

(昭和 59 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

# 軟鋼 SS41 の変動応力振幅下における応力-歪 応答と疲労強度について

正員 永井 欣一\* 正員 藤本 由紀夫\*  
正員 花崎 博文\*\*

Stress-Strain Response and Fatigue Strength of SS 41 Steel Plate under  
Variable Stress Amplitude

by Kin-ichi Nagai, *Member* Yukio Fujimoto, *Member*  
Hirofumi Hanasaki, *Member*

## Summary

In this study, five types of load controlled fatigue tests were carried out under variable stress amplitude in order to clarify the stress-strain response and the fatigue strength of SS41 steel plate specimen. That is, those tests were constant stress amplitude test, step test, repeated high-to-low and repeated low-to-high block loading test and block random loading test. In each test, stress-strain loops were recorded by X-Y plotter from the start of cycling to visual crack initiation by using the strain gauges put them on the test piece.

As the test results, the following conclusions were obtained.

- 1) Stress-strain response for step tests, block loading and block random loading were different from that for constant stress amplitude, and cyclic softening for variable stress amplitude was greater than that for constant stress amplitude.
- 2) Especially cyclic softening under variable stress amplitude was remarkable for low stress level.
- 3) Fatigue life estimation by Miner's rule makes over estimation compared with the experimental values, and fatigue life of block random loading is slightly shorter than that of block loading under the same stress frequency distribution.
- 4) When the plastic strain amplitude was used as a determining factor of fatigue damage, the estimated fatigue lives fairly approached the experimental values.

## 1 緒 言

船舶や海洋構造物などの不規則な変動荷重を受ける構造物では、変動応力振幅下における疲労強度を明らかにすることは重要な課題である。現在のところ、このような不規則変動応力下の疲労強度推定には Miner 則などの線形累積被害則が適用されているが、従来の変動応力下の疲労試験結果あるいは実機の疲労損傷状況からみて、この推定方法には問題点の多いことが指摘されている。その原因の一つとして、変動応力振幅下において材料は、一定応力振幅下の場合とは異なった応力-歪応答を示し、いわゆる繰返し硬化および繰返し軟化挙動が変動応力によって変化し、それが寿命に影響するという考

えが提案されている<sup>1)~3)</sup>。

本研究は変動応力下の疲労強度を明らかにするために、まず材料の応力-歪応答とくに塑性歪成分の繰返し中の変化に着目して検討を行ったものである。すなわち、一定応力振幅下および変動応力振幅下において平滑平板試験片を用いて軸力荷重制御の疲労試験を行い、繰返し中の応力-歪履歴(ヒステリシスループ)をき裂発生まで連続して記録し、繰返し中の塑性歪挙動の変化、疲労寿命との関係などについて考察した。また、Manson-Coffin の提案した塑性歪規準の累積被害則を用いて変動応力下の寿命を予測し、実験値および Miner 則による推定寿命と比較検討した。変動応力としては、ステップテスト、三段多重のブロック荷重および三段多重のブロックランダム荷重を対象として実験を行った。

\* 広島大学工学部

\*\* 広島大学大学院工学研究科

2 実 験

2.1 試 験 片

実験に用いた材料は板厚 12mm の軟鋼板 SS41 で、その化学成分および機械的性質をミルシートから引用して Table 1 に示す。試験片は板の両面を 2 mm ずつ切削して 8 mm の板厚とした後、長手方向が圧延方向に一致するように切出して機械加工により Fig. 1 の形状寸法に仕上げた。なお、この試験片の弾性応力集中係数  $K_t$  は約 1.08 である。

2.2 実験方法

使用した試験機は動的容量  $\pm 10$  ton の油圧サーボ式疲労試験機で、荷重繰返し速度は 0.5~5.0 Hz、荷重波形は正弦波である。疲労試験はすべて軸力の完全両振り荷重制御（応力比  $R=-1$ ）で行った。実験した荷重様式を一括して Fig. 2 に示す。

A-Type は一定応力振幅の疲労試験で破断寿命  $N_f$  が  $2 \times 10^8 \text{ cycle} < N_f < 2.3 \times 10^8 \text{ cycle}$  の範囲で試験した。

C-Type は Landgraf ら<sup>4)</sup> によって提案されたステップテスト (Incremental step test) を荷重制御で行ったもので、最大応力振幅、最小応力振幅および 1 ブロック中の荷重繰返し数を 10~36 cycle に変えた 3 本の試験片について行った。なお、一般にステップテストでは数十ブロックを繰返して応力-歪履歴が安定した時点で試験を中止するが、今回は破断にいたるまで荷重ブロックを繰返し負荷した。

D-Type, E-Type は三段多重のブロック荷重疲労試験で、D-Type は応力振幅漸減型、E-Type は応力振幅漸増型である。1 ブロックの荷重繰返し数はいずれも 11,100 cycle とし、一定応力振幅疲労試験の応力振幅 (13 の応力レベルで行った) から 3 点の応力振幅を取出し、応力出現頻度は最も大きい応力振幅  $S_{a1}$  を 100

Table 1 Chemical composition and mechanical property

Material	Thickness (mm)	Chemical composition					Mechanical property		
		C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Y.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	U.T.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SS41	12	0.14	0.22	0.71	0.018	0.007	30	46	44

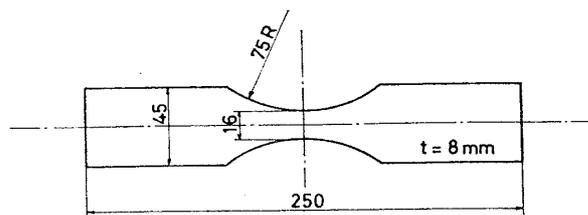


Fig. 1 Fatigue test specimen

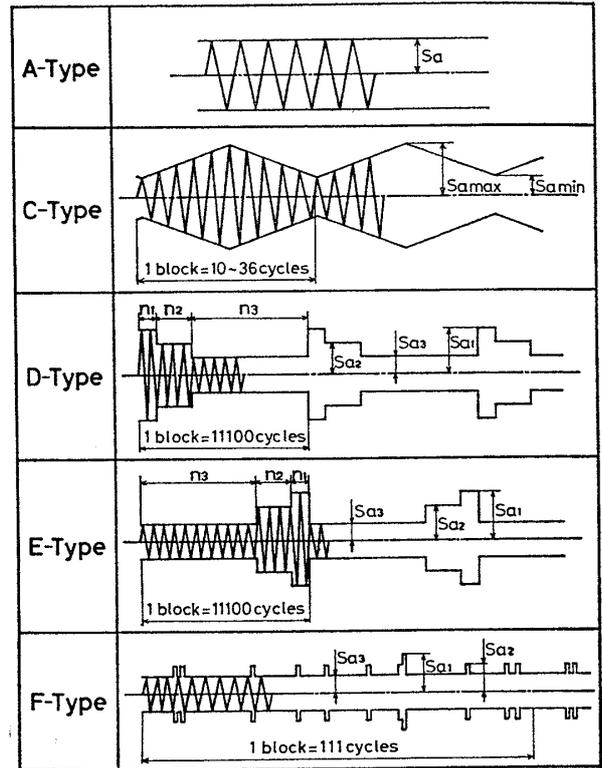


Fig. 2 Contents of fatigue test

cycle, 中間の応力振幅  $S_{a2}$  を 1,000 cycle, 最も小さい応力振幅  $S_{a3}$  を 10,000 cycle とした。

F-Type は三段多重のブロックランダム荷重疲労試験 (各ブロックにおける応力振幅は三段でその出現順序はランダムとし、出現回数は同一とした) で、1 ブロックは 111 cycle, 応力出現頻度は  $S_{a1}$  を 1 cycle,  $S_{a2}$  を 10 cycle,  $S_{a3}$  を 100 cycle とし、その出現順序は乱数表によってランダムに決め、それを繰返して行ったものである。ここで三段の応力レベル  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$  は D, E-Type のブロック荷重試験における応力レベルと同じとした。

C, D, E および F-Type の変動応力振幅下の疲労試験における荷重の制御には、いずれも疲労試験機に内蔵されたマイコンを用いた。

疲労試験中の歪の計測は、試験片長手方向中央部の両表面および両側面にゲージ長 6 mm の塑性歪ゲージ (KLM-6-A 9) を貼付して、ロードセルから取出した荷重とともに荷重-歪履歴を繰返し期間中連続して X-Y レコーダに記録した。途中歪ゲージがはがれた場合には貼り変えて計測を行った。なお前述したように、荷重繰返し速度は疲労寿命により 0.5~5.0 Hz の範囲で変化させているが、X-Y レコーダに記録するときはずべて 0.5 Hz とした。

### 3 実験結果

#### 3.1 一定応力振幅疲労試験結果

応力の繰返しに伴う塑性歪振幅  $\epsilon_{pa}$  の変化を一例として Fig. 3 に示す。図中の実線は4枚の歪ゲージの測定値の平均であり、上下の破線は  $\epsilon_{pa}$  の測定値のうち最も大きい測定値と最も小さい測定値を示す。なお試験片の両表面に貼付したゲージの測定値と両側面のそれとでは、歪挙動に有意の差はみられなかった。図より第1サイクル目で降伏を起こした応力振幅  $S_a = 32.5 \text{ kg/mm}^2$  の試験片は、荷重繰返しに伴って次第に  $\epsilon_{pa}$  は減少し繰返し硬化を起こしている。 $S_a$  が降伏応力に近い  $S_a = 30.6 \text{ kg/mm}^2$ ,  $28.8 \text{ kg/mm}^2$  の試験片では、繰返しの初期に急激な繰返し軟化を示し以後徐々に硬化している。 $S_a = 26.8 \text{ kg/mm}^2$ ,  $24.4 \text{ kg/mm}^2$  の試験片では初期に急速な軟化現象はみられるが、以後硬化も軟化もあまりすることなく比較的安定している。さらに  $S_a = 23.0 \text{ kg/mm}^2$ ,  $20.8 \text{ kg/mm}^2$  の低応力レベルの試験片では、初期にやや急速な軟化を示した後破断まで徐々に軟化を続けている。いずれの場合にも応力の繰返しによる急速な軟化が破断寿命の5~10%まででは完了している。

Fig. 4 に繰返し数比  $N/N_f$  ( $N_f$  は破断繰返し数) が 0.2, 0.5 および 0.8 の場合の塑性歪振幅  $\epsilon_{pa}$  と公称応力振幅  $S_a$  の関係を示す。同図において  $S_a$  と  $\epsilon_{pa}$  の間には従来いわれているような直線関係はみられず、 $S_a \approx 25 \text{ kg/mm}^2$  付近と  $S_a \approx 21 \text{ kg/mm}^2$  付近の2点で折

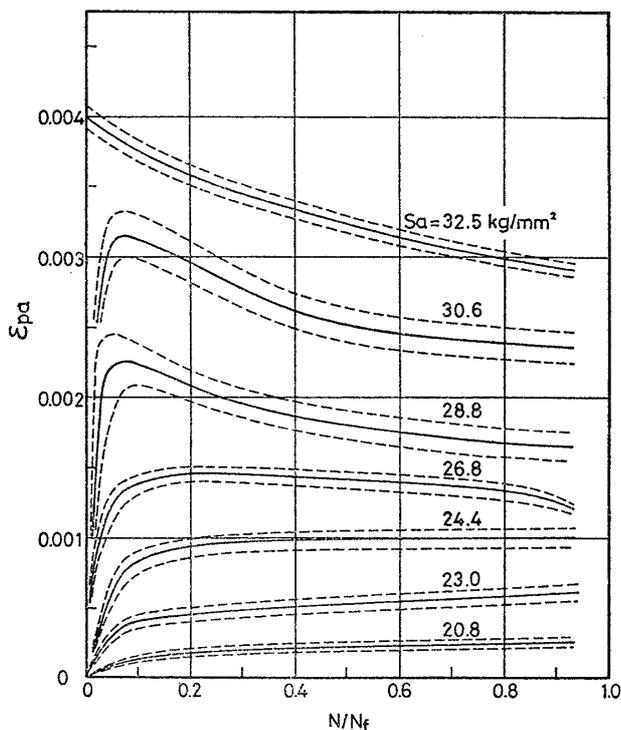


Fig. 3 Change of plastic strain amplitude under constant stress amplitude fatigue

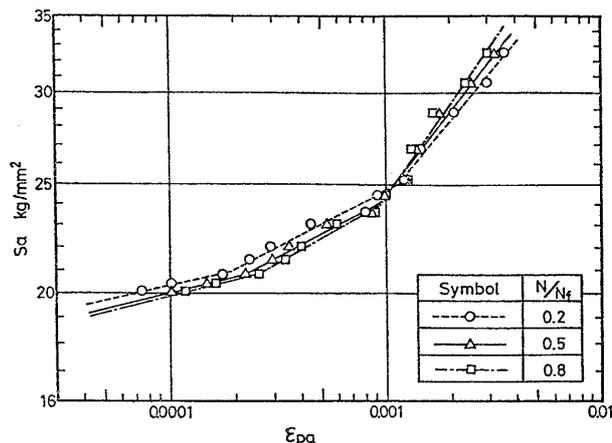


Fig. 4 Relation between stress amplitude,  $S_a$ , and plastic strain amplitude,  $\epsilon_{pa}$ , for constant stress amplitude

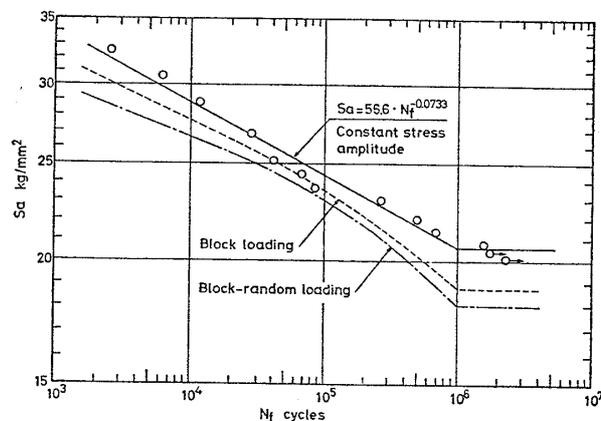


Fig. 5  $S_a-N_f$  curve for constant stress amplitude

れ曲った3本の直線でほぼ近似できる。ここで  $S_a \approx 25 \text{ kg/mm}^2$  は Fig. 3 で示したように全寿命の大半が比較的繰返し硬化も軟化も示さない応力レベルに相当し、また  $S_a \approx 21 \text{ kg/mm}^2$  は後述の Fig. 5 に示すようにはほぼ疲労限の応力レベルに相当している。

一定応力振幅疲労試験の  $S_a-N_f$  線図を Fig. 5 に示す。図よりこの材料の疲労限をおよそ  $S_{aw} = 20.5 \text{ kg/mm}^2$  と決め、また時間強度を(1)式で近似した。

$$S_a = 56.6 \times N_f^{-0.0733} \quad (1)$$

なお、図中の破線および一点鎖線については4章の考察において説明する。

#### 3.2 ステップテスト結果

Fig. 6 にステップテストを行った3本の試験片 C-1, C-2 および C-3 の公称応力振幅  $S_a$  と塑性歪振幅  $\epsilon_{pa}$  の関係を一括して示す。ステップテストは前述の一定応力振幅試験と同様に荷重制御とし、3試験片で1ブロック中の繰返し数および応力振幅のレベルを変えて行った。なお、図中には1ブロック中の繰返し数と破断までのブロック数が示してある。また各試験片の  $\epsilon_{pa}$  は  $N/N_f = 0.5$  の時点の値を  $\circ, \triangle, \square$  印でそれぞれ示し、

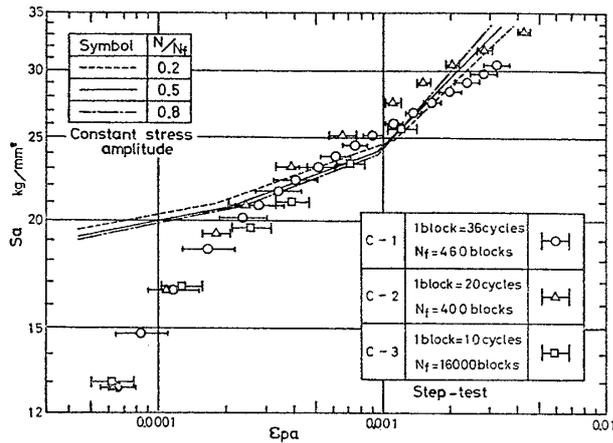


Fig. 6 Step test results

0.2 <math>N/N\_f</math> <math>< 0.8</math> の範囲の  $\epsilon_{pa}$  のばらつきを箇中に示した。箇中の破線、実線および一点鎖線はそれぞれ一定応力振幅下の  $S_a$  と  $\epsilon_{pa}$  の関係を  $N/N_f=0.2$ , 0.5 および 0.8 の場合について示したものであるが、ステップテストのそれとはかなり傾向に差がみられる。とくに疲労限付近以下の応力レベルにおいて、一定応力振幅下では  $\epsilon_{pa}$  はきわめて早く零に漸近するのに対して、ステップテストでは  $\epsilon_{pa}$  はゆるやかに減少し、一定応力振幅下の疲労限よりかなり小さな応力振幅下でも塑性歪を生じていることがわかる。

3.3 三段多重のブロック荷重疲労試験結果

Table 2 に D-Type および E-Type のブロック荷重疲労試験結果を一括して示す。同表において D-Type は応力振幅漸減型、E-Type は応力振幅漸増型である。ブロック荷重疲労試験の三段の応力レベルは、一定応力振幅試験における歪挙動との差異を明らかにするために、 $S_a=18.0\text{ kg/mm}^2$  の場合を除いて、一定応力振幅疲労試験に合わせて3つの応力レベルを取り出して負荷した。また、D-1 と E-1, D-2 と E-2 というように D-Type と E-Type で試験片番号の同じものは、応力頻度

Table 2 Fatigue test results of block loading

No.	Stress amplitude			$N_f$ ( blocks )	$N_f$ ( cycles )	$N_f^*$ Miner ( blocks )	$N_f^{**}$ Estimation ( blocks )
	$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$				
D-1	30.6	26.8	23.0	3.35	37200	9.56	5.36
D-1'	30.6	26.8	23.0	2.80	31000	9.56	5.36
D-2	28.8	23.0	20.8	12.21	135500	39.27	19.02
D-3	26.8	23.0	20.8	23.03	255600	51.21	25.32
D-4	26.8	23.0	20.1	22.43	249000	122.08	30.85
D-5	26.8	22.0	18.0	46.29	513800	161.90	92.34
E-1	30.6	26.8	23.0	4.00	44400	9.56	5.36
E-2	28.8	23.0	20.8	14.61	162200	39.27	19.02
E-3	26.8	23.0	20.8	20.89	231900	51.21	25.32
E-3'	26.8	23.0	20.8	21.11	234300	51.21	25.32
E-4	26.8	23.0	20.1	20.88	231800	122.08	30.85
E-5	26.8	22.0	18.0	36.91	409700	161.90	92.34

分布は同じで応力負荷順序のみが逆となるように決めて試験を行ったものである。なお、D-1', E-3' 試験片は実験結果の確認のため、それぞれ D-1, E-3 試験片と同じ応力下で追加試験を行ったものである。

表中には試験結果として、破断までのブロック数および繰返し数を示すとともに、Miner 則による推定寿命のブロック数  $N_f^*$  および後述の塑性歪振幅基準による推定寿命  $N_f^{**}$  が一緒に示してある。

D および E-Type の試験では、1 ブロック中において同一応力振幅  $S_a$  を負荷した場合でも、応力振幅が変動した直後と、しばらく  $S_a$  を繰返した後とでは  $\epsilon_{pa}$  の値に差異がみられる。Fig. 7 は  $N/N_f$  が 0.5 における1ブロック中の  $\epsilon_{pa}$  の変化の様子を示したもので、いずれの  $S_a$  に対する  $\epsilon_{pa}$  もその直前に  $S_a$  より大きい応力振幅が加えられた後においては、同じ応力振幅である回数繰返された場合の  $\epsilon_{pa}$  に比べて明らかに小さくなっており、その後応力の繰返しに伴って一定値に漸増する。この現象は八木ら<sup>5)</sup>によってすでにランダム荷重下の疲労試験結果においても観察されている。

Fig. 8(a), (b) および (c) はブロック荷重下における繰返し中の塑性歪挙動の一例を  $S_a=26.8\text{ kg/mm}^2$ ,  $23.0\text{ kg/mm}^2$  および  $20.8\text{ kg/mm}^2$  の場合について示したものである。箇中の  $\epsilon_{pa}$  は前述したように各応力ステップにおいてヒステリシスループが安定した後の値を、 $N/N_f$  に対して D-Type は破線、E-Type は一点鎖線

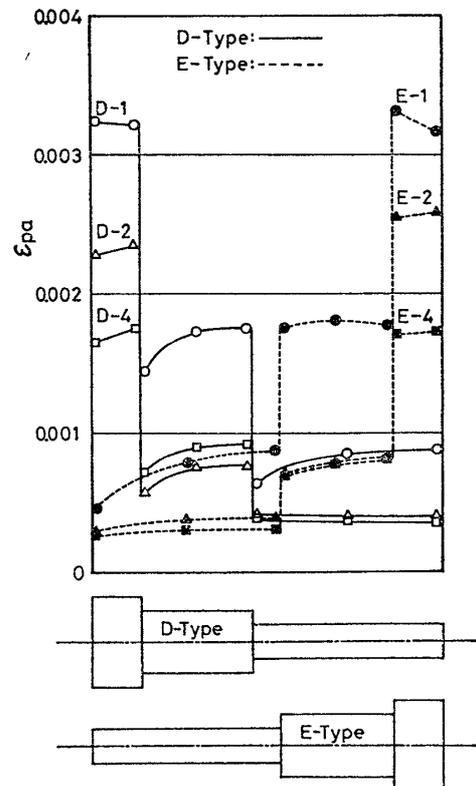


Fig. 7 Change of  $\epsilon_{pa}$  through one block

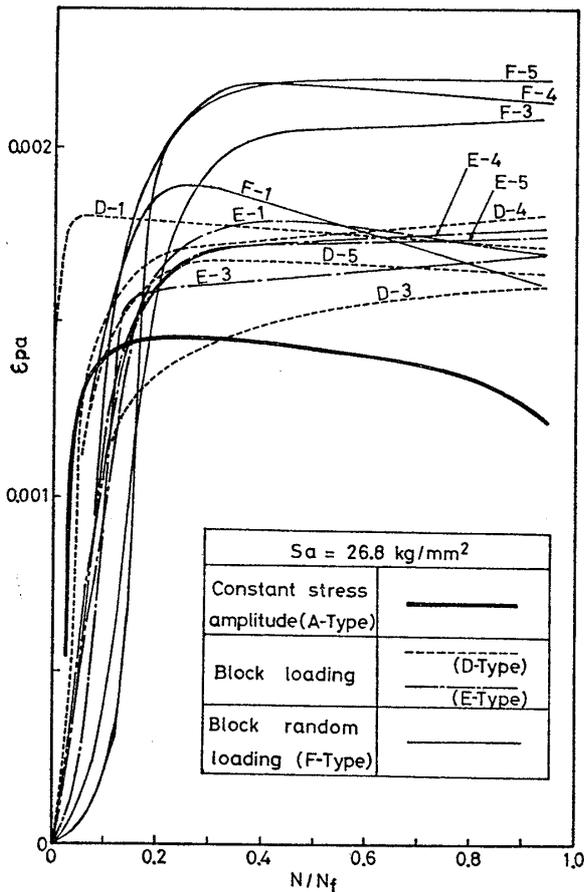


Fig. 8(a) Response of plastic strain amplitude under block and block random loading

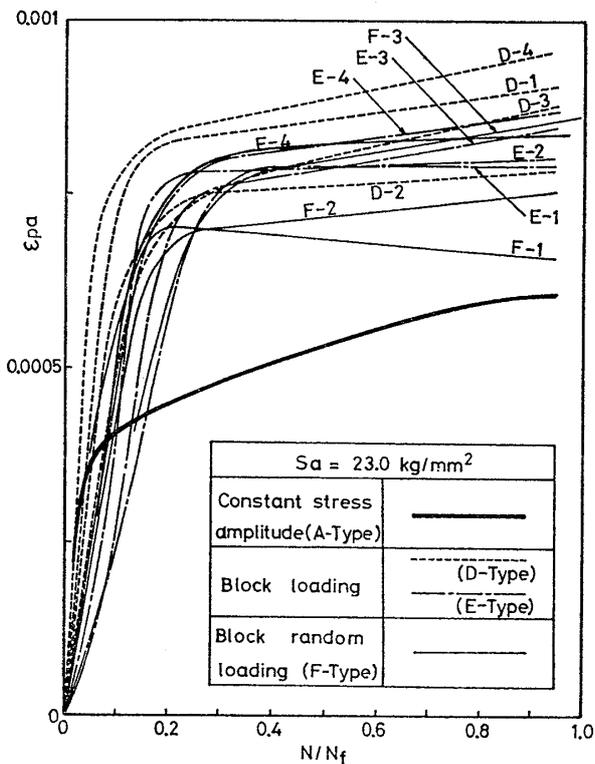


Fig. 8(b) Response of plastic strain amplitude under block and block random loading

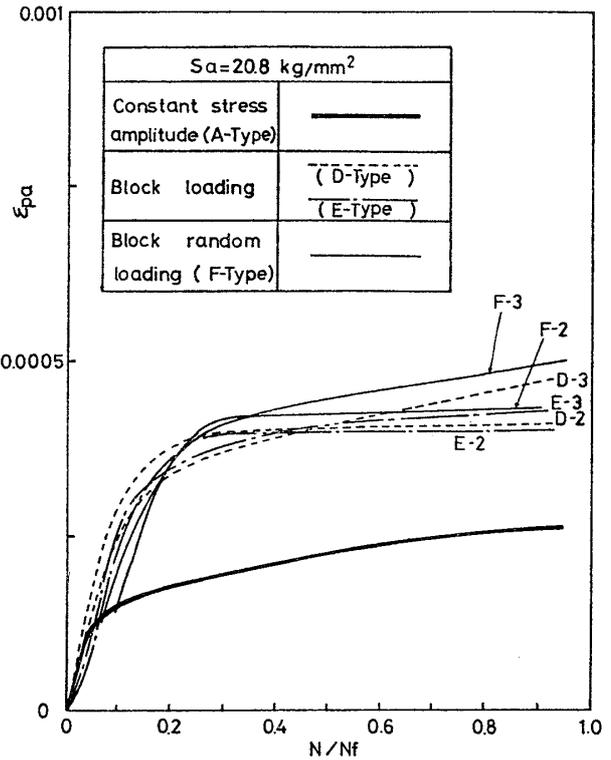


Fig. 8(c) Response of plastic strain amplitude under block and block random loading

で示した。なお、歪値はいずれも試験片に貼付した4枚の歪ゲージの平均値である。図において太い実線は一定応力振幅試験の  $\epsilon_{pa}$  であり、ブロック荷重疲労試験の  $\epsilon_{pa}$  はそれと同一の一定応力振幅試験の  $\epsilon_{pa}$  に比べいづれもかなり大きな値となっていることがわかる。たとえば Fig. 8(a) に示す  $S_a=26.8 \text{ kg/mm}^2$  の応力振幅は Table 2 から明らかなように、D-1, D-3, D-4, D-5 および E-1, E-3, E-4, E-5 の計8試験片に負荷されているが、そのいづれもが  $\epsilon_{pa}$  は一定応力振幅下の場合より大きい。また D-Type と E-Type では応力振幅の負荷順序が異なるにもかかわらず  $\epsilon_{pa}$  の挙動に有意の差異はみられない。

### 3.4 三段多重のブロックランダム荷重疲労試験結果

Table 3 にブロックランダム荷重の疲労試験結果を示す。ブロックランダム試験の三段の応力レベルはブロック荷重試験と同一の応力レベルを採用している。表中に

Table 3 Fatigue test results of block random loading

No.	Stress amplitude			Nf ( blocks )	Nf ( cycles )	Nf* Miner ( blocks )	Nf** Estimation ( blocks )
	Sa1	Sa2	Sa3				
F-1	30.6	26.8	23.0	2480	27500	955.7	281.5
F-2	28.8	23.0	20.8	826.9	91800	3926.5	1120.6
F-3	26.8	23.0	20.8	1442.5	160100	5120.6	1817.5
F-4	26.8	23.0	20.1	1560.0	173200	12208.3	2183.1
F-5	26.8	22.0	18.0	2342.9	260100	16190.5	3687.5

は破断までのブロック数, 繰返し数, Miner 則による推定寿命のブロック数および後述の塑性歪規準の推定ブロック数が比較して示してある。Fig. 8(a), (b) および (c) にはブロックランダム荷重の繰返し中の塑性歪振幅  $\epsilon_{pa}$  の変化の様子も実線で付記してあるが, 全体的にみて,  $S_a=26.8 \text{ kg/mm}^2$  の高応力レベルで D, E-Type のブロック荷重の  $\epsilon_{pa}$  より軟化が大きく,  $S_a=23.0 \text{ kg/mm}^2$  および  $20.8 \text{ kg/mm}^2$  ではブロック荷重下とほぼ同程度の  $\epsilon_{pa}$  となっている。なお, ブロックランダム荷重の  $\epsilon_{pa}$  は 1 ブロック中の任意に抽出した 5 点の歪の平均値である。

#### 4 考 察

三段多重のブロック荷重疲労試験, および三段多重のブロックランダム荷重疲労試験の塑性歪振幅  $\epsilon_{pa}$  と公称応力振幅  $S_a$  の関係を,  $N/N_f$  が 0.2, 0.5 および 0.8 の場合についてそれぞれ Fig. 9(a), (b) および (c) に示す。図中の実線は Fig. 4 にすでに示した一定応力振幅疲労試験の  $\epsilon_{pa}$  と  $S_a$  の関係を表わし, 黒塗りの記号は D-Type, E-Type のブロック荷重疲労試験の結果を, 白塗りの記号は F-Type のブロックランダム荷重疲労試験の結果をそれぞれ表わす。また, 破線および一点鎖線はそれぞれブロック荷重, ブロックランダム荷重の実験値にもっとも合致するように引いたものであるが, ブロック荷重下では  $S_a$  と  $\epsilon_{pa}$  の関係は  $S_a \approx 23 \text{ kg/mm}^2$  付近で折れ曲る 2 本の直線で近似でき, ブロックランダム荷重下では 1 本の直線でほぼ近似できた。

各図に示されている繰返し数レベルにおいて, 同一応力振幅  $S_a$  に対する塑性歪振幅  $\epsilon_{pa}$  は, ブロックランダム荷重の場合がブロック荷重に比べて大きく, また一定応力振幅の  $\epsilon_{pa}$  はすでに述べたようにこれらに比べてかなり小さいことが同図からわかる。このことは応力振幅の変動が激しいほど材料の繰返し軟化が著しいことを示している。ブロック荷重, ブロックランダム荷重における繰返し軟化の程度は,  $S_a=24 \sim 25 \text{ kg/mm}^2$  においてはそれほど著しくないが, その応力より高くても低くても軟化は著しく, とくに低応力レベルで顕著である。

以上の結果を Fig. 6 に示したステップテストの  $S_a - \epsilon_{pa}$  の関係と比較すると, 低応力レベルでの繰返し軟化が著しいという点は類似しており, これらのことから SS41 材の繰返し応力-歪応答は, 負荷する応力頻度分布によって種々に変化し, とくに変動応力振幅下においては低応力レベルで繰返し軟化が大きいことがわかる。

次にブロック荷重およびブロックランダム荷重下で生ずる塑性歪から推定した  $S_a - N_f$  線図を示し, それをもとに以下に示す方法で疲労寿命予測を行った。

塑性歪振幅を疲労被害の主な因子として提案された

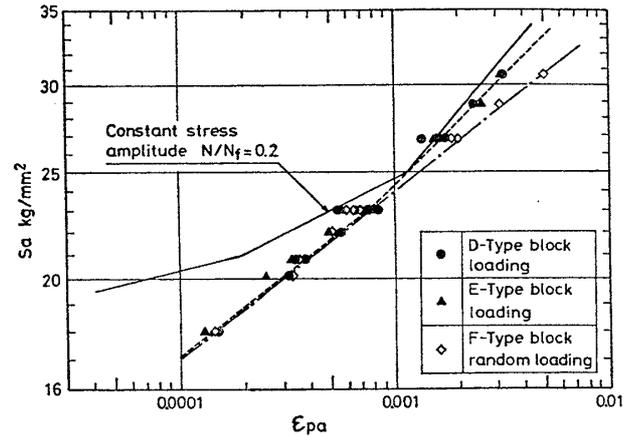


Fig. 9(a) Comparison of  $S_a - \epsilon_{pa}$  curves among constant stress amplitude, block loading and block random loading ( $N/N_f=0.2$ )

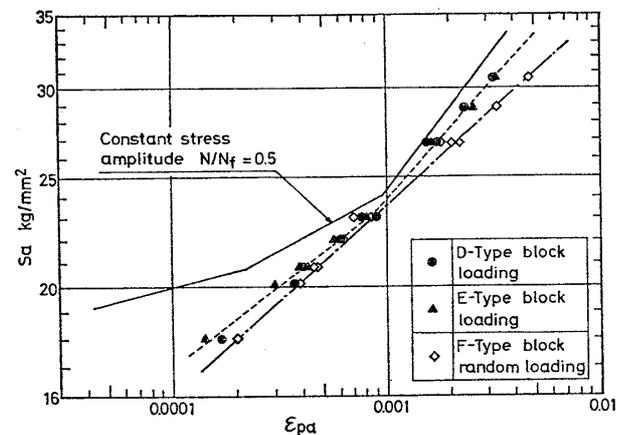


Fig. 9(b) Comparison of  $S_a - \epsilon_{pa}$  curves among constant stress amplitude, block loading and block random loading ( $N/N_f=0.5$ )

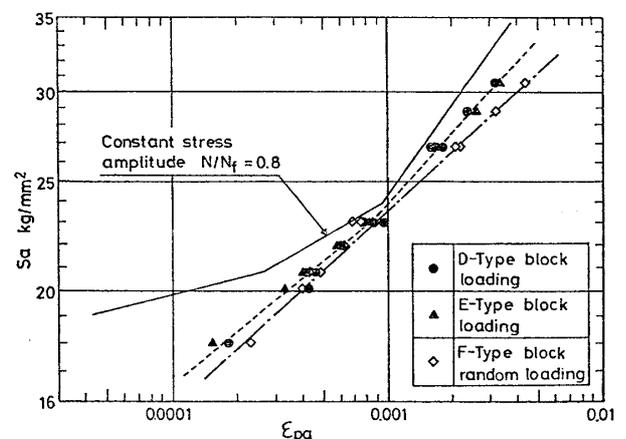


Fig. 9(c) Comparison of  $S_a - \epsilon_{pa}$  curves among constant stress amplitude, block loading and block random loading ( $N/N_f=0.8$ )

Manson-Coffin 式では、疲労寿命は (2) 式で与えられる。

$$\sum_{N=1}^{N_f} \Delta \varepsilon_{pa}^a = \text{Const.} \quad (\alpha \text{ は材料定数}) \quad (2)$$

上式によれば、 $\varepsilon_{pa}$  が同じであれば変動応力の形式によらず寿命は同じとなる。そこで Fig. 9 に示した  $S_a$ - $\varepsilon_{pa}$  線図において、ある  $\varepsilon_{pa}$  に対する一定応力振幅下、ブロック荷重下およびブロックランダム荷重下の  $S_a$  をそれぞれ読み取れば、それらの各  $S_a$  に対する破断寿命  $N_f$  は、(2) 式によってすべて一定応力振幅下の  $N_f$  で与えられることとなる。同様な方法で種々の  $\varepsilon_{pa}$  に対して  $S_a$  をそれぞれ読み取り、塑性歪振幅基準の  $S_a$ - $N_f$  線図を Fig. 5 にブロック荷重に対して破線、ブロックランダム荷重に対して一点鎖線でそれぞれ示した。なお破線および一点鎖線の作成にあたっては、Fig. 9(b) の  $N/N_f = 0.5$  の  $S_a$ - $\varepsilon_{pa}$  線図を代表させて用いている。塑性歪振幅基準の疲労寿命  $N_f^{**}$  は Fig. 5 の破線、一点鎖線の  $S_a$ - $N_f$  線図に Miner 則を適用して計算し、その結果を Table 2 および 3 に示した。またこれらの表に示した  $N_f^*$  は、従来の方法に習って Fig. 5 の一定応力振幅下の  $S_a$ - $N_f$  線図に Miner 則を適用して得た推定寿命である。Fig. 5 に示すように塑性歪振幅基準で考えると、ブロック荷重、ブロックランダム荷重の疲労限はそれぞれ  $S_a \cong 18.8 \text{ kg/mm}^2$ ,  $S_a \cong 18.0 \text{ kg/mm}^2$  となり、一定応力振幅下の疲労限  $S_a \cong 20.5 \text{ kg/mm}^2$  に比べて低下することになる。なお、ここではブロック荷重およびブロックランダム荷重下においても疲労限が存在するものと考えた。

Fig. 10 は破断繰返し数  $N_f$  と推定寿命  $N_f^*$  あるいは  $N_f^{**}$  の比を縦軸に、横軸に  $N_f$  をとって推定寿命と実際の寿命とを比較したものである。図において黒ぬりの記号は Miner 則による推定寿命の関係を示したものであり、D, E-Type のブロック荷重下における  $N_f/$

$N_f^*$  は 0.18~0.45 の範囲に分布している。また F-Type のブロックランダム荷重下における  $N_f/N_f^*$  は 0.13~0.28 の範囲 (破線で囲った範囲) に分布しており、全体的にブロックランダム荷重による寿命がブロック荷重下におけるそれより短いことがわかる。一方、白ぬきの記号で示した塑性歪振幅基準の寿命推定結果によれば、D, E-Type のブロック荷重下で  $N_f/N_f^{**}$  は 0.40~0.91 の範囲に分布し、破線で囲った F-Type のブロックランダム荷重下では  $N_f/N_f^{**}$  は 0.64~0.88 の範囲に分布している。以上のことから、塑性歪振幅基準による累積被害則を用いれば、通常の Miner 則に比べて実際の寿命に近い推定が可能であることがわかる。しかし、塑性歪振幅基準の  $N_f/N_f^{**}$  の値は本試験結果においてはすべて 1.0 以下であり、危険側の予測を与えることになる。従って、変動応力下の疲労寿命を塑性歪振幅のみを被害の因子として推定することは若干の無理があり、現在のところ未知な因子の影響および累積被害の非線形性の影響などについて今後検討する必要がある。

## 5 結 言

本研究では軟鋼 SS41 の平滑平板試験片を用い、軸力の両振り荷重制御で変動応力振幅の疲労試験を行って、材料の応力-歪応答および疲労寿命との関係について検討した。得られたおもな結果は次のとおりである。

(1) ステップテスト、三段多重のブロック荷重および三段多重のブロックランダム荷重下の応力-歪応答 ( $S_a$ - $\varepsilon_{pa}$  線図) は一定応力振幅下とは異なり、変動応力振幅下の方が繰返し軟化が著しい。

(2) 変動応力振幅下ではブロックランダム荷重の方がブロック荷重よりも若干軟化の程度が大きく、また低応力レベルにおいて変動応力振幅下の繰返し軟化が顕著である。

(3) Miner 則による推定寿命は、本実験の範囲内で実際の疲労寿命よりかなり危険側の予測を与える。また、同一応力頻度分布のブロック荷重とブロックランダム荷重では、1 ブロックの繰返し数が小さく応力振幅の変動の激しいブロックランダム荷重の方が寿命は短い。

(4) 塑性歪振幅を疲労被害の主な因子と考えて寿命推定を行えば、通常の Miner 則による推定寿命よりもかなり実際の寿命に近くなる。

実験の結果、変動応力振幅下においてはとくに疲労限付近およびそれ以下の低応力レベルでの材料の繰返し軟化が著しいことが明らかとなった。今後さらにランダム荷重下での疲労試験を行って、この応力レベルでの材料の繰返し応力-歪応答を検討するとともに、変動応力振幅下の疲労寿命予測について考察する予定である。

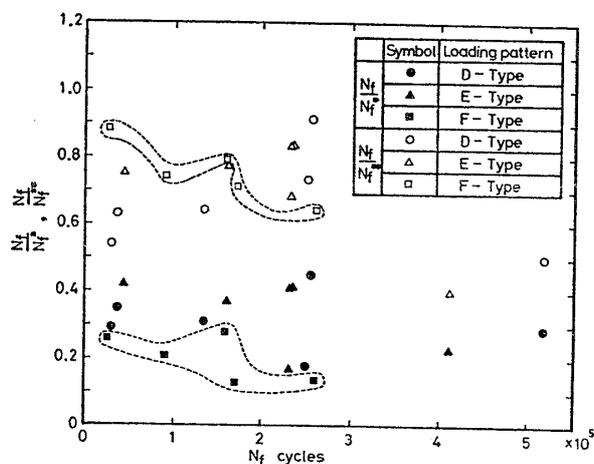


Fig. 10 Relation between estimated and measured fatigue life

おわりに本研究を行うにあたり、一部文部省科学研究費（一般研究 C，課題番号 58550294）を使用したことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 菊川 真，大路清嗣，城野政弘，溝口孝遠：引張圧縮定常ランダム荷重による疲れについて，日本機械学会論文集，35巻，第278号（1965），p.2020～2031.
- 2) 八木順吉，富田康光，他：ランダム荷重下での疲労挙動に関する研究（第一報），日本造船学会論文集，第 152 号（1983），p.361～371.
- 3) 飯田國廣，洪 性祚：P 分布荷重による累積疲労被害（第二報），日本造船学会論文集，第 152 号（1983），p.372～380.
- 4) Landgraf, R. W., Morrow, JoDean and Endo, T.: Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve, Journal of Materials, Vol.4, No.1 (1969), p.176.
- 5) 八木順吉，富田康光，他：ランダム荷重下での疲労挙動に関する研究（第二報），日本造船学会論文集，第 154 号（1983），p.449～457.