

山形鋼部材の極低サイクル疲労破壊実験

岩井 哲・朴 鍊洙・野中泰二郎・亀田 弘行

VERY LOW CYCLE FATIGUE TESTS OF STEEL ANGLES

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

Synopsis

An experimental study is made of very low cycle fatigue failure of steel angle specimens under repeated loading. The primary objective is to extract decisive factors causing cracks and the ultimate failure in the course of loading repetitions of the order of a few to twenty cycles. The test specimen was subjected to axial loading repeatedly after undergoing inelastic buckling. The experimental investigation reveals that, regardless of loading patterns and deflection modes, visible cracks were initiated on the concave side of bending deformation when it was stretching. There is not a simple relationship between the state of fatigue failure and energy absorption capacity, but the energy absorption process of each member depends on the loading pattern and the deflection mode. The initiation of cracking due to the very low cycle fatigue is found to be related closely to the cumulative strain of the order of 25% ~ 40%, regardless of the loading patterns, the deflection modes, and width-to-thickness ratios.

1. 研究目的

構造物が破壊的な地震などによる厳しい繰返し载荷を受ける場合、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が非常に大きくなると、構造物は極低サイクルの塑性疲労によって破壊する可能性がある。地震による鉄骨構造物の塑性疲労損傷・破壊に大きく影響する因子を抽出し、それらの定量的関係を調べることが、本研究の主たる目的である。著者らは既に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^{1), 2)}。ここでは局部座屈を生じるような構造部材としての挙動を調べるべく山形鋼を対象として取り上げ、数回からせいぜい20回程度の極低サイクルの繰返し载荷による疲労破壊現象を観察する。特に極低サイクルの疲労破壊条件に関わると考えられるひずみに焦点を絞った。すなわち、亀裂や破断につながる局所ひずみの大きさや、繰返しによるそのひずみの累積状況と、繰返し変位振幅、繰返し数ならびに载荷履歴との相関性を探ること、および部材中でも最も厳しい応力やひずみを受けている断面における局所的なひずみ履歴と、部材の全体的な変形挙動との関係を探るための実験的資料を蓄積するものである。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体はSS 41 相当の山形鋼 L-40 × 40 × 3 と L-40 × 40 × 5 を用いた。合計7体である。それぞれ引張降伏強度は 344 N/mm² (3.51 tf/cm²), 339 N/mm² (3.46 tf/cm²), 引張終局強度は 456 N/mm² (4.66 tf/cm²), 470 N/mm² (4.79 tf/cm²), 破断伸びは 29%, 27% であった。Fig. 1 に示すように両端部に 9 mm 厚の鋼板を、山形鋼に垂直に溶接接合した。但し試験体 No. 4 ~ 7 は端部鋼板を持たない山形鋼だけのものを用い、試験部長さ L を 300 mm とした。しかし板厚 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、载荷初期に滑りを生じることがあったため、No. 8 以降の試験体で端部鋼板を取り付けたもので、その結果、試験部長さに前者と 18 mm の差が生じ 318 mm となった (Table 1 参照)。

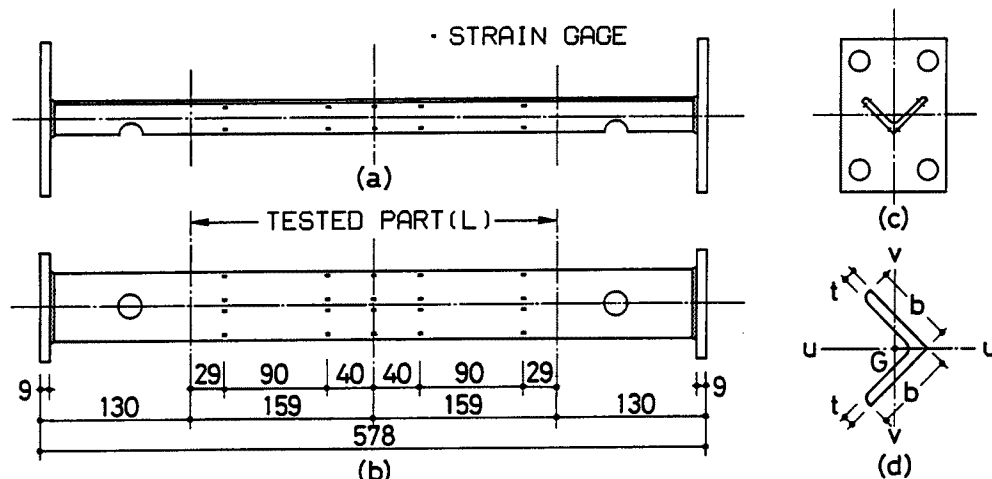


Fig. 1. Test specimen (length in mm).

2.2 実験変数

本実験では、①試験体断面の幅厚比の違い、および②繰返し载荷パターンの違いによるひずみの履歴・累積性状ならびに極低サイクル疲労破壊挙動の相違を調べた。試験体に用いた板幅 $b = 40$ mm の山形鋼の厚さ t を公称値で 3 mm と 5 mm の 2 種とした。公称寸法による幅厚比 b/t は 13.3 と 8 となるが、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。軸方向変位 Δ を制御変数とする静的な定速度载荷で、圧縮変位領域のみの载荷を行った。载荷パターンは Fig. 2 に示す (a) 段階型漸増変位振幅繰返し载荷 (I 型) と、(b) 定変位振幅繰返し载荷 (C 型) の 2 種を採用した。試験体の実測寸法と、各試験体に与えた変位振幅ならびに繰返し数を Table 1 に示す。ここで変位 Δ は圧縮を負としている。

山形鋼が中心圧縮载荷によって座屈変形する時、たわみの発生向きは Fig. 3 に示すように 2 通り現れ得る。従って結果的にこのたわみの発生向きが、比較されるべき重要な第③の実験変数となった。ここでは Fig. 3 (a) のモードを正たわみ (P 型)、Fig. 3 (b) のモードを負たわみ (N 型) と定義する。

なお、この実験の全体計画では試験体の細長比 λ の違いによる破壊挙動の差を調べることも含まれているが、今回は試験部長さ $L = 300 \sim 318$ mm で、細長比 $\lambda = 37 \sim 41$ の比較的短い部材を対象にした。

2.3 载荷ならびに計測装置

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. 4 および Photo 1 に、システム図を Fig. 5 にそれぞれ示す。Fig. 6 および Photo 2 に

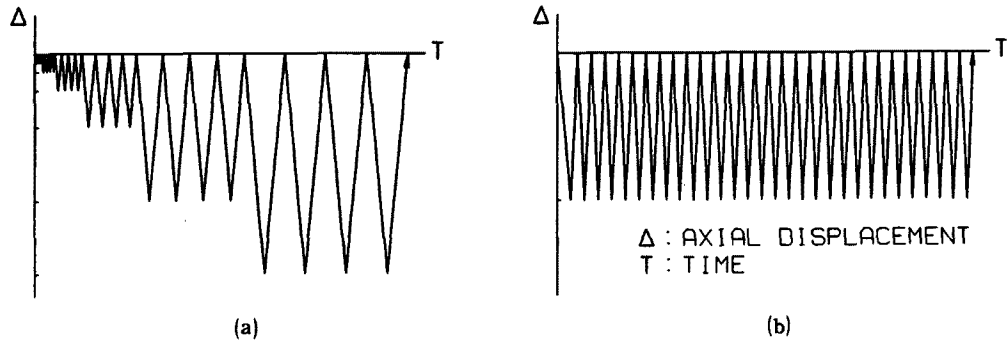


Fig. 2. Loading patterns.

(a) Increased displacement amplitude loading.

(b) Constant displacement amplitude loading.

Table 1. Testing parameters and results

Specimen		L(mm)	b(mm)	t(mm)	b/t	$(\Delta/L) \times 100$	Mode of Deflection	P_{cr} (kN)	Extreme Strain	
Name	No.								tens.	comp.
L3IN	4	301	40.4	2.55	15.8	-0.5-0 (4)	N	58.02	—	—
						-1.0-0 (4)				
						-2.0-0 (4)				
						-4.0-0 (3)				
						-8.0-0 (4)				
						-12.0-0 (4)				
L3CP	6	300	40.3	2.55	15.8	-8.0-0(16)	P	62.92	27.5%	-29%
L3CN	5	301	40.5	2.47	16.4	-8.0-0(30)	N	68.31	25%	-41%
L51P	9	318	39.2	4.56	8.6	-0.5-0 (4)	P	100.65	35%	-35%
						-0.9-0 (4)				
						-1.9-0 (4)				
						-3.8-0 (4)				
						-7.6-0 (4)				
						-11.3-0 (4)				
L5IN	7	300	39.2	4.58	8.6	-0.5-0 (4)	N	119.07	25%	-30%
						-1.0-0 (4)				
						-2.0-0 (2)				
						-4.0-0 (4)				
						-8.0-0 (4)				
						-12.0-0 (4)				
L5CPa	8	317	39.3	4.55	8.6	-7.6-0(19)	P	95.55	32.5%	-35%
L5CPb	10	317	39.2	4.55	8.6	-7.6-0(19)	P	106.33	30%	-32.5%

[Note] I: Increasing amplitude,

P: Positive deflection,

b: Width of angle leg,

 Δ : Relative axial displacement,

L: Specimen length between pin-supports

 P_{cr} : Buckling load

C: Constant amplitude

N: Negative deflection

t: Thickness of angle leg

(): No. of cycles

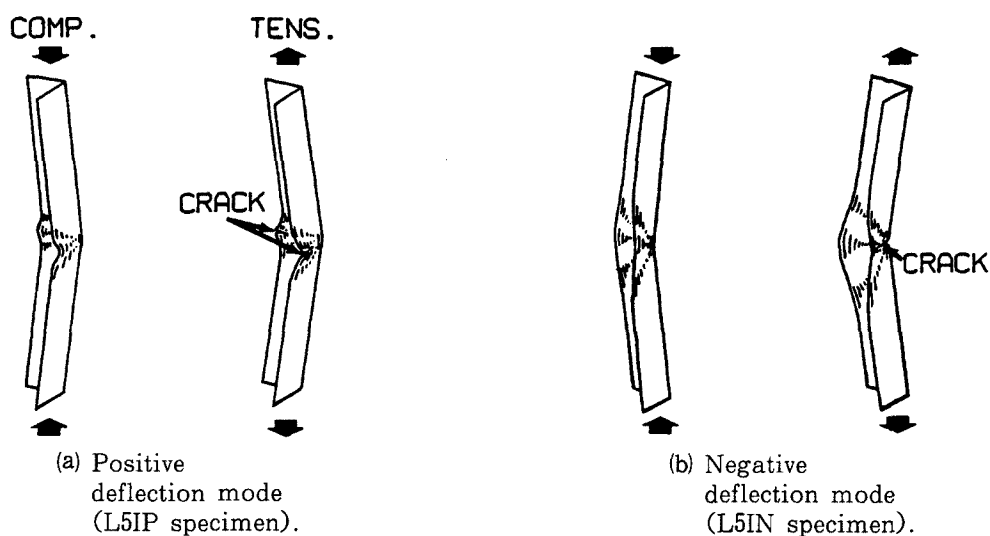


Fig. 3. Deflection modes and cracking patterns.

示す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 を通る主軸の内の u 軸回り、ならびに材軸回りの回転を拘束し、 v 主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返し加力を行った。但し座屈による横たわみの発生を意図的に定めるため、材端で 1 mm 程度の偏心を与えた試験体もある。今回の実験の目的は座屈変形以後の繰返し挙動の調査にあり、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一つの手がかりとして座屈耐力をみることはできる。

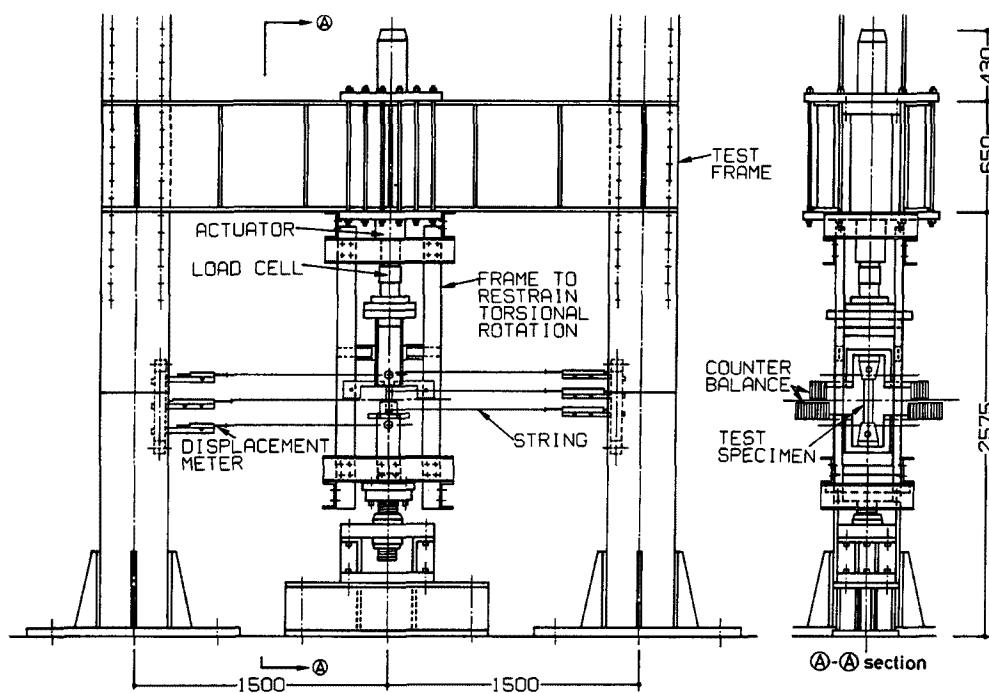


Fig. 4. Testing apparatus (length in mm).

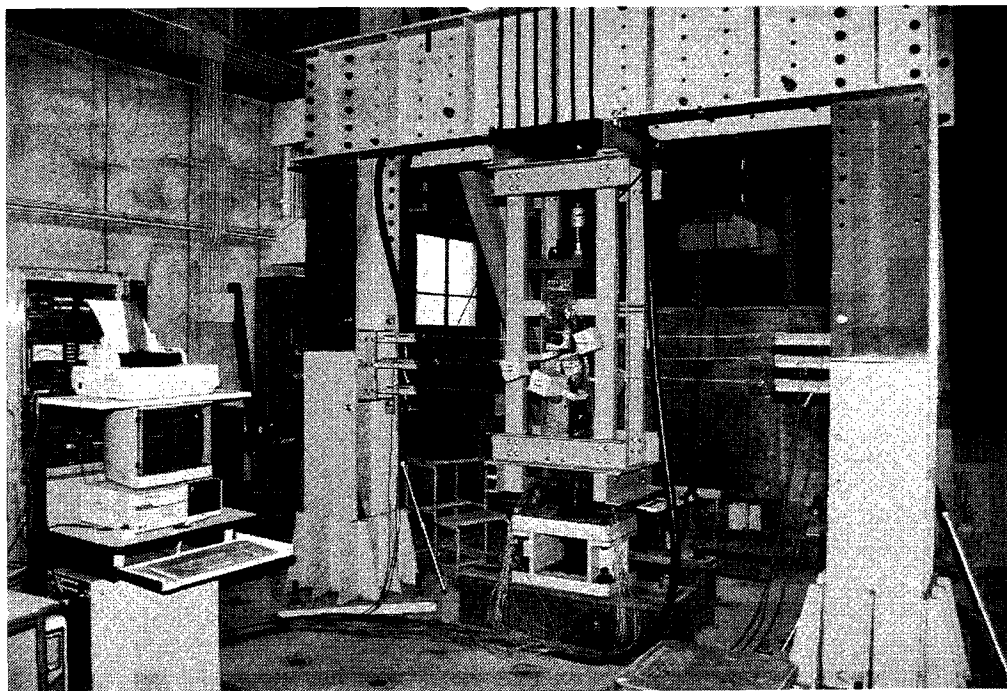


Photo 1. Over-all testing apparatus.

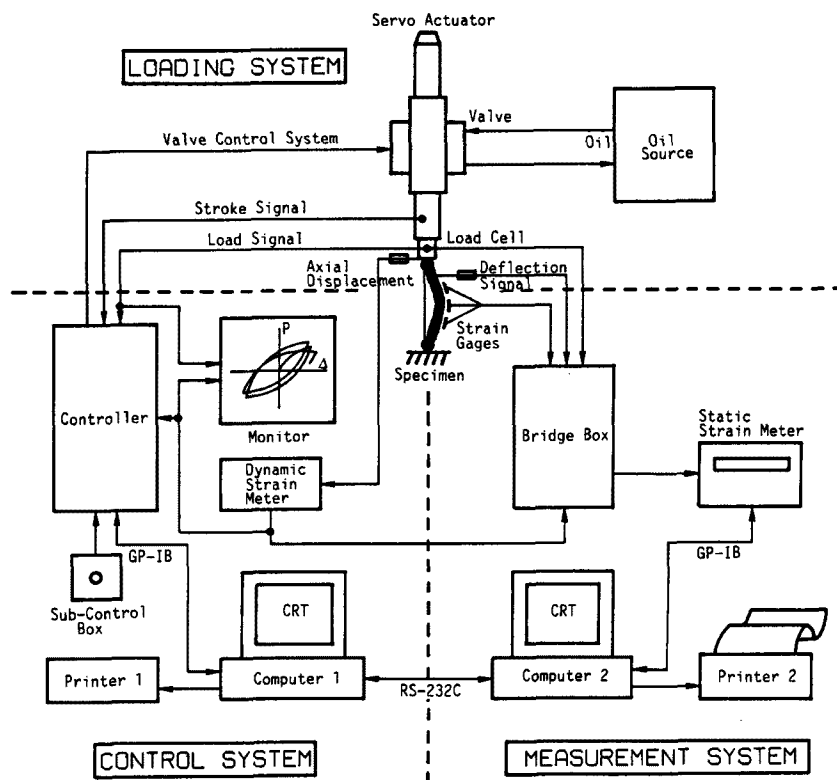


Fig. 5. System diagram.

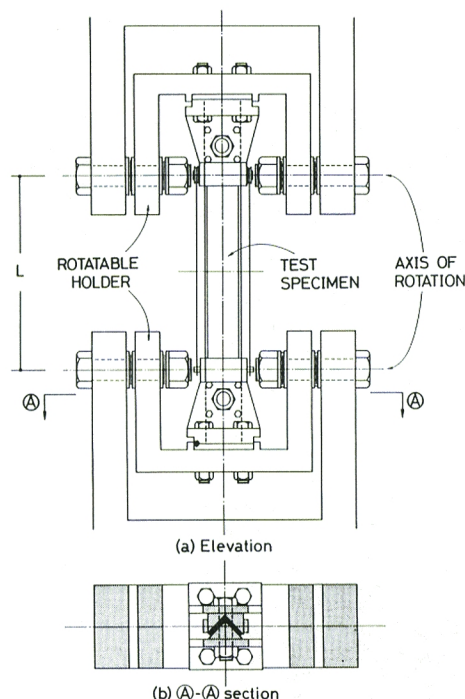


Fig. 6. Specimen supporting system.

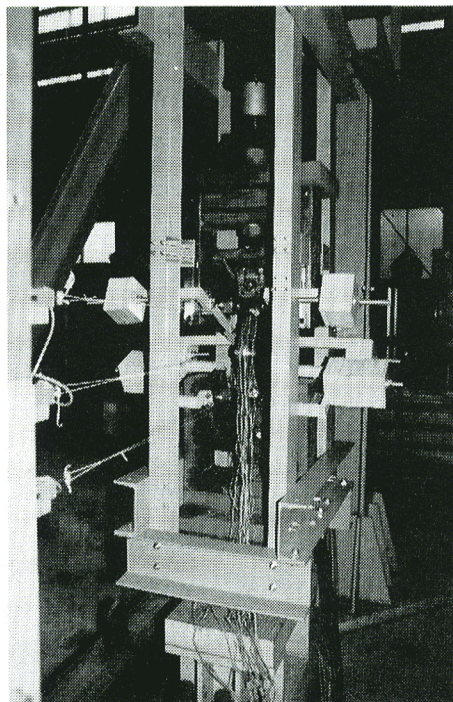


Photo 2. Specimen supporting system.

試験体の軸方向相対変位および横たわみは、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の糸を介して撓動抵抗型変位計で計測し、軸方向相対変位をアクチュエータのフィードバック制御に用いた。載荷装置は基本的に前回¹⁾用いたものと同じであるが、次の3点で変更を加えた。すなわち、試験体の振れ剛性が低いことによる上下材端間の相対振れを防止したこと (Photos 1, 2 参照), Fig. 6 の試験体上下に用いた回転式保持具 (rotatable holder) 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 (Fig. 4), 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 (Fig. 5) である。

2.4 局部ひずみの計測方法

載荷前に対する亀裂発生後の試験体表面の局部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³⁾を参考にして、ヴィッカース硬度試験装置を用いて、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、ヌープ圧痕 (線条痕) を標点として打った。打痕用荷重は196 N(20kgf), 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。桑村らは標点にヴィッカース圧痕 (点痕) を打ち、荷重98 N(10kgf) 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を行っている。なお、このような打痕は試験体にあらかじめ傷を与えるため、亀裂の発生位置をある程度特定することになるが、亀裂や破断に関連するような大きな塑性ひずみを計測する他の方法が見い出せないため、また破壊時のひずみ度が重要な因子の一つであるため、このような方法を用いることにした。

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た。

3. 実験結果

3.1 座屈変形と亀裂の発生

実験初期の圧縮载荷によって試験体は全体座屈を起こすと同時に、正たわみモードの場合は部材中央付近で局部座屈を生じた。細長さの程度を示すため、実験による座屈強度を座屈曲線との比較で Fig. 7 に示す。ここで、非弾性座屈曲線として、Engesser-Shanley の tangent modulus 理論による座屈応力を示した。このとき鋼材の降伏強度を σ_y として、比例限度 σ_p を

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

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

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

と求めて求めた。ここで、 E_s は鋼材のヤング係数である。

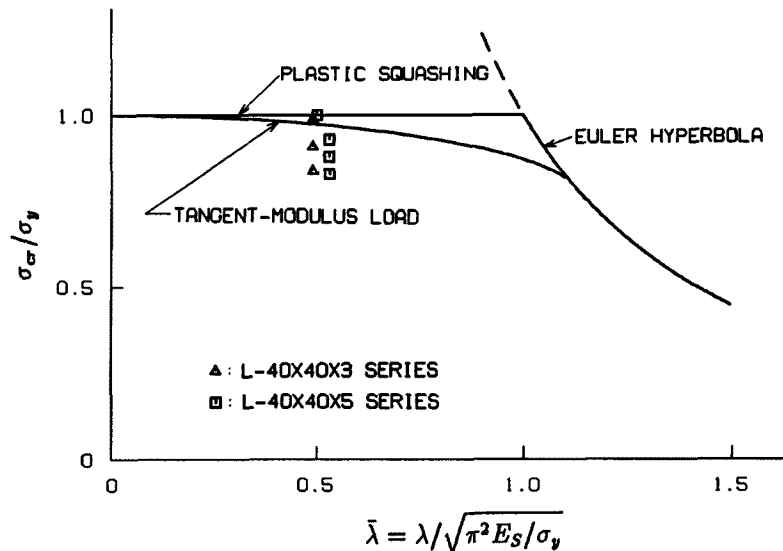
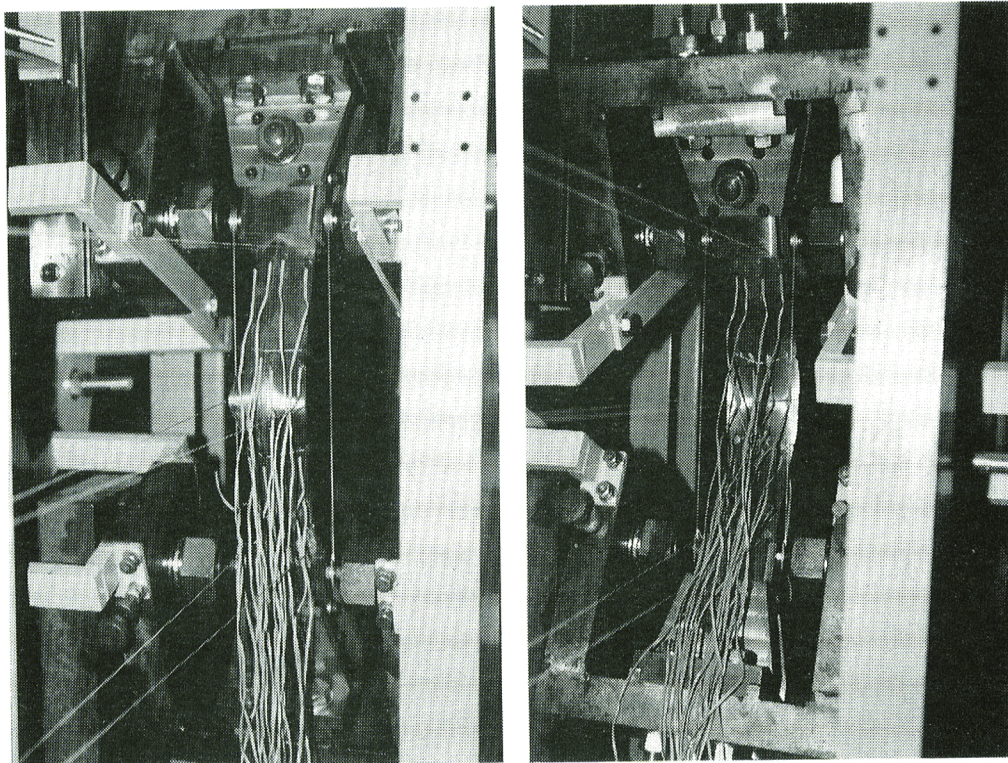


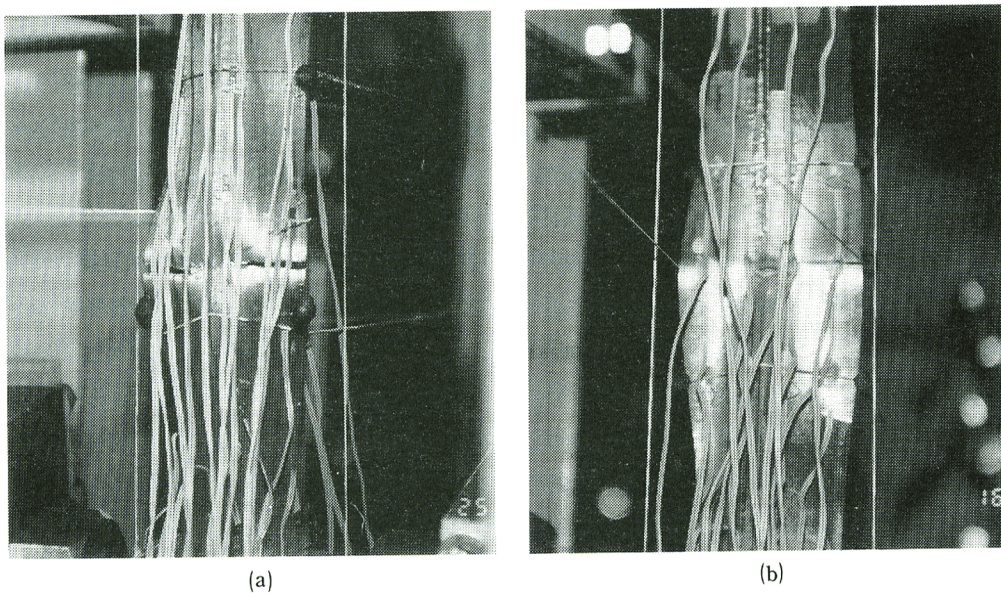
Fig. 7. Column curve and observed strength.

Photo 3 (a) および Fig. 3 (a) のような正たわみモードでは、まず山形鋼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、载荷と共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 (Photo 4 (a))。Photo 3 (b) および Fig. 3 (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 (Photo 4 (b))。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、荷重の反転によって引張力を受けた時に初亀裂が発生し、続く荷重再反転後の圧縮载荷で反対面の曲げ引張側である凸側に、初亀裂の発生位置とほぼ同じ材軸方向位置で新たに亀裂が発生するという過程が認められた。ここで、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。

全く同じ载荷条件で実験を行った試験体 L 5 CPa と L 5 CPb 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、途中経過も含めて実験そのものの再現性があることが確かめられた。



(a) (b)
Photo 3. Deflection modes.
(a) Positive deflection mode (L5IP).
(b) Negative deflection mode (L3CN).



(a) (b)
Photo 4. Cracking patterns.
(a) Positive deflection mode (L5CPb).
(b) Negative deflection mode (L3CN).

3.2 荷重—変形関係

軸方向相対変位振幅の漸増繰返しならびに定変位振幅繰返しによる荷重 P と軸方向変位 Δ との関係の履歴を全試験体について Fig. 8 に示す。 N_y は断面の降伏軸力である。変位振幅漸増型载荷では、各振幅で4サイクルずつの繰返しを基本として行ったが、試験部長さの8%変位にあたる第5振幅域での繰返しまでは亀裂が現れず、多くの場合、同じく12%変位にあたる最終の第6振幅域での第1サイクル目に初亀裂が出始めた。定変位振幅型载荷は、この第5振幅と同じ8%変位での繰返しを行っており、第7～9サイクルで最初の亀裂が確認できた。なおL5INにおける履歴曲線の乱れは試験体と固定具との間の滑りに基づく载荷制御のトラブルによるものである。

漸増変位振幅繰返しおよび定変位振幅繰返し载荷を行った試験体L5IPとL5CPaの中央横たわみ V と荷重との関係を Fig. 9 に示す。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よくわかる。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、亀裂が発生し始めると、引張抵抗力・圧縮抵抗力共に著しく劣化し、破断に至る。

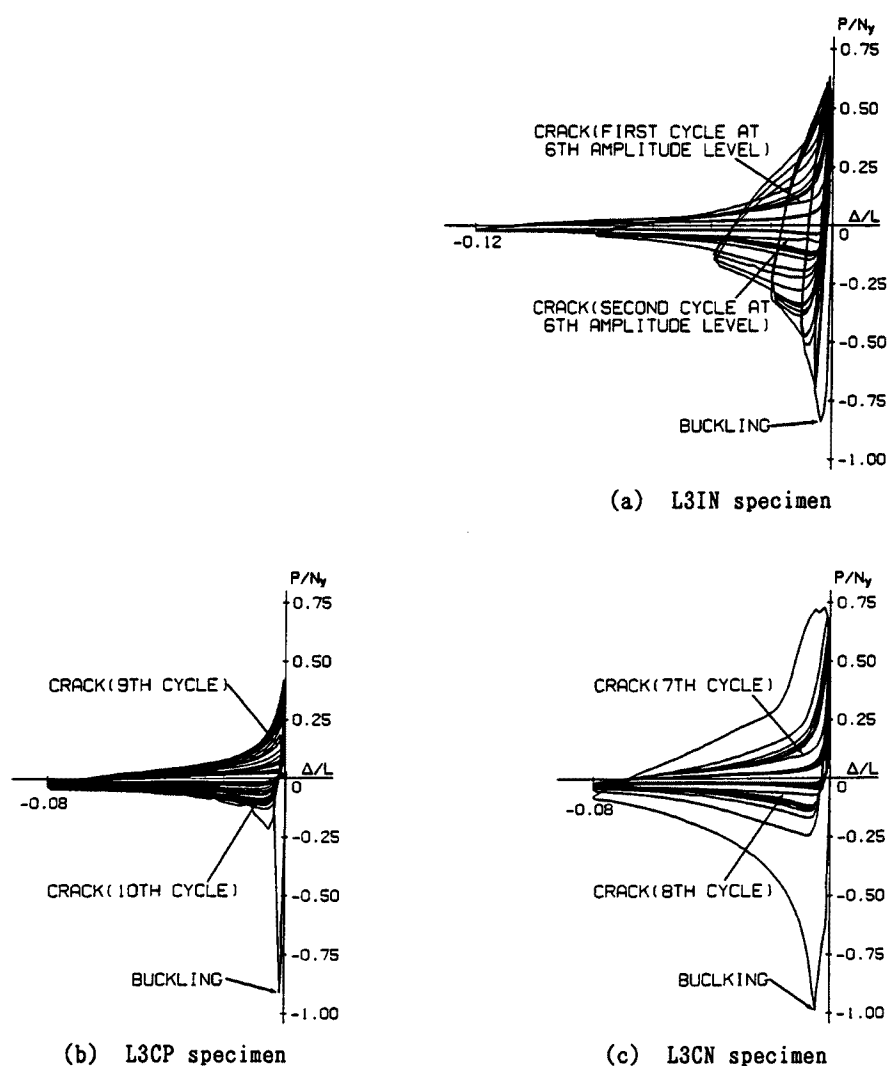
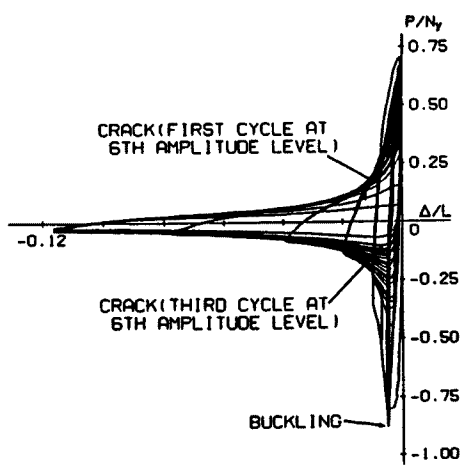
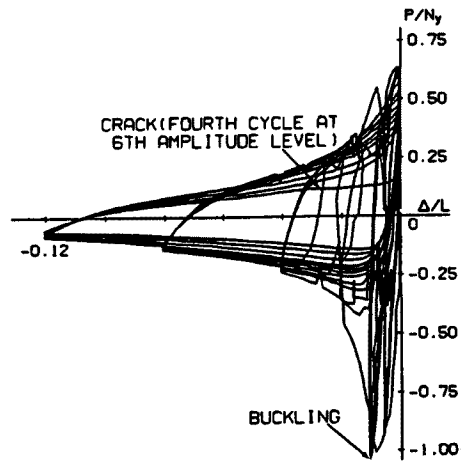


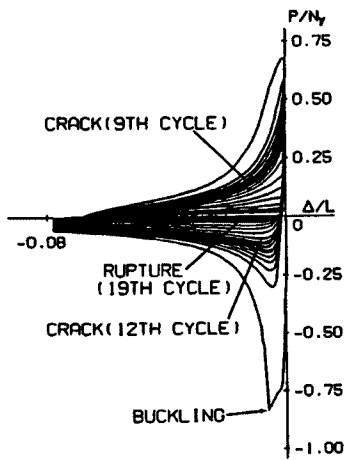
Fig. 8. Load-axial displacement relations.



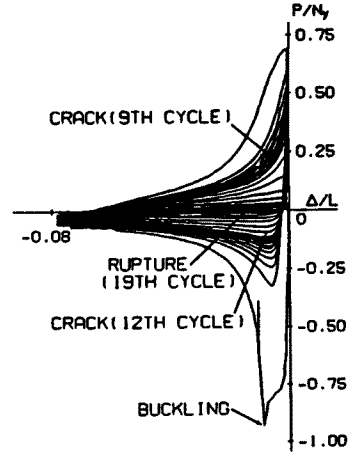
(d) L5IP specimen



(e) L5IN specimen

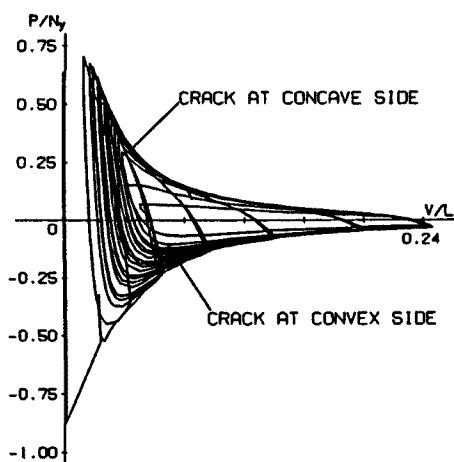


(f) L5CPa specimen

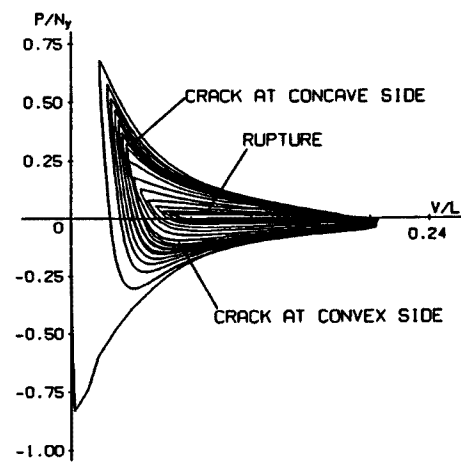


(g) L5CPb specimen

Fig. 8(continued). Load-axial displacement relations.



(a) L5IP specimen



(b) L5CPa specimen

Fig. 9. Load-deflection relations.

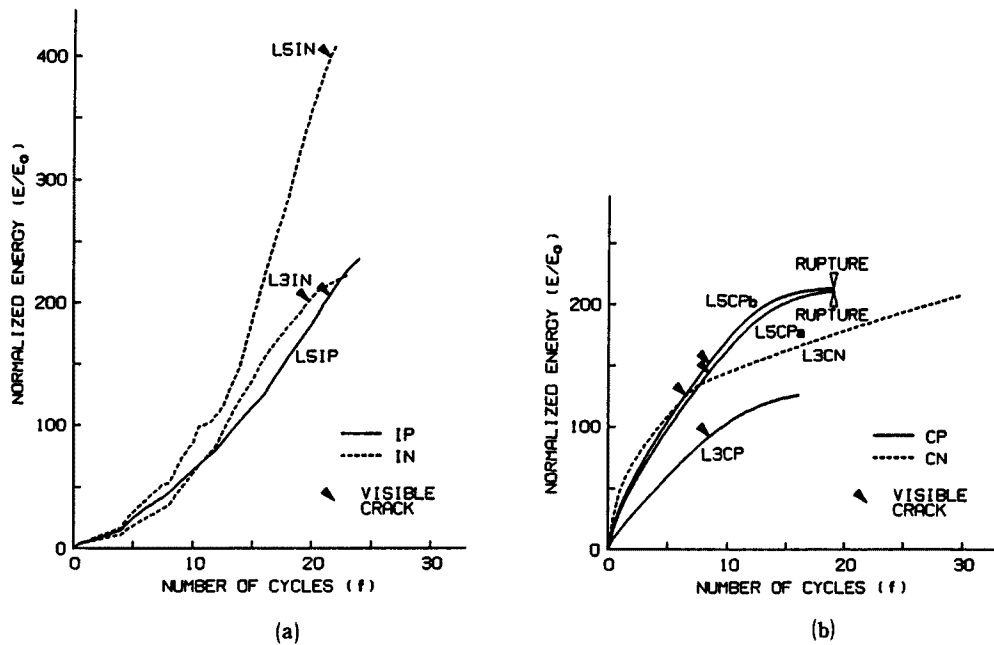


Fig. 10. Comparison of cumulative energy absorption as function of loading cycles.

(a) Increased displacement amplitude loading.

(b) Constant displacement amplitude loading.

3.3 履歴吸収エネルギー

P — Δ 曲線によって囲まれた面積で算定される履歴吸収エネルギーの累積値 E と繰返し数 f との関係を載荷パターン別に Fig. 10 に示す。エネルギー量は、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

$$E_0 = \sigma_y^2 AL / (2E_0) \dots\dots\dots (3)$$

で無次元化した。ここで A は試験体断面積である。エネルギー吸収の累積過程は I 型 (Fig. 10(a)) と C 型 (Fig. 10(b)) の別、すなわち載荷パターンによって全く違う性状を示す。また載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 P 型と N 型の別の影響も受けることがわかる。負たわみの場合の方が正たわみの場合より、同じ繰返し数でもエネルギー比が大きい。幅厚比の違いに関しては、5 mm 厚 (L5 グループ) のものが 3 mm 厚 (L3 グループ) のものよりこのエネルギー比が大である。しかし同じ板厚の試験体を用い、同じ載荷パターンで同じ変形モードを生じた場合 (L5 CPa と L5 CPb) では、亀裂発生時の繰返し数や、亀裂発生後の劣化の過程ならびに履歴曲線の形状の酷似による、ほとんど一致した実験結果が得られ、エネルギー吸収能力に関しても極低サイクル疲労実験の再現性が非常に高いことが認められた。これらの諸曲線より、亀裂発生時における累積エネルギー量は一定という訳ではなく、また最終的な破断に関わるエネルギー量を特定の値で表わ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・幅厚比・変形モードの違いを顕著に反映するということもできる。これは極低サイクル疲労による部材の損傷の過程を、エネルギー吸収量の変化によって表現するというようなモデル化が可能であることを示唆している。

3.4 ひずみ分布

載荷終了後の局部ひずみの大きさと亀裂との関係は、Figs. 11, 12 に示す断面の脚縁部ならびに稜角部

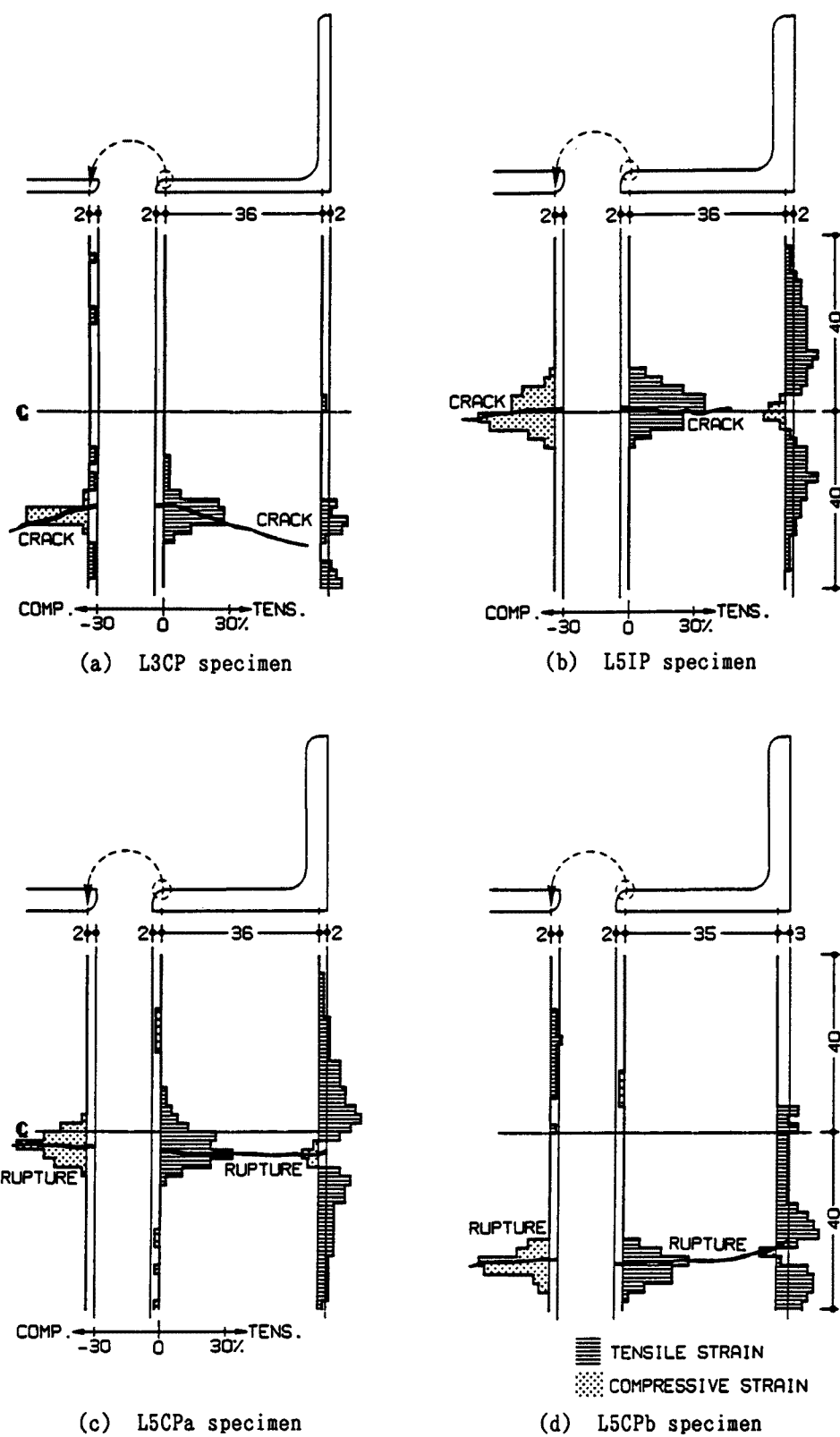


Fig.11. Local strain distribution of positive deflection mode in angle test.

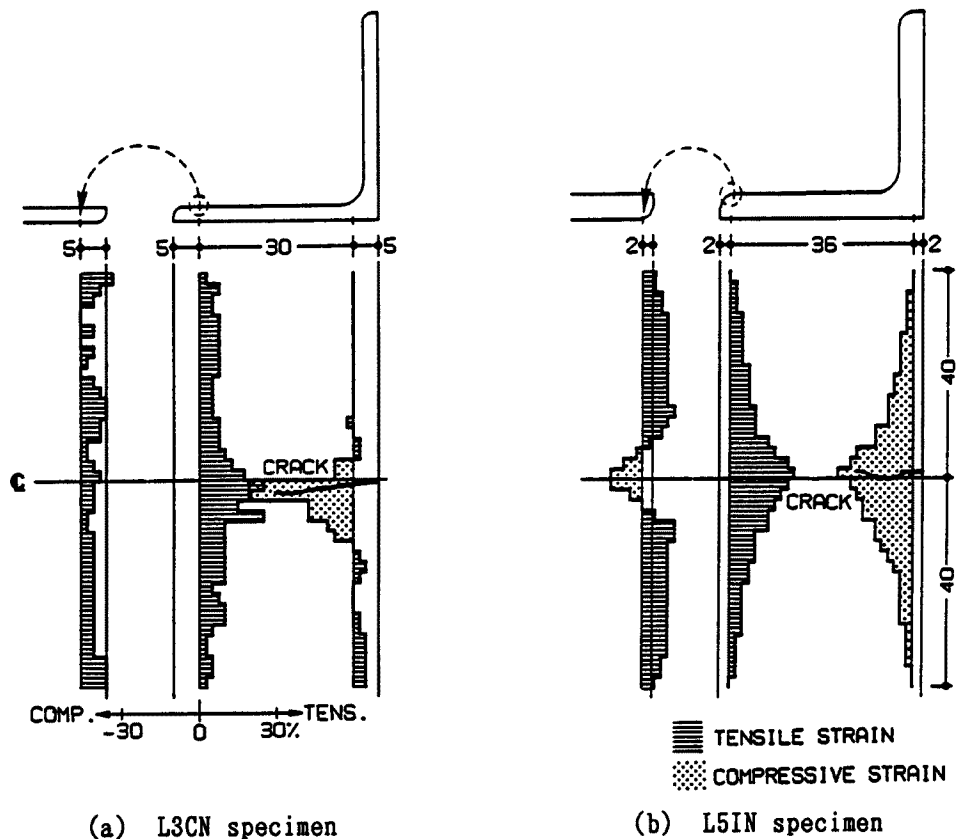


Fig. 12. Local strain distribution of negative deflection mode in angle test.

付近で測った材軸方向のひずみ分布図によって見る事ができる。ここで亀裂発生部のひずみ量は、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。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。負たわみモードでは、ひずみ計測を行った80mm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 1に示すように圧縮側・引張側とも25～40%の範囲であった。この値は、荷重履歴や幅厚比、ならびにたわみ発生の方に問わずほぼ同じであることが注目される点である。

単純引張荷重試験を行った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結果の例を、Fig. 13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Oとおいている。標点間距離50mmでの平均伸び率が30%程度である場合でも、1.5mmピッチあるいは2mm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。従って上記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、繰返し荷重の効果によるものと考えられる。

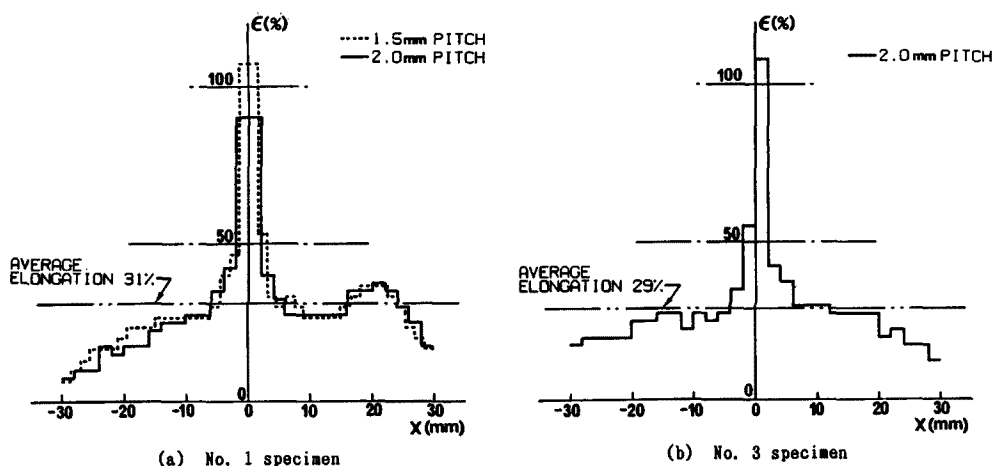


Fig.13. Distribution of local strain in material test.

4. 結 び

山形鋼材を用いて軸方向相対変位で制御する繰返し載荷を行って、数回からせいぜい20回位の極低サイクルで疲労破壊する現象を実験的に観察し、亀裂を生じる局部ひずみの大きさならびに繰返しによるひずみの累積状況に焦点を当てて調べた結果、得られた知見を次に要約する。

1) 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・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の発生が肉眼で観察され、続く圧縮再載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) 全く同じ載荷条件で実験を行った試験体2体はほぼ同じ履歴挙動を示し、最終的に同じサイクル数で完全破断を生じた。極低サイクル疲労における本実験の再現性が確かめられた。

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、亀裂発生時における累積量が一定という訳ではなく、また最終的な破断に関わるエネルギー量を特定の値で表すことはできない。しかし見方を変えれば、累積履歴吸収エネルギー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・幅厚比・変形モードの違いを顕著に反映するということもできる。

4) 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、試験体亀裂発生部の残留ひずみの最大値は、圧縮側・引張側とも25～40%の範囲であった。この値は、載荷履歴や幅厚比、ならびにたわみ発生の向きに関わらずほぼ同じであった。

謝 辞

実験の試験体準備に使用したヴィッカース硬度計の利用にあたり、京都大学化学研究所の幸塚広光助手ならびに同工学部工業化学教室の田中勝久助手の御協力を得た。また本研究の経費の一部は平成元年度文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)(課題番号01750582)の援助を受けた。ここに記し、深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 岩井 哲・Ulrich Bourgund・野中泰二郎：繰返し載荷を受ける構造部材の塑性疲労—鋼板要素

の破壊実験一，京都大学防災研究所年報，第 32 号 B-1，1989 年 4 月，pp.133-147.

- 2) S. Iwai, 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, 1990 年 12 月, pp.1377-1382.
- 3) 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, 1990 年 3 月, pp. 385-397.