場合の海水吸水率はコンクリート重量に対し、1.14%であるが、シリンダーの場合は条件によって多少変動するが0.25～0.34%であった。

4 長尺管の製作、移動

4.1 概要

進水作業に先立ち、養生の終わったコンクリートクラッド管6本を溶接接合し、45mの長尺管を製作した。

また、この長尺管を進水設備まで移動するのに、(1)木製台上をころがす方法および(2)油圧ジャッキを備えた台車による方法の2つの方法を併用した。Photo 2に台車による長尺管移動の状況を示す。

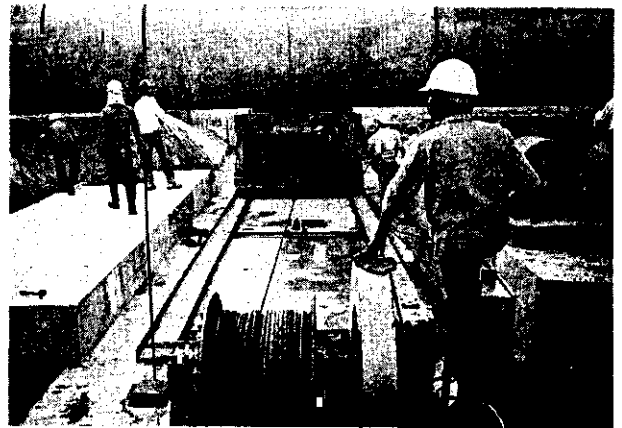


Photo 2 Pipe boggie

4.2 作業手順

(1) コンクリートクラッド管の溶接ピットへの移動

養生の完了したコンクリートクラッド管を100tクレーンで吊りながら引張型ロードセルで重量測定し、溶接ピットへ仮置する。

(2) 芯出し

3方向の調整ができる30t型芯出しジャッキ2台と独自に開発した芯出し用クランプを用い芯出しを行う。また3mm/3mの直線性を確保するためトランシットを併用した。

(3) 溶接

API 1104に基づく溶接施工法試験および溶接工技量試験を行い、試験に合格した溶接工により溶接した。溶接はまず内面より行い、その後外面より行った。溶接に要した時間は1ジョイント当たり溶接工2名で約8時間であった。

(4) 溶接部非破壊検査

現場溶接部は100% X線にて検査した。撮影方法はAPI 1104に基づき、内部線源法による一重壁単影法全周同時撮影を採用した。

(5) 水圧テスト

圧力27 kg/cm²で24時間保持し、自記圧力計にて記録し、圧力低下のないことを確認した。

(6) 外面防食

溶接継手部の外面防食は熱収縮シートを使用した。検査は全継手部についてピンホール検査（電圧 19 200 V）および外観検査を行い、また、適宜ピールテストを行い密着度をテストした。

(7) 内面モルタルライニング

無収縮モルタルを使用し、こて塗り 2 回で仕上げた。

(8) 継手部コンクリートクラッド

(9) 長尺管の移動

長尺管の製作・保管ヤードは敷地の都合上 A ヤード、B ヤードの 2 つに分割した。長尺管の移動は A ヤードにおいては管に巻き付けたワイヤーロープを 5 t ウインチで引張りころがす方法、B ヤードにおいては進水設備への搬入も兼ねて 60 t ジャッキ 4 台を塔載した台車 2 台により行った。

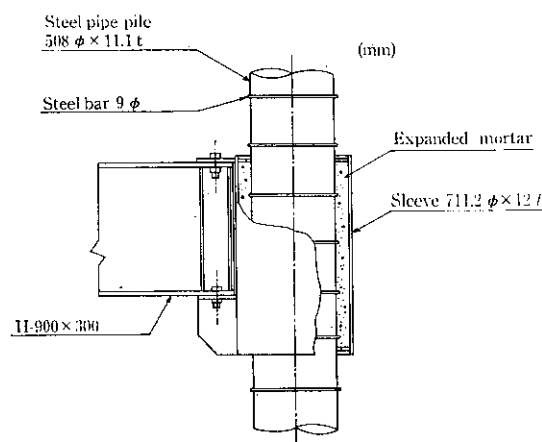


Fig. 7 Underwater junction method

5 進水設備

5.1 ランチングウェイ

現地土質を考慮し、前面壁部、底盤、機械基礎のみを鉄筋コンクリート製とし、他の壁部は親杭木製横矢板、法面モルタル吹付けとした。

Photo 3 にランチングウェイ全景を示す。

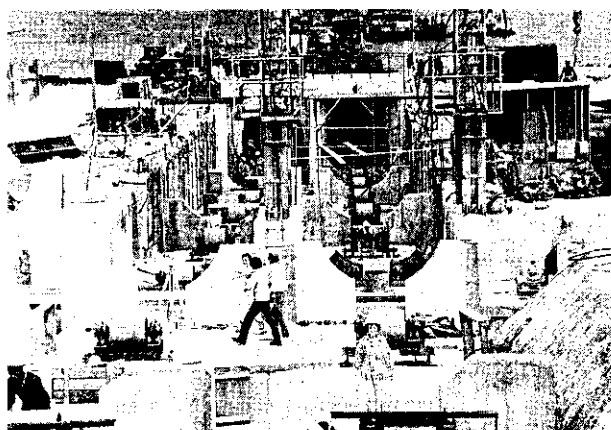


Photo 3 Launching way

5.2 ランプウェイ

Fig. 6 にランプウェイの概要を示す。

構造は鋼管杭及び H 形鋼による溶接鋼構造であるが、主桁と鋼管杭の接合は水中格点工法を採用した (Fig. 7)^{3), 4)}。

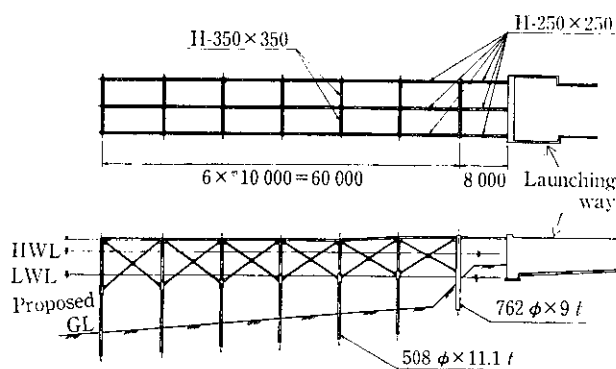


Fig. 6 Plan and side view of rampway

また、地盤の一部が岩であったため、この部分はプレボーリング鋼管杭建込、水中コンクリートによる巻込みとした。

6 曳航工事と設計

6.1 海底管敷設工法

海峡横断など数 km 程度の比較的短距離パイプラインの敷設工法としては (1) 浮遊曳航法、(2) 海底曳航法の 2 種が適当である。本工事では、曲り部 200 m 区間に浮遊曳航法を、2.2 km の直線部分には海底曳航法を採用した。浮遊曳航法とは、パイプが海面上に多少浮く程度にフローターを取付けタグボート等で所定位置まで曳航、沈設させる工法である。一方海底曳航法は、地上または台船上に大型ウインチを固定し、ワイヤーロープをパイプ先端と結んでウインチの巻取りによって管を海底面上ですべらせながら敷設するので、多くの事例がある。しかし、今回のような大口径管で実施された例はほとんどなく、曳航中の重量調整、線形管理およびウインチ牽引力の管理が工事における重要なポイントとなっている^{5), 6)}。

6.2 浮遊曳航工事

ランチングウェイ上で接合した約 180 m の管 2 本をそれぞれ自重滑動で進水させ、予備フローターに空気を注入して海上に浮上させた。海上曳航は先頭に 300 Hp、後端に舵取り用 80 Hp のタグボートを配置してジョホール側スワンプ内まで曳航し、フローターに充水して所定地点に沈設した。1.6 km の海峡横断に約 40 分、沈設後の位置は誤差 10 cm 以内とほぼ計画どおりであった。浮遊曳航の状況を Photo 4 に示す。

しかし、斜路からの進水・浮上の位置とタイミングについては潮位に基づく予測計算によったほか、ローラー摩擦とねじれ回転のため、各段階でのダイバーチェックなどの細かい進水管理を行った⁷⁾。

6.3 海底曳航工事

海底管敷設では East ライン、West ラインとも 45 m 長尺管をそれぞれ 2 本ずつ接合し、交互に 90 m ずつ進水させる方法を採用した。Fig. 8 に概要を示す。

曳航作業は 2 交代制による 24 時間連続作業で行った。

溶接時間は 3 名の現地溶接工で 8~9 h/joint、コンクリートの養生時間は進水ローラー接地圧 120 kg/cm² に耐えられる圧縮強度が得られるように設定した。超早強コンクリートの確性試験も実施し

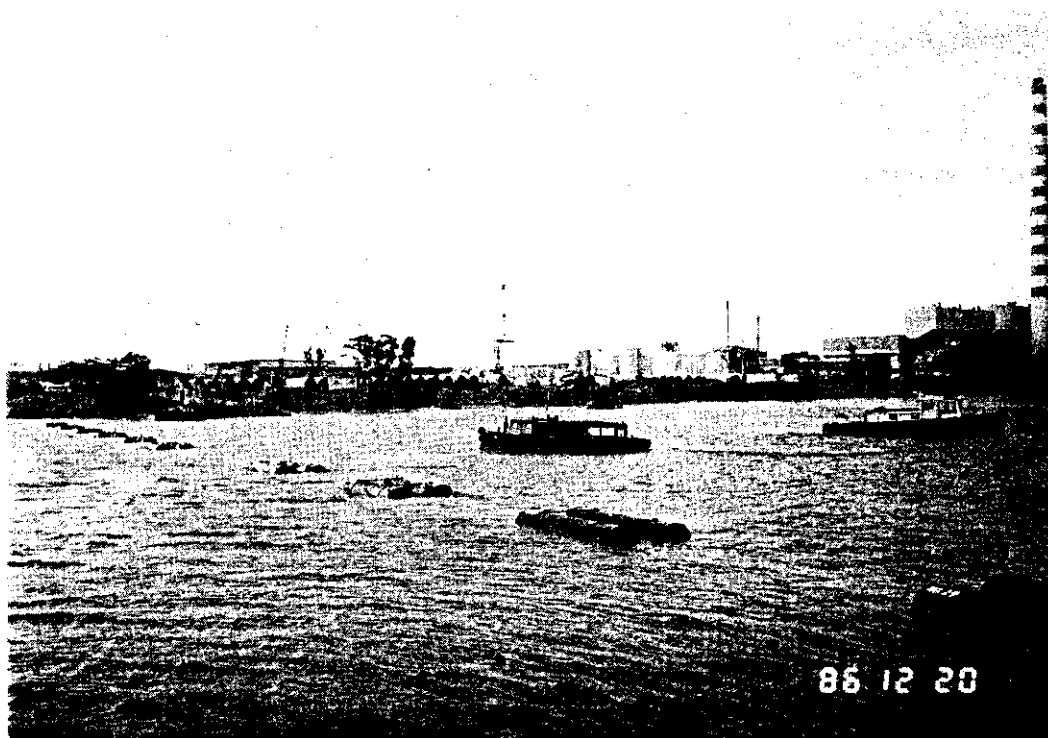


Photo 4 Surface tow

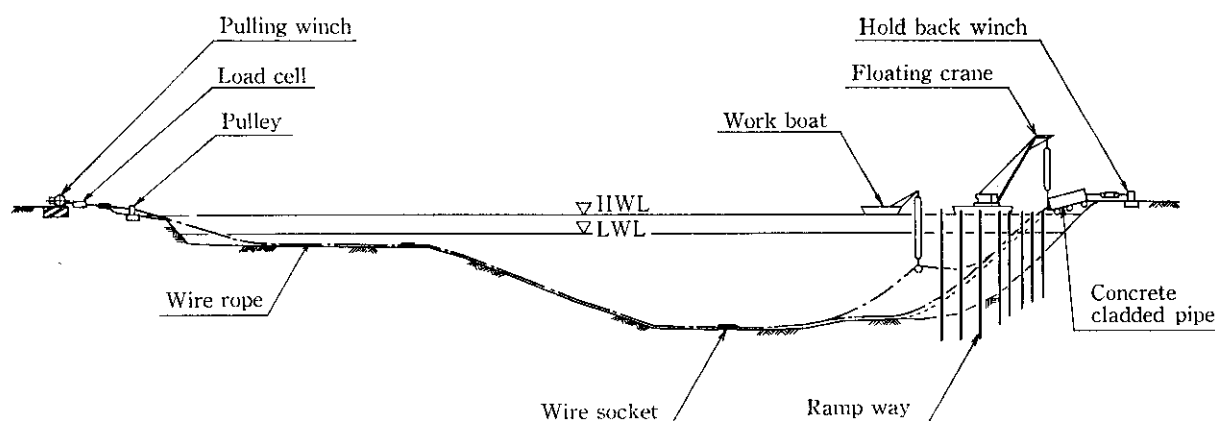


Fig. 8 Pulling plan

たが、硬化時間のバラツキ（微妙な温度変化）が大きく採用を見合わせた。

なお、溶接は API 1104 に基づき判定し、その補修率は約 2 % であった。

海底曳航においてはヘッダー部に予備フローターを取付け絶えず先端が海底に突込むことがないようにするとともに、ワイヤー地切れ時の変動、浮上り量、East および West 両ラインの間隔、土質状態等をダイバーに観察させながら曳航を進めた。曳航スピードは 15t ホールドウィンチで、1.6m/min 程度にコントロールし、90m を約 1h で進水させた（進水ローラーを毎分 1 回転のスピードとした）。

Photo 5 は進水時のランチングウェイ内の状況である。曳航力に関しては、ワイヤー両端にテンションメーターを組込み張力の調整、張力減のための浮力調整を行い、ワイヤー破断に対して注意を払った⁸⁾。

ライザー管とランプウェイで海中に保持されている 500m 区間に

ついては、フローターおよびランプ構造を利用してジャッキアップし、ローラー桁を撤去後ウィンチワイヤーで海底面まで吊り下した。

以上の海底管敷設完了後、浮遊曳航管および陸上ターミナル配管との継ぎ込みを行い全線の通水・耐圧テストを実施した。

6.4 線形管理と設計

海底管の曳航に際して、コンクリートクラッドパイプに過度の応力を発生させないような管理が要求された。そのために、現地にパーソナルコンピュータを設置し、曳航時には計算によって安全の確認を行いながら施工を行った。主な入力データとしては次のようなものである。

- (1) パイプの剛性と重量（空中、水中）
- (2) 支持ローラーの位置および計画トレンチレベル
- (3) フローターの取付位置およびその浮力
- (4) 潮位

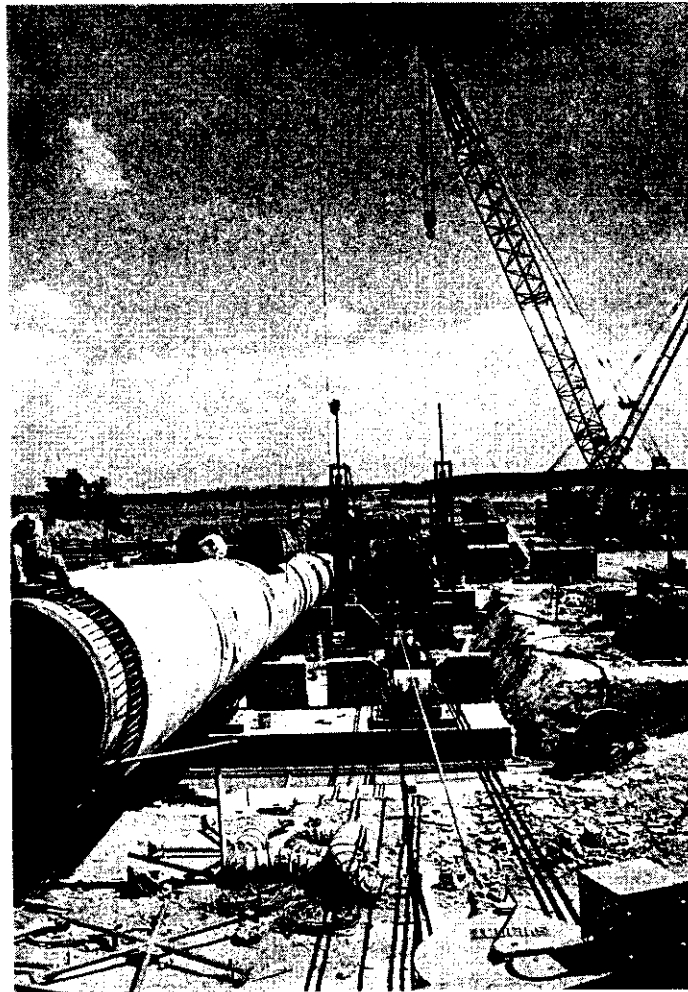


Photo 5 Launching operation

結果として以下のようなものを求めた。

- (1) 着底点の位置
- (2) 海底管の線形
- (3) コンクリート、鋼管の曲げ応力
- (4) 最小曲率半径
- (5) 支点ローラーの反力

6.4.1 パイプ剛性の検討

モデル化に際して、コンクリートクラッドパイプは、コンクリートの引張部分の抵抗を無視した複合ばりと考え、剛性の評価を行った (Fig. 9)。したがって、パイプの中立軸は圧縮側へずれた形となる。

パイプは連続ばりと考えて解析を行ったが、状況によっては支点ローラーからパイプが離脱することがあり、そのような場合の想定を組み込んで行った。

剛性の算出にあたり、コンクリートの平均静ヤング係数 E_c および平均圧縮強度 σ_c を BS 規格に基づきテストを行い実測した。

その結果および ACI (American Concrete Institute) コードにて算出した予想ヤング係数値を Table 4 に示す。

上記コンクリート平均ヤング係数を使用して算出したコンクリートクラッドパイプの全体剛性 K_B およびこの全体剛性を鋼管剛性に置換した時の断面 2 次モーメント I_B を次に示す。さらに参考として鋼管本体の剛性 K および断面 2 次モーメント I を Table 5 に示す。

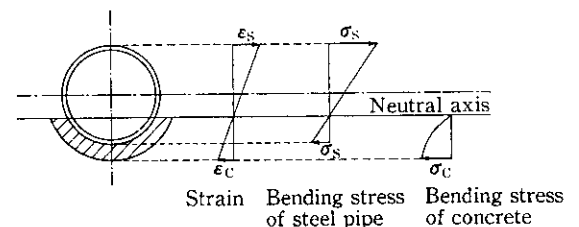
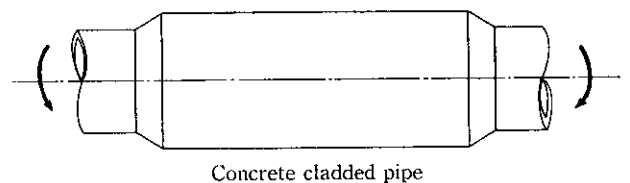


Fig. 9 Model of composite pipe

Table 4 Static modulus of elasticity of concrete

Age (d)	Static modulus of elasticity, tested (kg/cm ²)	Compressive Strength (kg/cm ²)	Static modulus of elasticity, esti- mated by ACI code (kg/cm ²)
7	4.49×10^5	570	3.67×10^5
28	4.54×10^5	705	4.08×10^5

Table 5 Bending stiffness (K) and moment of inertia (I)

	K (kg·cm ²)	I (cm ⁴)
Concrete clad pipe	3.58×10^{13}	1.707×10^7
Steel pipe only	1.68×10^{13}	7.97×10^6

なお、コンクリートパイプの全体剛性 K_B は次式にて求めた。

$$K_B = K_S + K_C \quad (1)$$

$$K_S = E_S (I_S + I_{sb}) \quad (2)$$

$$K_C = E_C I_C + E_S (A_S + A_{sb}) a^2 \quad (3)$$

ここで、

K_S : 鋼管および鉄筋の剛性 (kg·cm²)

K_C : コンクリートクラッドの剛性 (kg·cm²)

E_S : 鉄のヤング係数 (kg/cm²)

I_S : 鋼管の断面 2 次モーメント (cm⁴)

I_{sb} : 鉄筋の断面 2 次モーメント (cm⁴)

E_C : コンクリートのヤング係数 (kg/cm²)

I_C : コンクリートクラッドの断面 2 次モーメント (cm⁴)

A_S : 鋼管の断面積 (cm²)

A_{sb} : 鉄筋の断面積 (cm²)

a : 中立軸からの偏心距離 (cm)

また、 I_C は次のように定義される。

$$I_C = \alpha \left[\frac{(r_C^4 - r_I^4)}{4} + a^2 (r_C^2 - r_I^2) \right] + \sin 2\alpha \times \frac{r_C^4 - r_I^4}{8} - \frac{4}{3} a \sin \alpha \times (r_C^3 - r_I^3) \quad (4)$$

$$r_I = r_C - t_C/2 \quad (5)$$

$$\tan \alpha - \alpha - \frac{C_2}{C_1} = 0 \quad (6)$$

$$C_1 = r_C t_C \quad (7)$$

$$C_2 = \pi \frac{E_S}{E_C} (r_S t_S + r_{sb} t_{sb}) \quad (8)$$

ここで、

r_C : コンクリートクラッド外縁端までの半径 (cm)

r_I : コンクリートクラッド中心までの半径 (cm)

t_C : コンクリートクラッド厚さ (cm)

r_S : 鋼管の板厚中心までの半径 (cm)

t_S : 鋼管の板厚 (cm)

r_{sb} : 鉄筋を円環断面に置換した時の中心までの半径 (cm)

t_{sb} : 鉄筋を円環断面に置換した時の板厚 (cm)

Fig. 10 に記号の説明を示す。

6.4.2 パイプ重量 (空中, 水中)

コンクリートクラッドパイプ重量は当初コンクリート比重等のファクターが明確でなかったため推定値を使用して計算した。

次に、工事がスタートしてからコンクリートクラッドパイプの重量測定値およびコンクリート供試体を海水に浸漬して吸水率を確認した。また、海水を採取して海水比重の実測を行った。これらのデータを基にコンクリートクラッドパイプの平均空中重量および水中重量を決定した。

空中重量 = 6 131 kg/m

水中重量 = 236 kg/m (吸水量 10 kg/m を含む)

浮力 = 5 905 kg/m

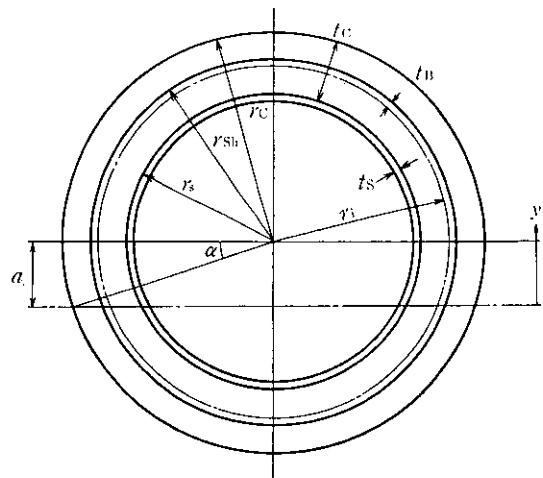


Fig. 10 Model for calculation of pipe bending stiffness

なお、本計算にあたっては、

吸水量 = 0.24% × コンクリート重量 kg/m

海水比重 = 1.024

を用いた。

6.4.3 支持ローラーの位置

ローラーの位置はローラーの耐力 90 t を考慮し、かつ海底管コンクリートクラッドのジョイントコンクリート厚みの不均一による不均等荷重を 50% 考慮して配置を設計した。

ローラー配置間隔 l は次のとおり

ランブウェイ $l = 10$ m

ランチングウェイ $l = 12.5$ m

ローラーの設置レベルは線形計算結果を基に決定した。

6.4.4 海底管敷設時の線形決定

線形の決定は次の点を考慮して、コンピュータによるシミュレーション計算を行った。

- (1) 海底部および陸上部の現地盤レベル
- (2) 進水設備ヤードのスペース
- (3) 海底管の全体剛性
- (4) 海底地盤までの水深
- (5) 鋼管の許容応力

上記の計算結果から進水斜路は 3 度勾配と決定した。

また、海底管の全体剛性が非常に高いため、小、中口径管の海底管施工で行われるオーバーベンド方式は採用できず、3 度勾配の直線にてパイプが入水し、着底点手前付近でサグベンド形になるような線形をとった。

着底点は斜路前面より約 550 m 沖合になることがコンピュータにより計算され、ダイバーチェックによっても着底点がほぼ予測値と一致していたことが確認できた。

6.4.5 線形予測値と実測値との比較

理論予測値は実測値と差異を生じたが、この差異は、コンクリートの引張側を完全に無視した剛性断面で計算してあったため、剛性が過小評価されたためと思われる。剛性を約 30% up した数値で予測値と実測値はよい一致を示した。

6.5 水中重量の調整と曳航力

ウインチの曳航力に影響を与える主な因子として以下のようなものが考えられた。

- (1) 海底の地形

(2) 海底地盤とパイプとの間の摩擦係数

(3) 曳航されるパイプとワイヤーの海中重量

パイプの水中重量を軽減することにより摩擦力を減少させ、曳航力を小さくすることが出来る反面、あまり軽くとすると敷設時に不安定になる可能性があり、施工上問題がある。したがって、水中重量が粘土質地盤で 35 kg/m、砂質地盤で 50 kg/m となるようにフローターを配置した。

予測曳航力 F の計算は次式によった。

$$F = f_1 L_1 W_1 + f_2 (L_2 W_1 + L_3 W_3) \quad \dots\dots\dots (9)$$

f_1 : 海底地盤との摩擦係数 1.2

L_1 : 海底地盤と接している海底管の延長 (m)

W_1 : コンクリートクラッドの海中重量 (kg/m)

f_2 : ローラーとの摩擦係数 0.01

L_2 : 海中ローラー上にある海底管の延長 (m)

L_3 : 空中ローラー上にある海底管の延長 (m)

W_3 : コンクリートクラッドの空中重量 (kg/m)

予想曳航力 F は、66 t と推測された。このため、100 t 能力ウインチを採用した。しかしながら、実際には、今回の曳航におけるウインチ引張り力の範囲は、50 t ~ 130 t (最終曳航時) であった (Fig. 11)。予測値と実測値には大きな差異が生じたが、この理由として考えられるのは、スワンプエリアにある粘性土の静止粘着力がクラッドパイプに作用したためと考えられた。

7 ま と め

シンガポールとマレーシアの間に敷設した口径としては世界最大の海底水道配管工事について報告した。この結果は次のとおりである。

- (1) 大口径管の現場での外面コンクリートコーティングについて試験打設を行い、そのデータを基にコンクリート配合と打設方法を決定した。その結果、実際の工事においては満足できる施工が得られた。
- (2) 45 m、270 t という長く重い長尺管の製作は芯出しジャッキと独自開発した芯出し用クランプを使用して行い、また長尺管のハンドリングはウインチとワイヤーを利用したシステムと昇降設備を搭載した台車システムの 2 方式にて行った。
- (3) パイプラインの形状から浮遊曳航法と海底曳航法の 2 方式を採用した。両方式ともコンピュータシミュレーションで検討を行い、所定の精度内に敷設することができた。

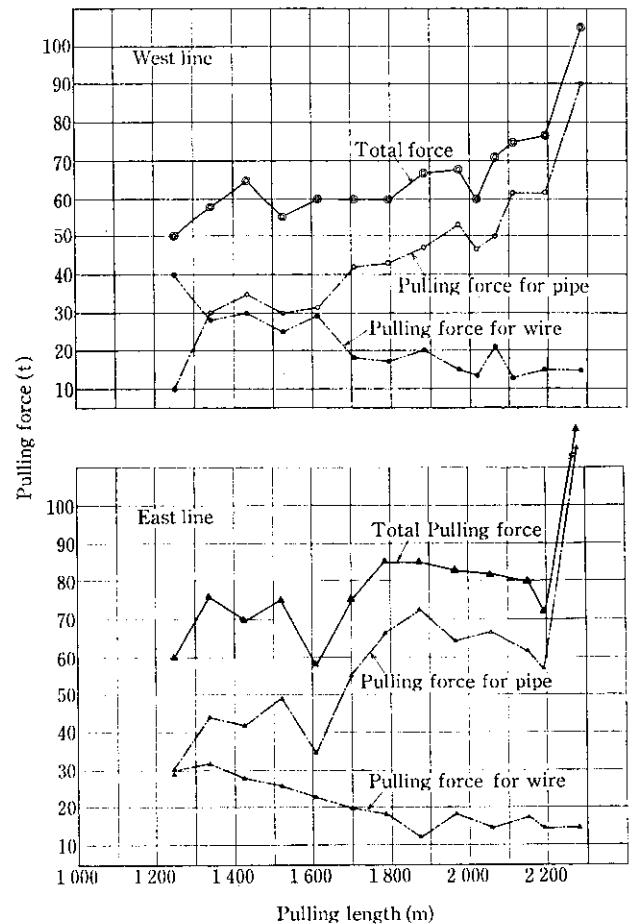


Fig. 11 Pulling force for pipe and wire with pulling length

- (4) 海底管の設計において、鋼管と鉄筋コンクリートからなる複合管の剛性を検討し、そのデータから予測値を得て曳航中の線形を管理した。

本プロジェクトは世界的にみても初めての超重量大口径パイプラインという環境条件も加わって施工難易度の高いプロジェクトであったが、無事に完了することができた。今後は本工事を大きな実績として新たなプロジェクトに取り組んでいきたい。

最後に工事の実施に当たり全面的に協力頂いた浜中海底管工事株式会社はじめ関係各位に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会: 「コンクリート標準示方書」, (1980)
- 2) 日本コンクリート工学協会編: 「コンクリート便覧」, (1976), [技報堂]
- 3) 今井 実, 根井基雄, 岡田武二: 「水中格点工法の格点部のせん断耐力に関する実験」, 土木学会第 37 回年次学術講演会, V-48, (1982)
- 4) 今井 実, 根井基雄, 岡田武二: 「水中格点工法の格点部の付着強度に関する実験」, 土木学会第 38 回年次学術講演会, V-12, (1983)
- 5) A. H. Mousselli: "Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods", (1981), [Pennwell Publishing Company]
- 6) 長崎作治: 「海洋パイプラインハンドブック」, (1984), [山海堂]
- 7) 嶋 文雄, 河本 浩, 金野春幸, 寺本 正: 川崎製鉄技報, 9 (1978) 3/4, 207-216
- 8) 加藤親男, 上田為敏, 西沢信二, 佐々木洋三, 堀 信介, 金野春幸: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 2, 228-239