CrMoV 鋼の切欠部におけるクリープボイド生成について[†]

田 北 勝 彦* 竹 田 頼 正*
中 村 誠** 竹 添 堅 三 郎**

Cavitation during Creep in Notched Bar of CrMoV-Steel

by

Katsuhiko TAKITA*, Yorimasa TAKEDA*, Makoto NAKAMURA**
and Kenzaburo TAKEZOE**

In actual components, almost all creep failures occur at a stress concentrated parts. Therefore, the cavitation during creep in a notched bar was examined both by using FEM and actual testing on notched CrMoV-steel bar specimens, which were heat-treated in advance so as to get the creep-embrittlement in a rather short time. The change of creep voids in their number, distribution, orientation and coalescing direction in the notch root region was made clear by using SEM and an image processor. It was found that the cavitation behavior corresponded well with the creep damage based on the maximum principal stress.

Key words : Creep void, Creep damage, CrMoV-steel, Notched bar test, Image processing

1 緒 言

火力プラントをはじめとする高温機器の寿命検討は応力解析より得られた応力ひずみ挙動と、使用する材料の損傷あるいは破壊クライテリアとの比較に基づく手法が一般的である。この場合、設計的な配慮から、安全率の形で実機使用条件に対して安全裕度を持たせているが、近年、火力発電設備の運用形態の苛酷化、あるいは老朽火力の増加に伴い、計画的保守管理のため精度の高い劣化診断・余寿命評価が要求されるようになった。

設備の劣化および寿命を支配する大きな要因のひとつは高温部品のクリープによる損傷であり多くの調査研究が実施され、特にき裂発生前の現象であるクリープボイドの生成をとらえることにより劣化診断、寿命評価を行おうという試みがなされている^{1),2)}。一方、実機におけるクリープ損傷は、ほとんどの場合、構造不連続部・溶接部等の応力勾配を有する位置で発生しているが、この応力集中部におけるクリープボイドの生成、あるいは巨視的なき裂へと移行する状況は、現状では必ずしも明確であるとは言い難い。

そこで本報では切欠部のクリープ破断試験を実施しクリープボイドの生成挙動を詳細に観察すると同時に画像処理によるボイドの定量化を試みた。またこれらの結果と FEM クリープ解析より得られた応力ひずみ挙動との対応について考察を加えた。

2 切欠きクリープ試験

2・1 供試材および試験方法

材料は Table I に示す蒸気タービン高压ロータ材である CrMoV 鋼を用いた。ただし、現状のロータ材では短時間のクリープ破断試験においてクリープボイドの発生傾向は低く、試験片レベルでの詳細検討に不向きであるため、焼入温度を 1010°C と高くすることによりクリープボイドの発生傾向を高くし試験に供した。すなわち熱処理は 1010°C×15 hr 焼入 (冷速 250°C/hr)+680°C×25 hr AC とした³⁾。本供試材はクリープボイド発生傾向を高める熱処理を実施したため Table II に示すように引張伸び・絞り大幅に低下しているが、0.2% 耐力・引張強さは高くなっている。また 600°C、応力 176 MPa の平滑のクリープ破断時間は 1940 hr でクリープ破断強度は高くなっているがクリープ伸びは 8.3% とクリープ延性の低い材料と

Table I. Chemical composition (wt %).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
CrMoV steel	0.28	0.33	0.83	0.013	0.013	1.00	1.15	0.27

Table II. Tensile properties.

0.2 proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
707	861	11.2	15.3

[†] 原稿受理 平成元年 7 月 24 日 Received July 24, 1989

* 正 会 員 三菱重工業(株)長崎研究所 長崎市飽の浦町, Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Akunoura-machi, Nagasaki

** 三菱重工業(株)長崎研究所 長崎市飽の浦町, Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Akunoura-machi, Nagasaki

Fig. 1. Specimen geometry.

なっている。

本材料について板状切欠クリープ破断試験を、試験温度 600°C、公称応力 176 MPa で実施し破断・未破断試験片について組織調査を行った。更に未破断材については液体窒素中（-196°C）で切欠部より破壊し、破面観察を行った。試験片の形状寸法を Fig. 1 に示す。本試験片の弾性応力集中係数 K_t は 2.8 である。

2・2 試験結果

2・2・1 切欠クリープ破断試験結果 板状切欠材のクリープ破断試験を実施した結果、平滑材の破断時間より大幅に短い 801 hr で破断した。き裂は片方の切欠部より進展し破断に至っているが、中心断面の組織調査の結果、両切欠底のある範囲にボイドと微小き裂が発生し、き裂の進展部には狭い範囲にしかボイドと微小き裂は発生していない (Fig. 2)。そこでボイドの発生・成長、微小き裂の発生・進展過程を明らかにするため 100 hr (12.5%), 200 hr (25%), 400 hr (50%), 600 hr (75%), 700 hr (88%) において試験を中止し組織調査を行った。なお () 内の数

Fig. 3. Creep void initiation (200 hr).

字は破断時間に対する中止時間の割合であり、寿命消費率を表わす。

調査結果を Table III に示す。100 hr ではボイドの発生はなく、200 hr で初めてボイドが観察される。発生範囲は切欠底内部の狭い範囲であり、密度は粗く微小なボイドが観察される (Fig. 3)。

400 hr になるとさらに切欠底内部のボイド発生範囲は広がってくる。ただし、400 hr では微小ボイドに加えて切欠底より 0.25 mm の位置の主応力と直角に近い粒界に連結し、線状となったボイドが 1 箇所観察された (Fig. 4)。

600 hr になるとボイドの発生範囲はさらに広がり主応力方向と直角に近い粒界に連結し線状となったボイドが多数観察される。特に切欠底の 0.25 mm～0.70 mm 範囲は粒界の空けきも大きくなり線状のボイドも長く、き裂の前段階の状況を呈している (Fig. 5)。

Fig. 2. Creep void region of the ruptured specimen.

Table III. Results of rupture tests.

Time (creep damage fraction)	200 hr (25%)	400 hr (50%)	600 hr (75%)	700 hr (88%)	801 hr (100%)
Initiation and growth behavior of void and crack
	Void initiation	Void growth	Void growth + Crack initiation	Void growth + Crack growth	Rupture

Fig. 4. Typical inter-granular creep voids (400 hr).

Fig. 5. Creep voids (600 hr).

Fig. 6. Crack initiation (700 hr).

700 hr では線状のボイドの一部がき裂となり表面に現出している。なお、700 hr の発生範囲が600 hr より狭いのはバラツキと考えられる (Fig. 6)。

この後 801 hr で破断するが、切欠近傍に発生した微小き裂が一旦切欠表面に達すると、そのき裂が主き裂となって内部への進展を開始し破断に至ることを示している。すなわち、ボイドの生成および微小き裂化については、600~700 hr までは両切欠底ともにほぼ同じ挙動を示すが、上記の主き裂については片方のみ進展するため Fig. 2 のような状況となることが分かる。

2・2・2 破面観察 前記 100・200・400・600 hr 試験中止未破断材を液体窒素中において切欠部より破壊し破面調査を行いボイドの状況を詳細に観察した。この場合破面は典型的なぜい性破面であるリバーパタ

Fig. 7. Typical brittle fracture surface (100 hr).

Fig. 8. Creep voids (200 hr).

ーンを示すが、100 hr 中止材の破面からはクリープボイドは発見されなかった (Fig. 7)。

200 hr 中止材ではクリープボイドの発生が観察された。Fig. 8 はボイドの生成初期に対応するものであり、直径 3~6 μm のボイドが見出される。この 200 hr 中止材では、ボイドの発生は $\frac{1}{4}$ 破面中でわずか 2 か所であった。Fig. 9 の 400 hr 中止材では、ボイドの生成領域が拡大しており、その内部には直径 5~10 μm の多数のボイドの輪隔が観察されるが、これは直径 10 μm 以下の多数のボイドが隣接して生成することで拡大したものと考えられる。600 hr 中止材の Fig. 10 についても Fig. 9 と同様の状況であるが、個々のボイドの縁がやや細くなっており、ボイドの連結、あるいはき裂化の前段階にあるものと考えられる。なお、クリープボイド内部に見られる微小な粒子は炭化物であり、クリープボイド発生 の核と考えられる。

Fig. 7~10 によってクリープボイドの生成状態が明らかになったが、ボイドの個々の大きさは観察された範囲内で最大 10 μm 程度であった。本供試材ではク

Fig. 9. Creep voids (400 hr).

Fig. 10. Creep voids (600 hr).

リープボイドの成長は単一のボイドの拡大ととらえるよりも、ボイドの増殖とボイド同志の結合による成長ととらえる方が適当である。

3 画像処理によるボイドの定量化

試験中止材の切断調査によってボイドの生成挙動が明らかになったが、ここではボイドの成長・分布・方向性をより明確にするため画像処理による定量化を行った。Fig. 11 に画像処理による断面観察法の概略を示す。画像処理入力は 200・400・600 hr それぞれについて、切欠表面より内部 1.3 mm、幅 0.7 mm 領域の SEM 写真をもとに、粒界およびボイドを記入着色して作成した画像を用い、0.1 mm ピッチで処理を行った。

Fig. 12 に 0.1 mm 間隔の各領域内における粒界ボイド率 α (=ボイド長さの和/粒界長さの和) の分布を示す。600 hr の分布では、切欠表面より 0.4~0.5 mm に分布のピークが現われており、粒界ボイド率は最高 8% を超えている。この結果は、Fig. 5 の断面観察結果を定量的に裏付けるものである。

粒界ボイド率の時間変化は、領域全体については Fig. 13 の実線で示す通りほぼ直線上の関係を示すが、切欠内部を個別に調べるとかなりの変化がある。すなわち、切欠表面の 0~0.2 mm、0.3~0.5 mm の範囲に

Fig. 11. Schematic flow of image processing analysis.

ついて比較すると発生初期 (200 hr) では、表面近くの方がボイド率は高いが、成長速度の点では 0.3~0.5 mm 内部の方が上回っており、400 hr・600 hr ではボイド率は内部の方が高くなっている。

クリープボイドの発生・成長についての方向性の存在を確認した結果を Fig. 14 に示す。本図は、クリープボイドを含む粒界の接線方向とボイドの長さを求め、各方向ごとのボイドの長さの和を観察領域内に含まれるボイド長さの総和で割って無次元化している。これによってボイドの発生・成長が強い方向性を持ち、その方向性は試験時間によらずほぼ一定であり、同様のパターン (バラツキ) を示すことが定量的に確認され

Fig. 12. Creep void fraction versus distance from notch root.

Fig. 13. Creep void fraction versus time.

Fig. 14. Direction distribution of grain boundaries with creep voids.

た.

4 FEM クリープ解析

4・1 解析方法

切欠試験片の形状寸法, および機械的性質等については, Fig. 1 および Table II を使用した. また, クリープ則は同一材料のクリープ試験結果をもとに決定した. 実験との対応を図るため, 次式に示す通り 1 次クリープまで考慮している.

$$\epsilon_c = 7.7 \times 10^{-11} \sigma^{3.0} t^{0.28} + 4.8 \times 10^{-21} \sigma^{6.6} t$$

600°C, CrMoV ロータの通常の熱処理材と比較するとかなりクリープひずみ速度は小さい.

Fig. 15 に有限要素分割を示す. 試験片形状の対称

Fig. 15. Finite element mesh.

Fig. 16. Stress distribution under creep condition.

Fig. 17. Relation of creep damage and time.

性から、 $\frac{1}{4}$ 部分についてモデル化している。使用した要素は 8 節点アイソパラメトリック要素であり、板厚効果を調べるため、同一モデルによって平面ひずみ解析（板厚中央部相当）および、平面応力解析の 2 通り行った。本モデルの要素数は 66、節点数は 233 である。荷重条件は、実験と同様、切欠断面の平均応力 $\sigma_y = 176 \text{ MPa}$ となるように与えている。なお、切欠底のピーク応力値は、材料の 0.2% 耐力以下であるため、解析では塑性を考慮せず弾性クリープ計算とした。

4・2 解析結果

試験片板厚中央部の応力状態は、平面ひずみ解析より得られる結果に近いことが予想される。平面ひずみ解析より得られた Von Mises の相当応力 σ_{mises} および最大主応力 σ_p の切欠断面における分布とその時間変化を Fig. 16 に示す。切欠底表面における最大主応

力 σ_p の緩和は著しく、荷重負荷から約 1 時間で、ピーク応力位置は、約 0.2 mm 表面から内部へ移動している。応力の緩和とピーク応力位置の移動は、その後も徐々に進み、最終的にはピーク位置は表面より内部へ約 0.5 mm 程度移動している。Von Mises の相当応力 σ_{mises} 分布では、応力の緩和した状態でもピーク位置の移動を示しておらず、最大主応力の場合とは明確に異なった様子を示す。クリープひずみについては、切欠底表面に集中しており、したがって、クリープひずみに基づく評価では今回観察されたクリープボイドの成長を説明できない。

なお、平面応力解析の結果においては、最大主応力 σ_p 、相当応力 σ_{mises} 分布共にピーク位置の表面から内部への移動は生じていない。これらの状況は、従来の研究にて得られている結果と同様である。

5 考 察

Fig. 17 に切欠断面における Von Mises の相当応力 σ_{mises} に基づくクリープ損傷 D_c ($D_c = \int (dt/tr)$) と最大主応力 σ_p に基づく損傷 D_c の時間変化を示す。 σ_p ベースの損傷変化は、実験結果 Fig. 13 と良好に対応している。また、Fig. 18 は 100 hr 時のクリープ損傷の分布を示している。本図では上半分は最大主応力 σ_p に基づく損傷計算値、下半分は Von Mises の相当応力 σ_{mises} に基づく損傷計算値 D_c の分布である。なお D_c の計算の tr としては平滑試験片のクリープ破断時間を用いている。

FEM 解析の結果は、100 hr 以降では応力再配分量が小さく、長時間側の状況は外挿によって推定可能である。実験の最終段階では切欠部は第 3 期クリープ領域に入るが、クリープボイドの生成は、クリープによる損傷蓄積が関係しており、その分布および方向性については第 2 期クリープまでの応力状態が支配的と考えられる。Fig. 12 の実験結果では、クリープボイド

Fig. 18. Creep damage D_c distribution.

は切欠表面より若干内部に入った位置に分布しているが、Fig. 18 の相当応力 σ_{mises} ベースの評価では、損傷の進展は切欠底表面が最大であるため、対応は明確でない。これに対しての最大主応力 σ_p ベースの評価では、損傷のピークが切欠底表面から若干内部に入った所にあり、Fig. 18 のボイド分布との対応が認められる。更にボイドの発生に関しては最大主応力ベースの損傷 D_c の方が良く対応しており、また、Fig. 14 に示したボイドの方向性についても σ_p との関係で説明することが可能である。以上の検討は切欠部の応力に基づいているがクリープひずみの集中は切欠底表面が最大であり、ひずみベースの評価では、今回のクリープボイドの分布との対応は明らかにできない。なお、平面応力解析から求めたクリープ損傷 D_c は、平面ひずみの場合より小さく、試験片中央断面で観察されたクリープボイドとの対応は認められなかった。

6 ま と め

本研究では、クリープボイドの発生しやすい熱処理を施した CrMoV 高圧ロータ材板状切欠試験片を用

い、クリープ破断材およびクリープ中途抜取材の断面 SEM 観察を行なった。更に、クリープボイド発生量、分布状況、方向性について、画像処理による定量化を行なった。これらの実験結果と FEM 解析より求めたクリープ損傷との対応を調べた結果、実験によって観察されたクリープボイドの生成挙動は FEM 解析より得られた最大主応力と良好な対応が認められた。すなわち、最大主応力によってクリープボイドの生成、分布およびその方向性が説明可能であることが明らかになった。

(昭和61年12月10日 第24回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 科学技術庁, 構造材料の信頼性評価技術に関する研究, 昭和58~62年度
- 2) 瀬戸口克哉, 増山不二光, 上原勝景, 高野勇作, 第22回高温強度シンポジウム前刷集, 82 (1984).
- 3) J. D. Conrad, Trans. ASME 1958, 1210 (1958).
- 4) 大谷隆一, 材料, 25, 230 (1976).

書 評

“Concise Encyclopedia of Wood & Wood-Based Materials”

A. P. Schniewind (編)

(1989年, Pergamon Press 発行, 25.5×19 cm, 354ページ, \$ 125)

木材および木質材料は建築・船舶・車両などの躯体・内装をはじめ、家具、器具、楽器などに身近な材料として広く使われている。さらに木材は紙の原料、エネルギー源としても重要である。本書はこのような木材、木質複合材料、および紙についての事典で、次のような内容をそれぞれの分野の専門家 68 名が分担執筆している。

主な内容は、資源としての木材、肉眼可視から分子オーダーまでの木材の組織構造、化学成分とその利用、収着・電気・熱・音響特性などの基礎的物性、吸湿性と寸法変化、木材中での流動、変形・破壊・強度などの耐力性能と木構造、熱・菌・昆虫・環境条件による材質劣化とその防除、切削・乾燥・成型・接着・接合・塗装などの各種加工、集成材・合板・木質ボードなどの木質複合材料、木材-ポリマー複合体と化学的改質、紙とペーパーボード、燃料としての木材を中心に、これに加えて考古学的な出土木材、木材利用の歴史、木造建築、楽器用材に関する項目も含まれている。さらに、世界の各地域で産出する主要木材についての一般的材質だけでなく、竹、籐(トウ)、コルクなどの木性材料の項目もある。

この中には各種の非破壊試験、評価・加工におけるアコースティックエミッションの利用、バイオテクノロジーや化学修飾による木材の改質、木材からの液化燃料などに関する最近の発展についても述べられている。

本書は大項目解説方式をとっており、以上の内容を 73 項目にまとめ、アルファベット順に配列してある。各項目は写真、図、最近のデータを使って系統的に解説がされているだけでなく、関連する他の項目が引用できるようにしてある。引用文献が付いているので原著を参照することができる。また、巻末に約 1700 項目の索引があるので小項目用語も検索しやすい。

このような内容であるため、木材学、木材工業だけでなく、建築、住居、化学、機械、計測、工芸、技術教育などの分野で木材、木質材料、紙などを取り扱っている研究者・技術者が手元に置いて、手軽に参考ができる事典である。

(京都大学農学部 佐道 健)