原子炉用黒鉛材料の疲労強度に与える保持時間効果[†]

石 山 新 太 郎* 衛 藤 基 邦** 奥 達 雄***

Effect of Stress Holding on Fatigue Strength
of Nuclear Graphite

by

Sintarou ISHIYAMA*, Motokuni ETO** and Tatuio OKU***

Since graphite components in the HTTR (=High Temperature Engineering Test Reactor) are subjected to cyclic stress during reactor start-up, operation or shut-down, the design of the reactor requires the knowledge of cumulative fatigue damage of graphite materials. However, the number of reports on the cumulative fatigue damage of graphites are very limited.

In this paper, the results of fatigue test in the mixed fatigue mode of cyclic and static stresses were reported on HTTR components graphite, IG-110, regarding the effects of stress hold time and static fatigue-cyclic fatigue interaction on cumulative fatigue damage of the graphite. The following results were derived:

- (1) Static fatigue failure of IG-110 graphite was observed at the stress level of more than 0.95 times as large as the mean tensile strength.
- (2) Fatigue life under cyclic stress was longer than that of mixed fatigue mode of cyclic and static stresses at the stress level of more than 0.85 times as large as the mean tensile strength.
- (3) Fatigue life of mixed fatigue mode decreased with increasing stress hold time.
- (4) Damage factor of static stress in the mixed fatigue mode was very small, and cumulative fatigue damage in this was smaller than 1.

Key words: Gas-cooled reactor, Graphite, Fatigue, Fatigue damage, Damage factor, Cyclic fatigue, Static fatigue

1 緒 言

現在日本原子力研究所で建設準備中の高温工学試験研究炉 (HTTR = High Temperature Engineering Testing Reactor) は, 出力 30 MW, 最高出口温度 950°C のヘリウム冷却黒鉛減速型の高温ガス炉であり, この原子炉の炉内構造物の大半は黒鉛製構造物で構成されている。

HTTR 炉内黒鉛構造物には, 原子炉の運転中に発生する熱応力, あるいは照射により生じた寸法変化に起因して炉の停止時に発生する照射誘起応力などが生じ, これらの応力は原子炉の起動・停止の繰返しのために繰返し加わることから, 黒鉛構造物に疲労損傷を与えることが考えられる。このため, 炉内黒鉛構造物の疲労強度に関する健全性を評価・検討するには, 黒鉛材料の疲労特性のうち, 特に原子炉のそれぞれの運転状態に応じて発生する応力の形態, すなわち, 最大応力が時間によって増加してから一定時間保持され, その後減少するようなパターンからなる組み合わせ応力の繰返しに対する黒鉛材料の疲労強度に関する知見

が必要である。

過去, 黒鉛材料の疲労強度に関して幾多の研究が行われてきたが, 黒鉛材料の疲労強度によぼす保持応力の影響に関する研究は現在全く存在しない。

このため本研究では, HTTR 炉内構造用高純度微粒子性黒鉛 IG-110 の疲労強度におよぼす繰返し応力下での保持応力の影響に関してその基礎的知見を得ることを目的とした。

2 実 験 方 法

2・1 供試材と試験片

供試材は石油コークス系の高純度微粒等方性黒鉛 IG-110 である。この黒鉛の機械的性質を Table I に示した。応力保持ならびに繰返し疲労試験には, 直径

Table I. Mechanical properties of IG-110 graphite.

Item	Bulk density (d) [g/cm ³]	Tensile strength (σ_t) [MPa]	Compressive strength (σ_c) [MPa]	Bending strength (σ_b) [MPa]	Young's modulus (E) [GPa]
IG-110	1.77	24.4	71.2	33.6	8.5

† 原稿受理 平成 2 年 12 月 10 日 Received Dec. 12, 1990

* 正 会 員 日本原子力研究所 茨城県那珂郡東海村, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaragi

** 日本原子力研究所 茨城県那珂郡東海村, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaragi

*** 正 会 員 茨城大学工学部 日立市中成沢町, Faculty of Engineering, Ibaragi University, Nakanarusawa-cho, Hitachi

Type	Combination pattern	Peak hold time/sec
I		0
II		300
III		1800

Fig. 1. Loading conditions of present fatigue test.

×ゲージ長さ, $\phi 4.5 \times 4.5$ mm の引張り-圧縮疲労用試験片を用いた。各試験片の切出しは母材の任意から行った。

2・2 試験条件

繰返し疲労試験は、最大容量 980 N の油圧サーボ式疲労試験機（島津製作所 EHF-ED5 型）を用いて、試験片に荷重制御により Fig. 1 に示した三タイプ（タイプ I；三角波、タイプ II；（三角波 + 短時間保持）台形波、タイプ III；（三角波 + 長時間保持）台形波）の繰返し荷重を加えることによって行った。最大付加応力の選択は、引張り強度の 1.0～0.85 倍の範囲内の

三レベルを選択して行った。また、疲労中のひずみの計測は、ゲージ長さ 0.5 mm のひずみゲージ（共和電業（株）製）を試験片に接着して行った。ここでの荷重条件は、応力比 = 0.0 の完全片振りで、最高 10^6 サイクルまで行った。また、各タイプとも三角波の繰返し周波数は 1 Hz である。

静的疲労試験は、最大容量 980 N の油圧サーボ式疲労試験機を用いて、試験片の荷重制御により一定荷重を上記試験片が破断するまで加えることによって行った。試験片の破断までの変化と時間は、荷重の変化を X-T レコーダー（理化学電気社製）に記録することにより行った。

3 結果

3・1 繰返し応力下および静的応力下での黒鉛の変形

Fig. 2 の (a), (b) にそれぞれ台形波応力および静的応力を加えた際の黒鉛の破壊までの変形状態を示した。(a) の台形波応力の場合、比較的初期サイクルで残留ひずみと大きなヒステリシスループを示したが、その後のピーク応力での 1800 秒保持中や除荷-負荷過程ひずみやヒステリシスループに顕著な変化は見られなかった。(b) の一定応力保持の場合、応力が定応力に達する最初の負荷過程で生じた変形の他には、その後の応力を保持し始めてから黒鉛材料が破壊に至るまでに特に大きな変形は認められなかった。

3・2 繰返し疲労試験

Fig. 3, 4, 5 には各疲労タイプ別（タイプ I, II, III）に疲労試験を行った際の合成波のうち、繰返し応力成分だけ疲労寿命分布を付加応力レベル別に示した。

ここで、応力レベルには最大応力 σ_a を平均引張り強度 σ_t で規格化した規格化応力 (σ_a/σ_t) を用いた。図中実線は、正規分布を仮定して求めた疲労寿命分布である。ここで破壊確率 50% に対応する寿命を平均寿命 N_f とする。なお、図中 → 印の付いたデータは 10^6 サイクル以上の疲労で破壊しなかった試験データを意味している。

Fig. 3 に示した応力レベル 0.97 σ_t におけるタイプ I, III 両疲労寿命分布を比較すると、タイプ III の平均寿命 N_f はタイプ I に比べて一桁短くなっていることが分かる。さらに、分布勾配はタイプ III の方が急になっており疲労データの分布の幅がタ

Fig. 2. Load-strain curves of mixed fatigue mode test and static fatigue test.

Fig. 3. Distribution of fatigue life in mixed mode at stress level of $0.97 \sigma_t$.

Fig. 5. Distribution of fatigue life in mixed mode at stress level of $0.85 \sigma_t$.

Fig. 4. Distribution of fatigue life in mixed mode at stress level of $0.90 \sigma_t$.

Fig. 6. Static fatigue strength of IG-110 graphite.

イブ I に比べて狭くなっていることを示している。Fig. 4 に示した応力レベル $0.90\sigma_t$ で平均寿命は各タイプで、 $I > II > III$ の順に小さくなっており、さらに分布こう配は $I > II > III$ の順で小さくなっていった。Fig. 5 に示した応力レベル $0.85\sigma_t$ での平均寿命は $I > III$ の順でタイプ I の方がこんどは長くなっているのに対して、分布勾配に差はほとんど認められなかった。Table II には各タイプの疲労寿命分布の平均疲労寿命をまとめて示した。

3・3 静的疲労試験

Fig. 6 には、一定応力を試験片が破断するまで保持した場合、保持開始から破断までの時間とその際の平均引張り強度で規格化した保持応力 (σ_a/σ_t) との関係を示した。図中実線は、保持応力 (σ_a/σ_t) と破断

時間との片対数の関係を仮定して求めた最適疲労寿命曲線である。また、図中 $\rightarrow$ 印の付いたデータは、応力保持時間が 10^6 sec を経過しても破断しなかったものを示している。

4 考 察

4・1 保持応力下の疲労特性

Fig. 7 には、Fig. 3~5 の疲労寿命分布から求めた繰返し応力成分の平均疲労寿命 N_f と最大付加応力 σ_a を引張り強度 σ_t で規格化した規格化応力との関係をタイプ別に示したものである。また、図中実線は規格化応力 (σ_a/σ_t) と平均疲労寿命 N_f との間に片対数の関係を仮定し ($\sigma_a/\sigma_t, N_f$) = (1, 1) を通るように最適 S-N 曲線である。これによると、疲労強度はタイプ $III > II > I$ と荷重保持時間が長くなるに従って低下する傾向を示した。さらに、タイプ III においては応力レベルが $0.85\sigma_t$ になると、平均寿命がタイプ I より若

Table II. Fatigue life of mixing fatigue test and failure time of static fatigue.

Fatigue type Stress level	Static fatigue/sec				Cyclic fatigue/cycles		
	I	II	III	STATIC	I	II	III
0.97	—	—	3600	7×10^3	40	—	2
0.90	—	24900	10800	$> 10^4$	190	83	6
0.80	—	—	1.08×10^4	$> 10^4$	220	—	6×10^4

Fig. 7. Fatigue strength of mixed fatigue mode.

干長くなり、保持応力の影響が最大応力が低くなるに従って小さくなることを示している。つまり、黒鉛材料の疲労強度におよぼす保持応力の影響は、引張り強度に対して比較的高い応力レベルで生じる現象であることが分かる。一般に金属材料に繰返し応力と静的応力が同時に作用すると、繰返し疲労とクリープ（Creep）の相乗効果により疲労損傷⁶⁾が増すことが知られている。これに対して黒鉛材料などのぜい性材料では、Fig. 2 に示したように、長時間静的応力を付加し続けると、変形がほとんど進まないにもかかわらず、いきなり破断するといった疲労破壊現象が良く観察され、実際に IG-110 黒鉛の場合も、Fig. 6 の図中実線で示した静的疲労現象を起こすと考えられる。この疲労破壊現象は、材料に含まれる微視的き裂が一定応力下において徐々に進展していきやがて材料を破断させるに十分な大きさのき裂まで成長する過程、いわゆる静的疲労（static fatigue）として説明されている。これらのことから、本試験条件において試験片には、静的疲労＋繰返し疲労による損傷が同時に加わるものと考えられる。

4・2 繰返し疲労と静的疲労の損傷程度の評価

台形波の繰返し疲労成分と静的疲労成分がそれぞれ黒鉛材料に与える疲労損傷程度を評価するため、両疲労成分の損傷程度および相互間の損傷程度の関係調べてみた。

ここで、繰返し疲労の損傷係数を D_{cycle} とし、

$$D_{\text{cycle}} = n/N_f$$

(n ; タイプ II, III で加えたサイクル数, N_f ; タイプ I のタイプ II, III と同レベルの応力における平均疲労寿命)

静的疲労の損傷係数 D_{static} としてそれぞれ定義する。

$$D_{\text{static}} = t/T$$

(t ; タイプ II, III の破壊までの応力保持時間, T ; 静的疲労曲線上 (Fig. 6 中の実線) から推定したタイプ II, III の試験応力における静的疲労破壊時間)

各試験応力下におけるこれら, n , N_f , t , T の値

をまとめて Table II に示すとともに、この結果を用いた各疲労要素の疲労損傷係数を求め Table III に示した。これによると、 D_{cycle} , D_{static} とも 1 より小さく、特に D_{static} はほとんどゼロに近い値を取っていることから、本試験における応力範囲では、試験片が疲労損傷を受けるのは、台形波の組合わせ応力成分のうち専ら繰返し応力成分によるものであって、逆に応力保持成分による損傷は本来ほとんど生じないことを示している。一方、これらの結果から、試験片が本応力試験範囲で（繰返し＋静的）応力から受ける総合的な疲労損傷程度を評価するため、累積疲労損傷係数を $D_{\text{total}} (= D_{\text{cycle}} + D_{\text{static}})$ として定義すると、ここで、 D_{total} の値は、

$$D_{\text{total}} < 1$$

となる。

また、ここでは、 $D_{\text{total}} \sim D_{\text{cycle}} > D_{\text{static}} \sim 0$ であることが分かる。

一般に繰返し疲労と静的疲労が同時に材料に加わっても、両者に相互作用がない場合、各疲労による損傷係数の和は線形累積損傷則⁹⁾に従い各疲労係数の総和 D_{total} は 1 に等しいことになる。

Fig. 8 に疲労損傷係数 $D_{\text{cycle}} (= n/N_f)$ と静的疲労損傷係数 $D_{\text{static}} (= t/T)$ との関係を示した。これによると各データ点はすべて図中の左側に集まっており、線形累積損傷則（図中 45 度の実線に相当⁹⁾）とは著しく異なる結果を示している。このことは、黒鉛材料の場合、繰返し疲労と静疲労に著しい相互作用（static fatigue-cyclic fatigue interaction）があり、特に $D_{\text{static}} \sim 0$ ということから、静的疲労の繰返し疲労損傷に与える影響が大きいのことを示している。ここで、静的疲労と繰返し疲労の相互作用により黒鉛材料に与える疲労損傷を $D_{\text{cycle}} \cdot \text{static}$ とすると、

Fig. 8. Cumulative fatigue damage of IG-110 graphite.

Table III. Damage factor and cumulative fatigue damage of IG-110 graphite.

Damage factor, D_f Stress level ($\times S$)	Cyclic damage factor, $D_{CYCLIC} \left(= \frac{n}{N} \right)$			Static damage factor, $D_{STATIC} \left(= \frac{t}{T} \right)$			Total damage factor, $T_{TOTAL} \left(= \frac{n}{N} + \frac{t}{T} \right)$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0.97	1	—	0.05	—	—	0.001	1	—	0.05(<1)
0.90	1	0.44	0.03	—	0	~0	1	0.44(<1)	0.03(<1)
0.85	1	—	1(27.3)	—	—	~0	1	—	—

$$D_{\text{cyclic} \cdot \text{static}} = (1 - D_{\text{total}}) \sim (1 - D_{\text{cyclic}})$$

となり, これらの値は Table III より, タイプ II の応力レベル 0.9α では 0.56, タイプ III の応力レベル 0.97α と 0.90α ではそれぞれ 0.95, 0.97 であり, ピーク応力の保持時間が長くなるに従って相互作用が増していくことが分かる. また, 3 章結果の 3・1 節で示した(繰返し+静的)疲労中および静的疲労中の黒鉛材料の変形挙動の観察の結果, 静的疲労だけの場合, 材料が疲労破壊を起こすまで特に顕著な変化は観察されない. これに対して(繰返し+静的)疲労の場合, 付加応力の負荷-除荷過程において大きなヒステリシスループを毎サイクルごとに描くことから, 黒鉛材料中に蓄積される毎サイクルごとのエネルギー(=毎サイクルごとのヒステリシスループ内の面積)が材料に疲労損傷を与える原因と考えられる. つまり, このエネルギー蓄積プロセスにおいてこのエネルギーが材料内の微視的欠陥(微視き裂など)の発生に消費され, さらにこの状態で静的疲労過程でのピーク応力が長時間作用することによってこれらの欠陥の成長が促進されるものと考えられる. その結果, (繰返し+静的)疲労における著しい相互作用(static fatigue-cyclic fatigue interaction)が観察されたものと考えられる.

5 結 論

微粒等方性黒鉛 IG-110 を用いて平均引張り強度 0.85 倍以上の高応力レベルでの保持応力下の静的疲労試験ならびにノコギリ波や台形波の繰返し疲労試験を行った結果, 次の結論が得られた.

(1) IG-110 黒鉛の平均強度の約 0.95 倍以上の高応力レベルにおいて IG-110 黒鉛材料の静的疲労破壊現

象が観察された.

(2) 最大付加応力レベルが平均引張り強度の 0.85 倍以上の高応力における繰返し疲労試験においては, 最大付加応力レベルが同じでも, 台形波の繰返しによる疲労寿命はノコギリ波の繰返しによるものよりも短くなった.

(3) 台形波の繰返しによる疲労寿命は, 台形波の最大応力の保持時間が長いほど短くなった.

(4) 台形波の繰返しによる損傷係数は, 保持応力成分による値が著しく小さくなった. その結果, 累積疲労損傷は本試験の範囲ですべて 1 より小さな値となった. これは静的疲労と繰返し疲労の相互作用によるものと考えられる.

(昭和62年12月14日 日本原子力学会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) H. Leichter and E. Robinson, UCRL Report 50337 (1974).
- 2) J. E. Brocklehurst and R. G. Brown, TRG Report 2513 (1973).
- 3) J. E. Brocklehurst, Mater. Sci. Eng. **16**, 91 (1974).
- 4) J. B. S. Wilkins and A. R. Reich, AECL-4216 (1972).
- 5) 石山新太郎, 奥 達雄, 衛藤基邦, 日本原子力学会誌, **30**, No. 2, 181 (1988).
- 6) R. J. Price, Carbon, **16**, 367 (1978).
- 7) セラミックス基礎工学講座小委員会, “セラミックスの機械的性質”, p. 55, (1979) 窯業協会
- 8) 大谷隆一, 駒井謙治郎, 総合材料強度学講座, “7. 環境・高温強度学”, p. 180, (1984) オーム社
- 9) M. A. Miner, J. Appl. Mech., **12**, 159 (1945).