

金属材料疲労強度データベースによる 機械構造用鋼の回転曲げ疲労特性解析の試み

兵庫県大 ○花木 聡 香川高専 岡田憲司 明石高専 境田彰芳 広島大 菅田 淳
大阪工大 西川 出 立命館大 上野 明 立命館大 酒井達雄

An Approach for Evaluation of Rotating Bending Fatigue Characteristics of Structural Steels Based on “DATABASE ON FATIGUE STRENGTH OF METALLIC MATERIALS”

Satoshi HANAKI, Kenji OKADA, Akiyoshi SKAIDA, Atsushi SUGETA

Izuru NISHIKAWA, Akira UENO and Tasuo SAKAI

1 緒 言

機械・構造物の信頼性の確保において、設計における重要な基礎データである疲労強度データを集積、整理することは非常に有効である。このような観点から、日本材料学会では広範な金属材料を対象として疲労強度データを組織的に集積し、1982年に電子媒体として金属材料疲労強度データベースを刊行した。その後、1996年にはElsevierとの共同企画として、英文版のデータブックが海外出版された¹⁾。さらに、2010年より第3次データ収集として、これまでの高サイクル疲労を対象とした試験データに加え、超長寿命域における試験データの集積が進められている。これまで、日本材料学会金属材料疲労信頼性データ集積評価委員会（旧金属材料疲労信頼性評価・設計法検討委員会）では、金属材料疲労強度データベースに収録されたデータに対し学会標準²⁾を用いた解析を進めてきた。これらのうち、岡田らは低炭素鋼を対象として上記ソフトウェアを用いて得られた回帰係数の相関や分布特性について詳細に報告している³⁾。本報ではこれに続き、同標準を機械構造用鋼全般の疲労試験データに拡張して解析した結果について報告する。

2 検索結果と解析対象

日本材料学会で編集された DATABASE ON FATIGUE STRENGTH OF METALLIC MATERIALS に収録された機械構造用炭素鋼の疲労試験データに対し、(1) 試験片形状は丸棒平滑および砂時計型試験片（応力集中係数 1.00～1.09）、(2) 荷重条件は回転曲げ、(3) 試験温度は常温の3条件を設定し、該当データを検索した結果を Table 1 にまとめる。合計で 239 シリーズ、6058 点のデータが該当した。ここで、ここで、1 シリーズとは同一試験条件で応力レベルを順次変化させて疲労試験を実施して得られた 1 組の $S-N$ データを示す。

なお、酒井らの報告⁴⁾に基づき、S45C は調質材(Q&T)とそれ以外(EQT)に分類している。調質材に分類したシリーズはオーステナイトになる 850℃付近で焼入れした後、焼戻しを施したものである。ここで、焼戻し温度は JIS G 4051:2005(機械構造用鋼)の解説を参考に 450℃以上で焼戻しされたシリーズを Q&T とし、450℃未満で焼戻しされたシリーズは Q&T 以外に分類した。これらの

データシリーズに対し、JSMS 標準により $S-N$ 曲線を回帰する。ここで、鉄鋼材料については従来から明確な疲労限度を呈することが知られていることから、本報では(1)式による片対数斜交双曲線を用いることとした。

$$(\sigma - E)(\sigma + A \log_{10} N - B) = C \quad (1)$$

ここで、 σ は負荷応力、 N は疲労寿命、 E は疲労限度、 A は傾斜準線の勾配を示し、 B は $N=1$ に対応する負荷応力に対応し、 C は傾斜準線と水平準線の交点から $S-N$ 曲線までの上下方向の距離を与える。また、上記2準線の交点の横座標は限界繰返し数 N_w を意味し、 $N_w = (B - E) / A$ で与えられる。

Table 1 Number of series of carbon steel in JSMS Database

Material	Series	Plot	Material	Series	Plot
Pure Iron	4	67	S38C	1	350
S10C	46	1151	S40C	5	29
S12C	1	13	S45C(Q&T)	24	1067
S15C	28	203	S45C(EQT)	28	933
S20C	9	106	S48C	1	10
S25C	28	958	S50C	17	163
S30C	9	134	S55C	3	35
S33C	1	8	S58C	1	32
S35C	33	799	Total	239	6058

3 解析結果

解析対象としたデータに対し、片対数斜交双曲線モデルを回帰して得られたパラメータについて、各パラメータ間の相関を調査した。一例として、Table 2 に S10C、S35C および S45C に対して得られた相関係数を示す。解析対象としたシリーズは解析用ソフトウェアにより耐久限度を入力せずに回帰できたものとした。いずれの鋼種においても、引張強度 σ_B と疲労限度 E 、勾配 A と切片 B 、勾配 A と限界繰返し数 $\log N_w$ の間に比較的高い相関が見られた。同様の傾向は、低炭素鋼の解析結果³⁾や高強度鋼による解析結果において見られている。また、一部の鋼種では勾配 A と係数 C に高い相関が見られた。前述の通り C は傾斜準線と水平準線の交点から $S-N$ 曲線ま

での上下方向の距離を与えることから、 C が増大することにより S - N 曲線の勾配が低下すると考えられる。

Table 2 Coefficient of correlations of regression parameters

(a) S10C					
	A	B	C	E	$\log N_w$
σ_B	0.237	0.369	0.175	0.744	-0.225
A		0.971	0.872	0.212	-0.825
B			0.775	0.371	-0.803
C				0.135	-0.722
E					-0.324

(b) S35C					
	A	B	C	E	$\log N_w$
σ_B	0.245	0.538	-0.187	0.917	0.064
A		0.931	0.836	0.382	-0.858
B			0.588	0.635	-0.683
C				-0.019	-0.868
E					-0.106

(c) S45C(Q&T)					
	A	B	C	E	$\log N_w$
σ_B	0.314	0.400	0.076	0.638	-0.160
A		0.989	0.499	0.115	-0.691
B			0.485	0.228	-0.714
C				0.397	-0.369
E					-0.179

(d) S45C(EQT)					
	A	B	C	E	$\log N_w$
σ_B	0.741	0.781	0.900	0.903	-0.597
A		0.993	0.836	0.547	-0.842
B			0.830	0.592	-0.839
C				0.801	-0.668
E					-0.533

3.2 パラメータの分布特性

解析対象のデータに対し、片対数斜交双曲線モデルを回帰して得られたパラメータに対し、確率紙を用いて正規分布をあてはめた際の平均値、変動係数を Table 3(a) および(b)に示す。また、確率紙を用いて母数を推定する際に得られる相関係数を正規分布に対する適合度として Table 3(c)に示す。Table 3(a)において勾配 A と切片 B および耐久限度 E はいずれも炭素含有量の増加に伴って増加する傾向が見られた。一方で、耐久比を表す E/σ_B は逆に低下している。一方、Table 3(b)において変動係数の鋼種間の差は見られないが、 S - N 曲線の折れ曲がり点を決定する $\log N_w$ の変動係数は他のパラメータと比較して小さい傾向が確認できる。Table 3(c)において係数 C 以外はいずれも正規分布によりよく近似できることが確認できる。なお、係数 C は回帰において複数のシリーズで $C=0$ となり折れ線モデルに一致する例が見られ、これらの離散的なデータが含まれることにより相関係数が低下したと考えられる。また、S45C 調質材において $\log N_w$ の相関係数が低い理由として、実験範囲の関係から明瞭な折れ曲がりを示さなかったデータシリーズが含まれるためであると考えられる。

Table 3 Distribution of obtained regression parameters

(a) Mean value						
	A	B	C	E	E/σ_B	$\log N_w$
S10C	82.3	690.2	754.4	213.8	0.55	6.06
S15C	63.1	608.6	149.9	221.1	0.51	6.26
S25C	47.7	516.0	178.0	241.0	0.50	6.51
S35C	114.7	865.3	3389.7	266.5	0.45	5.86
S45CA	79.6	901.6	382.0	433.7	0.52	6.47
S45CB	72.2	685.2	1964.7	287.0	0.42	6.12
S50C	89.9	830.2	837.0	329.7	0.44	5.71

(S45CA: Q&T, S45CB: EQT)

(b) Coefficient of variance						
	A	B	C	E	E/σ_B	$\log N_w$
S10C	0.54	0.34	1.46	0.20	0.14	0.09
S15C	0.52	0.30	1.37	0.17	0.12	0.06
S25C	0.54	0.33	1.53	0.13	0.11	0.09
S35C	0.86	0.52	1.82	0.20	0.10	0.14
S45CA	0.64	0.32	1.37	0.08	0.06	0.18
S45CB	0.88	0.48	1.98	0.23	0.10	0.12
S50C	0.54	0.30	1.78	0.22	0.12	0.08

(S45CA: Q&T, S45CB: EQT)

(c) Coefficient of correlation						
	A	B	C	E	E/σ_B	$\log N_w$
S10C	0.83	0.90	0.68	0.99	0.14	0.96
S15C	0.90	0.92	0.82	0.99	0.12	0.98
S25C	0.93	0.94	0.78	0.85	0.11	0.98
S35C	0.86	0.89	0.62	0.86	0.10	0.92
S45CA	0.96	0.97	0.81	0.98	0.06	0.77
S45CB	0.82	0.84	0.53	0.86	0.10	0.96
S50C	0.97	0.99	0.63	0.95	0.12	0.97

(S45CA: Q&T, S45CB: EQT)

4 結 言

日本材料学会「金属材料疲労強度データベース」に収録される機械構造用炭素鋼のデータを検索し、本会発行の学会標準「 S - N 曲線回帰法」を用いて得られた S - N 曲線の回帰パラメータ間の相関や分布特性について調査した。各パラメータ間の相関を調べた結果、いずれの S - N 曲線回帰モデルにおいても、引張強度 σ_B と疲労限度 E 、勾配 A と切片 B 、勾配 A と限界繰返し数 N_w に相関が見られた。また、各パラメータは正規分布に従うことから、これらの組み合わせにより算出される時間強度や疲労限度の分布も正規分布に従うと予測される。今後、これらの知見をもとに各鋼種における S - N 特性の簡易推定法を構築していく予定である。

参 考 文 献

- 1) Editorial Committee of Database, "DATABASE ON FATIGUE STRENGTH OF METALLIC MATERIALS", (1996) JSMS.
- 2) 金属材料疲労信頼性評価基準- S - N 曲線回帰法-, JSMS-SD-6-08, (2008) 日本材料学会編.
- 3) 岡田憲司, 岡憲司, 菅田淳, 酒井達雄, 西川出, 境田彰芳, 材料, 56, pp.1170-1176 (2007).
- 4) 酒井達雄, 安井秀昭, 田中道七, 材料, 36, pp.915-921(1987).