

(討11) 鋼材の脆性破壊試験法と溶接構造物の安全性評価の現状

新日本製鉄製品技研

金沢正午 〇三波建市 谷口至良

征矢勇夫 萩原行人

I まえがき

近年の技術進歩に伴ない構造物は大型化され、したがって破壊を重視した構造設計や、材料選択がきわめて重要となっている。特に、脆性破壊は低応力でも発生し、クラックは瞬時に伝播し、大事故に至る場合がある。溶接部は材質変化、溶接欠陥、溶接残留応力など脆性破壊の促進因子が重畳しているため、脆性破壊防止を目的とした構造設計、工作法、欠陥評価、材料選択を総合的に進める必要がある。その場合の破壊力学的手法を用いた Fracture Safe Design のプロセスは図1に示すようになるであろう。

II 脆性破壊試験法

現在主に行われている試験法としては表1に示すようなものがある。

表1. 脆性破壊試験法

	伝播試験	発生試験
大型試験 (母材, 溶接部)	シャルビ試験 (Vノッチ, Pノッチ)	曲げCOD試験 (シャルビ試験)
大型試験 (母材, 溶接部)	二重引張試験 ESSO試験	Deep Notch 試験
模型試験	各種クラック アレスタ試験	Wells-木原試験 角変形付表面切欠試験 構造模型(ステフナ付)試験

2-1 脆性破壊発生試験

(1) 曲げCOD試験

COD仮説で整理すれば大型試験と小型試験との相関がつくことから、発生試験法として小型でかつ簡便にできる曲げCOD試験が行なわれている。先端COD値は図2に示すように回転中心をとる方法と有限要素法の計算結果を使う方法を組合せて求められる。大型引張試験結果とは図3に示すように¹⁾良い一致がみとめられる。¹⁾大型試験に比べ試片加工が容易なことから組織と靱性との関係を調べるのにも有効な試験法であろう。

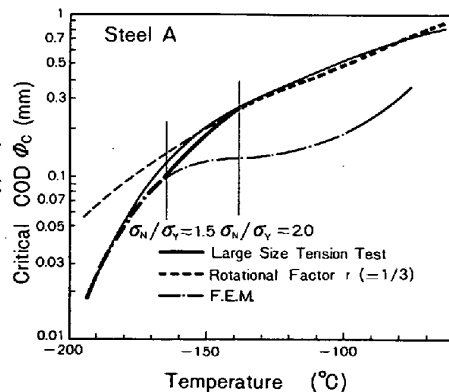


図2 曲げCOD試験の ϕ_c

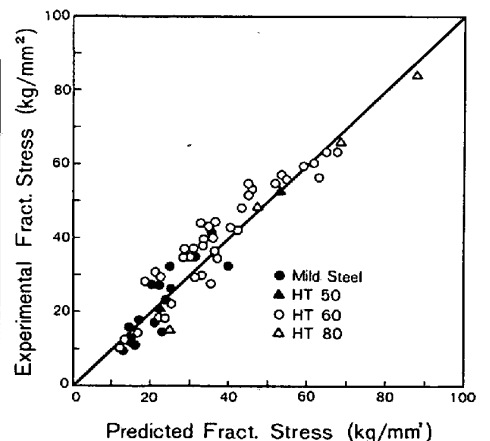


図3 引張試片の破壊応力の推定

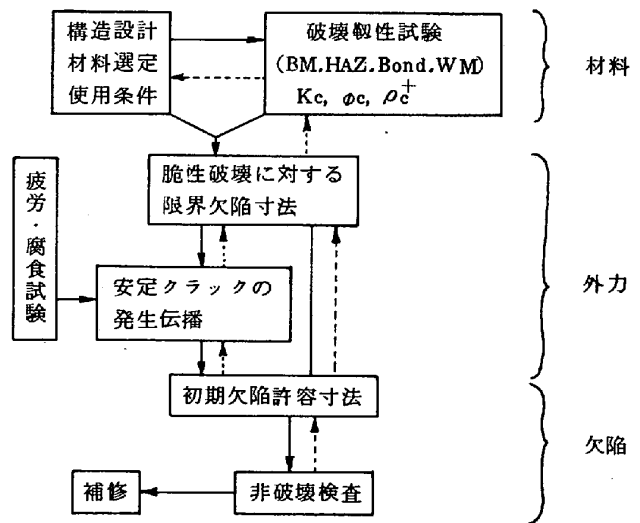


図1. Fracture Safe Design のプロセス

ここで問題となるのは図4に模式的に示すように比較的低温域から脆性破壊に先立って Slow Crack が発生する場合がある²⁾。Slow Crack の発生点のCOD (ϕ_i)と最高荷重時のCOD (ϕ_{max})との比較を図5に示すが、両者にはかなりの差がみられる^{2,3)}。図の点線と実線の差があり、どちらを重要視するか問題である。このSlow Crackの問題は延性不安定破壊に対するCOD仮説の適用と併せて今後の課題である。

(2) シャルビ試験との相関

上に述べたような脆性破壊発生試験と現在広く行われているシャルビ試験との相関を求めるため、図4. ϕ_c の温度依存性(模式図)の検討がなされている。溶接協会TM委員会ではCOD試験結果とシャルビ試験特性との相関を調べ発生特性に基づく材質判定基準の確立を目指している。

i) 角変形付表面切欠試験のK_{1c}と νE の相関(伊藤, 田中⁴⁾)

HT 60, 80の板厚25~75mmに対しての結果から次式で与えられる相関を求めている(図6)。

$$K_{1c}^2 / \sigma_y = 900 \sqrt{\nu E} \quad (1)$$

ii) 限界塑性域寸法 ρ_c^+ と νTr_s との相関(越賀ら⁵⁾)

軟鋼~HT 80までの母材, 溶接部のディープ, ノッチ試験から得られた ρ_c^+ と νTr_s との相関を求めている(図7)。

$$\rho_c^+ = \alpha (T^0 k / 100)^2, \log_{10} \alpha = 2.39 - 0.008 \nu Tr_s (^\circ C) \quad (2)$$

iii) ボンド部COD試験と νTr_s との相関(住金⁶⁾)

軟鋼, HT80ボンド部に対して, 形式的に,

$$K_c = \sigma_y \sqrt{\pi c} = \sqrt{\phi_c \sigma_y E}, \phi_c: \text{限界COD} \quad (3)$$

となる破壊発生温度と νTr_s との相関を調べている。

iv) 限界CODと νE との相関(三村ら⁷⁾)

COD試験とシャルビー試験の差としてはひずみ速度とノッチの鋭さが考えられるが, これらの効果は鋼材の強度によって異なる。したがって α を1のオーダーの数として

$$\nu E \approx \alpha \sigma_y f(\sigma_y) \phi_c \quad (4)$$

の関係にあることが推定される。整理結果はパラッキが多いが, $f(\sigma_y) = \sigma_y$ の整理が一番良いと思われる。

2-2 脆性破壊伝播試験

溶接構造物の大型化に伴ない大入熱の溶接法が使われる傾向にあ

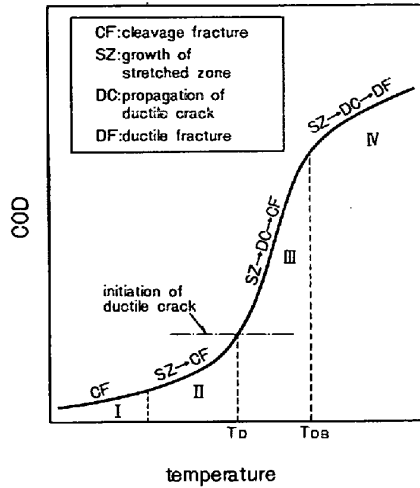


図4. ϕ_c の温度依存性(模式図)

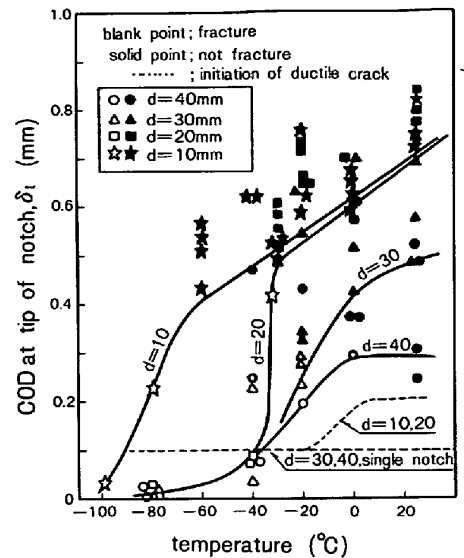


図5. ϕ_i と ϕ_{max} との関係

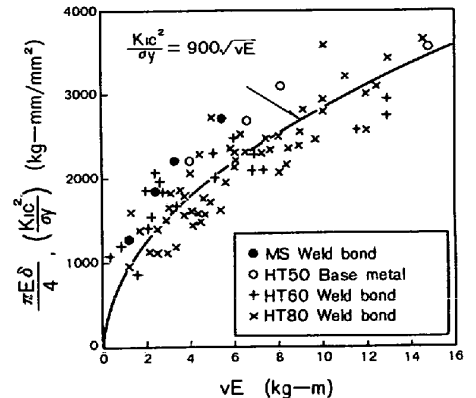


図6. K_{1c}と νE の関係

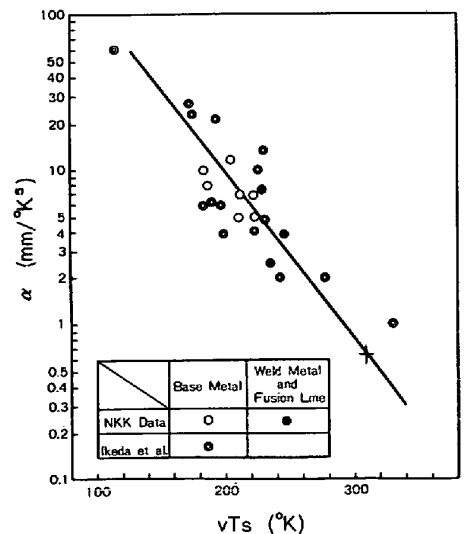


図7. α と νTr_s の関係

るが、ボンド部の脆化が重要な問題になっている。そこで溶接部に発生したクラックがボンド部を伝播することを想定した伝播試験が行われている。宮ら⁸⁾は図8に示すようなChevron切欠付 ESSO 試験を行ない、ボンド部の伝播停止特性を調べている。結果を図9に示すが、大入熱溶接をした場合、ボンド部の伝播停止特性 Kc値は母材のそれに比して小さくなる。この点に関しては現在、造船研究協会の SR147 部会で共同研究がなされている。

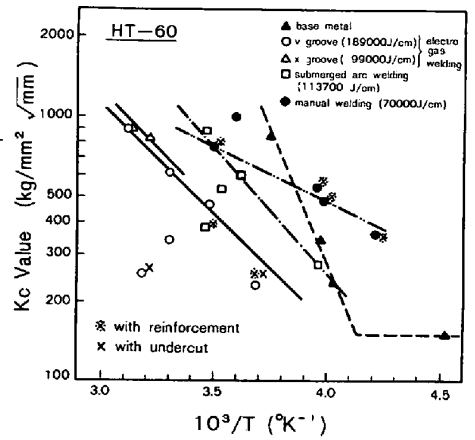
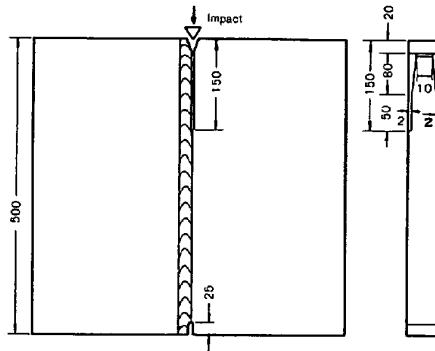


図8. Chevron 切欠付 ESSO 試験片 図9. Kc と温度の関係 (ボンド部)

III 構造物の安全性評価

Fracture Safe Design のプロセスは図1のようになる。すなわち材料の靱性値をもとに破壊力学を使って使用条件を考慮して許容欠陥寸法を求め、非破壊検査で検出される欠陥を判定することになる。また一方、許容欠陥寸法が、構造設計上あるいは非破壊検査能力などから予め与えられる場合は上記のプロセスを逆にたどって材料選択をすることになる。ここで問題となってくるのは、破壊力学的パラメータと外力、欠陥寸法・位置との関係を知らなければならないが、高ひずみ場(欠陥に比してかなり大きな領域が降伏ひずみ以上のひずみ状態になっている)におけるこれらの関係について現在のところ満足しうる表示が得られていないことである。これは破壊の発生源としてはひずみ集中や溶接残留応力などが重畳した高ひずみ場であることが多いと考えられることから解決しなければならない問題であろう。これ以外の問題としては先に述べた破壊靱性試験法の問題や実際の構造物に存在する欠陥として重要な表面欠陥の解析などがある。これらのいくつかについて現在進められている研究を以下に述べる。

3-1 溶接残留応力の影響

溶接によって生ずる残留応力が、溶接構造物の脆性破壊に大きな影響を与えることはよく知られている。溶接残留応力の効果については COD 説、 ρ_c^+ 説によって定量的に説明しうる。^{9), 10)} 一例として図10に素材ディープノッチ試験結果をもとに COD 説を使って溶接ビード付ディープノッチ試験(残留応力を矩形分布で近似)の破壊応力を推定した値と実測値の比較を示すが、両者にはかなり良い一致がみられる。

3-2 疲労と脆性破壊

構造物の破壊事故例としては溶接欠陥等の何らかの欠陥から繰返し荷重によって疲労クラックが進展し、それがある限界寸法に達したところで不安定な伝播をおこす場合が多くと考えられるが、脆性破壊に及ぼす疲労クラックの影響としては材料の疲労ダメージ、切欠尖鋭度、クラック先端の残留応力などがある。図11に HT60 の突合せ継手の機械切欠と疲労クラックの比較を示す。¹¹⁾ 図11(b)は図11(a)の結果から残留応力分を差引いたもので、機械切欠との差は疲労ダメージ、

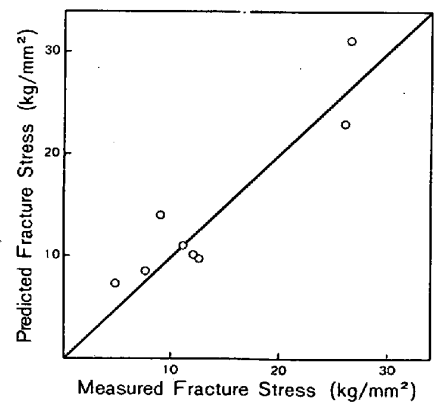


図10. ビード付試片の破壊応力の推定

思われる。

3-3 表面欠陥

表面欠陥は重要な問題ではあるが、三次元解析が困難なために十分解析が進んでいないとは云い難い。しかし、現在までに得られている計算結果¹²⁾を参考にして、 K_{Ic} - a の関係を曲げと引張の成分に別けて検討してみると図1^{2,3)}のようになる。 K_{Ic} 値の信頼性は下図の方がよいようである。このように、二次問題で近似したりすることによってある程度の傾向を知ることができよう。

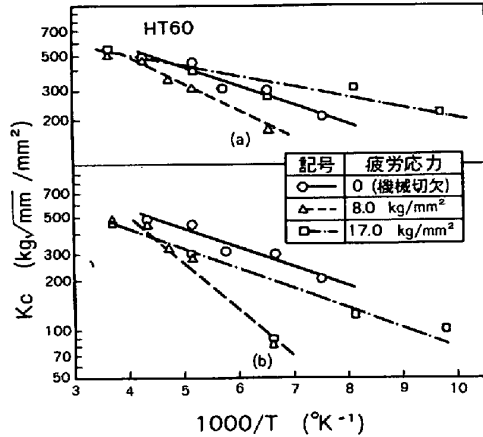


図1.1. 疲労クラックと機械切欠の比較

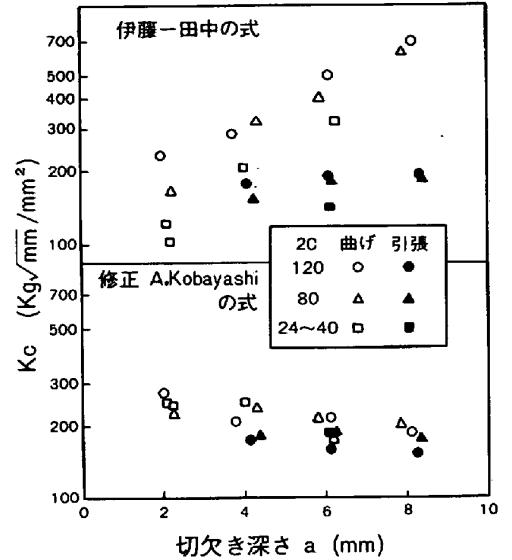


図1.2. 表面切欠の K_{Ic} と切欠深さの関係

3-4 高ひずみ場

イギリスでは高ひずみ状態における COD と外力、欠陥寸法との関係について、実験結果をもとに次式で与えられる Design Curve を設定している。

$$\left. \begin{aligned} \sigma/2\pi e y a &= (\sigma/\sigma_y)^2, \sigma/\sigma_y \leq 0.5 \\ \sigma/2\pi e y a &= e/e_y - 0.25, e/e_y \geq 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、 $e_y = \sigma_y/E$ (降伏ひずみ)

表2には HT80 の母材 溶接ボンド部に対して圧力容器における許容欠陥寸法 (欠陥長さの 1/2) を一例として示したものである。ここで、溶接残留応力は安全側の推定として外力に $e/e_y = 1.0$ を単に加わえたものであり、ノズル部に対しては応力集中を考慮して e/e_y を求めている。¹⁴⁾

表2. 圧力容器における許容欠陥寸法 (半クラック長)

	設計応力 $2/3\sigma_y$			水圧試験 $1.3 \times 2/3\sigma_y$			
	殻 (SR)	殻(AW)ノズル(SR)	ノズル (AW)	殻 (SR)	殻 (AW)	ノズル (SR)	ノズル (AW)
母材	360	64		180		21	
溶接ボンド	44	8	5	22	8	3	2

IV まとめ

以上、溶接構造物の脆性破壊に対する安全設計を目的とした研究を概観したわけであるが、将来の問題点としては、脆性破壊試験法に関して、① Slow Crack Growth の問題、② 機械切欠と自然欠陥の問題、また破壊力学の適用範囲の拡張および精密化に関して、① 高ひずみ集中領域への破壊力学の拡張の問題、② 表面欠陥の解析、③ 溶接部を想定した機械的性質および材質の不連続部におけるクラックの発生伝播の問題などがある。

参考文献

- 1) 金沢, 町田ら; 船論 第134号 (1973) 予定
- 2) 金沢, 三波ら; 船論 第133号 (1973)
- 3) 大塚, 宮田; 日米セミナ (1973)
- 4) 田中, 野田; 溶接学会昭和48年度秋季全国大会
- 5) 越賀ら; 船論 第129号 (1971)
- 6) 住金中研; 溶接協会 BE委資料 (1973)
- 7) 三村ら; 未発表
- 8) 三波, 宮ら; 溶接学会昭和48年度春季全国大会
- 9) 金沢, 三村ら; 船論 第129号 (1971)
- 10) 越賀, 船論 第127号 (1970)
- 11) 三波, 征矢ら; 造学溶接研1分科資料 (1973)
- 12) A.S Kobayashiら; Eng.Frac.Mech. 3 (1971) など
- 13) 征矢; 未発表
- 14) Burdekinら; Conf.Prac.Appl.of.F.M (1971)