

随 想

延性破壊の研究の推進を願つて

宮 本 博*

1. はじめに

最近数年、延性破壊機構の研究に憂き身をやつしている。誠にお恥しい話だが、筆者の研究室からはみるべき結果はいまだでていない。しかし、国の内外ではかなり目覚ましい結果が続出し、この問題も次第に大方の注意をひくようになり、ひそかに喜んでいる。このたび、どういふ経緯かは知らないが、日本鉄鋼協会から首記の題目をいただいたので、快く誘いに乗ることにした。

線形破壊力学が日本に導入されたのが 1970 年頃であるから、既に 15 年はたつている。弾塑性破壊力学が、そして 1974 年の Minnowbrook の日米セミナーではいまだしの感のあつた J-積分が、日本でも広く語られるようになったのが 1975 年頃であるから、これまた既に 10 年を経過している。かくして破壊力学は日本の学界、工業界に定着した感があるが、この間延性破壊機構研究の進歩はどうであろうか。

この問題に関する McCLINTOCK の一連の先駆的業績、1970 年の RICE, JOHNSON¹⁾ のき裂先端の鈍化に関する業績、その他延性破壊機構に関する諸々の業績は、そのつど日本にも紹介されてはいるが、RICE²⁾ 自身が嘆いたように、局所化 (localization) の問題はその重要さにもかかわらず必ずしも学界の中心話題にはなつていなかった。ところが RICE 達の仕事はその間も執拗に継続されていたらしく、ようやく最近に至つて開花し、実を結ぼうとしている。

延性破壊機構のシナリオは決して新しいものでなく、次のようにうたつている。“延性材料のき裂材を負荷すると、き裂先端は鈍化し、多くのボイド (void, 微小空孔) がき裂先端周辺に発生する。それらは成長し、合体して破面を生ずる。”ボイドの発生、成長、合体のモデルの中、ここでは連続体モデルに限ろう。また延性破壊機構を解明するアプローチの中、巨視的 (連続体力学) アプローチに限る。

重要な問題の一つに合体条件がある。小林³⁾らの実験によれば、ボイドとき裂先端の合体のモデルは、

- A) ボイドとき裂先端がネッキングにより結合する。
- B) ボイドとき裂先端の間にある小さな介在物を核として、リガメント部がせん断形の破壊をして、鈍化したき裂先端と結合する。
- C) ボイドの核となる大きな介在物がき裂先端近傍に存在せず、鈍化したき裂先端から直接小さな介在

物を核としてボイド発生する。本質的にはモデル (A) と同じであるが、モデル A より核となる介在物の寸法が小さい。

の三つに大別される。(A) は McCLINTOCK, RICE のモデル、(B) は HAHN のモデル、(C) のモデルは鋼について報告されている。

2. 延性破壊機構に関する従来の研究

RICE⁴⁾によれば、き裂先端の鈍化過程で成長した、自己同一形の応力・ひずみ場がき裂先端の材料を通過後、き裂先端からの初期距離 R にあるボイド発生点は、 $R/J/\sigma_0=2$ (J : J-積分値, σ_0 : 降伏応力) の時にはじめて最大応力になる。おそらくこの時点では、塑性ひずみは小さいが、高い三軸応力が、弱い介在物においてボイドを発生させる。続いて、ボイドは有限ひずみ領域にのみ込まれ、き裂先端と合体する。RICE と JOHNSON¹⁾ (RJ モデル) はき裂線上のボイドが最初にき裂先端と合体するとして、ボイドとき裂の合体条件をつかつか、破壊をおこす時のき裂先端開口変位を、ボイドを発生させる粒子間距離 X と粒子寸法 R_0 の比の項で表した。GREEN と KNOTT⁵⁾ は鋼について実験を行い、一例を除いては、き裂成長の開始は RJ モデルで予測できるが、破壊靱性を過大評価したこの例外例では、破壊は局部せん断によつて起こつてゐることを示した。また McMEEKING⁶⁾ はき裂先端の 45° 方向にあるボイドの成長を考え、高強度鋼とアルミ合金のデータと予測値を比較して、局所化 (localization) を起こしやすい材料に対して、RJ モデルは破壊靱性を過大評価することを述べている。

局所化をおこしやすい材料では、破壊過程はいくつかの過程をへておこる。 $R/J/\sigma_0=2$ になつたとき、比較的大きいが弱い粒子が、高応力、微小塑性ひずみ領域の中でボイドを発生させると、このボイドまわりの付加ひずみ集中が、近接するボイドとき裂先端を結合するせん断帯を形成するようにせん断帯の位置をきめる。このせん断帯は迂り破断するか、あるいは小さな粒子群から、さらにボイドを発生させ、ボイドシート機構 (void sheet mechanism) により破壊に至らしめることにより、合体を著しく加速する。せん断帯の内部では、ひずみが高いことと、局所化を伴う静水張力の増加により、ボイドの発生と成長に適した条件になる。

すなわち、RJ モデルによりき裂進展開始の予測のできる場合 (モデル A) と、RJ モデルでは破壊靱性を過大評価し、破壊が局所化によつて起こる場合 (モデル B) があることが分かる。

3. 三つの否定

前章で述べたように、き裂先端のリガメントの局所化によるき裂進展開始が次の研究の目標になる。一方、座

* 東京理科大学理工学部教授 工博

屈や分岐荷重に関しては J_2 -Flow 説 (J_2 -F 説) による計算値が実際値を大幅に上回る場合の多いことが指摘されており、解決策として対象材料に初期不整を考慮することのほかに、構成式に欠陥があることが指摘されている。

従来の、滑らかな降伏曲面を有する J_2 -F 説の構成式を否定して、

- (1) 降伏曲面がとがり点 (corner) を有する構成式 (滑らかな降伏曲面の否定)
- (2) non-normality の構成式 (法線則の否定)
- (3) ボイドの発生・成長を考え、圧縮性を考慮した構成式 (非圧縮性の否定)

のもつ不安定効果 (destabilizing effect) に関心が移っていく。以下この三者を考慮した最近の研究を紹介する。

3.1 とがり点のある降伏曲面を有する構成式

降伏曲面が滑らかと考えることは必ずしも妥当ではなく、むしろとがり点をもちうるものが結晶塑性論により予測されており、また通常の金属に対しても実験的にその存在が確かめられている。とがり点形成を前提とした塑性構成式は、最近あらたに提案がいくつかなされているが、いずれも完成したものとは言い難い。ここではその中で、比較的無難であり、米国において局所化問題に多用されている CHRISTOFFERSEN と HUTCHINSON の J_2 -corner 説 (J_2 -C 説)⁷⁾ による例題を示す。第一⁸⁾は平面ひずみ引張試験における局所化で、化試験片に初期不整を与え、有限変形 FEM により、ひずみ線の発生と主ひずみ等高線を求めている。第二⁹⁾は CCP (Central Cracked Panel) および ECB (Edge Cracked Bending) 試験片におけるき裂先端の HRR 特異性に関する論文であるが、筆者の関心をそそるものは、 J_2 -F 説と J_2 -C 説でき裂先端における変形の様相に差のあることである。前者の場合、き裂先端は滑らかな半円形を示すのに対し、後者によれば局所化したせん断帯が発生し、対応してき裂先端に角ができることである。しかしこの論文では解析はせん断帯の初期様相を示すだけで終わっている。せん断帯の発生とき裂先端におけるその発達およびそれらとマイクロ構造の関係は極めて重要な問題である。1個またはそれ以上のボイドとき裂先端の干渉を解明することも、き裂発生を定量的に予測するために必要かつ有効なステップであろう。これらについては筆者の研究室の結果を近い将来に発表する予定である。

3.2 non-normality について

従来の構成式に欠陥があることを述べた。一つの試行関数として、とがり点のある構成式が提案されたが、この問題に対して $d\epsilon^p$ が σ のみでなく、 $d\sigma$ に依存する形の構成式を考えればよいことに着目した提案がある。

RICE ら¹⁰⁾¹¹⁾は、応力増分 $d\sigma$ を負荷面、負荷点 σ の法線方向 m への成分 ($m:d\sigma$) ($=m_{ij}d\sigma_{ij}$) と、接線方向成分 ($d\sigma-m:d\sigma$) に分解し、 $d\epsilon^p$ は ($m:d\sigma$) に

比例するとする旧来の塑性ポテンシャル理論に対し、接線方向にも比例する項をもつとして、その比例定数を $1/H'$ とおき、 H' を瞬間とがり点硬化率とよんだ。それに対して ($m:d\sigma$) の項の比例定数 $1/h'$ は従来の意味の瞬間硬化率である。この場合、 H' の決定法が問題になる。さて J_2 -変形理論の増分形を考えると、ちょうど ($m:d\sigma$) および ($d\sigma-m:d\sigma$) にそれぞれ比例する二つの項に分解されることから、 J_2 -変形理論の増分形がとがり点を許す構成式の一つとして使えるとした。この構成式のその後の発展と応用例は現時点では多くない。

3.3 圧縮性を考慮した構成式

延性破壊が問題となるような大きなひずみを受けると、材料の内部に微小なき裂やボイドの発生・成長がみられ、母材の塑性特性の本質的な変化はなくても、巨視的には等方応力依存性、圧縮性が現れる。

塑性応答を扱うことのできる理論としては RUDNICKI-RICE 理論¹⁰⁾、GURSON の降伏関数から誘導される構成式¹²⁾などがある。ここでは後者を利用した青木・岸本¹²⁾らの結果を紹介しよう。

ボイドの影響を考慮に入れるため、GURSON 材を考え、その中にき裂と大きなボイドがあるとして解析する。荷重の増大とともに、き裂とボイド間に、微小ボイドが発生、成長しその体積率 f が増大し、加工硬化率 h が減少し、 h が臨界値 h_{crit} に達する領域が生じ、やがて、この領域がき裂とボイド間のリガメントを覆うことになる。応力ひずみ場が不均一なき裂先端近傍においては、局所化の生ずる条件が明らかでないが、 h が h_{crit} をこえた領域では少なくとも破壊しやすい状態になっていると考えられるので、この領域がリガメントを覆ったとき、き裂と大きなボイドが合体するとして $\delta_f/D \sim D/a$ (ただし δ_f : き裂進展開始時のき裂開口量、 D : 第二相粒子の間隔、 a : 粒子直径) の関係が求められる。この結果は従来のデータと比較して妥当である。

4. おわりに

以上、きわめて簡略であるが延性破壊機構に関する最近の研究状況について述べた。弾塑性破壊力学により、延性破壊の引金はき裂先端のプロセスゾーン (A533B 鋼でき裂前方 0.2 mm くらい) にあることが分かった。そして、このプロセスゾーンの探険がまさに始まったわけであるが、ここでは従来の塑性構成式が成立しないことが分かった。新しい構成式によつて計算してみると、古典構成式との相違は更なき裂前方 0.1 mm 以内にあるらしい¹²⁾。このことは延性破壊機構の秘密をき裂先端 100 μm のきわめて狭い範囲に追い込んだことになる。あと一息である。大方の関心と御協力を願うこと切なるものがある。

文 献

- 1) J. R. RICE and M. A. JOHNSON: Inelastic Behavior of Solids (1970), p. 641 [McGraw-Hill]
- 2) J. R. RICE: Theoretical and Applied Mechanics (1976), p. 207 [North-Holland Publishing Company]
- 3) 佐藤 学, 小林英男, 中村春夫, 中沢 一: 機講論, No. 790-12 (1979), p. 238
- 4) J. R. RICE: The Mechanics of Fracture (1976), p. 23 [ASME]
- 5) G. GREEN and J. F. KNOTT: Trans. ASME, J. Eng. Materials and Technology, 98 (1976), p. 37
- 6) R. M. McMEEKING: J. Mech. Phys. Solids, 25 (1977), p. 357
- 7) J. CHRISTOFFERSEN and J. W. HUTCHINSON: J. Mech. Phys. Solids, 27 (1979), p. 465
- 8) V. TVERGAARD, A. NEEDLEMAN and K. K. LO: J. Mech. Phys. Solids, 29 (1981), p. 115
- 9) A. NEEDLEMAN and V. TVERGAARD: Elastic-Plastic Fracture 2nd Sympo. (1983), p. I-80 [ASTM. STP. 803]
- 10) J. W. RUDNICKI and J. R. RICE: J. Mech. Phys. Solids, 23 (1975), p. 371
- 11) S. STÖREN and J. R. RICE: J. Mech. Phys. Solids, 23 (1975), p. 421
- 12) 青木 昇: 機論集, 50 (1984), p. 1787

書 評

「金属基複合材料を知る事典」

日本複合材料学会編

複合材料は異種材料の機能の組み合わせ効果が期待され、多くの方面で関心を集めている。本書は金属基複合材料 (Metal matrix composites: MMC) に焦点を合わせ、主として構造用を対象とした事例が簡潔に説明されている。代表的な用語、例えば、PRM, FRM, FRC, CVD, PVD, HIP, Cermet などや、製造法、応用例を簡便に知るには好都合である。各々の事例には、馬子に衣装を (化学蒸着法と物理蒸着法による表面処理) といったユニークな題目がついており、思わずページを開かせる努力が為されている。

内容は1. それぞれの複合材料: ①カーボン, 炭化けい素およびアルミナ繊維, ②ボロン, 炭化けい素, アルミナおよび金属繊維, ③理想強度の繊維, ④化学蒸着法と物理蒸着法による表面処理, ⑤電解メッキ, 無電解メッキ, ⑥プラズマ溶射, ガス溶射, ⑦コンポジットワイヤ, ⑧拡散接合法, ⑨複合材料の塑性加工による製造法,

⑩粉末冶金の応用, ⑪鋳造法, ⑫繊維とマトリックスの界面, ⑬カーボン繊維強化アルミニウム, ⑭ボロン繊維金属, ⑮SiC/Al, SiC/Ti, ⑯SiC 繊維強化アルミニウム, ⑰Al₂O₃/Al, ⑱耐火金属と耐熱合金の組合せ, ⑲一方向凝固共晶合金, ⑳共析合金, ㉑分散強化合金, ㉒サーメット, ㉓炭素/炭素複合材料, ㉔繊維強化セラミックス材料, ㉕二次加工, ㉖二次接合,

2. 機能性複合材料: ①Al₂O₃/Al 耐摩耗材料, ②熱膨張調整合金 C/Cu, ③自己潤滑性複合材料, ④温度変化に敏感なバイメタル, ⑤磁性材料, ⑥垂直磁気記録用複合2層磁気媒体,

3. 複合材料の応用: ①超電導材料, クラッド板, ②B/Al や C/C コンポジットのスペースシャトルへの応用, ③未来の航空機,

4. 学会・研究機関・参考資料,

5. 関連企業の特徴 PR, などが記載されている。

以上内容は書名のとおり事典であり、複合材料にはどのようなものがあるかを手近に知るには便利な図書である。(大谷泰夫)

新書判 261 ページ 定価 1,700 円

1984 年 10 月 (株)アグネ 発行