研削砥石の破壊に関する研究 (第2報)*

— AE 法による破壊過程の解析 —

本 間 恭 二**

Studies on Fracture of Grinding Wheels

(2nd Report)

— Analysis of Fracture Process in Terms of
Acoustic Emission Measurement —

Kyoji HOMMA

Previous work dealt with the effects of pores on macroscopic fracture of the vitrified grinding wheels. In the present work, fracture mechanisms of the same materials from the stages of microcrack growth to final fracture under uniaxial tensile loading are discussed by means of the acoustic emission monitoring which provides the information of dynamic morphological changes of them. Results of the emission monitoring revealed that a clear correlation between the crack growth behavior and the emission amplitude distributions was found, and the incremental microcrack growth in the

location of inhomogeneity could be detected throughout loading. It was also found with the specimens having sharp notches that, prior to the final fracture, intermittent fracture (break in two pieces) of abrasive grains or bondbridges or both took place, while with the specimens without notches that a simultaneous coalescence of each microcracks extended sufficiently to critical length should cause the final fracture. Although only qualitative discussion of the results were attempted in this study, the type of information obtained can readily be used for qualitative interpretation of the fracture mechanics of the materials.

Key words: vitrified grinding wheel, fracture mechanism, uniaxial tensile loading, acoustic emission, emission amplitude, crack growth, microcrack coalescence, qualitative discussion.

1. 緒 言

高速研削用の新しい高強度砥石の開発や研削性能の定量化などのために砥石の破壊機構の解明が必要とされている。いま砥石の破壊現象に対しては巨視的および微視的両観点からとらえて行く必要がある。そこで前報¹⁾では砥石に含まれる気孔をモデル化することで巨視的破壊(不安定破壊)条件の定式化を図ったが、破壊現象は微視的き裂の進展(安定破壊)から不安定破壊に移行するものであるため、本報ではこの安定破壊現象を実験的に計測した結果をもとに不安定破壊に至るまでの破壊機構について考察してみた。

構造上不均一集合体に属する砥石に対し準静的に外荷重を荷重させていくと、ある荷重のレベルに達したとき構成要素の中の最も弱い部分から塑性変形あるいは微視的なき裂の進展が開始する。このとき蓄えられていたひずみエネルギーは瞬時に解放されて弾性波(アコースティックエミッション波、以下 AE 波と略す)として放出され、砥石中を伝わる。本論文ではこの現象を利用

してこれらの AE 波を連続的に検出することによって、負荷過程における時々刻々の動的構造変化を追ったものである。ここではビトリファイド砥石の1軸引張試験の結果について述べる。

なお、こうした AE 測定は現在多方面で利用されてきており^{2)~5)}、解説書^{6)~10)}も少なくない。

2. 実験方法

2.1 試験片および試験方法

供試砥石は WA 砥粒の高速研削用ビトリファイド砥石から切り出した #36 J 7, #36 J 10, #60 J 4, #60 J 10 および #60 K 7 の 5 種類である。引張試験片は JIS 金属材料 5 号試験片形状とし、平滑な試験片のほか鋭い切欠きを設けた試験片を用意した(図 1)。ただし平滑試験片は図 1 の切欠きのないものをさす。この切欠き試験片はあらかじめ破壊位置を標定するため、砥石中の巨視的な高い応力集中源の存在が AE 特性に及ぼす影響についてこれを平滑試験片と比較して論じる目的で供したものである。

切欠きは 0.2 mm 幅のダイヤモンドブレードを用いて水道水により湿式で加工したもので、加工後のひずみ取り焼きなましは行っていない。試験片の引張方法は前報と同一である。

* 原稿受付 昭和 55 年 4 月 18 日。昭和 53 年度精機学会春季大会学術講演会(昭和 53 年 4 月 2 日)および昭和 54 年度精機学会春季大会学術講演会(昭和 54 年 3 月 30 日)にて発表。

** 正 会 員 電気通信大学(調布市調布ヶ丘 1-5-1)

図1 切欠き試験片形状寸法

図2 AE計測システムのブロック図

載荷部において発生するAE波ノイズの除去にはAEの非可逆性(カイザー効果)を利用した。すなわち、計測に際してはあらかじめ試験片つかみ部に破断荷重を越える予荷重を加えたのち試験を行った。

2.2 AEの計測

図2は本実験で用いたAE計測システムのブロック図を示したものである。このシステムはAE検出部、処理部ならびに表示部から構成される。

検出器はPZT(チタンジルコン酸鉛)圧電素子で140 kHz付近に共振特性を持つ市販のものを使用し、これを試験片肩部に真空グリースを介して圧着して取付けた(図1参照)。検出器で検出された微弱な電気信号は前置増幅器によって40 dBの増幅を行い、さらに主増幅器を通して全体で60 dBの増幅を行った。また300 kHzのローパスフィルタを使用して高周波成分を除いた。オシロスコープはAE波形の観測ならびに増幅率の決定に、またデータレコーダはAE波の記録・再生に使用した。AE波は実効値電圧計を介してX-Yレコーダに記録させた。

AE波の波の個数の測定は波高弁別器によってノイズレベル以上(S/N比最低6 dB以上)の一定のしきい値電圧 V_{th} を設定し、これを越える入力AE信号をすべてパルスに変換してその個数をデジタルカウンタで計数

図3 しきい値で弁別されたAE信号の計数法

図4 破断までの荷重-伸び線図

する方法(リングダウン計数法)をとった。またAE波はある継続時間振動するため、一つのAE源による波を複数個として計測しないように信号入力後一定の不感時間(10 ms)を設定して計測する方法をも併用した。

AE波の持つエネルギーはその振幅の2乗に比例する。そこで、砥石の負荷過程で放出されるエネルギー量と破壊の機構との対応を調べるためにAE波の振幅分布を求めた。振幅分布は図3に示すようにしきい値電圧を任意に設定したとき、各振幅レベルにピークのある波の数を計数したものである。

AE波形、AE計数率(単位時間当たりの波の個数)、累積総数およびロードセルからの荷重の情報はすべてX-Yレコーダに記録した。

3. 実験結果

3.1 引張試験における荷重-伸び特性

図4は試験片が破壊するまでの荷重-伸び曲線を4種類の砥石について示したものである。荷重の立上がり部分ではつかみ部その他のなじみの影響で非線形となっているが、その後破断まで線形関係を保っていることがわかる。従って、今回使用した砥石はすべて巨視的にぜい

図5 平滑試験片の荷重過程におけるAE波の変化

図6 平滑試験片の荷重過程における計数率の変化

性破壊する材料であるとみてよい。

3.2 平滑試験片のAE特性

図5は4種類の平滑試験片が引張荷重によって破断するまでのAE波形(ここでは実効値電圧に換算したもの)の時間的変化の様子を表したものである。これらに

共通して現れたAE特性の傾向は、① S/N 比6 dBを越えるAE波は破断荷重の40%付近から顕著に現れ始めていること、② 破断荷重の50~75%付近で振幅の大きなAE波が生じること、③ その後一時小康状態となり、破断直前で再びAE波の増大がみられること、などがあげられる。ただしX-Yレコーダに記録された波形は実際のAE波の振幅波形に対応するものでなく、連続して多数の信号が入った場合には発生率も加わった値を表示するものである。このため記録された波は単位時間当たりのAE波のエネルギーに対応していると考えてよい。

次に得られたAE波の計数率を表すため、 S/N 比8 dBとしたときの1 s当たりの個数をリングダウン計数法によって計数したものを図6に示す。コンクリートなどのぜい性材料と異なり、平滑試験片の計数率は破断直前で急増する傾向がみられない。つまり#36では計数始めから破断まではほぼ一定であるのに対し、#60ではその間明確な二つのピークが見い出されるといった粒度依存性がみられる。

3.3 切欠き試験片のAE特性

図7は切欠き試験片の場合のAE波形を表したものである。この波形の特徴の一つは破断近くで大振幅の波が断続的に現れることにある。特に破断荷重の80%を越えると高いピークを持つ波が頻繁に現れ始め、これが最終破断まで継続的に発生する。図8は破断近くに現れたAE波の一部を観測したもので、振幅の大きいいわゆる突発型AE波形を示していることがわかる。

次に切欠き試験片でのAE発生点を平滑試験片のそれと比較してみる。いま S/N 比8 dBを越えるAE波が観測され始めるのは破断荷重の50%付近である。そこで切欠き試験片に作用している応力をその切欠き底の最小断面の平均応力に換算して表したとき、AE開始点における応力レベルは同一種類の砥石で

あれば切欠き, 平滑ともにほぼ等しいことがわかる。

AE 計数率は平滑試験片でみられる傾向と異なり, AE 開始付近で少なく, 荷重の増加とともに指数関数的に増大し, 破断時に最大となる (図9)。この傾向は前述のぜい性材料のそれと定性的に一致している。

4. 考 察

4.1 砥石破面と AE 波との関係

セラミックスの破面の形態と AE 波との対応に言及した論文^{11)~13)}はいくつかみられるが, いずれも気孔率の低い材料に限られている。その中でも微視的な破面形態と AE 波とは必ずしも 1 対 1 の対応で説明できない部分がある。砥石のような気孔率の高い複合材料に至っては, 通常のセラミックスのような単一き裂の発生とその伝ばの過程に比べて破面形態がさらに多様かつ複雑であるため破面と AE 波との対応は一層つけ難い。従って, ここでは破壊の開始点とみられる切欠き試験片の切欠き底近傍における破面の観察からその特徴を抽出して AE 波の発生要因を考察するにとどめる。

図10(a), (b)は一例として #60 J7 切欠き試験片の切欠き底直下の破面の電顕 (SEM) 写真を示したものである。図10(a)は砥粒部で破壊しており, 多くのへき開段と方向の異なる川模様が観察される。この川模様の状況から, 砥粒を貫通したき裂は途中で方向を変えて伝ばしたことがわかる。またへき開段がみられることから, 多くの微視的き裂同志が合体したことも伺える。図10(b)は同じ切欠き底近傍の結合剤部 (ボンブリッジ) の破面を示したものである。一部には局所的な塑性変形のあととみられる直線状の引裂きによる稜も存在しているが, 全体として塑性変形の領域は僅少である。また結合剤破面ではウェルナー線のみられるものも観察された。

一方, 切欠き底から十分離れた位置では砥粒の破面が多く, しかも全体に滑らかな破面がみられるが, これらは破断時の急速なき裂伝ばのあとと考えられる。また中には砥粒と結合剤の両方にまたがるいわゆる粒界破壊の形態も観察されたが, その割合は全体の 10% 以下であった。

このように切欠き底近傍の破面は遠方に比べて複雑多様な状況にあることから, 切欠き試験片では切欠き底近傍での局所的なき裂進展挙動が AE の発生を支配するとみて差し支えないであろう。

4.2 AE 振幅分布から推定した破壊機構

AE 波のエネルギー分布のスペクトルから破壊の機構を考察するため, 波の最大振幅 V_p とその発生数 (また

図7 切欠き試験片の負荷過程における AE 波の変化

縦軸: 16 mV/div, 横軸: 4 ms/div

図8 突発形 AE 波形

は累積総数) との関係求めた。

図11は3種類の砥石についてリングダウン計数法により得られた振幅分布を示したもので, 適当なしきい値で弁別したときの各しきい値レベル間にピークを持つ AE 波の累積総数を表示したものである。切欠き試験片においては AE 総数がしきい値レベルの増大とともにほぼ直線的に減少しているのに対し, 平滑試験片では上に凸の放物線の傾向を示している。このことは切欠き試験片では比較的広い振幅範囲を持つ分布であるのに対し,

図9 切欠き試験片の負荷過程における計数率の変化

図10 砥石破面写真

平滑試験片では振幅範囲が狭いことがわかる。しかし組織が粗い場合(#36 J 10)両者の差異はみられない。

一方、リングダウン計数法では一つの AE 事象に対して複数の AE パルスを計数するため、得られた振幅分布

図11 リングダウン計数法による振幅分布

図12 切欠き試験片の振幅分布

は必ずしも正確なエネルギー分布を示したものとはなっていない。そこで前述したように新たに1事象1パルスとして計数して振幅分布を求めたものが図12である。図において AE 発生数は振幅レベルの大きさに反比例して減少するが、比較的高い振幅レベルで極大値を持つことがわかる。ぜい性材料の多くは振幅レベルの増大とともに一様減少するスペクトルとなるため、この結果は砥石特有の構造組織と切欠きによる応力集中との相互作用の結果極大を持つ分布となったものであろう。

破面解析の結果より、計測された振幅の小さな AE 波は切欠き底近傍における構成要素(砥粒および結合剤をさす)の微視的き裂の進展およびその停止に伴って生じ

図13 平滑試験片の振幅分布

たものと考えられる。図7の結果は既に初期の荷重過程でき裂の進展が始まっていることを表している。また大振幅のAE波は砥石の網状構造組織の一部の破断(大破砕)に原因するとみられ、図12の極大を示す部分がその振幅に相当するものと考えられる。

以上の結果切欠き試験片の破壊機構は、まず切欠き底部において多数の微小き裂の進展が始まり、それに続いて構成要素の一部で大破砕が起こるという過程を数回あるいは数十回繰返したのち不安定破壊に至るとみられる。ただし今回の実験で砥粒の粒径が切欠き底の曲率半径に比して十分大きく、しかも砥粒率の低い#36 J 10の試験片では大きなAE振幅のものが生じなかったが、この程度に粗い組織の砥石は鋭い応力集中の影響がほとんど現れてこないといえる。

図13は#60 K 7の平滑試験片の振幅分布の一例を示したものであるが、切欠き試験片によるスペクトルとはかなり異なり振幅分布に極大はみられず、振幅そのものも小さい。またAE波の出方も切欠き試験片のそれと異なり、破断直前で大きなAE波が生じない。従って平滑試験片では構成要素の不均一部で微視的き裂が徐々に進展し、構成要素の大破砕の過程を経ずに微視的き裂同志の同時合体の結果不安定破壊を起こすと考えられる。

なお、平滑試験片のAE特性については砥石の種類により大きなばらつきを示したが、それが構造本来の性質によるものか明らかでなく、さらに詳細に検討する予定でいる。

5. 結 論

本研究は高速研削用ビトリファイド砥石に1軸引張荷

重を荷重させて行ったときに、巨視的な不安定破壊に至るまでの砥石内部の動的構造変化の様子をAE法によって計測し、その破壊の機構を考察したものである。その結果、既に荷重の初期段階から砥石の不均一部で微視的き裂の進展が起きていることがわかった。さらに、構造内部に巨視的な応力集中源の存在する場合には構成要素の大破砕が不安定破壊に先行するのに対し、応力集中源のない場合には大破砕の兆候はなく、微視的き裂が成長し、その大きさと密度が十分な量に達したとき急激な不安定破壊を生ずることが推定された。

おわりに、AE計測で御指導下さった東京大学航空宇宙研究所岸助教授ならびに栗林博士に厚く御礼申し上げます。また実験に協力下さった当時本学学生であった森井伸行君(現・リコー時計勤務)に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 本間恭二: 研削砥石の破壊に関する研究(第1報), 精密機械, **46**, 11 (1980) 1344.
- 2) M. Onoe: Development of Acoustic Emission Techniques for Pressure Vessel Inspection, TAB-AE (IRI) Project, 3rd AE Symp., Tokyo, (1976) 118.
- 3) A. G. Evans et al.: Failure Prediction in Structural Ceramics Using Acoustic Emission, J. Amer. Ceram. Soc., **56**, 11, (1973) 405.
- 4) H. Iwaeda et al.: Acoustic Emission Characteristics during Tensile Tests of Various Metals with Several Types of Crystal Structures, 3rd AE Symp., Tokyo, (1976) 492.
- 5) 仲佐博裕: 疲れ損傷におけるAE特性について—AE法の疲れ試験への応用, 材料科学, **13**, 1, 2 (1976) 29.
- 6) Acoustic Emission, ASTM, STP 505, Philadelphia, (1972).
- 7) 小野恒司: 鉄鋼材料からの音波発生研究の現状, 鉄と鋼, **59**, 9 (1973) 1338.
- 8) 尾上守夫ほか: アコースティックエミッション(AE)とその応用(小特集), 電気学会雑誌, **96**, 4 (1976) 265.
- 9) 岸 輝雄: アコースティックエミッション, 金属材料, **16**, 10 (1976) 107.
- 10) 尾上守夫ほか: アコースティックエミッションの基礎と応用, コロナ社 (1976).
- 11) L. J. Graham et al.: Microstructural Aspects of Acoustic Emission Generation in Ceramics, *Fracture Mechanics of Ceramics*, ed. by Bradt et al., Plenum Press, New York, N. Y., (1973) 175.
- 12) M. J. Noone et al.: Observation of Crack Propagation in Polycrystalline Ceramics and Its Relation to Acoustic Emissions, *Fracture Mechanics of Ceramics*, ed. by Bradt et al., (1973) 201.
- 13) A. G. Evans et al.: A Model for Crack Propagation in Polycrystalline Ceramics, Acta Met., **23**, (1975) 1303.