

## 構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性

STRAIN CONTROLLED LOW CYCLE FATIGUE  
BEHAVIOR OF STRUCTURAL STEELS

西村 俊夫\*・三木 千寿\*\*

By Toshio NISHIMURA and Chitoshi MIKI

## 1. 序 論

橋梁、海洋構造物などの鋼構造物が、地震、風、波浪などによる過大な外力を比較的少ない回数（ $10 \sim 10^5$  回程度）受けたとき、部材あるいはそれらの継手部に疲れきれつが発生・進展し、破壊を起こす、いわゆる低サイクル疲れは、構造物が異常時荷重を受ける場合の安全性を確保するうえで、その性状を明らかにすることが必要であり、究明の重要性は従来より指摘されてきたところである<sup>1)~3)</sup>。また、公称応力が許容応力以下であるような一般の載荷状態でも、構造物中に必ず存在する切欠き部では、切欠き底が局部的に降伏し、塑性ひずみを繰返し生ずることがあり、このような部材の疲れ挙動を解明するうえでも、低サイクル疲れの諸性状を求めることはきわめて有用である<sup>4)</sup>。

この低サイクル疲れは、高サイクル疲れの場合と異なり、構造材料の塑性領域における応力あるいはひずみの繰返しを取扱うため、ひずみ制御下のものか、荷重制御下のものかで、その疲れ性状はかなり異なったものとなる。実際の鋼構造物に考えられる低サイクル疲れは、その構造型式や載荷条件などにより各種の場合が生ずるが、ここではそのうち疲れきれつ発生位置がひずみ制御的となるような場合の低サイクル疲れの問題を対象としている。鋼構造物のひずみ制御低サイクル疲れにおける寿命評価あるいは構造設計に際しては、構造部分の繰返し載荷に伴う塑性ひずみを決定し、このひずみ量から構造部分の疲れ寿命を推定するのがその考え方の骨子となるが、本論文はこれらの方法を適用するに際し必要となる各種構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れの諸特性を求めたものである。

構造物の低サイクル疲れ寿命を考えると、もっとも基本となるのは素材のひずみ制御試験から得られる、ひ

ずみ振幅～寿命線図であり、これを求めるための研究は従来より内外で種々の金属材料に対して数多く実施されている。わが国で鋼を対象としたものには、堀田らの低炭素鋼から超高張力鋼までの10鋼種に対する研究<sup>5)~7)</sup>、飯田らによるSS 41, SM 50, HT 60の疲れきれつ発生寿命に注目した研究<sup>8)~11)</sup>、大路らの低炭素鋼で予ひずみの影響を調べた研究<sup>12)</sup>、中川らのS 55 Cを用いた研究<sup>13)</sup>、黒羽らのH型鋼から切出した材料による研究<sup>14)</sup>などがあげられる。そして、いずれの研究においても塑性ひずみ振幅、弾性ひずみ振幅と疲れ寿命が両対数で直線関係を示すという、いわゆるManson-Coffin則<sup>15)</sup>がほぼ成立つことを明らかにしている。また、Manson-Coffin則の係数、指数と材料の静的引張特性との関係や<sup>5)~7)</sup>、Mansonが提案している4点法<sup>16)</sup>などの寿命推定法の検討なども行われている。なお、飯田らの研究以外はいずれも破断寿命を対象にして考察が行われており、そのため試験片寸法の影響とか、ひずみ制御の精度などに問題を含んでいると考えられる。

構造部分に考慮すべきひずみ振幅を決定するためには、鋼材のひずみ繰返しに伴う応力の性状を明らかにすることも必要である。すなわち、一定の塑性ひずみ振幅を繰返すと、真応力が上昇したり、低下したりする、いわゆる繰返し硬化、繰返し軟化の現象が生じるため、繰返し硬化、繰返し軟化が終了した後の定常ヒステリシスループのループチップを結んで求めた繰返し応力～ひずみ曲線(cyclic stress-strain curve)を導入して応力ひずみ関係を解析することが適当と考えられる。この曲線についてMorrowはアルミ合金による実験からその塑性ひずみ成分と、真応力とが両対数で直線関係になることを示しており<sup>16)</sup>、このことは黒羽らによりH型鋼素材に<sup>14)</sup>、また、河本らによりS 55 C鋼<sup>18)</sup>に対してもかなりよく成立することが確かめられている。また、この曲線を得るためにはかなりの数の試験片に対するひずみ制御試験が必要となるが、Morrowらはこの曲線を簡便に求める方法として静的引張試験結果からの推定方法<sup>16)</sup>

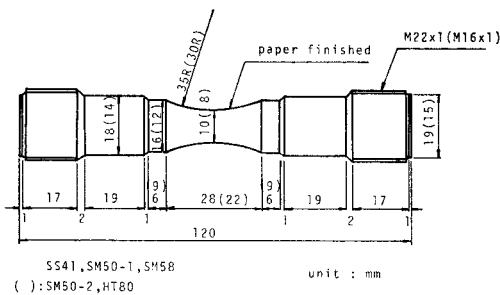
\* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

や、ひずみ振幅漸増減試験 (Incremental step test)、多段ひずみ振幅試験 (Multi-step test)<sup>19)</sup> を提案している。河本らは S 55 C 鋼についてひずみ振幅漸増減試験の適用性を検討し、それから得られる曲線と、一定ひずみ振幅試験から得られる曲線とはよく一致することを示している。

過大な荷重を繰返し受けた後の構造物の静的残存強度の評価も、その安全性を考えるうえで重要である。そのための基礎的なデータとなる、材料に繰返し塑性ひずみ履歴を与えた後の静的引張試験は過去数例実施されている<sup>20)~23)</sup>。しかし、それらは低サイクル疲れにおける累積被害の仮説がすべて材料の延性の消費に関係づけられることより<sup>20), 22)</sup>、破断延性の変化のみに注目しており、その他の力学的性質の変化については検討されていない。

以上に述べたごとく、ひずみ制御低サイクル疲れ試験はさほど目新しいものではない。しかし、土木構造物に今後使用が増加するであろう調質高張力鋼も含め、繰返し塑性ひずみを受ける各種構造用鋼材の低サイクル疲れ特性に関する検討は十分なされていないといえず、また、関係データの集積も少ないと考えられる。本研究では SS 41, SM 50, SM 58 および HT 80 の 4 鋼種、5 供試鋼材に対して統一的方法でひずみ制御低サイクル疲れ試験を行い、主として次の各項目について鋼種間の相違なども含め検討を加えた。また、構造部材ではその荷荷条件から一般に平均ひずみが存在することから、平均ひずみが疲れ性状に及ぼす影響についても検討した。

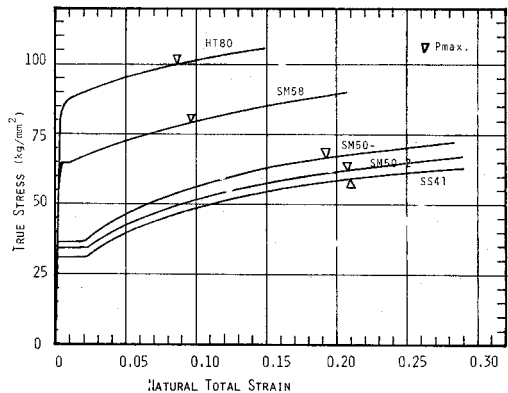


図一 試験片の形状、寸法

- (i) ひずみ振幅と疲れきれつ性状。
- (ii) ひずみ振幅～寿命線図。
- (iii) 繰返し硬化、繰返し軟化といった過渡的な挙動と、その後の定常状態での繰返し応力～ひずみ特性。
- (iv) 繰返し応力～ひずみ曲線を簡便に求める方法。
- (v) 繰返し塑性ひずみ履歴に基く引張強さ、破断延性など鋼材の力学的性質の変化。

## 2. 試験片および試験計画

供試鋼材のミルシートによる機械的性質、化学成分を表一に示す。なお SM 50 A のうち板厚 25 mm のものを SM 50-1, 16 mm のものを SM 50-2 とした。試験片はすべてその軸を鋼板の圧延方向と一致させ、板厚中心部から採取した。試験片の形状は図一に示すごとく WES-162<sup>24)</sup> の 3 号試験片で、最小断面部の直径が 10 mm あるいは 8 mm (SM 50-2, HT 80) の砂時計型 (形状係数 1.06) である。試験片表面は機械仕上げの後、軸方向に研摩紙 (# 1000) で円周方向のバイト傷がなくなるまで研摩した。本実験では塑性ひずみの繰返しを対象としているので、素材圧延および試験片加工による残留応力は載荷の初期には大部分開放されるものと考え、残留応力除去のための処理は行わなかった。図二に各供試鋼材による砂時計型試験片の静的引張試験結果



図二 砂時計型試験片の真応力～対数全ひずみ曲線

表一 供試鋼材の機械的性質と化学成分 (ミルシート値)

STEEL	TENSION TEST			CHEMICAL COMPOSITION (%)									
	Y.P. (kg/mm <sup>2</sup> )	T.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	El. (%)	C (×100)	Si (×100)	Mn (×100)	P (×1000)	S (×1000)	Cu (×100)	Cr (×100)	Mo (×100)	V (×100)	B (×1000)
SS 41	29	46	—	12	26	104	20	16	—	—	—	—	—
SM 50 A*	33	52	29	15	36	134	14	18	—	—	—	—	—
SM 50 A**	33	51	28	16	34	130	17	18	—	—	—	—	—
SM 58	55	71	30	12	27	111	12	7	—	16	—	3	—
HT 80	84	88	31	11	27	89	11	3	24	91	32	4	1

\* 板厚 25 mm これを SM 50-1 とよぶ。

\*\* 板厚 16 mm これを SM 50-2 とよぶ。

その他の鋼材 SS 41, SM 58 は板厚 25 mm, HT 80 は板厚 16 mm

表-2 供試鋼材の引張試験結果

供試鋼材	by HOUR GLASS TYPE SPECIMEN				by JIS-1 A (R 25)			by JIS-4 (φ 10) Modified		
	降伏点応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	破断延性 <sup>1)</sup> ε <sub>f</sub>	ひずみ硬化 指数 <sup>2)</sup> n*	降伏点応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	破断延性 <sup>1)</sup> ε <sub>f</sub>	降伏点応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	破断延性 <sup>1)</sup> ε <sub>f</sub>
SS 41	30.2	47.8	1.087	0.291	29.2	45.1	1.100	27.1	44.8	1.041
SM 50-1	34.8	55.4	1.058	0.282	31.6	51.8	1.073	32.5	53.4	1.050
SM 50-2	34.2	51.6	1.064	0.286	—	—	—	—	—	—
SM 58	63.8	72.6	1.116	0.139	64.3	70.0	1.248	60.5	67.0	1.259
HT 80	85.8	92.3	1.074	0.087	—	—	—	—	—	—

1) ε<sub>f</sub> = ln(A<sub>0</sub>/A<sub>f</sub>) = ln(100/(100-RA)) RA: Reduction of Area (%)  
 2) n\*: Strain Hardening Exponent σ = C · (ε<sub>p</sub>)<sup>n\*</sup>

を、真応力～対数全ひずみについて示す。また、表-2はそれらから得られた材料諸値である。引張試験は各供試体ごとに3本の試験片について行ったが、図-2の各曲線はその内で平均的なものであり、表-2の値は3本の平均である。SS 41, SM 50-1, SM 58 については同一鋼板から採取した JIS 1 A 号試験片および JIS 4 号でつかみ部をねじとした試験片での引張試験も行われており<sup>25)</sup>、同表中にその結果を示した。砂時計型とすることにより降伏点および引張強さとも上昇する傾向が認められる。砂時計型試験片では疲れきれつ発生位置が限定されるため、その部分でのひずみ制御が可能であり、また、疲れきれつの観察が容易であるなどの利点がある。疲れ寿命は砂時計型の方が平行部を有する試験片に比べてやや長寿命となるが、実用上問題のない程度であり<sup>26)</sup>、この種の実験にしばしば使用されている。

疲れ試験には電気油圧型疲労試験機(載荷能力: 動的 ±5.0t, 静的 ±7.5t)を用いた。ひずみ制御疲れ試験は試験片の最小断面位置の直径方向変位を制御することにより行われる。荷重および直径方向変位は X-Y レコーダーに描くとともに、データレコーダーに記録し、それを A-D 変換して真応力や対数ひずみの計算を行った<sup>24)</sup>。疲れきれつの観察は、三眼式実体顕微鏡(6~40倍)によった。

疲れ試験での繰返し速度は、すべての試験でひずみ速度が 2 × 10<sup>-3</sup>/sec と一定になるように設定した。したがって、作用波形は三角波である。繰返し速度に関して Morrow らは室温の実験ではひずみ振幅に関係なく 0.1 ~ 10 Hz で応力～ひずみ性状および寿命に大きな差は生じないと述べている<sup>19)</sup>。また、堀田らは構造用鋼材はひずみ速度にさほど敏感ではないが、ひずみ速度が 10<sup>-2</sup>/sec 以上となると影響があるとの実験結果を示している<sup>9)</sup>。さらに Topper らは 8 × 10<sup>-3</sup>/sec とひずみ速度がその 1/20 である 4 × 10<sup>-4</sup>/sec の実験では応力～ひずみ性状および寿命にさほど大きな差はなかったと述べており<sup>27)</sup>、これらを考慮し、また変位検出装置の応答性から上記のようなひずみ速度を設定したのである。

図-3 に本論文中で用いる記号とヒステリシス

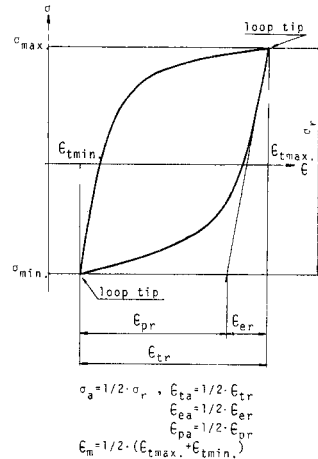


図-3 記号とヒステリシスループとの対応

ループとの対応を示したが、実験に使用した平均ひずみ ε<sub>m</sub> は 0 の他 +0.1, -0.1 とした。+0.1 のひずみは SM 58, HT 80 では引張試験での最大荷重時のひずみ値を越えているが、ひずみ制御試験のため、いずれの鋼種においても試験中にさほど顕著なくびれ現象は生じなかった。

ひずみ制御試験は一定ひずみ振幅試験を主体に、その他多段ひずみ振幅試験、ひずみ振幅漸増減試験を行った。一定ひずみ振幅試験ではひずみ振幅(ε<sub>ta</sub>)を 0.1 ~ 0.002 の間で、ε<sub>m</sub> = 0 のときは 8 ~ 10 レベル、ε<sub>m</sub> = ±0.1 のときは 5 ~ 6 レベルとし、この場合の応力ひずみ挙動、疲れ寿命などを測定した。

多段ひずみ振幅試験は図-4(a)に示すようなひずみの繰返しを行い、各ひずみ振幅段階での定常ループを求めるものである。繰返し応力～ひずみ曲線を求める場合

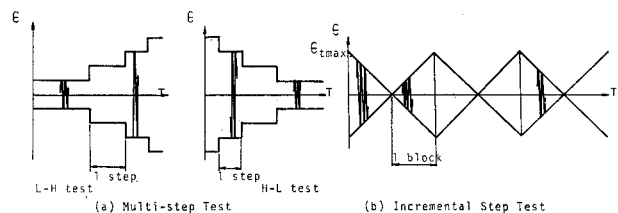


図-4 多段ひずみ振幅試験とひずみ振幅漸増減試験

にはひずみの段階数が多いほどよいが、各段階においてその応力～ひずみ関係が定常となるには概略破断寿命の1～2割の繰返し数が必要であり、そのような条件から各段階での被害度 ( $n/N_f$ ) が1/6となるよう各段階での繰返し数 ( $n$ ) を設定した。実験は  $\epsilon_m=0$  のとき  $\epsilon_{ta}$  の最大値を0.03, 0.1とし、 $\epsilon_m=\pm 0.1$  のときは  $\epsilon_{ta}$  の最大値を0.03とした。

ひずみ振幅漸増減試験は図-4(b)に示すごとく、ひずみ振幅の漸減、漸増のブロックをある程度繰返せば、以後定常ループが得られるというものである<sup>8),9)</sup>。この場合、最大ひずみ振幅  $\epsilon_{t\max}$  を大きくとれば広いひずみ領域での繰返し応力～ひずみ曲線が得られて好都合なわけであるが、定常的な応力～ひずみ関係を得ることが次第に困難になるといった問題があり、ここでは  $\epsilon_m=0, \pm 0.1$  に対して  $\epsilon_{t\max}=0.03$  とした実験を行った。なお  $\epsilon_m=0$  のときに  $\epsilon_{t\max}=0.08, 0.01$  とした実験を行い、ヒステリシスループに及ぼす  $\epsilon_{t\max}$  の影響を調べた。

繰返し塑性ひずみ履歴材の引張試験は SS 41, SM 50-1, SM 58 の3供試鋼材について行った。そのときの履歴は  $\epsilon_m=0$  でひずみ振幅が0.1, 0.03, 0.01, 0.005に対して、被害度 ( $n/N_f$ ) がそれぞれ0.3, 0.5, 0.7, 0.9となるように与えたものであり、引張試験は所定の履歴を与えた直後に行った。

は写真-1(a), (b) (同一試験片)のごとく荷重軸に対して45°方向に多数のきれつが発生し、それが相互につながりあって破断に至る。写真-1(c), (d) (同一試験片)は(a), (b)よりやや小さいひずみ振幅を受けたときに発生するきれつを示すもので、その方向はやはり荷重軸に対して45°であるが発生数は少なく、きれつの開口量も小さい。写真-1(e), (f)はひずみ振幅がさらに小さいとき ( $\epsilon_{ta} \leq 0.008$ ) のきれつを示すもので、荷重軸に対してはほぼ直角方向に発生し、ほとんど開口せずに破断に至る。また、 $\epsilon_{ta} \leq 0.003$  では発生するきれつは1～2本であった。

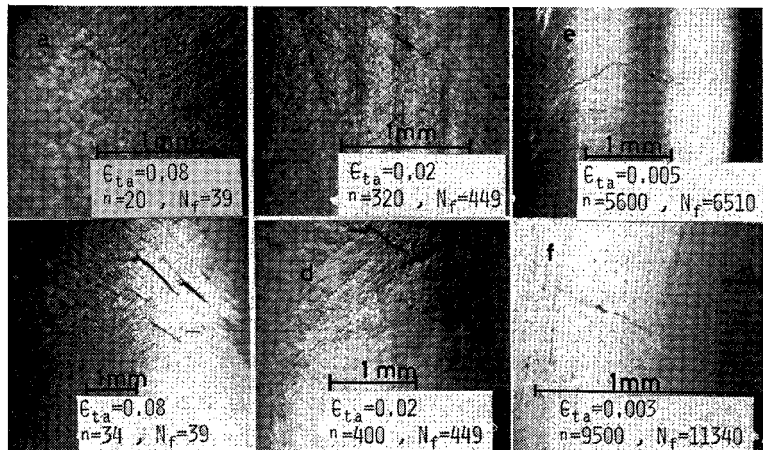
写真-2は疲れきれつの深さ方向の状況を示すもので、(a)～(c)は試験片表面で疲れきれつの発生を確認後、液体チツソで冷却して衝撃的に破断させたもの、(d), (e)は疲れきれつの表面長さがかなり長くなった後室温で引張り、破断させたものである。このような観察から、ひずみ振幅が大きく、きれつが開口するようなときは、たとえその表面長さが短かくてもきれつは半円状に内側に入っており、また、ひずみ振幅が小さいときはきれつの長さが1～2mmまではほとんど深さはなく、その後徐々に円弧状に内側へ進展することが明らかとなった。

以上のような疲れきれつの性状から、広い寿命領域にわたり表面きれつ長のみからきれつ寿命を設定すること

### 3. 実験結果とその考察

#### (1) 疲れきれつの性状ときれつ寿命の設定

写真-1は試験片表面で観察された代表的な疲れきれつを示すものである。この写真は SM 58 試験片の例であるが、きれつの発生性状に鋼種間の差は認められなかった。疲れきれつの発生および進展性状は、繰返されるひずみの大きさにより顕著な差があり、ひずみ振幅が大きいとき ( $\epsilon_{ta} \geq 0.03$ )



$\epsilon_{ta}$ : ひずみ振幅,  $n$ : 撮影時の繰返し数,  $N_f$ : 破断寿命  
写真-1 試験片表面での疲れきれつの様相

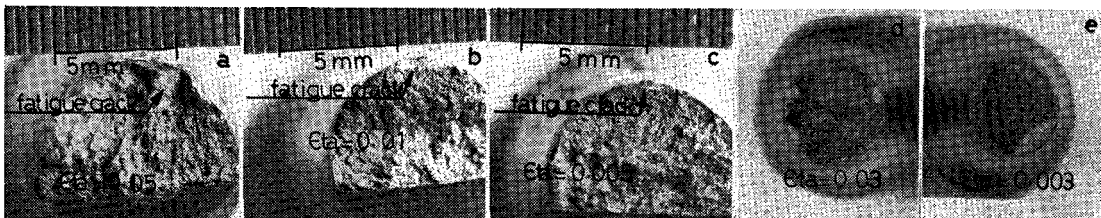


写真-2 疲れきれつの深さ方向の状況 (a, b, c: HT 80, d, e: SM 58)

表—3 Manson-Coffin 則の係数, 指数

STEEL	MEAN STRAIN $\epsilon_m$	Constants for $N_f$				Constants for $N_c^{0.3}$			
		$k_e$	$C_e$	$k_p$	$C_p$	$k_e$	$C_e$	$k_p$	$C_p$
SS 41	0	0.114	0.00451	0.540	0.420	0.118	0.00428	0.549	0.314
"	0.1	0.132	0.00503	0.574	0.476	0.117	0.00424	0.509	0.229
"	-0.1	0.122	0.00488	0.559	0.441	0.107	0.00418	0.492	0.217
SM 50-1	0	0.116	0.00499	0.548	0.444	0.115	0.00460	0.538	0.295
"	0.1	0.124	0.00512	0.571	0.433	0.115	0.00427	0.525	0.185
"	-0.1	0.116	0.00493	0.586	0.505	0.101	0.00419	0.493	0.182
SM 50-2	0	0.119	0.00482	0.550	0.403	0.119	0.00451	0.547	0.302
"	0.1	0.121	0.00481	0.588	0.466	0.119	0.00450	0.581	0.335
"	-0.1	0.110	0.00457	0.552	0.380	0.105	0.00422	0.582	0.297
SM 58	0	0.091	0.00495	0.638	0.788	0.087	0.00458	0.566	0.283
"	0.1	0.104	0.00532	0.633	0.682	0.088	0.00448	0.537	0.240
"	-0.1	0.089	0.00460	0.617	0.721	0.073	0.00389	0.504	0.228
HT 80	0	0.082	0.00579	0.633	0.679	0.077	0.00533	0.588	0.350
"	0.1	0.102	0.00645	0.643	0.640	0.101	0.00604	0.626	0.421
"	-0.1	0.087	0.00584	0.640	0.716	0.080	0.00533	0.593	0.372

は検討を要するが、少なくとも微小き裂の範囲ではあまり問題はないものと考え、試験片表面での疲れき裂長の観察結果を図—5のごとく整理し、実測されたき裂長の下限も考慮して、その長さが 0.3 mm となったときの繰返し数を  $N_c^{0.3}$  とし、これをき裂つ寿命と定義した。なお、き裂つ長が 1 mm になったときの繰返し数  $N_c^{1.0}$  を参考値とし、以下の疲れ寿命の考察に破断寿命  $N_f$  とともに使用した。

(2) ひずみ振幅と疲れ寿命

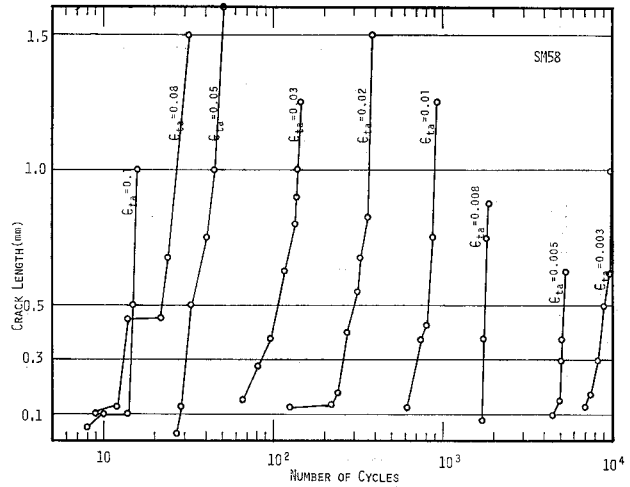
図—6 は各供試鋼材ごとに一定ひずみ振幅試験から求めた  $\epsilon_m=0$  の場合のひずみ振幅と寿命の関係を示すものである。(3), a) で述べるように、塑性ひずみを繰返したとき、応力~ひずみ関係はかなり顕著な繰返し硬化あるいは繰返し軟化を生ずることより、ここでは繰返し数  $N_f/2$  時のヒステリシスループを用いて塑性ひずみ振幅 ( $\epsilon_{pa}$ )、弾性ひずみ振幅 ( $\epsilon_{ea}$ ) を計算した。図中には  $\epsilon_{pa}$  と  $N_c^{0.3}$  および  $N_f$  との関係、 $\epsilon_{ea}$  と  $N_f$  との関係を直線式で回帰解析し、ひずみ振幅—寿命線図 ( $\epsilon-N$  線図) を求めて示した。いずれの供試鋼材においても  $\epsilon_{pa}=\epsilon_{ea}$  となるひずみ振幅に対応する寿命より短かい寿命領域で  $\epsilon_{pa}$  と  $N_f$ 、 $\epsilon_{ea}$  と  $N_f$  はよい直線性を示し、式 (1), (2) で表わされる Manson-Coffin 則<sup>15)</sup>はここで対象とした構造用鋼材についても成立していることが確認された。

$$\epsilon_{pa} \cdot (N_f)^{k_p} = C_p \dots\dots\dots (1)$$

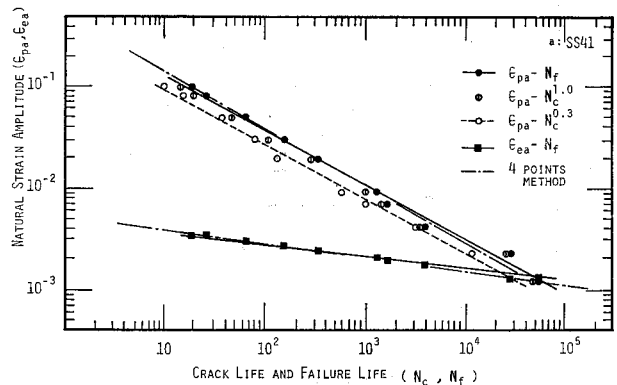
$$\epsilon_{ea} \cdot (N_f)^{k_e} = C_e \dots\dots\dots (2)$$

また、 $\epsilon_{pa}$  と  $N_c^{0.3}$  も多少ばらつきは認められるが同じくよい直線性を示し、したがって、き裂つ寿命についても Manson-Coffin 則的な取扱いが可能ながことが明らかになった。

表—3 に本実験で得られた式 (1), (2) の各係数, 指数を示した。式 (1) の  $C_p$  に対して Manson<sup>15)</sup> は  $\epsilon_f^{0.6}/2$ , Coffin<sup>28)</sup> は  $\epsilon_f/4$ , Martin<sup>29)</sup> は  $\epsilon_f/2\sqrt{2}$  を提案し、飯田<sup>10)</sup>は式 (1) をき裂つ寿命 (表面長さ 0.2~0.5



図—5 疲れき裂の表面長さと繰返し数



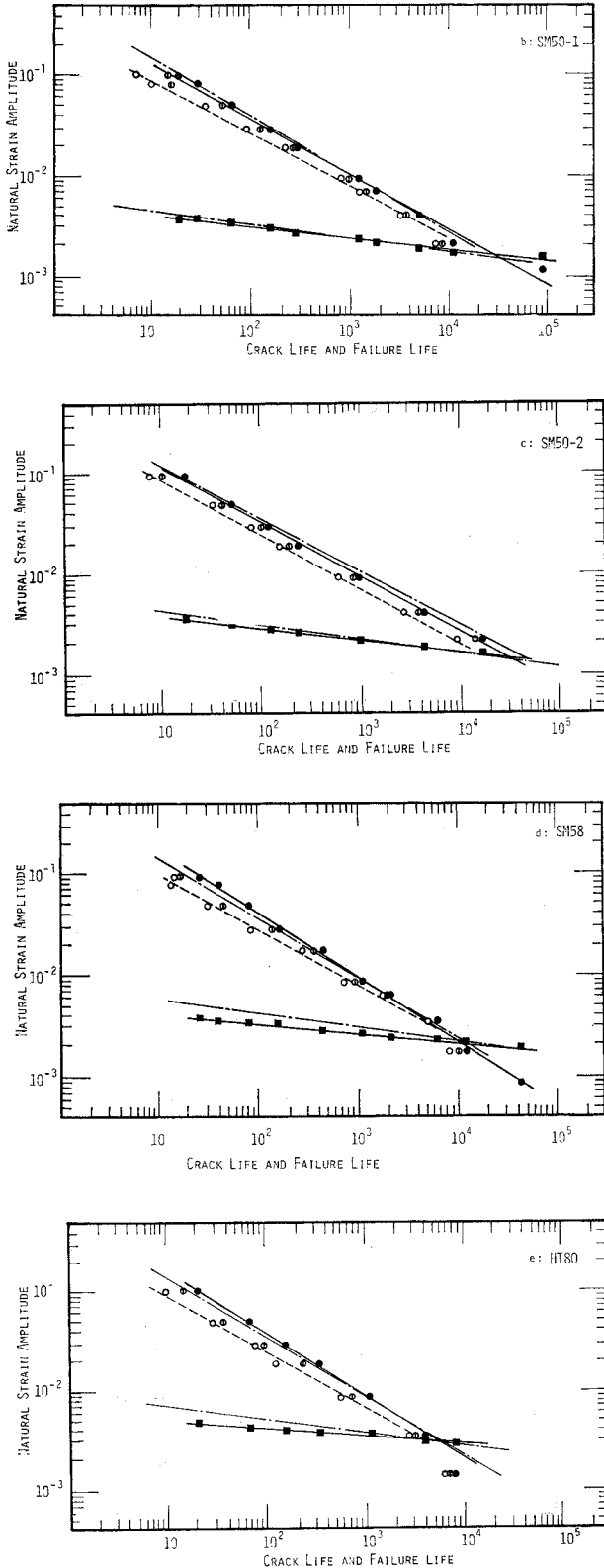


図-6 ひずみ振幅～寿命線図 ( $\epsilon_m=0$ )

mm のきれつ発生時)に適用して  $0.35\epsilon_f$  を提案している ( $\epsilon_f$ : 破断延性). また,  $k_p$  は Manson<sup>15)</sup> は 0.6, Coffin<sup>28)</sup> および Martin<sup>29)</sup> は 0.5 と一定であるとしている. 表-2 より各供試鋼材で  $\epsilon_f$  はほとんど等しいが, 実験結果では, SM 58, HT 80 に対する  $C_p$  は SS 41, SM 50 のそれより大きく, このことは  $k_p$  についても同様であり, 調質高張力鋼は SS 41, SM 50 とはやや異なる傾向を示すことに注意しなければならない.

図-6 には Manson の 4 点法<sup>16)</sup> による寿命推定線を一点鎖線であわせ示した.  $\epsilon_{pa}-N_f$  の推定線は実験結果と比較して SS 41, SM 50 ではやや長寿命側, SM 58, HT 80 では短寿命側を予測しているが, 全体的に上述各提案式によるよりは 4 点法の方が実験値に近い結果となった. また, SM 58, HT 80 の  $\epsilon_{ea}-N_f$  の推定線は実験値よりかなり上方向にはずれてくる.

図-7 は各供試鋼材での  $\epsilon_{pa}$  と  $N_f$  の関係をまとめたもので, 全体的には各鋼種間で疲れ強さの差はあまりないが, 各寿命直線は  $N_f$  が  $10^2 \sim 10^3$  回で交差し, それより寿命の長い領域で調質鋼など静的引張強さの高いものがやや短寿命になるといった傾向が認められる.

図-8 は同じく  $\epsilon_{pa}$  と  $N_e^{0.3}$  の関係をまとめたもので, 各供試鋼材ごとの寿命直線はほぼ一致してることが認められる. すなわち, きれつ寿命を基準とすればきれつ進展寿命差による影響がなくなり, SS 41 から HT 80 までの鋼種にかかわらず, 塑性ひずみ振幅に対する疲れ強さはほぼ同じになることが明らかとなった.

図-9 は  $\epsilon_m = \pm 0.1$  の場合のひずみ振幅～寿命線図であり, 各直線の係数, 指数は表-3 に示した. また, 比較のため  $\epsilon_m = 0$  のときの  $\epsilon_{pa}-N_f$ ,  $\epsilon_{ea}-N_f$  直線も図中に記入した. 各寿命直線は  $\epsilon_m$  が  $+0.1$  および  $-0.1$  の場合, SS 41, SM 50 ではほとんど一致し, かつ  $\epsilon_m = 0$  の場合に比しわずかに短寿命側になっており, これは大路らがアルミ合金に対する実験で指摘している傾向<sup>20)</sup>と同様である. SM 58, HT 80 では  $\epsilon_m = +0.1$  の方が  $-0.1$  の場合に比して多少短寿命側となる. しかし, 全体的にみればいずれの供試鋼材でもこの程度の引張あるいは圧縮の平均ひずみが寿命に及ぼす影響はあまりないとしてもさしつかえない.

(3) 一定ひずみ振幅試験での応力～ひずみ挙動

a) 鋼材の繰返し硬化および繰返し軟化特性

図-10 は各供試鋼材ごとに  $\epsilon_m=0$  での疲れ試験において、引張側、圧縮側最大真応力（ループチップでの真応力）の繰返し数に対する変化を示したものの例で、最初の引張時（0.25 サイクル）、圧縮時（0.75 サイクル）の値は1サイクルの位置にプロットした。本実験の範囲では SS 41, SM 50 はひずみ振幅が非常に小さいとき ( $\epsilon_{ta} \leq 0.003$ ) を除いて繰返し硬化し, SM 58 はひずみ振幅が大きいき ( $\epsilon_{ta} \geq 0.08$ ) を除いて繰返し軟化し, また, HT 80 はすべてのひずみ振幅で繰返し軟化を生じた。特に SM 58, HT 80 では繰返されるひずみ振幅が非常に小さいとき ( $\epsilon_{ta} = 0.003, 0.002$ ) でも繰返し軟化が著しい（繰返し数  $N_f/2$  で真応力が, SM 58 で約 35%, HT 80 で約 30% 低下）ことは注意すべき性質である。SS 41, SM 50 での繰返し硬化はいずれの  $\epsilon_{ta}$  でも2サイクル目までが著しく, その後の変化はわずかである。それに対して SM 58, HT 80 での繰返し軟化傾向は破断時まで継続することも大きな特徴である。これらの性質は, 構造物に過大荷重が繰返されるとき, 塑性ひずみ振幅は素材が繰返し硬化すれば1サイクル目よりも大きく, その後小さくなっていくのに対し, 繰返し軟化すれば荷重の繰返しごとに大きくなり, また, 塑性ひずみが繰返される領域も拡がり続けるといった現象が生じることを示唆している。

図-11 は同じく  $\epsilon_m = \pm 0.1$  での実験において最大真応力の変化を示したものの例である。+0.1, -0.1 の平均ひずみを与える場合は, それぞれ引張, 圧縮の初応力が生じる。 $\epsilon_m=0$  のとき繰返し硬化した SS 41, SM 50 においては  $\epsilon_{ta} \geq 0.05$  の場合, 第2サイクル目で初応力はほとんどなくなり, その後は  $\epsilon_m=0$  のときと変わらない応力～ひずみ挙動を示している。しかし,  $\epsilon_{ta} \leq 0.02$  の場合は平均ひずみを与えた側の真応力が徐々に低下し, 破断寿命の1割程度の繰返し数で初応力は消滅する。SM 58, HT 80 においても平均ひずみを与えた側の真応力の低下が激しくなって初応力が徐々に消滅していく。このことは(2)で述べたごとく平均ひずみの有無にかかわらず疲れ寿命がおおよそ同じとなることを裏付けるものと考えられる。

図-10, 11 の引張側真応力曲線上に  $N_c^{0.3}$  を

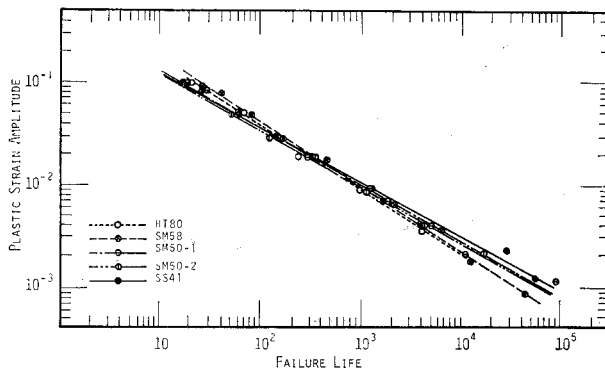


図-7 塑性ひずみ振幅 ( $\epsilon_{pa}$ )～破断寿命 ( $N_f$ ) 線図

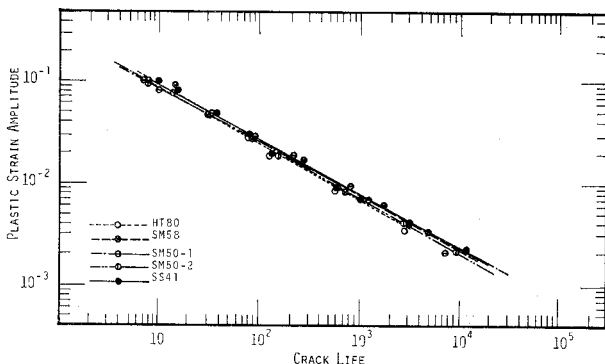
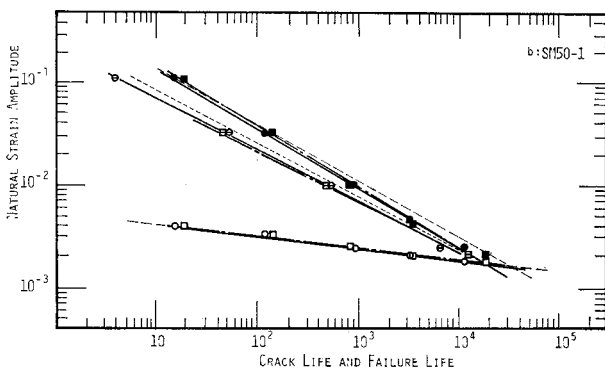
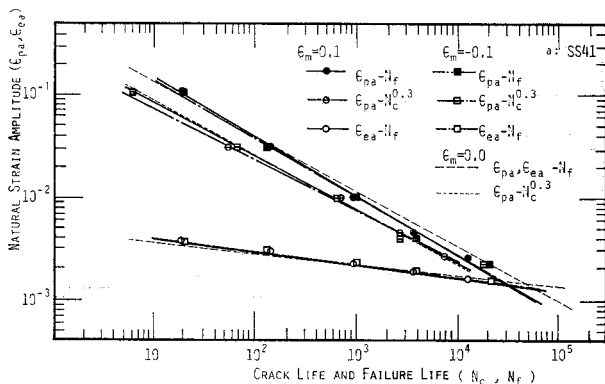


図-8 塑性ひずみ振幅 ( $\epsilon_{pa}$ )～き裂寿命 ( $N_c^{0.3}$ ) 線図



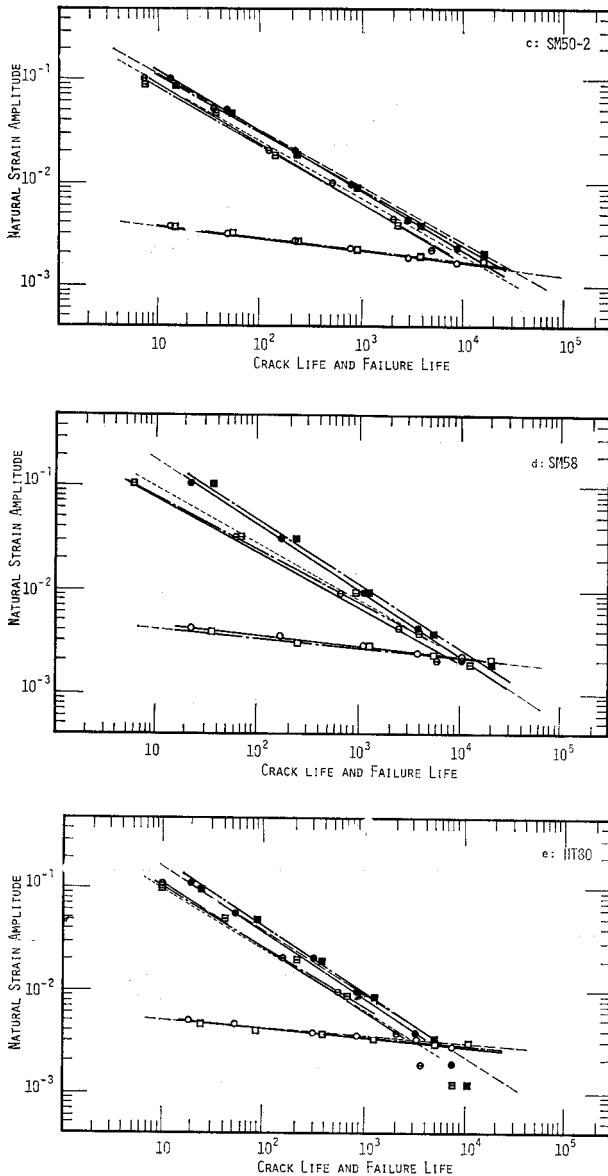


図-9 ひずみ振幅～寿命線図 ( $\epsilon = \pm 0.1$ )

示した。いずれの実験においても真応力が不安定な挙動を示しはじめるのは表面き裂つ長さが 3~5 mm となった以降である。

**b) 繰返し応力～ひずみ曲線**

SS 41 および SM 58 の  $\epsilon_m = 0, \epsilon_m = \pm 0.1$  による疲れ試験において、繰返し数  $N_f/2$  での真応力～全ひずみヒステリシスループのループチップを結んで得られたものが 図-12 に示す繰返し応力～ひずみ曲線である。a) における検討より、SS 41, SM 50 では  $0.1 N_f$  程度の繰返し数で応力～ひずみ関係はほぼ定常状態となっており、 $N_f/2$  は定常状態の範囲内である。また、SM 58, HT 80 では定常状態は存在しないが、 $N_f/2$  以降で

真応力の変化は小さいこと、平均ひずみのある場合はそれまでには初応力が消滅することなどより、便宜的に  $N_f/2$  時のヒステリシスループを採用した。同図中には 1 サイクル目 (引張側は静的引張曲線と一致する)、および 2 サイクル目のループチップを結んだ曲線も示した。

$+0.1, -0.1$  の平均ひずみを有する場合は、それぞれの平均ひずみ値を原点に一致させて表示している。繰返し応力～ひずみ曲線の形状に対する平均ひずみの影響は、いずれの供試鋼材においても無視できる程度である。また、a) での最大真応力の挙動からも明らかなごとく、この曲線はいずれも引張側、圧縮側でほぼ対称である。

繰返し応力～ひずみ曲線の形状は、平均ひずみが存在しても各鋼材ごとに同一とみなせることから平均ひずみを与えた側の 1 サイクル目の最大真応力、たとえば 図-13 に示すごとく、 $\epsilon_m = 0.1, \epsilon_{ta} = 0.01$  のときの  $\epsilon_t = 0.11$  に対応する真応力  $\sigma_1$  が、繰返し応力～ひずみ曲線における  $\epsilon_t = 0.01$  のときの真応力  $\sigma_2$  より大きいときは、ひずみの繰返しに伴い最大真応力が低下していく。

図-14 は SM 50-2 と HT 80 の  $\epsilon_m = 0, \epsilon_m = \pm 0.1$  の各疲れ試験で求めた、繰返し数  $N_f/2$  での真応力振幅 ( $\sigma_a$ ) と塑性ひずみ振幅 ( $\epsilon_{pa}$ ) との関係をも対数でプロットしたものである。このような表示をすると、SM 50 (SS 41 も同様) はすべての試験値が、また、HT 80 (SM 58 も同様) ではひずみ振幅が小さい部分を除きほとんどの領域で直線性を示す。したがって、ここで対象とした鋼材では全ひずみ振幅  $\epsilon_{ta} (= \epsilon_{ea} + \epsilon_{pa})$  は式 (3) のごとく表示できる。

$$\epsilon_{ta} = \sigma_a / E + A \cdot (\sigma_a)^{1/n'} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$A, n'$ :  $\epsilon_{pa}$  と  $\sigma_a$  の関係を両対数で直線近似したときの係数、指数

$E$ : 鋼材の縦弾性係数

前述のごとく繰返し応力～ひずみ曲線の形状は原点に対してはほぼ対称であることから、真応力振幅と全ひずみ振幅との関係を示す式 (3) は繰返し応力～ひずみ曲線を数式表示したものである。

表-4 は各供試鋼材、各平均ひずみについて、 $\sigma_a$  と  $\epsilon_{pa}$  が直線性を示す領域で最小二乗法により式 (3) 第 2 項の  $A, n'$  の値を計算した結果である。Morrow<sup>17)</sup> はアルミ合金を中心とした実験から  $n'$  はほとんどの金属で 0.15 であり、また、 $A$  に対しても表-4 右欄に示すごとく静引張試験結果からの推定方法を示しているが、その値は実験結果と大きく異なっている。したがっ



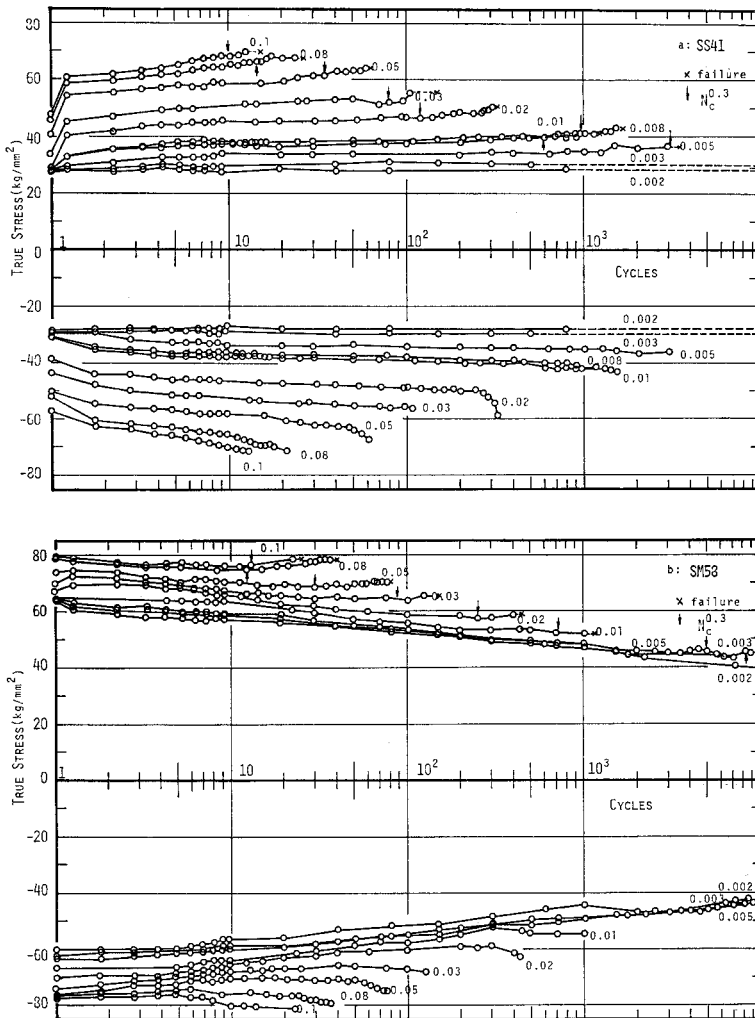


図-10 最大真応力の繰返し数に対する変化 ( $\epsilon_m=0$ ) (図中に付記した数値は  $\epsilon_{ta}$  の値)

て、構造用鋼材に対してはそのような方法により簡単に繰返し応力～ひずみ曲線の形状を予想することは困難と考えられる。

c) ヒステリシスループの形状

ヒステリシスループの形状を検討するため、図-15に示すごとく、ひずみが増加する側のループ(上昇線)は圧縮側ループチップを、ひずみが減少する側のループ(下降線)は引張側ループチップを原点とする座標軸を用い、この座標軸で計算した真応力( $\sigma^*$ )と塑性ひずみ( $\epsilon_p^*$ )を両対数でプロットし、繰返し数に対するループ形状の変化を各供試鋼材につき求めた。図-16はSS41の $\epsilon_m=0$ での実験において $\epsilon_{ta}=0.08$ (a図)および0.008(b図)の場合の例であり、いずれも繰返しの初期(2サイクル目)には上昇線は下降線に比しやや上にふくらんだ形状をしているが、ループが定常(a図で14サイクル目、b図で500サイクル目)となると、 $\epsilon_p$

が小さいわずかの部分を除いて両者は一致し、かつ一致したところでは直線性を示すようになる。また、長さ1mm程度のきれつが試験片表面に発生すると、 $\epsilon_{ta}$ が比較的大きいときは両者は再び一致しなくなる(a図で24サイクル目)が、 $\epsilon_{ta} \leq 0.01$ の実験では一致したままで(b図の1400サイクル目)、これらは(1)で述べた疲れきれつの深さおよび発生数のちがいによるものと考えられる。このような傾向はいずれの供試鋼材、平均ひずみでも同様である。

上述の $\epsilon_p^*$ と $\sigma^*$ の関係が両対数で直線性を示す場合のループ形状は式(4)で表現することができる。

$$\sigma^* = B \cdot (\epsilon_p^*)^{n''} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、

$B, n''$ :  $\epsilon_p^*$ と $\sigma^*$ の関係を直線近似したときの係数および指数

そして曲線の両端は繰返し応力～ひずみ曲線上にあることから、 $n''$ だけで定常時のループ形状を決定することができる。

図-17は各供試鋼材の $\epsilon_m=0$

での実験において、繰返し数 $N_f/2$ のヒステリシスループの $n''$ を、ひずみ振幅 $\epsilon_{pa}$ に対し両対数でプロットしたものである。同図より $n''$ は $\epsilon_{pa}$ の増加に対し直線的に小さくなっていることが認められる。各鋼材での $n''$ と $\epsilon_{pa}$ の関係を最小二乗法で計算し、図中に示したが、 $n''$ は静的な引張強さが高いほど大きいといった傾向が認められる。

図-18はSM50-2およびHT80について $n''$ に対する平均ひずみ $\epsilon_m$ の影響を調べたもので、図から明らかなどく $n''$ には $\epsilon_m$ の影響は認められない。これはいずれの鋼材についても同様である。

(4) 多段ひずみ振幅試験およびひずみ振幅漸増減試験での応力～ひずみ挙動

図-19は多段ひずみ振幅試験での引張側、圧縮側それぞれの最大真応力値の、繰返し数比( $n/N_f$ )に対する

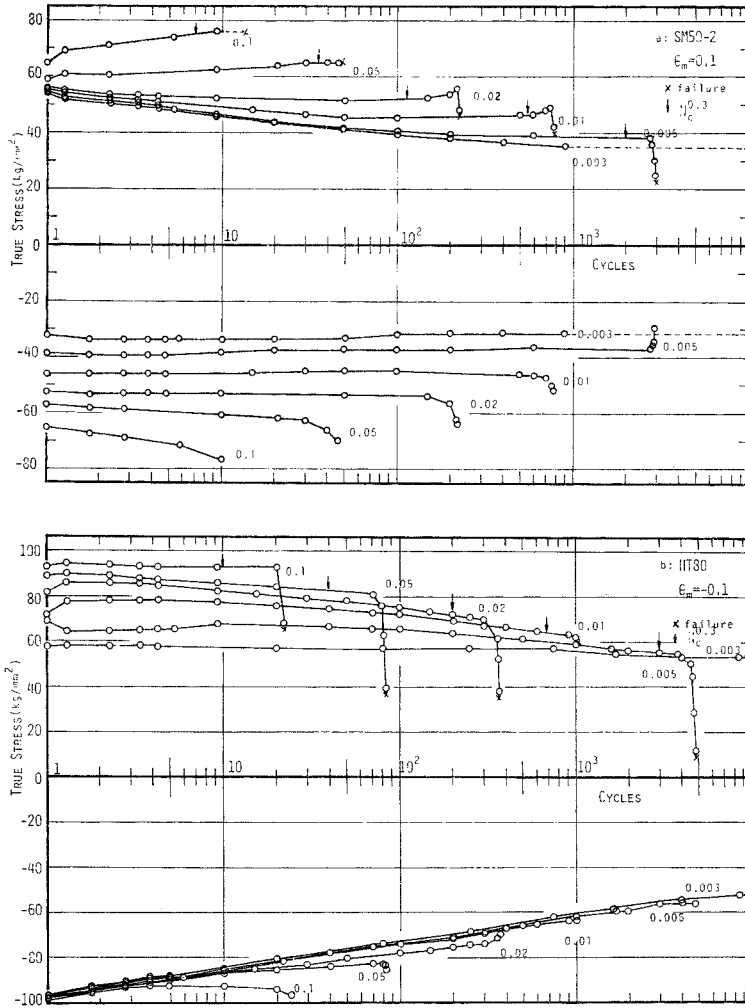


図-11 最大真応力の繰返し数に対する変化 ( $\sigma_m = \pm 0.1$ ) (図中に付記した数値は  $\epsilon_{ta}$  の値)

挙動である (最大ひずみ振幅が 0.03,  $\epsilon_m = 0$  のときの例). a 図に示した SM 50-2 では, 試験を低いひずみ振幅から始めた場合 (L-H 試験), ひずみ振幅を変えた毎に繰返し硬化しながら定常となり, 高いひずみ振幅から始めた場合 (H-L 試験), 繰返し軟化しながら定常となる. 各ひずみ振幅段階での定常時の最大真応力を一定ひずみ振幅試験の繰返し数比 1/2 のときの値と比較すると, L-H 試験では両者はよく一致しているが, H-L 試験では履歴の効果が現われ, 前者は後者よりかなり高くなっている. b 図に示した HT 80 では, L-H, H-L 試験のいずれもひずみ振幅を変えた後は繰返し軟化しながら定常状態に近づいており, また, 同じひずみ振幅段階で両試験方法から得られた最大真応力値はほとんど等しい. しかし, (3) で述べたごとく繰返し軟化は破断時まで継続するため, 一定ひずみ振幅試験の  $N_f/2$  での値とはかなり大きな差がある.

図-20 はひずみ振幅漸増減試験 ( $\epsilon_{t \max} = 0.03$ ) において各ブロックから得られる真応力振幅と, 塑性ひずみ振幅との関係を両対数で示したものである. 同図には静的引張試験から得られる真応力~塑性ひずみ曲線も示した. 繰返し硬化 (SM 50-2) あるいは繰返し軟化 (HT 80) は 1 ブロック目でかなりの部分が完了し, 真応力振幅と塑性ひずみ振幅の関係は 2 ブロック目から定常状態にかなり近い値となっている. いずれの供試鋼材でも 4 ブロック目以降でその真応力振幅と塑性ひずみ振幅の関係がほとんど変化しないことから, ここでは破断回数の 1/2 の繰返し数を含むブロック (SM 50-2 で 4 ブロック目, HT 80 で 5 ブロック目) での関係を定常とみなし, 以下の比較を行った.

図-21 はこれら 2 方法から得られた真応力振幅と塑性ひずみ振幅の関係を, 一定ひずみ振幅試験の繰返し数  $N_f/2$  時の結果と比較したものである. SM 50-2 では 図-19 からも明らかなごとく, 多段ひずみ振幅 L-H 試験と一定ひずみ振幅試験

の結果がよく一致し, HT 80 ではひずみ振幅漸増減試験の結果が, その最大ひずみ振幅によらず一定ひずみ振幅試験の結果とよく一致している.

図-23 は多段ひずみ振幅試験およびひずみ振幅漸増減試験での定常ヒステリシスループに対して 図-17 と同様な整理を行ったものであり, 図中には一定ひずみ振幅試験の結果も示している. この図においても  $n'$  は塑性ひずみ振幅が大きくなるに従い小さくなっており, また, その値に試験方法による差は認められない.

以上の応力~ひずみ挙動について, SM 50-2 での結果は SS 41, SM 50-1 と, HT 80 の結果は SM 58 とそれぞれ共通であり, また, +0.1, -0.1 の平均ひずみがある場合も同様である.

(5) 繰返し塑性ひずみ履歴による力学的性質の変化

図-23 に示すごとく各供試鋼材ごとに, 一定ひずみ

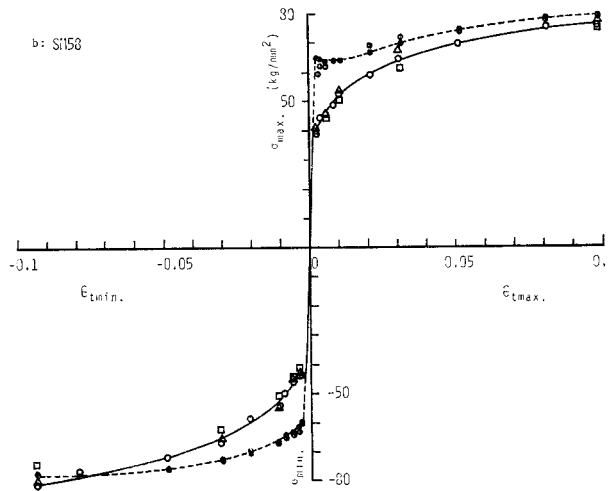
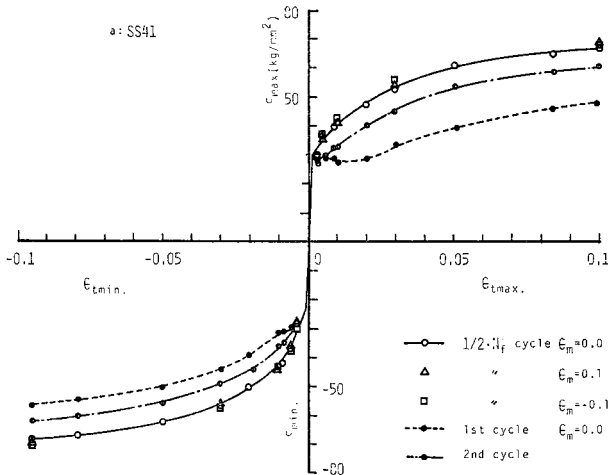


図-12 繰返し応力～ひずみ曲線

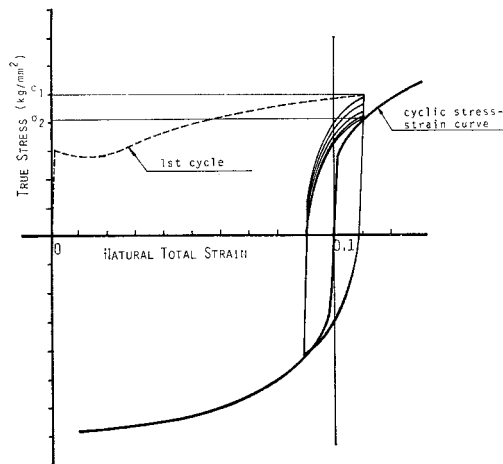


図-13 平均ひずみがあるときの繰返し応力～ひずみ挙動

表-4 真応力振幅 ( $\sigma_a$ ) と塑性ひずみ振幅 ( $\epsilon_{pa}$ ) の関係,  $\sigma_a = A \cdot (\epsilon_{pa})^{n'}$

STEEL	MEAN STRAIN $\epsilon_m$	CONSTANTS FROM EXPERIENCE		$A^{(1)}$
		$A$	$n'$	
SS 41	0	114.3	0.213	98.6
"	0.1	125.3	0.230	
"	-0.1	121.9	0.217	
SM 50-1	0	125.2	0.215	113.0
"	0.1	129.2	0.218	
"	-0.1	118.7	0.199	
SM 50-2	0	123.1	0.217	105.5
"	0.1	118.3	0.205	
"	-0.1	116.3	0.199	
SM 58	0	117.8	0.170	151.1
"	0.1	118.9	0.164	
"	-0.1	101.1	0.145	
HT 80	0	128.5	0.131	189.4
"	0.1	136.2	0.139	
"	-0.1	131.8	0.144	

1) by Morrow

$$\epsilon_{pa} = \epsilon_f' \cdot \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_f'} \right)^{1/n'}$$

$\sigma_f' = \sigma_f$ ,  $\epsilon_f' = \epsilon_f$ ,  $n' = 0.15$  としたときの  $A$

$\sigma_f'$ ,  $\epsilon_f'$ : 材料の繰返し延性および強度に関する定数  
 $\sigma_f$ ,  $\epsilon_f$ : 静引張試験での真破断強さと破断延性

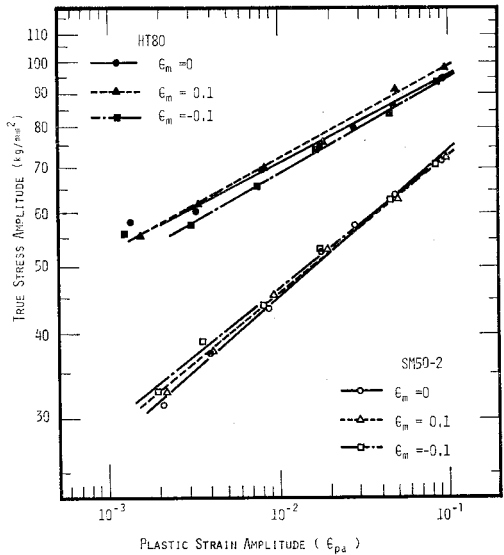


図-14 真応力振幅と塑性ひずみ振幅との関係

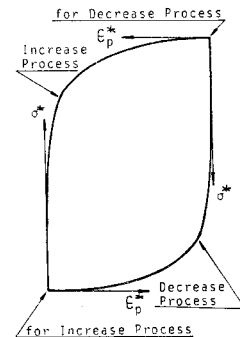
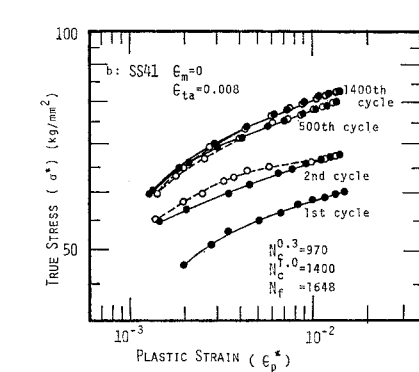
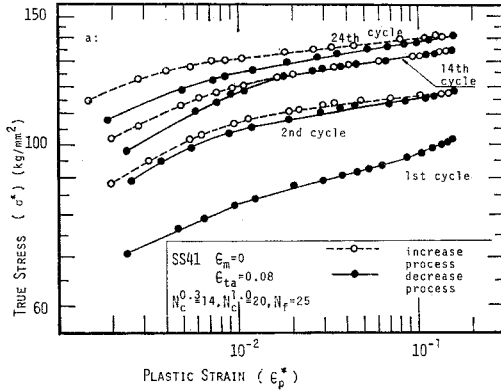
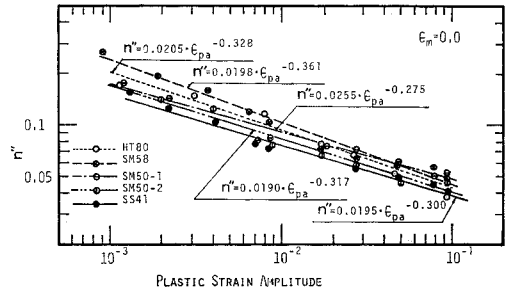


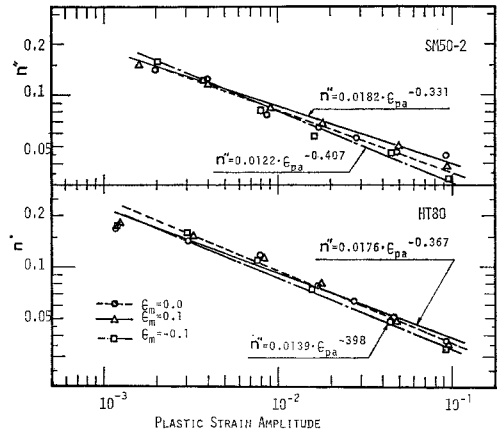
図-15 ヒステリシスループ形状検討のための座標軸



図一六 繰返し数に対するヒステリシス曲線形状の変化



図一七 塑性ひずみ振幅と勾配  $n^*$  の関係



図一八 塑性ひずみ振幅と勾配  $n^*$  の関係

振幅で所定の履歴（被害度を  $n/N_f$  で示す）を与えた後、残留変形が 0 となるようにして除荷したうえ、ひずみ時効の影響を被らないようただちに引張試験を行って求めたものが、図一24 の引張曲線（真応力～対数全ひずみ）である。いずれの引張曲線も载荷に伴い弾性的に上昇し、わずかに曲って履歴を与えた最後のループに一致する。これは一般に静的引張試験のひずみ硬化域で除荷し、ただちに再負荷したときに現われる挙動<sup>20)</sup>と同様である。したがって、いずれの供試鋼材、履歴においても降伏棚は消失している。

各引張曲線上の矢印は最大荷重点を示すものであり、そのときのひずみは、繰返し軟化した SM 58 の  $\epsilon_{ta} \leq 0.03$  の場合を除いて処女材より小さくなっている。

各引張曲線の真応力  $\sigma$  と塑性ひずみ  $\epsilon_p$  を両対数でプロットすると、 $\epsilon_{ta} = 0.1$  の履歴材を除いて良好な直線関係が得られることから、式 (5) を仮定し、最小二乗法によりひずみ硬化指数を計算した。

$$\sigma = \sigma_0 (\epsilon_p)^{n^*} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $\sigma_0$ ：定数、 $n^*$ ：ひずみ硬化指数

図一25 は塑性ひずみ振幅 ( $\epsilon_{pa}$ ) により所定の被害度 ( $n/N_f$ ) を与えた履歴材の、ひずみ硬化指数  $n^*$  を示したものである。履歴材の  $n^*$  は処女材に比べて、繰返し硬化

したときは小さく、また、 $\epsilon_{pa}$  が大きいほど減少している。

それに対して繰返し軟化したときは処女材より大きくなっている。

図一26 は履歴材と処女材の公称引張強さの比  $\sigma_u'/\sigma_u$ 、および破断延性（表一2 参照）の比  $\epsilon_f'/\epsilon_f$  を被害度  $n/N_f$  に対して示したものである。実験結果のうち破面内に表面長さが 1 mm 程度以上のき裂が存在しているものは除外した。履歴材の引張強さは処女材のそれより繰返し硬化したときはいずれも高くなり、繰返し軟化したときは低くなるが、その値は同一ひずみ振幅の履歴ではほぼ等しく、被害度にはほとんど影響されないと見える。履歴材の破断延性は、処女材のそれより、繰返し硬化したときは小さくなり、繰返し軟化したときは、被害度が 0.5 以下では大きくなっている。また、繰返し硬化をほとんど起こしていない SS 41, SM 50 の  $\epsilon_{ta} = 0.003$  の履歴材では、引張強さ、破断延性ともほとんど変化していない。

同図中には累積被害の各仮説から導かれる<sup>20), 22)</sup>  $\epsilon_f'/\epsilon_f$  と  $n/N_f$  の関係も示した。実験結果は SS 41, SM 50 の  $\epsilon_{ta} = 0.03$  の履歴材を除いて、いずれも同じひずみ振幅の履歴では被害度が大きくなると破断延性は小さ



(8) 繰返し塑性ひずみ履歴を受けると、繰返し硬化するものは処女材に比し公称引張強さが上昇し、破断延性は低下する。また、繰返し軟化するものは公称引張強さが低下し、破断延性は上昇する。

本研究は工業技術院の委託をうけて(財)建材試験センター内に設置された「構造材料の安全性に関する調査

研究委員会・金属分科会、高低サイクル疲労 W.G.」の活動の一部であり、東京工業大学 藤本盛久教授、東京大学 飯田国広教授および横浜国立大学 青木博文助教

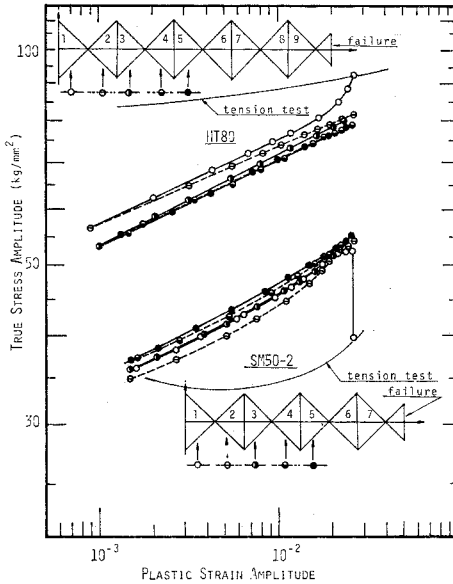


図-20 ひずみ振幅漸増減試験での真応力振幅～塑性ひずみ振幅 ( $\epsilon_m=0, \epsilon_{lmax}=0.03$  の場合)

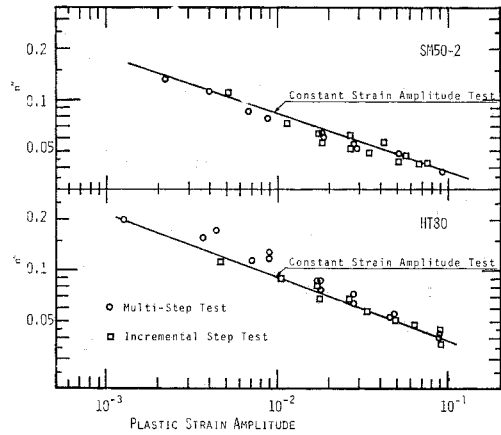


図-22 ヒステリシス曲線の勾配  $n''$

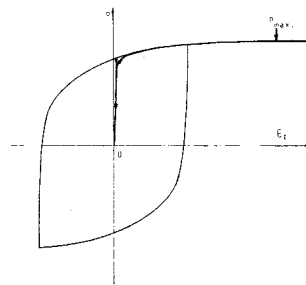
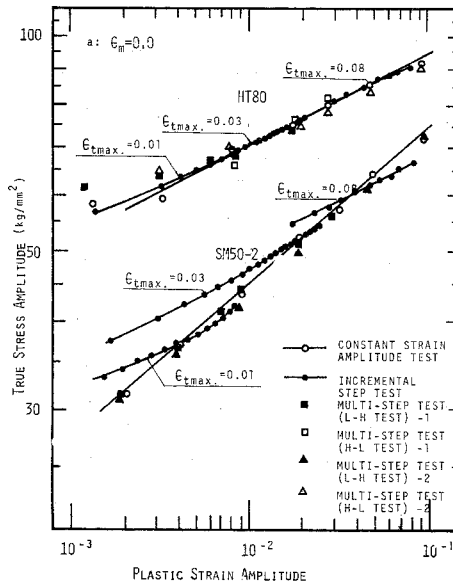
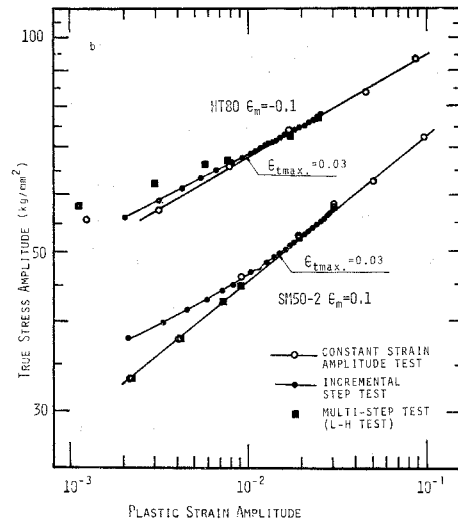


図-23 繰返し塑性ひずみ履歴材の引張試験



(a)



(b)

注 1) 図中の  $\epsilon_{lmax}$  はひずみ振幅漸増減試験での最大ひずみ振幅

注 2) 多段ひずみ振幅試験 (L-H, H-L) -1 とは、最大ひずみ振幅を 0.03 としたもので、-2 とは、最大ひずみ振幅を 0.1 としたものである。

図-21 真応力振幅～塑性ひずみ振幅関係の比較

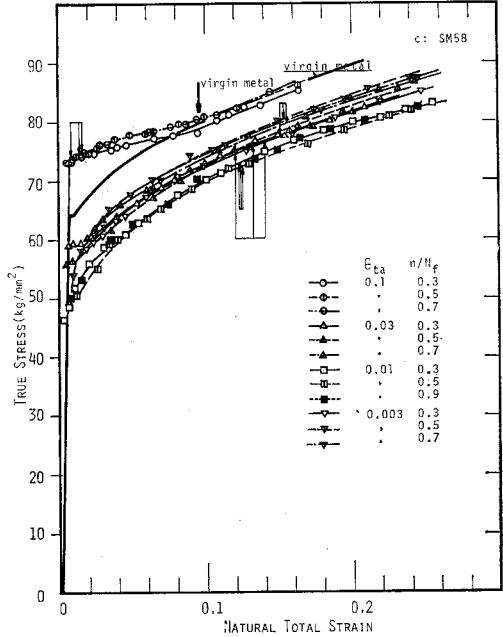
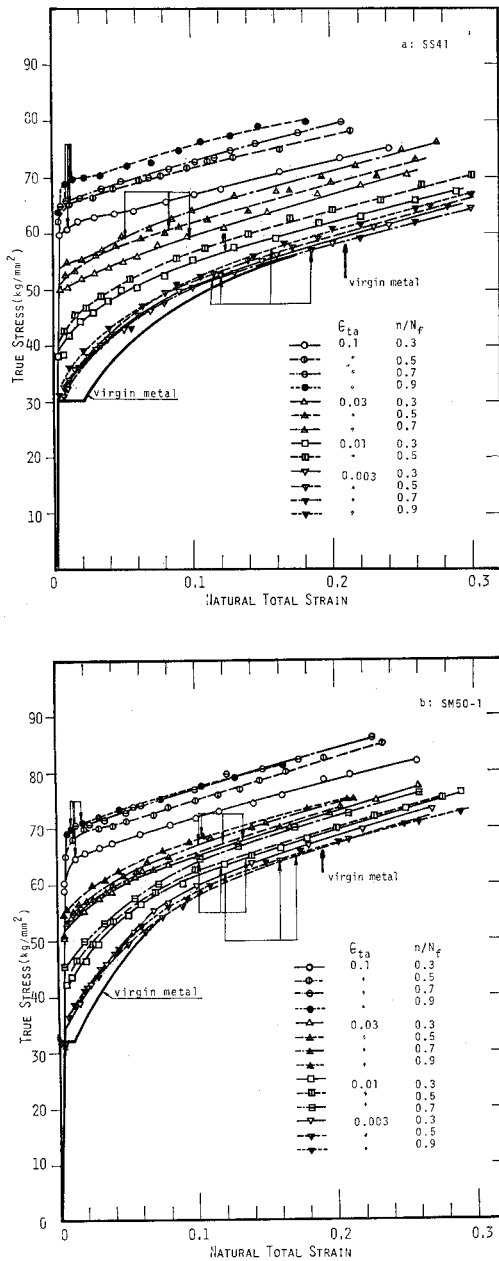


図-24 繰返し塑性ひずみ履歴を受けた鋼材の引張曲線

授には実験の細部に至るまで種々ご教示をいただいた。また、実験には東京工業大学土木工学科の鶴巻正行技官、鈴木克宗君、北野良典君および建築学科の中込忠男君、神山広理君など学生諸君のご協力を得た。ここに各位に対して厚く感謝する次第であります。

参考文献

- 1) 奥村敏恵・堀川浩甫：土木構造物と低サイクル疲労性状，溶接学会誌，第37巻，第5号，pp. 98~105, 1968. 5.
- 2) Y. Kurobane, Y. Mitsui, T. Atsuta and S. Toma : Fatigue Design of Welded Joints in Trussed Legs of Offshore Jack-up Platform. IABSE 10th Congress

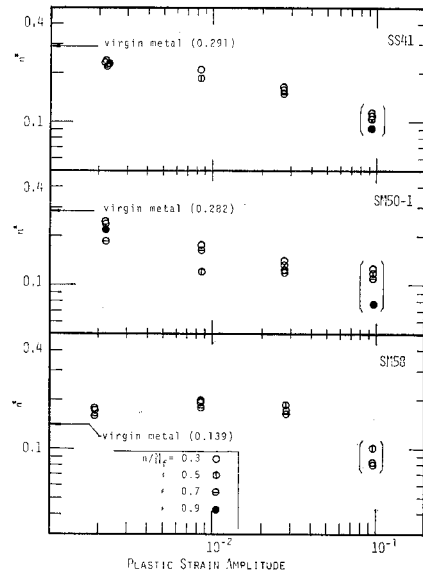


図-25 履歴材のひずみ硬化係数  $n^*$

- 3) Preliminary Report, 1976. 11.
- 4) T. Okumura, E. Murakami, N. Akiyama and H. Akiyama : Estimation of Strength of Tubular Joints. IABSE 10th Congress Preliminary Report, 1976. 11.
- 5) 奥川淳志：繰返し荷重を受ける鋼部材要素の弾塑性挙動に関する研究，東京大学工学部土木工学科論文集録，第10巻，1973.
- 6) 堀田知道・村木潤次郎・石黒隆義・石井伸幸・関口進：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，日本造船学会論文集，第124号，pp. 341~353, 1968.

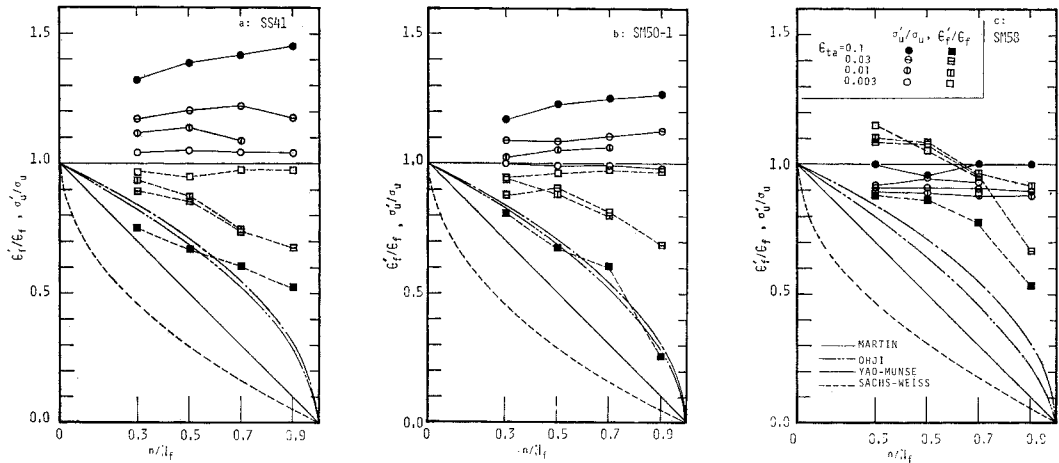


図-26 繰返し塑性ひずみ履歴による公称引張強さ，破断延性の変化

6) 同 第2報，日本造船学会論文集，第126号，pp. 357~365, 1969.

7) 同 第3報，日本造船学会論文集，第128号，pp. 317~330, 1970.

8) 飯田国広・井上 肇・小林佑規・宮本 武：歪制御低サイクル疲労における平均歪の影響，日本造船学会論文集，第127号，pp. 215~225, 1970.

9) 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，pp. 331~343, 1970.

10) K. Iida, Y. Fukuda and Y. Ando: Strain Cycling Fatigue of Welds of Ship Structure Steels. IIW Document No. XXI-534-69, 1969-5.

11) Kunihiko Iida: Crack Initiation Life in Low Cycle Fatigue. The 1st Inter. Symposium of the Japan Welding Society on "Precaution of Cracking in Welded Structures Based on Recent Theoretical and Practical Knowledge", 1971. 11.

12) 大路清嗣・小倉敬三・水谷雄吉：低炭素鋼の破断延性および低繰返し数疲労に及ぼす予ひずみの影響，材料，第20巻，第211号，pp. 22~28, 1971.4.

13) 中川隆夫・徳納久睦・空野信吉：低繰返し数疲労に及ぼす平均ひずみの影響，日本機械学会論文集，41巻，349号，pp. 2511~2517, 1975.9.

14) 花井正実・黒羽啓明・吉村浩二・藤田文雄：鋼素材の低サイクル疲労挙動に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第184号，pp. 29~37, 1971.6.

15) Manson, S.S.: Thermal Stress and Low-cycle Fatigue, McGraw-Hill, 1966.

16) Manson, S.S.: Fatigue; A Complex Subject-Some Simple Approximation, Experimental Mechanics, pp. 193-226, 1964.7.

17) Morrow, JoDean: Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals, Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity, ASTM STP 378. pp. 4-83, 1965.

18) 河本 実・並木宏徳・堂前雅夫：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およぼすひずみ履歴の影響，材料，第24巻，第259号，pp. 19-25, 1975.4.

19) Raske, D.T., JoDean Morrow: Mechanics of Materials in Low Cycle Fatigue Testing Manual on Low Cycle Fatigue, ASTM STP 465, pp. 1~25, 1969.

20) K. Ohji, Miller W.R. and J. Marin: Cumulative Damage and Effect of Mean Strain in Low Cycle Fatigue of a 2044-T 351 Aluminum Alloy, Trans. of ASME, Ser. D, pp. 801~810, 1966.12.

21) 大路清嗣：低繰返し数疲労における累積損傷の仮説の検討，日本機械学会誌，第70巻，第576号，pp. 35~47, 1967.1.

22) 飯田国広・井上 肇・小林佑規：歪制御低サイクル疲労における累積被害(第1報)，造船協会論文集，第121号，pp. 249~261, 1967.6.

23) 同 第2報，造船協会論文集，第123号，pp. 287~296, 1968.6.

24) WES 167-1970: 溶接構造用金属材料のひずみ制御低サイクル試験方法.

25) 藤本盛久・青木博文・北脇史郎：構造用金属材料の力学的挙動に関するひずみ履歴の影響，日本建築学会論文報告集，第253号，1977.3.

26) 飯田国広：80 キロハイテンの歪制御疲労における切欠効果，造船協会論文集，No. 119, pp. 123~133, 1966.

27) H. Abdel-Raouf, A. Plumtree and T.H. Topper: Effect of Temperature and Deformation Rate on Cyclic Strength and Fracture of Low-Carbon Steel., Cyclic Stress-Strain Behavior-Analysis, Experimentation, and Failure Prediction, ASTM STP 519, pp. 28~57, 1973.

28) Coffin, L.F. Jr.: A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal., Trans. of ASME, 76, pp. 931~950, 1954.

29) Martin, D.E.: AN Energy Criterion for Low Cycle Fatigue., Journal of Basic Engineering, ASME, pp. 565~571, 1961.12.

30) たとえば，ジョン・ウルフ編：材料科学入門 Ⅲ，機械的性質，岩波書店，1967.

(1977.11.18・受付)