山形鋼部材の極低サイクル疲労破壊実験

VERY LOW-CYCLE FATIGUE TESTS OF STEEL ANGLES

岩井 哲*, 朴 鍊洙**, 野中泰二郎***, 亀田弘行****
Satoshi IWAI, Yeon-Soo PARK, Taijiro NONAKA and Hiroyuki KAMEDA

An experimental investigation has been performed on very low-cycle fatigue failure of steel angles under repeated loading. The objective of this study is to extract decisive factors causing cracks and rupture in the course of loading repetitions of the order of a few to twenty cycles. Visible cracks were initiated on the concave side of the bending deformation when it was stretching. Energy dissipation capacity depends heavily on the entire history of loading, failure mode, slenderness ratio and width-to-thickness ratio. Residual strains at the outbreak of a crack were of the order of 25~40 %, irrespective of the test parameters.

Keywords : steel structure, repeated loading, low-cycle fatigue, buckling, absorbed energy, residual strain

鉄骨構造, 繰返し載荷, 低サイクル疲労, 座屈, 吸収エネルギー, 残留ひずみ

1. 研究の目的と位置付け

構造物が破壊的な地震などによる厳しい繰返し載荷を受ける場合, その構造物の要素は部分的に大きな塑性変形を繰返し受ける。この時, 繰返し数は少なくとも塑性化の度合いが非常に大きくなると, 構造物は極低サイクルの繰返し塑性変形によって破壊する可能性がある。本研究の主たる目的は, 鋼部材が大きな塑性変形を繰返し受けることによって, 亀裂発生を伴う損傷を受けて破断に至る破壊過程を調べ, 塑性疲労損傷・破壊に大きく影響する要因を抽出し, 構造的破壊と各要因との定量的関係を把握することにある。

本研究は山形鋼を扱うが, 研究のねらいは山形鋼そのものの使用状況を対象にするというよりも, より一般的な鋼薄肉断面材の塑性疲労破壊現象を対象に考えるものである。ここでは, 部材の全体曲げ座屈や局部座屈の変形の繰返しに起因する亀裂発生や最終的な破断という, 部材特性にかかわる塑性疲労問題を, これまで多くの成果のある材料特性に基づく疲労破壊規準と関連づけて評価できるか否かを調べることを目指している。試験体の山形鋼は, 既に実験を行った鋼板要素の座屈後塑性

疲労の成果と対応づけられるような2枚の板要素が組み合わせられた比較的単純な断面形状をもつ材として選んだ。山形断面材を用いることによって, 幅厚比が明確に定義されること, 全体曲げ座屈と局部座屈が連成する挙動が調べられること, 部材断面が曲げ圧縮・曲げ引張・純引張といった基本的な局面を経験する本実験の載荷で, 複雑な破壊挙動解明のための基礎資料を得ることができると考えられる。

構造物の破壊・損傷の形態は, 一般に応力・ひずみなどの力学的因子, 腐食などの化学的因子と, 使用される材料の特性との組み合わせによって変化する。構造物で問題となる破壊としては, 材料中に何らかの要因で潜在したり, あるいは成長したミクロまたはマクロな欠陥や亀裂から瞬間的に破壊を引き起こす脆性破壊, 荷重あるいは変位の増加に伴って安定な亀裂が発生・成長し, 最終的には急速な塑性不安定破壊に至る延性破壊, 繰返し荷重に対する疲労破壊, その他に応力腐食割れ, クリーブ破壊などが挙げられる。

材料レベルにおいては, 繰返し荷重に対する疲労強度は, よく知られているように S-N 曲線を用いて表さ

本論文の一部は, 文献30), 31) および平成3, 4年度の日本建築学会大会と土木学会大会, ならびに第10回世界地震工学会議(マドリッド, 1992)で既に発表している。

* 京都大学防災研究所 助手・工博

** 京都大学大学院工学研究科 大学院生・工修

*** 京都大学防災研究所 教授・Ph.D.・工博

**** 京都大学防災研究所 教授・工博

Research Assoc., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., M. Eng.

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Ph.D., Dr. Eng.

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Dr. Eng.

れる。これは材料、熱処理条件などの内的条件のみではなく、負荷様式、切欠き、寸法、表面仕上げ状態、環境などの外的条件によっても異なるなど、それに影響する因子は極めて多く複雑な挙動を示す。寿命が 10^4 回以下である疲労を、いわゆる低サイクル疲労あるいは塑性疲労と呼ぶ。この場合の寿命の評価は、ひずみを規準として行われるのが普通である¹⁾。

鋼構造部材レベルの低サイクル疲労の問題は、筋かい材やトラス材のような細長い材が繰り返し軸方向力を受ける場合、あるいは H 形鋼のような薄肉断面材のプレート部が繰り返し曲げないしは曲げと軸力を受けるような場合にしばしば生じる。特に部材の繰り返し載荷実験では、一旦座屈して局部的に大きな塑性変形を受けた後、さらに引張・圧縮の繰り返しによって極少ないサイクル数で破壊するような現象が見られる。したがって、強震時のような、たかだか数十回程度の塑性変形域での繰り返しによって、たとえ破断に至らずとも、大きな損傷を受ける可能性のあることに注目することが必要である。本研究で対象とする繰り返しによる破壊挙動は、数回から十ないし二十回で破断に至る「極低サイクル」疲労現象であるが、これは疲労破壊的というよりも、変位の増加に伴って亀裂が発生・成長する延性破壊的な様相を呈している。

構造部材を扱ったこれまでの研究の成果では、文献 2), 3) において著者らが言及したように、主として数十～数百あるいはそれ以上のサイクル数の繰り返し載荷による破壊が取り上げられ、ここで考えているような極低サイクルでの繰り返しによる破壊を対象としたものはまだほとんどない。構造部材の一定変位振幅下の繰り返し曲げ挙動は履歴ループが定常状態となるか、劣化するか²⁾の 2 種に大きく分けられる^{4)~11)}。劣化を示す場合は、局部変形や不安定現象の発生にかかわっており、定常状態となる場合に比べて、より早く疲労破壊に至る場合がある。軸方向圧縮力が存在する場合は、その劣化挙動をさらに早めることになる^{12)~17)}。これらの実験結果は一般に、載荷変位振幅と破壊時の繰り返し数との関係が両対数グラフ上で負勾配をもつ直線で表されることが多い。しかし破壊状態の定義は各研究者によってまちまちで、まだ統一されていない。

実際の構造物に作用する荷重は、一定振幅であることはまれであり、通常は平均や振幅が複雑に変化する不規則の変動荷重である。変動荷重下の疲労強度は、荷重の大きさの頻度分布のみでなく、載荷順序により変化する。しかし一般には頻度分布のみを考えて、一定振幅試験結果に基づいて推定する線形累積損傷則、いわゆるマイナー則¹⁸⁾などが広く用いられている。材料レベルでも、この関係は各応力レベルの繰り返し数が比較的少なく、また応力変動範囲も小さく周期的に繰り返し変動が起こ

る場合は成立するが、変動回数の少ない場合には、高・低応力の負荷順序など荷重パターンの違いにより累積疲労損傷の程度は異なる¹⁾。構造物に対して、地震時における非定常載荷下での、疲労寿命あるいは累積的な損傷を評価する理論・解析方法は多く提案されているものの^{7), 8), 12), 13), 19)~24)}、まだ確立されるに至っていない。その理由としては、実験的に現象をとらえようとした研究が主体でまだ疲労破壊の機構そのものが十分にわかっているわけでないことと、破壊自体がばらつきの多い現象であるため厳密に考察することが困難であることが挙げられる。

著者らは既に局部座屈部分の破壊挙動を調べるため、鋼部材板要素を対象として、初期に座屈を生じた後の圧縮・引張繰り返しによる破壊性状を実験的に調べ、板要素の極低サイクル疲労では、非常に大きな塑性変形が生じた部位におけるひずみの大きさと、亀裂の発生や破断とが密接に関係する可能性が認められた^{25), 26)}。本論文では、全体座屈が局部座屈を伴って生じるような構造部材としての挙動を実験的に調べるため山形鋼を試験体を選び、数回からせいぜい二十回程度の極低サイクルの繰り返し載荷による疲労破壊現象を観察した。ここでは、細長比、幅厚比、載荷パターン、ならびにたわみ変形モードの違いが破壊挙動、繰り返しサイクル数、履歴吸収エネルギー、局所残留ひずみなどに与える影響に注目して、実験結果をまとめ、比較し考察を加えた。特に極低サイクルの疲労破壊条件に関与する亀裂や破断に主要な影響を及ぼすと考えられる局所ひずみの分布に焦点を当てて実験を遂行した。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は合計 20 体で、SS 400 材相当の山形鋼 L-40×40×3 と L-40×40×5 を用いて Fig. 1 のように製作した。試験部長さ l は、318 mm (もしくは 300 mm; とともに“L”シリーズと呼ぶ) と 618 mm (“H”シリーズと呼ぶ) の 2 種を用いた。試験体に用いた脚幅 $b=40$ mm の山形鋼の板厚 t は公称値で 3 mm と 5 mm の 2 種で、公称寸法による幅厚比 b/t は 13.3 と 8 であるが、実寸法に基づく幅厚比はそれぞれ 15.8~16.4 と 8.6 となっている。ただし、 $t=3$ mm の山形鋼はロットの異なる 2 種が使われ、 $t=5$ mm のものを含めて Table 1 ならびに Table 2 に I, II, III で示す 3 つの材料特性があるが、大きな差はない。

Table 2 で、試験体には名前と番号 (No.) を併記した。試験体名は実験変数を表すものとしており、その付け方を Table 2 の欄外に示した。なお、試験体名 4 文字の後に“a”あるいは“b”と付けたものは、全く同じ載荷条件による実験を行った場合で、2 体ずつ 2 組ある。試

Fig. 1 Test specimen (length in mm)

Table 2 Specimen sizes and test parameters

Specimen Name	No.	Material type	Length l (mm)	Width b (mm)	Thickness t (mm)	Slenderness ratio λ	Width-to-thickness ratio b/t	Loading pattern	Deflection mode
L3IP	13	I	318	39.6	2.80	40.7	14.1	I	P
L3IN	4	II	301	40.4	2.55	37.6	15.8	I	N
L3CP _a	6	II	300	40.3	2.55	37.5	15.8	C	P
L3CP _b	18	I	318	39.6	2.83	40.7	14.0	C	P
L3CN	5	II	301	40.5	2.47	37.6	16.4	C	N
L3GP	16	I	318	39.5	2.80	40.7	14.1	G	P
L3SP	17	I	318	39.5	2.82	40.7	14.0	S	P
L3GN	14	I	318	39.5	2.78	40.7	14.2	G	N
L3SN	15	I	318	39.6	2.79	40.7	14.2	S	N
L5IP	9	III	318	39.2	4.56	41.9	8.6	I	P
L5IN	7	III	300	39.2	4.58	39.5	8.6	I	N
L5CP _a	8	III	317	39.3	4.55	41.8	8.6	C	P
L5CP _b	10	III	317	39.2	4.55	41.8	8.6	C	P
L5CN	11	III	318	39.2	4.55	41.9	8.6	C	N
H3IP	19	II	618	40.3	2.49	77.2	16.2	I	P
H3IN	21	II	618	40.2	2.50	77.2	16.1	I	N
H3CP	20	II	618	40.3	2.50	77.2	16.1	C	P
H3CN	22	II	618	40.4	2.50	77.2	16.2	C	N
H3GP	23	II	618	40.2	2.51	77.2	16.0	G	P
H3SP	24	II	618	40.4	2.49	77.2	16.2	S	P

Fig. 2 Loading system

Specimen Identification

試験体番号は実験を遂行した順を示している。No. 8 以降の番号の試験体には、両端部に 9 mm 厚鋼板を山形鋼に垂直に溶接接合したが、それ以前のは端部鋼板をもたない。これは後者で、特に板厚 5 mm の山形鋼試験体の場合、試験体端部での高力ボルト摩擦接合耐力に不足があり、荷重初期に滑りを生じることがあったためである。No. 18 までの試験体は、端部鋼板の有るものが $l=318$ mm、無いものが $l=300$ mm となっている。なお最小断面 2 次半径 i は、L-40×40×3 が 7.81 mm (Type I) と 8.01 mm (Type II; 公称値で 7.90 mm), L-40×40×5 が 7.59 mm (Type III; 公称値で 7.74 mm) である。“L” シリーズと “H” シリーズに対応する細長比 $\lambda=l/i$ はそれぞれ 37.5~42 および 77 である。

2.2 実験変数

本研究では、実験変数として試験体の①細長比 $\lambda=$

Table 1 Mechanical properties of materials

Type	Angle	Cross-sectional area A (mm ²)	Upper yield stress (N/mm ²)	Lower yield stress (N/mm ²)	Ultimate strength (N/mm ²)	Elongation (%)
I	L-40x40x3	216	396	371	465	31.2
II	L-40x40x3	200	351	336	449	29.7
III	L-40x40x5	338	356	339	469	27.1

l/i (l : 有効部材長, i : 最小断面 2 次半径) と②幅厚比 b/t (b : 脚幅, t : 板厚), ③繰り返し荷重パターン, ④たわみ変形モードをとった。試験体の実測寸法と、各試験体に与えた実験変数の設定条件を Table 2 に示す。

Fig. 2 に示す装置を用いて試験体の軸方向相対変位 Δ を制御する静的な定速度繰り返し荷重を行った。この装置によって試験体を高力ボルトと普通ボルトで固定して、Fig. 1(d) の断面重心 G を通る主軸 u, v の内、 u 軸回りならびに材軸回りの回転を拘束し、 v 軸回りの回転のみ自由にした両端ピンの条件で支持し、断面重心位置に材軸方向の繰り返し加力を行った。変位 Δ はすべての試験体について縮む変形域でのみ作用させた。これは引張破断によらない破壊性状の把握を目指し、圧縮変位側での座屈後の繰り返し荷重に焦点を絞ったこと、ならびに試験体の端部に高力ボルト用の有孔断面を設けたことによって母材を引張降伏させられるまで荷重できなかったことの 2 つの理由による。荷重 P ならびに Δ の符号は引張を与えるものを正とした。荷重パターンは Fig. 3 の 4 通りを用いた。(a) の段階型漸増変位振幅繰り返し荷重 (I 型) と (b) の定変位振幅繰り返し荷重 (C 型) に加えて、(c) と (d) の 2 段階定変位振幅繰り返し荷重 (GS 型) は (b) の一定変位振幅荷重を基本パターンとして、途中の 6 サイクルを半分の小変位振

Fig. 3 Loading patterns

Fig. 4 Deflection modes and cracking patterns

Fig. 5 Testing system

Fig. 6 Definition of one loading cycle

幅で繰り返したものである。計画した総サイクル数は、漸増変位振幅 [I] 型 24 サイクル、定変位振幅 [C, G, S] 型 30 サイクルである。I 型载荷では、各振幅で 4 サイクルずつの繰り返しを行った。G 型载荷は第 7 サイクル目から、S 型载荷は第 1 サイクル目から各 6 サイクルの小変位振幅载荷を与えたもので、双方共第 13 サイクル目以降では同じ変位履歴を受けたことになり、その挙動の差異を調べることを目的の 1 つとした。

山形鋼が中心圧縮载荷によって座屈変形する時、たわみの発生の向きは Fig. 4 に示すように 2 通り現れ得る。したがって結果的にこのたわみの発生の向きが、比較されるべき重要な実験変数となった。ここでは Fig. 4(a) を正たわみモード (P 型)、Fig. 4(b) を負たわみモード (N 型) と定義する。载荷は可能な限り中心圧縮としたが、座屈後のたわみモードを計画どおりに制御する必要性から、载荷実験の多くは、予備载荷でほぼ中心圧縮状態とみられるひずみ分布を確認した重心位置から、0.3 mm~0.7 mm 程度の微小な偏心を与えた。故意に偏心を与えないで、座屈時のたわみが正負どちらの向きに生じても構わないものとして実際に中心圧縮状態で载荷した試験体は、L3IP (No.13), L3IN (No.4), L3CN (No.5), L5IN (No.7) の 4 体である。今回の実

験の目的は座屈変形以後の繰り返しによる破壊挙動の調査にあり、座屈挙動そのものは特に重要視していないが、両端ピン支持の実験装置の機能を検証するの一つの手がかりとして座屈耐力をみることはできる。

2.3 载荷方法

京都大学防災研究所設置の油圧式サーボアクチュエータを用いた载荷実験システムにより加力を行った。载荷装置を Fig. 5 に示す。载荷装置は基本的に文献 25), 26) で用いたものと同じであるが、若干変更を加えた。すなわち、試験体の上下材端位置でねじれ回転止めを設けたこと、試験体上下に用いた回転式保持具 (Fig. 2 参照) 自体の重量不均衡を解消するためのカウンター・バランスを取り付けたこと、そして実験時のモニター用と計測用のデータの同時出力のための配線を追加したことなどである。

ここで用いる 1 サイクルの数え方は次のように決めた。Fig. 6 に示すように、軸方向変位 Δ を与えることによって、圧縮軸力が生じ、その後与えられた設定変位 A で折り返すと引張軸力が生じる。さらに変位を戻して、別の設定変位 B で折り返し新たに縮みを加える時、荷重 P が 0 になる。初めの圧縮過程における $P=0$ から、次の圧縮過程における $P=0$ までを 1 サイクルと定義す

る。これは、Fig. 3 の変位制御による $\Delta=0$ から次の $\Delta=0$ の点までの 1 サイクルとは一致しないが、3.4 節における履歴吸収エネルギーの算出には、本定義による方が明確に対応し得るからである。

2.4 計測方法

試験体の軸方向相対変位 Δ および横たわみは、伸び縮みが少なく計測の再現性があるグラスファイバー製の糸を介して撓動抵抗型変位計で計測し (Fig. 5), Δ をアクチュエータのフィードバック制御に用いた。

載荷前に対する亀裂発生後の試験体表面の局部残留ひずみを測定するため、桑村・前田が用いた局部ひずみの測定方法²⁷⁾を参考にした。桑村らは標点に Vickers 圧痕 (点痕) を打ち、荷重を 98 N (10 kgf) としているが、本実験に用いたような表面処理を施していない山形鋼の場合にはそれと同じ方法では標点を認識するのに難があったため変更した。本実験では、Vickers 硬度試験装置を用いて、山形鋼断面の脚縁部ならびに稜角部において端から 2 mm 入った位置 (Fig. 10 参照) に、試験体材軸方向に 2 mm のピッチで中央試験区間 80 mm にわたって Knoop 圧痕 (線条痕) を標点として打った。打痕用荷重は 196 N (20 kgf), 荷重の保持時間は 5 秒間とした。載荷実験終了後、スケール付きルーペなどを利用して 1/10 mm 精度で伸び量を読みとった。これにより 5% 単位のひずみ計測が可能となる。また検長 2 mm のひずみゲージを Fig. 1(a), (b) に示す位置に貼付し、降伏棚域までの弾塑性挙動を計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 座屈強度と変形、亀裂の発生

実験初期の圧縮載荷によって試験体は全体座屈を起こし、同時に正たわみモードでは、部材中央付近で局部座屈を生じた。全試験体について、座屈強度の実験値をブ

ロットし座屈曲線と比較したものが Fig. 7 である。図の縦座標は座屈荷重 P_{cr} を降伏軸力 $\sigma_y A$ で無次元化した。横座標は細長比 λ に比例し、オイラー座屈強度が降伏軸力に対応する時の値が 1 となるように定めた。ここで、 σ_y は鋼材の下位降伏点応力、 A は断面積で Table 1 に示した各値をとっている。非弾性座屈曲線として、Engesser-Shanley の接線係数理論による座屈応力を示した。ここで、鋼材の比例限度 σ_p を

$$\sigma_p = 0.8 \sigma_y \dots \dots \dots (1)$$

と仮定し、比例限度以上の応力-ひずみ曲線の座屈応力 σ_{cr} における接線弾性係数 E_t を

$$E_t = E_s [1 - (\sigma_{cr} - \sigma_p)^2 / (\sigma_y - \sigma_p)^2] \dots \dots \dots (2)$$

と求めて求めた。 E_s は鋼材のヤング係数で $E_s = 206$ kN/mm² とした。

実験結果の一覧を Table 3 に示す。ここに示した P_{cr} は座屈荷重、 f_{cav} は正たわみモードの局部座屈あるいは負たわみモードの全体座屈による曲げ変形の凹部側において肉眼で初亀裂が確認できた時のサイクル数、 f_{vex} は同じく曲げ変形の凸部側で初亀裂を確認した時のサイクル数、 f_{pen} はそれらの両亀裂発生後に板厚方向に亀裂が貫通した時のサイクル数、 f_{rup} は破断サイクル数、 E は実験終了段階における履歴吸収エネルギーの累積量、 E_0 は試験部全長にわたって蓄え得る最大弾性ひずみエネルギーで

$$E_0 = \sigma_y^2 \cdot A \cdot l / (2 \cdot E_s) \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる。 ϵ_{tens} , ϵ_{comp} は亀裂発生部における引張側、圧縮側それぞれの局所ひずみで、絶対値が最大のものである。

荷重はデータ・ロガーを用いてデジタルの数値で記録されたが、実験では座屈現象は瞬時に起こり、その最大圧縮荷重をデータ・ロガーで記録できないこともある。実験時にはモニターとして X-Y レコーダーによる

Fig. 7 Column curve and observed strength

Table 3 Test results

Specimen name	Buckling load P_{cr} (kN)	Number of load cycles				Dimensionless energy E/E_0	Strain at cracked portion	
		Crack f_{cav}	Crack f_{vex}	Crack f_{pen}	Rupture f_{rup}		Tens. ϵ_{tens} (%)	Comp. ϵ_{comp} (%)
L3IP	71.4	17	18	18	--	131	--	--
L3IN	58.9	20	21	21	--	235	--	--
L3CP _a	64.2	9	10	10	--	133	27.5	-29
L3CP _b	66.8	5	8	8	23	115	30	-32.5
L3CN	69.0	7	8	8	--	220	--	-41
L3GP	66.0	5	9	10	25	112	27.5	-35
L3SP	69.7	8	12	12	27	122	30	-32.5
L3GN	72.8	6	--	7	--	170	--	-30
L3SN	76.3	10	--	11	--	221	--	-35
L5IP	105.2	21	23	23	--	236	35	-35
L5IN	120.7	22	--	22	--	410	--	-30
L5CP _a	96.7	9	12	12	19	211	32.5	-35
L5CP _b	109.2	9	12	12	19	214	30	-32.5
L5CN	107.5	9	13	13	21	378	35	-35
H3IP	68.4	18	21	21	--	78	35	-35
H3IN	59.9	18	--	22	--	117	--	-35
H3CP	49.1	5	8	9	17	66	32.5	-35
H3CN	58.3	5	--	8	--	104	--	-35
H3GP	48.6	6	9	11	22	75	30	-35
H3SP	62.7	9	12	12	22	83	35	-35

P - Δ 関係のアナログ記録も同時に行った。図および表中の P_{cr} は X-Y レコーダーに示された最大荷重値で、両者の比較では、データ・ロガーの最大荷重値記録の方が若干低くなる傾向があり、最大で 4.5 % 程度の差を生じた^{註1)}。本実験に用いた細長比あたりの座屈実験結果は座屈荷重の相当ばらつく所であり²⁸⁾、当結果のばらつきは特に大きいものではない。

Fig. 4(a) のような正たわみモードでは、まず山形断面の両脚縁の局部変形の凹部と凸部の 2 表面にそれぞれ初亀裂が発生した後、載荷とともに亀裂が進展して厚さ方向内部に進み、断面中央の稜角部まで入り込んだ。Fig. 4(b) のような負たわみモードでは逆に、両脚付け根の稜角部に変形が集中し、全体座屈変形の凹側変形部が引張力を受けた時に初亀裂が発生した。亀裂の進展は当然、引張力を受ける部位にみられるが、いずれの載荷の場合も、局部座屈や全体座屈によって曲げ圧縮変形を受けた凹側変形部の板要素が、荷重の反転によって引張力を受けた時に初亀裂が観察された。多くの試験体では、続く荷重再反転後の圧縮載荷で、初亀裂が発生したのとはほぼ同じ材軸方向位置で反対面の曲げ引張側である凸側に新たに亀裂が発生するという過程が認められた。ここでの亀裂の発生はすべて肉眼での観察によって確認したものである。実験終了後の試験体の稜角側の亀裂発生部の写真を Photo. 1 に示す。

全く同じ載荷条件で実験を行った試験体 L5CPa と L5CPb は最終的に 2 体が同じサイクル数で完全破断を生じた。これによって疲労実験とはいえ、実験そのものの再現性がかなりあることが確かめられた。

3.2 繰り返しサイクル数と破壊挙動

(1) 幅厚比の影響

載荷予定した最終サイクル数に至る前に破断したのは 9 体であった。正たわみモードの場合は、実験時の制御困難のため途中で載荷終了した L3CPa を除いて、C, G, S 型の定振幅載荷のものすべてが破断に至った。この時の破断サイクル数は $f_{rup}=17\sim 27$ である。負たわみモードでは L5CN 1 体のみが破断し、この時 $f_{rup}=21$ である。両たわみモードとも、亀裂発生時サイクル数 f_{cav} , f_{vex} は幅厚比による差があまりないか、または幅厚比大の方がサイクル数が少ない傾向にある。しかし破断サイクル数はむしろ幅厚比の小さい方が少ない^{註2)}。

負たわみモードでは、亀裂はすべて材軸に垂直な方向に現れ (Photo. 1(b), (d)), 亀裂発生位置も全体座屈で最も厳しい応力と変形を受ける材中央に出た。正たわ

みモードでは、両縁部の局部座屈と全体座屈とがほぼ同時に生じるが、局部座屈は必ずしも材中央に生じていない。亀裂は局部座屈発生部で最も変形の大きい位置に生じ、幅厚比の大きい場合、材軸垂直方向より斜めに現れる (Photo. 1(a))。これは局部座屈が、ねじれ変形を伴って両脚で材軸方向にずれた位置で現れたことによる。幅厚比の大きい場合に材のねじれる傾向が著しい。

(2) 細長比の影響

正たわみモードの場合では、細長比の影響は破断サイクル数に顕著に現れ、細長比大のものは破断サイクル数 f_{rup} が各載荷パターンで細長比小のものに比べて 3~6 サイクル減少した。しかし亀裂発生時のサイクル数 f_{cav} , f_{vex} には細長比による顕著な差はあまりみられない。また細長比の大きい場合に材のねじれる傾向が著しい。実験によると、ここで用いた細長比程度の同じ断面形状をもつ山形鋼では局部座屈による変形領域の広がりにより差がない。負たわみモードの場合は、亀裂発生時サイクル数に顕著な影響はみられない。

高橋ら²⁹⁾は、山形鋼筋違の圧縮・引張変位漸増型繰返し下での破壊性状を、本実験でいう負たわみに当たるモードで、種々の幅厚比 (8.3~12.5) と細長比 (60, 150, 240) を用いて実験的に調べている。その結果として、①幅厚比の大きい方が早いサイクルで破断すること、②細長比の小さい方が早いサイクルで破断すること、が示された。本実験の、特に正たわみモードの場合の結果はいずれも、これらの結論とは逆の傾向になっている。ただし、細長比は対象とした範囲が異なり、本実験の試験体の細長比は高橋らの実験の小さい方の値に近い。また②については本実験で負たわみモードの破断サイクル数のデータが得られていない。

(3) 載荷経路の影響

載荷パターンの C, G, S 型繰返し (Fig. 3 参照) の 3 者の場合を比較して、載荷経路の影響を調べた。第 6 サイクルまでの C 型と G 型とは同じ載荷条件であり、Table 3 で、亀裂発生時の f_{cav} における 1 サイクルの値の差は実験のばらつきと考えられ、両者はほぼ同じ経過をとっている。S 型で f_{cav} が C, G 型に比べて 3~4 サイクル遅れるのは、初めに小振幅の 6 サイクルを経験したことによる影響とみられる。 f_{vex} および f_{pen} は第 8 サイクル以降となるが、C 型と G 型でほとんど差がない。G 型の 7 サイクル目以降の小振幅繰返しによって損傷の進展を緩和する効果が特に現れなかったと言える。S 型では f_{cav} が遅れたのと同じ程度に、 f_{vex} も遅れている。破断時の f_{rup} については L3 シリーズと H3 シリーズの差がどの程度、有意であるか判断するのは難しい。しかし初めに大きい振幅の載荷を行った方が亀裂発生サイクル数および破断サイクル数が少なく、やや損傷の大きい傾向がある。載荷経路の影響については、3.4 節で

注 1) 平成 4 年度の日本建築学会、土木学会、ならびに第 10 回世界地震工学会議 (マドリッド) の著者らによる研究概要報告などにおける座屈荷重値の表記はデータ・ロガーによるものであり、Table 3 の値と若干の差がある。

注 2) 負たわみモードの L3CN は 30 回繰返しても破断しなかったと見なせる。

Photo. 1 Cracked and ruptured portions after testing

Fig. 8 Load-axial displacement relations

エネルギー吸収量の観点から再び考察を加えることにする。

3.3 荷重-軸方向変位曲線

荷重 P と軸方向変位 Δ の関係の例を Fig. 8 に示す。 $N_y = \sigma_y A$ は断面の降伏軸力である。変位振幅漸増 (I) 型载荷では、試験部長さ l の 8% 変位にあたる第 5 振幅域での繰り返しまでは亀裂は現れず、多くの場合 12% 変位にあたる最終の第 6 振幅域での第 1 サイクル目に亀裂が出始めた。定変位振幅 (C) 型载荷は、この第 5 振幅と同じ 8% 変位での繰り返しを行っており、第 7~9 サイクルで最初の亀裂が確認できた。

定変位振幅型载荷を行った試験体では、各サイクルの履歴曲線が収束し安定する傾向と、逆に発散し不安定となる傾向の違いが認められる。各サイクルごとの履歴ループに劣化による顕著な差が見られるのは、亀裂が確認された時点か、もしくはその 2~3 サイクル後である。载荷初期の座屈によって圧縮抵抗力は急激な低下を起こすが、材料的な損傷はまだ受けていないため、引張力には抵抗でき、亀裂が発生するまで履歴曲線は徐々に安定する傾向にある。しかし、亀裂が発生すると、引張抵抗力・圧縮抵抗力共に著しく劣化し破断に至る。

負たわみモードの場合は、正たわみモードの場合と比べて、膨らみの大きい履歴ループ形状が観察される。ま

た、幅厚比の小さい L5 シリーズを除いて、引張強さは負たわみモードの場合が大きくなっている。負たわみモードでは、全体座屈が生じた後、更に縮められる時、部材中央では山形断面の両縁部間距離が広げられる。次に設定変位で折り返して $\Delta=0$ まで戻る際には、まっすぐに近い状態に戻り、この時、元の断面形状に近くなる。しかし、特に幅厚比が大きい L3 シリーズの断面、あるいは正たわみモードで局部座屈を伴う座屈変形をした場合では、 $\Delta=0$ の元の変位に戻っても、まっすぐに伸び切らない状態にある。

また別の顕著な現象の例として、試験体 H3CN では、変位を戻す途中で局部座屈が発生すると同時にねじれ、履歴ループに明確な折れ曲がりが見られた。しかし、この負たわみモードにおけるねじれ変形は亀裂の発生・進展につれて徐々に解消し、载荷終了時には単に材中央について上下対称な、ねじれない弱軸曲げ変形しか残らなかった。

3.4 履歴吸収エネルギー

各履歴ループで囲まれた面積から算定した履歴吸収エネルギーの累積値 E と繰り返しサイクル数 f との関係性を全試験体について Fig. 9 に示す。図の縦軸は E を最大弾性ひずみエネルギー E_0 で無次元化したエネルギー比である。(a) 図は I 型、(b) 図は C 型、(c)~(e) 図

Fig.9 Comparison of energy absorption in the course of increasing number of cycles

はS, G, C型の3者をそれぞれL3正たわみモード, L3負たわみモード, H3正たわみモードについて比較したものである。

(1) 载荷パターン別の比較

繰り返しに伴う履歴吸収エネルギーの累積過程の各段階は, I型 (Fig.9(a)) とC型 (Fig.9(b)) の別, すなわち载荷パターンによって全く違う性状を示す。また载荷パターンが同じ場合でも, 山形鋼のような1軸対称断面では, 横たわみの発生方向の違いによる影響を大きく受ける。負たわみモードの場合の方が正たわみモードの場合より, 同じ繰り返し数でもエネルギー比が大きい。これは亀裂発生が認められた段階 (▼) までの载荷初期においても, 最終的な破断時 (▽) の総エネルギー量においても同様である。正たわみモードと負たわみモードの履歴ループ面積の差は Fig.8 でも明らかに現れていた。これは負たわみモードでは全体座屈のみ生じたが, 正たわみモードでは全体座屈が局部座屈を伴って生じ,

Fig.10 Distribution of residual strain in angle test

Fig.11 Longitudinal distribution of residual strain in material test

抵抗力が下がったことによると考えられる。幅厚比の違いに関しては, 幅厚比小 (L5シリーズ) の場合が幅厚比大 (L3シリーズ) の場合よりエネルギー比が大となっている。幅厚比小の場合にエネルギー比が大となることは, 幅厚比が局部座屈に関連していることから理解できる。また細長比による影響も, 座屈後挙動の履歴ループの膨らみの違いから, 細長比小の場合にエネルギー比が大となることがわかる。

これらの諸関係より, 累積エネルギー比がある値を超えた時に亀裂が発生するという訳ではなく, また最終的な破断にかかわるエネルギー比を特定の値で表すことも困難である。しかし見方を変えれば, 累積履歴吸収エネルギー特性は極低サイクル疲労破壊と単純な関係にはないが, 载荷履歴・変形モード・幅厚比・細長比の違いを顕著に反映するということもできる。これより極低サイクル疲労による部材の損傷過程を, 部材中の局部座屈発

生部分などの局所の塑性仕事を算出することで、エネルギー吸収量によって定量的に評価を行える可能性のあることが推察される。

(2) 同一载荷条件下での比較

同じ载荷条件で実験した2組の試験体について、エネルギー吸収特性の比較がFig. 9(b) でなされている。まず試験体 L5 CPa と L5 CPb はほとんど同じエネルギー吸収挙動をしていることが認められた。亀裂発生時の繰返し数や、亀裂発生後の劣化の過程、履歴曲線の形状ならびに破断時のサイクル数など、ほとんど一致した実験結果が得られたことは、極低サイクル疲労実験の再現性のあることを示している。しかし、もう1組の L3 CPa と L3 CPb では、エネルギー特性に若干の差が現れている。これらのことから、同じ载荷を行っても実験結果としてこの程度のばらつきが出ると考えるべきかも知れない。ただし、前者L5の一対は材料も端部板溶接の有無も全く同じ条件であるのに対し、後者L3の一対は材料のロットが同一でなく、一方が端部プレート無し、他方が端部プレート有りのもので、全く同一の試験体条件と見なせない点もあり、その影響が皆無とは言いつけない。

(3) 载荷経路の影響

载荷経路は異なるが、同一の試験体形状に対し、同一のモードで変形して亀裂を生じ、破断に至った場合のエネルギー吸収能力の比較を、Fig. 9(c)~(e) において行っている。ここでは载荷経路(载荷順序)が異なる2体と、それらの基本となる定振幅繰返し载荷を行った1体の、3体ずつ3組の場合についてそれぞれ示している。

正たわみモードの場合は、L3 シリーズ (Fig. 9(c)) も H3 シリーズ (Fig. 9(e)) も良く似た曲線を示しており、本実験で行った程度の载荷経路の変化では、亀裂発生や破断にかかわるエネルギー吸収比にあまり差が見られない。载荷経路による影響としては、最初の6サイクルまではG型(破線)とC型(鎖線)が一致すること、7~12サイクルでG型(破線)がS型(実線)に近寄ることなど、順序を入れ替えた影響を直接反映していることが認められる。第13サイクル目以降のエネルギー吸収率(曲線の勾配)は、C, G, S型の順で大きく、損傷の受け方と対応しているとも考えられる。また、この順に破断サイクル数も多くなっている。しかし負たわみモード (Fig. 9(d)) の場合の結果は、正たわみモードの場合ほど合理的な対応は見いだせない。

3.5 局所残留ひずみ分布

载荷終了後の局所残留ひずみの大きさと亀裂との関係は、Fig. 10 に示す断面の脚縁部ならびに稜角部付近で測った材軸方向のひずみ分布図によって見ることができる。ここで亀裂発生部のひずみの大きさは、亀裂による

間隙を除いた、材としての正味のひずみを算定したもので表した。図中、線引きを施した部分は引張ひずみを、網点を施した部分は圧縮ひずみを表す。正たわみモード (Fig. 10(a)) では、脚縁部の塑性化領域が狭い範囲に集中して限られており、領域長さは断面の板厚の4~6倍程度となっている。稜角部では、ひずみ量はそれより小さくなるが、塑性化領域長さは長く、板厚の20倍程度まで広がっている。また、塑性化域の中央ではひずみが付近とは反転し、圧縮を示している。一方、負たわみモード (Fig. 10(b)) では、ひずみ計測を行った80 mmの長さ区間の領域全体に塑性化が進んでいる。各試験体で得られた亀裂発生部の残留ひずみの最大値は、Table 3 に示すように圧縮側・引張側とも絶対値で25~40%の範囲であった。この値は、载荷履歴や幅厚比、細長比、ならびにたわみ発生の向きにかかわらずほぼ同じであることが注目される。亀裂は引張载荷時に発生するものであるけれども、特に亀裂発生箇所における圧縮ひずみの大きさは、試験体が経験した最も大きな曲げ変形に依存するとも考えられる。したがってひずみの値の範囲を検証するためには、今回と異なる変形状態による場合を更に問題設定する必要があるかも知れない。今後の実験的課題として、このことも踏まえ、伸び変形を含む载荷パターンを変位履歴に入れることを計画中である。

Table 1 に結果を示した単純引張载荷試験に用いたJISの13B号材料試験片について、局部ひずみを同様の方法で調べた例を、Fig. 11 に示す。図の横軸は試験片の材軸方向の座標を表すが、破断を生じた断面位置を座標の0と置いている。標点間距離50 mmでの平均伸び率が30%程度である場合でも、1.5 mm ピッチあるいは2 mm ピッチで計測した局部ひずみの最大値は100%にも達している。したがって上記繰返し载荷時の亀裂発生に関するひずみ値がこれと比べて相当小さいことは、繰返し载荷による効果によるものと考えられる。

4. 結 論

山形鋼部材を用いて軸方向相対変位で制御する繰返し载荷を行い、数回から二十回位の極低サイクルの繰返しで破壊する現象を実験的に観察し、調査した。本実験で行った実験変数の範囲で得られた知見を次に要約する。

- 1) 亀裂の進展は当然、引張応力を受ける部位にみられるが、いずれの载荷の場合も、局部座屈・全体座屈によって曲げ圧縮変形を受けた凹側変形部の板要素が、繰返しによる荷重の反転で引張力を受けた時に初亀裂が発生することが肉眼で観察され、続く圧縮再载荷で曲げ引張側である凸側に新たに亀裂が発生する過程が認められた。
- 2) 正たわみモードでは、局部座屈が全体座屈とほぼ同

時に生じ、幅厚比の大きい場合には材のねじれを伴って現れた。ねじれは細長比が大きい場合に顕著に現れた。亀裂は局部座屈発生部において生じた。破断時のサイクル数は、幅厚比が小さいほど少なく、また細長比が大きいほど少なくなった。

3) 荷重-軸方向変位曲線で囲まれる面積から算定される累積履歴吸収エネルギーは、累積量が特定の値を超えた時に亀裂が発生するという訳ではなく、また最終的な破断にかかわるエネルギー量を特定の値で表すことはできない。しかし同一形状の試験体を用いた同一の載荷履歴とたわみモードによる載荷では、エネルギー吸収能力は同程度に発現されている。繰り返しに伴う履歴吸収エネルギーの累積過程は、極低サイクル疲労破壊と単純な関係にはないが、載荷履歴・たわみモード・幅厚比・細長比の影響を著しく反映するといえる。

4) 本実験で行ったG型、S型のような振幅変動を伴う載荷経路の変化に対しては、エネルギー吸収過程への影響はあまり顕著ではないが、初めに大きい振幅の載荷を行った方が破断繰り返しサイクル数が少なく、やや損傷が大きい傾向を示す。

5) 亀裂が発生した部位における局所の残留ひずみは、亀裂による間隙を除いて算定した正味のひずみによると、曲げ圧縮側・曲げ引張側共、絶対値で25～40%の範囲にあり、載荷履歴・たわみモード・幅厚比・細長比にかかわらず、ほぼ同一であった。

謝 辞

実験の試験体準備に使用したVickers硬度計の利用にあたり、京都大学工学部工業化学教室の田中勝久助手ならびに同化学研究所の幸塚広光助手のご協力を得た。ここに記し、深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 佐藤正信, 城野政弘: 材料の強度・破壊とその評価法, 材料, Vol. 41, No. 462, pp. 389～395, 1992. 3.
- 2) 岩井 哲, 野中泰二郎: 繰返し載荷を受ける構造部材の塑性疲労—研究の現状分析と展望—, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-1, pp. 89～104, 1988. 4.
- 3) Nonaka, T., and S. Iwai: Failure of Bar Structures under Repeated Loading, Chap. 12 in "Structural Failure", (Wierzbicki, T., and Jones, N., Ed.) John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 389～433, 1989.
- 4) Tanabashi, R., Y. Yokoo, M. Wakabayashi, T. Nakamura, H. Kunieda, H. Matsunaga and T. Kubota: Load-Deflection Behaviors and Plastic Fatigue of Wide-Flange Beams Subjected to Alternating Plastic Bending Part I Experimental Investigation, Trans. AIJ, No. 175, pp. 17～29, 1970. 9.
- 5) Tanabashi, R., Y. Yokoo, T. Nakamura, T. Kubota and A. Yamamoto: Load-Deflection Behaviors and Plastic Fatigue of Wide-Flange Beams Subjected to Alternating Plastic Bending Part II Hysteretic and

Skeleton Stress-Strain Relations and Plastic Fatigue of Flanges, Trans. AIJ, No. 176, pp. 25～36, 1970. 10.

- 6) Tanabashi, R., Y. Yokoo and T. Nakamura: Load-Deflection Behaviors and Plastic Fatigue of Wide-Flange Beams Subjected to Alternating Plastic Bending Part III Steady-State Theory, Trans. AIJ, No. 177, pp. 35～46, 1970. 11.
- 7) 後藤尚男, 亀田弘行, 小池 武, 泉並隆二, 脇田和試, 杉原 豊: くり返し曲げ荷重下における構造用鋼材の破壊過程に関する一考察, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, pp. 157～169, 1974. 4.
- 8) 後藤尚男, 亀田弘行, 小池 武, 青山 功, 脇田和試: 構造用鋼材の塑性疲労破壊に関する確率統計的考察, 京都大学防災研究所年報, 第18号B, pp. 377～393, 1975. 4.
- 9) Krawinkler, H., and M. Zohrei: Cumulative Damage in Steel Structures Subjected to Earthquake Ground Motions, Computers and Structures, Vol. 16, No. 1-4, pp. 531～541, 1983.
- 10) 宇田川邦明, 高梨晃一, 田中 尚: 繰返し載荷を受けるH形鋼はりの復元力特性 (その1・定変位振幅繰返し載荷時の塑性ヒンジ回転能力), 日本建築学会論文報告集, 第264号, pp. 51～59, 1978. 2.
- 11) 宇田川邦明, 高梨晃一, 田中 尚: 繰返し載荷を受けるH形鋼はりの復元力特性 (その2・ランダム変位履歴における耐力の低下), 日本建築学会論文報告集, 第265号, pp. 45～52, 1978. 3.
- 12) 鈴木敏郎, 玉松健一郎: 低層鉄骨造骨組柱材のエネルギー吸収能力に関する実験的研究 (その1・単調載荷および定変位振幅載荷を受けるH形鋼柱材のエネルギー吸収能力), 日本建築学会論文報告集, 第279号, pp. 65～75, 1979. 5.
- 13) 鈴木敏郎, 玉松健一郎: 低層鉄骨造骨組柱材のエネルギー吸収能力に関する実験的研究 (その2・変動変位振幅を受けるH形鋼柱材のエネルギー吸収能力), 日本建築学会論文報告集, 第280号, pp. 19～25, 1979. 6.
- 14) Yamada, M.: Low Cycle Fatigue Fracture Limits of Various Kinds of Structural Members Subjected to Alternately Repeated Plastic Bending under Axial Compression as an Evaluation Basis or Design Criteria for Aseismic Capacity, Proc. 4th World Conf. Earthq. Eng., Santiago, Vol. I, B2, pp. 137～151, 1969.
- 15) 加藤 勉, 秋山 宏: 鋼構造部材の耐力 (その4), 日本建築学会論文報告集, 第151号, pp. 15～20, 1968. 9.
- 16) Kato, B., and H. Akiyama: Inelastic Bar Subjected to Thrust and Cyclic Bending, Jour. Struct. Div., Proc. ASCE, Vol. 95, No. ST1, pp. 33～56, 1969. 1.
- 17) Neale, K., and J. Schroeder: Instability under Cycles of Plastic Deformation, Instability of Continuous Systems (IUTAM Symposium Herrenalb [Germany], Edited by Leipholz, H.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 329～333, 1969. 9.
- 18) Miner, M. A.: Cumulative Damage in Fatigue, Jour. Applied Mechanics, ASME, Vol. 12, pp. A 159～A 164, 1945.
- 19) Suidan, M. T., and R. A. Eubanks: Cumulative Fatigue Damage in Seismic Structures, Jour. Struct. Div.,

- Proc. ASCE, Vol. 99, No. ST5, pp. 923~943, 1973. 5.
- 20) Kaneta, K., I. Kohzu and H. Nishizawa : Cumulative Damage of Welded Beam-to-Column Connections in Steel Structures Subjected to Destructive Earthquakes, Proc. 8th World Conf. Earthq. Eng., San Francisco, Vol. 6, pp. 185~192, 1984. 7.
 - 21) 西垣太郎, 水畑耕治 : 鉄筋コンクリート柱の低サイクル疲労に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 328 号, pp. 60~70, 1983. 6.
 - 22) 西垣太郎, 水畑耕治 : 鉄筋コンクリート構造物の動的耐震性評価に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 332 号, pp. 19~29, 1983. 10.
 - 23) Park, Y. -J., and A. H. -S. Ang : Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Jour. Struct. Eng., Proc. ASCE, Vol. 111, No. ST4, pp. 722~739, 1985. 4.
 - 24) Park, Y. -J., A. H. -S. Ang and Y. K. Wen : Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings, Jour. Struct. Eng., Proc. ASCE, Vol. 111, No. ST4, pp. 740~757, 1985. 4.
 - 25) 岩井 哲, Ulrich Bourgund, 野中泰二郎 : 繰返し载荷を受ける構造部材の塑性疲労—鋼板要素の破壊実験—, 京都大学防災研究所年報, 第 32 号 B-1, pp. 133~147, 1989. 4.
 - 26) Iwai, S., T. Nonaka, U. Bourgund and H. Kameda : Structural Failure Due to Very Low Cycle Fatigue of Steel Members and Elements under Earthquake Loading, 第 8 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 1377~1382, 1990. 12.
 - 27) 桑村 仁, 前田孝一 : 低 YR 高張力鋼の機械的性質に及ぼす歪速度の影響, 構造工学論文集, Vol. 36 B, pp. 385~397, 1990. 3.
 - 28) 例えば, 若林 實 (編著) : 鉄骨構造学詳論, 丸善, p. 152, 1985.
 - 29) 高橋 治, 平野道勝, 穂積秀雄, 金子 聡 : 繰返し荷重を受ける筋違の崩壊性状に関する実験的研究 (その 1 : 山形鋼筋違), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp. 1431~1432, 1991. 9.
 - 30) 岩井 哲, 朴 鍊洙, 野中泰二郎, 亀田弘行 : 山形鋼部材の極低サイクル疲労破壊実験, 京都大学防災研究所年報, 第 34 号 B-1, pp. 71~85, 1991. 4.
 - 31) 岩井 哲, 朴 鍊洙, 野中泰二郎, 亀田弘行 : 山形鋼部材の極低サイクル疲労破壊実験 (その 2), 京都大学防災研究所年報, 第 35 号 B-2, pp. 509~524, 1992. 4.

(1992 年 7 月 10 日原稿受理, 1992 年 12 月 3 日採用決定)