



Title	引張りを受ける有限板の中央切欠きから発生したき裂の応力拡大係数について
Author(s)	真壁, 朝敏; 才本, 明秀; 福里, 真吾; 小倉, 正也
Citation	日本機械学会論文集. A編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, 72(719): 32-36
Issue Date	2006-07-25
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/126
Rights	Copyright (c) 2006 日本機械学会

引張りを受ける有限板の中央切欠きから発生したき裂の 応力拡大係数について*

真壁 朝敏^{*1}, 才本 明秀^{*2}
福里 真吾^{*3}, 小倉 正也^{*4}

Stress Intensity Factors for a Crack Emanating from a Notch in a Finite Center-Notched Plate Subjected to Tension

Chobin MAKABE^{*5}, Akihide SAIMOTO,
Singo FUKUZATO and Masaya OGURA

^{*5} Department of Mechanical Systems Engineering, University of the Ryukyus,
1 Senbaru, Nishihara cho, Nakagami gun, Okinawa, 903 0123 Japan

Many literatures have been given for the stress intensity factors of a crack emanating from a hole or notch in infinite or semi-infinite body. However, there has been few detailed discussion about applicability of such stress intensity factors for the finite body. In this study, the stress intensity factors of a crack emanating from a U-shaped center notch in finite plate are analyzed for various crack lengths and parameters characterizing plate dimensions and notch shape on the bases of the body force method. These results are then compared with those for the center cracked plates. Also, the relationship between the variations of such stress intensity factors and the fatigue crack's behavior are discussed. The stress intensity factor of center cracked specimens can approximate that of center notched specimens with crack when an equivalent crack length is used for calculations in the cases of $\rho/W < 0.1$ and $c/\rho < 1$, where c , ρ and W are crack length measured from notch bottom, notch root radius and semi-width of specimen, respectively.

Key Words: Stress Intensity Factor, Geometry Factor, Crack Propagation, Notch, Fatigue, Finite Body

1. 緒 言

切欠きから発生したき裂の応力拡大係数の評価は基本的にも実用的にも重要な問題であり、その簡便的あるいは統一的な評価手法が見出せれば工学的に有意義である。例えば、西谷と尾田⁽¹⁾によって半無限板において切欠きからき裂が発生・進展した場合の引張り負荷に対する応力拡大係数が解析されている。その研究では、切欠きの長さを含めたき裂の長さを縁き裂の長さと同値とみなした場合(その長さは等価き裂長さと呼ばれる)、応力拡大係数がどの程度の精度で近似できるのかについて検討がなされている。そして、その解析では、切欠き底から発生したき裂の長さが切欠き半径程度の長さに達したら、応力拡大係数が縁き裂の場合のものと同様になることを明らかにしている。さらに、西谷ら⁽²⁾は中央切欠きを有する無限板の引張りにおいて、等価き裂で近似した応力拡大係数

と切欠きから発生したき裂の厳密な応力拡大係数の関係についても検討している。また、中井ら⁽³⁾は切欠きから発生した微小き裂の進展条件について等価き裂長さを用いて解析した応力拡大係数を用いて議論している。しかしながら、そのような等価性の問題は、有限板の場合については、検討されてない問題が残されており、その応用範囲は必ずしも明確ではないと思われる。また、切欠き先端に生じる応力集中と有限板に生じたき裂の応力拡大係数の形状係数には相似則⁽⁴⁾が適用できるが、そのことと上述した等価き裂の有効範囲の関連について検討するのも興味深いことであると思われる。

以上のようなことから、本研究では、有限板の中央に加工した U 字形の切欠きからき裂が発生した場合の引張りにおける応力拡大係数の問題について検討した。そして、その中央切欠きから発生したき裂の応力拡大係数がどの程度の精度で中央き裂の応力拡大係数で近似できるかどうか検討した。

2. 解析手法および解析対象

応力拡大係数の解析には西谷ら⁽⁵⁾によって開発された体積力法による二次弾塑性問題の汎用解析法を用

* 原稿受付 2005年11月16日。

^{*1} 正員、琉球大学工学部(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字1)。

^{*2} 正員、長崎大学工学部(〒852-8521 長崎市文教町1-14)。

^{*3} 沖縄電力(株)(〒901-2602 沖縄県浦添市牧港5-2-1)。

^{*4} 琉球大学大学院理工学研究科。

E-mail: makabe@tec.u-ryukyuu.ac.jp

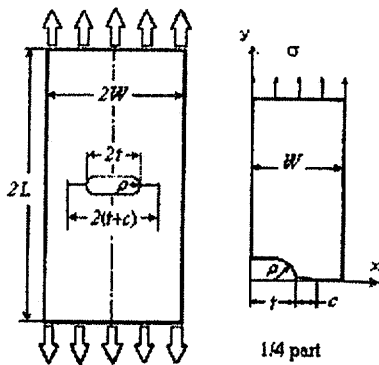


Fig.1. Shape of center notched plate with crack.

いた。解析対象としたき裂の発生した U 字形切欠きを有する有限平板の形状を図 1 に示す。また、本研究では図 1 の切欠きを有する有限板の場合と比較検討するため、図 1 の場合と同じ外形寸法 ($2W$ と $2L$) の中央き裂平板の場合についても同様な解析手法を用いて応力拡大係数を求めた。解析は平板の上下端で切欠きと垂直方向に一応な応力で引張りを受けた状態について平面応力の条件で行った。

3. 解析結果および考察

3・1 切欠きから進展したき裂の応力拡大係数の形状係数に関して 本報告では、図 1 の試験片におけるき裂が x 軸に沿って進展した場合の応力拡大係数の変化を調べ、それと中央き裂の場合の応力拡大係数を比較するため、両者の形状係数を算出した。 x 軸上における、中央切欠き試験片の場合 (切欠き半長を t 、切欠き底から進展したき裂の長さを c とする) の形状係数 F_{In} を式(1) に示す。また、き裂半長 a を有する中央き裂試験片の場合の形状係数 F_I を式(2) に示す。

$$F_{In} = \frac{K_{In}}{\sigma\sqrt{\pi(t+c)}} \quad (1)$$

$$F_I = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi a}} \quad (2)$$

ここで、 K_{In} あるいは K_I はそれぞれ中央切欠きから発生したき裂あるいは中央き裂の応力拡大係数、 σ は有限板の上下端部に負荷された一様応力である。

応力拡大係数はき裂長さに依存したき裂先端近傍の応力場における応力こう配等を評価するパラメータである。そして、応力拡大係数には相似性がないので、

個別のき裂の場合について評価する必要がある。しかしながら、良く知られているように、応力拡大係数の形状係数は試験片の板幅 $2W$ 等に依存せず、無次元量 $(t+c)/W$ や ρ/W によって整理できる相似性のある係数である。したがって、き裂の挙動は相似性のある応力拡大係数の形状係数によって検討した方が好ましい場合がある。本報告では応力拡大係数の解析値を示すのではなく、切欠きの場合とき裂の場合における応力拡大係数の変化傾向を比較検討することを目的とした。そこで、次節においては、応力拡大係数の変化ではなく、両者の比較を行うため、形状係数 F_I と F_{In} の変化に着目して検討した。

3・2 切欠きから進展したき裂の応力拡大係数と中央き裂の応力拡大係数の比較 応力拡大係数を決定するための形状係数には相似性があるので、本節では、代表例として、板幅 $2W=20$ mm、板の高さ $2L=30$ mm の場合の計算結果を用いて、切欠き半長 t 、切欠き半径 ρ そしてき裂長さ c を変化させた場合の結果を検討する。

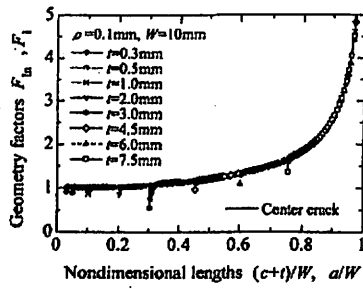
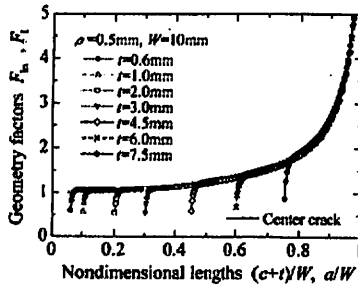
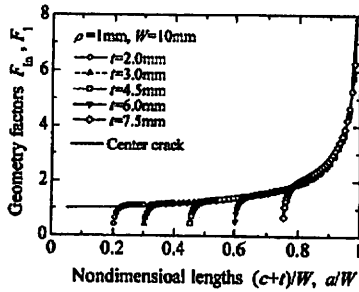
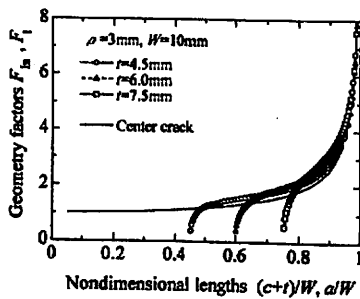
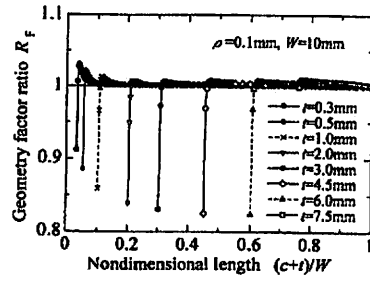
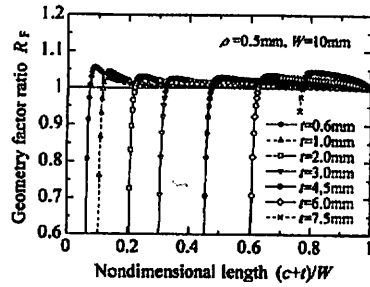
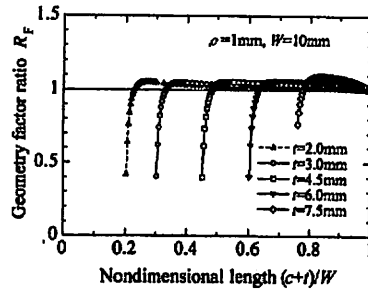
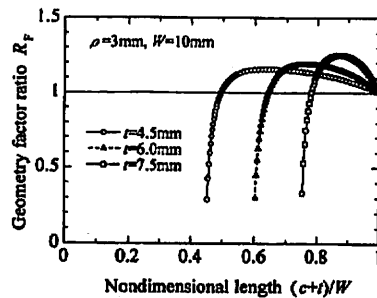
図 2 は板半幅で無次元化した等価き裂長さあるいはき裂長さ $\{(t+c)W$ あるいは $aW\}$ と形状係数 (F_{In} あるいは F_I) の関係例である。図 3 は、図 2 に基づき、切欠きの場合とき裂の場合における形状係数の比 $R_F (=F_{In}/F_I)$ を無次元長さ $(t+c)/W$ に対して整理した結果である。

図 3 (a) は ρ/W の値が小さい場合 ($\rho/W=0.01$) であり、図 3 (d) は逆に ρ/W の値が大きい場合 ($\rho/W=0.3$) である。図 3 (a) では検討した全ての切欠きの場合でき裂の進展によって R_F の値はほぼ 1 に漸近する。それに対し、図 3 (d) の場合では、全ての切欠きの場合で R_F の値が 1 に漸近することはない。

ここで、疲労き裂の挙動と応力拡大係数の関係について考えてみる。小規模降伏条件下で疲労き裂が進展する場合、き裂進展速度や進展開始条件は応力拡大係数を用いて評価するのが常であり⁽⁶⁾、それは切欠き材についても応用されている。試験片に加工した相対的に小さな寸法の切欠きから発生したき裂については、中井ら⁽³⁾によって示されているように、次式⁽⁷⁾によって、板幅を考慮しない応力拡大係数を用いて、切欠き底近傍の応力場が近似的に評価できる。

$$K_a = \frac{1.122K_I \sigma \sqrt{\pi c}}{\sqrt{1+4.5(c/\rho)}} \quad (3)$$

この近似式は切欠きから発生したき裂の長さ c が切欠き半径 ρ よりも小さい場合において有効であり、

(a) $\rho=0.1\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $\rho/W=0.01$.(b) $\rho=0.5\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $\rho/W=0.05$.(c) $\rho=1\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $\rho/W=0.1$.(d) $\rho=3\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $\rho/W=0.3$.Fig. 2 Variations of geometry factors F_{Ia} and F_{I1} .(a) $\rho=0.1\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $\rho/W=0.01$.(b) $\rho=0.5\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $\rho/W=0.05$.(c) $\rho=1\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $\rho/W=0.1$.(d) $\rho=3\text{mm}$, $W=10\text{mm}$, $\rho/W=0.3$.Fig. 3 Variations of ratio of geometry factors $R_F (=F_{Ia}/F_{I1})$.

K_t は応力集中係数である。また、中井ら⁽³⁾の研究ではき裂長さ c が切欠き半径 ρ よりも大きい場合は切欠きから発生したき裂を、等価き裂長さで評価した応力拡大係数を用いて算出している。式(3)によって算出した応力拡大係数を用いて、切欠きから発生した疲労き裂の進展を評価するのは、実用面から有効であり、意味ある手法であると考えられる。しかし、図3に示した R_f の変化例から検討した場合、部材の寸法等の条件によっては、式(3)を用いて簡便に応力拡大係数を評価するよりもそれとは異なる観点から、厳密に評価した方が現象を理解する上で適切な場合もある。

通常の実験で用いている切欠き材の板幅 $2W$ は5mmから50mm程度であると考えられる。図3(c)の場合は $\rho/W=0.1$ ($W=10\text{mm}$ の場合では $\rho=1\text{mm}$) であるが、この例では形状係数の比 $R_f (=F_n/F)$ の値は無次元長さ $(t+c)/W$ のほぼ全範囲で約1.05から1.0(すなわち、切欠きの場合の応力拡大係数がき裂の場合の応力拡大係数で約5%の以内の誤差で評価できる)であり、この結果は実用的には興味深いものである。そして、この傾向は、当然 $\rho/W=0.1$ 以下の寸法の切欠きにおいても成り立っている。したがって、このことを、大きい寸法の試験片、例えば、 $W=500\text{mm}$ の試験片に適用すると、切欠き半径が50mmの場合でも、切欠き材をき裂材と等価と見なして、実用上の精度で応力拡大係数が式(1)を用いて近似できると考えられる。ただし、き裂長さ c が ρ に比べて小さく、 R_f が1より小さい場合には切欠きの場合の応力拡大係数がき裂の場合の式(1)では近似できない。また、疲労においては、初期き裂が存在する試験片と切欠きを有する試験片の疲労寿命等を検討する場合、後者においては、き裂発生寿命やき裂発生寸法等を考慮する必要があり、それらは材料や負荷条件(例えば、応力比や最大繰返し応力)によって異なるので注意を要する。

次に、停留き裂の場合について考えてみる。停留き裂が存在するか否かの分岐点である限界の切欠き半径 ρ_0 ⁽⁸⁾ は材料定数とみなされている。例えば、炭素鋼 S10C, S20C そして S30C における分岐点の ρ_0 は、0.5mm程度(0.4mmから0.6mm)であり、この ρ_0 以下の寸法では、負荷応力の条件によって、切欠きから発生したき裂が停留する可能性がある。

図3(a)と(b)は、切欠き半径 ρ がそれぞれ0.1mmと0.5mmの場合であるので、それらは低炭素鋼の ρ_0 程度かそれ以下の場合における傾向を示している。図3(a), (b)からわかるように、無次元化した切

欠き長さ t/W が0.1程度以下の場合(図3の横軸で $c=0$ として検討)、 R_f の値は最大値に達した後比較的急こう配で減少している。しかし、 t/W が0.2以上の場合、 R_f の値は最大値に達した後緩やかに減少している。したがって、停留き裂長さ等を式(1)で評価した結果の評価精度は R_f の変化傾向に影響されることが予想される。

疲労き裂の発生と停留は切欠き底の応力の最大値と応力こう配等に関係する⁽⁹⁾。そして、き裂進展過程において形成されるき裂先端付近での繰返し塑性域やき裂面のフレッチングコロージョンの発生等に起因してき裂閉口が生じることが停留き裂の存在する原因であることも述べられている⁽⁹⁾。中井ら⁽⁹⁾は詳細な実験結果に基づいて、切欠き材の停留き裂の問題について応力拡大係数範囲と有効応力拡大係数範囲の下限値を考慮した理論的な検討を行っている。そして、中井ら⁽⁹⁾の研究結果から、き裂閉口挙動による有効応力成分の低下に起因して、き裂の停留が生じることが結論づけられる。このようなことを考慮して、今後、 R_f の変化傾向の違いや応力比の違いが、硬さの異なる材料のき裂の停留現象にどのように影響するのかについて実験的な検討をすることも興味深いことであると考えている。西谷ら⁽²⁾の解析によれば、縁に切欠きを有する半無限板の場合の方が、中央に切欠きを有する無限板の場合よりも、切欠きから発生したき裂の応力拡大係数が等価き裂長さを用いて高精度で近似できることが示されている。このようなことから、中央に切欠きを有する平板と両端に切欠きを有する平板について、改めてき裂の停留と寸法効果の関係について検証してみるのも興味深いことであると思われる。

4. 結 言

き裂を有するU字形切欠きを加工した中央切欠き試験片における、き裂の進展に伴う応力拡大係数の変化について検討した。また、本研究では切欠き先端から、どの程度、き裂が進展したら、その試験片が中央き裂試験片として近似できるのかについても検討した。その結果、板半幅で無次元化した切欠き半径 ρ/W が0.1以下であれば、き裂長さ c が切欠き半径 ρ に比べて小さい場合を除いて、実用上の精度でき裂の発生した中央切欠き試験片は中央き裂試験片とみなして応力拡大係数が評価できることがわかった。

最後に、本研究に対しご助言を賜った西谷弘信九州大学名誉教授に感謝申し上げます。

文 献

- (1) Nisitani, H. and Oda, Y., Interference Effect between a Crack and a Notch or Crack in a Semi-Infinite Plate, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 46, No. 407 (1980), pp.745 - 753.
- (2) Nisitani, H., Bao, C. and Saimoto, A., Stress Intensity Factor of a Crack Emanating from Hole or Notch (An Examination Based on Equivalent Crack Length), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 66, No. 642 (2000), pp.369 - 373.
- (3) Nakai, Y., Tanaka, K. and Kawashima, R., Propagation and Non-Propagation of Fatigue Cracks in Notched Plates of Low-Carbon Steel, *Journal of Society of Materials Science, Japan*, Vol. 32, No. 356 (1983), pp. 535 - 541.
- (4) Brock, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, (1986), Martinus Nijhoff Publishers.
- (5) Nisitani, H., Saimoto, A. and Noguchi, H., Versatile Method of Two -Dimensional Elastic Problem by Body Force Method (1st Report, Basic Theory), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 56, No. 530 (1990), pp. 2123 - 2129 .
- (6) Suresh, S., *Cambridge Solid State Science Series, Fatigue of Metals*, (1991), Cambridge University Press.
- (7) Lukas, P. and Klesnil, M., Fatigue limit of Notched Bodies, *Materials Science and Engineering*, Vol. 34 (1978), pp. 61 - 66.
- (8) Nisitani, H. and Endo, M., Unifying Treatment of Notch Effects in Fatigue, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 51, No. 463 (1985), pp.784 - 789.
- (9) Tanaka, K. and Nakai, Y., Prediction of Fatigue Threshold of Notched Components, *Transaction of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 106, No. 2 (1984), pp.192 - 199.