

交番変位载荷を受ける鋼構造部材の 極低サイクル疲労破壊実験

岩井 哲・朴 鍊洙・磯部 恭二
野中泰二郎・亀田 弘行

TESTS ON VERY LOW-CYCLE FATIGUE FAILURE OF STEEL MEMBERS SUBJECTED TO REVERSED DISPLACEMENT LOADING

By *Satoshi IWAI, Yeon-Soo PARK, Kyoji ISOBE*
Taijiro NONAKA and Hiroyuki KAMEDA

Synopsis

An experimental study is carried out to elicit important factors causing cracks and rupture of steel members under imposed large repeated deformations, and to investigate the quantitative relationships among the important physical factors leading to failure. Eight angle specimens were subjected to repeated axial load after undergoing inelastic buckling. Particular attention was paid to the effect of elongation of the specimen on the very low-cycle fatigue behavior under load repetitions of the order of a few to twenty. The experimental results show that energy dissipation capacity depends heavily on the entire history of loading and the deflection mode, but no simple quantitative relations are observed between the initiation of the visible cracks or rupture and the energy dissipation capacity. The maximum value of residual "net" strains ranges from 30% to 35%, independent of test parameters.

1. 研究目的

本実験は、既報^{1)~3)}の研究に続くものである。これら一連の研究の目的は、地震時に鋼構造部材が数回から十数回の極低サイクルで破壊に至るような大きな塑性変形を繰り返し受けることによって、亀裂発生を伴う損傷を生じ、破断に至る破壊挙動を実験的に観察すること、更にその破壊過程に影響を与える要因を探り、各要因と亀裂発生や破断との間の定量的関係を調べることにある。

昨年まで行ってきた山形鋼部材の極低サイクル疲労破壊実験は、試験体に引張変位を与えない、圧縮変位領域のみの軸方向繰り返し载荷下のものであった。但し、圧縮変位域での繰り返し载荷によって、部材には引張・圧縮両軸力が生じる。それらの研究成果の中で、全体座屈や局部座屈などの曲げ座屈変形によって、亀裂や破断を生じた部位における局所残留ひずみが、細長比・幅厚比・载荷パターン・たわみ変形モードといった実験変数に拘らずほぼ一定値となることを示し、25~40%の範囲にあったことが、破壊機構の解明のために重大な意味を持つと考えられる。しかし、この現象が引張変位を含む変形域での繰り返し载荷下にお

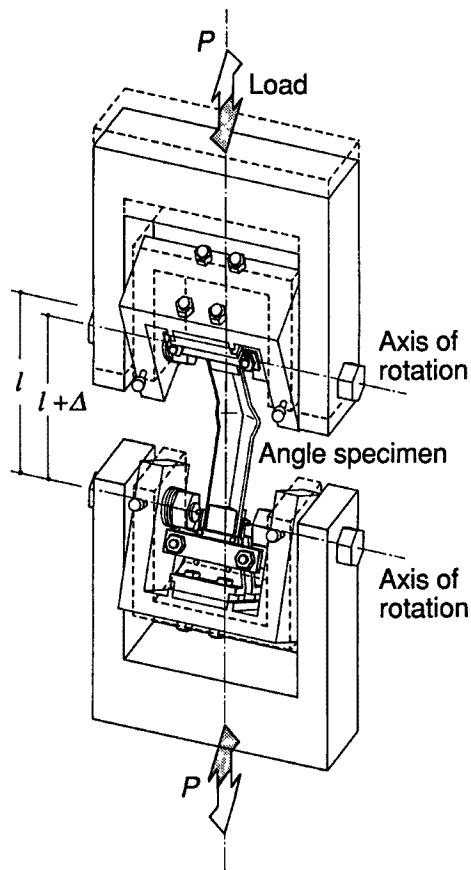


Fig. 1. Loading system.

Fig. 3に示すように、前回設けていた試験体両端の支持部における高力ボルト用の貫通孔をなくし、母材の引張耐力が発揮できるようにした。試験体は合計8体で、すべてSS400材で作製した。材料特性をTable 1に示す。両端単純支持とし、試験部の長さ l は前回までと同じ318 mmとした。断面形状も同じで、前回

いても成立するか否かはまだ不明であり、確認をする必要がある。このため本実験は、繰り返し曲げを主とする極低サイクル疲労挙動に及ぼす伸び変形の影響を明らかにし、特に亀裂発生部における局所残留ひずみ値の大きさを調べることを目的とするものである。

2. 実験計画

2.1. 実験変数

前回までは、実験変数として、①細長比 $\lambda = l/i$ (l : 有効部材長, i : 最小断面2次半径), ②幅厚比 b/t (b : 板幅, t : 板厚), ③繰り返し载荷パターン, ④たわみ変形モードを採り、各要因が耐力、亀裂発生時ならびに破断時の繰り返しサイクル数、累積エネルギー消費量、局所残留ひずみなどに与える影響に注目した。 λ は前回、40ならびに80の材を用いたが、今回は、 $\lambda = 40$ のみとし、 $b/t = 13$ も一定の同一断面山形鋼を用いて、③と④を変数に採った。Fig. 1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 Fig. 2の単調载荷1種、繰り返し载荷3種の計4通りの载荷パターンを採用した。ここで、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。

2.2. 試験体

試験体は前回の実験に用いたものと同じ形状であるが、

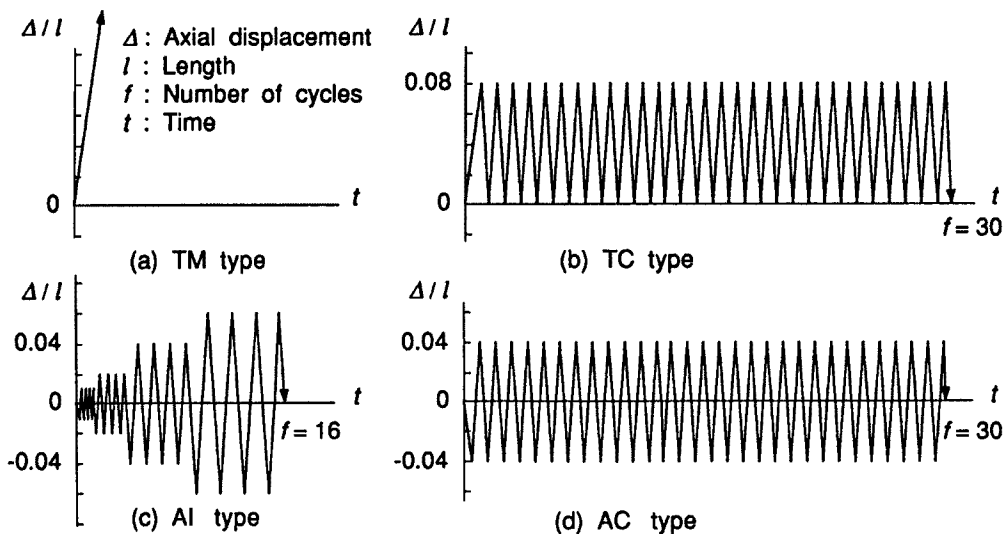


Fig. 2. Loading patterns.

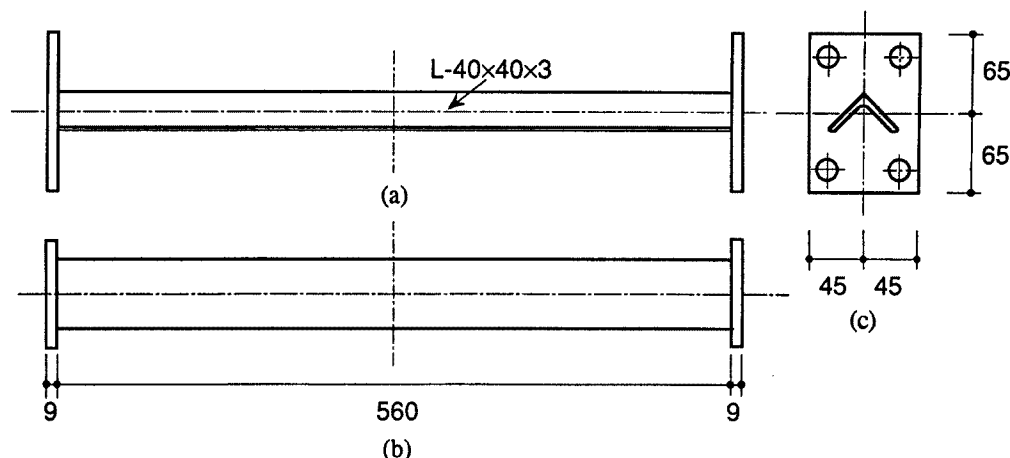


Fig. 3. Test specimen (length in mm).

と変わらない。試験体諸量を **Table 2** に示す。試験体名は前回²⁾の付け方にならったが、最初の英文字が“T”のものは引張変位域 ($\Delta \geq 0$)での繰り返し载荷の場合、“A”のものは引張・圧縮両変位域での交番繰り返し载荷の場合、前回の“L”のものは圧縮変位域での繰り返し载荷の場合をそれぞれ表す。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、全く同じ载荷条件による実験を行った一組のものである。なお計測寸法に基づく最小断面2次半径 i は 7.82 mm (L-40×40×3 山形断面の公称値は 7.90 mm)で、細長比 λ は40.3~40.7となる。

2.3. 载荷ならびに計測方法

载荷装置ならびに計測方法は、基本的に前回の場合と変えていない。実験装置を **Photo. 1** に示す。試験体両端のピン支持部は、試験体を定着させる端部ブロックの外側から2枚の鋼板ではさみ込み、普通ボルト2本で締め付けた (**Fig. 1** 参照)。载荷変位の制御は、両端部ブロック間の軸方向相対変位を摺動抵抗型変

Table 1. Material properties

Upper yield stress (N/mm ²)	Lower yield stress (N/mm ²)	Ultimate strength (N/mm ²)	Elongation (%)
339	331	447	36.7

Table 2. Specimen sizes and test parameters

Specimen name	Length l (mm)	Width b (mm)	Thickness t (mm)	Slenderness ratio λ	Width-to-thickness ratio b/t	Loading pattern	Deflection mode
T3M	316	39.7	2.97	40.4	13.4	TM	--
T3CP _a	315	39.6	2.98	40.3	13.3	TC	P
T3CP _b	316	39.7	2.97	40.4	13.4	TC	P
T3CN	318	39.6	2.97	40.7	13.3	TC	N
A3CP	316	39.7	2.99	40.4	13.3	AC	P
A3CN	315	39.6	2.97	40.3	13.3	AC	N
A3IP	316	39.7	2.98	40.4	13.3	AI	P
A3IN	315	39.5	2.96	40.3	13.3	AI	N
L3CP _b	318	39.6	2.83	40.5	14.0	CC	P
L3CN	301	40.5	2.47	37.4	16.4	CC	N

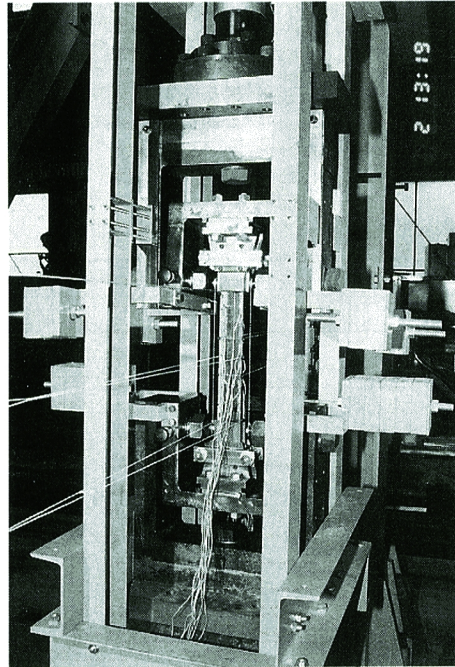
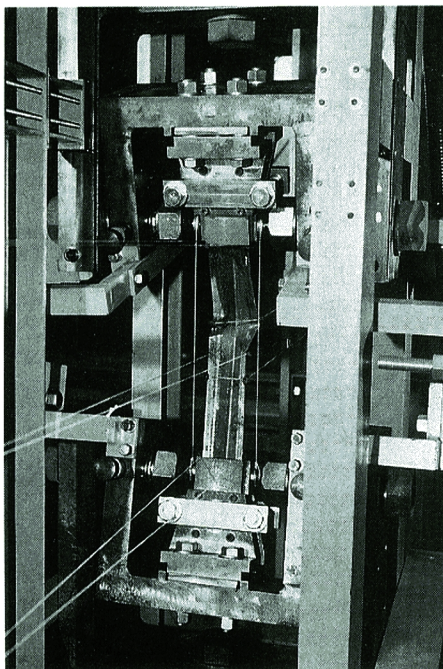
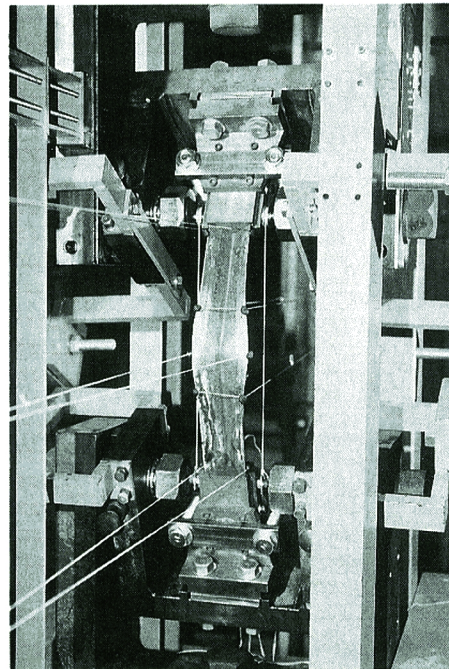


Photo. 1. Testing system.

位計で計測して行ったが、T3M だけは変位計の計測変位限界を越える危険もあったので、アクチュエータ・ストロークで制御した。载荷は可能な限り断面重心に作用させるようにしたが、座屈時のたわみモード（正たわみ [P] モードと、負たわみ [N] モード；Fig. 4 ならびに Photo. 2）を計画通りに制御する必要性から、载荷実験の多くは、予備载荷ではば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、0.5



(a) Positive deflection [P] mode



(b) Negative deflection [N] mode

Photo. 2. Specimens after buckling.

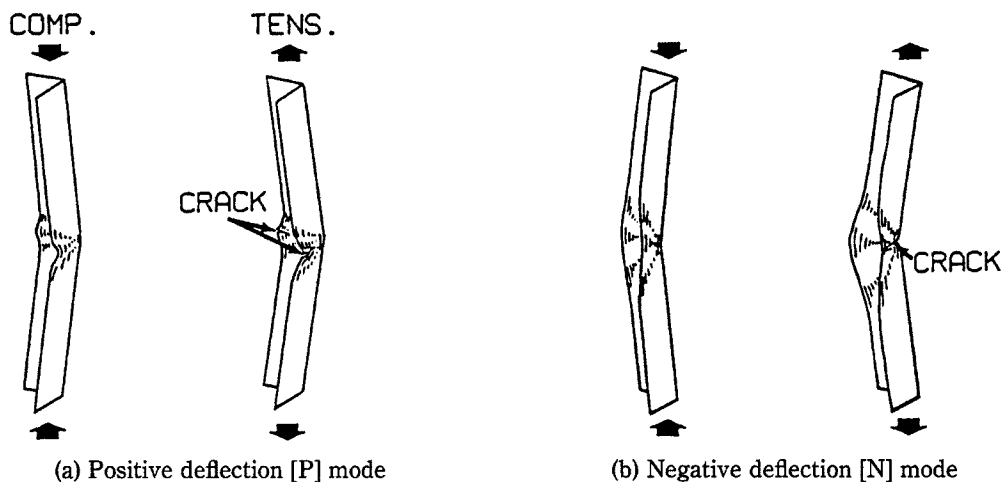


Fig. 4. Deflection modes and cracking patterns.

mm 程度の微小な偏心を与えた。但し、純引張载荷の T3M および、引張処女载荷（第 1 サイクル前半）時の T3CPb は、故意に偏心を与えず、中心引張とした。計画した载荷総サイクル数は、定変位振幅 [C] 型で 30 サイクル、漸増変位振幅 [I] 型で 16 サイクルである。繰り返しサイクル数の数え方は荷重軸に沿って決め、初めの $P=0$ から開始し、圧縮変位载荷する場合には、変位折り返し点から戻り、次の圧縮载荷過程における $P=0$ までを 1 サイクルと定義している。

3. 実験結果と考察

3.1. 繰り返しサイクル数と破壊・変形挙動

Table 3 に実験結果の次の諸量を示した。座屈荷重 P_{cr} 、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_{cav} 、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_{vex} 、およびそれらの両亀裂発生後の板厚方向に亀裂が貫通した時のサイクル数 f_{pen} と、最終の破断サイクル数 f_{rup} 、実験終了段階における履歴消費エネルギー E の累積量を、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 $E_0 = \sigma_y^2 \cdot A \cdot l / (2 \cdot E_s)$ で無次元化したエネルギー比 E/E_0 、亀裂発生部における引張側、圧縮側それぞれの局所残留ひずみの絶対値で最大

Table 3. Test results

Specimen name	Buckling load P_{cr} (kN)	Number of load cycles				Dissipated 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} (%)
T3M	--	--	--	--	1	466	[115] *	--
T3CP _a	--	4	7	8	17	267	30	-30
T3CP _b	--	4	8	8	17	259	35	-30
T3CN	--	6	8	8	--	293	--	-30
A3CP	75.0	4	7	8	17	190	35	-30
A3CN	67.1	4	7	7	20	198	35	-30
A3IP	70.6	8	11	11	13	179	[65] *	-35
A3IN	74.8	12	13	13	14	215	[65] *	-35
L3CP _b	66.8	5	8	8	23	115	30	-32.5
L3CN	69.0	7	8	8	--	220	--	-41

* [] means local strain due to tensile rupture.

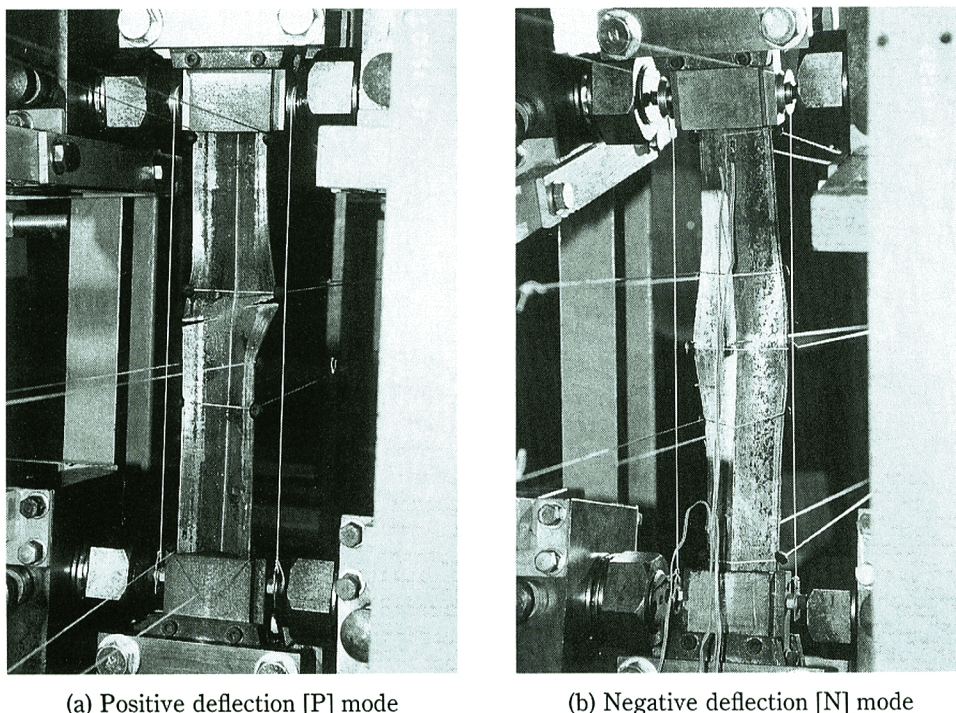


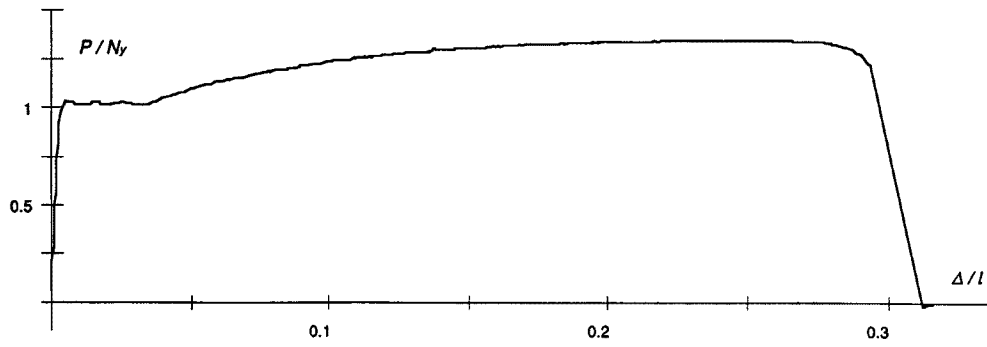
Photo. 3. Outbreak of cracks during test.

のもの ϵ_{tens} , ϵ_{comp} の各値である。ここに、 σ_y は降伏応力度、 A は断面積で、ヤング係数は $E_s=206 \text{ kN/mm}^2$ とした。なお、前回の圧縮変位領域のみの繰り返し荷荷による試験体 L3CPb と L3CN の 2 体の結果を、比較のため同表に加えた。負たわみモードの試験体 T3CN を除く 7 体は予定したサイクル数以内で破断した。試験体 A3CN と A3IN は負たわみモードの荷荷であるが、いずれも中央断面に発生した亀裂が板厚方向に進展して、引張変位荷荷で貫通した直後の圧縮加力時に、負たわみモードから正たわみモードに移行した後、破断した。同じ変動幅の定変位振幅荷荷である T3CPa, T3CPb, A3CP と L3CPb を比較すると、亀裂の発生サイクル数に大差はないものの、破断時サイクル数は、引張変位を与えることによって前回の圧縮変位領域での繰り返しの場合より少なくなったことが認められる。実験中の亀裂発生状況を **Photo. 3** に示す。

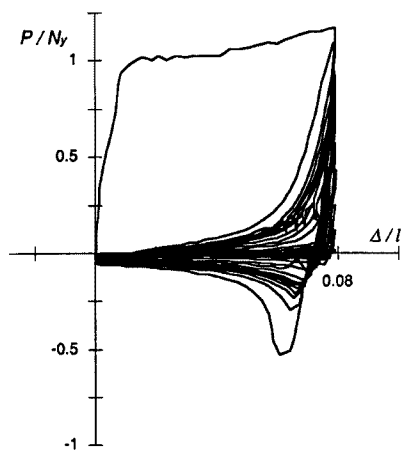
正たわみモード (**Photo 3(a)**) では、両縁部の局部座屈と全体座屈がほぼ同時に生じるが、局部座屈は必ずしも材中央に生じず、亀裂は局部座屈発生部で最も変形の大きい脚縁部に生じ、断面中央部に向かって進展した。本実験に用いたような幅厚比の大きい断面の場合、亀裂は材軸垂直方向より斜めに現れることが多い。これは部材中央付近で、捩れ変形を伴って両脚で材軸方向にずれた位置に亀裂が現れたことによる。これに対して、負たわみモード (**Photo. 3(b)**) では、亀裂はすべて材軸にほぼ垂直な方向に現れ、全体座屈で最も厳しい応力と変形を受ける材中央高さ位置の稜角部に発生し、徐々に脚縁部へと進展した。

3.2. 荷重一軸方向変位曲線

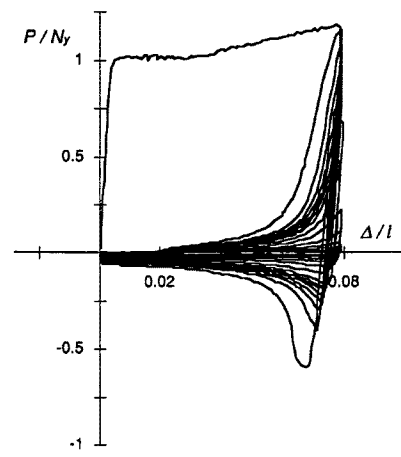
荷重 P と軸方向変位 Δ の関係を **Fig. 5** に示す。前回の圧縮変位領域 ($\Delta \leq 0$) での定変位繰り返し荷荷実験結果を同図 (i), (j) に示した。試験体 T3M (**Fig. 5(a)**) の単調荷荷曲線は、他の繰り返し荷荷試験体の荷重一軸方向変位関係の引張側包絡線となっていることがわかる。また同じ荷荷パターンの実験でも負たわみモードの場合は、正たわみモードの場合と比べて、いずれも膨らみの大きい履歴ループ形状が観察される。荷重一軸方向変位挙動は、概略的には、前回の圧縮変位領域のみの繰り返し荷荷による履歴曲線の座標原点を、試験体が経験した純引張変形分だけ変位軸に沿って平行移動したような履歴ループを示した。引張変位



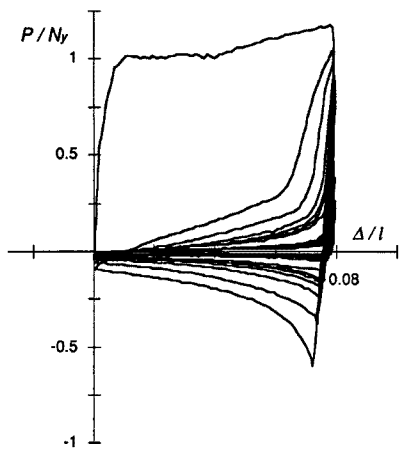
(a) T3M specimen



(b) T3CPa specimen

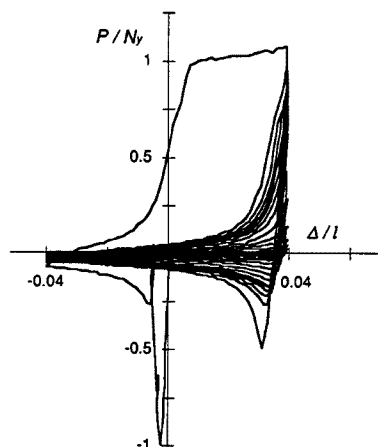


(c) T3CPb specimen

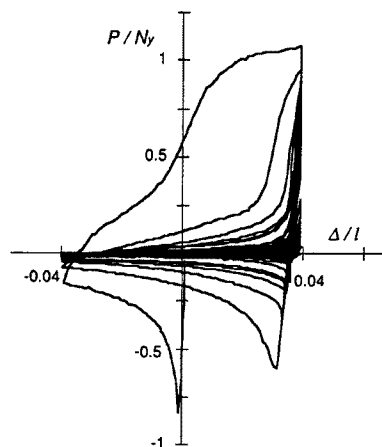


(d) T3CN specimen

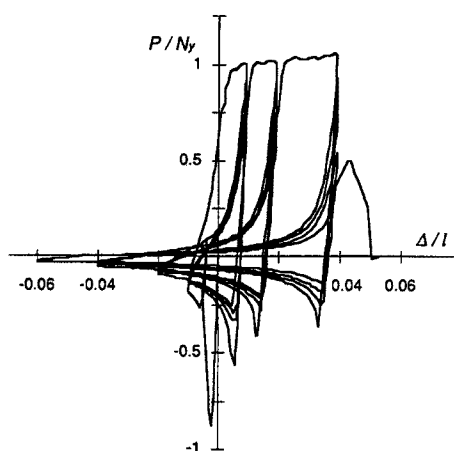
Fig. 5. Load-axial displacement relations.



(e) A3CP specimen

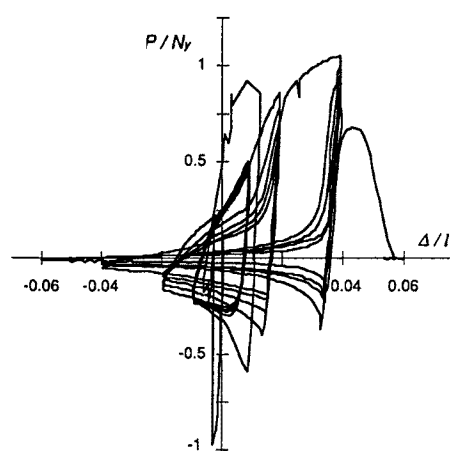


(f) A3CN specimen

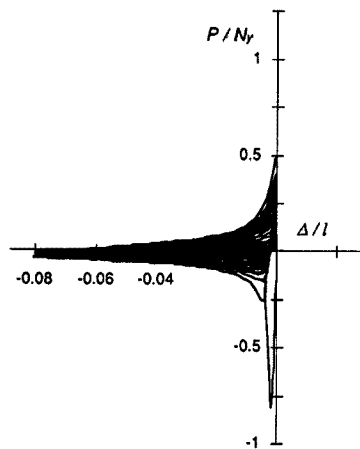


(g) A3IP specimen

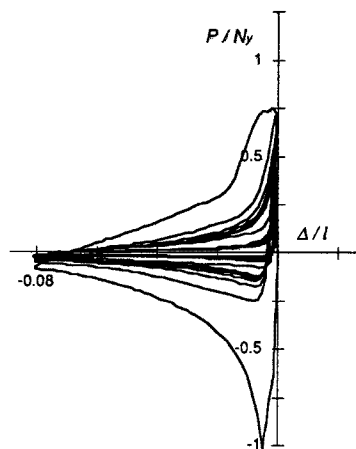
(g) A3IP specimen



(h) A3IN specimen



(i) L3CPb specimen



(j) L3CN specimen

Fig. 5 (Continued). Load-axial displacement relations.

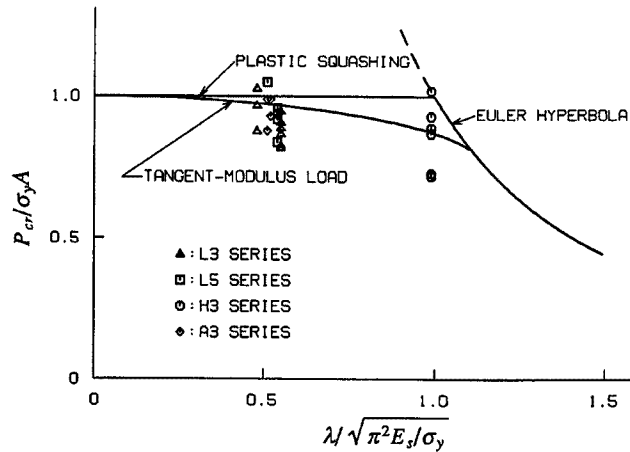


Fig. 6. Column curve and observed strength.

側の処女载荷時に生じた塑性伸びや曲げ変形によって、座屈耐力は低減しているが、各試験体の第2サイクル以降の履歴ループの形状はよく似ている。

3.3. 座屈強度

“T” シリーズを除く、圧縮側から载荷を開始した全試験体について、座屈強度の実験値をプロットし座屈曲線 (column curve) と比較したものが Fig. 6 である。図の縦座標は座屈強度 P_{cr} を降伏軸力 $\sigma_y A$ で無次元化し、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となるように定めている。同図および Table 3 の P_{cr} は、前回の試験体分も含めて、X-Y レコーダーによる実験時のアナログ・モニターで示された最大荷重値から読み取った。座屈曲線は前報¹⁾ と同じものを示している。実験結果は、今回の“A”シリーズも含めて、いずれも若干の偏心圧縮载荷となっているものであるが、座屈曲線によく対応しているといえる。

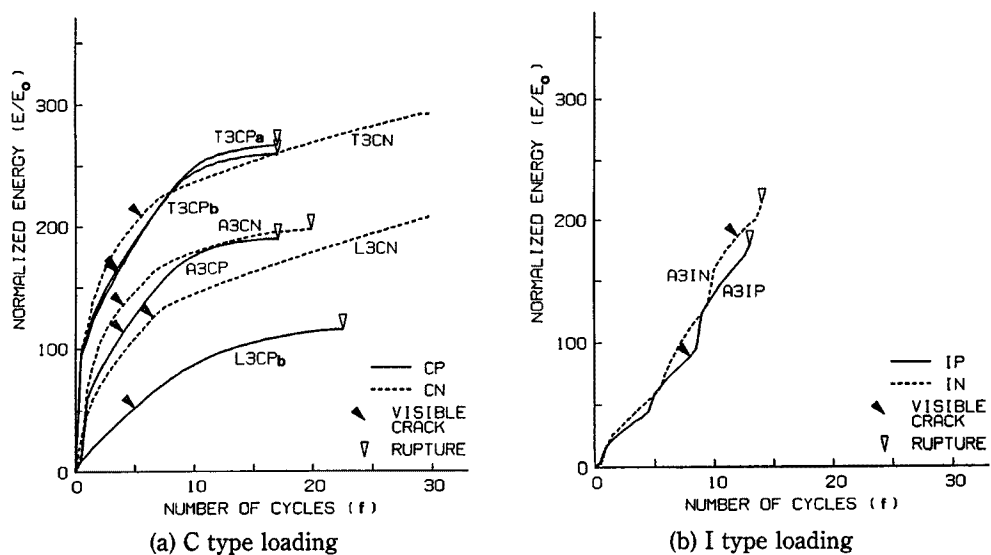


Fig. 7. Energy dissipation with increasing number of cycles.

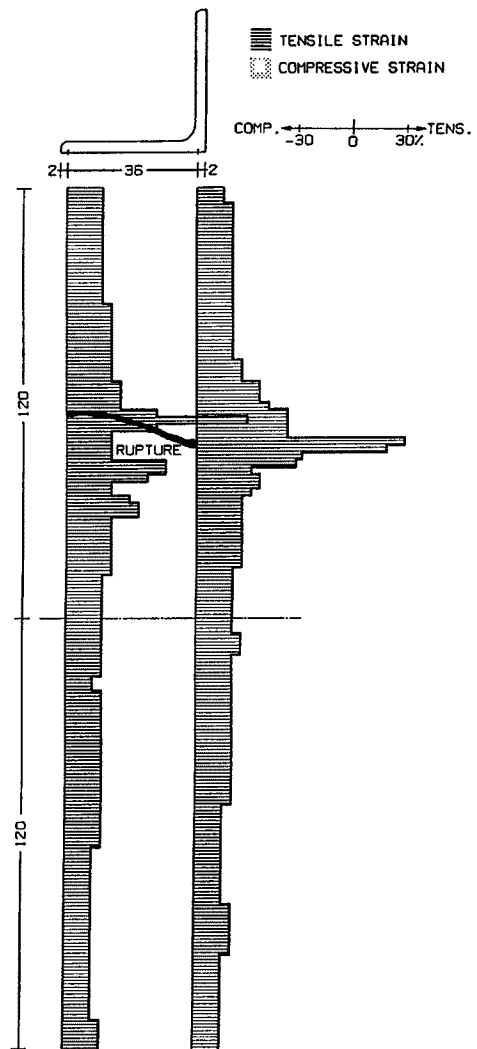
3.4. 履歴消費エネルギー

各履歴ループで囲まれた面積から算定した履歴消費エネルギーの累積値 E と繰り返しサイクル数 f との関係を図 7 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。図 (a) では C 型載荷, 図 (b) では I 型載荷の各パターンについて比較した。繰り返しに伴う履歴消費エネルギーの累積過程は, 図 (a), (b) で示されるように, 載荷パターンに大きく依存する。たわみモードによる差は, 前回までの圧縮変位領域での繰り返しによる場合よりも, かなり小さくなっているものの, 若干, 量的な違いが生じている。これは亀裂発生が認められた段階 (▽) までの載荷初期においても, 最終的な破断時 (◇) の総エネルギー量においても同様に見られる。同一の載荷パターンで, 同一のモードで変形して亀裂を生じ破断に至った T3CPa と T3CPb は, ほとんど同じエネルギー消費挙動をしていることが認められる。両者の亀裂発生サイクル数は, 曲げ変形の凸部側で初亀裂を確認した時のサイクル数が, T3CPa の $f_{\text{cr}}=7$ に対し, T3CPb は $f_{\text{cr}}=8$ で 1 サイクルの差があっただけで, それ以外は破断時のサイクル数も全く一致した結果となっており, 疲労破壊の現象を扱うとはいえ, 本実験挙動に確かな再現性のあることが認められる。

以上から, 破壊挙動と履歴消費エネルギーの量的対応関係を把握することは難しいが, 載荷履歴はエネルギー消費能力にも影響する重要な要因の一つと考えられる。また部材中の局部座屈発生部など局所の塑性仕事を算出することでエネルギー的な定量的損傷評価を行える可能性もあると考えている。

3.5. 局所残留ひずみ分布

既報において, 亀裂発生部における局所の残留ひずみに着目し, 残留ひずみが各実験変数に拘らずほぼ一定であることを示した。実験終了後の残留ひずみ分布を全試験体について Fig. 8 に示す。Table 3 に示した通り, 単調引張載荷あるいは漸増変位載荷で引張破断を生じた箇所 (Table 3 の ϵ_{tens} の [] で示したものを) を除いて, 繰り返し載荷で亀裂が発生した部位における局所残留ひずみは, 曲げ圧縮側・曲げ引張側共, 絶対値で 30~35% の範囲にあり, 載荷パターン・たわみモードに拘らず, ほぼ同じ値と見なせる。これは前回と同様の結果である。純引張変形では部材中で一様に伸びが生じるが, 局部曲げ座屈変形では, 非常に局所的なひずみの進展が現れると考えられる。亀裂は引張載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考えられる。試験体 T3M, A3IP, A3IN の最終破壊モードは, 引張変位載荷中に破断した引張破壊である。Fig. 5(a) の試験体 T3M の横座標は軸方向相対変位 Δ を試験長さ l で除した平均伸びを表し, 破断時に約 30% となっているが, この試験体での局所残留ひずみの最大値は, 115% と大きな値を示している (Table 3)。また試験体 A3IP, A3IN が漸増変位載荷中に新たな引張変位振幅を与えられている最中に破断した場合の, 引張破断箇所の局所残留ひずみの最大値も, 他の繰り返し載荷による場合の破断箇所とは違って, 約 65% と大



(a) T3M specimen

Fig. 8. Distribution of local strain.

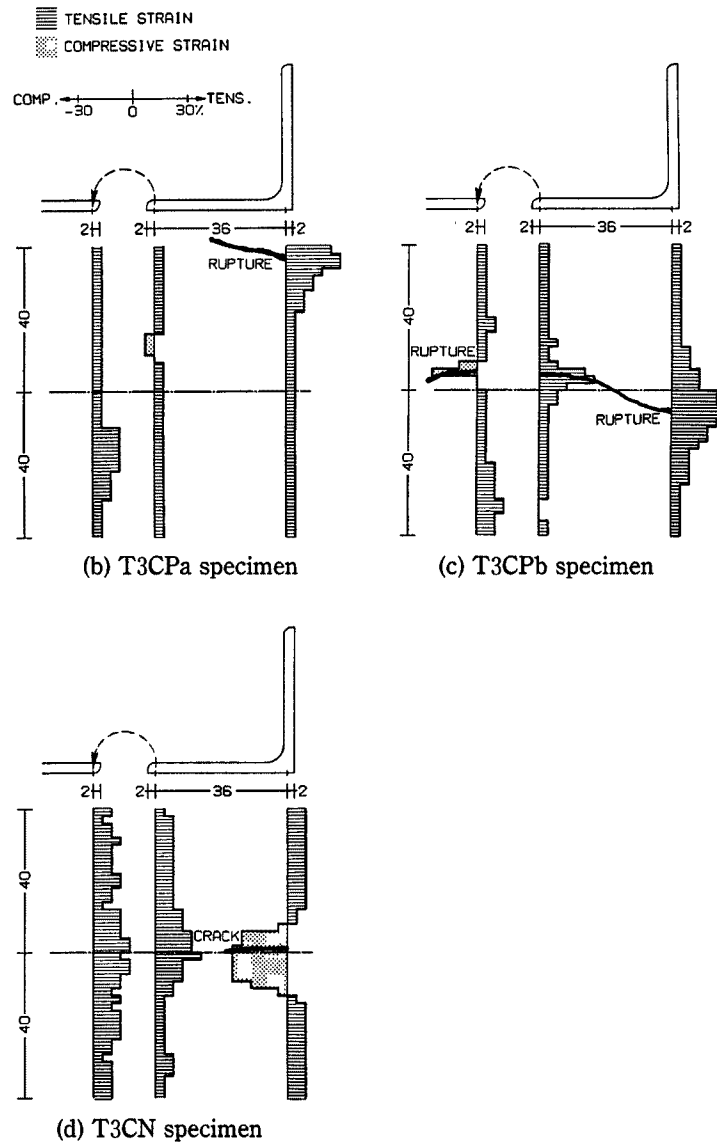


Fig. 8 (Continued). Distribution of local strain.

きい。

亀裂や最終破断に関わる局所残留ひずみの値に、一様な引張伸び変形の及ぼす影響がどの程度であるかを定量的に評価することが今後の課題である。また、その解明のため非線形有限要素解析による局所応力-ひずみ履歴の追跡^{4),5)}を、現在遂行しつつある。

4. 結 論

本実験による観察から次のことが確認された。

1) 引張変位を伴う繰り返し载荷を受ける鋼部材の荷重-軸方向変位挙動は、前回の圧縮変位領域の繰り返し载荷による履歴曲線の座標の原点を、変位軸に沿って平行移動したような履歴ループ形状を示した。

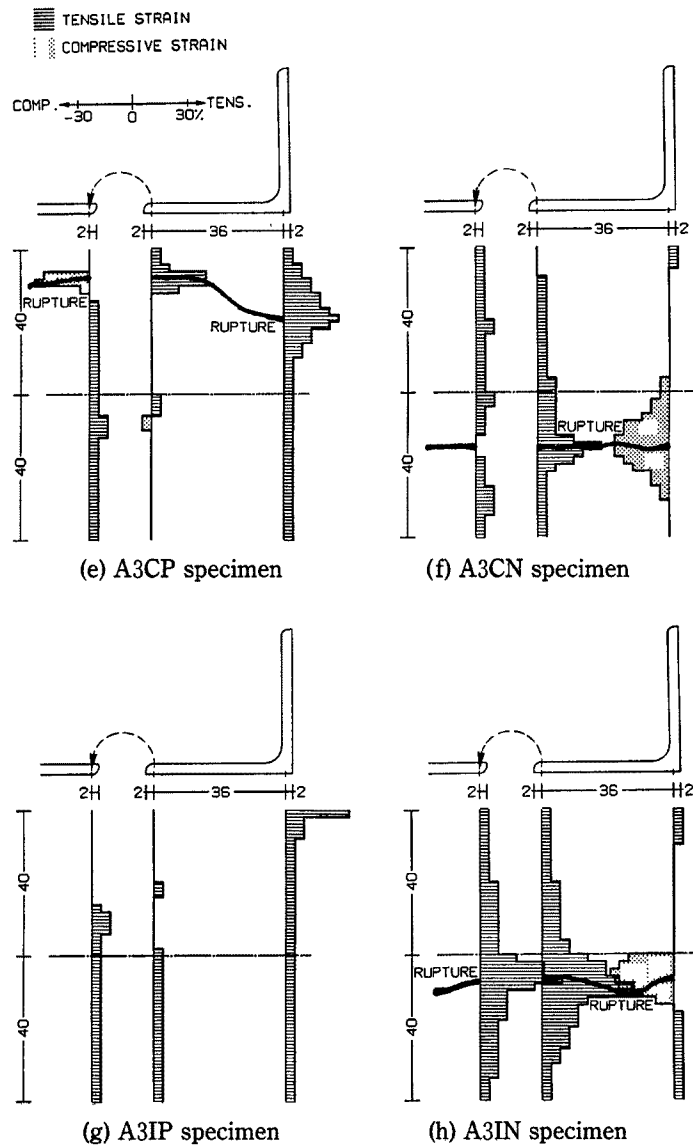


Fig. 8 (Continued). Distribution of local strain.

2) 破断時繰り返し数は、引張変位を与えることによって、前回の圧縮変位領域での繰り返しによる場合より少なくなった。

3) 繰り返し荷重で亀裂が発生した部位における局所残留ひずみは、曲げ圧縮側・曲げ引張側とも、絶対値で30~35%の範囲にあり、荷重パターン・たわみモードに拘らず、ほぼ同一であった。この値は、引張破断箇所におけるひずみ値が65~115%を示したこととは明らかな差がある。

4) 繰り返しに伴う履歴消費エネルギーの累積過程は、荷重パターン・たわみモードの影響を受けて変化した。初亀裂の発生や破断との単純な量的対応関係は見い出せなかった。

参 考 文 献

- 1) 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-1，1991年4月，pp. 71-85.
- 2) 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-2，1992年4月，pp. 509-524.
- 3) 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，日本建築学会構造系論文報告集，第445号，1993年3月，pp. 139-149.
- 4) Park, Y.-S., S. Iwai, H. Kameda and T. Nonaka: Nonlinear FEM Analysis of Steel Members under Very-Low-Cycle Loading, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，第1部，1993年9月，pp. 156-157.
- 5) Park, Y.-S., S. Iwai, T. Nonaka and H. Kameda: Non-Linear FEM Analysis of Steel Members under Very-Low-Cycle Loading, 日本建築学会大会学術講演梗概集，C 構造Ⅱ，1993年9月，pp. 1521-1522.