ランダム荷重下での疲労亀裂伝播 (第 4 報)

——ランダム荷重下およびブロックプログラム
荷重下での疲労亀裂伝播の比較——

正員 岩 崎 紀 夫* 正員 加 藤 昭 彦*
正員 川 原 正 言*

Fatigue Crack Growth under Random Loading (4th Report)
——Comparison between Random Loads and Block Programmed Loads——

by Toshio Iwasaki, *Member* Akihiko Katoh, *Member*
Masanori Kawahara, *Member*

Summary

Fatigue crack growth under random loading has been extensively studied since nearly a decade in relation with the design of offshore structures, ship hulls, pressure vessels and so on.

For the sake of simplicity, random loads in service conditions are often simulated by block programmed loads in laboratory fatigue tests. However, very few studies have been conducted on the difference of fatigue crack growth behaviour between random loads and block programmed loads.

The authors previously presented an experimental study on fatigue crack growth under block programmed loads, and discussed on the effect of block size on fatigue crack growth life. A proposed model gave a good prediction of fatigue crack growth life in block programmed loading tests.

In the present paper, fatigue crack growth tests were performed under three different types of block or random loads. Experimental results show that fatigue crack growth behaviour under random loads is very similar to that under block programmed loads with short periods. Miner's rule gave a non-conservative estimation for crack growth life under both random and short block loads. Life estimation by the model previously proposed agreed well to the experimental results.

記 号

A : 擬似乱数
 a : 亀裂半長さ
 a_s : 変動荷重開始時の亀裂半長さ
 a_{GY} : 試験片全面降伏時の亀裂半長さ
 C : Paris 則の定数
 ΔK : 応力拡大係数範囲
 ΔK_{rms} : 応力拡大係数範囲の 2 乗平均平方根値
 $(\Delta K^4)^{1/4}$: 応力拡大係数範囲の 4 乗平均 4 乗根値
 m : Paris 則の指数
 N : 繰返し数
 $N_{Meas.}$: 実測寿命
 N_{Miner} : 線形重畳則による推定寿命

$N[\Delta\sigma_{rms}]$: $\Delta\sigma_{rms}$ を用いた推定寿命
 $N[(\Delta\sigma^4)^{1/4}]$: $(\Delta\sigma^4)^{1/4}$ を用いた推定寿命
 R : 応力比
 W : 試験片幅
 da/dN : 亀裂伝播速度
 σ_{mean} : 平均応力
 $\Delta\sigma$: 応力範囲
 $\Delta\sigma_{rms}$: 応力範囲の 2 乗平均平方根値
 $(\Delta\sigma^4)^{1/4}$: 応力範囲の 4 乗平均 4 乗根値

1 緒 言

海洋構造物, 船舶をはじめとする種々の溶接構造物の疲労設計において, 近年, フェールセーフ設計, 欠陥許容設計など疲労亀裂の発生寿命とともにその伝播寿命をも重視した設計法の採用されることが多くなった。これ

* 日本鋼管(株)技術研究所

らの設計法では、より正確な疲労寿命の予測ならびにより適切な検査期間の設定などの必要性から、対象とする構造物に働くランダム荷重下での疲労亀裂伝播に大きな関心が払われるようになってきた。

ランダム荷重下での疲労亀裂伝播に対しては、今まで Miner 則で代表される線形重畳則が手法の簡便さから多用されているものの、大小荷重間の相互干渉による亀裂伝播の加速、遅延を考慮していないために、その推定寿命は実際の寿命とかけ離れた場合が多い。このような状況の下で、ランダム荷重下での疲労亀裂伝播の研究の必要性が認識され、ここ数年来系統立てた研究がいくつか進められつつある^{1),2)}。

ランダム荷重疲労試験は、実験ならびにデータ解析の煩雑さ、さらには高精度の疲労試験機を必要とすることなどから種々の制約を受ける。そこで、ランダム荷重を荷重頻度分布の等しいブロックプログラム荷重に置き換えた比較的簡便な実験により、疲労亀裂伝播の推定がなされることが多い。したがって、ランダム荷重下とブロックプログラム荷重下での疲労亀裂伝播挙動を比較検討することは、構造物設計への応用において意義の大きいものと考えられるが、現在までにこの種の研究例は比較的小さい³⁾。

筆者らは、第1報において⁴⁾、ランダム荷重下での疲労亀裂伝播の推定に最も大きな障害になっていると考え

られる引張過大荷重による亀裂伝播の遅延現象について考察した。また、第2報、第3報では^{5),6)}、ブロックプログラム荷重下での疲労亀裂伝播挙動について考察し、亀裂伝播に及ぼすブロックサイズおよび平均応力の影響を明らかにするとともに、その亀裂伝播挙動を推定する解析モデルを提案した。

本論文では、ほぼ荷重頻度分布の等しいランダム荷重下とブロックプログラム荷重下での疲労試験から、両者の亀裂伝播挙動の対応付けを行なった。また、ランダム荷重下での亀裂伝播に及ぼすランダムサイクル長さの影響、および亀裂伝播寿命推定法についても考察を試みた。

なお、実験に用いたランダム荷重波形は、波形計数を明確にするために、周波数、ならびに平均応力または応力比が一定で大きさのみがランダムとなる波形であり、重畳波形は取扱っていない。

2 実 験

2.1 実験の種類

本論文では、次の3つの変動荷重パターンを解析の対象とした。

(1) ブロックプログラム荷重

(2) 出現する各荷重範囲の大きさはブロックプログラム荷重と同一で、その出現順序のみがランダムとなる荷重パターン。(Kタイプランダム荷重と記述する)

Fig.1 Loading patterns studied in this paper

(3) 各荷重範囲の大きさ, 出現順序ともランダムとなる荷重パターン。(Aタイプランダム荷重と記述する)

以上の3つの変動荷重パターンに対し, それぞれ

- (i) 完全片振り ($R=0$) 条件
- (ii) 平均応力が 10 kgf/mm^2 と一定の条件
- (iii) 平均応力が 5 kgf/mm^2 と一定の条件
- (iv) 平均応力が 0 と一定 (完全両振り, $R=-1$) の条件

の4条件下で亀裂伝播試験を実施した。

Fig. 1 に, 上述の変動荷重パターンを示す。Fig. 1(a)(c)(e) は, $R=0$ の変動荷重パターンを表わし, Fig. 1(b)(d)(f) は, 平均応力一定の変動荷重パターンを表わしている。

ブロックプログラム荷重は, Fig. 1(a)(b) に示すように, 1ブロック内の応力範囲が漸増漸減する3応力レベル5ステップのものである。1ブロック内の応力範囲は, $R=0$ の場合 $10, 15, 20 \text{ kgf/mm}^2$, 平均応力一定の場合 $10, 20, 30 \text{ kgf/mm}^2$ の3応力レベルであり, それぞれの出現頻度は100対10対1と一定である。また, ブロックサイズは, 1ブロック内での最大応力範囲の繰返し数が $1 \sim 100$ サイクルまで, すなわち1ブロック内

での総繰返し数が $111 \sim 11,100$ サイクルまで変化させている。

Kタイプランダム荷重は, Fig. 1(c)(d) に示すように, 出現する各応力範囲がブロックプログラム荷重の場合と同一で, $R=0$ の場合 $10, 15, 20 \text{ kgf/mm}^2$, 平均応力一定の場合 $10, 20, 30 \text{ kgf/mm}^2$ の3応力レベルであり, その出現順序がランダムとなる荷重パターンである。また, それぞれの応力範囲の出現頻度もほぼ100対10対1である。なお, 1ユニット内でのランダムサイクルの長さは666サイクルである。

Aタイプランダム荷重は, Fig. 1(e)(f) に示すように, 各応力範囲の出現範囲が $R=0$ の場合は $10 \sim 20 \text{ kgf/mm}^2$, 平均応力一定の場合は $10 \sim 30 \text{ kgf/mm}^2$ であり, 応力範囲の大きさ, 出現順序ともランダムとなる荷重パターンである。なお, 1ユニット内でのランダムサイクルの長さは, $R=0$ および平均応力が 5 kgf/mm^2 の場合のみ222, 2,500サイクルの2種類であるが, 他の場合はいずれも222サイクルである。

KタイプおよびAタイプランダム荷重は, マイクロコンピュータにより, 0 から 1 までの擬似乱数を発生させ, 次式により応力範囲に換算した。

Kタイプランダム荷重:

(a) $R=0$

(b) $\sigma_{\text{mean}} = \text{Const.}$

Fig. 2 Variable stress range distributions

Table 1 Characteristic value of variable amplitude loading

Loading Pattern	Block or Unit Size (cycles)	$R=0$				$\sigma_{\text{mean}}=10, 5, 0 \text{ kgf/mm}^2$			
		$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_{\text{rms}}$	$(\Delta\sigma^4)^{1/4}$		$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_{\text{rms}}$	$(\Delta\sigma^4)^{1/4}$	
Block Programmed Load	111-11100	10, 15, 20	10.7	11.1		10, 20, 30	11.6	13.2	
K-Type Random Load	K-1 666	10, 15, 20	10.6	11.0		10, 20, 30	11.5	13.2	
	K-2 666	10, 15, 20	10.6	11.0		10, 20, 30	11.4	13.0	
A-Type Random Load	A-1 222	10 - 21	12.2	12.6		10 - 32	14.6	15.9	
	A-2 222	10 - 21	12.3	12.8		10 - 31	14.9	16.5	
	A-3 2500	10 - 28	12.4	12.8		10 - 42	14.9	16.6	

stress : kgf/mm^2

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma = S_1; \quad 1 \geq A > 10/111 \\ \Delta\sigma = S_2; \quad 10/111 \geq A > 1/111 \\ \Delta\sigma = S_3; \quad 1/111 \geq A \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

して Figs. 4~7 に示す。Figs. 4~7 より、ランダム荷重下での亀裂伝播曲線は、ブロックプログラム荷重の場合と同様、ランダム荷重負荷開始直後には上に凸となり、引張過大荷重負荷時の delayed retardation に似た亀裂伝播現象が生じている。

3 考 察

3.1 亀裂伝播に及ぼすランダムサイクル長さの影響

Figs. 4~7 より、ブロックプログラム荷重下での疲労亀裂伝播は、たとえ各応力ステップの出現頻度が同一であってもブロックサイズに大きく影響を受け、ブロックサイズが小さくなるにつれて速くなっている。

そこで、ランダム荷重下での疲労亀裂伝播に対しても

1 ユニットのランダムサイクル長さの影響を検討した。Fig. 8 は、A タイプランダム荷重において、1 ユニットのランダムサイクルが 222 サイクルと 2,500 サイクルの場合の疲労亀裂伝播曲線を比較したものである。 $R=0$ および $\sigma_{\text{mean}}=5 \text{ kgf/mm}^2$ のいずれの場合とも、1 ユニットのランダムサイクルの短い方が亀裂伝播はわずかに速くなっているものの、ブロックプログラム荷重のブロックサイズの影響にみられるような大きな差は生じていない。したがって、ランダム荷重下での疲労亀裂伝播に及ぼすランダムサイクル長さの影響は比較的小さいものと考えられる。なお、以下の考察では、A タイプランダム荷重は、222 サイクルのランダムサイクルのデータを用いている。

Fig. 5 Fatigue crack growth curve ($\sigma_{\text{mean}}=10 \text{ kgf/mm}^2$)

Fig. 6 Fatigue crack growth curve ($\sigma_{\text{mean}}=5 \text{ kgf/mm}^2$)

3.2 ランダム荷重下とブロックプログラム荷重下での疲労亀裂伝播の比較

Figs. 4~7 において, $\sigma_{\text{mean}}=0$ ($R=-1$) の場合を除き, Kタイプランダム荷重下での疲労亀裂伝播曲線は, いずれも, 1ブロック中に最大応力が1サイクルだけ負荷されるブロックサイズが最も小さい場合のブロックプログラム荷重下での伝播曲線にほぼ一致している。一方, Aタイプランダム荷重下での疲労亀裂伝播は, Table 1 に示した $\Delta\sigma_{rms}$ あるいは $(\Delta\sigma^4)^{1/4}$ の値が, ブロックプログラム荷重およびKタイプランダム荷重の値よりも大きいことから, 両者の場合よりも速くなっている。

なお, $\sigma_{\text{mean}}=0$ ($R=-1$) の場合については, 3.5項で考察することとし, 以下では $R=0$ および $\sigma_{\text{mean}}=10, 5 \text{ kgf/mm}^2$ の場合について考察する。

Figs. 4~7 におけるKタイプとAタイプランダム荷重

下での疲労亀裂伝播の相違が, 両者の応力範囲の違いのみに原因しているかどうかを検討するために, 亀裂伝播速度と ΔK 値の関係を調べた (Fig. 9 (a)~(d))。Fig. 9 において, 縦軸の亀裂伝播速度は, ランダム荷重負荷開始直後にみられる亀裂伝播速度の急変領域を除いたほぼ定常伝播と考えられる領域で求めた。また, Table 3 に前報⁹⁾で求めた種々の応力比に対する一定振幅荷重下での疲労亀裂伝播試験から得られた Paris 則の

Table 3 Constants in Paris' formula for various stress ratios

	$R=\sigma_{\text{min}}/\sigma_{\text{max}}$				
	0.50	0.33	0	-0.30	-1.00
C	6.66×10^{-11}	3.33×10^{-11}	6.40×10^{-13}	7.59×10^{-13}	1.75×10^{-13}
m	3.30	3.40	4.00	3.88	4.00

Fig. 7 Fatigue crack growth curve ($\sigma_{\text{mean}}=0$, $R=-1$)

Fig. 8 Comparison of fatigue crack growth curve between short random unit and long ones.

(a) $R=0$ (b) $\sigma_{\text{mean}}=10 \text{ kgf/mm}^2$ (c) $\sigma_{\text{mean}}=5 \text{ kgf/mm}^2$ (d) $\sigma_{\text{mean}}=0, R=-1$
 Fig. 9 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Fig. 10 Comparison of fatigue crack growth curves between random loads and block programmed loads

C, m 値を示すが、この m 値がいずれの応力比に対しても4ないしはそれに近い数値となっていることから、Fig. 9 の横軸の ΔK 値は、ほぼ線形重畳則に一致する4乗平均4乗根の値 $(\overline{\Delta K^4})^{1/4}$ で整理した。

Fig. 9 (a)~(d) において、KタイプおよびAタイプランダム荷重下での亀裂伝播速度は、いずれの応力比あるいは平均応力の場合ともほとんど差のない結果となっている。このことから、Figs. 4~7 における両者の亀裂

伝播曲線の差は、応力範囲の違いを考慮すればなくなると思われる。

なお、Fig. 9 (a)~(d) に示した実線は、それぞれのランダム荷重において出現頻度の高い最小の応力範囲の応力比に対応した一定振幅荷重下での亀裂伝播速度と ΔK の関係を表わしている。

Figs. 4~6 および Fig. 9 (a)~(c) の結果より、ランダム荷重下での疲労亀裂伝播は、 $(\overline{\Delta \sigma^4})^{1/4}$ の違いを考

慮すれば、ブロックサイズの最も小さい場合のブロックプログラム荷重下での亀裂伝播にはほぼ対応すると考えられる。そこで、Kタイプランダム荷重およびブロックプログラム荷重の $(\Delta\sigma^4)^{1/4}_{K\text{-Type or Block}}$ の値を、Aタイプランダム荷重の $(\Delta\sigma^4)^{1/4}_{A\text{-Type}}$ にそろえることにより、Figs. 4~6 における三者間の亀裂伝播曲線の相違の修正を試みた。

Fig. 10 は、上述の $(\Delta\sigma^4)^{1/4}$ 値の比の4乗、すなわち

$$\left[\frac{(\Delta\sigma^4)^{1/4}_{K\text{-Type or Block}}}{(\Delta\sigma^4)^{1/4}_{A\text{-Type}}} \right]^4 \quad (5)$$

をKタイプランダム荷重下およびブロックサイズが最も小さい場合のブロックプログラム荷重下での亀裂伝播曲線における繰返し数 N に乗じて求めた修正亀裂伝播曲線とAタイプランダム荷重下での実測亀裂伝播曲線を比較したものである。Fig. 10 より、三者間の亀裂伝播曲線はほぼ一致した結果が得られ、ランダム荷重下での亀裂伝播はブロックサイズの最も小さいブロックプログラム荷重下でのそれに対応することが裏付けられた。

3.3 線形重畳則による亀裂伝播寿命予測

前報において⁶⁾、ブロックサイズが小さい場合のブロックプログラム荷重下での疲労亀裂伝播は、Miner 則で代表される線形重畳則からの推定亀裂伝播よりも速くなることを示した。

一方、Barsom は⁷⁾、 $R=0$ のランダム荷重の亀裂伝播速度と ΔK 値の関係において、 ΔK 値を ΔK_{rms} 値で表わせば一定振幅荷重下での亀裂伝播速度と良く一致すると報告している。しかしながら、Fig. 9 (a)~(d) に示したランダム荷重下での亀裂伝播速度の結果は、 $(\Delta K^4)^{1/4}$ で表わしてもなお一定振幅荷重下での亀裂伝播速度データよりも加速されており、線形重畳則による寿命予測では非安全側の推定になることを示している。

そこで、本項では、ランダム荷重下およびブロックプログラム荷重下での亀裂伝播寿命が、線形重畳則から予測される亀裂伝播寿命と比較してどの程度加速されるかを検討した。なお、亀裂伝播寿命は、亀裂が比較的長く伝播する間の寿命を比較するために、変動荷重負荷開始時の亀裂長さ a_s から、1ブロックないしは1ユニット中の最大引張応力によって試験片が全面降伏する亀裂長さ a_{GY} までを取扱った。

線形重畳則による予測寿命 N_{Miner} は、初期亀裂長さ a_s から、変動荷重の1サイクルごとに亀裂進展量 Δa を次式から反復計算し、 $a + \Delta a = a_{GY}$ となるまでの総繰返し数により求めた。

$$\Delta a = C \{ \Delta\sigma \sqrt{\pi a} / \sec(\pi a / W) \}^m \quad (6)$$

ただし、(6)式の C, m 値は、Kタイプランダム荷重およびブロックプログラム荷重の場合には各サイクルごとの応力範囲に対応した応力比の C, m 値を、Aタイプラ

a ○ : A-Type Random Load
b △ : K-Type Random Load
c □ : Block Programmed Load (111cycles)
d ◇ : Block Programmed Load (11100cycles)

Fig. 11 Comparison of the value of $N_{Meas.}/N_{Miner}$ between A-Type random loads, K-Type random loads and block programmed loads

ンダム荷重の場合には出現頻度の高い最小の応力範囲 $\Delta\sigma = 10 \text{ kgf/mm}^2$ に対応した応力比の C, m 値をそれぞれ Table 3 より求めた。

また、(3), (4) 式の $\Delta\sigma_{rms}$, $(\Delta\sigma^4)^{1/4}$ を用いた予測寿命 $N[\Delta\sigma_{rms}]$, $N[(\Delta\sigma^4)^{1/4}]$ は、それぞれ次式のよう

$$N[\Delta\sigma_{rms}] = \int_{a_s}^{a_{GY}} \frac{da}{C \{ \Delta\sigma_{rms} \cdot \sqrt{\pi a} / \sec(\pi a / W) \}^m} \quad (7)$$

$$N[(\Delta\sigma^4)^{1/4}] = \int_{a_s}^{a_{GY}} \frac{da}{C \{ [(\Delta\sigma^4)^{1/4}] \cdot \sqrt{\pi a} / \sec(\pi a / W) \}^m} \quad (8)$$

ただし、 C, m 値は、出現頻度の高い最小の応力範囲 $\Delta\sigma = 10 \text{ kgf/mm}^2$ に対応した応力比の値を用いることとする。

なお、Table 3 より、 $R=0$ および $R=-1$ の場合には $m=4$ であるから、 N_{Miner} と $N[(\Delta\sigma^4)^{1/4}]$ の値は一致する。

Fig. 11 は、Kタイプ、Aタイプランダム荷重およびブロックプログラム荷重下での亀裂伝播寿命に関し、実測寿命と線形重畳則による推定寿命の比を比較したものである。ブロックプログラム荷重に対しては、1ブロック中に最大の応力範囲が1サイクルだけ負荷され、1ブロック長さが111サイクルとなる最も小さなブロックサイズの場合と、1ブロック中に最大の応力範囲が100サ

サイクル連続して負荷され、1ブロック長さが1,1100サイクルとなる比較的ブロックサイズが大きい場合とを併記した。

Fig. 11 より、ランダム荷重下およびブロックサイズの小さい場合のブロックプログラム荷重下の亀裂伝播に対し、線形重畳則による予測寿命は、実測寿命の2.5倍を超える無視しえない非安全側の推定になりうる場合のあることがわかる。

また、Aタイプ、Kタイプランダム荷重下およびブロックサイズの最も小さい場合のブロックプログラム荷重下での $N_{\text{Meas.}}/N_{\text{Miner}}$ の比は、 $R=-1$ の場合を除き、それぞれの条件下ではほぼ同程度の値を示しており、ランダム荷重下での亀裂伝播が、最もブロックサイズの小さい場合のブロックプログラム荷重下の亀裂伝播からさらに加速されることはないと考えられる。

一方、ブロックサイズの大きい場合のブロックプログラム荷重下での $N_{\text{Meas.}}/N_{\text{Miner}}$ の比は、ブロックサイズが小さい場合の値に比べ非常に大きくなっている。このことから、ランダム荷重下での亀裂伝播を、実験手法の簡便なブロックプログラム荷重下での亀裂伝播から予測するに際しては、ブロックサイズを充分小さくとる必要があり、ブロックサイズの大きい場合には、非安全側の予測結果となることに注意する必要がある。

3.4 ランダム荷重下での疲労亀裂伝播予測

本項では、ランダム荷重下での亀裂伝播を、前報⁷⁾で示したブロックプログラム荷重下での亀裂伝播に対する解析モデルから推定することを試みるとともに、線形重畳則による予測寿命(今回の場合、(8)式による $(\Delta\sigma^4)^{1/4}$ を用いた予測と一致しないしはほぼ近い値となる)および(7)式による $\Delta\sigma_{\text{rms}}$ を用いた予測寿命と比較した。

解析モデルによるランダム荷重下での亀裂伝播の推定

は、3.2 項の Fig. 10 の場合と同様の手法により行なった。すなわち、まず最初に、AタイプあるいはKタイプランダム荷重の初期亀裂長さ a_s に対して、ブロックサイズが最も小さい111サイクルのブロックプログラム荷重下での亀裂伝播曲線を解析モデルから求める。次に、ブロックプログラム荷重とランダム荷重の応力範囲の違いを(5)式から求め、これを先に求めた亀裂伝播曲線の繰返し数 N に乗じてランダム荷重下の亀裂伝播曲線とした。

解析モデルによる推定亀裂伝播曲線の1例を Fig. 12 に示す。Fig. 12 では、実測亀裂伝播曲線とともに、線形重畳則ならびに $\Delta\sigma_{\text{rms}}$ を用いた推定亀裂伝播曲線も合わせて示しているが、これらの推定亀裂伝播曲線に比べて、解析モデルによる推定亀裂伝播曲線は実測値と比較的良好一致した結果となっている。

また、Figs. 13~15 は、Aタイプ、Kタイプランダム荷重下およびブロックサイズが111サイクルと最も小さい場合のブロックプログラム荷重下において、亀裂が a_s から a_{GY} まで伝播する寿命に関し、実測寿命と各推定法による推定寿命を比較したものである。

解析モデルによる推定寿命は、実測寿命に比べて若干非安全側の予測となっているものの、ほぼ実測寿命の $\pm 50\%$ 以内に予測されている。この実測寿命から非安全側にずれる原因としては、最終亀裂長さを a_{GY} としたために、大規模降伏領域における亀裂伝播速度のParis 則からのずれを計算には考慮していないことが大きいと考えられる。

3.5 完全両振りの場合の疲労亀裂伝播

$R=-1$ となる完全両振り条件下での疲労亀裂伝播は、 $R=0$ あるいは平均応力が正の場合のそれと異なる傾向を示した。すなわち、Fig. 7 および Fig. 11 より、Kタ

Fig. 12 Comparison of measured crack growth curves with predicted ones

Fig. 13 Comparison of measured crack growth life with predicted life by using the author's model

Fig. 14 Comparison of measured crack growth life with predicted life by Miner's rule

イランダム荷重下での亀裂伝播は、ブロックサイズが最も小さい場合のブロックプログラム荷重下での亀裂伝播よりも大幅に速くなっている。

今回の変動荷重パターンでは、 $R=-1$ の場合、各応力範囲は常に正負が対となって負荷される。その中で、正の過大応力の半サイクル後に現われる負の過大応力により亀裂伝播の遅延効果は軽減されることになるが、その程度はブロックプログラム荷重下よりランダム荷重下の方で大きいのではないかと考えられる。このような挙動は、負の過大応力による亀裂面の接触を含めた亀裂の開閉口挙動の解析が必要と考えられる。

いずれにしても、現時点では $R=-1$ の場合のブロッ

Fig. 15 Comparison of measured crack growth life with predicted life by using $\Delta\sigma_{rms}$

クプログラム荷重下とランダム荷重下での亀裂伝播の相違に関する原因は不明であり、今後 $R=-1$ の場合を含め平均応力が負となる場合の亀裂伝播には、亀裂の開閉口挙動をも含めたもう少し詳細な検討が必要である。

4 結 言

ランダム荷重下での疲労亀裂伝播解析の第4報として、ランダム荷重下での疲労亀裂伝播挙動を実験的に考察するとともに、ブロックプログラム荷重下での疲労亀裂伝播挙動との対応付けを試みた。以下に得られた結論を示す。

(1) ランダム荷重下での疲労亀裂伝播に及ぼす1ユニット内のランダムサイクルの長短の影響は小さい。一方、ブロックプログラム荷重におけるブロックサイズの影響は非常に大きい。

(2) ランダム荷重下での疲労亀裂伝播は、 $R=-1$ の場合を除き、1ブロック中に最大の応力範囲が1サイクルだけ負荷される程度にブロックサイズが小さいブロックプログラム荷重下のそれに対応する。したがって、ランダム荷重下での亀裂伝播を、実験手法の簡便なブロックプログラム荷重から予測する場合には、ブロックサイズをできるだけ小さくする必要がある。

(3) Miner 則で代表される線形重畳則により、ランダム荷重下での疲労亀裂伝播寿命を推定すると非安全側の結果となり、実測寿命と推定寿命の比が0.4を下回る無視しえない場合もありうる。

(4) 前報に示したブロックプログラム荷重下での疲労亀裂伝播に対する解析モデルを用いてのランダム荷重下での亀裂伝播の推定は、両者の応力範囲の違いを修正すれば、ほぼ可能である。

おわりに、本研究を進めるにあたり、多くの有益な御助言、御討論を賜った東京大学 金沢武教授、飯田國廣教授をはじめ、日本造船学会溶接研究委員会第1分科会（主査：東京大学 町田進助教授）の各委員の方々に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads, ASTM STP 595 (1976).
 - 2) Cyclic Stress-Strain and Plastic Deformation Aspects of Fatigue Crack Growth, ASTM STP 637 (1977).
 - 3) J Schijve : Effect of Load Sequences on Crack Propagation under Random and Program Loading, Eng. Frac. Mech., Vol.5 (1973), p.269.
 - 4) 川原, 岩崎 : ランダム荷重下での疲労亀裂伝播 (第1報) 単一および多重の過大荷重による疲労亀裂伝播の遅延現象, 日本造船学会論文集, 第142号 (12月, 1977), p.261.
 - 5) 川原, 岩崎 : ランダム荷重下での疲労亀裂伝播 (第2報) ブロックプログラム荷重下での疲労亀裂伝播, 日本造船学会論文集, 第144号 (12月, 1978), p.359.
 - 6) 岩崎, 川原 : ランダム荷重下での疲労亀裂伝播 (第3報) 応力比変動を含むブロックプログラム荷重下での疲労亀裂伝播, 日本造船学会論文集, 第147号 (6月, 1980), p.201.
 - 7) J. M. Barsom : Fatigue Crack Growth Under Variable-Amplitude Loading in ASTM A 514-B Steel, ASTM STP 536 (1973), p.147.
-