

論文の内容の要旨

論文題目 信頼性手法に基づく減肉を有する圧力設備の
供用適性評価手法に関する研究

氏 名 戒田 拓洋

本論文では、経年化プラントの事故防止のための技術として、減肉を有する圧力設備の供用適性評価技術に着目し、信頼性手法に基づいて、安全裕度を合理化する手法を検討した。その中でも、一般的な化学プラント圧力設備に経験される保温材下腐食を対象に、利便性の高い信頼性手法に基づいた供用適性評価手法、並びに次回検査時期の決定手法の提案を行うことを本論文の目的とした。供用適性評価技術導入と普及に向けて、実際のメンテナンスにおけるデータを調査するとともに、簡易かつ効果的に適用するための評価手法を提案した。

第1章では、信頼性手法を用いた供用適性評価手法に関する既往研究事例と現状および課題を述べた。減肉評価に関する研究は、主に内圧による破壊を対象として、圧力設備の耐圧性能に関する研究が進み、その応用として決定論的な供用適性評価に関する研究に広がり、供用適性評価規格として発行され広く利用されるようになった。その後、決定論的手法の安全係数を合理化することを目的として、信頼性手法の研究が行われるようになった。一方で、信頼性手法に基づいた減肉評価を実施する際には、その手順が煩雑になることや、統計データが評価に利用できる形で整理されていない等、合理性の高い信頼性手法の普及のためには、更なる利便性の向上が必要であることを示した。

第2章では、本研究で用いる信頼性解析手法について解説し、同手法をより簡易に導

入するために、確率変数として取り扱う変数の選択について、感度解析を用いて客観的に評価する手法を提案した。一次近似信頼性手法における信頼性指標 β_{HL} の定義を中心に整理し、標準正規空間上における設計点と、確率的感度の関係を明らかにした。設計点における限界状態関数の法線ベクトル α_i は確率的感度を相対的に示すものであり、 α_i を評価することによって、各確率変数の確率的感度や荷重・耐力特性が明らかになることを示した。

提案手法を化学プラント圧力設備の減肉評価に適用し、保温材下腐食を対象とした減肉評価手法に対し、過去の減肉速度データ等を与え感度解析を実施した結果、減肉速度と減肉部の最小厚さ測定値が、より破損確率に影響を与えることを明らかにした。

過去の減肉速度データ等に基づいて感度解析を行った結果から、減肉速度と減肉部の最小厚さ測定値を確率変数として採用し、目標とする破損確率を修正係数により保証した限界状態関数を導出した。高感度の確率変数と修正係数を考慮した限界状態関数を用いて、保温材下腐食を対象とした減肉を有する圧力設備の供用適性について容易に評価が可能な等破損確率評価線図を提案した。

感度解析に基づく限界状態関数の導出手法は一般的な問題にも適用可能であるが、精度を保証するための修正係数の決め方は、限界状態関数の形やそれぞれの確率変数の確率特性に依存する。本章では、対象とする構造物の信頼性評価の特徴、目的（確率変数の数を増やし煩雑な評価を実施しても許容される範囲を増やしたいか、又は許容される範囲を狭くしてもよいから、確率変数の数を減らし評価をできるだけ簡便にしたいか等）を踏まえ、感度解析結果に基づいて限界状態関数を導出する手順について事例解析を実施して明らかにした。

第3章では、供用適性評価における検査データの確率特性を明らかにするために、実機で経験された配管の腐食サンプルを供試し、供用適性評価に対応した厚さ測定についてラウンドロビン試験を実施するとともに、減肉配管の信頼性評価を実施した。まず、減肉を有する圧力設備の要求性能について、耐圧性能と耐漏えい性能に分類し、それぞれの要求性能ごとに厚さ測定値のばらつき要因について整理した。次に、実機で経験された3体の腐食サンプルについて供用適性評価に対応した厚さ測定を複数の機関で行った結果から厚さ測定データを整理し、減肉部と健全部で厚さ測定値のばらつきが大きく異なることを明らかにした。その要因については、供用適性評価のために検査グリッド上の点を検査員が測定していることから、減肉部の最小値を測定する方法よりもばらつきが大きくなるためと考えられた。得られた確率特性を信頼性評価が可能な形に整理した。

第4章では、破損確率の時間的推移に着目して、減肉を有する圧力設備の破損確率に基づく余寿命評価手法を提案した。また、目標信頼性については、従来の余寿命評価法

である確定論的全面減肉評価法に信頼性手法を適用して、従来手法の破損確率を求め、従来手法の水準で、局部減肉評価法の水準が保たれるようにした。

腐れ代が2mmの一般的な形状を持つ圧力設備に対して、断熱材下腐食を対象とした次回検査時期の決定について、従来手法である全面減肉評価法の信頼性を評価した結果、1年間当たりの破損確率が 2.2×10^{-8} という結果を得た。腐れ代が2mmの設備に対する従来手法の破損確率を目標信頼性とおいて、全面減肉評価手法の信頼性手法に基づく余寿命評価を行った。その結果、将来腐れ代が小さい場合、確定論的手法よりも、次回検査時期を延長することができ、確率論的手法適用による合理化が達成されることを明らかにした。

浅くて広い減肉や深くて狭い減肉等、6ケースの減肉形状に対して、局部減肉評価を確定論的手法、並びに確率論的手法を用いて実施した。減肉が進行し、残存強度が小さい設備に確率論的手法の適用する際、より大きな合理化が認められることを明らかにした。

第5章では、部分安全係数の破損確率に対する感度に着目し、定量的かつ簡易的に適用性を評価する手法を検討した。検討では、部分安全係数の感度に対応するものとして、二次近似信頼性手法における設計点の主曲率に着目した。主曲率と感度の関係について検討した結果を示し、検討結果を踏まえて合理的な部分安全係数の設定に利用可能な定量的指標を提案した。

第6章では、化学プラント圧力設備に発生する保温材下腐食に対し、過去の減肉速度データ等から得られた確率特性を与えた上で、部分安全係数法を用いた次回検査次期決定手法を提案した。それに加え、減肉速度のばらつきが信頼性に与える影響の観点から、保温材下腐食に対する現場の対策や具体的処置について提言した。

化学プラント圧力設備に発生する保温材下腐食に対し、過去の減肉速度データ等から得られた確率特性を用いて部分安全係数を算出した。目標とする破損確率には 2.2×10^{-8} を用いた。その結果、部分安全係数として、減肉速度の平均に対して11、減肉部の厚さ測定値に対して0.98、引張強さの平均に対して1を得た。これらの安全係数は、設計時の安全係数とは大きく異なることを明らかにした。

部分安全係数法に基づく次回検査時期と、一次近似信頼性手法に基づく次回検査時期とを比較した結果、部分安全係数法に基づく次回検査時期は評価が簡易であるのにも関わらず、一次近似信頼性手法の結果と良好に一致した。提案した部分安全係数法に基づく次回検査時期決定手法は、従来決定論的手法と比較して、減肉が進行している場合に、より次回検査時期を延長できることを明らかにした。

現場の保温材下腐食に対する対策について述べ、対策の結果、減肉速度のばらつきを抑えることができた場合に、信頼性の観点から、大きく検査時期の延長が実施できるこ

とを示した。現場で可能な対策として、塗装、防食テープ、ライニング、溶射、保温材の適切な外装施行等の具体的手順を示した。配管の塗装周期を考えた場合、これらの処置は重要で、適切な処置を施すことにより仮に減肉が見つかったとしても次回の塗装時期まで健全性が確保できる可能性がある。

本論文では、一般的な化学プラント圧力設備に経験される保温材下腐食を対象に、過去のデータ等から感度解析を適用し、高感度の確率変数を選択した限界状態関数の導出をすることで、対象とする構造物の利便性の高い信頼性解析が実施可能となった。本論文で高い感度を示した変数の一つである減肉部の厚さ測定値については、信頼性解析に利用できる形で確率特性が整理された。導出された限界状態関数を用いて、提案された余寿命評価手法、並びに部分安全係数法による次回検査時期決定法を採用することにより、利便性の高い信頼性手法を用いた供用適性評価手法の実機への適用が可能となり、信頼性手法を用いた供用適性評価手法の標準化と普及が進むことが考えられる。