ステンレス鋼—Sn-Pb 合金複合材料に おけるファイバーの破断挙動*

中 沢 興 三** 梅 川 莊 吉**

Kōzō Nakazawa and Sōkichi Umekawa : Fracture Behavior of Stainless Steel Fibers in Sn-Pb Alloy Matrix. The fracture behavior of 18-8 stainless steel fibers which were embedded in the Sn-Pb eutectic alloy matrix was studied. The progressive failures of fibers during the tensile test of the composite were detected by an acoustic technique. The following results were obtained.

(1) As the spacing of fibers in composite gets closer, a larger amount of strain of a fiber is localized in a small region which is located near the first fracture site of a neighboring fiber. Thus, the total elongation of the composite is relatively small due to a localized deformation. Contrary to this, for the larger spacing of fibers, deformation of the composite is uniform because fracture in many of the fibers occurs independently. This results in an increase in total elongation. Slip of the matrix arising from the break-down of a fiber develops at a domain which forms an angle of about 45° with the tensile axis.

(2) Only a single notch of a fiber in a 13 vol% fibers specimen has a considerable effect on the tensile strength of the composite, which is weakened remarkably compared with the composite with the same amount of flawless fibers. This effect was presumably caused by the same failure mechanism of fibers as in (1).

(3) The fracture strain of fibers in the matrix increases nearly two times greater than that of the isolated fiber.

(Received December 24, 1971)

I. 緒 言

周知のようにファイバー強化複合材料の引張挙動はファイバーの破断過程と密接な関係をもつ。一般にファイバー強化複合材料においては、ファイバーは高強度および高弾性率をもち、伸びは小さいものが用いられる。このようなファイバーと延性の大きな金属とを組み合わせた複合材料がファイバー方向に引張りを受けると、その変形に伴ってファイバーの逐次的な破断が生ずる。最近用いられるようになってきたファイバーとして、カーボンファイバーおよびボロンフィラメントがある。これらは強度にばらつきがあるため、これらを強化材とした場合には特にファイバーの破断過程から検討する必要がある。

特定の強度分布をもつファイバーで強化した複合材料の引張挙動を、統計的手法を用いて推定したファイバーの破断過程から検討する試みは、いままでいくつか行なわれている^{(1)~(4)}。この場合、破断したファイバーに隣接するファイバーが受ける局所的な応力集中は破断過程に大きな影

響を及ぼす因子である。この応力集中に関しては、理論的な解析⁽⁵⁾⁽⁶⁾も行なわれ、グラスファイバーを樹脂に埋込んだ試料を光弾性を利用して実験的に調べた例⁽¹⁾⁽⁷⁾などがある。しかし光弾性実験による結果はマトリックスの弾性域に限られており、マトリックスの塑性域における応力集中の様子は不明の点が多い。また応力集中に及ぼすファイバー間距離の影響を調べた例は現在までにないようである。

本報では、塑性を有する金属をマトリックスとする複合材料において、ファイバーの破断過程に及ぼすファイバー間距離の影響を調べ、応力集中に関する基礎的資料を得ることを目的とした。ここに用いた素材は、ファイバーとして18-8 ステンレス鋼細線、マトリックスとしてSn-Pb 共晶合金で、著者らの経験⁽⁸⁾からファイバー強化複合材料に関する基礎的資料を比較的容易に得ることのできる組合せである。応力集中すなわち歪の集中は、複合材試料の引張変形中に個々のファイバーの破断を検出し、その破断状況から推定した。ファイバーの破断を知る手段として、応力-歪曲線図における曲線の変化をみる方法があるが正確

** 東京工業大学精密工学研究所 (Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology, Tokyo)

* 1971 年 4 月本会東京大会に発表

- (1) B. W. Rosen : J. Am. Inst. Aer. Astr., **2**(1964), 1985.
- (2) C. Zweben : J. Am. Inst. Aer. Astr., **6**(1968), 2325.
- (3) C. Zweben and B. W. Rosen : J. Mech. Phys. Solids, **18**(1970), 189.

(4) C. I. Moore : *Metal-Matrix Composites*, Symp. Met. Soc. AIME, May (1969), p. 77.

(5) J. M. Hedgepeth : NASA, TN, D-882, Langley Research Center, (1961).

(6) J. M. Hedgepeth and P. Van Dyke : J. Comp. Mater., **1**(1967), 294.

(7) I. M. Daniel : J. Comp. Mater., **4**(1970), 178.

(8) 梅川, 中沢 : 金属学会誌, **34**(1970), 222.

でない。ここではファイバーの破断を音響的に検出⁽⁹⁾するとともにオシロスコープによりその波形を観測した。歪集中の影響を明確に知る目的で、故意に切欠を施したファイバーを1本含む試料および含まないものを選んだ。ファイバー間距離の異なる2種類の複合材のモデル試験片ならびにファイバーを13%含む複合材試料の引張試験を行ないファイバーの破断過程から検討考察を加えた。

II. 実験方法

試料の寸法形状を Fig.1 に示す。試料は、軟鋼製鋳型中にファイバーをならべてそこに溶融したマトリックス材料を鋳込む方法により作製した。ファイバーとしては直径が 161μ の 18-8 ステンレス鋼線を線引のままで用いた。マトリックスとファイバーの接着を完全にするために、ファイバー表面はあらかじめ Sn-Pb 合金で被覆した。試料は、ファイバーを7本含むファイバー間距離がファイバーの直径と同じものおよび3倍のもの、ならびに約 70~80 本含むもの(約 13 vol%)を選んだ。Photo.1 に各試料中のファイバーの配列状態を示す。試料断面の中央部に位置する1本のファイバーに1箇所のみ、あらかじめナイフエッジで切欠を施し、それを欠陥を有するファイバーとした。また同種の切欠を施さない試料も用意した。試料本数は各種類につき2本以上とした。引張試験は、インストロン型引張試験機により常温で一定クロスヘッドスピード(1 mm/min)にて行なった。

つぎにファイバーの破断を検出する装置を Fig.2 に模式的に示す。ここで、検出器はレコードプレイヤー用カー

Fig.1 Tensile testpiece

Photo.1 Cross sections of specimens; (a) and (b) : composite containing 7 fibers, (c) 13 vol% fibers

Fig.2 Schematic diagram of acoustic system

トリッジを改造したものである。ファイバーが破断する際に発生する応力波は、グリップ近傍に取付けた検出器により電気的信号として検出し、その信号をプリアンプで増幅しテープレコーダーに録音した。引張試験後、録音した信号を再生してその波形をシンクロスコープを用いて写真撮影し、試料に荷重を負荷してから個々のファイバーの破断がおこるまでの時間を測定した。なお引張試験中はモニタースピーカーによりファイバーの破断によるクリック音を聴取した。

III. 実験結果および考察

Photo.2 は、7本のファイバーを含む試料を引張り、ファイバーの数回の破断を検出後、ただちに荷重を除いて試料を取り出し、ファイバー破断の様子を観察したものである。(a)および(b)は欠陥ファイバーを含むもので、写真の中央の破断点が欠陥部分である。まず欠陥部が破断し、ついで隣接ファイバーは局部的な歪の集中を受けてネッキングを生じ、あるいは破断していることが認められる。(c)および(d)は欠陥ファイバーを含まないもので、(a)および(b)と同様に、最初のファイバーの破断に続いて隣接ファイバーが破断していることが認められる。破断点近傍の隣接ファイバーが受ける局部的な歪の集中は、破断点を通りファイバーの長さ方向すなわち引張軸方向とおおよそ 45° の角度をなす部分で特に大きい。これは、ファイバーによるマトリックスの塑性変形の拘束がファイバーの破断点で解放され、最大分解剪断応力の働く方向に塑性すべりが生じたためと考えられる。

Photo.3 はファイバーの破断を Fig.2 に示す装置で観察した一例(Fig.4(a)に相当)である。各々のパルス波形は個々のファイバーの破断に対応している。またこれらパルスはモニタースピーカーによってクリック音として聴取することができる。

Fig.3 および Fig.4 は、7本のファイバーを含む試料を引張試験した結果で、荷重-時間曲線図とファイバーの破断に対応するパルスとの関係をあわせて示したものである。すべての図について、荷重-時間曲線の変化とファイバーの破断過程とは良く対応している。Fig.3 は欠陥ファ

(9) W.W.Gerberich : J.Mater.Science, 5(1970), 283.

Photo.2 Fracture modes of fibers in composite specimens. (a) and (b) : containing a fiber with a notch (located near the center), (c) and (d) : flawless fibers

Photo.3 Typical stress pulses

イバーを含む場合である。ファイバーの欠陥部での破断から、続いておこる隣接ファイバーの破断までに要する時間およびすべてのファイバーが破断するまでに要する時間は、ファイバー間距離が小さいもの(a)の方が大きいもの(b)と比較して短い。すなわち、ファイバーの破断によって隣接ファイバーが受ける局所的な歪の集中は、ファイバー間距離が小さいほど大きいことが認められる。Fig.4は欠陥ファイバーを含まない場合である。ファイバー間距離が小さいもの(a)は、破断回数が試料に含まれるファイバーの本数と同じである。ファイバー間距離が大きいもの(b)ではその本数よりも多い。また前者よりも後者はより長い時間にわたって破断が認められる。これは後者では前者と比較して局所的な歪の集中が小さいために、ランダムな位置での破断を生じ易いためである。

Fig.3 Load-time curves and stress pulses of composite specimens containing a notched fiber;
d : diameter of fiber

欠陥ファイバーおよび欠陥のないファイバーの破断伸びは、ファイバーを単独で複合材試料と同一条件にて引張試験した場合にはそれぞれ1.2%および3.5%であった。一方、Fig.3およびFig.4に示されるように、これらファイバーをマトリックスに埋め込むことによって、破断伸びはそれぞれ2%および5%となり、2倍に近い増加が認められた。これは、複合材試料においては、ファイバーの欠陥

部分あるいは最初にネッキングを生じる部分での変形がマトリックスの存在によって拘束され⁽¹⁰⁾、ファイバー単独の引張りの場合と比較してファイバー全体が均一な伸びを示したためと考えられる。

つぎに、ファイバーを約 13% 含む複合材試料の引張強さに及ぼす 1 本の欠陥ファイバーの影響について調べた結果を Table 1 に示す。これらの試料については、はじめに数回の破断が生じ、続いてほとんど同時に連鎖的に全ファイバーは破断することが認められた。欠陥ファイバーを含む場合の引張強さの実験値は、一般的な複合則から求めた計算値より約 8% ほど小さい。ここで、欠陥ファイバーの強度は欠陥のないファイバーの強度と同一とみなして計算したが、欠陥ファイバーの強度を無視しても計算値の減少は約 1% である。欠陥ファイバーを含まない場合の実験値は、若干小さいが計算値とほぼ一致している。このように、欠陥ファイバーが 1 本存在することによる引張強さ

の減少は顕著である。両者の間の実験値の差異は前に述べた局所的な歪の集中の効果に起因するもので、つぎに述べる考察によって説明することができる。ファイバー間距離は Photo.1(c) に示されるように小さく、ファイバー破断部に隣接するファイバーが受ける局所的な歪は大きいであろう。欠陥ファイバーを含まない試料の場合、最初のファイバーが破断する時点で、残りの破断していないすべてのファイバーの応力はすでに最大強度に近い値に達している。続いて歪の集中が大きいためにファイバーの連鎖的な破断が生じても、ファイバーは有効に複合材料の強度に寄与するであろう。これに対して欠陥ファイバーを含む場合は、欠陥ファイバーが破断する時点で、残りのファイバーの応力はいまだ最大強度付近のレベルに達していない。続いて連鎖的な破断が生じると、個々のファイバーはその最大強度に達して破断するが、個々のファイバーの破断はつぎつぎにおこるので、一つのファイバーの破断はこれに隣接するファイバーの破断に対し時間的に遅れを伴う。このために、ファイバーは全体として効果的に複合材料の強度に寄与できなかったものと考えられる。

以上、ファイバー破断部に隣接するファイバーが受ける局所的な歪の集中について、静的あるいは動的な歪の集中を区別せずに述べた。つぎに本実験で得られた結果についてさらに若干の考察を加える。静的な歪の集中はファイバーが破断して後の静的な応力状態におけるものを意味し、動的な歪の集中は、ファイバーが破断する瞬間に発生する動的な応力場の乱れに起因し、時間的な因子を含むものを意味すると考えられる。これらに関して、Hedgepeth ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾は定量的な計算を行ない、応力集中すなわち歪の集中はいずれの場合においても大きいことを示している。ファイバーの破断過程においてどちらが支配的であるかは材料の種類、引張条件などによって異なると考えられる。Fig.3 において、欠陥ファイバーの破断からつぎのファイバーが破断するまでの過程では、時間的な遅れは 10~14 sec と大きいことから主として静的な歪の集中によるものである。これに続く破断過程では、個々の破断の時間的な遅れは小

Fig.4 Load-time curves and stress pulses of composite specimens with flawless fibers; d : diameter of fiber

Table 1 Effect of uniformity of fibers on tensile strength of 18-8 stainless steel Sn-Pb alloy composites

Vol% fibers	Tensile strength σ_c (kg/mm ²)	σ_c^* (kg/mm ²)	Deviation from rule of mixtures (%)	Uniformity of fibers
12.6	29.4	29.9	-1.6	Composite with flawless fibers
13.0	29.8	30.6	-2.8	
13.6	29.3	31.8	-7.9	Composite containing a fiber with a notch
13.2	28.6	31.0	-7.8	

σ_c^* : Tensile strength calculated from the rule of mixtures

$\sigma_c^* = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$, ($\sigma_f = 197$ kg/mm², $\sigma_m = 5.8$ kg/mm²)

(10) H.R. Piehler : Trans. Met. Soc. AIME, **233** (1965), 12.

さい。Fig.4においても個々の破断の時間的な遅れは小さい。また、ファイバーを13%含む試料において、初期の破断を除く連鎖的な破断が生ずる過程では時間的な遅れは著しく小さい。このような時間的な遅れの小さい破断過程では、どの程度の時間的な遅れが動的と静的との境界になるかは不明であるため、静的あるいは動的な歪の集中のいずれによるものか判別し難い。おそらく両者がともに大きな役割を果たしたものと思われる。

以上の結果は、塑性域でほとんど加工硬化しないSn-Pb合金と延性を有するステンレス鋼ファイバーを組み合わせた複合材料について得られたものである。マトリックスが塑性域で加工硬化する場合、あるいはファイバーが脆い場合においても、ファイバーとマトリックスとの界面の接着が完全であれば、本実験の結果にほぼ類似した結果が得られるものと考えられる。つぎに本実験の結果を基としてファイバー強化複合材料の伸びについて考察する。一般に、ファイバー強化複合材料のファイバー方向の伸びは、ファイバーの容積比が増加するにしたがって減少する傾向にある^{(8)(11)~(13)}。ファイバーの直径が一定でファイバーの容積比が増加すれば、ファイバー相互の距離は必然的に小さくなる。ファイバー間距離が大きい場合は、小さい場合に比較してファイバー破断部に隣接するファイバーの受ける局所的な歪が小さいために、ファイバーの破断する場所は統計的に平均化する傾向がある。この結果、複合材全体が均一に変形し、伸びが増大すると考えられる。一方、フ

ィバー間距離の小さい複合材料においては、局所的な歪の集中による影響が大きいため、ファイバーの破断過程の初期における破断部を核として連鎖的な破断を生じ、これが全体の破壊を導く傾向がある。この結果、複合材料の伸びは減少すると考えられる。

IV. 総 括

ステンレス鋼ファイバーとSn-Pb共晶合金の組合せによる複合材料の引張試験における個々のファイバーの破断を音響的に検出することによりファイバーの破断過程を調べた。その結果はつぎのようである。

(1) ファイバー間距離が小さいほど、ファイバー破断部に隣接するファイバーが受ける局所的な歪は大きい。その局所的な歪はファイバー破断部を通り引張軸と約45°の角度をなす部分で大きい。

(2) ファイバーを13 vol%含む複合材料において、1本の切欠を施したファイバーを含む場合およびそれを含まない場合の引張強さの値に顕著な差異が認められた。これは(1)におけるファイバーの破断機構の観察結果と一致する。

(3) 複合材料中でのファイバーの破断伸びは、ファイバー単独の引張りで得られた伸びの2倍近い値を示した。

(4) 一般に認められているように、複合材料におけるファイバー間距離の大小は、複合材料の変形および破断挙動に影響する。すなわち、ファイバー間距離の大きいものは比較の変形が全体に平均的に生じ、全体として大きな伸びを示すのに対し、その小さいものは変形およびファイバーの連続的破断が複合材料の小さい領域に発生するため、全体としての伸びは小さい。

(11) D. L. McDanel, R. W. Jech and J. W. Weeton : Trans. Met. Soc. AIME, **233** (1965), 636.

(12) I. Ahmad and J. M. Barranco : Met. Trans., **1** (1970), 989.

(13) R. M. Vennett, S. M. Wolf and A. P. Levitt : Met. Trans., **1** (1970), 1569.