

山形鋼部材の極低サイクル疲労破壊実験 (その2)

岩井 哲・朴 鍊洙・野中泰二郎・亀田 弘行

VERY-LOW-CYCLE FATIGUE TESTS OF STEEL ANGLES (PART 2)

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

Synopsis

An experimental investigation has been performed on very-low-cycle fatigue of steel angles, which were subjected to repeated axial load after undergoing inelastic buckling. 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. The experimental results show that the number of load cycles at rupture decreases as the width-to-thickness ratio becomes smaller and the slenderness ratio becomes larger. Energy absorption capacities depend heavily on the entire history of loading, failure mode, slenderness ratio and width-to-thickness ratio. The maximum values of residual "net" strains, excluding contributions from crack opening, of all the specimens are of the order of 25-40% and they do not depend on loading pattern, failure mode, slenderness ratio or width-to-thickness ratio.

1. 研究目的

本実験は、前報¹⁾の研究に続くもので、研究の主たる目的も、前報と同じである。即ち、地震時に構造物が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、鋼部材が亀裂発生を伴う損傷を受け破断に至る破壊過程を調べ、構造的破壊と要因間の定量的関係を把握することにある。本報では、これまでの実験全体としてのまとめを行った。また今回、新たに追加した、細長比が前回の約2倍である部材ならびに載荷経路(載荷順序)の変動による破壊挙動、繰り返しサイクル数、履歴吸収エネルギー、局所残留ひずみへの影響に注目して、これまでの結果との比較を行って考察を加えた。

2. 実験計画

2.1 実験変数

前回では、山形鋼部材の、降伏と座屈がほぼ同時に起こるような細長比 $\lambda=l/i=40$ (l : 有効部材長, i : 最小断面2次半径)の材を用いて、①幅厚比 b/t (b : 板幅, t : 板厚)、②繰り返し載荷パターン(漸増変位振幅 [I] 型と一定変位振幅 [C] 型)、③たわみ変形モード(正たわみモード [P] と負たわみモード [N])を実験変数にとった。今回は細長比が前の約2倍である部材の実験を追加し、細長比が実験変数④として加えられたことになる。

Fig. 1 に示す装置で試験体の軸方向相対変位 Δ を制御し、Fig. 2 の4通りの載荷パターンを用いた。変位 Δ はすべての試験体について縮みを与える変形域でのみ作用させており、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。Fig. 2 の (a) と (b) は前回と同じ載荷条件である。(c) と (d) は今

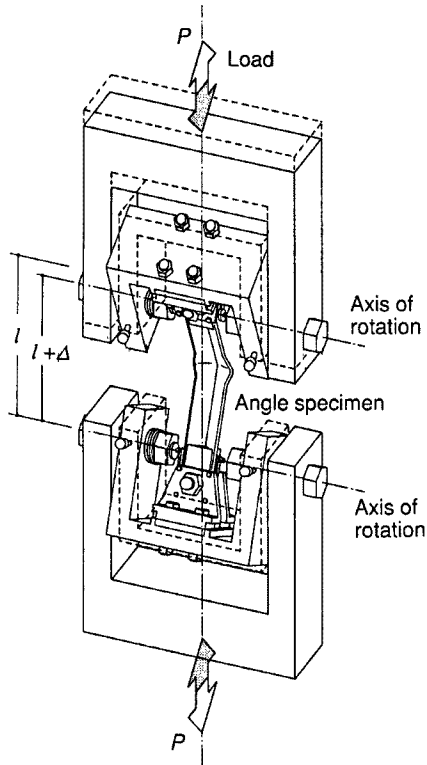


Fig. 1. Loading system.

回新たに加えたもので、(b)の一定変位振幅荷重の条件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幅で繰り返した。(c)では第7サイクル目から、(d)では第1サイクル目から各6サイクルの小変位振幅荷重を与えたもので、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ができる。

2.2 試験体

試験体は合計20体で、SS 400材で製作した。試験部長さ l （前回まで L としていたもの）が、前回の318 mm（もしくは300 mm；“L”シリーズ）の他に618 mm（“H”シリーズ）が加わった以外は前回と同じで、断面形状も前と変わらない。但し、 $t=3$ mmの山形鋼は、材料特性の若干異なる2種が使われており、Table 1ならびにTable 2に示すI、II、IIIの3つの材料差がある。

試験体には、試験体名と試験体番号（No.）を併記した。試験体名の付け方をTable 2下の欄外に示す。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、全く同じ荷重条件による実験を行った場合で、2体ずつ2組ある。実験は試験体番号順に遂行した。No. 8以降の番号の試験体は、両端部に9 mm厚の鋼板が溶接されたものである。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；Types I、IIとも公称値で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 λ はそれぞれ37.5～42および77である。

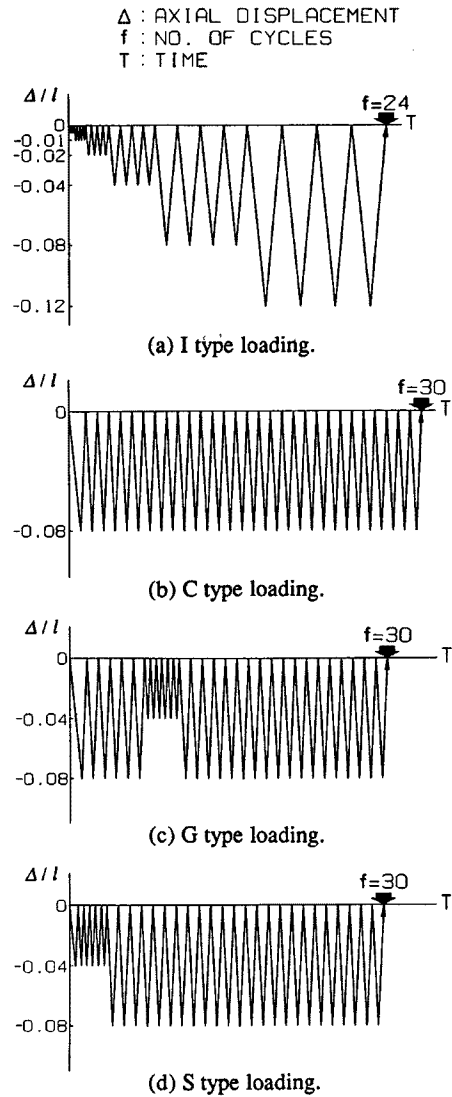


Fig. 2. Loading patterns.

Table 1. Mechanical properties of materials

Type	Angle	Cross-sectional area A (mm ²)	Lower yield stress (N/mm ²)	Upper yield stress (N/mm ²)	Ultimate strength (N/mm ²)	Elongation (%)
I	L-40×40×3	216	371	396	465	31.2
II	L-40×40×3	200	336	351	449	29.7
III	L-40×40×5	337	339	356	469	27.1

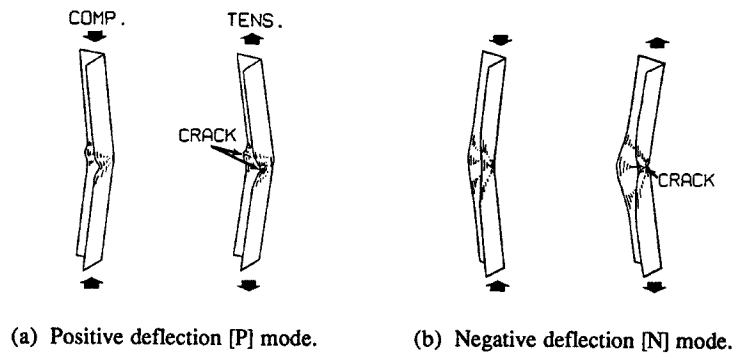


Fig. 3. Deflection modes and cracking patterns.

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わらない。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（正たわみ [P] モードと負たわみ [N] モード； Fig. 3）を計画通りに制御する必要から、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、L3 IP (No. 13), L3 IN (No. 4), L3 CN (No. 5), L5 IN (No. 7) の4体である。

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. 4に示すように、縮み（ $-\Delta$ ）を与えることによって、圧縮荷重（ $-P$ ）が生じ、その後与えられた設定変位Aで折り返すと引張荷重が生じる。更に変位を戻して、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 $P=0$ （START点）から、次の圧縮過程における $P=0$ （END点）までを1サイクルと定義する。これは、Fig. 2における変位制御による $\Delta=0$ から次の $\Delta=0$ の点までの1サイクルとは一致しないが、3.6節の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。

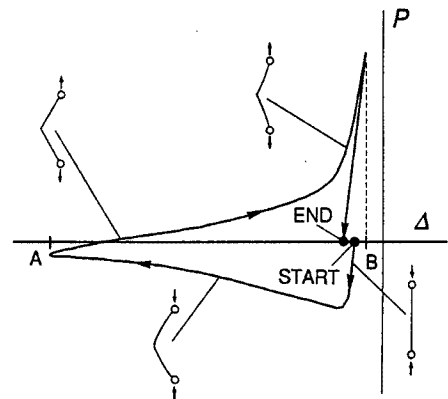


Fig. 4. Definition of one loading cycle.

Table 2. (Continued)

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

全試験体の実験終了後の稜角側ならびに側面の写真を **Photos 1, 2** に示す。各写真は鎖線の左が正たわみモード、右が負たわみモードの試験体でまとめており、**Photo 1**と**Photo 2**はそれぞれ同一の試験体を、向きを変えて撮影したもので対応させている。実験終了後の亀裂発生部の写真を **Photo 3** に示す。

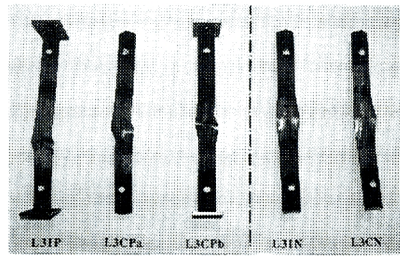
(1) 幅厚比の影響

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、予定したサイクル数以内で破断したのは、9 体である。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 L3CP_aを除いて、C, G, S 型の定振幅載荷のものはすべて破断に至った。破断サイクル数 f_{rup} = 17 ~ 27 である。負たわみモードでは、L5CN 1 体のみが破断し、 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。（負たわみモードの L3CN は 30 回繰り返しても破断しなかったと見なせる。）

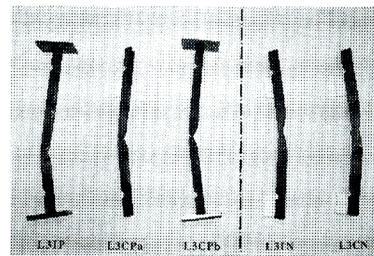
負たわみモードでは、亀裂はすべて材軸に垂直な方向に現れ (**Photo 3**)、亀裂発生位置も全体座屈で最も厳しい応力と変形を受ける材中央に出た。しかし、正たわみモードでは、両縁部の局部座屈と全体座屈がほぼ同時に生じるが、局部座屈は必ずしも材中央に生じていない。亀裂は局部座屈発生部で最も変形の大い位置に生じ、幅厚比の大きい（板厚小の）場合、材軸垂直方向より斜めに現れた (**Photo 4**)。これは局部座屈が、振れ変形を伴って両脚で材軸方向にずれた位置で現れたことによる。

(2) 細長比の影響

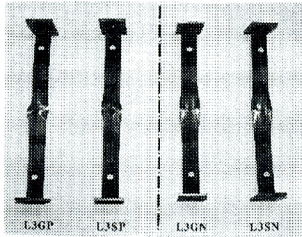
正たわみモードの場合は、細長比の影響は破断サイクル数に顕著に現れ、細長比大のものは破断サイクル数が各載荷パターンで 3 ~ 6 サイクル減少した。しかし亀裂発生時のサイクル数には細長比による顕著な差はあまりみられない。また細長比の大きい場合に材の振れる傾向が著しい (**Photos 3, 4**)。実験によると、ここで用いた細長比程度の試験体は同じ断面形状をもつ山形鋼では局部座屈による変形領域の広



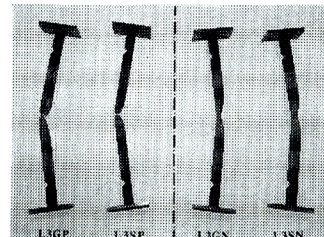
(a)



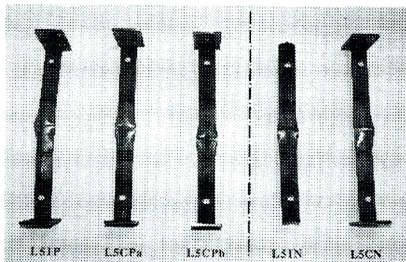
(a)



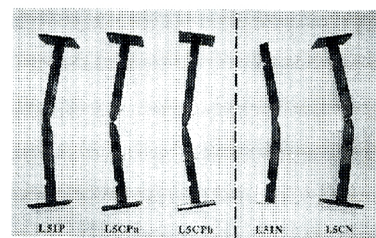
(b)



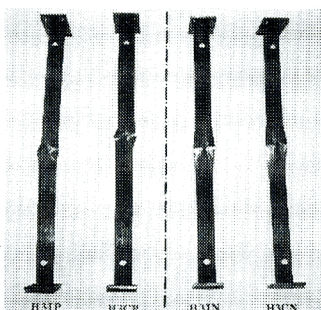
(b)



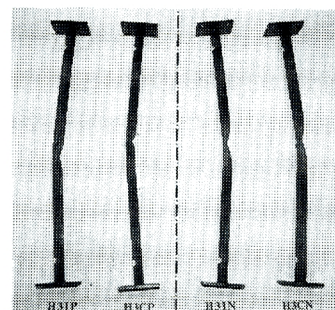
(c)



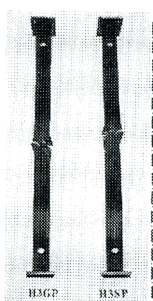
(c)



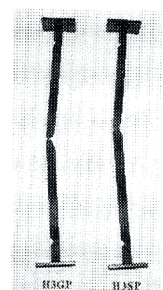
(d)



(d)



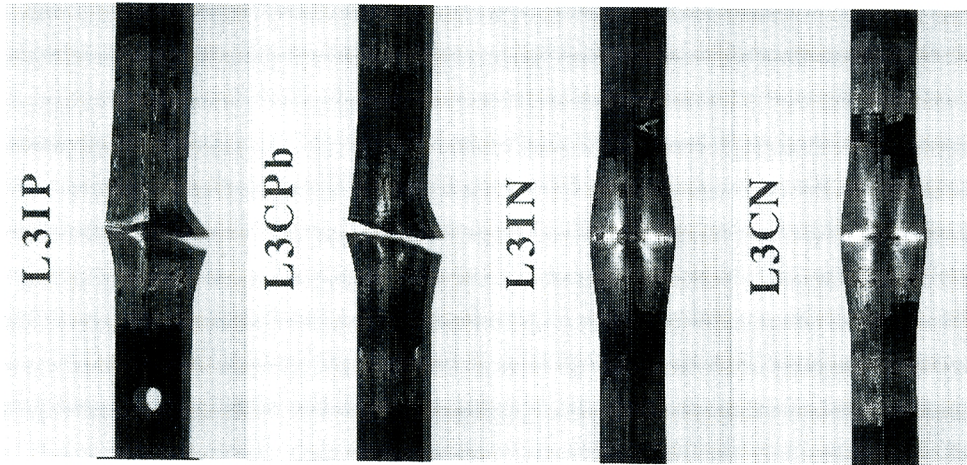
(e)



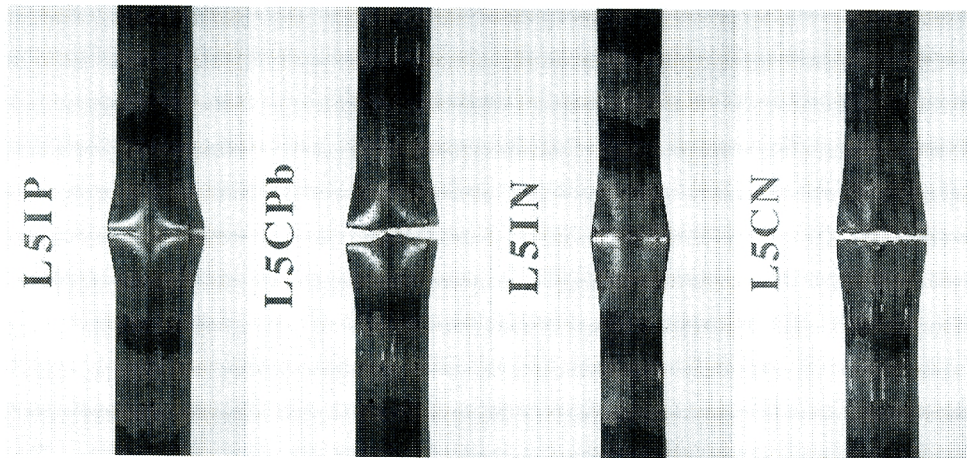
(e)

Photo 1. Specimens after testing (front view).

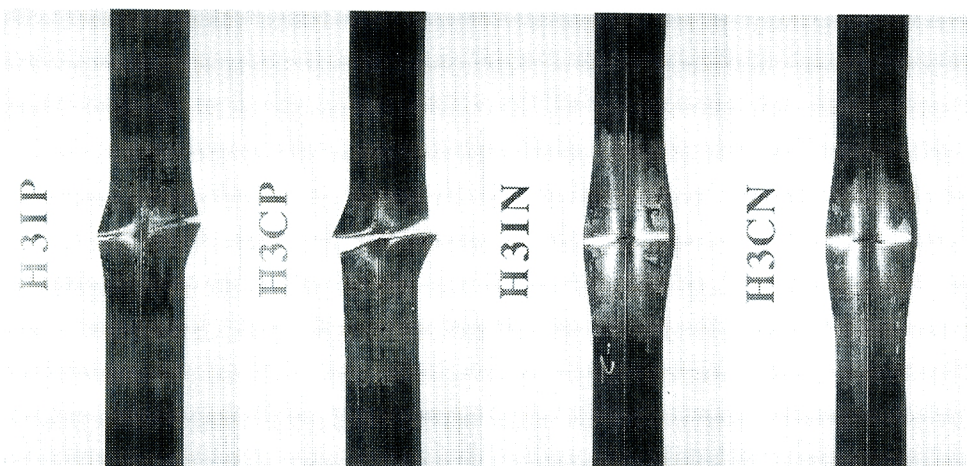
Photo 2. Specimens after testing (side view).



(a) L3 series



(b) L5 series



(c) H3 series

Photo 3. Cracked and ruptured portions after testing (front view).

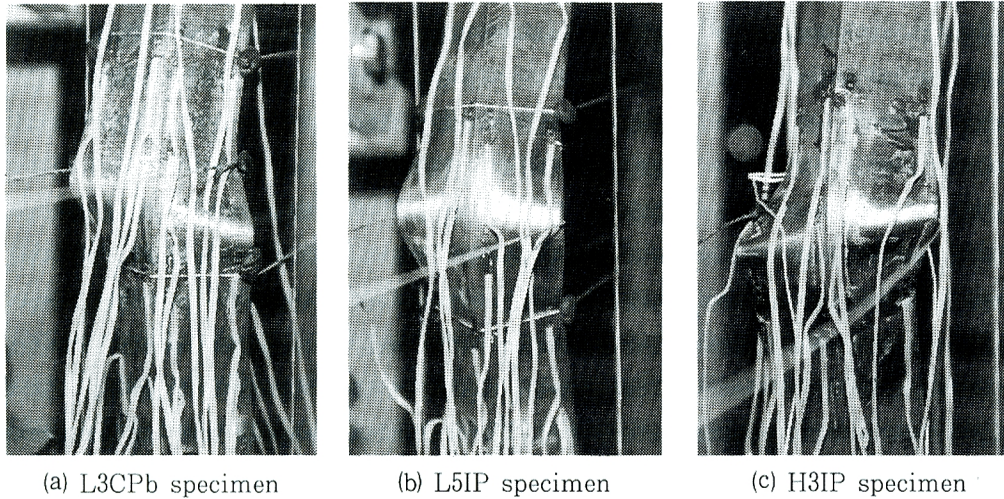


Photo 4. Specimens after buckling.

がりにあまり差がない。負たわみモードの場合も、亀裂発生時繰り返しサイクル数に細長比による顕著な影響はみられない。

高橋ら²⁾は、山形鋼筋違の圧縮・引張変位漸増型繰り返し下での破壊性状を、本報で言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た。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、が示されている。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。但し、細長比について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 of C, G, S 型繰り返し (Fig. 2 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、亀裂発生 of f_{cav} における 1 サイクルの値の差は実験のばらつきによると考えられ、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 型の第 7 サイクル以降の小振幅繰り返しによって損傷の進展を緩和する効果は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 シリーズで C, G, S 型差がどの程度、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。

3.2 座屈強度

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. 5 である。

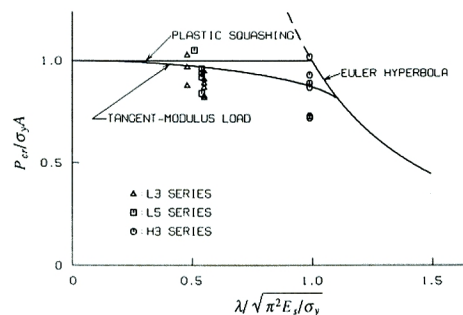


Fig. 5. Column curve and observed strength.

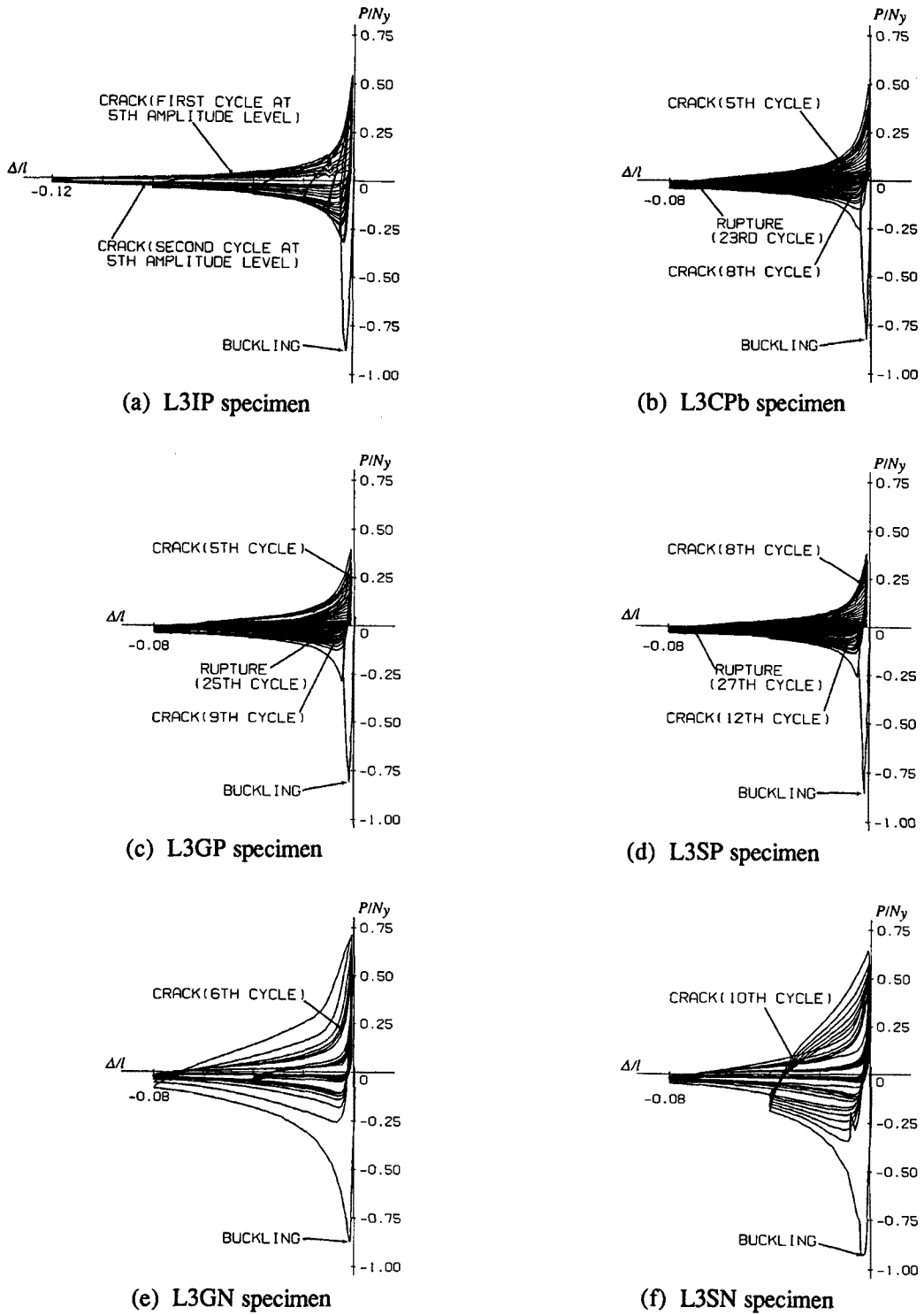


Fig. 6. Load-axial displacement relations.

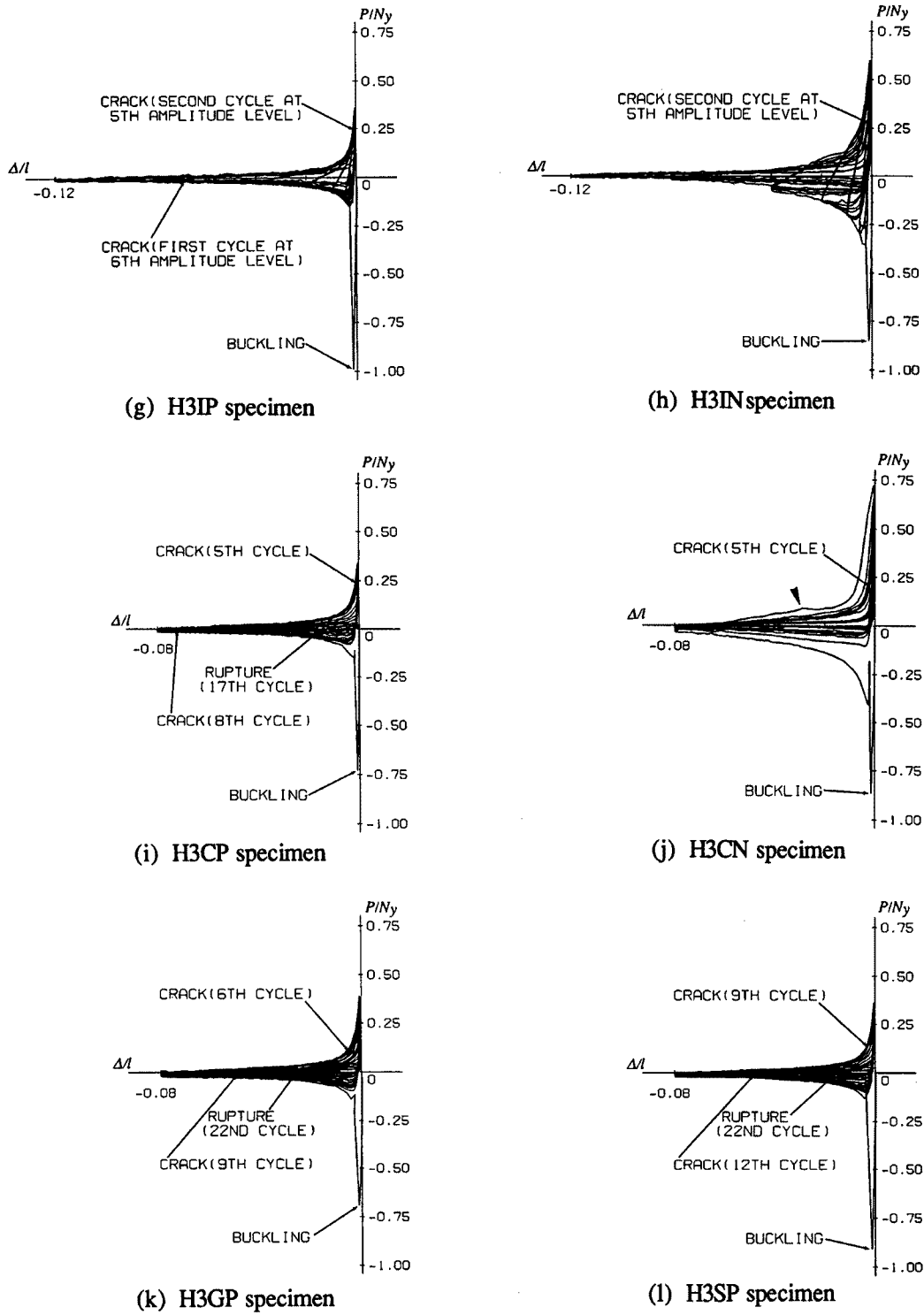
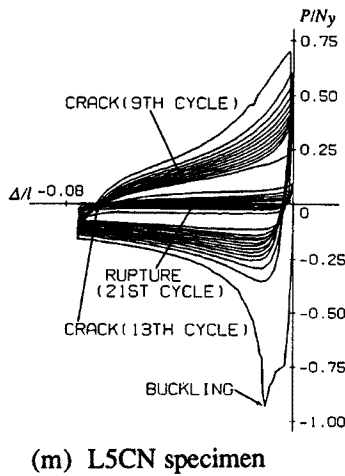


Fig. 6. (Continued).



(m) L5CN specimen

Fig. 6. (Continued).

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 に比例して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。座屈曲線は前報¹⁾と同じ式によるものを示している。

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。本実験に用いた細長比程度の座屈実験結果は、座屈荷重の相当ばらつき所であり³⁾、当結果もほぼ同様のばらつき傾向を示している。

3.3 荷重-軸方向変位曲線

荷重 P と軸方向変位 Δ の関係を Fig. 6 に示す。ここでは前報で掲載した試験体を除くすべての曲線を提示した。

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(板厚大の) 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 $\Delta = 0$ まで戻るときには、まっすぐに近い状態に戻り、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。

各サイクル毎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。また別の顕著な現象として、試験体 H3CN では、変位を戻す途中 (Fig. 6 (j) の▼) で局部座屈が発生すると同時に振れ、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振れ変形は亀裂の発生・進展につれて徐々に解消し、載荷終了時には単に材中央について上下対称な、振れない弱軸曲げ変形しか残らなかった。

荷重-軸方向変位関係を、1サイクル毎に描いて、その変化の様子を示した例が、Fig. 7 である。ここで、奇数番目のサイクルを実線で、偶数番目のサイクルを破線で表した。全体座屈を生じた第1サイクルと次の第2サイクルの間、および凸側変形部に亀裂を生じた第12サイクルあたりで劣化を示した以外では、各ループ間の差はかなり小さい。

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 との関係を生試験体について Fig. 8 に示す。図の縦軸は E を最大弾性ひずみエネルギー E_e 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。

*) 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)での著者らの研究報告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、値に若干の差がある。

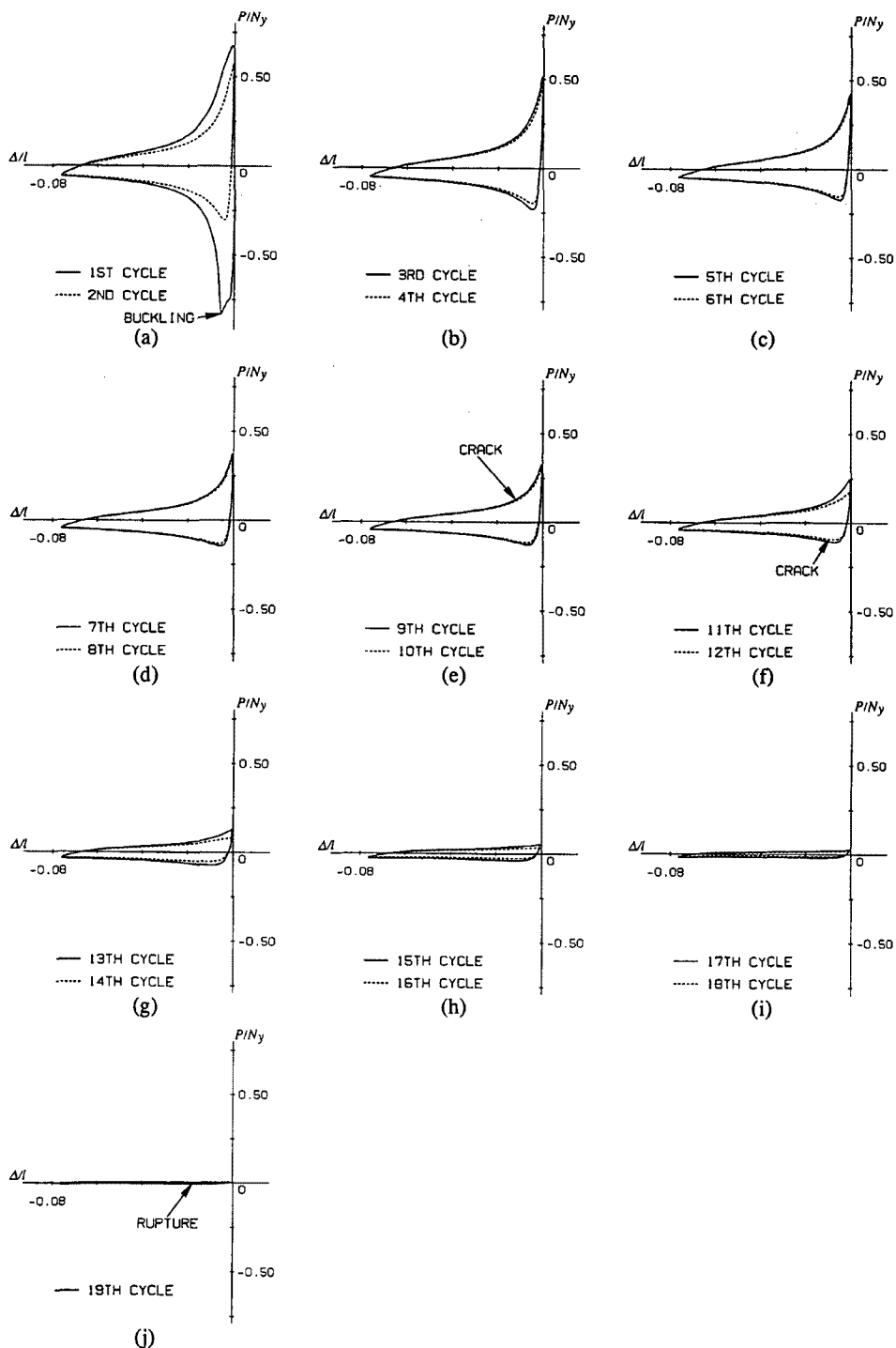


Fig. 7. Change in $P-\Delta$ hysteresis loop [L5CPa specimen].

繰り返しに伴う履歴吸収エネルギーの累積過程は、Fig. 8の(a)と(b)で示されるように、载荷履歴(载荷パターン)に依存するだけでなく、たわみモードの違い、幅厚比による断面形状、ならびに細長比による差で量的な違いが生じる。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、

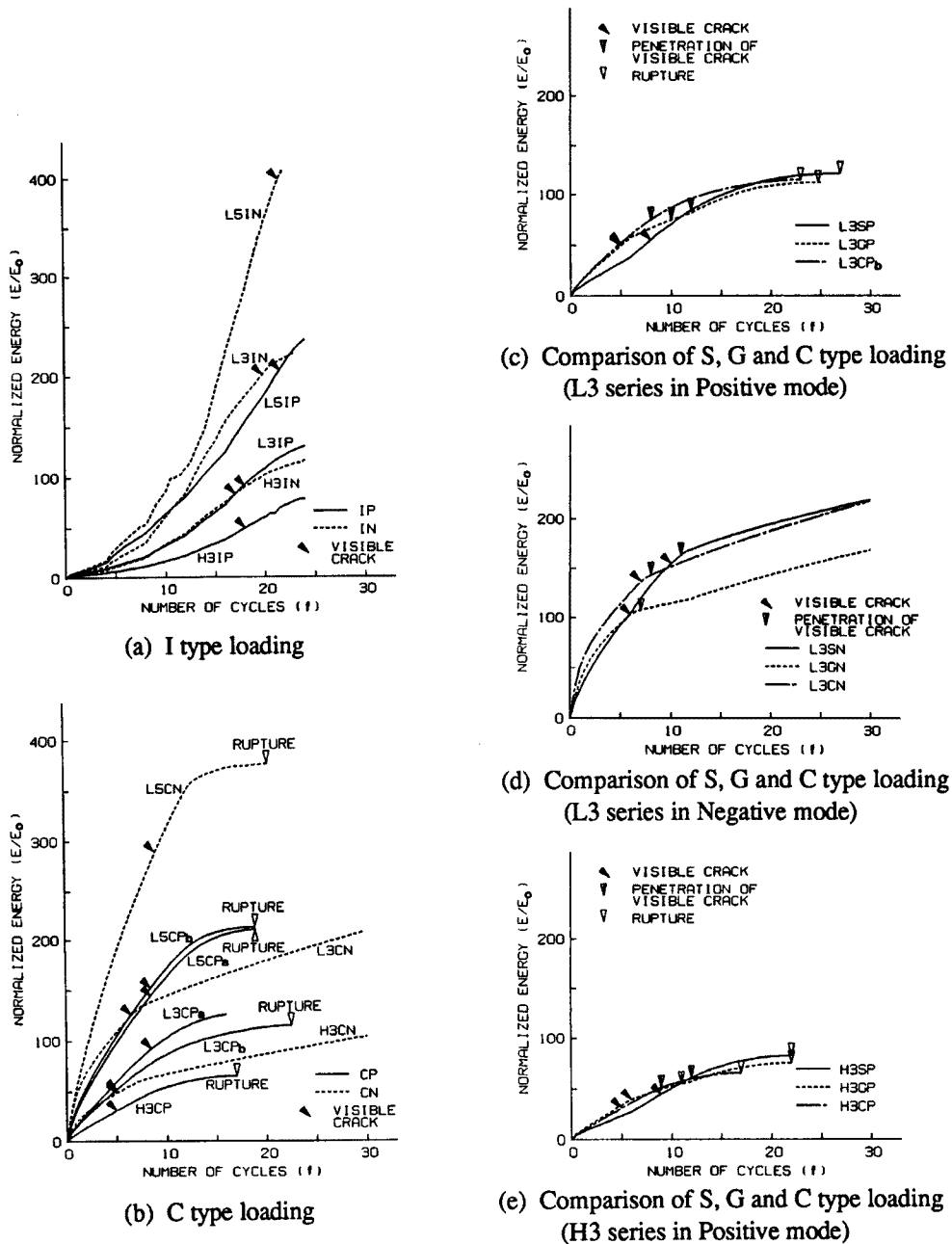


Fig. 8. Comparison of energy absorption in the course of increasing number of cycles.

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. 6 でも明らかに現れていた。これは局部座屈を伴ったか否かによると考えられる。従って、幅厚比大の場合にエネルギー比小となることは、幅厚比による差が局部座屈に関連していると考えられ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、細長比大の場合にエネルギー比小となることがわかる。

ここで同じ荷重条件で実験した2組の試験体についてエネルギー吸収特性の比較を Fig. 8 (b) から行う。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る。亀裂発生ならびに破断時のサイクル数も全く一致した結果となっている。しかし、もう1組の L3 CPa と L3 CPb とは、やや傾向が異なっている。これらのことから、同じ荷重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。但し、先の L5 グループ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、後の L3 グループは材料が同一でなく、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えず判断は難しい。

荷重径路は異なるが、同一の試験体形状を有し、同一のモードで変形して亀裂を生じ、破断に至った場

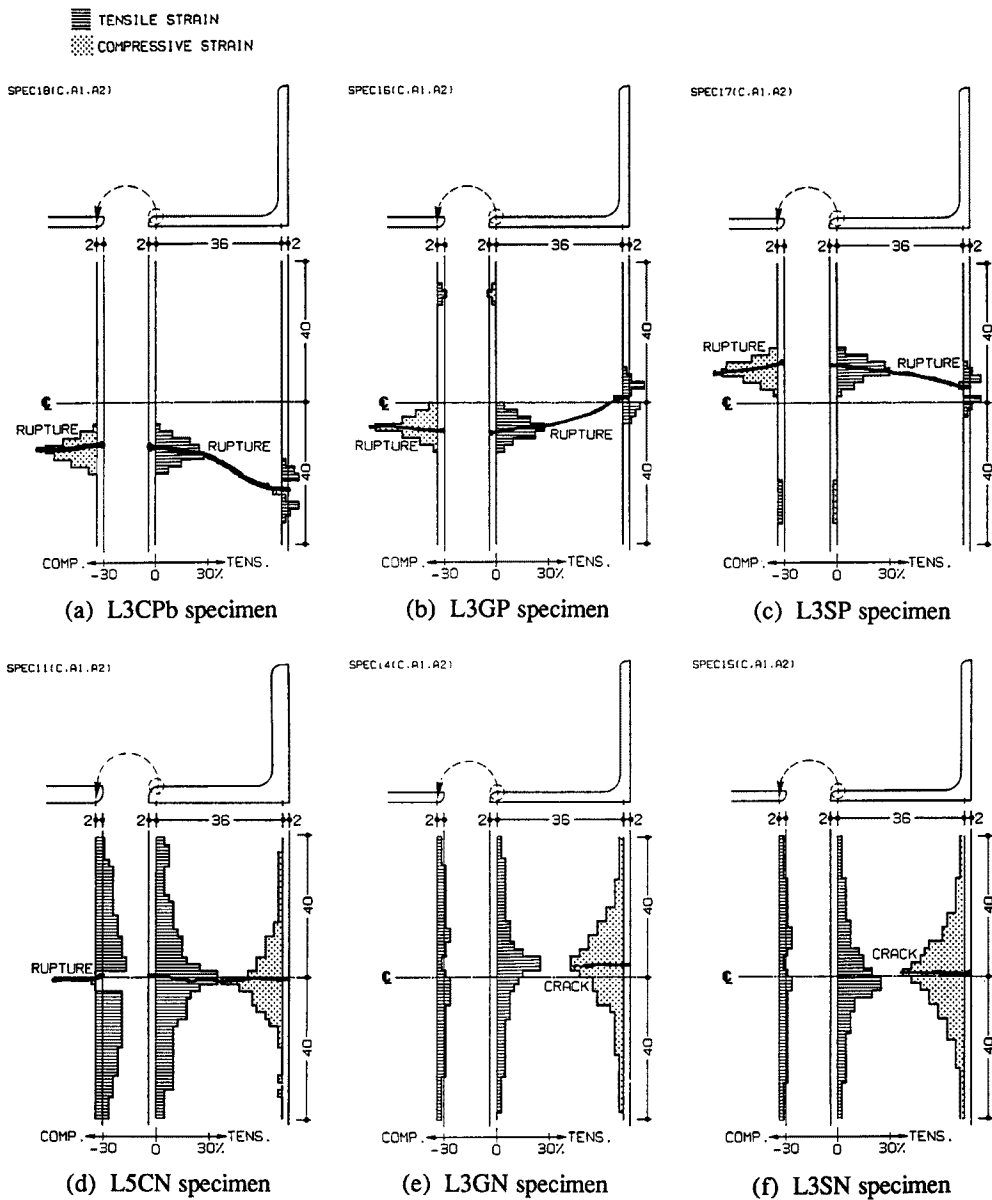


Fig. 9. Distribution of residual strain.

合のエネルギー吸収能力の比較が、Fig. 8 (c)~(e) においてなされている。ここでは荷経路（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グループ (Fig. 8 (c)) もH3グループ (Fig. 8 (e)) も良く似た曲線を示しており、本実験で行った程度の荷経路の変化では、亀裂発生や破断に関わるエネルギー吸収比にあまり差が見られない。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のが認められる。第13サイクル以降のエネルギー吸収率（曲線の接線勾配）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大きくなっている。しかし負たわみモード (Fig. 8 (d)) の場合の結果は、正たわみモードの場合ほど合理的な説明は付けられない。

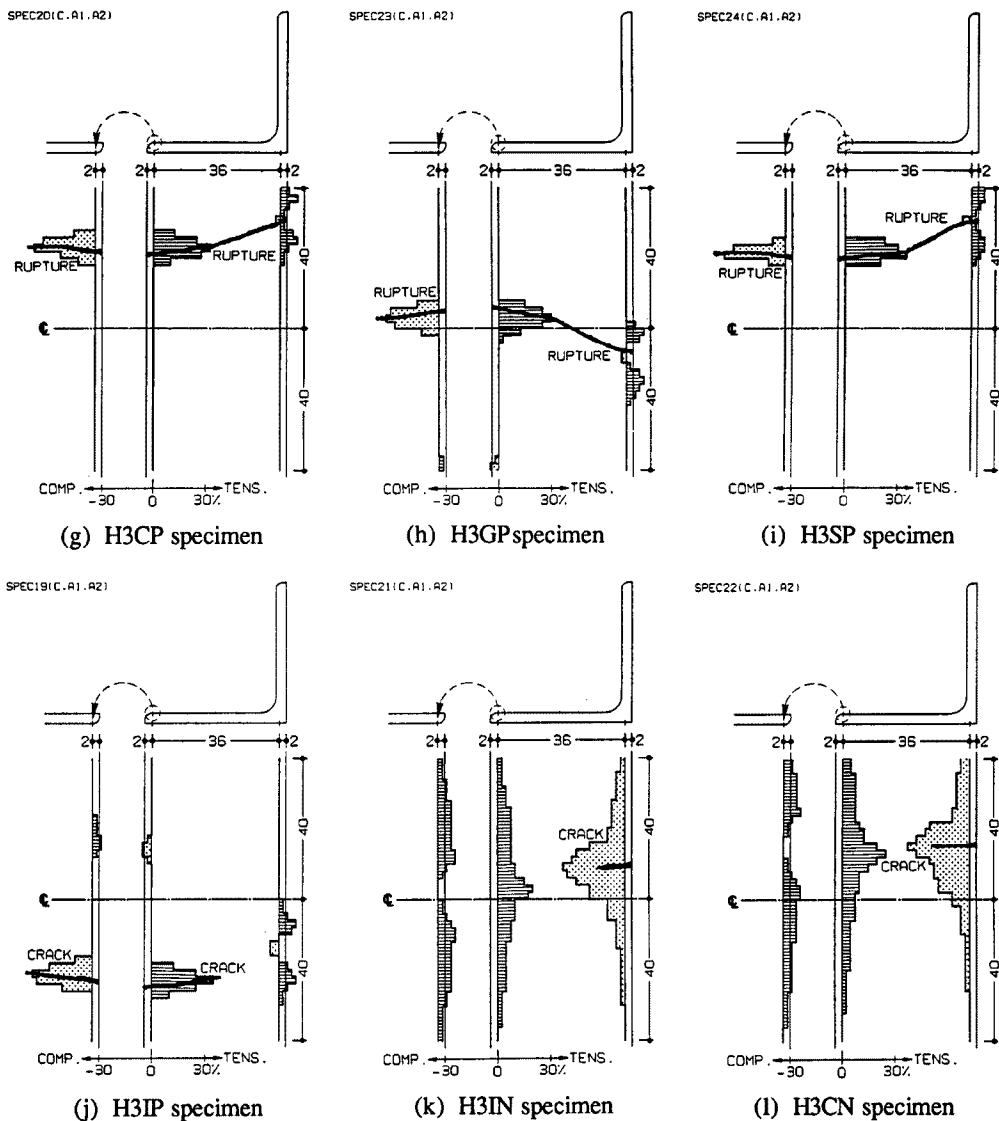


Fig. 9. (Continued).

以上から、破壊挙動と履歴吸収エネルギーの量的対応関係を把握することは難しいが、载荷履歴による差はエネルギー吸収能力にも影響することが認められ、エネルギー吸収能力に基づく破壊・損傷評価を行う場合にも载荷履歴が重要な要因となる。また部材中の局部座屈発生部など局所部分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

前年において、亀裂発生部における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¹⁾。実験終了後の残留ひずみ分布は Fig. 9 のようであった。今回の結果においても最大ひずみの値は、曲げ圧縮側も曲げ引張側も、絶対値で 25～40% (Table 2 参照) の範囲にあり、ほぼ前回と同じ結果になっていることが確認された。

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⁴⁾とも考えられる。従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実験を計画中である。

4. 結 び

本実験で行った実験変数の範囲で次のことが確認された。

- 1) 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振れを伴って現れた。振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。負たわみモードでも、細長比大の場合には、一旦座屈変形した部材が引き戻される時に、振れを伴って局部座屈が現れた。
- 2) 繰り返しに伴う履歴吸収エネルギーの累積過程は、载荷履歴・たわみモード・幅厚比・細長比の影響によって著しく異なる。しかし同一形状の試験体を用いた同一の载荷履歴とたわみモードによる载荷では、エネルギー吸収能力は同程度に発現されている。本実験で行った G 型、S 型のような振幅変動を伴う载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载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。
- 3) 亀裂が発生した部位における局所の残留ひずみは、曲げ圧縮側・曲げ引張側共、絶対値で 25～40% の範囲にあり、载荷履歴・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。

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) 高橋 治・平野道勝・穂積秀雄・金子 聡：繰り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，1991年9月，pp. 1431-1432.
- 3) 例えば，若林 實（編著）：鉄骨構造学詳論，丸善，1985年，p. 152.
- 4) 谷口健男（岡山大学工学部）：私信によるコメント，1991年.