

溶接構造用鋼の曲げ試験における破壊挙動に およぼす衝撃速度の影響

北村 茂*・中村正久**・呂 芳一**

The Effects of Impact Velocity on Fracture Behavior of Weldable Structural Steel in Bending Tests

By

Shigeru KITAMURA*, Tadahisa NAKAMURA** and Yoshikazu RO**

Abstract

Mechanical properties and fracture toughness bending strength of weldable structural steel (SM41) have been studied with three point bending test over the wide range of nominal bending speed ranging from 6 mm/min to 40 m/sec and testing temperature, from -196 to 70°C .

The results obtained were as follows.

1) Nominal skin stress of smooth specimen had been increased with lowering temperature and increase of bending rates. In static bending of fatigue-cracked and mechanically notched specimens, it showed no remarkable temperature and notch root radius dependency except at lower temperature, while in dynamic bending, it was observed strong temperature, notch root radius and bending speed dependencies.

2) Ratio of nominal skin stress of notched specimens to that of smooth ones was increased with notch root radius and showed no strong temperature dependency in static bending. In dynamic bending, the ratio was increased sharply with temperature and shifted to higher temperature with bending speeds.

3) The effect of notch root radius was not strong in fracture toughness. Plane strain fracture toughness was obtained at higher temperature in dynamic bending than in static one.

4) The relation between cross head displacement and clip gage one showed linear relationship for both experimental results and finite element method (FEM).

5) Critical COD in dynamic bending might be calculated from the relation between cross head displacement and clip gage one in static test, and the experimental equation about COD and displacement in dynamic test.

6) In critical COD, transition behavior was observed for temperature and it shifted to higher temperature with bending speeds.

1. 緒 言

船舶らに多く使用される溶接構造用鋼の脆性破壊は、加工ならびに設計上、重要な問題である。脆性破壊の評価基準として線形破壊力学にもとづく破壊靱性

値 (K_{IC} 値) は、非常に有効であることが示されているが、平面ひずみ破壊靱性値 K_{IC} は、試験片の寸法が大であること、また破壊までの小規模降伏が満たされねばならないことなど実験上の困難は大きい。一方、き裂開口変位 (COD 値) は、荷重変位関係が非線形挙動を示す場合にも破壊基準として使用しうるといわれている。これらの諸特性値の温度および負荷速度依存性については、すでに多数の報告があるが¹⁻⁴⁾、COD 値は、衝撃試験の場合、直接計測しにくいため十分に研究されていないようである。また、鉄鋼材料では、これらの値は衝撃引張試験について、多くの結果を得

* 船体構造部 ** 東京工業大学

* Ship Structure Division, Ship Research Institute, 6-38-1 Shinkawa Mitaka-shi Tokyo 181

** Graduate School of Science and Engineering at Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama Meguro-ku Tokyo 152

原稿受付: 昭和52年6月21日

ているが、衝撃曲げ試験について、とくに曲げ速度を
広範囲に変えて系統的に研究した例は少ない。

著者らは、回転円板式高速衝撃試験機を用いて、一
連の衝撃破壊挙動について調べ、引張速度の影響につ
いてはすでに報告したり。今回は、前報と同種の溶接
構造用鋼を用いて、小型試験片による衝撃曲げ試験を、
温度をかえて行い、機械的性質のほかにも前述の諸特性
値を求め、これらの相互の関係を明らかにするととも
に、静的曲げおよびシャルピー衝撃試験の結果との比
較および検討を行った。

2. 試験方法

2.1 供試鋼および試験片

供試鋼は板厚 10 mm の JIS SM41A で、C: 0.14,
Si: 0.23, Mn: 0.62, P: 0.012, S: 0.018% の化学成
分のものを用いた。

曲げ試験片に疲労き裂を入れるために、Fig. 1 に示
すような WOL 型の試験片を最初に加工した。この試
験片を西原式疲労試験機に両端をピン止めにして、毎
分 900 回の引張圧縮繰返し荷重を与え、繰返し数を
1.0~4.0×10⁵ 回の間で疲労き裂を導入した⁹⁾。き裂が
3~5 mm 進んだ所で止めて、試験片の幅の 1/2 ま
でき裂がくるように加工し、疲労き裂付曲げ試験片を製
作した。

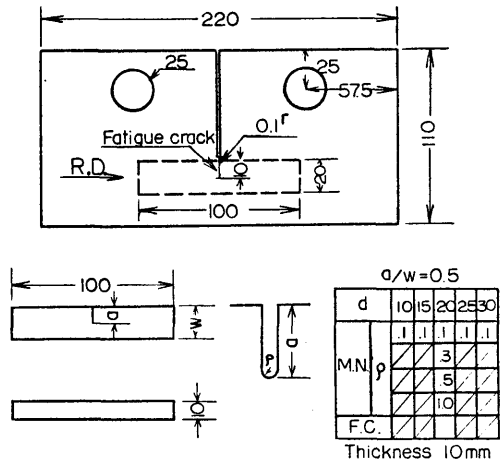


Fig. 1 Shapes and dimensions for fatigue-cracked and notched specimens.

切欠曲げ試験片は切欠先端半径を 0.1, 0.3, 0.5 お
よび 1.0 mm になるように機械加工し、試験片の幅の
1/2 まで高速カッターで入れた。試験片の幅に対する
切欠長さの比を 0.5 と一定にしたままで、試験片の幅
を変えたものについても一部実験を行った。

平滑曲げ試験片は幅が 10 mm, 長さ 100 mm とした。

2.2 曲げ試験

静的曲げ試験は 50 トンのアムスラ型試験機に、ス

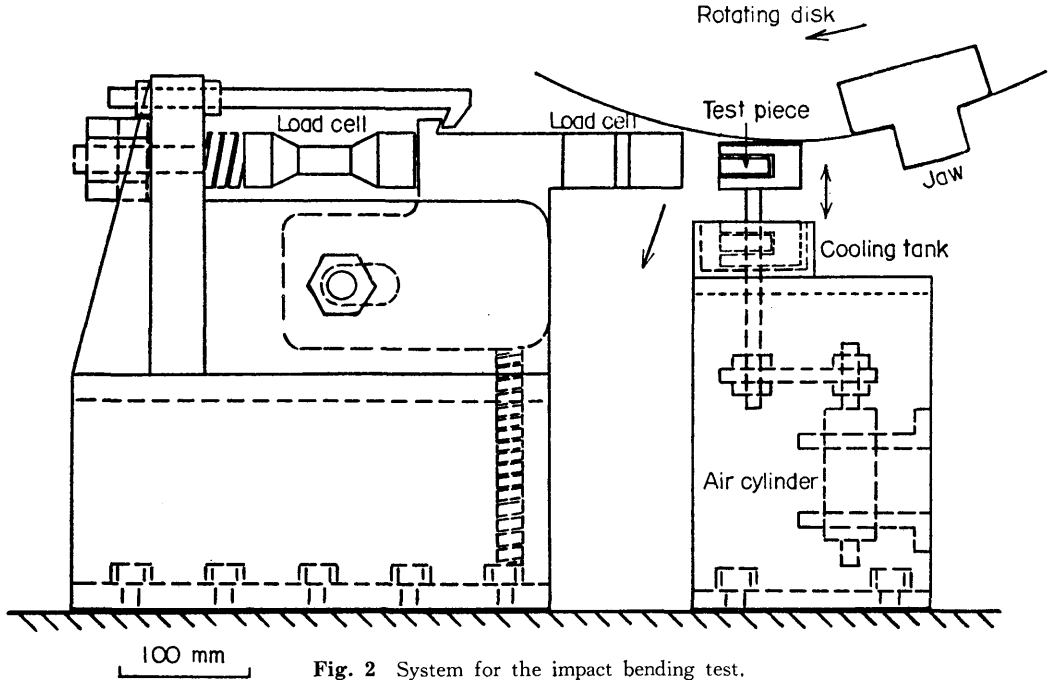


Fig. 2 System for the impact bending test.

パン間隔 70 mm の曲げ治具をとりつけ、負荷速度を 6 mm/min、試験温度を -196°C から室温の範囲で 10 温度として行った。

衝撃曲げ試験は回転円板式高速衝撃試験機を用い、Fig. 2 に示す衝撃曲げ試験装置を設計し使用した。刃の部分に試験片が当たり、衝撃荷重が加わると、刃の部分は回転円板の外周についている爪からはずれ、つぎに円板が回転して爪がきても、試験片を再び打撃しないようになっている。刃部および荷重棒に、半導体ストレングージをブリッジに組み、ロードセルとした。2 つのロードセルの中、比較的形のよい波形を示した刃部のロードセル出力を、荷重として計算した。

円板は希望の円周速度が得られるように、主電動機からトルク・コンバーターを介して漸進的に加速される。所定の円周速度になると、円板の爪と曲げ試験装置とで、衝撃曲げ試験を行う。すなわち、円板の爪が円板直下の曲げ試験装置の刃の部分を通過すると、高圧の窒素ガスにより試験片が打上げられ、円板の爪に両端が当たり、3 点曲げの型式で負荷される。

破壊までの荷重 - 時間曲線は、トランジエント・レコーダーに記憶し、シンクロスコープで観察し、XYT レコーダーで記録した。

衝撃曲げ速度は 5, 10, 20, および 40 m/sec の 4 種類、試験温度は $-80 \sim 70^{\circ}\text{C}$ までの範囲で 6 点として実験した。

平滑曲げ試験片からは降伏応力および破壊曲げ応力を、切欠曲げ試験片からは破壊応力、脆性破面率および断面収縮率を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 曲げ応力

曲げ試験片の表面の公称曲げ応力 σ_N は (1) 式により求められる。

$$\sigma_N = \frac{3}{2} \frac{Pl}{B(W-a)^2} \quad (1)$$

ここで、 P は荷重 (kg)、 l は支持間隔 (mm)、 B は板厚 (mm)、 W は試験片の幅 (mm)、 a は切欠長さ (mm) である。平滑および切欠曲げ試験片とも、支持間隔 70 mm にとり、破壊曲げ応力をもとめた。

平滑試験片については、曲げ応力および破断試験片の断面収縮率の温度依存性を、各曲げ速度に対して調べ Fig. 3 に示す。曲げ応力は Fig. 3 より、同一温度で比べると、曲げ速度が 5 m/sec では、ほぼ静的曲げの場合と同じ値であったが、10 m/sec 以上になると

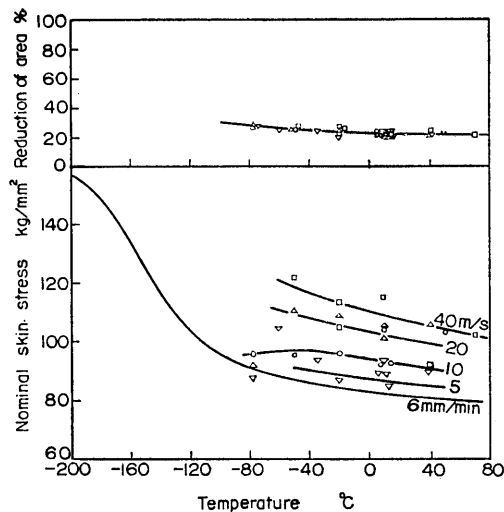


Fig. 3 Variation of nominal skin stress and lateral contraction of smooth bending specimens with temperature for various bending rates.

急に増大した。また、試験温度に対し、いずれの曲げ速度においても、低温になるに従い増加した。断面収縮率には、顕著な曲げ速度および温度依存性はみられなかった。これらの結果は、前報の平滑引張試験片の場合と同様¹⁾であった。

この曲げ応力と一定温度における曲げ速度との関係を求めると、Fig. 4 のようになる。曲げ速度が大きいほど、応力は漸増曲線を示し、温度が低いほどその曲線は高くなる。

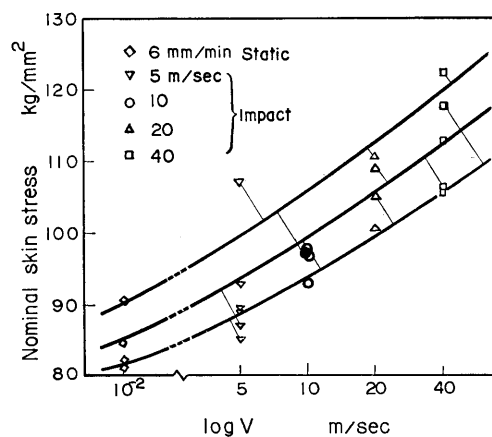
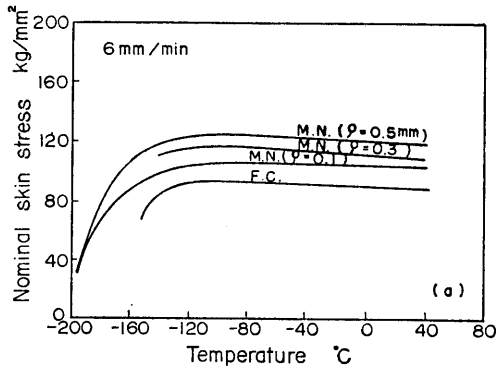
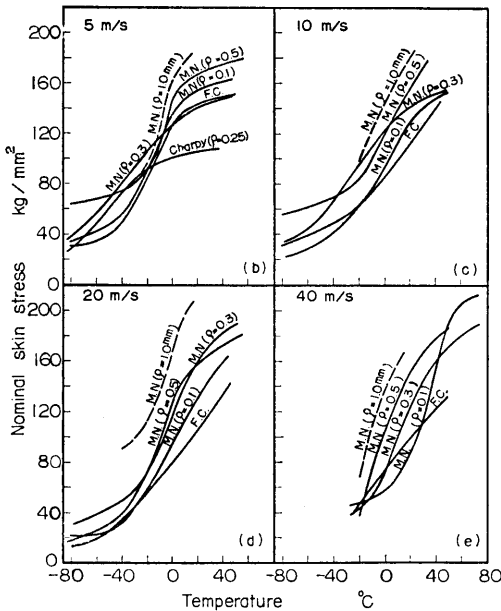


Fig. 4 Relation between nominal skin stress of smooth specimen and bending rates for testing temperature.

切欠試験片の公称破壊曲げ応力について、温度および切欠先端半径の効果を、静的および衝撃曲げについて Fig. 5 に示す。静的曲げの場合、曲げ応力は室温から -100°C 付近まで、いずれの切欠先端半径においても、ほとんど温度依存性を示さないが、 -120°C 以下になると、いずれも急に低下した (Fig. 5.1)。



(5.1)



(5.2)

Fig. 5 Variation of nominal skin stress of machine notched (M.N.) and fatigue cracked (F.C.) specimens with temperature for various bending rates; (a) 6 mm/min, (b) 5 m/sec, (c) 10 m/sec, (d) 20 m/sec, and (e) 40 m/sec.

た、切欠先端半径は鋭いほど低い曲げ応力を示した。衝撃曲げでは、試験温度範囲において、静的曲げの温度依存性と著しく異なり、曲げ速度が早くなり、温度が上昇するにつれて、急激に増大した。一方、切欠先端半径の効果は切欠先端が鋭いほど、延性-脆性遷移曲線は高温側に移動する傾向が認められた (Fig. 5.2)。

計装化シャルピー試験の衝撃速度は 4.8 m/sec であり、荷重-時間曲線より曲げ応力を求め、円周速度 5 m/sec の場合と比較すると、Fig. 5.2 (b) のようになった。シャルピーの吸収エネルギーの上部シエルフエネルギーに対する曲げ応力は、約 100 kg/mm^2 であり、曲げ応力-温度曲線は切欠曲げ試験片の場合より低くなっていた。この原因としては、切欠の深さ、形状などによる塑性拘束効果の相違によると考えられる。

切欠試験片の平滑試験片に対する公称曲げにおける切欠応力比 (切欠耐力比) と温度の関係を、切欠先端半径ごとに求めると、Fig. 6 のようになる。この応力比は引張試験における切欠感度係数に相当するとみなせる。静的曲げ試験では切欠先端半径が大きくなるほど、応力比は大きくなった。温度に対して -120°C 付近までは、余り温度依存性を示さず約 1.2 で一定値をとっていたが、それ以下の温度では急に低下し、応力比も 1 以下になった。衝撃曲げ試験での応力比は、静的曲げ試験の場合と比べて、切欠先端半径の影響は同様であったが、強い温度依存性がみられた。すなわち、Fig. 6 に示すごとく、応力比は低温になると 0 に近づき、高温側では約 2 に接近する遷移挙動が認められた。また、曲げ速度が大きくなるほど、遷移曲線は高温側に移動した。シャルピー試験の応力比は -20°C より高温側では、5 m/sec の曲げ試験の値より小さく、静的試験と同程度の値をとり、塑性拘束効果が比較的小さかった。 -20°C 以下では 5 m/sec の場合とほぼ同じ曲線を示した。

この応力比を破面との関係でみると、衝撃曲げでは応力比が 1 のときの温度と脆性破面が 50% の時の破面遷移温度がよい対応をしていた。応力比が 1 以上になる領域は、切欠による塑性拘束効果のためであり、切欠先端半径の小さいほど、また曲げ速度が大きいほど、この効果が強いことがわかった。これらの結果を、前報の引張試験の結果¹⁾と比べると、温度および負荷速度依存性は同じ傾向を示したが、応力比の最大値は今回の結果では 2 前後であり、曲げの方が引張より拘束効果が小さいと結論できる。

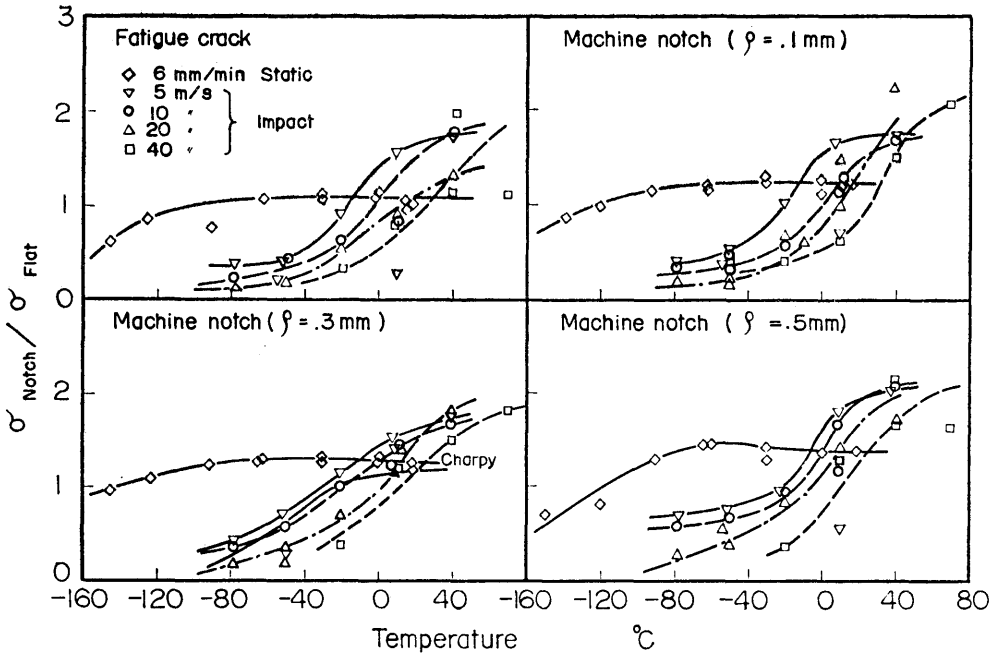


Fig. 6 Relation between nominal skin stress of fatigue-cracked and notched specimens to that of smooth specimen $\sigma_{Notch}/\sigma_{Flat}$ and temperature for various notch root radii; (a) Fatigue crack, (b) Machine notch ($\rho=0.1$ mm), (c) M.N. ($\rho=0.3$ mm), and (d) M.N. ($\rho=0.5$ mm).

切欠先端半径と応力比との相関を求め Fig. 7 に示す。応力比は切欠先端半径が大きいくほど大で飽和曲線を示す。試験温度が低いほど、応力比は小さくなる。

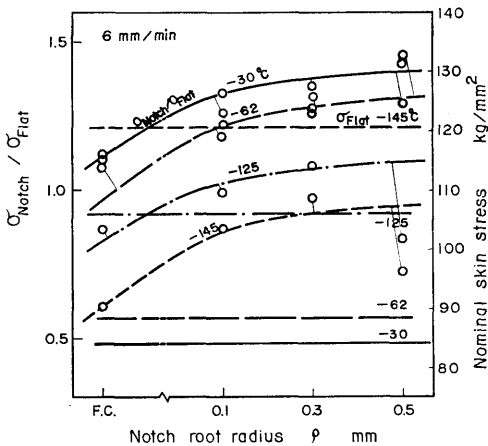


Fig. 7 Relation between stress ratio of notched specimen to smooth specimen, nominal skin stress of smooth specimen and various notch root radius.

一方、水平な破線で示した、平滑試験片の曲げ応力は温度が低いほど大きくなり、 -125°C で飽和曲線と水平線が応力比で1近傍でもっとも接近した。応力比が1より大きい領域では切欠先端およびその近傍で、十分に塑性変形を伴ってから破壊が起ったものと考えられる。

3.2 破壊靱性値

3点曲げ試験の破壊靱性値 K_0 は (2) 式により求められる⁶⁾。

$$K_0 \text{ または } K_a = \frac{3}{2} \frac{Pl}{BW^2} \cdot \sqrt{a} \cdot Y \quad (2)$$

ただし、 $Y=1.93-3.07(a/W)+14.53(a/W)^2-25.11 \times (a/W)^3+25.80(a/W)^4$ 、 K_0 、 K_a は、それぞれ静的および動的な破壊靱性値 ($\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$)、 P は破壊荷重 (kg)、 a はき裂長さ (mm)、 W は試験片の幅 (mm)、 l はスパン間隔 (mm) であり、平面ひずみ破壊靱性値 K_{Ic} および K_{Ia} は、次式を満たさなければならない。

$$a \text{ および } W \geq 2.5(K_0 \text{ または } K_a/\sigma_y)^2 \quad (3)$$

ここに、 σ_y は該当温度での降伏応力 (kg/mm^2) である。

疲労き裂および機械切欠試験片の破壊靱性値と温度

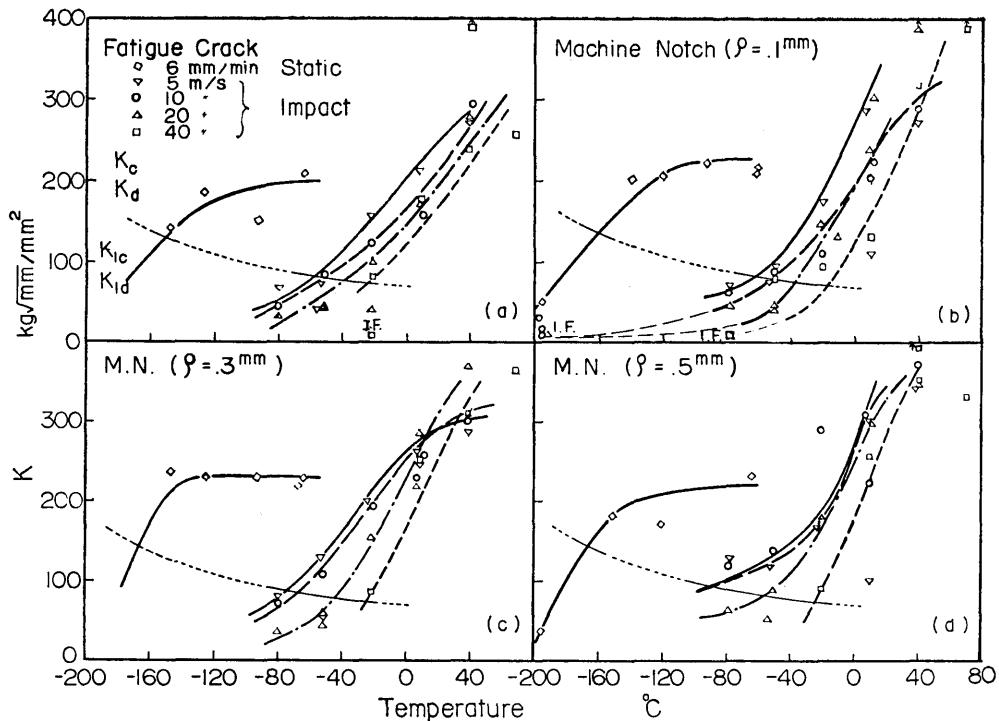


Fig. 8 Temperature dependence of fracture toughness K for various notch root radii; (a) Fatigue crack, (b) Machine notch ($\rho=0.1$ mm), (c) M.N. ($\rho=0.3$ mm), and (d) M.N. ($\rho=0.5$ mm).

の関係を Fig. 8 に示す。図中で右下りの細線の下側の領域は K_{1c} , K_{1a} を満足させ、上側は K_c , K_a である。

静的曲げ試験の破壊靱性値は、疲労き裂の場合を除き、 $-160 \sim -60^\circ\text{C}$ の温度域で、ほぼ一定であり、かつそれらの値は、切欠先端半径に依存しなかった。疲労き裂試験の場合は、温度の低下とともに減少していき、かつ機械切欠試験より 20% 程度低い値であった。 -160°C 以下の低温域では、いずれの場合も破壊靱性値は急に低下し、 K_{1c} が得られた。

衝撃曲げ試験の破壊靱性値は、静的曲げの場合と比べて同一温度では、ほぼ 50% 以下であり、温度依存性も遷移曲線が高温側へ移動した形態を示した。遷移挙動は切欠先端半径が小さく、曲げ速度が大きいほど、高温側へ移動した。 K_{1a} は -40°C 以下では、50% 以下になっているが、 0°C 以上では、もし、静的な場合温度に依存しないとすると、また、 K_c が得られているとすると、衝撃の場合の値が大きくなっている。

切欠先端半径が 0.1 mm の機械切欠試験片では、曲げ速度が 10 m/sec, 20 m/sec では -196°C および 40

m/sec で -78°C のとき、疲労き裂試験片では、曲げ速度が 40 m/sec で -20°C のとき、試験片に円板の爪があたるだけで、破壊する現象がみられた。小さい試験片が短時間に大きな衝撃力をうけることにより、試験片の慣性力が破壊強さを越えるためか、応力波の干渉による破壊であると考えられる。その破面および破壊状況の 1 例を Photo. 1 に示す。き裂は切欠底より直進する例もみられたが、大多数は切欠方向よりある角度でき裂が伝播し、さらに途中で折れ曲り、分岐して進み破断した。破面は完全な脆性破面を示した。

3.3 試験片の幅の影響

板厚中心の切欠底近傍では応力の三軸性が強くなり、いわゆる平面ひずみ状態に近くなる。切欠先端半径が 0.1 mm の試験片で、試験片の幅に対する切欠長さの比を 0.5 と一定にし、幅を 10 mm から 30 mm まで変化させ、破壊靱性値への影響を調べた。試験温度が -20°C および -50°C の結果を Fig. 9 に示す。図で右下りの細線の下側は (3) 式を満足する K_{1a} を示し、上側は K_a である。これより破壊靱性値は試験片の幅に対して、いずれの温度においても右下りの

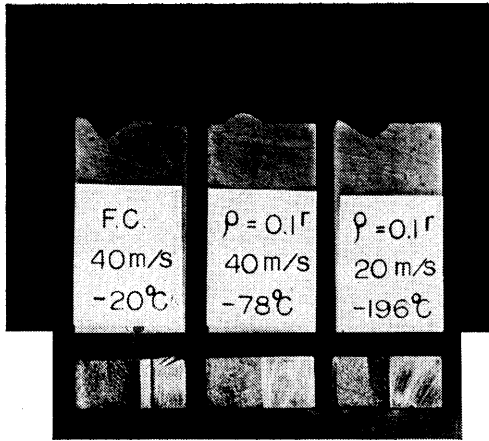


Photo. 1 Macroscopic fracture appearances of fatigue-cracked and notched specimen presumed from impact force.

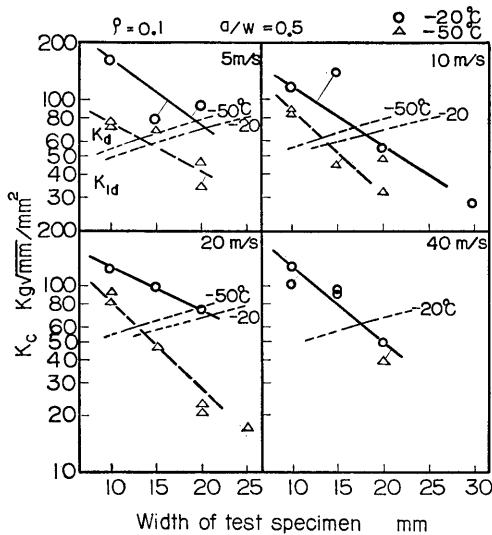
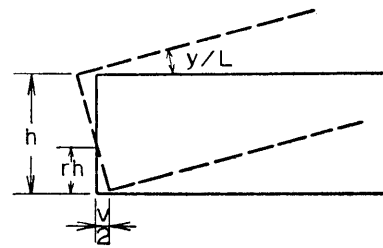
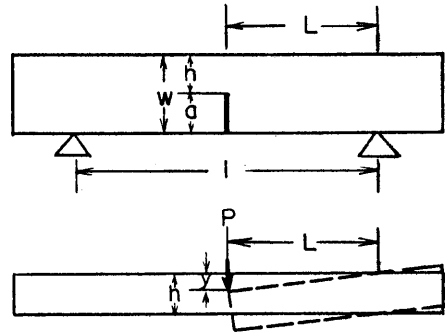


Fig. 9 Effect of specimen width on fracture toughness K for testing temperatures and various bending rates; (a) 5 m/sec, (b) 10 m/sec, (c) 20 m/sec, and (d) 40 m/sec.

直線で近似され寸法効果を示した。 K_{Ia} を示す試験片幅は、いずれの曲げ速度に対しても、 -20°C ではほぼ 18 mm 以上であり、 -50°C になると 14 mm 以上で、曲げ速度の影響は認められなかった。

3.4 COD 値

衝撃曲げ試験の場合、切欠先端近傍の変位を計測することは技術的に困難である。回転円板の円周速度が 5 m/sec 以上の場合、試験片を破断させたのちも、回



$$V = 2 \frac{rhy}{L} f \quad r: \text{rotational factor} \quad f: \text{correction factor}$$

Fig. 10 The method for calculation of displacement in notch root V from cross head displacement y .

転速度の低下は無視できるので、試験片を破断させるまでの時間は変位に比例すると仮定し、荷重-時間曲線より幾何学的に求める方法を Fig. 10 に示す。したがって、切欠先端の変位は (4) 式より求めることができる。

$$V = 2 \frac{rhy}{L} f \quad (4)$$

ここで、 V は切欠先端の開口変位 (mm)、 L は支持間隔の 1/2 (mm)、 r は回転因子、 h は試験片の幅から切欠長さを減じた値 (mm)、 f は修正係数である。

今回もちいた試験片では、 $a/W=0.5$ であり、降伏応力 σ_y に対する作用応力 σ_N の比 σ_N/σ_y が 2 以上の場合、回転因子 r の応力依存性は大きく、 r は変形量より小さくなり、測定誤差と変形量のオーダーが近づくので、 σ_N/σ_y が 2 より小さい範囲では、回転因子による方法は不適當である^{7),8)}。

有限要素法により弾塑性計算をおこない、試験片の切欠の反対側に荷重を与えた時の、たわみおよび変位

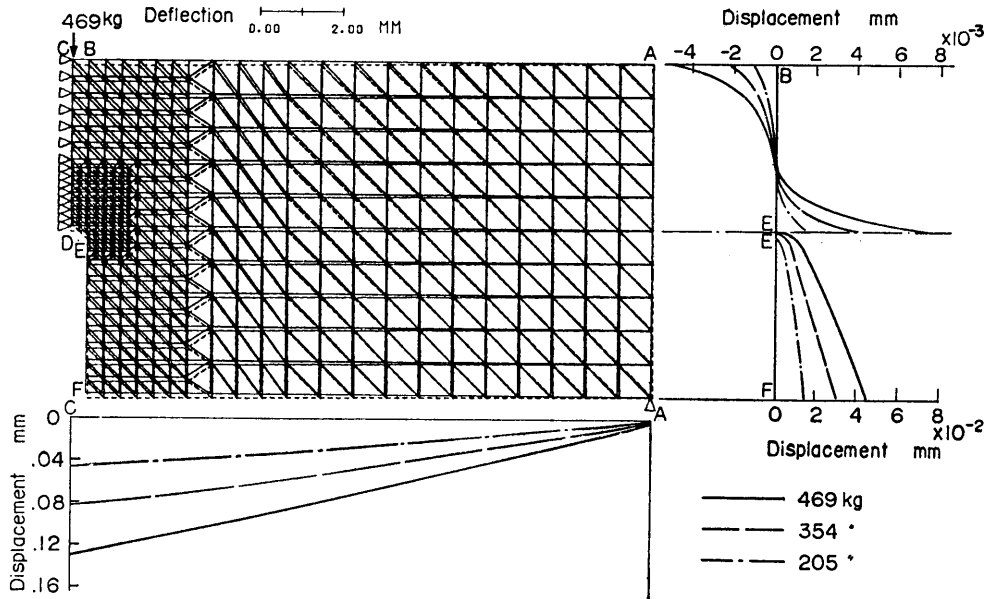


Fig. 11 The distribution of deflection and displacement in notched specimen loading at C and B with 205, 354, and 469 kg calculated from finite element method (FEM).

を求めた。有限要素法の適用範囲は $\sigma_N/\sigma_V \leq 1.5$ であるとされている。また、 σ_N/σ_V が 1.5 より大きく 2.0 より小さい中間の領域では両者の平均値を用いるとされている^{7),8)}。

試験片は切欠をはさみ左右対称で、その半分について節点数 386、三角形要素 690 にユニット分割し、面内変位、平面応力を求めた。塑性変形域においては、流れ理論による増分法を用いて計算した⁹⁾。

計算結果の 1 例を Fig. 11 に示す。試験片の B、C 点に最大の 469 kg の荷重を与えたときのたわみ分布を破線で示す。試験片の中心より 1 mm はずれた BE 線上の、各節点での変位をもとめ図の右上に示す。回転軸は切欠先端から 4 mm (回転因子 $r=0.4$) 近傍のところにあられた。試験片の AC 線上および EF 線上での各節点の変位を 205, 354, 469 kg の荷重ごとに求めた結果を同図に示す。

試験片のほぼ切欠線上および切欠先端より 1.7 mm はなれた切欠と平行線上での、主応力の大きさおよび方向を求めた結果の 1 例を Fig. 12 に示す。

荷重 469 kg のとき、切欠先端の三角形要素では約 20 kg/mm² の引張応力が働き、方向は切欠線上で荷重方向とほぼ直角である。主応力は切欠先端より離れるにしたがって小さくなり、主応力の方向も左下りの

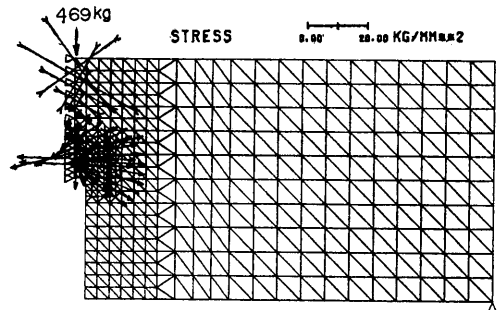


Fig. 12 The value and direction of principal stress in the position which was extension of notched line and 1.7 mm apart from notch root calculated from finite element method (FEM).

45° の角度にかわり、切欠先端より約 4 mm はなれると、引張応力から圧縮応力にかわる。

切欠より 1.7 mm 離れた切欠と平行線上の三角形要素 5 mm の間では、引張応力が働き、切欠先端から約 1.5 mm はなれた切欠線上に、引張応力の矢印が集まるような傾向をえた。

試験片の切欠と反対側の荷重点の変位 v と、切欠先端から 10 mm はなれた場所の変位 V_0 (ナイフエッジ

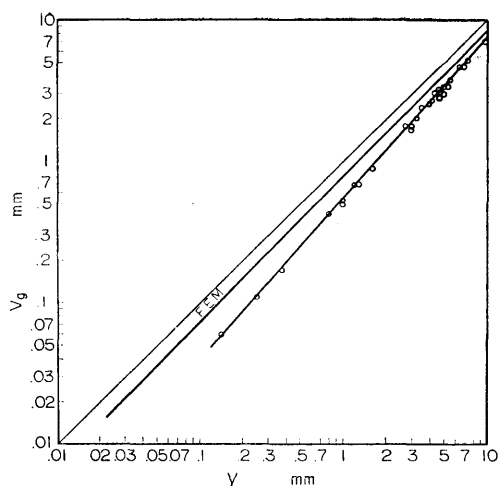


Fig. 13 Relation between clip gage displacement V_g and cross head displacement y . FEM means the result of finite element method (FEM).

取付位置)を、有限要素法で求めると Fig. 13 のような直線で示される。切欠先端近傍のメッシュ分割は、三角形要素を用いて、切欠先端半径を 1.0 mm に想定した座標である。切欠先端近傍の座標のみをかえて、切欠先端半径 0.5, 0.3, 0.1 mm の切欠試験片を考えたときの y と V_g の関係を求めると、先端半径 1.0 mm の場合とほとんど同じ値がえられた。

一方、刃部と曲げ試験装置の支持台との間の変位 (y に相当)を差動トランスで求め、試験片の切欠部に厚さ 1.5 mm のナイフエッジをつけ、クリップゲージで計測した変位 (V_g に相当)との関係を、同じく Fig. 13 に ○印で記すと直線で示される。有限要素法の結果は y が V_g より大きくなり、直線関係がえられた。差動トランスによる変位 y は、有限要素法で求めた値より大きく、これは Fig. 9 で求めた変位や試験機全体の剛性を考慮したものより大きく、試験片の刃部および支持部のへこみなどの寄与が大きいものと考えられる。

き裂もしくは切欠先端の開口変位に関しては、負荷速度が大きく変化しても、その変形機構は本質的に変わらないと仮定すると、静的曲げ試験の結果より、動的な COD 値を計算することが可能である。

すなわち、静的試験においてクリップゲージ変位 V_g から、回転因子により $r=1/3$ として、(5) 式より切欠先端の開口変位 V を求めた。

$$V = V_g / \{1 + a/r(W-a)\} \quad (5)$$

Fig. 13 に示す関係より、 V_g に対応したクロスヘッド変位 y を、実験値の結果より求める。修正係数 f は衝撃曲げでも同じで、 y は負荷速度に破断までの時間を乗じて求めると仮定すると、(4) 式より V が計算できる。

COD 値、脆性破面率、断面収縮率と温度の関係を疲労き裂および機械切欠試験片について Fig. 14 に示す。静的曲げの COD 値は、温度に対して顕著な遷移挙動をとった。すなわち、 -120°C 付近以下および -80°C 以上では、それぞれ一定値に収束する傾向が認められた。切欠先端半径が小さくなるほど、遷移挙動は高温側に移動していたが、COD 値には切欠先端半径の影響は認められなかった。

衝撃曲げの COD 値は強い温度依存性を示し、曲げ速度が大きくなるにつれて、曲線はいずれの切欠先端半径においても高温側へ移動した。その結果 -20°C 付近を境として、それ以上の温度域では衝撃曲げが、それ以下では静的曲げがより大きな値を示した。

破面遷移温度は静的曲げ試験では、 $-50 \sim -70^\circ\text{C}$ となった。衝撃曲げでは静的曲げより $40 \sim 90^\circ\text{C}$ 程度高温になり、曲げ速度が大きくなるにつれて、いっそう高温側へ移動した。また、切欠先端半径が 0.3 mm 以下では、遷移温度に顕著な効果は認められなかった。

断面収縮率は静的曲げ試験では、 -80°C 付近までは 20% 位であり、それ以下の温度では急に小さくなり 0 に近づいた。衝撃曲げではこの挙動が高温側にずれ、かつ強い曲げ速度依存性がみられた。

静的曲げ試験では、脆性破面率および断面収縮率の遷移曲線は COD の遷移曲線より、幾分高温側に位置し、衝撃曲げではほぼ同じ温度にきた。

荻原らは、シャルピー衝撃試験における吸収エネルギー vE と曲げ試験における COD-温度曲線との関係を求めている¹⁰⁾。COD 値の遷移温度を 0.4 mm のときと定義すると、COD 曲線と吸収エネルギー曲線のシフト温度 ΔT^* ($^\circ\text{C}$) は (6) 式で表示される。

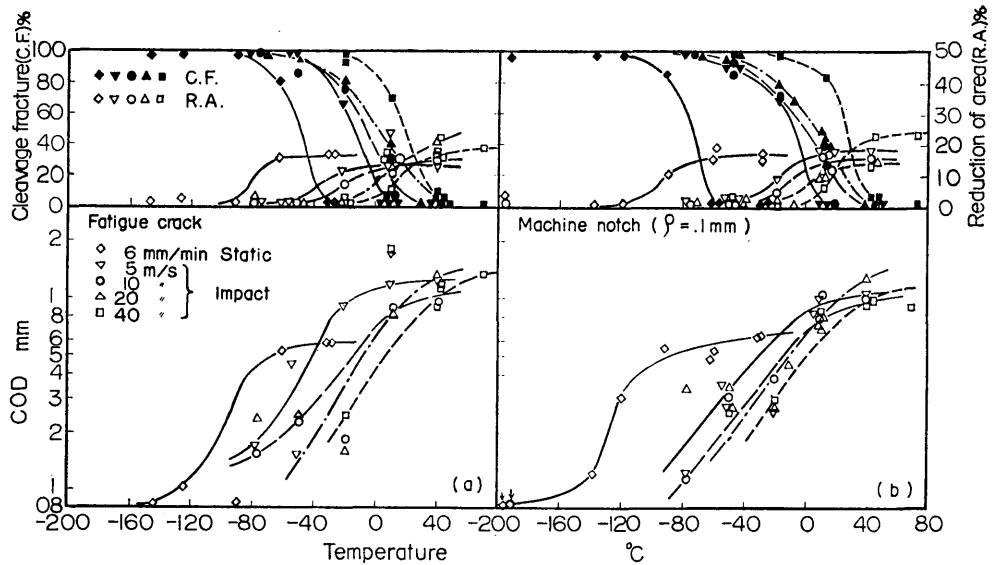
$$\Delta T^* = 120 - \sigma_{y0} - 5(\sqrt{t} + \sqrt{20}) \quad (6)$$

ここに、 σ_{y0} は室温での降伏応力 (kg/mm²)、 t は板厚 (mm) であり、 $20 < t < 60$ である。

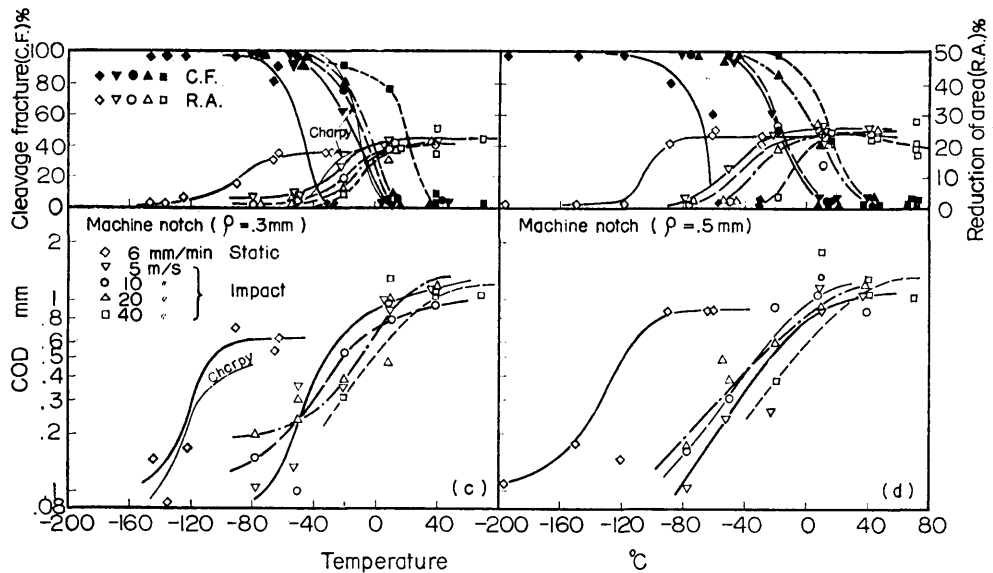
遷移領域では両者の関係は (7) 式で示される。

$$\text{COD}(T) = 0.02vE(T + \Delta T^*) \quad (7)$$

ここで、 $\text{COD}(T)$ は $T^\circ\text{C}$ での COD 値 (mm)、 $vE(T + \Delta T^*)$ は $(T + \Delta T^*)^\circ\text{C}$ での vE (kg \cdot m) である。



(14.1)



(14.2)

Fig. 14 Variation of crack opening displacement (COD), percent cleavage fracture (C.F.), and reduction of area (R.A.) with temperature for various notch root radii; (a) Fatigue crack, (b) Machine notch ($\rho = 0.1 \text{ mm}$), (c) M.N. ($\rho = 0.3 \text{ mm}$), and (d) M.N. ($\rho = 0.5 \text{ mm}$).

シャルピー試験における上部シェルフ領域では、 νE^* と COD との間には (8) 式が成り立つ。

$$\text{COD}(T) = 0.02 \nu E^* (T + \Delta T^*) \quad (8)$$

ここで、 $\nu E^* = \nu E_0 e^{-T/T_0}$ で、 T_0 (°C), νE_0 (kg·m)

(80)

は材料定数である。

(6) から (8) 式を用いて、シャルピー衝撃試験の νE より COD 曲線を推定すると、Fig. 14 (c) の細い実線のように、静的曲げ試験で求めた COD 曲線

の近傍に来た。用いた試験片は板厚 10mm の場合であり、(6) 式の条件を満足しないが、 νE より COD を十分に推定できた。

これらの結果から、各曲げ速度および切欠先端半径に対して、遷移温度を求め Table 1 に示し、それらの相関を Fig. 15.1 および 15.2 に図示した¹¹⁾。破壊

Table 1 Comparison among transition temperatures defined from various properties for notch root radii and bending rates;

(K_{Ic}, K_{Ia}) ; The highest temperature corresponding to static and dynamic plane strain fracture toughness K_{Ic} and K_{Ia} respectively.

$(\sigma_N)_{80}$; The temperature corresponding to nominal skin stress of 80 kg/mm².

$(\sigma_{Notch}/\sigma_{Flat})_{1.0}$; The temperature corresponding to the ratio of nominal fracture stress of notched specimen to that of flat specimen $\sigma_{Notch}/\sigma_{Flat}$ of 1.0.

$(COD)_{0.4}$; The temperature corresponding to the critical crack opening displacement (COD) of 0.4 mm.

$(C.F.)_{50}$; The temperature corresponding to cleavage fracture (C.F.) of 50%.

$(R.A.)_{10}$; The temperature corresponding to reduction of area (R.A.) of 10%.

(M.N.; Machine Notch, F.C.; Fatigue Crack)

		Static mm/min	Impact m/sec					Charpy
			6	5	10	20	40	
$(\frac{K_{Ic}}{K_{Ia}})_c$	F.C.	-151	-58	-52	-39	-25		
	M.N.	$\rho=0.1$	-160	-64	-56	-38	-20	
		$\rho=0.3$	-170	-75	-69	-46	-26	
$\rho=0.5$		-166	-95	-90	-60	-26		
$(\sigma_N)_{80}$	F.C.	-140	-22	-6	0	5		
	M.N.	$\rho=0.1$	-156	-26	-9	8	15	
		$\rho=0.3$	-160	-41	-31	-18	2	-32
		$\rho=0.5$	-160	-32	-24	-18	-9	
$\rho=1.0$		-160	-32	-30				
$(\frac{\sigma_{Notch}}{\sigma_{Flat}})_{1.0}$	F.C.	-104	-17	-3	12	25		
	M.N.	$\rho=0.1$	-122	-20	0	8	26	
		$\rho=0.3$	-141	-31	-20	0	11	-18
$\rho=0.5$		-124	-23	-13	-5	10		
$(COD)_{0.4}$	F.C.	-84	-48	-23	-17	-4		
	M.N.	$\rho=0.1$	-112	-46	-29	-22	-11	
		$\rho=0.3$	-115	-38	-30	-20	-10	
$\rho=0.5$		-125	-32	-39	-42	-18		
$(C.F.)_{50}$	F.C.	-48	-13	-6	2	19		
	M.N.	$\rho=0.1$	-70	-8	-1	7	23	
		$\rho=0.3$	-46	-14	-7	-4	21	-14
$\rho=0.5$		-68	-20	-19	4	13		
$(R.A.)_{10}$	F.C.	-78	-25	-8	6	17		
	M.N.	$\rho=0.1$	-93	-20	-12	4	14	
		$\rho=0.3$	-85	-26	-18	-12	-7	-34
$\rho=0.5$		-107	-56	-48	-37	-14		

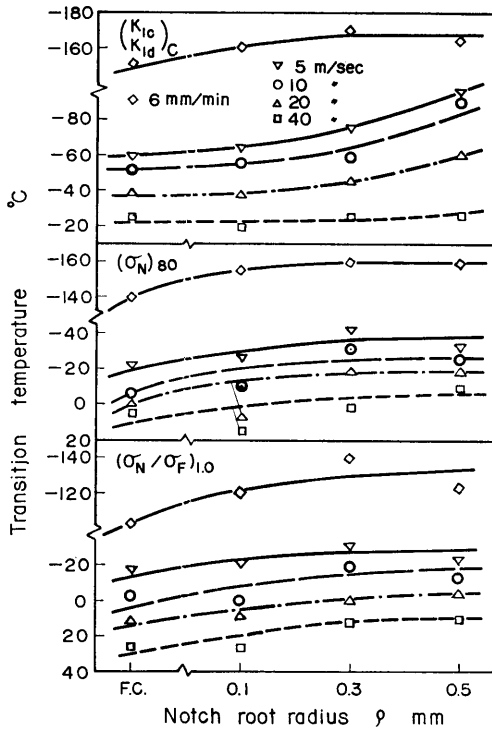


Fig. 15.1 Relation between transition temperatures and various notch root radii; (a) $(\frac{K_{Ic}}{K_{Ia}})_c$, (b) $(\sigma_N)_{80}$, (c) $(\sigma_N/\sigma_F)_{1.0}$

靱性値 K は K_{Ic} 又は K_{Ia} が得られる最高温度を $(\frac{K_{Ic}}{K_{Ia}})_c$ 、公称曲げ応力 σ_N は 80 kg/mm^2 を $(\sigma_N)_{80}$ 、平滑試験片の曲げ応力に対する切欠試験の曲げ応力比 $\sigma_{\text{Notch}}/\sigma_{\text{Flat}}$ は 1.0 を $(\sigma_{\text{Notch}}/\sigma_{\text{Flat}})_{1.0}$ 、COD 値は 0.4 mm を $(\text{COD})_{0.4}$ 、破面遷移温度 (C.F.) が 50% へき開破面を (C.F.)₅₀、断面収縮率 (R.A.) が 10% を (R.A.)₁₀ と、それぞれ示す温度を遷移温度とした。 $(\frac{K_{Ic}}{K_{Ia}})_c$ 、(C.F.)₅₀、(R.A.)₁₀ の遷移温度は、い遷移ずれも試験片の切欠が鋭く、曲げ速度の早いものほど温度は高温になる傾向を示した。静的試験ではゆるやかな飽和曲線を示し、衝撃試験ではゆるやかな漸増曲線を示した。 $(\sigma_N)_{80}$ 、 $(\sigma_N/\sigma_F)_{1.0}$ 、 $(\text{COD})_{0.4}$ の遷移温度は、COD が 5 m/sec 以外は、同様の傾向を示し、いずれもゆるやかな飽和曲線を示した。

3.5 破面の観察

疲労き裂および機械切欠曲げ試験片について、破面観察を光学顕微鏡を用いて行った。

疲労き裂および切欠先端半径 $0.1, 0.3, 0.5 \text{ mm}$ の機械切欠曲げ試験片の巨視的破面の 1 例を Photo. 2

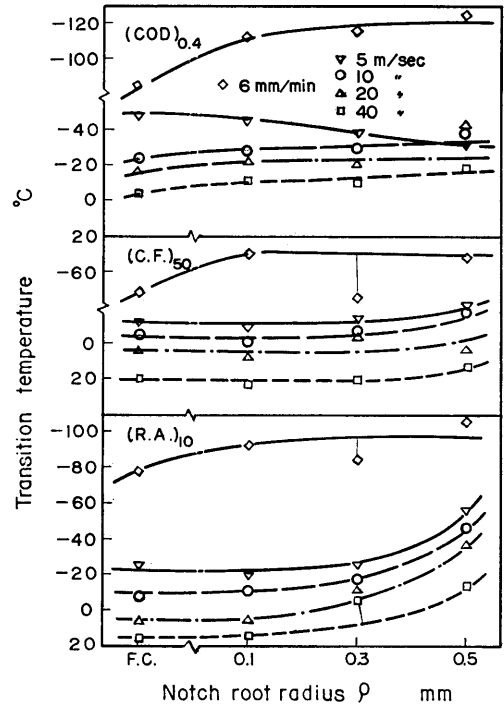


Fig. 15.2 Relation between transition temperatures and various notch root radii; (d) $(\text{COD})_{0.4}$, (e) $(\text{C.F.})_{50}$, (f) $(\text{R.A.})_{10}$

から Photo. 5 に示す。静的試験では疲労き裂試験は -50°C 機械切欠試験は 100°C 付近で切欠先端に thumb nail が発生したのちへき開状破壊していた。それより低温では thumb nail は認められずへき開状破面を示し、高温では繊維状破面を示し、縦割れの発

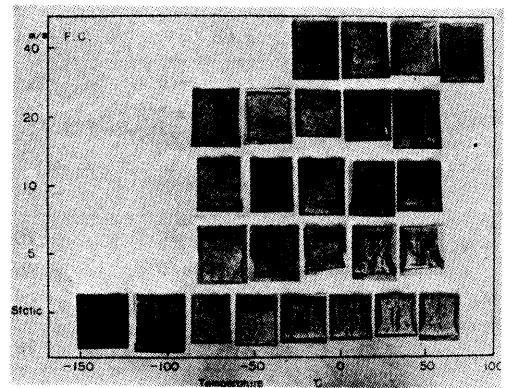


Photo. 2 Macroscopic fractured surface in fatigue-cracked specimen for testing temperatures and bending rates.

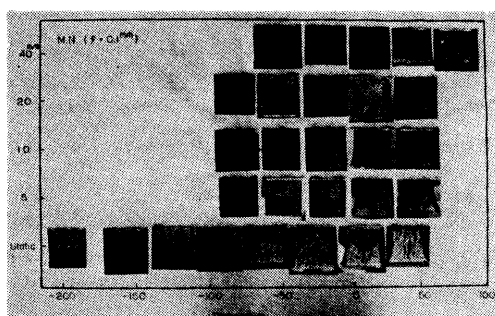


Photo. 3 Macroscopic fractured surface in machine-notched specimen for testing temperatures and bending rates ($\rho=0.1$ mm).

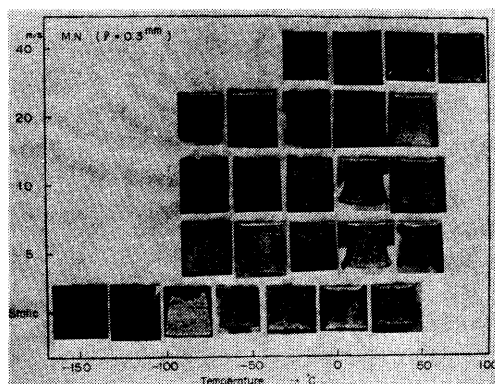


Photo. 4 Macroscopic fractured surface in machine-notched specimen for testing temperatures and bending rates ($\rho=0.3$ mm).

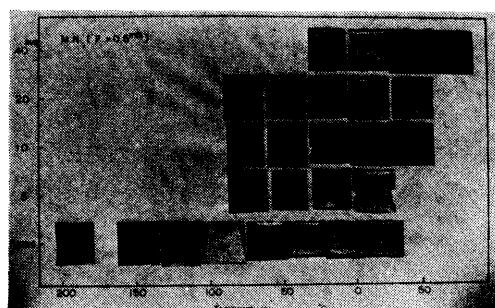


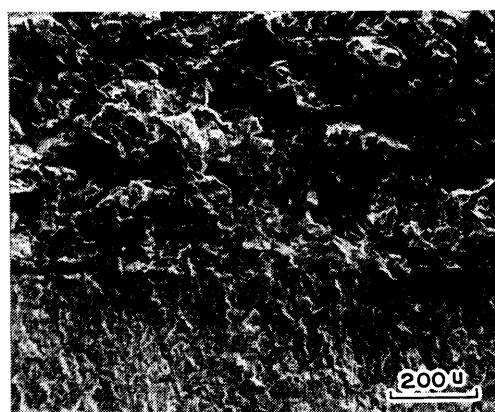
Photo. 5 Macroscopic fractured surface in machine-notched specimen for testing temperatures and bending rates ($\rho=0.5$ mm).

生が認められた。曲げ速度 5 m/sec では -20°C 付近でへき開状破面から繊維状破面に移り、10 および 20 m/sec では -20 から 20°C で、40 m/sec では 20

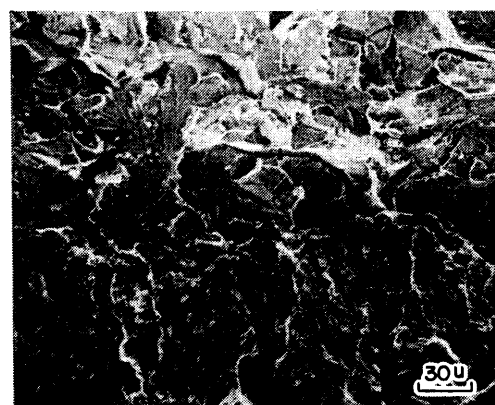
から 50°C で同様な現象がみられた。切欠先端半径が鋭いほど、それらの破面遷移温度は高温側に移る傾向を示した。衝撃試験では顕著な thumb nail の発生は認められなかった。

切欠先端半径が 0.1, 0.3, 0.5 mm の試験片は、いずれも静的試験では -78 から -100°C で、へき開状破面から繊維状破面に移った。衝撃試験ではいずれの曲げ速度においても -20 から 20°C の温度域で、切欠先端半径の鈍なものほど thumb nail が発生していた。

衝撃試験では疲労き裂先端の板表面のせん断部を除いて、ストレッチゾーン (SZW) が認められ、き裂先端の破面中央部近傍で消失しているものもあった。それらの破面の 1 例を Photo. 6 に示す。特にストレッチ



X 100



X 400

Photo. 6 An example of SEM micrograph of cleavage fracture surface without stretched zone at middle of fatigue-crack notch tip. (5 m/sec, -51°C)

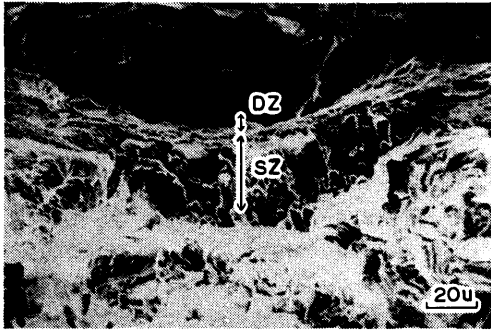


Photo. 7 An example of SEM micrograph of the stretched zone followed by cleavage fracture surface. (40 m/sec, -20°C)

チゾーン (SZW) よりへき開状破面に移る境界に、細長いデンプルゾーンがあるものも観察された。それらの破面の1例を Photo. 7 に示す。また、静的試験のストレッチゾーン (SZW 又は SZD) は衝撃試験のそれらの値とほとんど変わらないという報告もあるが¹²⁾、今回の結果では静的試験のストレッチゾーンは小であった。

切欠先端半径 0.2 mm の機械切欠試験片の切欠先端の全面にわたり、いずれの温度域でも、ストレッチゾーンは認められなかった。

切欠試験片でへき開破断したものについては、前報と同様に、切欠底より 1~3 結晶粒入った部分から、へき開き裂が発生していた¹⁾。疲労き裂試験片についても同様であった。すべての試験片の破面には、高速変形に特有な双晶の発生がみられなかったが、これは、今回の材料の平均結晶粒径が約 25μ と小さいからであると考えられる。

4. 結 論

JIS SM41A 鋼を用いて、平滑および切欠試験片を作り、試験温度、切欠先端半径および負荷速度を広く変えて曲げ試験を行い、破壊挙動に対するそれらの影響を調べた。

1) 平滑試験片の曲げ応力は温度の低下、曲げ速度の増加と共に大きくなった。切欠試験片では静的曲げ試験の場合は、低温を除いて温度、切欠先端半径に強く依存しないが、衝撃曲げでは、強い温度および曲げ速度依存性を示した。

2) 平滑試験片に対する切欠試験片の曲げ応力比は、静的曲げ試験では、切欠先端半径が大きくなると

増加したが、温度に対しては低温を除き、強い依存性はみられなかった。衝撃曲げの場合、応力比は温度の上昇と共に急に増加し、また曲げ速度が増すにつれて高温側に移行した。

3) 破壊靱性値は静的曲げ試験では -160°C 付近を境として、高温側ではほぼ一定であり、それ以下で急に低下した。衝撃曲げのとき破壊靱性値の回帰曲線は、曲げ速度が大きいかほど高温側に移った。平面ひずみ破壊靱性値は静的曲げでは -160°C 、また衝撃曲げでは $-20\sim 100^{\circ}\text{C}$ 以下で求められた。切欠先端半径は余り破壊靱性値に影響しなかった。

4) 平面ひずみ破壊靱性値に対する試験片の幅の影響は、同一温度では、曲げ速度に依存せず一定であった。

5) 刃部と支持台との間の変位 y と試験片切欠部のクリップゲージ変位 V_0 との関係を、有限要素法により求めると直線で示される。実験値は有限要素での結果より大きい y をとり、一本の直線で近似できる。

6) 衝撃曲げ試験の変位は、曲げ速度と破断までの時間から求めると仮定すると、切欠先端の COD 値 V を、静的曲げ試験の V_0-y の直線関係と、 $V=2rhyf/L$ より求めることができる。

7) COD 値は温度に対して遷移現象を示し、曲げ速度、切欠先端半径の大きいほど、高温側に移動した。脆性破面率および断面収縮率の遷移曲線も同様の傾向を示した。

8) シャルピー衝撃試験の吸収エネルギー-温度曲線から、荻原らの実験式を用いて COD-温度曲線を推定すると、静的曲げ試験の結果とよい一致をみた。

9) 衝撃試験では疲労き裂先端の破面中央部近傍で、ストレッチゾーンが消失しているものもあり、静的試験のストレッチゾーンは、衝撃試験のそれらより小であった。機械切欠試験片ではいずれの温度域でも、ストレッチゾーンは認められなかった。

謝 辞

本研究の実施に際しては、東工大布村成具助教授、小林英男助教授、堀江史郎技官、船舶技研長沢準部長をはじめ船体構造部、溶接工作部の方々からご指導、ご意見をいただきました。衝撃曲げ試験用治具および装置の製作にあたっては、住友金属工業株式会社より多大なご援助をいただきました。ここに心から謝意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 中村正久, 呂 芳一, 北村 茂: 溶接構造用鋼の引張破壊挙動に対するひずみ速度の影響, 鉄と鋼, 52 年投稿中
- 2) 小林俊郎, 高井耕一, 間庭秀世: シャルピー衝撃試験における遷移挙動および破壊靱性の評価について, 日本金属学会誌, 30 (1966) p. 700
- 3) 田中 実, 布村成具: 鋼の引張特性とシャルピー式衝撃曲げ試験における荷重および遷移温度との関係について, 日本金属学会誌, 27 (1963) p. 439
- 4) 清田堅吉, 藤田昌大: 横衝撃を受けた棒の塑性変形, 日本機械学会誌, 69 (1966) p. 78
- 5) ASTM E-399 American National Standards Institute (1974)
- 6) ASTM STP 410 (1967) p. 42
- 7) 金沢 武, 町田 進, 荻原行人: 工業的試験法としての曲げ COD 試験について (第 1 報), 日本造船学会論文集, 132 (1972) p. 361
- 8) 金沢 武, 町田 進, 荻原行人, 小林順一: 工業的試験法としての曲げ COD 試験について (第 2 報), 日本造船学会論文集, 134 (1973) p. 365
- 9) 遠藤久芳: 2 次元板構造物の弾塑性応力解析と座屈解析プログラム, 船舶技術研究所報告, 第 15 巻 第 1 号 昭和 53 年 1 月
- 10) 荻原行人, 征矢勇夫, 三波建市, 佐藤光雄: シャルピー衝撃特性から脆性破壊発生特性の評価法, 溶接学会誌, 45 (1976) p. 627
- 11) 中村正久, 呂 芳一, 北村 茂: 溶接構造用鋼の破壊挙動に対する衝撃曲げ速度の影響, 鉄と鋼, 52 年投稿中
- 12) 大塚昭夫, 西村誠二, 宮田隆司, 笠井 登: 予き裂端からの破壊発生におよぼすひずみ時効の影響, 日本造船学会論文集, 139 (1976) p. 265

附 録

溶接構造用鋼を用いて静的曲げ試験 (6 mm/min) から衝撃曲げ試験 (40 m/sec) までの速度範囲で曲げ試験を行い, 公称曲げ応力, 破壊靱性値, 引張試験の切欠感度係数 (NSR) に相当する切欠応力比 ($\sigma_{\text{Notch}}/\sigma_{\text{Flat}}$), き裂開口変位, 脆性破面率および断面収縮率らの結果を求め附表 1~8 にそれぞれ示す。

附表の記号の説明

S.B. : 平滑材の静的試験

D.B. : 平滑材の衝撃試験

F.C. : 疲労き裂試験片

M.N. : 機械切欠試験片

P_{max} : 最大応力 (破壊応力) (kg/mm²)

P_y : 降伏応力 (kg/mm²)

σ_N : 公称曲げ応力 (kg/mm²)

σ_{Ny} : 降伏点の公称曲げ応力 (kg/mm²)

C.F. : 脆性破面率 (%)

R.A. : 断面収縮率 (%)

K : 破壊靱性値 (kg $\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$)

$\sigma_{\text{Notch}}/\sigma_{\text{Flat}}$: 切欠材の公称曲げ応力/平滑材の公称曲げ応力

COD : き裂開口変位 (mm)

(注) 平滑試験片	{	試験片の幅 W : (9.6~10.4)mm
		板厚 t : (9.7~10.0)mm
切欠試験片	{	試験片の幅 W : (19.6~20.4)mm
		板厚 t : (9.7~10.0)mm
		疲労き裂長さ a : (8.2~11.2)mm
		切欠長さ a : (9.1~10.2)mm

附表-1 Static (1)

No.	Speed mm/min	Temp. °C	P_{max} kg	σ_N kg/mm ²	P_y kg	σ_{Ny} kg/mm ²	C.F. %	R.A. %
S.B.- 1	6	19	680	81.6	410	49.2	0	17.9
2	"	19	685	82.1	420	50.4	0	21.1
3	"	0	710	80.9	405	46.1	0	18.8
4	"	0	730	82.3	415	46.8	0	20.6
5	"	- 30	765	90.7	430	51.0	0	18.8
6	"	- 30	745	84.7	435	48.8	0	19.9
7	"	- 60	830	90.8	500	54.7	0	18.2
8	"	- 60	810	87.3	510	54.9	0	19.0
9	"	- 75	810	92.2	537	61.2	0	18.8
10	"	- 90	890	93.8	599	63.6	0	21.1
11	"	-120	915	103.1	720	81.2	100	20.1
12	"	-120	895	104.0	708	82.3	100	20.3
13	"	-160	1210	133.6	1065	117.6	100	18.6
14	"	-160	1170	134.6	942	108.4	0	23.7
15	"	-196	1425	155.0	1288	140.1	100	7.2
16	"	-196	1315	148.2	1260	142.0	100	2.1

附表-2 Static (2)

No.	Temp. °C	P _{max} kg	σ_N kg/mm ²	K kg√mm/mm ²	$\frac{\sigma_{Notch}}{\sigma_{Flat}}$	COD mm	C.F. %	R.A. %	Slow crack mm
F.C.- 1	19	910	84.5	177.7	1.03	.49	0	16.5	—
2	0	945	92.0	191.6	1.12	.52	0	16.7	—
3	0	1015	91.5	193.5	1.12	.64	0	17.9	—
4	15.5	1085	79.9	180.5	0.97	.65	0	20.0	—
5	15.5	845	86.7	169.7	1.06	.54	0	19.2	—
6	- 30	765	94.2	176.2	1.12	.55	0	16.6	—
7	- 30	935	92.2	189.8	1.10	.70	0	16.1	—
8	- 62	1225	95.4	212.6	1.08	.74	80	15.6	3.5
9	- 90	785	73.0	154.0	0.78	.120	100	0.5	—
10	-125	915	92.5	188.3	0.87	.145	100	2.1	0.2
11	-145	630	73.6	143.0	0.61	.107	100	0	—
M.N. 0.1-	15.5	855	92.5	184.5	1.13	.70	0	17.0	—
2	15.5	840	90.5	180.3	1.10	.76	0	17.9	—
3	0	1020	106.6	214.6	1.30	.76	0	18.4	—
4	0	915	94.7	192.0	1.15	.61	0	19.5	—
5	- 30	975	105.5	210.2	1.26	.61	0	17.3	—
6	- 30	950	111.6	215.7	1.33	.71	0	15.5	—
7	- 62	990	107.1	214.0	1.22	.59	0	15.5	—
8	- 60	1065	103.5	213.9	1.18	.65	0	19.4	—
9	- 92	1087	109.0	223.9	1.17	.74	0	10.8	1.5
10	-120	970	102.5	207.8	0.99	.43	100	0	—
11	-196	210	26.8	50.1	0.17	.048	100	4.2	0.1
12	-138	942	100.5	203.7	0.87	.17	100	0	—

附表-3 Static (3)

No.	Temp. °C	P_{max} kg	σ_N kg/mm ²	K kg√mm/mm ²	$\frac{\sigma_{Notch}}{\sigma_{Flat}}$	COD mm	C.F. %	R.A. %	Slow crack mm
M.N. 0.3- 1	19	950	98.3	199.3	1.20	.97	0	18.5	—
2	19	955	102.8	204.9	1.25	.82	0	17.9	—
3	0	935	105.4	206.9	1.29	.77	0	18.6	—
4	0	935	105.4	206.9	1.29	.4	0	15.5	—
5	- 30	1000	106.1	214.1	1.26	.46	0	17.5	—
6	- 30	1050	113.6	227.2	1.35	.55	0	17.5	—
7	- 62	1135	115.9	238.1	1.32	.77	90	16.7	—
8	- 65	1030	113.2	224.4	1.27	.65	80	14.9	—
9	- 91	1185	114.3	231.2	1.23	.85	95	17.7	2.0
10	-135	—	—	—	—	—	100	0	0.1
11	-125	1060	113.7	229.6	1.08	.23	100	2.8	0.1
12	-145	1127	117.9	239.1	0.98	.20	100	0.5	—
M.N. 0.5- 1	19	1100	114.5	231.1	1.40	1.63	0	19.0	—
2	0	1060	114.3	230.5	1.39	.78	0	22.5	—
3	- 30	1075	108.6	221.7	1.29	.8	0	20.4	—
4	- 30	1095	119.8	238.7	1.43	.97	0	22.9	—
5	- 63	970	128.3	233.7	1.46	.93	60	23.0	—
6	- 60	1195	129.6	260.6	1.47	.97	0	24.5	—
7	- 90	1162	121.6	247.1	1.31	1.05	80	20.4	2.0
8	-196	170	17.7	36.1	.12	.14	100	.53	—
9	-150	860	90.4	183.5	.72	.23	100	.52	—
10	-120	770	86.4	172.6	.83	.19	100	0	—

附表-4 Impact (1)

No.	Speed m/sec	Temp. °C	P_{max} kg	σ_N kg/mm ²	P_y kg	σ_{Ny} kg/mm ²	C.F. %	R.A. %
D.B.- 1	5	12	730	83.1	580	66.0	0	19.5
0	"	11	780	88.8	530	60.4	0	21.1
3	"	7	800	89.3	610	68.1	0	21.6
6	"	38	800	90.2	610	68.8	0	21.6
7	"	-35	840	93.7	675	75.3	0	23.7
8	"	-20	750	83.7	525	58.6	0	23.7
10	"	10	820	93.4	555	63.2	0	22.6
11	"	11	700	76.5	635	69.4	0	23.4
9	"	-52	980	111.0	750	84.9	0	26.2
27	"	-78	780	84.8	672	73.5	0	28.5
13	10	50	920	105.9	828	95.3	0	22.2
5	"	7	810	91.3	736	82.9	0	22.6
12	"	13	850	94.9	728	79.6	0	24.4
14	"	-20	850	96.3	772	87.5	0	22.6
15	"	-50	860	95.9	742	82.8	0	26.5
28	"	-78	880	95.7	683	74.3	0	27.4
18	20	40	950	105.9	650	72.5	0	21.5
17	"	10	950	105.5	542	60.2	0	24.2
16	"	10	910	101.5	850	94.8	0	24.1
21	"	-20	960	109.4	713	81.2	0	20.8
22	"	-50	1000	110.4	892	98.5	0	26.5
29	"	-78	820	88.8	740	80.1	0	26.5
23	40	70	910	100.0	910	100.0	0	21.0
20	"	40	800	88.3	800	88.3	0	21.4
19	"	10	1020	118.6	1020	118.6	0	25.6
24	"	-20	1000	113.3	1000	113.3	0	27.4
25	"	-50	1060	122.6	1060	122.6	0	27.0
A	"	10	940	104.8	940	104.8	0	23.0

附表-5 Impact (2)

No.	Speed m/sec	Temp. °C	P_{max} kg	σ_N kg/mm ²	K kg \sqrt{mm}/mm^2	$\frac{\sigma_{Notch}}{\sigma_{Flat}}$	COD mm	C.F. %	R.A. %
F.C.-17	5	40	1300	148.1	276	1.74	1.24	0	13.5
16	"	9	1080	108.6	214	1.57	1.75	0	13.5
18	"	-21	800	82.8	159	0.92	0.95	65	10.8
19	"	-55	230	19.2	42	0.21	0.47	100	1.9
34	"	-78	330	34.5	69	0.38	0.18	100	3.0
37	"	-51	370	37.8	77	0.42	0.16	98	2.1
12	"	10	—	—	—	—	—	0	13.0
13	"	10	690	23.6	54	0.27	1.21	0	23.7
21	10	41	860	102.1	294	1.77	1.0	0	14.3
20	"	11	920	77.0	160	.83	.92	30	9.8
22	"	-20	430	40.2	121	.63	.19	75	6.9
23	"	-50	400	42.7	85	.44	.24	85	0.5
35	"	-78	210	23.2	46	.24	.16	100	0.5
14	"	7	—	—	—	—	—	0	17.5
15	"	7	—	—	—	—	—	0	14.5
25	20	40	1720	132.6	280	1.33	1.32	0	20.6
24	"	10	800	93.5	174	.90	0.85	40	11.0
30	"	-20	400	59.5	98	0.56	0.17	80	1.6
33	"	-50	220	19.7	42	.18	0.25	95	0.5
36	"	-78	180	14.5	34	.13	0.25	100	1.6
31	40	70	2350	116.7	259	1.14	1.38	0	18.7
27	"	40	—	—	—	—	—	10	14.1
28	"	40	—	—	—	—	—	0	15.8
29	"	40	1200	122.0	242	1.16	0.94	0	17.3
26	"	10	900	87.6	175	0.82	1.80	70	5.4
32	"	-20	440	39.4	84	0.35	0.26	95	3.1
38	"	42	2300	208.5	425	1.99	1.15	0	22.1
39	"	-20	I.F.	—	—	—	—	100	0.5

附表-6 Impact (3)

No.	Speed m/sec	Temp. °C	P_{max} kg	σ_N kg/mm ²	K kg \sqrt{mm} /mm ²	$\frac{\sigma_{Notch}}{\sigma_{Flat}}$	COD mm	C.F. %	R.A. %
M.N. 0.1-19	5	40	1330	146.1	276.0	1.74	1.10	0	19.0
17	"	7	1470	146.4	289.2	1.68	0.88	0	19.0
20	"	- 20	910	92.0	179.9	1.02	0.27	70	9.4
21	"	- 54	380	38.4	78.3	0.39	0.37	90	3.6
35	"	- 78	350	36.3	74.3	0.40	0.13	100	1.6
39	"	- 50	480	47.3	97.2	0.53	0.29	90	2.1
13	"	10	560	57.4	115.7	0.66	1.02	0	17.9
23	10	40	1500	150.0	292.0	1.65	1.05	0	16.3
22	"	12	1160	117.2	225.8	1.26	1.10	0	16.8
24	"	- 20	550	55.1	108.2	0.58	0.40	70	5.2
25	"	- 50	480	47.8	98.5	0.50	0.32	85	1.5
36	"	- 78	350	35.5	73.4	0.37	0.13	100	1.5
14	"	10	1000	107.7	206.8	1.16	0.81	30	14.5
46	"	-196	I.F.	—	—	—	—	100	1.0
47	"	-196	150	15.4	31.1	0.10	.077	100	0.5
28	20	40	2250	226.3	443.8	2.26	1.35	0	15.0
26	"	10	—	—	—	—	—	45	9.8
27	"	10	1230	123.1	240.7	1.18	0.84	—	—
32	"	- 20	770	73.9	147.8	0.69	0.29	80	2.6
34	"	- 50	230	22.8	47.1	0.21	0.37	98	0.5
37	"	- 78	230	24.3	48.2	0.21	0.36	100	3.1
38	"	- 50	200	21.0	42.0	0.19	0.29	98	1.0
41	"	- 10	700	66.5	139.7	0.63	0.48	70	0.5
42	"	11	1030	104.0	202.1	1.0	0.74	40	12.2
45	"	- 78	I.F.	—	—	—	—	100	0
49	"	10	1580	153.5	306.0	1.48	0.85	35	11.7
31	40	70	2000	212.2	403.3	2.08	0.95	0	23.7
29	"	40	1680	159.7	318.5	1.52	1.05	0	14.5
30	"	10	660	70.8	134.4	0.66	0.89	85	6.8
33	"	- 20	500	49.8	97.9	0.44	0.31	98	3.1
44	"	- 50	370	40.4	80.2	0.34	0.27	98	1.0

附表-7 Impact (4)

No.	Speed m/sec	Temp. °C	P_{max} kg	σ_N kg/mm ²	K kg \sqrt{mm} /mm ²	$\frac{\sigma_{Notch}}{\sigma_{Flat}}$	COD mm	C.F. %	R.A. %
M.N. 0.3-20	5	40	1470	147.1	289.2	1.73	1.15	0	21.6
18	"	8	1360	132.9	263.5	1.53	0.96	3	19.2
21	"	-21	1010	104.5	201.2	1.16	0.35	60	12.4
22	"	-50	280	27.6	56.8	0.31	0.36	100	3.6
35	"	-78	420	38.9	80.7	0.43	0.11	100	2.6
38	"	-52	630	65.2	132.0	0.72	0.14	90	4.1
13	"	10	1170	123.1	236.8	1.41	0.88	0	21.1
24	10	40	1530	153.8	300.1	1.69	0.92	0	20.0
23	"	12	1320	135.9	259.6	1.46	0.78	0	20.4
25	"	-20	1030	97.3	195.0	1.02	0.53	75	9.2
26	"	-50	550	55.5	108.2	0.58	0.10	98	2.0
36	"	-78	370	36.0	74.7	0.38	0.15	100	0.5
19	"	9	—	—	—	—	—	2	22.3
14	"	10	—	—	—	—	—	1	17.9
15	"	10	—	—	—	—	—	0	17.5
16	"	8	1140	115.1	223.6	1.24	0.92	0	18.4
28	20	40	1900	183.8	362.3	1.84	1.19	0	20.0
27	"	10	1470	146.4	287.0	1.41	1.04	0	19.5
32	"	-20	770	75.6	149.2	0.71	0.39	80	6.2
34	"	-50	230	22.3	46.6	0.20	0.24	98	1.5
37	"	-78	190	19.1	38.7	0.20	0.20	100	2.6
17	"	9	1150	109.0	218.3	1.17	0.47	0	14.2
40	"	-50	180	18.1	36.9	0.27	0.30	100	2.1
31	40	70	1880	187.1	367.9	1.83	1.05	0	21.5
30	"	40	1560	159.3	310.1	1.52	1.06	0	25.0
29	"	10	1270	129.5	251.0	1.21	1.27	75	19.4
33	"	-20	430	43.7	88.9	0.39	0.31	90	4.1
39	"	40	—	—	—	—	—	0	16.7

附表-8 Impact (5)

No.	Speed m/sec	Temp. °C	P_{\max} kg	σ_N kg/mm ²	K kg $\sqrt{\text{mm}}$ /mm ²	$\frac{\sigma_{\text{Notch}}}{\sigma_{\text{Flat}}}$	COD mm	C.F. %	R.A. %
M.N. 0.5-18	5	38	1710	174.5	341.2	2.05	1.02	0	24.2
16	"	9	1430	159.5	301.5	1.83	1.15	2	26.0
19	"	-23	580	60.4	171.7	0.98	0.26	60	22.9
20	"	-52	100	61.8	119.8	0.78	0.24	98	12.2
36	"	-78	700	64.6	129.7	0.72	0.10	100	2.1
11	"	10	500	49.6	97.3	0.57	0.87	0	25.0
22	10	-20	—	—	—	—	—	70~80	23.4
21	"	40	1930	190.5	377.1	2.10	0.87	0	23.3
19	"	8	1590	156.1	307.1	1.68	1.05	0	23.7
23	"	-20	1450	149.6	291.4	0.95	0.92	50	26.3
24	"	-50	700	66.7	132.7	0.69	0.31	98	2.0
37	"	-78	600	57.7	114.7	0.60	0.16	100	2.0
12	"	9	—	—	—	—	—	0	24.6
13	"	10	—	—	—	—	—	0	22.5
14	"	10	1100	110.1	216.4	1.18	1.30	10	13.4
26	20	40	1800	173.3	343.7	1.73	1.22	0	24.5
25	"	10	1580	149.4	299.0	1.44	0.92	40	19.9
32	"	-20	1000	90.2	181.9	0.84	0.58	85	18.4
35	"	-50	460	43.5	90.4	0.40	0.39	98	2.0
38	"	-78	320	31.7	64.9	0.28	0.17	100	2.0
39	"	-54	250	24.4	50.3	0.57	0.49	98	2.5
15	"	8	—	—	—	—	—	0	26.3
29	40	70	—	—	—	—	—	0	19.8
30	"	70	—	—	—	—	—	0	16.9
31	"	70	—	—	—	—	—	0	19.4
33	"	70	1760	169.4	334.6	1.66	1.02	0	27.0
28	"	40	1820	178.6	351.4	1.70	1.27	0	22.4
27	"	10	1400	128.1	258.6	1.20	1.78	45	23.1
34	"	-20	450	44.4	91.6	0.42	0.38	100	3.6
40	"	40	—	—	—	—	—	0	22.4
41	"	40	2300	227.8	447.4	2.17	1.04	0	23.0