接合境界面近傍にき裂を有する異材接合体の変形挙動*

小 田 勇^{*1}, 白 石 和 彦^{*2}

Deformation near a Crack Close to Interface in Bonded Dissimilar Plate

Isamu ODA and Kazuhiko SHIRAISHI

The bonded dissimilar plates are often used for chemical apparatus and pressure vessels. The failures of those apparatus and vessels can lead to serious accidents. In the present paper, an explosion clad plate composed of copper and mild steel is dealt with as a typical example of the bonded dissimilar plate. Tensile tests are carried out by using rectangular plate specimens extracted from the clad plate. Each specimen has an artificial through-the-thickness edge crack close and perpendicular to the explosive interface. The effects of the material inhomogeneity, the residual stress and the hardened zone on the deformation near a crack are examined by the experiment and the finite element analysis. The lower-strength material ahead of a crack and the tensile residual stress near the bonded interface increase the crack opening displacement. The higher-strength material ahead of a crack, the compressive residual stress and the hardened zone near the bonded interface decrease the crack opening displacement.

Key Words: Crack Opening Displacement, Residual Stress, Fracture Mechanics, Bonded Dissimilar Plate, Explosion Welding, Material Inhomogeneity, Hardened Zone, Finite Element Method

1. 結 言

化学装置や压力容器などに耐食性・耐熱性等を付与する目的で異種材の接合体が用いられている。また、材料の高性能化、高機能化を目的として、近年、種々の複合材が利用されている。さらに、溶接材は巨視的不均質材とみなされ⁽¹⁾、原子炉压力容器では長期間の使用で局所的に材質劣化が起こり、本質的に不均質と考えられる⁽²⁾。化学装置や原子炉压力容器の破壊は重大事故につながるので、その変形・破壊挙動の解明は極めて重要である。このような観点からこれまでも、異材接合体や不均質材にき裂が存在する場合の弾塑性破壊力学に関する研究⁽²⁾、材質的不均一の影響に関する解析^{(3)~(5)}や実験⁽⁶⁾、J 積分に関する解析⁽⁷⁾などが精力的に行われている。いわゆる異材接合体には材質的不均一はもちろんのこと、接合によって生じた材質変化部や残留応力が存在する。しかしながら、異材接合体の変形・破壊に及ぼすこれら諸因子の影響を総合的に詳細に検討した研究は見られない。

本研究では、き裂を有する異材接合体の変形・破壊

に関する基礎的研究として、強度差のかなり大きな銅と軟鋼の爆接クラッド材を取り上げ、接合境界面近傍に境界面に垂直方向のき裂が存在する場合の二次元的な変形挙動、すなわち、き裂開口変位、き裂近傍のひずみや塑性変形域に関して、材質的不均一、爆接による材質変化および残留応力のそれぞれがどのように影響するかを実験と弾塑性有限要素解析により検討した。なお、異材接合体を用いた化学反応容器や压力容器などの使用中劣化に伴って生ずる実際の欠陥としては表面き裂が多いと考えられる。したがって、本来は三次元的検討を行うべきであるが、本報ではひとまず、このような容器表面および平面状表面き裂のき裂面にいずれも垂直な面内での変形挙動を模擬的に検討することを意図した。また、接合境界面に垂直方向のき裂を対象としたのは、異材接合による压力容器等では板厚方向に不均質であり、不均質境界面に対して垂直方向にき裂進展することが最も起こり得る典型的な事象と考えられる⁽²⁾からである。

2. 実 験

2・1 供試材とその特性 供試材には原板厚 22

mm の銅 C 1100 を合せ材とし、原板厚 42 mm の軟鋼 SS 400 を母材とする爆接クラッド材を用いた。接合

* 原稿受付 1997 年 4 月 18 日。

^{*1} 正員、熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪 2-39-1)。

^{*2} 正員、熊本大学大学院。

境界面から約8 mm以上離れた位置から採取した JIS 7号相当の試験片を用いて、C1100 と SS 400 のそれぞれ均質材について単軸引張試験を行った。その結果を表1に示す。なお、爆接による加工硬化の影響と思われるが、明りょうな降伏点を検出することは SS 400 材においても困難であった。そこで、表1には耐力を示している。C1100 材は SS 400 材に比べて強度がかなり低く、伸び率がやや大きい。図1はクラッド材断面におけるビッカース硬さの測定結果である。接合境界面近傍で硬さの上昇が認められ、硬度上昇や硬化域の幅は、接合境界から軟鋼側におけるほうが、銅側におけるよりもやや大きい。この硬化域での機械的性質の詳細な分布を測定することは困難である。そこで次のような仮定を行った。図1の硬度分布を基に硬化域を接合境界面から軟鋼側へ2 mmの部分に限定した。接合境界面から1 mmと、そこからさらに1 mmの2領域に分け、各々の領域では一様硬さと仮定した。多くの金属材料で硬度と耐力あるいは降伏点の間に線形関係がほぼ成り立つこと⁽⁸⁾を利用して、硬化域の機械的性質を決定した。なお、図1では接合境界面から銅側へも若干の硬度上昇が見られるが、本報ではこれを無視した。

2.2 試験片および実験方法 クラッド材から図

Table 1 Mechanical properties of materials used

Materials	σ_{ps} (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)	E (GPa)	ν
C1100	181	225	45.7	106	0.3
SS400	344	481	32.3	200	
Hardened zone	668	—	—		
	800	—	—		

σ_{ps} : Proof stress (0.2%)
 T.S. : Tensile strength
 El. : Elongation, G.L. = 20mm
 E : Young's modulus
 ν : Poisson's ratio

Fig.1 Microhardness distribution on section of clad plate

2のような平行部を持つ板状引張試験片を作製した。試験片は全長240 mm、幅28 mm、板厚3 mmで、その表面はクラッド材の爆接境界面に垂直な面とした。試験片には長さ10 mmの板厚貫通の片側切欠きを爆接境界面に垂直方向に付けた。切欠先端部の長さ3 mmは、直径0.03 mmのワイヤによるワイヤカット放電加工により設定した。したがって加工後の切欠先端部の幅は0.06~0.07 mmであり、厳密な意味では、いわゆるき裂ではないが、本報では以後き裂と表現する。試験片はき裂先端がC1100材に存在する均質材 Type CH と不均質材 Type CI およびき裂先端がSS400材に存在する均質材 Type SH と不均質材 Type SI の合わせて4種類である。

爆接クラッド材には、前述のような爆接によって生ずる硬度変化とともに、残留応力の存在が考えられる。図2のような形状・寸法に加工し、予き裂を導入した不均質試験片について、標点距離1 mmの二軸ストレングジを用いた弛緩法により、接合境界面に平行方向(y方向)の残留応力 σ_{ry} を測定した。図3は Type CI における σ_{ry} のき裂延長線上(x軸上)での分

Fig. 2 Central portion of test specimen

Fig. 3 Distribution of residual stress σ_{ry} in Type CI

布である。ただし図は測定結果を最小二乗法により多項式近似した曲線である。接合境界面近傍に引張応力が、また、き裂先端近傍およびき裂と反対側の接合境界面から離れた領域に圧縮応力が残留している。なお、接合境界面に垂直方向の残留応力 σ_{rx} は測定値が最大で 20 MPa と σ_{ry} に比べてかなり低かったので、本報では簡単化のためこれを無視した。Type SI においても、Type CI とおおよそ同様な残留応力分布が得られた。

実験では、き裂線に垂直方向 (y 方向) の一様引張りを加え、負荷応力を測定すると同時にき裂先端から 9 mm 後方(試験片端部からき裂先端側へ 1 mm の位置)での開口変位をクリップゲージで測定した。

3. 解析

3.1 解析方法 変形挙動の解析は、ひずみ増分理論に基づく弾塑性有限要素法によって行い、平面応力と仮定した。要素分割においては、アイソパラメトリック四節点四辺形要素を用い、降伏条件には Mises の条件を用いた。また、解析では、き裂先端半径を零とし、き裂先端部の最小要素の寸法は 0.25×0.25 mm とした。材料は次の Swift の式によるひずみ硬化特性をもつと仮定し、式中の各係数には表 2 に示すものを用いた。

$$\bar{\sigma} = C(\alpha + \bar{\epsilon}_p)^n \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ [MPa] および $\bar{\epsilon}_p$ は相当応力および相当塑性ひずみである。各係数の値は、C1100 および SS 400 各素材では単軸引張試験結果に基づき、また、硬化域については表 1 の機械的性質と SS 400 素材の単軸引張試験結果を参考にして決定した。なお、硬化域に関しては、精度よい応力-ひずみ線図が実測でき

なかったため、便宜上、表 1 の耐力をそのまま式 (1) における降伏応力として用いた。

3.2 異材接合体における諸因子の考慮 Type CI と Type SI のような不均質材は、接合境界面を境とした材質的不均一、爆接による材質変化(硬化)および残留応力を有している。これらの各因子それぞれが、き裂材の変形と破壊にいかに関与するのかを明らかにすることは極めて重要である。そこで、Type CI と Type SI のそれぞれにおいて、表 3 のような 4 種類の Model を用いて変形挙動の解析を行った。Model-M は材質的不均一のみを、Model-MR は材質的不均一と残留応力を、Model-MH は材質的不均一と材質変化(硬化)を、そして、Model-MHR は三つの因子のすべてを、それぞれ考慮したものである。材質変化部(硬化域)については、式 (1) における各係数を表 2 の硬化域における値のように決定し、解析に用いた。残留応力は図 3 のような多項式近似した分布を初期応力として解析に組入れた。図 3 の曲線は x 軸上における分布であるが、他の線上での分布も同様に求め、残留応力の考慮は試験片全面にわたって行った。

4. 結果と考察

4.1 クラッド材におけるき裂開口変位 き裂材の破壊を問題にする場合、いわゆる破壊力学パラメータについて検討することは極めて重要である。本報では、小規模降伏以前のみならず大規模降伏後にも工学的に有用なパラメータであるき裂開口変位に注目する。図 4 はき裂先端から 9 mm 後方における開口変位 V_g をき裂長さ $a=10$ mm で除して無次元化した値と最小断面での負荷応力 σ_n の関係である。図 4 にはクリップゲージによる測定値と FEM による解析結果を併記している。ただし、解析結果は、材質的不均一、

Table 2 Constants used in equation (1)

Materials	C (MPa)	α	n
C1100	285	1.5×10^{-6}	0.047
SS400	550	3.0×10^{-6}	0.080
Hardened zone	1090	3.0×10^{-5}	0.048
	1150	3.0×10^{-5}	0.035

Table 3 Four models used in finite element analysis

	Factors considered		
	inhomogeneity	residual stress	hardened zone
Model-M	○		
Model-MR	○	○	
Model-MH	○		○
Model-MHR	○	○	○

Fig. 4 Relationship between crack mouth opening displacement and applied net stress

硬化域、残留応力のすべてを考慮した、表3における Model-MHR の場合である。実験結果と解析結果を比較すると定量的には若干の差が認められる。これには、解析において、硬化域での材料定数を不連続に設定したことやき裂半径を零と仮定したことなどが主として起因していると思われる。しかしながら両者は定性的により一致をなしている。図4で、均質材同士を同じ負荷応力段階で比較すると、表1のような両者の強度差、特に降伏応力の差に起因して、C1100 均質材 Type CH の V_g が SS 400 均質材 Type SH のそれより極めて大きい。き裂先端が C1100 材に存在する均質材と不均質材を比較すると、不均質材 Type CI の V_g は、均質材 Type CH のそれに比べて極めて小さい。これは、Type CI においてはき裂先端前方に爆接による硬化域が、またさらにその前方に、き裂先端材より高強度の SS 400 材が存在するので、主としてこれらにより変形が抑制されるためと考えられる。また、残留応力も不均質材の変形に影響すると思われるが、その詳細は図4までの結果では評価できない。しかしながら、き裂先端材の前方に、これよりも高強度の異質材が存在する Type CI のような不均質材では、均質材に比べてき裂開口変位が低下するので、COD 仮説に基づいた場合、もし、均質材と不均質材で境界き裂開口変位に大きな差がなければ、均質材に比べて破壊強度の上昇が期待できる。

一方、SS 400 材にき裂先端が存在する均質材と不均質材を比較すると、不均質材 Type SI の V_g のほうが均質材 SH のそれより大きくなっている。これには、Type SI には、たしかにき裂先端付近における圧縮の残留応力やき裂先端前方の硬化域も存在するが、接合境界面前方に低強度の C1100 が存在することが主として起因して、結果として変形が助長され、 V_g

Fig. 5 Ratio of opening displacement near crack tip to that at crack mouth

が増大しているものと考えられる。

なお、本研究で対象としたような不均質材においては、 V_g のような試験片端部での開口変位とき裂先端部での開口変位は必ずしも同一の傾向を示すとは限らないことも考えられる。FEM 解析結果を用いて、き裂先端から後方へ 0.25 mm の位置における開口変位 δ と試験片端部における開口変位 V_g の比較を行うために、 δ と V_g の比を求めると図5のようになる。予想したように、たとえき裂先端材が同一で、かつ V_g が同じ値であっても、均質材と不均質材では、 δ が若干異なった値となることが認められる。しかしながら、各試験片 Type における δ/a と σ_n の関係は図4に示した V_g/a と σ_n の関係と定性的にはよい一致を示すことを確認した。

4.2 不均質材のき裂開口変位に及ぼす諸因子の影響

図4のき裂開口変位に関する結果を基に、上記のような考察を進めたが、不均質材において材質的不均一、硬化域および残留応力の諸因子が、それぞれどのようにき裂付近の変形挙動に影響するのか、その詳細は、これまでの議論では不十分である。そこで、表3

(a) At low applied stress level

(b) At high applied stress level

Fig. 6 Effect of each factor on crack opening displacement in Type CI

のような各因子を考慮に入れた4種類のModelによる解析結果を用いて、まずき裂開口変位 δ に及ぼす諸因子の影響について検討する。図6はC1100材にき裂先端を有する不均質材Type CIにおける δ と σ_n の関係の各Modelによる解析結果である。図6には参考のためにC1100均質材Type CHの場合の結果も破線で含めている。Type CIのModel-Mは材質的不均一のみを考慮したものであるが、この場合の δ はC1100均質材Type CHのそれより極めて小さく、Type CIの接合境界面より前方に存在する高強度材SS400による変形の拘束が明らかである。Type CIのうち材質的不均一に加えて残留応力も考慮に入れたModel-MRをModel-Mと比較してみる。図6(a)のように、低負荷段階では、図3で見たようなき裂先端近傍における y 方向圧縮残留応力の影響によりModel-MRの δ はModel-Mのそれより小さい。しかし、負荷応力が增大すると、Model-MRの δ は接合境界面近傍の y 方向引張残留応力の影響でやや増大して、図6(b)のように、 σ_n が210~240 MPaではModel-Mの δ とほぼ同じ値となる。さらに負荷応力が增大するとき裂と反対側の接合境界面から離れた領域の圧縮残留応力により、Model-MRの δ はModel-Mの場合よりもやや小さくなっている。材質的不均一と硬化域を考慮したModel-MHの δ はModel-Mのそれより常に小さく、硬化域による変形の拘束が明らかである。三つの影響因子すべてを考慮したModel-MHRの δ はこれらの影響を受けて、この場合、すべてのModelにおいて最小となっている。以上のように、図6で示す δ に対して低負荷段階では残留応力と硬化域の影響が明らかに現れるが、高負荷段階になると、Model-MとModel-MRとでほぼ同様となり、残留応力の影響はそれほど明白ではない。そ

して、硬化域の影響が顕著となり、Model-MHとModel-MHRはほぼ同様の値に近づいていく。このことと、図4のように、Model-MHRの解析結果は実験結果と良い一致を示すことを考えると、本研究におけるような不均質材で、延性破壊が対象となるような高負荷段階の場合には、材質的不均一と硬化域のみを考慮に入れて解析すれば、近似的にはき裂開口挙動を評価できるといえる。

図7はSS400材にき裂先端を有する不均質材Type SIについて、同様に4種類のModelを用いて δ に及ぼす諸因子の影響を解析した結果である。Model-Mは材質的不均一のみを考慮したものであるが、この場合の δ はSS400均質材であるType SHのそれより大きくなっている。Type SIはType CIとは逆に、接合境界面の前方にき裂先端材より低強度のC1100材が存在するため、これにより、変形が助長されることを示している。その他、Type CIの場合と同様な、 y 方向圧縮残留応力と引張残留応力による、それぞれ、変形の抑制と助長、さらに、硬化域による変形の抑制が確認できる。

(a) $\sigma_n = 150$ MPa

Fig. 7 Effect of each factor on crack opening displacement in Type SI

(b) $\sigma_n = 300$ MPaFig. 8 Distribution of strain ε_y on the prolongation of crack

4.3 不均質材におけるき裂近傍のひずみ分布と塑性変形に及ぼす諸因子の影響 き裂開口変位はき裂先端近傍の変形状態, すなわちひずみ分布や塑性変形に依存すると考えられる。そこで, これらに関する材質的不均一, 硬化域および残留応力の影響を検討し, き裂開口変位との関連について考察する。図8はC1100材にき裂先端を有する不均質材 Type CI について, 4 Model で解析した y 方向ひずみ ε_y のき裂延長線上での分布を示す。図8(a)のような低負荷段階で,

(a) $\sigma_n = 150 \text{ MPa}$

(b) $\sigma_n = 300 \text{ MPa}$

Fig. 9 Plastic deformation around crack tip in Type CI

き裂先端近傍の ε_y に注目すると, Model-MR では Model-M に比べ, また, Model-MHR は Model-H に比べてき裂先端部の圧縮残留応力の影響によりそれぞれ, ε_y が小さくなっている。また, Model-MR では, 接合境界面近くで, 引張残留応力による ε_y の上昇も若干現れている。硬化域の影響による ε_y の低下も見られるが, このような低負荷段階ではそれほど顕著ではない。そしてこの $\sigma_n = 150 \text{ MPa}$ の段階では, き裂先端のごく近傍での ε_y は大きいほうから Model-M, Model-MH, Model-MR, Model-MHR の順となっており, これは図6(a)の 150 MPa における δ の大きさの順序に対応している。図8(b)のように, さらに負荷応力が増大して, き裂先端から生じた強変形域がき裂先端前方に拡がると前方に存在する異質材 SS 400 および接合境界面近傍の硬化域の影響が現れてくる。すなわち, Model-M でも, ε_y の分布曲線は接合境界部で若干不連続となり, 高強度の SS 400 材による変形の抑制を示している。また, Model-MR と Model-MHR の ε_y はき裂先端近傍での圧縮残留応力による低下, および, 接合境界面近傍での引張残留応力による上昇を示している。しかしながら, 接合境界面から SS 400 材側へ約 2 mm の領域に存在する硬化域の影響が顕著に現れて, Model-MH では Model-M より, また, Model-MHR では Model-MR より, それぞれ ε_y が, かなり小さくなっている。そして, $\sigma_n = 300 \text{ MPa}$ では, き裂先端のごく近傍での ε_y は大きいほうから, Model-M, Model-MR, Model-MH, Model-MHR の順となっており, このことは, 図6(b)の $\sigma_n = 300 \text{ MPa}$ における δ の大きさの順序に対応している。

図9はき裂先端がC1100材に存在する不均質材 Type CI においてき裂先端から塑性変形域が拡がっていく状態を, 4種の Model による解析で得られた相当塑性ひずみ分布で示したものである。負荷応力が 150 MPa において, き裂先端のごく近傍での約 0.5% 以上の塑性変形域に注目すると, Model-MR が Model-M より, また, Model-MHR が Model-MH より, それぞれ若干ではあるが塑性変形域が小さい。これは, Model-MR と Model-MHR におけるき裂先端近傍の圧縮残留応力の影響を示している。また, Model-MR と Model-MHR では, 接合境界面近傍で, 低い値ではあるが, 塑性変形域が接合境界面に沿って y 方向に拡がる傾向が見られる。これは, 接合境界面近傍に存在する y 方向引張残留応力の影響と思われる。さらに, Model-MH は Model-M より, また, Model-MHR は Model-MR よりそれぞれ, 約 0.1%

以上の塑性変形域が小さい。これは、き裂先端前方に存在する硬化域による変形の拘束を表している。このような 150 MPa における塑性変形挙動は、同じ負荷段階における図 6(a) の δ 値および図 8(a) のき裂先端ごく近傍の ϵ_y 値とよい対応を示している。

負荷応力がさらに増大して 300 MPa になると、き裂先端のごく近傍における約 1.8% 以上の塑性変形域は、大きいほうから Model-M, Model-MR, Model-MH, Model-MHR となり、とくに、硬化域による変形の拘束が顕著である。そしてこの塑性変形域の大きさの順序は、同じ負荷段階における図 6(b) の δ 値および図 8(b) のき裂先端ごく近傍の ϵ_y 値とよい対応を示している。

以上のように、不均質材においては、き裂先端から広がったある程度の強変形域が、圧縮あるいは引張りの残留応力場、異質材および硬化域のどの部分に到達しているかに応じて、その部分に存在するこれら諸因子の影響が変形挙動に現れてくる。

このような ϵ_y 分布と塑性変形に及ぼす諸因子の影響はき裂先端が SS 400 材に存在する不均質材 Type SI においても同様に明らかとなった。

5. 結 言

異材接合体の典型的な例として、強度差のかなり大きな銅と軟鋼の爆接クラッド材を取り上げた。接合境界面近傍に境界面と直角方向のき裂が存在し、き裂線に垂直方向の引張荷重が加わる場合の二次元的な変形挙動に関して、材質的不均一、爆接による硬化域および残留応力の影響を検討した。得られた結果は次のように要約される。

(1) 不均質材においては、き裂先端材が同一な均質材と比較した場合、き裂先端の前方に存在する異質材が、き裂先端材よりも高強度かあるいは低強度かによって、それぞれ変形が抑制されるかあるいは助長さ

れる。

(2) 本研究におけるようなき裂を有する爆接材には、き裂線に垂直方向の残留応力が、き裂先端近傍で圧縮、接合境界面近傍で引張り、さらに前方では圧縮で存在している。不均質材の変形は圧縮残留応力あるいは引張り残留応力により、それぞれ、抑制され、あるいは助長される。

(3) 接合境界面近傍には硬化域が存在し、き裂材の変形を抑制する。

(4) 不均質材の変形に対して、低負荷段階ではき裂先端近傍の圧縮残留応力の影響が明白であるが、き裂先端部から生じた強変形域が進展するにつれて、順次その部分に存在する圧縮あるいは引張りの残留応力場、硬化域、および異質材の影響が現れてくる。そして、高負荷段階では、残留応力よりむしろ硬化域と異質材の影響が顕著となる。

(5) 本研究における Type CI のような、き裂先端の前方にこれより高強度の異質材が接合されている場合には、き裂先端材が同一な均質材に比べてき裂開口変位が著しく低下する。したがって、不均質材と均質材とで限界き裂開口変位に大きな差がなく、しかも COD 仮説が成り立つ場合には、不均質材の破壊強度の著しい上昇が期待できる。

文 献

- (1) 豊田政男, 溶接学会誌, **58-2** (1989), 99-105.
- (2) 矢川元基・吉村 忍, 学術月報, **45-9** (1992), 890-898.
- (3) 佐藤邦彦・豊田政男・南二三吉・佐藤 進・中西睦夫・有持和茂, 溶接学会誌, **52-2** (1983), 154-161.
- (4) Vijayakumar, S. and Cormack, D.E., *Eng. Fract. Mech.*, **17-4** (1983), 313-321.
- (5) 西岡俊久・小林 豊・Epstein, J.S., 機論, **59-561**, A (1993), 1319-1326.
- (6) 西岡俊久・西 正己・藤本岳洋・板倉慧悟・Epstein, J.S., 機論, **59-559**, A (1993), 558-565.
- (7) 菊池正紀・小林光夫, 機論, **60-569**, A (1994), 25-30.
- (8) 吉沢武男編, 硬さ試験とその応用, (1997), 287, 裳華房.