

# 切欠を有する鋼材の変形・破壊特性に 及ぼす負荷速度の影響

石川 信行\*・小林 泰男\*・豊田 政男\*<sup>2</sup>

Effect of Loading Rate on Deformation and Fracture Properties of Notched Steels

Nobuyuki ISHIKAWA, Yasuo KOBAYASHI and Masao TOYODA

**Synopsis :** The effects of loading rate on deformation and fracture properties of structural steels have been investigated using notched round bar steel specimens. FEM analysis was carried out to evaluate stress and strain condition around notch region. Because of high speed straining, plastic work leads to temperature increase in the vicinity of notch tip. Strain rate dependence of tensile strength was evaluated equally as temperature by strain rate-temperature parameter (R parameter) considering temperature increase in the notch region. It is proved that ductile-brittle transition temperature did not rise with dynamic loading in the case of the steels with good deformability or the specimen with low stress concentration factor. This is because that large amount of plastic deformation leads to high temperature increase around the notch under dynamic loading, which eliminates the effect of strain rate for brittle fracture.

**Key words :** structural steel ; dynamic loading ; stress concentration ; FEM analysis ; adiabatic deformation ductile-brittle transition phenomenon.

## 1. 緒言

1995年1月の阪神淡路大震災では多くの鋼構造物が被害を受け、特に鉄骨建築物における柱-梁溶接接合部や梁スカラップ端等では、大きな塑性変形を伴った脆性破壊(高応力脆性破壊)が見られている<sup>1)</sup>。その要因としては、柱-梁接合部や梁スカラップ端等は構造的に形状不連続な部位であり局所的に大きな塑性変形を生じやすかったことや、都市直下型地震であったために揺れの速度が大きく、高歪速度の変形を受けたこと等が考えられている。

鋼材の変形・破壊特性が歪速度の影響を受けることはよく知られており、降伏応力、引張強度に対する歪速度の影響については、歪速度温度効果指数(Rパラメータ)により温度と等価に評価することができ<sup>2)</sup>、歪速度の増加により降伏応力、引張強度が上昇することが知られている<sup>3,4)</sup>。また破壊靱性に及ぼす歪速度の影響に関しては、一般的には負荷速度の増加により破壊靱性値が低下し、延性-脆性遷移温度が上昇すると考えられている<sup>5,6)</sup>。従来の破壊靱性に及ぼす負荷速度の影響に関する研究は、疲労き裂などの鋭い切欠を有する試験片を用いたものがほとんどであった。しかし、梁スカラップ端からの破壊では、欠陥の無い健全部が大きく塑性変形した後破断し、脆性破面を呈している事例が見られている。さらに、震災で破壊した梁フランジ

部では最大で15%強の残留歪を生じるような変形を受けていたとの報告もあることから<sup>7)</sup>、鋼材の耐震性能を考える上で、より大きな塑性変形を考慮した破壊特性の評価が必要となっている。また、歪速度と温度の影響を等価とするRパラメータは、平行試験片を用いた引張特性の評価に適用されているが、切欠試験片などの応力集中を有する場合も同様に適用が可能かどうかは明らかでない。

本報告では、鋭い切欠を有する試験片に比べて、破断までの塑性変形量がより大きくなる環状切欠付丸棒試験片を採用し、動的荷重下での破壊特性を調査するとともに、延性-脆性遷移挙動に及ぼす応力集中および材質の影響について検討を行った。

## 2. 実験方法

供試鋼の成分及び機械的性質をTable 1, 2に示す。A鋼、B鋼はいずれも490MPa級の鋼板であるが、B鋼の方がシャルピー試験での破面遷移温度が低く高靱性である。C鋼は同じ強度レベルのH型鋼である。金属組織はいずれの鋼もフェライト+パーライト組織であるが、C鋼は0.018%のSを含有しており粗大な硫化物系介在物が多く見られるのに対し、A鋼、B鋼のS量は0.003%であり介在物は極めて少ない。試験片はFig. 1に示す環状切欠付丸棒試験片で、切欠

平成9年6月23日受付 平成9年9月3日受理 (Received on June 23, 1997; Accepted on Sep. 3, 1997)

\* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1 Koukan-cho Fukuyama 721)

\* 2 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University)

Table 1. Chemical composition of steels (mass%).

No.	C	Si	Mn	P	S	Nb	V
A	0.16	0.40	1.47	0.012	0.003	0.01	—
B	0.15	0.35	1.39	0.016	0.003	—	0.04
C	0.14	0.05	1.29	0.008	0.018	0.06	—

Table 2. Mechanical properties of steel plates.

No.	Tensile properties					Impact properties	
	YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RA (%)	vTs (°C)	vE0 (J)
A	394	554	72	38	79	-2	84
B	354	523	68	40	78	-50	238
C	387	528	80	38	72	4	48

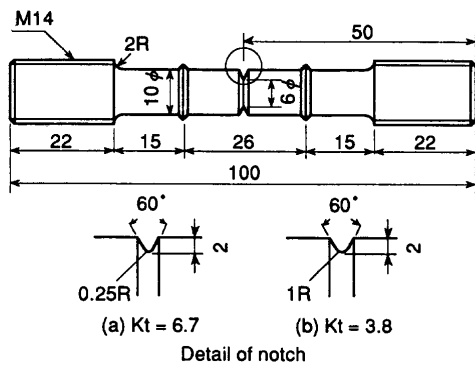


Fig. 1. Configuration of notched round bar specimen (in mm).

底半径が 1 mm (応力集中係数  $K_t = 3.8$ ) 及び 0.25 mm ( $K_t = 6.7$ ) の 2 種類とした。引張試験は油圧サーボ型高速引張試験機を使用し、試験片チャック部に取付けたロードセルにより荷重を測定した。また、標点間変位は試験片のつば部に固定した治具を介してクリップゲージにより測定した。負荷速度は 300 mm/s (動的) 及び 0.1 mm/s (静的) としたが、このときの標点間変位速度の実測値はそれぞれ、約 250 mm/s (動的) 及び 0.075 mm/s (静的) であった。また試験温度は  $-40 \sim 60^\circ\text{C}$  の範囲とした。

降伏応力 (YS) は 0.2% 耐力とし、降伏応力及び引張強度 (TS) に対する歪速度及び温度の影響について、 $R$  パラメータによる整理を行った。ここで応力は切欠底断面での公称応力として評価した。また、延性及び靱性の指標として絞り値及び脆性破面率を測定するとともに、動的負荷による延性-脆性遷移挙動の変化特性を検討した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 変形特性に及ぼす負荷速度の影響

応力-変位曲線の測定例を Fig. 2 に示す。いずれの材料も負荷速度が速いほど YS, TS が高くなっている。また、B 鋼は負荷速度により破断伸びがほとんど変化していないが、C 鋼で  $K_t = 6.7$  の場合は少ない伸びで破断している。そして、

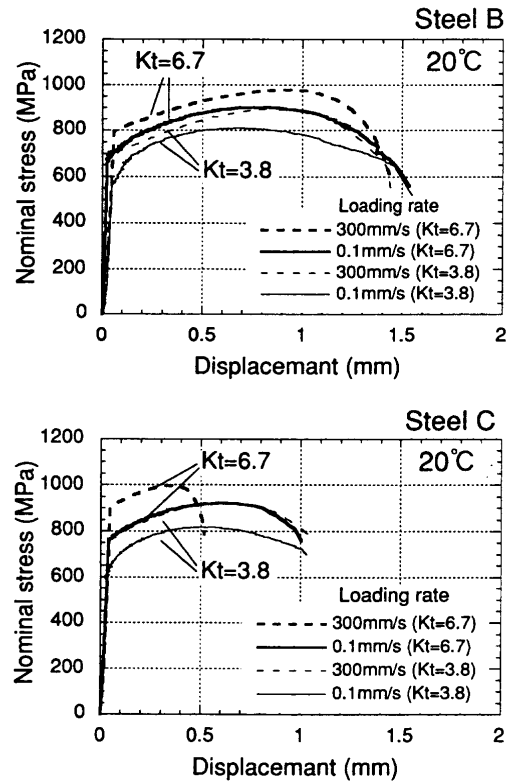


Fig. 2. Stress-displacement curves.

いずれの条件でも C 鋼の破断伸びは B 鋼に比べて小さくなっている。A 鋼では B 鋼と同様の応力-変位曲線が得られている。

鋼材の高歪速度下における降伏応力の変化については (1) 式で示す  $R$  パラメータを用いて評価する方法が提案されている<sup>2)</sup>。

$$R = T \ln(A/\dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (1)$$

$T$ : 絶対温度,  $\dot{\epsilon}$ : 歪速度,  $A$ : 定数

ここで、切欠底の初期直径を  $d_0$ 、破断時の切欠底径を  $d$  とすると、切欠底断面の塑性歪は次式で表される。

$$\epsilon_p = (d_0/d)^2 - 1 \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式より求めた破断時の塑性歪を破断までの時間で除することにより切欠底断面の平均歪速度を求めることができる。B 鋼で  $K_t = 6.7$  の場合の平均歪速度は静的負荷で約 0.02/s、動的負荷で約 80/s であった。また、(1) 式の材料定数  $A$  は Bennet<sup>9)</sup> にならない  $A = 10^8/\text{s}$  として各条件に対する  $R$  パラメータを求め、B 鋼、C 鋼について YS 及び TS の測定結果を  $R$  パラメータにより整理すると Fig. 3 のようになる。ここで、 $R$  が小さくなることは高歪速度または低温になることを意味しており、 $R$  値が 5000 以下が動的試験 (300 mm/s)、それ以上が静的試験 (0.1 mm/s) の結果となっている。両鋼とも応力集中係数が高い方 ( $K_t = 6.7$ ) が YS, TS ともに高くなっており、 $R$  パラメータの低下にもなって YS, TS は上昇している。YS については動的試験、静的試験の場合とも

連続的に変化しており、切欠を有する場合でもYSの変化はRパラメータを用いることにより、歪速度の影響を温度と等価に評価できるといえる。しかし、TSについては動的試験と静的試験との結果が不連続となっており、Rパラメータは適用できない。また、A鋼についてもB鋼とほぼ同様の結果が得られている。

次に、破断後の絞り値の測定結果をFig. 4に示す。いずれの鋼種も応力集中係数が高い方(Kt=6.7)が絞り値が低くなっているが、切欠材での絞り値は負荷速度の影響をほとんど受けず、また温度の低下にともなわずかに低下している。A鋼、B鋼はKt=6.7の場合も40%程度の大きな絞り

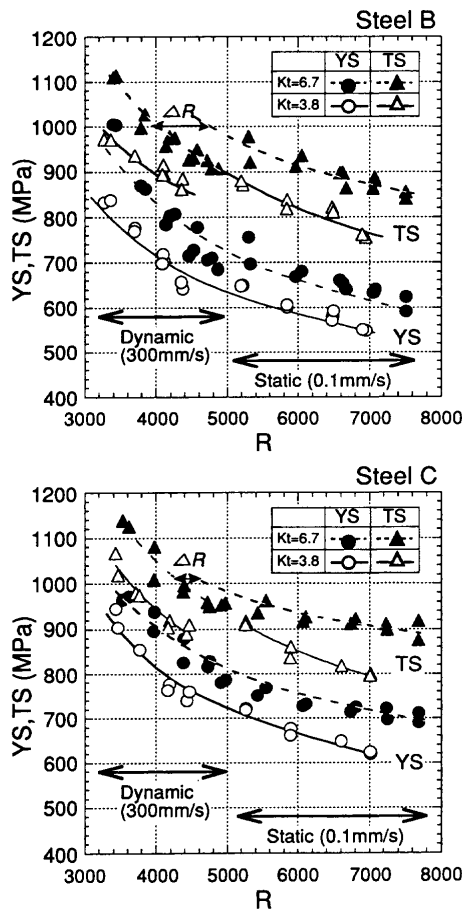


Fig. 3. Changes in yield stress and tensile strength with R parameter.

値を示しているが、C鋼ではKt=6.7の場合は20%程度であり、塑性変形能(切欠延性)が劣っていることがうかがえる。

### 3・2 延性-脆性遷移挙動に及ぼす負荷速度の影響

B鋼について室温、静的負荷の条件で破断した切欠丸棒試験片(Kt=6.7)の破面のSEM観察写真をFig. 5に示す。試験後の破面は切欠底周辺部がディンプル破面、中央付近が劈開破面であるが、切欠底から延性き裂が発生、進展した後に最終的に脆性破壊したものと考えられる。また、Kt=3.8の試験片ではほとんどの場合、試験片中央部から延性的に破壊した破面となっていた。

SEM観察により脆性破面率を測定した結果をFig. 6に示す。Kt=6.7の場合を見ると、C鋼では動的負荷の方が脆性破面率が高く、静的載荷に比べ延性-脆性遷移温度は約30°C上昇しており、従来の報告と同様に歪速度の上昇によって遷移温度が高温側へシフトしている。一方、A鋼、B鋼では動的負荷の方が脆性破面率が低くなっており、C鋼とは逆に動的負荷により遷移温度が低下している。

Kt=3.8の場合は、いずれの鋼種もKt=6.7に比べ遷移温度が低温側へ移動している。脆性破面率に対する負荷速度の影響を見ると、A鋼、B鋼はともに動的負荷の方が脆性破面率が低下している。また、C鋼は動的負荷により破面率は

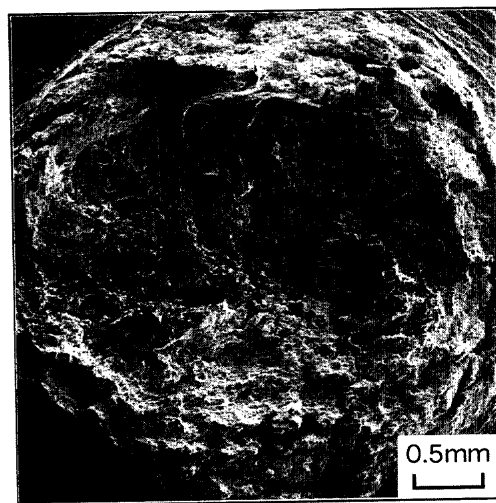


Fig. 5. SEM image of fracture surface (Steel B, 300mm/s, 20°C).

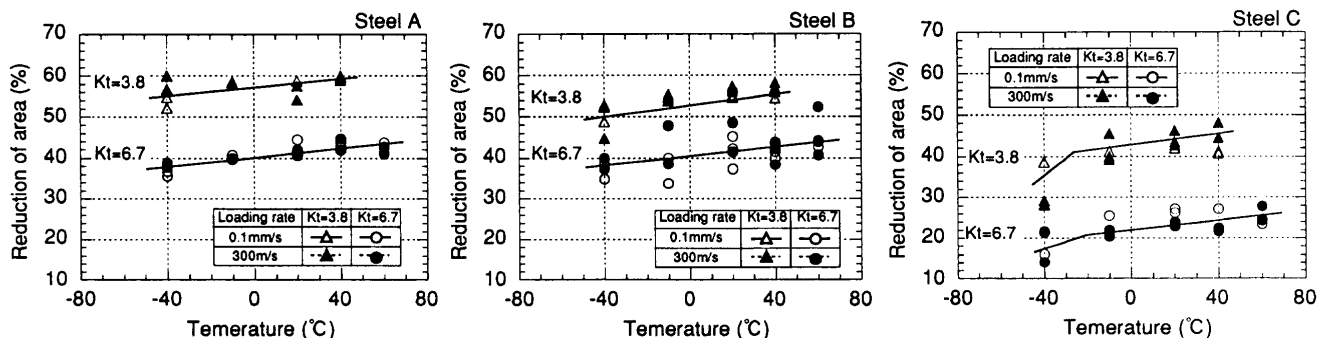


Fig. 4. Relation between reduction of area of notched specimen and temperature.

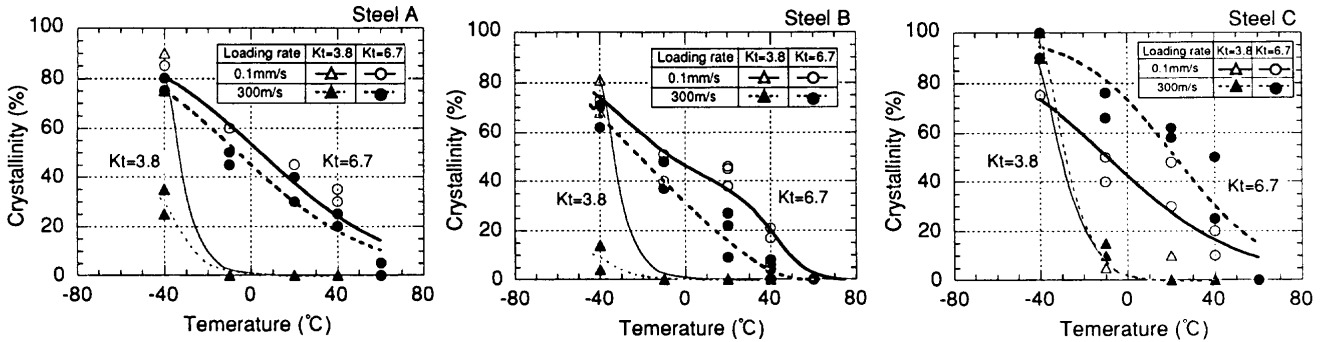


Fig. 6. Effect of loading rate and temperature on crystallinity.

ほとんど変化しておらず、Kt=6.7の場合と負荷速度の影響が異なっている。

以上のように、従来の報告では歪速度の上昇により延性-脆性遷移温度が上昇するとされていたが、切欠丸棒試験片のように大きく塑性変形した後の破壊では、材料によっては逆に遷移温度が低下する場合があることが示された。

4. 考察

4.1 引張特性に及ぼす温度上昇の影響

Fig. 3 に示すように、YS に対する歪速度と温度の効果は Rパラメータによって等価に扱うことができたが、TS については静的負荷と動的負荷とで不連続となっている。ここで、C鋼で Kt=6.7 の場合は他に比べ不連続の度合いが小さくなっているが、Fig. 4 にあるように C鋼の絞り値は他に比べて低く、塑性変形量の違いによって、動的負荷時の TS の変化量が異なっていると考えられる。

一般に変形速度が速くなり塑性変形により生じる熱の散逸が十分に行なわれない条件では、鋼材の温度が上昇することが知られており<sup>9)</sup>、平行試験片を用いた高速引張試験ではくびれ変形時の温度上昇により局部伸びが増加することが報告されている<sup>10)</sup>。切欠丸棒試験片における動的負荷の場合も、切欠底の温度が上昇していると考えられることから、FEMにより切欠底断面の応力-歪状態を解析し、動的負荷時の温度上昇量を推定した。解析プログラムは ADINA (ADINA R&D Inc.) を使用し、8 接点、軸対称モデルにより解析した。メッシュ分割を Fig. 7 に示す。また、切欠底断面での平均的な温度上昇量が求まればよいことから、簡単のために、材料の応力-歪関係は同一負荷速度での平滑丸棒引張試験で得られた応力-歪曲線を用いて解析を行った。Fig. 8 に示すように、動的負荷時の応力-変位曲線の測定値と FEM 解析結果とはほぼ一致している。また、Fig. 4 に示したように絞り値は歪速度によらずほぼ一定となっていることから、切欠底の平均的な応力-歪状態を解析する上では、本手法を用いても問題はないと考えられる。

動的変形時に塑性仕事の全てが熱に変わると仮定すると、切欠底断面の各要素の温度上昇量(ΔT)は次式により求める

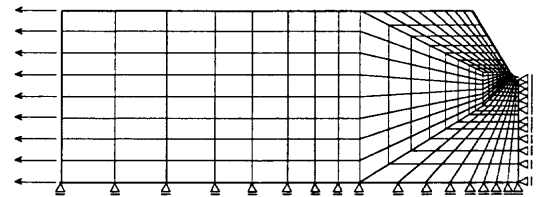


Fig. 7. Configuration of the mesh for FEM analysis.

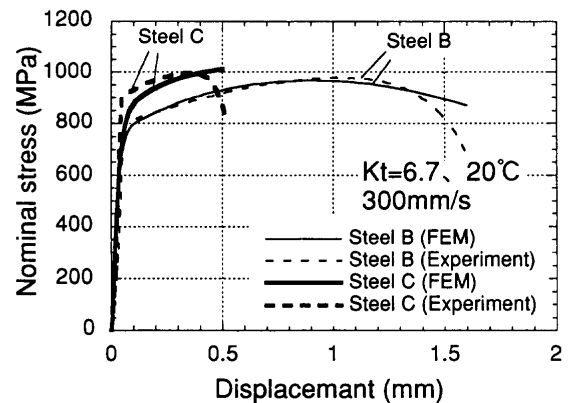


Fig. 8. Relation between displacement and nominal stress for notched specimen under dynamic loading (Kt=6.7).

ことができる<sup>9)</sup>。

$$\Delta T = \frac{W_p}{c \cdot \rho_0} = \frac{1}{c \cdot \rho_0} \int \sigma d\epsilon_p \dots \dots \dots (3)$$

W<sub>p</sub> : 塑性仕事, c : 比熱 (0.48J/g・K),  
ρ<sub>0</sub> : 密度 (7.83g/cm<sup>3</sup>), σ : 真応力, dε<sub>p</sub> : 歪増分

(3)式により、B鋼、C鋼の Kt=6.7 の場合について、最高荷重点 (B鋼で標点間変位 1.0mm, C鋼で 0.34mm) までの温度上昇量を解析した。Fig. 9 に温度上昇量の切欠底断面での分布を示す。これから切欠底断面の平均温度上昇量を求めると B鋼で 70.3°C, C鋼で 18.2°C となる。この温度上昇を考慮した Rパラメータを用いて、Fig. 3 の TS と Rパラメータの関係を補正した結果を Fig. 10 に示す。静的負荷と温度上昇を考慮した動的負荷のデータはひとつの曲線で近似でき、動的負荷時の切欠底の温度上昇を考慮することで、切欠材の TS も Rパラメータによる評価が可能となると言える。

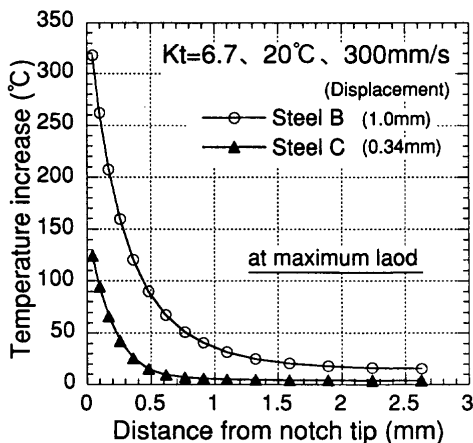


Fig. 9. Temperature increase in the notch section under dynamic loading.

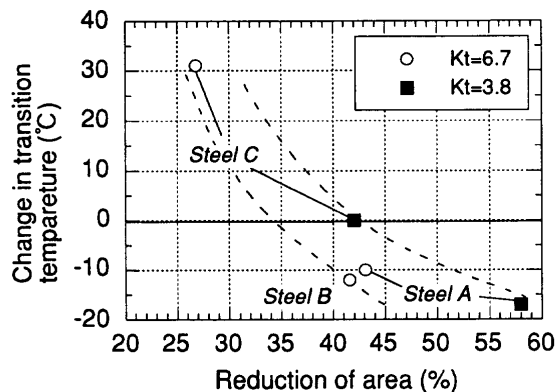


Fig. 11. Relation between reduction of area and transition temperature shift.

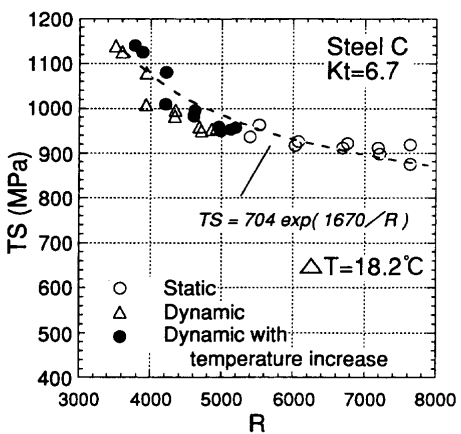
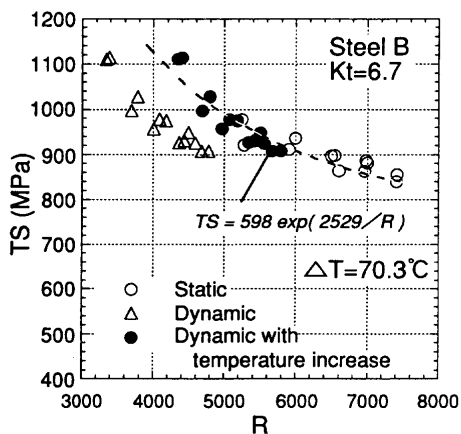


Fig. 10. R parameter dependence of tensile strength considering temperature increase with dynamic loading.

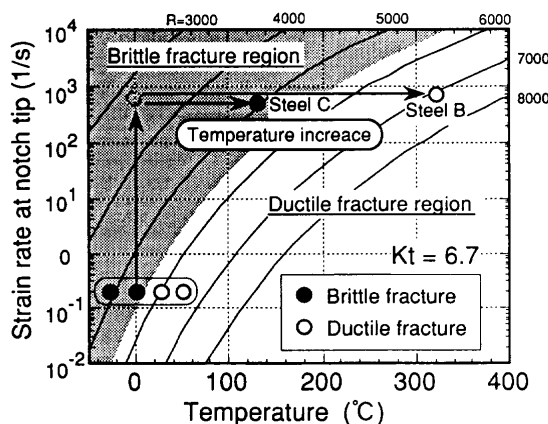


Fig. 12. Effect of strain rate and temperature on fracture appearance.

よる遷移温度変化量(静的負荷時の遷移温度-動的負荷時の遷移温度)を室温静的条件での絞り値で整理するとFig.11のようになる。Kt=6.7の場合、絞り値が40%以上のA鋼、B鋼は動的載荷により遷移温度が低下し、絞り値の小さいC鋼は遷移温度が上昇している。またKt=3.8の場合、C鋼でも40%以上の絞り値が得られており、遷移温度は変化していない。このように、絞り値が大きくなるほど遷移温度シフト量が小さくなっているが、これは絞り値が大きいものほど切欠底の温度上昇量が大きくなっているためと考えられる。

歪速度の上昇に対応して、変形応力が上昇し脆性破壊を生じやすくなる<sup>12)</sup>ことから、動的負荷による破面形態の変化は、歪速度と断熱変形による温度上昇との兼ね合いで決まるといえる。そこで前節のFEM解析により求めた、最高荷重点での切欠底先端部の歪速度及び温度上昇量を、そのときの破面形態とを合わせてFig.12に示す。図中の曲線はRパラメータが一定となる点を結んだ線(等Rパラメータ線)であり、Rパラメータが小さくなるほど脆性的な破壊形態を示す領域となる。静的負荷の場合はいずれの供試鋼もほぼ0°C以下で脆性破面率が50%以上となっている。また動的負荷では切欠底の温度上昇量は、完全断熱変形を仮定する

#### 4・2 動的負荷による温度上昇を考慮した延性-脆性遷移挙動

動的荷重下では切欠部の温度上昇により引張特性が変化することが示されたが、9%Ni鋼において動的負荷時のき裂先端の温度上昇により破壊靱性値が上昇する<sup>11)</sup>という報告もあるように、切欠底の温度上昇は破壊特性に影響を及ぼすと考えられる。そこで、Fig.6の破面遷移曲線において脆性破面率50%の温度を破面遷移温度として、動的負荷に

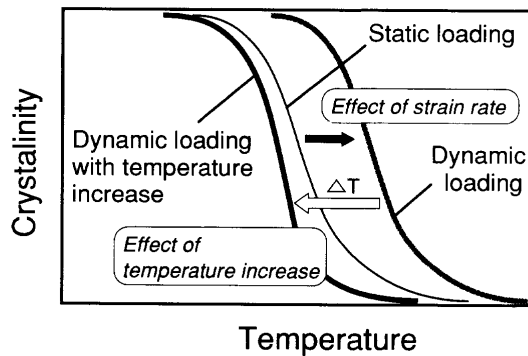


Fig. 13. Schematic diagram for the effect of dynamic loading on ductile-brittle transition phenomenon.

とB鋼で約320°C, C鋼で約130°Cにもなっており, 0°Cの結果ではB鋼は延性的, C鋼は脆性的な破壊形態を示している。このように破面形態についても, Rパラメータを用いて歪速度と温度の効果を定性的に説明できる。しかし, 本解析においては歪速度依存性や熱伝導を考慮しておらず, Rパラメータを靱性評価に用いるためには, より正確な解析を行い切欠部の歪速度や温度上昇を正しく求めることが必要と考えられる。

以上のように, 動的荷重下での破面形態は応力集中部の温度上昇の影響を大きく受けるが, 延性-脆性遷移挙動に対する歪速度及び温度上昇の影響を模式的にFig.13に示す。すなわち動的荷重の場合, 切欠底の歪速度上昇により脆性破面率が増加するため遷移温度が上昇するが, 延性の高い鋼材または応力集中係数が小さな場合は, 塑性変形量が大きくそれによる温度上昇のため破面率が低下する。そのため, C鋼は動的荷重時の温度上昇量が少ないため, 破面遷移温度が上昇したのに対し, B鋼は温度上昇量が大きいと逆に破面遷移温度が低下したと考えられる。

## 5. 結言

環状切欠付丸棒試験片を用いて, 490MPa級構造用鋼の引張特性および延性-脆性遷移挙動に及ぼす切欠形状, 荷重速度の影響を調査し, 以下の結論を得た。

(1)降伏応力, 引張強度は歪速度の上昇または温度の低下とともに上昇し, 降伏応力に及ぼす歪速度の影響は, 歪速度温度効果指数(Rパラメータ)を用いることによって温度と等価に評価することができる。

(2)引張強度に対してのRパラメータ依存性は動的荷重と静的荷重で不連続となるが, 動的荷重時の切欠部の温度上昇を考慮してRパラメータを補正することにより, 引張強度に対してもRパラメータの適用が可能となる。

(3)絞り値及び破断伸びは荷重速度の影響をほとんど受けないが, 延性が低い材料でかつ切欠き部の応力集中係数が大きい場合は, 動的荷重による破断伸びの低下が認められた。

(4)破面形態は試験温度により変化し, 温度の低下とともに脆性破面率が増加する。脆性破面率の歪速度依存性は材料によって異なり, 切欠材での絞り値が40%程度となるような高い切欠延性を有する鋼材または応力集中係数が低い場合は, 動的荷重によって脆性破面率が減少する。

(5)動的荷重下では切欠底における歪速度上昇によって遷移温度が上昇するが, 延性の高い鋼材または応力集中係数が低い場合は, 切欠部の断熱変形にともなう温度上昇のため破面遷移温度が低温側へ変化した。

## 文 献

- 1) 1995年兵庫県南部地震 鉄骨構造物被害調査報告書, 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会編, 東京, (1995).
- 2) 牛嶋通雄, 北村 茂, 小林卓也, 藤井英輔: 船舶技術研究所研究発表会講演集, 57 (1991), 22.
- 3) 桑村 仁, 前田孝一: 構造工学論文集, 36B (1990), 89.
- 4) 石川信行, 小林泰男, 東田幸四郎, 豊田政男, 前中 浩: 鋼構造年次論文報告集, 4 (1996), 113.
- 5) 藤井英輔, 大熊 勇, 川口善昭, 塚本雅敏: 日本造船学会論文集, 158 (1985), 619.
- 6) 中野善文, 久保高宏: 材料, 39 (1990), 1417.
- 7) 橋田知幸, 藤平正一郎, 森川 潤, 南二三吉, 豊田政男: 鋼構造年次論文報告集, 4 (1996), 135.
- 8) P.E.Bennet and G.M.Sinclair: AIME. paper, 65-MET-11, (1965).
- 9) 鈴木 弘: 塑性加工(改訂版), 裳華房, 東京, (1985), 25.
- 10) 津山青史, 角田浩之, 細谷佳弘: 鉄と鋼, 80 (1994), 40.
- 11) 佐野謙一: 鉄と鋼, 73 (1987), 147.
- 12) 豊田政男: あたりあ, 35 (1996), 370.