

氏 名 佐 近 淑 郎
 学位(専攻分野) 博 士 (工 学)
 学 位 記 番 号 論 工 博 第 3343 号
 学位授与の日付 平成 10 年 5 月 25 日
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
 学 位 論 文 題 目 切欠および亀裂の非弾性挙動を考慮した構造部材の寿命評価法に関する研究

(主査)

論文調査委員 教授 大谷 隆 一 教授 井上 達 雄 教授 島 進

論 文 内 容 の 要 旨

各種構造部材の寿命評価においては、切欠部における応力・ひずみ集中および亀裂発生・伝播の評価が重要な位置を占めることが多い。非弾性解析はこれらに対する有効な手法であるが、本論文では、より現実的な方法として、弾性FEM(有限要素法)解析に基づいて切欠部の非弾性応力・ひずみ集中係数および亀裂先端近傍の非弾性破壊力学パラメータJ積分を推定し、それを用いて亀裂発生寿命および亀裂伝播速度を評価する方法を開発した。

緒論である第1章では、関連する研究の中での本研究の位置づけを明確にした。すなわち、切欠部での低サイクル疲労やクリープの亀裂発生寿命の評価法と、それに用いる非弾性応力・ひずみ集中および亀裂のJ積分の評価に関する現状技術の問題点について検討し、本研究の目的と本論文の構成について述べた。

第2章では、切欠部の応力・ひずみ集中の推定法について検討した。弾塑性域での応力・ひずみ集中の推定法の一つであるNeuber則は広範に使用されているが、全断面降伏域での推定精度が悪いことが指摘されている。本研究では、この精度低下は切欠部断面への弾性拘束効果によって生じる応力多軸性によることを明らかにし、その補正方法を検討した。その結果、公称応力・ひずみをMisesの相当応力・相当ひずみによって定義することにより、実用上十分な精度の推定が可能となることを示した。さらに、クリープ中の応力・ひずみ集中の時間変化や変位制御型荷重条件に対してもこの方法が適用可能であることを示した。

第3章では、切欠の応力・ひずみ集中係数の推定法を亀裂問題に拡張することにより、J積分の簡易推定式を求めた。また、代表的な亀裂平板について弾塑性FEM解析を行い、提案したJ積分簡易推定法と比較してその有効性を検討した。その結果、亀裂を含む部材の弾性FEM応力解析により、応力拡大係数(もしくは弾性J積分)と残存断面の相当公称応力に基づく荷重制御型荷重条件下のJ積分簡易推定式を提案した。さらに、変位制御型荷重条件に対するJ積分の推定法も提案した。

第4章では、切欠底での低サイクル疲労亀裂発生寿命を推定する手法について検討し、亀裂発生寿命を切欠底のひずみ範囲と平滑試験片のひずみ範囲-破損繰返し数関係に基づいて推定できることを示した。また、この場合の亀裂発生を定義する亀裂長さとの関係についても論じた。

第5章では、第3章で提案したJ積分推定法を低サイクル疲労およびクリープの亀裂伝播問題に適用する際の具体的手順とその精度の評価を行った。その結果、本推定法を構造部材中の亀裂評価に適用できることが確認された。

第6章では切欠クリープ破断寿命の評価を試みた。切欠クリープ破断寿命を亀裂発生寿命と伝播寿命に区分し、第2, 3章で得られた簡易法を適用して各々を評価した。亀裂発生寿命については、それに及ぼす3次クリープおよび破断延性の影響について検討するためKachanov-Rabotnov型の損傷力学を援用した。その結果、3次クリープ域で切欠底の応力緩和が加速することにより、高延性材で切欠強化、低延性材で切欠弱化となりやすいことがわかった。また、環状切欠試験片の強い応力多軸性が切欠クリープ強化となる要因であることも判明した。

以上のように第2～6章では、高温機器の構造設計、信頼性確保の上で重要な要素である応力集中部でのき裂発生寿命の

評価法、それに必要な非弾性応力・ひずみ集中係数の簡易推定法を提案した。併せて、従来曖昧にされがちであった切欠部の破損の意味を、亀裂発生寿命と対応する亀裂の大きさ、その後の亀裂伝播の観点から論じた。また近年、高温非弾性域での亀裂伝播評価技術は長足の進歩を遂げており、材料の亀裂伝播速度データも充足されつつあるにもかかわらず、実構造部材中の亀裂のJ積分の算出が容易でないためにその寿命評価等への実用例は未だ少ない。この点に対し、ほぼ満足できる精度でJ積分ならびに亀裂伝播速度の推定を可能にした。

第7章では、実際の構造部材の例としてボイラー水循環ポンプケーシングをとり上げ、その内面に発生した熱疲労亀裂の伝播評価を行った。本ケーシングは起動停止時の水温の急変により内表面に高い非定常熱応力が発生する。また、これは大型の鋳鋼製であるため大小の鋳造欠陥（ポロシティ）を多く含み、これらを起点とする熱疲労亀裂が多数発生する。本章では、まず非定常熱応力のような非線形熱応力分布下の亀裂について、亀裂を含まない状態での弾性熱応力解析結果に基づいて繰返しJ積分 ΔJ を推定する方法を検討し、これに基づきケーシング内面の亀裂の伝播挙動を予測した。その際、複数の微小亀裂の成長・合体も含めてこの方法が適用できることを実験的に検証した。その結果、ケーシングの許容熱疲労亀裂寸法は比較的大きく、短い亀裂の段階では亀裂の削除やケーシングの更新の必要がないことがわかり、ポンプの保守管理コストの低減が可能となった。

第8章では、応力集中を有する高温部材の例としてタービンボルトをとり上げ、ねじ底の亀裂発生寿命の評価を行った。ねじは荷重レベルによってねじ山に加わる荷重分担率が変わるため、通常の切欠に比べて応力・ひずみ集中の推定は複雑となる。本研究では、まず、ねじ山荷重分担率を推定し、それを応力・ひずみ集中の推定に反映した。構造部材としてのボルトに加わる力は、被締付体の材料や温度・応力分布に大きく影響されるので、対象としたタービン部材とボルトの全体構造についてFEMによる温度・応力解析を行い、ボルトに加わる公称応力履歴を求めた。これらの結果から、ねじ底の応力および亀裂発生寿命を推定したところ、推定結果は実ボルトの運転実績とほぼ一致し、一連の手順が妥当なものであることが確かめられた。

第9章ではこれらの知見をまとめて結論とした。最近、長期使用プラントの余寿命評価や高効率プラントの開発等においてクリープや低サイクル疲労寿命の評価の重要性はますます増大しており、本研究はこれらのニーズに応えられる実用的手法を提供し、価値のある成果を得た。

論文審査の結果の要旨

本研究は、構造部材の低サイクル疲労やクリープによる破損を防止し、より合理的な損傷許容設計を行うため、切欠底の非弾性応力・ひずみ集中係数および亀裂先端近傍の非弾性破壊力学量J積分を簡便に評価する方法および簡便式を提案し、それを用いて疲労やクリープの亀裂発生寿命および亀裂伝播速度の評価の実験的検証を行い、さらに実機部材の実働条件下での寿命評価を試みたものである。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 切欠底の非弾性応力・ひずみ集中については、従来広範に使用されているノイバー則の欠点を指摘し、応力の多軸性を考慮した弾塑性応力・ひずみ集中係数の簡易評価式（修正ノイバー則）を解析的に求め、有限要素法による数値計算によって実用上十分な推定精度があることを証明した。また、クリープの応力・ひずみ集中の時間変化もこの評価式によって推定できることを示した。

(2) 亀裂先端近傍のJ積分については、上記の修正ノイバー則を亀裂に拡張適用することにより、J積分の簡易評価式を求めた。また、クリープ亀裂についてはクリープJ積分の簡易評価式を導いた。

(3) 提案した簡易評価式にもとづいて切欠底の低サイクル疲労亀裂発生寿命、低サイクル疲労およびクリープの亀裂伝播速度および切欠クリープ破断寿命を推定し、実験結果と良好な一致が得られることを示した。

(4) さらに、ボイラー水循環ポンプケーシングに発生した熱疲労亀裂の伝播速度およびタービンボルトねじ底のクリープ疲労亀裂の発生寿命を推定し、いずれも合理的に評価できることを明らかにした。

以上要するに、本論文は、長期使用プラントの健全性評価や高効率プラントの開発等において低サイクル疲労やクリープの寿命評価がますます重要性を増している現状に対して、それら構造部材の信頼性を的確に判断する手法を提供したものであって、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成10年3月11日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。