

制震デバイスとしての極軟鋼の低サイクル疲労特性とそのモデル

阿部雅人*, 藤野陽三**, Yi ZHENG***, Krzysztof WILDE****

* Ph.D 東京大学助教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

** Ph.D 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

***工修 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻博士課程 (同上)

****博士 (工学) 東京大学助教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

制震デバイスへの適用を想定した極軟鋼の一連の低サイクル疲労実験を行い、それに基づき低サイクル疲労損傷のモデル化を試みた。低サイクル疲労実験は小型丸棒を用い、純曲げ下で行った。ひずみは最大で10%のオーダーである。ひずみレベルがやや低い一軸圧縮引張下での既往の実験と今回の実験を比較したところ、履歴ひずみ硬化応力-ひずみモデルを用いた履歴エネルギーを尺度として低サイクル疲労特性を表した場合、両者の整合性が高くなることを示した。次いで、破壊に至るまでの累積履歴エネルギーとひずみとの関係を求め、それに基づくランダム荷重下での低サイクル損傷モデルを提案した。さらに、地震動入力による擬動的実験を行い、極軟鋼をダンパーと用いたときの低サイクル疲労特性を調べ、損傷モデルの有効性を検討した。

Key Words: experiment, low-yield point steel(LYPS), damage model, low-cycle fatigue

1. はじめに

構造物の耐震性能を向上させる手段として、免震をはじめとした各種デバイスを用いる手法^{1,2)}が、阪神大震災以後とくに注目され、活発に研究開発が行われてきている。その一つの方法として極軟鋼(低降伏点鋼)を用いる方法が提案されている(例えば文献3~6)。

極軟鋼は通常用いられる構造用鋼に比べ、降伏点が低く、かつダクティリティに優れている。図1の応力-ひずみ関係からわかるように、これらの性質は、地震による振動エネルギーを吸収して、構造物本体が塑性化するのを極力防ぐことが目的である制震デバイスとしては好ましい性質であることから、今後いろいろな形で極軟鋼の利用が考えられていくものと思われる。

制震材料としての極軟鋼の効率的な利用を考えたとき、当然ひずみレベルは高くなり、低サイクル下での疲労強度が問題となる。大ひずみ低サイクル疲労特性に関する研究としては、鉄筋を対象としたManderの研究⁷⁾や極軟鋼を対象とした佐伯ら⁸⁾の研究などがある。これらの研究では、前者でひずみレベルで1%程度、後者でも2~3%以下を対象としている。極軟鋼を制震材料として有効に利用するためには、一層大きなひずみレベルでの疲労特性を知っておく必要がある⁹⁾。

材料としての疲労特性は一軸圧縮引張下での実験から求めるのが一般的である。しかし、高いひずみレベルでの疲労実験は、細長い供試体を用いた場合は座屈の問題が生じ、また、太くずんぐりとした供試体では

大型の試験装置が必要となる。したがって、実験は容易ではないというのが現実である。

本研究は、数%レベルのひずみを対象として一連の疲労実験を行い、極軟鋼の低サイクル疲労特性を明らかにしようとするものである。疲労実験は荷重の行いやすい純曲げに近い状態で行う。疲労特性の表示として、従来から用いられている変動応力・ひずみに加え、履歴エネルギーを用い、既往の佐伯ら⁸⁾の実験結果との比較を通じて後者の有用性を明らかにする。さらにランダム荷重状態に対する低サイクル疲労破壊規準として履歴エネルギーに基づいた指標を提案し、非一定応力下での疲労実験、ならびに地震入力を対象とした擬動的荷重実験の結果からその有効性を検討する。

2. 疲労実験⁹⁾

実験には、今回新たに作成した動的荷重装置(図-2)を使用した。アクチュエーターの最大出力は2tonf、最大ストロークは100mmである。反力壁とアクチュエーターの間には図3に示す治具を取り付け、一様純曲げひずみが生じるようにしてある。供試体は長さ160mmの丸棒とし、試験対象である中央部でひずみが大きくなるように、中央部の径を治具とりつけ部の径よりも小さくしてある。供試体の詳細を図-3に示す。

表1に行われた一連の実験ケースを示す。最大緑ひずみにして1.15%から最大8.30%までのひずみ振幅の異なる7ケースのほかに、平均ひずみ、ひずみ速度の影響を見る実験、非一定応力下での特性を見るための実験

も併せて行った。各々のケースにおける、疲労破壊に至るまでの載荷回数を表1に併せて記載してある。なお、実験では、供試体の変形測定のための変位計を設置、また供試体中央の上面・下面にひずみゲージを貼付し、ロードセルの反力とあわせて計測した。図-4に代表的な載荷パターンとそのときの変位-力の履歴ループを例として示す。

3. 純曲げ下での疲労特性

3.1 曲げひずみ表示

実験を行った範囲では、ひずみ速度、平均ひずみが疲労寿命に及ぼす影響は認められなかった。よって以下の検討では、一定平均ひずみが無い場合の実験結果を対象とする。

履歴載荷下での鋼材の損傷過程は変動ひずみの大きさに支配されると考えるのが従来の考え方である。ここでもその考えに従って考える。変動ひずみ $\Delta \epsilon$ を弾性ひずみ $\Delta \epsilon_e$ と塑性ひずみ $\Delta \epsilon_p$ の和、

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} \quad (1)$$

として表し、各々について指数型で

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2 N_f)^b \quad (2)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2 N_f)^c \quad (3)$$

で近似できると考えれば¹⁰⁾、疲労寿命曲線は図5に示したように、

$$\epsilon_f = \frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2 N_f)^b + \epsilon'_f (2 N_f)^c \quad (4)$$

の形で表すことができる。ここで N_f は寿命サイクル、 σ'_f , b , ϵ'_f , c はパラメータ、 E はヤング率である。 $\Delta \epsilon_e$, $\Delta \epsilon_p$ はひずみゲージではうまく測定できないため、供試体の外縁部のひずみゲージでの処女履歴ループにおける $\Delta \epsilon$ を求め、 $\Delta \epsilon$ にほぼ対応するFEM解析から求めた。なお、ひずみ硬化を考慮したFEM解析⁹⁾と実験結果との対応がよいことは確かである。各々について疲労寿命(サイクル)との関係を示したのが、図-6のプロットである。各々が指数型曲線で近似できることがわかる。最小二乗法により求めた回帰曲線(直線)は

$$\epsilon_f = 0.000643 (2 N_f)^{-0.234} + 0.699 (2 N_f)^{-0.506} \quad (5)$$

であり、図の中に示してある。

3.2 一軸下での疲労特性との比較

純曲げによる疲労寿命と一軸圧縮引張による疲労寿命とは、断面内のひずみ分布が異なることから、そのままの形では比較できない。

ここでは、まず、Esin¹¹⁾の提案している「等価応力振幅法」を純曲げ実験の結果に非弾性ひずみの範囲にまで拡張適用し、一軸下での疲労特性⁸⁾と比較することを試みる。

純曲げ状態での圧縮側(引張側)における平均等価応力 σ_{eq} を

$$\sigma_{eq} = \frac{\sum \sigma_i \Delta A_i}{\sum \Delta A_i} \quad (6)$$

と定義する。

ここで断面内のひずみが直線分布をするとし、応力-ひずみ関係としては図-7に示した単調載荷ひずみ硬化モデル、履歴載荷ひずみ硬化モデルを考える。なお、単調載荷モデルひずみ硬化は今回の疲労実験に使用した極軟鋼を別途実験して求めたものであり、一方、履歴載荷ひずみ硬化モデルは前者をベースに佐伯らの提案式⁸⁾に基づいて求めたものである。低サイクル疲労実験は繰り返し載荷であり、当然後者の適合性が高いことが期待されるが、通常の実験で得られるのは前者であることから、単調載荷ひずみ硬化モデルを用いた結果も参考のために提示した。これらのモデルを用いて純曲げ下での応力-寿命と等価応力-寿命の関係を求めたのが、図-8,9である。

佐伯らの一軸圧縮引張条件下での疲労実験結果と比較するために等価応力を等価ひずみに置き換えて示したのが図-10である。佐伯らの実験結果とはかなり差があることがわかる。

3.3 等価履歴エネルギーによる表示

前に示したように、等価応力を用いても、純曲げによる疲労特性は、一軸圧縮引張状態での疲労特性と整合性の高いものではなかった。

塑性ひずみを伴う低サイクル疲労では一サイクルごとに履歴エネルギーが消費される。この履歴エネルギーの大きさと疲労寿命の間には当然強い相関があると推測される。前出の等価応力・等価ひずみは応力状態や形状によって種々の定義が考えられるのに対し、エネルギーという尺度は多軸応力下においても一義的に定義されるものである。したがって、多様な形態を持ち得る制震装置の低サイクル疲労に対し、このエネルギー尺度が使えることができれば極めて都合がよい。

塑性変形に伴う一サイクルごとの履歴エネルギーは、近似的に

$$W_{1 \text{ cycle}} \approx 4 \sum \sigma_i \epsilon_i \Delta A_i \quad (7)$$

と表せる。単位面積あたりの履歴エネルギーは、

$$w_{eq} = \frac{W_{1 \text{ cycle}}}{\sum A_i} \quad (8)$$

となる。

等価履歴エネルギーを尺度として、今回の実験結果と佐伯らの実験結果を示したのが図11である。履歴載

表-1. 極軟鋼の低サイクル疲労実験ケース

Test type	Amplitude (cm)	Largest strain	Strain rate (1/sec.)	Number of cycles
Constant amplitude	1.0	1.15%	1.66×10^{-3}	1080
			1.66×10^{-3}	1039
	2.0	2.49%	1.69×10^{-3}	231
	3.0	3.82%	1.68×10^{-3}	100
			3.05×10^{-3}	105
	4.0	5.13%	1.64×10^{-3}	65
			1.64×10^{-3}	68
	5.0	6.42%	1.54×10^{-3}	44
			5.14×10^{-4}	47
	6.0	7.67%	1.53×10^{-3}	28
			6.14×10^{-4}	26
	6.5	8.30%	1.66×10^{-3}	23
			6.64×10^{-4}	24
Constant amplitude with off-set	4.0 (mean=1)	5.13%	1.64×10^{-3}	68
	4.0 (mean=-1)	5.13%	1.64×10^{-3}	65
Variable amplitude	2.0/6.0	2.49%/7.67%	$1.99 \times 10^{-3} / 1.53 \times 10^{-3}$	116/17
	6.0/2.0	7.69%/2.49%	$1.53 \times 10^{-3} / 1.99 \times 10^{-3}$	17/110
	0.5/5.0	0.80%-6.42%	$1.60 \times 10^{-3} / 1.54 \times 10^{-3}$	2291/16
	0.5-6.5	0.80%-8.3%	$1.72 \times 10^{-3} - 1.66 \times 10^{-2}$	48
	0.36-6.5	0.6%-8.3%	$2.30 \times 10^{-3} - 1.66 \times 10^{-2}$	1650
	0.12~6.5	8.30%	3.32×10^{-4}	36
		8.30%	6.64×10^{-4}	38

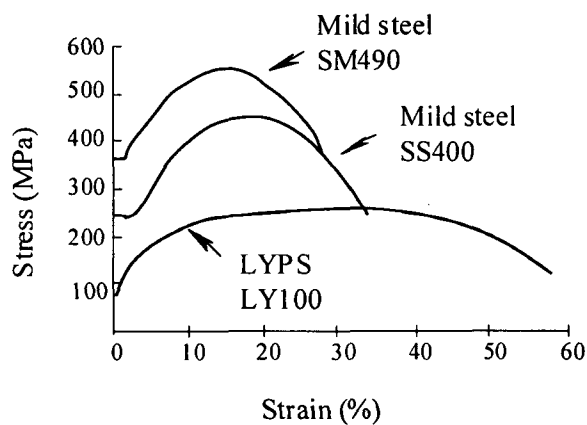


図-1. 鋼材の応力-ひずみ関係

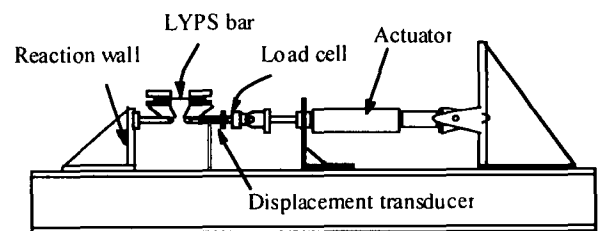


図-2. 載荷装置

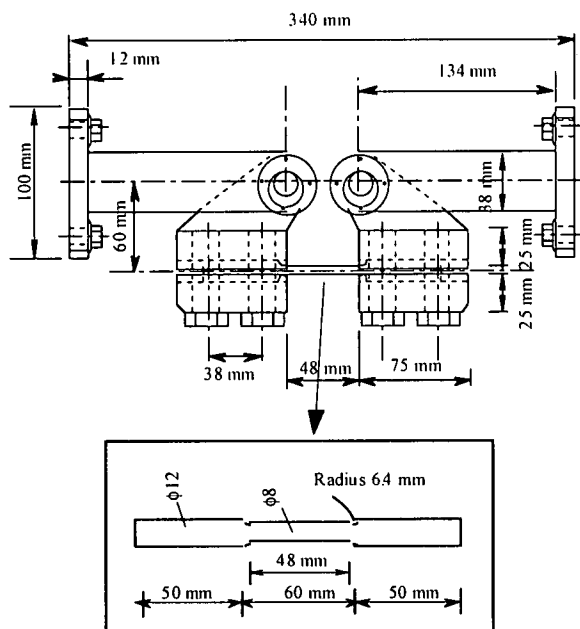


図-3. 純曲げタイプの荷重システムと丸棒供試体

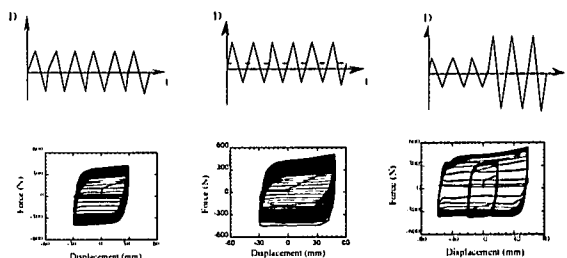


図-4. 荷重パターンと履歴ループの例

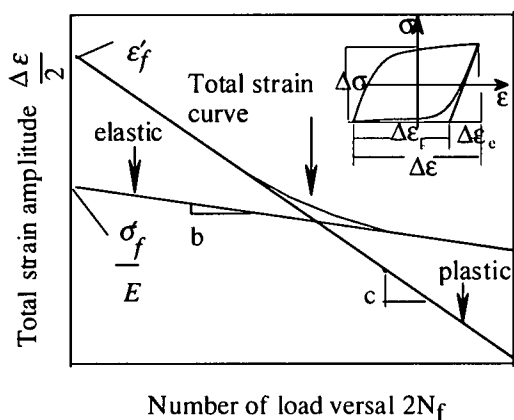


図-5. 塑性ひずみを伴う荷重条件下での疲労寿命曲線

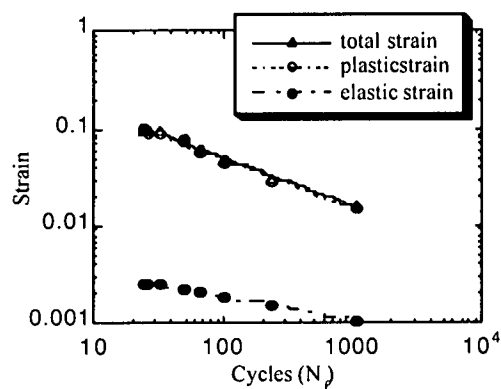


図-6. 低サイクル疲労寿命（実験結果）

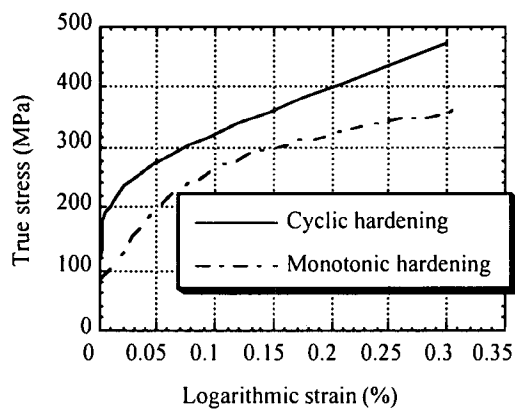


図-7. 極軟鋼の応力-ひずみ関係（単純荷重ひずみ硬化モデルと履歴荷重ひずみ硬化モデル）

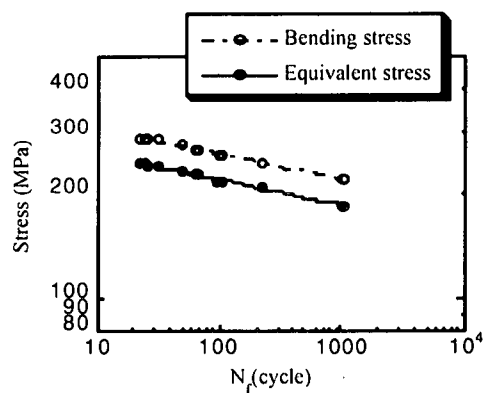


図-8. 履歴荷重モデルを用いた等価応力表示

荷ひずみ硬化モデルを用いると佐伯らの実験結果と極めてよい整合性を示す。単調載荷モデルを用いてもかなりより一致となる。佐伯らの実験に用いた極軟鋼（低降伏点鋼）と今回の実験に用いた極軟鋼とは成分的に若干の成分が異なるため、力学的特性にも多少の差があり得る。したがって、図11における整合性がエネルギー尺度の妥当性を完全に証明するものではないが、履歴エネルギーが低サイクル疲労を特徴づける一つの有用な尺度であることを示していると考えている。

4. エネルギー尺度を用いた低サイクル疲労寿命

4.1 エネルギーモデル

低サイクル疲労における履歴エネルギー尺度の有効性を3.3において示した。ここではこのエネルギー尺度の考え方をさらに発展させる。

図12に示すのは、1回あたりの履歴エネルギーを縦軸にプロットしたものである。いろいろな外縁ひずみ $\Delta \epsilon_f$ レベルをパラメータととっている。大きなひずみでは1回あたりの履歴エネルギーもが大きい。当然疲労寿命（サイクル数）は小さくなる。このようなちがいはあるが、どのひずみレベルに対しても履歴エネルギーはサイクル数に対してかなりフラットなカーブを描いている。このことに着目し、疲労寿命の半分のサイクル数における（単位面積あたりの）履歴エネルギーと疲労寿命をプロットしたのが図13である。図には佐伯らの実験結果もあわせて示してあるが、ここでも両者は整合的な関係になっていることがわかる。なお、各々についての回帰寿命曲線は、

$$W_h = 397.23 (2 N_f)^{-0.609} \quad (\text{純曲げ}) \quad (10)$$

$$W_h = 427.79 (2 N_f)^{-0.590} \quad (\text{一軸}) \quad (11)$$

である。

極軟鋼を制震材、ダンパーとして使用することを考えたとき、トータルとしてどの程度のエネルギーを履歴エネルギーとして吸収できるのかは工学的関心の高いところである。また、材料の高ひずみ低サイクル損傷のメカニクスとしては破壊に至るまでの総履歴エネルギーにはどの程度の振幅（ひずみ）依存性があるのかは別の意味で興味のあるところである。

低サイクル破壊に至るまでの累計履歴エネルギーを図12から求め、それと外縁部のひずみレベルとの関係を示したのが図14である。回帰曲線は

$$W \equiv \sum W_h = 142.25 \epsilon^{-0.751} \quad (12)$$

であり、極軟鋼が吸収できる総履歴消費エネルギーはひずみ振幅の影響を受けることがわかる。大きなひずみを受ける場合の方が、累計（総）履歴エネルギーが小さい値で破壊する。この理由としては、大きなひずみを受ける方が損傷の局所化が早く進行するなどが考

えられるが、著者らにとっては現段階では明確ではない。

4.2 低サイクル疲労における損傷指標の提案

図14に示したように、総履歴エネルギー w_f は、ほぼひずみレベルのべき乗数 ϵ^β で表される。このことは $w_f \epsilon^\beta$ が一定となることを意味し、 ϵ^β はいわばひずみレベルに応じた重み係数と解釈できる。

ここでは図14の結果をベースに、デバイスの変形 Δ をパラメータとした、エネルギーに基づく損傷指標 D_w

$$D_w = \frac{\sum w_i |\Delta_i|^\beta}{c \cdot v_y \cdot \Delta_y^{\beta+1}} \quad (13)$$

を定義する c は $D_w=1.0$ で破壊となるように調整された係数である。なお、 Δ_y は降伏変位である。 v_y は降伏力である。式(13)は、疲労で広く使われているマイナー則と同じ概念のものであるが、履歴エネルギーをベースにしているところが異なる。

なお、ひずみ ϵ ではなく、変形 Δ を図式(3)で用いている。これは、極軟鋼を制震デバイスとして用いることを考えたとき、通常の地震応答解析や動的耐震照査において変形 Δ を用いる方が、都合がよいからである。なお、式(13)の Δ_i は、 i 番目のピーク変位を意味する。

図14の横軸のひずみを変位 Δ に直して、累積履歴エネルギーと変形 Δ の関係を示したのが図15である。この結果から求めた回帰直線 β 、 c の値は $\beta=0.74$ 、 $c=4.5 \times 10^6$ である。

これらの値を用いて D_w を一定ひずみ、ならびに2段階非一定ひずみ下での実験結果に適用して求めたのが図16である。一定ひずみ下での実験が $D_w=1.0$ 付近になっているのは当然ともいえるが、2段階非一定ひずみ下での実験においても D_w は0.8~1.2の間にあり、有効な損傷指標になり得ることを示唆している。

4.3 擬動的実験を用いた指標の検証

4.1節で提案した損傷指標がランダム荷重下でどの程度有効なのかを示す必要がある。

構造物内に組み込まれた制震デバイスが受けるランダムな変形は、デバイスの復元力モデルがわかっているれば計算が可能である。しかし、デバイス自身が大きな非弾性変形を受けることを考えると、極軟鋼の復元力特性は実験から求め、それを用いてデバイスを含む構造系全体の応答を計算する、いわゆる擬動的(pseudo dynamic)オンライン実験が適している。

ここでは一自由度系構造物の中に極軟鋼を制震デバイスとして組み込んだ構造系（図17）を想定し、擬動的実験を低サイクル疲労実験を行ったのと同じ装置を用いて実施した。実験の詳細は文献9を参照されたい。なお、入力としては1995.1.17兵庫県南部地震の神戸海

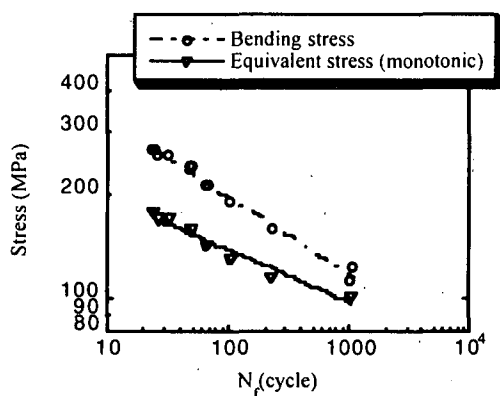


図-9.単調載荷モデルを用いた等価応力表示

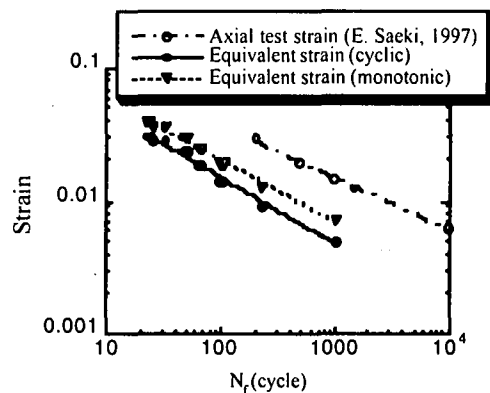


図-10.等価ひずみ表示による寿命曲線
-一軸実験との比較-

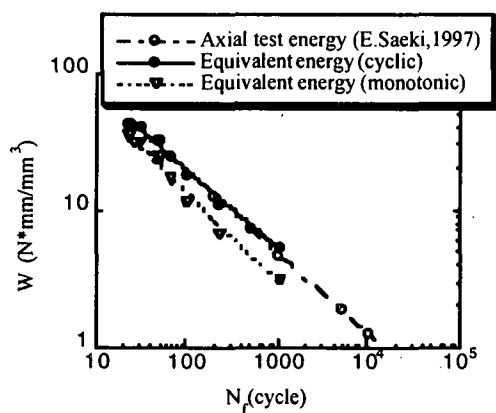


図-11.履歴エネルギーを尺度とした疲労寿命

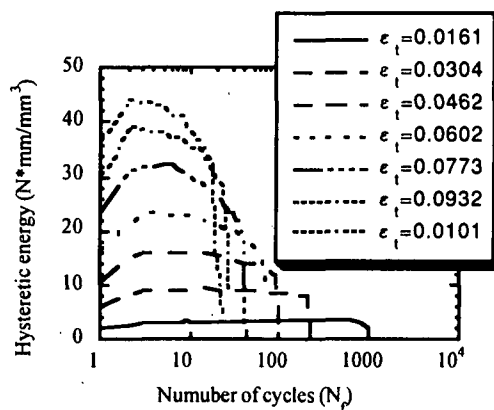


図-12.履歴エネルギー

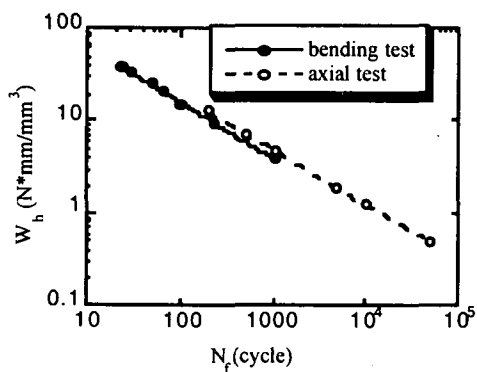


図-13.平均的な履歴エネルギー W_h と寿命

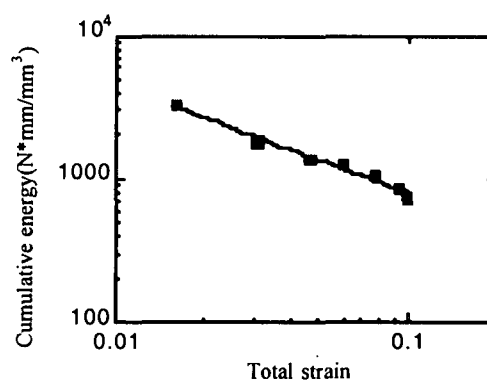


図-14.吸収可能な累積履歴エネルギーとひずみの関係

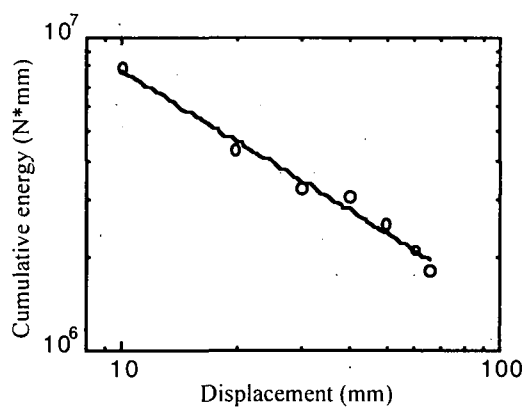


図-15.変位 Δ と累積履歴エネルギーの関係

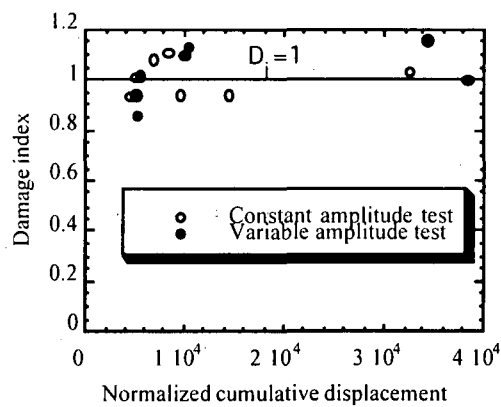


図-16.損傷指標 D_w の値

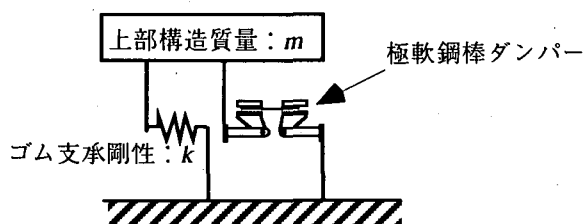


図-17.擬動的オンライン実験に用いた構造系モデル

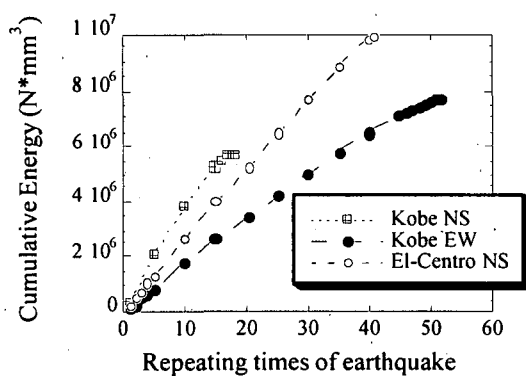


図-18.各地震入力に対する極軟鋼ダンパーへの累積履歴エネルギー

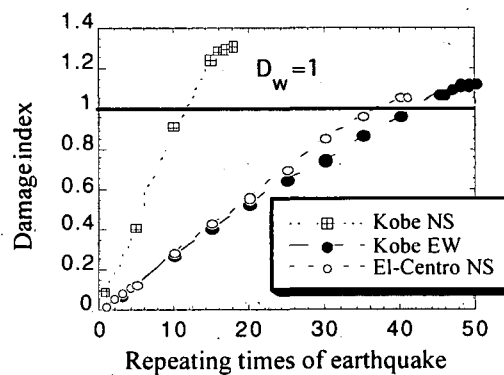


図-19.各入力に対する破壊時の損傷指標 Δ_w 値

洋気象台観測波NS成分（最大加速度817.8gal），EW成分が（617.1gal），1940年エルセントロ地震NS成分（340.2gal）をスケーリングして用いた。

図18には，極軟鋼ダンパーに累積された履歴エネルギーを示す。横軸は各入力の回数を示している。累積エネルギーのピークはダンパーが実験において破壊した状態に対応している。地震動入力により破壊に至るまでの累積エネルギーがかなり異なることがわかる。

図19に示すのは式(13)で定義した指標 D_w の値である。神戸NSでは1.3近いが，EW，エルセントロでは1.0強で実際に壊れており， $D_w=1.0$ という指数が地震応答下でも使用可能であることを示唆している。

5. まとめ

極軟鋼の塑性ひずみを伴う低サイクル疲労特性を曲げひずみ下で実験時に調べた。ひずみレベルは佐伯ら⁸⁾によるものよりも大きく，数%のオーダーとなっていることが特徴である。

履歴エネルギーを尺度とすると，佐伯らの一軸圧縮引張下での低サイクル疲労特性と整合的な結果となることを示した上で，低サイクル疲労破壊における極軟鋼の履歴エネルギー，総履歴エネルギーをベースとした損傷指標を提案し，その妥当性を擬動的オンライン実験により検討した。

今回の低サイクル疲労実験は実験数も少なく，供試体の形状効果，サイズ効果などについての検討が残されている。履歴エネルギーを用いた損傷指標についても，理論的背景を含めた検討が十分とは言えず，今後さらに検討を進めたいと考えている。

謝辞

極軟鋼の実験供試体は日本鋼管株式会社に作成いただきました。その際に建材開発部島岡久喜氏，鉄鋼事業部石川博氏，総合材料研究所大森俊道氏，基盤技術研究所岡本隆氏には多大の援助と助言をいただきました。また本研究は鋼材倶楽部「土木鋼構造研究助成」

ならびに「科学研究特定領域研究」の補助を受けて行いました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) R.I.Skinner et al., An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons, 1996.
- 2) T.T.Song and G.F. Dargush, "Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons, 1997.
- 3) M. Nakashima et al., "Energy Dissipation Behavior of Shear Panels Made of Low Yield Steel", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.23, 1299-1313 (1994).
- 4) I. Nishiyama et al., "Effect of Seismic Energy Dissipation Metal Beams Installed in Steel Frame", Proc. of 11 WCEE, paper No. 600, 1996.
- 5) 田中清・佐々木康人, "極低降伏点鋼を用いた制震パネルダンパーの静的履歴減衰性能に関する研究", 日本建築学会構造系論文集, 509号, pp.159-166 1998年7月
- 6) Y. Fukumoto et al., "Ultimate Strength of Steel Piers With Multi-Cell Cross Section Under Cyclic Loading", Technical report of Applied Technology Research Center, NKK Corporation, 1997.
- 7) J. B. Mander, "Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 6, No. 4, 463-468 (1994).
- 8) E. Saeki et al., "A study on Mechanical Properties of Low-Yield Point Steels", Journal of Structural Engineering, ASCE (submitted).
- 9) Yi Zheng "Seismic Damage Control of Bridges Using Low-Yield Point Steel (LYPS) Devices" Ph.D dissertation, University of Tokyo, 1998.
- 10) Collins, J.A., Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention, Wiley-Interscience Publication, New York, 1992.
- 11) A. Esin "A Method for Correlating different types of fatigue curve", International Journal of Fatigue, October 1980, 153-158.

(1998年8月17日受付)

LOW-CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF LOW-YIELD POINT STEEL (LYPS) AND DAMAGE INDEX

Masato ABE, Yozo FUJINO, Yi ZHENG and Krzysztof WILDE

Low yield point steel (LYPS) is a new kind of material; it has lower yield stress and larger ductility than the normal mild steels. As a material of the energy dissipation device, LYPS is expected to undertake large cyclic plastic strain under seismic loading. In this study, the low-cycle fatigue tests of LYPS bending bars at large strain level (1~10%) were conducted by imposing different histories of large cyclic deformation. By defining the number of load cycles in terms of the plastic energy dissipated, it is found that the result from the bending test is consistent with the normal axial force experiment. On the basis of low-cycle fatigue test results, a damage index for seismic loading is proposed which is expressed as a combination of deformation and cumulative hysteric energy. It is found from the pseudo dynamic experiment that the proposed damage index can reasonably well predict the failure of LYPS devices under seismic random excitations.