

構造用鋼材のプログラム荷重下での累積損傷度について

大本組 青山 功 京都大学大学院 学主員 小池 武
京都大学工学部 正員 亀田 弘行 京都大学工学部 正員 後藤 尚男

1. まえがき 本研究は、地震荷重のような大荷重をくり返し受ける場合の構造物の破壊機構を明らかにする研究の一環として構造用鋼材の塑性曲げ変動変位振幅試験を行なったものである。塑性疲労破壊基準としての累積損傷度の妥当性を検討するために、実験結果をMiner則に従って整理し、とくに確率統計的な面を中心に考察を加えた。

2. 実験の方法 本実験で使用した供試体は圧延されたままのS41H型鋼材で、 $100 \times 100 \times 6 \times 8 \text{ mm}$ である。全長 200 cm の供試体をスパン 140 cm の単純ばりとして用い、スパン中央部にくり返し塑性曲げ集中荷重を加えた。[sine波形, 0.5 Hz]。60本の供試体に対し、定変位振幅試験(SN曲線作成用)および3段変動変位振幅試験を実施した。3段荷重レベルとして靱性率振幅 2.0 (14 mm)、 2.5 (17.5 mm)、 3.0 (21 mm) の3種類の振幅レベルを用い、4つの組合せパターン A, B, C, D (表3参照) に対してプログラム試験を実施した。

3. 疲労破壊データの解析

3.1. SN曲線 塑性疲労破壊に対するSN曲線を求めるために観測データとして破断回数 N と靱性率振幅 $\hat{k}$ を用いるが、この両者の関係の推定にあたっていくつかの不規則因子が混入すると予想される。たとえば、供試体個々の降伏レベル E_y のばらつきや、機械の設定レベル $\hat{k}$ と実際の出力レベル k の比 $R = k/\hat{k}$ のばらつきなどである。これらの要因を考慮したSN曲線の関係式は次式で与えられる。

$$N(\hat{k} R E_y)^b = C \quad (1)$$

事前に得た降伏レベルの平均値 μ_{E_y} 、設定出力比 μ_R を用いて得た観測値 $(N, \hat{k})$ には、 E_y, R のばらつきの影響が存在するため、破断回数 N のばらつき δ_N は次式で与えられる。

$$\delta_N^2 = \delta_{NIR E_y}^2 + \mu_b^2 (\delta_R^2 + \delta_{E_y}^2) \quad (2)$$

ここで、 δ_N は観測値 $(N, \hat{k})$ を回帰分析して得られた N の変動係数、 μ_b は中乗 b の平均値である。 $\delta_{NIR E_y}$ は、機械設定誤差 R および材料の不均一性 E_y の影響が無い場合の塑性疲労破壊現象のばらつきを示す量となる。

3.2. 累積損傷度 鋼部材の組合せ荷重下での疲労破壊寿命予測に使用されるMiner則は、その結果にいくつかのばらつきが入る可能性がある。Miner則では、 $D_{cr} = \sum D_i$; $D_i = n_i/N_i$

で定義される限界累積損傷度 D_{cr} が 1 に達した時に破壊するものとされているが、損傷度 D_i が $S-N$ 曲線の N に基づいていることから、Miner 則のちがはらつき δ_{DM} は S_N に一致する。さらに損傷度の載荷回数比に与える非線形性、荷重履歴依存性など Miner 則で考慮できない量 D_{p1} によるばらつき $\delta_{D_{p1}}$ の存在や、荷重レベルの変化に伴う力学状態の変化による疲労寿命への影響 D_{p2} (たとえば、載荷レベル変更後の局部座屈の発生など) のばらつき $\delta_{D_{p2}}$ も存在する。以上の各要因を考慮すれば、限界損傷度 D_{cr} の平均値、変動係数は次式となる。

$$\mu_{D_{cr}} = \mu_{DM} \cdot \mu_{D_{p1}} \cdot \mu_{D_{p2}} = \mu_{D_{p1}} \cdot \mu_{D_{p2}} \quad (3)$$

$$\sigma_{D_{cr}}^2 = \sigma_{DM}^2 + \sigma_{D_{p1}}^2 + \sigma_{D_{p2}}^2 = \sigma_N^2 + \sigma_{D_{p1}}^2 + \sigma_{D_{p2}}^2 \quad (4)$$

4. 考察 本研究では、損傷度

D を 2 通りに定義した。

$$D_1 = n_i / N_i \quad (5)$$

$$D_2 = e_i / E_i \quad (6)$$

こゝで D_2 は、ある振動レベルでの全消費エネルギー E_i に対するその作用回数 n_i に対応した消費エネルギー e_i の比として定義される。破壊過程における材料特性の変化を反映しうる D_2 の方が損傷度評価としてより大きな物理的意義があると考え採用した。

	δ_N	μ_b	μ_c	δ_b	δ_c	r
100x100	0.096	-2.862	8.32×10^{-3}	0.158	0.067	-0.976
100x 50	0.143	-2.544	2.31×10^{-3}	0.061	0.091	-0.987

Table 1.

	δ_E	μ_b	μ_c	δ_b	δ_c	r
100x100	0.104	-0.94	316.0	0.048	0.073	-0.802
100x 50	-	-1.05	63.3	-	-	-

Table 2.

Table 3.

Loading pattern	$\mu_{D_{cr}}$	$\delta_{D_{cr}}$	δ_{DM}	$\sqrt{\Sigma \delta_{D_P}^2}$	$\mu_{D_{cr}}$	$\delta_{D_{cr}}$	δ_{DM}	$\sqrt{\Sigma \delta_{D_P}^2}$
A	0.907	0.125	0.096	0.078	0.956	0.376	0.104	0.361
B	1.080	0.199	0.096	0.174	1.169	0.424	0.104	0.411
C	1.305	0.267	0.096	0.249	1.420	0.432	0.104	0.419
D	1.403	0.321	0.096	0.306	1.489	0.462	0.104	0.450

$S-N$ 曲線の回帰分析結果 (表 1) より疲労破壊現象そのもののばらつき δ_{NIRty} は、たとえば $\delta_R = 0.02$, $\delta_{ty} = 0.02 \sim 0.026$ と仮定すれば $\delta_{NIRty} = 0.05 \sim 0.02$ 程度の大まきであり、塑性疲労破壊そのもののばらつきがかなり小さいことがわかる。

また、表 3 の破断回数 N を基準に整理した左側の表を見ると、組合せ荷重下での限界損傷度の平均値 $\mu_{D_{cr}}$ は、もし D_{p2} による影響がないと仮定した時、パターン A, B, C, D の順に $\mu_{D_{cr}} \approx 1$, $\mu_{D_{cr}} \approx 1$, $\mu_{D_{cr}} \approx 1$ の傾向になることが予想されるが、結果はむしろ A, B で $\mu_{D_{cr}} \approx 1$, C, D で $\mu_{D_{cr}} \approx 1.3 \sim 1.4$ と 2 組に分離するであろう。この 2 つのグループは局部座屈を誘発しやすい最大変位率振幅 3.0 が第一段階で出現するグループと第三段階で出現するグループに対応している。つまり、局部座屈の発生により、応力集中点が載荷初期からその点に固定される傾向にある A, B グループと、載荷点と局部座屈点に応力集中が分散して不確定要因が入りやすい C, D グループの差により、疲労寿命の差が発生したと考えれば、 $\sigma_{D_{cr}}$ の動向とも合せて表 3 の結果の理解が可能である。この意味で上述の限界累積損傷度 D_{cr} のばらつき $\sigma_{D_{cr}}$ は、局部座屈発生による所が大まきと予想される。実構造物材の疲労寿命予測において、局部座屈の発生が避けられない部材に対して局部座屈をばらつきの要因として与えることが重要であると言わねばを得ない。