

(昭和 55 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

構造的応力集中部における脆性破壊 発生特性について (第 2 報)

正員 永 井 欣 一* 正員 矢 島 浩**
正員 梶 本 勝 也*** 正員 日 野 隆 博**
南 渚 夫***

On the Characteristics of Brittle Fracture Initiation in a Structurally Stress
Concentrated Region (2nd Report)

by Kin-ichi Nagai, *Member* Hiroshi Yajima, *Member*
Katsuya Kajimoto, *Member* Takahiro Hino, *Member*
Nagio Minami

Summary

In the previous study, basic examinations were made on the COD in small structural models with artificial slits in the structurally stress concentrated regions to develop a quantitative estimation method of flaws existing in stress concentrated regions. As a result, it was made clear that flaws in stress concentrated regions could be quantitatively evaluated.

This study using larger structural models aimed at establishing a more general strength estimation method by experimentally determining variations in the structural stress concentration, effect of notch lengths and combined effect of welding residual stresses and material deterioration.

1 緒 言

船舶、海洋構造物、压力容器等の各種溶接構造物に発生した脆性破壊損傷の多くは、構造的な不連続部などの応力集中の高い箇所が起点となっている。したがって、これら各種構造物の脆性破壊事故防止は勿論のこと、合理的な設計、工作、検査基準が採られるようにするためには、応力集中部に存在する欠陥を定量的に評価する方法を確立する必要がある。

このような背景から、本問題を解決するために一連の研究に着手し、前報¹⁾で、人工スリットを構造的応力集中部に設けた小型構造模型体について COD 概念を適用した基礎的解析を行なって、応力集中部における欠陥評価が定量的に行なえる見通しを得た。

そこで本研究では、さらに大型の構造模型試験体を使用し、構造的応力集中に溶接残留応力、溶接による材質劣化等が重量した結果、一般に使用される温度付近で脆

性破壊を生じる場合に COD 概念による評価法が適用できるか否かについて検討を行なった。さらに、実際の構造物においては、その応力集中部は複雑なひずみ勾配をもつことが多いが、このような場合の欠陥評価法についても、構造模型体の種類と切欠き長さを変えた試験を行なうことによって検討し考察した。

2 供試試験体および試験方法

供試材は板厚 20 mm の一般船体用軟鋼で、その化学成分と機械的性質は Table 1 に示すとおりである。

2.1 中央スリット付平板試験片

後述の構造試験体の脆性破壊発生試験との比較のために、平行部の板厚が 20 mm、板幅 400 mm の中央に長さ 2C が 40 mm の板厚貫通スリット(先端半径 0.1 mm)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

Kind of steel	Thickness of plate (mm)	Chemical composition (%)					Mechanical properties		
		C	Si	Mn	P	S	σ_y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	El (%)
KAS	20.0	0.16	0.19	0.64	0.018	0.015	22.0*	44.3	24.5

* Lower yield point

* 広島大学工学部

** 三菱重工業(株)長崎研究所

*** 三菱重工業(株)広島研究所

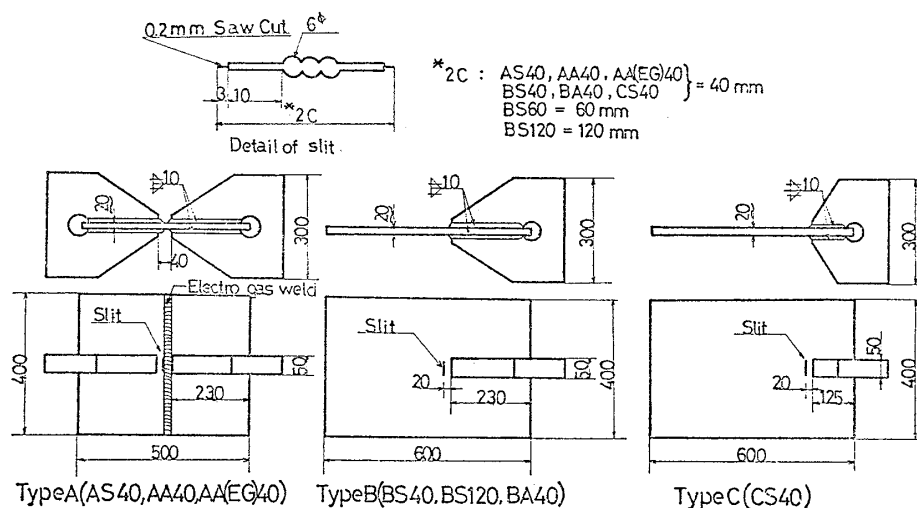


Fig. 1 Test specimens

を設けた母材平板試験片を用意した。

2.2 構造試験体

試験対象とした構造試験体の形状寸法を Fig. 1 に示す。

Type A 試験体は、構造が大型化し、著しい構造的応力集中に溶接残留応力、溶接による材質劣化が重畳する場合について前報¹⁾で明らかにした欠陥評価法の適用を検討する目的で製作したもので、前報の小型構造試験体の各寸法をほぼ2倍に拡大した形状寸法である(ただし、スチフナ間の距離は前報の試験体と同一にしている)。すなわち、上述の平板試験片と同一寸法の平板の両面に板厚 50mm のスチフナを被覆アーク溶接によって対称的にすみ肉溶接で接合し、スチフナを通して平板に荷重が伝達される構造で構造的応力集中が生じるようになっている。また、スチフナの溶接によって平板部には高い溶接残留応力が生じる。本研究ではこの溶接残留応力が破壊に及ぼす影響を調べるために、溶接のままのものと溶接後残留応力除去焼鈍 (625°C×2hr.) を行なったものの両者について検討を加えるとともに、さらに溶接による材質劣化が重畳した場合の影響を調べるために、エレクトロガス溶接 (溶接入熱: 約 140kJ/cm) によって製作した横継手付きの平板を構造試験体に組立てたものを用意した。

なお、各構造試験体に溶接されたスチフナ間の平板にはその板幅中央に平板試験片と同一寸法のスリットが設けられている。スリットの機械加工は、溶接のままの試験体については溶接後に、残留応力除去焼鈍を行なった試験体については焼鈍後にそれぞれ行なった。また、エレクトロガス継手付き試験体については、スリット先端が溶接境界部に位置するようにした。

Type B および Type C 試験体は Type A 試験体に比較して複雑なひずみ勾配を有する場合の欠陥評価法を検討するために製作したもので、図に示すようにスチフナを平板の両面の片側にだけ設けることによって荷重方

Table 2 Test condition

Type of specimen	Location of slit	Heat treatment	Slit length 2C mm			
			0	40	60	120
A	Base metal	SR	AS0	AS40	—	—
	Base metal	As weld	AA0	AA40	—	—
	Bond of EGV	As weld	—	AAEG40	—	—
B	Base metal	SR	BS0	BS40	BS60	BS120
	Base metal	As weld	BA0	BA40	—	—
C	Base metal	SR	CS0	CS40	—	—

向にひずみ勾配が生じるようにしている。また、Type B と C では、平板へのスチフナの挿入長さを変えることによって両者の構造的応力集中度とひずみ勾配の程度に差を生じるようにしている。いずれの試験体もスチフナ先端の平板部に板厚貫通スリットを設けたが、Type B 試験体についてはスリット長さを $2c=40, 60, 120$ mm の3種類に変えた。応力除去焼鈍を行なった Type C 試験体については $2c=40$ mm についてのみ検討した。

以上に述べた各構造試験体の試験条件とスリット長さを表わす説明記号を一括して Table 2 に示す。

2.3 試験方法

以下に示すように4種類の試験を行なった。

(1) 構造解析試験

試験に供した各構造試験体がどのような応力集中度とひずみ勾配を有するかを知るために、まず弾性 FEM 計算を適用してスリットがない状態の応力解析を行なった。なお、計算は前報と同様な手法によってスチフナと平板を3次元板構造モデルとして行なった。次いでスリットのない構造試験体について室温で引張試験を行ないひずみゲージおよびクリップゲージなどを用いて、各位置におけるひずみおよび overall strain を測定した。また、構造試験体の溶接による残留応力は、ひずみゲージによる応力弛緩法によって測定した。

(2) 室温試験におけるスリット先端開口量の測定

スリットを設けた構造試験体について、前報¹⁾と同様

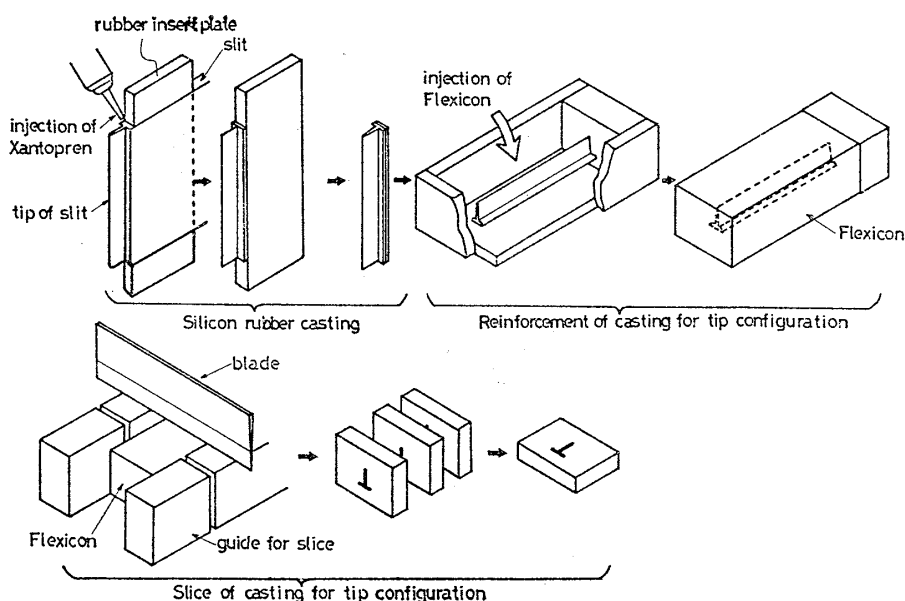


Fig. 2 Procedure of silicon rubber casting for tip configuration

にスリットをはさみ標点距離が 10mm となるようにコンタクトボールを打ち込み、スリットの長さ方向の各位置における開口量を押し当て式機械ひずみ計によって各荷重段階ごとに計測した。他方, Fig. 2 に示すシリコンゴムキャスト法によって、直接スリット先端部の開口量を計測することを試みた³⁾。このスリット先端の開口量の計測に加えて、スリットが存在することによって生ずる先端部周辺の変形領域を知るためにひずみゲージによってスリット周辺のひずみを測定した。

(3) 低温破壊試験

スリットを設けた構造試験体について、試験温度を種々変えて破壊試験を行ない、破壊応力およびスリット開口変位を計測した。なお、スリット開口変位の計測は、リング型クリップゲージを用いてスリット長さの中央位置で行なった。

(4) 三点曲げ COD 試験

構造試験体の限界開口変位との相関を見るために BS-DD 19 に準拠した三点曲げ COD 試験(ただし、構造試験体に合わせてスリット先端は機械加工によってその半径を 0.1mm とし、疲労亀裂は設けていない)を行なった。三点曲げ試験は、受領のままの母材、残留応力除去焼鈍(625°C×2hr.)を行なった母材およびエレクトロガス溶接継手の溶接境界部の3種類について計画した。しかし、溶接のままの構造試験体については、残留応力場にスリットを設けたことになるので、スリット加工時にその先端部は塑性変形を受け試験に供するまでの期間にひずみ時効を起こし脆化する可能性が考えられる²⁾。そこで溶接のままの Type A 構造試験体(AA 40)のスリット先端の位置から試験片を採取し、三点曲げ試験を追加して行なった。

3 試験結果

3.1 構造解析試験

ひずみゲージによって測定して得た構造試験体の平板部に作用する荷重方向の応力分布の一例を Type A 試験体については Fig. 3 に、Type C 試験体については Fig. 4 にそれぞれ示す。Type A はスチフナを不連続にしているため、スチフナ間の断面における応力は荷重に直角な方向に急激な応力勾配を生じているが、スチフナ間の各位置における応力はあまり変化せず、ほぼ一定と

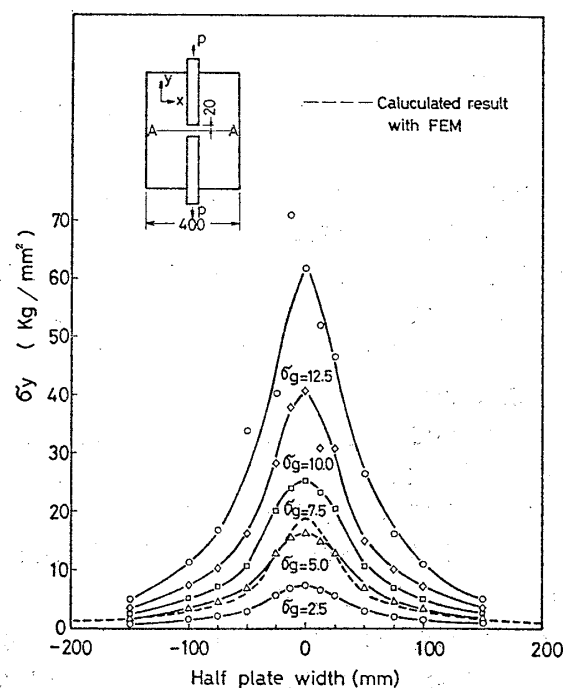


Fig. 3 Distribution of loading direction stress on A-A line (ASO)

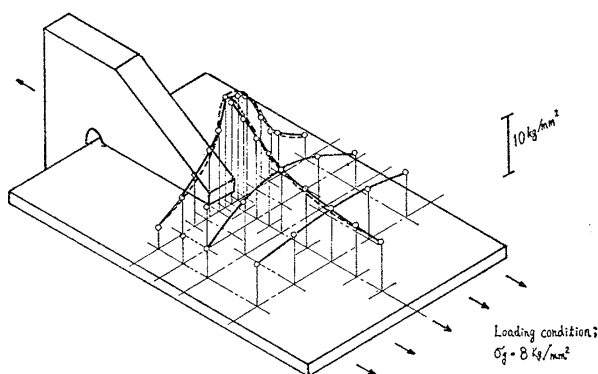


Fig. 4 Distribution of loading direction stress (CSO)

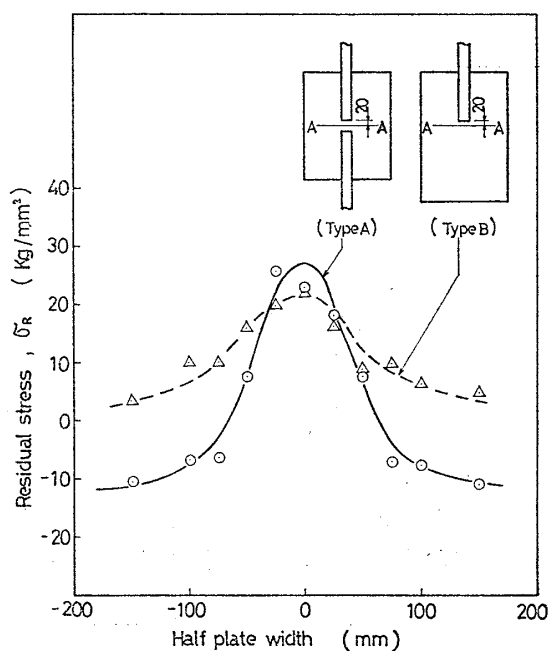


Fig. 5 Distribution of welding residual stress (Loading direction stress on A-A line)

考えられる。他方、Type B および Type C の場合、スチフナが平板の片方のみにあるので荷重に直角な方向だけでなく荷重方向にも応力勾配を生じる。なお、これらの図中の点線は FEM による解析結果を示したもので、実測値と比較的よく一致している。そこで、FEM によって求めたスリット先端部の応力集中率 K_t を各構造試験体について示すと次のようになる。すなわち、Type A (AS0) は $K_t=3.80$ 、Type B (BS0) は $K_t=2.32$ 、Type C (CS0) は $K_t=3.50$ である。Type B に比べて Type C が平板へのスチフナ挿入長さが短いため高い応力集中率を示している。

次に、溶接のままの構造試験体の溶接残留応力分布を示すと Fig. 5 のようになる。Type A、Type B とともにスチフナと平板のすみ肉溶接によって、スチフナ先端部には降伏点に達する高い溶接残留応力が生じている。

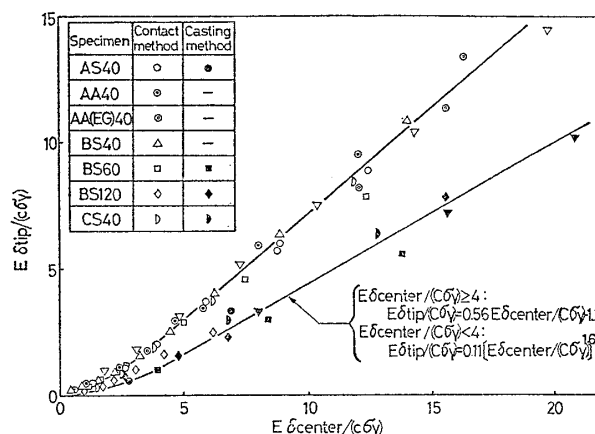


Fig. 6 Relation between $E\delta_{tip}/(c\sigma_Y)$ and $E\delta_{center}/(c\sigma_Y)$ at room temperature

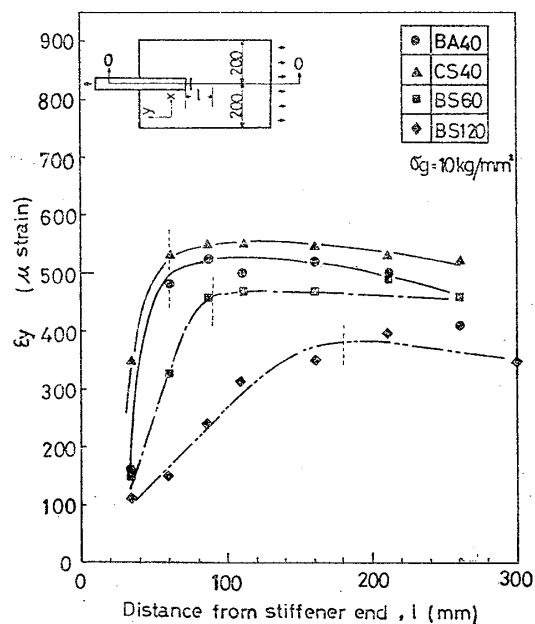


Fig. 7 Distribution of strain on O-O line with notched specimens (ϵ_Y : strain parallel to loading direction)

3.2 スリット開口挙動の解析

室温で押し当て式機械ひずみ計およびシリコンゴムキャスティング法を用いて計測したスリット先端の開口量 δ_{tip} と中央位置の開口量 δ_{center} をそれぞれ無次元化して両者の関係を示すと Fig. 6 のようになる。無次元化した δ_{tip} と δ_{center} の間には、押し当て式機械ひずみ計による場合、スリット長さが長い BS 60, BS 120 試験体は直線関係からはずれる傾向にあるが、シリコンゴムキャスティング法の測定結果によるとすべての試験体について一定の関係が認められた。これは、すでに述べたように押し当て式機械ひずみ計による方法は標点距離 10 mm

間の変位を計測する間接的計測法であるために、スリット先端の開口量に標点間の変位が加わったためと考えられる。そこで、後述の低温破壊試験においては δ_{center} を計測し、 δ_{center} から δ_{tip} への換算は Fig. 6 中に表示シリコンゴムキャスティング法による関係式を用いて行なうこととした。

次に、スリットが存在することによって生ずる変形領域を知るために、ひずみゲージによりスリット周辺のひずみを計測した結果の一例を Fig. 7 に示す。試験体により多少のばらつきはあるがスリットの存在によって荷重方向のひずみが減少する領域は図中に示した点線の位置となり、その領域の大きさはおおむねスリット長さの 1.5 倍である。

なお、各構造試験体について計測したスリット開口変位が試験体の種類によってどのように変化するかは、低温破壊試験の結果と合わせて次章で考察することとした。

3.3 低温破壊試験

低温破壊試験で得られた各試験体の破壊応力と温度の

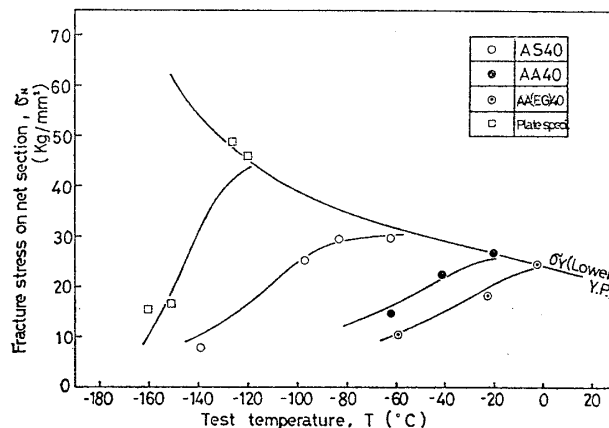


Fig. 8 Fracture stress in plate specimen and type A specimen at various temperature

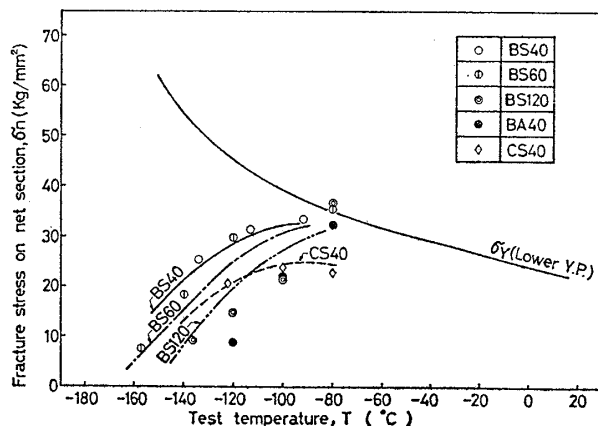


Fig. 9 Fracture stress in type B and type C specimen at various temperature

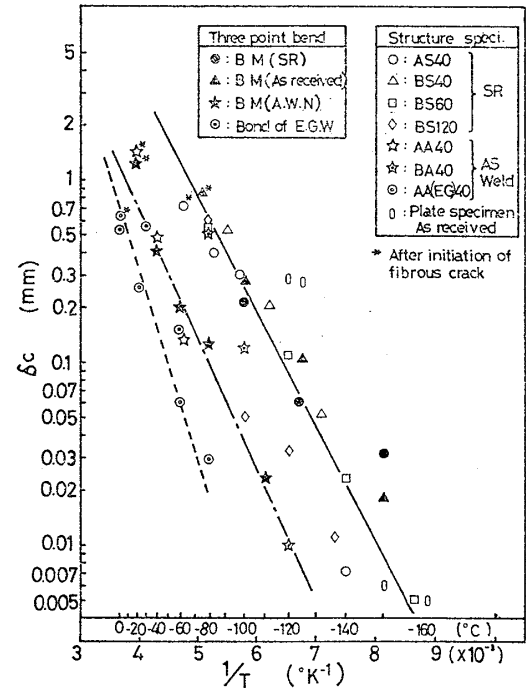


Fig. 10 Relation between critical COD and temperature

関係を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。なお、図中の各曲線は、4.1 の方法で推定した破壊応力曲線である。平板試験片の低応力脆性破壊はごく低温で起こり、軟鋼平板に単に欠陥がある場合の脆性破壊は 0°C 程度では問題とならないが、これに構造的応力集中、溶接残留応力、材質劣化等が重畳すると -20~0°C の使用温度で脆性破壊を生じるようになることを Fig. 8 は示している。また、Type C の構造試験体の場合、応力集中部が降伏するとその箇所にとくに高いひずみ集中を局部的に生じるために、高応力領域における破壊応力が実断面降伏応力よりも小さくなることを Fig. 9 は示している。

次に、低温破壊試験において実測した各試験体のスリット先端の限界開口変位 δ_c と温度の関係を Fig. 10 に示す。なお、図中には同一材料を用いて実測した三点曲げ COD 試験の結果が一緒に示してある。構造試験体および三点曲げ COD 試験による δ_c と絶対温度の逆数の間にはほぼ同一の直線関係が成立することを同図は示している。とくに、2.3 (4) 項で述べたように、溶接のままの構造試験体 Type A (AA 40) のスリット先端部から採取した試験片による三点曲げ COD 試験結果と構造試験体の δ_c (図中★, ☆印) はほぼ一致しており、残留応力場に欠陥が存在するとひずみ時効によって欠陥先端部はかなり脆化することを確認できたことは興味深い結果といえよう。

4 考 察

4.1 破壊応力曲線の推定について

構造物の応力集中部における欠陥の破壊力学的パラメ

ータを理論的に検討することは不可能な場合が多く、このことが応力集中部に存在する欠陥を定量的に評価する上で大きい障害となっていた。

前報¹⁾の基礎的な研究において、亀裂開口量と応力について無次元化表示法を適用すれば、室温における応力集中部の亀裂開口挙動から低温におけるそれが容易に推定可能であることが示された。

そこで、本研究でさらに大型の構造模型体の試験により得られた各試験体の室温および低温におけるスリット

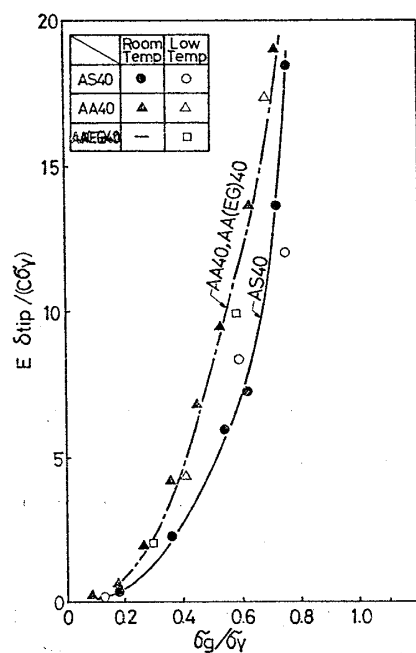


Fig. 11 Relation between $E\delta_{tip}/(c\sigma_Y)$ and σ_g/σ_Y (type A specimen)

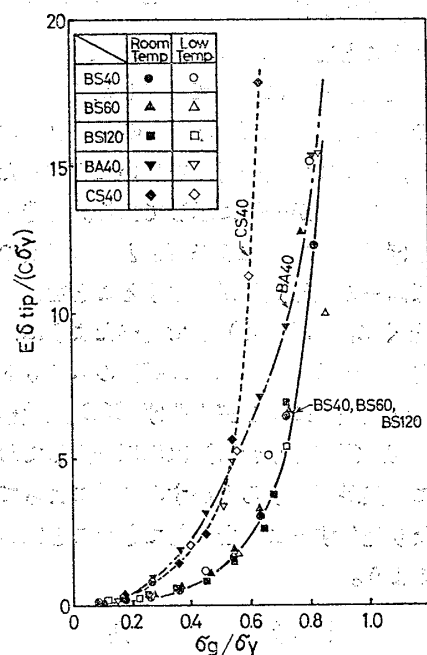


Fig. 12 Relation between $E\delta_{tip}/(c\sigma_Y)$ and σ_g/σ_Y (type B & C specimen)

先端開口変位 δ_{tip} と作用応力 σ_g を無次元化して、前報と同様に $E\delta_{tip}/(c\sigma_Y)$ と σ_g/σ_Y の関係で示すと Fig. 11 および Fig. 12 のようになる (ここに c : スリット長さの $1/2$, σ_Y : 各温度における降伏点, E : ヤング率)。なお、図中の低温における関係は煩雑になるため破壊発生時におけるもののみ示した。このような無次元化表示を行えば室温および低温、さらにスリット長さが変化した場合 (BS 40, BS 60, BS 120) でもスリット先端の開口量と作用応力の関係は各構造体ごとにほぼ一定の関係で与えられる。すなわち、前述したように低温の開口挙動が室温の挙動から推定でき、三点曲げ COD 試験によって得られた脆性破壊発生の限界開口変位 δ_c から低温における破壊応力の推定が可能となる。Fig. 8 および Fig. 9 中に示した各曲線は、このようにして推定した破壊応力曲線で、推定破壊応力は実験値と比較的よい一致を示している。

以上述べてきたように、前報に示した無次元化法による低温の亀裂開口挙動の推定法は、構造が大型化し、著しい応力集中に溶接残留応力、材質劣化等の影響が重畳する場合および構造的応力集中度の違いや亀裂長さが相違する場合に対しても適用でき、構造物の脆性破壊発生特性を評価する上で極めて便利な手法であることを確認することができた。

4.2 応力集中部における overall strain について

大変形領域での亀裂開口挙動については従来から種々の検討がなされており^{4), 5), 6)}、亀裂開口変位と overall strain との間には相関があることが示されている。しかし、これらはいずれも平板試験片によって検討されたものであり、實際上問題となる構造的応力集中部に存在する欠陥について成立するか否かはまだ明らかにされていない。そこで応力集中部に存在する亀裂の開口変位と overall strain との関係について検討してみることにした。

実際構造物における応力集中部は複雑なひずみ分布を示すことが多く、本研究に供した試験体のうち Type B および C がこれに相当する場合と考えることができる。しかし、このような場合に overall strain としてどの部分のひずみを採ればよいかが大きな問題となる。これに関しては、本研究ではまず亀裂または欠陥をとりまく局所領域に作用する平均ひずみとその領域に様に作用すると考えて取扱った。また、局所領域としては亀裂の開口に有効的に寄与しうる領域を考えるのが妥当であり、亀裂の存在によってひずみが減少する部分が相当すると考えることができよう。この領域の大きさはすでに述べたように Fig. 7 によるとスリット長さの約 1.5 倍である。そこで Type B および C の試験体についてはスリットを設けていない構造試験体について測定したひずみの

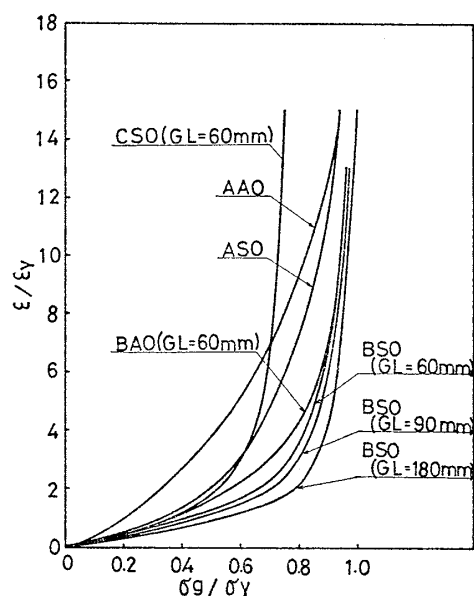


Fig. 13 Relation between overall strain and applied stress

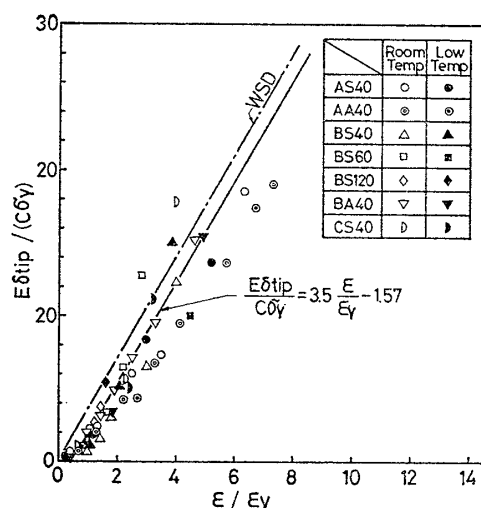


Fig. 14 Relation between non-dimensional COD and overall strain

計測結果から求めたスリット長さの1.5倍の範囲(平板中央の荷重方向のライン上)の平均ひずみを overall strain として採用した。Type A はすでに述べたように、スチフナ間における荷重方向のひずみ分布はほぼ一定であるので、スリット挿入位置に相当する部分のひずみを採った。このようにして求めた各構造試験体の overall strain ε とグロス応力 σ_g の関係をそれぞれ降伏ひずみ ε_Y および降伏応力 σ_Y で無次元化して示すと Fig. 13 のようになる。

以上述べた応力集中部における overall strain の妥当性を確認するために、Fig. 13 を用いて Fig. 11 および Fig. 12 から σ_g/σ_Y を介して $E\delta_{tip}/(C\sigma_Y)$ と $\varepsilon/\varepsilon_Y$ の関係を求めると Fig. 14 のようになる。 $E\delta_{tip}/(C\sigma_Y)$ と $\varepsilon/\varepsilon_Y$ との間には $\varepsilon/\varepsilon_Y$ が1.0以上ではほぼ良好な直線

関係が成立することを同図は示している。

以上のことからひずみ勾配を有する部分に欠陥が存在する場合の overall strain としては、欠陥をはさんで欠陥長さの1.5倍の領域において求めた欠陥が存在しないときのひずみの平均値を採用すればよいことが明らかになった。

5 結 言

本研究は、構造的応力集中に溶接残留応力、溶接による材質劣化が重畳した場合の脆性破壊発生特性を検討するために、3種類の大型構造試験体の脆性破壊試験を行なって亀裂開口挙動および応力集中部におけるひずみを調べるとともに COD 概念の適用について考察した。得られた結果を要約すれば次のようになる。

(1) 前報¹⁾に示した無次元化表示法による低温の亀裂開口変位の推定は、構造的応力集中に溶接残留応力、材質劣化の影響が重畳する場合、構造的応力集中度が相違する場合、亀裂長さが相違する場合等に対しても適用できる。

(2) 溶接残留応力が作用している部分に欠陥が存在するとひずみ時効によって欠陥の先端部は脆化されるので、小型三点曲げ COD 試験によって限界亀裂開口変位を求める場合に材質劣化に対する配慮が必要である。

(3) 欠陥が複雑なひずみ勾配がある部分に存在している場合には、欠陥をはさんで欠陥長さの1.5倍の領域におけるひずみの平均値をとれば、応力集中部におけるほぼ妥当な overall strain を評価でき、無次元化した亀裂開口変位と overall strain との間には次式が成立する。

$$E\delta_{tip}/(C\sigma_Y) = 3.5(\varepsilon/\varepsilon_Y) - 1.57$$

終りに、本研究に対して有益なご討論、ご教示をいただいた日本造船学会溶接研究委員会第1分科会主査 金沢武 東大教授をはじめ委員各位に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 永井欣一, 梶本勝也, 谷口清久: 構造的応力集中部における脆性破壊発生特性について, 日本造船学会論文集, 第144号(1978), p.441.
- 2) 佐藤邦彦, 豊田政男, 川口喜昭, 有持和茂, 鈴木充, 多々良敏行: 50 キロ高張力鋼溶接継手の脆性破壊発生挙動におよぼす溶接熱・歪履歴の影響, 日本造船学会論文集, 第138号(1975), p.467.
- 3) 永井欣一, 清水茂俊, 岩田光正, 河野俊一, 小園健一: 大規模降伏脆性破壊強度に及ぼす板厚の影響について, 日本造船学会論文集, 第146号(1979), p.497.
- 4) F. H. Burdekin, M. G. Dawes: Practical Use of Linear Elastic and Yielding Fracture Mechanics with Particular Reference to Pressure

Vessels, IIW Doc. X-641-71 (1971).

- 5) 日本溶接協会 WSD 委員会：脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定基準 (1977).

- 6) 豊田政男, 伊藤義康, 佐藤邦彦：構造用鋼材とその溶接部の全面降伏後不安定破壊開始と破断延性, 日本造船学会論文集 (1979), p.212.
-