(昭和 62 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

実働荷重下の疲労き裂伝播の研究 (第 3 報)

—狭帯域ランダム荷重下の疲労き裂進展挙動の予測手法—

正員 町 田 進* 正員 吉 成 仁 志*
 渡 辺 佐千雄* 森 田 明 保*
 石 橋 文 彦**

Fatigue Crack Propagation under Service Loading (The 3rd Report)

—Estimating Method for Fatigue Crack Growth under Narrow Band Random Loading—

by Susumu Machida, *Member* Hitoshi Yoshinari, *Member*
 Sachio Watanabe Akiyasu Morita
 Fumihiko Ishibashi

Summary

It is essential for the structural engineer to be able to estimate fatigue strength of structural members under the effect of randomness in service loading on the basis of the conventional fatigue test data. In the previous paper, fatigue crack propagation tests under narrow band random loading were carried out and the relationship between fatigue behaviors under random loading and constant amplitude loading was discussed. It was concluded that consideration of crack closure was indispensable for examination of fatigue behavior under random loading.

In this study, additional fatigue tests are conducted in order to obtain the data under different stress conditions. Crack closure phenomena of the specimens are automatically recorded over a long period of fatigue cycles using strain gage method aided by micro-computer system.

The significance of crack closure for understanding crack growth under variable-amplitude loading is emphasized and an estimating method for fatigue crack behavior under random loading is proposed.

1 緒 言

前報¹⁾では、実働荷重下の疲労き裂伝播挙動を、簡便な一定振幅荷重試験を基に予測する手法の確立を目的に、その第一段階として狭帯域ランダム荷重下の疲労き裂伝播試験を行った。そして、一試験当たり約 10 万波に亘ってき裂開口応力²⁾を計測し、その結果を基に一定振幅荷重試験とランダム荷重試験の関連を検討した。その結果、き裂開口応力を基にした等価有効応力拡大係数範囲による整理により、狭帯域ランダム荷重下の疲労き裂伝播挙動を一定振幅荷重試験より予測できる可能性を示した。

しかしながら、行ったランダム荷重試験は平均応力の比較的高いものばかりであり、その結果、き裂開口応力

レベルに比べ負荷した応力レベルが高くなる場合が多くなって(つまり、き裂が開いている状態がかなりの割合をしめることになって)、き裂の閉口現象の影響を検討するにはデータとして不十分であったと思われる。

そこで、本研究では、平均応力を下げ圧縮荷重も負荷されるようなランダム荷重試験を行って、より広範囲の応力条件に対応した考察を加えられるようにした。実験は、前報と同様にマイクロコンピュータ制御で行い、き裂伝播中約 10 万波に亘るき裂開口応力の自動計測を実施した。

2 実 験

2.1 供試材および試験片

供試材は板厚 4mm の JIS 規格構造用熱間圧延軟鋼板 SPHC である。これは前報と同規格であるがロットは異なる。Table 1 は供試材の化学成分と機械的性質で

* 東京大学工学部

** 東京大学大学院 (現(株)東芝)

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of steel used

Chemical compositions (%)					
CLASS	C	Si	Mn	P	S
SPHC	0.06	Tr	0.34	0.022	0.016
Mechanical Properties					
Yield strength (kgf/mm ²)		Tensile strength (kgf/mm ²)		Elongation (%)	
26.4		39.0		39.0

Fig. 1 Specimen shapes and dimensions

ある。試験片は中央切欠付引張試験片 (CCT) で、Fig. 1 に示すように幅 60mm のもの (タイプ a) と幅 130mm のもの (タイプ b) の 2 種の形状を使用した。切欠先端は 0.2mm 幅の機械切欠を加工後、低応力の繰返し荷重によって数 mm 疲労予き裂を進展させ、これを初期き裂とした。この試験片に対する応力拡大係数 K の算定には次式を用いた。

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{\sec(\pi \xi / 2)} f(\xi) \quad (1)$$

$$\text{ここに、} f(\xi) = 1 - 0.025 \xi^2 + 0.06 \xi^4$$

$$\xi = 2a/w$$

a : き裂半長, w : 試験片幅

2.2 実験方法

ランダム波のシミュレーションは、既報^{1),3)}と同様に 1 自由度力学系にランダム外力が作用する場合の応答を利用する方法によった。すなわち、1 自由度系の運動方程式

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2)$$

あるいは

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = f(t)/m \quad (3)$$

ここに、 $\omega = \sqrt{k/m}$: 固有振動数

$\zeta = c/2\sqrt{km}$: 減衰定数

$f(t)$: ランダム外力

を基にする方法である。

き裂開口応力の計測はひずみゲージ法を用いることに

Fig. 2 (a) Measurement of crack opening stress by strain gage method

Fig. 2 (b) Example of crack opening stress measurement

よって行った (Fig. 2 (a) 参照)。前報¹⁾では電気ポテンシャル法を用いたが、今回の実験では圧縮荷重も加わることが多く、その場合き裂面が圧縮荷重によりつぶされ電圧値が安定しなくなることなどもあって、ひずみゲージ法を用いることとした。き裂開口応力は Fig. 2 (b) に示すように、荷重-ひずみ関係のカーブの折れ曲がり点として求められる。この情報をマイクロコンピュータに取込むことにより、一試験当たり約 10 万波に亘ってき裂開口応力の自動計測を行った。なお、周波数はき裂開口応力計測中は 2Hz、それ以外は 6Hz とした。

3 実験結果

3.1 一定振幅荷重試験

供試材の疲労き裂伝播の基礎データを得るために、一定振幅荷重試験を 5 体実施した。特に応力比 R は、0.15 から -1.6 までと小さい範囲をねらっている。Table 2 に実験条件を示す。応力は公称載荷応力である。

実験結果より、き裂伝播速度 da/dN と式 (1) を基に算定した応力拡大係数範囲 ΔK の関係を示すと Fig. 3 のようになる。前報と同様、応力比 R の影響がいちじる

Table 2 Particulars of constant load amplitude fatigue tests

Specimen Number	Specimen type	Stress ratio R	Gross stress (kgf/mm ²)	
			σ_{max}	σ_{min}
C-5	a	0.15	11.76	1.76
C-6	a	-0.15	7.14	-1.07
C-7	a	-1.00	10.00	-10.00
C-8	b	-0.60	5.00	-3.00
C-9	a	-1.60	5.00	-8.00

Fig. 3 Relation between crack propagation rate da/dN and stress intensity factor range ΔK for constant load amplitude tests Fig. 4 Relation between measured effective stress range ratio U and stress ratio R for constant load amplitude tests

しい。実測したき裂開口応力 σ_{op} より次式で定義されるき裂開口応力比 U と R の関係は、Fig. 4 のようになっている。

$$U = (\sigma_{max} - \sigma_{op}) / (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad (4)$$

前報では $R > 0$ の一定振幅荷重試験を行い、 U と R の関係として

$$U = 0.745 + 0.314R \quad (5)$$

を得たが、 $R < 0$ ではこのような直線関係とはならないようである。

加藤ら⁴⁾ は広範囲の応力比条件下での U と R の関係式として

$$U = 1/(\alpha - R) \quad (6)$$

あるいは

$$U = \beta(1 - R)^\gamma \quad (7)$$

を提案している (α, β, γ は定数)。また Schijve⁵⁾ は Al 合金について $-1 < R < 1$ で成立する関係として

$$U = 0.55 + 0.35R + 0.1R^2 \quad (8)$$

を提案している。Fig. 4 には式 (6)～(8) の関係を示すが、今回の実験に対しては加藤らの提案した式 (7) において $\beta = 0.82$, $\gamma = -0.66$ としたものが最もよく適合するようである。

次に、有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を

$$\Delta K_{eff} = U \Delta K \quad (9)$$

で定義し、 da/dN と ΔK_{eff} の関係をみると Fig. 5 が得られる。このようにき裂開口を考慮すれば、応力比に無関係にき裂伝播速度を 1 本の直線で表わせることが確認できた。なお、Fig. 5 の直線は

$$da/dN = c(\Delta K_{eff})^m \quad (10)$$

$$c = 5.62 \times 10^{-11}, m = 3.69 \quad (\text{kgf}, \text{mm} \text{ 系})$$

で与えられる。

3.2 ランダム荷重試験

平均応力、応力範囲の rms 値を変えた狭帯域ランダム荷重試験を 6 体実施した。Table 3 に実験条件を示す。表で分かるように、平均応力が比較的高いものから

Fig. 5 Relation between crack propagation rate da/dN and effective stress intensity factor range ΔK_{eff} for constant amplitude tests

Table 3 Particulars of random loading fatigue tests

Specimen Number	Specimen type	ζ	σ_{mean} (kgf/mm ²)	$\Delta\sigma_{rms}$ (kgf/mm ²)
RN-6	a	0.03	0.00	6.43
RN-7	a	0.03	3.83	9.83
RN-8	b	0.03	8.00	7.83
RN-9	a	0.03	1.04	6.04
RN-10	b	0.03	-0.50	4.14
RN-11	a	0.03	-0.73	8.93

Fig. 6 (a) Distribution of measured stress range $\Delta\sigma$ as compared with Rayleigh distribution (RN-6) Fig. 6 (b) Distribution of measured effective stress range $\Delta\sigma_{eff}$ (RN-6)

圧縮側となるものまで幅広い条件となっている。

Fig. 6 (a) は試験体に負荷された応力範囲 $\Delta\sigma$ の分布の一例を示したものである。本実験のシミュレート法では理論的に $\Delta\sigma$ の分布は、確率密度関数が

$$f(x) = \frac{x}{\sigma_x^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad x > 0 \quad (11)$$

で与えられるレイリー分布に従うと予測されるが⁶⁾、Fig. 6 (a) より良好なシミュレートが行えていることが分かる。一方、Fig. 6 (b) は同じ試験体について実測された有効応力範囲 $\Delta\sigma_{eff}$

$$\Delta\sigma_{eff} = \begin{cases} \sigma_{max} - \max(\sigma_{op}, \sigma_{min}) : \sigma_{op} < \sigma_{max} \\ 0 : \sigma_{op} > \sigma_{max} \end{cases} \quad (12)$$

の分布を示したものである。 $\Delta\sigma$ の分布に比べ分布形が鋭くなっており、かなりの割合で $\sigma_{op} > \sigma_{min}$ となっていることが分かる。

さて、ランダム荷重試験結果の整理方法として前報と同様に以下の3種類の方法を比較する。 ΔK の計算に用

いた応力値 $\Delta\sigma$ の定義で示せば、

i) ΔK_{rms} に基づく場合⁷⁾

$$\Delta\sigma_{rms} = \left\{ \int_0^\infty \Delta\sigma^2 f(\Delta\sigma) d(\Delta\sigma) \right\}^{1/2} \quad (13)$$

ここで、 $f(\Delta\sigma)$: $\Delta\sigma$ の確率密度関数

ii) 等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} に基づく場合⁸⁾

$$\Delta\sigma_{eq} = \left\{ \int_0^\infty \Delta\sigma^m f(\Delta\sigma) d(\Delta\sigma) \right\}^{1/m} \quad (14)$$

ここで、 m : パリス則における指数

iii) 等価有効応力拡大係数範囲 $(\Delta K_{eff})_{eq}$ に基づく場合

$$(\Delta\sigma_{eff})_{eq} = \left\{ \int_0^\infty (\Delta\sigma_{eff})^m f'(\Delta\sigma_{eff}) d(\Delta\sigma_{eff}) \right\}^{1/m} \quad (15)$$

ここで、 $f'(\Delta\sigma_{eff})$: $\Delta\sigma_{eff}$ の確率密度関数

Fig. 7 (a), (b), (c) は各々上記 i), ii), iii) の方法に基づくランダム荷重試験の整理結果である。図には比較のために一定振幅荷重試験の結果も示してある。Fig. 7 (a), (b) では Fig. 3 の結果が、Fig. 7 (c) には Fig. 5 の結果が対応することに注意する必要がある。

これらの図から、 $(\Delta K_{eff})_{eq}$ による整理が最もまとまりがよく、また一定振幅荷重試験結果とも良好な一致を示すことが分かる。このことは、前報の $R > 0$ の試験においても得られた結論であり、少なくとも狭帯域ランダム荷重試験においては、広範囲の応力条件について成立するものと考えてよさそうである。

4 等価有効応力範囲 $(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ の推定

3. において等価有効応力拡大係数範囲 $(\Delta K_{eff})_{eq}$ による整理が有効であることが結論できたが、このことは与えられたランダム荷重の応力範囲の分布より等価有効応力範囲 $(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ が推定できれば、一定振幅荷重試験で得られる $da/dN \sim \Delta K_{eff}$ 関係を基にして、疲労き裂の進展挙動が予測できることを示している。前報では、この $(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ がほぼ $\Delta\sigma_{eq}$ に等しいものと考えてよいとしたが、これはあくまでも平均応力が比較的高いという条件下であった。Fig. 6 (a), (b) を比較しても分かるように、今回の平均応力の低い実験の場合には $(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ と $\Delta\sigma_{eq}$ はかなり差がでてくるものと予想される。

Table 4 は今回のランダム荷重試験結果より $\Delta\sigma_{eq}$, $(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ の値をまとめたものであるが、やはり平均応力が下ってくるにつれ、 $(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ と $\Delta\sigma_{eq}$ の差は大きくなってきている。もしここで $(\Delta\sigma_{eff})_{eq} = \Delta\sigma_{eq}$ とすれば、過度に安全側の予測となってしまふ。そこで、ランダム荷重における応力比 R_r 、開口応力比 U_r なるものを次式で便宜的に定義すれば

$$R_r = \frac{\sigma_{mean} - 1/2 \cdot \Delta\sigma_{eq}}{\sigma_{mean} + 1/2 \cdot \Delta\sigma_{eq}} \quad (16)$$

Fig. 7 (a) Relation between da/dN and ΔK_{rms} (ΔK based on $\Delta \sigma_{rms}$) as compared with the results of constant amplitude tests

Fig. 7 (b) Relation between da/dN and ΔK_{eq} (ΔK based on equivalent stress range) as compared with the results of constant amplitude tests

Fig. 7 (c) Relation between da/dN and $(\Delta K_{eff})_{eq}$ (ΔK based on effective equivalent stress range) as compared with the results of constant amplitude tests

$$U_r = (\Delta \sigma_{eff})_{eq} / \Delta \sigma_{eq} \quad (17)$$

R_r と U_r の関係は Fig. 8 (a), Fig. 8 (b) のようになる。このような R_r, U_r なる量を考えたのは、一定振幅荷重下においては U と R の関係がうまく σ_{op} を表現しており、ランダム荷重下においても U ないし R に相当する量を定義すれば、同様に σ_{op} の特性を表現できる可能性があると思われたためである。Fig. 8 (a) は前報で得られた $R > 0$ の場合のデータ、Fig. 8 (b) が今回の実験データである。いずれの場合も一定振幅試験で得られる $U \sim R$ 関係にはほぼ一致することが分かる。

このように広範囲の応力条件に対し $U \sim R$ 関係と $U_r \sim R_r$ 関係が一致することは、重要な意味を持つ。すなわち、与えられるランダム荷重の応力範囲の分布より $\Delta \sigma_{eq}$ は式 (14) で計算できるので、式 (16) よりその場合の R_r が求まる。一方、一定振幅荷重試験を行って $U \sim R$ 関係を求めておけば、これから U_r を求めることができ、したがって $(\Delta \sigma_{eff})_{eq}$ の値を予測できることになる。

以上より、狭帯域ランダム荷重下の疲労き裂伝播挙動を予測するには、以下の手順に従えばよいことになる。

Table 4 Comparison between $(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ and $\Delta\sigma_{eq}$ for random fatigue tests

	σ_{mean} (kgf/mm ²)	$\Delta\sigma_{eq}$ (kgf/mm ²)	$(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ (kgf/mm ²)	R_r	U_r
RN-6	0.00	7.30	4.57	-1.00	0.63
RN-7	3.83	11.17	8.81	-0.19	0.79
RN-8	8.00	8.94	8.81	0.28	0.99
RN-9	1.04	6.84	4.19	-0.53	0.61
RN-10	-0.50	4.71	2.24	-1.54	0.48
RN-11	-0.73	10.20	6.84	-1.33	0.67
$R_r = \frac{\sigma_{mean} - 0.5\Delta\sigma_{eq}}{\sigma_{mean} + 0.5\Delta\sigma_{eq}}, \quad U_r = \frac{(\Delta\sigma_{eff})_{eq}}{\Delta\sigma_{eq}}$

Fig. 8(a) Relation between U_r and R_r (random loading fatigue tests) as compared with relation between U and R (constant load amplitude tests) [Data from the previous report¹⁾]

Fig. 8(b) Relation between U_r and R_r (random loading fatigue tests) as compared with relation between U and R (constant load amplitude tests)

①一定振幅荷重試験を応力比 R を変えて行い、 $U \sim R$ 関係を求めておく。一方、 σ_{op} の計測も行つて $da/dN = c(\Delta K_{eff})^m$ の定数 c, m を求めておく。

②構造物に加わると予想される応力範囲 $\Delta\sigma$ の分布 $f(\Delta\sigma)$ より①の m を用いて

$$\Delta\sigma_{eq} = \left\{ \int_0^\infty \Delta\sigma^m f(\Delta\sigma) d\Delta\sigma \right\}^{1/m}$$

を算定し、平均応力 σ_{mean} より

Fig. 9 Procedure for predicting fatigue crack propagation behavior under random loading from constant load amplitude test

$$R_r = \frac{\sigma_{mean} - 1/2 \cdot \Delta\sigma_{eq}}{\sigma_{mean} + 1/2 \cdot \Delta\sigma_{eq}}$$

を算定する。①の $U \sim R$ 関係より U_r を求めれば

$$(\Delta\sigma_{eff})_{eq} = U_r \Delta\sigma_{eq}$$

として $(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ が算定できる。

③構造物における $(\Delta K_{eff})_{eq}$ は、②の $(\Delta\sigma_{eff})_{eq}$ より

$$(\Delta K_{eff})_{eq} = (\Delta\sigma_{eff})_{eq} \sqrt{\pi a} \cdot F$$

ここに、 F ：形状補正係数

の形となるから、①で得られた c, m を用いて

$$da/dN = c(\Delta\sigma_{eff})_{eq}^m (\sqrt{\pi a} \cdot F)^m$$

として構造物での疲労き裂伝播挙動の予測ができることになる。

Fig. 9 は以上の手順をまとめてフローチャートとしたものである。

5 結 言

簡便な一定振幅荷重試験結果より、ランダム荷重下の疲労き裂伝播挙動を予測することを目的に、前報に引き続いて、実験的検討を行った。得られた結果を以下に要約する。

(1) 比較的小さい応力比 R についての一定振幅荷重試験結果においては、 R と開口応力比 U の関係は加藤らの提案した

$$U = \beta(1-R)^{\gamma}$$

より表わせる。本実験の場合 $\beta=0.82, \gamma=-0.66$ であつた。

(2) 一定振幅荷重試験における da/dN は、通常の ΔK で整理すると R の影響を大きく受けるが、き裂開口応力を基にした有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} で整理すれば、 R によらず1本のカーブで表わせることを R の小さい範囲においても確認した。

(3) 実施した狭帯域ランダム荷重試験における da/dN は ΔK の rms 値 ΔK_{rms} ないし等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} による整理ではまとまりが悪く、一定振幅荷重試験との対応がつかないが、き裂開口応力を基にした等価有効応力拡大係数範囲 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{eq}}$ で整理すればまとまりもよく、一定振幅荷重試験の $da/dN \sim \Delta K_{\text{eff}}$ 関係と良好な一致を示すことを、平均応力の比較的低い場合についても確認した。

(4) ランダム荷重試験において

$$R_r = \frac{\sigma_{\text{mean}} - 1/2 \cdot \Delta \sigma_{\text{eq}}}{\sigma_{\text{mean}} + 1/2 \cdot \Delta \sigma_{\text{eq}}}$$

$$U_r = (\Delta \sigma_{\text{eff}})_{\text{eq}} / \Delta \sigma_{\text{eq}}$$

なる量を定義すると、 R_r と U_r の関係は、一定振幅荷重試験における R と U の関係とほぼ一致する。このことは、ランダム荷重下の $(\Delta \sigma_{\text{eff}})_{\text{eq}}$ を簡便な一定振幅荷重試験結果より推定できることを意味し、したがってランダム荷重下の疲労き裂伝播挙動の予測が行えることになる。

最後に、本研究は文部省科学研究費の補助を受けて実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 町田 進, 吉成仁志, 渡辺佐千雄, 森田明保: 実働荷重下の疲労き裂伝播の研究 (第2報)—狭帯域ランダム荷重における進展挙動のき裂開口応力による検討—, 日本造船学会論文集, 第160号 (1986), pp. 486-494.
- 2) Elber, W.: The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 486 (1971), pp. 230-240.
- 3) 町田 進, 大岡俊之, 渡辺佐千雄, 森田明保: 実働荷重下の疲労き裂伝播の研究 (第1報)—ランダム荷重とブロック荷重の比較—, 日本造船学会論文集, 第154号 (1983), pp. 396-406.
- 4) 加藤昭彦, 栗原正好, 川原正言: 広範囲の応力比条件下での疲労き裂伝播速度式の検討—き裂開閉口挙動に基づいた考察—, 日本造船学会論文集, 第153号 (1983), pp. 336-343.
- 5) Schijve, J.: Some Formulas for the Crack Opening Stress Level, Eng. Fract. Mech. Vol. 14 (1981), pp. 461-465.
- 6) 岡村弘之, 板垣 浩: 強度の統計的取扱い, (1979) 培風館.
- 7) Barsom, J. M.: Fatigue—Crack Growth under Variable Amplitude Loading in ASTM A 514-B Steel, ASTM STP 536, (1973), pp. 147-167.
- 8) Japan Welding Engineering Society Standard: Method of assessment for defects in fusion-welded joints with respect to brittle fracture, WES 2805—1980.