
エンボス加工付きプラスチック被覆鋼管の開発

Development of Embossed Plastic and Concrete Coated Pipe for Offshore Pipeline

南谷 昭次郎(Shojiro Minamiya) 柴垣 正邦(Masakuni Shibagaki) 桑田 一義
(Kazuyoshi Kuwata) 薄井 輝久(Teruhisa Usui) 池田 雄二(Yuji Ikeda) 大庭 成元
(Shigeyuki Oba)

要旨：

近年、海底パイプライン用鋼管は、敷設時の浮力防止および海底での鋼管保護を目的として被覆鋼管の外表面にコンクリートコーティングを施したものが使われ始めている。このたび、ポリエチレン被覆外表面にエンボス(凹凸)模様をつけ、コンクリートの付着力を飛躍的に高め、敷設時のコンクリート脱落、パイプ損傷などの事故を防止し、さらに敷設後の海底でのパイプ保護を図った被覆鋼管を開発した。このエンボス被覆鋼管は、コンクリートの付着強度が 12 kgf/cm² 以上あり、エンボス加工を施さない鋼管に対し、約 30 倍の付着強度がある。知多製造所では、当製品を約 1000 t 製造し 1983 年 2 月、大手石油会社に納入した。また、その敷設工事も昨秋無事完了した。

Synopsis：

The strong demand for corrosion resistant offshore steel pipelines in recent years has led to the making of pipes coated with polyethylene or epoxy resin. Furthermore, for minimizing buoyancy of the pipes during the laying work and for protecting them on the sea bottom, concrete-coated pipes have begun to be used. Recently, the authors have successfully developed a new product whose concrete coating is fast bonded to the polyethylene coating for a remarkable increase of the adhesive strength of concrete. This new coated steel pipe is embossed with a rugged pattern on the outer surface of the polyethylene coating to achieve a perfect bond between polyethylene and concrete so as to prevent peeling-off of concrete and damages pipe during pipe laying and to improve pipe protection on the sea bottom. Embossing the outer surface of polyethylene coating has achieved, at the concrete coating interface, an adhesive strength of more than 12 kgf/cm² which is about 30 times that for the non-embossed pipe. Chita Works made the first shipment of the new products to a major oil company in February 1983.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

南谷 昭次郎^{*2} 柴垣 正邦^{*3} 桑田 一義^{*4} 薄井 輝久^{*5} 池田 雄二^{*6} 大庭 成元^{*7}

Development of Embossed Plastic and Concrete Coated Pipe for Offshore Pipeline

Shojiro Minamiya, Masakuni Shibagaki, Kazuyoshi Kuwata, Teruhisa Usui, Yuji Ikeda, Shigeyuki Oba

要旨

近年、海底パイプライン用鋼管は、敷設時の浮力防止および海底での鋼管保護を目的として被覆鋼管の外表面にコンクリートコーティングを施したものが使われ始めている。このたび、ポリエチレン被覆外表面にエンボス（凹凸）模様をつけ、コンクリートの付着力を飛躍的に高め、敷設時のコンクリート脱落、パイプ損傷などの事故を防止し、さらに敷設後の海底でのパイプ保護を図った被覆鋼管を開発した。

このエンボス被覆鋼管は、コンクリートの付着強度が 12 kgf/cm^2 以上あり、エンボス加工を施さない鋼管に対し、約 30 倍の付着強度がある。知多製造所では、当製品を約 1000 t 製造し 1983 年 2 月、大手石油会社に納入した。また、その敷設工事も昨秋無事完了した。

Synopsis:

The strong demand for corrosion resistant offshore steel pipelines in recent years has led to the making of pipes coated with polyethylene or epoxy resin. Furthermore, for minimizing buoyancy of the pipes during the laying work and for protecting them on the sea bottom, concrete-coated pipes have begun to be used. Recently, the authors have successfully developed a new product whose concrete coating is fast bonded to the polyethylene coating for a remarkable increase of the adhesive strength of concrete. This new coated steel pipe is embossed with a rugged pattern on the outer surface of the polyethylene coating to achieve a perfect bond between polyethylene and concrete so as to prevent peeling-off of concrete and damages pipe during pipe laying and to improve pipe protection on the sea bottom. Embossing the outer surface of polyethylene coating has achieved, at the concrete coating interface, an adhesive strength of more than 12 kgf/cm^2 which is about 30 times that for the non-embossed pipe. Chita Works made the first shipment of the new products to a major oil company in February 1983.

1 緒言

世界のエネルギー産業を支えるガス、石油、水等の効率的輸送手段として、パイプラインが大きな役割をはたしている。このパイプラインに使用される鋼管は、その用途に応じ、各種の防食処理がなされるが、これまでは、良好な塗覆装と電気防食との併用が最も経済的かつ効率的な防食法とされてきた。

このうち、外表面塗覆装材料としては、古くはアスファルト、コールタールエナメルなどの瀝青材料が多く用いられ、また最近では、ポリエチレン樹脂やエポキシ樹脂などのプラスチック材料が主流を占めるようになってきた。特に海底パイプラインの場合は、腐食環境が厳しい上に、敷設後、パイプの点検、補修がほとんど不可能に近いことを考慮して、さらに安全性に優れた高品質のパイプが要求される。

一方、当社では、知多製造所被覆管工場¹で、これまで陸上用をはじめ、海底パイプライン用ポリエチレン被覆鋼管を丸ダイ方式により数多く製造してきた。この蓄積された技術をもとに、このたび長期防食性に優れたポリエチレン被覆鋼管の外表面にコンクリートコーティングを施し、さらに安全性を高めた海底パイプライン用被覆鋼管を開発した。この被覆鋼管は、従来のポリエチレン被覆外表面

にエンボス（凹凸）模様（以下、エンボス被覆鋼管と称す）を施し、コンクリートとの付着強化を図ったもので、敷設時のコンクリート脱落、パイプ損傷等の事故を防止し、さらに、海底でのパイプ保護強化を図ったものである。

なお、このコンクリートコーティングの目的は、

- (1) パイプライン敷設時、パイプの浮力によるパイプの浮上防止
- (2) パイプライン敷設後、船舶からの投錨、底引き漁船の網取付け金具等による衝撃損傷防止

の 2 点にある。

本報は、エンボス被覆鋼管の開発経過および実用性を想定した各種性能試験結果について報告する。

なお、当エンボス被覆鋼管は、大手石油会社が日本近海に敷設したガス輸送用海底パイプライン（全長 42 km）の主要部分に使用されている。

2 開発経過

2.1 予備調査と解析

従来のポリエチレン被覆鋼管は、外表面が非常に滑らかなため、コンクリートとの付着強度が小さく、パイプライン敷設時、種々の

*1 昭和59年8月15日原稿受付

*2 知多製造所第1造管部部長

*3 知多製造所管理部技術管理室主査（課長）

*4 知多製造所企画部企画開発室主査（掛長）

*5 知多製造所設備部設備技術室主査（掛長）

*6 知多製造所第1造管部溶接管技術室

*7 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）

Table 1 Emboss pattern¹⁾

Item	Type of pattern	Surface pattern	Cross-cut pattern
A	Chequer		
B	Straight line		
C	Tape wrapping (Single)		
D	Tape wrapping (Double)		
E	Non embossed		

事故が想定される。したがって、ポリエチレン外表面とコンクリート間の付着強度の強化を図ることは最重要課題である。

その手段としては、

(1) 橋梁の合成桁のように境界面にメカニカルな接合材を用いる方法

(2) 異形棒鋼のように鋼材の表面に突起形状を設ける方法が考えられるが、加工性、材料費等の見地から後者の方が有利であり、ポリエチレン外表面に突起形状をつける方向で検討した。これまで、ポリエチレンの外表面に凹凸を付ける方法としては、

(1) テープまき成形法

(2) 熱転写法

の2方法が考えられている。

そこで、この2方法により実現可能でかつ代表的と思われる4種類のエンボス模様を試作し、コンクリートの付着強度より最適なエンボス模様を決めることにした。

供試管としては、API 5LX52 406.4 mmφ×7.9 mm_t×4 000 mm_Lの素管外表面に膜厚 2.4 mm の高密度ポリエチレンを被覆したものをを用い、Table 1 に示すエンボス模様を前記2方法によりつくった。また、コンクリートは、比重 2.2、圧縮強度 350 kgf/cm² 補強鉄筋 17 番-38 mm 亀甲金網入りの仕様とした。

付着強度試験は、50 t 万能試験機を使用し、載荷方法は、Fig. 1 に示す要領で供試管をセットし、ポリエチレン外表面とコンクリー

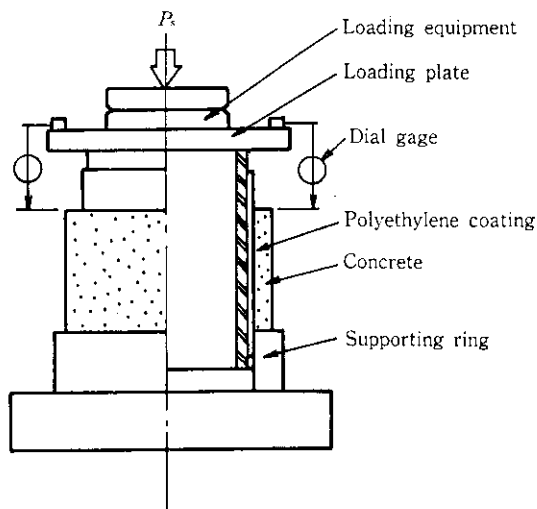
Fig. 1 Schema of method of shear strength test¹⁾

Table 2 Shear strength test results

			Maximum load P_{max} (t)	Shear strength $T_{B max}$ (kgf/cm ²)	Average shear strength $T_{B max}$ (kgf/cm ²)
A	Chequer	1	4.180	1.08	1.19
		2	5.030	1.30	
B	Straight line	1	5.650	1.46	1.44
		2	5.480	1.41	
C	Tape wrapping (Single)	1	1.575	0.41	0.38
		2	1.350	0.35	
D	Tape wrapping (Double)	1	1.465	0.38	0.37
		2	1.365	0.35	
E	Non embossed	1	1.610	0.42	0.38
		2	1.295	0.33	

トとの相対変位をダイヤルゲージで測定する方法をとった。その結果をTable 2 に示す。一方、付着応力 τ_b は一般に次式で定義される。

$$\tau_b = \frac{P}{\pi DL} \quad (1)$$

ここで、 P : 載荷重 (kgf)

D : 被覆管を含む管外径 (cm)

L : コンクリートライニング幅 (cm)

である。

付着応力 τ_b は、接着応力 τ_a 、摩擦応力 τ_f 、機械的抵抗応力 τ_m の合応力、すなわち、

$$\tau_b = \tau_a + \tau_f + \tau_m$$

で与えられる。今、仮に、エンボス模様を施さない場合の τ_a を0.4 kgf/cm²とし、 τ_f は、法線応力が作用していないので、 $\tau_f = 0$ 、また、 τ_m はエンボスの突起表面積 A (cm²)に比例すると仮定すると、

$$\tau_m = \frac{\pi DL}{A} (\tau_b - \tau_a) \quad (2)$$

が導かれる。

前記の両式に実験データを挿入した結果をTable 3 に示す。

Table 3 Mechanical resistance stress

	Straight line	Cheque
τ_B (max)	1.44 kgf/cm ²	1.19 kgf/cm ²
A	56.9 cm ²	44.5 cm ²
τ_m (max)	72.5 kgf/cm ²	70.5 kgf/cm ²

2.2 エンボス形状の決定

これまでの予備調査結果より、横目形状が付着強度に最も大きな影響を持っていることがわかった。そこで、付着剪断強度に及ぼす突起部の投影面積 A_e との関係、平均剪断応力と自由端におけるずれ量との関係を明らかにし、さらに、エンボス加工時の作業性を考慮して、突起高さを 1.7 mm と決めた。

次にエンボス加工方法には、ロール方式およびプレス方式を考えた。まず、ロール方式であるが、80 A サイズの被覆鋼管を用いて実験したが、以下の如き問題があった。

- (1) ロールの周速差により、エンボス形状が部分的に不均一になる。Photo 1 にパターンくずれを示す。
- (2) ロールが均一に加熱しづらい。
- (3) ポリエチレン被覆速度 (3~5 m/min) に対し、ロールによるエンボス加工速度 (1 m/min) が遅く対応できない。

次に、プレス方式に関しては、ヒーター内蔵型金型を用いて実験したが特に基本的な問題はなく、押付温度、圧力、時間を種々変え最適加工条件を得た。

また、エンボス加工時の熱影響によるポリエチレンの劣化度は Fitz-Simol 試験により確かめた。極限粘度 (η) の測定結果では、接触温度 270°C までは安定しているが、300°C を超えると劣化しはじめ、また偏光顕微鏡によるポリエチレン組織の低分子化調査結果でも 270°C 以下では安定しており、350°C 以上で劣化しはじめることが分かった。

さらに、引張、衝撃、破壊電圧、密度等の機械的物性値等からも 200~300°C では、全く影響を受けていないことが分かった。



Photo 1 Deformation of emboss pattern

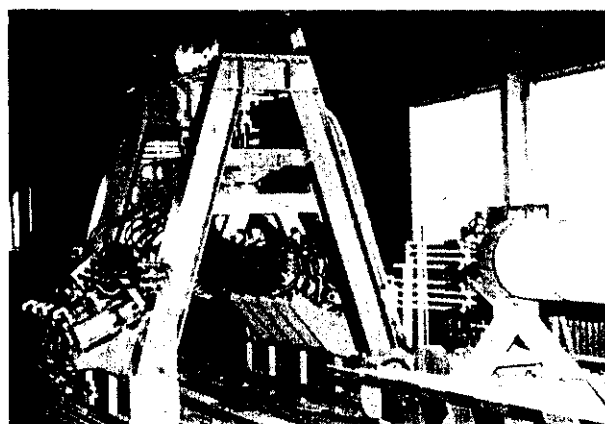
2.3 エンボス加工設備

エンボス加工設備を Photo 2 に示す。ラインは、中央に門型のエンボス加工機があり、その入側に走行可能な載荷台車を設け、トンネル状のヒーター内をヒーター幅だけ、ピッチ運転しながらエンボス加工を行うシステムになっている。エンボス加工は、シーズヒーターを内蔵したエンボス刃型を3方向から同時に押付け模様づけが行われる。

鋼管搬送台車は、自走式で、V型受台で鋼管を受け、また、周波数変換モーターにより速度切替えを自動的に行い、停止位置の精度を上げる構造になっている。

次に、エンボス加工機本体の特長をあげると、

- (1) 鋼管端部は通常 1/1000 程度の曲がりがあり、この影響をさけるために金型を長手方向で4分割した。
- (2) 鋼管の真円度 (長径と短径の差/公称直径) は最大 0.5% 程度が予想され、その対策として、金型を円周方向で3分割した。
- (3) 金型が過度に食い込むことを防止するため、一定量食い込んだ時点で止まるストッパーを設けてある。

Photo 2 Embossing machine¹⁾

3 エンボス被覆鋼管の製造

大手石油会社向に約 1000 t のエンボス被覆鋼管を製造したが、その仕様および製造方法を以下にのべる。

3.1 製造仕様

素管は、シームレス鋼管 (API 5LX52) を使用し、その化学成分および機械的性質を Table 4 に示す。

被覆仕様は、NACE, ASTM および DIN 規格が適用された。被覆構成を Fig. 2 に、主な仕様と実績を Table 5 に示す。

被覆工程としては、鋼管外表面をショットブラストで SIS, S_u2^{1/2} 以上に除錆し、エポキシプライマー (目標厚み: 20 μ) を塗布後、丸ダイにより、接着用ポリエチレン (目標厚み: 0.5 mm) を押し出

Table 4 Specifications of pipe

Chemical composition (wt%)					Mechanical properties			
C	Mn	Si	P	S	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Charpy (kg·m)
≤0.31	≤1.35	0.15~0.35	≤0.04	≤0.05	≥46.4	≥36.6	≥27.0	(-26°C 2 mmV) ave. ≥2.07 any ≥1.55

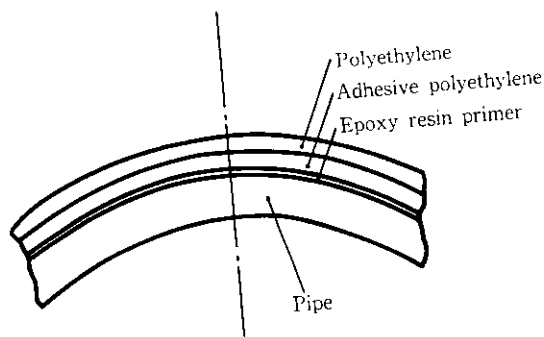
Fig. 2 Schema of adhesive polyethylene coated pipe¹⁾

Table 5 Properties of polyethylene compound

	Specification	Typical result
Polyethylene coating thickness	2.0 mm or above	3.0 mm
Adhesive strength	7.5 kgf/cm or above	15~20 kgf/cm
Tensile break strength	$200 \geq \text{kgf/cm}^2$	302 kgf/cm^2
Dielectric strength	$40 \geq \text{kV/mm}$	44 kV/mm
Pinhole detector	12 kV	20 kV
Density	0.93 gm/ml	0.952 gm/ml

Table 6 Concrete specifications

	Category I	Category II
Concrete thickness (mm)	53.0	25.4
Nominal density (gm/cm ³)	3.04	2.35
S/C ^{*1)}	3.0	2.26 ^{*3)}
W/C ^{*2)}	22.3	21.2
Cement (kg/m ³)	833	765
Water (kg/m ³)	186	162
Iron ore (kg/m ³)	2 499	432
Sand (kg/m ³)	none ^{*4)}	1 297
Compressive strength (7 days)(kgf/cm ²)	≥ 210	≥ 210

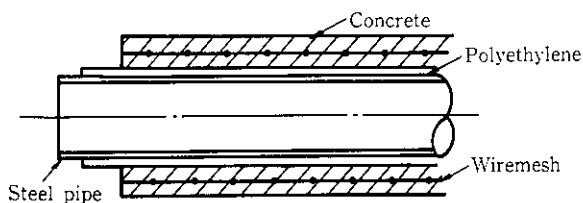
Note

*1)S/C means aggregate-cement ratio.

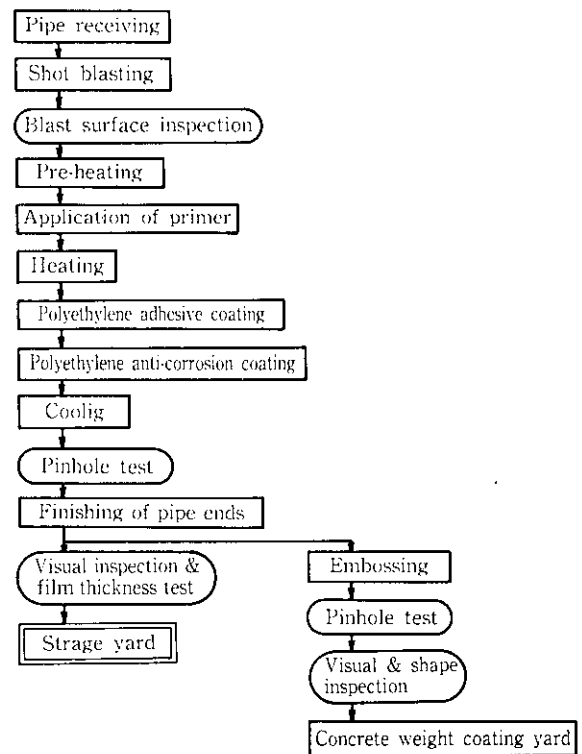
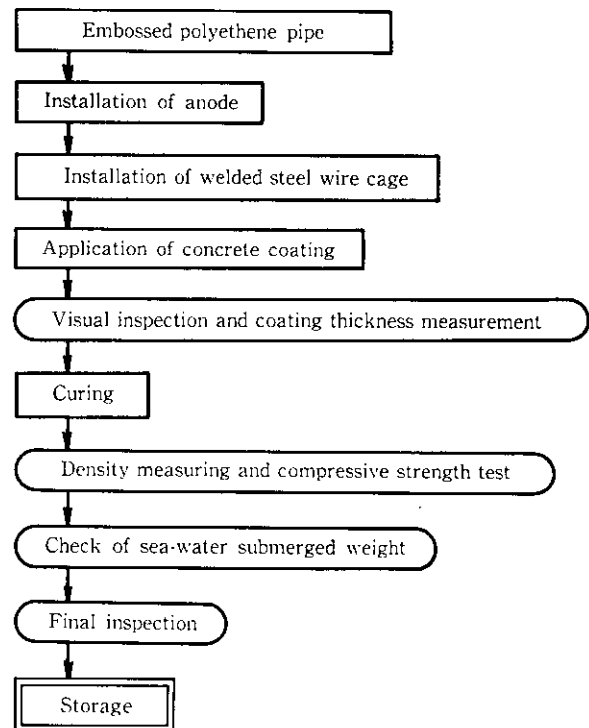
*2)W/C means water-cement percentage.

*3)The ratio of iron ore and sand is about 1:3.

*4)Small amount of sand might be used to adjust density.

Fig. 3 Schema of concrete and polyethylene coated pipe¹⁾

し、続いて高密度ポリエチレン(目標厚み: 3.0 mm 以上)を押し出す。このあと、エンボス加工工程を経て、コンクリートコーティング工程に入る。

Fig. 4 Manufacturing and inspection procedure of external coating¹⁾Fig. 5 Manufacturing process of concrete coating¹⁾

コンクリート材料には、ASTM 規格が適用され、その主な仕様を Table 6 に示すが、コンクリート厚み、比重等を敷設位置により適宜変えている点に特徴がある。また、コンクリートの圧縮強度も $350 \sim 500 \text{ kgf/cm}^2$ と仕様を十分満足している。コンクリートライニングした被覆鋼管の断面を Fig. 3 に示す。

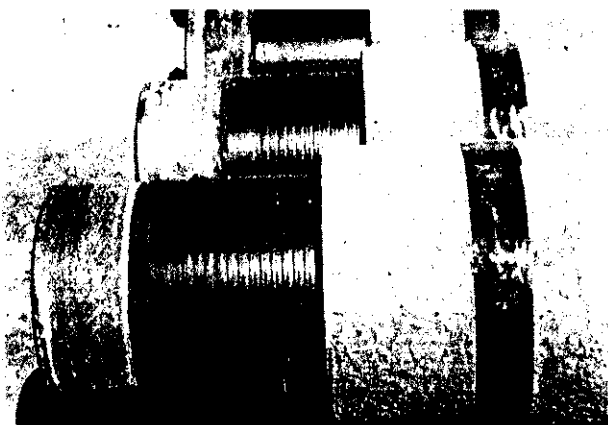


Photo 3 Embossed polyethylene and concrete coated pipes¹⁾

以上の工程を経て製造された複合管のポリエチレン/コンクリート間の付着強度は 12 kgf/cm^2 (仕様: $\geq 2.5 \text{ kgf/cm}^2$) 以上あり、エンボス加工をしない被覆鋼管 (以下一般の被覆鋼管と称す) の $0.4 \sim 0.6 \text{ kgf/cm}^2$ に比べ、実に $20 \sim 30$ 倍の付着強度が得られた¹⁾。

なお、具体的な被覆工程を Fig. 4 に、コンクリートコーティング工程を Fig. 5 に示す。また、エンボス加工付きポリエチレン被覆コンクリートコーティング鋼管の製品を Photo 3 に示す。

4 実用材料力学特性

敷設船を使った代表的な敷設工法²⁾を Fig. 6 に示すが、船上で長さ 12 m のパイプを流れ作業で溶接し船尾から海中に送り出される。この敷設工法および海底での損傷を想定し実用性能調査を行った。

4.1 供試材

供試材としては、外径 324.0 mm 、肉厚 9.5 mm の鋼管外表面に厚さ 3.0 mm の高接着型ポリエチレンを被覆したあと、エンボス加工工程を経て、厚さ 53.0 mm の補強鋼線入りコンクリートコーティングをしたものを使用した。

4.2 偏平試験

パイプ固定装置 (Tensioner) による上下からの偏平力に対する変形挙動を調べるため 200 t 試験機を使って行った。結果を、Fig. 7 に示すが、一般の被覆鋼管に対し、エンボス被覆鋼管は、最終のコンクリート亀裂およびポリエチレンコンクリート間剝離荷重とも 5 tf 程度大きいことが分る。

これは、エンボス模様により、ポリエチレン外表面とコンクリート面の一体性が増し、コンクリートの剝落が抑制されたものと考えられる。

4.3 曲げ特性

パイプ敷設時の曲げ半径 (R) を求め、曲げ試験を行った。設計時の最小曲げ半径は、以下の公式により求められている。

$$R = \frac{E \cdot D}{2\sigma_0 \cdot D_F} \quad (3)$$

R = Overbend radius of curvature (ft)

E = Elastic modulus ($\approx 30 \times 10^6 \text{ psi}$)

D = Outside steel diameter of pipe (ft)

σ_0 = Minimum specified yield stress of pipe

D_F = Design factor, usually 0.85

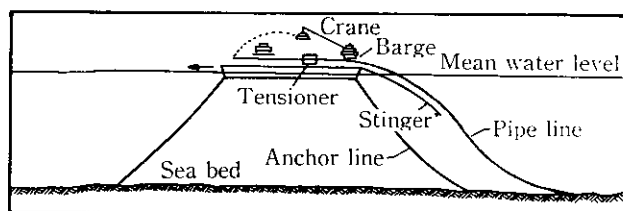


Fig. 6 Method for constructive pipe line (A.H. Mousselli²⁾)

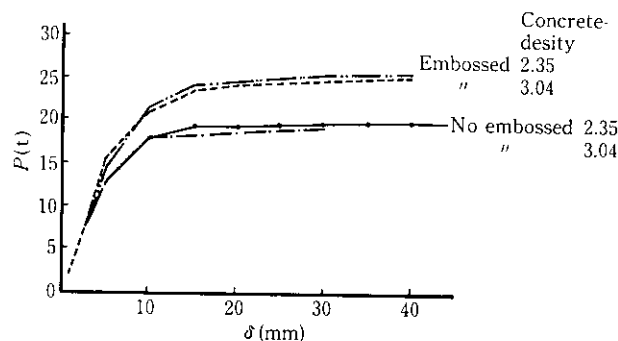


Fig. 7 Relations between press-down load and deformation quantity¹⁾



Photo 4 Setup for bending test¹⁾

上式をもとに、今回製造した鋼管の仕様より曲げ半径 R を計算すると、 $R=110 \text{ m}$ となる。

次に、この曲げ半径に対するエンボス被覆鋼管の耐力および剛性等を把握するため、実長パイプ (長さ 12.2 m) を使って単純曲げ載荷テストを行った。

試験状況を Photo 4 に示すが、中央 2 点集中載荷方式としコンクリートが圧縮破壊するか、または、ポリエチレン外表面からコンクリートが剝離するまで荷重を漸次増加させた。

結果は Fig. 8 に示すように、一般の被覆鋼管の曲げ耐力が 21 tf に対しエンボス被覆鋼管は 26 tf で、エンボス模様が曲げ耐力に寄与していることが分かる。また、クラックの発生状況も、一般の被覆鋼管は発生範囲が広く幅も大きい、エンボス被覆鋼管はヘアークラック状で深さ、程度ともに小さかった。

同じく、次式により曲げ剛性 ($E_s \cdot I_c$) を求めた³⁾。

$M_p = 40 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ($P=20 \text{ tf}$) および曲率 $\rho=1/110$ の値を挿入した場合の曲げ剛性 ($E_s \cdot I_c$) を Fig. 9 に示す。

$$\text{曲げ剛性 } E_s \cdot I_c = \frac{M_p}{\rho} \quad (4)$$

E_s : 弾性係数

I_c : 断面二次モーメント

M_p : 曲げモーメント

ρ : 曲率 ($1/R$)

Fig. 9 よりエンボス被覆鋼管の曲げ剛性は、一般の被覆鋼管に対して約 1.4 倍と大きいことが分かる。したがって、今後、荒天時、または深海での敷設作業におけるパイプ損傷の軽減が期待できる。

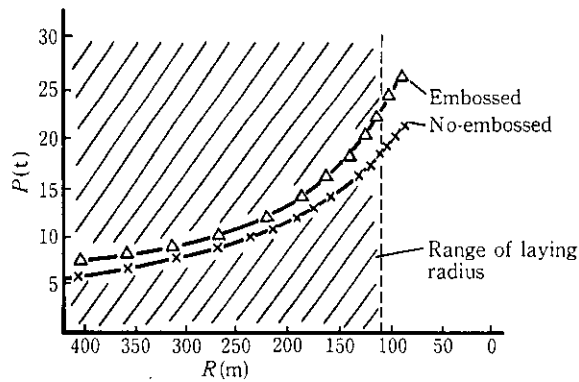


Fig. 8 Relation between load and radius bending¹⁾

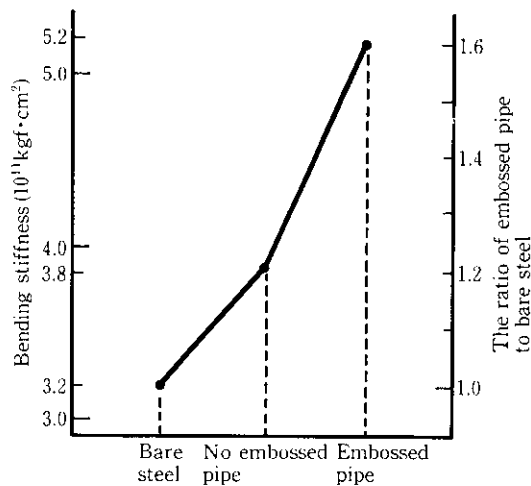


Fig. 9 Bending stiffness¹⁾

Table 7 Results of impact test¹⁾

Drop height	Crack length of longitudinal section	
	Embossed	No-embossed
1 m	0.25 m	1.0 m
3 m	0.8 m	rupture of concrete coating

4.4 オッターボード衝撃試験

海底でのパイプラインには、潮流、海底土の移動、地震による地圧など自然環境からの外圧に加え、船舶からの投端、地曳き網漁業（トロール漁業）の漁網用金具（オッターボード）の衝突などさまざまな外力が加えられる。この外力に対する抵抗力を把握するため、日本近海で使用されているトロール漁船用オッターボード（縦：2.0 m、横：1.5 m、幅：0.2 m、重量：1.5 t）を使用し落錘試験を行った。

Photo 5 に落錘試験の状況を示すが、サンドマット上に供試管を置き、オッターボードを高さ 1.0 m および 3.0 m の位置から管軸に対し落下させ破壊状況を調査した。結果を Table 7、Photo 6 および Photo 7 に示すが、エンボス被覆鋼管は、ポリエチレン外表面とコンクリート間の付着力（スティフネス）が強く、衝撃によるコンクリートの損傷が著しく小さいことが分かる。

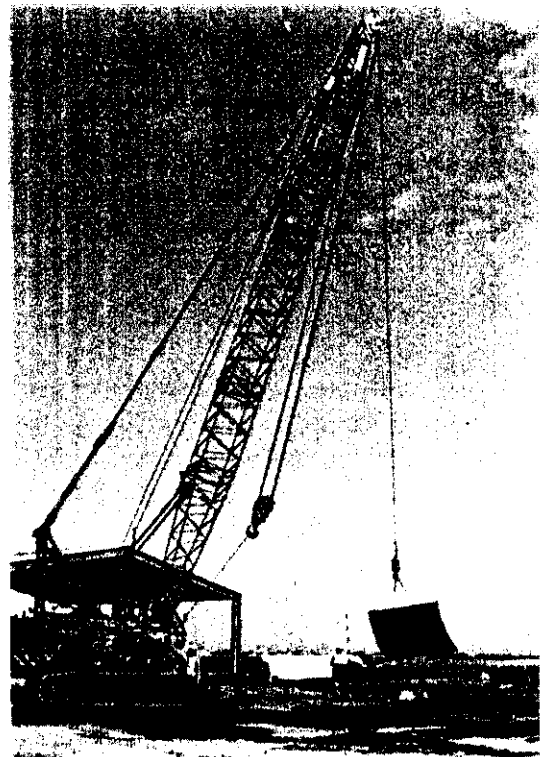


Photo 5 Impact test¹⁾



Photo 6 Rupture of no-embossed pipe after 3 m height impact test¹⁾

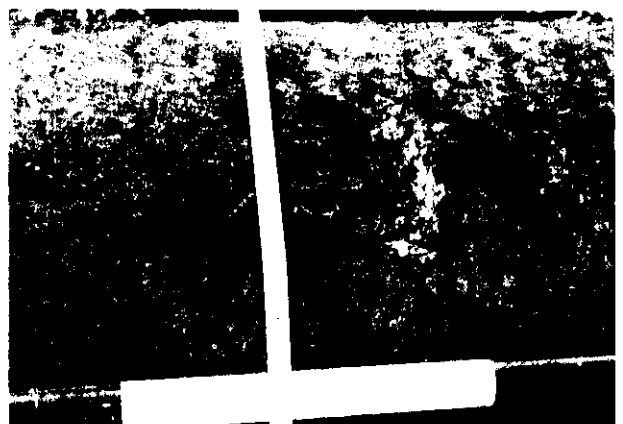


Photo 7 Damage of embossed pipe after 3 m height impact test¹⁾

5 結 言

防食性に優れた高接着型ポリエチレン被覆鋼管の外表面にエンボス加工を施すことにより、コンクリートとの付着力は著しく強化され、一般の被覆鋼管に比較し、その付着強度は約 30 倍 (12 kgf/cm^2)

となった。この大きな付着強度を有する被覆鋼管は敷設時の偏平力および曲げ応力等に対し卓越した耐力を示し、海底での衝撃にも優れた性能を発揮することが確認された。

この優れた特性をもつエンボス被覆鋼管は、商業用ガス田としてはわが国で二番目となった磐城沖ガス油田の海底ラインパイプ用として約 1000 t 使用され、昨秋、無事敷設工事を完了した。

参 考 文 献

- 1) Y. Ikeda, S. Oba, M. Sato, K. Shibagaki, T. Tamura and S. Minamiya: "The Development of Embossed Polyethylene Coated Pipe for Offshore Pipeline", Preprint of 5th International Conference, Innsbruck (Austria), BHRA Fluid Engineering, October (1983)
- 2) A.H. Mousselli: "Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods" (1981) [Penn Well Books]
- 3) M. Sato, M. Hara, M. Ishiwata, E. Yamanaka: Kawasaki Steel Technical Report, (1982) 5, 5