

ISSN 0389-4010

UDC 519.25,539.4

539.422.24,

620.168,

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1319

炭素繊維／熱可塑性樹脂複合材料円孔切欠き
試験片の疲労強度

濱 口 泰 正

1997年 2 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

第1章 はじめに	1
第2章 供試材，試験片および試験方法	2
2-1 供試材	2
2-2 試験片	2
2-2-1 形状および寸法	2
2-2-2 板厚と繊維含有率の関係	2
2-3 試験方法	3
2-3-1 試験条件および試験機	3
2-3-2 座屈防止金具	3
2-3-3 応力(強度)の算出法	4
第3章 試験結果および考察	4
3-1 静的強度試験	4
3-2 疲労強度試験	4
3-2-1 疲労試験データ	4
3-2-2 S-N関係	9
a) 公称応力評価	9
b) 実測応力評価	13
3-2-3 寿命分布	13
a) 対数正規分布およびワイブル分布への適合性	13
b) ばらつき	15
3-2-4 疲労損傷過程	15
3-3 残存強度試験	17
3-4 破面観察	19
第4章 むすび	20
第5章 参考文献	20

炭素繊維／熱可塑性樹脂複合材料円孔切欠き 試験片の疲労強度*

濱 口 泰 正*¹

Fatigue Properties of Circular-Hole-Notched Specimens of a AS-4/PEEK Thermo-Plastic Composite Material

Yasumasa Hamaguchi

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the fatigue properties of thermo-plastic composite specimens. Tested specimens were centrally circular-hole-notched and made of a carbon/thermo-plastic composite (AS-4/PEEK, APC-2) material. The mechanical properties investigated were static tensile and compressive strengths, S-N relationships for stress ratios $R=0$ and $R=-1$, fatigue life distributions, fatigue damage growth, and residual static strength after fatigue tests. Especially, fatigue life data of the long life range by the 10^7 cycles were collected in the fatigue life test. The results were analyzed and discussed.

Key Words: Static strength, Fatigue properties, Residual strength, AS-4/PEEK, Thermo-plastic composite material

概 要

この研究の目的は、熱可塑性樹脂複合材料の疲労特性を評価する事である。そこで、炭素繊維／熱可塑性樹脂複合材料(AS-4/PEEK, APC-2)を供試材とし、総数146本の円孔切欠き試験片を用い、静的引張・圧縮強度、応力比 $R=0$ および $R=-1$ におけるS-N関係、寿命分布、疲労損傷の進行、残存強度などを調べる試験を実施した。特に疲労寿命試験については、 $N=10^7$ サイクルまでの長い寿命域の疲労寿命データの取得を目的とした。本報では、得られたデータについて、解析ならびに評価を行った結果を報告する。

第1章 はじめに

炭素繊維／熱可塑性樹脂複合材料は、耐衝撃性が優れており、高い靱性を持つことから、良好な疲労特性を持つと評価した研究報告^{1,2,3,4,5,6)}がいくつか見られる。また、熱融着性、再成形性などの利点があり、航空宇宙構造用材料として期待されている。

繊維強化複合材料は、繊維、樹脂、成形方法などの多様な因子を含んだ状況において製作される。そのために強度特性のばらつきは大きく成っている。したがって、

強度特性に関する統計的な解析・評価が重要となる。しかしながら、複合材料について統計的疲労試験を実施するには、多数の試験片と長い試験時間を必要とし、かつ、高い精度と安定性のある試験装置が要求される。それゆえ、収集されている疲労試験データは少なく、疲労寿命領域についてもほとんどが $N=10^6$ サイクル未満の結果である。

著者らは、航空宇宙構造用複合材料について、基礎的強度特性ならびに疲労特性のデータ収集を進めている。この一環として、今回は、炭素繊維／熱可塑性樹脂複合材料を供試材とし、総数146本の円孔切欠き試験片を用い、静的引張・圧縮強度、応力比 $R=0$ および $R=-1$ におけるS-N関係、寿命分布、疲労損傷の進行、残存強度な

* 平成8年10月11日受付(received 11 October 1996)

* 1 機体部 (Airframe Division)

どを調べる試験を実施した。

特に疲労寿命試験については、長寿命で多数本試験結果の報告例が見られない事から、多数本で長い寿命領域の疲労寿命評価を目的とし、同一応力レベルにおける試験片数を20本とした多数本試験データ、および、 $N=10^7$ サイクルまでの長い寿命域での疲労寿命データを取得した。

本報では、得られたデータ、これらの解析結果、ならびに評価結果を報告する。

第2章 供試材、試験片および試験方法

2-1 供試材

使用した供試材は、炭素繊維AS-4と結晶質熱可塑性樹脂ポリエーテル・エーテル・ケトン(PEEK)のUDプリプレグ(ICI社製, APC-2, $t=0.125\text{mm}$, $\rho=1.6$, 公称 $V_f=61\%$)を $[45/0/-45/90]_{2S}$ の積層構成で、ホットプレス成形により製作した準等方性16Ply積層板である。供試材は二つの時期に分かれて製作しており、それぞれをS-IとS-IIで区別して表す。表1に、これらの製作仕様を示す。

2-2 試験片

2-2-1 形状および寸法

ファスナー穴を想定した円孔を持つ短冊形の中央円孔切欠き試験片で、形状・寸法を図1に示す。円孔部は、精密フライス盤でHI-ROKドリルを用い、高速回転(4,000rpm)で、加工による損傷が生じないように加工した。

また、超音波Cスキャンによる探傷検査(超音波探傷器M-500A, 映像処理装置M-500IP: キヤノン社製)を行

表1 供試材および試験片の製作仕様

分類	S-I	S-II
積層構成	$[45/0/-45/90]_{2S}$	同左
公称板厚 (mm)	2.00	同左
ホットプレス温度 (°C)	380~390	380~392
ホットプレス圧力 (kg/cm^2)	16.6	20~33
ホットプレス保持時間 (分)	11~24	10~15
冷却速度 (°C/分)	---	1.5~2.0
パネル製造枚数	4	5
V_f (% , 実測値)	56.4~59.0	60.0~62.7
製造年月	1988年3月	1989年3月
試験片製造枚数	60 (B群=26)	86
試験評定部板厚 (mm)	1.845~1.979	1.942~2.101
備考	S-I, B群の試験片加工は89年3月 S-IIは超音波探傷検査を実施	

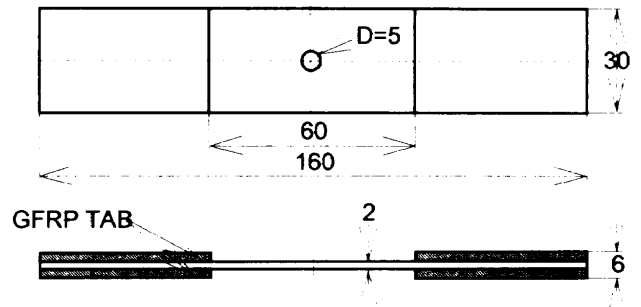


図1 試験片の形状・寸法

い、一部の試験片は軟X線探傷検査(SOFTEX SV-100 AW: ソフテックス社製)を行い、供試材を成形した時の損傷、試験片を加工した時の損傷などの無い事を確認した。探傷検査結果の例を写真1に示す。成形が完全でない判断される箇所もわずかに存在するが、円孔部近傍には損傷が見られなかった。

2-2-2 板厚と繊維含有率の関係

複合材料の板厚は、金属材料のように均一に制作することは難しく、ばらついている。そこで、本試験片板厚の変化の様子を、試験片を製作したパネルごとに区別して、図2の折れ線グラフで表した。試験片の板厚は、ほぼ1.8~2.1mmの範囲にあり、ばらつきが大きい。板厚分布は、パネル毎に異なり、一様でない。また、S-I試験片群ではパネルの中央部の板厚が厚く、S-II群ではパネルの中央部の板厚が薄い傾向を示し、試験片群すなわちバッチによる板厚の相違も見られる。

さて、複合材料の強度特性は、繊維含有率に大きく依存する。ここで、各試験片の単位断面積当たりの繊維含有量は同量であり、試験片板厚のばらつきは樹脂の含有量が異なっていることに原因すると想定する。つまり、板厚が薄いのは、樹脂含有量が少なくて繊維含有率が大きく。逆に板厚が厚いのは、樹脂含有量が多くて繊維含有率は小さくなると想定する。したがって、板厚と繊維含有率は反比例し、薄い板厚の強度特性が比較的高い値を示すと考えられる。この想定では、強度評価において、板厚に対する補正が必要となる。

そこで、繊維含有率測定用供試片について、その板厚と密度法で導いた繊維含有率(V_f)の関係を図3の散布図に示す。繊維含有率測定用供試片の数は各試験片群それぞれのパネルで3個である。図中の凡例には、試験片群、パネル番号、導かれた相関係数の値を示す。

この図から板厚と V_f の関係をみると、白抜き記号で表わすS-I試験片群では、公称板厚より薄い場合は相関が見られる。黒または灰色記号で表すS-II試験片群では、

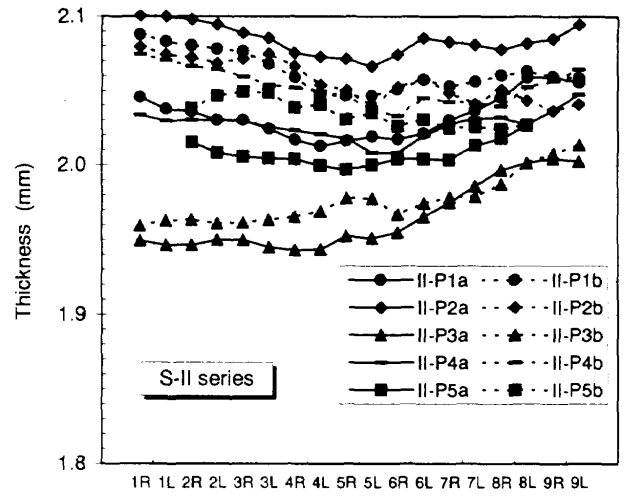
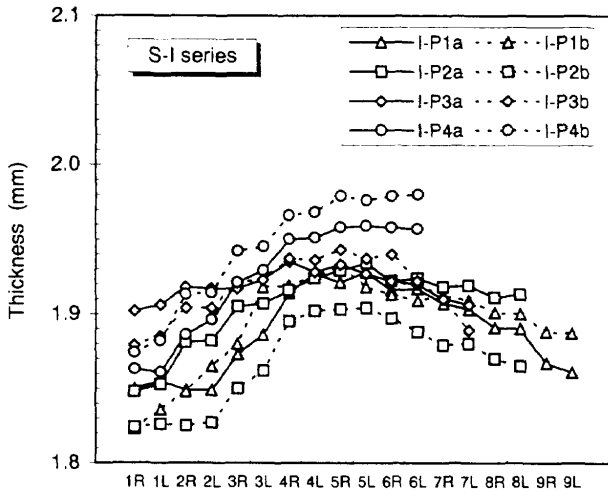


図2 試験片板厚のばらつき(試験片を切り出したパネル毎に別, 2列/パネル, 6~9枚/列)

公称板厚より厚い場合は相関が見られないと判断できる。したがって、総体的には板厚と V_f に相関関係は見られないと判断でき、強度評価における板厚補正を簡潔かつ合理的に行う事は、本供試体では出来ないと考えられる。

2-3 試験方法

2-3-1 試験条件および試験機

本試験片のS-Nデータは大きくばらつくと予測される。そこで、S-N関係をS-I試験片群で導き、繰返し応力のばらつきを制御した寿命分布をS-II試験片群で収集することを基本試験項目とした。それぞれに対応する試験条件および試験機などの試験方法を表2に示す。また、使用した試験機を写真2に示す

なお、静的引張・圧縮試験も同じ試験機で行った。

2-3-2 座屈防止金具

静的圧縮試験および最大最小応力比 $R=-1$ の疲労試験では、試験片の座屈が考えられる。そこで、この試験に適用できる座屈防止金具を考案・製作して試験を行った。写真3は試験片に取り付けた座屈防止金具を示す

この座屈防止金具は、テフロンテープを貼った2枚の平板、締結用ボルト・ナット、および板厚調整用ネジで構成され、試験片を挟みこむ仕組である。上記した様に、試験片の板厚は一樣ではない。そこで、次の様な手順により、異なる板厚の試験片に対応した。

- ① 各試験片の表面と裏面に0.05mm程度の薄い紙をサンドイッチした状態で座屈防止金具の平板をボルト締めする。
- ② 平板間の間隔を試験片板厚に薄い紙の厚さを加えた寸法になる様に板厚調整用ネジで調整する。
- ③ 締結用ボルト・ナットを緩めて、挟みこんだ薄い紙を取り外して、再度、締結用ボルト・ナットを締める。

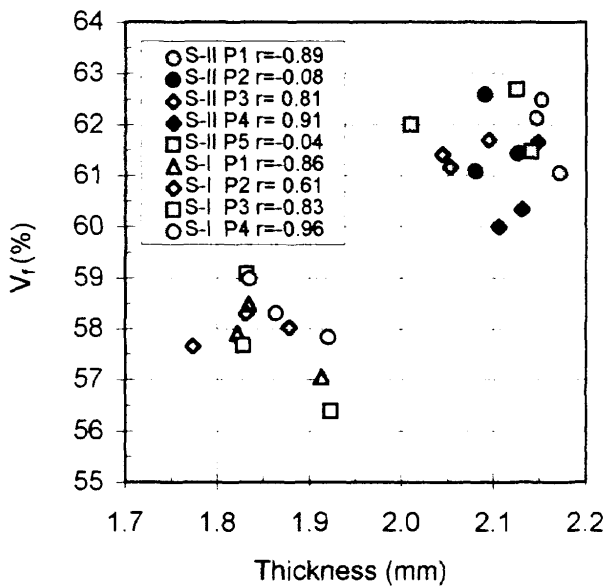


図3 繊維含有率と板厚の関係

表2 試験機および試験条件

分類	S-I	S-II
基本試験項目	R=0, R=-1のS-N関係	寿命分布
使用試験機	サギビヤ FT-5型電気油圧サーボ	INSTRON 8500型デジタル油圧サーボ
制御方法	荷重、(一定)	荷重、(一定)
繰返し波形	正弦波	正弦波
繰返し速度 (Hz)	1, 5, 10	5 (8,10)
実験室温度 (°C)	22~24	20~25
実験室湿度 (RH%)	50±5	50±5
グリップ	ボルト締付け(手動)	油圧グリップ
試験期間	1988/10~1993/12	1992/9~1993/12

したがって、試験片と座屈防止金具の間隔はどの試験片でもほぼ一定となり、座屈防止金具による各試験片への拘束条件は同一である。また、テフロンテープを貼りつけることで、試験片との接触による摩擦抵抗を極小小さくした。

2-3-3 応力(強度)の算出法

静的強度、および疲労試験における繰返し応力は次の関係式より導く。

$$S_x = \frac{L}{t_x(W-D)}$$

L : 繰返し荷重, 破壊荷重

W : 板幅

D : 円孔径

t : 板厚 t_m : 実測板厚(1.845~2.101mm)
 t_n : 公称板厚(2.00mm)

また、すでに述べたように試験片板厚は、公称板厚の92~105%の範囲にばらついている。したがって、試験片の公称板厚に基づいて計算した応力や強度値には公称の呼び名を付け、実測板厚に基づいて計算した応力や強度値には実測の呼び名を付けて評価する。

第3章 試験結果および考察

3-1 静的強度試験

静的引張試験は、S-I群で5本、S-II群で2本の試験片で行い、静的圧縮試験はS-I群で4本、S-II群で2本の試験片で実施した。それぞれの、試験片番号、板厚、板幅、円孔径、公称強度、実測強度、破壊荷重ならびに

各試験片群の強度平均値を表3に示す。

図4は引張試験の公称応力-伸び関係を示す。横軸で表した伸びは、試験片側面に取り付けた動的変位計(Instron Dynamic Extensometer Cat.No;2620, 標点間距離25mm)による計測値である。図5は圧縮試験の公称応力-変位関係を示す。横軸は試験機アクチュエータ変位量の計測値である。また、図6および図7は、引張および圧縮試験それぞれについて、縦軸を実測応力とした実測応力-変位関係を示す。

これらの表と図に示すように、実測応力評価では、公称応力評価に比較して、ばらつきが小さくなる。しかしながらいずれの評価でも、静的破壊強度や弾性率のばらつきは大きいと判断できる。ばらつきの原因としては、供試材製作時期の違いによる V_f や板厚の相違、および、供試材(パネル)の反りとして現れる残留応力の影響などが考えられる。

3-2 疲労強度試験

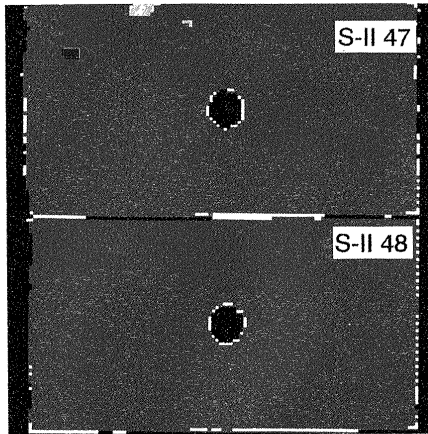
3-2-1 疲労試験データ

最大最小応力比 $R=0$ および $R=-1$ におけるS-Nデータの収集を目的としたS-I試験片群の疲労試験結果を表4に示す。この表には、疲労試験の最大最小応力比、公称最大応力、実測最大応力、繰返し数、対数繰返し数、繰返し速度、試験片番号、最大荷重、試験片板厚、板幅、円孔径、試験日を示した。順序は公称最大応力の昇順とし、静的試験結果も合わせて示した。

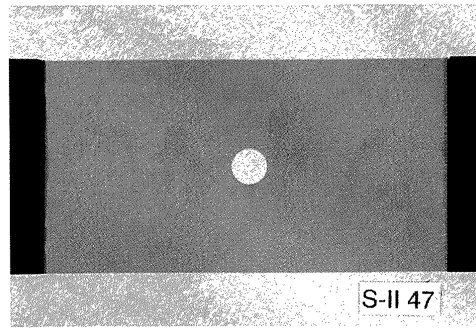
同様に、寿命分布の調査を目的としたS-II試験片群の疲労試験結果を表5と表6に示す。ここで、表5は $R=0$ の場合で、表6は $R=-1$ の場合である。

表3 静的引張・圧縮強度試験結果

荷重	試験片番号	板厚(mm)	板幅(mm)	円孔径(mm)	公称強度 Sn (MPa)	実測強度 Sm (MPa)	破壊荷重 (kN)	試験片群別強度平均値
引張	S-I 1	1.845	30.18	5.0	348	378	17.54	387MPa(公称) 411MPa(実測)
	S-I 55	1.865	30.00	5.013	374	401	18.67	
	S-I 30	1.887	30.20	5.0	401	425	20.21	
	S-I 16	1.906	30.20	5.0	398	418	20.06	
	S-I 7	1.909	30.22	5.0	414	434	20.87	
	S-II 77	2.004	30.08	5.008	483	482	24.20	452MPa(公称)
	S-II 7	2.033	30.05	5.027	420	414	21.04	448MPa(実測)
圧縮	S-I 10	1.836	30.16	5.0	-326	-355	-16.39	-349MPa(公称) -368MPa(実測)
	S-I 56	1.902	30.03	5.018	-365	-384	-18.25	
	S-I 48	1.909	29.89	5.006	-349	-366	-17.37	
	S-I 40	1.925	29.90	5.023	-355	-369	-17.66	-392MPa(公称) -388MPa(実測)
	S-II 46	1.961	29.75	5.033	-380	-388	-18.80	
	S-II 26	2.080	30.19	5.0	-403	-387	-20.29	

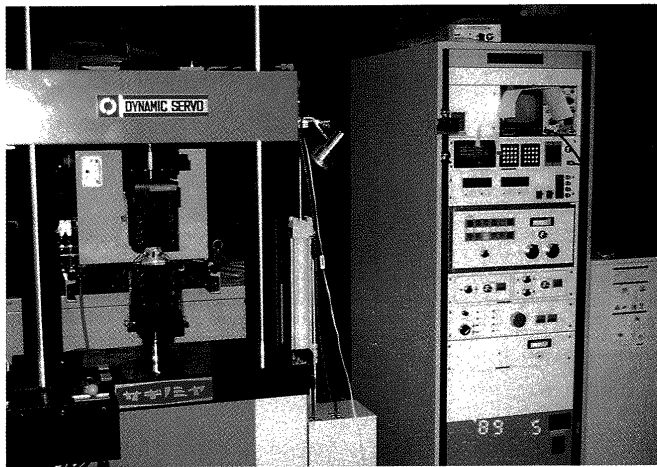


超音波探傷検査

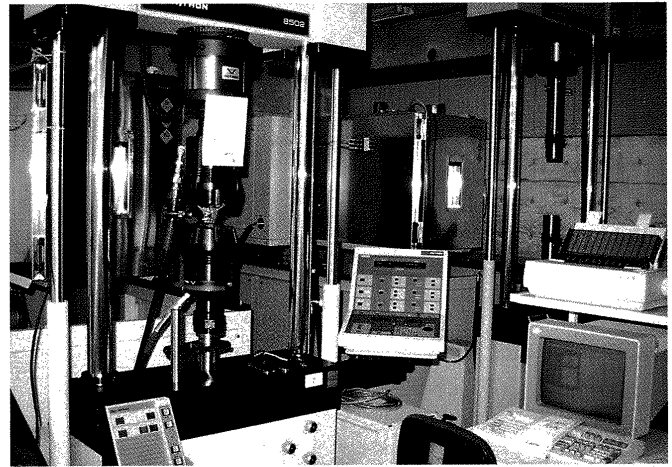


軟X線探傷検査

写真1 試験片の探傷検査結果の一例

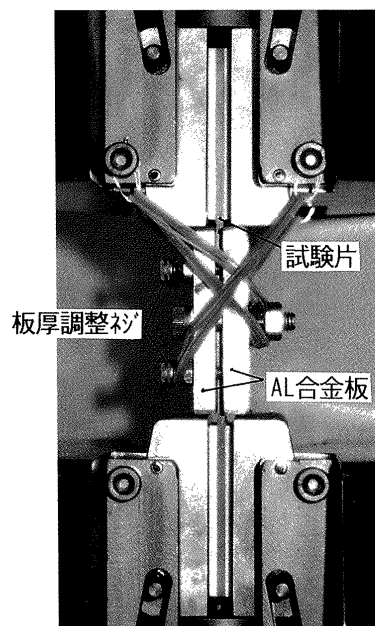
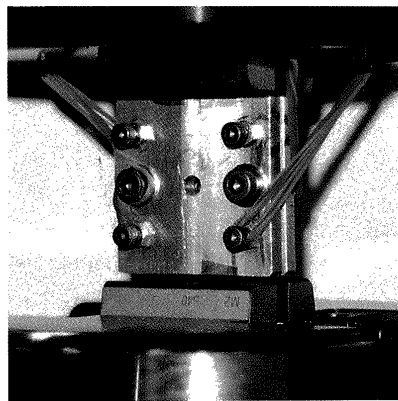


サギノミヤ電気油圧サーボFT-5型



INSTRONデジタル油圧サーボ8500型

写真2 使用した試験機



側面

写真3 座屈防止金具

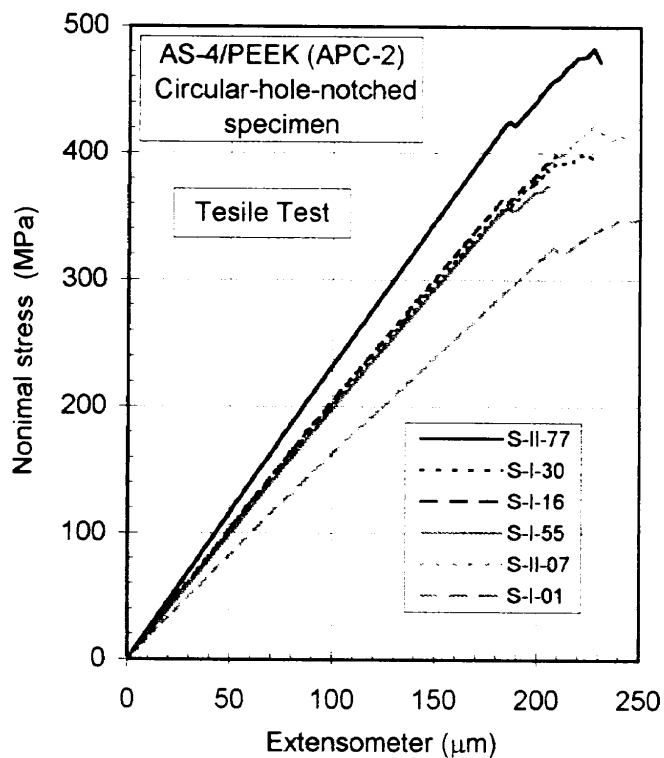


図4 静的引張試験の公称応力－伸び関係

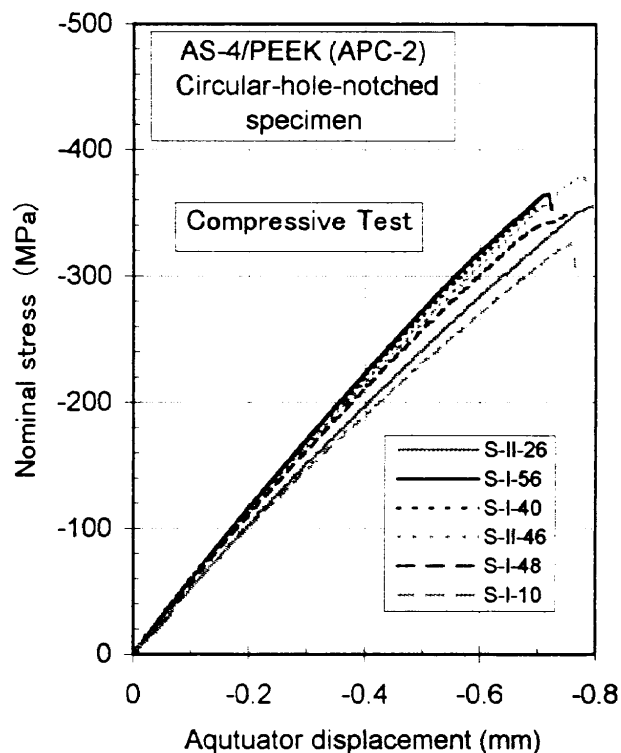


図5 静的圧縮試験の公称応力－変位関係

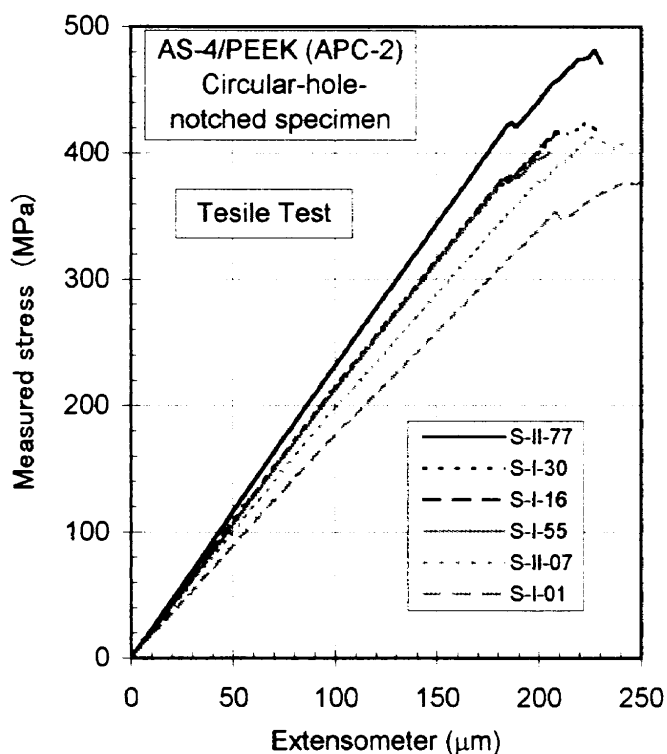


図6 静的引張試験の実測応力－伸び関係

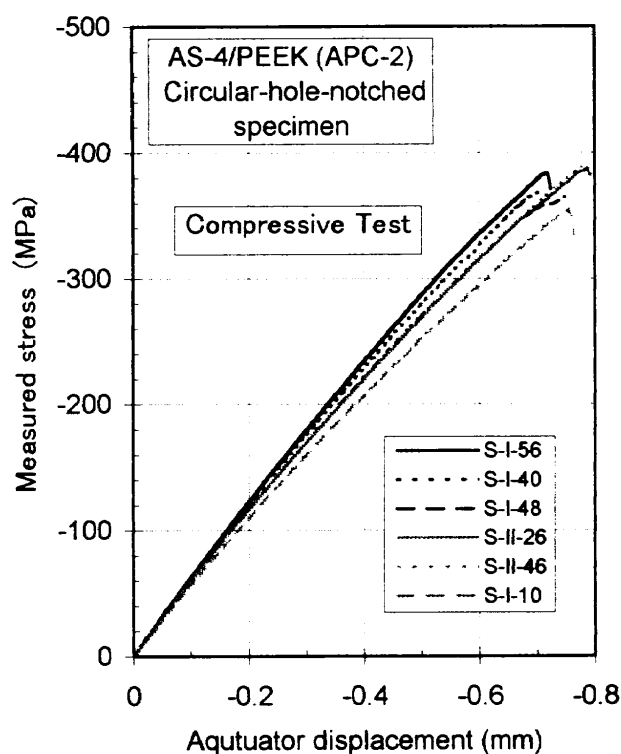


図7 静的圧縮試験の実測応力－変位関係

表4 S-I群試験片の疲労試験結果

応力比 R	公称最大 応力 S _n (MPa)	実測最大 応力 S _m (MPa)	繰返し数 N	log N	繰返し 速度 f (Hz)	試験 片番 号	最大 荷重 (kgf)	板厚 (mm)	板幅 (mm)	円孔径 (mm)	試験日 (開始)
0	248.4	260.2	12,154,700 nf	7.0847	10	4	1,277	1.909	30.21	5	88/11/1
0	268.9	279.5	10,000,000 nf	7.0000	10	5	1,383	1.924	30.22	5	88/11/16
0	269.0	294.0	3,193,000	6.5042	10	27	1,383	1.830	30.21	5	89/6/12
0	269.2	292.3	10,000,000 nf	7.0000	10	19	1,383	1.842	30.19	5	89/4/3
0	269.3	281.0	10,000,000 nf	7.0000	10	13	1,383	1.917	30.18	5	89/2/15
0	282.2	300.0	18,662	4.2710	10	50	1,437	1.881	29.99	5.018	90/9/19
0	282.6	292.4	10,000,000 nf	7.0000	10	45	1,437	1.933	29.94	5.003	90/7/18
0	282.7	285.7	10,000,000 nf	7.0000	10	60	1,437	1.979	29.94	5.013	90/8/6
0	283.4	296.0	325,210	5.5122	10	36	1,437	1.915	29.90	5.036	90/7/6
0	289.8	309.3	56,500	4.7520	10	9	1,490	1.874	30.21	5	88/12/15
0	289.9	313.8	7,600	3.8808	10	2	1,490	1.848	30.20	5	88/11/29
0	290.0	302.6	254,200	5.4052	5	6	1,490	1.917	30.19	5	88/10/31
0	293.0	296.6	10,000,000 nf	7.0000	5,10	59	1,490	1.976	29.96	5.026	90/9/5
0	313.5	324.2	121,264	5.0837	10	47	1,597	1.934	29.99	5.01	90/9/29
0	313.5	326.9	20,907	4.3203	10	37	1,597	1.918	29.98	5.002	90/9/28
0	314.0	319.9	1,389,651	6.1429	10	58	1,597	1.963	29.95	5.011	90/9/25
0	314.4	335.8	5,186	3.7148	10	42	1,597	1.873	29.90	4.997	90/9/29
0	334.1	349.2	37,513	4.5742	10	41	1,704	1.913	30.02	5.008	90/9/30
0	334.1	344.8	16,565	4.2192	5	46	1,704	1.938	30.01	5.002	92/11/12
0	334.5	341.7	5,528	3.7426	5	53	1,704	1.958	29.98	5.007	92/11/12
0	335.4	353.1	5,128	3.7099	10	43	1,704	1.900	29.91	5.001	90/10/1
0	359.8	379.1	1,493	3.1741	1	21	1,850	1.898	30.21	5	92/11/19
0	359.8	385.8	720	2.8573	5	3	1,850	1.865	30.21	5	88/10/17
S.T.	348.4	377.6	1	0	--	1	1,789	1.845	30.18	5	93/9/17
S.T.	373.9	400.9	1	0	--	55	1,905	1.865	30.00	5.013	93/12/15
S.T.	397.3	416.9	1	0	--	16	2,046	1.906	30.20	5	90/7/12
S.T.	401.0	425.0	1	0	--	30	2,061	1.887	30.20	5	93/9/17
S.T.	413.7	433.5	1	0	--	7	2,128	1.909	30.22	5	88/10/24
-1	107.0	111.3	10,325,300 nf	7.0139	10	14	550	1.922	30.21	5	88/12/23
-1	136.1	143.9	12,951,100 nf	7.1123	10	18	700	1.892	30.21	5	89/1/4
-1	155.6	164.0	10,000,000 nf	7.0000	10	17	800	1.897	30.21	4.997	89/1/21
-1	175.0	185.0	10,139,200 nf	7.0060	10	18b	900	1.892	30.21	5	89/7/3
-1	175.0	184.5	10,000,000 nf	7.0000	10	17b	900	1.897	30.21	4.997	89/7/15
-1	184.6	195.6	4,753,200	6.6770	10	33	950	1.888	30.23	5	89/5/9
-1	184.8	192.5	10,000,000 nf	7.0000	10	25	950	1.920	30.21	5.002	89/5/26
-1	184.8	192.2	7,504,800	6.8753	10	24	950	1.924	30.20	5	89/5/1
-1	184.8	194.1	2,949,800	6.4698	10	31	950	1.904	30.21	5	89/4/27
-1	194.4	207.2	2,098,500	6.3219	10	20	1,000	1.877	30.22	4.997	89/4/14
-1	194.4	205.0	1,369,600	6.1366	10	32	1,000	1.897	30.22	5	89/5/16
-1	194.5	208.0	3,648,600	6.5621	10	11	1,000	1.870	30.21	5	89/2/3
-1	194.5	211.6	1,129,600	6.0529	10	29	1,000	1.838	30.21	5	89/4/25
-1	194.6	201.8	4,319,300	6.6354	10	23	1,000	1.928	30.20	5	89/4/18
-1	194.6	203.4	3,662,000	6.5637	10	15	1,000	1.913	30.20	5	89/1/26
-1	194.6	208.0	1,581,100	6.1990	10	34	1,000	1.871	30.21	5.008	89/6/7
-1	194.6	212.9	570,400	5.7562	10	28	1,000	1.828	30.20	5	89/5/23
-1	194.8	203.5	1,088,000	6.0366	10	26	1,000	1.914	30.17	5	89/4/24
-1	204.1	214.3	1,145,100	6.0588	10	12	1,050	1.905	30.23	5	89/5/18
-1	206.2	213.8	539,186	5.7317	10	38	1,050	1.929	29.99	5.022	92/6/19
-1	206.5	210.9	161,396	5.2079	5	54	1,050	1.958	29.95	5.015	92/9/8
-1	206.6	213.9	1,552,640	6.1911	5	39	1,050	1.932	29.93	5.014	92/9/9
-1	226.0	243.5	4,079	3.6106	5	49	1,150	1.856	29.97	5.018	92/12/15
-1	226.3	233.5	336,920	5.5275	5	57	1,150	1.938	29.93	5.014	92/9/25
-1	254.9	262.0	5,967	3.7758	5	52	1,301	1.946	30.04	5.013	92/12/17
-1	254.9	268.1	1,810	3.2577	5	35	1,291	1.902	29.88	5.047	92/12/17
S.C.	325.7	354.7	1	0	--	10	1,671	1.836	30.16	5	93/9/20
S.C.	349.0	365.6	1	0	--	48	1,771	1.909	29.89	5.006	92/9/22
S.C.	355.0	368.8	1	0	--	40	1,801	1.925	29.90	5.023	93/9/20
S.C.	364.9	383.6	1	0	--	56	1,861	1.902	30.03	5.018	92/9/8

注) nf:未破断試験片, S.T.:静的引張試験, S.C.:静的圧縮試験

表5 S-II群試験片の疲労試験結果(R=-1の場合)

応力比 R	公称最大 応力 S _n (MPa)	実測最大 応力 S _m (MPa)	繰返し数 N	log N	繰返し 速度 f (Hz)	試験 片番 号	最大荷 重 (kgf)	板厚 (mm)	板幅 (mm)	円孔径 (mm)	試験日 (開始)		
-1	205		199	458,314	5.6612	5	17	1,043	2.062	29.96	5.022	92/12/8	
			201	786,831	5.8959	5	16	1,050	2.055	29.94	5.020	92/10/2	
			203	880,028	5.9445	5	2	1,050	2.033	29.93	5.026	92/9/22	
			199	2,435,799	6.3866	5	9	1,050	2.058	30.09	5.006	92/9/26	
			203	3,127,714	6.4952	5	58	1,045	2.022	30.00	4.994	93/6/11	
			202	3,476,100	6.5411	5	57	1,027	2.028	29.58	5.005	93/1/4	
			209	4,306,961	6.6342	5	48	1,046	1.963	30.02	4.996	93/4/6	
			202	7,291,460	6.8628	5	83	1,043	2.033	29.92	4.982	93/2/5	
			197	7,634,533	6.8828	8.5	25	1,050	2.082	30.17	5.002	92/11/18	
			199	7,705,020	6.8868	5	33	1,050	2.055	30.13	4.986	92/10/30	
			205	9,585,122	6.9816	5	45	1,044	2.004	29.94	4.980	93/6/21	
			204	10,007,937	7.0003	5	59	1,034	2.013	29.72	4.994	93/1/12	
			198	10,000,000	nf	7.0000	5	23	1,050	2.069	30.16	4.990	92/10/4
			198	10,000,000	nf	7.0000	10.8	30	1,050	2.073	30.07	4.976	92/10/29
			198	10,000,000	nf	7.0000	5	64	1,050	2.073	30.04	4.997	92/11/20
			200	10,000,000	nf	7.0000	5	35	1,049	2.047	30.07	4.981	92/12/10
			202	10,000,000	nf	7.0000	5	61	1,036	2.029	29.77	5.001	92/12/18
			203	10,000,000	nf	7.0000	5	79	1,051	2.022	30.13	4.991	93/5/13
			204	10,000,000	nf	7.0000	5	74	1,053	2.005	30.18	4.995	93/4/19
			211	10,000,000	nf	7.0000	5	37	1,044	1.948	29.95	4.985	93/7/16
		-1	250		248	8,485	3.9287	5	5	1,278	2.018	30.08	5.013
	245			12,576	4.0995	5	1	1,270	2.042	29.94	5.038	93/3/30	
	243			38,843	4.5893	5	18	1,272	2.059	29.95	5.002	93/4/6	
	255			120,041	5.0793	5	47	1,280	1.962	30.09	4.984	93/1/13	
	244			154,932	5.1901	5	67	1,281	2.051	30.14	5.010	93/1/19	
	253			164,989	5.2175	5	50	1,279	1.978	30.08	4.994	93/1/14	
	257			174,032	5.2406	5	38	1,272	1.948	29.97	5.013	93/4/2	
	246			197,475	5.2955	5	62	1,283	2.030	30.16	4.987	93/3/30	
	251			221,493	5.3454	5	53	1,281	1.995	30.11	4.990	93/1/20	
	250			239,384	5.3791	5	75	1,282	2.002	30.15	5.008	93/3/29	
	239			330,010	5.5185	5	27	1,277	2.090	30.10	5.054	93/1/12	
	246			341,557	5.5335	5	84	1,273	2.028	29.96	4.984	93/1/18	
	248			343,894	5.5364	5	60	1,261	2.014	29.74	4.999	93/4/1	
	249			361,141	5.5577	5	54	1,279	2.011	30.06	4.966	93/1/20	
	241			406,800	5.6094	5	29	1,280	2.071	30.09	4.988	93/1/15	
	249			418,992	5.6222	5	73	1,283	2.012	30.15	4.995	93/1/14	
	244			453,064	5.6562	5	71	1,281	2.046	30.12	4.996	93/1/27	
	240			492,663	5.6925	5	21	1,284	2.087	30.17	4.994	93/4/5	
	245	528,197	5.7228	5	70	1,280	2.042	30.11	5.010	93/2/5			
	243	701,636	5.8461	5	72	1,282	2.061	30.14	4.998	93/1/29			
S.C.	380	388	1	0	--	46	1,917	1.961	29.75	5.033	93/9/22		
S.C.	403	387	1	0	--	26	2,069	2.080	30.19	5.000	93/9/22		

注) nf: 未破断試験片, S.T.: 静的引張試験, S.C.: 静的圧縮試験

3-2-2 S-N関係

a) 公称応力評価

図8に、公称繰返し最大応力(S_{n,max})を縦軸、対数繰返し数(logN)を横軸とする片対数S-N線図上に、表4に示したS-I群の試験データをプロットした結果を示す。なお、静的試験の繰返し数はN=1とする。

ここで、実線で示したS-N曲線は、目分量で推定した中央寿命に従って描いており、R=0では蛇行する曲線形状を示し、R=-1では下に凸の形状を示している。これらのS-N曲線から導かれる時間強度の静的強度に対す

る比率は、R=0の場合、N=10³が0.92、N=10⁵が0.76、N=10⁷が0.67の値を示し、R=-1の場合、N=10⁵が0.63、N=10⁷が0.46の値を示す。

図8中の実線で示すS-N曲線は目分量で描いた。このように蛇行する曲線形状のS-N関係を数式表示する方法⁷⁾も提案されている。しかし一般に、S-N関係を簡便に数式表示する手段として、片対数座標あるいは両対数座標上で直線とみなして評価した報告が多く見られる。そこで、R=0とR=-1の場合に分け、S-N関係の簡便な数式表示を試みた。

R=0の場合については、静的引張強度および疲労破壊

表6 S-II群試験片の疲労試験結果(R=0の場合)

応力比 R	公称最大 応力 S _n (MPa)	実測最大 応力 S _m (MPa)	繰返し数 N	log N	繰返し 速度 f (Hz)	試験 片番 号	最大荷 重 (kgf)	板厚 (mm)	板幅 (mm)	円孔径 (mm)	試験日 (開始)	
0	310	308	19,844	4.2976	5	4	1,582	2.015	30.04	5.019	93/7/13	
		298	36,999	4.5682	5	10	1,575	2.083	29.93	5.019	93/1/5	
		298	40,797	4.6106	5	11	1,574	2.082	29.93	5.027	93/2/17	
		302	140,720	5.1484	5	15	1,563	2.054	29.74	5.022	93/7/12	
		315	402,568	5.6048	5	49	1,586	1.967	30.07	4.986	93/1/29	
		301	3,107,044	6.4923	5	31	1,588	2.060	30.10	4.978	93/2/27	
		298	7,201,147	6.8574	5	24	1,592	2.080	30.18	5.002	93/1/5	
		300	10,000,000	nf	7.0000	5	65	1,591	2.066	30.15	4.980	93/3/9
		303	10,000,000	nf	7.0000	5	34	1,586	2.045	30.08	4.993	93/2/18
		303	10,000,000	nf	7.0000	5	81	1,588	2.049	30.11	4.986	93/5/8
		304	10,000,000	nf	7.0000	5	36	1,588	2.039	30.10	4.990	93/5/24
		304	10,000,000	nf	7.0000	5	80	1,591	2.042	30.16	4.990	93/6/30
		306	10,000,000	nf	7.0000	5	85	1,580	2.025	29.97	4.985	93/6/1
		306	10,000,000	nf	7.0000	5	86	1,579	2.026	29.96	4.984	93/6/18
		310	10,000,000	nf	7.0000	5	76	1,588	1.999	30.12	5.000	93/3/15
		310	10,000,000	nf	7.0000	5	44	1,576	1.999	29.92	4.992	93/4/12
		313	10,000,000	nf	7.0000	5	43	1,579	1.981	29.96	4.979	93/4/28
		318	10,000,000	nf	7.0000	5	41	1,580	1.952	29.98	4.988	93/2/2
		319	10,000,000	nf	7.0000	5	40	1,579	1.943	29.97	4.996	93/4/2
0	365	362	645	2.8096	5	6	1,866	2.019	30.07	5.007	93/3/18	
		352	1,254	3.0983	5	12	1,855	2.072	29.94	5.020	93/2/17	
		357	1,517	3.1810	5	14	1,852	2.047	29.90	5.021	93/3/18	
		372	3,075	3.4878	5	42	1,860	1.960	29.98	4.994	93/2/2	
		356	3,147	3.4979	5	8	1,867	2.052	30.10	5.023	93/3/12	
		369	3,211	3.5066	5	52	1,868	1.979	30.09	4.990	93/2/2	
		370	3,384	3.5294	5	51	1,867	1.971	30.07	4.990	93/2/1	
		375	3,962	3.5979	5	39	1,856	1.948	29.93	5.001	93/2/2	
		355	3,988	3.6008	5	66	1,838	2.057	29.74	5.048	93/1/27	
		358	4,044	3.6068	5	69	1,870	2.039	30.14	5.018	93/1/29	
		364	4,383	3.6418	5	78	1,873	2.008	30.15	4.995	93/2/2	
		357	4,963	3.6957	5	32	1,871	2.045	30.11	4.981	93/2/2	
		358	6,737	3.8285	5	68	1,840	2.042	29.73	5.012	93/1/28	
		358	6,773	3.8308	5	82	1,850	2.040	29.84	4.985	93/2/2	
		351	7,809	3.8926	5	28	1,861	2.077	30.00	4.994	93/1/27	
		360	8,789	3.9439	5	56	1,833	2.030	29.64	5.020	93/2/2	
		352	8,861	3.9475	5	22	1,874	2.074	30.17	4.989	93/1/27	
		359	11,423	4.0578	5	55	1,841	2.032	29.73	5.005	93/2/1	
		348	18,035	4.2561	5	20	1,874	2.096	30.16	4.979	93/1/26	
348	35,417	4.5492	5	19	1,871	2.100	30.13	4.999	93/3/18			
S.T.	420	414	1	0	--	7	2,145	2.033	30.05	5.027	93/9/16	
S.T.	483	482	1	0	--	77	2,468	2.004	30.08	5.008	93/9/17	

注) nf: 未破断試験片, S.T.: 静的引張試験, S.C.: 静的圧縮試験

表7 S-I群S-N曲線における線形近似式の母数推定値

応力比 (R)	応力 区分	S = C ₁ ·logN + C ₂			log S = C ₃ ·log N + C ₄		
		C ₁	C ₂	r ²	C ₃	C ₄	r ²
0	公称	-17.53	386.9	0.401	-0.02260	2.588	0.280
	実測	-18.98	410.8	0.586	-0.02298	2.614	0.509
-1	公称	-24.86	348.7	0.929	-0.04047	2.542	0.934
	実測	-26.35	368.2	0.940	-0.04065	2.566	0.952

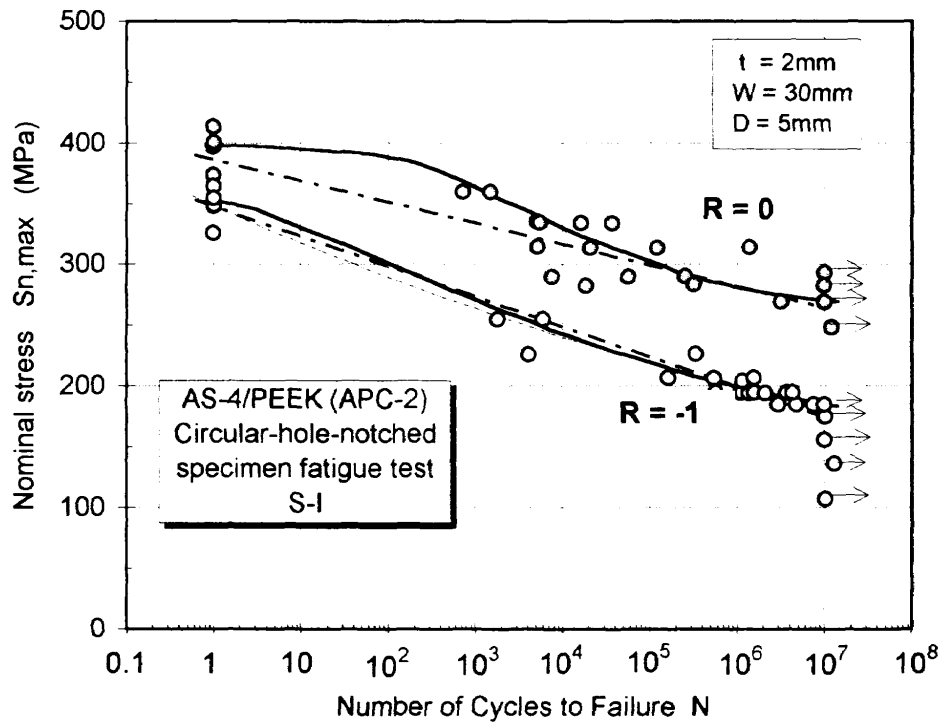


図8 S-N線図。(公称応力, S-I群データ, 片対数)

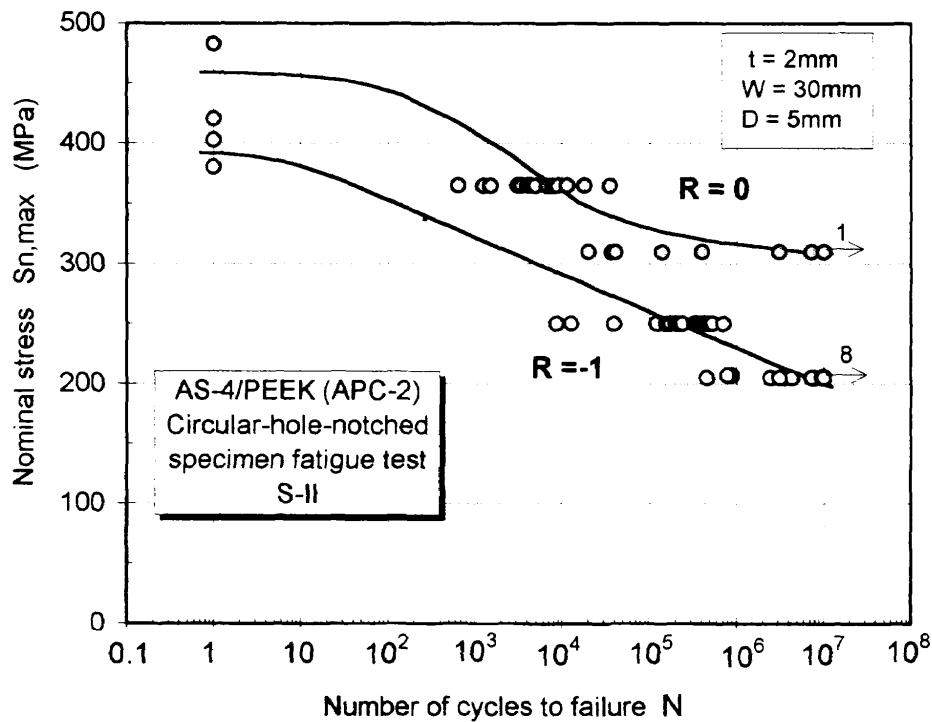


図9 S-N線図。(公称応力, S-II群データ, 片対数)

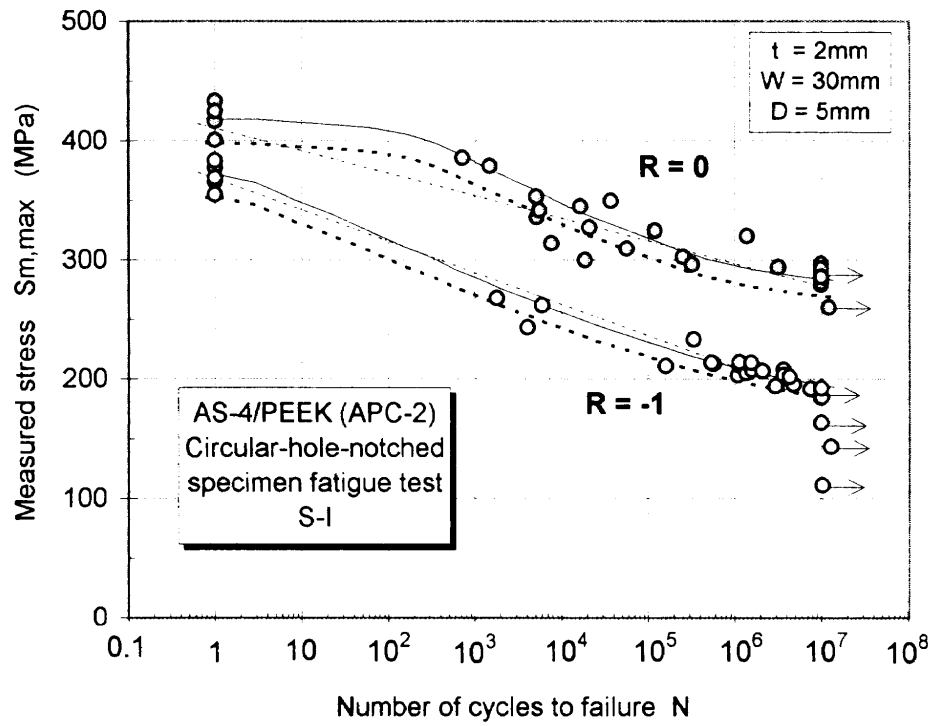


図10 S-N線図。(実測応力, S-I群データ, 片対数)

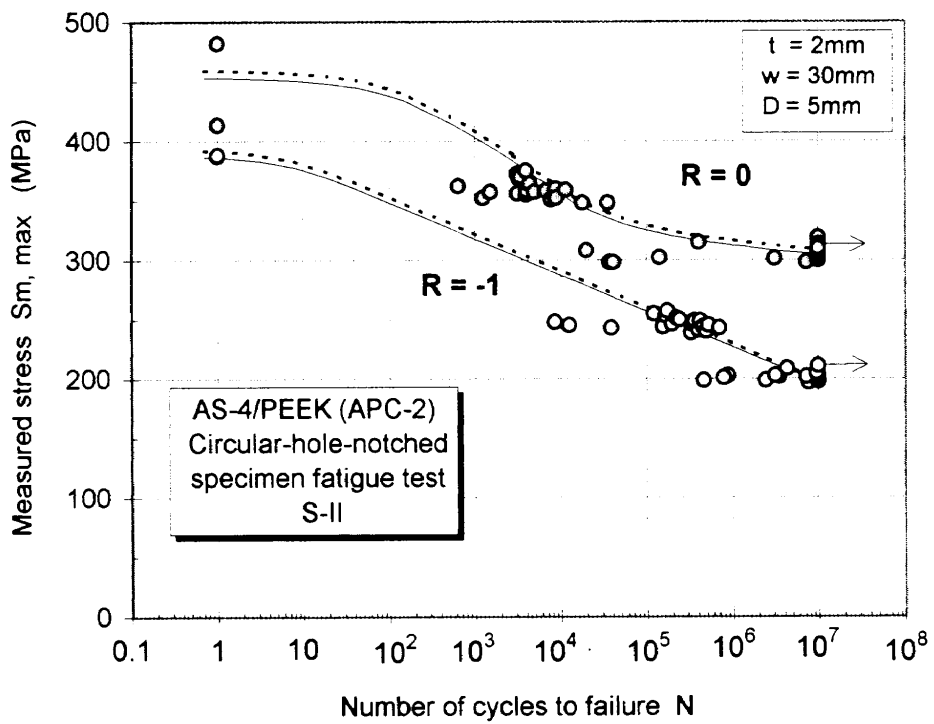


図11 S-N線図。(実測応力, S-II群データ, 片対数)

データを用い、繰返し応力が独立変数、破壊繰返し数が従属変数、静的引張強度の平均値を近似直線が通過するとして、最小2乗法により導いた線形近似式の母数(C_i)ならびに近似式のあてはまりの程度を示す決定係数(r^2)を表7に示す。ここで、 C_1 、 C_2 は片対数座標上で直線近似した母数、 C_3 、 C_4 は両対数座標上で直線近似した母数である。なお、片対数座標上で直線関係、すなわち、 $S=C_1 \cdot \log N + C_2$ で表わすS-N曲線を図8中に一点鎖線で示す。これらの表および図より、本試験の結果ではS-N曲線の直線近似は適切でないと判断できる。また、両対数座標上で直線関係、すなわち、 $\log S=C_3 \cdot \log N + C_4$ で表わすS-N曲線もほぼ同じ傾向であると判断できる。

$R=-1$ の場合については、静的圧縮強度を用いて、 $R=0$ の場合と同様に線形近似式の母数を導き、表7に合わせ示し、 $S=C_1 \cdot \log N + C_2$ で表わすS-N曲線を図8中に一点鎖線で示す。これらの表および図より、 $R=-1$ の場合は、直線近似が有効であり、両対数座標上で直線とするS-N曲線の適合性がより良好であると判断できる。

また同様に、表5と表6に示したS-II群の試験データを図9にプロットした。この場合は、それぞれ2応力レベルの試験結果であることから、S-N曲線を導くためのデータとして十分ではないが、S-N曲線の定性的な傾向はS-I群と同じである。

b) 実測応力評価

ここでは、実測最大繰返し応力($S_{m, \max}$)を縦軸とした片対数S-N線図に疲労試験結果をプロットして評価する。S-I群の結果を図10に、S-II群の試験結果を図11に示す。

図中の破線は、上記の図8と図9の公称応力評価において目分量で描いたS-N曲線に相当する。ここで、実線で示すS-N曲線は、破線で表したS-N曲線を基準として、公称強度に対する実測強度の平均的な割合(比率)を

応力(S)値側の乗数として導いたS-N関係である。なお、各試験片群の公称強度に対する実測強度の平均的な割合(比率)は、S-I群では $R=0$ および $R=-1$ の結果がそれぞれ1.052および1.053であり、S-II群では $R=0$ および $R=-1$ の結果がいずれも0.986である。

S-N曲線の直線(線形)表示については、公称強度評価と同じように、母数(C_i)および決定係数(r^2)を表7に示し、同様に、 $S=C_1 \cdot \log N + C_2$ で表わすS-N曲線を図10中に一点鎖線で示す。これらの図から、実測強度のS-N曲線の傾向は公称強度のS-N曲線と同じである。

3-2-3 寿命分布

a) 対数正規分布およびワイブル分布への適合性

S-II群の試験データについて、対数正規確率紙およびワイブル確率紙にプロットした結果を図12に示す。破壊確率はメジアンランク法により導いた。図中の回帰直線は、寿命データを従属変数として最小2乗法を用いる直線回帰法により導いた。

また表8には、寿命の統計量、すなわち対数寿命の平均値、標準偏差、変動係数、ならびに寿命分布が2母数ワイブル分布に適合するとみなして導いたワイブル母数を示す。未破断寿命データを含む場合の統計量およびワイブル母数の推定は直線回帰法を利用して導いた。なお、それぞれの回帰直線に対するあてはまりの程度を示す決定係数(r^2)も合わせ示す。

さらに、寿命データの対数正規分布および2母数ワイブル分布への適合性を調べるために、修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定⁸⁾を行った。有意水準を5%として、得られた修正コルモゴロフ・スミルノフ統計量の計算値と限界値を表9に示す。ここで、限界値を越えた計算値には下線を引いた。

寿命の分布形への適合性は、確率紙へのプロット、 r^2 値、ならびに修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定

表8 寿命分布データの統計量、(S-II群)

パネル区分	応力比	最大公称応力 (MPa)		対数寿命					ワイブル母数(2母数)			静強度比
		データ数	データ数	平均値	標準偏差	変動係数(%)	r^2	形状	尺度	r^2		
全パネル(P1~P5)データ	0	365	20	20	3.678	0.394	10.7	0.96	1.340	7,158	0.93	0.81
		310	19	7	7.152	1.843	25.8	0.83	0.427	14,695,000	0.77	0.69
	-1	250	20	20	5.283	0.517	9.8	0.80	1.037	324,700	0.91	0.64
		205	20	12	6.963	0.735	10.6	0.96	0.928	12,573,000	0.96	0.52
P1パネルを除いたデータ	0	365	16	16	3.811	0.294	7.7	0.89	1.957	8,523	0.77	0.81
		310	15	3	8.479	1.679	19.8	0.99	0.487	230,640,000	1.00	0.69
	-1	250	17	17	5.473	0.217	4.0	0.97	2.385	372,970	0.96	0.64
		205	16	8	7.045	0.346	4.9	0.93	2.057	12,275,000	0.91	0.52

注) 未破断寿命データを含む場合のパラメータおよびワイブル母数は直線回帰法を利用して導いた。

表9 コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定結果の母数推定値

応力比 (R)	公称最大応力 S (MPa)	パネル区分	データ数	破断データ数	対数正規		2母数ワイブル	
					計算値	限界値 (5%)	計算値	限界値 (5%)
0	365	全	20	20	0.165	0.192	0.146	0.197
		P1 除く	16	16	0.155	0.213	0.207	0.218
	310	全	19	7	0.121	0.197	0.206	0.202
		P1 除く	15	3	0.051	0.219	0.049	0.224
-1	250	全	20	20	0.229	0.192	0.171	0.197
		P1 除く	17	17	0.171	0.207	0.118	0.212
	205	全	20	12	0.096	0.192	0.103	0.197
		P1 除く	16	8	0.112	0.213	0.103	0.218

から、次のように言える。

R=0の場合、高い応力レベルであるSn,max=365MPaの寿命データは対数正規確率分布と2母数ワイブル分布いずれにも適合すると判断できる。低い応力レベルである310MPaの寿命データについては、N=10⁷での

未破断データを除いた短寿命側データの分布形を評価すると、2母数ワイブル分布形への適合性が否定される。

R=-1の場合、高い応力レベルであるSn,max=250MPaの寿命データは、対数正規分布への適合性が否定される。低い応力レベルである205MPaの寿命データにつ

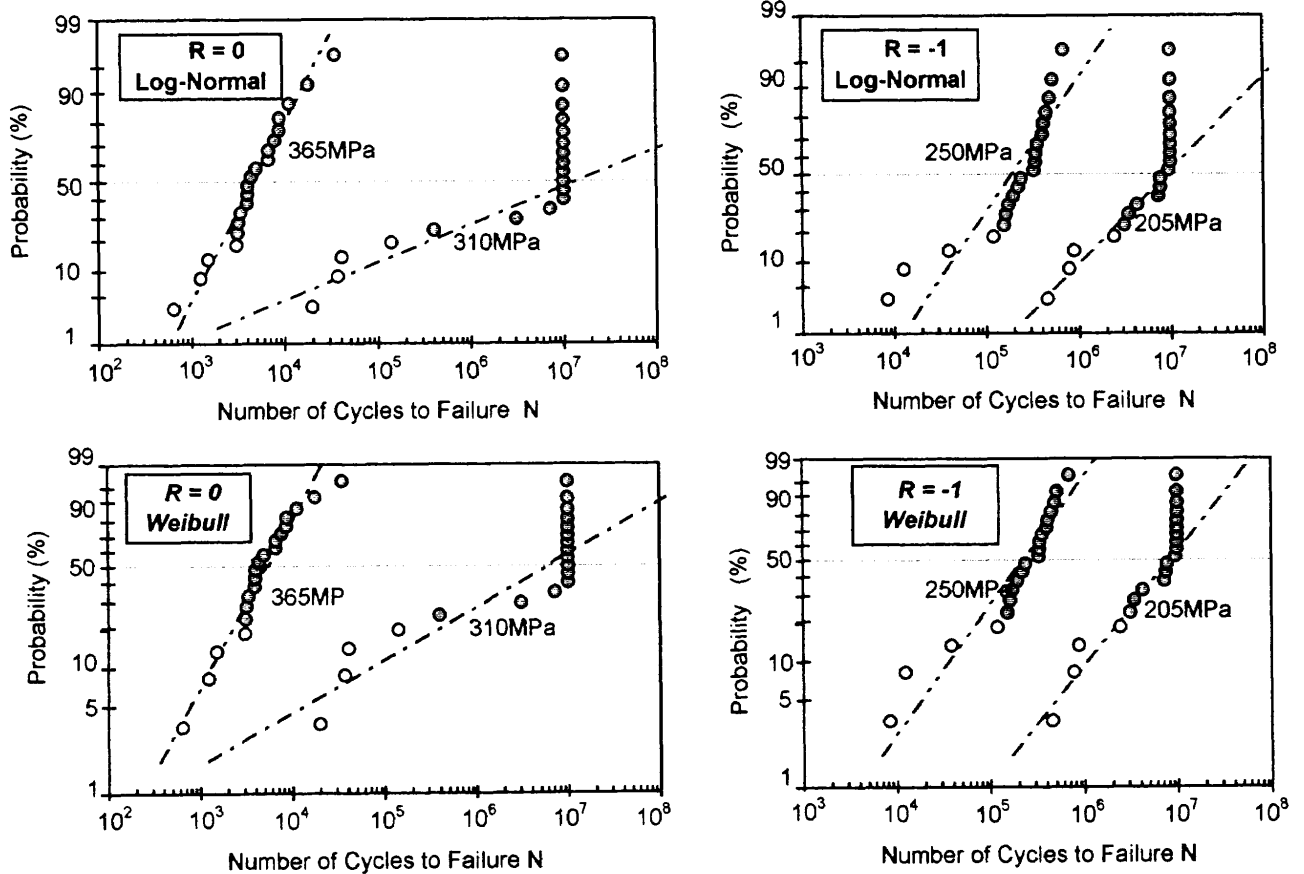


図12 疲労寿命データを対数正規確率紙およびワイブル確率紙にプロットした結果
{全パネル(P1~P5)の試験データについて}

いては、 $N=10^7$ での未破断データを除いた短い寿命側データの分布形を評価すると、短寿命側の分布は対数正規分布と2母数ワイブル分布いずれにも適合する。

しかしながら、確率紙にプロットした寿命データを見ると、いずれの応力レベルにおいても、4本程度のデータが短い寿命域に存在している。これらのデータは、S-II群用に成形した5枚のパネルの中で特定できる1枚のパネルP1から製作した試験片(番号1~18)の試験結果である。これらの試験片では、反り(カール)が見られ、静的引張強度も表6に示したように低い値である。

そこで、パネルP1から製作した試験片(番号1~18)を除いたデータについて、再解析および評価を行った。対数正規確率紙およびワイブル確率紙にプロットした結果を図13に示す。また、この場合の寿命分布データの統計量および修正コルモゴロフ・スミルノフ統計量の計算値と限界値を表8および表9に併記する。当然のことながら、寿命のばらつきは小さくなる。また、疲労寿命の分布形は、いずれも、対数正規分布形と2母数ワイブル分布形に適合する。

b) ばらつき

表8に示すように、ばらつきの指標である対数寿命の変動係数は4~26%、ワイブル母数の形状母数は0.4~2.4と幅広い値となり、応力レベルが低いと寿命のばらつきが大きくなる傾向を示している。しかしながら、定量的な傾向を本試験結果から見出すことはできない。

C.C. M. Ma⁹⁾らは、本供試材に類似した材料(AS-4/Peek, 短冊型平滑試験片, $[0/\pm 45/\pm 45/90]_s$)で疲労寿命データを収集している。ここでは、最大最小応力比 $R=0.1$ とし、静的強度に対する最大繰返し応力の割合すなわち静的強度比が0.62~0.82である5つの繰返し応力レベルにおいて、それぞれ8~11本の試験片を用い、 $N=10^6$ までの疲労寿命データを求めている。この対数寿命の変動係数は、6~20%の値であり、応力レベルによる依存性は見られない。

本材料系の寿命のばらつきは、対数寿命の変動係数が20%を越える値が得られており、比較的大きいと判断できる。

3-2-4 疲労損傷過程

層間剝離やき裂の発生・進展などの疲労損傷は試験片

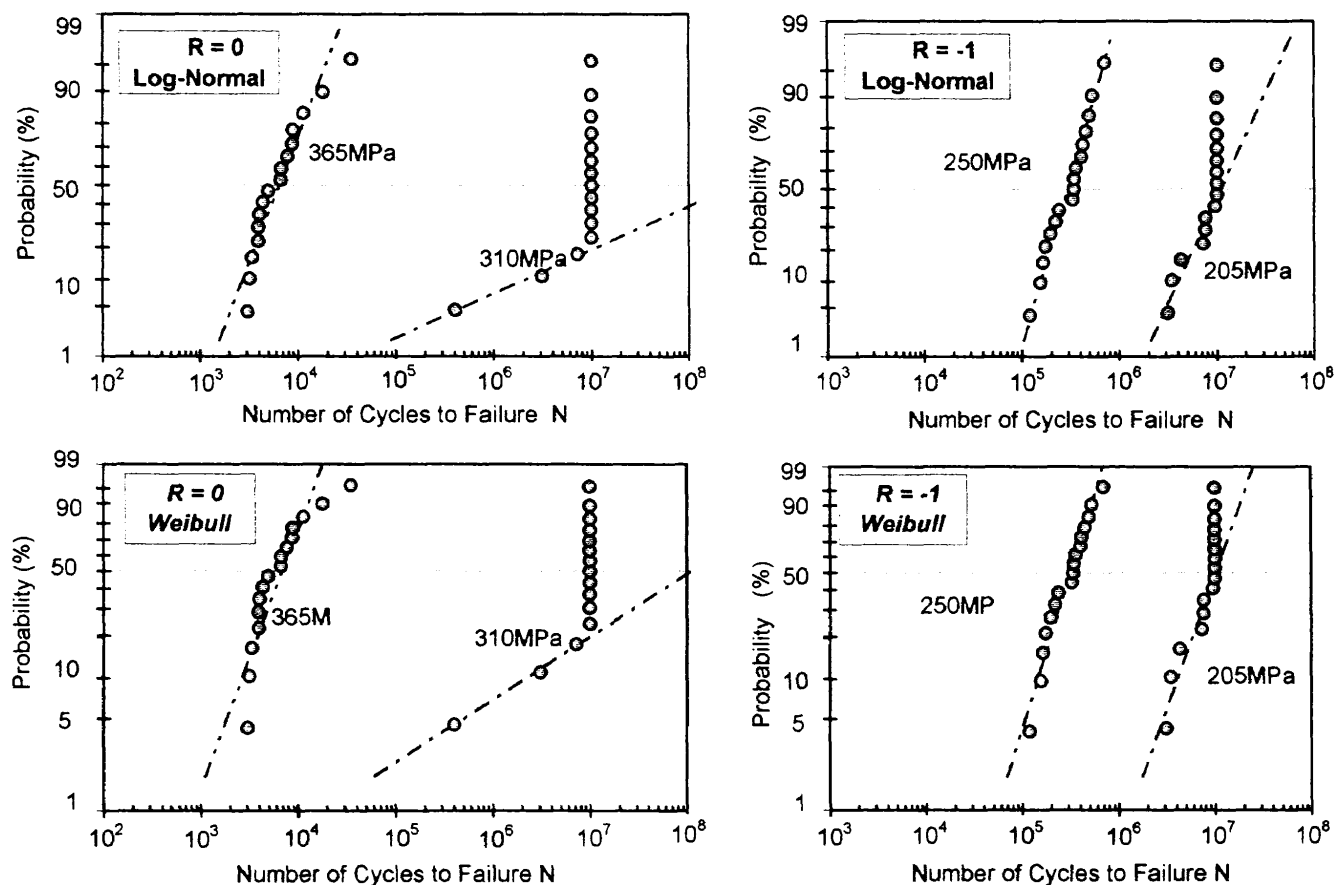


図13 疲労寿命データを対数正規確率紙およびワイブル確率紙にプロットした結果
{パネル(P2~P5)の試験データについて}

の剛性変化として表れる。そこで、剛性変化と累積繰返し数の関係を調べた。

R=0の場合は、静的引張試験でも使用した動的変位計を用いて、円孔部をまたぐ標点間距離25mmの変位量の変化を計測できる。また、5mmの円孔変位は独自に制作したクリップゲージ型円孔変位計で計測できる。これらの測定装置を用い静的引張試験において、標点間距離25mmの変位量と内径5mm円孔の変位量の間には線形関係が成立していると判断できる。したがって、動的変位計から計測される変位量の変化から、補正を行って、円孔変位量を推定することができる。さらに、動的変位計から計測される変位量の変化は、試験片の剛性変化に相当する。

まず、S-II群試験片において、応力レベル365MPaおよび310MPaの試験で、それぞれパネルP1、短寿命、中寿命、長寿命の代表的な試験片について、剛性変化と累積繰返し数の関係を調べ、その結果を図15に示す。

図15の(a)は、応力レベル365Mpaにおける試験片番号SII-14, SII-42, SII-32, SII-19から導いた結果。また、図15の(c)は、横座標を破壊寿命(N_f)に対する累積繰

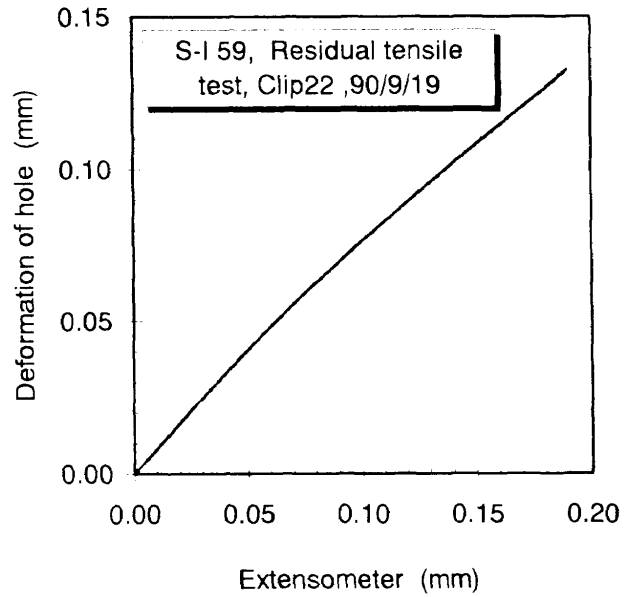


図14 円孔変位量と動的変位計の関係

返し数(N_i)の割合すなわち寿命比(N_i/N_f)で評価した結果を示す。同様に、図15の(b)は、応力レベル310Mpaにおける試験片番号SII-11, SII-49, SII-41, SII-86か

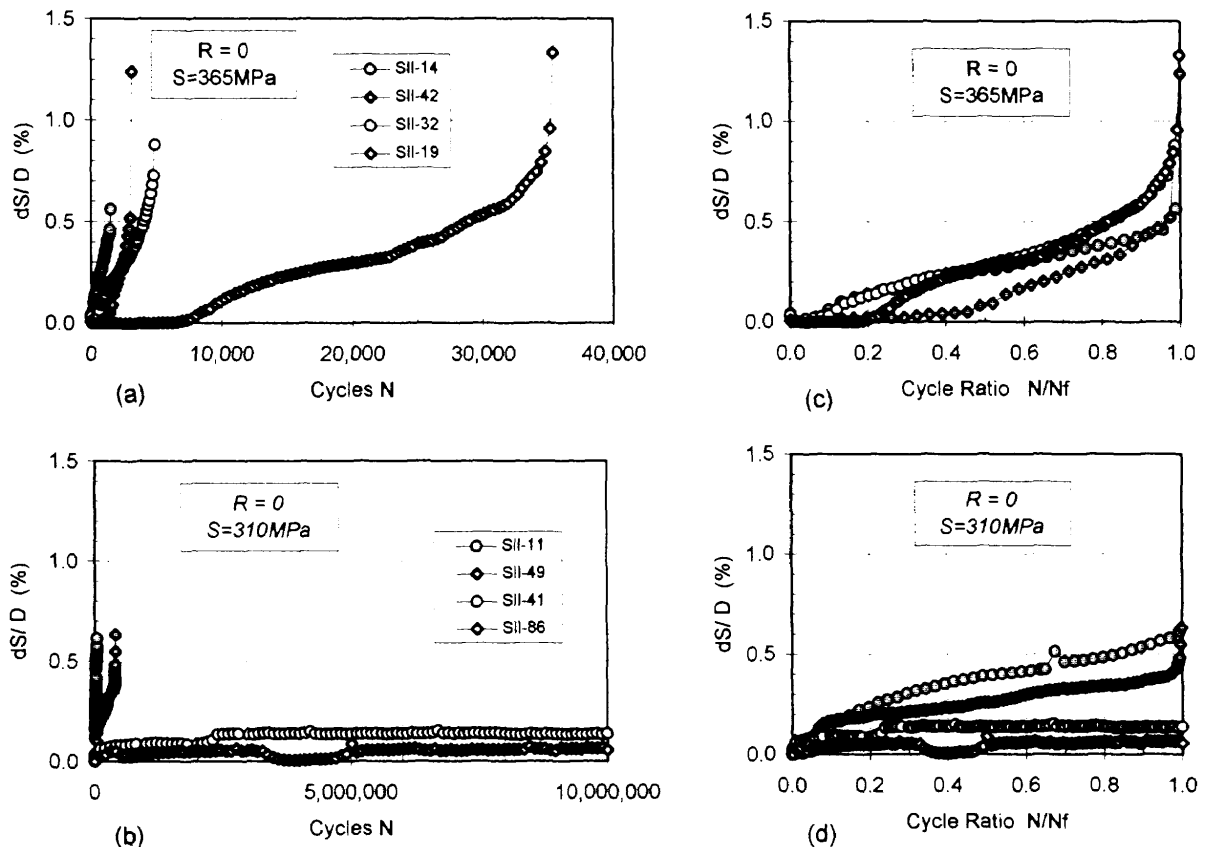


図15 R = 0 における剛性低下の様相

ら導いた結果。さらに、図15の(d)は、横座標を破壊寿命に対する累積繰返し数の割合すなわち寿命比(N_i/N_f)で評価した結果を示す。

これらの図から、剛性低下の進行により、円孔部の変位が1%程度拡大すると破壊が起こる事、 $N=10^7$ 未破断試験片は剛性低下の進行が計測されていない事が分かる。

$R=-1$ の場合は、座屈防止金具を用いており、動的変位計による変位の計測はできないが、疲労試験機のアクチュエータ変位の変化量(dP)から、剛性低下の定性的な傾向を調べた。応力レベル250MPaおよび205MPaの試験について、それぞれパネルP1、短寿命、中寿命、長寿命の代表的な試験片から導かれた結果を図16に示す。なお、図16中の縦座標は円孔径($D=5\text{ mm}$)に対するアクチュエータ変位の変化量(dP)の割合を示し、横座標は図15の定義と同じである。

これらの図から、 $R=-1$ の場合は、剛性低下が進行しており、ある特定値に達すると、すなわちdP/Dが4%程度になると疲労破壊が起きると考えられる。また、 $N=10^7$ 未破断試験片では、いずれも剛性低下の進行が計測されており、試験片表面の45°層の層間剥離や界面剥離が見られた。すなわち、繰返し圧縮荷重の疲労損傷に及ぼす

影響は大きいと判断できる。

3-3 残存強度試験

S-I群およびS-II群試験片における $N=10^7$ 未破断試験片について、残存強度試験を行った結果を表10に示す。図17には、静強度試験結果と残存強度試験結果を棒グラフを用いて比較表示した。ここで、黒い棒グラフが公称破壊強度、白い棒グラフが実測破壊強度、斜線の棒グラフが疲労試験の繰返し応力値を示し、横軸には試験片番号を示す。また、表11には、残存強度試験結果および静的強度試験結果から導いた破壊強度の平均値、標準偏差、変動係数、中央値、ならびに、静的強度比を示す。これらの表および図から、S-I群とS-II群とでは試験条件や試験結果に若干相違が見られるが、残存強度特性は次の様に言える。

零引張の繰返し荷重条件すなわち $R=0$ で $N=10^7$ 未破断試験片の残存引張強度は、強度平均値の静的引張強度比が1.04~1.07であり、静的引張強度より高い傾向を示す。平均値の差の検定^{10,11)}においても、残存引張強度と静的引張強度の間に有意差が認められた。強度上昇の要因として、引張疲労過程において、成形時の残留応力が

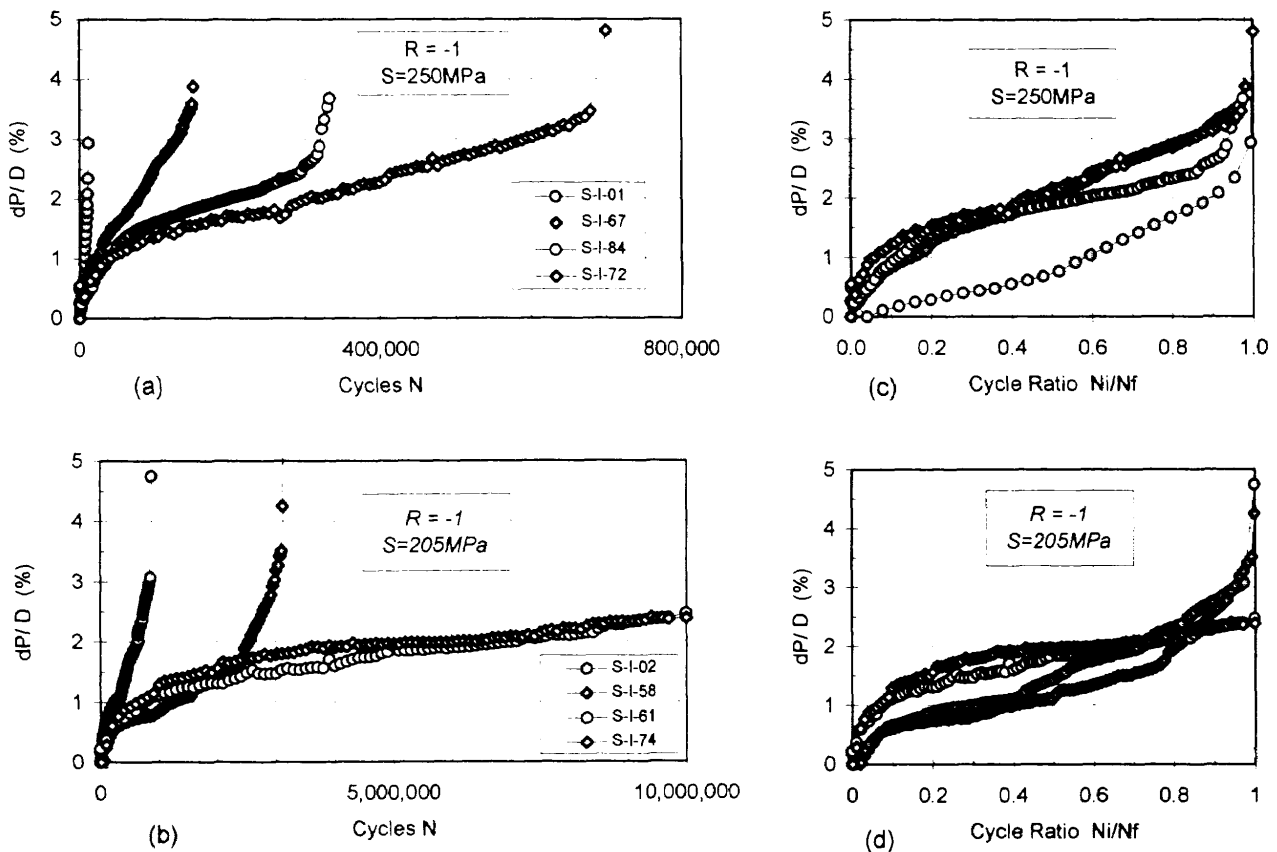


図16 $R=-1$ における剛性低下の様相

表10 残存引張・圧縮強度試験結果 (S-I群, S-II群)

試験片群	試験荷重	公称強度 Sn (MPa)	実測強度 Sm (MPa)	破壊荷重 (kN)	公称最大 繰返応力 (MPa)	実測最大 繰返応力 (MPa)	最大繰返 し荷重 (kN)	応力比 R	試験 片番 号	板厚 (mm)	板幅 (mm)	円孔径 (mm)	試験日 (開始)
S-I	引張	389	404	19.59	269	280	13.56		5	1.924	30.22	5	88/11/15
		390	424	19.65	269	292	13.56		19	1.842	30.19	5	89/4/15
		407	421	20.30	283	292	14.09		45	1.933	29.94	5	90/8/3
		414	418	20.61	283	286	14.09		60	1.979	29.94	5	90/9/19
		425	443	21.40	269	281	13.56		13	1.917	30.18	5	89/2/28
	427	447	21.52	248	260	12.52		4	1.909	30.21	5	88/11/15	
	447	453	22.30	293	297	14.61		59	1.976	29.96	5.026	90/9/19	
	-324	-337	-16.31	185	193	9.32		25	1.920	30.21	5	93/12/28	
	-326	-345	-16.44	175	185	8.83		18	1.892	30.21	5	93/12/28	
	-326	-344	-16.46	175	185	8.83		17	1.897	30.21	5	93/12/28	
S-II	引張	447	458	22.33	310	318	15.49		41	1.952	29.98	5	93/11/24
		450	439	22.59	310	303	15.57		81	2.049	30.11	4.986	93/12/12
		450	440	22.58	310	303	15.55		34	2.045	30.08	5	93/11/24
		459	464	22.95	310	313	15.48		43	1.981	29.96	5	93/11/24
		464	478	23.19	310	319	15.48		40	1.943	29.97	5	93/11/24
		467	452	23.52	310	300	15.60		65	2.066	30.15	5	93/11/25
		468	468	23.51	310	310	15.57		76	1.999	30.12	5	93/11/24
		468	463	23.40	310	306	15.49		85	2.025	29.97	5	93/11/24
		477	477	23.76	310	310	15.46		44	1.999	29.92	5	93/11/25
		480	471	24.12	310	304	15.57		36	2.039	30.10	5	93/11/24
	506	496	25.48	310	304	15.60		80	2.042	30.16	4.99	93/11/24	
	510	504	25.50	310	306	15.48		86	2.026	29.96	4.984	93/11/24	
	-352	-362	-17.58	205	211	10.24		37	1.948	29.95	5	93/12/15	
	-353	-345	-17.71	205	200	10.29		35	2.047	30.07	4.981	93/12/15	
	-366	-353	-18.32	206	198	10.30		64	2.073	30.04	4.997	93/12/15	
-370	-358	-18.63	205	198	10.30		23	2.069	30.16	4.99	93/12/15		
-382	-377	-18.94	205	202	10.16		61	2.029	29.77	5.001	93/12/15		
-385	-384	-19.39	205	205	10.33		74	2.005	30.18	4.995	93/12/15		
-390	-386	-19.60	205	203	10.31		79	2.022	30.13	4.991	93/12/15		
-407	-393	-20.45	205	198	10.30		30	2.073	30.07	5	93/12/15		

表11 残存強度試験および静的強度試験結果の統計量と静的強度比 (S-I群, S-II群)

評価区分	試験片群	強度区分	試験片数	平均値 (MPa)	標準偏差 (MPa)	変動係 数(%)	中央値 (MPa)	静的強度比 平均値評価	静的強度比 中央値評価	
公称値	S-I	残存引張	7	414	21.0	5.1	414	1.07	1.04	
		静的引張	5	387	26.0	6.7	398	---	---	
	S-II	残存圧縮	3	-325	1.5	0.5	-326	0.93	0.93	
		静的圧縮	4	-349	16.6	4.8	-352	---	---	
	実測値	S-I	残存引張	12	471	20.4	4.3	468	1.04	1.04
			静的引張	2	452	44.1	9.8	452	---	---
S-II		残存圧縮	8	-376	19.0	5.1	-376	0.96	0.96	
		静的圧縮	2	-391	15.9	4.1	-391	---	---	
S-I		残存引張	7	430	18.0	4.2	424	1.05	1.01	
		静的引張	5	411	22.2	5.4	418	---	---	
	残存圧縮	3	-342	4.2	1.2	-344	0.93	0.94		
	静的圧縮	4	-368	11.9	3.2	-367	---	---		
S-II	残存引張	12	467	19.7	4.2	466	1.04	1.04		
	静的引張	2	448	48.2	10.8	448	---	---		
	残存圧縮	8	-370	17.6	4.8	-369	0.95	0.95		
	静的圧縮	2	-388	0.4	0.1	-388	---	---		

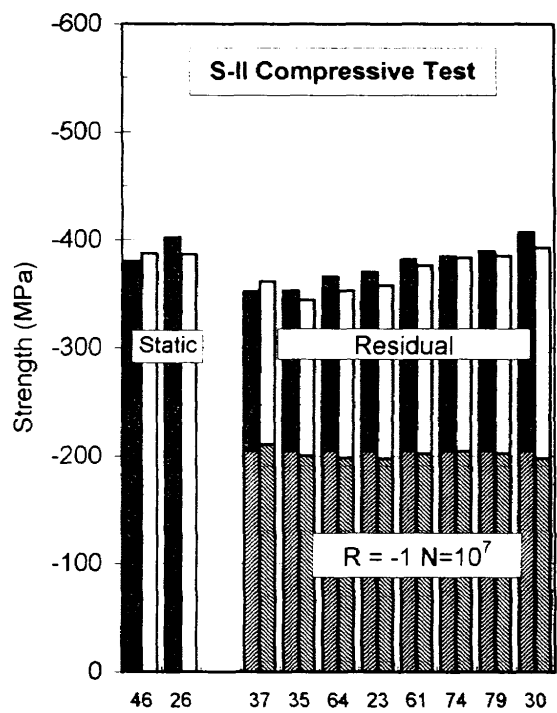
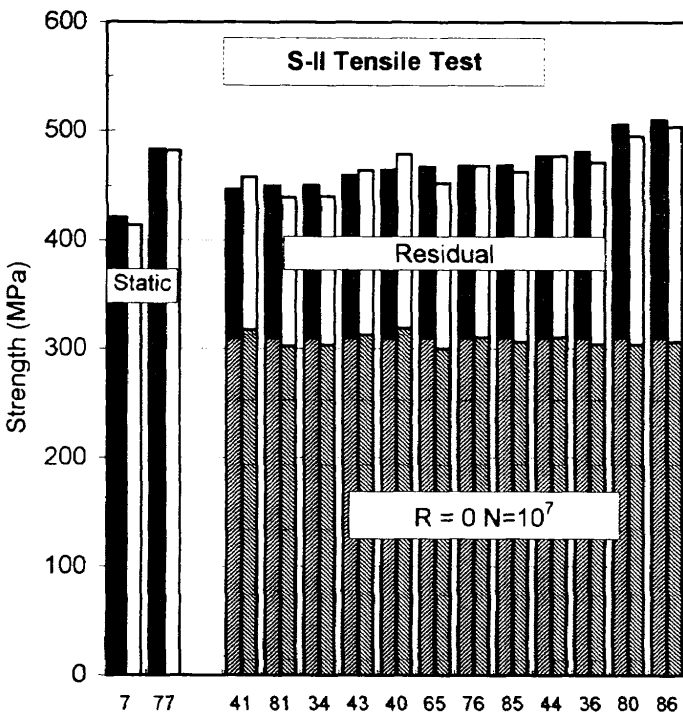
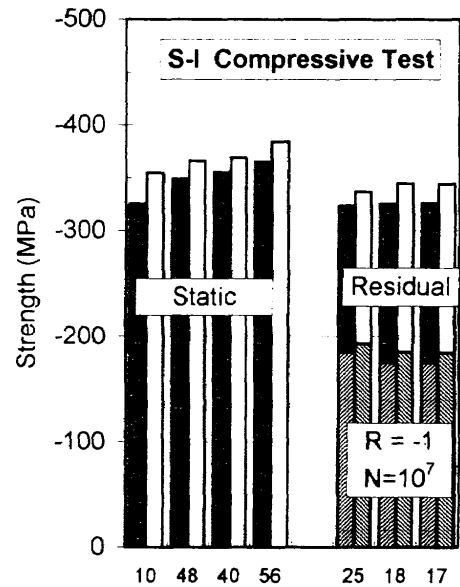
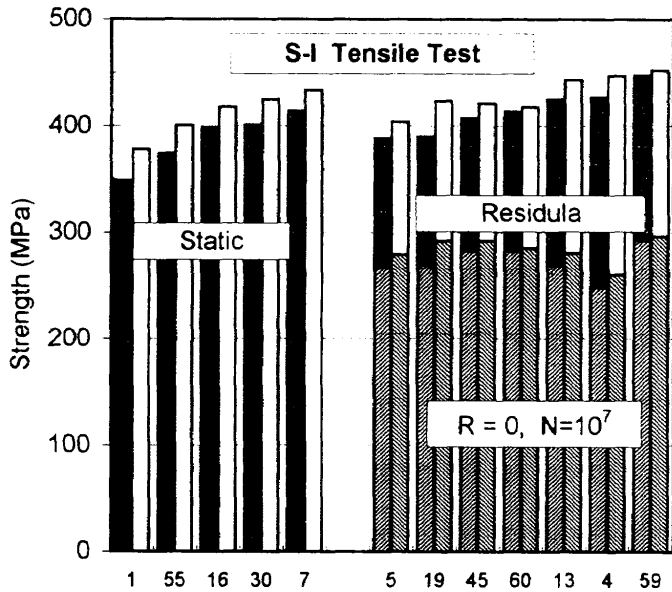
適度に解放されたことに因るものと考えられる。

引張-圧縮の繰返し荷重条件すなわち $R = -1$ で $N = 10^7$ 未破断試験片の残存圧縮強度は、強度平均値の静的引張強度比が $0.93 \sim 0.96$ であり、静的圧縮強度に比べて低い値を示す。平均値の差の検定においても、残存圧縮強度と静的圧縮強度の間に有意差が認められた。強度の低

下は、3-2-3項の疲労損傷過程で述べたように疲労損傷の蓄積に起因すると考えられる。

3-4 破面観察

本試験で行った静的試験、疲労試験および残存強度試験それぞれの試験で得られた代表的な破面観察結果を述



■: Nominal Strength □: Measured Strength

図17 静的強度と残存強度の比較グラフ

べる。

まず、静的引張および圧縮試験結果の破壊部を写真4に示す、

静的引張試験の破面について、試験片正面を見ると、破壊領域は円孔を支点とする扇型に広がっている。また、試験片側面を見るとほぼ25mmの領域に層間剝離と繊維破断の複合した破面が見られる。

静的圧縮試験の破面について、試験片正面を見ると、破壊領域は、円孔を始点とし、いくぶん波打ちながら側面に向かって進行している。側面を見ると、傾斜した形の破壊部がほぼ6mmの領域に見られる。これらは圧縮荷重に起因するせん断破壊を主とした破面であると考えられる。

次に、疲労試験について、 $R=0$ および $R=-1$ それぞれの場合において、短寿命であった試験片と平均的な寿命である試験片の破壊部を写真5に示す。

$R=0$ の疲労破壊部について、試験片正面を見ると、破壊領域は、応力集中点である円孔端を始点とし、ほぼ 90° の広がり角度で側面方向に進行している。側面を見ると、破壊部はリガメントに相当する25mmの領域に見られる。これらは圧縮荷重による層間剝離とせん断破壊の複合した破面であると考えられる。

$R=-1$ の疲労破壊部について、試験片正面を見ると、表皮 45° 層ならびに第2層に相当する 0° 層の界面剝離が見られる。長手(荷重軸)方向の損傷領域は40mmを越えている。側面観察から、広い範囲に層間剝離が進行していたと判断できる。なお、短寿命であった試験片は、長寿命試験片に比較して、損傷領域が少ない。

さらに、 $R=0$ と $R=-1$ の $N=10^7$ 未破断試験片の疲労損傷部を写真6に示す。

$R=-1$ で、 $N=10^7$ 未破断試験片の疲労損傷部について、試験片正面から観察すると、表皮 45° 層ならびに第2層に相当する 0° 層の界面剝離がわずかに見られる程度である。また、 $R=0$ で、 $N=10^7$ 未破断試験片の疲労損傷部について、試験片正面および側面から観察すると、表皮 45° 層に界面剝離や層間剝離がわずかに見られる。

残存圧縮強度試験の破壊部について、上記の静的圧縮試験の破面と同じであり、疲労による破面への影響はほとんど見られない。

残存引張強度試験の破壊部について、上記の静的引張試験の破面と同じであり、疲労による表皮 45° 層の界面剝離や層間剝離の影響はほとんど見られない。

第4章 むすび

炭素繊維/熱可塑性樹脂複合材料(AS-/PEEK, APC-2)の円孔切欠き試験片を用い、静的引張・圧縮強度、応力比 $R=0$ および $R=-1$ におけるS-N関係、寿命分布、疲

労損傷、残存強度などを調べる試験を実施し、得られたデータについて、解析ならびに評価を行い、結果の主なものを以下に列挙する。

1. 静的強度および疲労強度特性は、材料の成形工程に大きく影響される。したがって、信頼性のある成形技術の確立が重要である。
2. 静的強度のばらつきの指標である変動係数は、円孔切欠き試験片においても、5~10%程度であった。これは、一般的な複合材平滑試験片のばらつきと同程度である。したがって、強度のばらつきは比較的大きいと考えられる。
3. 片対数座標上におけるS-N曲線の形は、 $R=0$ (零-引張)の場合が蛇行する曲線形状であり、 $R=-1$ (引張-圧縮)の場合が下に凸となる曲線形状である。また、円孔切欠き試験片では、S-N曲線の勾配は比較的大きいと考えられる。すなわち、静的強度に対する時間強度の比率は、 $R=0$ の場合が $N=10^7$ で $2/3$ 程度の値を示す。 $R=-1$ の場合が $N=10^7$ で $1/2$ 程度の値を示した。
4. 疲労寿命の分布形は、対数正規分布あるいは2母数ワイブル分布に適合すると判断できる。
5. 寿命のばらつきは、対数寿命の変動係数が20%を越える値が得られており、比較的大きいと判断できる。
6. $N=10^7$ サイクル未破断試験片の残存強度については、 $R=0$ の残存引張強度が静的引張強度に比べていくぶん高い傾向を示した。また、 $R=-1$ の残存圧縮強度が静的圧縮強度に比べて低い値を示した。

本研究を遂行するに当たり、機体部の下河利行疲労研究室長から色々な面においてご指導を頂いた。また、非破壊検査の実施に際して、機体部の松嶋正道主任研究官のご協力を頂いた。ここに厚く感謝申し上げます。

第5章 参考文献

- (1) John Timothy Harthnes, Ran Y. Kim, : "A comparative study on fatigue behavior of poly-ether-etherketone and epoxy with reinforced graphite cloth," 28th National SAMPE Symposium, 1983, pp. 535-544.
- (2) Ran Y. Kim, John Timothy Harthnes, : "The evaluation of fatigue behavior of poly-ether-etherketone/graphite composite fabricated from prepreg tape," 29th National SAMPE Symposium, 1984, pp. 765-776
- (3) Simonds, R. A., Bakis, C. E., and Sitnchcomb, W. W., : "Effects of matrix toughness on fatigue response of graphite fiber composite laminates,"



写真4 静的強度(引張, 圧縮)試験の破壊部

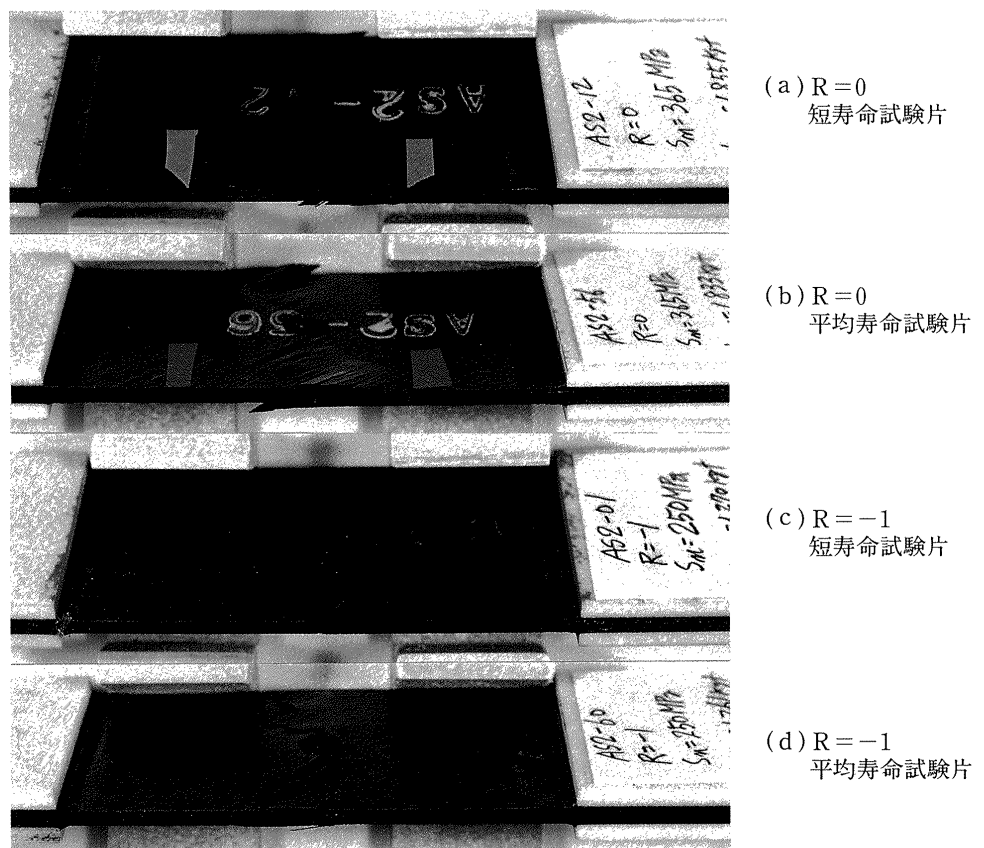


写真5 疲労試験による破壊部

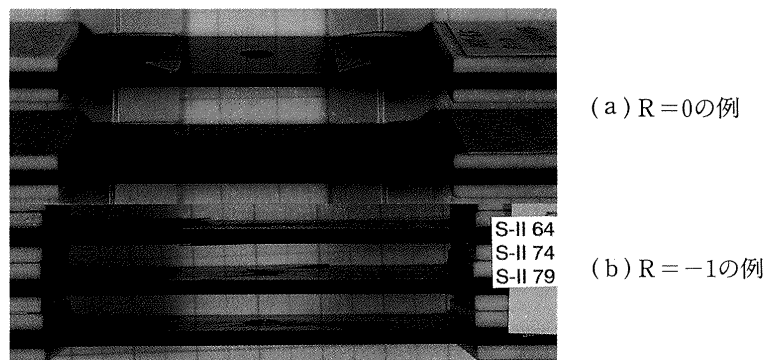


写真6 $N=10^7$ 未破壊試験片の疲労損傷

- Composite Materials: Fatigue and Fracture, Second Volume, ASTM STP 1012, 1989, pp.5-18.
- (4) 石川隆司, 林洋一, 松嶋正道, 「熱可塑複合材(CF/PEEK)の高い疲労特性と, 構造物への適用の現状について」, 第31回構造強度に関する講演会講演集, 1989/7, pp.6-9.
- (5) B.Harris, H.Reiter, T.Adam, R.F.Dickson and G.Fernando, : "Fatigue behavior of carbon fiber reinforced Plastics," Composite, Vol.21, No.3, 1990, pp.232-242.
- (6) S.M.Spearing, P.W.R.Beaumont, and M.T.Kortshot, : "The fatigue damage mechanics of notched carbon fiber/PEEK laminates," Composite, Vol.23, No.5, 1992, pp.305-311.
- (7) G.P.Sendeckyj, : "Fitting models to composite materials fatigue data," Test methods and design allowable for fibrous composites, ASTM STP 734, 1981, pp.245-260.
- (8) 下河利行, 「極値分布と22母数ワイブル分布に対する修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定の限界値」材料, 第39巻, 第436号, 1990, pp.45-49.
- (9) C.C. M.Ma, H.C.Kuo, M.J.Chang, C.L.Ong, I.C.Wu and M.F.Sheu, : "Fatigue behavior of carbon fiber reinforced polyetheretherketone (peek) laminated composites(III)," Advanced composites '93 International conference on advanced composite materials, 1993, pp.915-920.
- (10) 近藤良夫, 舟阪渡 編; 技術者のための統計的方法, 共立出版株式会社, 1967.
- (11) 山内次郎 編, 統計数値表JSA-1972, 日本規格協会, 1972.

航空宇宙技術研究所報告1319号

平成9年2月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話(0422)47-5911 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

© 禁無断複写転載

本書(誌)からの複写、転載を希望される場合は、企画室
調査普及係にご連絡ください。

Printed in Japan