Architectural Institute of Japan

日本建築学会構造系論文集　第472号，139-147，1995年6月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 472, 139-147, Jun., 1995

低降伏点鋼の低サイクル疲労特性に関する研究

A STUDY ON LOW CYCLE FATIGUE 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 yield strength steel will be discussed in the next report. As a result, the following conclusions were obtained concerning low-cycle fatigue characteristics of low yield strength steel.

(1) The low-cycle fatigue characteristics (ε -N_f relationship) of low yield strength steel can be expressed by the Manson-Coffin equation. (2) Despite major differences in static ductility and other properties, low-cycle fatigue characteristics vary little by steel type. (3) The effect of strain rate on low-cycle fatigue characteristics is small. (4) The Monson-Coffin equation's coefficient C_1 and m_1 of low yield strength steel deviate from the values obtainable from the conventionally proposed equations. (5) A correlation of $C_1 = 2.1/460^{m1}$ exists in all types of steel.

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

1. まえがき

昭和60年頃より免震、制振構造の研究[1)~12)]が活発となり多くの振動制御技術が提案されてきた。振動を低減するには大別すると2種類の方法があり、その一つは建物の剛性を調整することであり、他の一つは建物の減衰性の向上にある。減衰性能を向上させることは、言い替えると人意的にエネルギーを吸収させる機構を建物に装着させることであり、部材レベル（柱、梁、ブレース）のものから装置的なものまで種々の物が提案されている。力学的に分類すると、①オイルダンパーのように粘性材料を使用したもの、②粘弾性体を使用したもの、③摩擦を利用したもの、④弾塑性履歴を利用したもの等があげられる。

筆者らは、昭和61年より減衰部材、装置（以下ダンパーと称す）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、成分調整や熱処理等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、弾性範囲内を強度材として使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し、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。特に風振動に対する減衰効果を期待する場合においては、塑性域における疲労特性が問題となり、地震に対しては歪速度、歪レベルに対応してヒステリシスが、どのように変化するかを明らかにしておく必要がある。

本論文は、低降伏点鋼の力学的特性のうち大歪下における低サイクル疲労特性を、歪速度、歪レベルの観点より明らかにすることを目的としている。低降伏点鋼の破壊に至るまでの履歴曲線の特性（降伏点の特性も含む）は紙面の関係上次の報告書の中で論じる。

2. 弾塑性ダンパー用鋼材（低降伏点鋼）

履歴減衰型のダンパーとして使用される鋼材は、地震

本論文の一部は1994年度日本建築学会大会[24)]で発表している。

* 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.

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

時に他の柱梁等の構造部材に先行して、かつ設計で想定した応力レベルで塑性化することが必要である。他の部材に先行して塑性化させるためには、形状や使用方法の工夫によっても可能ではあるが、降伏耐力が低い特性を持った鋼材を使用することで、降伏歪も小さくなるため目的が容易に達成される。このため、まずダンパー用の鋼材としては降伏強さが低いことと、降伏点のばらつきができる限り狭い範囲に収まっていること（狭YP）が要求される。また、地震時にはダンパーは大きな塑性域における繰返しを受けることになる。このため、低サイクル疲労特性が重要な問題となる。

鋼の降伏強さを低くし、伸びを高くするためには以下の三種類のアプローチが考えられる。

1）添加元素を極力低減し純鉄に近いものとする。

2）フェライト結晶粒の粗大化

3）他元素等による C. Nの固定

さらに鋼鈑の圧延時の最適な温度管理及び必要に応じて圧延の後で熱処理を加えることにより低降伏点鋼は、製造される。

3. 低サイクル疲労試験方法

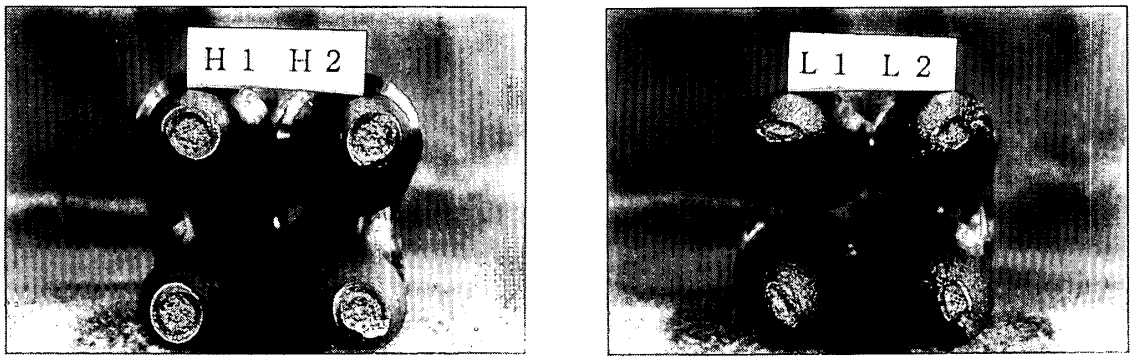
3-1 供試材

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(A.B) 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

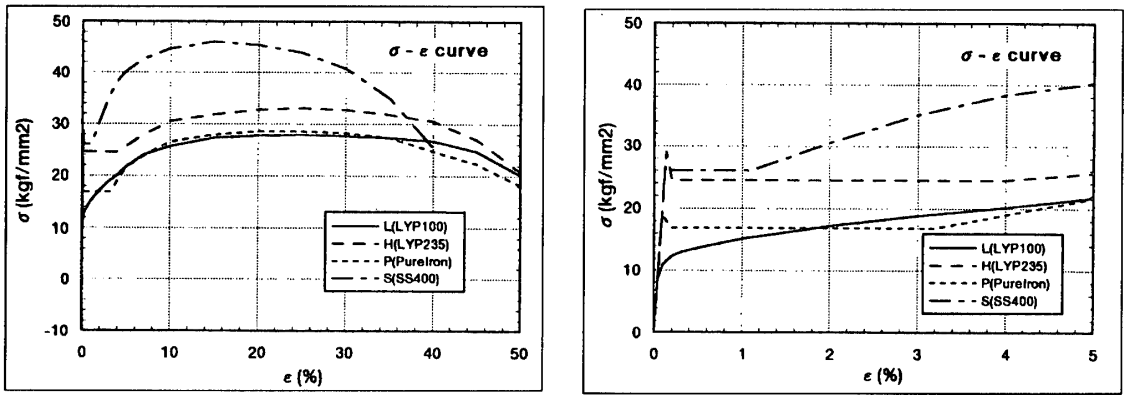
表-1 供試材の機械的性質と化学成分

供試材名	記号	引張試験結果							化学成分（%）				
		降伏点 (kg/mm²)	0.2%耐力 (kg/mm²)	引張強さ (kg/mm²)	降伏比 (%)	伸び (%)	絞り ϕ (%)	静破断 ε_f^* 延性(%)	C	Si	Mn	P	S
LYP100	L	—	13.5	27.6	48.8	58.4	89.5	226	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	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

$*\varepsilon_f = \ln \frac{100}{100-\psi} \times 100$ (%)
（真破断歪とも言う）



(L) 写真-1 引張試験片の破断状況 (H)



(A) 図-1 応力歪線図 (B)

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

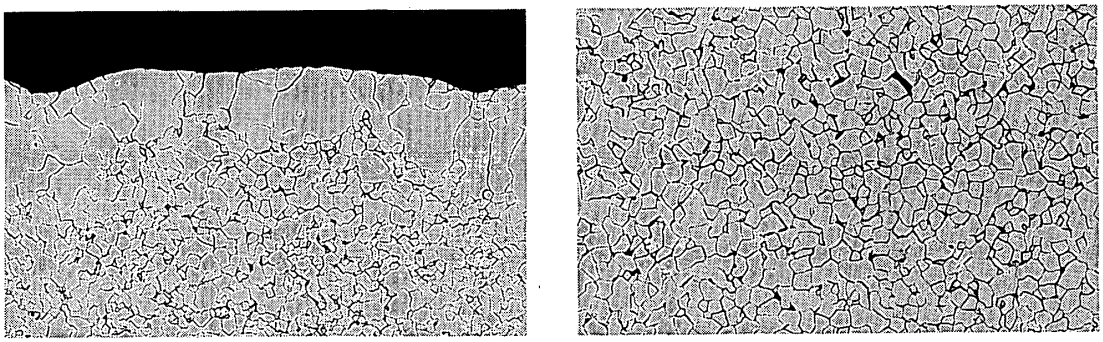


写真-2　断面組織（H）　（左：表層、右：½t）

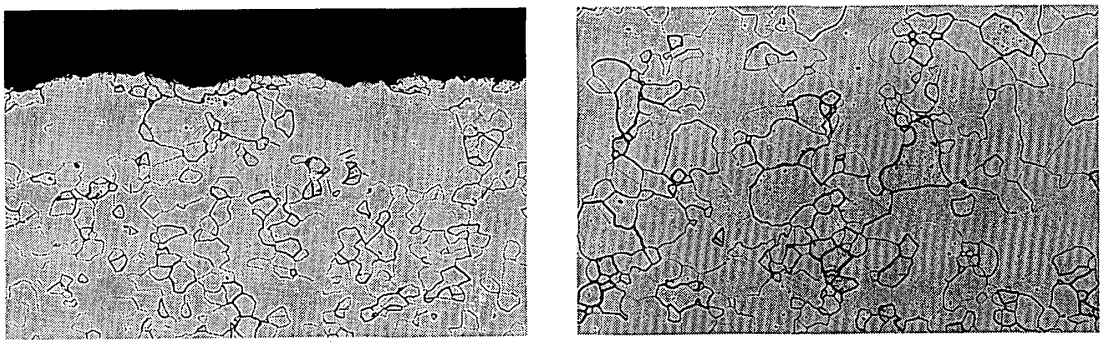


写真-3　断面組織（L）　（左：表層、右：½t）

力が低く降伏比も低い。LYP235の降伏伸びはSS400に比較して著しく大きいがLYP100、PURE IRONの伸びはさらに大きく、破面写真（写真-1）でもわかるように絞りもいちじるしく大きい。

写真-2、3に、LYP235、LYP100の各試験片の表層と1／2tのミクロ組織を示す。顕微鏡写真の倍率は、LYP235が100倍、LYP100が50倍である。LYP235は表裏層の極表面の組織は粗粒となっているが、他の大部分は小さい整粒となっている。一方、LYP100の組織は、極表層はLYP235と同じであるが1／4tから3／4tの間に最大5mm位の粗大結晶粒が存在し、他の部分も混粒となっていて粗大結晶粒が散在している。

3-2　試験方法

低サイクル試験片は図-2に示すように平行部は直径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-4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

3-3　試験の種類

試験は歪速度、全歪範囲をパラメーターとして実施した。低降伏点鋼は先に述べた様に、免震、制振用弾塑性ダンパーとして使用されるわけであるが、その最大歪範囲、最大歪速度の範囲を次のように考えた。モデルディバイスとして免震ダンパー（図-3）、アンボンドブレース（図-4）を例にとる。

免震ダンパーは免震層の最大層間変位を20cm、1次固有周期を2～3秒として正弦振動を仮定するならばダンパーに発生する最大歪は±2%、最大歪速度は5%／secである。アンボンドブレースの場合、層間変形を

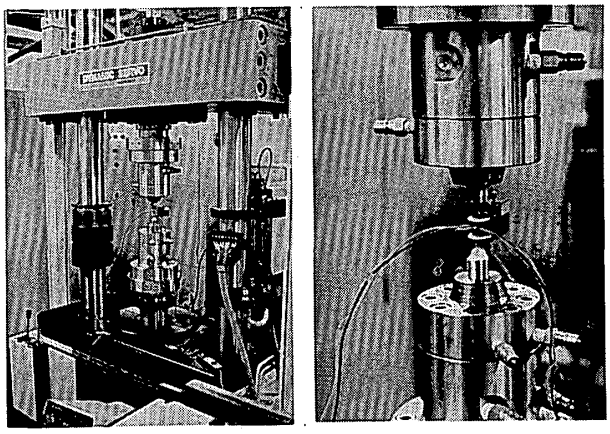


写真-4　低サイクル疲労試験機

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

1／100、建物の一次固有周期を同様に２～３秒と仮定して歪が長さ方向に一様に分布するという前提で計算すると最大歪は±1.0%、最大歪速度2.5%／secとなる。従って上記の数値を参考にして試験の種類は、表-２に示すものとした。

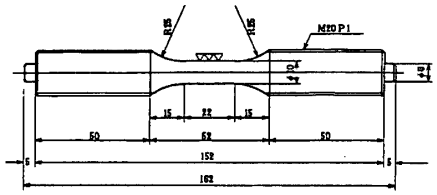


図-2　低サイクル疲労試験片形状

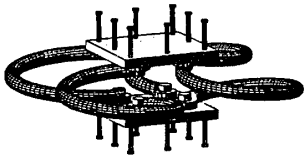


図-3　スチールダンパー

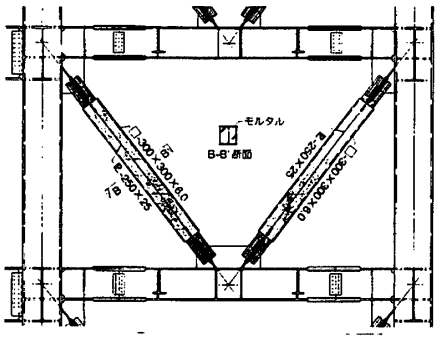


図-4　アンボンドブレース

3-4　試験結果

試験結果の一例を図-5、6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は図-７のようにモデル化でき、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、次の報告で考察する。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、バウシンガー効果で早期に塑性変形を起こし（C）、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B２において初期引張過程（B１）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、破断の直前まで安定したループを示す。

図-７（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、全歪範囲を ε_t、弾性歪範囲 ε_e、塑性歪範囲 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。

表-2　試験の種類

		全歪範囲 ε_t (%)									
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1	1.5	2	3
歪速度 $\dot{\varepsilon}$ (%/sec)	0.1		L	L		L		L	L	L	
			H	H		H		H	H	H	H
		P	P	P	P		P	P	P	P	
		S	S	S	S		S	S	S	S	
	5.0		L	L		L	L	L	L	L	
			H	H		H	H	H	H	H	H

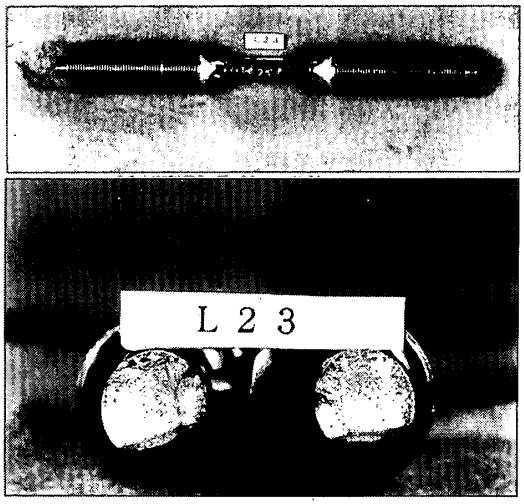


写真-5　低サイクル疲労破断の状況（L）

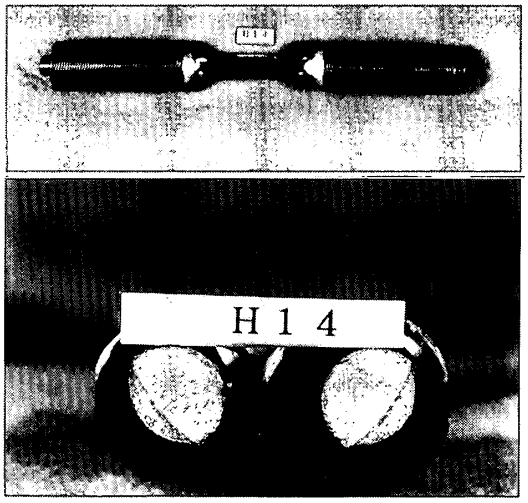


写真-6　低サイクル疲労破断の状況（H）

NII-Electronic Library Service

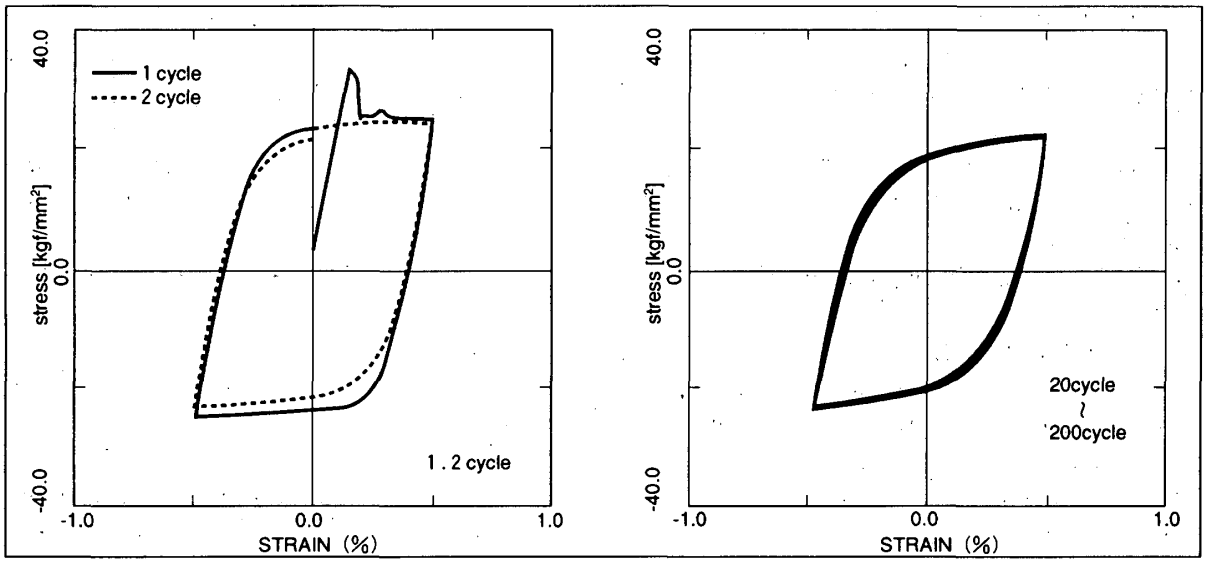


図-5　試験結果（H, $\dot{\varepsilon}$ =0.1%/sec, ε_t=1.0%）

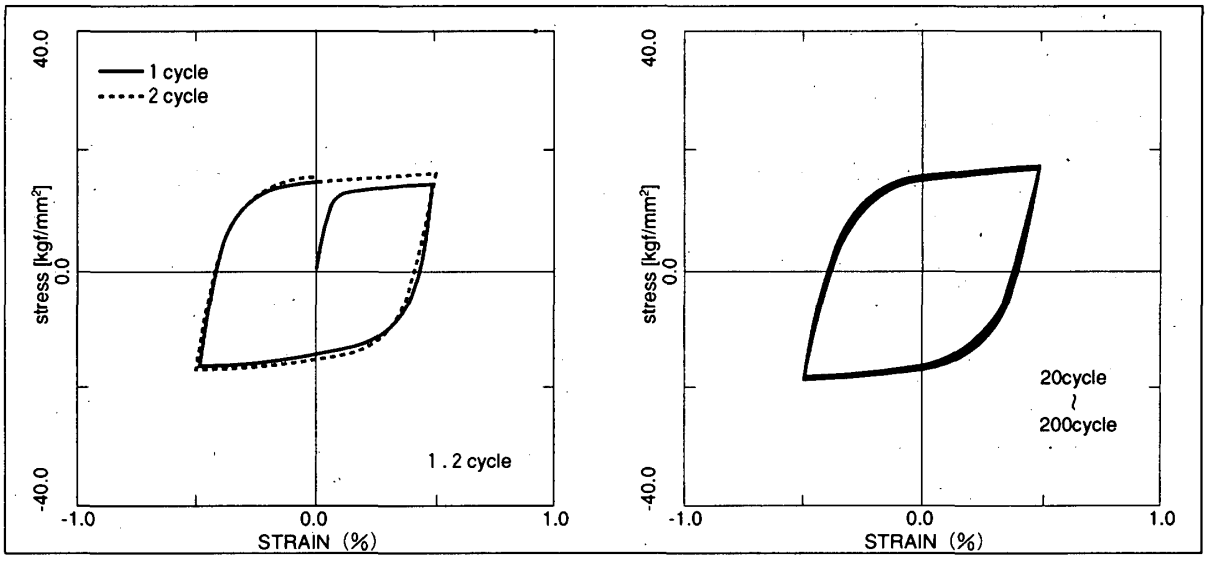
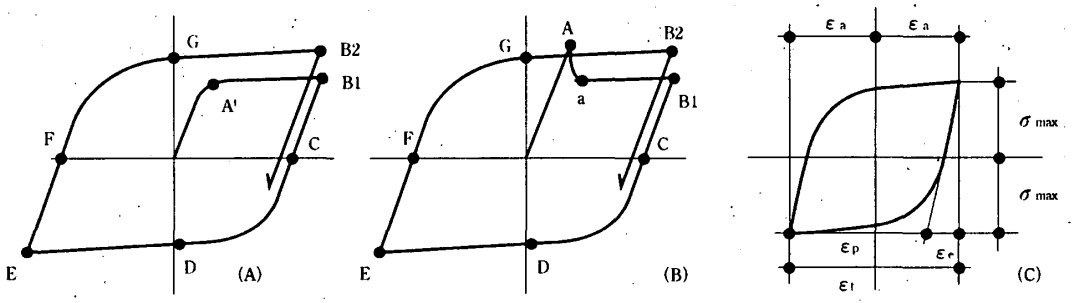


図-6　試験結果（L, $\dot{\varepsilon}$ =0.1%/sec, ε_t=1.0%）



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-7　ヒステリシスループモデル

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

3-5 破断状況のミクロ組織

写真-5、6に低サイクル疲労試験片の試験後の破断状況と破面状況の一例を示す。塑性変形による肌荒れや亀裂の発生状況からみるとLYP235に比較してLYP100の結晶粒は非常に粗いことがわかる。LYP100は疲労破面が進展してからせん断破壊をしており、疲労亀裂発生点付近の破面の粗いものが多い。粗大結晶粒が低サイクル疲労寿命に影響を与えている可能性が大きい。

4. 低サイクル疲労試験結果

図-8～13にそれぞれの鋼材の歪範囲 ε と破断繰返し数N_fの関係を示す。全歪範囲 ε_t、塑性歪範囲 ε_p および弾性歪範囲 ε_eは、$\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_e$ なる関係があり疲労試験では ε_t を制御している。Manson-Coffin 式は、次式で表わされる。

$$\varepsilon_p = C_1 \cdot N_f^{m1} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\varepsilon_e = C_2 \cdot N_f^{m2} \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\varepsilon_t = C_1 \cdot N_f^{m1} + C_2 \cdot N_f^{m2} \quad \cdots\cdots(3)$$

上に示す式を用いて本試験結果を回帰すると次のような実験式を得る。

LYP235

$\dot{\varepsilon}$ =0.1%／sec　　$\varepsilon_t = 72N_f^{-0.55} + 0.88N_f^{-0.14}$ ……(4)

$\dot{\varepsilon}$ =5.0%／sec　　$\varepsilon_t = 184N_f^{-0.67} + 0.47N_f^{-0.077}$ …(5)

BT-LYP100

$\dot{\varepsilon}$ =0.1%／sec　　$\varepsilon_t = 33N_f^{-0.48} + 0.47N_f^{-0.087}$ ……(6)

$\dot{\varepsilon}$ =5.0%／sec　　$\varepsilon_t = 328N_f^{-0.78} + 0.37N_f^{-0.073}$ …(7)

PURE IRON

$\dot{\varepsilon}$ =0.1%／sec　　$\varepsilon_t = 24N_f^{-0.42} + 0.56N_f^{-0.11}$ ……(8)

SS400

$\dot{\varepsilon}$ =0.1%／sec　　$\varepsilon_t = 35N_f^{-0.47} + 0.74N_f^{-0.11}$ ……(9)

4-1 鋼種による差異

図-14に全鋼種の全歪範囲 ε_t（%）と破断繰返し数（N_f）の関係を示す。表-1に示すように低降伏点鋼はSS400と比較して非常に大きな破断延性を有するにも拘わらず低サイクル疲労特性に大きな差異は認められず、どちらかと言うと降伏点が小さい材種は疲労寿命が短い傾向がある。

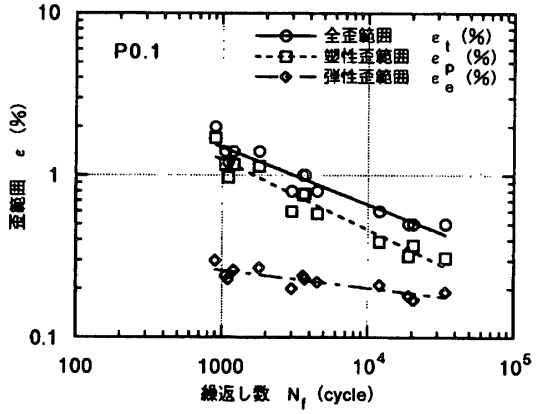


図-8 歪範囲（ε）－破断繰返し数（N_f）
（P、$\dot{\varepsilon}$ =0.1%／sec）

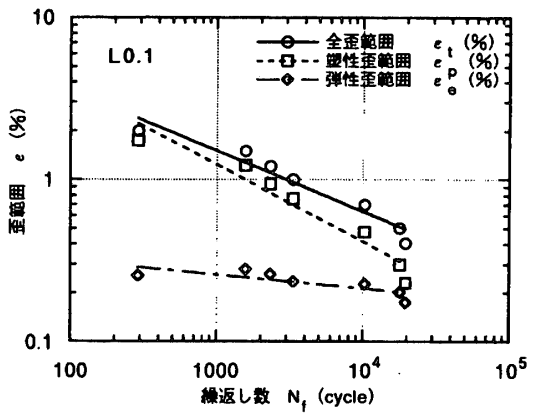


図-9 歪範囲（ε）－破断繰返し数（N_f）
（L、$\dot{\varepsilon}$ =0.1%／sec）

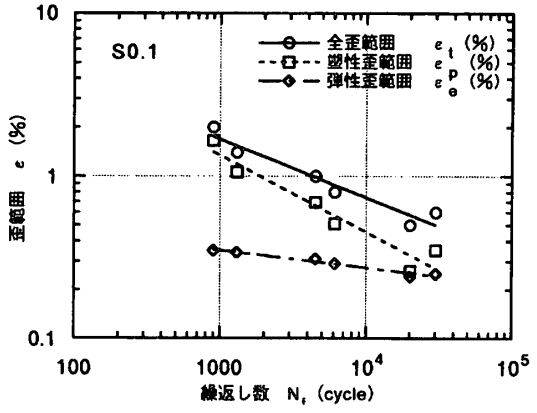


図-10 歪範囲（ε）－破断繰返し数（N_f）
（S、$\dot{\varepsilon}$ =0.1%／sec）

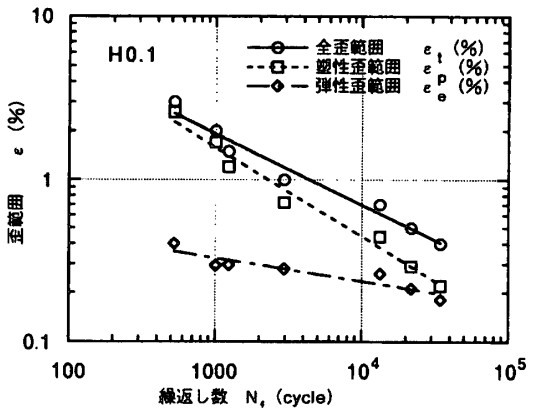


図-11 歪範囲（ε）－破断繰返し数（N_f）
（H、$\dot{\varepsilon}$ =0.1%／sec）

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

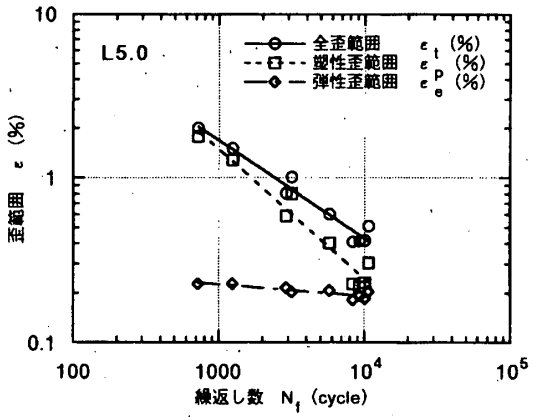


図-12 歪範囲（ε）－破断繰返し数（N_f）
（L、$\dot{\varepsilon}$ =5.0%／sec）

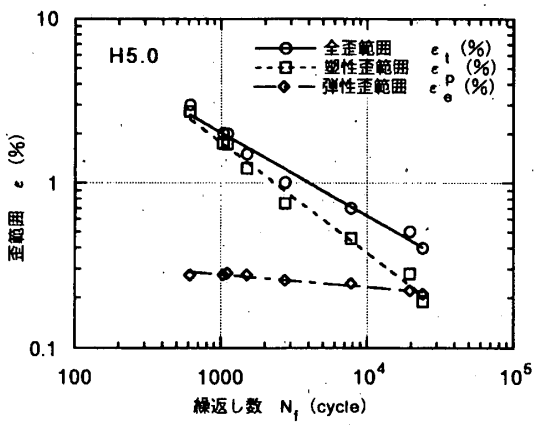


図-13 歪範囲（ε）－破断繰返し数（N_f）
（H、$\dot{\varepsilon}$ =5.0%／sec）

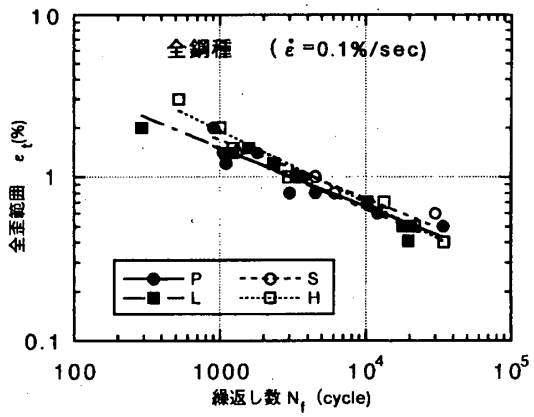


図-14 全歪範囲（ε）－破断繰返し数（N_f）
（全鋼種、ε =0.1%／sec）

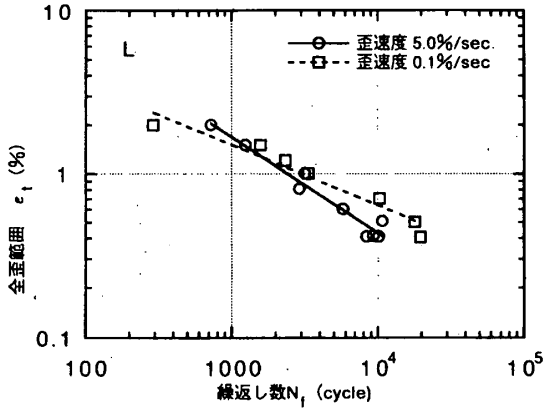


図-15 ε_t－N_f関係に及ぼす歪速度の影響（L）

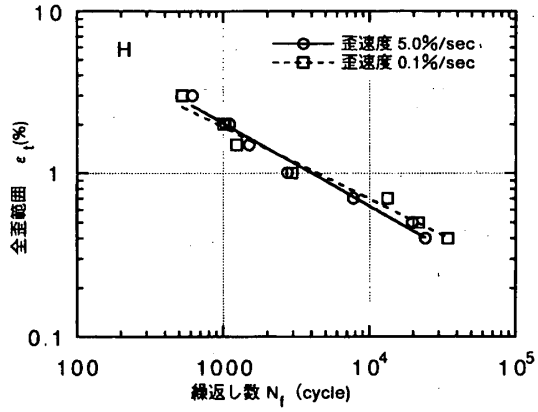


図-16 ε_t－N_fに及ぼす歪速度の影響（H）

4-2 歪速度の影響

図-15.16 にH、Lについて歪速度の異なる2試験のε_t－N_f関係を示している。Lの高サイクル域で多少の差異は認められるものの、低サイクル疲労寿命に及す歪速度の影響は小さいことがわかる。

4-3 低サイクル疲労と静的引張特性

低サイクル疲労特性を簡便に推定・評価するために、静的引張特性との関連性に関する研究が数多くある[13)~18)]。すなわち(1).(2) 式の指数、係数と引張特性との関係式がいくつか提案されている。

Manson[15)] は多くの材料の平均として、m_1=-0.6とし、係数C_1は材料の静破断延性ε_fに関係付けて、$C_1=\varepsilon_f^{0.6}$なる関係を提案している。さらに、C_2を引張強度σ_uで表わして(3) 式の推定式として次式を導出した。

$$\varepsilon_t=\varepsilon_f^{0.6}\cdot N_f^{-0.6}+3.5\,(\sigma_u/E)\cdot N_f^{-0.12}\cdots(10)$$

ただし

$$\varepsilon_f=\ln\,(100/(100-\psi))\times 100 \quad (\psi：絞り\ (\%))$$

Coffin[18)] は、静的引張試験は$\varepsilon_p=2\cdot\varepsilon_f$、R=-1なる低サイクル疲労試験において疲労寿命がN_f=1/4の場合に相当すると考え、m_1=-0.5、$C_1=2\cdot\varepsilon_f$を提案している。また、Martin[16)] はヒステリシスエネルギーの観点からm_1=-0.5、$C_1=\varepsilon_f/\sqrt{2}$を導出した。

このように、いずれの提案式においてもε_fが大きい程C_1は大きくなる。低降伏点鋼はSS400に比べて非常に大きな静破断延性を有するにも拘わらず、図-14に見られるように低降伏点鋼のε_p－N_f関係はSS400のそれに

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

比べて良くはなっていない。このため、他の鋼材の完全両振り歪制御低サイクル疲労試験結果[23]より各種材料のC_1とm_1を比較する。

図-17にε_fとC_1、m_1の関係を示すが、Manson, Coffin, Martinらの提案式との明瞭な相関性は認められない。一方、C_1、とm_1の間には図-18に示すように良い相関が見られ、$C_1=2.1/460^{m_1}$と表わされる。このことはε_p-N_f線図はε_p=2.1%、N_f=460サイクルなる点(pivot)を通る事を示している。

図-19に$N_f=10^3$、10^4回の時のε_tとε_fの関係、図-20には同じε_tと引張強度σ_uの関係を示す。これらの図において、低サイクル疲労強度とε_f、σ_uの間に強い相関関係は認められない。特に図-19ではε_fが大きくなるとε_tがやや小さくなる傾向が見られ、Coffin、Mansonらの研究結果から予想される傾向とは異なっている。

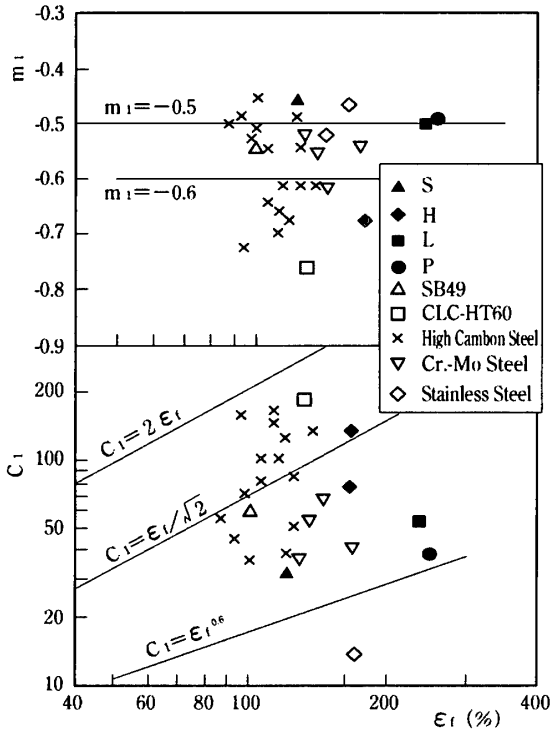


図-17 静破断延性(ε_f)と係数C_1、指数m_1の関係

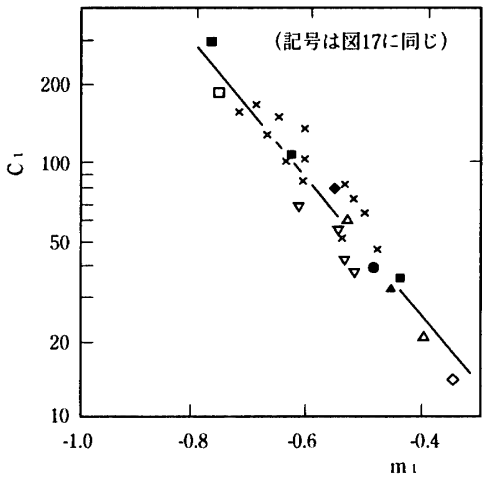


図-18 係数C_1、指数m_1の関係

5. 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) 低降伏点鋼の低サイクル疲労特性($\varepsilon-N_f$関係)はManson-Coffin式で表現できる。

(2) 破断延性等に大きな差異があるにもかかわらず、低サイクル疲労特性の鋼種による差異は少ない。

(3) 低サイクル疲労特性に及ぼす歪速度の影響は小さい。

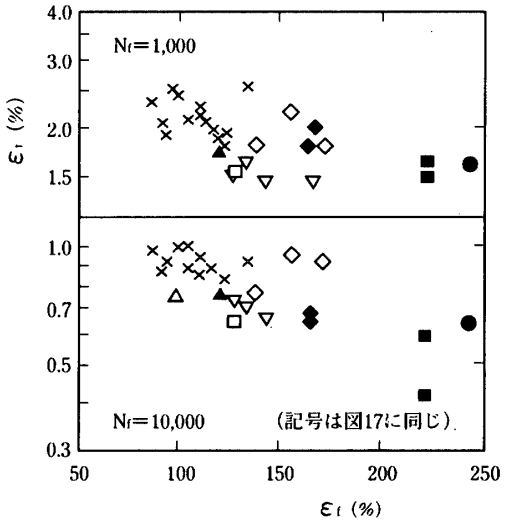


図-19 静破断延性(ε_f)と全歪範囲(ε_t)の関係

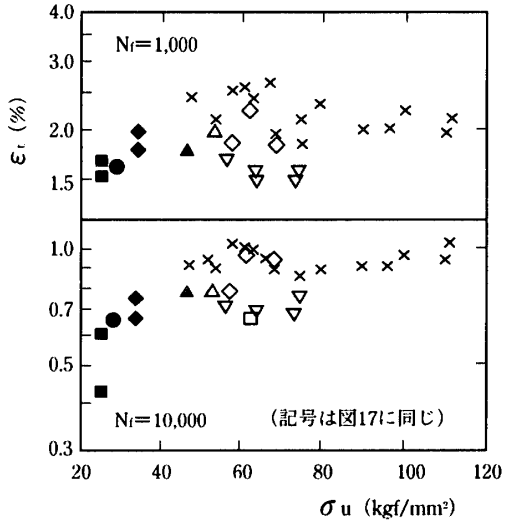


図-20 引張強度(σ_u)全歪範囲(ε_t)の関係

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

(4) 低降伏点鋼のMonson-Coffin式の係数C_1、m_1は従来の提案式との相関は認められず特に静破断延性ε_fとの相関は認められない。

(5) C_1とm_1には$C_1=2.1/460^{m_1}$なる相関がある。これはすべての鋼材のε_p-N_f線図において、$\varepsilon_p=2.1\%$、$N_f=460$なるPivot点が存在することを意味している。

謝辞

本研究にあたり、新日鉄㈱厚板破壊研究部征矢主幹研究員及び㈱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) 金属材料技術研究所、疲れデータシート、No.22（1980）、No.47（1985）、

24) 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

（1994年10月10日原稿受理，1995年3月1日採用決定）

NII-Electronic Library Service