

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	根布 景
論文題目	水素・酸素混合ガスの爆轟に対する鋼製配管の健全性評価手法に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、可燃ガスの爆轟がもたらす衝撃波の圧力を受ける鋼製配管に対して、配管の健全性を評価する手法を論じた結果をまとめたもので、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、原子力プラントでは、配管内に蓄積した水素・酸素混合ガスの爆轟が懸念されること、ならびに従来研究では実機配管構造物の健全性を評価する手法が整備されていないため、新たな健全性評価手法を構築する必要があることを論じている。</p> <p>第2章では、爆轟圧力に起因する高速変形条件を模擬した配管材料の高速引張試験結果をまとめたもので、配管材料の機械的特性とひずみ速度の関係を明らかにした。ひずみ速度 0.1 s^{-1} から 5000 s^{-1} の条件下で、材料の延性を示す破断伸びおよび絞りはほとんど変化しないことを明らかにし、爆轟による配管の破壊形態が延性破壊になることを推察した。</p> <p>第3章では、実機配管の形状を模擬した配管試験体について、混合ガスの爆轟によって破壊または変形を生じさせる試験を行い、それぞれの配管形状に対する破壊位置および破壊形態を検証した。直管、閉止弁を模擬した閉止端、またはエルボを有する試験体を爆轟圧力によって破壊させることによって、いずれの試験体も8～14%以上の周方向ひずみを伴う大きな膨張変形をした後に破断すること、および破壊形態が破面にディンプル模様を呈する延性破壊となることを明らかにした。爆轟圧力がピーク圧力まで急峻に上昇し、下降するまでに要する時間に比べて、ひずみが最大値まで上昇するのに要する時間が長いこと、ならびに配管の変形が爆轟圧力のピーク圧力のみ依存しないことを示した。これらのことから、最大負荷力と応力のつり合いを基準とした応力評価法が従来の原子力プラントで用いられてきたが、そのような評価法を適用できないことを明らかにした。以上の結果を踏まえ、従来の応力評価手法に代わる手法として、有限要素法解析によってひずみを求め、求めたひずみを許容ひずみと比較するという手法、すなわちひずみ基準の評価手法を新たに提案した。</p> <p>また、閉止弁を模擬した試験体では、閉止端で発生した反射波の圧力が爆轟圧力に比べて著しく高いこと、および比較的厚肉である弁の本体ではなく、弁に接続された配管が反射波によって破断することを明らかにした。爆轟圧力でエルボを変形させた試験からは、エルボ内で反射した爆轟波が到達することによって、エルボ下</p>			

流の配管が最も膨張変形することが判明した。閉止端に生じる反射波がもたらす変形促進の効果と、エルボがもたらす下流直管の変形促進の効果と比較することにより、配管系の中で相対的に強度が低くなる部位が閉止弁に接続された配管であることを示した。

第 4 章では、配管に生じるひずみを解析的に評価する手法を提供することを目的に、有限要素法を用いて第 3 章の配管強度試験のひずみを解析的に再現した。数値流体力学によってあらかじめ求めた爆轟圧力を、有限要素モデルにおける負荷力として与えた。配管ひずみの解析結果は、試験結果に対して、同等または高めの推定を与えた。この解析により、定量的には差異が生じたものの、閉止端およびエルボを持つ試験体に対しては最大ひずみ発生点を予測することが可能であることを示した。このことから、有限要素法を用いたひずみ評価法は、保守的な設計手法として有効であることを明らかにした。

第 5 章は、健全性評価の基準として用いる許容ひずみを提案したものである。この提案に向けて、まず第 3 章の配管強度試験体の破断時のひずみを、有限要素法解析によって推定した。推定した破断ひずみが、第 2 章の高速引張試験の破断伸びに比べて低下した原因として、多軸応力場がもたらす延性の低下に起因する可能性があることを考察した。さらに、材料毎のばらつきを考慮した安全率を適用し、炭素鋼および低合金鋼配管に対する許容ひずみとして 8 % を提案した。

第 6 章は結論で、以上の研究結果を総括したものである。提案した健全性評価手法を総括すると、以下ようになる。まず、爆轟圧力を受ける鋼製配管は大きな膨張を伴う延性破壊の様相を呈することから、塑性ひずみを基準とした評価手法が有効となり、有限要素法を用いてひずみを予測することにより、健全性評価を行うことができる。また、健全性の判断基準となる許容ひずみには、配管強度試験および材料試験の破断ひずみに安全率を適用した 8 % の値を用いる。以上より、爆轟圧力を受ける鋼製配管の健全性を保守的に評価することが可能となる。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

原子力プラントにおける配管では、内部に蓄積した可燃ガスの燃焼により、衝撃的な爆轟圧力が生じ、配管が突発的に破断することが懸念される。本論文は、そのような爆轟圧力を受ける鋼製配管に対して、その健全性を評価する手法について論じた結果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

まず、爆轟圧力によって生じる高速変形の条件を模擬した配管材料の高速引張試験を実施した。その結果、ひずみ速度 5000 s^{-1} においても、材料延性の指標となる破断伸びおよび絞りは、準静的な負荷条件下での試験結果と同等であり、配管材料は高ひずみ速度においても延性的に破壊することを示した。

次に、直管の試験体、閉止弁を模擬した閉止端の試験体、および実機配管形状を模擬したエルボを有する試験体を、それぞれ爆轟圧力を負荷することによって破壊させた。その結果、いずれの試験体においても、8~14%以上の周方向ひずみを伴う大きな膨張変形をした後に破断すること、ならびにそれらの破壊形態が破面にディンプル模様を呈する延性破壊になることを明らかにした。

さらに、爆轟圧力がピーク圧力まで急峻に上昇し、その後下降するまでの時間に比べて、ひずみが最大値に到達する時間が長いこと、ならびに配管の変形がピーク圧力だけでなく、その後の圧力波形にも影響を受けることを示した。これらのことから、従来原子力プラントで最大負荷力と応力のつり合いを基準とした応力評価法が用いられてきたが、そのような評価法を適用できないことを指摘した。

以上の結果を踏まえ、本論文では、従来の応力評価法に代わる手法として、有限要素法解析によってひずみを求め、求めたひずみを許容ひずみ値と比較するという手法、すなわちひずみ基準の評価手法を新たに提案した。上記の配管試験で生じるひずみを有限要素法解析により再現した結果、高めのひずみ値の推定が得られたことから、有限要素法を用いたひずみ評価法は保守的な設計手法として適用できることを示した。また、ひずみ基準の許容ひずみ値としては、配管の破壊試験における破断時のひずみを有限要素法解析によって推測し、その推測値に安全率を適用した値、すなわち 8.0% を提案した。

以上、本論文は、配管材料の高速変形時の破壊について有用な知見を提示するとともに、爆轟圧力の影響が考慮されていない従来の配管設計手法に代わる評価手法を提案するものであり、学術上および実際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 27 年 2 月 23 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 2016 年 03 月 23 日以降