

熱交換器の強度信頼性向上

——ゴム拡管法による拡管部の強度——

Improvement of Reliability of Heat Exchangers — Strength of Expanded Tubes by Expanding Method Using Rubber

多管式熱交換器の製作で、管を管板に取り付けるため、あるいは管を管孔にはだ付けするためにローラ拡管法が用いられているが、ローラによる圧延効果で管内面の加工硬化、加工引張残留応力の発生、管の材質によっては割れの発生などがあり、拡管部の強度、耐食性が低下することがある。

そこで、ゴムを用いて管を均一に押し広げる拡管装置を開発した。その結果、マイルドな拡管部を得ることが可能となり、多管式熱交換器の強度信頼性を支配する拡管部の強度を著しく向上することができた。

本稿では、開発した拡管装置の概要、特長及び拡管部の強度、耐食性に関する実験結果の一部をローラ拡管法と対比して紹介する。

蒲原 秀明* Kamohara Hideaki

大村 慶次* Ōmura Keiji

嶋田 憲二** Shimada Kenji

高田 忠** Takada Tadashi

久保田富雄** Kubota Tomio

1 緒 言

化学プラントなどに使用される多管式熱交換器では、管と管板の結合部の強度信頼性が、熱交換器の死命を制すると言っても過言ではない。

管の管板への取付けには、一般の熱交換器の場合は機械式のローラ拡管法が、高温高圧の場合はクリープによる管の保持力低下、リーク防止などの観点から漏れ止め溶接の併用、又は強度溶接が採用されている。この場合でも、すきま腐食防止及び溶接部の強度的な防護のため、一般にはだ付き拡管を併用している¹⁾。

ローラ拡管法により、管を拡管する場合、管内面は加工硬化を受け、チタン管などでは拡管割れの発生、加工による残留応力の発生などがあり、強度、耐食性の面で問題となることが多い²⁾。

このような状況から、拡管部の強度、耐食性を低下させないゴムを用いた拡管装置(以下、ゴム拡管装置と呼ぶ)を開発

し、熱交換器の強度信頼性の向上を図ることができた。開発した拡管装置は、化学プラント用の熱交換器、電力プラント用の給水加熱器、復水器、大形冷凍機用の熱交換器などへも活用できる。

本稿では、ゴム拡管装置の概要、特長及び拡管部の特性について、ローラ拡管法と対比して概説する。

2 従来拡管部の問題点

ローラ拡管法は、**図1**に示すように軸方向にこう配をもつマンドレルの外周に、3本ないし5本のローラが配設されており、マンドレルを電動機で回転させながら前進させることにより、ローラが回転して管を拡管する³⁾。

この場合、ローラによる圧延効果で管の内面は加工硬化を受け、しかも、管の円周上の一点に着目すると管は**図2**に一例を示すように、拡管過程で繰返しひずみを受ける。

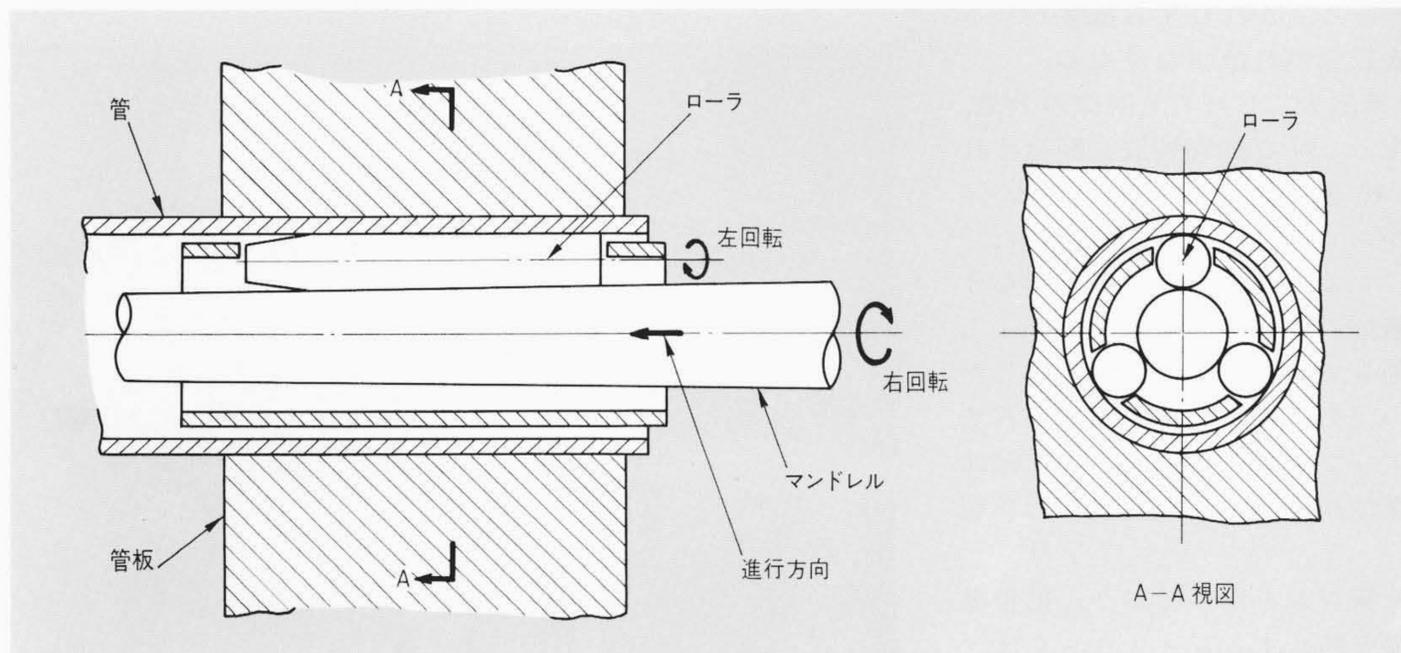


図1 ローラ拡管法の概要
従来のローラ拡管法は、ローラの線荷重で管を拡管することになり、しかも規定量を拡管するまでに多くの繰返し荷重を付加するため、管内面はローラの圧延効果で加工硬化を生ずる。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所笠戸工場

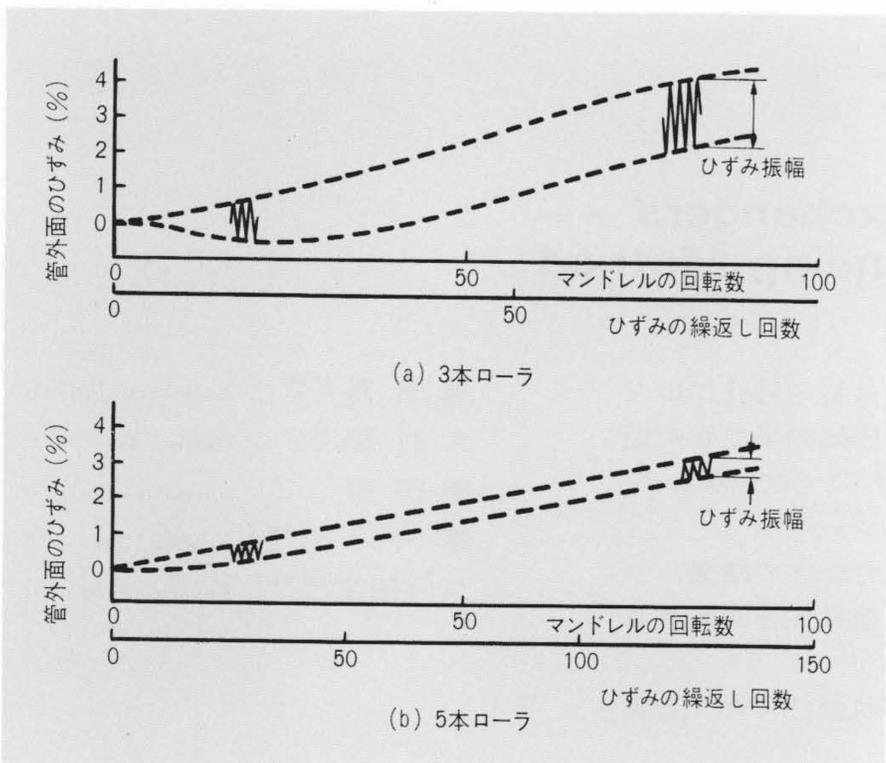


図2 拡管時の管外面のひずみ挙動 ローラ拡管法による拡管加工では管が繰返しひずみを受けながら拡管され、ひずみの大きさ、繰返し数は図示のように3本ローラと5本ローラでは異なる。拡管割れ防止の観点から見ると、5本ローラが繰返し数は大きくなるが、ひずみ振幅は小さく優位である。

そのため、チタン管など、繰返しひずみに対して割れやすい材料は、内面の引抜線きずなどが起点となり割れを生ずることがある。

また、管端部の強度、耐食性に悪影響を与える、

- (1) ローラによる拡管面のはだ荒れの発生
- (2) 拡管部外面及び未拡管部との境界での過大引張残留応力の発生
- (3) 管の軸方向伸びによる管端溶接部での残留応力の発生などがある。

一方、厚肉管の拡管加工に一部用いられている爆発拡管法は、拡管条件の均一性、拡管部の強度のばらつき、作業上の安全性などに問題を生ずることがある。

3 ゴム拡管装置の概要と特長

3.1 装置の概要

ローラ拡管法の場合、図2に示したように3本ローラよりも5本ローラが繰返し数は大きくなるが、ひずみ振幅が小さく、チタン管などの疲れによる拡管割れは少なくなる。

このことから、ローラ本数を無限大にしたのと同様の効果、すなわち、ひずみ振幅を零とするような拡管装置を開発すれば、圧延効果による加工硬化、繰返しによる疲労被害はなく、割れを皆無にできるとの観点からゴム拡管装置を開発した。

ゴム拡管法は、前述のようにゴムを利用して拡管を行なうもので、その概要を図3に、装置の外観を図4に示す。

ゴム拡管法の拡管原理は、図3で油圧シリンダに連結した加圧ロッドを、油圧シリンダの圧力により軸方向に荷重Fで引っ張り、その反力をバックアップリングで受け、拡管媒体に軸方向荷重を付加し、拡管媒体が半径方向に広がる力を利用して拡管する。

この拡管装置の拡管媒体は軟質ゴムを用いており、拡管媒体の高拡管圧力下での塑性流動を防止するシールリングは、拡管圧力により自緊効果を発揮するような特殊な形状をしているため、連続的な繰返し使用に対しても十分な耐久性をもっている。

この拡管法での適正拡管圧力、すなわち管孔に設けたグループ部で、グループ深さまで管を食い込ませるに必要な圧力は、外径1 inのチタン管(JIS TTH35D)を例にとると、図5に示すように両対数グラフ上でグループ幅との間に直線関係がある。いまグループ幅を5 mmとすると、肉厚0.8~2.8 t に対し1,300~6,000 kg/cm²となる。

この装置による実機の拡管状況を図6に示す。

3.2 ゴム拡管法の特長

ゴム拡管法による拡管部の特性については一部後述するが、強度、耐食性など製品及び製造面に関して次のような特長をもっている。

3.2.1 製品面の特長

(1) 強度に関する事項

- (a) 拡管時に管にはだ荒れ、疲労被害がない。
- (b) 管に圧延効果を与えないため、肉厚減少及び加工硬化

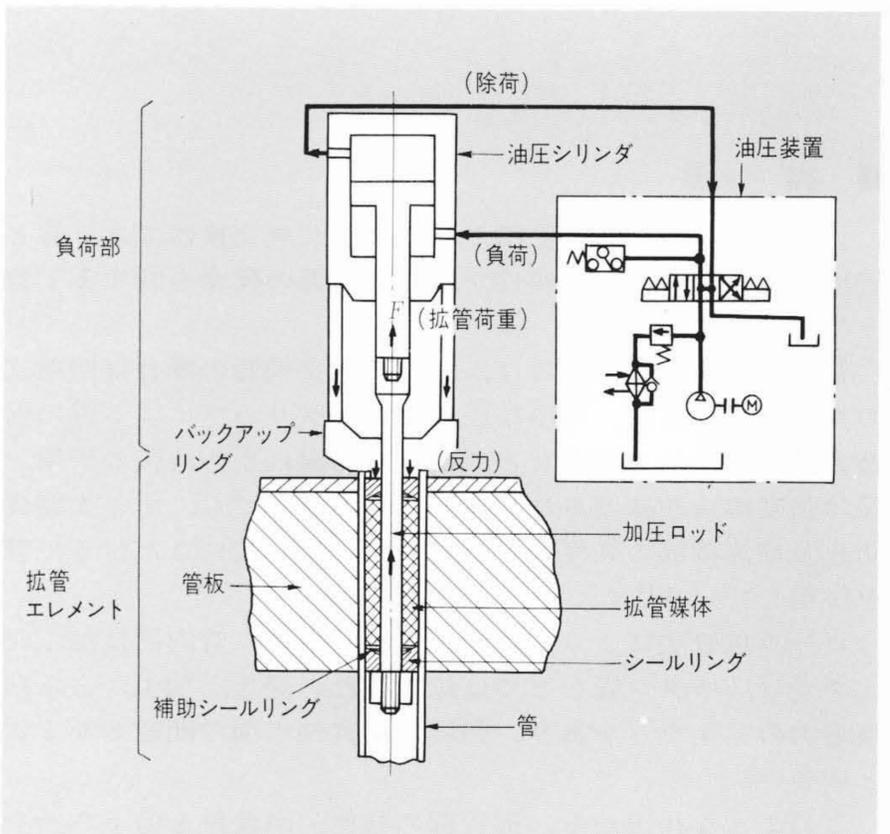


図3 ゴム拡管装置の概要 新しく開発したゴム拡管装置の拡管エレメントと負荷部の概要を示しているが、開発の主眼点は拡管媒体のシール方法である。

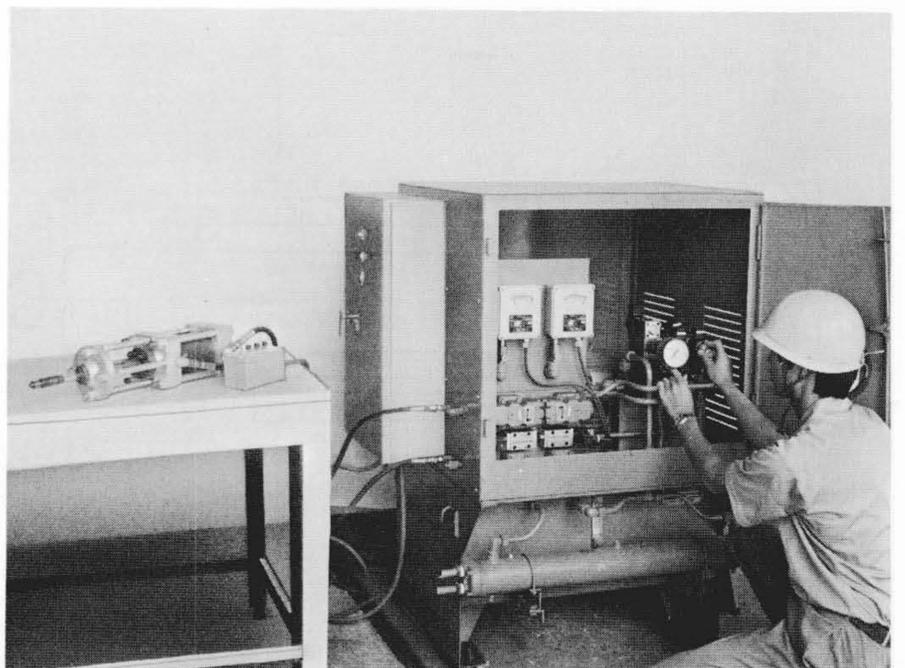


図4 装置全体の外観 図の右側が油圧装置、左側が油圧シリンダ及び拡管エレメントを示しているが、最大使用油圧は210 kg/cm²である。

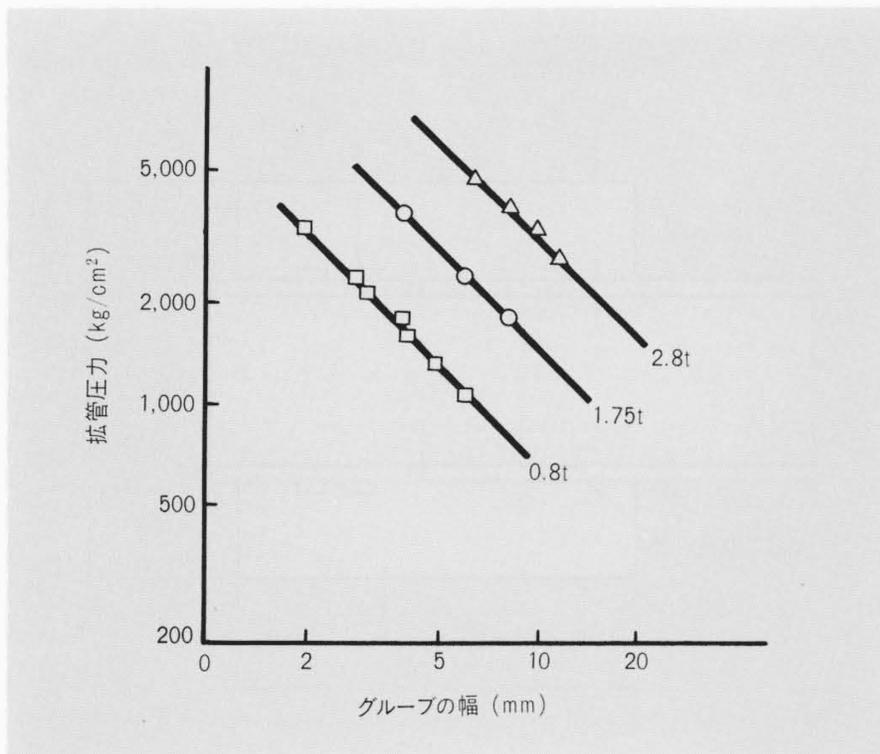


図5 適正拡管圧力(チタン管JIS TTH35D $\phi 25.4$) ゴム拡管法で拡管する場合の適正拡管圧力を示しているが、両対数グラフ上で管の肉厚をパラメータとするとグループ幅との間に直線関係があり、グループ幅5mmを例にとると肉厚0.8~2.8tに対し1,300~6,000kg/cm²となる。

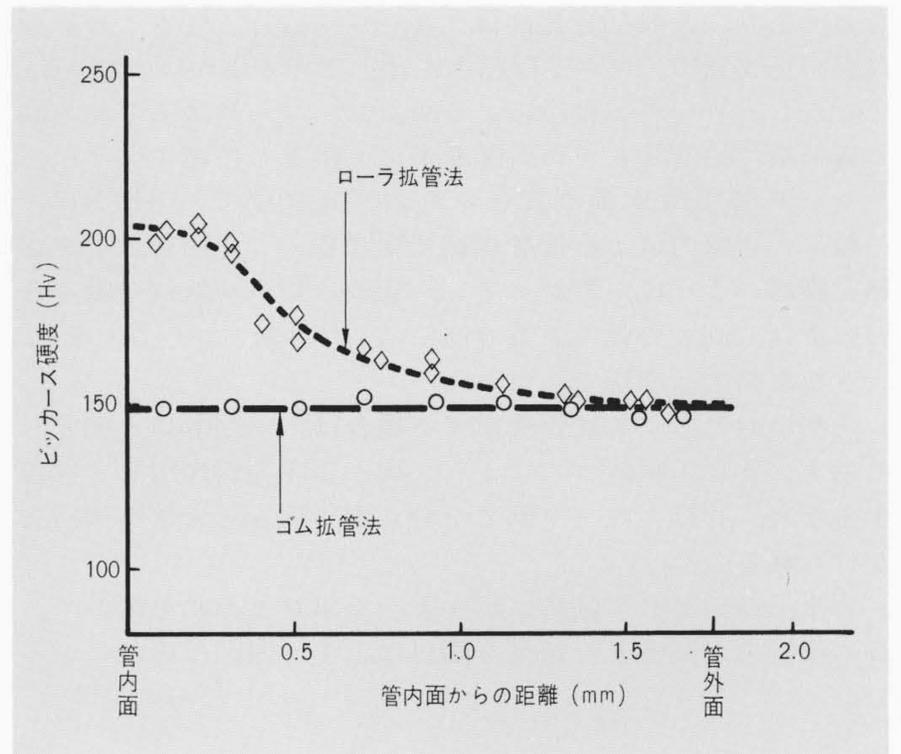


図7 拡管部の硬度分布 拡管部の硬度分布を示すが、ローラ拡管法では管内面が著しく加工硬化を生ずるのに対し、ゴム拡管法では管の全肉厚が均一な硬度分布となっている。

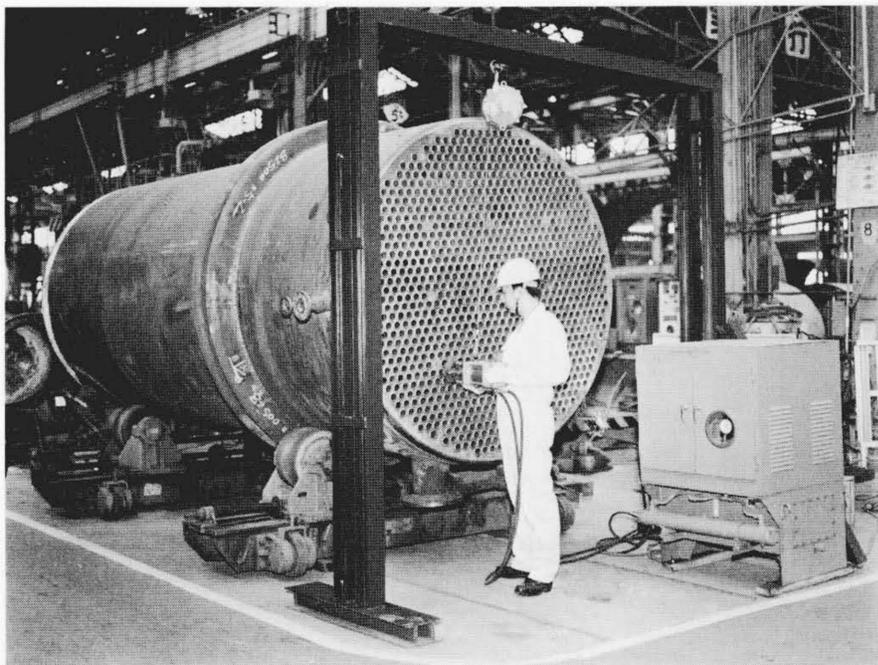


図6 実機の拡管状況 ゴム拡管装置による実機の拡管状況を示すが、ローラ拡管法に比較して作業が容易で早く、また油圧制御であるため拡管条件の管理が容易である。

を生じない。

(c) 管孔に適正な幅のグループを設けることにより、大きな保持力が得られる。

(d) 管の保持力のばらつきが小さい。

(2) 耐食性に関する事項

(a) 拡管部と未拡管部の境界での残留応力が小さい。

(b) 内面の加工硬化に起因する外面での引張残留応力の発生がない。

(c) 管孔に適正な幅のグループを設けることにより、大きな水密性が得られ、管端への浸入がない。

(d) 拡管時の管の軸方向伸びが小さく、管端溶接部に悪影響を与えない。

(e) 潤滑油を必要としないため、クリーンな状態で拡管ができる。

3.2.2 製造面の特長

- (1) 作業が容易で早い。
- (2) 騒音が発生しない(爆発音、電動機、ロータの回転音などが無い)。
- (3) 拡管条件の管理が容易である(拡管圧力で正確に管理できる)。
- (4) 拡管範囲の管理が正確(一体ゴムで拡管するため、ばらつきが小さい)。
- (5) 作業上の安全性が高い(爆発、回転などが無いため、安全上の危険性がない)。
- (6) 装置維持費が安い(拡管エレメントの消耗が少なく、安い)。

4 拡管部の特性

4.1 硬度と内面の割れ

拡管部の硬度分布をチタン管(JIS TTH35D)を例にとり図7に、拡管割れに関する実験結果(チタン管JIS TTH35D, W)の一例を図8に示す。

図7から明らかなように、ローラ拡管法による場合、管内面が大きな加工硬化を生ずるのに対し、ゴム拡管法による場合は、加工硬化現象は全く認められず、管内外とも同じ硬度で、しかも拡管前の硬度とほとんど変わらない。

一方、図8は横軸に拡管による管外径の変化割合、縦軸に顕微鏡的に見た管内面での拡管割れの長さの総計を示すが、ローラ拡管法による場合、薄肉管ほど割れやすくなることを示しているのに対し、ゴム拡管法による場合は、いずれの肉厚、外径変化に対しても割れを発生することはない。

4.2 強度

多管式熱交換器での拡管の目的は、

- (1) 管の管板への取付け
- (2) 管内外圧に対する水密性保持
- (3) 管に作用する軸、曲げ荷重に対する管端溶接部の強度的防護
- (4) 管端部の防食

などであり、一般に管孔にはグループを設け、管をこの部分に食い込ませて、大きな保持力を生じさせるようにしている。

しかし、ローラ拡管法による場合は、ローラによる軸方向の線荷重で拡管するため、**図9(a)**に一例として示すように、グループ部で微少量の食込みを生ずるだけで、保持力は、一般部の自緊力による接触抵抗で生ずる。この場合、チタン熱交換器のように、管がチタン、管板の母板が軟鋼の組み合わせでは、両者の弾性係数の違いにより自緊力が小さくなり、大きな保持力は期待できない。

これに対し、ゴム拡管法による場合は、同**図(b)**に一例として示すように、軟質ゴムによって均一な圧力が作用して拡管するため、管はグループ部で十分に食い込み、大きな保持力が得られる。

いま、一例として**図10**に示すような単管モデルを用いて、管の保持力を測定した結果を**図11**に示す。同図は横軸にグル

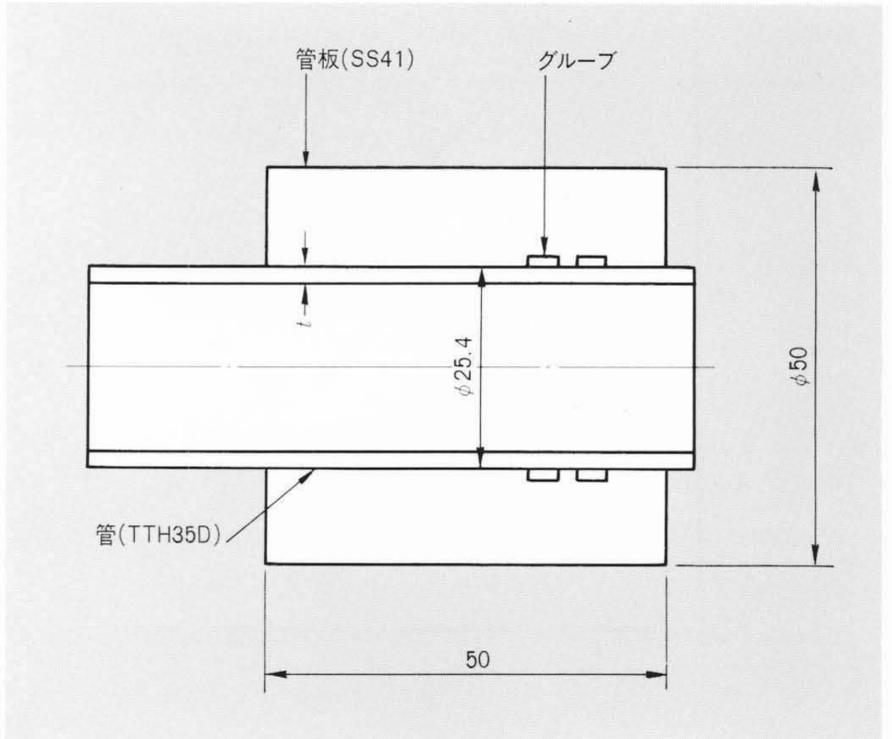


図10 単管モデル 拡管部の保持力、水密性試験に用いた単管モデルの形状を示しているが、管板の外径は実機での管孔のピッチから求められる等価円とした。

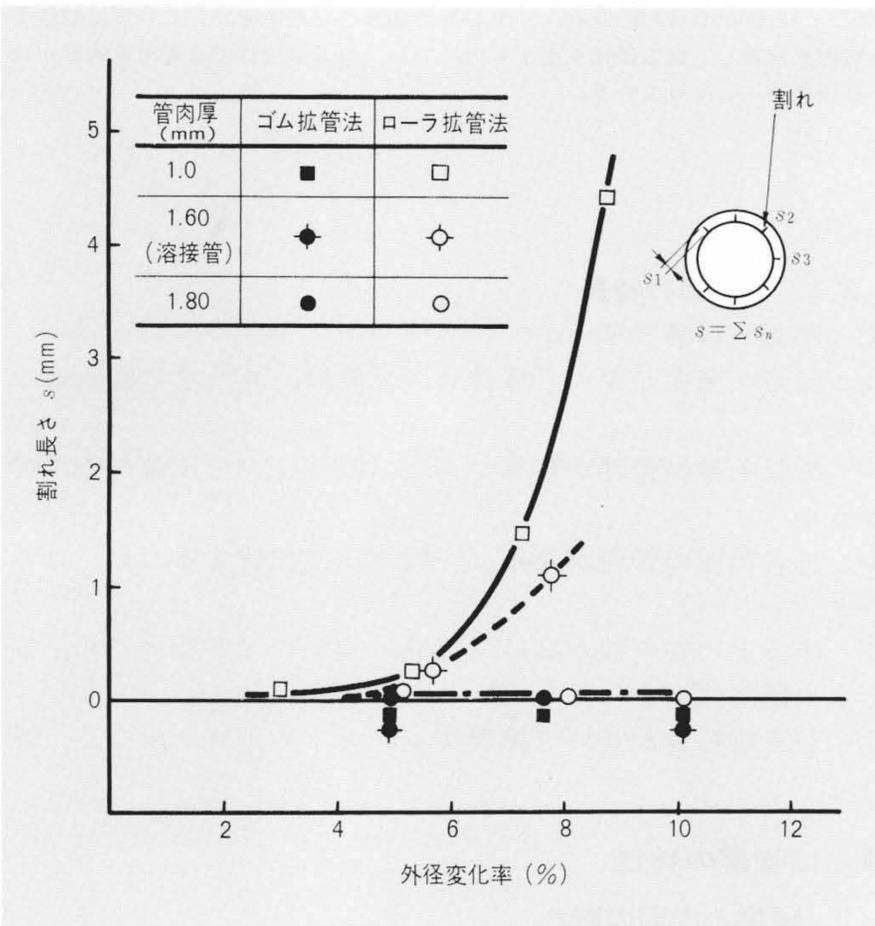


図8 管の割れやすさ(チタン管JIS TTH35D, W φ25.4) 拡管による管の外径変化率と管内面の割れ長さの関係を示しているが、ゴム拡管法ではいずれの管も割れは生じない。しかしローラ拡管法では、薄肉管ほど割れやすくなる。

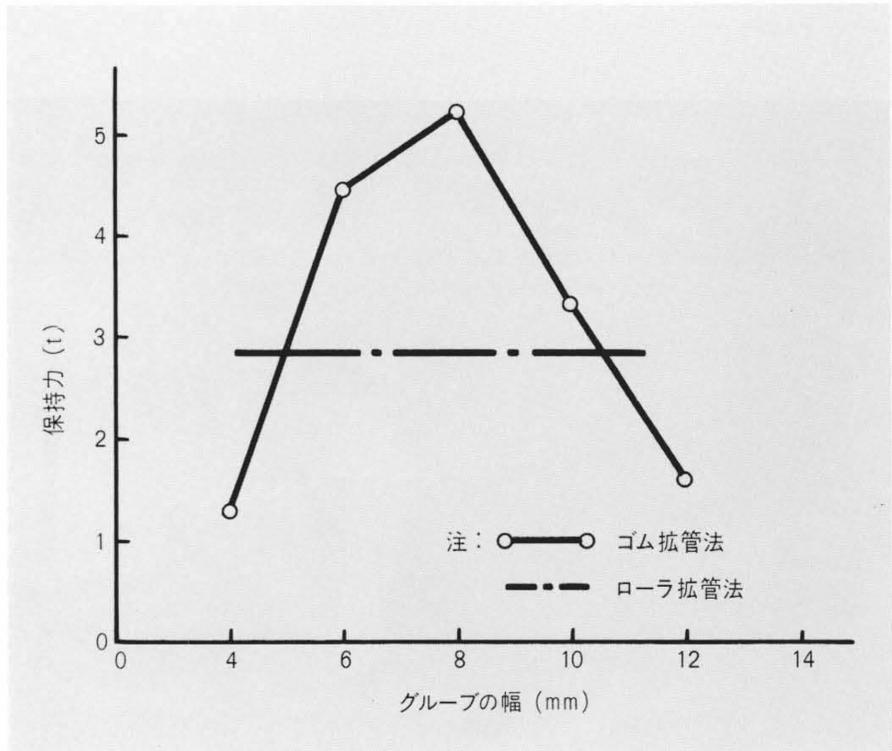
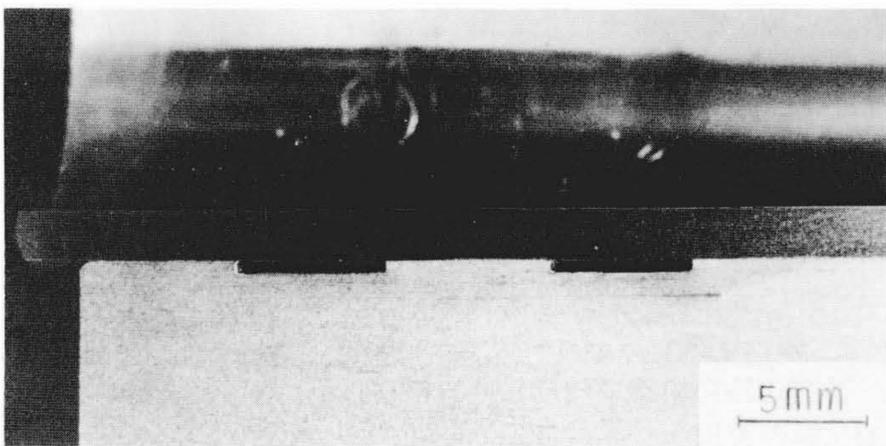
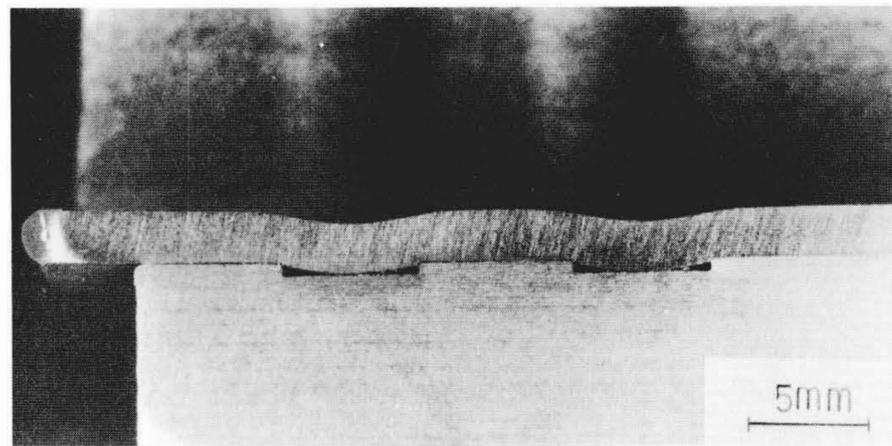


図11 拡管部の保持力の一例(チタン管JIS TTH35D φ25.4×1.75t) グループの幅と拡管部の保持力の関係を示すが、適正なグループ幅のもとではローラ拡管法に比較して大きな保持力が得られる。



(a) ローラ拡管法



(b) ゴム拡管法

図9 グループ部での管の食込み状況 ローラ拡管法は、ローラの線荷重で拡管するため管孔に設けたグループ部での管の食込み量は小さいが、ゴム拡管法では、拡管媒体の均等な内圧で拡管するため、グループ部で大きな食込みを生ずる。

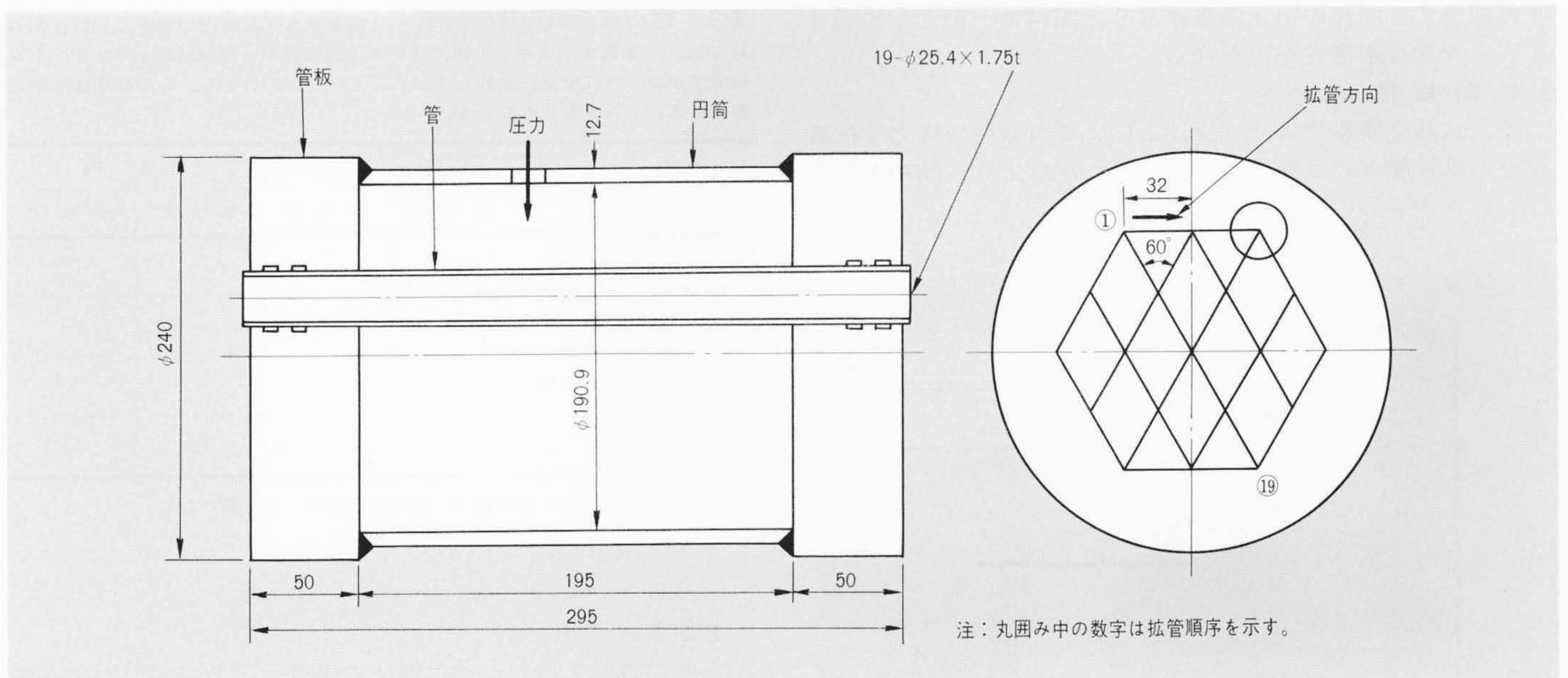


図12 多管モデル 多管モデルの形状寸法を示しているが、管孔には単管モデルの場合と同様2条のグループを設け、拡管順序は図中に示す丸囲み番号の順に行なった。

ープの幅をとり、縦軸に保持力を示しているが、同図から明らかのように、6～10mmの範囲内で大きな保持力を示している。このように、大きな保持力が得られるグループの幅は管の半径、肉厚により固有の値をもっている。

図10に示した単管モデルの管板の大きさは、実機の管ピッチから求められる等価円としたが、このようなモデルによる場合は、同一拡管条件のもとで、保持力のばらつきはほとんど生じないが、実機のように多管の場合は、従来のローラ拡管法、また一部、厚肉管の拡管に用いられている爆発拡管法の場合も大きなばらつきを生ずることがある。

これに対し、ゴム拡管法による場合は、図12に示すような多管モデルでの実験結果によれば、図13に示すように平均値に対するばらつきは±5%以内であり、平均値も単管モデルの値とほぼ同一の値を示している。

4.3 水密性

チタン熱交換器の場合は、前述したように管の弾性係数が管板のそれに対し約 $\frac{1}{2}$ となるため、管板の自緊力が小さく、拡管の一般部では水密性が得にくい。

しかし、ゴム拡管法による場合は、グループ部での食い込みがよく、グループの角部で大きな自緊力が得られるため、

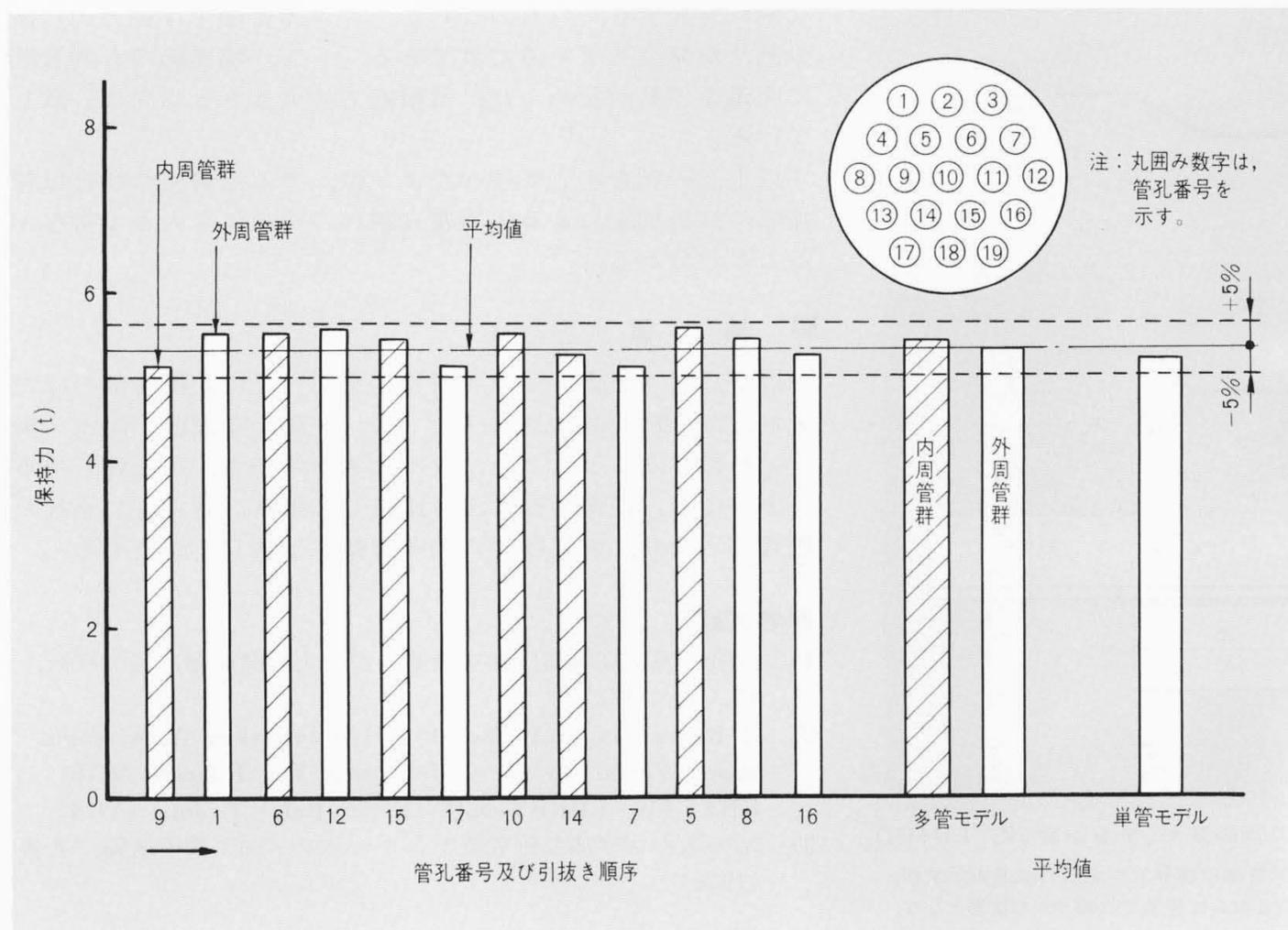


図13 ゴム拡管部の保持力 (チタン管TTH35D φ25.4×1.75t) 実機にゴム拡管法を適用した場合、管の拘束条件、隣合った管の干渉効果の影響をどの程度受けるのか把握するため、実験を行なった結果であるが、平均値は単管モデルとほぼ同じで、ばらつきも非常に小さい。

その部分で、漏れの防止効果があり、**図14**に一例として示すように大きな水密性が得られる。

4.4 耐食性

多管式熱交換器では、拡管加工による引張残留応力で拡管及び未拡管部との境界に応力腐食割れが発生し、問題となる

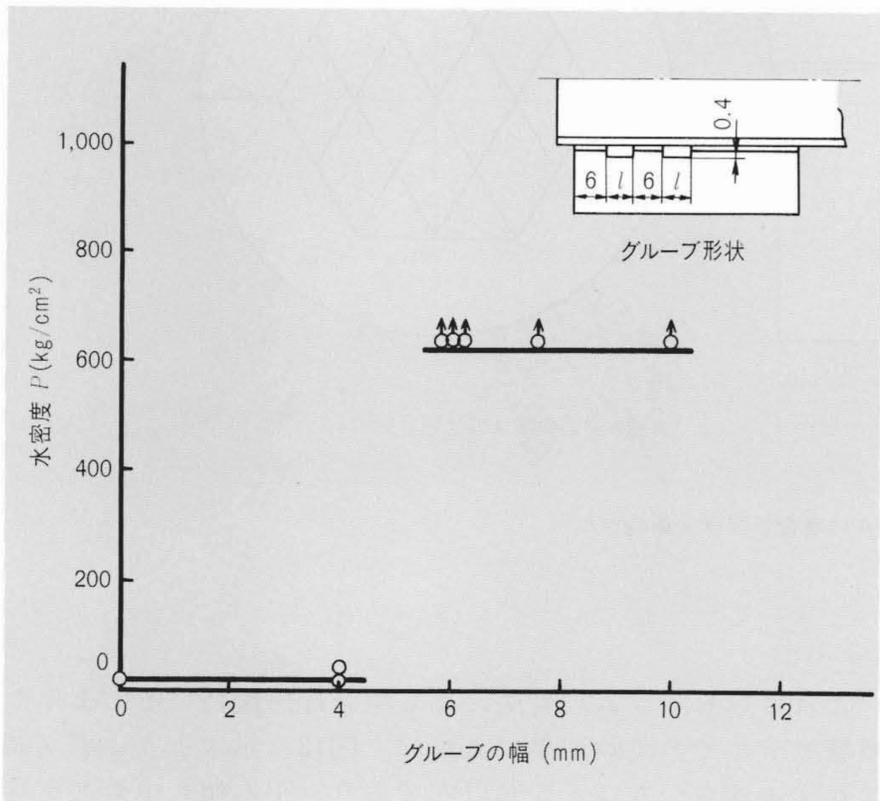


図14 拡管部の水密性(チタン管JIS TTH35D $\phi 25.4 \times 1.75t$) グループの幅と水密度の関係を示すが、適正なグループ幅のもとでは大きな水密度が得られる。これは、管がグループ部で十分に食い込みグループの角部で大きな自緊力が得られるためと考えられる。

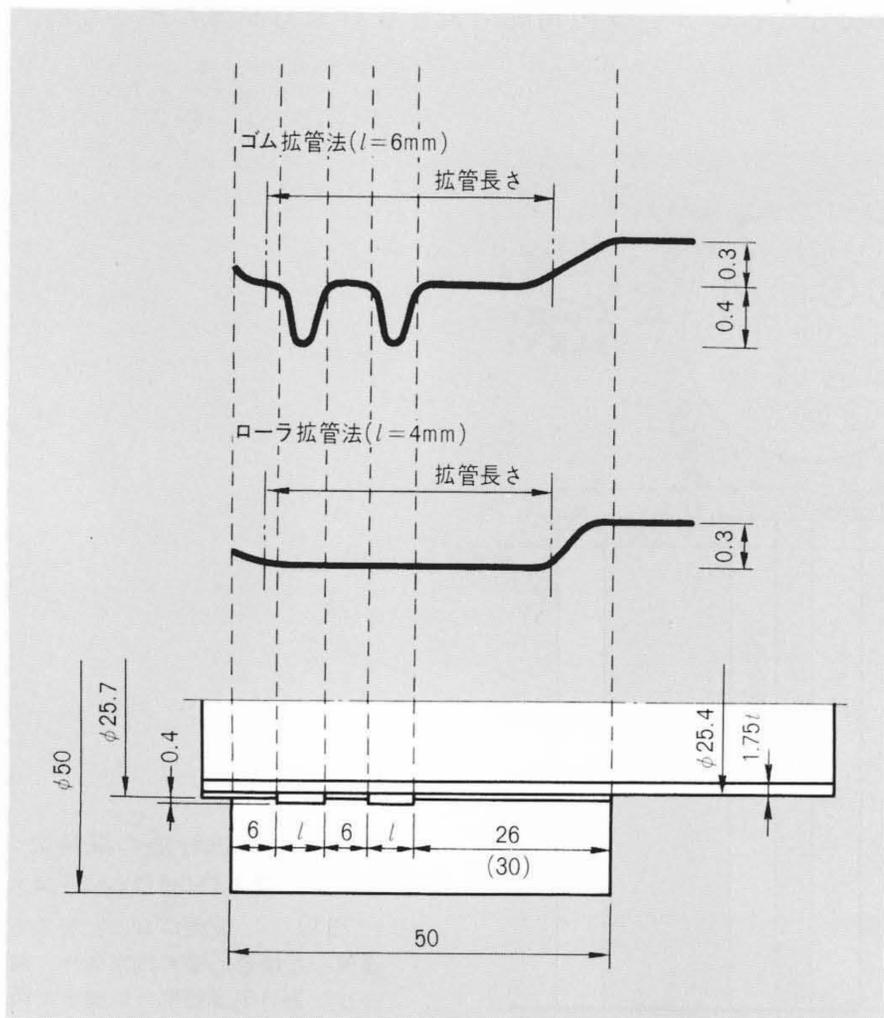


図15 拡管部と未拡管部の境界の管の変形(チタン管JIS TTH35D $\phi 25.4 \times 1.75t$) 管の拡管部と未拡管部の境界での変形の状況を示すが、ローラ拡管法では急激な変形となるのに対しゴム拡管法では緩やかな変形となる。

表1 応力腐食割れ試験結果 拡管部と未拡管部の境界及び拡管部の42% MgCl₂ 沸騰水溶液中での静的浸せき応力腐食割れ試験結果を示すが、ゴム拡管法がローラ拡管法に比較して割れにくいことが分かる。この結果は、加工残留応力により支配されている。

		内 面		外 面	
		軸 方 向	周 方 向	軸 方 向	周 方 向
境 界 部	ローラ	△	×	—	—
	ゴ ム	○	⊗	—	—
拡 管 部	ローラ	○	○	×	×
	ゴ ム	○	○	⊗	○

注：×=大きな割れ △=割れ ⊗=微少割れ ○=割れなし

ことが多い。

まず拡管部ではローラ拡管法の場合、**図7**に示したようにローラによる圧延効果で加工硬化を生じ、管内面は圧縮の残留応力となり、管外面はそれにつり合うための引張残留応力が発生する。

この引張残留応力は、管板による自緊効果が十分に得られるような拡管加工では自緊圧力で打ち消されるが、はだ付き拡管の場合はそのまま残存することになる。

次に未拡管部との境界では、ゴム拡管法の場合、ローラ拡管法に比較して、**図15**に一例を示すように緩やかな変形となり、残留応力は小さくなる。

このような残留応力によるSUS304の応力腐食割れ実験結果の一例を**表1**に示す。これは、境界部については**図10**に示した単管モデルを用いて、42% MgCl₂ 沸騰水溶液中で静的浸せき応力腐食割れ試験を、拡管部については単管モデルから管を引き抜き、管だけで同様の試験を実施した結果を示したものである。

まず、拡管部についてみると、ローラ拡管法の外面は大きな割れを発生しているのに対し、ゴム拡管法では軸方向に微少割れが発生しているだけである。一方、境界部でも両者間で明確な差異が認められ、残留応力の大きさと傾向は一致している。

以上、一例を示して述べたように、ゴム拡管法の場合は管端部の拡管加工による応力腐食割れの防止にも大きく寄与することが分かる。

5 結 言

以上、述べたようにゴム拡管法を用いれば、拡管部のはだ荒れ、加工硬化、割れ発生などはなく、管孔に適正な幅のグループを設けることにより、管の大きな保持力、水密性を得ることができ、従来の拡管法に比較して強度、耐食性に優れた拡管部となり、熱交換器の強度信頼性は著しく向上する。

参考文献

- 1) 尾野 馨：高温高压熱交換器の設計上の諸問題，圧力技術，10，2（1972）
- 2) H. Krips und M. Podhorsky：Hydraulisches Aufweitenein neues Verfahren zur Befestigung Von Rohren, VGB KRAFTW ERKSTECHNIK 56 Heft 7 Juli（1976）
- 3) エキスパンダ加工研究会：エキスパンダ加工技術総覧，丸善（1966）