

Installation of Oxygen Submarine Pipeline in Mizushima Port



前田 諭
Satoshi Maeda

エンジニアリング事業
部 パイプライン海洋
技術部パイプライン水
道技術室 主査(掛長)



横山 昭男
Akio Yokoyama

エンジニアリング事業
部 パイプライン海洋
技術部パイプライン水
道技術室 主査(部長
補)



堺 信介
Shinsuke Sakai

エンジニアリング事業
部 土木技術部建材技
術室 主査(課長補)

1 まえがき

近来、産業界は省エネルギー対策を進めてきたが、各企業が個々に行う省エネルギー対策は次第に限界に近づきつつある。このような状況下で水島地区においては通産省の提唱により企業の枠を越えたエネルギー共同利用による省エネルギー対策の検討が進められている。

本工事はその一環として行われたもので、当社水島製鉄所から水島港を経て東京製鉄株式会社岡山工場へ至る酸素配管の敷設工事である。

特に水島港横断部に関しては種々検討の結果、浮遊曳航法による海底パイプライン敷設を行った。しかし水島港は重要港湾に指定されており、船舶の航行量も多いため施工はかなり難しいものであった。Photo 1 に水島港の全景を示す。



Photo 1 Mizushima Port

要旨

川崎製鉄水島製鉄所から東京製鉄株式会社岡山工場へ至る酸素配管敷設工事は水島港横断部において浮遊曳航法による海底パイプライン敷設を行った。事前に所定の形状寸法にプレハブした長尺管にフローターを取り付け、所定の位置まで曳航し沈設した。導管は内管 200 A、外管 300 A の二重管構造で、土被り厚さは 3 m である。設計に際しては、特に地震時の動的解析を行い、パイプラインの安全性を確認した。海底掘削にはスパット式の大形バックホウ浚渫船を採用して、硬質土を効率よく掘削すると共に、大型警戒船を配備する等安全対策を十分に行った。

Synopsis:

In the installation work of the oxygen pipeline from Mizushima Works of Kawasaki Steel to Okayama Works of Tokyo Steel Mfg. Co., Ltd., a submarine pipeline was installed in the Mizushima Port by the floating tow method after various studies. A long and deformed pipeline was prefabricated on land according to specifications, equipped with floaters, launched, towed, and then sunk simultaneously at the time.

The pipeline consists of the service pipe whose nominal diameter is 200 mm and the steel jackets whose nominal diameter is 300 mm. The earth-covering thickness for the pipeline is 3 m. In design, the safety of the pipeline was especially confirmed by the dynamic analysis of expected stress of the pipeline during earthquakes. A large backhoe dredger equipped with spuds was applied for excavation of the seabed in order to remove hard sandy soil efficiently, and safety provisions, for example, large guardships, were sufficiently provided.

以下に、本工事のうち、(1) 導管の設計上のポイント、(2) 浚渫工事の問題点と対策、(3) 東京製鉄側立ち上がり部における深い土留壁の施工の概要、(4) 長尺管の製作から沈設までの工事の概要を報告する。

2 配管工事概要

2.1 配管諸元

導管(海底パイプライン)は以下のような二重管構造である。

(1) 設計圧力

内管: 27.5 kgf/cm²

外管: 9.9 kgf/cm²

(2) 管仕様

内管: 200 A, STPG38 SCH80 無塗装

外管: 300 A, STPG38 SCH40 ポリエチレン被覆鋼管 (KPP)

* 昭和60年11月6日原稿受付

2.2 施工順序

海底パイプライン敷設に際しては、まず海底地盤を掘削し、掘削溝へ砂を敷きならして管床を作る。次に、事前に陸上ヤードにて所定の寸法形状に製作しておいた長尺管を進水、曳航し沈設した。所定の位置に沈設されていることを確認した後埋め戻しを行った。

また、両岸の立ち上がり部については、一方は配管橋を海上へ突き出して設置しその上へ配管し海底パイプラインと接合した。他方は既設鋼矢板岸壁を一部取り壊し、岸壁内へ配管を立ち上げ、配管据え付け完了後岸壁を復旧した。Fig. 1 に施工フローを、Fig. 2 に施工位置を示す。

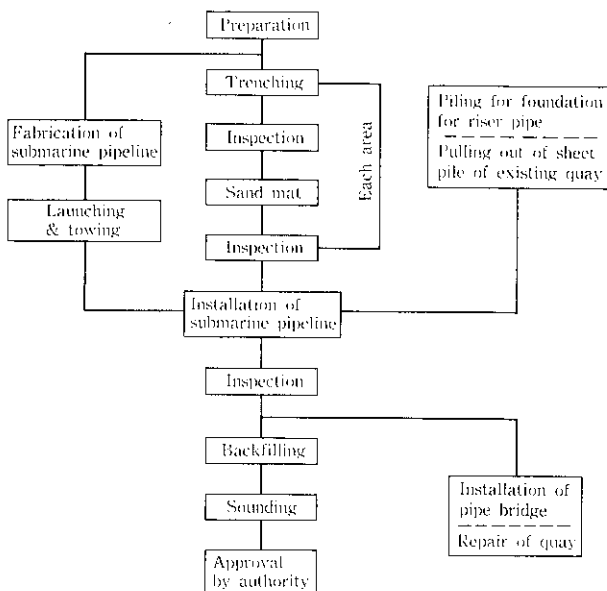


Fig. 1 Flow diagram of installation of submarine pipeline

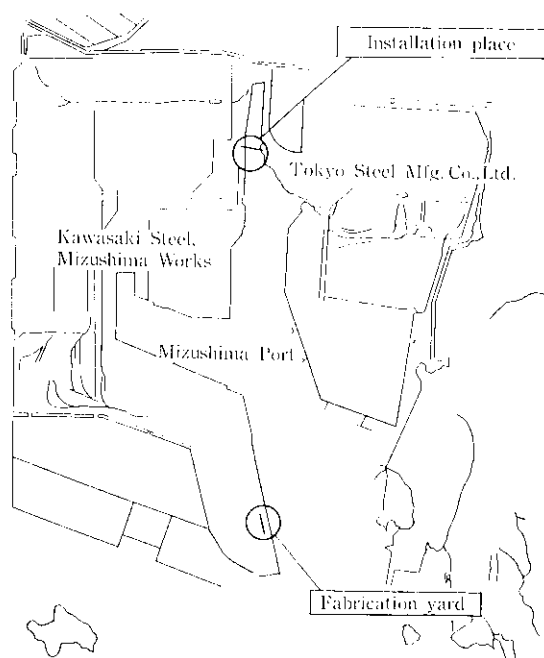


Fig. 2 Location of installation site

2.3 工事の安全性の検討

重要港湾であり船舶の航行量の多い水島港内の工事であったため、工事の安全性の検討を第三者機関である瀬戸内海航行安全協会に業務委託し、本工事のための航行安全対策特別委員会を設立した。検討結果²⁾として、工事区域の設定 (Fig. 3 参照)、警戒船の配備などの提案がなされ、施工にあたってはこれらの提案を遵守した。また、事前調査として特に磁気探査を行い、機雷や不発弾などの危険物の有無を確認した。

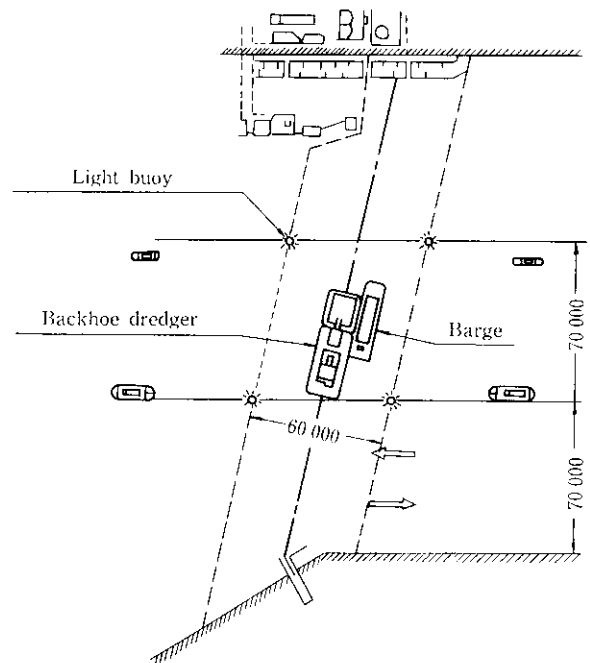


Fig. 3 Partition of installation area

3 導管の設計

3.1 二重管の目的

今回の海底パイプラインは二重管構造となっているが、その目的は以下のとおりである。

- (1) 酸素本管である内管を外管で保護する。
- (2) 内管と外管の間に窒素ガスを封入し、窒素の圧力および窒素中の酸素濃度を測定することにより内管からの漏洩を検知する。

導管の設計上のポイントは土被りの決定と管に発生する応力の検討であるが、上記理由によりこれらの設計計算は外管のみを対象とした。

3.2 設計条件

主に、港湾の施設の技術上の基準・同解説 (日本港湾協会) およびコンビナート等保安規則関係基準 (高圧ガス保安協会) にもとづき設計した。主な設計諸元を以下に示す。

- (1) 配管: 300 A, STPG38 SCH40
- (2) 投錨: 3 000 DWT 級船舶使用錨
- (3) 土質条件: Fig. 4 参照

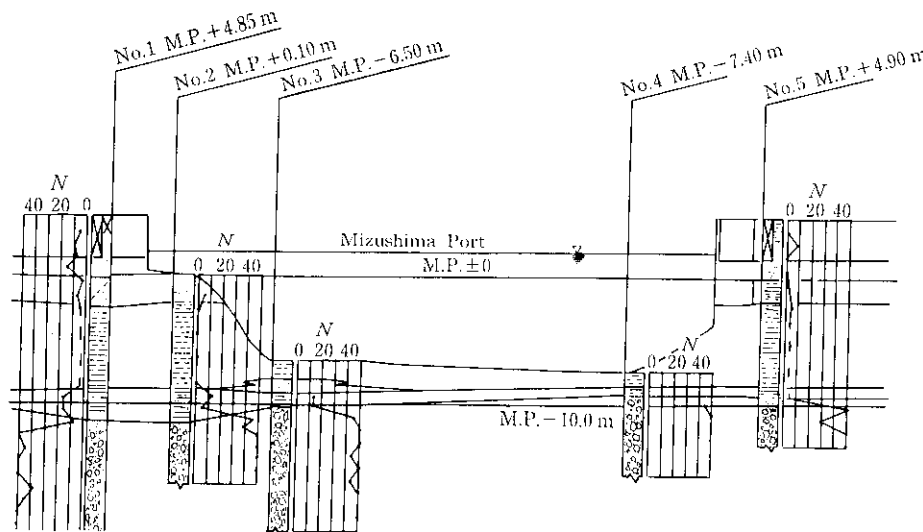


Fig. 4 Soil profile of the place where the pipeline was installed

3.3 土被り厚さの決定

土被り厚さは以下の手順で検討した。

(1) 通航が予想される船舶の最大船型の検討

航路水深および現状の通航船舶の調査より 3 000 DWT 級船舶とした。

(2) 上記船舶が積載する錨の諸元の決定

船型と錨の重量の実績表および JIS のストックレスアンカー表から 3 000 DWT 級船舶の積載する錨の諸元は以下のとおりである。

重 量: 2.1 t

底面の長さ: 1.47 m (上からの投影図において)

底面の幅: 0.57 m (上からの投影図において)

(3) 投錨による錨の貫入量の算定

中山らの方法³⁾により算定した。以下に計算手順を示す。

錨の水面での速度 v_a (m/s) は (1) 式から求められる。

$$v_a = \alpha \sqrt{2gx_1} \quad (1)$$

ここに、 α : 錨鎖による抵抗係数 (0.6)

g : 重力加速度 (9.8 m/s²)

x_1 : 錨の空中落下高さ (m)

x_1 は 3 000 DWT 級船舶を想定しているので 3.5 m とすると $v_a = 4.97$ (m/s) が得られる。

また、錨の海中での平衡速度 v_0 (m/s) は (2) 式を用いて求められる。

$$v_0 = \sqrt{\frac{A}{B}} \quad (2)$$

$$A = \left(1 - \frac{w_0}{w_s}\right)g$$

$$B = \frac{w_0}{2W} \times C_D \cdot S$$

ここに、 w_0, w_s : 海水および錨の単位体積重量 (kg/cm³)

W : 錨の重量 (2.1 t)

C_D : 抗力係数 (1.2)

S : 錨の底部投影面積 (0.838 m²)

(2) 式から $v_0 = 5.87$ m/s になる。

海底接地速度 v_w (m/s) は $v_0 > v_a$ の場合は (3) 式により求められる。

$$v_w = \sqrt{\frac{A}{B}} \tanh \{ \sqrt{AB}(t - C_1) \} \quad (3)$$

$$t = \frac{1}{\sqrt{AB}} \cosh^{-1} \exp \{ B(X - C_2) \} + C_1$$

$$C_1 = -\frac{1}{\sqrt{AB}} \tanh^{-1} \left(\sqrt{\frac{B}{A}} v_a \right)$$

$$C_2 = -\frac{1}{B} \ln [\cosh \{ \sqrt{AB} \times (-C_1) \}]$$

X は落下距離で、ここでは 11 m とした。これから

$$v_w = 5.87 \text{ m/s}$$

が得られる。

錨の貫入量 ΔH (m) は砂地盤に落下した場合は (4) 式より求められ、粘性土地盤に落下した場合は (5) 式により求められる。

$$\Delta H = 0.382 + 0.0348 \frac{E}{S} \quad (4)$$

$$\Delta H = 0.520 + 0.235 \frac{E}{S} \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{2} \frac{W}{g} \cdot v_w^2$$

これから、投錨による錨の貫入量は以下のようになる。

(a) 砂地盤に落下した場合: 0.54 m

(b) 粘性土地盤に落下した場合: 1.55 m

(4) 走錨による錨の食い込み量の算定

(a) 砂質地盤に落下し砂質地盤を移動する場合

運輸省第 2 港湾建設局が昭和 47 年 10 月に行った錨の引張り試験の結果より算定した。この試験報告⁴⁾によると錨は砂質土中において錨の軸を中心に回転しながら若干浮き上がりつつ移動するので、走錨による食い込み量はアンカーヘッドの幅の 1/2 になる。このことから、砂質地盤の場合は

$$1.47 \text{ m} \times \frac{1}{2} = 0.74 \text{ m}$$

となる。

(b) 粘性土地盤に落下し粘性土地盤および砂質地盤を移動する場合

清宮らの求めた方法⁵⁾により算定した。これによると錨は粘性土地盤ではほぼ水平に移動し、砂質地盤では $2H_0 \sim 3H_0$ の範囲で $\frac{1}{2}H_0$ 程度浮き上がる (H_0 は錨の長さでここでは 2.31 m)。砂質地盤中の移動距離は 4.7 m となるので走錨に

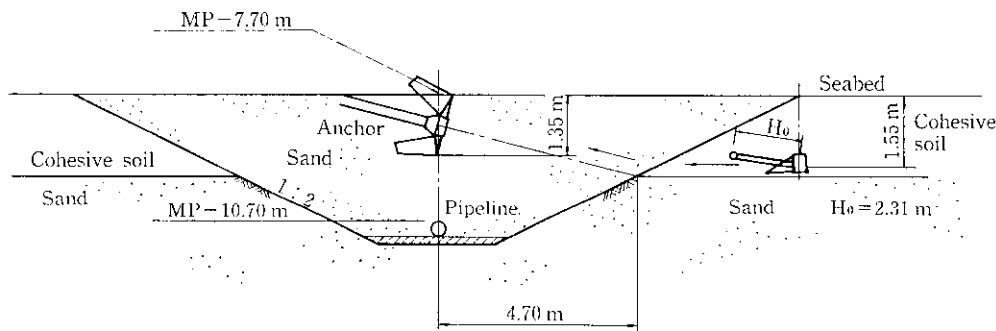


Fig. 5 Schematic illustration of expected anchor location, dropped on cohesive soil (case 2)

よる浮き上がり量は

$$\frac{1}{2} H_0 \times \frac{4.7}{2.5 H_0} = 0.94 \text{ m}$$

一方、回転による食い込み量は 0.74 m、したがって合計すると 0.2 m 浮き上がる。

(5) 土被り厚さの決定

管埋設位置における投錨および走錨による錨の貫入量は以下のとおりである。

(a) 砂質地盤に落下した場合

$$0.54 + 0.74 = 1.28 \text{ m}$$

(b) 粘性土地盤に落下した場合

$$1.55 - 0.2 = 1.35 \text{ m}$$

これに投錨による洗掘、過去の事例など安全を考慮して土被り厚さは 3 m とした。

Fig. 5 に粘性土地盤に落下した時の状況を示す。

3.4 応力の検討

土圧などの主荷重、地震や温度変化による従荷重、およびそれらの組み合わせによって管に発生する応力を計算した。条件的には地震時がもっともきびしかったが、結果はすべて許容応力以下で問題なかった。ここでは計算過程は省略し、結果のみを Table 1 に示す。

3.5 地震時の動的解析

地震時の応力解析は応答変位法により行い、入力地震波としては Case 1 として El-Centro 波、Case 2 として八戸波を用いた。

3.5.1 土質条件

両岸各 1 箇所、海底部 3 箇所、計 5 箇所のボーリングデータおよび陸上 1 箇所の PS 検層データより地盤モデルおよび各物性値を作成した。Fig. 6 に地盤モデルを示す。

Table 1 Summary of stress calculations on submarine pipeline

	Load condition	Circumferential stress	Axial stress	Combined stress	Allowable stress
Principal load	Internal pressure ①	192	58	—	880
	Earth load ②	405	—	—	—
	Earth load (Earthquake) ③	444	—	—	—
	Water pressure ④	41	—	—	—
Secondary load	Dropped anchor ⑤	247	116	—	—
	Bucket ⑥	695	263	—	—
	Seismic force ⑦	—	942	—	—
	Thermal stress ⑧	—	378	—	—
Combination of each load	①+②+④	638	58	—	1 100
	①+③+④	677	58	—	1 870
	①+②+④+⑤	885	174	—	1 650
	①+②+④+⑥	1 333	321	—	1 650
	①+③+④+⑦	677	1 000	—	1 760
	①+③+④+⑧	677	436	—	1 375
	①+③+④+⑦	—	—	1 461	1 980

3.5.2 解析モデル

全長約 280 m に 33 節点を設け、パイプラインを 32 梁部材で構成するモデルとした。

3.5.3 解析結果

Table 2 に最大応力を、Fig. 7 に解析結果の一例を示す。解析方法である応答変位法の特徴であるが、管の周囲環境が変化する場所において応力、変位とも大きな値となっている。応力度別に見ると

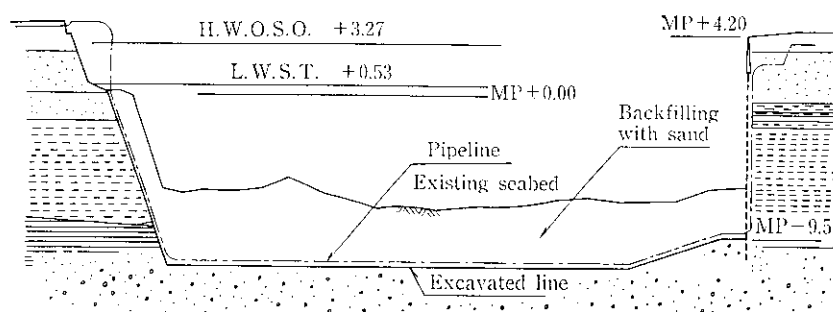


Fig. 6 Ground model

Table 2 Maximum stress in dynamic analysis of submarine pipeline during earthquake

		(kgf/cm ²)	
		Case 1 (El-Centro wave)	Case 2 (Hachinohe wave)
Axial stress	Tension	297.90	321.80
	Compression	-276.50	-335.70
Horizontal shearing stress		-5.29	10.64
Vertical shearing stress		18.69	36.37
Horizontal bending stress		625.90	1 075.00
Vertical bending stress		-322.20	-471.40



Photo 2 Backhoe dredger

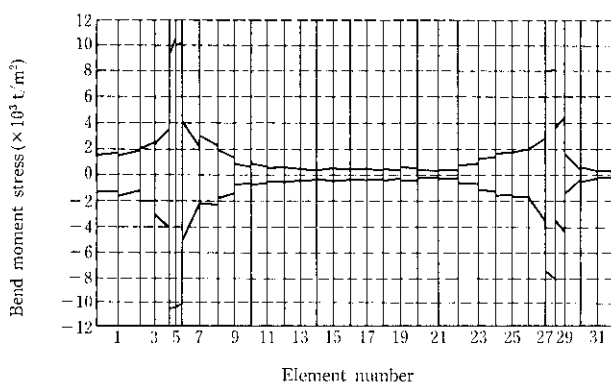


Fig. 7 Example of output of dynamic analysis of submarine pipeline

- (1) 軸応力: 立ち上がり部付近にピークがある。
 - (2) 剪断応力: 配管橋部にピークがある。
 - (3) 曲げ応力: 埋設管の曲がり部付近にピークがある。
- これらの応力はすべて許容応力以下であり問題はない。

4 浚渫工事

浚渫工事にあたっては港の機能を損わず施工することがもっとも重要であったため様々な制約があった。以下にこれらの問題点とその対策を示す。

- (1) 一般の船舶を航行させながら施工する必要があったため航路を3分割し、1工区を長さ 70 m、幅 60 m とした。アンカーで固定するタイプの浚渫船ではアンカーが工区の外へ出るため、スバッドにより船体を固定するタイプとした。
- (2) 工事期間が短かったため作業効率を上げる必要があった。4.6 m³ のバケットを設備した大型バックホウ浚渫船 (Photo 2) を採用して掘削効率を上げると共に、後述のような高い施工精度で品質管理を行い手戻りをなくした。
- (3) *N* 値が 50 以上の硬質土を掘削するため上記バックホウ浚渫船のバケットとして 3 m³ のリッパバケットを準備した。
- (4) 掘削深さが深いためバックホウのアームをロングアームに改造した。
- (5) 高い施工精度 (+100 mm, -200 mm) が要求された。バックホウ浚渫船搭載のマイコン管理システムを駆使すると共に測定を密に行った。

また第三者とのトラブルが予想されたため、事前にポスターを配布したり大型警戒船を配備するなど安全対策も十分に行った。

5 東京製鉄側立ち上がり部

5.1 構造

東京製鉄側の立ち上がり部は安全上から岸壁の内側に管を立ち上げる必要があった。このため、既設鋼矢板岸壁を一部取り壊して施工した。使用中の岸壁のため工期、作業範囲、既設岸壁への影響など数多くの制約があり、工法と構造の決定に際しては模型を作成するなど十分な検討を行った。

各種の工法および構造の比較検討の結果、構造はなるべくシンプルで掘削土量の少ないものを採用した。Fig. 8 に施工時の構造を示す。岸壁掘削部の陸側の土圧はH杭と補強グラウトおよびその背面に設けた組み杭形式の控え工に持たせる。また、両側の土圧はグラウトで一体となったH杭、鋼矢板の組み合わせで受ける。腹起こしおよび切梁は深い掘削にもかかわらず、管洗設時に撤去する必要があること、取り付け作業が水中作業となることのため、上部の一段だけとした。施工に際しては現場計測を行って、その時点の状況を把握しこれを即座に施工ヘフィードバックし、常に構造物の安全

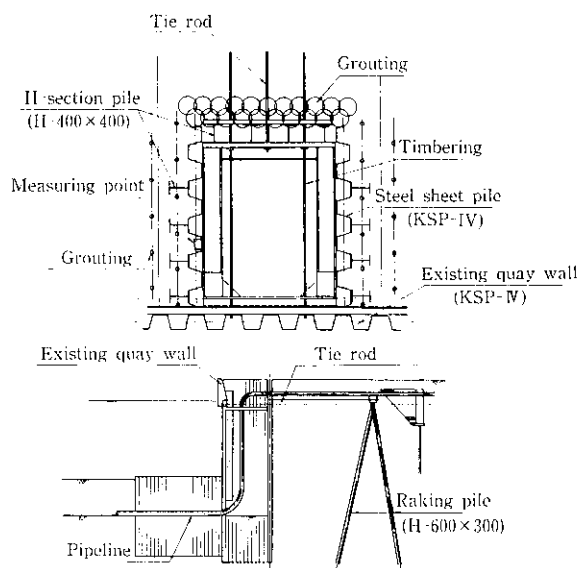


Fig. 8 Structure of temporary retaining wall

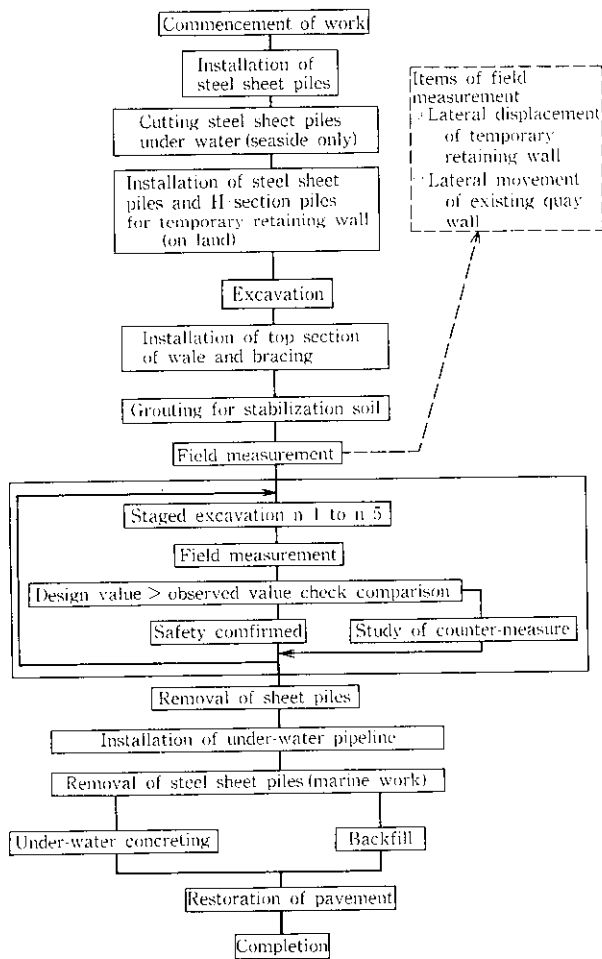


Fig. 9 Flow diagram of civil work at existing quay

性を確認しながら工事を進めた。Fig. 9 に施工フローを示す。

5.2 計測管理

5.2.1 掘削部側面の挙動

山留め壁の水平変形測定には信頼性が高く連続的な挙動が把握可能なスライド式連続傾斜計を用いた。なお、潮位の影響を配慮し、常に同一潮位のもとに計測した。結果を Fig. 10 に示す。山留め壁の変形は掘削の進行と共に、変形の最大値の発生位置が深部へ移行するという変化を呈している。

掘削完了時における最大変位は 42 mm、変位をもとに計算した H 杭および鋼矢板の最大応力はそれぞれ 1 540 kgf/cm²、1 300 kgf/cm² となりすべて許容値内であった。

5.2.2 既設岸壁の挙動

既設岸壁の挙動は上記傾斜計およびトランシットによる岸壁頭部変位の実測により把握した。その結果、岸壁頭部は最大 9 mm 海側へ移動したが、特に問題となる値ではなかった。

6 長尺管の製作、曳航、沈設

6.1 長尺管の製作

長尺管は当社水島製鉄所内に仮設されたヤードで製作され、水島港を奥部まで縦断曳航、沈設された。

二重管構造となっているため Fig. 11 に示すように 5 ブロックに分けて製作した。内管は高圧酸素配管であるため全溶接部について

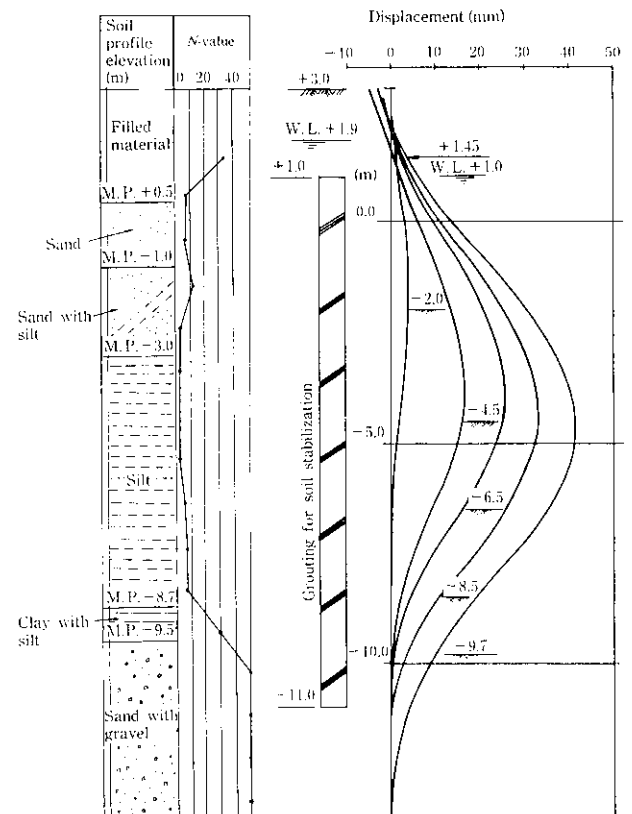


Fig. 10 Horizontal displacement of landslide protection wall

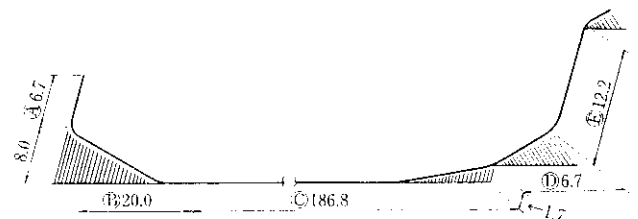


Fig. 11 Shape of submarine pipeline (m)

目視による耐圧気密検査をする必要があった。そのためブロックごとに内管のみを溶接し検査をした後、順次外管をかぶせた。ブロックとブロックの接合はまず内管を接合し、溶接部の検査をした後、外管として二つ割鋼管をかぶせてシーム接合して二重管とした。また、製作にあたっては酸素配管であるため、異物の除去、油脂分の除去には特に気を配った。

6.2 進水、曳航

水中重量を軽くするためフローターを取り付けた長尺管の両端ライザー部を 50 t 吊りと 70 t 吊りの起重機船で、中間の水平部を 8 台のトラッククレーンで吊り地切りした後、管の状況を見ながら 50 cm ずつ吊り上げ水平移動を繰り返して海上へ出し着水させた。その後 100 m 沖合まで移動させてライザー管を引き起こし、その状態で一晩仮留した。翌日、前後を 2 600 PS 級タグボートで、両側を小型船で警戒し水島港の東岸沿いを 2 ノットで沈設場所近くの海域まで曳航し沈設開始まで仮留した。

6.3 沈設

片側岸壁上に 45 t 吊りと 36 t 吊りのトラッククレーン各 1 台を、

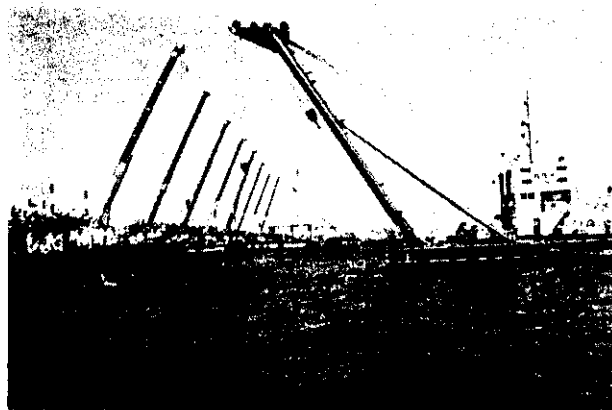


Photo 3 Launching

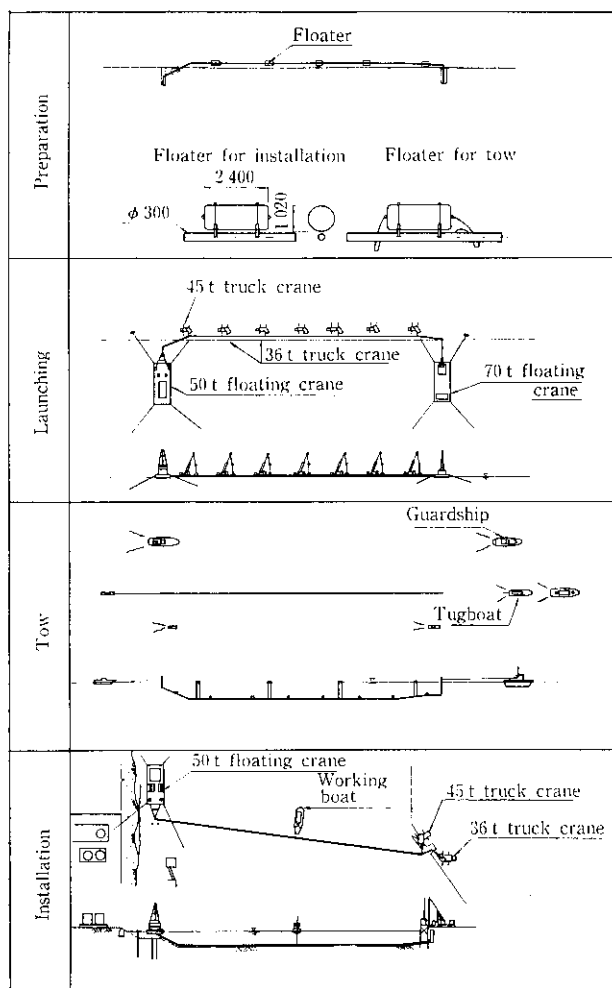


Fig. 12 Outline drawing of installation work

他方の立ち上がり基礎側に 50 t 吊り起重機船を配置した。航行禁止前の最終便フェリー通過後、港長の告示による航路の全面通行止めを確認して長尺管の沈設を開始し、作業は予定どおりに進行して無事完了した。Photo 3 および Fig. 12 に作業状況を、Fig. 13 に沈設作業の流れを示す。

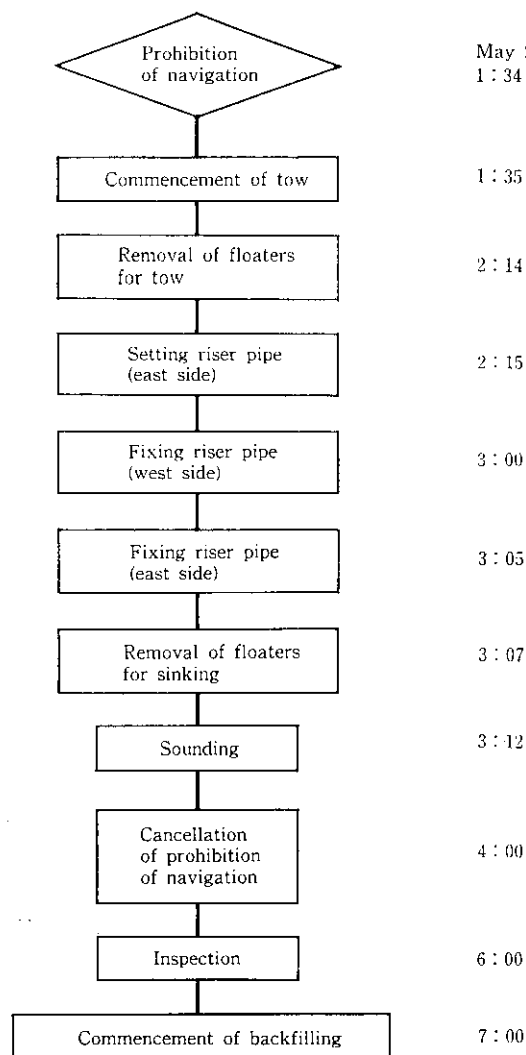


Fig. 13 Flow diagram of sinking work

7 結 言

水島港において浮遊曳航法によって海底パイプラインを敷設した本工事の特徴は以下のとおりである。

- (1) 硬い海底地盤に限られた狭い工事区域内で掘削するため、スパッド式の大型バックホウ浚渫船を採用した。
- (2) 複雑な形状をした二重管構造の長尺管を陸上で製作し、浮遊曳航法にて沈設した。
- (3) 東京製鉄岸壁の掘削は深い水中作業であったため、計画管理を十分行い作業を進めた。
- (4) 船舶の航行量の多い水島港の最奥部での工事であったため、関係者への周知徹底、警戒船の配備等安全対策に特に気を配った。

最後に、かなりの難工事にもかかわらず無事完了できたのは施主である大阪酸素工業株式会社をはじめ関係官庁、関係企業各位のご指導、ご協力の賜物と感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 佐々木洋三, 山元 深, 小泉 進: 川崎製鉄技報, 17 (1985) 2, 98-103
- 2) 瀬戸内海航行安全協会: 「水島港横断酸素ガス配管工事計画の安全性に関する報告書」, (1984)

- 3) 中山茂雄，清宮 理：「投錨試験における錨の貫入量」，港湾技研資料，No. 218 (1975)，1-18
- 4) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所：「実船による投錨および走錨試験結果報告書」，昭和47年10月
- 5) 清宮 理，藤沢孝夫，輪湖建雄：「走びょう中のいかりの挙動と走びょう抵抗特性」，港湾技術研究所報告，18 (1979) 4，105-139