

氏名	山口 義 仁		
学位の種類	博士 (工学)		
学位記番号	甲博理工第456号		
学位授与年月日	平成25年9月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	地震荷重下におけるき裂進展評価に関する研究		
審査会	主査 菊地 賢 司	委員 関東 康 祐	
	委員 鈴木 徹 也	委員 三枝 幹 雄	
	委員 山中 一 雄		

論文内容の要旨

和文抄録

き裂を有する給水系配管及び再循環系配管である高温配管用炭素鋼管 STPT410 及びオーステナイト系ステンレス鋼管 SUS316 から製作した試験片について、地震荷重を模擬した繰返し荷重によるき裂進展試験を実施し、解析的な評価を加え、地震時のき裂進展評価式を初めて定式化した。実配管を用いた試験により本論文で提示した方法は、±20%の範囲でき裂進展量の実測値に一致すること実証した。

第1章では、地震荷重下におけるき裂進展評価に関する研究の背景として、日本国内の軽水炉プラントは近年いくつかの大きな地震を経験しており、設計時に設定された基準地震動を上回る大きさの地震動に対応して、高経年化を考慮した耐震安全評価手法の整備が重要な課題であることを示した。次に既往の研究の状況として、地震を模擬した繰返し荷重による配管破損試験や、小規模降伏条件を超える繰返し荷重によるき裂進展に関する研究、一定振幅でない繰返し荷重によるき裂進展に関する研究等を紹介し、解明を要する問題点を明らかにした。そして、本研究が目指す学術的価値の拠り所について述べた。

第2章では、一定振幅の繰返し荷重を用いてき裂進展試験を実施して、小規模降伏条件を超える荷重下におけるき裂進展を評価した。この条件における裂進展には疲労と延性による力学的効果が重畳しており、従来のき裂進展評価に用いられる ΔK ではなく弾塑性破壊力学パラメータである ΔJ 及び J_{max} を用いた評価が有効であることを示した。小規模降伏条件を超える荷重下におけるき裂進展速度を次式で評価することが可能である。過大な繰返し負荷時について、従来はできなかった延性による効果を疲労き裂進展評価に取り込めるように定式化した。

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN}\right)_{fatigue} + \left(\frac{da}{dN}\right)_{ductile}$$

ここで、右辺第一項は疲労の効果、第二項は延性の効果であり次式で定義する。

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{fatigue} = C_{fatigue}(\Delta J)^{m_{fatigue}}$$

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{ductile} = \left(\frac{J_{max,i}}{C_{ductile}}\right)^{m_{ductile}} - \left(\frac{J_{max,i-1}}{C_{ductile}}\right)^{m_{ductile}}$$

第3章は、過大な引張圧縮荷重を含むき裂進展試験とその解析を行った。まず、過大荷重によるき裂進展の加速及び遅延効果を実験的に確認した。その力学的原因を、き裂鈍化とき裂前縁応力に着目して FEM 解析を行い、加速は過大荷重によりき裂前縁応力分布が引張側に大きくなること、並びに遅延は過大荷重によってき裂が鈍化することに起因することを突きとめた。過大荷重によるき裂前縁応力分布の変化をき裂前縁の塑性域寸法(r_p)を用いて表し、さらに β_a/β_b による過大荷重負荷時のき裂の開口荷重の変化を考慮することで、過大荷重による影響の評価式を作成した。

$$\Delta J_{eff}(a_i) = \frac{\beta_a}{\beta_b} \Delta J(a_i) \left(\frac{r_{pi}'}{r_{pel}'+a_{el}-a_i} \right)^{\gamma'R'}$$

$$a_i + r_{pi}' < a_{el} + r_{pel}'$$

更に、過大荷重によりき裂が鈍化する場合のき裂進展評価式について、力学的検討を加え、過大な引張荷重時の J 積分値($J_{max,el}$)と過大荷重後の J 積分値($J_{max,i}$)の関係をを用いて作成した。

$$\frac{da}{dN} = C_{fatigue} \left[\Delta J - \Delta J_{i=1} \left(\frac{J_{max,el}-J_{max,i}}{J_{max,el}-J_{max,1}} \right) \right]^{m_{fatigue}}$$

以上を組み合わせることで、過大荷重がき裂進展に及ぼす影響を考慮可能なき裂進展評価式として定式化した。

$$\frac{da}{dN} = C_{fatigue} \left[\frac{\beta_a}{\beta_b} \Delta J_b(a_i) \left(\frac{r_{pi}'}{r_{pel}'+a_{el}+a_i} \right)^{\gamma'R'} - \Delta J_{i=1} \left(\frac{J_{max,el}-J_{max,i}}{J_{max,el}-J_{max,1}} \right) \right]^{m_{fatigue}}$$

第4章は、第3章の結論の一般化であり、地震のような不規則波形への適用を念頭においている。不規則波形から引張荷重-圧縮荷重のサイクルを1波ずつ抜き出し、対応する荷重-変位曲線を予測し、 ΔJ を算出することが可能な次式を提示した。

$$\Delta J_i = \frac{\Delta K^2(1-\nu^2)}{E} + \left\{ (J_{max,i} - MAX(J_{max,i-1}))(1 - R_i) + J_{ABF} \frac{1}{|R_i|} \right\}$$

第2章で提示した小規模降伏条件を超える荷重下におけるき裂進展評価式、第3章で提示した過大荷重がき裂進展及ぼす影響を考慮したき裂進展評価式、及び本章で提示した ΔJ の算出式を併用することで、一般化が完結する。

第5章は、一般化した式の証明である。実配管を試験体に模擬地震動を負荷し、き裂進展量を測定し、第4章で提示した方法によりき裂進展評価を行い、試験結果との比較を行った結果、本論文で提示した方法は、±20%の範囲でき裂進展量の実測値に一致することを実証した。

第6章では、以上で得られた成果を総括し、本研究の学術的価値、並びにその波及効果について述べてある。本研究において提案した巨大地震荷重下におけるき裂進展評価手法を用いることで、軽水炉プラントが設計時に設定された基準地震動を上回る大きさの地震動を受けた際の健全性に関して、従来用いられている疲労き裂進展評価手法と比較して、より正確に評価可能となった。以上要するに本論文は、き裂進展評価手法の提案を通じて、今後のより合理的な設計・保守に資する有用な知見、基本となるデータを得られ、軽水炉プラントのみならず様々な構造物の安全・信頼性の向上に寄与するところが大きいと考えられる。

In this study, the evaluation method for a crack growth due to a seismic load has been proposed based on experiments and finite element method analyses. Crack growth experiments were performed by a cyclic load simulating the seismic load applied to materials of the type 316 austenitic stainless steel and the carbon steel STS410 (JIS G 3455: similar to ASTM A106B). Specimens were machined from each pipe. The validity of the proposed method was confirmed by fact that the difference between the evaluation result and test result did not exceed 20%.

In Chapter 1, backgrounds in this study are described. Previous studies of the crack growth due to the seismic loading are introduced. Then, objective of this study is established.

In Chapter 2, an evaluation formula of the crack growth beyond small scale yielding (SSY) condition has been proposed based on fatigue crack growth tests using cyclic loading. The mechanisms of the crack growth due to cyclic loading beyond SSY include the concept of the fatigue crack growth and the ductile crack growth.

The crack growth rate under condition beyond SSY can be evaluated using an elastic-plastic fracture mechanics parameter, J-integral value, instead of ΔK . Then, the new term describing ductile crack growth rate is linearly added to the existing fatigue crack growth evaluation formula, as shown in the following equation.

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN}\right)_{fatigue} + \left(\frac{da}{dN}\right)_{ductile}$$

Each component for crack growth rates is defined by the following equations, respectively.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{fatigue} = C_{fatigue}(\Delta J)^{m_{fatigue}}$$

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{ductile} = \left(\frac{J_{max,i}}{C_{ductile}}\right)^{m_{ductile}} - \left(\frac{J_{max,i-1}}{C_{ductile}}\right)^{m_{ductile}}$$

In Chapter 3, crack growth tests using cyclic load including excessive tensile and compressive load were performed in order to confirm effects of excessive load on the crack growth. At the same time, FEM analyses simulating experiments were performed in order to evaluate the stress distribution in front of crack tip. Crack growth tests evaluated acceleration and retardation effects of the excessive load by focusing on the stress distribution and the crack blunting. Experiments and FEM analyses revealed that the acceleration effect on the crack growth is attributed to increase the stress in front of crack tip due to the applied excessive loading. Similarly, it was revealed that the retardation effect on the crack growth is attributed to the crack blunting due to the excessive loading. A following equation using the plastic region size in front of crack tip and the crack closure ratio can quantitatively evaluate the effect of the stress variation on the crack growth rate.

$$\Delta J_{eff}(a_i) = \frac{\beta_a}{\beta_b} \Delta J(a_i) \left(\frac{r_{pi}'}{r_{pel}' + a_{el} - a_i} \right)^{\gamma'R'}$$

$$a_i + r_{pi}' < a_{el} + r_{pel}'$$

In addition, a crack growth prediction method, considering the excessive loading effect based on the crack blunting, has been proposed using the J_{max} at i-th step ($J_{max,i}$) and the J_{max} at the excessive tensile loading ($J_{max,el}$).

$$\frac{da}{dN} = C_{fatigue} \left[\Delta J - \Delta J_{i=1} \left(\frac{J_{max,el} - J_{max,i}}{J_{max,el} - J_{max,1}} \right) \right]^{m_{fatigue}}$$

An evaluation formula of the excessive loading effect on the crack growth behavior has been proposed based on the presence or absence of the crack blunting and the variation of the stress distribution.

$$\frac{da}{dN} = C_{fatigue} \left[\frac{\beta_a}{\beta_b} \Delta J_b(a_i) \left(\frac{r_{pi}'}{r_{pel}' + a_{el} + a_i} \right)^{\gamma'R'} - \Delta J_{i=1} \left(\frac{J_{max,el} - J_{max,i}}{J_{max,el} - J_{max,1}} \right) \right]^{m_{fatigue}}$$

In Chapter 4, results of chapter 2 and chapter 3 are generalized in order to deal with the random cyclic loading like the seismic load. A method of calculating the ΔJ in the seismic load has been proposed based on the crack growth test using the random amplitude cyclic load. The ΔJ calculation method has been proposed based on the prediction of the load-displacement curve with each cycle of the random cycle.

$$\Delta J_i = \frac{\Delta K^2(1 - \nu^2)}{E} + \left\{ (J_{max,i} - MAX(J_{max,i-1}))(1 - R_i) + J_{ABF} \frac{1}{|R_i|} \right\}$$

In addition, an estimation method of the crack growth in reactor piping subjected to seismic loading has been proposed by combining the evaluation formula of the crack growth, the evaluation formula of the excessive loading effect on the crack growth behavior and the method of calculating the ΔJ .

In Chapter 5, the estimation method of the crack growth in reactor piping subjected to seismic loading beyond SSY condition was validated by the piping crack growth tests, using the simulated seismic load. Comparing crack growth test results with evaluation ones performed a validation. The validity of the proposed method was confirmed by the fact that the difference between the evaluation result and test result did not exceed 20%.

In Chapter 6, conclusions are drawn based on above results. In addition, an academic value of this study and a ripple effect are addressed.

論文審査の結果の要旨

本学位論文では従来の規模よりも大きい地震が突発的に起きた場合を想定した原子炉構造物のき裂進展量の求め方を実験的理論的に研究し、実規模配管を使った検証実験で得た成果を基に新たな耐震設計評価法として適用可能であると提案している。

炭素鋼管製及びオーステナイト系ステンレス鋼管製の試験片を用いて地震荷重を模擬した繰返し荷重によるき裂進展試験を実施し、実験的及び解析的な評価を実施している。従来の疲労き裂進展評価に用いられている力学パラメータは小規模降伏条件に限定されており、解決しようとするこの種の課題の条件下では適用できない。そこで、弾塑性破壊力学に基づく新たなパラメータを提案し、現象を説明可能な新たな力学的評価方法論として、疲労き裂進展と延性き裂進展機構が線形的に重畳しているという捉え方に着眼した。実際の地震荷重は不規則な荷重波形であり、振幅の変動がき裂進展に及ぼす影響が評価されなければならない。地震に対する応答は千差万別であり、広くそのようなランダム条件に対応するため、実際の機器に加わる応力の履歴を分解して、その中で、き裂の開口状態と、き裂前方に現れる塑性域の応力分布を計算で評価することで、力の繰返しに対応してき裂の力学的状態を評価できるとした。

新たに着眼した方法を、実際の原子炉給水系配管及び再循環系配管を対象にした模擬地震動負荷結果に適用し、従来手法では評価が難しかった試験結果を提案した評価法が良く表わすとする結果を得ている。このことから、研究した提案手法は耐震設計評価法として有効であると結論している。弾塑性破壊力学パラメータを用いて、き裂鈍化及びき裂前縁応力分布に着目して新たに提案した過大荷重の影響評価式を用いることで、より高度化した実用性のあるき裂進展評価手法すなわち、耐震設計評価法を確立した。

米国機械学会の学術論文誌にオリジナル論文として掲載されており、論文が着眼した手法に学術上の寄与があると客観的に認められ、従来説明できなかった大規模な変動荷重が加わる疲労き裂の進展量を定量的に処理する予測方法を示したことに学術上の貢献があると審査会は判断した。実用上は、原子炉機器のみならず、航空機、橋梁、建築物等、高度経済成長時に造ったインフラの安全性チェックが昨今社会の関心となっており、そのような機械構造物の疲労破壊寿命の評価に応用することができる点に波及効果がある。

最終試験において、提出された学位論文及びこれに関連した試問において博士の学位を受けるに十分な資質を習得していると判断した。

審査会は、以上のことを総合的に判断して、本審査を合格とする。