OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残留応力の測定
Author(s)	小川, 直輝
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/143
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

【122】

氏名	小川直輝（おがわなおき）
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	第　24607　号
学位授与年月日	平成23年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科地球総合工学専攻
学位論文名	固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残留応力の測定
論文審査委員	（主査） 准教授　中長　啓治 （副査） 教授　村川　英一　　教授　大沢　直樹　　教授　望月　正人 准教授　芹澤　久

論文内容の要旨

本研究は，原子炉の安全性の向上を目的として，固有ひずみ法の新しい測定理論と測定手順を開発し，原子炉容器及び冷却材配管の溶接部の残留応力を実継手に近い試験体を使用して測定したものである．

まず，原子炉の冷却材配管の溶接部の残留応力を固有ひずみ法により測定した．円管継手に対して，新たに軸対称測定理論を展開し，その理論に基づいて，有限要素法解析プログラムを構築した．同時に，冷却材配管溶接部の試験体を製作し，同プログラムを使用して，溶接残留応力を評価した．

実験及び理論解析の結果，溶接継手部の表面及び内部の残留応力分布の特徴を知ることができた．又，本測定法では統計学的理論を使用しており，残留応力の最確値と共に，推定精度の評価材料として標準偏差を知ることができる．その結果，最確値の信頼性が十分高いことを確認した．

次に，原子炉容器の管台貫通溶接部の残留応力を固有ひずみ法により測定した．この継手は寸法的に小さく，しかも，固有ひずみが複雑に変化していると推察される．そこで，固有ひずみの分布を関数表示する手法を採用した．関数表示固有ひずみ法の理論を具体的に展開し，それに基づいて有限要素法解析プログラムを構築した．又，実継手に近い試験体を製作して，同プログラムを使用し，その３次元溶接残留応力分布を測定した．

関数表示固有ひずみ法を適用する場合，解析で使用する固有ひずみ分布関数が特に重要な解析条件となる．本研究では，１０種類の分布関数を設定して，それらの関数の本解析への適応性を評価した．評価は固有ひずみ法が統計学的には最小二乗法に基づいていることに注目して，３段階の診断により進めた．第１段階は「残差からの診断」，第２段階は「統計学的見地からの診断」，最後の第３段階は「専門知識からの診断」である．「専門知識からの診断」では，溶接力学的観点から，まず，定量的に，そして，定性的に診断した．１０種類の分布関数により得られた解析結果を，このような手順で評価し，分布関数の適応性の優劣を判定した．その結果，固有ひずみ分布関数として，３次多項関数を使用した場合が最も信頼できる推定結果を与えていると結論付けた．また，その残留応力の分布特性を把握すると共に，生成機構を溶接金属の収縮に対する内的拘束の観点から考察した．

試験体を用いた残留応力計測は，計測作業が煩雑であり高費用を要することから，経済性を考えると，できる限り少ない計測点数で精度よく評価できることが望ましい．そこで，固有ひずみ分布関数と共に重要な解析条件である，ひずみ計測領域の適性診断を行った．結果の評価は分布関数の診断時と同様に３段階で行い、更に，第４段階の診断として，「経済性からの診断」を追加し、総合的に最適なひずみ計測領域を決定した．その結果，推定精度をほとんど低下させずに、ひずみ計測数を従来の約40％まで大幅に削減できることを解明した．この計測領域は，溶接端部から約20㎜離れた領域を含む範囲であり，塑性ひずみ発生領域よりやや広い領域と考えられる．類似の継手形状であれば，同様の範囲を計測領域と設定すれば，信頼できる測定結果が得られるものと結論付けた．このように推定精度と経済性が両立するひずみ計測領域を究明できたことは，将来，類似の実験を実施する場合の一つの指標となり，非常に意義深い成果と言える．

以上のように，本研究は，原子炉の配管突合せ溶接継手及び原子炉容器管台貫通溶接部の残留応力を対象として，固有ひずみ法に基づく高精度高効率な測定理論と測定手順を開発し，その信頼性を実証したものである．本研究で構築した３次元残留応力評価手法は厚板内部の複雑な残留応力分布を解明することが可能であり，発電プラント等の溶接構造物に対する寿命評価の高精度化が実現できるため，その健全性及び経済性の向上に大いに貢献することができるものと確信する．又，残留応力改善を目的とした新しい溶接法の検証，等にも，必須の測定法として大いに活躍することが期待できる．

論文審査の結果の要旨

原子力発電プラントや火力発電プラントは，様々な配管や容器を溶接により接合している構造物であり，溶接部には残留応力が発生する．特にニッケル基合金溶接部においては，残留応力により応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）が発生する事象が，近年，国内外のプラントにおいて報告されている．

例えば，国内では，沸騰水型原子炉(BWR:Boiling Water Reactor)では浜岡 1 号機において，加圧水型原子炉(PWR: Pressurized Water Reactor)では大飯３号機において，原子炉容器貫通部材の溶接部で応力腐食割れによる漏洩事象が認められている．したがって，これらに対し適切な予防保全対策を実施することが重要な緊急課題となっている．

応力腐食割れは，材料，環境，応力の３つの因子が重畳した時に発生すると考えられている．各因子に対して，材料，環境面での改善は適宜進められており，応力を低減する手法も検討されているが，応力値そのものを精度よく評価することも重要である．溶接残留応力を精度よく測定することで，力学的な面から損傷発生防止に最適な溶接法を究明することや，損傷発生後のき裂進展解析の精度を向上させ，寿命評価の信頼性を高めることが可能となる．特に，容器貫通部のように厚板と配管との複雑な溶接形状を持つ構造部は，溶接部や部材の内部（断面）で残留応力が複雑に変化していると推察され，高精度で詳細な残留応力分布データを取得する必要性が高まっている．

残留応力分布の測定法は様々な手法が提案されているものの，厚肉構造物の溶接部や部材の内部の残留応力分布を測定できる理論は少なく，例えば，逐次穿孔法として有名な Sachs 法では管の残留応力分布が軸対称でしかも軸方向に一様であることが条件となっている．最近では DHD（Deep-Hole Drilling）法があるが，穿孔ラインに沿った残留応力分布が得られるだけで 3 次元的な分布は測定できない．3 次元的に複雑に変化している残留応力分布を測定できる手法は，現時点では，上田らが提案した“固有ひずみ法”以外には見当たらない．固有ひずみ法を用いた残留応力評価では，平板の突合せ継手や T 継手のような基本的な継手に対しての適用例は多いが，軸対称構造である配管突合せ溶接継手に対する実測例はない．また，更に複雑な容器貫通溶接部に対しては，内外表面の残留応力分布は計測されているが，断面の応力分布を測定した例はない．

このような状況下において，本研究では，原子炉配管突合せ溶接継手部及び原子炉容器管台貫通溶接部を対象に，固有ひずみ法を測定原理とした具体的な測定理論と測定手順を開発し，実継手に近い試験体（モックアップ）を製作して，その３次元溶接残留応力分布を測定している．

配管突合せ溶接継手に対しては，同継手部は軸対称な形状を有するので，軸対称な残留応力分布を想定し，固有ひずみ法の軸対称測定理論を新たに開発している．その理論に基づいて，有限要素法解析プログラムを構築している．モックアップを製作して，切断による解放ひずみを計測し，同プログラムに入力することにより，配管突合せ溶接継手部の残留応力分布を推定している．

原子炉容器管台貫通溶接部に対しては，同継手部は寸法的に小さく（ひずみの計測数が制限される），しかも，応力分布が複雑に変化している（未知固有ひずみ数が非常に多くなる）と推察されるため，固有ひずみの分布を関数表示する手法を採用している．即ち，関数表示法に基づいて原子炉容器管台貫通溶接部を対象とした残留応力測定理論及び測定方法を開発している．更に，推定結果に対する信頼性評価手順を提案している．

具体的には，上記継手の残留応力測定に適した関数表示固有ひずみ法の理論を展開し，その理論に基づいて有限要素法解析プログラムを構築している．プログラムでは，固有ひずみ分布関数として１０種類の関数が使用できるようにしている．同時に，容器管台貫通溶接部のモックアップを製作して，切断による解放ひずみを計測し，開発したプログラムを使用して，同溶接部の３次元溶接残留応力分布を解析している．

解析は１０種類の固有ひずみ分布関数を用いて実行し，各分布関数の本解析への適応性を評価している．評価は固有ひずみ法が統計学的には最小二乗法に基づいていることに注目して実施している．最小二乗法は実験データの解析法，具体的には“あてはめ”法の一つであり，その結果は３段階の診断により評価するのが望ましいと考えられている．第１段階は「残差からの診断」であり，第２段階は「統計学的見地からの診断」であり，最後の第３段階は「専門知識からの診断」である．「専門知識からの診断」として，溶接力学現象に基づく診断方法（診断基準）を提案している。１０種類の分布関数による解析結果を，このような診断法により評価している．評価結果より，各関数の適応性の優劣を判定し，最適な関数を決定している．更に，その最適関数を使用した場合の残留応力推定結果（測定結果）の信頼性を確認している．

最後に，今後，同様な溶接継手部に対する残留応力評価を実施する場合を想定し，測定結果の信頼性と実験の経済性が両立する計測条件を探究している．即ち，実験におけるひずみ計測は，測定結果の信頼性を考えると，固有ひずみが存在すると推察される領域を十二分に含む広領域において出来る限り多数計測することが望ましい．しかし，計測作業は煩雑であり高費用を要することから，経済性を考えると，できる限り少ない計測点数で残留応力を評価したい．そこで，計測位置及び計測点数が測定精度に及ぼす影響を解明し，同時に経済性も考慮して，測定結果の信頼性と実験の経済性が両立する計測条件（最適ひずみ計測領域）を提案している．

以上のように，本論文は，原子炉の配管突合せ溶接継手部及び原子炉容器管台貫通溶接部の残留応力を対象として，固有ひずみ法に基づく高精度高効率な測定理論と測定手順を開発し，モックアップを使用した実験により，同継手の残留応力分布を解明すると共に測定法の信頼性を実証したものである．本研究で構築した３次元残留応力評価法は厚板溶接継手内部の複雑な残留応力分布を解明することが可能であり，その測定結果を用いることにより，継手の寿命評価の高精度化が実現でき，発電プラント等の溶接構造物の健全性及び経済性の向上に大いに貢献することができるものと確信する．又，残留応力改善を目的とした新しい溶接法の検証，等にも，必須の測定法として大いに活躍することが期待できる．

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。