

230

爆接クラッド材のクリープ主裂伝ば挙動

熊本大学工学部
熊本工業大学
熊本大学工学部

竹園茂男
緒方典介
○佐藤昌宏 吉村英嗣

1. 緒言

筆者らは爆接クラッド材に関してこれまでに疲労強度¹⁾²⁾、高温におけるクリープ破断強度³⁾、および爆接境界を通過する疲労主裂伝ば挙動^{4)~7)}などについて研究を行ってきたが本研究では爆接クラッド材のクリープ主裂伝ば試験を行ない、FEMによる主裂伝ばの弾塑性クリープ解析による結果と比較検討した。

クリープ主裂伝ばに関する研究はこれまでに多数あり多くの成果が得られているが^{8)~13)}、異材境界を有するクラッド材のクリープ主裂伝ば挙動を調べた研究はあまりないようである。主裂伝ばの弾塑性クリープ解析において、筆者らは大谷ら⁹⁾、大路ら¹⁴⁾、と同様にクリープ破壊は本質的に材料の局所的ひずみによるものであるという考えに基づいて主裂先端のMisesの相当クリープひずみが一定値に達したときに主裂進展が生じるというクライテリオンを用いた。

2. 供試材

供試材は、(1) オーステナイト系ステンレス鋼板 SUS33 (板厚 16 mm)、(2) ボイラー用炭素鋼板 SB42 (板厚 15 mm)、(3) ステンレスクラッド鋼板 SUS33 + SB42 (板厚 16 mm + 15 mm) の 3 種類である。供試材の化学成分および常温における機械的性質を Table I, II に示す。各素材の高温における材料特性を調べるため、単レバー式クリープ試験機を用いて、応力-ひずみ関係を求めるための単軸引張試験およびクリープ試験を行なった。試験温度は 600°C である。試験片の形状寸法を Fig. 1 に示す。試験片はすべて機械加工後 900°C (1h 保持) の真空焼鈍を行なっている。応力-ひずみ関係を求める引張試験は、標点間の伸びを電気式変位変換器にて測定し、荷重を試験機のフルロードに貼付したひずみゲージにより検出するこゝれによって行なった。単軸引張試験は試験中のクリープひずみをできるだけ小さくするように 1~3 秒で所定の荷重まで負荷するようにした。得られた両素材の真応力と真ひずみの関係およびこれらの Swift の式による近似を Fig. 2 に示す。Fig. 3, 4 に両素

Table I. 化学成分

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS33	0.021	0.81	1.53	0.028	0.007	14.22	17.08	2.25
SB42	0.12	0.27	0.70	0.010	0.028	—	—	—

Table II. 常温における機械的性質

Material	Yield point MPa (kgf/mm ²)	Tensile strength MPa (kgf/mm ²)	Elongation %	Reduction of area %	Hardness Hv	Coefficient of linear expansion (100~600°C) 1/°C
SUS33	—	547 (55.8)	57.3	78.8	223	$18.5 \cdot 10^{-6}$
SB42	295 (30.1)	427 (43.5)	34.6	59.0	202	$15.1 \cdot 10^{-6}$
SUS33 + SB42	—	594 (60.6)	25.7	40.6	—	—

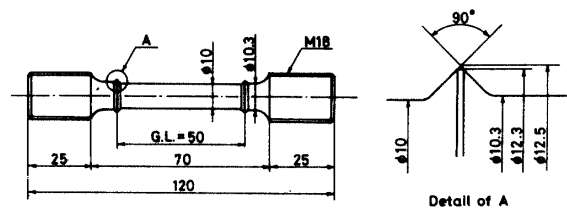


Fig. 1. 単軸試験片

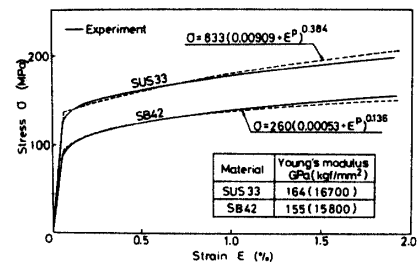


Fig. 2. 応力-ひずみ関係 (600°C)

材のクリープ曲線を示す。縦軸は真ひずみである。クリープ試験は公称応力 σ_0 を一定として行っているが、真応力は刻々変化するのでクリープひずみ ϵ^c は

$$\epsilon^c = \int_0^t \dot{\epsilon}^c dt, \dot{\epsilon}^c = n A \dot{\sigma}^m \sigma^{m/n} \epsilon^{n-1/n}$$

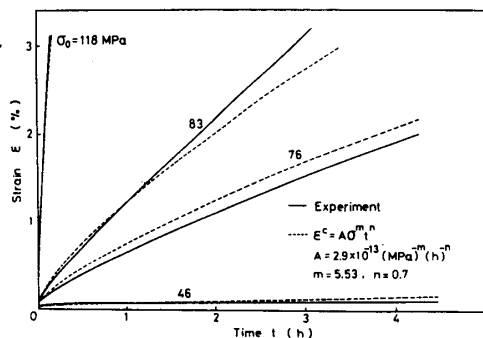


Fig. 3. クリープ曲線 (SB42)

となる¹⁵⁾。図中破線は実験結果を二のようにして近似したものである。なお瞬間弾塑性ひずみには Fig. 2 より得られた値を用いている。図より SUS33 に比べ SB42 の方が全ひずみに占めるクリープひずみの割合が大いことが分かる。Fig. 2~4 に示した近似式は後述の FEM 解析の際に用いるものである。

3. クリープと裂伝ば

3-1 実験方法 主裂伝ば試験には単軸試験と同一のクリープ試験機を使用し、試験温度は 600℃

である。クラッド材のクリープと裂伝ば試験片の形状寸法を Fig. 5 に示す。試験片の側面にはグループを設けてある。これは主裂のトンネル化を防ぐためと主裂の伝ば方向を制御するためおよびチャック部からの破断を防ぐためである。試験片はその長手方向と爆轟方向が一致するように採取した。なお両素材の試験片も Fig. 5 に示すクラッド材のそれと全く同形であり、その長手方向が圧延方向と一致するようにした。

主裂の観察は、加熱炉に石英ガラスで密封した直径 13 mm の穴を 2 個あけ、一方は採光用とし他方から約 20 倍の望遠顕微鏡を用いて試験片表面の主裂長さを測定した。本実験ではクリープと裂伝ば速度の変化をより明確にし安定なクリープと裂伝ばを比較的長く得るために、正味断面公称応力 σ_{net} が一定となるように主裂の進展とともに荷重を減少させた。荷重の調整には水量調節のできる水タンク (30 l) を用いた。なお σ_{net} は板厚および板幅の変形による減少を考慮せずに計算した値である。また高温空気に於いては酸化皮膜の形成が特に SB42 において著しく、表面観察が不可能となるのでここではアルゴンガス (99.9%) を炉内で予熱した後試験片表面に吹きつけてその酸化を防いだ。

3-2 FEM によるクリープと裂伝ばシミュレーション 本研究では負荷応力が高い場合を含めて取扱うので、全ひずみは弾性ひずみ、塑性ひずみおよびクリープひずみから成るものと考え、弾性ひずみには Hooke の法則を、塑性ひずみには Prandtl-Reuss の式を、またクリープひずみには前述のべき乗則を用いた¹⁶⁾。主裂進展は主裂先端の Mises の相当クリ

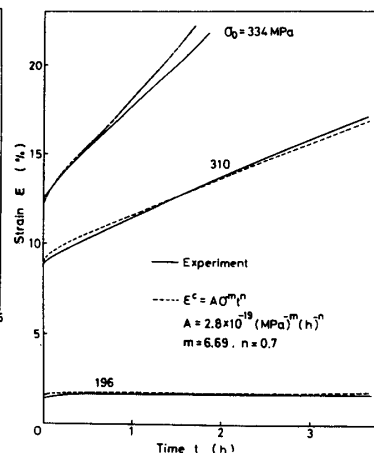


Fig. 4. クリープ曲線 (SUS33)

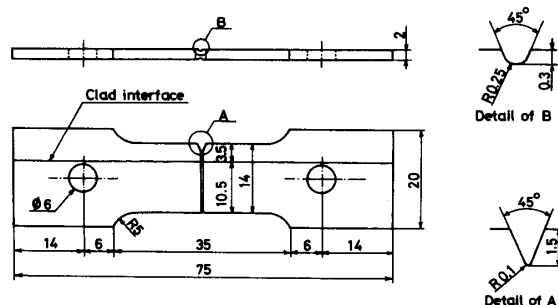


Fig. 5. クリープと裂伝ば試験片

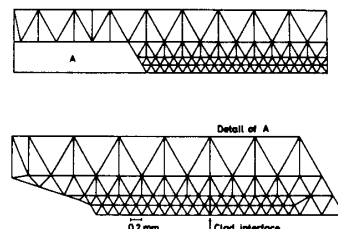


Fig. 6. 要素分割

クリープひずみ $\bar{\epsilon}^c$ がある限界値 $\bar{\epsilon}_f^c$ に達したとき生じるものと考えた。試験片のグリッド近傍の要素分割の様子を Fig. 6 に示す。最小要素は境界部分を除いて一辺 0.2 mm の正三角形とした。主裂伝ばには Fig. 7 に示す主裂先端の要素 (m) の相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}^c$ を用いた。

4. 実験結果および計算結果

Fig. 8 に SUS33 素材のクリープ主裂伝ば試験の結果を示す。 σ_{net} を一定として荷重を制御しているの で比較的主裂が長くなるまで安定なクリープ主裂伝ばが観察されている。図中に $\bar{\epsilon}_f^c = 0.25$ とした場合の前述の方法による計算結果を示しているが、本計算においては $\bar{\epsilon}_f^c = 0.25$ と仮定すると実験結果とよく一致する。

Fig. 9 にクラッド材において主裂伝ば方向が SUS33 $\rightarrow$ SB42 の場合の実験結果および素材で求めた $\bar{\epsilon}_f^c = 0.25$ を用いたときの計算結果を例示する。 σ_{net} が Fig. 8 の SUS33 素材の場合に比べて小さいにもかかわらず主裂伝ば速度は始めから高く、境界に近づくにつれてますます大きくなり、SB42 側では急速な不安定破壊に移行している。これは SB42 側においてクリープによる応力緩和が著しいために SUS33 側における応力の負担が最初から大きく、主裂が進展するにつれてますます大きくなることに起因している。

Fig. 10 にクラッド材と素材 (SUS33) の主裂の写真例を示す。

5. 結言

爆接クラッド材および各素材のクリープ主裂伝ば試験を σ_{net} = 一定のもとで行ったところ、各素材の高温材料特性の相違に起因して素材と爆接材とではクリープ主裂伝ば挙動に著しい相違があることが認められた。またこの事実を FEM による主裂伝ばの弾塑性クリープ解析の結果を用いて説明した。

文献 1) Kiyota, K. et al., Mechanical Behaviour of Materials, 5, 505 (1972). 2) 竹園・福山, 機講論, No. 768-3, 25 (1976). 3) 竹園ほか2名, 機講論, No. 758-2, 44 (1975). 4) 竹園・福山, 機講論, No. 775-2, 45 (1977). 5) 竹園・福山, 機講論, No. 788-2, 4 (1978). 6) 竹園ほか3名, 機講論, No. 788-3, 20 (1978). 7) 竹園ほか2名, 機講論, No. 790-13, 78 (1979). 8) 佐々木ほか3名, 材料, 25, 236 (1976). 9) 大谷・中村, 材料, 25, 738 (1976). 10) 大谷・新田, 材料, 25, 746 (1976). 11) 大路ほか3名, 機論, 46, 43 (1980). 12) 小寺・沢・森, 材料, 26, 948 (1977). 13) Taira, S. et al., Trans. of ASME, 101, 154 (1979). 14) 大路ほか2名, 機講論, No. 730-12, 243 (1973). 15) Fanning, I and Haller, W.R. (鈴木訳), 工業材料のクリープ, 259 (1965), 707社. 16) 竹園・大谷, 機講論, No. 713-1 (1971).

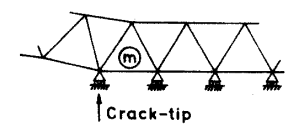


Fig. 7. 主裂先端要素

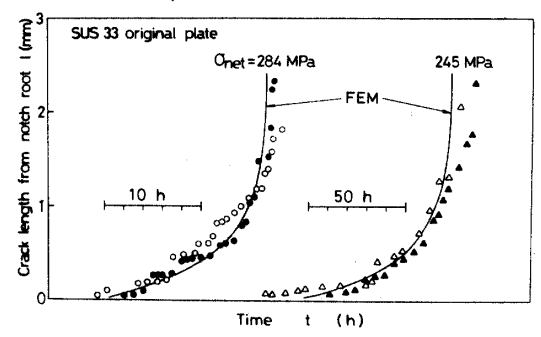


Fig. 8. クリープ主裂伝ば曲線 (SUS33 素材)

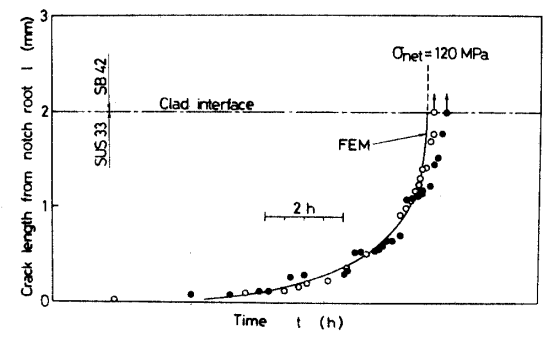
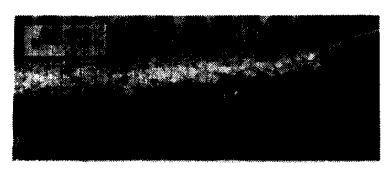
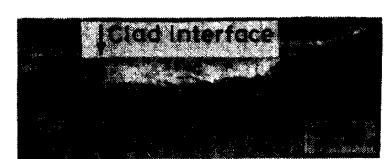


Fig. 9. クリープ主裂伝ば曲線 (SUS33 $\rightarrow$ SB42)



(a) SUS 素材



(b) クラッド材

Fig. 10. クリープ主裂