702 起動停止時におけるパイプ内き裂の過渡的応力拡大係数を低減するための流体温度履歴の与え方に関する逆解析手法

An Inverse Analysis Method for Determination of Fluid Temperature History Reducing Transient Stress Intensity Factor of Crack in Pipe during Start-up and Shut-down

学 〇前川 充匡 (阪大) 正 久保 司郎 (阪大) 正 井岡 誠司 (阪大)
 Mitsumasa MAEKAWA, Osaka University, Yamadaoka, 2-1, Suitashi, Osaka
 Shiro KUBO, Osaka University
 Seiji IOKA, Osaka University

Key word: Inverse Analysis, Stress Intensity Factor, Crack, Thermal Stress, Pipe, Fluid Temperature History

1 緒 言

機器の起動停止時には、配管内を流れる流体の温度が変化し、配管に不均一で非定常な熱応力が発生する。発生した熱応力により生じるパイプ内き裂の過渡的応力拡大係数は、機器の健全性および寿命を評価するために重要である。この熱応力問題は、流動様式、熱伝達、熱伝導、固体熱変形の問題が関わるマルチフィジックス問題である。本研究では、この問題を分解し、過渡的応力拡大係数を低減するための流体温度履歴の与え方を求めるための逆解析手法を提案する。

Fig.1 Outside crack model

簡単のため、その半径が円筒の厚み l に対して十分大きく、また軸対称加熱される問題を考え、無限平板近似を用いる。パイプの軸方向応力 $\sigma(x,t)$ は、このとき、時間を t とし、内表面温度履歴 $T_s(t)$ 、線膨張係数 α 、ヤング率 E 、温度伝導率 κ 、板厚 l 、 $\phi_n = (2n+1)\pi/2$ を用いて、次のように表される。⁽¹⁾

$$\sigma(x,t) = 2\alpha E \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(\phi_n \frac{x}{l})}{\phi_n} - \frac{1}{\phi_n^2} \right\} e^{-\frac{\kappa \phi_n^2}{l^2} t} \int_0^t \frac{dT_s(\tau)}{d\tau} e^{\frac{\kappa \phi_n^2}{l^2} \tau} d\tau \quad (1)$$

この軸方向応力 $\sigma(x,t)$ を残留応力と考え、き裂面に相当する部分に作用させることにより応力拡大係数 $K(t)$ は、き裂長さ a 、補正係数 F 、熱応力分布、 $\sigma(x,t)$ を用いて、次式のように得られる。

$$K(t) = \int_{x=0}^{x=a} \frac{2}{\sqrt{\pi a} \sqrt{1-x^2/a^2}} F \sigma(x,t) dx \quad (2)$$

起動時の内表面温度 $T_s(t)$ が $t:0[s] \rightarrow t_e[s]$ で $T_s(t):0[^\circ\text{C}] \rightarrow T_e[^\circ\text{C}]$ に変化するとき、関数の重ねあわせにより、き裂に生じる応力拡大係数を最小化する $T_s(t)$ を求める。ここでは、 i 番目の内表面温度履歴 $T_{si}(t)$ の候補として、次式のような時間 t に関する $i+1$ 次関数を用いる。

$$T_{si}(t) = \begin{cases} (-1)^{i+2} T_e \left(\frac{t-t_e}{t_e} \right)^{i+1} + T_e & (0 \leq t \leq t_e) \\ T_e & (t_e \leq t \leq t_\infty) \end{cases} \quad (3)$$

2 次以上のべき関数を用いているのは、 $t=t_e$ で $T_s(t)$ が滑らかに連続するようにするためである。

パイプの内表面温度が式(3)で表される i 次べき関数で与えられるとき、応力拡大係数 $K(t)$ の最大値を最小化する $T_{si}(t)$ をパラメータ ξ_i を用いて、次式で与える。

$$T_s(t) = \sum_{i=1}^j \xi_i T_{si}(t) \quad (4)$$

ここで係数 ξ_i は $\sum_{i=1}^j \xi_i = 1$ を満たす。内表面温度の関数 $T_{si}(t)$ に対応する応力拡大係数 $K_i(t)$ とすると、内表面温度 $T_s(t)$ に対する応力拡大係数 $K(t)$ は次式のように表わされる。

$$K(t) = \sum_{i=1}^j \xi_i K_i(t) \quad (5)$$

応力拡大係数 $K(t)$ の最大値を最小化する ξ_i ($i=1,2,\dots,j$) を求めることにより $T_s(t)$ が定まる。内表面温度 $T_s(t)$ が定まると、対応する流体温度履歴を熱流束から求めることができる。流体温度履歴 $T_f(t)$ は、熱伝達係数 h 、熱伝導率 λ を用いて、次式のように得られる。

$$T_f(t) = T_s(t) + \frac{2\lambda}{hl} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{\kappa \phi_n^2}{l^2} t} \int_0^t \frac{dT_s(\tau)}{d\tau} e^{\frac{\kappa \phi_n^2}{l^2} \tau} d\tau \quad (6)$$

3 数値例

式(3)において、 $t_e = 10[\text{s}]$ 、 $T_e = 100[^\circ\text{C}]$ とする。すなわち、最初の $100[\text{s}]$ 間で内表面温度 $T_s(t)$ を $0[^\circ\text{C}]$ から $100[^\circ\text{C}]$ まで上昇させ、その後 $100[\text{s}]$ から $200[\text{s}]$ の間は $T_s(t)$ を $100[^\circ\text{C}]$ に保持する問題を考える。今回は $j=3$ とした。また、物性値には Table 1 のものを用いた。

Table 1 Thermal and mechanical properties

Radial thickness	l	[m]	0.03
Thermal diffusivity	κ	[m ² /s]	4.0485×10^{-6}
Coefficient of thermal expansion	α	[$^\circ\text{C}^{-1}$]	17.3×10^{-6}
Yong's modulus	E	[MPa]	197000
Thermal conductivity	λ	[W/(m $\cdot$ $^\circ\text{C}$)]	16.0
Coefficient of heat transfer	h	[W/(m ² $\cdot$ $^\circ\text{C}$)]	5500
Crack length	a	[m]	0.003

3.1 外側き裂の過渡的応力拡大係数の最小化

パイプの板厚の10%の長さを持つ外側き裂に対する応力拡大係数 $K(t)$ の最大値を最小化するパラメータ ξ_i を計算すると、 $\xi_1=5.48$ 、 $\xi_2=-12.49$ 、 $\xi_3=8.01$ となった。このパラメータを用いて、式(5)より求めた $K(t)/\sqrt{\pi a}$ の時間履歴を実線で Fig. 2 に示す。図中には $T_{si}(t)$ に対応する応力拡大係数 $K_i(t)$ も示している。 $K(t)/\sqrt{\pi a}$ の最大値が $80.69[\text{MPa}]$ と、低減できていることがわかる。

また、このときの式(3)で表わされる内表面温度履歴 $T_{si}(t)$ ($i=1,2,3$) とそれらを重ね合わせた最適内表面温度履歴 $T_s(t)$

をFig. 3に示す. さらに, $T_{s1}(t)$, $T_{s2}(t)$ に対応する流体温度履歴 $T_{f1}(t)$, $T_{f2}(t)$ をFig. 4に示す.

Fig. 2 History of stress intensity factor $K(t)$ and $K_i(t)$ (outside crack)

Fig. 3 History of inner surface temperature $T_s(t)$ and $T_{s1}(t)$ (outside crack)

Fig. 4 History of fluid temperature $T_f(t)$ and $T_{f1}(t)$ (outside crack)

3.2 内側き裂の過渡的応力拡大係数の最小化

パイプの板厚の10%の長さを持つ内側き裂に対する応力拡大係数 $K(t)$ の最大値を最小化するパラメータ ξ_i を求めると $\xi_1=4.18$, $\xi_2=-9.00$, $\xi_3=5.82$ となった. このパラメータを用いて, 式(5)より求めた $K(t)/\sqrt{\pi a}$ の時間履歴を実線でFig. 5に示す. 図中には $T_{s1}(t)$ に対応する応力拡大係数 $K_{i1}(t)$ も示している. $K(t)/\sqrt{\pi a}$ の最大値が119.50[MPa]と, 低減できていることがわかる.

また, このときの式(3)で表わされる内表面温度履歴 $T_{s1}(t)$ ($i=1,2,3$) とそれらを重ね合わせた最適内表面履歴 $T_s(t)$ をFig. 6に示す. さらに, $T_{s1}(t)$, $T_{s2}(t)$ に対応する流体温度履歴 $T_{f1}(t)$,

$T_{f2}(t)$ をFig. 7に示す.

Fig. 5 History of stress intensity factor $K(t)$ and $K_i(t)$ (inside crack)

Fig. 6 History of inner surface temperature $T_s(t)$ and $T_{s1}(t)$ (inside crack)

Fig. 7 History of fluid temperature $T_f(t)$ and $T_{f1}(t)$ (inside crack)

4 結 言

パイプの外側表面に存在するき裂および内側表面に存在するき裂の過渡的応力拡大係数を低減するための流体温度履歴の与え方を求める逆解析手法について検討した.

内表面温度履歴をべき関数の重ね合わせで表現し, 過渡的応力拡大係数の最大値を最小化する逆解析手法を提案した. また数値例により過渡的応力拡大係数の低減が可能であることを示した.

5 参考文献

- (1) 内田賢治, 平成20年度大阪大学修士論文, (2009).