

低降伏点鋼のヒステリシス及びヒステリシスエネルギー 特性に関する研究

A STUDY ON HYSTERESIS AND HYSTERESIS ENERGY CHARACTERISTICS OF LOW YIELD STRENGTH STEEL

佐伯 英一郎*, 杉 沢 充**, 山口 種美***, 望月 晴雄****, 和田 章*****

Eiichiro SAEKI, Mitsuru SUGISAWA, Tanemi YAMAGUCHI,

Haruo MOCHIZUKI and Akira WADA

Recently, studies on seismic energy isolation and damping structures abound and a number of attenuation mechanisms have been proposed. One of them proposes to utilize the elasto-plastic hysteresis of steel, using low yield strength steel as material. This study conducted low-cycle fatigue tests to clarify the low-cycle fatigue characteristics, hysteresis characteristics and energy absorption characteristics of low strength steel. Low-cycle fatigue characteristics of low yield strength steel were reported. In this paper the following conclusions were obtained concerning hysteresis and hysteresis energy characteristics.

1. Hysteresis curve characteristics of low yield strength steel

(1) The effect of strain rate on the yield strength is considerable. Particularly, the upper yield strength increases markedly. (2) In the σ_{max} -cycle relationship, the stress amplitude is more or less constant. However, a) the LYP 235 tends to soften by repetition while b) the LYP 100 to harden by repetition. (3) The hysteresis curve can be approximated by the Kato-Akiyama model.

2. Hysteresis energy of low yield strength steel

(1) The hysteresis energy-cycle relationship shows a similar tendency to the σ_{max} -cycle relationship. The effect of strain rate decreases as the number of cycles increases. (2) Within the strain amplitude range of $\epsilon_r > 0.8\%$, the cumulative energy absorption characteristics of low yield strength steel up to fracture vary by steel type. SS400 and LYP235 are superior to pure iron and LYP100. (3) Within the strain amplitude range of $\epsilon_r < 0.7\%$, the hysteresis energy of low yield strength steel is much greater than of ordinary steel (nul for ordinary steel), and low yield strength steel has excellent energy absorpion characleristics.

Keywords:

Low yield strength steel : 低降伏点鋼 low-cycle fatigue : 低サイクル疲労 hysteresis energy : 履歴エネルギー
hysteresis curve : 履歴曲線 strain rate : 歪速度

1. まえがき

免震、制振構造用の履歴減衰部材^{1)~12)}に利用することを目的として低降伏点鋼の開発に着手し、製造法の検討を初めとして種々の力学的確性実験を実施してきた。従来鋼は弾性範囲内で強度材として利用するのが一般的であった。しかしながら履歴ダンパーとして用いる鋼は積極的に塑性域を活用するので、塑性域の挙動が重要である。特に低降伏点鋼については構造材としての使用実績がなく、構造上の安全性の確保のためにその力学的特性を明らかにする必要がある。

弾塑性履歴を利用した減衰部材に必要とされる力学的性能として第一に確認されるべき特性は低サイクル疲労

特性であり、その詳細はすでに報告した²⁹⁾。

本論文は低サイクル疲労試験により得られた種々のヒステリシスカーブを分析することにより、低降伏点鋼のヒステリシス特性及びエネルギー吸収特性について、歪み速度、歪みレベルの観点より考察する。

2. 低サイクル疲労試験方法

2-1 供試材

試験体は、PURE IRON、LYP100、LYP235(SS400-MOD)、SS400(比較用)の4種類で、その機械的性質と化学成分を表-1に示す、試験片の記号はPURE IRONをP、LYP100をL、LYP235をH、SS400をSとする。図-1

* 新日本製鉄株式会社建築事業部 室長・工修

Nippon Steel Corporation, M. Eng.

** 新日本製鉄株式会社建築事業部 部長代理

Nippon Steel Corporation

*** 新日本製鉄株式会社建材開発技術部 部長代理・工修

Nippon Steel Corporation, M. Eng.

**** 新日本製鉄株式会社厚板商品技術室 部長代理・工修

Nippon Steel Corporation, M. Eng.

***** 東京工業大学 教授・工博

Prof. Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

表-1 供試材の機械的性質と化学成分

供試材名	記号	引張試験結果								化学成分 (%)				
		降伏点 (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	絞りφ (%)	静破断ε _t 延性 (%)	破断真応力 σ _t (kg/mm ²)	C	Si	Mn	P	S
LYP100	L	—	13.5	27.6	48.8	58.4	89.5	226	92.0	0.002	0.02	0.16	0.01	0.01
PURE IRON	P	上 19.2 (下 16.9)	—	28.4	67.6 (59.5)	65.8	91.2	243	—	0.003	0.003	0.13	0.01	0
LYP235	H	上 29.6 (下 24.5)	—	32.7	90.0 (74.9)	50.8	81.4	168	91.0	0.04	0.02	0.25	0.01	0.01
SS400	S	上 27.0 (下 26.0)	—	46.6	58.1 (55.8)	44.6	70.2	121	—	0.15	0.215	0.99	0.02	0

*ε_t = 1 n $\frac{100}{100-n}$ × 100 (%)
(真破断歪とも言う)

に応力歪線図を示す。PURE IRON、LYP235は、明瞭な降伏点を示すが、LYP100は、降伏点を示さず耐力が低く降伏比も低い。

2-2 試験方法及び試験の種類

低サイクル試験片を図-2に示す。平行部は直径10mm、長さ22mmであり、表面は軸方向に600番エメリーペーパーで仕上げた。低サイクル疲労試験機は、10tの電気油圧式疲労試験機で、その概観を写真-1に示す。

試験条件は次のとおりである。

- 制御：軸歪制御 (コンピュータ制御)
- 標点距離：15mm
- 歪比：R (ε_{max}/ε_{min}) = -1 (完全両振り)
- 測定項目：荷重、変位、変位速度、繰返し回数
- 破断繰返し数 (N_f)：荷重が最大荷重の75%に低下した時の繰返し回数

試験は歪速度、全歪範囲をパラメーターとして実施し、その種類は表-2に示すとおりである。

3. 試験結果

試験結果の一例を図-3、4に示す。ヒステリシスループは、安定した紡錘形を示し、処女ループ以降は4~5サイクルでほぼ同一のループを描く。

処女載荷時のヒステリシスループ (図-5) は初期引張過程と初期圧縮過程に大別できる。初期引張過程の応力歪関係は引張試験と同一のもので、降伏点の存在する

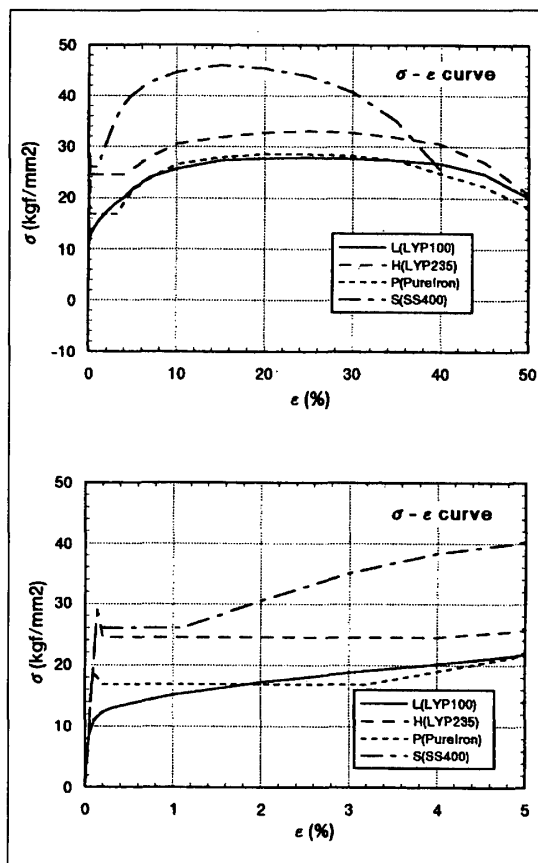


図-1 応力歪線図

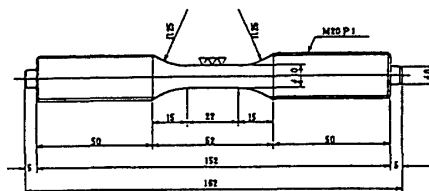


図-2 低サイクル疲労試験片形状

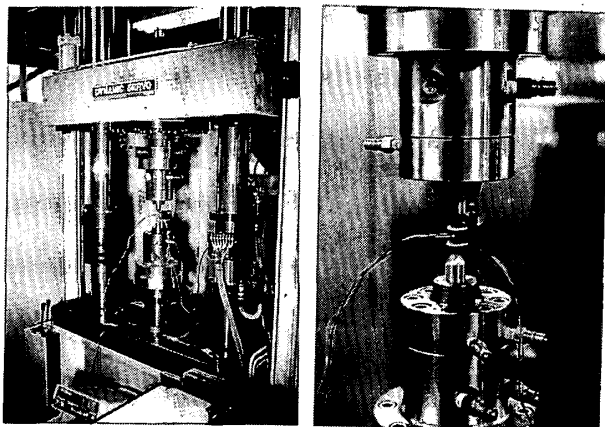


写真-1 低サイクル疲労試験機

表-2 試験の種類

歪速度 ε̇ (%/sec)		全歪範囲 ε _t (%)								
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1	1.5	2
0.1	L	L	L		L		L	L	L	
	H	H	H		H		H	H	H	H
	P	P	P	P		P	P	P	P	P
	S	S	S	S		S	S	S	S	S
5.0	L	L		L	L	L	L	L	L	
	H	H		H	H	H	H	H	H	H

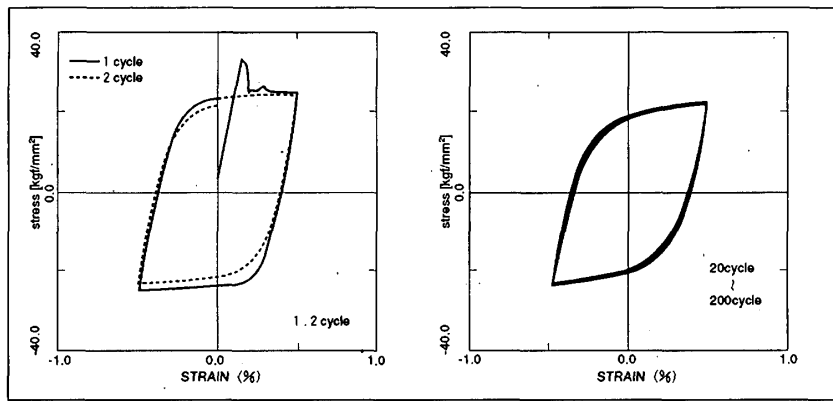


図-3 試験結果 (H, $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec, \Delta \epsilon_t = 1.0\%$)

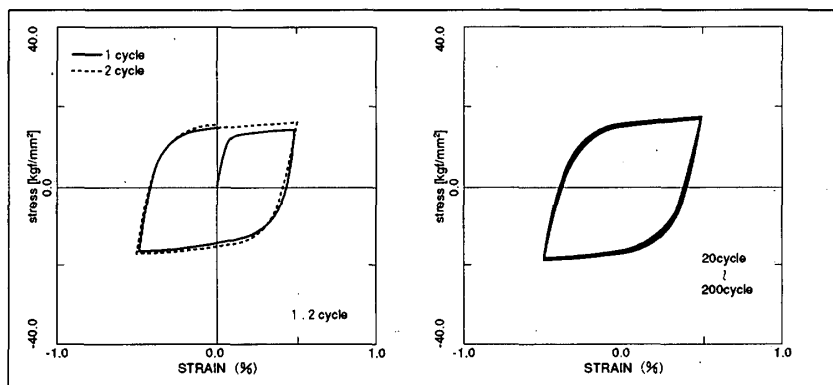
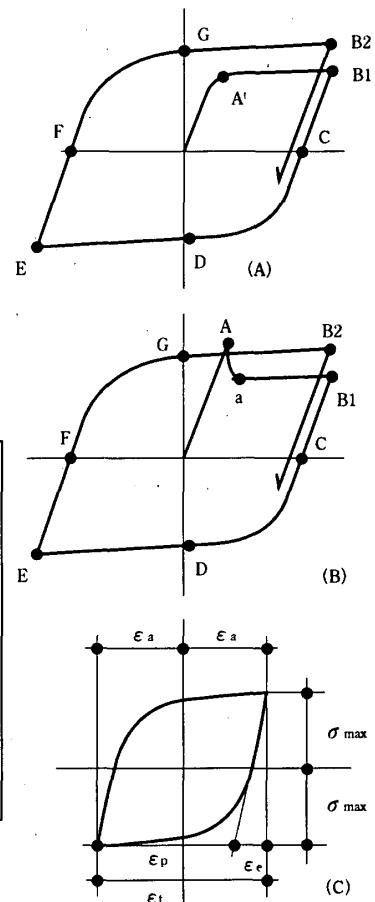


図-4 試験結果 (L, $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec, \epsilon_t = 1.0\%$)



A: 上降伏点 a: 下降伏点 A': 0.2% オフセット耐力点
 B1: 最大引張歪点 (1cycle) B2: 最大引張歪点 (2cycle)
 C: 圧縮軟化開始点 E: 最大圧縮歪点 F: 引張軟化開始点

図-5 ヒステリシスループモデル

もの (PURE IRON、LYP235、SS400) は、降伏点が現われ、存在しないもの (LYP100) は現われない。降伏点の値 (A、a、A') は、歪速度に影響され、その特性については、後で考察する。初期圧縮過程 (B1、C、D、E) は、引張時と同じ弾性勾配で変形し、パウシグナー効果で早期に塑性変形を起こし (C~D)、歪硬化を起こしながら初期圧縮最大荷重 (E) に達する。第2引張過程 (E、F、G、B2) においては、降伏点は現われず初期引張過程より高い応力を示すものと、低い応力を示すものがある。いずれの場合も、初期繰返し軟化あるいは繰返し硬化を起こしながら4~5サイクルで定常状態のヒステリシスループに収束していく。

図-5 (C) は定常状態のヒステリシスループモデルを示しており、全歪み範囲 ϵ_t 、弾性歪み範囲 ϵ_e 、塑性歪み範囲 ϵ_p 、歪振幅 ϵ_a 及び応力振幅 σ_{max} は図のように定義する。

4. 応力振幅 (σ_{max}) 特性

4.1 応力振幅 (σ_{max}) - サイクル曲線

図6~図9にH、Lの σ_{max} -サイクル関係を歪速度 0.1%/sec、5.0%/secのケースについて疲労試験の全歪み振幅 (ϵ_t) 別に表わしている。いずれのケースも応力振幅はほぼ一定であるが、Hタイプ、Lタイプの鋼種の違い及び歪速度の差異によって、その傾向は多少異なる次のような特徴を有する。

- 1) Hタイプ (降伏点を有するもの) は歪みレベルが小さい ($\epsilon_t < 1\%$) 範囲で初期 (10サイクル以下) に繰返し軟化を起こし、その現象は歪速度が大きい程顕著である。
- 2) Hタイプの10~10⁴サイクル域において $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$ の場合応力振幅はほぼ一定であるが、 $\dot{\epsilon} = 5\%/sec$ の場合は軟化する傾向がある。
- 3) Lタイプは $\dot{\epsilon} = 5\%/sec$ の場合 $\epsilon_t < 1\%$ の範囲では初期 (10サイクル以下) にやや繰返し軟化する傾向があるが、 $\epsilon_t > 1\%$ の範囲では繰返し硬化する。10サイクル以降は、応力振幅はほぼ一定である。 $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$ の範囲は繰返し硬化する傾向があり、その傾向は応力振幅が大きい程顕著である。
- 4) L、Hタイプ共、初期サイクル時における応力振幅は歪速度により異なるが、 $N_f/2$ サイクル時には歪速度による影響は小さくなる。

4.2 サイクリック応力歪み関係

ヒステリシスループが定常状態に達した以降のあるサイクル数において図-5 (C) における σ_{max} と ϵ_a の関係

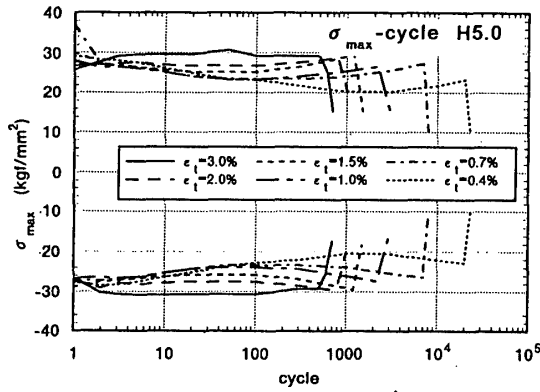


図-6 応力振幅-サイクル曲線 (H、 $\dot{\epsilon} = 5.0\%/sec$)

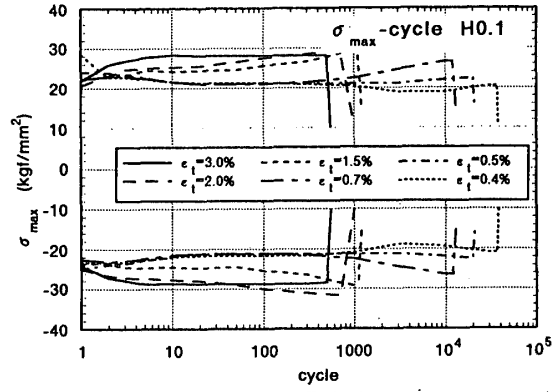


図-7 応力振幅-サイクル曲線 (H、 $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$)

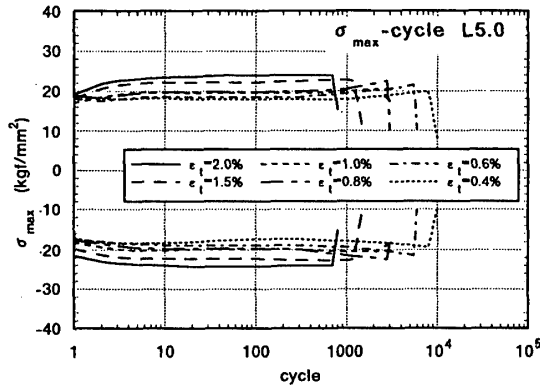


図-8 応力振幅-サイクル曲線 (L、 $\dot{\epsilon} = 5.0\%/sec$)

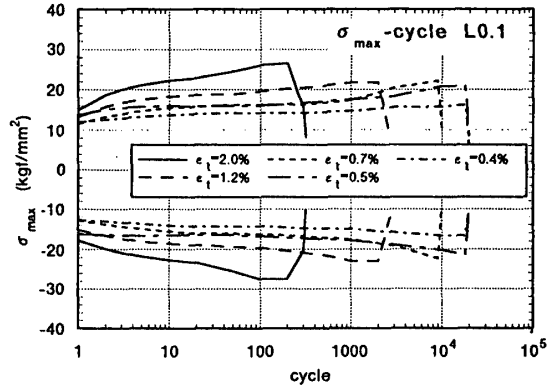


図-9 応力振幅-サイクル曲線 (L、 $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$)

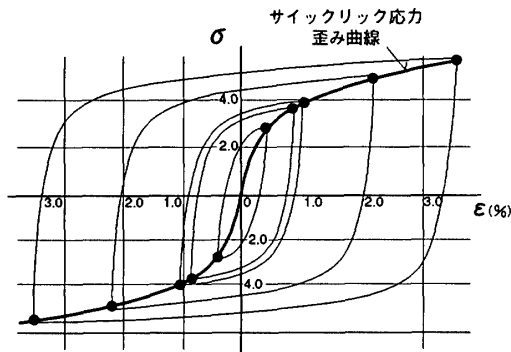


図-10 サイクリック応力歪み関係

を表わしたグラフをサイクリック応力歪み関係と称す。図-10にその概念図を示すがヒステリシスループの σ_{max} ($-\sigma_{max}$) を結んで得られる曲線である。図11～図14に20サイクル及びN/2サイクルのH、Lのサイクリック応力歪み曲線を示す。4-1の応力振幅サイクル曲線からも明らかなように20サイクルにおいては歪み速度の違いによる σ_{max} の差異は顕著であるが、N/2サイクルにおいてはその差が小さくなっていることがわかる。図中に一点鎖線で示したグラフは静的な引張試験より得られた応力歪線図である。Hタイプの場合 ϵ_a が小さい範囲では繰返し軟化を起こし、 ϵ_a が大きい範囲では繰返し硬化を起こしていることが、このグラフからもわかる。一方、Lタイプについては、全ての歪み範囲にわたって

繰返し硬化を起こしている。

サイクリック応力歪み曲線の数式表示については多くの研究があり、いずれのものもベキ関数か双曲線関数を利用したものである。J.D.Morrow²⁸⁾ は次式にてサイクリック応力歪み曲線を表している。

$$\epsilon_a = \epsilon_{ea} + \epsilon_{pa} = \frac{100}{E} \sigma_a + \epsilon_f \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_f} \right)^n \dots\dots (1)$$

ここで、 ϵ_a = 歪み振幅 (%), ϵ_{ea} = 弾性歪み振幅、 ϵ_{ep} = 塑性歪み振幅、 σ_a = 応力振幅、 σ_f = 破断真応力度、E = ヤング係数である。n は Cyclic Strain-Hardening Exponent と呼ばれ、n = 0.15 と言われている。

本実験により得られたサイクリック歪み曲線を次式により

$$\epsilon_a = \frac{100}{E} \sigma_a + \alpha \sigma_a^\beta \dots\dots (2)$$

と近似し、塑性歪み部分を対数座表上にプロットするとほぼ直線になる。最小二乗法により α 、 β を求めると表-3 のようになり、Morrow の提案式とは異なる結果となっている。 α 、 β と n、 ϵ_f 、 σ_f の関係は以下のように表わすことができる。

$$\beta = \frac{1}{n}, \quad \alpha = \epsilon_f \times \left(\frac{1}{\sigma_f} \right)^{\frac{1}{n}}$$

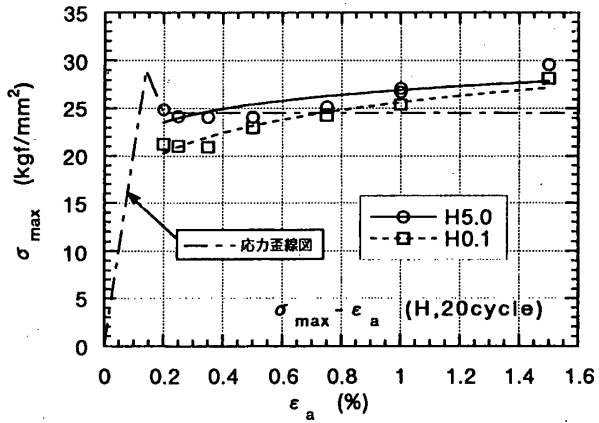


図-11 応力振幅(σ_{max})—全歪振幅(ε_a)、(H, 20cycle)

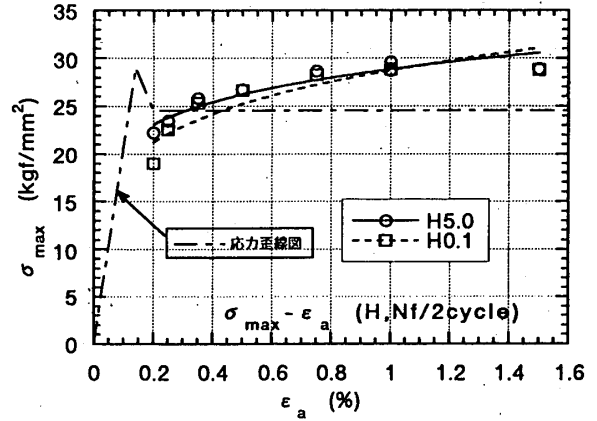


図-12 応力振幅(σ_{max})—全歪振幅(ε_a)、(H, Ni/2cycle)

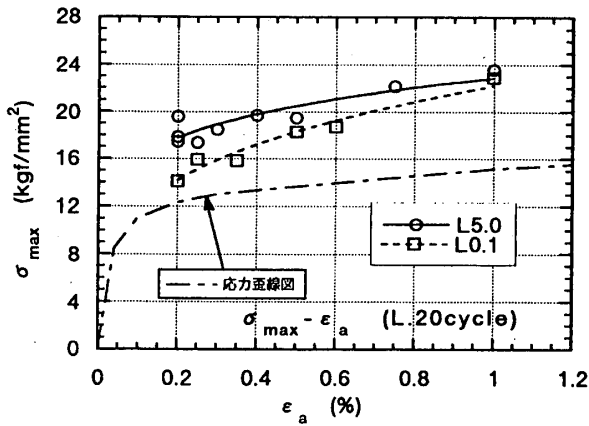


図-13 応力振幅(σ_{max})—全歪振幅(ε_a)、(L, 20cycle)

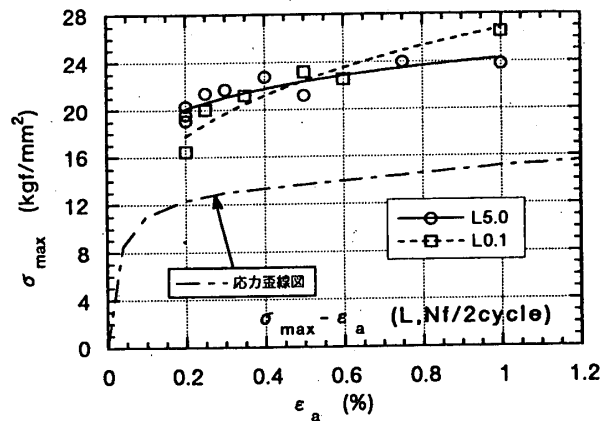


図-14 応力振幅(σ_{max})—全歪振幅(ε_a)、(L, Ni/2cycle)

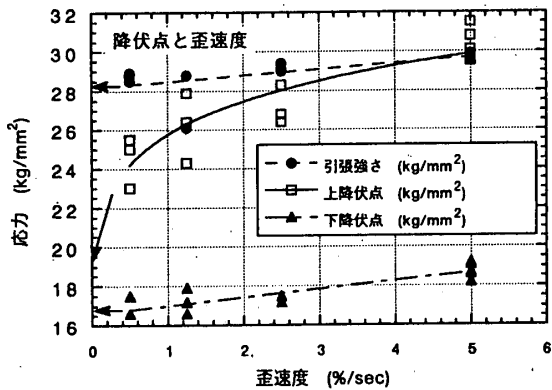


図-15 降伏点と歪速度の関係

図-11～図-14の実線及び破線は上の関係式をプロットしたものである。

5. 降伏点と歪速度の影響

鋼の降伏点は歪速度に依存することは一般的に知られている。特に炭素当量の少ない鋼については、その影響

表-3 サイクリック応力歪み曲線の係数

試験結果		Morrowの提案式						
試験	サイクル	α	β	ε _f	σ _f	n	α	β
H0.1	20	1.72×10 ⁻¹⁰	6.77	168	91	0.15	1.46×10 ⁻¹¹	6.67
H5.0	20	1.98×10 ⁻¹⁴	9.36					
H0.1	Ni/2	5.8×10 ⁻⁹	5.55					
H5.0	Ni/2	5.21×10 ⁻¹³	8.33					
L0.1	20	3.68×10 ⁻⁶	3.95	226	92	0.15	1.8×10 ⁻¹¹	6.67
L5.0	20	2.50×10 ⁻⁹	6.16					
L0.1	Ni/2	4.32×10 ⁻⁷	4.39					
L5.0	Ni/2	8.13×10 ⁻³	8.62					

が大きくなり固溶炭素量による影響が大きいとされている。

図-15にPタイプの上、下降伏点、引張強さと歪速度の

関係を示す。いずれの値も歪速度が増加するにつれて増加し、特に上降伏点の増加率は著しく大きい。Lタイプにおける0.2%オフセット耐力上昇率も同様の傾向を示し、 $\dot{\epsilon} = 5\%/sec$ の0.2%オフセット耐力は静的なものと比較して約30%上昇する。

6. ヒステリシスカープについての考察

鋼のヒステリシスカープについては種々の研究がなされているが最も知られているものにRamberg-Osgoodモデルに基づくものがある。これは履歴曲線をRamberg-Osgood関数で表示し、その係数を前回までの最大応力により決定し、不規則な履歴挙動を予測しようとするものである。一方交番単調増加する場合の履歴挙動については加藤、秋山²⁵⁾らにより簡便なヒステリシスモデルが提案されている。図-16にモデルの概念図を示すが、任意の半サイクルのヒステリシスループを「弾性除荷部分 (elastically unloaded part)」、バウシンガー効果による「軟化部分 (softened part)」および「スケルトン部分 (skelton part)」の3部分に分け、軟化部分を双曲線で表現する方法である。このモデルの主眼点はスケルトン部分を連続した曲線が単調載荷試験の曲線とほぼ一致することである。本論文は加藤、秋山モデルを用いて低降伏点鋼の特性を考察する。

6-2 スケルトン部と応力歪線図

図17、18にプロットした点は図-5におけるB点とE点の値を ϵ_s (図-16に示す歪み) についてプロットしたものである。(B、E点は図-16におけるb点に相当しスケルトンカーブ上にある。) 同図にH、Lの応力歪線図を表わす。 $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$ のもの (L0.1、H0.1) については、ほぼ応力歪線図と一致しており加藤、秋山モデルの妥当性を示している。 $\dot{\epsilon} = 5\%/sec$ のもの (L5.0、H5.0)の値は応力歪線図より大きな値を示しているが、歪速度を5%/secにして得られる応力歪線図と一致することが推定できる。(図-17、18のレジェンド内のT、Cは引張、圧縮を表わす)

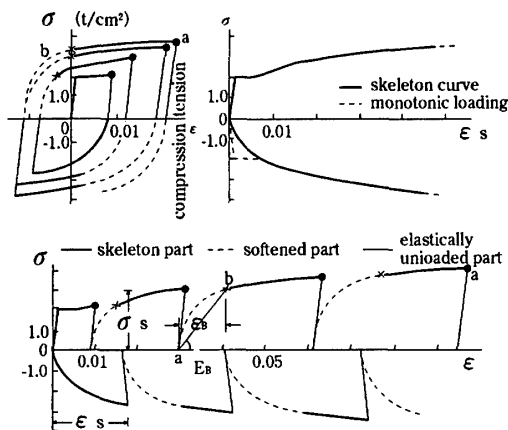


図-16 加藤、秋山モデル

6-3 バウシンガー効果部の考察

加藤、秋山らはバウシンガー効果部の特性を表現するために E_B (図16 σ_s / ϵ_s) を ϵ_s に関係づけている。その結果SS400、SM490のヒステリシス特性として (3) 式を提案している。

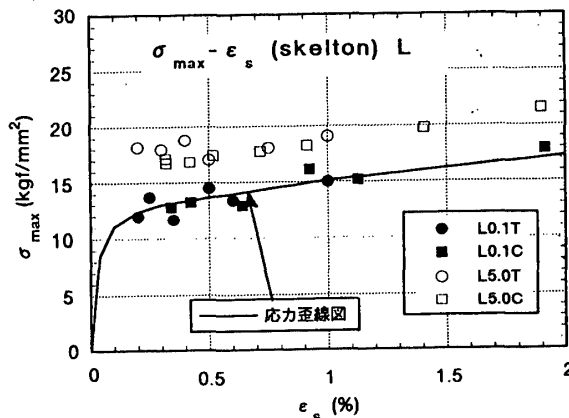


図-17 $\sigma_{max} - \epsilon_s$ 関係と応力歪線図 (L)

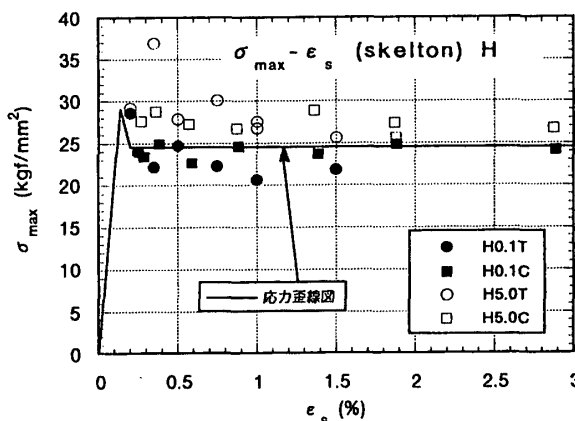


図-18 $\sigma_{max} - \epsilon_s$ 関係と応力歪線図 (H)

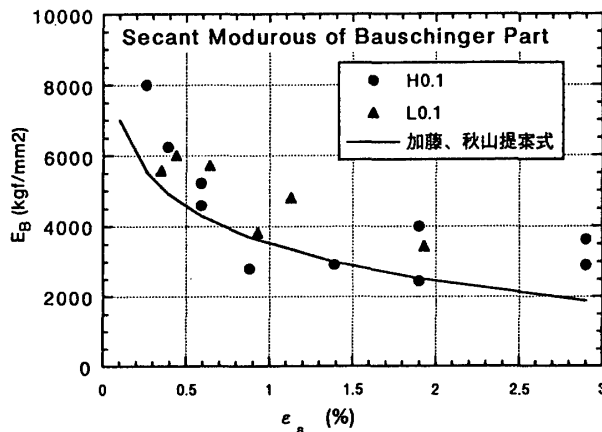


図-19 $E_B - \epsilon_s$ 関係

$$E_B = -\frac{1}{6} \log(10 \epsilon_s) \times E \dots \dots \dots (3)$$

図-19は、L、Hタイプの E_B と ϵ_s の関係を表している。

ややばらつきはあるもののバウシinger効果部分の割線係数 E_B は普通鋼と同様の特性を有することがわかる。

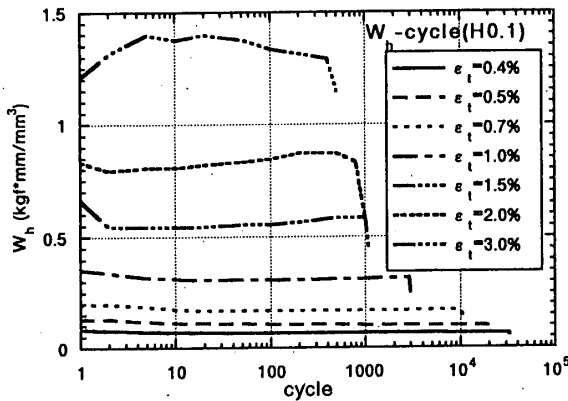


図-20 ヒステリシスエネルギー-サイクル曲線 (H, $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$)

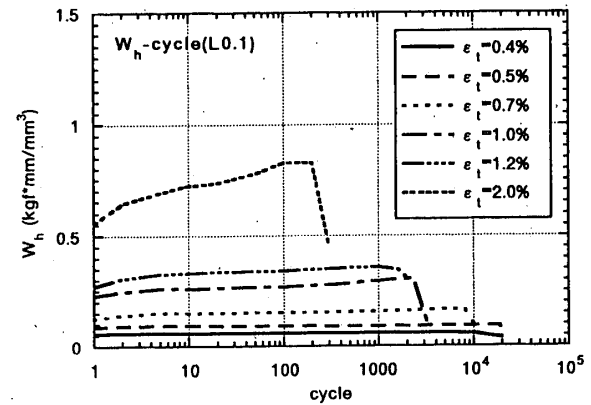


図-21 ヒステリシスエネルギー-サイクル曲線 (L, $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$)

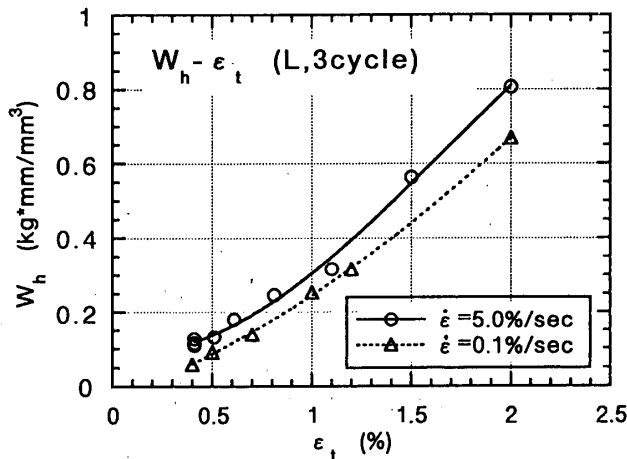


図-22 ヒステリシスエネルギー (W_h) - 全歪振幅 (ϵ_t) 関係 (L, 3 cycle)

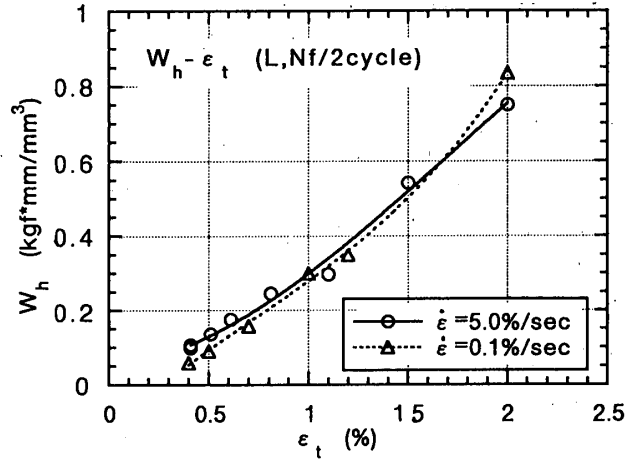


図-23 ヒステリシスエネルギー (W_h) - 全歪振幅 (ϵ_t) 関係 (L, $N_f/2$ cycle)

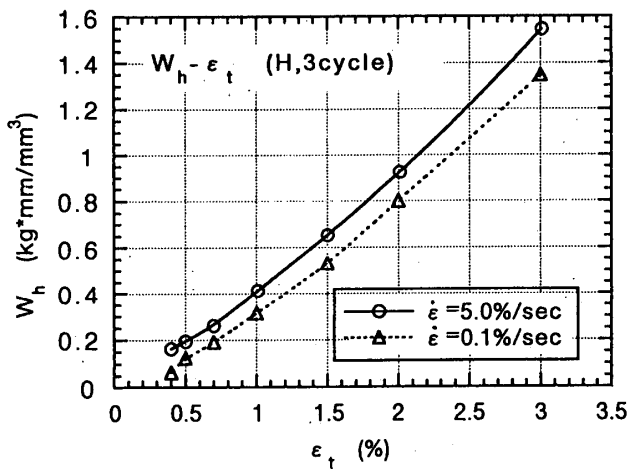


図-24 ヒステリシスエネルギー (W_h) - 全歪振幅 (ϵ_t) 関係 (H, 3 cycle)

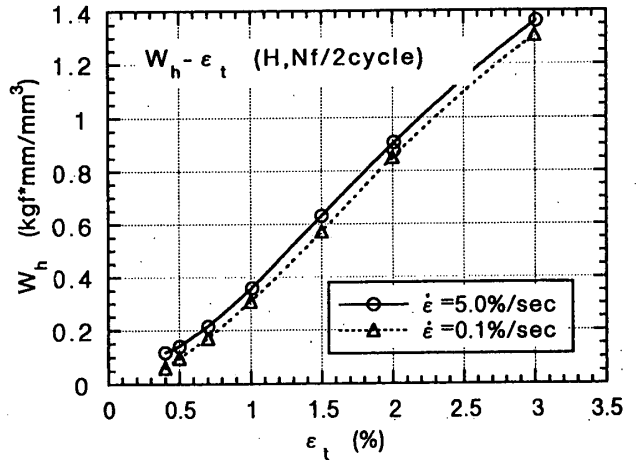


図-25 ヒステリシスエネルギー (W_h) - 全歪振幅 (ϵ_t) 関係 (H, $N_f/2$ cycle)

7. ヒステリシスエネルギーについての考察

7-1 ヒステリシスエネルギー—サイクル曲線

図-20、21に1サイクルあたりのヒステリシスエネルギー (W_h) (ヒステリシスループの面積) とサイクルの関係の一例を示す。ヒステリシスエネルギーは同じ材料であれば σ_{max} の1~2乗にほぼ比例する物理量であるために、その関係は σ_{max} -サイクル曲線とほぼ同等の傾向を示す。従って繰返し軟化、硬化の傾向は、ヒステリシスエネルギーの減少、増加に対応する。

又同じ歪振幅であれば、応力振幅の小さい低降伏点鋼はヒステリシスエネルギーも小さく、繰返し初期にはLタイプはHタイプの0.7倍程度であるが、サイクル数が増加するにつれて差異は少なくなる。

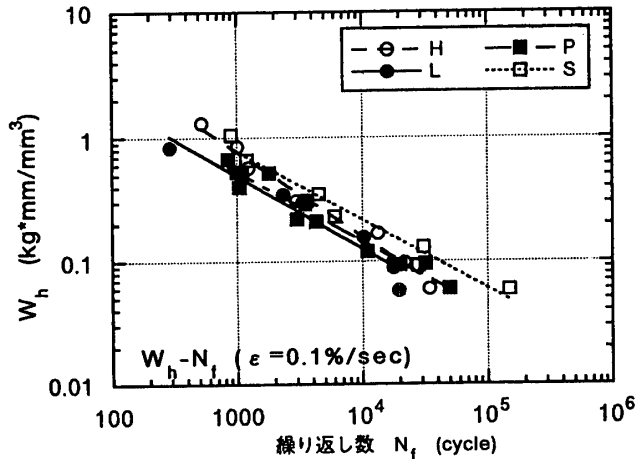


図-26 ヒステリシスエネルギー (W_h) - N_f 関係

7-2 ヒステリシスエネルギー—全歪み振幅曲線

ヒステリシスエネルギーの歪み速度の影響を考察するために図-22、23はLタイプのヒステリシスエネルギーと全歪み振幅の関係を3サイクルと $N_f/2$ サイクルについて表したものである。3サイクルにおいては歪速度の影響は顕著でありその差異は20%~30%であるが、 $N_f/2$ サイクルにおいては、歪速度の違いによる影響はほとんどみられない。

図-24、25は同様のものをHタイプについて表わしたものである。Lタイプ程ではないが同様な傾向があり、 $N_f/2$ サイクルは3サイクルと比較して歪速度の違いによるヒステリシスエネルギーの差異は少なくなっている。

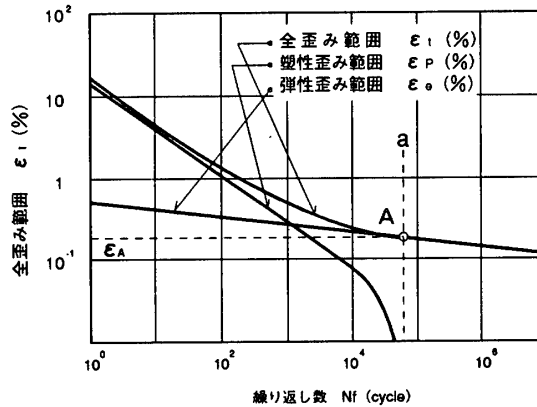


図-27 疲労線図のモデル

7-3 ヒステリシスエネルギー— N_f 曲線

図-26に $N_f/2$ サイクル時の1サイクルあたりのヒステリシスエネルギー (W_h) と破断繰返し数 (N_f) の関係を示す。全歪み振幅 (ϵ_t) - N_f 曲線と同様に両対数グラフ上で右下りのべき関数として回帰すると次のような近似式を得る。

H $W_h = 86N_f^{-0.68}$ (4)

L $W_h = 29N_f^{-0.59}$ (5)

P $W_h = 26N_f^{-0.56}$ (6)

S $W_h = 35N_f^{-0.55}$ (7)

$\epsilon_t > 0.4\%$ の範囲では、同じヒステリシスエネルギーにおける低降伏点鋼の疲労強度は普通鋼より小さい。

7-4 低サイクル疲労破壊に至る累積ヒステリシスエネルギーと歪み振幅の関係

図-27は $\epsilon_t - N_f$ 、 $\epsilon_p - N_f$ 、 $\epsilon_e - N_f$ の関係を低サイクル域から高サイクル域まで拡張して表わした模式図である。A点は「弾性限界点」であり、 $\epsilon_p - N_f$ カーブはライン a に漸近する。疲労変形は一般的に降伏点以下の範囲では静的試験の荷重変形関係と一致する。従ってA点よりも小さい歪みの範囲 (ϵ_A 以下) では、ヒステリシ

表-4 弾性限界応力及び弾性限界歪み

鋼種	弾性限界応力 σ_e (kgf/mm ²)	弾性限界歪み ϵ_e (%)
H	24.5 (降伏点応力)	0.117
L	8.5 (弾性限応力)	0.0405
S	26.0 (降伏点応力)	0.124
P	16.9 (")	0.0805

スエネルギーは0である。

それぞれの材料の弾性限界応力 (σ_e) 及び弾性限界歪み ($\epsilon_e (= \epsilon_A)$) を表-4のように仮定する。

上の仮定は図-22~図-25の $W_h - \epsilon_t$ 曲線が $\epsilon = 2 \times \epsilon_e$ の点でX軸と交わることを意味する。図-28は W_h と ($\epsilon_t - 2\epsilon_e$) の関係を各鋼種ごとに表わしたものである。それぞれの曲線はべき関数で近似したものであり、次のように表わすことが出来る。

H0.1 $W_h = 0.427 \times (\epsilon_t - 0.234)^{1.12}$ (8)

L0.1 $W_h = 0.317 \times (\epsilon_t - 0.081)^{1.47}$ (9)

S0.1 $W_h = 0.505 \times (\epsilon_t - 0.248)^{1.23}$ (10)

P0.1 $W_h = 0.376 \times (\epsilon_t - 0.161)^{1.18}$ (11)

低サイクル疲労試験結果²⁹⁾より、 $\epsilon_t - N_f$ 関係は次のとおりである。

H0.1 $\epsilon_t = 72N_t^{-0.55} + 0.88N_t^{-0.14}$ (12)

L0.1 $\epsilon_t = 33N_t^{-0.48} + 0.47N_t^{-0.087}$ (13)

S0.1 $\epsilon_t = 35N_t^{-0.47} + 0.74N_t^{-0.11}$ (14)

P0.1 $\epsilon_t = 24N_t^{-0.42} + 0.56N_t^{-0.11}$ (15)

(8) (9) (10) (11) 式と (12) (13) (14) (15) 式より累積ヒステリシスエネルギー $[\Sigma W_h (=W_h \times N_t)]$ と全歪み振幅 (ϵ_t) の関係を表わすことができる。

図-29、30に $\Sigma W_h - \epsilon_t$ 曲線を各鋼種毎に表わす。累積ヒステリシスエネルギーは「エネルギー吸収能力」と言うこともでき、鋼種毎に差異がある。低降伏点鋼のエネルギー吸収特性は全歪み振幅 $\epsilon_t > 0.8\%$ の範囲では、他の鋼材と比較して優れているとは言えないが、 $\epsilon_t < 0.7\%$ の範囲では極めて優れたエネルギー吸収能力を有している。特に $0.1\% < \epsilon_t < 0.3\%$ の範囲は普通鋼は弾性範囲でありエネルギー吸収能力を有しないが、低降伏点鋼は大きなエネルギー吸収能力を有する。

弾塑性ダンパーとして鋼を使用する場合、歪振幅の絶対値によって、適宜な鋼種を選択する必要がある。従って風振動に対する水平抵抗要素や地震時の柱、梁の外縁のように歪振幅が比較的小さく、累積回数の大きい外力に対しては、低降伏点鋼は有効である。

前述したように低降伏点鋼の $\epsilon_t < 0.4\%$ の中サイクル疲労特性については既往の研究が少なく、精度の高い定量的評価を行うためには解決すべきことが多い。ダンパーの累積疲労損傷の評価方法も含めて今後の課題としたい。

8. 結論

普通鋼 (SS400) 及び低降伏点鋼の低サイクル疲労試験を実施し、以下のような結論を得た。

1) 応力振幅特性について

- (1) σ_{max} -サイクル関係において応力振幅はほぼ一定であるが①Hタイプは低歪みにおいて繰返し軟化傾向があり、②Lタイプは繰返し硬化傾向がある。
- (2) サイクリック応力歪関係は

$$\epsilon_a = \frac{100}{E} \sigma_a + \alpha \sigma_a^\beta$$

で表現することができる。その係数 α 、 β は鋼種、歪速度、サイクル数によって変化し、既往の研究結果とは異なる。

2) 低降伏点鋼のヒステリシスカーブ特性について

- (1) 降伏点の歪速度の影響は大きく特に上降伏点は、著しく増加する。
- (2) ヒステリシスカーブは、加藤、秋山モデルで予測できる。

3) 低降伏点鋼のヒステリシスエネルギーについて

- (1) ヒステリシスエネルギーサイクル関係は、

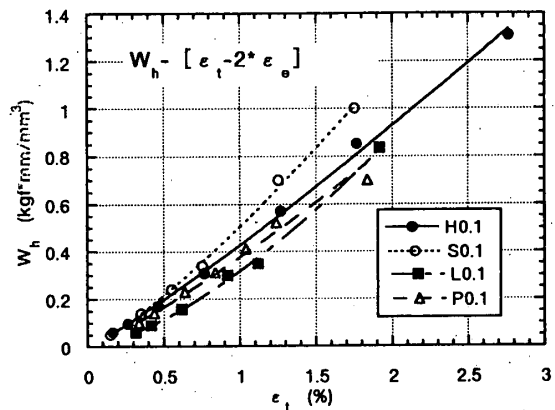


図-28 $W_h - [\epsilon_t - 2 \times \epsilon_e]$ 関係

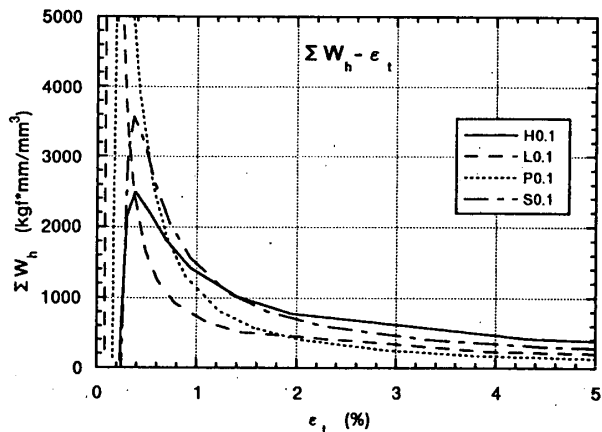


図-29 累積ヒステリシスエネルギー (ΣW_h) - 全歪振幅 (ϵ_t)

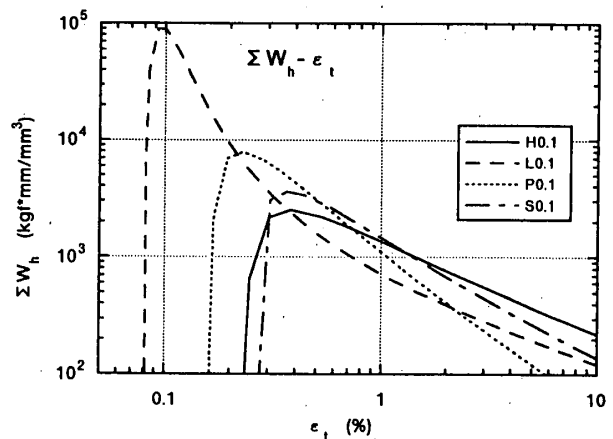


図-30 累積ヒステリシスエネルギー (ΣW_h) - 全歪振幅 (ϵ_t) (log-log座標表示)

σ_{max} -サイクル関係と同様な傾向があり、歪速度の影響は、サイクル数が増加すると少なくなる。

- (2) ヒステリシスエネルギー-全歪振幅関係は $1.12 \sim 1.47$ 乗のべき関数で近似できる。歪速度の影響はサイクル初期には $20 \sim 30\%$ あるが $N/2$ サイクル時には減少する。

- (3) $\varepsilon_t > 0.8\%$ の歪振幅では、低降伏点鋼の破壊までの累積エネルギー吸収能力 (ΣW_h) は鋼種により異なり、SS400及びLYP235はPURE IRON、LYP100よりも優れている。
- (4) $\varepsilon_t < 0.7\%$ の歪振幅では、低降伏点鋼の ΣW_h は、普通鋼と比較して著しく大きく(普通鋼は0)優れたエネルギー吸収特性を有する。

謝辞

本研究にあたり、新日鉄(株)厚板破壊力学研究部征矢主幹研究員及び(株)相模精機半澤貢殿に御協力頂くと共に貴重な御意見を頂いた。

付記して感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 小堀 他：ハニカム開口を有する鋼板ダンパーに関する研究 (その1~その6)、日本建築学会大会梗概集、1989~1992.8
- 2) 三浦 他：ハニカムダンパーを使用した高層ビル、ビルディングレター 1991.2
- 3) 大西 他：鋼製ダンパーを用いた高層RC造建物の設計と施工、コンクリート工学、Vol.31、No.10、1993.10
- 4) 細沢 他：極低降伏点鋼材の履歴減衰による制振システム、日本建築学会関東支部研究報告集、1990
- 5) 泉 他：極低降伏点鋼を用いたせん断降伏型制振部材の低サイクル疲労実験 (その1~4)、日本建築学会大会梗概集、1992.8、1993.9
- 6) 極低降伏点鋼材を利用した制振システム、建築技術、1993.11
- 7) 花井 他：低降伏応力度鋼を用いたK型ブレース制振装置に関する研究 (その1~その5)、日本建築学会大会梗概集、1991.9、1992.8、1993.9
- 8) 花井 他：低降伏応力度鋼を用いたX型ブレース制振装置付架構の弾塑性性状 (その1~その3)、日本建築学会大会梗概集、1993.9
- 9) 中村 他：鋼管の捩れ降伏を利用した弾塑性ダンパーに関する研究 (その1~2)、日本建築学会大会梗概集、1993.9
- 10) 渡辺 他：被害レベル制御設計法の研究 (その1~その4)、日本建築学会大会梗概集、1992.8、1993.9
- 11) 崎野 他：極低降伏点鋼を用いた制振構造、鉄鋼協会 CAMP-ISIJ Vol.5、1992
- 12) 三山 他：極低降伏点鋼を用いた制振構造に関する研究 (その1~2)、日本建築学会大会梗概集、1993.9
- 13) 堀田、村木、石黒、石井、関口：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 No.124 (1968) p.341~p.353
- 14) 堀田、石黒、石井、関口：鋼材の歪制御低サイクル疲労強度推定に関する研究 (第2報)、日本造船学会論文集 No.126 (1969) p.357~p.365
- 15) S.S.Manson : Thermal Stress and Low Cycle Fatigue, McGraw-Hill (1966)
- 16) D.E.Martin : An Energy Criterion for Low Cycle Fatigue, Trans. ASME, Ser.D, April (1921) p.565~p.571
- 17) S.S.Manson : Interfaces between Fatigue, Creep and Fracture, NASA TM X-52189 (1966)
- 18) L.F.Coffin, Jr. : Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue, Journal of Basic Engineering, Trans. ASME (Series D) December, (1962) 533/537
- 19) 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2報)、日本造船学会論文集、第123号、pp.287~296、1968
- 20) 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歪波形の影響、同上、第125号、pp.217~225、1969
- 21) 白鳥英亮、小幡谷洋一：塑性疲れ強さにおよぼす平均応力の影響、同上、32巻、238号、pp.886~893、1966低繰返し数疲れ強さにおよぼす平均応力の影響、同上、35巻、272号、pp.701~704、1969、塑性疲れ試験における繰返し応力-ひずみループの形状、同上、37巻、272号、pp.705~710、1969
- 22) 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.29~40、1971
- 23) Yokoo Y., Nakamura T., Kawada Y. : Non-Stationary Hysteretic Uniaxial Stress-Strain Relations of a Wide-Flange Steel (Part I), 同上、第259号、pp.53~66、1977
- 24) Yokoo Y., Nakamura T. : Non-Stationary Hysteretic Uniaxial Stress-Strain Relations of a Wide-Flange Steel (Part II), 同上、第260号、pp.71~82、1977
- 25) Kato B., Akiyama H., Yamanouchi Y. : Predictable Properties of Material Under Incremental Cyclic Loading, I.A.B.S.E. Symposiums, Theme III, Vol.13, pp.119~124, 1973
- 26) 金属材料技術研究所、疲れデータシート No.14 (1979)、No.22 (1980)、No.23 (1980)、No.47 (1985)、No.48 (1985)、No.55 (1986)
- 27) 山口、杉沢、望月：低降伏点鋼及び極低降伏点鋼の材料特性、日本建築学会大会梗概集、1994.9
- 28) J.D. Morrow, "Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals", ASTM, STP. 378, ASTM, 1965.
- 29) 佐伯、杉沢他：低降伏点鋼の低サイクル疲労特性に関する研究、日本建築学会論文報告集、1995年6月 (掲載予定)

(1994年11月10日原稿受理、1995年4月20日採用決定)