数種類の鋼の J_{IC} 試験におけるストレッチ・ ゾーン幅とき裂先端開口変位*

大 路 清 嗣**, 康 祥 隆**
岩 切 俊 一***, 中 川 茂 樹****

Relations between Stretched Zone Width and Crack Tip Opening Displacement in J_{IC} Tests of Steels

by Kiyotsugu OHJI, Sang-Ryung KANG,
Shunichi IWAKIRI, and Shigeki NAKAGAWA

Deformation of stretched zones during stable crack growth (stages II and III) in J_{IC} tests was examined by observing stereographically relations between apparent critical stretched zone width (SZW_c) and crack tip opening displacement. The average value of the apparent SZW_c along the crack front continued to increase with increase in J during the extension of tear region along the crack front from 20%, at which crack initiation and SZW_c were defined by the JSME standard, to 100% in length (stage II). In the stable tear crack growth stage (stage III), SZW_c was also deformed considerable with low-strength high-toughness steels and, to a lesser extent, with high-strength high- SZW_c steel and medium-strength steel, but not with high-strength low- SZW_c steel. A new procedure of SZW method was proposed to obtain J_{IC} values compatible with those by the R -curve method, by avoiding errors due to the SZW_c deformation.

Key Words: Fracture, Material Testing, Metallic Materials, Fracture Toughness, Stereographic Observation, Stretched Zone Width, Crack Tip Opening Displacement

1. 結 言

弾塑性破壊じん性 (J_{IC}) 試験の最も重要な課題は、延性き裂発生点の高精度の検出とその再現性にある。

日本機械学会基準「弾塑性破壊じん性 (J_{IC}) 試験方法」⁽¹⁾では、 R 曲線法およびストレッチ・ゾーン幅 (SZW) 法が互いに独立した試験法として採用され、 J_{IC} 試験方法の中心的位置を占めている。しかしながら、両試験法によって得られた J_{IC} 値には、必ずしも整合性があるとは言えないのが現状である。

著者らの実験によれば SZW 法による J_{IC} は R 曲線法による J_{IC} に比べて大きめの値となっている⁽²⁾⁽³⁾。 SZW 法による J_{IC} が R 曲線法による J_{IC} より大きくなる第一の原因として考えられることは、従来 SZW 法に対してもたれていた印象に反し、 SZW_c が延性き裂発生後も負荷とともに増大することである。すなわちストレッチ・ゾーンの発達段階は、負荷直後から基準という限界ストレッチ・ゾーン幅 (SZW_c) に達するまでの第 1 段階、その後延性き裂が

予き裂前縁全面に発生するまでの第 2 段階、さらに延性き裂の安定成長下でストレッチ・ゾーンが変形を受ける第 3 段階に分類でき、この分類の中で、第 2、第 3 段階では J の増加とともに SZW_c の平均値が増大することが考えられる。第二の原因として考えられることは、古くは中村ら⁽⁴⁾が SUS304 鋼の破面観察で指摘し、最近では著者ら⁽³⁾、武藤ら⁽⁵⁾が指摘しているように、ストレッチ・ゾーンの発達段階において、ストレッチ・ゾーン内に横割れが発生し、そのためにストレッチ・ゾーンが分断を受け、実質より大きく観察される場合のあることである。これらの原因のひとつである安定き裂成長下におけるストレッチ・ゾーンの変形については、前報⁽⁶⁾で数種類の鋼の延性き裂発生前後におけるストレッチ・ゾーン近傍のステレオ観察を行い、ある程度定性的に明らかにした。

本報告では、前報⁽⁶⁾のステレオ観察の結果をふまえ、 SZW とき裂先端開口変位 ($CTOD$) の関係から、安定き裂成長下でストレッチ・ゾーンが変形を受ける場合のあることを実証し、併せて、破面観察により、ストレッチ・ゾーン内に発生した横割れの形状およびその頻度についても考察を行った。

* 昭和 58 年 11 月 28 日 第 923 回講演会において講演、原稿受付 昭和 58 年 5 月 25 日。

** 正員、大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘 2-1)。

*** 学生員、大阪大学大学院。

**** 准員、三菱自動車工業(株)。

2. 供試材および試験片

実験に用いた材料は2種類の80キロ級高張力鋼 HT80 (HT80-1 および HT80-2 と区別する), 60 キロ級高張力鋼 HT60, 溶接用圧延鋼板 SM50A および原子炉压力容器用鋼板 A533B 鋼である。各材料の化学成分を表1に, 室温での機械的性質を表2に示す。試験片の採取方向は HT60 の場合は T-L 方向であり, 他の材料の場合はすべて L-T 方向である。

試験片形状を図1に示す。ただし, SM50A の場合のみ, 切欠きとして開き角 90 度のシェブロン形切欠きを採用し, 他の材料の場合には標準の直線切欠きを採用した。試験片板厚は 22 ないし 25.4 mm であり, a/w は 0.5 または 0.6 である。疲労予き裂は応力比 $R \leq 0.1$ で機械学会基準⁽¹⁾を十分に満足する小さい ΔK で導入した。

3. 実験方法

荷重負荷には島津オートグラフ IS-10T を用い, 毎分 0.5 mm のクロスヘッド速度で所定の荷重点変位まで試験片に負荷を加えた後, 除荷し, マーキングのため疲労でそれを破断した。

ストレッチ・ゾーン近傍のステレオ観察は, 走査形電子顕微鏡を用いて, 試料を水平および 15 度傾けた状態で撮影した破面写真に基づいて行った。ステレオ観察は大部分は試験片板厚のほぼ中央部で行ったが, 一部については板厚の 1/4 の位置においても行った。上下破面のマッチングは図2に示すように上下破面の同一基準点をほぼ水平方向に一致させ, 上下方向には変形がほとんどないと思われる疲労破断部をほぼ一致するように重ねて図を作成した。

SZW と CTOD の関係は, ストレッチ・ゾーン前縁に延性き裂が発生していない場合には図2(a)のように上下破面のステレオ観察を行った後, ストレッ

表 1 供試材の化学成分

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	V	B
HT80-1	0.12	0.33	0.83	0.011	0.009	0.81	0.44	0.40	0.25	—	0.04	—
HT80-2	0.12	0.26	0.86	0.017	0.007	—	0.78	0.41	0.17	—	0.04	0.09
HT60	0.13	0.44	1.15	0.018	0.014	—	0.18	—	—	—	—	—
SM50A	0.14	0.37	1.24	0.016	0.008	—	—	—	—	0.037	—	—
A533B	0.21	0.21	1.38	0.01	0.006	0.64	0.09	0.52	0.08	0.019	<0.01	—

表 2 供試材の機械的性質

Material	Yield stress σ_y MPa	Tensile strength σ_B MPa	Flow stress ($\sigma_y + \sigma_B$)/2 σ_{flow} MPa	Elongation ψ %	Reduction in area ϕ %
HT80-1	765	814	790	26	70
HT80-2	765	814	790	—	—
HT60	569	667	618	—	—
SM50A	333	500	417	33	71
A533B	471	618	545	29	67

チ・ゾーンの前縁を一致させて図を作成し, その図から SZW と CTOD をそれぞれ測定した。ストレッチ・ゾーン前縁に延性き裂が認められた場合には, (a)の方法に準じて, ストレッチ・ゾーン前縁を一致させて SZW と CTOD を求めるとともに, 図2(b)のように疲労予き裂面を基準面とし, 上下破面で別々に SZW とその高さを測定し, SZW はそれらの平均値で表し, CTOD は和で表した。

4. 実験結果および考察

4・1 第2段階における SZW_c の増加 この節ではストレッチ・ゾーンの発達段階の中で, 第2段階における SZW_c の増加 (このことについては前報⁽³⁾で詳論した) について簡単にふれておく。

図3に一例として JSME 基準に従って整理した HT80-1 の J と SZW の関係を示す。図中, 白印は延性き裂の発生していない実験点であり, ばつ印は $J > J_{in}/2$ を満足していないため, その実験点を鈍化直線から除外したことを示している。半黒印はストレッチ・ゾーン前縁のごく一部にディンプルが発生したことを示しており, 黒印はストレッチ・ゾーン前縁の 20 % 以上の領域で延性き裂が発生し, ストレッチ・ゾーンが SZW_c に達していたことを表している。以下の J と SZW 関係の図においても同様の記号を用いた。

図から明らかなように, 鈍化直線上にある延性き裂発生後の実験点 (半黒丸印および黒丸印) は J の増加とともに増大し, 図中縦軸に平行な実線で示された SZW_c の平均値に向って上昇している。これはストレ

図 1 試験片形状

図 2 SZW と CTOD の測定方法

ッチ・ゾーンの発達段階において基準にいう SZW_c に達した後、延性き裂が予き裂全面に発生するまでの第2段階で SZW_c の平均値が増加したことを表すものと考えられる。したがって、ここに示された第2段階における SZW_c の増加が、 SZW 法において J_{IC} が大きめに評価された第一の原因である。

4.2 SZW と $CTOD$ の関係 この節では第3段階のストレッチ・ゾーンの変形について SZW と $CTOD$ の関係から議論する。

図4(a), (b)にそれぞれHT80-1の場合について得られた J と SZW の関係および SZW と $CTOD$ の関係を示す。図(b)において、白印はストレッチ・ゾーン前縁に延性き裂の発生していない場合について、図2(a)の方法に従って SZW と $CTOD$ を求めたものであり、中黒点印および黒印はストレッチ・ゾーン前縁に延性き裂が発生した場合について、それぞれ図2(a)および(b)の方法に従って SZW と $CTOD$ を求めたことを表している。(以下でも同様)

延性き裂発生前の鈍化過程にある実験点(白印)について SZW と $CTOD$ の関係を決定すると、 $SZW = 0.90CTOD$ となった。鈍化角 β の算出はこの関係式を用い、次式に基づいて行った。

$$\beta = \tan^{-1}\{(CTOD/2)/SZW\}$$

この材料の場合には β は 29 度となった。

SZW と $CTOD$ 関係において、延性き裂発生後の実験点(中黒点印および黒印)の多くは、鈍化過程にある実験点より決定した直線上にある。すなわち延性き裂発生後も SZW と $CTOD$ の関係は鈍化過程におけるそれとほぼ同じ関係を保っていることになり、安定き裂成長下ではほとんど変形を受けなかったことを意味している。これは前報⁽⁶⁾における本材料のストレッチ・ゾーン近傍のステレオ観察より得られた推論と一致する。また前報でも指摘したように⁽⁶⁾、中村ら⁽⁴⁾が J の増加により SZW_c は変化しないとしている点に関しては、この種の材料の第3段階の現象と理解すれば、本観察結果と一致する。

なお、詳細に図を観察すると、延性き裂の発生した実験点の中で、図中矢印で示した SZW_c に達した後の、 J の大きい領域での中黒点印が $CTOD$ 側にずれる傾向が認められる。これは、延性き裂が安定に成長する前述の第3段階の過程で、基準面として用いた予き裂面が水平から少し傾斜したため、図2(a)の方法で求めた $CTOD$ が(b)の方法で求めた $CTOD$ より大きく評価されたことに起因している。他の材料についても二つの測定法の間には同じ傾向が認められた。

図5(a), (b)にそれぞれHT80-2について得られた J と SZW の関係および SZW と $CTOD$ の関

図3 HT80-1の J と SZW の関係

(a) J と SZW

(b) SZW と $CTOD$

図4 HT80-1の J と SZW および SZW と $CTOD$ の関係

(a) J と SZW

(b) SZW と $CTOD$

図5 HT80-2の J と SZW および SZW と $CTOD$ の関係

係を示す。この材料の鈍化過程にある実験点より求めた SZW と $CTOD$ の関係は $SZW=0.70CTOD$ となり、これに基づいて計算した β は 36 度であった。この材料の鈍化角は HT80-1 に比べてやや大きい値を示した。

ストレッチ・ゾーン前縁に延性き裂が認められたほとんどの実験点は鈍化過程の SZW - $CTOD$ 関係のかなり上方、すなわち SZW 側に移行している。この傾向は J の大きい実験点で顕著となるようである。(図中、黒および中黒で示された三角印) 実験点が直線の上方に移行した原因は、延性き裂発生後安定き裂成長下にある第 3 段階のストレッチ・ゾーンがある程度変形を受けたことによって、 SZW が実質より大きくなり、鈍化過程における SZW と $CTOD$ の関係が成立しなくなったためと思われる。

黒印が中黒点印に対して上方にくる傾向があるのはディンプル領域が傾斜した場合には、中黒点印では SZW は小さめに、 $CTOD$ は大きめに評価されるためである。

この材料のステレオ観察⁽⁶⁾によれば、延性き裂発生後はストレッチ・ゾーン前縁にはかなりの開口がみられ、その過程においてはストレッチ・ゾーンが変形を受けて伸された可能性が考えられたが、図(b)のき裂発生後の実験点もこれと同じ傾向を示している。

図 6(a), (b) にそれぞれ HT 60 における J と SZW および SZW と $CTOD$ の関係を示す。鈍化過程にある実験点より求めた SZW と $CTOD$ の関係は $SZW=0.55CTOD$ となり、 β は 42 度であった。

図(b)において、延性き裂発生後 SZW_c に達した実験点は若干ではあるが、鈍化過程の実験点より決定した直線の上方に位置している。黒印と中黒点印の位置関係にあまり大きな差がないことから、ディンプル領域の傾斜は HT 80-2 に比べ小さいものと考えられる。したがって、延性き裂の発生した実験点が直線の上方、すなわち SZW 側にずれている原因は第 3 段階にあるストレッチ・ゾーンが延性き裂の成長に伴って、わずかではあるが変形を受けたことによるものと思われる。

この材料のステレオ観察⁽⁶⁾によれば、 J の大きい試験片ではディンプル領域にも開口がみられ、ディンプル領域がある開き角をもって成長していることから、安定き裂成長下でストレッチ・ゾーンの変形の可能性が考えられたが、このステレオ観察による考察と図(b)の傾向はほぼ合致している。

図 7(a), (b) に SM50A について得られた J と SZW の関係および SZW と $CTOD$ の関係を示す。図(b)の記号 q の添字は板厚 1/4 の位置でステレオ観察を行ったことを示している。この材料の鈍化過程

(a) J と SZW (a) J と SZW (a) J と SZW (b) SZW と $CTOD$ (b) SZW と $CTOD$ (b) SZW と $CTOD$ 図 6 HT60 の J と SZW および SZW と $CTOD$ の関係図 7 SM50A の J と SZW および SZW と $CTOD$ の関係図 8 A533B 鋼の J と SZW および SZW と $CTOD$ の関係

にある実験点より求めた SZW と $CTOD$ の関係は $SZW=0.60CTOD$ となり、 β は 40 度であった。

図(b)における延性き裂の発生していない同一試験片の実験点において板厚の中央でステレオ観察を行った実験点が板厚の 1/4 の位置でステレオ観察を行った実験点より SZW および $CTOD$ ともに大きな値を示しているが、これは延性き裂発生前の SZW の板厚方向の分布が試験片板厚の影響を受けて放物線形を示したためである。

延性き裂発生後の実験点は直線の上方にあり、特に黒印はかなり上方に位置している。SM50A の場合は他の材料とは異なり延性き裂発生後、延性き裂の成長に伴ってディンプル領域はかなり傾斜し、その延長上にあるストレッチ・ゾーンもそれに引き伸ばされた形でかなりの変形を受けたため、黒印が直線の上方に著しく移行したものと思われる。

本材料のステレオ観察⁽⁶⁾によれば、延性き裂発生後は J の増加とともに延性き裂部は大きく開口し、延性き裂面も著しい傾斜を示し、ストレッチ・ゾーンのかなりの変形の可能性が考えられたが、図(b)のき裂発生後の実験点の傾向はこの観察結果とほぼ一致した。

図 8 (a), (b)に A533B 鋼について得られた J と SZW の関係および SZW と $CTOD$ の関係を示す。この材料の鈍化過程にある実験点より求めた SZW と $CTOD$ の関係は $SZW=0.78CTOD$ となり、 β は 33 度であった。

図(b)において延性き裂の発生していない同一試験片の実験点の中で、 q の添字を付した実験点が板厚中央部でステレオ観察が行われた実験点より下方に位置しているが、これは SM50A の場合で述べたことと同じ理由によるものと考えられる。

延性き裂発生後の実験点は SM50A の場合と同様、直線のはるか上方に位置しており、黒印でその傾向は特に著しい。これは本材料においても、延性き裂の成長に伴ってストレッチ・ゾーンが著しく開口・傾斜し、SM50A の場合と同じ機構によってストレッチ・ゾー

ンが変形を受けたためと考えられる。

本材料のステレオ観察結果⁽⁶⁾は SM50A のそれとほぼ類似しており、図(b)の実験点の傾向と良く一致していた。

4.3 破面観察 この節ではストレッチ・ゾーン内に発生した横割れについて述べる。

ストレッチ・ゾーンが実質より大きく計測される原因の一つは、著者らが前報⁽³⁾で指摘し、武藤ら⁽⁵⁾も報告しているように、ストレッチ・ゾーンの発達過程においてストレッチ・ゾーン内に横割れが発生し、ストレッチ・ゾーンが局部的に分断を受け実質より大きくなることである。

図 9 (a), (b)にそれぞれ HT80-2 および HT60 において観察されたストレッチ・ゾーン内に発生した横割れの電子顕微鏡写真の例を示す。HT80-1 を含め、これらの材料では共通して、図に示したような細い線状の横割れがストレッチ・ゾーン内部の数箇所で見られる。板厚の 3/8, 4/8, 5/8 点で撮影された電子顕微鏡写真において、このような横割れが視野に出現する確率は、HT80-1 の場合約 30 %, HT80-2 の場合約 35 %, HT60 の場合約 20 %であった。これらの材料については、割れの形状からみて、横割れの発生によって生じた SZW の見かけ上の増加は小さいものと考えられ、 SZW の測定においてそれほど考慮する必要はないものと思われる。

図 10 (a), (b)にそれぞれ SM50A および A533B 鋼において観察された割れの電子顕微鏡写真の例を示す。割れが出現する確率は SM50A の場合約 30 %, A533B 鋼の場合約 60 %であった。これらの材料において、ストレッチ・ゾーン内に発生した割れには HT80 および HT60 の例とは異なり、若干の開口がみられる場合があった。割れの開口量が SZW に対して占める比率はこの写真上で測定した範囲では、両材においてほぼ 10 %程度ではないかと思われる。横割れに開口がみられる場合は、その開口による SZW の測定値に対する影響量について考慮しなければならないが、割れの形状が一定していないため、その評価は

(a) HT80-2

(b) HT60

図 9 割れの電子顕微鏡写真

(a) SM50A

(b) A533B 鋼

図 10 割れの電子顕微鏡写真

かなり困難であると思われる。今後の詳細な検討が必要である。

4・4 考察 以上のことから明らかなように、 SZW_c は第2段階において J の増加とともに平均値を増し、第3段階でも材料によっては変形を受けて増大している。さらにストレッチ・ゾーン内の横割れが、見掛け上、 SZW_c の増加現象を助長している。これらの現象、とくに第2段階および第3段階における SZW_c の増加現象は、すでに広く行きわたっている J_{IC} 試験における SZW 法に対する印象、すなわち SZW_c は J の増加により変化しないとする考え方と異なっている。比較的高強度・低じん性の材料に対してはこのような SZW_c の増加現象はあまり大きくはなかったであろうが⁽⁴⁾、 J_{IC} 試験適用のメリットがむしろ低強度・高じん性材に対してあることを考えると、このことは十分に考慮に入れる必要がある。

J_{IC} 試験の日本機械学会基準⁽¹⁾では、制定時に実施された共通試験の結果からこのことがある程度予測されたので、 J の増加とともに SZW_c が増加すれば SZW 法を無効とする規定が設けられており、形式的には問題はない。しかし基準では SZW_c の増加現象をチェックすることを要求しているだけでなく、またどの程度の相違を増加とするかの定量的規定もないので、適用上で問題が現れる可能性がある。したがって機械学会基準に基づいて、 R 曲線法と SZW 法で求めた J_{IC} の値の間に整合性の欠ける最大の原因は SZW_c の増加現象にあると考えてよからう。今後更に SZW に関する資料を蓄積し、現基準をよりよいものに改訂していく必要がある。

さらに著者⁽³⁾および武藤ら⁽⁵⁾も指摘している、ストレッチ・ゾーン内に発生した割れが開口し、見かけ上ストレッチ・ゾーンが大きく観察されることも整合性を欠く一因であろう。しかし、こういった割れが SZW 測定に対してどの程度の影響を与えているかについては今後さらに詳細な検討が必要であるが、現時点では武藤ら⁽⁵⁾の報告に示されているように、ストレッチ・ゾーン内に割れの発生が観察される場合には、ストレッチ・ゾーンから割れの部分を減じて、ストレッチ・ゾーン幅を定めるのが常識的であろうと思われる。著者らはストレッチ・ゾーン内に発生した割れが開口するのは、低強度・高じん性材の場合、 J の大きい第3段階においてではないかと推測している。

以上のことから SZW 法による J_{IC} と R 曲線法による J_{IC} 値間に整合性を与えるという立場にたてば、前報⁽⁶⁾で提案したように、 SZW 法により J_{IC} を決定する場合、き裂発生点 (J_{in}) 近傍に実験点を集中し、第2段階における SZW_c の平均値の増加および第3段階におけるストレッチ・ゾーンの変形と割れの開口による影響をできるだけ小さくするのが妥当であると思われる。

なお本実験で得た鈍化角は鋼種によって異なるが、29度ないし42度であり、鋼の鈍化角が10度ないし45度であるとする従来の結果⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾とほぼ一致した。

5. 結 言

数種類の鋼を用い、ステレオ観察に基づき主として SZW と $CTOD$ を測定し次の結論を得た。

(1) SZW_c は第2段階において増加する。

(2) SZW_c の小さい高強度材では SZW と $CTOD$ の関係は鈍化過程とき裂発生後ではほとんど変わらず、ストレッチ・ゾーンは安定き裂成長下ではほとんど変形を受けていなかった。これは従来の知見と一致している。

(3) 低強度・高じん性材では、き裂発生後の SZW と $CTOD$ の関係は著しく SZW 側に移行し、ストレッチ・ゾーンは安定き裂成長下でかなりの変形を受けているものと思われる。

(4) SZW_c の大きい高強度材および中強度材ではストレッチ・ゾーンが安定き裂成長下で何がしかの変形を受けているものと思われる。

(5) SZW 法により J_{IC} を決定する場合には、 J_{in} 近傍に実験点を集中し、第2段階における SZW_c の増加および第3段階におけるストレッチ・ゾーンの変形および割れの開口による影響をできるだけ小さくするのが妥当であると思われる。

文 献

- (1) 日本機械学会基準, JSME, S001-1981.
- (2) 大路・ほか3名, 機講論, No. 810-2 (昭56-4), 141.
- (3) 大路・ほか3名, 材料, 31-344 (昭57), 425.
- (4) 中村・ほか2名, 機論, 45-392, A (昭54), 336.
- (5) 武藤・ほか3名, 機講論, No 834-3 (昭58-3), 100.
- (6) 大路・ほか5名, 材料, 32-355 (昭58), 372.
- (7) 佐藤・ほか3名, 日本造船学会論文集, 144 (昭53), 303.
- (8) 橋内, 材料, 29-321 (昭55), 562.