(昭和 45 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

長い切欠から発生する脆性破壊

正員 秋 田 好 雄*   正員 矢 田 敏 夫*
正員 酒 井 啓 一*   正員 飯 野 暢*

Effect of Slit Size on Brittle Fracture Initiation

by Yoshio Akita, *Member*   Toshio Yada, *Member*

Keiichi Sakai, *Member*   Nobu Iino, *Member*

Summary

In investigating the brittle fracture initiation characteristics of structural steels, the problem has to be solved whether the laboratory data obtained by experiments using specimens of small size can directly be applied toward predicting the brittle fracture initiation in actual steel structures. A good deal of studies have been made in investigating the properties of low stress level brittle fracture which accompanies very little plastic deformation, which is comparatively easier problem to deal. However from practical view point, it is of more importance to clarify so-called a high stress level brittle fracture which involves a larger amount of plastic deformation. It has been found that the use of COD concept is effective in approaching problems involving large plastic deformation.

Authors performed brittle fracture initiation tests using deep notch specimens of different size and discussed the validity of the application of laboratory test data using small test pieces toward larger structures and justified that the critical COD value predicts the initiation of brittle fracture upto around the general yielding stress level, irrespective of the specimen size.

1 緒 言

鋼構造物に生じる脆性破壊の発生特性を検討するときには、実験室的な小形の試験片による脆性破壊試験の結果をどのようにして実際の構造物の場合に適用させるかが重要な問題である。一般の構造用鋼では、切欠つき引張試験片を用いる脆性破壊発生試験においても、破壊に先だち大きな塑性変形を生じる場合が多い。このように大きな塑性変形を伴う場合あるいは全面降伏を生じてからの脆性破壊については従来のエネルギー論を中心とした解析手法は適用が困難である。したがって従来の研究においては、主として、低応力脆性破壊を生じさせ得るような試験方法の開発に努力がなされ、ディープノッチ試験、切欠つき縦溶接試験、I型縦溶接試験等苛酷な条件下での試験方法が開発されるに至った。

しかしながら、たとえば軟鋼のディープノッチ試験において認められるような net 平均応力が降伏点を越える高応力脆性破壊を生じる温度領域において、実際の構造物に対応づける上で破壊試験結果をどのように評価すれば良いかは必ずしも明確にされていない問題である。

著者らは、き裂の開口変位に注目した破壊理論を適用し、限界のき裂開口変位量(限界 COD)を破壊の条件にとることにより、切欠先端部に引張り溶接残留応力が分布している場合のように、塑性変形領域が大きい場合についても脆性破壊特性を定量的に定めることができること、また応力を受ける切欠の変形状態を定量的に定めることができることを先に報告した^{2,3)}。これらの研究において破壊条件として限界 COD 値をとることがかなり有効であることが認められたので、本研究では寸法の異なるディープノッチ試験片を用い切欠長さが脆性破壊の発生におよぼす影響について実験的に調べた。そして切欠長さが異なる場合にも限界の COD 値で試験結果がか

* 石川島播磨重工業株式会社技術研究所

なり良く整理できることを知った。またこれらの試験結果を検討し実験室的な小型切欠き試験片による脆性破壊発生試験の意義について考察を行つたところを報告する。

2 実験的研究

非常に長い切欠を有する構造物の脆性破壊発生特性を知るため、あるいは小形の脆性破壊発生試験を行ない、大形構造物の脆性破壊特性を知ることとを目的として次のような実験的研究を行つた。

板幅 1,000 および 400 mm の A, B 2 種類のディープノッチ試験片⁷⁾を製作し、脆性破壊の発生特性の比較, 検討を行なつた。破壊試験に際してはクリップゲージを用い、各応力レベルでの開口変位量, 脆性破壊の発生に対する限界開口変位量の計測を行なつた。

2.1 供試材

供試材は板厚 19 mm の造船用 A 級軟鋼板である。化学組成および機械的性質を Table 1 および Fig. 1 に示す。

2.2 試験片形状

試験片形状は Fig. 2 に示すような素材ディープノッチ試験片である。試験片幅を $2h$, 切欠長を c すれば、 c/h は全て 0.4 で一定である。試験片半幅 h は 500 mm, 200 mm の 2 種であり、これらの試験片符号を順に A, B とする。切欠部は先端を $0.1r$ とし先端部 2 mm を除く部分は、クリップゲージ挿入のため幅 3 mm に機械加工されている。

2.3 開口変位の計測

直径 40 mm, 幅 10 mm のクリップゲージ⁴⁾を切欠先端より 8 mm の位置を中心に、板の表裏面より挿入し開口変位の計測を行なつた。クリップゲージに貼布された抵抗線歪ゲージの変化を動的歪計を介し、電磁オシロにて記録させた。クリップゲージは 5/1,000 mm 精度の標準ゲージにより検定を行なっている。

2.4 脆性破壊の発生試験結果

A, B 各々の試験片シリーズについて破壊試験結果を Table 2 に示す。なお各試験片は一定温度に冷却後単調に荷重を加え破壊させている。

計測された限界 COD 値と温度との関係を Fig. 3 に示す。A, B の各試験結果から切欠長さが異なる場合においても限界 COD 値は温度によって定まるほぼ一定値

Fig. 1 σ_B and σ_Y vs. Temperature

SPECIMEN TYPE		DIMENSION		
		h (mm)	c (mm)	l (mm)
A	Deep Notch Specimen (Large Size)	500	200	1000
B	Deep Notch Specimen (Regular Size)	200	80	500

Fig. 2 Geometry of specimens

Table 1 Chemical Compositions and Mechanical Properties of the Material used for Testing

Steel	Chemical Compositions					Mechanical Properties	
	C	Si	Mn	P	S	As received	
						σ_Y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)
19 mm thick	0.17	0.03	0.85	0.020	0.028	25.0	45.2

Table 2 Results of Critical COD's for Different Size Specimens

Specimen (No.)	Temperature (°C)	COD crit. (mm) (larger)	COD crit. (mm) (smaller)	Net fracture stress, σ_n (kg/mm ²)	σ/σ_Y
Deep Notch Specimen (large size)					
A-1	— 9	2.97	2.86	31.5	1.19
A-2	— 34	2.07	1.16	32.1	1.15
A-3	— 63	1.34	0.73	31.5	0.93
A-4	— 77	0.77	0.53	28.7	0.82
A-5	— 90	0.35	0.33	25.5	0.71
A-6	—110	0.10	0.09	15.5	0.40
Deep Notch Specimen (regular size)					
B-1	20	>10	>10	37.1	1.48
B-2	— 10	25.0	2.49	32.4	1.22
B-3	— 40	1.22	0.40	32.1	1.09
B-4	— 60	0.64	0.35	31.5	0.99
B-5	— 65	0.68	—	31.3	0.96
B-6	— 68	0.59	—	33.3	1.01
B-7	— 70	0.73	—	32.3	0.97
B-8	— 81	0.45	0.27	31.1	0.90
B-9	— 87	0.31	—	33.8	0.96
B-10	— 95	0.29	0.17	30.0	0.82
B-11	—125	0.07	0.04	14.7	0.37
B-12	—196	0.05	0.04	12.3	0.24

Fig. 3 Effect of Temperature on Critical COD in Mild Steel Specimens

をとることが認められる。

3 試験結果の解析および考察

3.1 きれつの開口変位の計測値に対する評価

全面降伏応力以下の荷重においては、きれつの開口変位量は BCS model を用いて次のように計算できる。

$$\phi(x) = \frac{8h(1-\nu^2)}{E\pi^2} \sigma_Y \cdot \sin \alpha \cdot I(\varphi) \quad (1)$$

$$I(\varphi) = \int_x^{\pi/2} \frac{\cos \chi}{\sqrt{1-\sin^2 \alpha \sin^2 \chi}} \ln \left| \frac{\sin(\chi+\varphi)}{\sin(\chi-\varphi)} \right| d\chi$$

$$\frac{\pi\sigma}{2\sigma_Y} = \cos^{-1}(\sin \varphi) \quad (2)$$

ただし

$$\sin \chi = \sin(\pi x/2h)/\sin \alpha$$

$$\sin \varphi = \sin(\pi c/2h)/\sin \alpha$$

$$\sin \alpha = \sin(\pi a/2h)$$

$\phi(x)$: 点 x における開口変位量

a : 塑性域の先端を示す座標

h : 板幅の 1/2

c : きれつ長さ

σ : Gross 応力

σ_Y : 降伏応力

ν : ポアソン比

E : ヤング率

著者らは先に、開口変位量が切欠の受ける応力分布および、切欠中の計測点の位置によって異なることを知り、BCS モデルによる計算式で測定する位置を考慮に入れて計算する方法について報告している²⁾。(1) 式および (2) 式を用いて、本実験に用いた試験片シリーズ A および B について計測位置および切欠先端における変位計算を図示したのが Fig. 4 である。Fig. 4 中には A-2 および B-2 試験片の計測結果をあわせて示す。た

Fig. 4 Crack Opening Behaviour in the Vicinity of Crack Tip

だし実験計測結果は左右切欠き計測値の平均である。Fig. 4 で認められる様に計測位置における計算値は全面降伏以下の応力状態に対して良い一致を示すことがわかる。しかしながら応力が全面降伏状態に近づくにつれ実験値と計算値との差が大きくなる傾向にある。荷重を加えながら両切欠きの変位挙動を追って行くと、特に全面降伏応力に近い状態で破壊に到る場合の限界 COD 値のばらつきが顕著である。これは試験片にわずかに偏心荷重が加わっている場合、降伏応力レベルに達すると切欠き先端部分の応力増分が大きい方の塑性変形が他方に比し急激に進展し、限界値に達するためと思われる。

3.2 全面降伏に対する開口変位量について

低応力脆性破壊を net 断面応力が降伏応力以下、いいかえれば全面降伏以下の応力に対する破壊と定義すれば、低応力破壊を生じる上限の開口変位量 $\phi(x)$ と板幅 h との関係は次のように表わされる。

全面降伏の条件は

$$a = h$$

であるからこのとき

$$\sin \alpha = \sin(\pi a/2h) = 1$$

したがって (2) 式は

$$\frac{\pi\sigma}{2\sigma_Y} = \cos^{-1}(\sin(\pi c/2h))$$

故に

$$\sigma = \frac{h-c}{h} \cdot \sigma_Y \quad (3)$$

また (1) 式は

$$\phi(x) = \frac{8h(1-\nu^2)}{E\pi^2} \cdot \sigma_Y \cdot \int_{\chi'}^{\pi/2} \ln \left| \frac{\sin(\chi' + y')}{\sin(\chi' - y')} \right| d\chi' \quad (4)$$

ただし

$$\sin \chi' = \sin(\pi x/2h)$$

$$\sin y' = \sin(\pi c/2h)$$

とかける。

(4) 式から、全面降伏応力に対する開口変位量は、 c/h が一定のときは、板幅と降伏応力の積 $h \cdot \sigma_Y$ に比例することがわかる。

したがって、板幅の大きい試験板を用いる程、低応力脆性破壊を生じさせやすくなると考えられる。Fig. 2 に示した計測値を比較すれば、同一平均応力に対して、試験片の大きさにより開口変位量が大きく異なることがわかる。計算上は全面降伏時の A、B 試験片の開口変位量の比は、同一温度に対してきつて先端位置では 2.5 : 1 である。また計測位置に対しては大略 2 : 1 である。

3.3 破壊応力と試験片の大きさとの関係

前述の通り、同じ応力レベル下の COD 値は切欠き長さに比例して大きくなる。したがってもし材料が破壊に到る時の限界開口変位量が寸法、形状によらず一定としたら、広幅の試験片は小型試験片に比べて低い応力レベルにて限界開口変位に達する。Fig. 5 は各温度に対する $c/h=0.4$ の試験片について破壊応力を示したもので、板幅が大きくなるほど応力で破壊に到ることを示している。標準ディープノッチ、広幅のディープノッチ試験片による実験値も全面降伏応力レベル以下では理論解析による曲線と合致した傾向を示している。

このようにして、小形の試験片に対して限界の COD 値を求めておけば、大形試験片における低応力脆性破壊特性を計算で求めることができる。

3.4 低応力脆性破壊が生じる上限温度について

(4) 式によれば、 c/h 一定のとき h が大きくなれば、全面降伏時の開口変位量が大きくなる。したがって限界開口変位量を破壊発生条件とする以上、低応力脆性破壊温度領域は順次高温側に移行し、net 破壊応力が降伏点を越えるいわゆる高応力脆性破壊の発生温度領域は縮小される。しかしながら一定の開口変位量を越える温度領域では延性破壊を生じるものとするれば、低応力脆性破壊の生じ得る上限温度は、標準試験片の延性-脆性破壊遷移温度を越えることはないと考えられる。

Fig. 6 に他の造船用軟鋼材によるディープノッチ試験の結果を参考までに示すが、延性-脆性破壊遷移温度は

Effect of Specimen Width on Fracture Stress.

Fig. 5 Effect of Specimen Width on Fracture Stress

Fig. 6 Effect of Temperature on Fracture Stress of Deep Notch Specimens

切欠長さによつてはほとんど変化していないことが認められる。

結 論

板幅 400 mm および 1,000 mm のディープノッチ試験片を用いて脆性破壊の発生試験を行ない次の結論を得た。

- 1) 脆性破壊発生に対する限界開口変位量は試験片の大きさによらず、温度によつてほぼ一定である。
- 2) 板幅と切欠長さとの比が一定のときは、全面降伏を生じる応力値に対する開口変位量は、同一温度におい

ては板幅（切欠長）に比例する。

3) したがって 1) を前提として、低応力脆性破壊を生じる温度領域は、切欠長さの増大によつて高温側に移行する。しかしながら本試験のような拘束の小さな試験片では標準 deep notch 試験片の脆性-延性破面遷移温度を越えることはないと考えらる。

4) B.C.S. model による開口変位の計算式を用いれば、小形切欠試験片の結果から大形試験片の脆性破壊発生特性を計算できる。

謝 辞

本研究にあたり、造船学会溶接研究委員会の第一分科会主査である金沢教授をはじめ委員各位から有益なご教示、ご討論をいただいた。研究の遂行に当りましては石川島播磨重工業（株）技術研究所の松平所長、藤田部長のご支援をいただいた。ここに深く謝意を表します。また実験に協力された篠塚氏にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) B. A. Bilby, A. H. Cottrell, K. H. Swinden: The Spread of Plastic Yield from a Notch, Proc. Roy. Soc. A 279 (1964)
  - 2) 秋田, 矢田, 酒井: 鋼構造物に発生する脆性破壊と残留応力, 造船学会論文集, 第 125 号 (1969)
  - 3) 酒井, 飯野: きれつの変位挙動と脆性破壊の発生, 造船学会論文集, 第 127 号 (1970)
  - 4) 越賀: クリップゲージによる COD の測定, TM 委員会資料, TM-4.
  - 5) 矢田, 酒井: 分布応力を受ける不連続構造物に生じる脆性破壊の発生に関する一考察, 造船学会論文集, 第 123 号 (1968)
  - 6) 東京大学船舶工学科: COD に関する 2, 3 の実験, TM 委員会資料, 1970.6.24.
  - 7) 秋田, 池田: 脆性破壊の発生に関する研究 (第 1 報)——Deep Notch Test について——, 造船学会論文集, 第 112 号 (1962)
-