

パイプインパイプ用フレキシブルパイプの開発

Development of Flexible Pipe for Pipe-in-Pipe Technology

籠浦 徹*
Toru Kagoura

石井 健一*
Kenichi Ishii

安部 智*²
Satoru Abe

井上 哲夫*²
Tetsuo Inoue

林 隆義*³
Takayoshi Hayashi

坂本 隆*⁴
Takashi Sakamoto

望月 孝*⁴
Takashi Mochizuki

山田 知裕*⁴
Tomohiro Yamada

概要 日本各地の石油コンビナートに布設されている既設海底パイプライン内に一連続長のパイプを布設し、新たな流体輸送ネットワークを構築する「パイプインパイプ工法」の実用化を行った。多くの厳しい曲がり部が存在する長距離海底パイプライン内に新たなパイプを布設するためには、可撓性に優れた軽量フレキシブルパイプの開発が必要であったが、古河電気工業(株)、新日本製鐵(株)、出光興産(株)が連携して開発を進め、高圧液化石油ガス輸送用のフレキシブルパイプとして特別認定を取得した。開発したフレキシブルパイプは、平成14年7月に出光興産 徳山製油所内の既設海底配管(全長3.3 km)内に無事布設が完了した。

1. はじめに

日本各地の石油コンビナートには、石油・ガス等の流体輸送のため種々の海底パイプラインが布設されている。それらの中には老朽化が進み再建時期を迎えているものもあり、老朽化したパイプラインの再建技術として既設のパイプライン内に水を注水し、流体浮力を利用して新たなパイプラインを布設し、流体輸送のネットワークを構築する「パイプインパイプ工法」の適用を試みた。多くの厳しい曲がり部が存在する既設長距離パイプライン内に新たにパイプを布設する場合、軽量かつ可撓性に優れたパイプを適用する必要がある。古河電気工業(株)は、過去に海洋油田用として金属補強層とプラスチックの複合構造であるフレキシブルパイプを実用化¹⁾してきた。図1に実用化されているフレキシブルパイプの基本構造を示す。フレキシブルパイプは、海底で採掘された原油や天然ガス等を海上の浮遊式石油生産設備やタンカー等へ輸送するライザーパイプや、海底に布設されるフローラインとして海外では多くの実績²⁾³⁾があるが、国内における高圧液化石油ガス輸送用のパイプラインとして適用された実績はなく、更に既設パイプライン内に長距離布設された例もない。

現在、石油コンビナート高度統合運営技術研究組合(RING)が、国内のコンビナートの国際競争力強化を目的とし、経済産業省からの補助金を受けて「コンビナート・ルネッサンス構想」の具体化として研究開発事業を推進している。その一環として、

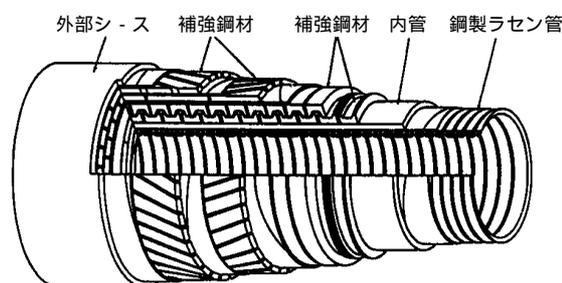


図1 フレキシブルパイプの基本構造
Basic structure of flexible pipe

徳山地区(出光興産(株)製油所を中心としたコンビナート)においてパイプインパイプ工法の技術開発を行った。本報では、古河電気工業(株)、新日本製鐵(株)、出光興産(株)が連携して行った軽量フレキシブルパイプの設計、プロトタイプによる性能検証の概要について述べる。

2. フレキシブルパイプの設計

2.1 準拠規格

フレキシブルパイプは海外では多くの実績があり、API(American Petroleum Institute)等の規格もあるが、国内では適用実績がないことから高圧ガス保安協会(KHK)による性能評価委員会の審査を受け、特別認定を取得する必要がある。そのため、既設パイプライン(導管)に適用されている高圧ガス法規のコンビナート等保安規則関係基準(以下コンビ則)に準拠して検討を行った。表1に、フレキシブルパイプの設計に際し考慮すべき荷重とその許容応力についてコンビ則の考え方を示す。コンビ則では荷重条件や材質に応じた許容応力が規定されており、それぞれの荷重条件において生じる応力が許容応

* 研究開発本部 環境・エネルギー研究所

² 電力事業部 電力エンジニアリング部

³ 出光興産株式会社 徳山製油所 技術課

⁴ 新日本製鐵株式会社 鉄構海洋事業部

表1 考慮すべき荷重及び許容応力
Design loads and allowable stresses

考慮すべき荷重		許容応力
主荷重 (運用時に常時作用する荷重)	内圧	円周方向応力 降伏応力の40%の値と0.5(1.6 -) 倍の値で最小のもの : 引張強さと降伏応力の比 (降伏応力/引張強さ)
		軸方向応力 降伏応力の50%の値
	ガス重量 外圧	引張強さの33.3%の値と降伏応力の66.7%の値で最小のもの (ステンレス鋼材料に適用)
従荷重 (設置時等で一時的に作用する荷重)	布設張力	降伏応力の90%の値

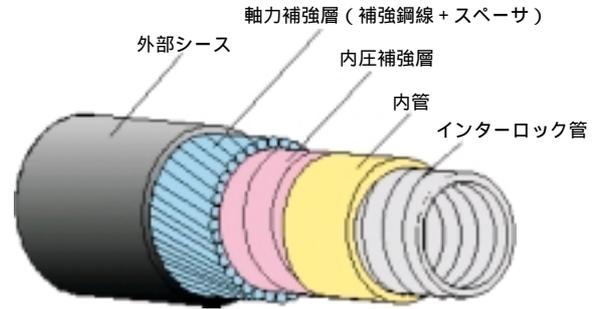


図2 最適軽量化構造
Structure of light-weight flexible pipe

力以下となるように強度設計することが規定されている。これらの許容応力は安全率が考慮された値となっているが、特に内圧に対してはAPI規格に比べてより厳しい設計基準となっており、従来以上の設計強度が要求された。

2.2 パイプ構造の検討

従来構造のパイプを曲がり有する長距離パイプライン内に布設した場合、布設張力が増大しパイプの破断張力を上回る恐れがあり、パイプインパイプ工法にフレキシブルパイプを適用するためには布設張力を低減させることが重要な技術課題となった。種々のパイプ構造検討及び試設計の結果、既設配管内に水を注水して流体浮力により布設張力を低減させる浮力延線工法を適用し、更にフレキシブルパイプの水中重量を軽量化することが最も効果的であることがわかった。また、曲がり部をスムーズに通過させるためには可撓性に優れている必要があり、パイプの曲げ剛性や外径をできる限り小さくすることが必要となった。

2.2.1 設計条件

フレキシブルパイプの構造検討に必要な設計仕様を以下に示す。布設張力は、新日本製鐵の検討により、パイプの曲げ剛性による張力増分や曲がり部での接触状態を考慮した新たな引き入れ張力計算式で推定した⁴⁾。

- 内径; 5 inch
- 外径; 7 inch 程度
- 内圧; 2.8 MPa
- 外圧; 0.12 MPa
- 布設ルート長 (パイプ長); 3.3 km
- 最小曲げ半径; 1450 mm
- 曲がり部; 5 箇所
- 布設張力; 80 kN (推定値)
- 引張破壊強度; 320 kN (布設張力の4倍)

2.2.2 パイプ構造設計

上記設計条件に基づき、パイプの軽量化、曲げ剛性低減、外径縮小化対策のため、布設張力を分担する軸力補強層については従来の二重鋼線鎧装構造ではなく一重鋼線鎧装構造を採用した。更に、一重鎧装の構成については鋼線補強層と比重の小さ

いプラスチックスペーサ層の複合構造を採用し、布設張力での発生応力が許容応力以下となり、引張破壊強度は布設張力の4倍を確保できる必要最小限の鋼線本数となるよう構成比率の最適化を行った。

内圧補強層については、構造上プラスチック層に挟まれていることや静的環境下で使用されることから、腐食や摩耗による肉厚減少を考慮する必要がなく、更に肉厚精度の高い薄肉鋼帯を採用することで、許容応力に対する余裕をほぼ1.0とした最適設計を行い、軽量化と曲げ剛性低減を図った。以上の対策により、気中重量約27 kg/mに対し、水中重量が極めて軽量化構造(0.6 kg/m)のフレキシブルパイプを設計することができた。最適軽量化構造を図2に、構造諸元及びコンビ則に基づく許容応力を表2に示す。

2.3 強度検討

最適軽量化構造で内圧により発生する円周方向応力及び軸方向応力について内圧補強層及び軸力補強層の強度設計を実施した結果、いずれもコンビ則に基づく許容応力以下となることを

表2 最適軽量化構造
Structure of light-weight flexible pipe

主要層 (材質)	機能	許容応力 [N/mm ²]	仕様
インターロック管 (ステンレス鋼)	外圧及び側圧補強	主荷重; 221 従荷重; 450	内径; 127.0 mm 外径; 134.0 mm
内管 (ナイロン11)	内部流体の保持	—	内径; 135.4 mm 外径; 148.8 mm
内圧補強層 (冷間圧延鋼帯)	内圧補強	主荷重; 214	0.5 mm t × 2枚 内径; 149.8 mm 外径; 151.8 mm
軸力補強層 (亜鉛メッキ鋼線)	軸力補強	主荷重; 200 従荷重; 360	7 mm × 15本 内径; 153.8 mm 外径; 167.8 mm
軸力補強層 (ポリエステル)	スペーサ	—	7 mm × 52本 内径; 153.8 mm 外径; 167.8 mm
外部シース (ポリエチレン)	外傷保護	—	内径; 170.7 mm 外径; 183.1 mm
気中重量			26.9 kg/m
水中重量			0.6 kg/m
最小曲げ半径			1450 mm
曲げ剛性			1.2 × 10 ⁴ N・m ²

確認した。また布設張力に対する軸力補強層の強度設計においても許容応力以下となり、強度設計上問題ないことを確認した。以下に内圧、布設張力、外水圧（静水圧）による強度検討例を示す。

2.3.1 内圧に対する強度検討

(1) 内圧補強層

内圧により生じる円周方向の応力は、内圧補強層で分担する。その発生応力は式(1)で与えられる。

$$= \frac{P(D-t)}{2t \sin} \quad (1)$$

ここで、

；発生応力

P ；内圧

D ；外径

t ；厚さ

；巻き付け角

上式において内圧により発生する円周方向応力は212 N/mm²であり、表2に示す内圧補強層の許容応力214 N/mm²以下となる。最適設計を図っているため、許容応力に対する裕度はほぼ1.0となっている。

(2) 軸力補強層

内圧により発生する軸方向応力は、軸力補強層で分担し、その発生応力は式(2)で与えられる。

$$= \frac{A_p P}{NA \cos} \quad (2)$$

ここで、

；発生応力

A_p ；パイプ内断面積

P ；内圧

N ；軸力補強層本数

A ；1本あたりの軸力補強層断面積

；巻き付け角

上式において内圧により発生する軸方向応力は64 N/mm²であり、表2に示す軸力補強層の許容応力200 N/mm²以下となり十分な強度を有している。

2.3.2 布設張力に対する強度検討

布設張力により発生する軸方向応力は、軸力補強層が分担するので式(2)において分子 $A_p P$ を布設張力 T と置きかえることによって得られる。

布設張力により発生する軸方向応力は143 N/mm²であり、表2に示す軸力補強層の許容応力360 N/mm²以下となり十分な強度を有している。また、引張破壊強度は320 kNとなり、布設張力の4倍を確保している。

2.3.3 外水圧に対する強度検討

フレキシブルパイプの静水圧下における外圧座屈強度は最内層のインターロック管が分担し、その外圧座屈強度は式(3)で与えられる。

$$P = \frac{3EI}{R^3} \quad (3)$$

ここで、

P ；外圧座屈強度

E ；インターロック層の弾性係数

I ；インターロック層の断面二次モーメント

R ；インターロック層の巻き付け半径

上式よりインターロック層の静水圧による外圧座屈強度は2.39 MPaとなり、設計外圧0.12 MPaに対して20倍程度の安全率を有している。なお外圧座屈に関しては過去のデータからも設計値と実測値は良く一致していることが確認されており、強度的には全く問題がないレベルである。

3. プロトタイプによる性能検証

上記のように設計した最適軽量化構造のプロトタイプを工場試作して、その安全性と設計の妥当性を検証するため以下に示す各種性能検証試験を実施した。

3.1 気密試験

3.1.1 試験方法

フレキシブルパイプの気密性能を確認するため、約4 m長の試料両端に試験用端末を組み立て、試料内部にN₂ガスを充填し、設計圧力(2.8 MPa)まで昇圧して10分間保持し、漏洩等の異常の有無を確認した。

3.1.2 試験結果

漏洩等の異常はなく、気密性能に問題ないことを確認した。

3.2 耐圧試験

3.2.1 試験方法

フレキシブルパイプの耐圧性能を確認するため、気密試験と同一の試料を用い、試料内部に水を充填し、設計圧力の1.5倍の圧力(4.2 MPa)まで昇圧して10分間保持し、漏洩等の異常の有無を確認した。

3.2.2 試験結果

漏洩等の異常はなく、耐圧性能に問題ないことを確認した。

3.3 内圧破壊試験

3.3.1 試験方法

フレキシブルパイプの内圧破壊値を確認するため、気密試験及び耐圧試験と同一の試料を用い、試料内部に水を充填し、パイプが破壊するまで昇圧した。写真1に試験状況を示す。



写真1 内圧破壊試験状況
Burst pressure test

3.3.2 試験結果

内圧破壊値は12.6 MPaとなり、常用圧力の4倍以上の耐圧性能を有し、設計値と同等以上であることを確認した。破壊状況は写真2に示すとおり内圧補強層が破断しており、プラスチック内管に破壊孔はなかった。

3.4 曲げ試験

3.4.1 曲げ剛性測定

(1) 試験方法

約3.5m長の試料の両端に油圧シリンダーとロードセルを取り付け、油圧シリンダーにて試料に曲げ（曲げモーメント）を与え、曲げモーメントと曲率半径を測定し、曲げ剛性EIを求めた。写真3に試験状況写真を示す。

(2) 試験結果

曲げ剛性は $0.9 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ で設計値（ $1.2 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ）に比べて若干小さい値となったが、布設面では安全サイドとなる。

3.4.2 繰り返し曲げ試験

(1) 試験方法

布設時の曲げ履歴を想定して、約10m長の試料を用い半径1400mmのバンド板に試料を沿わせて曲げを与えた後、試料を元に戻し、反対方向に同様の曲げを与えた。この操作を5サイクル（曲げ回数10回）行った後、試料を解体調査して異常

の有無を確認した。曲げ半径については布設ルート上の最大曲がり部相当とし、曲げ回数は実際に受ける曲げ回数に対して2倍の裕度を見た。試験状況を写真4に示す。

(2) 試験結果

解体調査の結果を写真5に示す。最小曲げ半径の繰り返し曲げに対して内圧補強層やそれ以外の構造にも問題はなく、布設時に受ける曲げ履歴に対して全く問題ない性能を有している。

3.5 引張破壊試験

3.5.1 試験方法

フレキシブルパイプの引張特性を確認するため約4m長の試料両端に試験用末端を取り付け、片端にロードセルを取り付けて固定し、他端に油圧シリンダーを接続して布設張力80kNを作用させ10分保持した。破断等の異常の有無を確認した後、張力を上げて破壊張力を確認した。試験状況を写真6に示す。

3.5.2 試験結果

布設張力80kN×10分の履歴において破断等の異常がないことを確認した。また破壊張力は、321～335kNで設計値と同等であり、布設張力の4倍以上の実力を有していることを確認した。写真7に破壊箇所を示す。



写真2 破壊箇所の状況
Breakdown point of pressure test



写真5 内圧補強層
Appearance of pressure reinforcements after bending test



写真3 曲げ剛性測定状況
Measurement of flexural rigidity



写真6 引張試験状況
Tensile test



写真4 曲げ試験状況
Bending test



写真7 破壊状況
Breakdown point of tensile test

3.6 引き入れ試験

3.6.1 試験方法

曲がり部布設時のフレキシブルパイプの側圧性能及び耐外傷性を確認するため、約12 m長の試料の両端に布設用端末を取り付け、曲率半径1.5 m、曲がり角度180°、内面に既設配管より厳しい溶接ビード部を設けたマイターバンド管の中にパイプを引き入れた状態で両端張力を与え、曲がり部での側圧履歴を与えた。

次にバックテンションを与えながらウインチにてパイプを引き入れ、パイプの座屈の有無及び外部シースの外傷の程度を確認した。試験状況を写真8に示す。

3.6.2 試験結果

曲がり部中央での張力とパイプ変形（水平方向外径；側圧方向、垂直方向外径）の関係を図3に示す。100～120 kNあたりまでは線形性を有しており、布設張力80 kNレベルでは座屈等の問題がないことがわかる。



写真8 引き入れ試験状況
Laying test

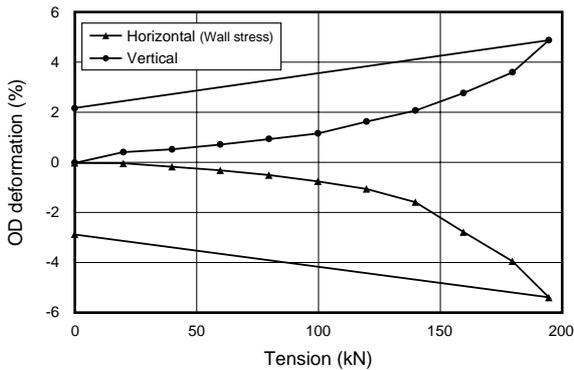


図3 張力とパイプ変形の関係
Relationship between tension and OD deformation



写真9 試験後の外部シース
Appearance of outer sheath after laying test

また、布設張力（80 kN）を上回る張力（安定時；80 kN / 最大；80～150 kN）で引き入れ履歴を与えた結果、パイプに座屈等の異常はなく、外部シースの外傷についても溶接ビードによる傷深さは僅か（写真9）であり、問題となるレベルではなかった。

試験後の解体調査の結果、各補強層、内管とも構造上の異常はなく引き入れ履歴に対して十分な性能を有していることを確認した。写真10に解体した試料の内圧補強層を、写真11に同インターロック管を示す。

4. 性能検証試験まとめ

最適軽量化構造のプロトタイプ管で各種性能検証試験を実施し、気密特性、耐内圧特性、内圧破壊特性、耐布設張力特性、曲げ特性、布設時引き入れ特性とも問題のないことを実証した。これらの成果により、高圧ガス保安協会および有識者らによる性能評価委員会の審査に合格し、高圧液化石油ガス輸送用のフレキシブルパイプとして特別認定を取得した。

5. おわりに

厳しい曲がりが存在する長距離パイプライン内に浮力延線法を用いて布設可能な軽量フレキシブルパイプを新日本製鐵、出光興産と連携して開発した。本開発品は平成14年1月に一連続長3.3 kmの製造を完成し、平成14年7月には出光興産 徳山製油所内の既設海底配管（3.3 km）の再建工事に初適用され、無事布設が完了した。現在実施されているガス輸送の実証試験が完了すれば、国内では初めて高圧液化石油ガス輸送用としてフレキシブルパイプが適用されることとなる。本開発品が今後の石油コンビナートにおける再建事業に貢献できれば幸いです。なお開発にあたりご協力頂いた関係各位に感謝致します。



写真10 試験後の内圧補強層
Appearance of pressure reinforcements after laying test



写真11 試験後のインターロック管
Appearance of interlocked conduit after laying test

参考文献

- 1) 牧野, 他 : “大水深用フレキシブルパイプの開発” 古河電工時報, 第93号 (1993) 102.
- 2) Y.Makino, K.Ishii, and T.Fuku: “Development of Light-Weight Flexible Pipe,” OTC7262 (1993)
- 3) K.Ishii, Y.Makino, and T.Kagoura: “Flexible Riser Technology for Deep Water Applications,” OTC7726, (1995)
- 4) T.Mochizuki et al.: “Experimental and Analytical Study for the Installation of Flexible Pipe In The Existing Submarine Pipeline By Pipe-In-Pipe Technology,” ISOPE, (2003)