銅および低炭素鋼のねじりにおける切欠きクリープ破壊*

大 路 清 嗣** 小 倉 敬 二**
久 保 司 郎*** 山 蔭 久 明****

Notch Creep Rupture Strength of Copper and Low Carbon Steel under Torsion

by

Kiyotsugu OHJI, Keiji OGURA, Shiro KUBO

(Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita)

and Hisaaki YAMAKAGE

(Mitsubishi Electric Co., Kobe)

Notch creep rupture strength under torsion was studied for OFHC copper and S10C low carbon steel at 200°C and 450°C, respectively. The torsional loading was selected in this study mainly because of several relative merits over the tensile loading from mechanics point of view, such as no existence of the hydrostatic stress component and the negligibility of change in specimen geometry during finite deformation. The results obtained are summarized as follows:

(1) Both of the materials investigated, which had previously been found to show “notch-strengthening” under tension, behaved “notch-weakening” under torsion, as was expected from a fracture-mechanics analysis by the authors of notch creep rupture strength under torsion.

(2) The mode of crack propagation for the OFHC copper was transgranular in the short life range and intergranular in the medium and long life ranges. For the S10C low carbon steel, cracks grew in the transgranular or mixed trans- and intergranular mode. These were essentially the same as those observed under tension.

(3) Comparing the results observed under torsion with those under tension, one can conclude that the mechanical plastic constraint of strains induced by the multiaxial tension in the vicinity of the notch root and the contraction of cross-sectional area due to large deformation, particularly in unnotched specimens, are two main causes responsible for “notch-strengthening”; in the lack of these two causes “notch-weakening” prevails.

(Received Oct. 3, 1973)

1 緒 言

切欠き材のクリープ破壊強度に関する研究はかなり以前より行なわれており、これまでに数多くの報告がなされている。しかし、その多くは個々の材料に対してクリープ破断強度に及ぼす温度、応力、切欠き形状などの因子の影響を形式的に整理するにとどまり、クリープ破断に至る諸過程を追跡し、本質的視点から定量的に取り扱った研究はほとんどない。

この原因は、クリープ破断の現象には力学的、金属組織学的あるいは熱力学的因子など多くの因子が関与しており、しかもこれらの諸因子の影響が複雑に交錯しているため、問題の総合的は握および解決がきわめ

て困難であることにあると思われる。しかしながら問題を切欠きクリープ破断の現象に限れば、この場合には平滑材のクリープ破断の場合と比べ、力学的因子の果たしている役割はきわめて大きいと考えられ、力学的側面からの考察のみによっても、かなりの程度まで問題をは握することが可能であると予想される。

著者らは、このような考えのもとに切欠き材やき裂材のクリープ破断におけるき裂の発生および成長に関する実験的研究とともに、この問題を定量的に取り扱う際に必要な切欠き材に関するクリープ下の応力およびひずみ分布の解析、さらにはこれに破壊条件を組み合わせた力学的解析を行ない、切欠き^{2)~4)}クリープ破断⁵⁾⁶⁾に関する一連の解析的研究も行なってきた。

クリープ破壊に対するこのような力学面からの研究は最近ようやく活発化のきざしが現われ始めており、

* 原稿受理 昭和48年10月3日

** 正 会 員 大阪大学工学部 吹田市山田上

*** 学生会員 大阪大学大学院 吹田市山田上

**** 三菱電機(株) 神戸市兵庫区和田岬町

著者らの研究のほかにもいくつかの報告がなされている。^{10)~15)}

しかし、これら従来のき裂材あるいは切欠き材のクリープ破壊に関する文献は、著者らのものを含めほとんど引張荷重下のものに限定されている。これは、引張荷重下の資料に対する実用的要求度が最も高いという事情に由来するものであろうが、実用的観点からはねじりなど他の負荷に対する同様の資料も必要であることはいうまでもなからう。一方、学術的観点からこの問題を眺めると、平滑材の強度を取り扱う場合には、引張荷重はねじりに比べて試験片断面内の応力の均一性という、問題の単純化に役立つ大きな長所があるが、き裂材あるいは切欠き材の場合にはこのような利点は消滅する。逆に、ねじりには大変形に伴う試験片の幾何学的因子の変化がほとんどなく応力（ひずみ）解析が容易なうえ、作用する応力系が単純で、静水圧応力成分が至るところで零であるという特徴があって、引張りの場合のように応力（ひずみ）解析において変形に伴う応力集中部の形状変化、断面積の減少、くびれなどの効果を考慮するとか、破壊条件に対し応力集中部近傍での著しい多軸引張応力状態（静水圧応力成分）の影響を考慮するなどの必要がない。このことは破壊問題を分析的に研究するうえで、きわめて大きな利点となる。

本研究では、以上のように実用的にも学術的にも重要でありながら資料のほとんどない切欠き材のねじりクリープ破断試験を実施し、資料の蓄積を試みた。供試材としては引張クリープ破断の結果と対比するため、著者らによってすでにき裂材の引張クリープ破断試験結果が得られている無酸素銅および低炭素鋼を用いた。さらに、この研究は並行的に進めている応力集中部のクリープ破壊に関する力学解析の研究結果に対する比較資料を得るということをも目的のひとつとしており、とくにねじりに対して特別な金属組織学的強化の機構が作用しなければ、切欠き弱화가支配的で強化の起こる可能性が少ないという解析結果を裏づける資料を得ることを期待している。

2 ねじりクリープ試験機

ねじりクリープ試験機本体の概略図をFig. 1に示す。トルクは上方に位置する回転ドラム(a)にワイヤロープを巻き付け重錘により発生させる方式を採用している。試験片(e)は下部軸(g)と上部軸(d)によって保持され、下部軸(g)は固定されている。上部軸(d)は縦に並べられた2個のボールプッシュ(c)によって支えられているので、昇温時の熱膨張および試験中の試験片の軸方向寸法変化による拘束力の影響が除かれる構造になっている。試験片より上方にある上部軸等の重量はつりあい重りによって補償されている。

③ Drum for twisting moment ⑤ Upper support
④ Linear bearing ① Upper shaft ⑥ Specimen
⑦ Furnace ② Lower shaft ⑧ Lower support

Fig. 1. Torsional creep testing apparatus.

3 供試材および試験片

供試材は無酸素銅 (OFHC Cu) および低炭素鋼 (S 10 C) であり、素材はそれぞれ径 19 mm の冷間加工材および径 28 mm の圧延材である。供試材の化学成分を Table I に示す。機械加工後、試験片は無酸素銅に対しては 600℃、低炭素鋼に対しては 910℃ でそれぞれ 1 時間真空中 (3×10^{-6} torr.) にて焼なましを施し、加工の影響を除去するようにした。焼なまし後の供試材の機械的性質を Table II に、顕微鏡写真を Fig. 2 に示す。

Fig. 3 に平滑試験片および切欠き試験片の形状を示す。切欠き部形状は加工の便宜上、60°-V 形環状切欠

Table I. Chemical composition of the materials investigated.

(a) OFHC copper (ppm)

Fe	Pb	Sn	Bi	Ni	Co	Ag	As	Sb	O ₂	H ₂	S
7	1	0	1	1	0	2	1	0	4.2	0.14	7.2

(b) S 10 C carbon steel (%)

C	Si	Mn	P	S
0.09	0.24	0.36	0.013	0.023

Table II. Mechanical properties of the materials investigated.

	Tensile strength (kg/mm ²)	Yield strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction in area (%)	Vickers hardness
OFHC Cu	21.9	—	72.1	90.7	62.2
S10C	35.6	24.3	—	75.6	105

Fig. 2. Microscopic structure of the materials investigated.

Fig. 3. Test specimen.

きとした。著者らが本研究と並行して行なっている環状双曲線切欠きを有する棒のねじりクリープ破壊に対する力学的解析結果との比較のため、切欠きの深さは、試験片のV形切欠きの応力集中係数と、これと同じ切欠き半径を有する双曲線切欠きの応力集中係数がほぼ等しくなるように決定した。切欠き試験片の応力集中係数は図中に示されている。

4 試験結果

試験温度は、無酸素銅に対しては 200℃、低炭素鋼に対しては 450℃ とした。切欠き半径は無酸素銅に対しては 0.1 mm、低炭素鋼に対しては 0.1 mm およ

び 0.8 mm の 2 種類を採用した。

Fig. 4(a)および(b)にそれぞれ無酸素銅および低炭素鋼の平滑材のクリープ曲線の例が示されている。縦軸の角変位は試験片肩間の値であり、Fig. 1中のドラム(a)に取り付けられた角度目盛による測定値より算定したものである。種々の破断時間に対応するクリープ曲線の比較を容易にするため、横軸の目盛を破断時間に応じて変えている。角変位とせん断ひずみ間には近似的に直線関係が成立し、実測によれば角変位 160° がほぼせん断ひずみ 1.0 に対応する。図中の公称応力 τ_{nom} は、同径の平滑棒の弾性ねじりにおける最大せん断応力である。

Fig. 5(a)および(b)はクリープ曲線より求めた無酸素銅および低炭素鋼の公称応力 τ_{nom} と最小角変位速度の関係を示したものである。角変位速度とクリープひずみ速度とは比例関係にあるので、図より、

Fig. 5. Relationship between stress and minimum angular velocity.

Fig. 4. Creep curves of unnotched specimens.

$$\dot{\epsilon}_{\min} \propto \tau_{\text{nom}}^n$$

の関係が成立する。nの値は無酸素銅および低炭素鋼であまり変わらず、前者で約14、後者で約15である。なお、切欠き材の実験結果も同じ図中に示したが、平滑材とはほぼ平行な関係を示している。

Fig. 6 (a)および(b)はそれぞれ無酸素銅および低炭素

(a) OFHC copper (b) S10C carbon steel
Fig. 6. Rupture strength under torsional creep.

(a) OFHC copper (b) S10C carbon steel
Fig. 7. Notch-rupture strength ratio against rupture time.

鋼に対する平滑材および切欠き材の応力-破断時間線図である。両図より求めた破断強度比をFig. 7(a)および(b)に示す。無酸素銅については、切欠き半径 0.1 mm の切欠き材に対して切欠き弱化を呈している。低炭素鋼については、切欠き半径 0.1 mm の切欠き材の場合、同様に切欠き弱化を呈しているが、切欠き半径 0.8 mm の切欠き材では、平滑材とはほぼ同じ破断寿命となっている。このようにねじりクリープ破断においては、少なくとも切欠き強化にはならず、切欠き弱化が支配的であるとみることができる。

最後に破壊様式の観察結果を示す。Fig. 8は平滑材の破断面近傍の縦割り断面の例を示したものである。図の横方向が試験片の半径方向である。無酸素銅においては応力の低下あるいは破断寿命の増加に伴い、粒内破壊型のき裂から粒界破壊型のき裂への移行がみられる。この傾向は引張負荷の場合とはほぼ同様である。低炭素鋼においては応力の変化にかかわらず粒内破壊型のき裂が⁴⁾支配的であり、これも引張負荷の場合と同傾向である。

5 考 察

前述のように著者らは実験と並行してねじりクリープ破壊に対する力学的解析を行なっている。^{7,8)} その詳細については別の機会に譲るが、環状双曲線切欠き棒の定常クリープ応力(ひずみ)解析結果をもとに、これと限界ひずみの破壊条件を組み合わせることにより、き裂の挙動を解析し、ねじり負荷においては切欠き弱化が支配的であるという結果が得られている。この結果は本研究の実験結果とよく対応している。

本研究で用いた無酸素銅および低炭素鋼については、引張負荷に対しては、切欠きの⁴⁾極限状態と考えられるき裂材が切欠き強化を呈することがすでに明らかにされている。とくに低炭素鋼においてはその傾向が顕著である。このような負荷形態の相違によって生じた切欠き破断特性の違いは、切欠き強化および弱化の本質に関する力学的側面からの重要な知見を与えると期待されるので、とくにこの点に焦点を絞って考察する。

引張負荷とねじり負荷によって起こる大きな相違点のひとつは、切欠き底近傍における多軸引張応力状態

Fig. 8. Microphotographs of cracks near the fracture surface.

*1 同一破断時間に対する切欠き材の破断応力と平滑材の破断応力の比。

の有無である。すなわち、有限要素法を用いた切欠き材の応力（ひずみ）解析結果によれば、引張負荷では切欠き底近傍で多軸引張応力状態となるのみならず、時間の経過とともにその部分の相当応力が減少する。その結果、切欠き部の形状に応じて、切欠き部の相当応力が切欠き底断面の公称応力値、換言すればこの場合の比較の基準となる平滑材の応力値（公称）を下まわることになる。したがってもし材料の延性が充分にあれば、充分の時間経過の後には切欠き部のクリープひずみが平滑材のそれよりも小さくなる。もし適当な限界ひずみで破壊条件を与えるなら、このような場合には切欠き強化が生じ、逆に材料が延性に欠け限界ひずみが小さい場合には切欠き弱化的傾向を示すことになって、大谷らの指摘¹¹⁾のとおりである。これに対しねじり負荷に対する解析結果によれば、多軸引張応力状態が生ずることはなく、したがって上記のような塑性拘束も生ずることがない。

引張りともねじりによる他の重要な相違点は変形の進行に伴う試験片形状の変化の有無である。上記の議論は微小変形理論に基づく計算結果を基礎としているが、高延性材の破壊に対しては当然有限変形の影響を考慮しなければならない。ねじり負荷の場合には変形が大きくてもほとんど試験片の形状変化がなく、これに対する修正を加える必要が事実上ないのに対し、引張負荷の場合には変形に伴う著しい形状変化が認められる。この形状変化としては切欠き底の曲率半径の変化で代表される切欠き形状の変化と切欠き・平滑試験片に共通の変形に伴う断面積の減少のふたつが考えられる。これら形状変化の試験片の応力またはひずみ分布への影響を正確に評価することは現在の段階では困難であり、今後の有限変形理論に基づく解析の進歩にまたねばならないが、これらの影響の概略の見当はいくつかの実験結果を参照してつけることができる。まず、切欠き底の曲率半径は時間の経過とともに増大することが報告されており^{18),19)}、応力集中が緩和され切欠き強化を大きくすることになる。つぎに断面積減少は切欠き試験片に比べ変形の容易な平滑試験片の方が大きく、延性のある材料では平滑試験片の真応力が加速度的に増大する。このため、平滑試験片の寿命が相対的に短くなり、切欠き強化に寄与すると考えられる。延性の大きい材料の切欠き強化にはこの効果が非常に大きな役割を果たしていると思われる。

引張負荷とねじり負荷の相違によって生ずる他のひとつの相違点は、破壊ひずみ（または抽象的に延性といつてよいが）およびひずみ速度に対する多軸引張応力状態、すなわち正の静水圧応力成分の影響であろう。これについても正確な情報はないが、高圧下（負の静水圧応力成分）では破断ひずみが増加しクリープ

ひずみ速度が減少するという実験結果があり、延性破壊における静水圧応力成分の影響とその機構を考慮すれば、当然クリープの場合にも正の静水圧応力成分によって破壊ひずみが減少しクリープひずみ速度の増大することが予想される。ねじり負荷の場合には多軸引張応力状態はなく静水圧応力成分は零であるからこの影響はないが、引張負荷では正の静水圧応力成分があるので上述のような効果があり、切欠き強化を減らす方向に作用するものと思われる。しかし定量的な議論については今後の研究にまたねばならない。

要するに、力学的観点からみれば引張負荷の場合には塑性拘束と大変形に伴う形状変化、とくに断面減少の効果のため、延性が充分あれば切欠き強化となる。正の静水圧応力成分の影響については、幾分強化を減らす方向に作用しているものと考えられる。ねじり負荷ではこれら三つの影響はすべて作用しないので、たとえ材料の延性が充分高くても、切欠き弱化的になると思われる。

以上のような力学的因子以外で切欠き強化および弱化的に影響を及ぼす因子としては金属組織学的因子をはじめとしていくつかのものが考えられ、破壊形態もそのひとつである。たとえば、大谷らは引張りにおいて適当な条件のもとでは粒内破壊より粒界破壊への破壊形態の変化に伴い、切欠き強化より弱化的への移行が起こりうることを示し、Cr-Mo-V 鋼の実験結果の説明としている。しかし、本実験結果のように、ほとんど粒内・粒界の破壊形態のいかにかわらず力学的条件によって切欠きクリープ破断特性が決定される場合もある。結局、力学的条件と、破壊形態の著しい影響をうける破壊条件との組合せによって、見掛け上の切欠き強化あるいは弱化的の現象が左右されると考えられる。なお破壊条件に関しては、上記のことと関連してひとつの統一的な考え方が大谷らによって示されている¹¹⁾。

6 結 言

引張負荷においては、切欠き材の極限であるき裂材に対して切欠き強化を呈することがすでに報告されている無酸素銅および低炭素鋼に対して、それぞれ 200℃および 450℃においてねじりクリープ破断試験を行ない以下の結論を得た。

(1) 両材料はともに、ねじり負荷のもとでは切欠き弱化的が支配的であった。これは著者らが並行して行っている力学的解析結果と一致する。

(2) 引張りおよびねじりにおける切欠きクリープ破断試験結果および破壊形態の比較より、切欠き強化・弱化的の現象には力学的効果と破壊の条件との組合せが非常に大きく関与していることが明らかとなった。

本研究には昭和47年度文部省科学研究費補助金（一

般研究C)の援助を得たことを付記する。

(昭和48年5月23日 日本材料学会第22期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば, "Symposium on Strength and Ductility of Metals at Elevated Temperatures", ASTM, STP, No. 128 (1952).
- 2) 大路清嗣, 材料, **20**, 368 (1971).
- 3) 大路清嗣, 小倉敬二, 康 祥隆, 日本機械学会第3回シンポジウム講演論文集, No. 710-7, 57 (1971); Proc. of the 1971 International Conference on Mechanical Behavior of Materials, **Vol. III**, 114 (1972).
- 4) 大路清嗣, 小倉敬二, 康 祥隆, 材料, **22**, 285 (1973).
- 5) 大路清嗣, 日本機械学会論文集, **33**, 1909 (1967).
- 6) 大路清嗣, 小倉敬二, 中野達也, 日本機械学会論文集, **39**, 822 (1973).
- 7) 大路清嗣, 小倉敬二, 久保司郎, 日本機械学会講演論文集, No. 720-9, 173 (1972).
- 8) 大路清嗣, 小倉敬二, 久保司郎, 日本機械学会講演論文集, No. 730-12, 243 (1973).
- 9) 大路清嗣, 小倉敬二, 久保司郎, 材料, **23**, 202 (1974).
- 10) 大谷隆一, 土井健志, 中村貞行, 新田明人, 材料, **22**, 291 (1973).
- 11) 大谷隆一, 土井健志, 日本材料学会第21期総会学術講演会前刷集, 119 (1972).
- 12) 大谷隆一, 新田明人, 第1回材料の力学的挙動に関するシンポジウム講演論文集, 256 (1973).
- 13) 坂田 勝, I. Finnie, 日本機械学会講演論文集, No. 720-9, 177 (1972).
- 14) Harrison, C.B., and G.N. Sandor, Eng. Fracture Mech., **3**, 403 (1971).
- 15) James, L.A., Int. J. Fracture Mech., **8**, 347 (1972).
- 16) Neuber, H., "Theory of Notch Stresses", p. 283 (1958) Springer
- 17) 大南正瑛, 梅田 清, 材料, **22**, 278 (1973).
- 18) Suezawa, Y., and H. Hōjō, Trans. ASME., **84**, Ser. D, No. 2, 214 (1962).
- 19) 間島 保, 宮野三郎, 宮川松男, 日本機械学会論文集, **38**, 2733 (1972).
- 20) 大南正瑛, 元家勝彦, 山蔭哲郎, 材料, **20**, 395 (1971).
- 21) McCormick, P.G., and A.L. Ruoff, "The Mechanical Behavior of Materials under Pressure" (ed. by H. L.I. D. Pugh), p. 355 (1970) Elsevier
- 22) Butcher, B.M., and A.L. Ruoff, J. Appl. Phys., **32**, 2036 (1961).
- 23) 大南正瑛, 山蔭哲郎, 材料, **21**, 225 (1972).
- 24) 解説として, 小倉敬二, 大路清嗣, 日本機械学会誌, **75**, 1099 (1972).