連載講義

不均質材の力学（その5）

5. 不均質性をもつ溶接継手の破壊強度*

豊田 政男**

Mechanics for Heterogeneous Materials [V]

5. Fracture Strength of Welded Joints with Mechanical Heterogeneity*

by Masao Toyoda**

キーワード：不均質材，破壊力学，脆性破壊，破壊靱性，靱性的不均質，強度的不均質，亀裂近傍の応力・歪

5.1 破壊強度を支配する溶接部の不均質性

最近の高性能・高機能材料やそれを複合化した材料は，一般には脆性的な特性を示すものが多く，破壊強度が材料の強度を決める場合が多い。その意味から不均質材の破壊特性を知ることが重要となる。

鋼溶接部は不均質材の代表例であることは本講でもしばしば指摘してきた通りである。この不均質性が溶接継手あるいは溶接構造物の破壊性能評価に影響をもたらすことは，本誌において既に著者が解説している¹⁻³⁾。ここでは，不均質材の破壊挙動を考える上で，溶接部を代表例として取り上げつつ，材料のもつ不均質性が破壊，特に脆性破壊挙動にどのように影響するか，何が問題かを明確にすることを目的として，

- ①破壊特性から見た力学的不均質性の分類と影響の仕方，
 - ②靱性的不均質，特に局部的劣化部（LBZ）の特性と，その影響，
 - ③強度的不均質が亀裂材の変形特性に及ぼす影響と破壊強度評価における問題点，
- などを取り上げる。本講での重点は，溶接継手の破

壊特性を取り上げつつ，不均質材の破壊評価において従来の破壊力学的手法や常識の問題点を指摘することである。

鋼溶接部で見られる力学的不均質は，図1に示すような強度的及び靱性的不均質のいずれも見られ，その両方の不均質性が破壊に及ぼす影響を同時に図示してある。脆性破壊の条件（クライテリオン）は，破壊をもたらす亀裂の変形（亀裂パラメータで代表される）と，その破壊時の限界値（亀裂パラメータの限界値，破壊靱性と呼ばれる）の二つの大小関係で判断される。強度的不均質性は，主に亀裂パラメータの方に影響を与え，靱性的不均質性は，主に破壊発生挙動，即ち破壊靱性の方に影響を与える。しかし，破壊発生挙動が強度的不均質の影響を大きく受ける場合もあり，また，靱性的不均質の存在によって，亀裂パラメータが意味をもたなくなり，適切なパラメータの選択が重要となることもある。

5.2 溶接部の靱性的不均質

(1) 溶接部に見られる靱性低下

靱性的不均質をもたらす主な原因は，鋼溶接部で靱性低下が生じることにある。鋼溶接部の代表的靱性低下は，

- ① 溶接融合線近傍が粗粒域になることによる脆化，いわゆるボンド脆化，と

*原稿受付 平成2年2月26日

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

図 1 鋼溶接部に見られる力学的不均質と破壊特性 (豊田)

図 2 鋼溶接部に生じる脆化とその破壊強度への影響

(a) ボンド脆化と熱歪脆化(HSE)

(b) 溶接後熱処理(PWHT)の影響

② 溶接熱影響部のうち最高加熱温度が A_{c1} 点以下の領域で生じ、熱歪を受けることによる脆化、いわゆる熱歪脆化 (HSE)、

の二つが代表的なもので、それ以外にも溶接金属に見られるいろいろな脆化、更に溶接継手に対して行われることのある PWHT によって生じる、いわゆる SR 脆化や、更には、使用中に生じる脆化現象もある。図 2 は溶接部に見られる脆化とその継手脆性破壊強度への影響を定性的に示したものである。亀裂

をもつ継手の破壊強度・温度遷移曲線は、脆化部に亀裂が存在すると、脆化しない場合に比べて、高温側へ平行移動の形で移動する。その移動量は、上記の原因①、②の両場合とも $40 \sim 50^\circ\text{C}$ にも達する。

(2) 溶接 HAZ 部の局所的脆化部 (LBZ)

溶接 HAZ 部の脆化現象で、特に最近の構造用鋼材で見られる特徴は、その脆化部寸法がサブミリメートルというような局所的脆化部 (Local Brittle Zones, LBZs と呼ばれる) の存在である。この LBZ の存在が溶接部の破壊靱性評価にいろいろな影響をもたらすとともに、その存在が構造物全体としての脆性破壊強度にどのような重要な影響をもたらすかの評価が大きな問題となっている。

一概に LBZ と言っても、その実体は鋼種や鋼材の強度レベル等に大きく依存する。一般に C-Mn 鋼の LBZ は多層溶接による多重熱サイクルによって、図 3(a) に示すように複雑な形態を示すが、溶接 HAZ 部に生じる Martensite-Austenite constituent と呼ばれる組織が大きな役割を果たしている。LBZ 挙動については著者によってまとめられた詳しい解説書が公表されている^{4,5)}。その概要をまとめると、

- 溶接融合線近傍の熱影響部粗粒域 (CGHAZ) は、一般に靱性低下をもたらす。
- HAZ 部で靱性の低い部分には炭素濃度の高いマ

ルテンサイトが存在する。

- 最近の HT50 級鋼材では、多重熱履歴を受ける場合、CGHAZ のうちで次の熱サイクルで A_{c1} と A_{c3} 温度の間に加熱される ICCGHAZ 領域に M-A constituent が多く生成される (図 3 参照)^{6,7)}。また、破壊靱性試験でも、破壊発生点になる確率の高いことが確かめられている^{4,5)}。
- M-A 組織は、母材の炭素等量などにあまり関係無く、1% 程度の炭素を含む高 C 組織で、硬さも $H_v = 700$ 程度ととかなり高い⁸⁾。
- M-A 組織は、負荷時のマイクロクラックの発生源となり、マイクロクラックの形態は、M-A 組織部分そのものが割れる場合と、M-A と隣接す

図 3 多重熱サイクルを受ける CGHAZ の破壊靱性に及ぼす後続熱サイクル最高加熱温度の影響。

UACGHAZ: Unaltered Coarse Grained HAZ

FGHAZ: Fine Grained HAZ

ICCGHAZ: Intercritically Reheated Coarse Grained HAZ

SCCGHAZ: Subcritically Reheated Coarse Grained HAZ

TP: 最高加熱温度

るマトリクスとの境界に亀裂が生じる場合の二つがある^{9,10)}。

- M-A を含む組織が約 450°C 以上のいわゆるテンパー熱サイクルを後続パスによって受けると、M-A 組織はフェライトとセメンタイトに分解し、靱性の回復が生じることもある (図 3(a), 図 4 参照)^{5,7,11)}。
- CGHAZ の靱性劣化特性は、溶接入熱、鋼材の成

図 4 二重熱サイクルを受けた CGHAZ の破壊靱性に及ぼすテンパー熱サイクル最高加熱温度の影響

分系の影響が大きい。

以上のような LBZ の本質についての検討は進んでいないものの、LBZ と称せられる低靱性部をもつ場合、特に、最近現実にも要求される破壊力学靱性試験の在り方、即ち試験片採取法と限界評価法に問題を生じさせる。溶接 HAZ 部の CTOD 試験法と試験結果の解釈等についてガイドラインが著者あるいは日本溶接協会 FTW 委員会等から示されている^{12,13)}。

5.3 靱性的不均質がもたらす問題点

溶接部に見られるような前述の靱性的不均質は、いわゆる靱性試験で得られる破壊靱性そのものの意義にさえ問題を生じさせる。ここではその問題点のうち、①靱性としての意義、②低靱性部の寸法効果と破壊靱性評価への影響、の二つを取り上げる。

(1) 靱性不均質をもつ材の破壊靱性値の意義

亀裂先端近傍に靱性の異なるいろいろな材質が存在するとき、破壊発生がどの材質によって生じ、また、得られる靱性はどの組織の靱性を代表するかが問題となる。

靱性評価で問題となるのは、亀裂先端部にある材

図 5 靱性的不均質をもつ材の破壊靱性試験で得られる指標の支配形式の分類 (豊田)

質以外の材質の靱性が関与するかどうかである。得られる靱性値の意味は、試験の種類と指標パラメータによって異なり、不均質の影響の仕方は、①亀裂近傍の最も靱性の低い部分の靱性が支配的となる、いわゆる weakest link 型、と②の近傍の材質が破面に占める面積に依存する、いわゆる rule of mixture 型、の二つに分かれる。いずれに属するかは、注目する破壊形態と指標によって図 5 に示すように分類できる。

すなわち、亀裂からの破壊の発生挙動は主に亀裂先端部に存在する低靱性部が支配的な weakest link 型であり、また、例えば、亀裂先端が高靱性部に位置しても、亀裂先端から少し離れて存在する脆化部の影響を受けることもある¹⁴⁾。それに対して、シャルピー吸収エネルギーのような場合には、(a)完全脆性破壊タイプの場合：破壊発生までのエネルギーは殆ど無視できるため、破面に占める材質の靱性の混合則に従う。(b)延性破面を含むような場合：破壊発生は weakest link 型であり、伝播エネルギーは混合則にしたがう、という複雑な形態となって、いずれの材質の均質材で得られる吸収エネルギーよりも小さくなる、いわゆる引きつられ現象が生じることもある。

したがって、溶接部のような靱性的不均質をもつ材では、シャルピー吸収エネルギーと破壊発生限界の限界 CTOD の間に一定の相関関係が認められるとは限らない。例えば、その相関を考えるのに溶接 HAZ 部から板厚方向に幾つかのシャルピー試験片を採取し、得られる吸収エネルギーの最低値と限界 CTOD の間の相関を考えて一定の相関を得ている例もある¹⁴⁾。

(2) LBZ 寸法効果と靱性評価

図 6 に例示するような多層溶接部から採取した破壊靱性試験片では、図(b)に示すように亀裂前縁に

(a)

(b)

図 6 鋼多層溶接継手から採取した CTOD 試験片とその亀裂前縁のセクションング結果例

ろいろな組織を含むことになる。このとき試験結果が亀裂前縁に占める組織、特に靱性劣化部(LBZ)の寸法によってどのような影響を受けるかは、試験片の採取の在り方を大きく左右する。

採取法の問題は、試験の目的に大きく依存し、LBZ の定義とそれを亀裂先端にどの程度含ませるように採取するかを明らかにするには、試験目的の明確化が重要な課題である。しかし、通常のいずれの試験においても、溶接 HAZ 部の lower bound toughness の評価が大きな目的であろう。そのためには低靱性部が亀裂前縁に一定の寸法以上含まれることが必要となる。この必要値については規定された試験法もあるが¹⁵⁾、必ずしも明確にされていない。それは破壊靱性のばらつき特性などにも依存し、これまでのいろいろな結果を参考にすると⁶⁾、

■多層溶接 HAZ 部の低靱性部は、使用する鋼材の種類や溶接条件などに依存し、破壊発生位置など

図7 亀裂前縁に沿って低靱性部を含む材の限界CTODに及ぼす低靱性部寸法の影響

の巨視的な観察結果を見る限り、工業的な見地からは全粗粒 HAZ (CGHAZ)をLBZ ととしておくのが妥当であろう。

■鋼材開発などの見地から、溶接による靱性低下挙動を明確にするためには、① HT50 級鋼材では、ICCGHAZ 部が破壊発生に関与するケースが多く、またテンパー熱サイクルの影響などもあり、より詳細に考察する必要がある。

■亀裂前縁に占めるLBZ寸法の影響は、その寸法が大きくなると平均的な靱性値は低下するが、lower bound level は寸法の影響が小さい。そのため、亀裂前縁のLBZ寸法が小さい場合に靱性のばらつきが大きい(図7参照)^{1,4,7)}。

■LBZ寸法効果は、weakest link model 型の特徴をもち、lower bound 靱性を評価するには、亀裂前縁に占めるLBZ寸法の絶対値が一定以上にあることが必要であり、その目安は現状のHT50級鋼では、3本の試験を行う場合には、7~8mm程度と考えられる¹²⁾。

5.4 強度的不均質をもつ亀裂材の変形

溶接部に見られる強度的不均質性は、しばしば欠陥などの亀裂が存在するところに生じるため、欠陥からの破壊を支配する欠陥近傍の応力・歪挙動がその影響を受ける。亀裂材の変形に及ぼす強度的不均質性の影響を基本的な考えとして、(その1)で示した二つの不均質モデル、すなわち並列モデルと直列モデルが考えられ、亀裂との位置関係から図8に示すようなL-及びP-タイプの二つのモデルが考えられる。

この二つのモデルで材料の降伏点異なる二材の接合線近傍に亀裂があるときの亀裂近傍の応力分布

を定性的に示すと図9のようになり¹⁶⁾、

■いずれの場合も荷重が小さく、亀裂先端塑性域が亀裂の存在する材料(I)内に限られているときは、材料(I)のみの均質材の応力・歪分布にほぼ等しい。

■L-タイプ：塑性域が材料(II)まで広がると、亀裂線上の応力分布は、それぞれの材において材料(I)、(II)均質材の同じ荷重レベルにおける亀裂線上の応力分布とほぼ等しい。

■P-タイプ：①材料(II)が低強度であるとき、亀裂線上の応力分布は材料(II)の均質材の応力分布に近くなる。すなわち、亀裂近傍に低強度材が存在すると、亀裂は高強度材に存在するにもかかわらず、応力分布は低強度材に支配され、あたかも応力集中の緩和が生じるようになる。②材料(II)が高強度材であるとき、材料(II)の影響は殆ど受

図8 強度的不均質をもつ亀裂材の基本モデル

図9 強度的不均質部近傍に存在する亀裂の応力特性のまとめ(豊田ら)

図 10 亀裂先端に存在する局部的硬化部近傍の応力分布特性の特徴 (豊田)

けない。

特に、P-タイプの場合には、塑性変形が亀裂面に対して非対称に生じ、亀裂開口も非対称となる。

図 8 に示した基本モデルは強度の異なる二材を接合した場合という基礎的な場合に対応するが、現実には不均質部は局部的であることが多い。一般に脆化部は硬化部であることが多く、LBZ は局部的硬化部 (Local Hard Zones, LHZs) といえる。いま、亀裂先端近傍に LHZ が存在するときの応力分布特性を考えると、その形状によって図 10 に示すように結局は、前述の二つのタイプの特徴に帰することになる。すなわち、LHZ が存在し、その回りを同じように塑性変形が取り囲んだとしても、LHZ 内及び近傍の応力分布は、LHZ の形状によって異なる。このように硬化脆化部が存在するとき、その回りの応力・歪挙動はその形状やアスペクト比などに影響されることは、材料開発などに一つの示唆を与えるものである。

5.5 強度的不均質がもたらす問題

亀裂近傍における強度的不均質の存在が破壊強度にもたらす問題を挙げると、

- ① 亀裂先端近傍の応力・歪挙動の変化に基づいて、適切な破壊指標パラメータの選択の必要性、
- ② 亀裂先端近傍の応力多軸度の変化に基づく破壊限界への影響、

の二つが大きなものとして指摘されよう。

前者の破壊指標パラメータについては、従来の均質材を対象として提案されてきた数々の指標は、機械的不均質が存在する材では必ずしもそのまま適用できないことが示されている。これは、亀裂先端近傍の応力・歪と指標パラメータとが対応していないことに起因する問題であり、特に、シャルピー吸収エネルギーや J 積分のように試験片全体の変形の

図 11 局部 CTOD に基づく一般化 CTOD 仮説 (佐藤, 豊田, 有持ら)

積分値のような形で決まる指標は、応力・歪分布の影響をまともに受けるため、その分布形態が材料ごとに異なるような場合、統一的な指標とならない。

例えば、図 8 の P-タイプのような場合、前述のように亀裂面に関して非対称に塑性変形が生じ、そのため亀裂開口変形も非対称になり、従来の定義による CTOD では亀裂先端近傍の変形量の代表指標とならないことがある^{12,16,17)}。そのような観点から、図 11 に示すように、局部 CTOD に基づく一般化された CTOD 仮説も提案されている。これは亀裂が存在する材の側の開口量 (局部 CTOD) を指標に取るべきであるという考え方である。

このような強度的不均質は変形指標に影響を与えるのみでなく、亀裂先端近傍の応力多軸度、すなわち塑性拘束の程度を変化させ、それが破壊発生靱性に影響を与えることがある。特に、亀裂先端近傍に高強度材が存在する場合には、高強度材によって変化が拘束されて、得られる見かけ上の破壊靱性 (たとえ局部 CTOD を指標として用いても) がその材の固有の破壊靱性よりも小さくなる可能性がある¹²⁾。この点は破壊靱性試験結果の実際への応用に当たっては十分な注意が必要であることを示唆している。

5.6 まとめ

溶接部に生じる力学的な不均質性に注目して、それが継手の脆性破壊挙動に及ぼす影響について、幾つかの代表的な問題を取り上げて解説してきた。鋼溶接部の破壊安全性評価、更には破壊靱性評価をこれらの不均質性に起因する問題を無視して進めることはできない。

また、ここで指摘した不均質性がもたらす数々の問題は、溶接部のみの問題だけでなく、異材接合体の破壊挙動を、また材料開発などを考えるうえで多

くの示唆を与えるものであるといえる。

参 考 文 献

- 1) 豊田政男：本誌，54 (1985)，10
- 2) 豊田政男：本誌，54 (1985)，71
- 3) 佐藤邦彦，豊田政男：本誌，55 (1986)，144
- 4) M. Toyoda : Fracture Toughness Evaluation of Steel Welds (Part I), (1988)
- 5) M. Toyoda : Fracture Toughness Evaluation of Steel Welds (PART II),(1989)
- 6) 中尾嘉彦，外：Proc. 4th Int. Sympto. of JWS, Osaka (1982)，503
- 7) T. Haze and S. Aihara : Proc. 7th OMAE, Houston (1988)，515
- 8) M. Nakanishi, Y. Komizo, et al. : IIW Doc. IX-1413-86 (1986)
- 9) S.Aihara and T. Haze : Proc. TMS Annual Meeting, Phoenix, (1988)
- 10) 米田理史：大阪大学工学博士請求論文(1985)
- 11) 中野善文，天野虔一，外：Proc. 7th OMAE, Houston (1988)
- 12) M. Toyoda : IIW Doc. X-1192-89 (1989)
- 13) 日本溶接協会，鉄鋼部会，FTW 委員会総合報告書 (1990)
- 14) 日本溶接協会，鉄鋼部会，RTW 委員会総合報告書 (1987)
- 15) API RP 2Z, (1987)
- 16) 佐藤邦彦，豊田政男，外：溶接学会誌，52 (1983)，154
- 17) 佐藤邦彦，豊田政男，外：溶接学会論文集，2 (1984)，447

その他文献 4)，5) に本講に関連する文献のリストが示されている。

シンポジウムテキスト頒布案内

関西支部のシンポジウムテキストは若干余部があり， 2. テキスト頒布案内

希望者には下記のとおり頒布いたします。

—記—

1. 頒布テキスト

- 1) 「ステンレス鋼溶接技術の現状とその将来動向」
(平成元年 3 月シンポジウム)
- 2) 「鋼構造物製作における溶接設計・施工の省力化・
省人化」(平成 2 年 2 月シンポジウム)

- 1) 頒布価格：3500 円 (送料込み)

- 2) 問 合 先：(社)溶接学会 関西支部 事務局

〒 650-91 神戸市中央区東川崎町 3-1-1

川崎重工工業技術研 溶接・加工研究室内

TEL : 078-682-5030

FAX : 078-682-5507

以 上