

## Study on ductile fracture under mixed mode loading.

Masanori KIKUCHI and Shogo SANNOUMARU

## 1 緒 言

延性破壊現象のパラメータとしては  $J$  積分<sup>(1)</sup>が広く用いられているが、大きな除荷を伴うき裂進展が生じた場合や薄板構造などには  $J$  積分の有効性が失われることが知られている。しかし近年の危機の小型化に伴い、薄板構造が使用されることが多くなっている。これらに疲労き裂が発生した後に何らかの原因で過大荷重が負荷した場合、混合モードで延性破壊が生じることが考えられる。しかし現在のところ、こうした現象を支配する機構についての研究は多くない。そこでここでは損傷力学の立場から、混合モード負荷下での延性破壊減少のシミュレーションを試み、板厚や混合モード比が延性破壊挙動に及ぼす影響について検討した。

## 2 延性破壊試験

2.1 試験片 材料は高韌性材料である原子炉圧力容器用鋼 A533B を用いた。Fig.1 に示すように、三点曲げ試験片を作成し、き裂を対象線からはずらして導入することでモードIとモードIIの混合モード試験を行った。図中の  $x$  の値を変化させることで混合モード比  $K_{II}/K_I$  を0から0.25まで5通りに変化させた。また試験片板厚は2mmと8mmの二種類の試験片を用いた。

2.2 試験結果 延性破壊試験後、破面形状を測定したところ、混合モード下では延性破壊は平坦に生じることがなく、初期き裂方向に対してある角度を持って進展することが分かった。そこでき裂進展方向の正負を Fig.2 のように定義し、試験片の中央部と表面でその角度を測定したところ、Fig.3 のような結果を得た。この図より、試験片の中央部では進展角度は板厚②よらないこと、また

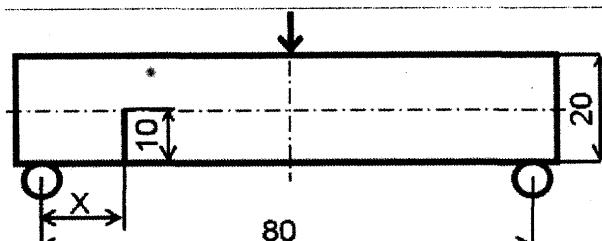


Fig.1 Three point bending specimen.

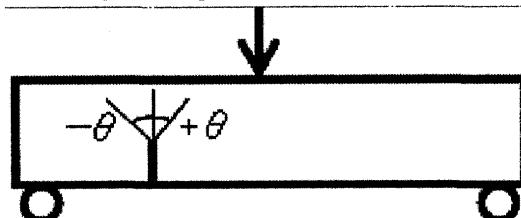


Fig.2 Definition of crack growth direction.

混合モード比が増加するほど進展角度が大きくなることが分かる。一方表面では板厚の影響は顕著である。混合モード状態での進展方向は、板厚 8mm の試験片では試験片中央での進展方向と反対方向に進展している。しかし 2mm の試験片では中央部とほぼ同じ方向に進展している。

次に SEM(Scanning Electron Microscope)を用いては免状のディンプルの大きさを調べた。この試験片では表面近傍に形成されるシャリップ内でもディンプルが確認できる。試験片表面と中央部とで、それぞれ 120 個のディンプルを測定し、その直径の平均値を Fig.4 に示す。これより板厚が大きいほど中央部でのディンプル径は

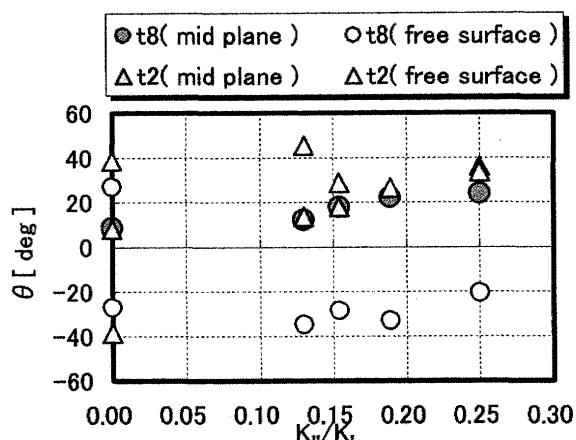


Fig.3 Crack growth direction.

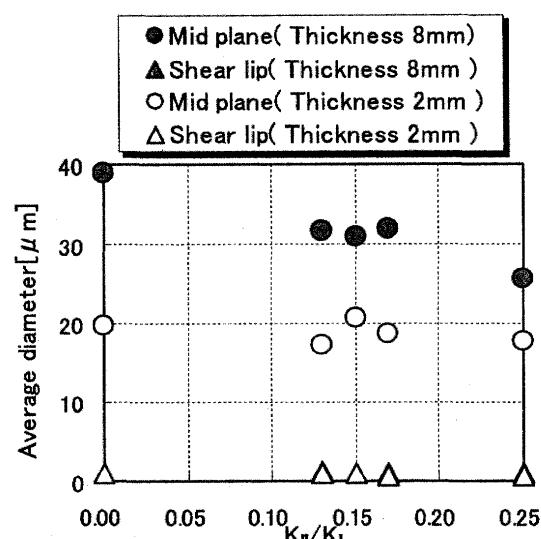


Fig.4 Average diameter of dimples.

大きくなることが分かる。8mm 厚さ試験片では混合モード比の増加につれてディンプルは徐々に小さくなるが、2mm 試験片ではそうした変化は顕著ではない。また表面でのディンプルはいずれもきわめて小さいものとなっている。

### 3 数値解析

こうした現象を数値シミュレーションするために、ボイドの挙動を考慮した Gurson の構成式<sup>(2)</sup>を用いた。この式を用いることにより延性変形に伴うボイド率の変化を計算することができる。そしてボイド率が臨界値になったとき、破壊が生じると仮定することで、破壊シミュレーションが可能となる。Fig.4 は対称性を考慮した 1/2 の解析モデルである。

破壊解析の結果を Fig.5 に示す。これは 8mm と 2mm の厚さの試験片の板厚中央部でのき裂進展の様子と応力三軸度の分布を示している。き裂は板厚に関わらず同じ方向に進展しており、その方向は実験結果と定性的に良く一致している。また応力三軸度は 8mm 試験片のほうが大きい。応力三軸度はボイドの成長に直接に関連した項である。これが大きいことは、大きなボイドが成長しやすいことを意味している。すなわちこの点でも Fig.3 に示したディンプルの径の違いが定性的に良く表現できている。

Fig.6 は試験片表面でのき裂進展の様子と相当塑性ひずみ分布を示す。ここでは 8mm 試験片のモード I での結果も示している。ただしモード I の解析は対称性により 1/4 のモデルを解析しており、こりは試験片の右半分の図である。表面ではモード I でのき裂は直進せず、左右対称に斜め方向にき裂が進展している。また混合モード状態では、8mm の試験片では左方向にき裂が進展しているのに対して、2mm 試験片では右方向に進展しており、板厚による影響が顕著に現れている。これらはいずれも

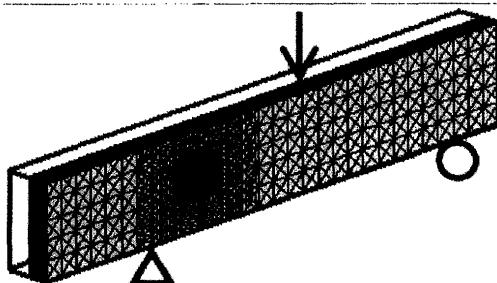
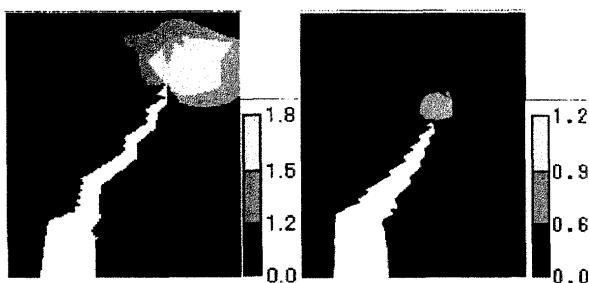


Fig.4 Numerical model.

(a) 8mm specimen (b) 2mm specimen  
Fig.5 Fracture at mid-plane.

実験により得られたき裂進展方向と定性的に良く一致している。すなわち混合モード下でのき裂進展をシミュレーションすることができた。また試験片表面では破壊は相当塑性ひずみの大きな領域を進展して行くことも明らかとなった。

Fig.7 にはき裂進展に伴いき裂面に対するせん断応力と垂直応力の比がどのように変化するかを示している。き裂進展前は混合モード状態であるから、両者の比は大きな値を取っている。しかしき裂が 0.3mm 進展したあとでは、両者の比はきわめて小さくなる。すなわちせん断成分が減少して、き裂先端の応力状態がモード I に近づいていることを意味している。疲労破壊が混合モード状態で進展を開始するとモード I 状態に移行することは良く知られている。この結果は延性破壊においても同様の現象が生じていることを示唆している。

### 4 結言

混合モード負荷下での延性破壊減少を実験的に調べ、数値解析により定性的に良くシミュレーションできることを示した。

#### 参考文献

- 1) J.R.Rice, P.C.Paris, and J.G.Merkle, *ASTM, STP 536(1973)*, pp-231-245..
- 2) A.L.Gurson, *Continuum Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.99, No.1(1977), pp.2-15..

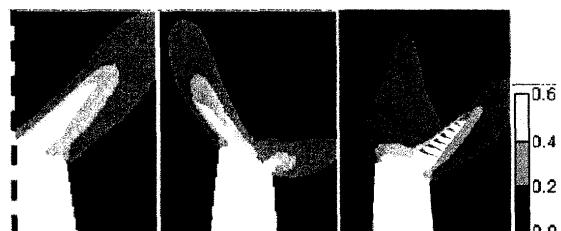
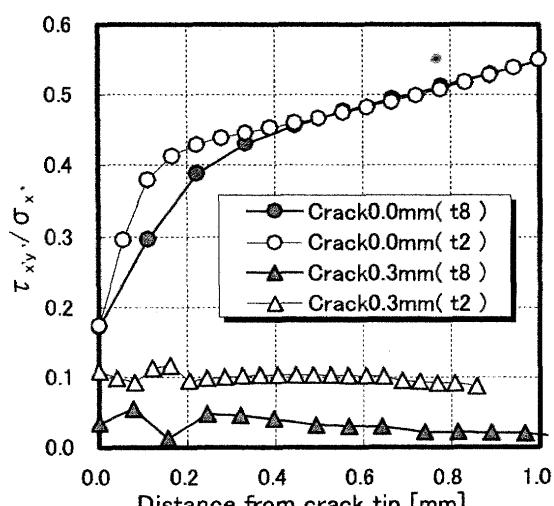
(a) Mode I (b) 8mm specimen (c) 2mm specimen  
Fig.6 Fracture at specimen surface.

Fig.7 Stress field around growing crack tip.