防爆機能を有するプラント配管保温構造の開発の試み

Improvement of development of plant piping thermal insulation structure with explosive-proof function

○学 石原 一輝 (福井大院)
正 飯井 俊行 (福井大院工)

正 佐藤 康元 (福井大院工)
岩佐 尚邦 (セーレン株式会社)

Kazuteru ISHIHARA, Yasumoto SATO, Toshiyuki MESHII, Naokuni IWASA
Univ. of Fukui, Bunkyo 3-9-1, Fukui, 910-8507

Key Words: Wastage piping, Burst internal pressure, Autofrettage, Fiber, Finite element analysis

1. 緒言

プラントの高温配管保温構造は、ウレタンフォームが用いられるようになり、保温性はもとより防塵性が向上され、定期検査時の作業環境の改善につながっている。しかし近年、関西電力美浜3号機事故のように、配管が破裂する事故が起きていることを受け、本研究では高温配管保温構造に防爆機能を付与することで、プラントの安全性を飛躍的に向上させる手法について検討した。防爆機能として、通常運転中は降伏しないよう設計されている配管が、徐々に減肉することで内圧により降伏し、点検時には内圧が0 MPaになる、この一連の流れに着目して、ポンベ等にはすでに適用されている自緊(autofrettage)⁽¹⁾の適用を検討した。

自緊とは、ファイバー等の補強材(以下「ファイバー」とする)を表面に巻いた配管を一度降伏させた後、0 MPaまで減圧すると、配管に圧縮残留応力が生じ、再び内圧を上昇させても破裂内圧が上昇し、耐久性が向上した状態を実現できるというものである(図1参照)。

本研究では、自緊による防爆機能を有したプラント配管保温構造の開発を目的とし、まずは自緊の設計手順を確立した。

Fig. 1 Liner and fiber pre/post autofrettage

2. 配管への自緊の適用

2.1 基礎理論 自緊は、すでにポンベ等に使われている周知の技術であるが、主に製品として使用する前の処理として適用されている。一方、原子力プラント等の配管は、自緊がなければ、減肉などが起こることにより不健全な状態になりうるが、配管外表面にファイバーなどの補強材を設置し、配管減肉部の応力上昇により自緊を生じさせることによって健全性を保てる可能性がある。つまり、ポンベなどで適用されている供用前に施される自緊とは異なり、プラントなどでの運転中の配管における減肉を、積極的に利用することにより、運転中のプラント配管に圧縮残留応力を生じさせ、減肉を有するプラントの安全性を向上させる

ことが可能と考えられる。無論、原子力プラントでは初期の段階で配管が降伏することは考えられないが、運転年数が増え、配管が減肉することにより(図2(a))、たとえ内圧が一定であったとしても降伏することは、美浜3号機配管破裂事故からも大いに考えられる。そして、定期検査により管内圧力は0 MPaに落ちる(図2(b))。つまり、減肉することにより周方向応力 σ_θ が降伏応力 σ_{YS} を超えた後の減圧で圧縮残留応力がかかり、その後の内圧の発生時には周方向応力の低減による耐久性の向上が期待される。このように、減肉発生後のプラント配管への自緊適用の可能性が考えられる(図2(c))。

Fig. 2 Plant condition

2.2 計算手順 図3に計算手順を示す。初めに図3①から、各種入力値を設定する。配管は、内圧 p 、軸力 N 、曲げモーメント M を受ける時、周方向応力 σ_θ 、軸応力 σ_l 、半径方向応力 σ_r の三軸応力(主応力)状態にある。弾性薄肉円筒理論から、平均半径と肉厚 t を用いて、両端にフタがない場合の、内圧 p のみを考慮して導き出される内圧 p と配管に生じる周方向応力 σ_θ の関係を与える式にて、運転内圧 p_{op} を定義する。

次に図3②から、三軸の主応力と内圧の関係式を導出する。

最後に図3③に計算により得られる値をグラフにプロットする。ここで、縦軸は破裂内圧 p_b 、横軸は肉厚 t とする。自緊前後の破裂内圧は、図3②で得られる三軸の主応力と

Fig. 3 Flow chart of calculations

内圧の関係式から導出する。ファイバーを巻いていない配管の評価には、図 3①の弾性薄肉円筒理論より得られる式から導出する。

3. モデル計算

3.1 試験体 高温配管用炭素鋼 STPT370 を用い、図 3 に示すように、外径 $D=107.1$ mm、初期肉厚 $t_0=4$ mm、内径 $d_0=99.1$ mm の両端にキャップを有する配管状試験体を検討対象とした。今回は減肉部肉厚 t_1 を軸方向一定とする一様減肉として検討を進めた。ファイバーには、PAN(Polyacrylonitrile)系高強度炭素繊維を用いて計算した。配管とファイバーの機械的性質を Table 1, 2 にそれぞれ示す。ここで、ファイバーの性質は文献⁽²⁾より抜粋した範囲の中間点を用いた。

Fig. 4 Cross section of the pipe specimen

3.2 計算条件 図 3 に示した計算手順に従って上記配管試験体のモデル計算を実施した。図 3①から、自緊が起こる内圧 p_a は、減肉が進むとプラント運転時の内圧 p_{op} で自緊が起こると仮定し、 $p_a=p_{op}$ とした。通常運転中の健全な配管は降伏しないよう設計されていると考え、 $\sigma_\theta = \sigma_{ys}$ として運転内圧を定義した。今回の計算では、 $t=t_0=4$ mm の時の内圧を運転内圧 p_{op} として適用した。これは、減肉のない健全な配管の時には降伏しないという考えから、肉厚 t が t_0 より薄くなった時点で自緊がかかることを想定して決定した。また、ファイバー補強面積 a_f は、肉厚 $t=1, 0.5, 0.25$ mm の時のそれぞれの臨界破裂内圧 p_{bc} の時の臨界フ

Table 1 Mechanical properties of pipe material (STPT370)

Y.S. σ_{ys} MPa	U.T.S. σ_{Bl} MPa	Tensile modulus E_l GPa	Elong. ε_{maxl} %
288	447	206	40

Table 2 Mechanical properties of fiber

U.T.S. σ_{Bf} MPa	Tensile modulus E_f GPa	Elong. ε_{maxf} %
5000	250	1.5

ィーパー補強面積 a_{fc} とした。ここで臨界破裂内圧とは、ファイバーをそれ以上巻いても破裂内圧が向上しない限界の破裂内圧を指す。そして、求められた関係式から破裂内圧 p_b を求める時は、周方向応力 $\sigma_\theta = \sigma_{Bl}$ となった時の内圧を p_b として評価している。

3.3 モデル計算結果および考察

異なるファイバー補強面積に対し、上記の計算手順に従ってモデル計算した結果得られた、配管肉厚と破裂内圧の関係を図 5 に示す。

ここで、白いマーカーは自緊後の破裂内圧を、黒いマーカーは自緊前の破裂内圧を表している。灰色のマーカーはファイバーを巻いていない時の破裂内圧を表している。

下記のグラフより、自緊後の破裂内圧が自緊前の破裂内圧に比べて上昇している様子が分かる。このように外径 107.1 mm、初期肉厚 4 mm の配管試験体に対して、今回提案する設計手順により自緊を生じさせることが出来ることを確認した。今後は、様々な大きさ、初期肉厚の配管に対し、今回提案する手順に従った計算を実施するとともに、有限要素解析により提案手法の適用範囲を明確にする。

Fig. 5 Calculation results

5. 結言

減肉配管に安全性向上を目的として、プラントの高温配管保温構造を補強材とし、減肉による配管応力上昇を利用して配管に自緊を生じさせる設計手法を提案した。モデル計算により提案する設計手法の妥当性を確認した。

参考文献 (省略)