

金沢大学工学部 正員 小坂為雄
 金沢大学工学部 正員 山森玄一
 福井県庁 正員 桑野善之

1. はじめに

構造物の低サイクル疲労破壊に関する多くの研究が進み実験データが示されるようになったが、それらを総合的に評価できる適切な破壊基準はいまだ確立していない。また実験は主としてひずみ制御や応力制御で行なわれたものであり、変位を制御パラメータとして行ったものや、橋梁等の鋼構造物に必ず含まれる切欠きを有する部材の低サイクル疲労実験もほとんど行なわれていない。本研究はそのような実情を考慮して変位制御による切欠き部材の低サイクル疲労実験を行ったものである。さらに地震動のような実動荷重を受ける構造物の期待累積損傷値算出の近似法についても考察したものである。

2. 実験方法および結果

実験は寸法効果を考慮してSS 41のH型鋼を用い、両端挟持状態で両振り変位制御で行った。荷重はスパン中央に線荷重で載荷した。切欠き形状およびゲージ貼付位置をFig. 1に、実験結果をTable 1に示す。Table 2はNo.3の供試体の繰返し回数に対する変形特性を示すもので、塑性ひずみ幅や1サイクル当り消費されるエネルギーの減少を表わす。これより疲労寿命中の10~20%の繰返し数の間で急激な変化を生じその後かなり安定していることがわかる。また実験は変位制御であったが、ひずみと公称応力 σ_n のヒステリシスループをみると応力制御とみて差し支えない状態であり、繰返し数とともにループは引張ひずみの正方向に移動する。ゲージ位置は切欠き底より5mmの位置であるため累積損傷仮説に実測値を用いても良好な結果が得られない。そのため二次元有限要素弾塑性解析を用いて切欠き底のC点とゲージ位置B点の塑性ひずみ集中度 α およびひずみ集中度 α' の変化を調べFig. 2に示してある。これよりB点のひずみが大きくなるにつれ、 α' 、 α とも変化が非常に小さくなることがわかる。よって実験結果をまとめるにあたっては塑性ひずみ0.01付近の塑性ひずみ集中度 α に近似的にすべてのケースに用い、仮説の検討を行った。ここで仮説検討の際必要な破断延性 ϵ_F は半純引張試験において得られた0.6/5を用いている。この結果をTable 3に示してある。誤差に関する上欄はB点のひずみをそのまま用いたものであり、下欄は塑性ひずみ集中度を用いて修正した値を用いたものである。疲労実験は一般に仮説の0.6~1.5の範囲にあるといわれているから、 α を用いて修正した値は形式力学的な低サイクル疲労の検討からみて良好であると思われる。本実験においてはCoffinの仮説が最も良一致を示したが、実験回数が少ないこと、また引張試験より得た ϵ_F をそのまま用いたことなど問題点が残されている。

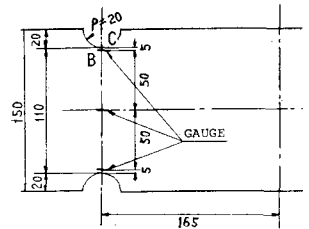


Fig. 1

Table 1

No.	Disp. (cm)	$\Delta\epsilon_p (\times 10^{-6})$	N1	N2
1	± 1.80	9836	210	327
2	± 2.00	10041	205	360
3	± 2.10	9196	157	279
4	± 2.20	13440	90	167
5	± 2.00 ± 2.20	10692	98	251

Table 2

Cycle	$\Delta\epsilon_p (\times 10^6)$		Area (Kg/cm ²)
2	3885	12190	66.75
3	3137	10790	53.07
5	2887	10170	53.56
10	2299	9930	46.40
20	2208	9745	48.09
40	2205	9476	42.13
70	2244	9455	37.57
100	2030	9090	39.49
130	1914	8544	41.56
160	1882	8571	39.56
200	1912	8614	38.26
240	1843	8254	36.13

Table 3

No.	$\Delta\epsilon_p \cdot N^{1/2}$	Coffin	Manson	Martin
		Error	Error	Error
1	0.1779	42.2	61.4	59.1
	0.2863	6.9	37.9	34.2
2	0.1904	38.1	58.7	56.3
	0.3067	0.0	33.5	29.5
3	0.1536	50.1	66.7	64.7
	0.2473	19.6	46.4	43.1
4	0.1734	43.6	62.4	60.1
	0.2796	9.1	39.4	35.7
5	0.1693	44.9	63.3	61.1
	0.2727	11.3	40.9	37.3

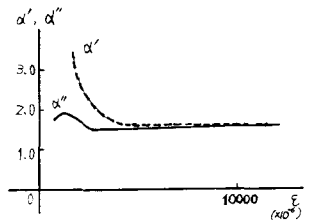


Fig. 2

3. 地震動による低サイクル疲労期待累積損傷値

Miles は Palmgren - Miner の理論を適用して疲労期待累積損傷値を求めたが、応力振幅と繰返し数との関係を使っており、低サイクル疲労の損傷値算出に用いるには適当ではない。前節に用いた仮説も平均ひずみが存在する場合には使用し難く、確率論的に期待累積損傷値を求める場合には Yao - Munse の仮説に従う。J. P. Tang と T. P. Yao により示された方法を用いる方が良いと思われる。文献 2) において Tang らはひずみ応答を結合ガウス過程とし、T秒間の期待累積損傷値を次式で求めている。

$$E[D(T)] = - \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \dot{\epsilon}(t) \left[\frac{\epsilon(t) - Y}{\Delta \epsilon_{21}} \right]^n P_{\epsilon \dot{\epsilon}}(\epsilon, \dot{\epsilon}; t) d\epsilon d\dot{\epsilon} dt \quad (1)$$

ここで $\epsilon(t)$ はひずみ応答過程、 Y は降伏ひずみ、 $\Delta \epsilon_{21}$ は $N=1$ で破壊するときの引張応力下の塑性ひずみ変化量である。また $P_{\epsilon \dot{\epsilon}}(\epsilon, \dot{\epsilon}; t)$ は時刻 t におけるひずみ応答の結合確率密度関数である。いまひずみに関する共分散マトリックスを作成する場合、 $G(t)$ をひずみ過程の包絡線関数、 $Re_{\epsilon}(t_2 - t_1)$ を非定常過程の自己相関関数とするなら、非定常過程の自己相関関数は

$$\psi_{\epsilon\epsilon}(t_1, t_2) = Re_{\epsilon}(t_2 - t_1) G(t_2) G(t_1) \quad (2)$$

により求められるが、これを共分散マトリックスに適用すると行列式は 0 となり、式(1)を用いることができない。そこで包絡線関数を Fig. 3 のように近似的に階段状に分割し、定常過程に対する式を求めると、区間 $[t_a, t_b]$ における期待累積損傷値は

$$E[D(t_a, t_b)] = (t_b - t_a) \int_0^{\infty} \frac{\omega_0}{2\pi [G(t)\alpha_{\epsilon}]^2} \cdot \epsilon \cdot \left[\frac{\epsilon - Y}{\Delta \epsilon_{21}} \right]^n \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{\epsilon^2}{[G(t)\alpha_{\epsilon}]^2} \right\} d\epsilon \quad (3)$$

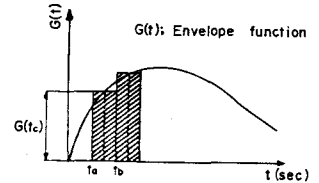


Fig. 3

により与えられる。ここで α_{ϵ}^2 は定常ひずみ応答過程の分散値、 ω_0 は固有円振動数である。Fig. 4 には定常過程に対する計算例、Fig. 5 には

$$G(t) = \exp(-a_1 t) - \exp(-a_2 t) \quad (4)$$

の包絡線関数に対する計算例が示してある。このような近似法を用いれば容易に非定常過程における期待累積損傷値を求めることができる。さらにこの期待累積損傷値から構造物の破壊確率の計算も可能である。Fig. 5 から明らかのように、構造物の固有円振動数が大きくなる程損傷は増大し、ある一定値に収束するが、このときの ω_0 は弾性応答における値とは異なることに注意しなければならない。また共分散マトリックス $[S]$ の逆行列が存在するならば、 S^{-1} と $[S^{-1}]$ の ij 要素として、累積損傷値は次のように導くことができる。

$$E[D(T)] = \int_0^T \int_0^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^{1/2} |S|^{1/2}} \left[\frac{\epsilon - Y}{\Delta \epsilon_{21}} \right]^n \frac{1}{S^{11}} \exp \left\{ -\frac{S^{11} S^{22} - (S^{12})^2}{2 S^{11} S^{22}} \epsilon^2 \right\} \times \left[\exp \left\{ -\frac{(S^{12})^2}{2 S^{11} S^{22}} \epsilon^2 \right\} + \sqrt{\frac{\pi}{2 S^{11} S^{22}}} S^{12} \epsilon (1 + \operatorname{erf}(\sqrt{\frac{S^{12}}{2 S^{11} S^{22}}} \epsilon)) \right] d\epsilon dt \quad (5)$$

参考文献

- 1) 大路清嗣; 低繰返し数疲労における累積損傷仮説の検討 J.S.M.E Vol. 70
- 2) J. P. Tang, T. P. Yao; Probability of Fatigue failure under earthquake Load, Technical Report CE-33 Univ. of New Mexico

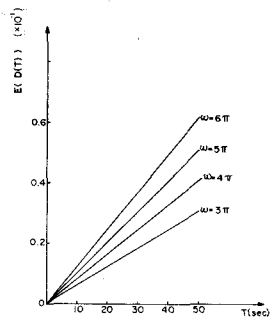


Fig. 4

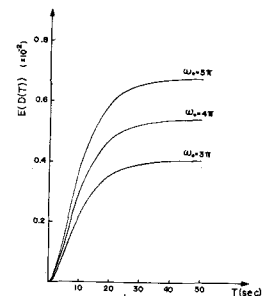


Fig. 5