管状構造物補修用 SMA 締結リング肉厚の最適化における基礎的検討[†]

沖田 圭 介* 岡部 永 年** 細 木 真 保***
佐久間 俊 雄**** 山 内 清*****

Fundamental Study for Optimizing the Thickness of a SMA Ring to Combine Two Pipes

by

Keisuke OKITA*, Nagatoshi OKABE**, Maho HOSOGI***,
Toshio SAKUMA**** and Kiyoshi YAMAUCHI*****

For the purpose of applying a shape memory alloy ring to combining two separated pipes, the way to exchange the reverse transformation properties of uni-axial stress for those of multi-axial stress was proposed by modeling σ - ε behaviors not only in the process of loading and unloading but also in the process of heating for using to make a FEM analysis. Using the new idea way, the behaviors of deformation recovery and pressure against inserted pipe in the process of ring diameter enlarging and heating for combining two separated pipes were clarified considering the effects of ring diameter enlarging rate and ring thickness. From the viewpoint of saving SMA material cost as well as improving efficiency of ring diameter enlarging works, it was clarified that optimum thickness of ring is about 3mm to 5mm.

Key words: SMA ring, FEM analysis, Reverse transformation rate, Diameter enlarging rate, Reverse transformation rate

1 緒 言

多くの経年原子力プラントにおいて、SUS304 製の構造物に応力腐食割れ (S. C. C) の問題が生じている。この問題の対応策として、耐 SCC 材料との取替えが急務となっている。その方法の一環として、二つのパイプの締結を目的とした Ti-Ni 系合金製の SMA リングの開発が行われている。その使用法は、Ti-Ni 系合金製 SMA リングをマルテンサイト相の状態で拡張し、加熱による形状回復を利用して締結するというものである。¹⁾ この形状記憶合金の適用においては、温度ヒステリシスの大きいことや形状回復機能が安定に保たれることが重要である。²⁾ 過去の実用例としては Ti-Ni-Nb を用いたものがある。³⁾ ここで、最も重要なことは、拡張した際、形状回復機能を失わず維持できるということである。リングの拡張においては、単軸引張試験によって得られる応力-ひずみ曲線のような均質的な変形ではなく、局所的な大変形によって 3 次元のひずみ分布の変形を受けることになる。⁴⁾ したがって、適切でかつ、安定した締結力を得るような最適化を図るために、拡張および逆変態の過程における応力-ひずみ挙動を多軸変形挙動として扱うことが必要である。

そこで、拡張から逆変態までの変形過程における基本的な応力-ひずみ挙動を明らかにし、要求締結力に対す

るリングの形状寸法および拡張加工条件を検討することを目的として、適用対象の Ti-Ni 合金の板材に対する引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を用いて 3 次元解析のモデル化を行った。この解析を通して、拡張率の増大に伴う形状回復挙動および形状回復におけるリングの肉厚の影響が明らかとなり、様々な影響因子に対する設計の最適化検討が可能となった。

2 解 析

2・1 解析方法

二つのパイプを締結する適切な条件を求めるために SMA リングの拡張過程だけでなく加熱による形状回復過程の変形挙動を明らかにすることが必要である。従って、SMA リングの拡張過程および加熱による形状回復過程における変形挙動について下記のように FEM を用いた 3 次元弾塑性解析によって調査した。

2・2 解析方法 (FEM) および解析条件

Fig. 1 に用いたモデルにおける軸方向断面の立体図を示す。解析としては軸対称条件下にて行った。拡張過程における負荷・除荷は温度 293K にてリングの内径側から圧力による強制変位を付加することによって行い、除荷後 293K から 363K まで増分ステップ 80 で一様加熱した。また SMA リング寸法は内径 35mm、幅 30mm

[†] 原稿受理 平成 15 年 4 月 16 日 Received Apr. 16, 2003

* 愛媛大学大学院理工学研究科環境科学専攻 〒790-8577 松山市文京町, Div. of Environmental Sci., Graduate School of Sci. and Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

** 正 会 員 愛媛大学工学部機械工学科 〒790-8577 松山市文京町, Dept. of Mech. Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

*** 正 会 員 香川大学工学部知能機械システム工学科 〒761-0396 高松市林町, Dept. of Intelligent Mech. Systems Eng. Faculty of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396

**** 正 会 員 電力中央研究所 〒201-8511 狹江市岩戸北, Central Res. Inst. of Elastic Power Industry, Iwadokita, Komae, 790-8511

***** NEC トーキン 〒982-8510 仙台市太白区郡山, NEC TOKIN Corporation, Tashiro-ku, Sendai, 982-8510

定とし肉厚 t , すなわち, 外径だけを変化させた. 締結対象となる挿入物は 外径 40mm, 肉厚 5mm の剛体および SUS304 製 ステンレスパイプとした.

2・3 Ti-Ni 形状記憶合金の基礎特性に対するモデル化

これらの FEM 解析を行うにあたり, Ti-Ni ダンベル試験片を用いて行われた基礎特性試験データをもとに SMA の変形・変態に対するモデル化を図った. この特性試験としては, Fig. 2 の概念図に示すように負荷・除荷および加熱を 1 つの工程とする試験を, 数回, 最大ひずみ $\varepsilon_{\max}$ を変えて行った. Fig. 3 はそれらの実験結果をもとに作成した線図であり, 最大負荷ひずみ $\varepsilon_{\max}$ に対する弾性除荷後の残留ひずみ ε_e , 変態回復ひずみ $\Delta\varepsilon_{re}$, 残留塑性ひずみ ε_p の挙動を示している. これらの各ひずみの挙動を数式モデル化することにより, 拡張過程での負荷・除荷および加熱による形状回復過程の変形挙動に対して独自のアイディアによる解析モデルを作成した. モデル化の詳細を次に述べる.

(1) 引張負荷・除荷過程における応力-ひずみ挙動のモデル化

Fig. 2 中の曲線における点 O から点 P は拡張過程で

Fig. 2. Behaviors of stress and strain with total strain in the process of loading, unloading and heating.

Fig. 3. Behaviors of 4 kinds of strains with increasing maximum strain by compulsory tensile deformation.

の応力-ひずみ挙動を示す. 負荷過程での応力-ひずみ曲線は①再配列変形および②塑性変形の抵抗応力の和となり次式 (1) で表される.

$$\sigma_f = \sigma_y (\varepsilon/\varepsilon_y)^n + \sigma_{p\max} [1 - \exp\{-\varepsilon/\varepsilon_T\}^m] \quad (1)$$

ここで, σ_f , σ_y , $\sigma_{p\max}$, ε , ε_T はそれぞれ流れ応力, 降伏応力, 塑性変形飽和応力, 全ひずみ, 遷移点のひずみを表している. 一方, 除荷過程の応力-ひずみ挙動は次式 (2) のように数式化した.

$$\sigma_f = \sigma_{\max} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_e}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_e} \right)^\alpha \quad (2)$$

ここで, 全ひずみ ε は $\varepsilon_e < \varepsilon < \varepsilon_{\max}$ である.

(2) 逆変態による変態回復率のモデル化

次に加熱による形状回復過程すなわち逆変態に対する解析モデルの作成にあたり, Fig. 3 における ε_e , ε_p , $\Delta\varepsilon_{re}$ を, それぞれ次のように数式化した.

$$\varepsilon_e = \varepsilon_{\max} \exp\left\{-\left(\varepsilon_{\max}/\varepsilon_0\right)^l\right\} \quad (3)$$

$$\varepsilon_p = A(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_0)^\alpha \quad (4)$$

$$\Delta\varepsilon_{re} = \varepsilon_e - \varepsilon_p \quad (5)$$

なお, $\varepsilon_{\max} > \varepsilon_0$, $\alpha > 1$ である.

ここで, 変態率 η_{tran} を ε_e に対する $\Delta\varepsilon_{re}$ の割合として定義する. すなわち, η_{tran} は式 (3), (4), (5) から式 (6) で表される.

$$\eta_{tran} = \frac{\Delta\varepsilon_{re}}{\varepsilon_e} = 1 - A(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_0)^\alpha / \varepsilon_{\max} \exp\left\{-\left(\varepsilon_{\max}/\varepsilon_0\right)^l\right\} \quad (6)$$

Fig. 4 は最大負荷ひずみ $\varepsilon_{\max}$ の増大に対する変態率 η_{tran} の挙動を示している. 図から分かるように式 (6) は, 変態率 η_{tran} が強制引張による最大負荷ひずみ $\varepsilon_{\max}$ の増大に伴い低下することを意味している. つまり, $\varepsilon_{\max}$ の増大に伴い逆変態可能な要素は減少し, 結果として形状回復機能が低下していることを示唆している.

(3) 加熱による形状回復に対するモデル化

Fig. 5 に単軸応力下での 2 次元変形における η_{2tran} から多軸応力下での 3 次元変形における η_{3tran} への変換方法の概念図を示す. 3 次元変形での η_{3tran} は次のように

Fig. 4. Behaviors of reverse transformation rate η_{tran} with increasing maximum strain by compulsory tensile deformation.

Fig. 5. Concept for applying η_{2tran} to η_{3tran} .

フォン・ミーゼス応力 $\bar{\sigma}_{max}$ に対応する相当ひずみ $\bar{\epsilon}_{max}$ から決定される。

(4) 逆変態に対する確率的決定法

逆変態過程における全要素の相状態の決定に関して次のような仮定をおいた。例えば、変態率が η_{3tran} である要素群において、その中の $100\eta_{3tran}$ (%) の要素が変態を生じるとした。この場合、各要素が逆変態を生じるか否かの確率論的な決定には一様乱数を用いた。またFEM解析において、変態ひずみを熱ひずみとして扱い、逆変態可能な要素に対して、その要素が負荷過程で受けた変形を消滅するように熱膨張係数を与えた。さらに逆変態を生じた要素は母相として、それ以外の要素はマルテンサイト相のままであるとして取り扱った。すなわち逆変態を生じた要素の材料定数をマルテンサイト相から母相へと変換することによって逆変態を取り扱った。

(5) 拡張後の加熱過程における応力-ひずみ挙動について

除荷後の加熱による形状回復過程においてリング内径で変形拘束を受ける場合の応力-ひずみ挙動の概念図をFig. 6に示す。このとき、形状回復は点Qで拘束され、リング内径部の円周方向には引張応力 σ_θ が生じる。直線QRは拘束物が剛体である場合、曲線QR'は変形体である場合を示している。また温度 t の上昇に伴う回復応力、回復ひずみそれぞれの挙動をFig. 7 (a), (b)に示す。

3 解析結果および考察

3・1 負荷・除荷後の変形状態

Fig. 8に拡張率 ξ の増大に伴う弾性回復ひずみ $\Delta\epsilon_e$ の増大挙動を示し、Fig. 9に弾性回復率 η_e の増大挙動を示す。なお ξ および η_e は次のように定義した。

$$\xi = \frac{D_B - D_A}{D_B} \quad (7)$$

Fig. 6. Behavior of stress with increasing recovery strain due to heating after unloading.

Fig. 7. Modeling for the behaviors of stress and strain with increasing of deformation due to reverse transformation.

Fig. 8. Changes of elastic recovery strain with increasing the inside diameter enlarging rate of the ring.

Fig. 9. Changes of elastic recovery rate with increasing the inside diameter enlarging rate of the ring.

$$\eta_e = \Delta\bar{\epsilon}_e / \bar{\epsilon}_{max} \quad (8)$$

ここで、 D_B , D_A はそれぞれ拡張前および拡張時のリング内径を示している。弾性回復ひずみ $\Delta\epsilon_e$ および弾性回復率 η_e は拡張率 ξ の増大とともに増大し、さらにリングの肉厚が薄くなるほど増大することが分かる。つまり、たとえ、同じ拡張率であっても薄肉であるほど拡張後のリング内径は小さくなる。

Fig. 10, 11は $\xi = 25$ [%]の拡張後にリングの内径側と外径側の間で生じる残留円周応力 σ_θ および残留径応力 σ_r の分布を示している。これらの残留応力 σ_θ , σ_r はリング内径側において最も高くなり、かつリング肉厚の増

Fig. 10. Change of hoop stress distribution with increasing the ring thickness.

Fig. 11. Change of radial stress distribution with increasing the ring thickness.

大に伴い増大している。一般に変態線図で知られるように SMA における逆変態温度は変形応力の増大に伴い上昇する⁵⁾したがって、このような残留応力を内在している SMA リングにおいて、要求機能を満たすだけの逆変態を生じさせるためには、より高温での熱エネルギーを必要とすることが容易に推察できる。

3・2 加熱過程における形状回復挙動

3・2・1 無拘束条件下での形状変化 無拘束条件下での加熱による変態回復ひずみ $\Delta\epsilon_{re}$ および変態回復率 η_{re} の拡張率 ξ に対する挙動を Fig. 12, 13 に示す。なお、変態回復率 η_{re} は次式で定義する。

$$\eta_{re} = \Delta\tilde{\epsilon}_{re} / \tilde{\epsilon}_{\max} \quad (9)$$

したがって、全形状回復率 η_{Total} は次式で表される。

$$\eta_{Total} = \eta_e + \eta_{re} = (\Delta\tilde{\epsilon}_e + \Delta\tilde{\epsilon}_{re}) / \tilde{\epsilon}_{\max} \quad (10)$$

Fig. 12, 13 から分かるように、変態回復ひずみ $\Delta\epsilon_{re}$ に比べて変態回復率 η_{re} の方は、リング肉厚が厚いほど大きくなり、その低下挙動も緩やかとなっている。つまり、リング肉厚が厚いほど、拡張による逆変態機能の低下は少なく、より安定した締付機能を有することを示唆している。

3・2・2 締結上の有効拡張範囲の検討 SMA リングを用いた締結法は前述のように、リング拡張後の加熱による形状回復を利用するものであるが、このうち実際に締結に必要な条件は、Fig. 14 に示すように SMA リングが内部挿入パイプへの接触以降における形状回復量であ

Fig. 12. Changes of transformation recovery strain with increasing the inside diameter enlarging rate of the ring.

Fig. 13. Changes of transformation recovery rate with increasing the inside diameter enlarging rate of the ring.

Fig. 14. Illustration of effective strain ϵ_h for fastening the inserted structure.

る。この締結における有効ひずみ ϵ_h は次式で表される。

$$\begin{aligned} \epsilon_h &= \epsilon_D - \epsilon_{\max} + \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_{re} \\ &= \epsilon_D - \epsilon_{\max}(1 - \eta_{Total}) \end{aligned} \quad (11)$$

なお ϵ_D は、SMA リング内径を D_R 、パイプ外径を D_P とすると次式で定義される。

$$\epsilon_D = \frac{D_P - D_R}{D_R} \quad (12)$$

Fig. 15 に拡張率 ξ に対する有効ひずみ ϵ_h の挙動を示す。拡張率 ξ の増大に伴い ϵ_h は低下し、肉厚が厚くなるほど増大する。ここで図の白丸、黒丸はそれぞれ締結可能な拡張率の下限値と上限値を示している。つまり、下限値以下では拡張が不十分でパイプを挿入することができず、一方上限値以上では加熱により形状回復するものの内部

Fig. 15. Changes of effective strain with increasing the inside diameter enlarging rate of the ring.

のパイプに接触できず締結できない。Fig. 16 は本解析条件における、下限値および上限値に対する肉厚変化の影響を示している。つまり、図の下限値と上限値に囲まれた領域が締結可能な有効拡管範囲である。

3・3 変形拘束条件下での締付圧力挙動

Fig. 17 は挿入する拘束物が剛体である場合の拡径率に対するリング締付圧力 P の挙動を示している。拡径率の増大に伴い締付圧力は急激に低下していることが分かる。また締付圧力 P はリングの肉厚が厚いほど増大する。

Fig. 16. Changes of effective diameter enlarging rate with increasing thickness of the ring.

Fig. 17. Changes of pressure for rigid with increasing the inside diameter enlarging rate of the ring.

この拡径率に対する締付圧力の挙動は次のように数式化できる。

$$P = P_{\max} \exp\left[-\left(\frac{\xi}{\xi_0}\right)^b\right] \quad (13)$$

ここで、 $P_{\max}$ 、 ξ_0 はそれぞれ最大締付圧力および締付圧力が急激に低下している領域の遷移点を示しており、これらのパラメータは肉厚 t の関数になっている。なお、ここでの締付圧力 P は拘束物が剛体であるため、各肉厚での SMA リングの上界締付圧力であるといえる。

一方、有効拡管範囲内における拡径率での肉厚変化に対する上界締付圧力の挙動としては式 (13) より Fig. 18 のように示され、拡径率が高くなると肉厚の増大とともに上界締付圧力 P は低くなっていく。

Fig. 19 に挿入する拘束物が SUS304 製ステンレスパイプである場合の、拡径率に対する締付圧力の挙動を示す。この締付圧力の挙動は 2 つの領域に分けられる。それは、締付圧力が拡径率の増加に対し、緩やかに低下する領域と急峻に低下する領域であり、これはステンレスパイプが塑性変形する領域と、弾性変形の領域にそれぞれ対応している。実際に 2 つのパイプを締結するときには、被締結体に塑性変形させて締結するため、ステンレスパイプの降伏点に相当する折れ曲り点が要求締付圧力 P の下限値となる。また Fig. 19 において、ステンレスパ

Fig. 18. Changes of pressure for rigid with increasing thickness of the ring.

Fig. 19. Changes of pressure for deformable structure with increasing the ring thickness.

イプの塑性変形領域の大きい厚肉リングの方がより拡張率範囲が広く取れ締結機能に優れていることが分かる。

4 SMA リング寸法の最適化

以上の結果からはリング肉厚が厚いほど、より高い締付圧力や締付機能の安定性が得られることが分かったが、ここでは経済性、作業性の観点からリング肉厚の最適化を検討する。

この最適化における条件とは、要求締付圧力を満足した上で、SMA の材料コスト面より、可能な限りリング肉厚は薄く、かつ拡張工数（負荷・除荷繰返し拡張作業）の面より拡張率が小さくなることが望ましい。

そこでまず、経済的な最適化を図るために、有効拡張範囲内の拡張率に対する単位肉厚当たりの上界締付圧力 P/t [MPa/mm] の挙動を Fig. 20 に示す。また、図中の細点線は P/t のピーク値を示し、太点線は Fig. 19 で説明した要求締付圧力の下限值に対して同様に求めた値である。したがって、各拡張率に対して、太点線以上の領域での P/t のピーク値に対応する肉厚が経済的に最適な肉厚となる。拡張率の最適化も考慮すると $\xi = 18$ [%], $t \approx 3$ [mm] がほぼ最適値となると予測できる。

一方、作業性の観点からリング肉厚の最適化を検討した。ここでは作業性を拡張仕事当たりの上界締付圧力 P/W [MPa/J] として定義し、そのリング肉厚との関係を Fig. 21 に示す。図中の太点線は Fig. 20 と同様な値を示し、この太点線以上の領域で P/W が最大となる肉厚および拡張率が望ましい。したがって、拡張率の最適化を考慮すると $\xi = 18$ [%], $t \approx 5$ [mm] が最適条件となる。したがって、両観点から判断すると、 $\xi = 18$ [%] にて $3 < t < 5$ [mm] が総合的に最適な肉厚条件となると考えてよいであろう。

5 結 言

本研究で我々は2つのパイプの締結を目的とした SMA リングの開発および最適設計を行うための解析モデルを

Fig. 20. Behaviors of lower limit of combining pressure per unit thickness with increasing the Ring thickness.

Fig. 21. Behaviors of lower limit of combining pressure per unit work with increasing the Ring thickness.

独自のアイディアにより考案した。さらに本研究では、実験結果に基づいた数式モデルを利用した FEM 解析から SMA リング拡張における負荷・除荷過程の応力ひずみ挙動だけでなく、締結のための加熱による形状回復過程においても明らかにすると共に、経済性、作業性の観点から最適なリング肉厚および拡張条件を明らかにした。得られた結果は下記ようになる。

- (1) 単軸応力下における2次元変形での逆変態特性から、多軸応力下の3次元変形での逆変態特性を予測できる確率逆変態モデルを考案できた。
- (2) 拡張・締結工程における弾性回復、加熱による変態回復の挙動に対するモデルを考案し、数式化を図ることができた。
- (3) 被締結体の挿入パイプに対して、剛体、弾塑性変形体を考慮した締付圧力を明らかにした。
- (4) 拡張における拡張率 ξ の下限界以上の領域において、任意の ξ に対応する最適リング肉厚を推定できた。
- (5) リングの材料コストおよび拡張作業効率の両面から判断すると、最適リング肉厚 t は $3 < t < 5$ [mm] である。

参 考 文 献

- 1) 宮崎修一, 佐久間俊雄, 渋谷壽一, “形状記憶合金の特性と応用展開”, p.226 (2001) シーエムシー。
- 2) 服部茂雄, 日本機械学会中国四国支部第81回講習会形状記憶合金の特性と応用講演集, 59 (2001)。
- 3) Y. F. Zheng, W. Cai, J. X. Zhang, L. C. Zhao and H. Q. Ye, Acta Metall., **48**, 1409 (2000)。
- 4) Y. Liu, Y. Liu and J. V. Humbeeck, Scripta Materialia., **39**, 1047 (1998)。
- 5) 清水謙一, 入江正浩, 唯木次男編, “記憶と材料—入門形状記憶材料”, p.86 (1986) 共立出版。