

LNG 地下式貯槽折曲げ型側部メンブレンの開発

Development of Bended Corrugation Type Side Membrane of Inground LNG Storage Tanks

技術本部 亀井博正^{*1} 出口明雄^{*2}
 横浜製作所 西岡信之^{*3} 山鳥富己雄^{*4}
 小粥康弘^{*5} 熊倉益男^{*6}

LNG 地下式貯槽側部メンブレン構造の溶接線長低減による信頼性向上を目的として、従来のへり溶接型に代わる折曲げ型を開発した。折曲げ型実現のために、多条ひだシート及びその成型機の開発、コーナピース・上端ピース等の各メンブレン要素の開発とその強度検証、低ひずみ溶接工法の開発を行った。さらに、工場ブロック製作から現地据付け作業までの検証を一貫して行い、その実現性を確認した。この結果、溶接線長の約 30% 低減と溶接による面外ひずみ量の 90% 低減を達成し、側部メンブレンの信頼性向上に大きく寄与した。

In recent years, LNG storage facilities have increasingly been installed having larger capacities due to the expanded demand for natural gas. This trend also leads to the requirements for a higher level of reliability of these facilities. To meet such concerns, MHI has developed the new side membrane system for inground LNG storage tanks applying bended corrugations. This new side membrane is formed with four (4) corrugations in larger units of panels, in order to reduce the welding length. Also, a plasma welding method for thin stainless steel plate has been developed to minimize the deformation caused by welding heat. The stability of all parts have been confirmed against thermal and pressure load and its fatigue strength was checked through repeated examinations using real membrane parts. Also, shop fabrication and site installation have been demonstrated to ensure its feasibility. As a result, the welding length was reduced to approximately 30% compared to the former side membrane system.

1. 緒言

世界のエネルギー需要に占める天然ガスの割合は、他の化石燃料と比べて近年加速度的に増加しており、今後も更なる増大が見込まれている。

天然ガスは、 -162°C まで冷却しほぼ大気圧下で液化した LNG (Liquified Natural Gas: 液化天然ガス) として貯蔵することによりその運用性及び安全性が向上するため、天然ガス需要の増大に伴い LNG 貯蔵設備の増設が各地で計画されている。なかでも地下式貯槽は、周囲の景観への配慮と敷地の経済的利用が可能で、大容量化が容易に図れるため、今後さらに増加・大型化する傾向にあり、その大型化に伴う信頼性の向上が重要課題となっている。

こうした状況にかんがみ、従来の側部メンブレンへり溶接ひだに代え、高疲労強度の折曲ひだを適用し、溶接線長低減と信頼性向上を主目的とした折曲げ型側部メンブレンを実用化した。

2. メンブレン構造の概要

地下式貯槽においては、内部をメンブレンと称するステンレス鋼製の薄膜で覆って液密性・気密性を確保しており、このメンブレンには LNG の極低温という性状に起因する熱応力を変形能で吸収するための「ひだ」が設けられている。当社の側部メンブレンは、直角方向のみ熱収縮機能を持つひだを互いに直交するように格子状に組合せたものである。本形式は旋回收縮型と称されており、この熱収縮吸収機構を図 1 に示す。図 1 において二重矢線は一つのひだを示し、ひだ相互は直角に接し市松模様を形成している。今、図の CX 部材に注目すると、B を不動点として熱収縮し、点 C、X が各々点 C'、X' に変位する。同様に他のひだについても部材の熱収縮に相当するだけ四辺のひだが開くので、各 A、B、C、D 点は A'、B'、C'、D' 点に変位する。各部材とも同一長さであ

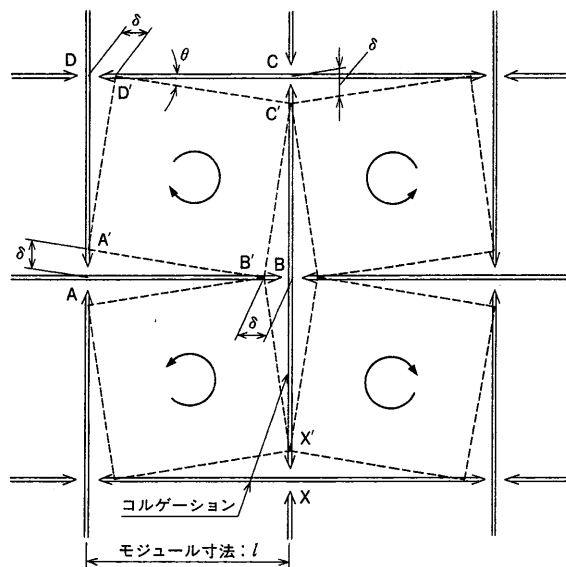


図 1 メンブレンの熱収縮吸収機能 メンブレンが極低温に冷却されたときの熱収縮を吸収する機構を示す。
 Schematic plan to show how lattice corrugation work to absorb thermal shrinkage

るからその変位量は等しく、次の式で表される。

$$AA' = BB' = CC' = DD' = \delta = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$$

ここに、 α : 線膨張係数

ΔT : 温度差

l : 市松モジュール幅

したがって、正方形板 ABCD は相似に熱収縮し剛体回転を行っただけであり、形状の変化を生じない安定した変形挙動を示すこととなる。このひだの形状として従来は平板の端部をフランジ加工し、上縁を 2 枚重ね合わせて溶接することで合掌形断面 A を形

*1 高砂研究所製造技術開発センター主務

*2 横浜研究所構造・強度研究室長 工博

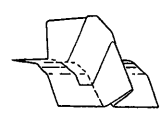
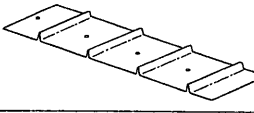
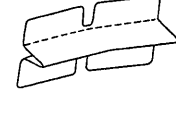
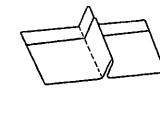
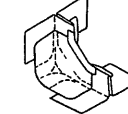
*3 鉄構技術部プラント設計課主務

*4 鉄構技術部建設課

*5 鉄構技術部プラント設計課

*6 鉄構工作部生産技術課

表1 折曲げ型側部メンブレン新規構造要素のポイント
Technical point of new element in bended corrugation type side membrane

部 位	ポ イ ン ト
上端ピース 	○部材の小型化 ○両端での屈曲 ○一体成型
多条ひだシート 	○折曲ひだ4条を配置 ○長尺部材採用による溶接線長低減 ○連続成形方法の確立
屈曲ひだ 	○折曲ひだをそのまま屈曲させる ○溶接部をひだ交差部に設けない ○2ステップ成形方法の採用
ジョグル部 	○ラップ部成形精度の確保 ○多条ひだ成形時の同時加工 ○ひだ拡幅部の滑らかな形状変化
コーナピース 	○小ピース化による加工性向上 ○応力集中部の母材化 ○据付け部の左右分離による施工性向上

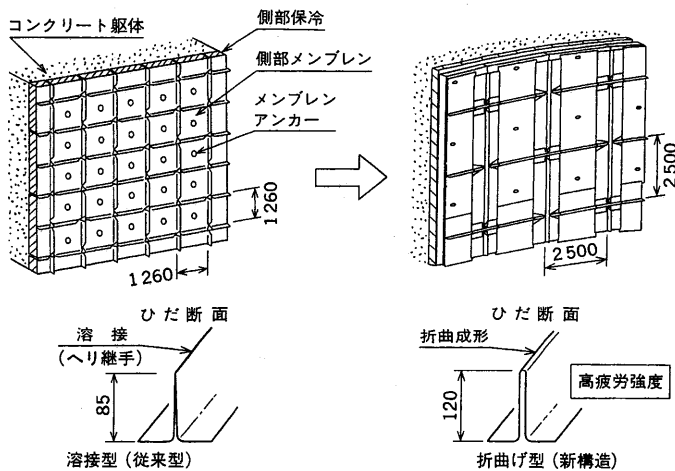


図2 メンブレン構造比較 従来型のヘリ溶接によるメンブレン構造と折曲ひだによる新構造の比較を示す。
Comparison of membrane structure

成したヘリ溶接型を採用していた⁽¹⁾。ヘリ溶接型ではひだが液圧によって密着するため、液圧・ガス圧によるひだの不安定崩壊（座屈）がないという利点がある反面、その構造から溶接線が長くなる欠点があった。

そこで、側部メンブレンのひだ形式としてこれまでのヘリ溶接型に代え、底部メンブレンで実績のある折曲ひだを採用した。折曲ひだは疲労強度が高いため、ひだ高さを高くすることにより1つの正方形の寸法（モジュール寸法）を拡大し、溶接線長を低減することが可能となる。図2にヘリ溶接型（従来型）と折曲げ型との構造を比較して示す。

3. 構造構成要素の開発

表1に折曲げ型側部メンブレンにおける新規開発要素と、その開発ポイントを示す。

3.1 多条ひだシート

底部メンブレンにおいては、1条の折曲ひだをすべて現地で交互に組合わせて市松モジュールを形成している。側部メンブレンにおいては、現地溶接の低減・工期短縮のために大型ブロック化が必要であり、底部メンブレンと同様の構造を用いるとブロック化ができず、また溶接線長の低減も難しい。そこで一枚の長尺板に一定間隔で折曲ひだを設けた多条ひだシートを採用した。この多条ひだシートを用いることで底部メンブレンのように各モジュールごとに小部材を組合わせる構造に比べ、溶接線長を減少させることが可能となった。

3.2 屈曲ひだ

平面である底部メンブレンと異なり、側部メンブレンはタンク円周方向に多角形を形成しており、多条ひだシートを用いて側部メンブレンを形成するためには、2枚のシートのひだを、多角形の隅角部において連続させる必要がある。このために、プレス成形によってひだ形状を保持しながら隅角部の角度に合わせて屈曲させた屈曲ひだを採用した。屈曲ひだの成形においては、スプリングバック量、加工じわの防止、ひだ断面形状の保持等を考慮した。試作の結果、一度成形した真直なひだを再度屈曲加工する、2ステップの成形方法を採用した。

3.3 ジョグル部（ひだ接続部）

多条ひだシートを用いて市松模様を形成するためには、ひだを長手方向に接続する必要がある。この部位には片側のひだにジョグルを設け、ラップさせる一般的手法を採用した。折曲ひだでは断面形状が直線的であるため、このラップ部の溶接時肌すき許容値が厳しく、ジョグル部の成形精度を確保する必要があった。そこで、多条ひだ成形時のプレス加工において同時にジョグル部を加工し、所定の寸法精度を確保することとした。

3.4 上端ピース

側部メンブレン上端部では、側部の鉛直方向ひだと、躯体（くたい）上端の水平方向ひだとを連続させる部位が生じる。このた

め、ひだを面外方向に90°屈曲させる必要があるが、これはひだ高さの高い折曲ひだでは加工上困難であった。そこで、端部の屈曲加工が可能な程度の小ピースを設け、両方向のひだとのラップ部で屈曲させる構造を採用した。

3.5 コーナピース

側部及び底部メンブレンのひだとコーナピースのひだとの交点は折れ角を持つため、応力集中部となる。そこで、この部分が溶接部とならぬようにプレス加工したピースをかぶせることとし、ピースの左右にはコーナメンブレンに接続するためにR形状にプレス加工した部品を配置して両者を重ね溶接で接続した。これにより、コーナメンブレンの施工段差を重ね代の幅で吸収することができ、コーナピースの施工性が向上した。

4. 多条ひだシート成形方法の確立

3.1節で述べた多条ひだシートの製作について、連続プレス加工による多条ひだシート製作方法を以下の点を考慮して検討した。

- 高い加工寸法精度の確保
- 板厚減少の極小化
- 平板部の平坦度確保
- ひだ側面の平坦度確保

これらの点について各種成形方法の検討、スケールモデルでのプレス試験を行った結果、次の知見が得られた。

- (1) ひだ部の寸法精度を向上させるためには、曲げ加工の過程において素材のずれを防止する必要がある。このために素材を上下方向にプレスして挟み込む必要がある。
- (2) 板厚減少を抑えるためには曲げ加工部への張力の付加を避ける必要があり、このためには素材を挟み込んだ上下の金型を互いに接近させ、面内方向に圧縮しながら曲げる方法が有効である。なお、おす型は、曲げ加工の最終段階において素材に接触させる。
- (3) 平板部及びひだ側面の平坦度確保のためにはスプリングバックを最小とする必要がある。このためにはプレス工程最終段階で素材を板厚方向に塑性域になる程度にプレスする方法が有効である。

これらの知見から、成形手順を図3に示すように決定した。図に示すとおり、成形加工中は素材の出し入れが必要ないため連続成形が可能であり、一枚の板に複数のひだを成形することができる。本手順に基づいて実際に成形機を製作し、多条ひだシート成形性の確認を行っている。

5. 要素試験によるメンブレン強度の確認

メンブレンには、温度変化による熱収縮をスムーズに吸収し過大な膜応力が生じないこと、及び通常運転時の液の出し入れによる温度変化、圧力変化の繰返し荷重等に対して十分な疲労強度を有することが要求される⁽²⁾。このため、①不安定崩壊を起こさないことの確認、②進行性変形が生じないことの確認、③静的荷重に対する安定性の確認を行う。疲労強度については、各メンブレン要素の疲労試験結果から求められる設計疲労曲線に基づき、疲労被害度の累積係数が1以下になることを確認する。

メンブレン構造は薄板で三次元的に構成されるために、局所的な応力集中や疲労強度を解析によって完全に把握することは困難である。そこで、これらの強度検証に当たっては、すべての項目に対して実物大供試体による要素試験を行った。折曲ひだは本質的に不安定崩壊を起こさないが、要素試験からこの点が確認され、

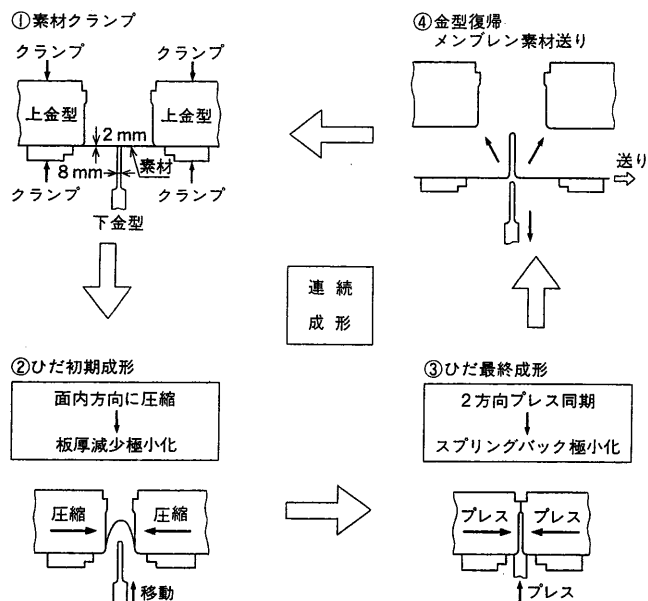


図3 多条ひだシート連続成形方法 多条ひだシートの連続成形の各過程を示す。
Continuous forming method of membrane sheet with 4 corrugations

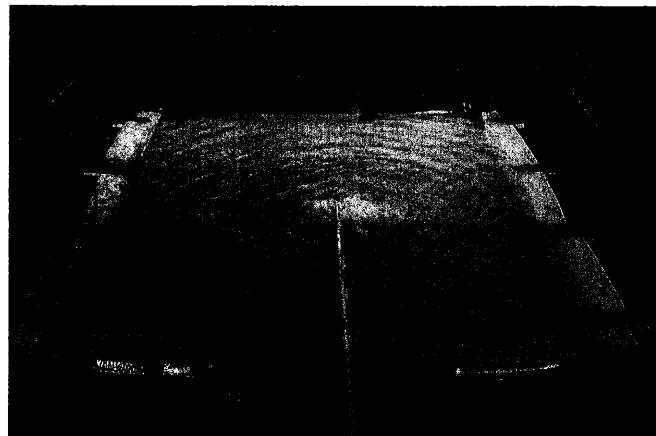


図4 3×3モジュール大型冷却試験状況 3×3モジュール大型冷却試験供試体にLN₂を注入している。
Cooling test of 3×3 modules side membrane

同様に、進行性変形が生じないこと、静的荷重に対する安定性も確認された。

特に静的荷重に対する安定性については、2.5 m角のモジュールを縦・横に3個ずつ並べた実物大モデルによるパターン挙動確認試験（冷却試験）を行い、メンブレンの熱収縮特性と変形挙動及び機能の健全性を確認した。実物大モデル冷却試験の試験状況を図4に示す。冷却試験後に浸透探傷試験を実施した結果、き裂等の発生は確認されず、変形挙動も2章で述べた設計値に一致していた。

20万 kJ クラスの貯槽での累積疲労被害度は、最大で0.3程度であり、折曲げ型側部メンブレンが大型貯槽においても十分な疲労強度を有することを確認している。

6. 低ひずみ溶接工法の開発

6.1 溶接方法の改善

折曲げ型側部メンブレンでは、多条ひだシートと各部材との接合はすべて重ね溶接によって行われる。また、メンブレンは薄板

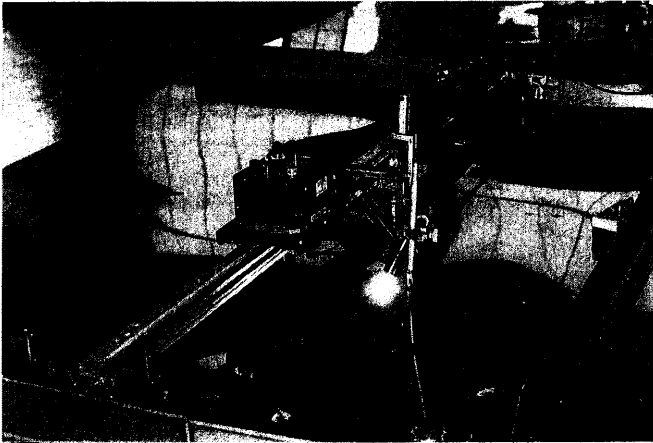


図5 プラズマアーク溶接状況 折曲げ型側部メンブレンに低ひずみ溶接法であるプラズマアーク溶接を適用している。
Applying plasma arc weld to membrane

表2 実機ブロックでの低ひずみ溶接工法の効果
Reduction of deformation by improved welding method
using actual membrane blocks

溶接方法	自動TIG溶接	自動プラズマアーク溶接
ひずみ防止対策	特になし	水冷銅板 冷却ガス 専用拘束ジグ
面外変形	60 mm	6 mm (90%減少)
長手方向の収縮量	-9.5 mm	-3.0 mm (68%減少)

大型溶接構造物であり、その溶接ひずみに対しては十分配慮する必要がある。従来からメンブレンの溶接には TIG (タングステンイナートガス) 溶接が広く用いられており、実績も多い。しかしながら、TIG 溶接では、アークの広がりが大きく溶接速度が比較的遅いために入熱量が多く、特に重ね溶接では面外への溶接ひずみが現れる。この溶接ひずみを最小限に抑えるため、低入熱であるプラズマアーク溶接法を採用し、さらに以下の改善を行った。

- 自動溶接の適用による入熱量の均一化
- 水冷銅板及び冷却ガスによる溶接熱の吸収
- 拘束ジグ (架台) の改良

プラズマアーク溶接は TIG 溶接に比べエネルギーの集中性が良く、このため高速溶接による低入熱溶接が可能である。このことから溶接ひずみの低減のみならずメンブレン溶接の高効率化に対しても十分寄与するものと考えられた。

6.2 低ひずみ工法確認試験

前節の各種低ひずみ工法の効果を調べるため、小型の溶接試験を実施した後に、実機と同寸法のメンブレンブロックにて、TIG 溶接とプラズマアーク溶接の溶接試験を実施し、面外へのひずみ量及びブロック長手方向の収縮量を比較した。プラズマアーク溶接によるブロックの溶接状況を図5に、変形量の比較を表2に示す。表2から低ひずみ工法の採用により面外変形は90%、長手方向の収縮量は68%減少しており、この工法の有効性が確認された。

7. 据付検証試験

折曲げ型側部メンブレンのブロック間には現地でのひだ接続部が4箇所あり、この4箇所の接続部の肌合せ精度が現地組立にお

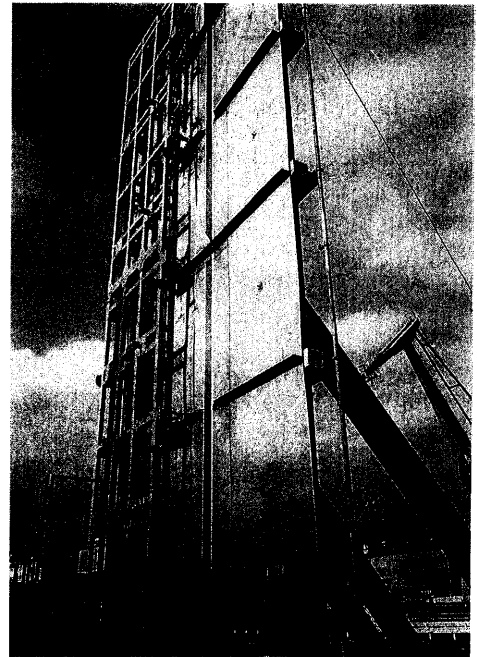


図6 据付検証試験状況 実機と同寸法のメンブレンブロックを用いて据付検証試験を実施している。
Installation test of side membrane blocks

ける大きなポイントとなる。メンブレン重ね継手の肌すき量は自動溶接機での溶接性を考慮すると0.5mm以内に抑える必要がある。一方、工場での溶接ひずみや、加工誤差等を考慮すると、この精度でメンブレンブロックのような大型溶接構造物を製作することは不可能である。そこで、ブロックの製作精度と肌合せ精度の関係を検証し、併せて専用据付装置のひだ部及び平板部肌合せ機構の検証を行うために、低ひずみ溶接工法にて製作したメンブレンブロックを用いて、実機を想定した据付検証試験を実施した。据付検証試験の状況を図6に示す。各種の条件で据付試験を実施した結果、上方から重ねる側のひだ間隔が下側の既に据付けられているブロックのひだ間隔よりもおおむね2mmまで広く製作されている場合には、問題なく据付が可能であることが明らかとなった。また、本試験によって据付装置の各機構が健全に作動することも確認された。

8. 結 言

折曲げ型側部メンブレン構造について、多条ひだシート連続成形方法の開発、ひだ接続部等の構造開発及びその強度検証、工場ブロック製作・現地据付までの一連の検証を実施し、実用化の見通しを得た。

今後、地下式貯槽の更なる大型化が予想される中で、折曲げ型側部メンブレンを適用して信頼性・安全性の向上に貢献するとともに、現地溶接へのプラズマ溶接の適用拡大等を図っていく予定である。なお、この開発に当たり御指導、御協力いただいた関係各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 山形俊介, 萩原孝一ほか, 大容量 LNG 地下式貯槽の開発, 三菱重工技報 Vol.17 No.3 (1980)
- (2) 日本瓦斯協会, LNG 地下式貯槽指針 (1979)