

I-3 繰返し塑性ひずみを受ける構造用鋼材の力学的特性

東京工大 藤本盛久 横浜国大 青木博文
東京工大 三木千寿 東京工大○中込忠男

1. 序

繰返し負荷を受ける構造物の破壊については、実際の構造物の調査や構造部材の一部またはそれをモデル化した実験結果から、その対策のための資料が集積されてきた。塑性ひずみの繰返しを受ける構造物の挙動や疲労破壊を考察するに当り、まず素材の平滑材における塑性ひずみ繰返し特性や疲労強度が基本的な資料となるであろう。ところで、疲労実験では、試験片の形状や表面の仕上げ程度、負荷形式などによってその結果が異なることはよく知られている。しかるに、日本工業規格(JIS)では、繰返し数が 10^4 以上の疲れ寿命の場合の規定しか定められておらず、低サイクルの範囲における共通のデータは得にくい状態にある。このたび、疲労試験方法のJIS化を検討するため、日本溶接協会規格WES-162に歪制御低サイクル疲労試験方法が定められているので、この方法に準拠して、構造用鋼材の低サイクル疲労試験および残留延性を調べる実験などが行なわれた。本論文では、この実験について、おもに繰返しの塑性ひずみを受けた場合の鋼材の応力とひずみ関係に注目して整理した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 試験体

供試用鋼材は、SS41・SM50A・SM58QTの3種類で、その化学成分をTable 1に、力学的性質をTable 2に示す。

試験体はWES-162の3号試験片でFig.1に示すように最小断面直径が10mmのものを使用する。試験体表面はエメリー(#400)仕上げの後、軸方向にサンドペーパー(#1000)により研削している。すべて試験体は圧延鋼板の板厚中心より、主圧延方向を試験体軸と一致させて採取している。また試験体相互の材料のバラツキを少なくするため、試験体の採取位置および板厚方向を明確にしている。

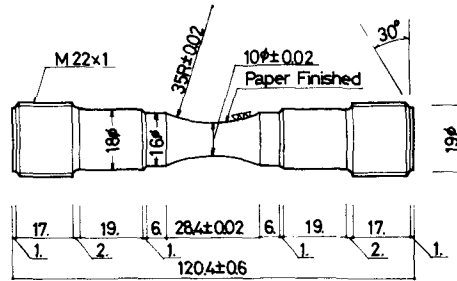


Fig.1 Test Specimen

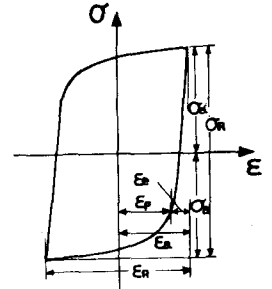


Fig.2 σ -E Relation

Table 1 Chemical Components (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ceq
SS41	0.12	0.26	1.04	0.020	0.016	—	—	0.30
SM50A	0.15	0.36	1.34	0.014	0.018	—	—	0.39
SM58QT	0.12	0.27	1.11	0.012	0.007	0.16	0.03	Q35

Table 2 Mechanical Properties

	Thickness (mm)	Yield Stress (kg/mm ²)	Tensile Stress (kg/mm ²)	Elongation (%)	Bending Test	Charpy Value (5°C; kgm)
SS41	25	29	46	—	Good	—
SM50A	25	33	52	29	Good	—
SM58QT	25	55	71	30	Good	24

加工前後の焼なましその他の熱処理は行っていない。

2.2 定ひずみ繰返し実験

加力は最大荷重±7.5 ton の電気油圧式疲労試験機を用い、最小断面の直径方向変位を変位計により検出してひずみ制御実験を行なった。

荷重および径方向ひずみをデータ・レコーダーおよびX-Y・レコーダーにより記録し、亀裂の観察には倍率6.3～40倍の三眼鏡筒式実体顕微鏡を用い、実験を続行しながら亀裂の測定を行なった。

繰返し速度は軸方向ひずみ速度が 10^{-2} /sec 以上ではその影響が大きくなる⁽¹⁾ことがいわれているので、ここでは軸方向ひずみ速度を 2×10^{-3} /sec に一定にして実験した。荷重波形はひずみの大きなところまで実験するので、リラクゼーション⁽²⁾を考慮して三角波とした。

荷重-径方向変位を真応力-対数ひずみへ変換するのは、塑性変形は非圧縮性の仮定が成り立つとして次式を用いた。記号はFig. 2 に示したものをを用いている。

$$\sigma_a = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_a}{E} \quad (2)$$

$$\varepsilon_p = -2 \left\{ \ln \frac{d}{d_0} + \frac{\nu \sigma_a}{E} \right\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= \varepsilon_p + \varepsilon_e \\ &= -2 \ln \frac{d}{d_0} + (1-2\nu) \frac{\sigma_a}{E} \quad (4) \end{aligned}$$

P: 軸方向荷重 (kg)

σ_a : 軸方向真応力 (kg/mm^2)

σ_R : 軸方向真応力の引張側と圧縮側の和 (kg/mm^2)

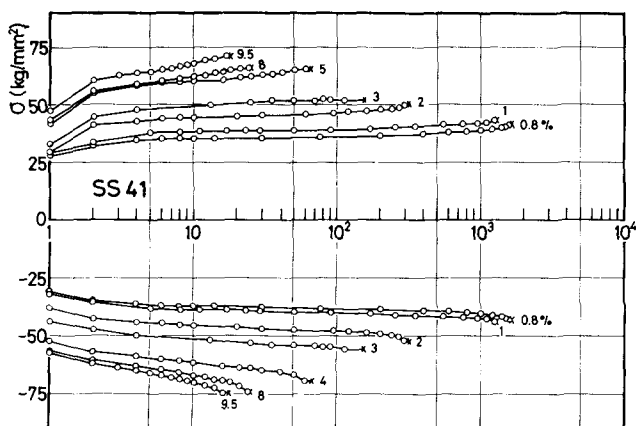


Fig.3 Variation of Maximum Stresses

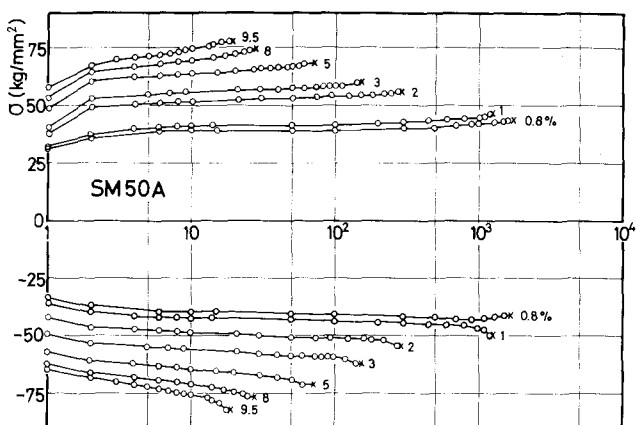


Fig.4 Variation of Maximum Stresses

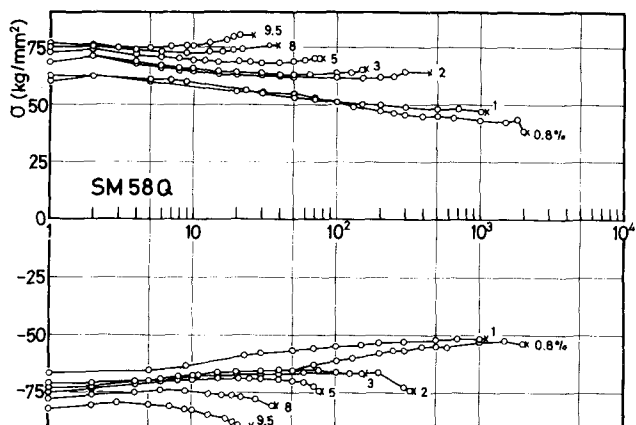


Fig.5 Variation of Maximum Stresses

ϵ_e : 軸方向弾性ひずみ
 ϵ_p : 軸方向対数塑性ひずみ
 ϵ_a : 軸方向対数全ひずみ
 ϵ_R : 軸方向対数全ひずみの引張側と圧縮側の和
 d_0 : 試験体の変形前の直径 (mm)
 d : 試験体の変形後の直径 (mm)
 E : ヤング率 (21000 kg/mm^2)
 ν : ポアソン比 (0.3)

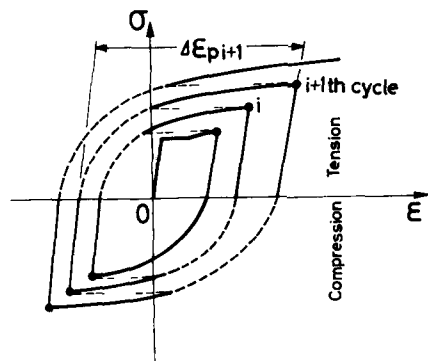


Fig. 6a σ -E Curve

圧縮と引張のひずみ比は、軸方向対数全ひずみ ϵ_a が 0.098 で約 0.95 程度である。ひずみ振幅はこれ以下で実験を行っているので、この影響はわずかであるので無視した。

2.3 残留延性試験

定ひずみ試験の結果により、破断繰返し回数の 30% ~ 90% まで定ひずみ繰返しを行ない、一度除荷した後手動により負荷して破断させた。このときひずみは径方向の変位計により測定し、荷重-変位を X-Y レコーダーに記録した。疲労試験機で負荷しているので最大荷重時以後は 3 ~ 4 秒程度で破断に至ることになった。このため最大荷重点と明確にとらえられなかったので、最大荷重に達し変形が急激に進み始める点を最大荷重点とした。

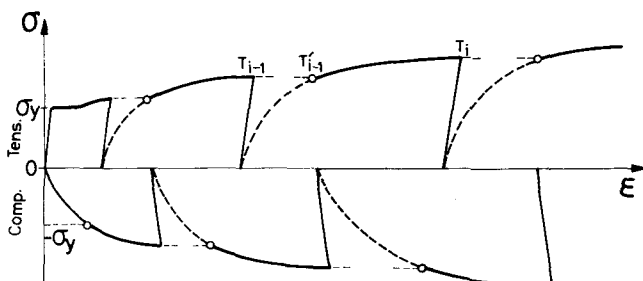


Fig. 6b Stretched Figures of Hysteretic Curve

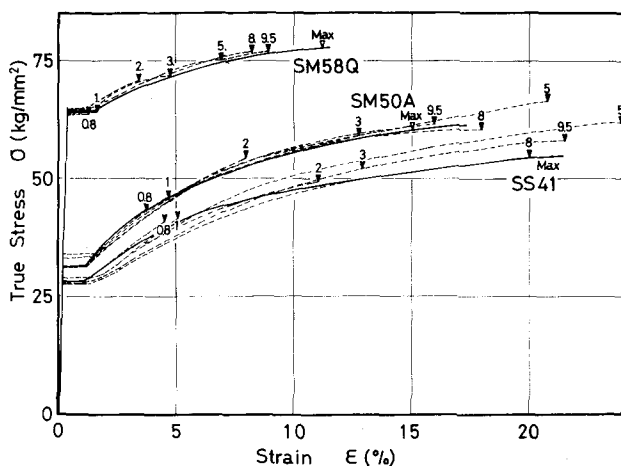


Fig. 7 Comparison with Fictitious and Monotonic

3. 実験結果および考察

3.1 定ひずみ繰返し実験

Fig. 3 ~ 4 に各鋼材の定ひずみ繰返し実験中の真応力の変化の様子が示してある。SS41, SM50 は最初の十数回の間に急増し、以後はゆっくり上昇し破断に至る。SM58 はひずみ振幅が 1% 以下ではゆっくり下降し続けるが、2% ~ 5% では 1/5 回程度で定常状態となり、破断近くで上昇する。ひずみ

Table 3 Comparison with Plastic Strains

	累積塑性ひずみ / 引張試験の最大荷重時の ϵ_p							引張試験 の最大荷 重時の ϵ_p
$\epsilon_p(\%)$	0.67	0.87	1.84	2.69	4.87	7.95	9.51	
SS41	0.21	0.24	0.53	0.61	1.14	0.95	0.98	20.9
SM50A	0.24	0.30	0.52	0.85	1.34	1.20	1.06	14.9
SM58QT	0.08	0.12	0.28	0.41	0.60	0.73	0.79	10.8

振幅が8%以上では、3、4回で最小となり以後破断まで上昇を続ける。これはくびれ現象による影響と考えられる。

各鋼種とも正負の真応力はほとんど等しくなっており、引張-圧縮のひずみ比は1に近い値であるので、平均ひずみの影響はなく、ひずみ硬化は正負ほぼ等しくなっている。

Fig. 6(a)は応力-ひずみ関係を一般的に模式図として示したもので、この履歴曲線をサイクル順につなぎ合せたものがFig. 6(b)である。このように各サイクルごとに、同じ応力符号側で前サイクルで到達された最大応力レベルを超えた部分をつなぎ合わせる。応力漸増型の繰返し実験を行ない、加藤等は累積塑性ひずみをFig. 6(b)のように連ねた曲線が単調引張負荷の枝の示す如き曲線によく一致すること、最大荷重時のひずみも累積塑性ひずみと如き枝の塑性ひずみが一致することを示した。

本実験は定ひずみ繰返し実験であるが、同様の手法によって応力-累積ひずみ曲線を求めたものをFig. 7に示してある。この手法は最大荷重時までには使える手法であるので、くびれ現象を起こすものは最大荷重時まで、そうでないものは最大応力まで累積してある。またSM58はFig. 5に示したように繰返しにより軟化するので、くびれ現象を起こさないものでも最大荷重まで累積してある。

各鋼種とも応力-ひずみ関係はほぼ単調引張試験と一致しており、くびれ現象を起こすものは最大荷重時のひずみもほぼ一致している。

SS41とSM50の5%のひずみ振幅のものは累積塑性ひずみが引張試験より大きくなっており、ひずみ振幅が小さくなるにつれて累積ひずみは小さくなっている。

Table 3に単調引張試験で得たくびれ直前の塑性ひずみで、累積ひずみを除いた値を示してある。くびれ現象を起こさないものはひずみ振幅が小さい程小さな累積ひずみで破断していることがわかる。

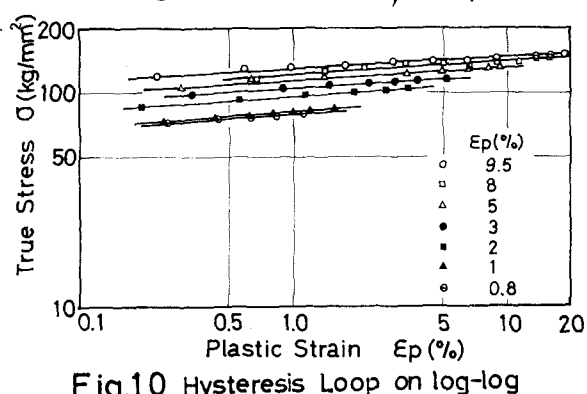
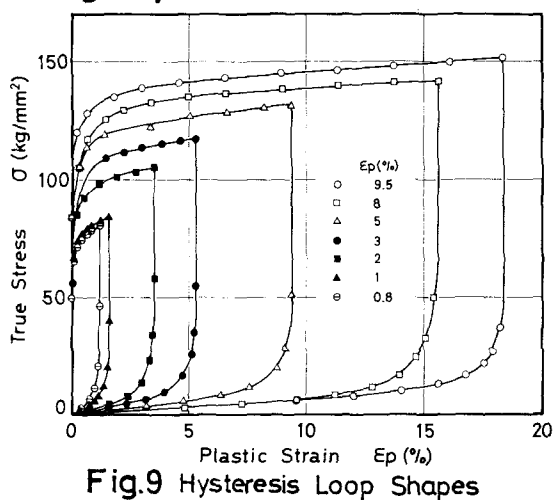
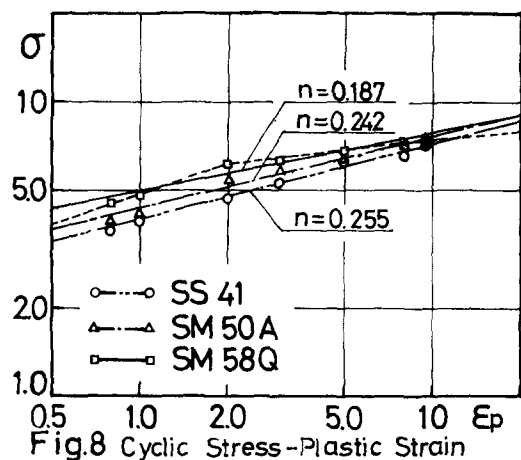


Fig.10 Hysteresis Loop on log-log

Table 4 Cyclic Data

	K	n
SS 41	40.3	0.255
SM 50A	44.0	0.242
SM 58QT	50.8	0.188

次に各サイクルごとの応力-ひずみ曲線が、定常状態のループの先端での真応力と塑性ひずみの関係が次式で指数表示できると仮定して、定数K, nを求めてみる。

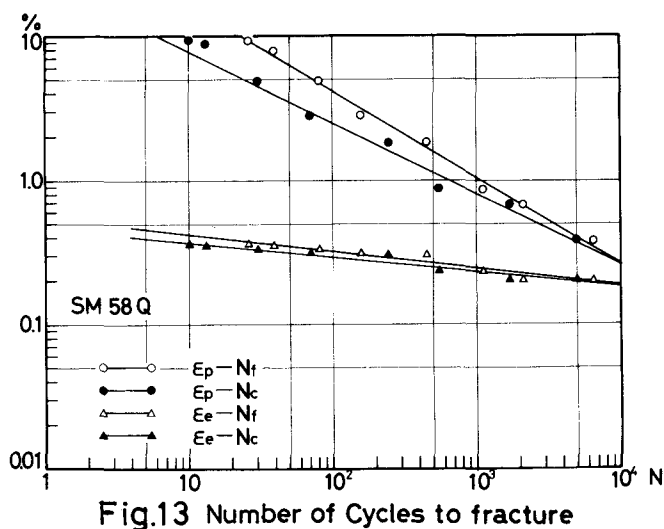
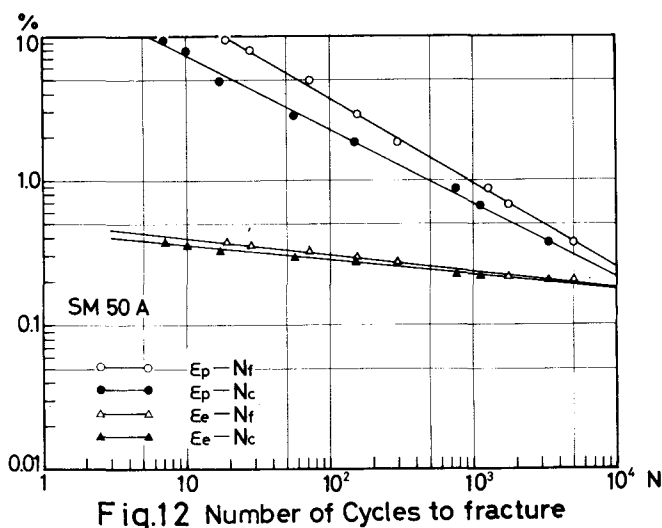
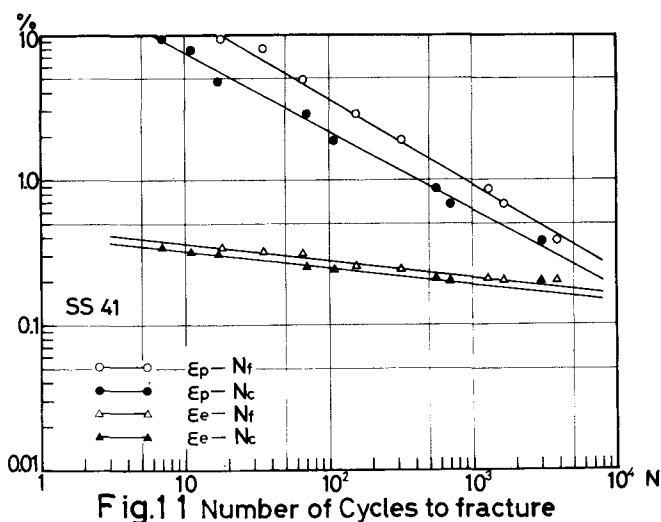
$$\sigma_a = K \varepsilon_p^n \quad (5)$$

その結果がFig.8に示してある。SS 41, SM50はEndoらの航空機材料と同様一本の直線上に乗っているが、SM58は途中で折れ曲って、二本の直線上にあった。Table 4 にnとKの値を示してある。

(5)式で定常ループの先端が表わされるSS41とSM50のうち、SM50について各ひずみ振幅の定常ループの圧縮側のループ先端に座標軸をとって各ヒステリシスループ形状を示したのがFig.9である。これは実験記録のデータレコーダーからアナログ変換により直接求めたもので、ヒステリシスループはほぼ対称になっている。

Fig.10は引張側の半サイクルを両対数座標に示したもので、河本らのS55C鋼と同様各ループはほぼ直線上にある。勾配はひずみ振幅が大きくなると大きくなる傾向はあるが、有意差があるかどうかは、きりしない。

疲労寿命は亀裂の発生と進展は別の因子であることや断面が亀裂発生後は引張と圧縮で異なることから、 N_f より N_c をとるべきであることが指摘されている。本実験でも N_c を重視した観察を行なった。観察は倍率6.3～40の実体顕微鏡で行なったが、負荷を一定ひずみ速度で行ないながら、観



察できる部分は全体の1/4程度であった。 N_c の亀裂長さは引張と圧縮で明らかに亀裂が開閉した0.2 mmとした。

Fig 11～13に定常状態における塑性ひずみ振幅および弾性ひずみ振幅と亀裂発生寿命および破断寿命の関係を両対数座標で示してある。

Manson - Coffin 式

$$\begin{aligned} \epsilon_p \cdot N^{kp} &= C_p \\ \epsilon_e \cdot N^{ke} &= C_e \end{aligned} \quad (b)$$

により、疲労試験の各定数を求めたものがTable 5に示されている。Fig. 11～13の図中の実線は最小二乗法により求めた結果である。

N_c は N_f に比較してバラツキが大きい。これは負荷を連続して行なったことにより、全体の表面の1/4しか亀裂の観測を行なわなかったことによるものと考えられる。

$\epsilon_p - N_c$ の勾配は $\epsilon_p - N_f$ の勾配に比べて小さくなっており、高張力鋼になるにしたがってその傾向は大きくなっている。各定数の値は飯田らの値とほぼ等しくなっている。

3.2 残留延性試験

累積損傷理論が残留破壊延性と関係づけられる説がいくつか提案されているので、これまで繰返しひずみと残留延性を扱った研究は多いが、累積損傷理論との対応は否定的な結果がほとんどである。

このような繰返しひずみを受け鋼材の残留延性は、繰返しひずみ試験と引張試験のひずみ速度、試験体形状、試験機の偏心、実験誤差などに影響されることが考えられるが、このほかに同一鋼材でも採取位置による影響が予想される。そこで本実験は材料のバラツキが少なくなるように、試験体の採取位置を明確にして行なった。

Table 5 Coefficient of Power Function

	N_c				N_f			
	C_p	K_p	C_e	K_e	C_p	K_p	C_e	K_e
SS 41	0.260	0.540	0.00419	0.114	0.550	0.590	0.00474	0.116
SM 50A	0.240	0.514	0.00449	0.102	0.558	0.589	0.00520	0.117
SM 58QT	0.244	0.493	0.00468	0.103	0.660	0.598	0.00551	0.119

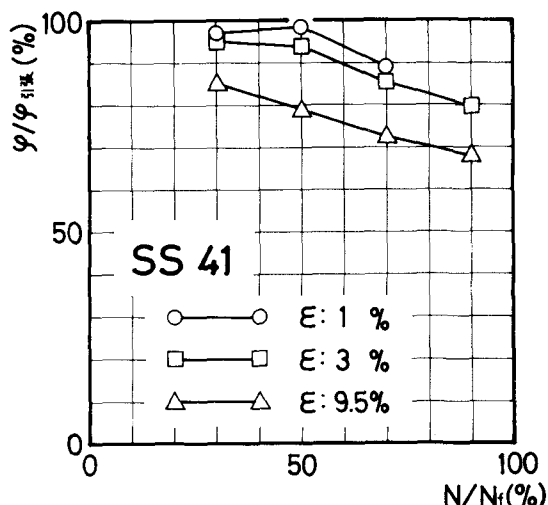


Fig.14 Ductility after Partial Cycling

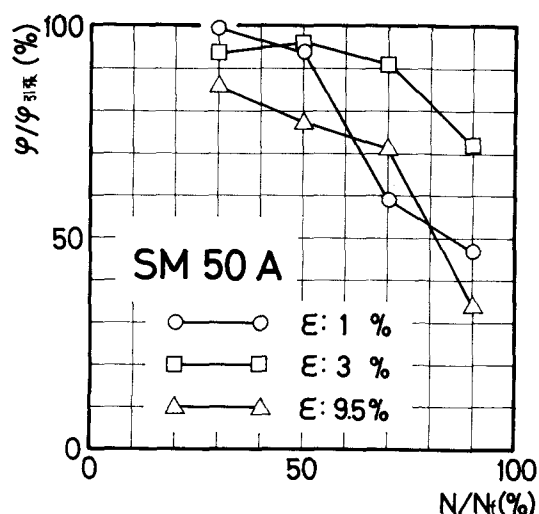


Fig.15 Ductility after Partial Cycling

繰返しひずみ速度は $2 \times 10^{-3} / \text{sec}$ で統一し、引張試験は疲労試験機でそのまま行ない、最大荷重時以後は3,4秒でほぼ一定速度で破壊した。

Fig. 14~16は各鋼種の残留延性を引張試験のしほりとの比で表わしたものである。各鋼種ともひずみ振幅が大きいほど、また N/N_f が大きいほど残留延性が減少している。これは飯田の報告と一致しており、理論式では大略らのものに傾向は一致している。加藤らの報告の SM 58 が1以上の値になっているのは荷重制御で実験を行なっているため、本実験と異なった結果になったと考えられる。

Fig. 17 は繰返しひずみを受けた鋼材の引張試験を累積塑性ひずみによって処女材の引張試験したものでほぼ一致している。Table 6は最大荷重時の塑性ひずみと累積塑性ひずみを比較したもので、累積塑性ひずみが SM 58 は小さく、SM 50 は大きくなっている。

4. 結び

SS 41・SM 50A・SM 58QT の3種の構造用鋼材の定ひずみ繰返し実験と残留延性実験を行ない以下の結果を得た。

(1) 定ひずみ繰返し力を受ける場合、SS 41・SM 50 は漸増応力となるが、SM 58 はくびれ現象を起こす8%以上の振幅では漸減した後漸増した。また1%以下では漸減を続け、その中間のひずみ振幅では漸減の後定常状態となった。

(2) 累積塑性ひずみによって各ループを寄せ合えたものは定ひずみ繰返し実験でも、ほぼ引張試験の応力-ひずみ関係と一致した。累積塑性ひずみは3%以下の振幅では引張試験のくびれ直前の塑性ひずみより相当小さいものであった。

(3) 試験体採取位置を考慮して、

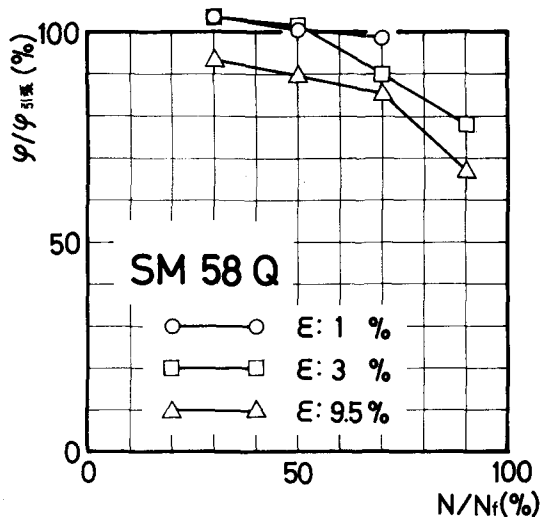


Fig. 16 Ductility after Partial Cycling

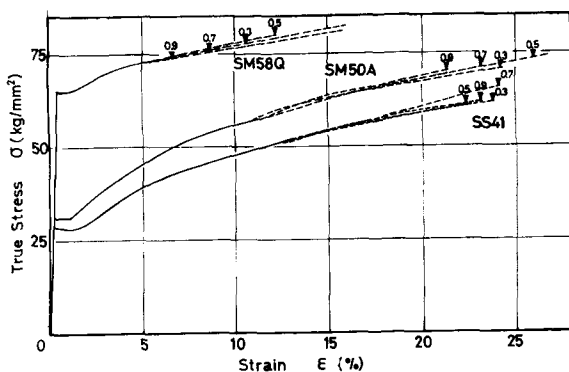


Fig. 17 Comparison with

Fictitious and Monotonic

Table 6 Comparison with Plastic Strains

累積塑性ひずみ/引張試験の最大荷重時の ϵ_p					引張試験の最大荷重時の ϵ_p
N/N _f	0.9	0.7	0.5	0.3	
SS 41	1.10	1.15	1.06	1.13	20.9
SM 50A	1.42	1.54	1.73	1.61	14.9
SM 58QT	0.57	0.76	1.08	0.94	10.8

＊ Fig. 17 と Table 6 は残留延性試験のうち、ひずみ振幅が3%のものを選んで累積塑性ひずみを求めたものである。

材料のバラツキを少なくして行なった残留延性試験は、ひずみ振幅が大きいほど、 N/N_f が大きいほど残留延性が減少しており鋼種の違いによる差はなかった。

謝辞

本実験は、工業技術院の委託を受けて建材試験センターに設置された構造材料の安全性に関する調査研究委員会（JMC委員会 委員長 仲威雄）、金属分科会（主査 藤本盛久）の「高低サイクル疲労」Working Groupで行なわれたものの一部である。委員である東京大学 飯田国広教授には実験の細部に至るまでの御教示をいただいた。実験の実施に当り東京工業大学の鈴木克宗、神山廣理両君の協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 堀田・石黒・関口・村木・石井「鋼材の歪制御低サイクル疲労強度推定に関する研究」(第1報),(第2報),(第3報)日本造船学会論文集 第124号(昭43),第126号(昭44),第128号(昭45)
- 2) Manual on Low Cycle Fatigue Testing ASTM STP 465, 1969
- 3) 加藤・青木・山内「引張・圧縮繰返し荷重を受ける鋼索材の挙動に関する実験的研究」日本建築学会大会梗概集(昭45)
- 4) 山内泰之「繰返し応力をうける鋼材の履歴挙動に関する研究」学位請求論文(東京大学建築学科)
- 5) Endo and J. Morrow "Cyclic Stress-Strain and Fatigue Behavior of Representative Aircraft Metals", Journal of Materials, JMLSA, Vol. 4, No. 1 March 1969
- 6) 河本・並木・堂前「硬鋼の繰返し応力-ひずみ関係およびヒステリシスループ形状に及ぼす履歴の影響」材料 Vol. 24, No. 259, Apr. 1975
- 7) 飯田国広「HT 60 鋼の歪制御低サイクル疲労における亀裂発生寿命と破面のマイクロフラクトグラフィ」日本造船学会論文集 第128号(昭45)
- 8) 飯田・井上「低サイクル疲労寿命の分布形状に基づいた疲労設計曲線の一考察」日本造船学会論文集 第133号(昭48)
- 9) D. E. Martin "An Energy Criterion for Low Cycle Fatigue" McGraw Hill 1966
- 10) K. Ohji, W. R. Miller and J. Martin "Cumulative Damage and Effect of Mean Strain in Low-Cycle Fatigue of a 2024-T351 Aluminum Alloy" Journal of Basic Engg. Dec. 1966
- 11) 飯田・井上・小林「歪制御低サイクル累積被害」(第1報),(第2報)日本造船学会論文集 No 121 (昭42), No 189 (昭43)
- 12) 加藤・秋山・山内「引張・圧縮繰返し応力を受けた鋼索材の引張強度、及び延性の変化」日本建築学会大会梗概集(昭47)

注1) JIS Z 2273 金属材料の疲れ試験方法通則

JIS Z 2274 金属材料の回転曲げ疲れ試験方法

JIS Z 2275 金属平板の平面曲げ疲れ試験方法

注2) WES 162 溶接構造用金属材料のひずみ制御低サイクル試験方法