106 微小欠陥をもつ材料の多軸疲労下限界と無害欠陥

Multiaxial Fatigue Thresholds for Materials Containing Small Defects and Non-Detrimental Defects

正 遠藤 正浩 (福岡大)

Masahiro ENDO, Fukuoka University, Jonan-ku, Fukuoka

Key Words : Multiaxial loading, Fatigue thresholds, Small defect, Criterion, $\sqrt{\text{area}}$ parameter model, Non-detrimental defect, Steels, Brass

1. 結 言

単軸荷重下における疲労強度に及ぼす微小欠陥、介在物、不均一相の影響については、ここ20年の間に急速に研究が進んだといえる^{(1),(2)}。本研究では、単軸、ねじりおよび組合せ荷重下における疲労強度におよぼす微小欠陥の影響の予測方法を提案してその有効性を確認することを目的としている。欠陥が非常に小さいときは、欠陥が疲労強度を低下させない無害欠陥になることは単軸疲労⁽³⁾やねじり疲労⁽⁴⁾では知られている。本研究では、組合せ荷重疲労における無害欠陥の限界寸法についても検討する。

2. 疲労下限界の予測法

2.1 単軸荷重下における疲労強度の予測法 欠陥が有害に作用しない場合の単軸荷重下の両振り疲労限度 σ_{w0} (MPa)は次式で予測できることが経験的に知られている。

$$\sigma_{w0} = 1.6HV \quad (1)$$

ここで、 HV : ピッカース硬さ(kgf/mm²)である。鉄鋼材料の場合は、式(1)の予測誤差は10%弱と考えてよい⁽²⁾。一方、欠陥が有害に作用する場合の単軸荷重下の両振り疲労限度 σ_w (MPa)は $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルで次式のように与えられている^{(2),(3)}。

$$\sigma_w = 1.43(HV + 120)/(\sqrt{\text{area}})^{1/6} \quad ; \text{表面欠陥} \quad (2)$$

$$\sigma_w = 1.41(HV + 120)/(\sqrt{\text{area}})^{1/6} \quad ; \text{表面直下の欠陥} \quad (3)$$

ここで、 $\sqrt{\text{area}}$: 最大引張り方向に垂直な面上への欠陥の投影面積の平方根(μm)である。式の予測誤差は多くの鉄系、非鉄系材料で約10%であることが確かめられている⁽²⁾。式(1)~(3)は、疲労試験を行わずに疲労強度が予測できる点が実用的である。

2.2 組合せ荷重下の疲労限度に対するクライテリオン 平滑材については、次のGoughら⁽⁵⁾の経験式が延性材料の実験結果とよく一致する。

$$(\sigma_0/\sigma_{w0})^2 + (\tau_0/\tau_{w0})^2 = 1 \quad (4)$$

ここで、 σ_0 と τ_0 は軸応力とねじり応力が単独で作用したときの疲労限度で、 σ_0 と τ_0 は組合せ応力の場合の疲労限度である。通常 σ_{w0} と τ_{w0} は疲労試験を行って決定しなければならない。

微小欠陥を有する欠陥材用のクライテリオンは、著者⁽⁶⁾がドリル穴材の組合せ疲労試験の観察結果と破壊力学的考察から次式を提案した。

$$\sigma_1 + k\sigma_2 = \sigma_w \quad (5)$$

ここで、 σ_1 と σ_2 は組合せ応力の両振り疲労限度 σ_0 と τ_0 における主応力振幅である。 k は応力2軸性を表わすパラメータである。組合せ軸ねじり荷重を受ける丸棒の場合は、 $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_d/2 \pm \sqrt{(\sigma_d/2)^2 + \tau_d^2}$ より次式が導かれる。

$$(1/\phi)^2(\tau_d/\sigma_w)^2 + (1/\phi - 1)(\sigma_d/\sigma_w)^2 + (2 - 1/\phi)(\sigma_d/\sigma_w) = 1 \quad (6)$$

ドリル穴やピット状欠陥では $\phi = \tau_w/\sigma_w \approx 0.85$ が解析的に与えられている⁽⁷⁾ので、式(6)は次式になる。

$$1.38(\tau_d/\sigma_w)^2 + 0.176(\sigma_d/\sigma_w)^2 + 0.824(\sigma_d/\sigma_w) = 1 \quad (7)$$

σ_w は式(2)または(3)を用いて予測できるので、式(7)は疲労試験が不用となり実用的である。先の研究では、人工微小穴をもつS35C焼なまし材⁽⁶⁾や球状黒鉛鋳鉄平滑材^{(6),(8)}にこの方法を適用して組合せ荷重下の疲労強度が精度よく予測されることを示した。

2.3 自然欠陥への適用 材料中の自然欠陥はしばしば平滑材の疲労強度を低下させばらつきを招く。すなわち、介在物が有害に作用する場合は、試験片の巨視形状が平滑材であっても、力学的には欠陥材として扱わなければならない。この観点から、鉄鋼材料の疲労強度に及ぼす非金属介在物の影響を定量評価して、ばらつきの下限値を予測する方法が村上ら⁽²⁾によって提案されている。

この方法の基本的手順⁽²⁾は、まず試験片の危険体積中に存在する最大寸法の自然欠陥の $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の値を予測する。これには、通常極値統計が用いられる。その後、その最大欠陥がもっとも危険な場所、すなわち表面に接するような表面直下に存在すると仮定することにより、 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の値を式(3)に代入して下限値 σ_{wl} を予測する。本研究では、 σ_{wl} の値をさらに式(7)の σ_w に代入して、組合せ荷重を受ける場合の疲労限度の下限値 σ_{al} と τ_{al} を予測した。

3. 使用材料および実験方法

使用材料はS35C鋼、SCM435鋼、高力黄銅である。S35Cは860°C 1時間保持→炉冷の焼なまし、SCM435は860°C焼入れ→550°C焼もどしを行った。高力黄銅は納入状態で使用した。化学成分を表1、機械的性質を表2に示す。試験片は直径10mm、長さ18~20mmの平行試験部をもつ丸棒である。試験片は、バフ研磨と電解研磨を併用して表面加工層を取除いた。一部の試験片は、図1に示す直径 $d = 40 \sim 500 \mu\text{m}$ のドリル穴を表面に加工したのち直径当り約 $2 \mu\text{m}$ の電解研磨を行った。疲労試験は、回転曲げ試験機と油圧サーボ制御軸ねじり試験機を用い、両振り($R = -1$)、同位相、正弦波の荷重制御で行った。疲労限度は、軸応力 σ とねじり応力 τ の比 τ/σ が一定

Table 1 Chemical composition (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Mg	Pb	Fe	Zn	Al
S35C	0.37	0.21	0.65	0.019	0.017	0.13	0.06	0.14	-	-	-	-	-	-
SCM435	0.36	0.30	0.77	0.027	0.015	0.02	0.02	1.06	0.18	-	-	-	-	-
Brass	-	-	0.021	-	-	59.1	-	-	-	-	0.0030	0.0032	bal	0.0047

Table 2 Mechanical properties

	Tensile strength MPa	Elongation % (G. L. : 80 mm)	Vickers hardness, HV
Annealed S35C	586	25	160
Quenched/tempered SCM435	1030	14	380
High strength brass	467	42	110

Fig. 1 Geometry of artificial hole

のもとで10⁷回の繰返しに耐えた最高の公称応力で定義した。

4. 実験結果と考察

今回検討した3種類の材料の人工欠陥材について、疲労限度の応力を10⁷回繰返した後穴周辺を観察したところ、微小なき裂が穴縁に発生していた。このき裂は、組合せ応力比 τ/σ によらず、ほぼ主応力 σ_1 に垂直なモードIき裂であった。この場合、予測法の基礎となっているモデル⁽⁶⁾が適用できるので、式(7)のクライテリオンは、S35C焼きなまし材⁽⁹⁾や球状黒鉛鉄⁽⁶⁾⁽⁸⁾と同様に、SCM435や高力黄銅にも適用できると期待される。

図2(a)~(c)に予測と実験結果の比較を示す。図中で、実線は式(4)による予測結果を示す。 σ_{w0} と τ_{w0} の値は、S35Cと高力黄銅では実験値を用いたが、SCM435では自然欠陥の影響によって真の値を実験的に得られないので、式(1)と低中強度の鉄鋼材料に対する平均値 $\tau_{w0}/\sigma_{w0} = 0.6^{(9)-(13)}$ を用いた。一点鎖線は、材料中の自然欠陥に注目して、式(3)と式(7)を用いて予測した結果を示す。ここで用いた最大欠陥の $\sqrt{areae_{max}}$ の値は、極値統計を用いて⁽²⁾試験片5本当りの期待値を算出した。S35CとSCM435の非金属介在物に対しては、それぞれ $\sqrt{areae_{max}} = 32\mu\text{m}$ と $24\mu\text{m}$ を得た。点線は人工欠陥(ドリル穴)について式(2)と式(7)を用いて得た予測疲労限度である。

図2(a)S35C: 人工欠陥が疲労強度に有害に作用する場合の実験結果は予測線(点線)とよい一致をしている。欠陥の寸法が小さくなるにつれて疲労強度は上がり、場合によっては欠陥は無害となる。図中に矢印で示した $d = 40\mu\text{m}$ または $100\mu\text{m}$ の穴をもつ人工欠陥材は穴以外の平滑部の強度によって疲労強度が決まった。この場合の実験値は欠陥材としての予測線(点線)より低い応力の平滑材の予測線(実線)とよい一致を示した。すなわち、欠陥の寸法が非常に小さい場合は、平滑部と欠陥部強度の競争となり、低い方の強度で決まることが理解される。実線と点線の関係から、 τ/σ が大きいほど無害欠陥の限界寸法は大きくなることが予想される。材料中の自然欠陥(介在物)に対する下限値(一点鎖線)と平滑部の強度(実線)の関係をみると、この材料では自然欠陥の影響は小さく、特に τ/σ が大きい範囲では無害であることが理解される。

図2(b)SCM435: S35Cに比べてピッカース硬度が高いので、式(1)から潜在的な平滑部の強度(実線)は高いことが予測される。しかし、欠陥が敏感に作用して、この材料の疲労強度に大きな影響を及ぼすことがわかる。 $d = 90\mu\text{m}$ の人工欠陥材の予測(点線)と実験結果はよく一致している。最大の自然欠陥(介在物)に基づいて予測した下限値(一点鎖線)も実線と大きな開きがあり、介在物の存在は無視できない。平滑材の実験結果はばらつきがあったので、図中では破断・非破断の結果をすべて示している。

図2(c)高力黄銅: $d = 100\mu\text{m}$ の欠陥材は、疲労強度より5MPa高い応力で平滑部に発生したき裂が起点となって破断したので、実質的には平滑材と等価である。しかし、式(1)の予測(実線)は実験値の傾向をうまく表していない。この原因は不明である。 $d = 500\mu\text{m}$ の欠陥材はすべて穴から発生したき裂が疲労限度を決定していた。実験値は予測(点線)によくあっている。

5. 結 言

簡単な予測式を用いた組合せ応力下の疲労強度の予測法について述べた。鋼(S35C, SCM435)と高力黄銅の実験結果と比

Fig. 2 Comparison of predicted with experimental results

較して高い予測精度を確認し、無害欠陥の限界寸法との関係についても検討した。

参 考 文 献

- (1) Murakami, Y. and Endo, M., *Int. J. Fatigue*, **16** (1994), 163.
- (2) 村上, 金属疲労: 微小欠陥と介在物の影響, (1993), 養賢堂.
- (3) 村上・遠藤, 材料, **35**-395 (1986), 911.
- (4) 村上・遠藤, 機論, **47**-415, A (1981), 249-256.
- (5) Gough, H. J. and Pollard, H. V., *Proc. Instn. Automobile Engrs.*, **31** (1937), 821.
- (6) Endo, M., In: *Small Fatigue Cracks: Mechanics, Mechanisms and Applications* (1999), 375-387, Elsevier Science.
- (7) Beretta, S. and Murakami, Y., *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **23** (2000), 97.
- (8) 遠藤, 機論, **67**-661, A (2001), 1520-1526.
- (9) Forrest, P. G., *Fatigue of Metals*, (1962), Pergamon Press.
- (10) Heywood, R. B., *Design against Fatigue*, (1962), Chapman and Hall.
- (11) 石橋 正, 金属の疲労と破壊の防止, (1967), 養賢堂.
- (12) 西谷・村上, 機論, **35** (1969), 1389.
- (13) Frost, N. E., Marsh, K. J. and Pook, L. P., *Metal Fatigue*, (1974), Oxford Univ. Press.