



高速荷重下の材料強度と構造物安全性*

日本機械学会論文集(A編)
60巻570号(1994-2)

本 間 寛 臣^{*1}

Material Strength and Structural Integrity under High Speed Loading

Hiroomi Homma

Key Words: impact, fatigue, fracture toughness, flaw, safety margin

1. はじめに

材料の強度に関する研究は非常に歴史が古く、18世紀にさかのぼる。研究の歴史的発展過程は成書“材料強度学”材料学会編⁽¹⁾その他に概説されているので、そちらを参照していただきたい。現在、材料の強度に関しては、金属材料を中心に準静的な作用荷重に対してかなりの現象が連続体力学に基づいて理解されている。さて、最近の機器や構造物においては高速荷重を受けるものも多く、これらの設計ならびに健全性評価はこの高速荷重に対してなされなければ合理的とは言えない。高速荷重はそのひずみ速度によってクリープ、準静的、動的負荷、衝撃負荷等に分類されている。ここでは、従来の設計思想ならびに構造物の安全性確保に対する考え方を示したあと、おもに一般の機器や構造物が受ける動的ならびに衝撃負荷速度範囲での材料強度と構造物の安全性について概説し、今後この方面における研究の動向について私見を述べる。

2. 設計および健全性評価の基本思想

現在、機器や構造物の強度設計ならびに健全性評価においては起こり得る部材の破損様式をすべて想定して、作用荷重に対して材料の強度が十分に余裕をもっているように部材の寸法を決定したり、作用荷重に対する部材強度の余裕を評価する。しかしながら、設計あるいは健全性評価時に作用荷重を正確に確定することは本来困難であり、想定される最大荷重あるいは設

計限界荷重を仮定する。構造物の安全裕度はこれら荷重の設定精度に依存する。

さて、従来の強度設計においては、安全率を導入して部材が安全に載荷できる許容応力を算定する。

この安全率が設計の段階で構造物の安全裕度を具体的に決定する因子であるが、製作および建造されたあとに耐久試験を経て稼動し始めるときの安全裕度を示すものではない。特に、製作施工過程に溶接工程が含まれる場合には設計時には予測しがたい残留応力の発生ならびに溶接欠陥の発生による強度低下が生じる。

近年非破壊検査技術の向上は著しく、なかでも超音波探傷検査精度は飛躍的に改善され、現場での探傷作業がほかの手法より容易であるので工業的に広く使用されている。しかしながら、非破壊検査装置を取り扱うのは人間であり、装置の感度に加えて人的エラーによる実在の欠陥を見逃す可能性もおおいにあり得る。

例えば、図1は航空機構造物に生じた欠陥の寸法に対する検出確率を示したものである⁽²⁾。また、図2は

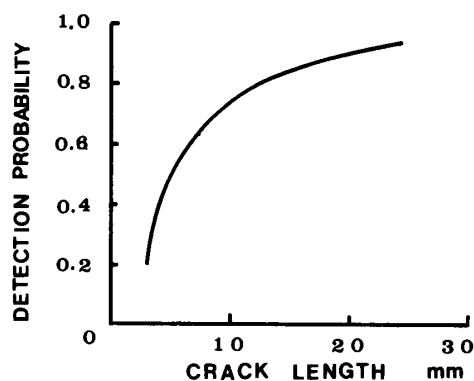


図1 航空機における欠陥検出確率

* 原稿受付 平成5年7月16日.

*¹ 正員, 豊橋技術科学大学 (〒441 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1).

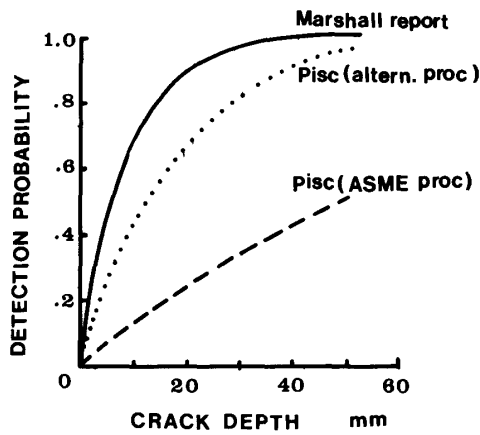


図 2 溶接欠陥の検出確率

溶接欠陥に対する検出確率を示したものである⁽³⁾。いずれも 10 mm 以下のき裂長さに対する検出確率は急激に減少していることに気が付くであろう。

さて、破壊力学に基づく設計思想に損傷許容設計思想がある。この手法では、使用する材料にはすでに製造過程で欠陥が内在していることを容認して、この欠陥が設計寿命中に成長したとしても安定に存在し、部材の終局的な破損をもたらさないように部材に作用する応力を決定する。この設計手法では一般に以下の三つの主要な段階をふむ。

- (1) 初期欠陥の寸法および位置の設定
- (2) 欠陥の成長則を規定
- (3) 不安定成長開始の欠陥寸法の算定

この思想で設計される構造物の安全裕度は上記三つの全段階で与えられる。

(1)の初期欠陥については仮想的な寸法のき裂を構造物の主要部材の最も危険と思われるところに想定することが行われる。例えば、航空機の損傷許容設計においては米国空軍規格仕様 (MIL-A-83444) で図 3 のように規定されている。すべての穴の部分では半径 0.127 mm のコーナき裂を想定し、穴および切り抜き部あるいは荷重を伝達する重ね継ぎ手部分における穴については図 3 中の 2, 3 に示すように板厚によりそれぞれ図示されたような初期欠陥が、また 4 の平滑部においては板厚により半円表面き裂あるいは貫通き裂が想定される。一方、原子炉圧力容器の場合には米国機械学会 ASME Boiler and Pressure Vessel Code がよく用いられているが、その設計コードである Section III Appendix G では厚さ t の容器壁内面に深さ $a=1/4 \cdot t$ 、表面長さ $2c=6a$ の半楕円き裂を想定しても脆性破壊が生じない破壊靱性値を有するフェライト鋼を使用することを規定し、Section XI では稼動前および稼動中に非破壊検査を実施し許容欠陥寸法をその

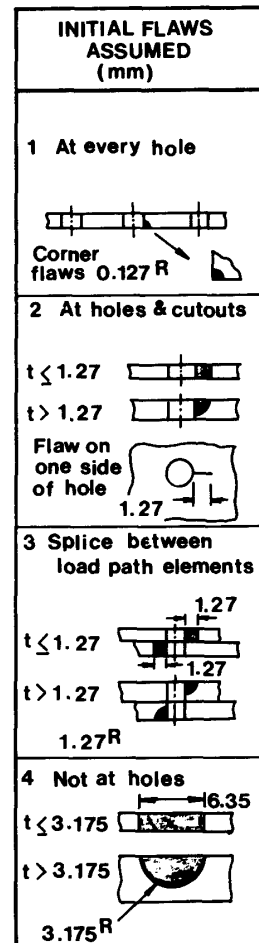


図 3 航空機的设计時に想定される初期欠陥の例

1/10 に規定している。(この Section ではそのほかのアスペクト比をもつ形状の欠陥も想定している)もし、検査により許容寸法以上の欠陥が検出されたら、疲労等による成長を考慮した欠陥評価を実施し、安全性を検討する。

(2)の欠陥の成長則については航空機、圧力容器とも疲労によるき裂の進展を考慮している。疲労き裂進展速度を表示する実験式、解析的に導出された理論式等が各種提案されているが、これらの式は一定範囲で繰り返された荷重の下で進展するき裂に対して適用が可能である。しかしながら、航空機、圧力容器に作用する荷重は複雑に荷重範囲が変化するいわゆるランダム荷重であり、過大荷重によるき裂進展の加速、あるいは減速(遅延)現象がランダム荷重下のき裂進展速度を精度よく予測する式を導出することを困難にしている。これまで、各種の疲労き裂進展速度式^{(4)~(8)}が提案されている。

疲労き裂進展速度則で安全裕度を上げる手段の一つは応力拡大係数範囲に掛かる材料定数 C に安全裕度係数 (>1) を掛けた速度則を用いることである。

(3)の不安定き裂進展については、材料の破壊靱性をういた次の規準式が用いられている。

$$K_{max} > K_{Ic} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K_{max} は設計限界荷重に安全率を掛けたときの応力拡大係数であり、 K_{Ic} は材料の平面ひずみ破壊靱性値である。航空機のエンジン設計においてはばらつきを考慮して破壊靱性値の平均値を用いることができる。

これは、(1)と(2)で十分に安全裕度を取った設計をしていることと、複数のエンジンを搭載している航空機では一個のエンジンが故障しても航行の安全性に問題がないので、重量の軽減を重視しているためと思われる。これに対して、ASME 設計コードによれば原子炉圧力容器では図4に示すように材料の破壊靱性値を各試験温度に対して、高負荷速度下の結果およびき裂進展停止靱性値の結果も整理し、その下限曲線を参照靱性値 (reference toughness) として使用することとしている。

以上、静的な荷重を対象に構築された構造物の安全設計手法について近年発展されている航空機および原子炉構造物を対象としたものを説明したが、高速荷重に対してこの設計手法によってどの程度の安全性が確保されるか次に検討する。このために、上記の(2)および(3)の材料強度データについて概説する。

3. 高速荷重下の材料強度

3.1 繰返し衝撃荷重下の疲労 繰返し衝撃荷重 (荷重パルス：数百マイクロ～数ミリ秒) 下の疲労に関する研究は日本で比較的盛んに行われている。しかし、正弦波形の荷重を負荷する通常の疲労試験に比べると、まだまだ蓄積されているデータも少なく現象の理解も浅い。そのなかで、興味深い結果について概説する。まず、 $S-N$ 曲線の例を図5に示す⁽⁹⁾。

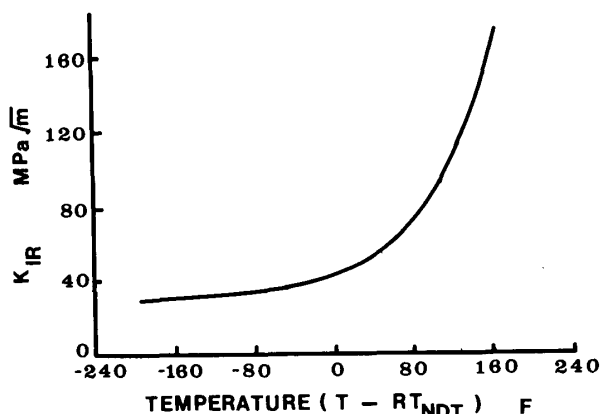


図4 圧力容器の鋼の下限界破壊靱性値

これはホプキンソン棒方式の繰返し衝撃引張りによる疲労試験の結果を示したものである。材料は構造用炭素鋼 S 45 C であり、通常の正弦波状片振引張りのもとでの疲労強度と比較して明らかに低下していることがわかる。このような傾向はそのほかの鋼種⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾に対しても得られている。通常の疲労試験においては繰返し速度の影響はさほど大きくなく、高温ならびに環境効果が厳しいもとでの結果を除けば数 Hz から 100 Hz まで繰返し速度の効果は無視できる⁽¹²⁾。これに対して、繰返し衝撃荷重による疲労強度は負荷時間ならびに負荷波形の影響を顕著に受ける⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。さて、上述の結果は平滑試験片に対するものでありき裂発生寿命に関するものとみなすことができる。損傷許容設計思想の立場からはき裂進展速度がどのような特性を有するかが興味のあるところである。

一般的な特性は繰返し衝撃荷重下の疲労き裂進展速度も応力拡大係数のべき乗則で記述されることである。図6と図7はオーステナイトステンレス鋼 SUS 316 とマルテンサイトステンレス鋼 SUS 410 の

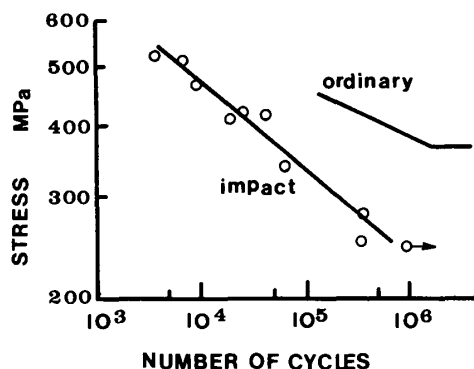


図5 S 45 C 鋼の衝撃疲労 $S-N$ 曲線

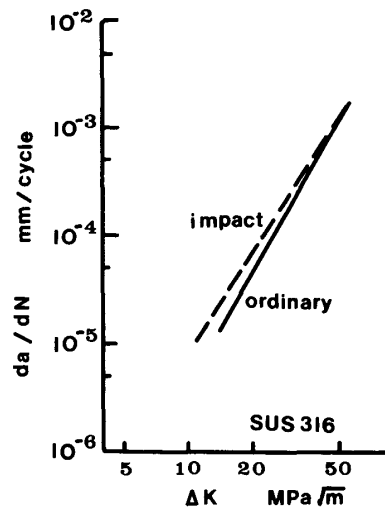


図6 SUS 316 鋼の衝撃疲労と通常疲労におけるき裂進展速度の比較

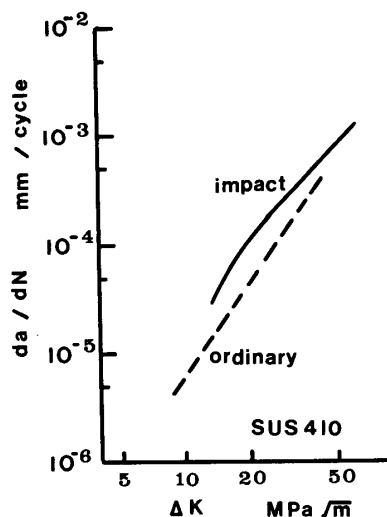


図 7 SUS 410 鋼の衝撃疲労と通常疲労におけるき裂進展速度の比較

衝撃疲労き裂進展速度を応力拡大係数の範囲で整理したものである⁽¹⁵⁾。き裂進展速度は応力拡大係数の範囲のべき乗に比例することがわかる。また、図中では通常の疲労き裂進展速度と比較されているが、SUS 316 では両者に明りょうな差異は認められないが、SUS 410 では衝撃疲労き裂進展速度のほうが明らかに大きい。これは微視破壊機構から説明されている。

すなわち、前者では衝撃疲労と通常疲労との間で明りょうな微視破壊機構の相違はなく、低応力拡大レベルでは粒界破壊がそして応力拡大レベルが大きくなるにしたがってストライエーションが破面全体を覆い、ついでディンプル破壊が出現する。一方、後者では、衝撃疲労破面に川状模様の擬へき開破壊が出現しており、脆性破壊機構が疲労き裂進展速度を加速している。

上述の結果から、面心立方晶 (SUS 316) のように、破壊強度に荷重速度の効果が現れない材料では衝撃疲労によってき裂進展速度は加速されないが、体心立方晶 (SUS 410) のように、破壊強度に荷重速度の影響が顕著に現れる場合には、衝撃疲労によってき裂進展速度が加速されると結論される。

上述の結果に対して、これと反する結論を示す実験結果がある。図 8 は体心立方晶である E-36 鋼 (JIS 熱間圧延軟鋼 SPHC に対応) の衝撃疲労と通常疲労によるき裂進展速度を比較したものである⁽¹⁶⁾。この実験では、試験片に作用する衝撃荷重は最初に大きな荷重が存在し、その後小さな荷重が数十回続く。そこで、通常の疲労試験では疲労に対して重要と思われる衝撃荷重の履歴を最初の 8 ピーク値について模擬した荷重履歴を繰返し作用させてき裂進展速度を計測し、衝撃疲労の結果と比較している。

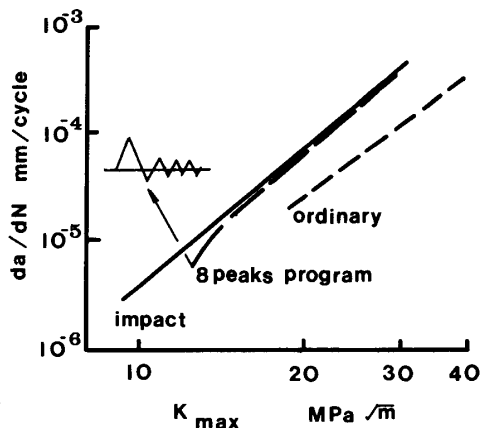


図 8 E-36 鋼の衝撃疲労と通常疲労におけるき裂進展速度の比較

図 8 に示されているように、両者の疲労き裂進展速度に有為な差異はない。この結果をもとに、衝撃疲労と通常疲労とのき裂進展速度の相違を衝撃疲労における荷重履歴の影響としている。

以上のように衝撃疲労についてはまだまだ統一した見解は得られていないが、荷重速度と荷重履歴の影響は衝撃疲労における主要な因子である。

3.2 高速荷重下の破壊靱性値 従来、衝撃荷重による破壊強度の評価試験としてはシャルピー衝撃試験およびアイゾット衝撃試験⁽¹⁷⁾があり、材料選定の規準として使用されている。そのほか、材料の靱性を定性的に評価する試験方法として Dynamic Tear Testing of Metallic Materials⁽¹⁸⁾ および Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferric Steels⁽¹⁹⁾ がある。しかしながら、これらの試験から得られる結果を直接用いて設計をしても安全裕度を定量的に評価することはできない。

このような評価方法に代わって、材料の破壊靱性値を破壊力学的に評価する方法が開発された。この方法に関する規格は米国、英国、我が国等^{(20)~(22)} で定められているが、内容的にはほぼ同様である。なお、これらの規格はほとんどが準静的荷重を対象として制定されているが、米国 ASTM 規格⁽²⁰⁾ においては破壊靱性の荷重速度依存性の重要性を考慮して、高速負荷下の破壊靱性評価試験法を規定している。しかしながら、この規格で規定されている荷重速度は通常の電気油圧式サーボ試験機で得られる程度であり、荷重が試験片に作用してからき裂が進展を開始するまでの時間が 1 ミリ秒以上でなければならない。これ以上の荷重速度に対する試験規格は現在なく、各研究者がそれぞれ開発した試験装置ならびに方法によって測定している。図

9 は原子炉圧力容器鋼 A 508 の破壊靱性値と荷重速度の関係を示したものである⁽²³⁾。実験結果は種々の試験方法で得られたものであり、ばらつきはあるものの実線で表される下限値は荷重速度の増加にともなって減少している。荷重速度 K が $10^6 \text{ MPa}\sqrt{m}/\text{sec}$ で破壊靱性値は最小となり、そのときの値は $30 \text{ MPa}\sqrt{m}$ である。また、このときの破壊時間は 80 マイクロ秒である。この図を見る限り、破壊靱性値は荷重速度の増加にともなってまだ減少しそうであるが、ここでの工学的興味は荷重速度を無限に大きくしたときに破壊靱性値の漸近値 (>0) が存在するか、あるいは特定の荷重速度のときに破壊靱性値の最小値が存在するかという点である。

これを調べた実験結果が図 10 と図 11 に示されている。図 10 はマルエージング鋼の破壊靱性値を破壊時間に対して整理したものである⁽²⁴⁾。

破壊時間が減少すれば荷重速度は増加するから、荷重速度がある特定のときに破壊靱性値は最小となることがこれより示される。靱性値が最小となる破壊時間は約 10 マイクロ秒であるからこのときの荷重速度 K は $4 \times 10^6 \text{ MPa}\sqrt{m}/\text{sec}$ である。一方、図 11 には溶接構造用鋼 SM 50 A の破壊靱性と破壊時間の関係が示されている⁽²⁵⁾。この試験は -80°C のもとで行われ、き裂の発生は完全な脆性破壊機構であるへき開破壊で生じている。この場合にも、破壊時間が 40 マイクロ秒以下になると破壊靱性値は急激に上昇しており、特定の荷重速度で靱性値は最小となることを示している。このときの荷重速度 K は $8 \times 10^5 \text{ MPa}\sqrt{m}/\text{sec}$ である。現在、ある荷重速度に対して破壊靱性値が最小値を示す実験結果は AISI 4340 鋼⁽²⁶⁾(JIS 規格ニッケルクロムモリブデン鋼 SNCM 439 に相当)、AISI 1018 鋼⁽²⁶⁾(機械構造用炭素鋼 S 20 C に相当)、アルミニウム

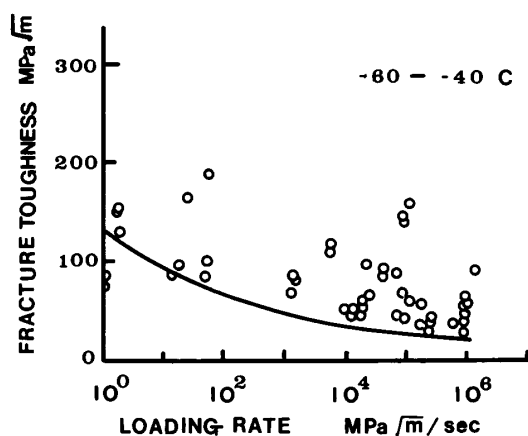


図 9 A 508 鋼の動的破壊靱性に及ぼす荷重速度の影響

合金 6061⁽²⁶⁾ および高分子材料ホマライト-100 (Homalite-100)⁽²⁷⁾ についても得られている。

しかしながら、最小の破壊靱性値に関する実験結果はまだ不十分であり、今後さらにデータの蓄積が必要である。

4. 安全裕度の検討

現在、損傷許容設計手法では衝撃的な高速負荷に対する安全裕度の確保を目的とした明確な手段は講じられていないように思われる。そこで、静的な負荷を対象に設計された構造物に衝撃的な荷重が作用したときの安全裕度について検討をする。第 2 章で述べた、損傷許容設計における 3 段階のうち [(1) の初期き裂の設定] は材料自体あるいは非破壊検査技術に依存しており、荷重の種類には無関係である。[(2) のき裂進展則] は疲労き裂進展が問題となる場合には 3・1 節で説明したように、衝撃疲労の効果は安全裕度に大いに関係する。衝撃疲労と通常疲労とでのき裂進展速度の定

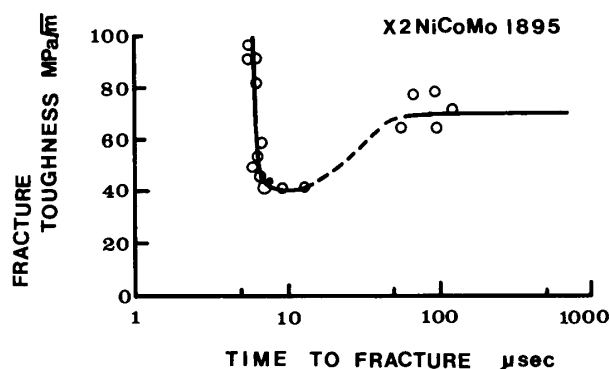


図 10 マルエージング鋼 X 2 NiCoMo 1895 の動的破壊靱性に及ぼす破壊時間の影響

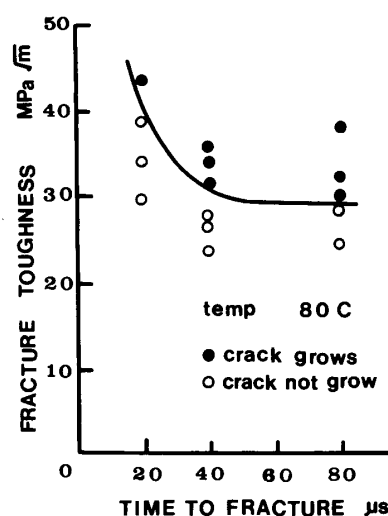


図 11 SM 50 A 鋼の動的破壊靱性に及ぼす破壊時間の影響

量的な差異をまとめたものはないが、仮に衝撃荷重での進展速度が2倍早ければ、き裂進展寿命は設計寿命の1/2となる。実際は、初期欠陥の設定でかなりの安全裕度を見込み、また設計荷重でも安全率を導入して安全裕度を見込んでいる。もし、き裂進展則がいわゆるパリス則で表示され、指数が4であるならば、き裂進展寿命が設計寿命に等しくなる荷重はき裂進展寿命を算定するときを用いた荷重の $(1/2)^{1/4}=0.84$ となる。すなわち、荷重で考えると0.84だけ安全裕度を下げる事になる。

次に[(3)のき裂不安定進展]について考える。

例えば、図9に示した圧力容器鋼 A 508 の破壊靱性の最低値 $30 \text{ MPa}\sqrt{m}$ と ASME コードで定められている下限界靱性値 K_{IR} とを比較してみよう。ASME コードでは K_{IR} は次式で与えられる。

$$K_{IR} = 29.425 + 1.343 \exp\{0.0261 \times (T - RT_{NDT} + 88.89)\} \dots\dots\dots (2)$$

この A 508 鋼の脆性遷移温度 RT_{NDT} は -30°C であり、試験温度 -60°C のときの K_{IR} は $35.7 \text{ MPa}\sqrt{m}$ と算定される。したがって安全裕度は $30/35.7=0.84$ 減少することになる。総合的な安全裕度の減少は単純にき裂進展速度の加速によるものと破壊靱性値の減少によるものとを掛け合わせて求めることはできないが、その値は安全裕度の減少の上限を与え 0.71 となる。

5. 今後の研究の方向

我が国においては新幹線の高速化、ならびに航空宇宙産業のますますの発展、米国では高速鉄道、コンコルドに代わる超音速旅客機の計画があり、動的荷重に対する安全性の確保がますます重要になってくるものと思われる。ここでは材料強度のうち、特に破壊靱性の荷重速度依存性に関して今後の研究動向を筆者の希望をもとに述べてみたい。き裂進展に及ぼす動的効果としてはき裂の発生に対する荷重速度の効果と高速進展しているき裂ならびにそのき裂が停止するときのき裂先端近傍あるいは試験片全体の動的効果が考えられている。この問題は従来から盛んに研究されており、これに関する盛書⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾が最近刊行されているので参照されたい。原子炉圧力容器においては加圧熱衝撃によるき裂の進展に関心を集め、圧力容器鋼の上部棚温度におけるへき開破壊を伴うき裂の高速進展の研究が行われている⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。この問題は原子炉ばかりではなく、高温機器全般に関係する興味ある問題である。へき開破壊機構に関する研究は古くから行われているが、上部棚近傍でのへき開破壊がどのような機構で起

こるのか不明であり、その解明が望まれる。超高速負荷におけるへき開破壊については3章で説明した破壊靱性の下限値との関連で研究が進められている⁽³²⁾⁽³³⁾。

弾塑性破壊力学の分野では荷重速度の影響に関する研究は非常に少なく、今後の研究に待つところが大きい。研究を実施する上での問題は破壊パラメータである J 積分の実験的評価の困難さである⁽³⁴⁾。特に、慣性効果が存在する場合の経路独立積分である \bar{J} あるいは T を実験的に評価する手法の確立が先決である。弾塑性破壊力学の最近の話題はき裂先端の拘束(塑性拘束)問題であり、このテーマに絞ったシンポジウム⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾が開催されている。この問題には材料の非均質(照射脆化、溶接部、傾斜機能材料等)による効果と荷重速度の効果が大きく関与すると思われるが、現在前者を対象とした研究がほとんどであり、動的効果を含めた研究が実施されることを期待したい。

6. むすび

高速荷重時の材料強度について簡単に概説し、この強度を十分に認識しないで静的荷重を対象に損傷許容設計手法で構造物を設計したときの安全裕度の減少を非常に大まかに説明し、動的荷重の重要性を強調した。

そして、材料の動的強度に関する今後の研究動向について浅学さを省みず筆者の希望を述べてみた。これは著者の独断の見方であるが、何かのお役にたてば幸いである。

文 献

- (1) 材料強度学, 日本材料学会編, (1986), 1, 日本材料学会.
- (2) Baren, A. P. and Hobey, P. W., *Evaluation of NDE Reliability Characterization, Report No. AFW AL-TR-81-4160, Vol. 1, University of Dayton Research Institute*, (1981), Ohio.
- (3) Wellen, R., *Applications of PMF in the nuclear industry to reactor pressure vessel, main coolant piping and steel containment*, Probabilistic Fracture Mechanics and Reliability, (1987), 325, J. W. Provan, Martinus Nijhoff Publisher.
- (4) Paris, P. C. and Erdogan, F., A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *J. Basic Eng., Trans. ASME D*, 85 (1963), 528.
- (5) Forman, R. G., ほか2名, Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures, *J. Basic Eng., Trans. ASME D*, 89 (1967), 459.
- (6) Collipriest, J. E. and Ehret, R. M., *A Generalized Relationship Representing the Sigmoidal Distribution of Fatigue Crack Growth Rates, Report No. SD74-CE-0001*, Rockwell International, (1974).
- (7) Artley, M. E. ほか2名, Variations in Crack Growth Rate Behavior, *ASTM, STP 677*, (1979), 54.

- (8) Lin, Y. K. and Yang, J. N., *On Statistical Moments of Fatigue Crack Propagation, Eng. Fracture Mechanics*, **18**, (1983), 243.
- (9) 茶谷・機講論, No. 764-2, (1976), 58.
- (10) 田中・中山, *機論*, **40**, (1974), 635.
- (11) 岡部・矢野・森, 第3回材料研究連合講演会前刷り集, (1971), 171.
- (12) 中沢・本間, *金属の疲労強度*, (1982), 52, 養賢堂.
- (13) 茶谷・中沢・中原, *機誌*, **73**, (1970), 1508.
- (14) Okabe, N. ほか5名, *Proc. of Conf. on Fatigue '84*, II, (1984), 1181.
- (15) Murakami, R., Akizono, K. and Kusukawa, K. (G. C. Sih, H. Nisitani and T. Ishihara, 編) *Role of Fracture Mechanics in Modern Technology*, (1987), 549, Elsevier Science Publishers.
- (16) Johnson, P. Zhang, X. P., and Pluvinaige, G., *Eng. Fract. Mech.* **37-3**, (1990), 519.
- (17) 金属材料衝撃試験方法, 日本工業規格 JISZ 2242, (1977).
- (18) Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Vol. 03. 01, E-604, (1992).
- (19) Annual Book of ASTM Standards, Section 3, 03-01, E-208, (1992).
- (20) Annual Book of ASTM Standards, Section 3, 03-01-E-399, (1992).
- (21) British Standards Institution, BS 5447, (1977).
- (22) 日本機械学会規準, 弾塑性破壊靱性 JIC 試験方法, JSME S 001-1981, (1981).
- (23) 軽水炉一次系健全性の破壊力学的評価に関する研究II, 日本溶接協会4DF小委員会, (1986), 350.
- (24) Kalthoff, J. F., *Eng. Fract. Mech.* **23-1**, (1985), 289.
- (25) Homma, H. Kanto, Y. and Tanaka, K., *ASTM STP* 1130, (1992), 37.
- (26) Homma, H., Shockey, D. A., and Hada, S., *ASTM STP* 905, (1986), 683.
- (27) Ravi-Chandar K. and Knauss, W. G., *Int. J. Fract.* **25**, (1984), 247.
- (28) Klepaczko, J. R., *Crack Dynamics in Metallic Materials*, (1991), Springer-Verlag.
- (29) Freund, L. B., *Dynamic Fracture Mechanics*, Cambridge Univ. Press (1991).
- (30) Habjian, A. H., Trans. of 10th Conf. on SMiRT Vol. F, American Association for SMiRT (1989), 1-64.
- (31) Cheverton, R. D., Iskander, S. K. & Ball, D., *ASTM STP 969* (1986), 752.
- (32) Homma, H., Kanto, Y. and Tanaka, K., *Dynamic Fracture of Materials* (Rosmanith H. P. & Rosakis A. J. 編), *Elsevier Appl. Sci.* (1991), 11.
- (33) Homma, H., Kanto, Y. and Tanaka, K., (Jono M.: Inoue T. 編), *Mechanical Behavior of Materials, Pergamon Press Vol. 1* (1991) 537.
- (34) Homma, H., and Minagawa, K., Proc. of Int. Conf. on Computational Mechanics, (1986-4), Tokyo Japan.
- (35) Hackett, Schwalbe and Dodds, *Constraint Effect in Fracture*, ASTM STP 1171 (1993).
- (36) The Second Symposium on Constraint Effects in Fracture, *ASTM*, (1993-11), Dallas, USA.