#### (昭和47年10月日本造船学会秋季講演会において講演)

# 工業的試験法としての曲げ COD 試験について

正員 金 沢 武\* 正員 町 田 進\* 正員 萩 原 行 人\*\*

Study on COD Bend Test as an Engineering Brittle Fracture Initiation Characteristics Test

> by Takeshi Kanazawa, Member Susumu Machida, Member Yukito Hagiwara, Member

#### Summary

The brittle fracture initiation characteristics have successfully been investigated in terms of COD concept in these few years. The COD concept seems to be promising as one of the possible useful fracture criteria to assess the fracture behavior of steel structures. In order to clarify the significance of defects in structures and select the proper materials, it is very important for the fabricators to be able to obtain the critical COD value from small sized and simple test. The present authors have investigated the effectiveness and utility of COD bend test as one of the fundamental material tests. The bend test specimen can be made smaller and can fracture at lower load, so that it could be very useful testing method from the industrial point of view.

But one of the troubles associated with the measurement of critical COD on a bend specimen is that the notch tip COD is not so easily obtained for bend test as for tension test. So far a COD value is estimated from the clip gauge reading using "rotational factor", on the assumption that a notched bend specimen rotates about a sort of "pivot", the location of which in the specimen is dependent of applied load.

In this paper the method of determining COD value at notch tip in a bend specimen is disscussed on the basis of the results of experiment and calculation using the Dugdale-Barenblatt crack model in bending stress field and Finite Element Method. It is revealed that the critical COD value can be obtained only from fracture load of bend specimen.

The COD bend test were carried out with various specimen size and notch acuity for the purpose of clarifying the characteristics of critical COD value. It is confirmed that not only the critical COD value obtained from COD bend test compares well with that obtained from tension test but also it is independent of specimen geometry to a certain extent.

Finally the tentative method of COD bend test is proposed as a fundamental material test.

## 1 緒 言

構造用鋼の不安定 亀裂 伝播 開始までにはかなりの 塑性変形が クラック先端に生じ、いわゆる large scale yielding の状態になることから,近年,脆性破壊発生に関してはクラック先端の塑性変位に着目した COD 説に 基づく研究が盛んに行なわれ,かなりの成功を収めている。

これまでに多くの研究者によって工学的破壊条件としての COD 説の実用性・妥当性の検討が進められてきた<sup>1~4</sup>)。その結果, COD 説は small scale yielding の場合のみならず large scale yielding の場合にも適用で

<sup>\*</sup> 東京大学工学部

<sup>\*\*</sup> 東京大学工学系大学院

## 日本造船学会論文集 第132号

き、小型 COD 試験により得られる限界 COD( $\phi_c$ ) 値をもとに大型試片の破壊強度を推定することができる。また曲げ COD 試験で得られる  $\phi_c$  値は引張試験で得られる  $\phi_c$  値とほぼ等しいという結果も報告されている<sup>3)</sup>。

COD 説に基づいて構造物に存在する欠陥の評価,あるいは材料の選択をする場合には、当然のことながら材料の *Φ*e 値を知らなくてはならない。そこで筆者らは *Φ*e 値を求める簡便な工業的試験法として曲げ COD 試験の検討を行なった。これは曲げ試験片は小型にすることができるし、低い荷重で破壊させうることから、工業的試験法として有力なものと考えられるからである。

しかし、曲げ試験の場合、切欠先端の COD( $\sigma$ ) をどのようにして決めるかという問題がある。Ingham ら<sup>5</sup> は試験片は回転的に変形するとして rotational factor を実験的に求め、切欠の試験片端部で測定したクリップ ゲージ変位を先端値に換算している。本報告では  $\sigma$  値の決め方についてこのような実験的な方法の他に曲げ応 力場の DB モデルや有限要素法による計算を行ない、それらを比較検討した。また曲げ COD 試験の  $\sigma_c$  値と大 型引張試験で得られた  $\sigma_c$  値との一義性を調べ、曲げ COD 試験の有効性を確かめた。最後にそれらの結果に基 づいて材料試験法としての曲げ COD 試験法に関する一提案を行なった。

## 2 曲げ試験における切欠先端の COD(@) 値の決定法

COD の計測法としては現在主にクリップゲージ<sup>8)</sup>が使われている。この方法では計測上の問題から直接クラッ ク先端の COD を測定することができないため、何らかの方法により測定値をクラック先端の開口量に換算しな ければならない。引張試験についてはクリップゲージの実測値とその測定位置における DB モデルで計算した値 がほぼ等しくなることから DB モデルによって実測値を先端 COD 値に換算している<sup>1,9,10)</sup>。しかし、曲げ試験 については現在のところ統一的な方法はない。その点に関して以下考察する。

## 2.1 Rotational Factor に関する実験的検討

切欠付き曲げ試験片は Fig.1 のように曲げモーメントにより、近似的にある見かけの回転中心の回りに回転変形すると考えられる。 従って図中に示したように定義される rotational factor r を求めればクリップゲージ変位 ( $V_{\theta}$ ) は次式の関係を用いて  $\phi$  に換算することができる。

$$\Phi = \frac{1}{1 + (z+c)/r(d-c)} V_g$$

この rotational factor r の値に関してはすべり線場理論<sup>9</sup> および実験的<sup>4,9</sup>に調べられている。その結果 r の 値は低荷重では荷重依存性が大きいが、高い荷重域になるとある一定値になる傾向がある。その r の一定値とし ては  $1/3 \sim 1/2$  が解析的・実験的に求められている。 最近イギリスでは多くの実験を積み重ね、安全側の値とし て 1/3 をとっている。すべり線場理論を用いると r=0.386 ( $\rho=0.25$  mm、純曲げ)が得られる。

そこで筆者らも同様な実験を行なってその有用性につき検討した。用いた方法は切欠の両側にビッカースでマーキングをつけ、負荷状態で写真撮影してrの値を求めるというものである。試験片の変形状況の一例を Fig.2 に、また従来とられてきた $r \ge V_g$ の関係の他に $r \ge c$ 応力比 $\sigma_N/\sigma_Y$ (試験片切欠部実断面の nominal skin stress と降伏応力の比)との関係を求めた。これらを Fig.3(a), (b) に示す。実験はすべて室温で行なったが、結果を

他の温度における変形にも適用する場合、温度の影響を 考慮に入れると  $r \sim \sigma_N / \sigma_Y$ の関係を用いる方がよいと思 われる。すなわち少なくとも低荷重域では  $V_g$ の値が同



Fig.1 Notch Profile during Bending



Fig.2 Notch Profile of Bend Test

工業的試験法としての曲げ COD 試験について





じであっても温度が異なると降伏点に差が生じるため,塑性域の大きさは同じにならず,結局rの値が違ってく ると考えられるからである。

Fig.3(b) をみると  $\sigma_N/\sigma_Y \leq 2.0$  では r の応力依存性はかなり大きい。またこの範囲では r 自身の値は小さく, 特に r < 0.1 についてはここで行なったような方法では測定誤差と変形量とがほぼ同じオーダーとなり事実上測 定不可能となる。しかも、この材料の低温における破壊実験データはほとんどこの領域に属しており、rotational factor を用いる方法はこのような温度範囲での破壊実験の結果に関しては  $V_0$  を精度よく o 値に換算すること ができないという致命的な欠点をもっているといえる。

2.2 有限要素法および曲げ応力場の DB モデルによる検討

2.2.1 有限要素法および DB モデルの計算

有限要素法の計算は二次元平面応力の弾塑性プログラ ムを用い, Fig.4 に示す要素分割(要素総数 234)に対 して行なった。寸法は後に述べる実験した試験片形状と 同じである。切欠は簡単のためスリットとし切欠先端部 分は先端から一番近い節点が 0.078125 mm となるよう に分割を細くした。COD に及ぼす降伏点および加工硬 化率の影響を調べるため,  $\sigma_Y = 27$ , 81 kg/mm<sup>2</sup>,  $E_t = 135$ , 416, 1,050, 2,100 kg/mm<sup>2</sup> に変えて計算した。Fig.5 にその応力-ひずみ関係を示す。

曲げ応力場の DB モデル (詳細は参考文献 3),7) にあ る)の計算手順は塑性域まで含めた仮想クラックのK値 と塑性域部に降伏応力  $\sigma_Y$ が内圧として分布している弾 性クラックのK値を求め、仮想クラックの先端における 応力の特異性をなくすため、両者のK値が等しくなるよ うに塑性域寸法を求めることになる。この計算では引張 側の応力は  $\sigma_Y$  で押えているが、圧縮側の応力は制限し ていない (圧縮側の応力も  $-\sigma_Y$  で押え、応力の再配分 を考慮すると計算はきわめて煩雑になる)。 そこでこの DB モデルの適用範囲としては圧縮側の応力が  $-\sigma_Y$  に 等しくなる応力 ( $\sigma_N/\sigma_Y \approx 1.1$ ) までとした。

2.2.2 クラック開口変位

FEM および DB モデルで求めたクラック開口変位の 一例(試験片の深さ 50 mm,切欠深さ 25 mm の三点曲 げおよび四点曲げ)を Fig.6 に示す。クラックの開口変 位は試験片端部付近でほぼ直線的な変形をし、スリット



Fig.4 Element Configuration used in FEM



Fig. 5 Stress-Strain Relation used in FEM

先端で小さくなるが、これは実験で測定したものと傾向的に一致する。

荷重が増加すると直線部分は長くなり、かつその勾配は小さくなるが、全面降伏(種々の形状に対する FEM の計算結果では  $\sigma_N/\sigma_Y \simeq 2.0$  に対応する)を過ぎると塑性ヒンジができ、試験片の回転変形が大きくなるためこの勾配は大きくなる。

クラック開口変位の直線部分を延長し、 切欠先端と交わった変位がいわゆる rotational factor を使った COD



Fig.6 Notch Configuration calculated by DB model and FEM



Fig.7 Relation between Non-Dimensional COD and Stress Ratio calculated by FEM for Materials with Different Yield Strengths and Tangent Moduli (Work Hardening)



Fig.8 Relation between Non-Dimensional COD and Stress Ratio calculated by FEM for Different Specimen Size and Loading Condition

となるが、低荷重域では DB モデルの COD とはかなり差がある。

この図には三点曲げと四点曲げの比較が示してあるが、 *V*<sub>0</sub> も切欠先端の開口変位量もほとんど同じであると 考えてよいと思われる。

2.2.3 FEM の結果の一般化

FEM では与えられた特定の条件(形状,降伏点,加工硬化率)のもとでの結果しか得られない。そこで結果の 一般化,すなわち他の条件への適用性について検討してみた。試験片の大きさ(切欠深さと試験片深さとの比は 一定),降伏点,加工硬化率をそれぞれ変えて無次元化した COD と応力比の関係,  $E\Phi/d\sigma_Y \sim \sigma_N/\sigma_Y$ を調べた。 結果を Fig.7,8 に示す。Fig.7 は降伏点,加工硬化率を変えた場合,Fig.8 は試験片の大きさおよび三点曲げ と四点曲げの場合のものである。ただし、この図で  $\Phi$  の値は FEM の解でスリットの先端から 0.1 mm の点の 開口量をとっているが、このことについては後に述べる。

Fig.7,8より  $E\Phi/d\sigma_Y \sim \sigma_N/\sigma_Y$ の関係は降伏点(3倍),試験片の大きさ(2倍)に変えても、また三点曲げと四点曲げでもほぼ単一の曲線で近似できる。加工硬化率は135,416( $\simeq E/50$ ),1,050(=E/20),2,100(=E/10)kg/mm<sup>2</sup>に変えたが、 $E_t=1,050$ ,2,100 kg/mm<sup>2</sup>の場合はCOD は小さくなる。しかし、一般の構造用鋼の加工 硬化率は416 kg/mm<sup>2</sup> までの値と考えられるから、 $E\Phi/d\sigma_Y \sim \sigma_N/\sigma_Y$ の関係は単一であるとみなせるであろう。

荷重が高くなると若干計算点のばらつきはあるが,限界 COD 値に一般にみられるばらつきを考えるとこの程度の差は無視することができるであろう。また降伏点,加工硬化率を変えてもほとんど差がないことから,この パラメータで整理すれば低温実験データを解析することができると思われる。

2.2.4 FEM, DB モデルの有効性

FEM および DB モデルの有効性・妥当性を調べるために実測したクリップゲージ変位とその測定位置における FEM と DB モデルで求めた変位を比較した。Fig.9 に結果の一例を  $EV_g/d\sigma_Y \sim \sigma_N/\sigma_Y$  の関係で示す。 クリップゲージ変位は X-Y recorder で記録した  $V_g \sim P$ の曲線から読みとった値である。

図中には室温から  $-196^{\circ}$  までの 4 温度の実験結果を 示してあるが、 $EV_g/d\sigma_Y \sim \sigma_N/\sigma_Y$  で整理すると試験温度 による差はほとんどなくなり、FEM、DB モデルからの 推定値との良い一致がみられた。

2.2.5 FEM における Ø の決定法

本来 Φ は塑性変形によるクラック先端の開口変位で あるが、実験でも FEM の計算によってもクラック先端 は不連続な変形はせず、その意味では COD は零である。 しかし、巨視的にはある種の"不連続的"な開口変位を することは事実であり、これが一般に COD と呼ばれる ものの実体といってよいであろう。したがって COD 説で鋼材の破壊特性を評価するには何らかの基準を設け て**Φ**を決定しなければならない。引張試験の場合には筆 者らはそれを DB モデルで定義される切欠先端のクラッ ク開口量としてきた。この意味から曲げ試験の場合にも 曲げ応力場の DB モデルで計算される COD をとるのが よいと思われるが, さきにも述べたように DB モデルの 計算可能な範囲は狭い。そこで FEM の結果を用いて Ø を決定する方法を考えてみる。**Φ**としては次の様な量が 考えられる。その1つは2.1で述べた回転中心を使って のを求める方法であり、もう1つはFEMで計算される切 欠先端にごく近い点の開口変位をΦとすることである。



Fig.9 Relation between Experimental and Estimated Clip Gauge Displacement



Fig.10 Rotational Factor obtained from FEM

## 日本造船学会論文集 第132号

FEM によるクラック形状は Fig.6 にみるように切欠先端から離れたところでは直線的であるため、この直線 を外挿して rotational factor を求めることができる。得られた  $r \sim \sigma_N/\sigma_Y$ の関係を Fig.10 に示す。r の値は  $\sigma_N/\sigma_Y \rightarrow 0$  になるとある値に収束する。また、それは  $\sigma_N/\sigma_Y \simeq 2.0$  (FEM では試片の全面降伏に対応する)近 くで最大値になり、それを過ぎると再び減少する傾向にある。特に c/d の値が小さいときにはその傾向が大き い。しかし、FEM で得られるrの値を用いて後に述べる実験結果から  $\Phi_c$  を求めると、低荷重域ではかなり大 きな値になってしまう。この理由は Fig.6 をみれば理解しやすい。

そこで次に、計算された開口変位において、切欠先端から先端半径だけ入った点(通常の切欠では $\rho=0.1$  mm)の縦変位を  $\sigma$  と考える。これにはあまり明確な物理的意味はないが、切欠先端の丁度アールどまりに対応する 点の開口変位であり、 $\sigma_{0.1}$  をとると曲げ応力場の DB モデルで得られる  $\sigma$  に近い値となるためである。Fig.7、8 に計算結果の一例が示してある。またこの考え方でいくと、破壊実験において  $\sigma_c$  を推定するのに破壊荷重の みを測定するだけですむことになる。

## 3 曲げ COD 試験

## 3.1 試験材および試験要領

供試鋼板は板厚 25 mm および 50 mm の軟鋼である。その化学成分,機械的性質は Table 1 に示すとおりである。

本実験では限界 COD の一義性およびそれに影響を及ぼす因子を調べるため, Fig.11 に示す曲げ試験を行なった。また表には試験片形状をまとめて示す。

Table 1	Chemical	Compositions	and	Mechanical	Properties	of	the	Materials	tested
---------	----------	--------------	-----	------------	------------	----	-----	-----------	--------

	Thickness (mm)	Chemical Compositions (%)						Mechanical Properties			
		С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Yield Point (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SS 41	25	0. 19	0. 06	0. 82	0. 013	0. 028	0. 02	0. 02	28. 1	45. 1	25. 0
SS 41	50	0. 20	0. 04	0. 78	0. 024	0. 026	0. 03	0. 02	23. 5	45. 6	38. 0



Fig.11 Bend COD Test Specimen

3.2 実験結果および考察

板厚 25 mm の材料で試験片形状,切欠先端半径を 変え,切欠深さや試験片深さ,切欠尖鋭度の脆性破壊 発生特性に及ぼす影響を調べ,標準試験片の形状決定 の一資料とした。また三点曲げと四点曲げを行ない, 一様曲げに対して求められている解析解を三点曲げに 適用することの妥当性を検討した。板厚 50 mm の材 料では 50 mm の板厚から両側機械切削で 30 mm に 減厚して板厚効果を調べた。

COD の間接測定法としてクリップゲージを用い, Fig.1 に示すように試験片端部にナイフ・エッジを付け、そこの変位を測定した。しかし、最終的な  $\boldsymbol{\sigma}_{c}$  値の決定には破壊荷重を用いた。

各試験の試験温度と破壊荷重の関係を Fig. 12 (a) (t=25 mm 材) と Fig. 12 (b) (t=50 mm 材) に示す。 t=25 mm 材の実験点のうち室温付近のものは最高荷重に達した後に破壊したものであり, 破面は fibrous であ る。 -50℃ 近くの実験は連続記録させた荷重とクリップゲージ変位の曲線がなだらかになったところで破壊し ているが, 破面は完全に cleavage である。また, t=50 mm 材の実験はすべて脆性的に破壊している。 前節で述べた FEM を使った Φ の決定法に従って実験結果を整理する。

Fig.13 は FEM から求めた rotational factor (Fig.10) を用い、実測したクリップゲージ変位を  $<math>\sigma_c$  値に換
算したものである。図中には参考として引張試験(試験片幅=90, 200, 400, 700 mm, いずれも切欠深さ/試験

工業的試験法としての曲げ COD 試験について







Fig. 13 Relation between Critical COD and Testing Temperature ( $\Phi_c$  from FEM-Rotational Factor)

Fig.14 Relation between Critical COD and Testing Temperature

Fig.14, 15 はそれぞれ板厚 25 mm, 50 mm 材での曲げ COD 試験の結果であるが, これは FEM の  $\sigma_{0.1}$  を 使って求めた  $\sigma_c$  値である。この場合は引試試験とかなりよい一致を示している。

以上のことから DB モデルの  $\boldsymbol{\sigma}$  との比較も考え合わせて,曲げ COD 試験の  $\boldsymbol{\sigma}$ の決定の方法として, $\boldsymbol{\sigma}_{\rho}$ ( $\rho$ は切欠先端半径)をとるのがよいと思われる。また,この方法を使うと  $\boldsymbol{\sigma}$ 値は応力比  $\sigma_N/\sigma_Y$  とその温度における降伏点がわかれば定まることになり,クリップゲージなどによる開口変位の測定は必要でなく,破壊荷重さえ測定すればよいことになる。

Fig.14 から  $\boldsymbol{\varphi}_c$  値は荷重様式や切欠深さ,試片の大きさなどによらず,ほぼ温度に対して単一の曲線にのることが確かめられた。また,三点曲げと四点曲げの荷重条件による  $\boldsymbol{\varphi}_c$  値の差もほとんど認められない。このことから曲げ COD 試験で大型試験の破壊発生特性を COD 説に基づいて推定できるということがいえるであろう。

Fig.15 は 50 mm 板厚から 30 mm に減厚した実験結果であるが,板厚効果はほとんど現われていない。しかし他の材料では  $\boldsymbol{\Phi}_{c}$ 値が板厚によって変わるという結果<sup>11)</sup>もあるため,本実験の結果だけから一概に板厚効果を 無視することはできないであろう。

367

日本造船学会論文集 第132号



Fig.15 Relation between Critical COD and Testing Temperature

Fig.16 Effect of Notch Acuity on Critical COD

Fig.16 は切欠尖鋭度の影響を調べた実験結果である。この図より  $\rho \leq 0.1 \, \text{mm}$  であれば  $\rho$  が変化しても  $\phi_c$  値 はほぼ同じになった。しかし、 $\rho$  が 0.1 mm より大きくなると  $\phi_c$  も大となる。このような傾向は引張試験でも報告されている<sup>3)</sup>。

## 4 材料試験法としての曲げ COD 試験法の提案

## 4.1 材料試験法

前節の実験結果から曲げ COD 試験は材料の破壊靱性試験として有効であり,実用的な試験法であると考えられる。そのようにして求められた小型試験の結果を COD 説に基づいて実際の構造物の欠陥評価や材料選択に適用する際に問題となるのは,破壊靱性値が厳密な意味での材料定数でなく欠陥近くの力学的因子に依存することである。従って材料試験は構造物中の欠陥が受ける力学的因子を充分考慮した上で行なわれなければならない。

## 4.2 ひずみ速度

 $K_c$ や $\phi_c$ といった破壊靱性値は力学的因子としてクラック先端のひずみ速度<sup>12)</sup>および多軸応力度<sup>3,9,11)</sup>に影響 される。一般の構造用鋼はひずみ速度に敏感であるから特に衝撃荷重を受ける恐れのある構造物に対しては動的 な曲げ COD 試験によって $\phi_c$ 値を求める必要があろう。動的な曲げ COD 試験は現在,いろいろ試みられてい るが,まだ確立されておらず,今後の課題として残されている。

#### 4.3 多軸応力度

多軸応力度で問題となるのは板厚である。板厚が大きくなるか、構造的に板厚方向の変形が拘束されるとクラック先端に生ずる塑性域寸法は小さく、いわゆる平面ひずみ状態になる。この状態での破壊靱性値は変形拘束の小さな平面応力状態における靱性値より小さくなる。この現象の定量的な解析はいまのところ充分にはなされていない。そこで板厚に関しては原板厚での曲げ COD 試験をする必要があると考えられる。

#### 4.4 標準試驗片形状

標準試験片形状としては本実験結果からみる限り, 板厚を t とすると試験片深さ d=2t, 切欠深さ c=d/2=t が適当であると考えられる。この形状は ASTM で平面ひずみ破壊靱性試験として提案<sup>13)</sup>されているものと同じ である。この形状にしたのは小型試験片だとどうしても実験のばらつきが入りやすくなるし, 切欠深さが浅いと 破壊荷重が高くなるためである。

板厚以外に広い意味での多軸応力度の問題として切欠尖鋭度の問題がある。実験結果によると  $\rho \leq 0.1 \text{ mm}$  ならば  $\sigma_c$  は切欠先端半径によらずほぼ一定になることから,曲げ COD 試験片の  $\rho$  は 0.1 mm 程度であればよいと思われる。

荷重条件としては三点曲げでよいと思われる。これは FEM の結果や実測したクリップゲージ変位を三点曲げ

工業的試験法としての曲げ COD 試験について



Table 2 Flow Chart for Determination of  $\Phi_c$ 

と四点曲げで比較してみると,荷重条件による差はほとんどみとめられないし,破壊荷重でみると三点曲げの方 が小さいためである。

4.5 限 界 COD

曲げ COD 試験の  $\phi_c$  値は FEM で求めた  $\sigma_N/\sigma_Y \sim E\Phi/d\sigma_Y$  の関係 (Fig. 7, 8) を使って計算することがで きる。ただしこの場合,材料データとして降伏点,加工硬化率 ( $\phi_c$  値を求めようとする温度の  $\sigma_Y, E_t$ ) は予め 調べておく必要はある。 $\sigma_N/\sigma_Y \sim E\Phi/d\sigma_Y$  の関係は c/d の比によって異なってくるが,試験片の絶対的な寸法に はあまり依存しないため,必要な c/d の値に対して一度 FEM で計算してチャート化しておけばよい。このチャ ートを使えば破壊実験では荷重だけ測定すれば  $\phi_c$  値は簡単に求めることができる。

## 5 結 論

小型脆性破壊発生試験として曲げ COD 試験を行ない,材料試験法としての有効性について検討し,次の結論を得た。

(1) 曲げ試験における切欠先端の COD は有限要素法の結果から、 $\sigma$  として切欠先端から先端半径だけ入った点の開口変位をとれば、 $\sigma_N/\sigma_Y \sim E\phi/d\sigma_Y$ の関係を用いて求めることができる。この結果は曲げ応力場の DB モデルの解とほぼ一致する。

(3) 試験片形状や切欠先端半径を変えた曲げ COD 試験を行ない,標準試験片形状や材料試験法としての曲 げ COD 試験法の提案を行なった。

(4) 今後さらに他の鋼材で実験し,曲げ COD 試験法の検討を行なう必要があると思われる。特に曲げ試験の場合,温度が高くなると破壊前に安定クラックが発生すると考えられるため, *Φ*。値をどのようにして決めるかという課題が残されている。

## 謝 辞

本研究は日本溶接協会鉄鋼部会 TM 委員会共同研究「脆性破壊発生特性に基づく鋼材の材質判定規準の確立」 の一環として行なわれたものであり、委員各位のご協力とご教示をいただいた。ここに深甚の謝意を表するもの

369

370 である。

有限要素法による数値解析にあたって、東京大学野本講師開発のプログラムを使用させて戴いた。深く感謝の意を表する。

また,実験および解析にあたっては金子助手,新村助手はじめ東京大学船舶工学科材料強度実験室の方々,な らびに東京大学工学部の松本善朗,富士原康一の両氏に種々のご助力をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げ る。

参考文献

- 1) 秋田, 矢田, 酒井, 飯野: 長い切欠から発生する脆性破壊, 日本造船学会論文集第128 号 (1970) p. 397.
- 2) 金沢,三村,町田,宮田,萩原:脆性破壊発生のクライテリアに関する考察,日本造船学会論文集第 129 号 (1971) p.237.
- 3) 金沢,町田,糸賀,土屋:COD 仮説による脆性破壊発生特性の研究,日本造船学会論文集第131号(1972).
- 4) 佐藤,豊田,阪野,豊貞:溶接継手の脆性破壊強度におよぼす機械的性質の不均一性の影響,日本造船学 会溶接研究委員会第一分科会資料 (1972).
- 5) T. Ingham et al.: Conf. Practical Appl. of Fracture Mechanics to Pressure Vessel Technology c 54/71 (1971).
- J. M. Alexander and T. J. Komoly: On the Yilding of a Rigid/Plastic Bar with an Izod Notch, J. Mech. Phys. Solids 10 (1962) p. 265.
- 7) 金沢,町田,宮田:曲げ応力場における塑性域の大きさと開口変位の計算,日本溶接協会鉄鋼部会 TM 委員会資料 (1969).
- 8) 越賀: クリップゲージによる COD の測定, 日本溶接協会鉄鋼部会 TM 委員会資料 (1969).
- 9) 金沢,町田,宮田:拘束部材の脆性破壊発生特性について,日本造船学会論文集第129号(1971) p.247.
- 10) 酒井,飯野:きれつの変位挙動と脆性破壊の発生,日本造船学会論文集第127号(1970) p.227.
- 11) T. Kanazawa, S. Machida, M. Miyata and Y. Hagiwara: A Consideration on the Variables Included in the Critical COD Value in Brittle Fracture Problem of Steel, Proc. Int. Conf. Mech. Behavior of Metals, Kyoto (1971).
- 12) 金沢,町田,百田,萩原:破壊発生条件に関する研究,日本造船学会論文集第124号 (1969) p.149.
- 13) Tentative Method of Test for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM Designation : E 399-70 T (1970).