

# 明瞭な降伏点を示さない材料での CT 試験片の K 値有効性検討

(株) IHI    〇板橋 遊    高梨正祐    平野 隆

## Validity of Stress Intensity Factor K on CT Specimen for Low Yield Point Material

Yu ITABASHI, Masahiro TAKANASHI, Takashi HIRANO

### 1 諸言

破壊力学試験で用いられる応力拡大係数は、小規模降伏条件を満たすように試験片形状および荷重負荷条件などが厳密に定められている<sup>(1)</sup>。例えば、平面ひずみ破壊じん性  $K_{IC}$  試験を実施する際、試験片は試験片形状と降伏応力  $\sigma_{YS}$  で規定されている小規模降伏条件を満たす必要がある。ステンレス鋼のように明確な降伏点を示さない材料では、規格に示された判定条件から K 値の有効範囲を確認することが困難であり、工学分野では 0.2% 耐力を用いて有効性を評価している。小規模降伏条件が成立する場合に K 値と J 値の間に相関関係が存在することに着目した。CT 試験片の J 値解析を実施し、解析によって得られる小規模降伏状態から K 値の有効性範囲を検討した。

### 2 検討条件

**2.1 解析モデル** 解析に使用した CT 試験片モデルを Fig.1 に示す。1inch および 2inch CT 試験片の 2 次元平面ひずみモデルとし、対称条件を利用した 1/2 モデルを使用した。き裂先端には一辺 0.25mm の四角形メッシュを使用し、J 積分経路を  $n=10$  経路確保した。き裂長さは  $a/W=0.65$  とした。解析対象とした材料は明瞭な降伏点を示さない低合金鋼(以後 LAS と称す)と SUS316 である。それぞれの主な機械的特性値を Table 1 に示す。J 値算出の際は弾塑性解析を実施した。荷重点に任意荷重を負荷することにより、任意の K 値条件を表現した。解析には汎用有限要素解析ソフト ABAQUS Ver. 6.9-1 を使用し、室温にて解析を実施した。

**2.2 K 値の有効性判定** K 値の有効性判定は、小規模降伏条件成立の可否により判定した。破壊力学試験で得られる K 値は小規模降伏条件を満たす必要がある。線形弾性体および小規模降伏条件下では、J 値はエネルギー解放率 G と等しい事が知られており、K 値と J 値には式 1 の関係が存在する<sup>(2)</sup>。ここで、弾塑性 FEM 解析を実施し、き裂先端の経路積分により算出した J 値を式 1 の関係を用いて K 値に変換した値を  $K(J)$  と定義した。小規模降伏条件が満たされる場合、弾塑性解析により算出した  $K(J)$  値と弾性解析により算出した K 値が一致する。任意の K 値に対して  $K(J)$  値と比較することにより、CT 試験片における小規模降伏条件を検討した。

Table 1 Mechanical property of Materials.

Material	Elastic modulus (GPa)	0.2% Proof stress (MPa)
LAS	213	478.5
SUS316	198.8	213

Table 2 Validity of K for CT specimen ( $a/W=0.65$ ).

Material	1 inch CT (MPa $\sqrt{m}$ )	2 inch CT (MPa $\sqrt{m}$ )
SUS316	16	24
SUS316 $\sigma_{Flow}$	34	48
LAS	40	56

$$J = G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (1)$$

ここで、 $E' = E$  (平面応力)

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \text{ (平面ひずみ)}$$

E は縦弾性係数とする。K 値の有効条件は ASTM E1820 により算出し<sup>(3)</sup>、得られた K 値を  $K_{STD}$  と以後称する。

### 3 解析結果および考察

**3.1 K 値有効範囲調査** 破壊力学試験では小規模降伏条件を満たすためにき裂長さ a, リガメント b の試験片寸法が次式のとおり規定されている<sup>(1)(3)(4)</sup>。小規模降伏条件を満たす最大の K 値一覧を Table 2 に示す。ここで  $\sigma_{YS}$  は 0.2% 耐力を使用した。

$$a, b \geq 2.5 \left( \frac{K}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2)$$

ASTM E647 疲労き裂進展試験規格では、ひずみ硬化しやすい材料については塑性変形開始に必要な応力である流動応力  $\sigma_{Flow}$  を用いて評価しても良いと定められている。このため、 $\sigma_{YS}$  の代わりに  $\sigma_{Flow}$  を用いた場合の最大許容 K 値も Table 2 に合わせて示す。ここでひずみ硬化しやすい材料とは引張強度  $\sigma_{TS}$  と降伏応力が  $\sigma_{TS}/\sigma_{YS} \geq 1.3$  の材料のことである。なお、流動応力は以下で与えられる<sup>(5)</sup>。

$$\sigma_{Flow} = \frac{(\sigma_{YS} + \sigma_{TS})}{2} \quad (3)$$

**3.2 弾塑性解析** 大変形を考慮した弾塑性 J 値解析を実施した。Fig. 2 に J 値弾塑性解析から算出した  $K(J)$  値と  $K_{STD}$  値の関係を示す。Table 2 で示した小規模降伏条件下では  $K(J)$  値と K 値は良く一致する。しかし、高 K 値領域においては  $K(J)$  値は K 値よりも大きくなった。Fig. 3 に K 値と  $K(J)$  値の乖離率を示す。乖離率は  $(K(J) - K_{STD}) / K_{STD}$  で定義した。SUS316 材では高 K 値領域で  $K(J)$  と K の乖離が顕著に確認された。一方、LAS 材では  $K(J)$  値と K 値はほぼ一致した。SUS316 の高 K 値領域では塑性域が広範囲に広がり小規模降伏条件を満たさないため、式 1 の関係が成立なくなるとみられる。SUS316 の 1inch 試験片では  $K \leq 40 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 、2inch 試験片では  $K \leq 60 \text{ MPa}\sqrt{m}$  で乖離率が 10% 以内であり、小規模降伏条件下にあるといえる。このことから Table 2 で示される範囲外にも小規模降伏が成立している。少なくとも規格

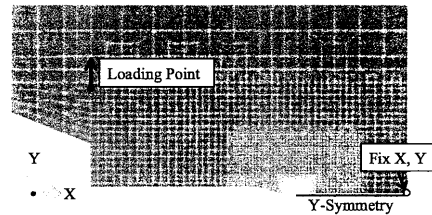


Fig.1 Example of 2D analytical model(2inch CT).

が定める小規模降伏条件下で  $K$  値は有効と考えられるため、乖離率 10%以内では  $K$  が有効であるとみなせる。

次に、き裂先端場の応力特異性評価により、 $K$  値の有効性を検証した。Fig. 4 に SUS 材 2inchCT のき裂先端の応力場を示す。縦軸に荷重負荷方向応力を無次元化し、横軸にき裂先端からの距離を無次元化した係数で整理した。 $K=30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  では傾き-0.5 で示される  $K$  特異場が存在しており、 $K=60\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  条件でも  $K$  特異場が存在することが確認できた。よって、 $K \leq 60\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  で  $K$  値が有効である。一方、 $K=75, 90\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  では塑性域内に傾き  $-N/(1+N)$  で示される HRR 特異場が存在し、 $K$  特異場はみられない。このため、 $K$  値が有効でないことが確認できた。SUS316 の加工硬化係数には  $N=0.293$  を用いた。応力特異場の検証結果からも、乖離率による小規模降伏条件での  $K$  値有効性評価は妥当といえる。

**3.3 小規模降伏有効範囲検討** 本研究で使した SUS316 2inchCT 試験片での  $K$  値有効範囲は  $K \leq 60\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。この値は式 2 に  $\sigma_{\text{Flow}}$  を使用して求めた  $K$  有効範囲  $K \leq 48\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  とおおよそ一致する。1inchCT でも同様に、 $\sigma_{\text{Flow}}$  による有効範囲は乖離率による  $K$  有効範囲内に存在する。このことから、0.2%耐力が低く塑性硬化を示すステンレス鋼のような材料では  $\sigma_{\text{YS}}$  の代わりに  $\sigma_{\text{Flow}}$  を使用して小規模降伏条件を判断しても差し支えない。

次に、従来用いられてきた 0.2%耐力による小規模降伏条件の有効性判定を検討し、式 2 で用いられている係数の変更を提案する。式 2 は式 4 のように記述でき、 $(K/\sigma_{0.2})$  に対し係数  $C$  を掛けた数値がき裂長さ  $a$  やリガメント  $b$  以下になるように規定している。式 2 では係数  $C=2.5$  を用いている。

$$a, b \geq C \left( \frac{K}{\sigma_{0.2}} \right)^2 \quad C: \text{係数} \quad (4)$$

式 2 で規定している範囲外においても小規模降伏条件が成立していることから、係数  $C$  が変更できる可能性がある。任意  $K$  値に対し式 4 を満たす係数  $C$  の最大値を

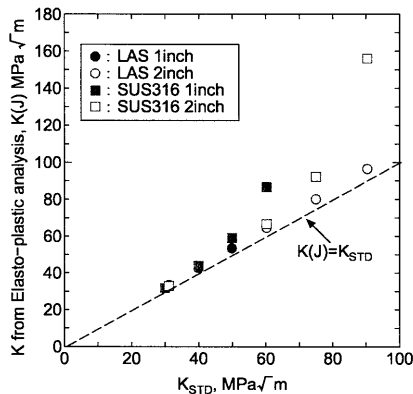


Fig. 2 Relationship between  $K(J)$  and  $K_{\text{STD}}$ .

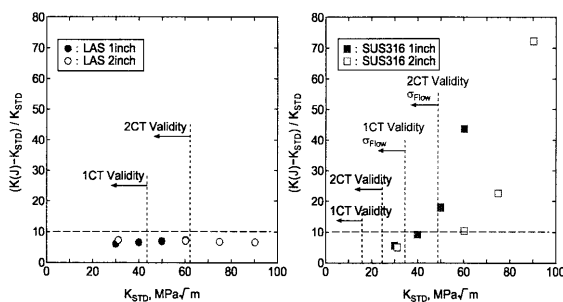


Fig. 3 Divergence ratio of  $K(J)$  from  $K_{\text{STD}}$ .

Fig. 5 に示す。従来は、係数  $C \geq 2.5$  で小規模降伏条件が成立することを表す。乖離率による小規模降伏条件判定に従うと係数  $C$  は 0.45 となり、乖離率による小規模降伏条件は式 5 に示される。Fig. 5 で係数 0.45 以上が小規模降伏を満たす領域であり、今回検討した範囲での結果、係数  $C=2.5$  を用いた場合よりも大幅に  $K$  値有効範囲が拡大した。

$$a, b \geq 0.45 \left( \frac{K}{\sigma_{0.2}} \right)^2 \quad (5)$$

#### 4 結言

材料試験規格で規定されている応力拡大係数  $K_{\text{STD}}$  値と弾塑性  $J$  値解析による  $K(J)$  値を比較することにより、小規模降伏条件を判定し、 $K$  値有効範囲を検討した。弾塑性解析の結果、高  $K$  値条件で  $K(J)$  値は  $K$  値よりも大きな値を示した。乖離率による小規模降伏条件判定を用いると、小規模降伏条件判定式の係数  $C$  として 0.45 を用いることができ、従来よりも  $K$  値の有効範囲が拡張された。ASTM 規格に従い小規模降伏条件判定式の係数  $C$  として 2.5 を用いる場合、 $\sigma_{0.2}$  の代わりに  $\sigma_{\text{Flow}}$  を使用しても小規模降伏条件を満足していることを確認した。

#### 参考文献

- (1) ASTM E 399-90: Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.
- (2) 東郷敬一郎, “材料強度解析学”, 内田老鶴圃(2004)
- (3) ASTM E 1820-08: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
- (4) ISO 7539-6: Corrosion of metals and alloys - Stress corrosion testing Part 6: Preparation and use of pre-cracked specimens for tests under constant load or constant displacement (2003).
- (5) ASTM E 647-00: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.

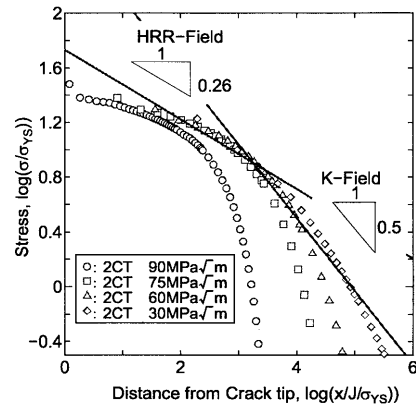


Fig. 4 HRR-field and  $K$ -field stress distribution near crack tip. (SUS316 2inch CT)

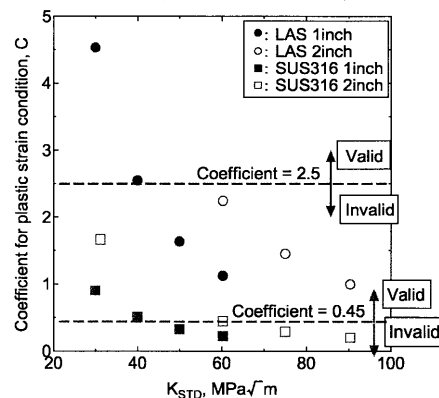


Fig. 5 Relationship between Coefficient and  $K_{\text{STD}}$ .