セラミックス/金属接合材の繰返し荷重下における
界面き裂発生・進展特性*林 偉 平^{*1}, 荒居 善 雄^{*2}, 土田 栄一郎^{*2}Crack initiation and Extension Characteristics of Ceramic/Metal Joint
under Cyclic Loading

Weiping LIN, Yoshio ARAI and Eiichiro TSUCHIDA

Crack initiation and extension characteristics of tension side, view side and compression side of ceramic/metal joints were investigated under cyclic bending loading. Location of cracks and propagations were investigated by SEM and X-ray compositional analysis methods. The stress and strain distribution under cyclic bending loading were investigated by FEM analysis. The results obtained are as follows. (1) Crack initiation occurred at ceramic/interlayer interface at the specimen corner under cyclic bending loading. The unstable fracture occurred from the interface crack. At the 84~90% of mean strength, crack initiated at ceramic/interlayer interface at the specimen corner. (2) After a main crack occurred many microcracks appeared in order near the main crack region with the increase of maximum stress. Finally they united to the main crack under cyclic loading. The length of crack was increased with increasing maximum stress. The curve slopes of crack lengths versus stresses also increased with increasing maximum stress. Under constant cyclic bending loading, the cracks intermittently grew. (3) At compression side, when the absolute value of maximum stresses were higher than those of tension side, cracks started on the ceramic/interlayer interface and grew up to about 40 μm , and finally halted. (4) The crack initiations occurred at the ceramic/brazing filler interface. The location of crack initiation under cyclic bending loading was same as monotonic strength. (5) The crack length increment was decelerated with increasing energy release rate, then increased. The difference of the relationship between crack length increment and energy release rate was less than that of crack length increment and maximum stress. (6) From the FEM analysis, the plastic deformation progressed in interlayer when specimen was loaded and the plastic strain of interlayer left when unloaded. In the interlayer of interface, as compressional plastic strain was constrained by materials around it, tensile residual stresses occurred at the compression side at end of unloading. That is why crack initiation occurred in the compression side.

Key Words: Ceramic/Metal Joint, Fatigue, Interface Mechanics, Ceramics, Residual Stress

1. 緒 言

構造材料の複合化に伴い、繰返し荷重を受ける接合部材の疲労が、機器信頼性の確保あるいは寿命評価上の重要な問題となっている^{(1)~(3)}。著者らは前報において一定振幅荷重の繰返しにより、圧縮側を含む試験片の四つのコーナにセラミックスと中間層の界面き裂が発生し、外応力(四点曲げ応力)と接合残留応力を考慮した応力拡大係数がほぼ一定にもかかわらず、き裂は減速し、やがて停留したことを報告した⁽⁴⁾。

しかし、セラミックス/金属接合材の界面におけるき裂発生・進展の支配力学因子や、引張応力のみならず、圧縮応力の繰返しによっても界面き裂が発生した原因などはまだ明らかではない。

本研究では、セラミックス/金属接合材の最大曲げ荷重漸増繰返し試験を行い、除荷状態で接合材の引張

側、圧縮側と側面の界面き裂発生・進展挙動を調べた。さらに SEM による破面の微視的観察および成分分析を行い、き裂発生位置および伝ば経路を調べた。また、圧縮応力の繰返しによって界面き裂が発生する原因を解明するため、接合材の負荷-除荷過程の弾塑性有限要素解析を行い、繰返し曲げ荷重下における圧縮側接合部の応力・ひずみ状態を調べた。

2. 解 析 方 法

2・1 応力拡大係数の評価方法 応力拡大係数の評価方法の詳細は前報で示したとおりである⁽⁴⁾。2章では、文献(4)より、以下の議論に必要な定義式のみを示す。

Hutchinson らに従って、図 1(a)に示すような二次元界面端き裂の複素応力拡大係数 K を次式で定義する⁽⁵⁾。き裂先端近傍 $y-a \rightarrow +0$ において応力場は次式で表される。

$$\sigma_x - i\tau_{xy} = \frac{K(y-a)^{ie}}{\sqrt{2\pi(y-a)}}, \quad x=0 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$K = K_1 + iK_2 \quad \cdots \cdots (2)$$

* 1998 年 4 月 1 日 75 期通常総会講演会において講演、原稿受付 1998 年 5 月 1 日。

^{*1} 正員、埼玉大学大学院(〒338-8570 浦和市下大久保 255)。

^{*2} 正員、埼玉大学工学部。

E mail: yarai@mech.saitama-u.ac.jp

ここで、 a は界面端き裂長さ、 i は虚数単位、 ε は接合された二つの材料の弾性係数から定まる異材定数であり、次式によって与えられる。

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} \right) / \left(\frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right) \right] \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 μ_j は横弾性係数、 κ_j は平面ひずみ状態において $3-4\nu_j$ 、平面応力状態において $(3-\nu_j)/(1+\nu_j)$ をとる材料定数、 ν_j はポアソン比であり、記号の添字は、1, 2 をとり、接合された二つの材料に対応する。

二次元半無限界面き裂のき裂面に初期接合残留応力場を負荷した場合の応力拡大係数 K^R は次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$K^R = K_1^R + iK_2^R \dots \dots \dots (4)$$

$$K_1^R = \frac{\cosh(\pi\varepsilon)}{\pi^{1/2}} \int_0^a \left(\frac{2}{\xi} \right)^{1/2} \left[\sigma_x^R(\xi) \cos(\varepsilon \ln \xi) - \tau_{xy}^R(\xi) \sin(\varepsilon \ln \xi) \right] d\xi \dots \dots \dots (5)$$

$$K_2^R = \frac{\cosh(\pi\varepsilon)}{\pi^{1/2}} \int_0^a \left(\frac{2}{\xi} \right)^{1/2} \left[-\tau_{xy}^R(\xi) \cos(\varepsilon \ln \xi) - \sigma_x^R(\xi) \sin(\varepsilon \ln \xi) \right] d\xi \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $\xi = a - y$ であり、 σ_x^R , τ_{xy}^R は初期垂直残留応力と初期せん断残留応力である。

図1(b)に示すような均質材中のコーナき裂(引張面側の長さ a 、側面長さ b)が曲げ応力を受ける場合の応力拡大係数は次式で与えられる。

$$K_I^{L'} = \sum_{n=0}^1 A_n k_n \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 A_n は有限板厚の補正係数、 k_n はだ円き裂

(a) Interface edge crack and residual stresses

(b) Configuration of corner crack

Fig. 1 Configuration of specimen with crack

形状の補正係数であり、その詳細は前報において報告した⁽⁴⁾。

接合材試験片のコーナに発生した界面き裂の外力の応力拡大係数は、次式で与えられる。

$$K^L = (1 + 2i\varepsilon)(2a)^{-i\varepsilon} K_I^{L'} \dots \dots \dots (8)$$

全応力拡大係数は、次式で表される。

$$K = K^R + K^L \dots \dots \dots (9)$$

エネルギー解放率 $\mathcal{G}$ と応力拡大係数 K の関係は次式のとおりである。

$$\mathcal{G} = \frac{1}{16 \cosh^2(\pi\varepsilon)} \left\{ \frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right\} K \bar{K} \dots (10)$$

本研究では、後述するセラミックス/金属接合材の窒化けい素と銅(中間層)の界面に発生したき裂の進展特性を、上記の $\mathcal{G}$ を用いて整理した。

2・2 界面端部応力場の解析 解析は平面ひずみ解析であり、汎用構造解析プログラム ABAQUS を用い、弾塑性応力解析を行った。

解析モデルの形状と寸法を図2に、要素分割を図3に示す。中間層のひずみ硬化則は、同じ接合温度条件で熱処理した無酸素銅の引張試験で得られた応力と塑

Fig. 2 Configuration and dimension of model (unit: mm)

Fig. 3 Mesh division

Fig. 4 Stress-plastic strain diagram of Cu

性ひずみの関係(図4)を用いた。

要素は8節点アイソパラメトリック平面ひずみ要素を用いた。接合界面、荷重点付近と端部近傍は細分割、その他の領域は粗分割とした。界面端部近傍の最小要素寸法は $20\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ であり、要素数1480個、節点数6109個である。

3. 実験方法

3・1 供試材および試験片形状 本研究では接合時に熱膨張係数の差異によって生じる接合残留応力を緩和するために、中間層に軟質材のCuを用いたセラミックス/金属接合材を採用した。セラミックスには、常圧焼結窒化けい素(東芝製 TSN 03)を、金属にはステンレス鋼(SUS304)を用いて活性金属法で接合を行った。各材料の材料特性を表1に、接合条件を表2に、試験片形状及び寸法を図2に示す。

3・2 試験方法 四点曲げ強度試験の実験系統図を図5に示す。四点曲げ強度試験方法は、原則として、JIS-R-1624に準拠して行ったが、試験片の角部に面取りを施していない。試験片の接合部が内スパンのほぼ中央に位置するように設置した。ひずみゲージはゲージ長さ0.2mmのものを引張面側のセラミックスの内スパン内に付けた。

室温、大気中において、図6に示すような最大荷重漸増繰返し試験を行った。所定の荷重を負荷後、除荷

し、試験片を取りはずして光学顕微鏡(400倍)で界面き裂の有無と進展を観察する。き裂が発生しない場合、最大荷重を増分 ΔP だけ増加させ、繰返す。き裂が発生した場合、き裂長さを測定し、応力拡大係数を計算し、この応力拡大係数を使って ΔP を制御し、き裂進展特性を調べた。試験片の表面をダイヤモンド研磨した場合と研削状態の場合について試験を行った(表3のSurface conditionの欄を参照)。接合材の4側面について、平面研磨機(NANO FACTOR FACT-200)で $9\mu\text{m}$ のダイヤモンドスラリー、ウエイト1.5kg、プレート回転数90rpmの条件で研磨を行った。試験片の破断面および試験前の試験片の側面において走査形電子顕微鏡観察およびX線成分分析を行った。

4. 実験結果

4・1 界面き裂発生・進展挙動 漸増試験前に、5本の同様の接合材の試験片について静的強度試験を行った。クロスヘッド速度 0.5mm/min 一定で試験片が不安定破壊するまで負荷した。5本の試験片がすべてセラミックスと中間層の接合部で破断し(後述のIC形)、平均強度は 309.4MPa であった。表3に最大荷重漸増繰返し試験結果を示す。Fracture pathの欄のICは破壊起点がセラミックスと中間層の接合部で、き裂がセラミックス中に屈折した場合を示す。ここで、 σ_a と σ_b は公称曲げ応力であり、接合部の材料の力学的性質の不連続を考慮せず、次式により算出した。

Table 1 Material properties

	Si_3N_4	Cu	SUS304
E(GPa)	304	108	196
ν	0.27	0.33	0.30
$\alpha(\times 10^{-6}/\text{K})$	3.0	17.7	15.0

Table 2 Condition of joining

Brazing filler	Ti-Ag-Cu
Temperature	1073~1123K
Atmosphere	Vacuum. 1×10^{-5} torr
Interlayer	Cu (thickness 0.5mm)

Fig. 5 Four point bending test system

Table 3 Result of cyclic loading test

TP.NO.	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	Fracture path	Surface condition
Tention side				
TP710	-	300	IC	No lap
TP711	280	340	IC	No lap
TP712	260	350	IC	Lap
TP713	280	342	IC	Lap
Compression side				
TP712	320	-	IC	Lap
TP713	328	-	IC	Lap

Fig. 6 Load history diagram

$$\sigma_a \text{ or } \sigma_b = \frac{3P(s_2 - s_1)}{2ht^2} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 P はき裂発生時(σ_a の場合)または破断時(σ_b の場合)の負荷荷重、 s_1 , s_2 はそれぞれ内スパンと外スパンである。荷重繰返しの結果、セラミックスと中間層の接合部に界面き裂が発生し、最大応力の増加に伴い、その界面き裂を起点として不安定破壊に至った。TP 710 はき裂の発生を観察できずに破断に至った。界面き裂は平均強度の 84~90% の最大応力で発生した。4 本の試験片がすべてセラミックスと中間層の接合部で破断し(IC 形)、破断時の平均応力は 332.5 MPa であった。繰返し荷重によって、セラミックス側界面近傍の中間層の相当塑性ひずみが増加するため、残留応力が緩和され、最大荷重漸増繰返し条件下の強度は静的強度より高くなると考えられる⁽⁷⁾が、詳細は今後の課題としたい。研磨した試験片の内、1 本の試験片の金属と中間層の接合部に停留き裂が観察さ

れた。研磨した 2 本の試験片において、引張側のみならず圧縮側のセラミックスとろう材の界面にき裂が観察された。

表 4~6 に最大応力 σ_i ($P_{\max}$ より計算した公称曲げ応力)と引張側のき裂長さを示す。ここで、 a , b (TP 711 と TP 712), a_i , b_i (TP 713) は、図 7 に示すようにコーナき裂長さである。*印を付けた結果は破断後の破面上で測定したき裂長さである。いずれの試験片においても、不安定破壊時に大きな界面き裂進展を示している。

図 7 に主き裂と微小き裂発生時のき裂長さと合体の様相を模式的に示す。ただし、TP 712 は、複数き裂が発生したが、それらは合体せずに破断に至った。研磨しない TP 711 は破断に至るまで、複数き裂の発生および合体が観察できなかった。研磨の有無によって複数き裂の発生および合体の観察の可、不可が異なる原因は、研削傷の有無による界面き裂測定精度の違いと

Table 4 Result of crack propagation test (TP711, TP712)

TP711				TP712		
N	σ_i (MPa)	a (μm)	b (μm)	σ_i (MPa)	a (μm)	b (μm)
1	240	0.00	0.00	240	0.00	0.00
2	250	0.00	0.00	250	0.00	0.00
3	260	0.00	0.00	260	9.45	3.15
4	270	0.00	0.00	270	14.9	4.88
5	280	24.2	23.5	280	17.3	14.9
6	290	36.36	32.21	290	18.9	17.3
7	300	47.42	42.1	300	20.45	19.7
8	310	60.36	70.28	310	30.7	26.1
9	320	97.61	102.1	320	38.6	37.82
10	330	132.32	178.48	330	48.1	50.4
11	340	689.65*	1896.55*	350	178.95*	168.15*

Table 5 Result of crack propagation test (TP713, crack 2~8, tension side)

TP713						
N	σ_i (MPa)	a_1 (μm)	a_2 (μm)	a_3 (μm)	a_4 (μm)	a_5 (μm)
5	280	7.45	0.0	0.0	0.0	0.0
6	290	8.45	0.0	0.0	0.0	0.0
7	300	9.75	0.0	0.0	0.0	0.0
8	310	11.7	0.0	0.0	0.0	0.0
9	310	11.7	5.35	0.0	0.0	0.0
10	320	19.7	9.85	7.35	0.0	0.0
11	320	19.7	9.85	7.35	0.0	0.0
12	330	32.08	-	10.19	0.0	0.0
13	310	46.4	-	-	0.0	0.0
14	310	46.4	-	-	6.42	0.0
15	320	64.5	-	-	6.42	0.0
18	320	82.25	-	-	8.25	0.0
22	320	82.25	-	-	8.25	0.0
23	320	95.73	-	-	-	0.0
25	320	107.5	-	-	-	6.75
N	σ_i (MPa)	a_6 (μm)	a_7 (μm)	a_8 (μm)	a_9 (μm)	a_{10} (μm)
27	320	107.50	0.0	0.0	0.0	9.10
29	322	120.86	5.25	3.43	0.0	10.85
37	340	136.42	7.34	4.32	6.15	-
39	340	136.42	8.03	7.21	7.76	-
40	340	136.42	8.03	7.21	7.76	-
41	340	154.15	-	8.43	9.03	-
44	340	175.32	-	12.42	10.81	-
45	340	198.62	-	-	11.57	-
46	340	198.62	-	-	11.57	-
47	342	302.92*	-	-	-	-

Table 6 Result of crack propagation test (TP713, crack 9~11, view side)

TP713					
N	σ_i (MPa)	b_1 (μm)	b_2 (μm)	b_{10} (μm)	b_{11} (μm)
5	280	11.7	0.0	0.0	0.0
9	310	18.25	0.0	0.0	0.0
12	330	23.29	0.0	0.0	0.0
15	320	27.9	0.0	0.0	0.0
19	320	39.42	6.75	0.0	0.0
27	320	53.82	8.25	0.0	0.0
31	326	68.17	8.25	0.0	0.0
33	330	84.16	10.01	0.0	0.0
35	336	107.04	11.28	3.43	6.76
37	340	132.76	13.15	8.34	9.18
38	340	132.76	13.15	8.34	9.18
39	340	161.25	-	8.34	10.76
41	340	161.25	-	8.34	10.76
42	340	328.8	-	-	12.39
43	340	328.8	-	-	12.39
44	340	445.78	-	-	-
47	342	540.64*	-	-	-

Fig. 7 Configuration and location of interface cracks

考えられる。主き裂の発生後、最大応力の増加に伴い、主き裂に近い所から遠方にむかって順次、界面微小き裂の発生と、主き裂との合体を繰返した。表5と表6に各繰返し数に対するTP713の引張面(表5)と側面(表6)に発生した複数の界面微小き裂長さを示す。界面端部に発生した複数の界面微小き裂(引張面:き裂2~8, 側面:き裂9~11)は、各欄の下線のき裂長さの次の段の繰返し荷重において主き裂(a_i , b_i)と合体

した。

図8に界面微小き裂 $a_2 \sim a_8$, $b_9 \sim b_{11}$ の発生繰返し数 N_i , 発生位置(試験片コーナからき裂中心までの距離 y または z), 発生時のき裂長さ a_i , b_i を示す。界面微小き裂の発生時の長さは $3 \sim 8 \mu\text{m}$ であり、荷重の繰返しに伴い、主き裂に近い所から遠方にむかって、順次、界面き裂が発生している。

表7に各繰返し数に対する最大応力と圧縮側き裂長さを示す。 N の値は表4~6の N の値と対応する。TP712, TP713において、それぞれ最大応力320 MPa, 328 MPaで圧縮側の圧縮面(試験片底面)に界面き裂が発生した。TP713の場合、最大応力の増加に伴い圧縮側の側面にも界面き裂が発生し、それぞれ進展した。TP712, TP713ともに、不安定破壊時に主き裂は圧縮側の界面き裂と合体せず、セラミックス内を進展したために圧縮側の界面き裂は破面に現れなかった。

TP713では $N=15 \sim 25$ の間、最大応力 $\sigma_i = 320$ MPa一定とした。図9に、このときの繰返し数 N と引張側の主き裂長さ a , 微小き裂と主き裂先端の距離 $z-a$ の関係を示す。最大応力が一定であっても、数回の繰返しによって主き裂と微小き裂の両方が間欠的に進展した。

Table 7 Result of crack propagation test (compression side)

TP712				TP713			
N	σ_i (MPa)	a (μm)	b (μm)	N	σ_i (MPa)	a (μm)	b (μm)
9	320	24.32	0	32	328	9.53	0
10	330	24.32	0	33	330	9.53	0
11	350	-	-	34	333	9.53	14.15
				35	336	24.9	14.15
				36	340	24.9	14.15
				37	340	24.9	14.15
				38	340	24.9	14.15
				39	340	37.74	22.17
				40	340	37.74	22.17
				41	340	37.74	22.17
				42	340	37.74	41.23
				43	340	37.74	41.23
				44	340	37.74	41.23
				45	340	37.74	41.23
				46	340	37.74	41.23
				47	342	-	-

Fig. 8 Micro-crack length and location (TP713)

Fig. 9 Crack propagation under constant amplitude loading (TP713)

(a) Tension side

(b) Compression side

Fig. 10 Crack length-maximum stress diagram

図10(a)は引張側のき裂長さと最大応力 σ_i の関係を示す。星印は微小き裂と合体した長さ、黒三角印は破面上で測定したき裂長さを示す。縦軸の a, b はそれぞれ引張面と側面のき裂長さである。 σ_i の増加に伴い、 a, b は増加しているが、その傾きは初期に小さく、 σ_i の増加に伴い増大する。TP 711 と TP 713 は a のほうが b より大きく、TP 712 の a と b はおよそ等しい。図10(b)は圧縮側のき裂長さと最大応力 σ_i の関係を示す。圧縮側のき裂は引張側の場合よりも絶対値の大きな最大応力で発生し、約 $40 \mu\text{m}$ のき裂長さまで進展し、最後に停留した。

4・2 破面観察 図11はTP 713の中間層側破面上の界面き裂に対応する位置のSEM写真である。中間層側破面の試験片端部にそって金属状の破面がわずかに露出し、その内側はセラミックスである。

図11の矢印1～5に示すように引張面近くから高さ方向に伸びた五つの二次き裂が観察された。側面と二次き裂の間の距離はそれぞれ、 $19.0 \mu\text{m}$, $34.5 \mu\text{m}$,

Fig. 11 SEM fractograph of ceramic-interlayer fracture (TP713)

Fig. 12 Fracture surface at ceramic-interlayer interface (TP713, high magnification)

$37.9 \mu\text{m}$, $46.6 \mu\text{m}$, $56.9 \mu\text{m}$ であり、 $34.5 \mu\text{m}$ と $37.9 \mu\text{m}$ を同一のき裂長さに対応させれば、表5の $N=10, 12, 13, 15$ の a_1 と対応している。また、矢印6, 7に示すように、側面から、 $70.7 \mu\text{m}$ のところに表面長さ約 $40 \mu\text{m}$ の段差が観察された。この段差は、表5に示した $N=16\sim 28$ までの主き裂長さとほぼ対応している。図11より、最大荷重漸増繰返し荷重下において界面き裂は、主き裂と微小き裂の合体により、引張面では横方向に、側面では高さ方向に進展し、最終的に界面に平行に大きく進展した後でセラミックス側へ屈折したと考えられる。

強度試験前の同様な接合材試験片の側面のX線成分分析結果から、セラミックスとろう材の界面はSiとTiが多いことが明らかとなった。図11のA部の拡大SEM写真を図12に示す。X線成分分析の結果から、図12の金属状の破面(左コーナ部)においてセラミックス側破面上ではSiとAgが多く、中間層側破面上では、TiとSiとAgが多いこと、図12のセラミックス破面では、セラミックス側、中間層側ともにSiとNが多いことが明らかとなった。図12の金属状の破面において、直径 $1 \mu\text{m}$ 弱の窒化けい素の結晶

(a) Crack length increment-maximum stress diagram

(b) Crack length increment-energy release rate diagram

Fig. 13

粒が観察される。以上のX線成分分析とSEM観察の結果から、極めてわずかな窒化けい素の層が金属状の破面上をおおっていることがわかる。すなわち、き裂はろう材とセラミックスの界面からわずかにセラミックス側に入った箇所が発生し、セラミックス内へ屈折する。この破壊起点の破面様相は繰返し荷重下の破壊と静的破壊と同様であった。以上の結果から、繰返し荷重によって発生したき裂の位置は、セラミックス

Fig. 14 Aspect ratio-energy release rate diagram

Fig. 15 Distribution of σ_x along y direction at end of unloading

Fig. 16 Maximum stress-nominal stress diagram during loading and unloading

とろう材界面からわずかにセラミックス側に入った箇所であることが明らかとなった。

5. 考 察

5.1 界面き裂進展特性 図13(a)にき裂長さ増分 $\Delta a, \Delta b$ と最大応力 σ_i の関係を示す。縦軸の $\Delta a, \Delta b$ はそれぞれ引張面と側面のき裂長さ増分である。 $\Delta a, \Delta b$ は、き裂が発生してから σ_i が 300 MPa 程度までの範囲で σ_i の増加に伴い減少し、その後、 σ_i の増加に伴い増加している。図13(b)にき裂長さ増分とエネルギー解放率の関係を示す。 $\Delta a, \Delta b$ は σ_i の場合と同様に G の増加に対して減少した後に増加している。図13(a)と(b)を比較すれば、 $\Delta a, \Delta b$ と G の関係のほうが、 $\Delta a, \Delta b$ と σ_i の関係よりも試験片ごとの変動が小さい。 $\Delta a, \Delta b$ を G で整理しても界面き裂発生直後の $\Delta a, \Delta b$ の減少と TP 713 の後半の小さい Δa の値については合理的な説明を与えることはできなかった。

図14はき裂の形状比とエネルギー解放率の関係で

(a) $\sigma = 67$ MPa (loading)

(b) $\sigma = 340$ MPa (loading)

Fig. 17 Distribution of σ_x during loading

ある。TP 713において、 b/a は $\mathcal{G}$ の増加に対して漸減し、 b/a がほぼ0.5になった後に緩やかに増加し、 $b/a=1$ のときに、 b/a は急に増加して、破断した。3本の試験片とも、 b/a が増加した後に不安定破壊した。

5・2 有限要素解析結果 図15に最大公称応力340 MPaを荷重後、0 MPaまで完全除荷した状態の

Fig. 18 Distribution of σ_x at end of unloading

(a) $\sigma=67$ MPa (loading)

(b) $\sigma=340$ MPa (loading)

Fig. 19 Distribution of ϵ_x^p by loading

有限要素解析結果(Cu/セラミックス界面のセラミックス側 $x=25.2 \mu\text{m}$ の σ_x の y 方向分布)を示す。除荷状態において、負荷の圧縮側で100 MPa程度の引張応力が発生する。図15のA,B点の負荷-除荷過程における応力 σ_x と公称応力 σ の関係を図16に示す。除荷に伴い、 x 方向の応力は圧縮応力から引張応力へ変化する。以上の有限要素解析結果から、除荷した後、負荷の圧縮側に引張残留応力が発生することが明らかとなった。これが圧縮側でき裂が発生した原因である。

図17に負荷時の σ_x の二次元分布を示す。セラミックス/中間層界面端では応力集中が生じ、中間層の自由表面の中央部と中立軸近くの間中間層では、応力は低下している。また、中間層の自由表面と中立軸の間で応力が高くなっている。図18に完全除荷したときの σ_x の二次元分布を示す。除荷した後、中間層の自由表面近傍の σ_x は引張応力になる。

図19に負荷時の中間層における x 方向の塑性ひずみの二次元分布を示す。最大荷重時($\sigma=340$ MPa)において中間層は全断面降伏しており、界面の拘束効果で界面に接する領域の塑性ひずみは小さく、中間層内部の塑性ひずみは大きい。図20に完全除荷したときの中間層の x 方向の塑性ひずみの分布を示す。除荷時の中間層の塑性ひずみは最大荷重時の中間層の塑性ひずみから変化せず、そのまま残っている。

図17~20より、負荷時に中間層内部において塑性変形が進行し、除荷時に中間層の塑性ひずみはそのまま残るので、中間層内部の界面に垂直な圧縮塑性ひずみは周囲の材料の拘束を受け、引張残留応力が発生することがわかる。

Fig. 20 Distribution of ϵ_x^p at end of unloading

6. 結 言

セラミックス/金属接合材の最大曲げ荷重漸増繰返し試験を行い、除荷状態で接合材の引張側、圧縮側と側面の界面き裂発生・進展挙動を調べた。さらにSEMによる破面の微視的観察および成分分析を行い、き裂発生位置および伝ば経路を調べた。また、接合材の負荷-除荷過程の弾塑性有限要素解析を行い、繰返し荷重下における応力・ひずみ状態を調べた。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

(1) 荷重繰返しの結果、セラミックスと中間層の接合部に界面き裂が発生し、最大応力の増加に伴い、その界面き裂を起点として不安定破壊に至った。界面き裂は平均強度の84~90%の最大応力で発生した。

(2) 主き裂の発生後、最大応力の増加に伴い、主き裂に近い所から遠方にむかって順次、界面微小き裂の発生と、主き裂との合体を繰返した。最大応力の増加に伴い、主き裂長さは増加しているが、その傾きは初期に小さく、最大応力の増加に伴い増大した。また、最大応力が一定であっても、数回の繰返しによって主き裂と微小き裂の両方が間欠的に進展した。

(3) 圧縮側のき裂は引張側の場合よりも絶対値の大きな最大応力で発生し、約40 μm のき裂長さまで進展し、最後に停留した。

(4) き裂はろう材とセラミックスの界面からわずかにセラミックス側に入った箇所が発生し、セラミックス内へ屈折する。この破壊起点の破面様相は繰返し

荷重下の破壊と静的破壊と同様であった。

(5) き裂長さ増分はエネルギー解放率の増加に対して減少した後に増加しているが、き裂長さ増分とエネルギー解放率の関係のほうが、き裂長さ増分と最大応力の関係よりも試験片ごとの変動が小さい。

(6) 負荷時に中間層内部において塑性変形が進行し、除荷時に中間層の塑性ひずみはそのまま残るので、中間層内部の界面に垂直な圧縮塑性ひずみは周囲の材料の拘束を受け引張残留応力が発生する。これが圧縮側でき裂が発生した原因である。

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により、日本溶接協会セラミック部材接合技術の試験・評価方法の研究委員会(委員長、小林英男東京工業大学教授)が実施した「セラミック部材接合技術の試験・評価方法の開発」の一環として行われた。関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) 岩本信也・須賀唯知, セラミックス接合工学, (1990), 11, 日刊工業新聞社.
- (2) 小林英男, 機論, **60**-577, A (1994), 1913-1919.
- (3) 許張旭・小林英男, 機論, **61** 582, A (1995), 258-264.
- (4) 林偉平・荒居善雄・土田栄一郎, 機論, **63**-611, A (1997), 1361-1369.
- (5) Hutchinson, J. W., Mear, M. E. and Rice, J. R., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **54** (1987), 828-832.
- (6) 荒居善雄・土田栄一郎・内藤政克・小林英男, 機論, **61** 587, A (1995), 1473-1479.
- (7) 許張旭・小林英男, 機論, **62** 604, A (1996), 2675-2680.