研 究

切削工具のぜい性損傷に関する

破壊力学的研究 (第1報)*

—解析方法と初期欠損への適用—

上田完次** 岩田一明*** 柴坂敏郎† ジョーン・パーシー††

Fracture Mechanics Analysis of the Brittle
Failure of Cutting Tools (1st Report)
—Basic Concept of Fracture Mechanics
Application and the Analysis of Early
Fracture in Interrupted Cutting—

Kanji UEDA, Kazuaki IWATA,
Toshiro SHIBASAKA and John H. PERCY

In the first part of the paper the basic concept is described of the application of fracture mechanics theory to the brittle failure of cutting tools and a systematic algorithm for its application is proposed. In the second part of the paper a case study is presented for the early fracture in interrupted cutting. From the analysis the boundary curve between safe and dangerous zones for the early fracture is

determined in terms of the cutting conditions, the tool geometry, the mechanical properties and the fracture toughness of tool materials. The dangerous zone increases as the fracture toughness value decreases and the wedge angle decreases. The zone also increases with a decrease in the ratio of vertical component to horizontal component of the resultant cutting force. The boundary is largely affected by the pattern of the contact between the work and the cutting edge in initial stage of cutting, and the most dangerous situation is found when the tip of the cutting edge contacts the end surface of the work.

Key words: cutting tool, brittle failure, fracture mechanics, interrupted cutting, fracture toughness, safe-dangerous boundary.

1. 緒 言

チップング、欠損、き裂など、いわゆる切削工具のぜい性損傷の解明が極めて重要であることはあらためて指摘するまでもない。既に数多くの優れた研究があり、最近の主なものだけでも、浅井らによる実験的研究¹⁾や臼井らによる解析的研究²⁾などがあげられ、有益な知見を与えている。

しかしながら、切削工具のように組織敏感な材料のぜい性損傷を考える場合、最も重要な問題の一つは材料内のき裂ないしはき裂状欠陥（以下、単にき裂と呼ぶ）の取扱いであるが、これまでその挙動の解明の必要性が指摘されながらも、系統的な研究が十分に行われているとは言えない。特に、き裂発生に至る微視的な変形挙動に対する検討は、竹山ら³⁾や岩田ら⁴⁾によってなされているものの、その成長・伝播を考慮した解析は全くなく、それ故、ぜい性損傷の解析が不十分な段階にとどまっ

ていると言ってもよい。

そこで、本研究では、き裂先端近傍の特異な力学的応答を取り扱うことのできる破壊力学理論を適用して、切削工具のぜい性損傷を解析しようとするものである。すなわち、切削系の力学的環境のもとで工具内のき裂が成長して不安定伝播に至った時、ぜい性損傷が引き起こされるものと考え、ぜい性損傷の発生する安全-危険境界やぜい性損傷に起因する工具寿命を、 K （応力拡大係数）、 G （ポテンシャルエネルギーの解放率）、 J 積分値などの破壊力学概念に基づいて検討する。

まず、本報においては、各種ぜい性損傷に対して破壊力学的アプローチを行うための解析方法を提案する。次いで、機械的要因が支配的と考えられる初期欠損の場合の解析結果を述べるとともにその考察を行う。

2. 破壊力学適用の基本的考え方

切削工具のぜい性損傷に対して破壊力学を適用する場合の解析の基本的流れを図1に示す。また、図1には、比較のために従来の材料力学に基づくアプローチも含めて示している。

まず、破壊力学的アプローチについて述べる前に、比較のために、いわゆる材料力学的なアプローチについて簡単に説明する。この場合には、与えられた境界条件と

* 原稿受付 昭和56年10月6日。昭和55年度精機学会春季大会学術講演会（昭和55年3月28日）にて発表。

** 正会員 金沢大学工学部（金沢市小立野2-40-20）

*** 正会員 神戸大学工学部（神戸市灘区六甲台町1）

† 正会員 姫路工業大学（姫路市書写2167）

†† University of Auckland (Private Bag, Auckland, New Zealand)

Fig. 1 Conceptual algorithm for the application of fracture mechanics to brittle failures of cutting tools

材料特性に対して工具内の応力 σ ・ひずみ ϵ 分布を求め、それらが臨界値 σ_f 、あるいは ϵ_f に達した時、工具破損が起こるという考えで解析が行われて来た。例えば、 σ としては主応力の最大値をとることがしばしば行われた。しかし、この方法では、定性的な傾向をつかむことはできるものの、き裂の成長・伝播を考慮していないために、ぜい性損傷に起因する工具寿命や、安全-危険境界などを定量的に評価するのは困難である。

これに対し、本研究で提案する破壊力学的アプローチにおいては、き裂を導入した解析モデルを用いて、従来の σ や ϵ に代わる破壊力学パラメータ、 K, G, J 値などを求め、それらの臨界値である破壊じん性値、 K_c, G_c, J_c などとの比較により、安全-危険境界や工具寿命を求めることが可能となる。

この破壊力学的手法は、欠損、チッピング、疲労き裂、及び熱き裂に対して適用が可能である。ここでは、純然たる初期欠損の場合をとりあげて説明する。き裂先端近傍の降伏域が小規模であれば、線形破壊力学が適用でき、この時の力学的パラメータは K あるいは G となる。次に、独立の破壊じん性試験で求められた K_c, G_c を用いて破壊発生の判定を行う。すなわち、 $K \geq K_c$ 、あるいは、 $G \geq G_c$ が満たされた場合には、き裂は負荷の増加なしに

不安定伝播を起こし、工具の欠損に至る。他方、この条件を満たさない場合は、不安定伝播を起こさず、工具の欠損に至らないことになる。この破壊条件を満足するかしないかは、もちろん、その時の切削条件、工具形状、材料特性、及び破壊じん性値によって支配されるわけであるから、それらの諸要因に対して安全-危険境界が求められることになる。なお、本研究において安全-危険境界と呼ぶ場合、ぜい性損傷が発生する限界き裂長さや限界切削力の関係を意味している。

また、繰返し負荷のかかる断続切削や不連続型切りくず生成のような場合には、 ΔK （応力拡大係数の変動幅）が力学的パラメータとなり、大規模降伏の場合には J 値が力学的パラメータとなる。更に、切削熱の影響を考慮する場合には、工具内の温度分布を求め、熱応力を算出し、重ね合わせの原理により K を解析すればよいことになる。

以上のように、破壊力学的アプローチをすすめる際に、重要な三つのステップがある。第1は、与えられた条件に対して $K, G, J, \Delta K$ などを解析することであり、第2は、適切な試験で求められた破壊じん性値を用いて、安全-危険境界や工具欠損寿命を求めることであり、最後に、第3として、切削実験による結果との比較検討であ

Fig. 2 Analytical model based on compliance method

Fig. 3 A representative of finite element analysis model

る。

まず、本報においては、純然たる初期欠損の場合についての解析例を示す。繰返し負荷のかかる場合の寿命予測や熱応力を考慮した問題については、続報で述べる予定である。

3. コンプライアンス法による初期欠損の解析

切削工具のように複雑な幾何学的形状と力学的境界条件を有する問題においては、純解析的に K, G などを求めることはできず、数値計算によらざるを得ない。数値計算に基づいた方法にも、応力法、変位法、ひずみエネルギー法などがあるが、本報では有限要素法を適用したコンプライアンス法を用いた。次にその概略を示す。

図2は用いる切削工具モデルである。同図において、 P_i はすくい面上*i*における等価集中荷重であり、 F_n^i 及び F_t^i はそれぞれ P_i の垂直成分及び接線成分である。また、 U_i は P_i に対応する変位である。

コンプライアンスの変化に伴う系のポテンシャルエネルギーの変化 $d\pi$ は次式で与えられる⁵⁾。

$$d\pi = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j d\lambda_{ij} \quad (1)$$

ここで、 $d\lambda_{ij}$ はコンプライアンスの変化であり、 $i=j$ の時は自己コンプライアンス、 $i \neq j$ の時は相互コンプライアンスである。従って、き裂面積 dA の増加に伴うポテンシャルエネルギーの解放率 G は次のようになる。

$$G = -\frac{\partial \pi}{\partial A} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j \frac{d\lambda_{ij}}{dA} \quad (3)$$

次に、き裂の不安定伝播の発生条件は

$$G \geq G_c \quad (4)$$

である。ここで、 G_c は G の臨界値、すなわち、破壊じん性値である。式(3)、(4)より次式が導かれる。

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j \frac{d\lambda_{ij}}{dA} \geq G_c \quad (5)$$

式(5)が、与えられた切削条件、工具形状、材料特性、及び破壊じん性値に対して、ぜい性損傷の発生する安全-危険境界を与えることになる。

一方、線形破壊力学の適用できる小規模降伏問題においては、 G と K の間には次式が成立する。

$$G = \frac{1}{E'} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad (6)$$

ただし、 K_I, K_{II}, K_{III} はそれぞれI型、II型、III型の応力拡大係数である。また、平面応力問題に対しては、 $E' = E$ 、平面ひずみ問題に対しては、 $E' = E/(1-\nu^2)$ である。 E はヤング率、 ν はポアソン比である。それ故、式(6)を用いて(5)を K で記述することもできる。例えば、I型で平面ひずみ条件の場合は、 $G_c = \frac{1-\nu^2}{E} K_{Ic}^2$ となるから安全-危険境界は次式で与えられる。

$$\left\{ \frac{E}{2(1-\nu^2)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j \frac{d\lambda_{ij}}{dA} \right\}^{1/2} \geq K_{Ic} \quad (7)$$

ここで、 K_{Ic} は独立の破壊じん性試験で求められる平面ひずみ破壊じん性である。

式(5)あるいは(7)で示されるように、与えられた切削条件、工具形状、材料特性に対して、 $d\lambda_{ij}/dA$ を求めれば、安全-危険境界が決定されることになる。

$d\lambda_{ij}/dA$ を求めるために有限要素法を適用する。図3は用いた解析モデルの一例である。破壊力学はもとより

Fig. 4 A typical crack observed near rake face
Work material: SCM 3(HRC 33), Tool material: P 20,
Cutting speed: 38 m/min, Feed rate: 0.14 mm/rev,
Depth of cut: 2.0 mm

き裂の発生を取り扱うのではなく、その成長・伝播を議論するものであるから、初期き裂については仮定をおかざるを得ない。そこで、最大主応力の生じる場所に位置するき裂が最も成長・伝播しやすいと仮定し、またその成長方向が最大主応力方向に直角な2次元き裂であると仮定する。この仮定は、I型が支配的となるぜい性材料に対しては第1近似として妥当と考えられ、また図4の観察例に見られるように、実際に生じるすくい面き裂の形態からもほぼ首肯されるものとする。

最大主応力分布及び主応力方向は、切削条件や工具形状などによって異なるため、き裂まわりの詳細な要素分割を変える必要が生じる場合があるが、基本的には図3と類似のモデルを用いた。

材料特性値としては、WC-Co系超硬工具を想定して、 $E=548.8 \text{ GPa}$ [$56\,000 \text{ kgf/mm}^2$], $\nu=0.225$ とした。また、平面ひずみ条件のもとで解析した。

4. 解析結果と考察

4.1 コンプライアンス及びポテンシャルエネルギー

コンプライアンス λ の計算結果の一例を図5に示す。これは刃先に切削力が集中荷重としてかかり、その合成切削力方向 θ が 10° の場合である。ただし、合成切削力方向は、 $\theta=\tan^{-1}(F_V/F_H)$ で定義した。 F_V は背分力、 F_H は主分力である。図5より、き裂長さ a の増加とともに λ が増加しているのがわかる。図中に示した式は λ と a の関係を最小二乗法で求めたものである。これより、式(3)を用いて G が求められる。

図6は a の増加に対する G の変化を示している。図6中のパラメータ f は単位切削幅当たりの合成切削力である。図6より、 G は a の増加とともに、また f の増加とともに増加するのがわかる。このことは、 G が独立の破壊じん性試験により求められた臨界値 G_c に達して、き裂が一旦成長を開始すると、 G が増加し続けることになり、不安定伝播に至るということの意味する。すなわち、 $G=G_c$ となるき裂長さは不安定伝播を引き起こす限界

Fig. 5 A representative of compliance variation with crack length

Fig. 6 Variations of potential energy release rate with crack length

き裂長さを意味する。なお、図6の $G_c=0.2754 \text{ N/mm}$ [0.0281 kg/mm]は $G_c=\frac{1-\nu^2}{E} K_{Ic}^2$ より求めた。ここで、 K_{Ic} はWC-Co系超硬合金の代表的な値として $K_{Ic}=12.4 \text{ MN/m}^{3/2}$ [$40 \text{ kg/mm}^{3/2}$]を用いた。このように、与えられた切削条件、工具形状、及び破壊じん性値に対して、限界き裂長さ a と限界切削力 f の関係、すなわち初期欠損の発生する安全-危険境界が求められる。

4.2 初期欠損の発生する安全-危険境界

まず、工具の K_{Ic} 値の影響について検討する。これまで、WC-Co系超硬工具材料の K_{Ic} は種々の値が求められている。例えばChermantら⁶⁾は K_{Ic} はCo相の体積率やカーバイドの粒径、Co相の平均自由行程などに依存して、約 $9.3\sim 15.5 \text{ MN/m}^{3/2}$ [$30\sim 50 \text{ kg/mm}^{3/2}$]と大きく変化することを明らかにしている。図7は K_{Ic} を

Fig. 7 Effect of the fracture toughness K_{Ic} on safe-dangerous boundary

Fig. 8 Effect of the direction of resultant cutting force on safe-dangerous boundary

変化させた場合の安全-危険境界の解析結果を示している。この時の境界条件は図6と同じく、合成切削力が刃先に集中荷重として $\theta=10^\circ$ の方向にかかっている場合である。図7から明らかなように、安全-危険境界は K_{Ic} に大きく依存し、 K_{Ic} が増加するに従い、安全領域が拡大している。例えばき裂長さが $50\mu\text{m}$ の時、 K_{Ic} が $9.3\text{ MN/m}^{3/2}$ [$30\text{ kg/mm}^{3/2}$] から $15.5\text{ MN/m}^{3/2}$ [$50\text{ kg/mm}^{3/2}$]に増加すると、 f は 130.3 N/mm [13.3 kg/mm] から 220.5 N/mm [22.5 kg/mm]に増加し、安全領域は約70%増大する。

次に、合成切削力方向 θ の影響について検討する。図8に示すように、 θ の減少とともに危険領域が拡大している。例えば、 θ が 20° から -10° に減少するに従い、き裂長さ $50\mu\text{m}$ において、安全領域は約1/4に減少している。通常、定常切削状態においては、 θ は比較的大きな値を示す場合が多いが、切削開始時の過渡状態におい

Fig. 9 Effect of the wedge angle of cutting tool on safe-dangerous boundary

ては、主分力の立上がりに対して背分力の立上がりは緩やかであり、 θ は小さい値をとる。従って、ぜい性損傷という観点からは、切削の開始時は、相対的に危険な状態にあると言える。

一方、切削終了時において、Pekelharingら⁷⁾が指摘するようにすくい面上で負の摩擦力が働くとすれば、 θ は負となり、非常に危険であると考えられる。また、いわゆる不連続型切りくずを生成する場合には、 θ が大きく変動するため、危険領域に入る可能性が高くなることが推察される。

図9は、工具のくさび角の影響を示したものである。くさび角が 90° から 84° へわずかに減少しただけでも、危険領域は拡大し、き裂長さ $50\mu\text{m}$ において f は約20%減少しているのがわかる。

更に、工具と被削材の切削開始時における接触様式の影響を示したのが図10である。同図は合成切削力方向が同一の場合における代表的な3様式について示したものである。図から明らかなように、刃先で衝突し集中荷重を生じる場合が最も危険であり、反対に刃先より離れたすくい面の接触位置に集中荷重を生じる時最も安全となり、すくい面に均一接触して一様応力を生じる場合には両者の中間になる。この傾向は合成切削力方向が3様式に対して同一と考えられる場合に言えることであるが、実際には合成切削力方向が接触時の過渡的な切りくず生成挙動に依存して変化することを考慮した検討を行う必要があると思われる。

以上検討して来たように、求められた安全-危険境界は経験的に知られている傾向と一致することが多く、本解析法が基本的に妥当であると言える。更に、諸因子の効果を詳細にとらえることにより、切削工具の設計に寄与することが可能である。

Fig. 10 Effect of the work/tool contact condition on safe-dangerous boundary

今後は、熱応力の影響や、断続切削におけるき裂の成長・伝播、及び工具寿命などについて解析をすすめるとともに、実験的な検討もあわせて行う予定である。

5. 結 論

破壊力学理論を適用して、切削工具のぜい性損傷を解析するアルゴリズムを提案するとともに、初期欠損の場合の解析例を示し、次の結論を得た。

- (1) 提案した破壊力学理論適用による解析アルゴリズムに従って、与えられた切削条件、工具形状、工具材料特性、及び破壊じん性値に対して、平面ひずみ条件のもとで初期欠損の発生する安全-危険境界が求められた。
- (2) 破壊じん性値の増加とともに安全領域は拡大す

る。例えば、 K_{Ic} が $9.3 \text{ MN/m}^{3/2}$ [$30 \text{ kg/mm}^{3/2}$] から $15.5 \text{ MN/m}^{3/2}$ [$50 \text{ kg/mm}^{3/2}$] に増すに従い、安全領域はき裂長さ $50 \mu\text{m}$ において約 70% 拡大する。

- (3) 合成切削力方向 θ が小さくなるに従い安全領域は減少し、 θ が負になると極めて危険な状態となる。例えば、 θ が 20° から -10° に減少するに従い、安全領域はき裂長さ $50 \mu\text{m}$ において約 1/4 に減少する。
- (4) 工具くさび角が減少するに従い安全領域は減少する。
- (5) 切削開始時における工具と被削材の接触様式は安全-危険境界に大きく影響を与える。合成切削力方向が同一の場合、刃先で衝突し集中荷重が生じる時が最も危険であり、反対に刃先より離れたすくい面の接触位置に集中荷重が生じる時安全領域が最も広く、すくい面に均一接触して一様応力が生じる場合には両者の中間になる。

参 考 文 献

- 1) 浅井 毅, 中谷征司, 原 昭夫: 鋼切削用超硬工具の初期欠損に関する研究 (第 1 報), 精密機械, **44**, 2 (1978) 147.
- 2) 白井英治, 井原 透, 白樺高洋: 断続切削における切れ刃欠損の解析的予測に関する研究 (第 1 報), 精密機械, **46**, 4 (1980) 429.
- 3) 竹山秀彦, 飯島 昇, 菊地 悟: 複合組織工具材のぜい性損傷に関する研究, 精密機械, **47**, 5 (1981) 40.
- 4) 岩田一明, 上田完次, 橋本英文, 柴坂敏郎: 超硬合金工具材料の微視的変形挙動の有限要素法による解析, 精密機械, **47**, 12 (1981) 1451.
- 5) H. Okamura, K. Watanabe and T. Takano: Application of the Compliance Concept in Fracture Mechanics, ASTM STP 536, (1973) 423.
- 6) J. L. Chermant and F. Osterstock: Fracture Toughness and Fracture of WC-Co Composites, J. Mater. Sci., **11**, (1976) 1904.
- 7) A. J. Pekelharing et al.: The Exit Failure in Interrupted Cutting, Ann. CIRP, **27**, 1, (1978) 5.