

氏 名	下 村 慶 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 62 年 11 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 53 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	アコースティック・エミッション (AE) 法によるへき開型破壊靱性評価法に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 関根 英樹

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

昭和48年の第一次石油危機を契機に、日本経済はそれまでの高度成長路線から安定成長経済への変換を余儀なくされた。わが国の各工業分野でも設備投資の多くは、設備の省エネルギー化あるいは既存設備の効率的運用化に向けられてきた。最近では既存設備機器の老朽化が問題となり始めており、このような経年設備の事故防止の立場より、既存の大型設備の延命化・長寿命化技術の確立が最大関心事となっている。一方1950年代の線形破壊力学の発達は、応力拡大係数 K をパラメータとして構造物の脆性破壊の発生を定量的に評価することを可能にし、以後の原子力発電設備に代表される大型厚肉構造物の設計思想を大きく変化させた。この破壊力学に基づく手法に従い前述の経年設備の安全性・余寿命評価を行うためには、使用されている構造部材料の平面ひずみ破壊靱性 K_{IC} の値の経年的変化を知ることが重要である。 K_{IC} の評価法としては平面ひずみ破壊靱性(K_{IC})試験法および弾塑性破壊靱性(J_{IC})試験法が測定されており、後者の J_{IC} 試験法は小型試験片で容易に K_{IC} を評価できるものとして極めて実用的である。しかしながら、 J_{IC} 試験法でもへき開破壊に対しては得られる破壊靱性値 J_C の寸法効果が解明されていないために、その評価対象を延性引き裂き型破壊のみに限定している。したがって、一般に使用されている構造用鋼の脆性-延性破面遷移温度領域における破壊靱性の評価は、未だに K_{IC} 試験法に頼らざるを得ず極めて大型の試験片を必要とするので、困難な場合が多い。したがって、多くの既存設備の運転にあたり定期点検後の

起動に際しては必ずこの温度領域を通過するので、経年設備の精度の良い安全性評価を行うために簡便で正確な K_{Ic} 評価法の確立が望まれている。以上の背景のもとで、本論文は弾塑性破壊力学に基づき小型試験片を用いたへき開破壊靱性評価手法の確立を目的として研究を行ったものである。ここで弾塑性破壊力学に基づくへき開破壊靱性評価法を確立するための課題を整理すれば、次の三つの研究課題が挙げられる。

- (1) 予き裂先端における破壊過程の解明と脆性破壊の検出
- (2) 脆性破壊靱性 J_c の試験片寸法効果 (I)：試験片板厚・き裂長さの違いに起因するき裂先端部における塑性拘束度の差異のために寸法効果が生ずるという考え方
- (3) 脆性破壊靱性 J_c の試験片寸法効果 (II)：き裂先端部近傍の材質不均一に起因する破壊靱性の統計的分布を原因とする考え方

本論文では、以上に示した研究課題に対して約14万時間稼働し廃棄された蒸気タービンロータ Cr-Mo-V 鋼劣化材を使用して実験的な検討を行い、確率・統計論的な脆性（へき開）破壊靱性評価法を確立することができた。

すなわち(1)に関しては、試験片予き裂先端における微視的な破壊の発生を検出できる AE 計測法を併用した破壊靱性試験を行い、AE 放出特性、破面観察結果ならびに AE 周波数解析結果を総合的に検討し、粒界型へき開破壊の発生を正確に検出し評価する方法を提案することができた。

課題(2)については、板厚が 10 mm, 25 mm, 50 mm および 100 mm のコンパクト・テンション試験片を用いて J 積分で評価される粒界型へき開破壊靱性の試験片寸法依存性を検討し、有効な粒界型へき開破壊靱性を判定する試験片寸法条件を提案することができた。

課題(3)については、粒界型ならびに粒内型へき開破壊靱性の統計的性質を明らかにし、さらに本論文で提案する試験片寸法条件を極値統計論に基づき検討しその妥当性を明らかにすることができた。

第 2 章 供試材料ならびに AE 法を併用した破壊靱性試験法

本章は本研究に供した蒸気タービンロータ Cr-Mo-V 鋼焼き戻し脆化材の詳細、試験片採取方法ならびに破壊靱性試験方法を述べた。さらに、本研究に用いた AE 計測系および AE 信号処理系についても説明した。

第 3 章 AE 周波数解析による粒界型へき開ポップイン破壊の検知

第 3 章では、Cr-Mo-V 鋼焼き戻し脆化材より板厚 25 mm のコンパクト・テンション試験片を作製して試験温度 200℃で AE 法を併用した弾塑性破壊靱性試験を行い、破壊靱性試験時に計測された AE 信号の周波数解析および破面の SEM 観察を実施した。その結果に基づき、計測される AE 事象の分類とき裂先端における微視破壊過程の対応関係を検討し、以下の点が明らかになった。

(1) 破壊靱性試験時に計測される AE 信号は、周波数解析ならびに破面観察結果の総合的検討より 3 種類に分類でき、それぞれ主き裂先端に局在する非金属介在物 (MnS) の割れ・合体、粒界型へき開破壊の発生・伝播および粒界ディンプル割れに対応することが明らかにされた。

(2) 累積AEエネルギー (ΣE_{AE}) と J 積分の関係において、その急増点より得られる J_{iAE} は粒界型へき開破壊ポップイン破壊の発生を意味する破壊靱性評価パラメータであることが示された。

第4章 粒界型へき開ポップイン破壊靱性の試験片寸法依存性

本章では、試験片板厚が 10 mm, 25 mm, 50 mm および 100 mm のコンパクト・テンション試験片を用いて試験温度 150°C で AE 法を併用した J_{IC} 試験ならびに K_{IC} 試験を実施した。本実験で得られた粒界型へき開破壊靱性値の試験片寸法効果は試験片板厚の差による塑性拘束度の差異に起因する現象であるという観点より検討し、次に示す結論を得た。

(1) 本実験で得られた粒界型へき開破壊靱性値 K_{JC} および K_{JAE} の試験片寸法依存性は、A533 B 鋼等の鋼種について報告されているへき開破壊靱性値の試験片寸法依存性と同様に、小型試験片ほどばらつきが大きくなる傾向を示した。

(2) 2TCT 試験片および 4TCT 試験片で得られた $K_{IC(AE)}$ 値は、有効な平面ひずみ破壊靱性としての寸法条件を満足する値であった。この $K_{IC(AE)}$ 値は微視的粒界型へき開ポップイン破壊の発生を意味する破壊靱性である。また、0.4TCT 試験片および 1TCT 試験片を使用して得られた K_{JAE} の下限値、ならびに 2TCT 試験片および 4TCT 試験片より得られた $K_{IC(AE)}$ の値はほぼ一致した。

(3) 試験片破面の詳細な SEM 観察に基づく検討より、粒界型へき開ポップイン破壊を評価する弾塑性破壊靱性の判定条件として次に示す試験片寸法条件を提案した。

$$B > 150 \cdot (J_C / \sigma_Y) \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

第5章 粒界型へき開ポップイン破壊の統計的性質

第5章では、粒界型へき開破壊靱性値の試験片寸法効果について小型および大型試験片で得られた破壊靱性値のばらつき特性の違いに注目した検討を行い、以下の結論を得た。

(1) 極値統計論における最小値分布の考え方に従えば粒界型へき開破壊靱性値 K_{JC} , K_{JAE} のばらつきは、第4章で提案した試験片寸法条件式(4-3)を満足する 1TCT 試験片の結果を使用して 3 母数ワイブル分布モデルに従い表示されるべきであることが示された。

(2) 同一ワイブル確率紙上に打点した K_{JC} 値および K_{JAE} 値の分布より、両者の確率分布の交点で定義される破壊靱性値は材料固有の粒界型へき開破壊靱性の最小値 K^* 、すなわち粒界型へき開破壊靱性分布を 3 母数ワイブル分布モデルに従って表示した位置母数であることが明らかにされた(図1)。

(3) K_{JC} 値および K_{JAE} 値の各確率分布を一本の試験片のき裂先端で生じている破壊過程を説明しているものと考えれば、破壊過程は 4 つの領域に分類できた； 領域(i)：粒界型へき開破壊は全く発生しない。 領域(ii)：極めて微小な規模で粒界型へき開破壊が発生する。 領域(iii)：AE 計測法によって検出可能な微視的粒界型へき開破壊が発生する。 領域(iv)：通常の荷重、荷重線変位の測定でも検出できる粒界型へき開ポップイン破壊が発生する。

(4) 粒界型へき開破壊靱性分布は、AE 法等の破壊検出感度に依存しない破壊靱性パラメータ K^J

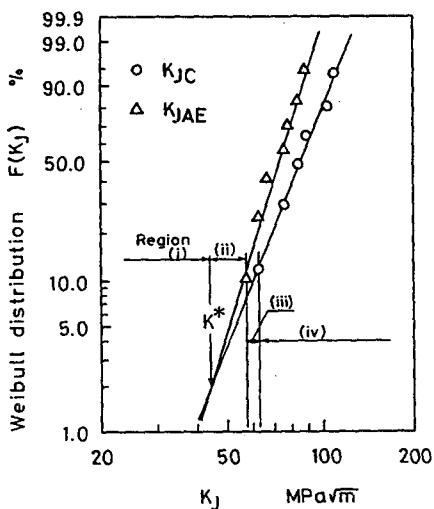


図1 K_{JC} 値および K_{JAE} 値の確率分布と位置母数 K^* の推定法

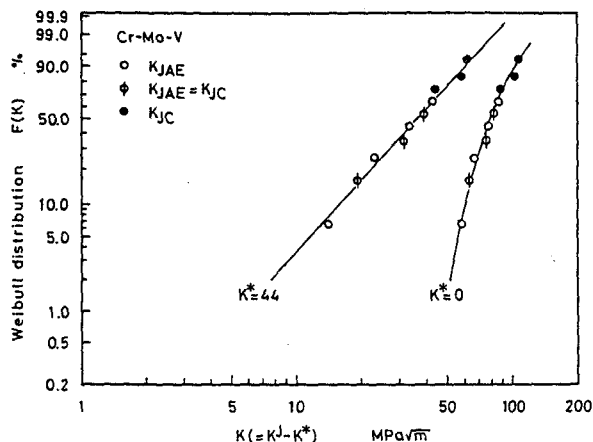


図2 粒界型へき開破壊靱性値 K_{IC}^J の確率分布

を導入し、 K_{JC} 、 $K_{JAE} \equiv K^J$ として3母数ワイブル分布に従い合理的に表示されることが示された(図2)。

(5) 上述の(2)~(4)までの結果は、AE法を併用したNi-Cr-Mo-V鋼製タービンロータ材の破壊靱性試験で得られた粒内型へき開破壊靱性値のばらつきを取り扱う場合にも有効であることが示された。

第6章 脆性破壊靱性の確率・統計論的評価

本章では第3章から第5章までに得られた各結論に基づき、小型試験片で得た結果より大型試験片での粒界型へき開破壊靱性値分布の予測および下限値を確率・統計論的に評価する方法を検討し、以下の結論を得た。

(1) 第4章において式(4-3)で提案したへき開破壊靱性判定条件は、極値統計論における最小値分布の考え方によって考案し統計論的にその妥当性が示された(図3)。また、压力容器用鋼A508 cl. 3について報告されている結果を使って、この判定条件は粒内型へき開破壊靱性判定条件としても有効であることが示された。

(2) 本研究に供されたCr-Mo-V鋼

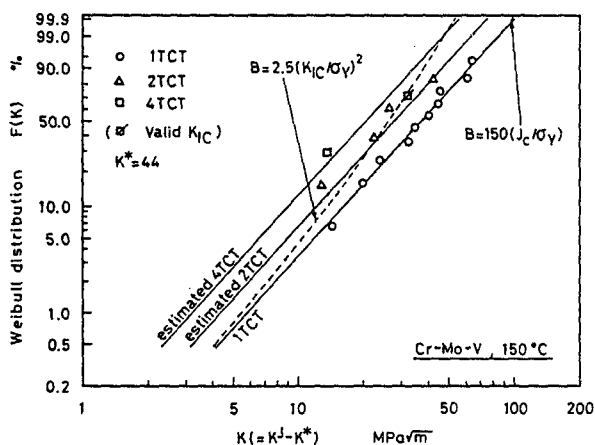


図3 Cr-Mo-V鋼の粒界型へき開破壊靱性値のワイブル確率紙上における試験片寸法効果(1TCT, 2TCT および 4TCT 試験片について)

製タービンロータ材の試験結果を確率・統計論的に考察し、へき開（粒内型および粒内型）破壊靱性の下限値評価法を提案することができた。特に、破壊靱性試験の実施にあたり重大関心事の一つである必要試験片本数に関する考察を行い、この評価法に従い原則的に7本の試験片を準備して得られる下限値は90%信頼区間の下限に相当する破壊靱性値であることを示した。

以上、本論文各章においてへき開破壊靱性値の試験片寸法効果ならびに統計的性質を明らかにし、その結果に基づきへき開破壊の確率・統計論的弾塑性破壊靱性評価手法を確立することができた。また、この評価手法に従い経年設備の脆性破壊防止のための安全性評価をこれまで以上に高精度に行うために、使用される部材料の破壊機構に立脚した K_{Ic} -温度設計線図の作成が可能となった(図4)。

第7章 結 論

第7章は各章において得た検討結果を簡潔にまとめたものである。

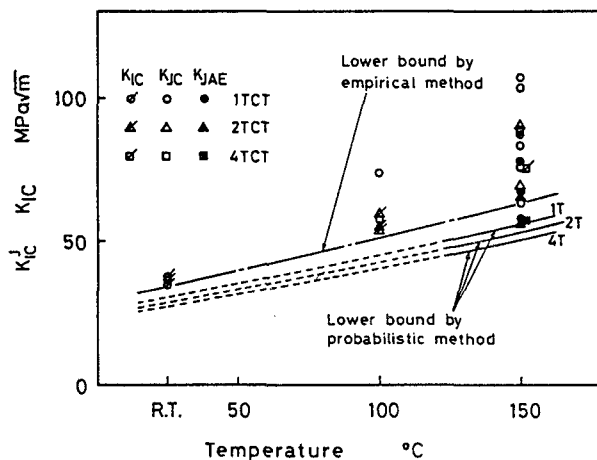


図4 確率・統計論に基づくCr-Mo-V鋼の粒内型へき開破壊メカニズムベース設計線図

審査結果の要旨

既存の火力・原子力発電あるいは石油化学プラント設備の多くが今後数年以内に設計寿命に達することで、事故防止の立場より老朽機器の更新基準が問題となっている。一方既存設備の効率的運用のための機器の長寿命化技術の開発が最大の関心事となっている。特に高温長時間使用された機器部材の材質経年劣化に注目したへき開脆性破壊事故防止のための破壊靱性評価法の確立が重要な研究課題である。本論文は高温で約22年間使用され、焼きもどし脆化の著しい蒸気タービンロータ鋼を例題に取り上げ、アコースティック・エミッション(AE)破壊検出手法を採用し、劣化材特有の粒界へき開型破壊の評価法の確立を目的としたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章は蒸気タービンロータ鋼の焼きもどし脆化の実態、ならびに本研究で採用したAE計測及び信号処理法について述べている。

第3章は延性・脆性遷移温度域(200℃)における弾塑性破壊靱性試験の紹介であり、AE周波数解析法は焼きもどし劣化材特有の粒界へき開型ポップイン破壊の検出には極めて有用であることが示されている。またこれにもとづき、粒来の弾塑性破壊靱性(J_{IC})評価基準に代る新しい評価パラメータ(J_{iAE})を提案するなど、注目に値する見解と言える。

第4章では、脆性破壊防止基準のために最も重要なへき開破壊挙動の試験片寸法効果について詳細に検討している。すなわち大型材で得られる平面ひずみ破壊靱性(K_{IC})と小型材の弾塑性破壊靱性(J_{iAE})の関係を明らかにし、新しい試験片寸法判定条件を提示している。

第5章では、粒界へき開型破壊靱性の試験片毎のばらつきやその試験片寸法効果などについて、極値統計論における最小値分布の考え方をを用いて説明している。これは従来の確率論的破壊力学の不備な点を補完するもので実用上も有用である。

第6章は前章までの種々の提案にもとづく実規模大型部材の破壊予側のための総合的評価に関するものである。実用上重要な平面ひずみ破壊靱性(K_{IC})の下限值推定法の具体的な手順が示されており、余寿命予測技術の基礎として注目すべきである。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、AE法による低合金鋼のへき開型破壊靱性評価法ならびに確率論的破壊力学の脆性破壊防止への応用について述べており、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。