

講 義

UDC 539.551 : 539.422 : 621.791.053 : 602.1

鋼材の破壊靱性値評価法と溶接構造物の欠陥評価*

金 沢 武**

Evaluation Methods of Fracture Toughness of Structural Steels and Significance of Defects in Welded Structures

Takeshi KANAZAWA

1. 緒 言

溶接構造物の各種事故は、過去永年にわたる広範囲の安全対策についての研究の成果によつて、最近その数は著しく減少している。しかし一方、構造物の経済性と同時にその安全性の保証に対する社会的要請は最近ますます強まっており、これらの相背する社会的要請に対応するには、経済性と安全性のバランスのとれた構造物を設計・製造することはもちろん、構造物の製作中、完成直後あるいは稼動中に行われる各種検査の結果より、その安全性を評価し、補修、改造の可否を決定することなどが必要である。

溶接構造物にはその製造時の溶接による各種の欠陥（溶接われ、溶け込み不足、アンダーカットなど角変形、目違いなどの工作誤差も含む）のほか、あるいは構造的な不連続による欠陥が、多かれ少なかれ含まれることは必然的なもので避けることができないが、さらに構造物の稼動中にこれらの欠陥が成長、あるいは新たに発生したりすることは当然考慮されなければならない。溶接構造物の製造、稼動中を通じて破壊に対する安全性を管理・制御する設計は破壊管理・制御設計（Fracture Control Design）と呼ばれ、圧力容器などをはじめ船体のような複雑な構造物に対してもその適用が検討されている。

さて、最近目覚ましい発展をみせている破壊力学は、溶け込み不足やアンダーカットなどの亀裂状欠陥を前提にして、材料や構造物を強度上安全に使用するための工学的的方法論という見方ができる。すなわち図1に示すような、構造物に作用する応力・ひずみ、構造物に含まれている欠陥の形状・寸法および使用材料の破壊特性値などの三つの情報の間を、比較的単純化された工学的破壊条件で定量的に関連づける工学的的方法の一つといえよう。

したがって、構造物に作用すると推定される種々の応力・ひずみ下で、構造物に存在すると思われる各種欠陥

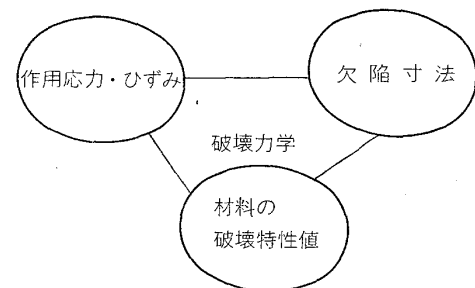


図1 破壊力学の構成

の形状・寸法に対して、使用される材料の破壊特性値を把握することがまず必要である。なおここで破壊特性値とは材料の疲労、クリープ、応力腐蝕われなどのあらゆる種類の破壊に対する材料特性値を意味しているが、本講では最も基本的で重要であり、破壊力学の適用が可能であると考えられる、脆性破壊に対する破壊靱性値と、脆性破壊に転移することが考えられる疲労亀裂の拡大・伝播特性に限定することにする。このように破壊特性値が把握されて、はじめてその構造物の製造中および稼動中の各種検査規準の制定、あるいは検査によつて発見される欠陥の安全性評価が可能になる訳で、場合によつては使用材料の変更あるいは適切な補修を必要とすることになる。

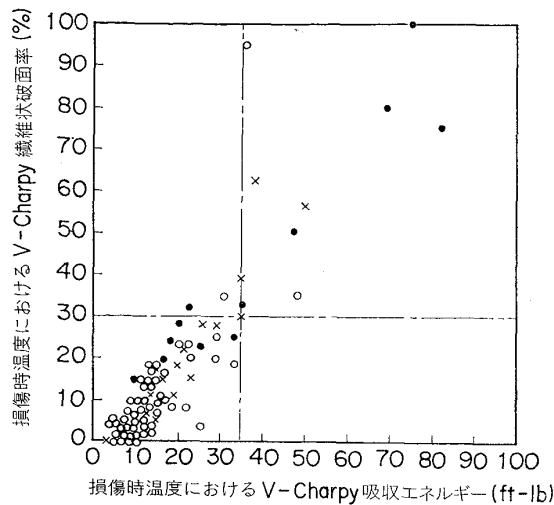
以下本講では、鋼材の破壊靱性値評価と溶接構造物の欠陥評価基準について、その代表的なものについて略述することにする。

2. 鋼材の靱性値評価法

溶接構造物に使用される鋼材の靱性値評価のための試験法として、今日国際的に広く採用されているものは、V-Charpy 試験であるが、それによる材質判定規準は従来の経験、あるいは脆性破壊事故調査の結果から取り決められたものが大部分であり、構造物の最低使用温度あ

* 昭和 52 年 12 月 13 日受付 (Received Dec. 13, 1977)

** 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113)



●印は破壊様式が延性であったもの、あるいは突入してきた脆性破壊が停止した鋼板、○印は脆性破壊が完全に伝播した鋼板、×印は両者の中間的なグループ、をそれぞれ表わす

図 2 英国船級協会による脆性破壊事故調査 (HODGSON ほか¹⁾)

るいはそれよりも若干低い試験温度で、V-Charpy 試験のある水準以上の吸収エネルギーを要求するものである。

たとえば英国の船級協会 (Lloyds' Register of Shipping) が戦後の船体用鋼板を主体とする脆性破壊事故の調査を行つたところ、図 2 のような結果¹⁾が得られた。この結果は船体用鋼板の脆性破壊事故をなくするためには、使用温度における V-Charpy 吸収エネルギーが、35ft-lb (4.8 kg·m) 以上 (繊維状破面率で 30% 以上) でなければならないことを意味しており、船級協会の国際統一規格で船体用軟鋼 D 級鋼の V-Charpy 試験の吸収エネルギーは 0°C で 4.8kg·m 以上を要求されていることの根拠となつている。このような規準は、脆性破壊事故を基に適当な V-Charpy 基準値を設定するという、やや後向きの靱性値評価法ではあるが、今日広く採用されている諸外国の規格や、各種の学協会規格には、その根拠が全く不明で、たんなる経験的な値を要求しているものが多い。

しかし、最近の破壊力学の進歩に伴い、破壊の諸要因 (最低使用温度のみならず作用応力、板厚、溶接残留応力など) を適確に把握し、このような条件下での使用材料の破壊靱性値をより正確に評価し、安全性を確保することが可能となりつつある。以下このような例として、原子力発電用機器に関する米国の破壊靱性評価法と、日本溶接協会 WES 3003「低温用鋼材の材質判定規準」G 種改訂案について簡単に解説することにする。

2.1 原子力発電用機器に関する米国の破壊靱性評価法

米国においては、原子力発電用機器の設計、施工、検査など全般にわたる管理が ASME (米国機械学会) の基準に従つて行われている。

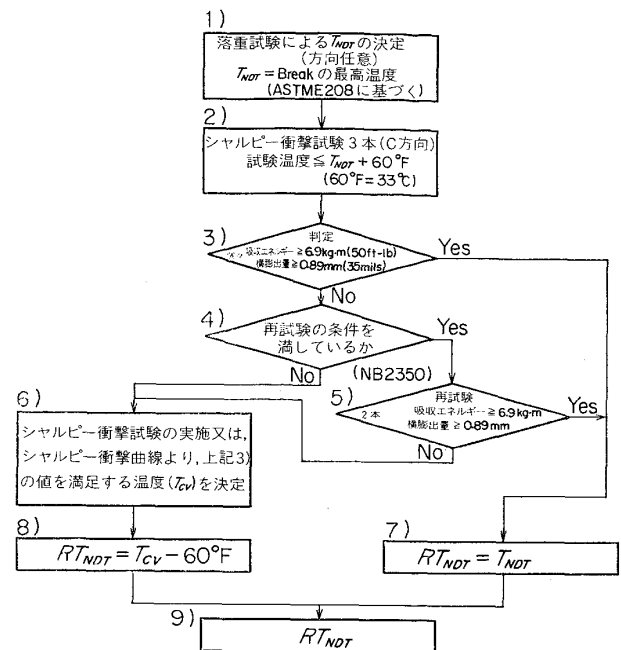


図 3 RT_{NDT} の決定手順 (ASME Sec. III)

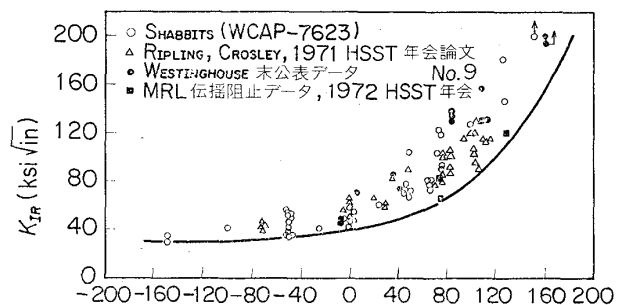


図 4 K_{IR} 曲線決定の実験的裏付け⁵⁾

このうち材料の靱性評価に関連するものは、ASME Sec. III²⁾ とその Appendix G³⁾であるが、それとは別に USNRC (米国原子力規制委員会) によつて、Federal Register 10 CFR Part 50⁴⁾ が制定されている。この規定の靱性値評価法は上述の ASME Sec. III とほぼ同じ内容をもつものであるが、すべて法律的な保証があたえられた強制力をもつたものである。

Section III と Appendix G に規定されている破壊靱性の尺度は RT_{NDT} (参照 NDT 温度) であるが、その決定手順を図 3 に示す。図に示すように NRL 落重試験と、その後実施される V-Charpy 試験とによつて求まる温度である。使用材料の RT_{NDT} の許容上限は原子力発電用機器の重要度に応じて、たとえば格納容器では最低使用温度から 30°F 差し引いた温度とするなどと定められているが、 RT_{NDT} が求めれば図 4⁵⁾ に示す K_{IR} (参照破壊靱性値) と RT_{NDT} の関係、

$$K_{IR} = 26.78 + 1.223 \times \exp \{0.0145 (T - RT_{NDT} + 160)\} \dots \dots (1)$$

ただし、 T : 試験温度 (°F)

を用いて K_{IR} を求めることができる。

上式であたえられる曲線は K_{IC} (平面ひずみ破壊靱性値), K_{Id} (平面ひずみ動的破壊靱性値) の外, 改良型 DCE 試験片により求められる K_{Ia} (平面ひずみ破壊伝播阻止靱性値) など, 種々の破壊靱性値を含め, すべてのデータの下限を代表するもので, 安全側の値を示すものと考えられるものである。

この破壊靱性値 K_{IR} と対比すべき K_I 値 (Stress Intensity Factor) の算定には, 構造物に内在する欠陥の形状, 寸法, 位置などを知らなければならないが, 十分安全側の評価を行うという意味で, Appendix G では現実ばなれした苛酷な仮想欠陥 (長さ: $1\frac{1}{2}t$, 深さ: $1/4t$ なる半楕円表面亀裂, t : 板厚, ただし $4 \leq t \leq 12$ in) を想定し, 欠陥面は最大主応力方向に直交するものとしている。

また使用状態で作用する応力を, 外力, 内力およびモーメントに対して単純な平衡の法則を満足する 1 次応力と, 隣接部分の拘束または自己拘束によつて生ずる 2 次応力に分類し, K_I の値を 1 次の引張り, 1 次の曲げ, 2 次の引張りおよび 2 次の曲げ, の各応力あるいは熱応力ごとにそれぞれ計算して, 1 次応力による K_I 値には機器の状態および対象によつて, 1.5 ないし 2 の安全率を乗じたものとして, これらをすべて集計したものが K_{IR} より小さくしなければならないとされている。

この結果を適用すると, 上述した仮想欠陥が巨大なため, 鋼材の破壊靱性に対する保証値がかなり厳しくなり製鉄技術上にも種々困難な点も生じている。しかし原子力発電用機器という特殊なものについての安全性確保という観点からは, ある程度やむをえないとも考えられるが, 仮想欠陥寸法の合理性, K_{IR} 曲線の妥当性を含めてこの方面の再検討が望まれている。

以上が原子力発電用機器の建設段階に対して, 使用材料の米国の破壊靱性値評価法を述べたが, このような評価法は対象となる構造物が限定され, 比較的簡単な形状で精密な応力解析が可能である場合以外は不可能であり, 一般に広く溶接構造物に用いられる構造用鋼の材質判定規準を, より品質管理レベルの色彩の濃い規準として, 破壊力学を用いて合理的に設定することが試みられている。その一例として次節に日本溶接協会 WES 3003 について述べることにする。

2.2 日本溶接協会規格 WES 3003 の G 種改訂について

現行の日本溶接協会規格 WES 3003「低温構造用鋼板材質判定規準」は, 本規格が初めて制定された 1964 年当時は, 破壊力学を適用した品質管理レベルの材質判定規準の画期的なものにして注目され, その内容は我が国はもちろん, 諸外国でもしばしば紹介された⁶⁾。その後数度にわたる改訂⁷⁾が行われたが, 脆性破壊の発生のおそれのある溶接構造物に適用される G 種と, 脆性破壊の伝播停止のための A 種は, いずれも脆性破壊の伝播試験

(二重引張試験) の結果に基づいたもので, 今日まで 10 年余りの適用実績をあげており, その思想は我が国の JIS 規格の制定にも適用されている。

しかしながら本規格の鋼板の一般的な材質水準を規定した G 種については, 脆性破壊の発生特性を基に評価すべきであるとの考えのもとに, 日本溶接協会鉄鋼部会で, ここ数年来 COD 概念に基く脆性破壊発生についての共同研究を進めてきたが, 最近ようやくその成案⁸⁾がまとまったので, ここでその概要について述べることにする。

溶接構造物の脆性破壊発生特性を問題とする以上は, 溶接をはじめとする加工, 工作などに関する多数の影響因子を度外視することは不合理であるが, “適正な, あるいは通常の溶接施工が行われる”ことを前提として, 溶接構造用鋼としてはどの程度の靱性をもたなければならないかを判定するものとし, 従来の WES 3003 の規格が品質管理レベルの判定規準であることの性格をそのまま踏襲している。そのため, 基本的には脆性破壊の発生特性をあたえる COD 試験結果をベースとして, 破壊力学的見地からは, 種々の問題点や不明確な点も少なくないが, 従来の経験による実績の積み重ねが豊富であり, 試験が簡単な V-Charpy 試験で最終的な材質判定を行うことになっている。

まず静的試験である COD 曲げ試験により求められる脆性破壊発生特性値としての限界亀裂開口変位 δ_c と, 動的試験である V-Charpy 試験の吸収エネルギー νE の遷移温度の差を考慮して図 5 に示すような基本的な考え方, すなわちその温度差だけ両遷移曲線をずらすことによつて δ_c と νE の相関を求めた。すなわち, 荻原⁹⁾

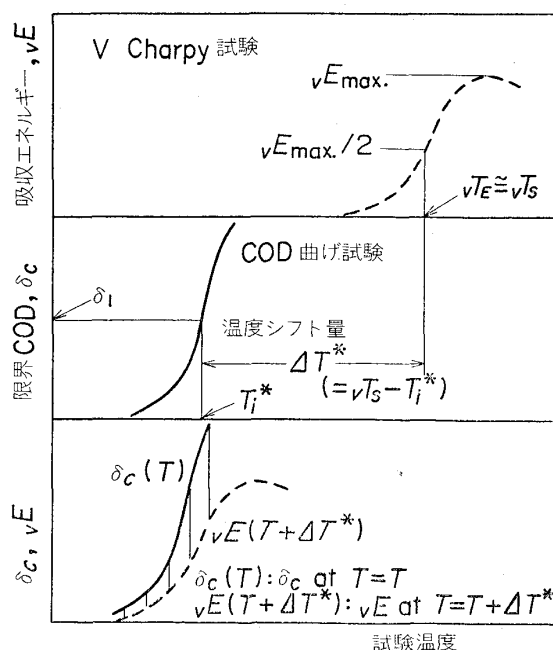
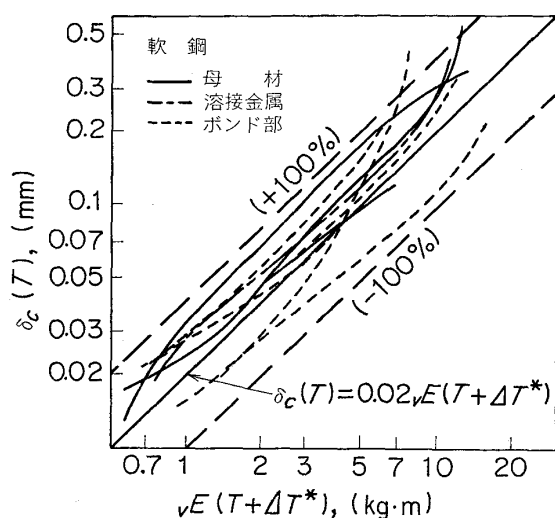


図 5 COD 試験と V-charpy 試験との相関の方法⁹⁾

図6 $\delta_c(T)$ と $vE(T+\Delta T^*)$ の関係⁹⁾

らは日本溶接協会の鉄鋼部会などで行われた。軟鋼，50 kg/mm² 級高張力鋼，60kg/mm² 級高張力鋼および 80 kg/mm² 級高張力鋼についての数多くのデータについて解析した結果，次式を提案している。

$$\delta_c(T) = 0.02 vE(T_R) \quad \left. \begin{array}{l} T_R = T + \Delta T^* = T + 142 - \sigma_{Y0} - 5\sqrt{t} \end{array} \right\} \dots (2)$$

ただし $\delta_c(T)$: $T(^{\circ}\text{C})$ における限界 COD (mm)

$vE(T_R)$: $T_R(^{\circ}\text{C})$ における V-Charpy 試験の吸収エネルギー (kg·m)

ΔT^* : V-Charpy 試験のエネルギー遷移温度 vT_E と COD 試験で切欠底部に繊維状破面が現れはじめる温度 T_i との差 ($^{\circ}\text{C}$)

σ_{Y0} : 鋼板の規格降伏点 (kg/mm²)

t : 板厚 (mm)

図6は，(2)式であたえられる関係を軟鋼について調べた結果を例示したものであるが，同様な結果が他の鋼種についても得られており，(2)式で $\delta_c(T)$ と $vE(T_R)$ が関係づけられることがわかる。

さて (2) 式で任意の温度における限界 COD は V-Charpy 試験の吸収エネルギーに置き換えられたが，これをさらにエネルギー遷移温度 vT_E に換算するために，エネルギー遷移温度近傍の V-Charpy 遷移曲線をすべての鋼種に対して，次式であらわれるものとする¹⁰⁾。

$$vE(T) = 10 + 0.4(T - vT_E) \dots (3)$$

この式は，V-Charpy 遷移曲線を正規確率積分曲線として，その展開式の第1項で近似したものであるが，この式の妥当性を示す例として 80 kg/mm² 級高張力鋼についての結果を図7に示す。

(3)式を(2)式に代入すると

$$\delta_c(T) = (117 + T - \sigma_{Y0} - 5\sqrt{t} - vT_E) / 125 \dots (4)$$

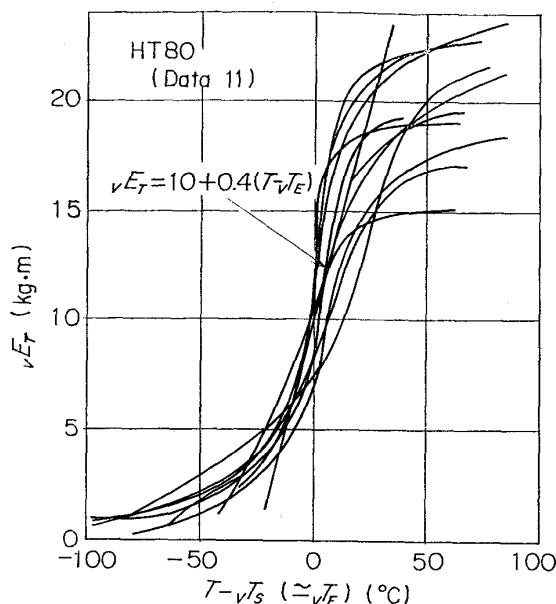
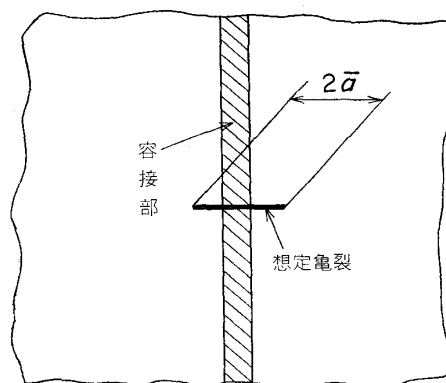
図7 V-Charpy 遷移曲線 (HT80)¹⁰⁾

図8 鋼板の材質判定をする場合の想定亀裂

が得られる。ただし上式は，機械的切削による切欠付 COD 試験と疲労亀裂を付けた COD 試験の遷移温度の差として 50°C の補正を行って，疲労亀裂付 COD 試験結果に換算したものである。

さて，材質評価に際して想定する欠陥であるが，WES 3003 は，母材に対する基準であることを考え，図8に示すような，その先端が疲労などによつて母材部に到達した板厚貫通亀裂を考える。このような欠陥には外力の他に溶接残留応力も作用することになるが，欠陥の大きさ自体は，理論上持っている意味よりも，むしろ材質判定に際して，鋼板を使用する個所の重要度ないしは材料に要求する靱性レベルの相対的尺度と理解するのが妥当であろう。このような亀裂の開口変位と外力との関係式として，後述する日本溶接協会 WES 2085¹¹⁾ では，

$$\delta = 3.5 \bar{a} (\sigma + 0.6 \sigma_{Y0}) / E \dots (5)$$

ただし δ : 亀裂先端の開口変位 (mm)

$\bar{a}$: 想定亀裂長さの 1/2 (mm)

σ : 作用応力 (kg/mm²)

σ_{Y_0} : 鋼板の規格降伏点 (kg/mm^2)

E : ヤング係数 (kg/mm^2)

を提案している. 上式で, $0.6\sigma_{Y_0}$ は降伏点に等しい溶接残留応力の最大値が存在するものとしたときの残留応力の寄与をあたえるものである. (5)式であたえられる開口変位 δ が, (4)式であたえられる使用温度 T における限界開口変位 δ_c に等しいものとすれば, $\bar{a}$ の値は,

$$\bar{a} = (117 + T - \sigma_{Y_0} - 5\sqrt{t} - \nu T_E) \times E / \{437.5(\sigma + 0.6\sigma_{Y_0})\} \quad \cdots \cdots (6)$$

で表わすことができる.

鋼板に要求される靱性値を得るためには, $\bar{a}$ の値を仮定しなければならないが, 使用実績がとくに豊富なアルミキルド鋼と 9%Ni 鋼についての V-Charpy 試験の要求値と調和するように考える. 板厚は一応 20 mm を考えることとし, アルミキルド鋼については JIS G 3126 (1975), 低温圧力容器用炭素鋼鋼板 SLA33A [$\sigma_{Y_0} = 33 \text{ kg}/\text{mm}^2$, $T = -45^\circ\text{C}$, $\nu T_E \leq -25^\circ\text{C}$] の規格を, また 9%Ni 鋼については ASTM A533 と ASTM Code Rection VIII Case 1308-5 の組合せ要求 [$\sigma_{Y_0} = 59.8 \text{ kg}/\text{mm}^2$, $T = -196^\circ\text{C}$, $\nu T_E \leq -130^\circ\text{C}$ *] を(6)式に代入すれば,

アルミキルド鋼: $\bar{a} = 55.1 \text{ mm}$

9%Ni 鋼: $\bar{a} = 13.7 \text{ mm}$

となり, 規格降伏点が高くなると $\bar{a}$ は小さくなる. 一般に鋼種によつて, それが使用される構造物あるいは構造部位はおのずから異なり, 一般に高強度材になるほど重要度は高くなり, 欠陥管理などが厳しくなることを考慮すれば, $\bar{a}$ を σ_{Y_0} の減少函数とみなすことは, それほど不自然ではないと思われる. そこで $\bar{a}$ が σ_{Y_0} によつて一義的に定まるものとし, 上記の例に適合する一般式として,

$$\bar{a} = 309 \cdot \exp \cdot (-0.0522 \sigma_{Y_0}) \quad \cdots \cdots (7)$$

を(6)式に代入し, $E = 21000 \text{ kg}/\text{mm}^2$ を採用すれば, 要求される νT_E の最高値として,

$$\begin{aligned} \nu T_{E \text{ max.}} = & 117 + T - 5\sqrt{t} - \sigma_{Y_0} - 6.44 \\ & \times (\sigma + 0.6\sigma_{Y_0}) \exp \cdot (-0.0522 \sigma_{Y_0}) \quad \cdots \cdots (8) \end{aligned}$$

とくに $\sigma = \sigma_{Y_0}/2$ のときは,

$$\begin{aligned} \nu T_{E \text{ max.}} = & 117 + T - 5\sqrt{t} - \sigma_{Y_0} \\ & - 7.08 \sigma_{Y_0} \exp \cdot (-0.0522 \sigma_{Y_0}) \quad \cdots \cdots (8)' \end{aligned}$$

のように求めることができる.

この要求値は現行の WES 3003 G 種と比較すると, 図 9 のようになり, 改訂案の値の方が $0 \sim 20^\circ\text{C}$, 平均的には 10°C ほど緩くなっているが, 要求の基礎を脆性破壊発生特性をあたえると考えられる COD 試験にその根拠をおいた, 抜本的な変更にもかかわらず, 具体的

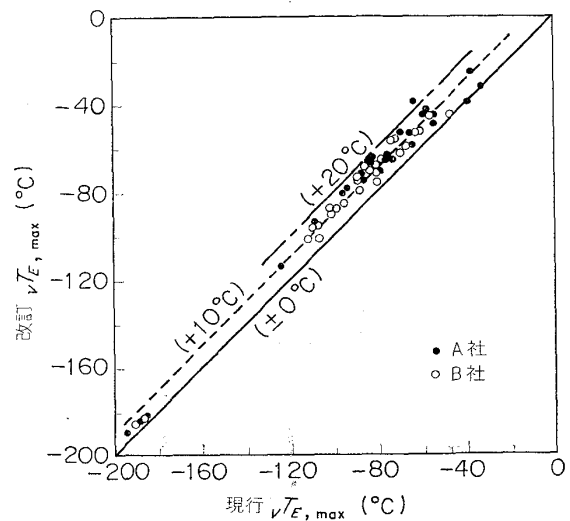


図 9 WES 3003 G 種の靱性要求改訂案と現行の比較

な要求値には変動がない. また ASTM の規格値との対応を調べると表 1 のようになり, 概して板厚が大きい場合はやや厳しい要求値となつていますが, 板厚 1" (25.4 mm) のときは, 両者の要求値はほぼ一致しており, 妥当なものであると考えられる.

3. 溶接構造物の欠陥評価

既往の破壊力学的諸研究をふまえ, かつ実用性の見地から種々の単純化を行ない, 溶接構造物の機能適合性に照らした欠陥の評価を行なう基準としては, 原子炉圧力容器を対象とした ASME Sec. II の Appendix A¹²⁾ をはじめとして, 一般の溶接構造物を対象とした BSI Draft¹³⁾ などのほか, 我が国では最近制定された日本溶接協会 WES 2805「脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定規準¹¹⁾」などがある. これらはいずれも, 材料強度や外力の確率論的側面は念頭におきながらも, 実務的簡便さを最重点に, もつぱら決定論的立場より大胆な単純化による破壊力学の応用をはかつたものであり, 種々の不確実要因は多分に主観的判断による安全代を適宜見込むという形で考慮している.

しかし破壊現象が本来確率的な側面を持つ物性であることをはじめとして, 実際構造物の欠陥の挙動は, 学問研究の対象となりにくい多くの複雑な未解決の問題が存在しており, 破壊力学による強度予測といつても, 実験事実にもとづく類推や仮定などによる種々の不確実要因が介入してくることは避けがたい.

このような条件下で, 合理的でバランスのよい判断を下すためには, 経験や実績にもとづく高度な技術者感覚による判断も大切であるが, いわゆる信頼性工学的手法を活用して, より客観根拠の裏打ちとすることがこれからのあるべき姿といえよう.

* -196°C での吸収エネルギーとして $3.5 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 以上を要求しているが, (3)式を用いて換算すると $\nu T_E \leq -180^\circ\text{C}$ となる.

表 1 ASTM 規格と WES 3003G 種改訂案との比較 (ASTM A593-72 "Charpy V Notch Testing Requirements of Steel Plates for Pressure Vessels")

鋼 種	板厚 (mm)	T (°C)	vE_T (kg·m)	σ_{YO} (kg/mm ²)	vT_E^* 規格 (°C)	vT_E 改訂案 (°C)	鋼 種	板厚 (mm)	T (°C)	vE_T (kg·m)	σ_{YO} (kg/mm ²)	vT_E^* 規格 (°C)	vT_E 改訂案 (°C)
A285 Gr A	25.4 50.8	4.4 15.6	1.4 〃	16.9 〃	+26 +37	+30 +30	A516 Gr60	25.4 50.8 76.2	-45.6 〃 〃	1.8 〃 〃	22.5 〃 〃	-25 〃 〃	-26 -36 -44
A285 Gr B	10.0 50.8	10.0 21.1	1.4 〃	18.8 〃	+32 +43	+33 +34	A516 Gr65	25.4 50.8 76.2	-45.6 〃 -40.0	1.8 〃 〃	24.6 〃 〃	-25 〃 -20	-27 -37 -40
A285 Gr C	25.4 50.8	15.6 26.7	1.4 〃	20.9 〃	+37 +48	+37 +37	A203 Gr B	25.4 50.8 76.2	-67.8 〃 -59.5	2.1 〃 〃	28.0 〃 〃	-48 〃 -40	-50 -60 -60
A442 Gr55	25.4	-1.1	1.4	20.9	+20	+20	A203 Gr E	25.4 50.8 76.2	-101.0 〃 -87.2	2.1 〃 〃	28.0 〃 〃	-81 〃 -67	-83 -93 -88
A442 Gr60	25.4	1.7	1.4	22.4	+23	+22	A299	25.4 50.8 76.2	-6.7 -1.1 〃	2.1 〃 〃	29.5 28.0 〃	+13 +19 〃	+11 +6 -2
A455 T・I	9.5 14.7 19.0	-3.9 〃 〃	1.8 〃 〃	26.4 25.7 24.6	+17 〃 〃	+24 +20 +18	A455 T・II	9.5 14.7 19.0	-9.4 〃 〃	2.1 〃 〃	26.4 25.7 24.6	+10 〃 〃	+19 +15 +13
A203 Gr A	25.4 50.8 76.2	-67.8 〃 -59.5	1.8 〃 〃	26.0 〃 〃	-47 〃 -39	-50 -60 -60	A515 Gr70	25.4 50.8 76.2	-40.0 -34.4 〃	2.1 〃 〃	26.7 〃 〃	-20 -15 〃	-22 -27 -35
A203 Gr D	25.4 50.8 76.2	-101.0 〃 -87.2	1.8 〃 〃	26.0 〃 〃	-81 〃 -67	-83 -93 -87	A537 Cr A	25.4 50.8 63.5	-59.5 〃 〃	2.1 〃 〃	35.2 〃 〃	-40 〃 〃	-43 -53 -57
A410	25.4 50.8 76.2	-87.2 -73.3 -65.0	1.8 〃 〃	21.1 〃 〃	-67 -53 -45	-66 -63 -63	A537 Gr B	25.4 50.8 63.5	-59.5 〃 〃	2.1 〃 〃	42.2 〃 〃	-40 〃 〃	-43 -53 -57
A442 Gr55	38.1	-28.9	1.8	20.9	-8	-14							
A442 Gr60	38.1	-26.1	1.8	22.4	-6	-12							
A516 Gr55	25.4 50.8 76.2	-45.6 〃 〃	1.8 〃 〃	21.1 〃 〃	-25 〃 〃	-25 -35 -43							

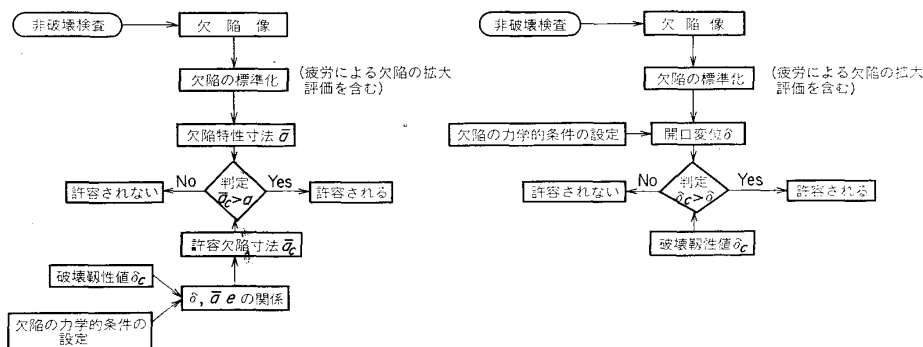
* $vT_E = 25 + T - 2.5vE_T$ で換算した ASTM 規格値

図 10 欠陥評価手順のフローチャート

本章では、このような観点から、破壊力学的手法を導入した欠陥評価法の例として、日本溶接協会 WES 2085 の内容の概略と、それに関連して簡単な信頼性工学的な考察を加えた結果について述べることにする。

3.1 日本溶接協会 WES 2085¹¹⁾について

WES 2085 は、一般の溶接構造物に用いられる鋼材を対象として、溶接継手に含まれるクラックまたはそれに準ずる平面状欠陥の許容判定の方法を示したもので、評

価手順をフローチャートの形にして示すと図 10 のようになる。以下その手順について簡単に述べることにする。

3.1.1 欠陥特性寸法 $\bar{a}$ の設定

対象とする欠陥は、クラック、溶け込み不足、アンダーカットなど亀裂ないしそれに近いとみなされる平面的な欠陥であるが、一般に規則性が低く、複雑な形状のこれら欠陥を、単純な破壊力学的解析手法にのせるためにまず単純な幾何学的形状に変換しなければならない。

この場合検出された欠陥像は、板厚貫通欠陥、表面欠陥、埋没(内部)欠陥ごとに、不規則な形状を、自由表面上に平行および垂直の方向のそれぞれの最大寸法を基に、平面状の二次元的貫通亀裂、楕円弧状あるいは半楕円弧状の板厚非貫通亀裂におきかえる。埋没欠陥の場合についての単純化の例を図 11 に示す。

このようにして単純化された欠陥を独立した単一のもの

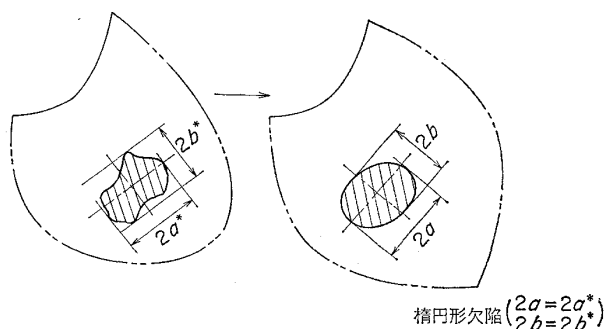


図 11 欠陥形状の単純化 (埋没欠陥)

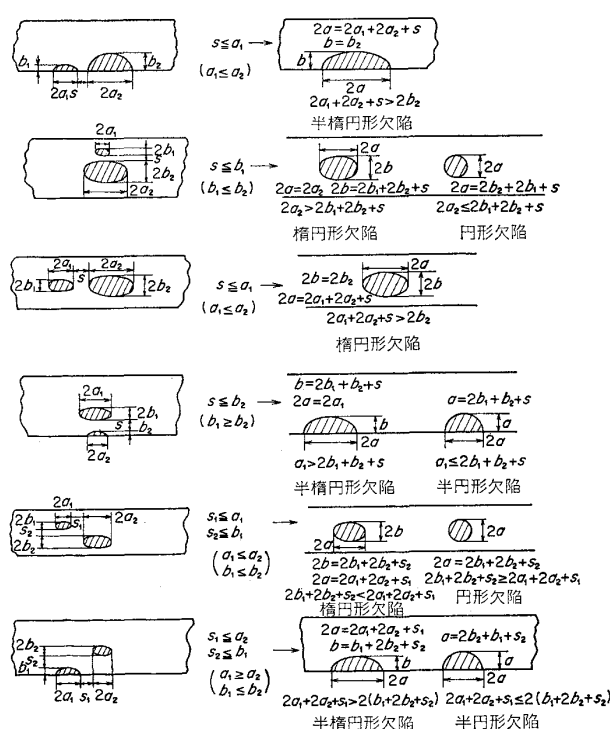


図 12 近接欠陥の複合

のと考えてよいが、あるいはこれらが互いに近接しており、相互影響のためにこれらの複合効果を考慮すべきかの判別を行って、独立した欠陥に置換える。この場合は、まず非同一平面上の欠陥同士について評価し、次に同一平面上にあると判定した欠陥の干渉を評価することとし、干渉がないと判定した非同一平面上の欠陥については再度評価することはしないこととしている。同一平面上の複数欠陥の複合法を表面欠陥および埋没欠陥の場合について図 12 に示してある。近接欠陥の複合法についてはたとえば ASME Code Sec. II にも記載されており、ここで述べた方法とは若干異なるが、WES 2085 では、一様応力場中の単純な複数欠陥についての解析結果を検討し、欠陥の K 値または COD 値が単独の場合より約 20% 以上大きくなる場合に、いずれよりも大きい欠陥におきかえたもので、安全側の置換になつている。

次に、独立した単一の欠陥に置換えられたものについて、板厚非貫通(埋没、表面)の場合に、自由表面の影響を上記と同様な考え方で評価し、影響を無視できない場合には、自由表面まで貫通しているものとして取扱う。

このようにして得られた欠陥寸法、 a 、 b をもとに、板厚貫通欠陥の場合には a の値を、非貫通欠陥の場合にはそれと等価な K 値をあたえる貫通欠陥の半長を欠陥特性寸法 $\bar{a}$ と設定するわけである。なお図 13 は、表面欠陥の場合についての $\bar{a}$ を求める換算曲線を示したものである。

なお構造部材が繰返し荷重をうけて、疲労亀裂成長による欠陥寸法の拡大が予測される場合には、所定の期間後における欠陥寸法を算定して、それについて評価を行わなければならない。WES 2085 では、最近の川原らの疲労亀裂伝播についての研究結果¹⁴⁾など大幅に採り入れた具体的評価法について規定しているが、紙面の関係で省略することにする。

3.1.2 力学的条件の設定と亀裂開口変位 δ の算定

欠陥に作用する応力またはひずみ値、すなわち欠陥の力学的条件は、欠陥を含む部材に作用する境界力の他に、溶接残留応力、ひずみ集中などを考慮しなければならない。

一般に評価の対象となる欠陥は、原則的には欠陥が存

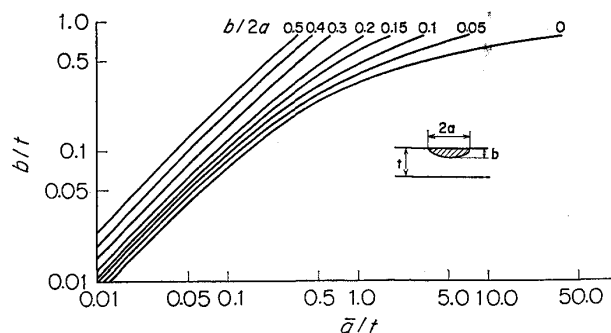


図 13 $\bar{a}$ を求めるチャート (表面欠陥)

在しないという前提で設計されている構造部材に存在しているものであり、応力集中、溶接残留応力などのために欠陥がない状態でも塑性状態（一般にそのまわりは弾性状態の部分に囲まれている）にある場合が多いと考えられる。従つて WES 2085 では欠陥に作用する力学的条件として、応力ではなくひずみ e を用いているが、 e は境界力による e_1 、溶接残留応力による e_2 、および溶接継手形状による集中ひずみ e_3 の和と考えることができる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} e &= e_1 + e_2 + e_3 \\ e_1 &= \sigma_t / E + \alpha_b \sigma_b / E \\ e_2 &= \alpha_r \sigma_{Y0} / E \\ e_3 &= (K_t - 1) e_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ただし

σ_t : 引張応力

σ_b : 面外曲げ応力

E : ヤング係数 (kg/mm²)

σ_{Y0} : 鋼板の規格降伏点 (kg/mm²)

α_b : 欠陥の種類による係数 (表 2)

α_r : 溶接継手および欠陥の種類とその位置関係によつて決まる係数 (表 3)

K_t : 溶接継手形状によるひずみ集中係数 (3~1)

で e の値を算定することができる。なお溶接継手が残留応力除去焼鈍されている場合は e_2 は考えなくともよい。

さて前節で設定した欠陥特性寸法 $\bar{a}$ の欠陥に上述したひずみ値 e が作用する時の亀裂開口変位 δ の値は、

$$\delta = 3.5 e \bar{a} \dots\dots\dots (10)$$

であたえられる。この式の根拠の詳細はここでは省略するが、一様引張応力場中の Dugdale 亀裂の中央に亀裂をまたいで標点距離を想定すると、この式は亀裂長さの

表 2 α_b の 値

欠 陥 の 種 類		α_b
貫 通 欠 陥		0.5
埋 没 欠 陥		0.25
表 面 欠 陥	欠陥が引張応力側にある場合	0.75
	欠陥が圧縮応力側にある場合	0

表 3 α_r の 値

欠陥の種類	突合溶接継手		隅肉溶接継手	
	溶接線と平行な欠陥	溶接線と直角な欠陥	溶接線と平行な欠陥	溶接線と直角な欠陥
板厚貫通欠陥	0	0.6	0	0.6
埋 没 欠 陥	0	0.6	0	0.6
表 面 欠 陥	0.2	0.6	0.6	0.6

2~3 倍の標点距離のひずみ e と亀裂の開口変位 δ をあたえる式とほぼ同等であることを指摘しておく。

3.1.3 材料の破壊靱性値 δ_c の推定と許容欠陥の判定

さきに図 10 に示した欠陥の許容判定手順で、構造部材に含まれる種々の欠陥像より、欠陥特性寸法 $\bar{a}$ の設定と、欠陥に対する力学的条件としてのひずみ量 e の設定から、亀裂の開口変位量 δ を算定する方法について略述したわけであるが、欠陥が許容されるか否かを判定するためには δ に対比すべき破壊靱性値 δ_c ($\bar{a}$ に対比すべき許容限界欠陥特性寸法 $\bar{a}_c$) を求めなければならない。

δ_c の値は、原則として当該部分と同等の材料を用いて曲げ COD 試験により求めることを建前にしており、その試験法と結果の評価法を示している。しかし実務的にはこれが困難な場合が多いと思われるため V-Charpy 衝撃値による簡易推定法も示している。この方法は既に第 2 章で述べた (4) 式によるものであるが、機械切削による切欠付 COD 試験と疲労亀裂切欠付 COD の試験との遷移温度の補正を 30°C ((4) 式中の 142 の代りに 112 を採用していることを意味する) としている。他、安全側の推定をするため係数の 0.02 の代りに 0.01 を用いている。

さて、最終的な許容度の判定は、上述した手順によつて求められた欠陥を含む構造要素に作用する外力、溶接残留応力などによる欠陥の開口変位の上限に対応する δ と、材料の破壊に対する抵抗力の下限に当る意味合いをもつ δ_c 、または各々に対応する欠陥寸法 $\bar{a}$ と $\bar{a}_c$ との対比で行われることになる。

3.2 信頼性工学的考察の応用¹⁵⁾

構造物の欠陥評価という破壊強度の予測は、先にも述べたように破壊強度自体が、本来確率事象であるとともに、構造物に作用する外力をはじめ関連する諸要因の確率的性質のため、信頼性工学の手法を応用して、はじめて合理的な判定規準が得られるものと思われるが、前述の諸規準を含めて、このような研究はほとんどなされていないのが現状である。

信頼性工学的手法の応用にはいくつかの側面が考えられるが、ここでは前述の WES 2085 による欠陥評価方法における不確実要因の分析と、応用面の一例として、簡単な例題について関連因子の相対的影響の考察 (Sensitivity Analysis) について述べる。このような考察により、各因子の推定精度のバランスをはかることにより、意味のない厳密さを要求する不合理な無駄を回避できるとともに、この種の欠陥評価法の合理的な信頼性向上のためには、今後どのような研究が推進されなければならないかを探究する基礎となるべきものである。

3.2.1 不確実要素の分析

前述の基準による欠陥評価方法の流れ図は図 10 に示したとおりであるが、各ステップにおける不確実要素にはどのようなものがあるかを考えると、本質的に確率的

な要因であるもの P と、本来決定論的に論ずることが可能なものであるが、現状の見解では解析が不十分のため正解が得られないための不確実要因 D との分けることができる。

まず非破壊検査で、寸法 $\bar{a}$ の欠陥が存在するときこれを検出する確率、寸法 $\bar{a}$ の欠陥の存在する場所を検査する確率 (全線検査の場合を除く)、寸法測定誤差、単一または複数欠陥であるという確かさなどは、すべて要因 P であると考えられる。

これに対して、次のステップである欠陥の標準化および欠陥特性寸法 $\bar{a}$ の決定では、検出された欠陥の単純化、複数欠陥の複合操作、自由表面の影響に関する操作、非貫通欠陥より $\bar{a}$ への換算などはすべて要因 D に属するものと考えても差支えないであろう。

また、欠陥の力学的設定および開口変位 δ の力学的算定の手順においては、外力の確率的性質、構造解析の誤差などによる引張応力 σ_t 、面外曲げ応力 σ_b の不確実さ、および材料の規格降伏点に対応する降伏ひずみ e_Y などは要因 P であるが、曲げ応力の寄与を示す式 (9) 中の係数 α_b 、溶接継手のひずみ集中係数 K_t 、開口変位 δ の力学的算定式 (10) の係数、3.5、などは要因 D と見なすことができる。なお、疲労亀裂伝播による欠陥寸法の拡大の推定にも、初期欠陥寸法、応力振幅などの要因 P と、拡大評価式の不確実さによる要因 D が考えられる。

最後に破壊靱性値 δ_c の推定には、COD 試験より求めた値の不確実さ、V-Charpy 衝撃値からの推定式の不確実さは、要因 P と D とが複合しているものと考えられる。

より緻密な不確実要因の分析も可能であろうが、上記の要因 D については、今後の研究によつて少しでもその不確実度を少なくすべきものであるが、当面は安全側の設定になつていけばよいと考えるべきであろう。

上記のように不確実要因の分析を行つてみると、大部分の要因について、その不確実性を定める関数形が不明であることはもとより、近似的にそれを推定する根拠となる具体的数値データは非常に不足していることである。今後このような立場からの実地調査や実験によるデータの蒐集が望まれるところである。

3.2.2 各因子の破壊確率への影響度の分析例

さて前述の欠陥評価基準における欠陥の破壊に対する安全性の判定は、外力または荷重に対応して設定される開口変位 δ と、材料の破壊靱性値 δ_c を対比し、 $\delta > \delta_c$ なることを要求するものである。すなわち破壊確率 P_F は、

$$P_F = P(\delta - \delta_c > 0) \quad \dots\dots\dots (11)$$

欠陥を含む構造要素の信頼性 R は、

$$R = 1 - P_F \quad \dots\dots\dots (12)$$

であたえられる。 δ や δ_c のそれぞれの不確実要素の依存性が解析的に表わされており、しかもそれらの分布函

数と確率的パラメーターが分つていれば、 $Z = \delta - \delta_c$ の確率密度関数 $f_Z(Z)$ 、分布関数 $F_Z(Z)$ を計算することができ、破壊確率は、

$$P_F = P(Z > 0) = \int_{-\infty}^0 f_Z(Z) dZ = F_Z(0) \quad \dots (13)$$

で与えられる。

簡単のため板厚貫通欠陥をとりあげ、評価式に現われる各因子のうち、確率変数とみなされるものについては、互に独立であり、正規分布にしたがうものとして、信頼性又は破壊確率におよぼすこれらの影響度を数値的に検討した例について述べる。

まず δ_c 値は安全側の推定になつていられることから、

$$(\delta_c \text{ の設定値}) = E(\delta_c) - 2\sigma_{\delta c} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし $E(\delta_c)$: δ_c の平均値 (期待値)

$\sigma_{\delta c}$: δ_c の標準偏差

と仮定する。すなわち δ_c の推定値は安全側の値であり、 δ_c が推定値より小さい確率は 5% 程度であるとする。また変動係数 (C.O.V.) は 0.1 と仮定する。

一方 δ の算定式は疲労による亀裂の拡大を考慮する必要のない場合は、

$$\delta = 3.5 \{ K_t (\sigma_t + \alpha_b \sigma_b) / E + \alpha_r e_Y \} \bar{a} \quad \dots\dots\dots (15)$$

であたえられることはすでに述べたが、数値例として、決定論的パラメーターとみなしたものは上式の係数 3.5 の他

$$K_t = 1, \alpha_b = 0.5, \alpha_r = 0.6,$$

$$E = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/mm}^2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

確率変数とみなしたものは、変動係数 0.05 の正規分布として

$$E(\sigma_t) = 10 \text{ kg/mm}^2, E(\sigma_b) = 10 \text{ kg/mm}^2,$$

$$E(e_Y) = 1.4 \times 10^{-3}, E(\bar{a}) = 10 \text{ mm} \quad \dots\dots (17)$$

としてこれら各パラメーターを設定値のまわりに変化させ、破壊確率の変化を計算した。その結果の例を図 14 および図 15 に示す。なお図中には疲労による亀裂の拡大を考慮する場合も示してあるが、これは板厚貫通疲労

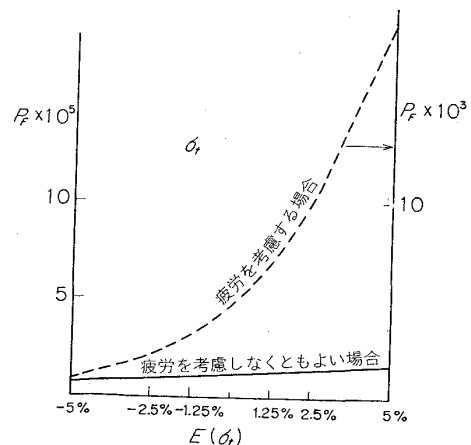
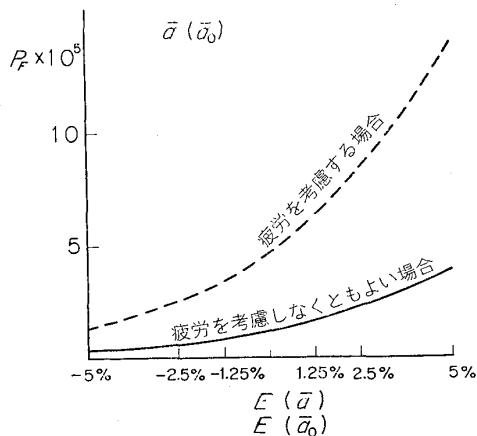


図 14 σ_t の影響¹⁵⁾

図 15 $\bar{a}$ の影響¹⁵⁾

亀裂の拡大に対して Paris 則, $\frac{d\bar{a}}{dN} = C (\Delta K)^m$ を適用し,

$$\begin{aligned} E(\Delta\sigma_t) &= 10 \text{ kg/mm}^2, E(\Delta\sigma_b) = 10 \text{ kg/mm}^2 \\ E(C) &= 5.46 \times 10^{-12}, E(m) = 4.0, E(N) = 10^4 \\ E(\bar{a}_0) &= 7.8 \text{ mm} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

とし, これらはいずれも上記と同様に独立した正規分布で変動係数を 0.05 とし, 他は式(16), (17)であたえた値を採用した場合である. なお初期欠陥寸法 $\bar{a}_0$ の平均値 ($\bar{a}_0$) は荷重繰返し数 $N=10^4$ 後の亀裂寸法の平均値が 10 mm となるように定めたものである.

これらの計算は, 影響度を検討する因子以外の因子はすべて平均値を用いているが, これらの結果から, 各因子の不確かさが, 信頼性にどのような影響をあたえるかを総括すると, 次のようなことがいえる.

(1) 疲労亀裂の成長をともなう場合も, そうでない場合も, K_t , α_b , e_Y などが P_F におよぼす影響は比較的小さいが, $\bar{a}(\bar{a}_0)$ の影響が比較的大きい.

(2) 疲労を考慮しなければならない場合の破壊確率は, 常に疲労を考慮しなくてもよい場合のそれよりも大きい, これは繰返し荷重後の疲労亀裂長さの平均値が, 繰返し荷重を受けない場合の平均値 10 mm に等しくなる場合を比較しているためである. すなわち疲労亀裂の拡大を考慮しなければならない場合は, 亀裂の伝播則の C , m , N のばらつきを考慮しなければならないため, 変動係数が疲労を考慮しない場合に比してはるかに大きくなるためである. このことは前節で述べた WES 2035 の評価法には, 疲労の有無で評価の相対的な信頼性に改善を加えなければならないアンバランスをもっていることを示している.

(3) 破壊確率に大きな影響をあたえると考えられる因子 δ_c は式(14)のように設定したが, その根拠をあたえるための実験によるデータの蒐集が望まれる.

(4) 非破壊検査でとくに埋没欠陥の寸法測定の不確かさはかなり大きいものと思われるので, 非破壊検査技

術と検査方法の実態調査にもとづく不確か性の定量化と, この種の信頼性解析結果のフィードバックによる検査システムの改善が必要である.

以上はすべて確率分布は正規分布で, 変動係数は δ_c に対しては 0.1, その他の因子に対しては 0.05 としたときを例示したものであるが, 各因子の確率分布を各々適切なものを採用することはもちろんのこと, 変動係数の影響などもしらべることが是非必要であろう.

4. む す び

以上鋼材の破壊靱性値評価法と溶接構造物の欠陥評価と題して最近制定された日本溶接協会規準を中心に述べたが, 限られた紙面のため舌たらずの記述に終ってしまったが, 読者の参考になれば幸甚であると考え.

なお最後に信頼性工学的解析を中心とする, より緻密な考察をふまえた, これら規準の改訂準備が日本溶接協会会で進められていることをつけ加えておく.

文 献

- 1) J. HODGSON and G. M. BOYD: Trans. Roy. Inst. Nav. Arch., 100 (1958), p. 141
- 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Rules for Construction of Nuclear Plants Components, (1974)
- 3) Appendix G, Protection against Nonductile Failure, to ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, (1974)
- 4) Appendix G, Fracture Toughness Requirements, to Federal Register 10CFR, Part 50, (1973)
- 5) PRVC Ad HOC Group on Toughness Requirements, PVRC Recommendations on Toughness Requirements for Ferritic Materials, WRC Bulletin 175, (1972)
- 6) H. KIHARA and T. KANAZAWA: IIW Doc. IX-414-64, (1964)
- 7) H. KIHARA, T. KANAZAWA, and H. TAMURA: The Contribution of Physical Metallurgy to Engineering Practice, Rosenhain Centenary Conference, The Society, London, (1976), p. 247
- 8) 日本溶接協会鉄鋼部会 JI 委員会, WES3003 (旧 WES136) G 種改訂案について, (1977)
- 9) 萩原行人, 征矢勇夫, 三波建市, 佐藤光雄: 溶接学会誌, 45 (1976), p. 627
- 10) 三村 宏: 土木学会本四架橋上部構造委員会鋼材分科会資料, (1975)
- 11) 日本溶接協会鉄鋼部会 WSD 委員会, 脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定規準, WES 2085, (1977)
- 12) Appendix A, Evaluation of Flaw Indications, to ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Reactor Coolant Systems, (1974)

-
- 13) British Standard Institution, Draft British Standard Rules for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joint, (1976)
- 14) 川原正言, 栗原正好: 日本造船学会論文集, No. 137(1975), p. 297
- 15) 町田 進: 信頼性工学による破壊力学応用研究ゼミナール, 日本高圧力技術協会(HPI), (1977)
-