

氏名(本籍)	北川正義(石川県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博第271号
学位授与年月日	昭和46年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)機械工学第二専攻
学位論文題目	各種負荷応力条件での鋼材の脆性破壊
	(主査)
論文審査委員	教授 横堀 武夫 教授 渥美 光 教授 川崎 正

論文内容要旨

鋼材の脆性破壊は、機械、構造物の性能向上と安全性の支配因子の一つとなっているので、従来この問題の研究は数多く行われている。構造物特に機械においては、ほとんどすべての場合、負荷応力は単純な引張りだけではなく、また、応力分布も均一ではない。しかるに従来この方面の系統的な研究はほとんど行われていない。そこで、本研究では、各種負荷応力のもとにおける脆性破壊の機構を微視的な領域から巨視工学的領域にわたって検討し、これをもとにして、脆性破壊の法則をもとめ、実用の設計に適用できるようにした。

第1章は緒論である。

第2章では、平滑試験片の引張り及び振り単独負荷条件のもとでの脆性破壊の温度依存性を研究

した。それら負荷条件のもとでは、温度依存性が相違することを実験によって確め、核生成論¹⁾によって、理論的に説明した。さらに、引張り及び振り脆性破壊応力の比較検討より、脆性破壊の法則は、巨視的な最大主応力一定条件ではないことを示した。

第3章では、脆性破壊現象の機構を解明するためには、巨視的又は肉眼による観察だけでは充分でないので、顕微鏡観察によって、微視組織学的な研究を行い脆性破壊機構のモデルを検討した。まず微視き裂の方位分布を調べ、微視き裂が最大主応力方向に直角な方位を中心に分布することを理論及び実験によって明確にした。続いて、レプリカ法によって、微視き裂の発生から伝播までを観察した。

この種の研究は少なく、破壊機構を論ずるに充分でない。さらに、それらは微視き裂の発生機構に重点がおかれている²⁾。

まず、き裂の発生個所を調べ、粒界炭化物、パーライト及びフェライトに発生することを認めた。つぎに、最終破壊に到ったき裂の様相をその先端近傍に着目して調べた。その結果、最終破壊に到ったき裂は、先端の鈍化程度が少なく、き裂先端に沁りが存在することを示した。これら観察に基づき、脆性破壊機構は、沁り帯とき裂の相互干渉効果を考慮したものでなければならないことを明らかにした。その結果、横堀によって提案されたモデル³⁾が最も妥当であることを示した。(Fig 1)

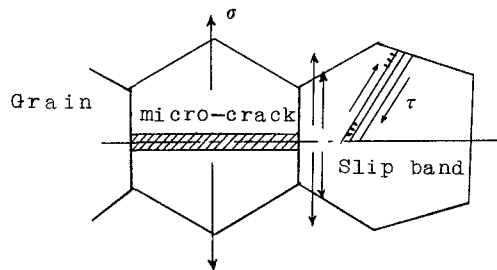


Fig.1 Schematic Illustration for Fracture Model

第4章では、第3章で示した脆性破壊機構モデルをもとに巨視的な応力条件と結びつけて、破壊条件式を求め(Eq. 1)これを検討するために、引張り及び振りを同時負荷し組合せ条件下での実験を行った。

$$\sigma_{\lambda f} = \frac{2[k_{\lambda} d \frac{1}{2} + \tau_i / \sqrt{2}]}{\epsilon(1 + \sqrt{1 + 4\lambda^2}) + \frac{1}{2}\sqrt{1 + 4\lambda^2}} \quad \text{Eq. 1}$$

$\sigma_{\lambda f}$: 引張り応力成分, $\tau_{\lambda f}$: 振り応力成分, $\lambda = \tau_{\lambda f} / \sigma_{\lambda f} k_{\lambda}$: 有効表面エネルギー項
 d : 結晶粒径, τ_i : 摩擦応力, ϵ : 定数

まず、最終破面の方向を巨視応力条件と関連して調べ、その結果、巨視破面は、最大主応力方向と直角となるという結論を得た。微視き裂の方位分布と合せて判断すると、脆性破壊の応力条件は、最大主応力一定条件と結論されやすい。実験結果によれば、引張り振り組合せ負荷領域では、脆性破壊の法則は最大主応力一定条件に従わず、さらに、結晶粒度に依存する。この事実は従来提案されているモデルによっては、説明できない。そこで、前述のモデルにより説明を試みた。実験より応力状態 λ の変化が、有効表面エネルギー k_λ 及び摩擦応力 τ_i を変換することを明らかにし、これを考慮することによって、 λ 帯とき裂の相互干渉作用に基づくモデルによって、実験結果を十分に説明することができる。以上より、その脆性破壊機構モデルが妥当であることを述べた。

2, 3及び4章では、巨視的には応力勾配のない平滑試験片の場合の脆性破壊の法則を研究した。しかしながら、実際には、応力分布が様でない場合が多い。従って、応力勾配を持つ試験片の脆性破壊の法則を検討することは、工学的にも物理的にも重要である。そこで、第5章では、切欠き材の脆性破壊を引張り試験の場合について検討した。切欠き底より発生する塑性域の長さが、板厚に比して小なる場合には、平面歪状態と見なすことができる。その場合の塑性域内の応力分布は、 λ 線場の理論⁴⁾より与えられる。これを用いて、荷重平衡法により、切欠き底に半径を持つ場合の負荷応力と塑性域長さの関係式を理論的に求め、法則検討の資料とした。また、切欠き底の歪分布を知ることは、開口変位論⁵⁾の検討に必要である。そこで、特殊な試片により実験し、歪分布が切欠き半径に依らずに統一的に整理可能なことを示し、その実験式を提案した。(Eq. 2)

$$\epsilon_p = \frac{2 \left[\theta \circ c \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{Gy}} - \frac{1}{\beta K_\sigma} \right) - 1 \right]}{\left(1 + \frac{r}{\rho} \right)^{1.8}} \times 10^{-2} \quad \text{Eq. 2}$$

ϵ_p : 塑性歪 r : 切欠き底からの距離 ρ : 切欠き半径 σ_a : 負荷応力
 σ_{Gy} : General yield 応力 β : 塑性拘束係数 K_σ : 弾性応力集中係数

以上をもとに、法則の検討を行った。実験によって、温度、結晶粒度及び切欠き半径依存の検討を行い、破壊の温度領域を分類し、そのうちの基本的な脆性破壊域での法則を検討した。その結果、従来提案されている一点における最大応力一定条件⁶⁾が妥当でないことを示し、新たに、ある有限層内の平均応力一定条件が法則として適当であることを示した。その有限層の大きさは、1 結晶粒径程度であり、ほとんど温度に依存しない。この考え方によれば、有限層内の平均破壊応力は、平滑試験片の場合の結晶粒度依存性の式と形式的に一致する。即ち、Eq. 3 で与えられる。

$$\sigma_{f\rho} = \sigma_i + \left(\frac{\alpha b d^2}{V_0} \right)^{-m} k_0 d^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 3}$$

右辺第2項の粒度依存性の勾配項が平滑試片と相違する。これは、体積効果に由来する。体積効果及び結晶粒度依存性は、実験結果を充分説明することができる。以上より、勾配を持つ場合の脆性破壊の法則は、有限層内の平均応力一定条件であることが示される。

この概念を用いて、切欠き形状の相違する場合等の称脆性破壊応力を図式的に予想することができる。例えば、切欠き深さの相違する場合、相似形試験片の場合及び歪速度依存性等である。これらの理論値と実験値は良好な一致を示している。即ち、工学的にも有効な基準を求める法則として発展させることができることを示している。一方、Eq. 2より破壊時の開口変位を検討できる。検討の結果、脆性破壊領域では、開口変位論は法則として、妥当でないことが示された。

第6章は結論である。

参 考 文 献

- 1) T. Yokobori, J. Phys. Soc. Japan, 10, 368, (1955)
- 2) C. J. McMahon, Jr. and M. Cohen, Acta Meta., 13, 591, (1965)
- 3) T. Yokobori, and M. Yoshida, Rep. Res. Inst. Str. Frac. Mats. Tohoku Univ. Vol, 4, NO. 1 (1968) P. 11
- 4) R. Hill, Mathematical Theory of Plasticity, Oxford, London (1950)
- 5) B. A. Bilby et al, Proc. Roy. Soc., A272, 304 (1963)
- 6) 例えば J. R. Hendrickson et al. Trans. ASM, 50, 656 (1958) J. F. Knott and A. H. Cottrell, J. I. S. I., 201, 249 (1963)

審 査 結 果 の 要 旨

鋼材の脆性破壊は機械・鋼構造物の性能向上と安全性の支配的因子の一つとなっているので従来この問題についての研究は数多く行なわれている。しかし、構造物とくに機械においては、ほとんどすべての場合、負荷応力は単純な引張りだけではなく、又応力分布も均一ではない。しかるに従来この方面の系統的な研究はほとんど行なわれていない。

本論文は、引張りと振りの組合せ応力条件および切欠きを附与した条件での研究を行ない、破壊強度の温度依存性、結晶粒大きさ依存性、き裂の発生・伝播の微視様相、切欠き脆性破壊の法則などに関して多くの重要な知見を得たもので6章からなる。

第1章は緒論で、本研究の意義および目的について述べている。

第2章では、鋼材の脆性破壊強度の温度依存性に対する負荷応力の種類の影響として引張りと振りの場合の相違を実験的に明らかにし、従来考えられていたのとは反して脆性破壊が最大引張り応力一定条件にしたがわないことを明確にしている。

第3章は微視の様相に対する負荷応力の種類(引張りと振り)の影響をしらべたものであり、微視き裂は最大引張り応力方向に垂直に発生すること、微視き裂発生源はフェライト、パーライトないし粒界炭化物等多様であるが、いずれの場合にもすべり帯をとまうこと等の知見を得ている。

第4章では、引張りおよび振りの組合せ負荷での脆性破壊法則を実験的に求めて、その法則は最大引張り応力一定条件ではなく、しかも結晶粒大きさによって異なってくることを明らかにした。さらに、この実験的法則は、第3章で明らかにした微視き裂とすべり帯との相互効果にもとづく機構によって理論的に説明されることをしめしている。

第5章は切欠きによる応力勾配のある場合の引張り脆性破壊に関する研究であり、ここでは塑性域長さと負荷応力との関係式を導き、実験的にたしかめ、また切欠き近傍における歪分布の実験式を与えている。さらに、この場合の破壊強度の温度依存性や結晶粒大きさ依存性を実験的に求め、切欠き付きの場合の脆性破壊は連続体力学的には、一点の最大応力条件によってきまるものではなく、破壊法則は、ある大きさの限界層内で平均した応力が限界値に達する条件で与えられるものであることを解明している。そして、この限界層の大きさは結晶粒径の程度の大きさであり、温度にはほとんど無関係であることを明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、各種負荷応力条件での鋼材の脆性破壊に関する新しい重要な知見を与えたものであり、材料強度学ならびに機械工学上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。