

材料強度信頼性データベース(MSDRD)の拡充と 金属材料の超長寿命疲労特性の解析

立命大 酒井達雄
高松高専 福井智史

立命大[院] ○新谷奉史 高松高専 岡田憲司
高松高専[専] 十川貴文 光洋精工 小熊規泰

1 緒 言

国内外ともに長引く経済不況の中で、機械構造物は点検・保守を組み合わせ設計寿命を超えて長期使用される傾向がある。そのため、超長寿命域における機械構造用材料の疲労特性は、機械構造物の安全設計や信頼性確保の視点から重要な因子となってきている。しかし、長寿命域の疲労試験を新たに実施するには多大な時間がかかるため、これまで国内外で発表されたファクトデータの有効利用が重要になる。

そこで本研究では、材料強度確率モデル研究会(RGSAMS)の共同研究として行われた高強度鋼に対する最近の疲労試験結果ならびに国内外で報告された研究報告を、材料強度信頼性データベース(MSDRD)に入力することにより MSDRD を拡張した。また応力繰返し数 $N=10^8$ 回を超える超長寿命域の疲労データを含んだ疲労試験結果を MSDRD から抽出し、それらの2重 $S-N$ 特性を明らかにする解析方法を提案した。

2 MSDRD の拡充と検索結果

2.1 MSDRD の拡充 前述の通り、本研究では RGSAMS の共同研究として行われた高強度鋼に対する最近の疲労試験結果ならびに国内外で報告されたデータを、MSDRD に入力した。当該入力データの総行数と容量はそれぞれ、3000 行、0.5MB に達した。これにより、MSDRD は 82000 行、8.8MB から 85000 行、9.1MB の大きさに拡張され、利用価値が一段と向上した。

2.2 超長寿命域疲労データの検索 応力繰返し数が $N=10^8$ を超える超長寿命域の $S-N$ 特性を解析するため、以前に MSDRD に入力されていたデータと今回本研究で入力したデータを含めて、金属材料、疲労データ、それが超長寿命域のものを含むという3条件下で RGSAMS が開発した MSDRD に対する専用の検索・統計解析ソフトウェア(STANAD)を用いて検索し、抽出した。抽出したデータの材料と機械的特性、参照元を Table 1 に示す。表中にある“DSN”の記号は論文中に2重 $S-N$ 特性が記述されていたことを示す。

3 超長寿命疲労特性の解析

3.1 超長寿命 $S-N$ 特性 抽出したデータを $S-N$ 線図として表したものを Fig.1 に示す。図は横軸に破断繰返し数、縦軸に応力振幅をとった両対数グラフである。また図中で●印は RGSAMS が共同研究で行った高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)の結果であり、○印は MSDRD から抽出したその他の金属材料の疲労データである。図を見て明らかのように、プロットは様々な金属材料から得られた疲労データであるため、それぞれの強度レベルに応じて大きくばらついて分布している。その中でも、SUJ2 鋼の疲労データは Table 1 にあるように引張り強さが $\sigma_B=2316\text{MPa}$ と高いことから、分布の最上部に位置

していた。

3.2 σ_5 , σ_8 を用いた疲労データの標準化 2重 $S-N$ 曲線に対する新たな標準化手法として2つの応力値 σ_5 , σ_8 を用いることを提案する。ここで σ_5 は表面起点型破壊に対する $S-N$ 曲線で破断繰返し数 $N=10^5$ における疲労強度であり、 σ_8 は Fish-eye を伴う内部起点型破壊に対する $S-N$ 曲線で破断繰返し数 $N=10^8$ における疲労強度である。明確な2重 $S-N$ 線図では容易に決めることができる。

この手法を用いて Fig.1 中で2重 $S-N$ 特性が示された疲労

Table 1 Contents of the data extracted from MSDRD.

Material designation	E (GPa)	σ_B (MPa)	HV	Duplex S-N
42Cr-Mo4	216	1530	465	
Cr-Si (54SC6)	210	1692	510	DSN
Cr-Si (55SC7)	210	1800	500	
Cr-V (60CV2)	210	1800	435	
SG cast iron (SG52)	178	510	184	
Cr-V spring wire	210	1800	435	
Cr-Si spring wire	210	1800	500	
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo alloy (A)		1135		
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo alloy (B)		1043, 1144, 1145		
Ti-6Al-4V	108	1190		
SCM 415				DSN
SNCM 616				DSN
Udimet 500	192	1780		
17-4 PH	201	1365		
S10C			300	
S55C			350	
SCM 435			650	
S48C				
SCM 420				DSN
SUJ2		2316	737	DSN
SWRH62A		(1) 1733 (310°C) (2) 1777 (270°C) (3) 1804 (220°C)	(1) 556 (2) 602 (3) 657	

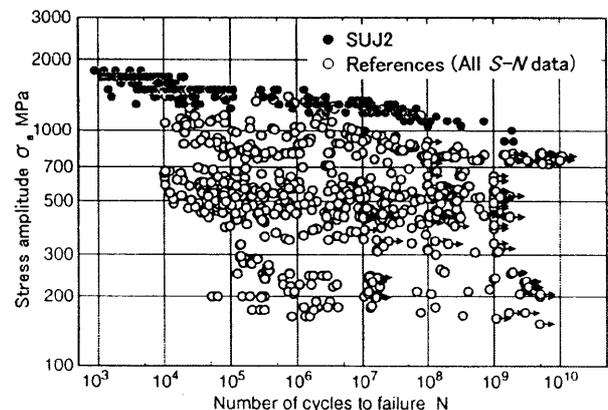


Fig. 1 $S-N$ diagram plotted all extracted data.

データを Fig.2 に再プロットした。□印, ■印は SUJ2 鋼の疲労データ, ○印, ●印は 2 重 S-N 特性を示すその他の金属材料の疲労データを示す。また□印, ○印は表面起点型破壊, ■印, ●印は内部起点型破壊を示す。図で明らかなように, 提案した手法によって一度に多種の材料に対して 2 重 S-N 曲線におけるそれぞれの破壊モードの S-N 曲線が明確に分離して表示することができた。図中に引かれている実線および破線は, それぞれの S-N 曲線の勾配を示している。

また, 図を見ると表面起点型破壊に対する S-N 曲線の勾配の方が, 内部起点型破壊に対する S-N 曲線の勾配よりも若干大きくなっている。一般に疲労き裂の進展速度は大気中よりも真空中のほうが遅いことが知られており, この勾配の違いもそのことに起因していると考えられる。この問題に対する解析的な解釈を次に述べる。

4 S-N 曲線の勾配の支配因子

前述したように, 2 重 S-N 線図において表面起点型破壊に対する S-N 曲線の勾配が, 内部起点型破壊に対する S-N 曲線の勾配よりも少し大きい特徴がみられた。この理由について, Paris のき裂進展則を用いて解析的に説明する。

Paris のき裂進展則は次式で示される。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

ここで a はき裂長さ, N は破断繰返し数, C と m は材料に依存する定数である。 ΔK は次式で与えられる応力拡大係数幅である。

$$\Delta K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

ここで σ は応力振幅である。式(2)を式(1)に代入すると

$$da/dN = \sigma\sqrt{\pi a}^m \quad (3)$$

この微分方程式を解くために変数を分離して両辺を積分すると,

$$\int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\sigma\sqrt{\pi a})^m} da = \int_{N_i}^{N_f} dN \quad (4)$$

ここで a_i , a_f はそれぞれ初期き裂長さ, 破断き裂長さであり, 同様に N_i , N_f はそれぞれ初期き裂発生までの応力繰返し数, 最終破断までの応力繰返し数である。ここで a_i は応力には依存せずほとんど一定であるとみなせるが, a_f は応力レベルによってその値が大きく異なるため, σ の関数であるといえる。ゆえに, このままでは積分の計算を行うことができない。そこで, a_f に近い値として a_f^* という定数を新たに考える。そしてき裂長さが a_f^* に達した際き裂進展速度 da/dN は十分大きいので, 応力レベルに関わらずすぐに a_f に達すると考える。そうすると a_f を a_f^* でほぼ近似することができ, 式(4)の両辺を積分することが可能になる。したがって, き裂が a_i から a_f に達するまでのき裂進展寿命 N_p は,

$$N_p = N_f - N_i = \frac{2}{C\sigma^m\pi^{m/2}(2-m)} \left(a_f^{*2-m} - a_i^{2-m} \right) \quad (5)$$

式(5)の右辺は応力振幅 σ を除いて全て定数である。式(5)の両辺に対数をとることにより,

$$\log \sigma = -\frac{1}{m} \log N_p + \beta \quad (6)$$

が得られる。ここで,

$$\beta = -\frac{1}{m} \log \left\{ \frac{2}{C\sigma^m\pi^{m/2}(2-m)} \left(a_f^{*2-m} - a_i^{2-m} \right) \right\} \quad (7)$$

である。

式(6)から, 横軸にき裂進展寿命, 縦軸に応力振幅をとった両対数グラフ上において, S-N 曲線の勾配は $-1/m$ で与えられることがわかる。したがって, S-N 曲線の勾配は Paris のき裂進展則との関係が解析的に明らかとなった。

これまでの実験的事実から, 疲労き裂が材料表面に達した後試験片表面を進展する時の速さは試験片内部よりかなり速いことが知られており, Paris 則における材料定数 m は, 大気中のき裂進展より真空中のき裂進展の方が大きい。このことから表面起点型破壊に対する 2 重 S-N 曲線の勾配の方が, 内部起点型破壊に対するそれよりも少し大きいことが示される。しかし疲労寿命は N_i と N_p の和で与えられるので, 材料の疲労特性を正確に把握するためには N_i を含めた考察が必要となる。

5 結 言

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 金属材料におけるの超長寿命域を含んだ新たな疲労試験結果を材料強度信頼性データベース(MSDRD)に入力し, MSDRD を 85000 行, 9.1 MB のサイズまで拡張した。
- (2) 表面起点型破壊の S-N 曲線と内部起点型破壊の S-N 曲線が重なることにより生じる 2 重 S-N 特性が, 多くの金属材料について存在することが再確認された。しかし, 実験を高速で行う超音波疲労試験で得られた疲労データは, 材料の 2 重 S-N 特性をあいまいにする傾向が見られた。
- (3) 2 重 S-N 特性は, 表面起点型破壊のデータに対しては $N = 10^5$ における疲労強度を用いて, また内部起点型破壊のデータに対しては $N = 10^8$ における疲労強度を用いて応力を標準化することにより, うまく表現することができた。
- (4) 表面起点型破壊に対する S-N 曲線の勾配は, 内部起点型破壊に対する S-N 曲線の勾配より若干大きくなる。このことは Paris のき裂進展則における材料定数 m の値が, 大気中のき裂進展時より真空中のき裂進展時において大きくなるという事実からうまく説明できた。

(参考文献・省略)

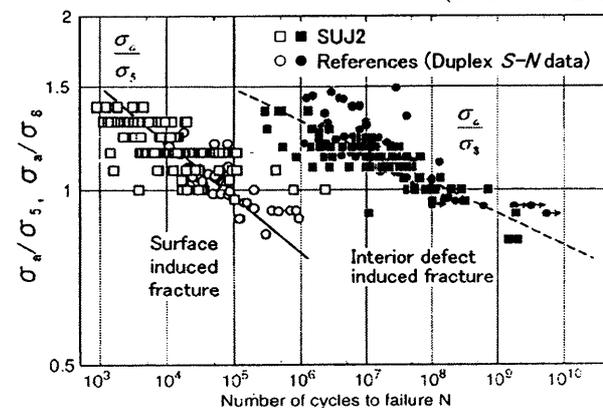


Fig. 2 $\sigma_a/\sigma_s - N$ and $\sigma_a/\sigma_s - N$ diagrams.