

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—

岩 井 哲・Ulrich Bourgund・野 中 泰 二 郎

Plastic Fatigue of Structural Members under Repeated Loading — Tests on Failure of Steel Plate Elements

By Satoshi IWAI, Ulrich BOURGUND and Taijiro NONAKA

Synopsis

An experimental study is made of the fatigue failure of structural elements in steel frames under repeated loading. The objective is to attain the ultimate failure in the course of loading repetitions of the order of several to ten, to try and simulate the action of destructive earthquakes. The test specimen is a rectangular plate, representing a thin-plated element in a steel member such as wide-flange cross section. It is subjected to uniaxial loading repeatedly, until complete failure takes place after undergoing inelastic buckling, plastic bending, plastic elongation and/or combination thereof. The results show that the state of the ultimate failure is closely related to the maximum strain at the extreme fiber in the cross section. The criterion of structural failure due to low-cycle fatigue cannot be specified by the total energy absorbed in plastic deformation only, but also depends on the entire history of loading, because tensile and compressive loadings have shown to induce distinct fatigue damage in the specimen.

1. 序

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。この場合、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、構造物はごく低サイクルの塑性疲労によって破壊する可能性がある。鋼構造物の地震による大きな被害例に、ブレース材の座屈および破断による骨組の過度の変形や崩壊がみられる。このような現象を低サイクル疲労破壊として捉えたこれまでの研究においては、数十～数百サイクルでの繰返し力による破壊規準を確立しつつある。部材の地震時挙動を明らかにすることを目的としたこれまでの低サイクル疲労実験は、材料的な塑性疲労の立場から破壊寿命を探究したものを中心となっている。即ち、鋼素材や部材あるいは溶接接合部などを対象とする場合も、座屈を生じさせないような試験体形状を選んで繰返し载荷実験を行い、低サイクル疲労破壊規準を確立しようとしたものが多い。しかしながら構造物の破壊の明確な定義はまだなされておらず、疲労破壊寿命あるいは累積疲労損傷を推定する方法についてもまだ決定的なものはない¹⁾。また地震時の実際の被害状況から判断すると、ブレースなどの部材は座屈した後、数回からせいぜい十数回程度のごく少ない回数で引張・圧縮繰返しの大きな塑性変形を受けることにより、破断に至ったと推定される。さらに H 形鋼の梁

あるいは柱といった部材レベルの実験では、むしろフランジ部で局部座屈を生じる場合が多く、その座屈した部分で局部的に相当大きな繰返し引張・圧縮曲げ塑性変形を受けることにより、亀裂を生じる場合が問題となる。このように圧縮荷重によって一旦座屈した後も、引張・圧縮を繰返し、破断せしめるまで荷重しごく低サイクルの疲労破壊性状を把握しようとした研究は他に見当たらない。

そこで、このような鋼構造部材の終局的な耐震性能を調べる観点から、疲労破壊の機構の解明ならびに構造物損傷度の定量的把握を目指した研究を始めた。本研究はごく低サイクルの繰返し塑性疲労破壊に関わる要因を抽出し、部材要素を対象として、細長比の大きい部材の全体座屈から、フランジプレートの局部座屈の現象まで含めた、特に初期に座屈を生じた後の圧縮・引張繰返しによる部材の破壊性状を明らかにすることを目的とする。ここでは鋼板要素が圧縮によって一旦座屈した後で、更に圧縮・引張の繰返し加力を受けて破壊に至る過程を実験的に調べた結果について報告する。なお本課題に関する既往の研究の調査は文献1), 2) にまとめている。

2. 実験計画

2.1 実験変数

今回の実験計画の主題は鋼部材が低サイクル塑性疲労破壊を生じる領域を探ること、ならびにその破壊の様相をとらえることにある。試験体形状は、①破壊を起こさせる断面を1ヶ所に特定すること、②H形断面材フランジ部のような薄板材の局部座屈に似た大きな塑性変形を生じさせるため、変形を部材局所に集中させること、③数回ないしは十回程度の繰返し荷重で亀裂を生じて破断させ得る荷重条件で、種々の荷重パターンによる部材の損傷・破壊過程を調べ得ること、などを目標として選定した。条件①より、試験体支持条件として両端固定を採用せず、両端ピンとした。条件②より、材中央に薄肉部を有し、他は剛体に近い挙動をとらせて材全体の塑性変形を中央に集中させることにした。条件③に示したようなごく少ない回数での疲労破断を実現させることに対しては、試験部分の長さを変えて適正な結果を得るにふさわしい変形領域を探ることによって対処することにした。以上の理由から、ここで採り上げた実験変数は試験体形状と荷重パターンの2つとした。

2.2 試験体

試験体は Fig. 1 のように、中央に薄肉6 mm の帯板状試験部をもつ。試験部長さ l を 72 mm, 18 mm, 9 mm の3種とした。使用材料は SS41 材で、板材から切削後、610°C で3時間の焼鈍処理を行っている。引張

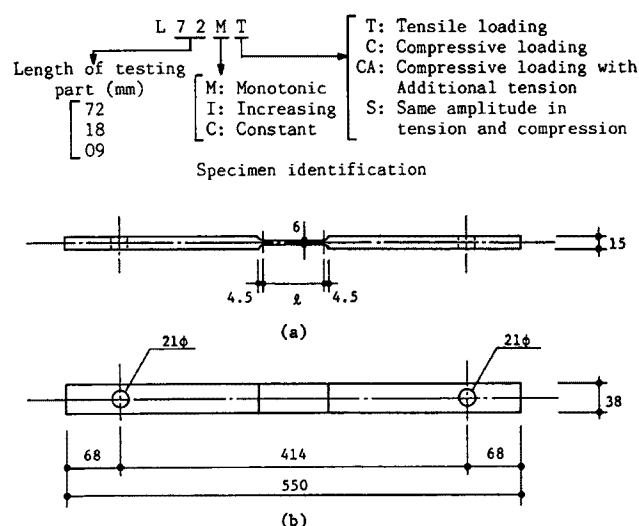


Fig. 1 Test specimen (length in mm).

上降伏点応力 304 N/mm^2 (3.10 t/cm^2), 下降伏点応力 283 N/mm^2 (2.89 t/cm^2), 引張終局強度 424 N/mm^2 (4.32 t/cm^2) (各値は試験体 No. 2 による) である。今回, 実験した試験体は Table 1 に示す全 9 体である。

試験体名の初めの L に続く 2 数字は試験部長さを示し, L72, L18, L09 はそれぞれ 72 mm, 18 mm, 9 mm を表す。続く 2 文字は载荷パターンを示す。MT および MC は引張および圧縮の単調载荷, IS は引張・圧縮対称漸増振幅の繰返し载荷, CC および IC は定振幅および漸増振幅の繰返し圧縮载荷をそれぞれ表している。最後に A が付いている場合は付加的に引張载荷がなされたものであることを示している。

2.3 载荷装置および载荷方法

京都大学防災研究所耐震構造実験室に設置された Fig. 2 および Photo. 1 に示す電動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を使用した。実験システムには Fig. 3 に示すように 2 台のパーソナルコンピュータを使い, 1 台はプログラムによるアクチュエータ制御用に, もう 1 台は計測用機器の制御ならびにデータの収納用に用いて, 2 台を RS-232C でつないでデータの通信を行っている。鋼板要素試験体を Fig. 4 および Photo. 2 に示すような両端ピン支持の条件で材軸方向に引張・圧縮の繰返し加力を行った。支持治具は繰返し軸方向力を受ける部材の実験^{3,4)}に用いられたもので, 試験体両端を高力ボルトで固定してベアリングによる回転中心位置でピン支持状態を実現させるものである。このベアリング部は試験体を固定した後で荷重の偏心量を微調整することが可能である。本実験では軸方向圧縮変位と横たわみが同程度の値となり, 特に横たわみは 10 cm を越えて変位計の計測範囲に制約を与えるため, あらかじめ载荷前に微小な偏心を与えて座屈によってたわむ向きを定めることにした。

载荷パターンは, 試験体両端の支持部間の軸方向相対変位 Δ (伸びる場合を正にとる) を制御する準静的な定速度载荷で, Fig. 5 の時間 T と Δ の関係に示すような (a) 単調载荷, (b) 定変位振幅繰返し载荷, (c) 段階型

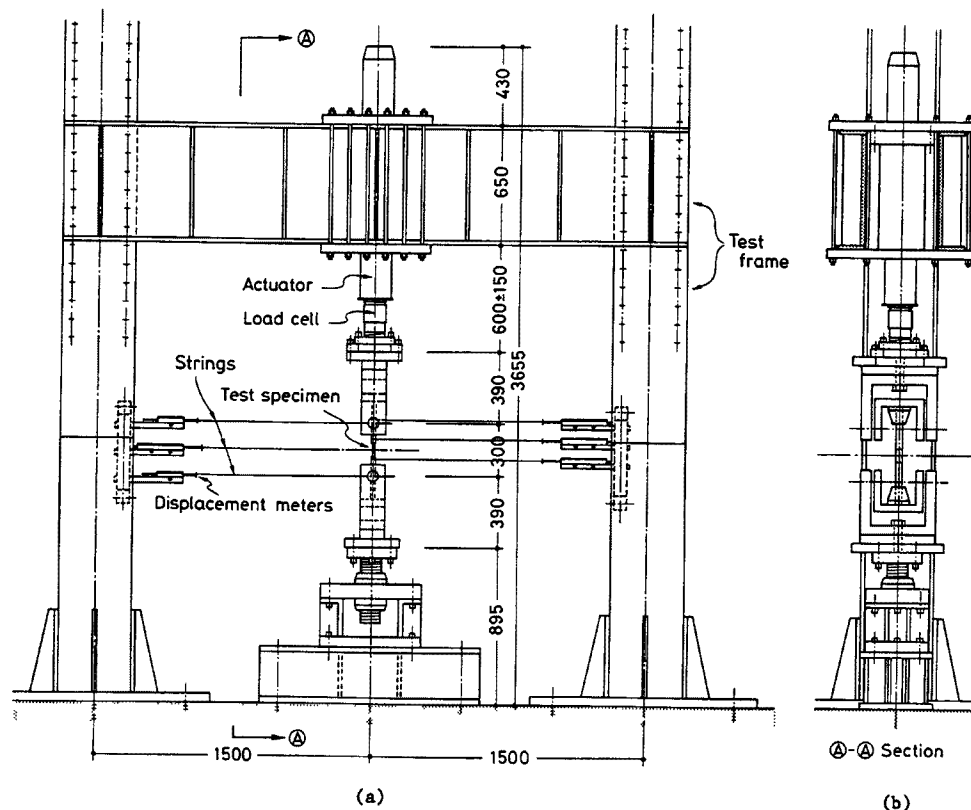


Fig. 2 Loading and measuring apparatus (length in mm).

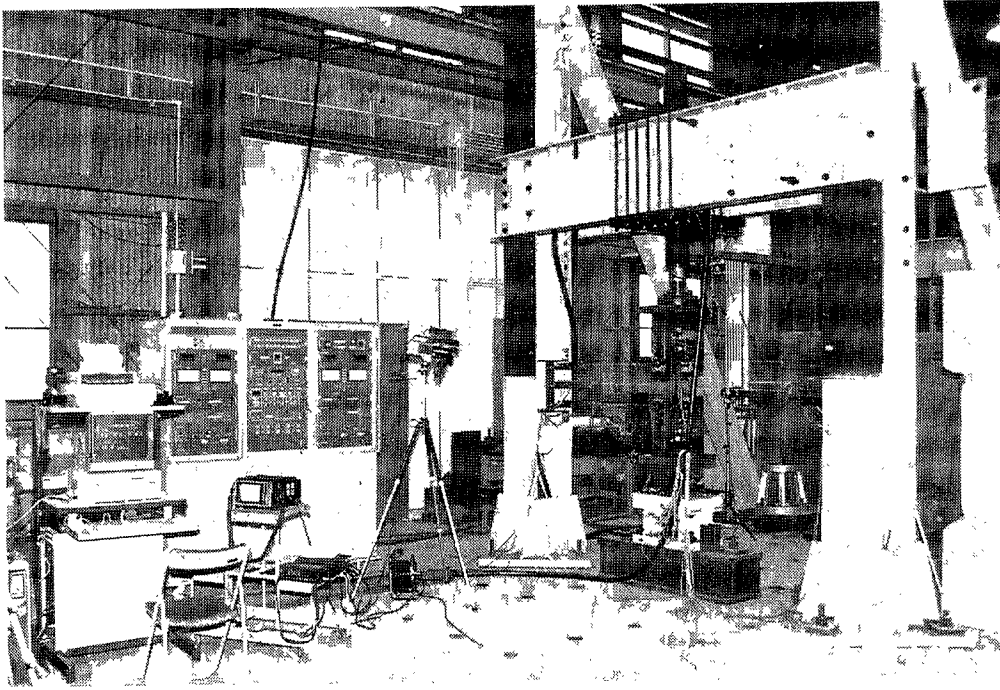


Photo. 1 Over all test arrangement.

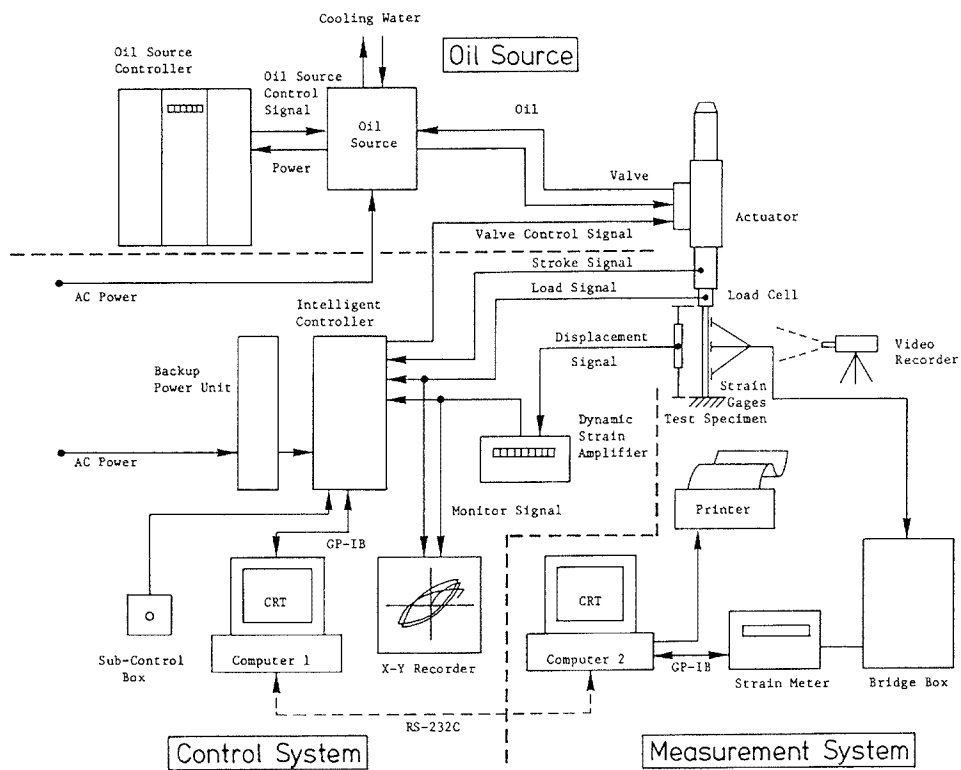


Fig. 3 System diagram.

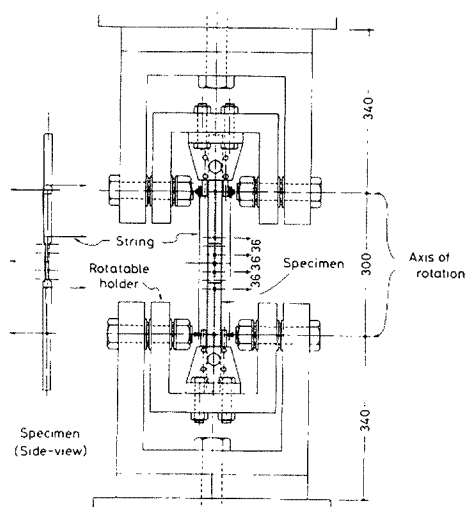


Fig. 4 Close up of testing part (length in mm).

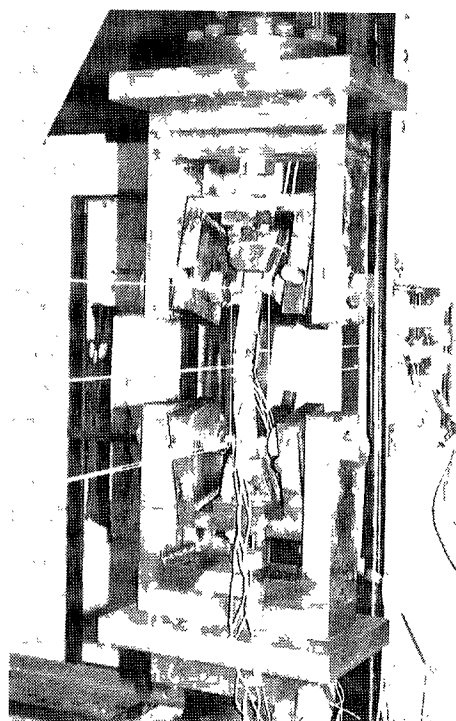


Photo. 2 Specimen supporting system.

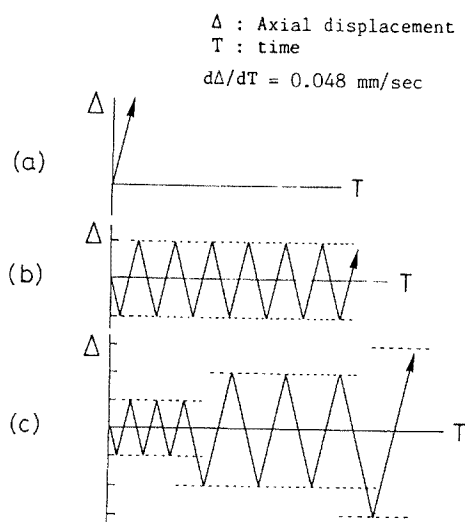


Fig. 5 Loading patterns.

漸増変位振幅繰返し载荷の3種を基本とし、それらを組合せた载荷も行った。Table 1に各試験体に载荷した変位振幅ならびに繰返し数（（ ）内の数字で表示）を示す。表中第2項目の軸方向変位の範囲は変位を試験部長さで除した Δ/l を百分率で表したものである。

この実験シリーズで負荷させた基本的な载荷速度は0.048 mm/sで、全载荷を通じて一定の軸方向変位速度を与えた。これで変位0～7.2 mmの間を1往復するのにちょうど5分かかるわけであるが、純引張時のひずみ速度で換算すると、L72シリーズで $6.7 \times 10^{-4}/s$ 、L18シリーズで $2.7 \times 10^{-3}/s$ となり、実験結果の強度を考える上で材料強度のばらつきのオーダーに比して、動的效果による強度上昇があまり問題とならない载荷速度の領域であると考えられる。

2.4 計測方法

試験体の軸方向変位および横たわみは比較的伸びが少ないグラスファイバー製の糸を用いて载荷骨組の柱に取り付けた撓動抵抗型変位計で計測した (Fig. 2)。この軸方向変位の値をアクチュエータのフィードバック制御に用いた。計測はできるだけ試験体の変位を直接的に測れるように工夫したが、試験体に相当な大変形を強いること、部材が破断する最終段階まで継続した計測が可能なこと、また軸方向の変位を制御に用いるため、如何なる場合にも制御不能とならない実験上の安全性を確保することなどが必要で、軸方向変位用には大きく変形する試験体に計測用治具を直接取り付けることは避け、試験体上部のつかみ部から回転軸上に設置した滑車を介して糸を張った (Fig. 4, Photo.

Table 1 Loading patterns.

Specimen No. & Name	100·(Δ/ℓ) (%)	Amplitude Levels in Axial Displacement (mm)															Type of Failure	
		-93.6	-57.6	-43.2	-28.8	-21.6	-14.4	-7.2	0	7.2	14.4	21.6	28.8					
No. 1 L72IS	-10 - +10 -20 - +20 -30 - +30 -40 - +40																	
No. 2 L72MT	0 - +40																	
No. 3 L72CCA	-130 - 0 -130 - +10 0 - +20																	
No. 4 L72MCA	-130 - 0 -10 - +10 -130 - 0 0 - +40																	
No. 7 L181C	-40 - 0 -80 - 0 -160 - 0 -320 - 0																	
No. 8 L18CC	-240 - 0																	
No. 9 L18CCA	-240 - +10																	
No. 10 L091C	-40 - 0 -80 - 0 -120 - 0 -160 - 0																	
No. 11 L09MC	-1040 - 0																	

[Notes] (): No. of Cycles, - : Last cycle not completed, ↓ : Starting Direction, ↑ : Starting Direction, TF: Failure in Tension, CF: Failure in Compression, NF: No Failure.

2)。横たわみの計測には、試験体に直接糸を結び、糸の固定位置のずれをなくするため粘性の大きいブチルゴムで接着した。これらの計測手法は今回初めて用いたものであるが、小変形域から大変形域までほぼ満足できる計測結果が得られた。部材両面には検長1mmおよび2mmのひずみゲージをFig. 4に示す36mm間隔の位置に貼付した。

荷重と軸方向変位の関係は X-Y レコーダーで実験中モニターされている (Fig. 3)。また 2 台のコンピュータと、実験過程を記録するための 2 台のビデオシステムおよびカメラにはタイマー機能があるので、後のデータ処理で現象の同時性を確かめるのに有効であった。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊モード

試験体の破壊のモードは 2 種に大きく分けられる。1 つは引張破断型であり、もう 1 つは圧縮曲げ繰返し破断型で後者が低サイクルの塑性疲労型破壊と呼べるものである。試験体 No. 1 (L72IS), No. 2 (L72MT), No. 4 (L72MCA) は引張破断型 (Table 1 に TF と表示), No. 7 (L18IC), No. 8 (L18CC), No. 9 (L18CCA), No. 10 (L09IC), No. 11 (L09MC) は圧縮曲げの低サイクル疲労型 (Table 1 に CF と表示) である。No. 3 (L72CCA) は薄肉試験部全体で相対たわみ角が 90° 以上となるような曲げ変形を生じさせたが、今回実験した試験体の内では、これだけが破断するに至っていない^{*1}。

今回の試験体形状で見られた圧縮曲げ変形は薄肉部分の均等曲げに近い変形で受け持たれ (Photo. 3), 非常に靱性のある挙動を示し、試験部中央で“く”の字型の極端に大きな塑性変形が集中することはなかった。

3.2 荷重-軸方向変位関係

軸方向荷重 P と制御に用いた軸方向相対変位 Δ の関係を今回実施した試験体全 9 体について Figs. 6, 7, 8 に示す。荷重は引張を正にとり、降伏耐力 $N_y = 64.7 \text{ kN}$ (6.60 t) で、軸方向変位は各試験体の試験部長さ l でそれぞれ無次元化している。

(1) 引張破断型破壊 引張破断型破壊は通常の引張試験と同様に試験体がまっすぐに伸び切ってくびれを生じ破断するものである。破断伸びひずみの値が通常の SS41 材に比べて大きいのは、本試験体の平行部長



Photo. 3 Specimen No. 3 under compression.

さが日本工業規格 (JIS Z-2201) に指定されている試験片の形状に比べて短いことによって、くびれによる伸び変形の影響が一般より大きく見られる結果になったためと思われる。

試験体 No. 1 (L72IS) と No. 2 (L72MT) の P - Δ 関係を比較したものが Fig. 9(a) である。この両者は単調載荷による曲線と繰返し載荷による各振幅第 1 サイクルの包絡曲線、ならびに破断点がほぼ一致しており、破断伸びに繰返しによる効果が見られない。しかし Fig. 6 の 4 つの P - Δ 関係の比較から、試験体 No. 3 と No. 4 では大きな圧縮塑性変形を強いられたことによって、引張側の包絡曲線のひずみ硬化開始域から最大引張耐力点までの曲線形状が影響を受けて、No. 1 や No. 2 の P - Δ 曲線と形が異なっていることが認められる。試験体 No. 4 では破断伸びも影響を受けて破断が早く生じている。これらは載荷履歴の違いが荷重-変位関係にほとんど影響を与えない場合と、著しく影響を与える場合が出てくることを如実に示している。

繰返し載荷時の引張側では各振幅の第 1 サイクルと第 2 サイクルで曲線の形状に大きな差がみられ (Fig. 11(a)), 荷重-変位履歴曲線の面積から算定した履歴吸収エネルギー量にも影響するが、Fig. 9(a) に見られるように第 2 サイ

*1 非破壊検査法として用いられている X 線同折法^{9),10)}による試験体ひずみ検査の結果を付録 1 に紹介する。

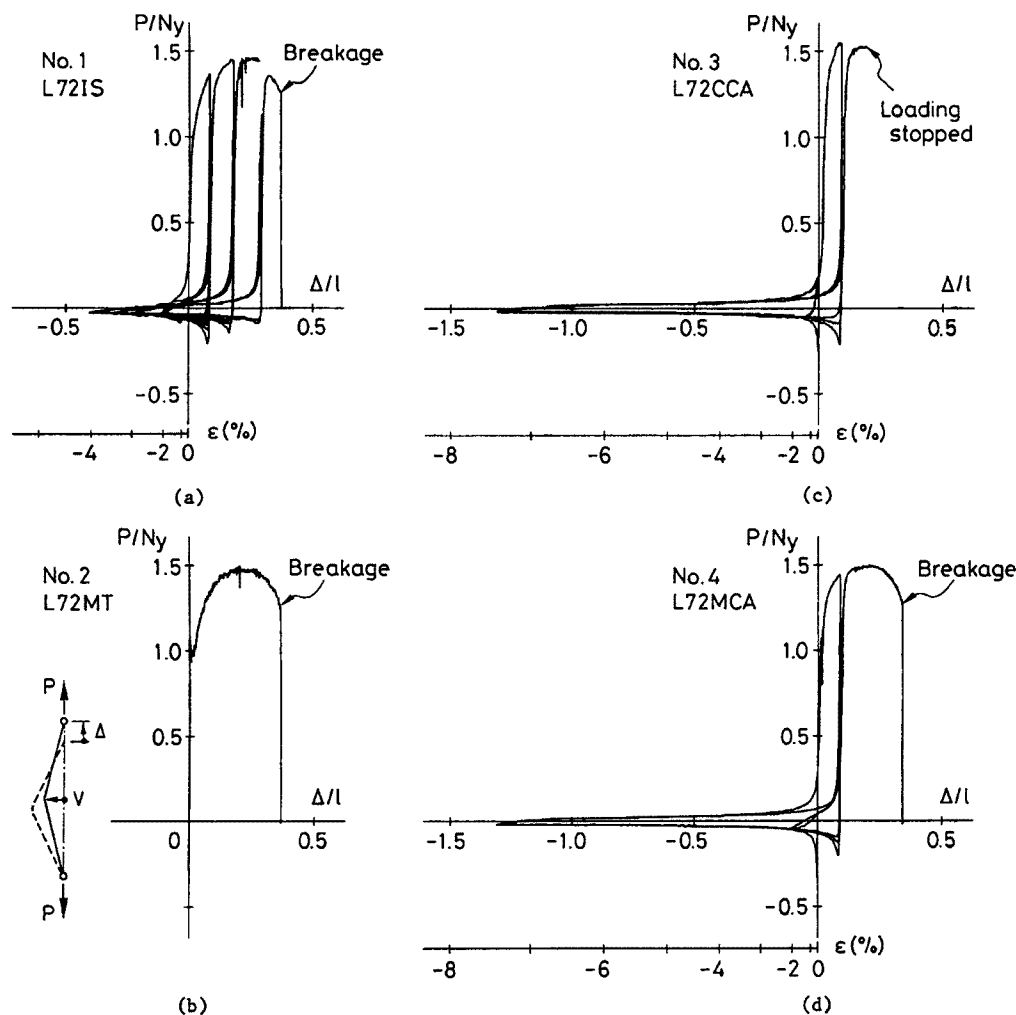


Fig. 6 Load-axial displacement relations for L72 series.

クル以降は大きな差がない。圧縮側では試験体の細長比によって座屈強度がかなり変わる特性をもつが、座屈後は各振幅の履歴ループで最大圧縮耐力に若干の差が見られる以外は繰返しによる差はみられない。破壊性状あるいは履歴損傷を考える場合に、これら引張側、圧縮側それぞれの履歴性状の差をどう捉えるかが問題となろう。

試験体 No. 1 の $P-\Delta$ 関係について、アクチュエータに内蔵されたストローク検出器によるものを描いたのが Fig. 9(b)である。アクチュエータ内蔵のストローク検出器によるものでは、試験部変位によるもの (Fig. 9(a)実線) と比べると試験部変位に载荷装置の弾性変形などが加わって、荷重の増加につれて大きな変形を示すことが認められる。

(2) 圧縮曲げ低サイクル疲労型破壊 圧縮曲げ低サイクル疲労型の破壊は L18 および L09 シリーズの試験体で起こった。本実験に用いた試験体および载荷方法では、次のような破壊性状が観察されたことが特筆される。圧縮荷重は载荷初期に起こる座屈後、降伏耐力の 1 割かそれ以下の値を示し、試験体にはほとんど曲げのみが負荷された状態となっている。しかしわずかな圧縮力の作用でも応力に影響し、中央試験部の曲げ引張側と曲げ圧縮側では凹側変形部の曲げ圧縮側の方が若干厳しい応力ならびにひずみを受けていると見られ、亀裂発生による部材耐力の急激な低下は、すべての試験体で軸方向変位が最大圧縮点から戻る途中

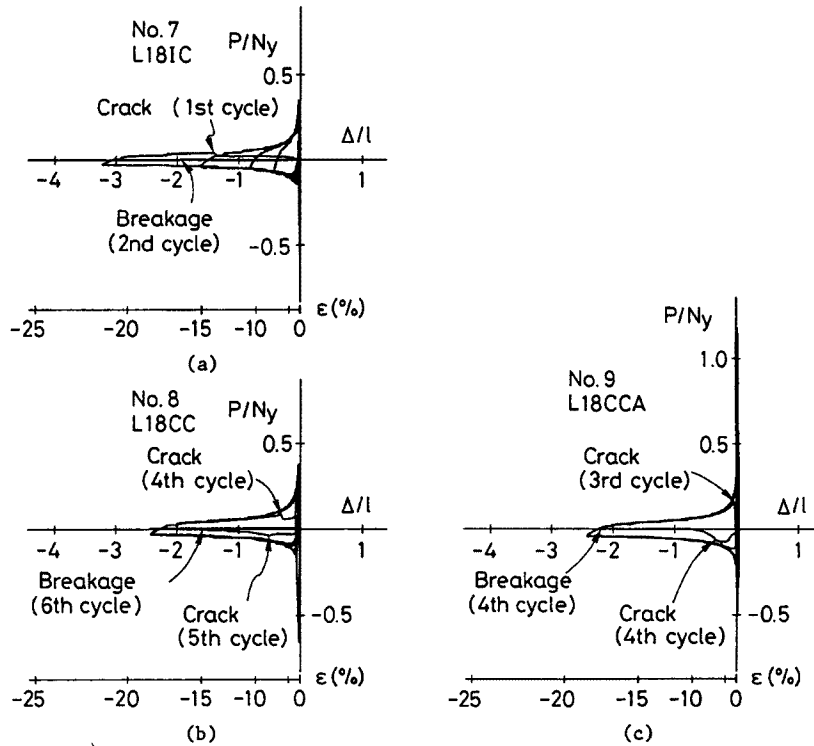


Fig. 7 Load-axial displacement relations for L18 series.

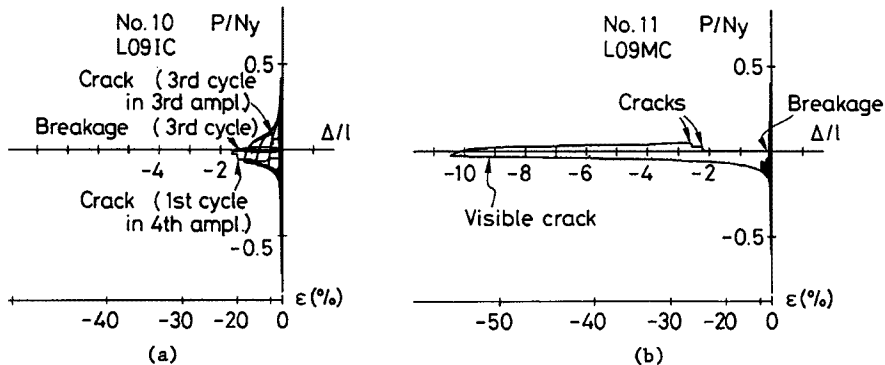


Fig. 8 Load-axial displacement relations for L09 series.

の凹側部が引張られる時に大きな音と共に生じた。その後続く圧縮方向加力では今度は凸側部に大きな亀裂が生じて、部材中央断面は両側面に亀裂損傷をもつことになり、軸方向力は事実上ゼロとなる。目視できる亀裂は上記の耐力低下を伴う亀裂発生の前にも存在するが、両面とも幅方向の中央に現れるのみである。本試験体の場合大きな圧縮変形を与えた時には、曲げ引張側ではポアソン効果によると見られる軸方向伸びによる幅方向の細りが、逆に曲げ圧縮側では幅方向の広がりそれぞれ現れ、全体として板要素表面が鞍型曲面状にたわむ状況を示した。これによってひずみ分布が断面幅方向に様々になっていることが、亀裂の発生が幅方向中央から現れたことと関連していると思われる。急激な耐力低下は亀裂が試験部幅方向全体に現れた時に生じ、同時に大きな音を発生した。

引張変位を与えず圧縮変位のみを繰返し载荷を行った試験体 No. 7 では、Fig. 7 に示すように第 4 変位振幅下の第 1 サイクルでの変位折り返し中で曲げ圧縮側が引き伸ばされる時に大きな音を発生すると共に亀裂が現れ引張耐力が急落した。そのまま軸方向変位をゼロに戻して再び圧縮方向に加力した時には耐力はほと

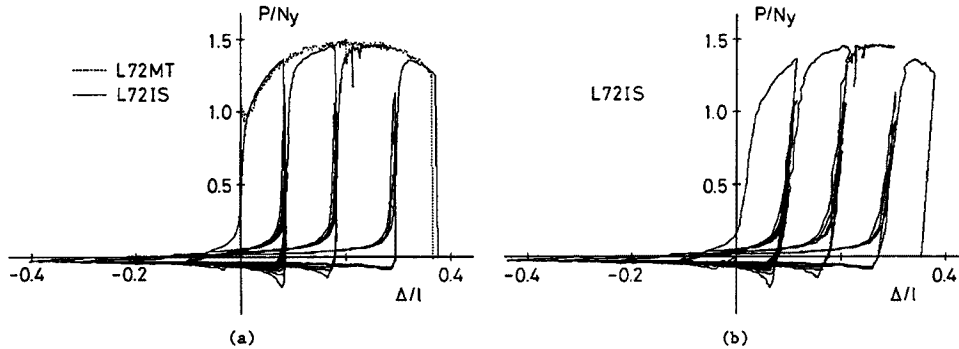


Fig. 9 Load-axial displacement correlation.

んどなく、荷重途中で破断した。これらの経過は、亀裂が現れるまでは破壊前の顕著な兆候もあまり見られず、突然性状が変化したという印象である。このタイプの破壊を論じる場合、構造的な破壊を定義するならば、亀裂が現れ耐力が急落した時点を用いるべきであって、後の破断を指すものではないといえる。

No. 8 は圧縮変形のための定変位振幅繰返し荷重を行ったもの、No. 9 はわずかに引張塑性変位を与えて No. 8 と同じ圧縮変位までを繰返し荷重したものである。個体の材料的なばらつきによる差は当然あると考えるべきであるが、両者の比較ではより厳しい応力履歴を受けた No. 9 の方が早いサイクル数で亀裂ならびに破断を生じていることが認められた。

最も試験部の短い No. 10 と No. 11 では、前者に No. 7 に相当するような漸増圧縮変位繰返し荷重を、後者に圧縮単調荷重に相当するような本装置で荷重可能な限りの非常に大きな圧縮曲げ塑性変形を強いた。注目されるのは No. 11 で、試験部長さの10倍の距離に至る変位まで一方向に圧縮荷重を行うことによって、目視できる亀裂が発生しながらも耐力の急激に落ちることがなかったことで、圧縮変形限界を定義することの難しいことがわかる。この場合にも変位を戻し引張力が作用する過程で最終的な構造的破壊と呼べる状態に達した。

3.3 荷重—横たわみ関係

試験体中央、厚肉部の端部およびピン支持点における横方向たわみ V と荷重 P との関係を Fig. 10 に示す。ピン支持の回転中心における横たわみはほぼゼロであること、ならびに引張荷重第1サイクル時において試験体が横たわみを生じずほぼまっすぐになっているが、荷重を繰返すにつれて引張耐力が漸減し、残留たわみが現れてくることが認められる。また試験体は上下にほぼ対称な変形が生じていることがわかった。試験体 No. 1 の第2振幅域までの各振幅での第1サイクル（実線）と第2サイクル（破線）の曲

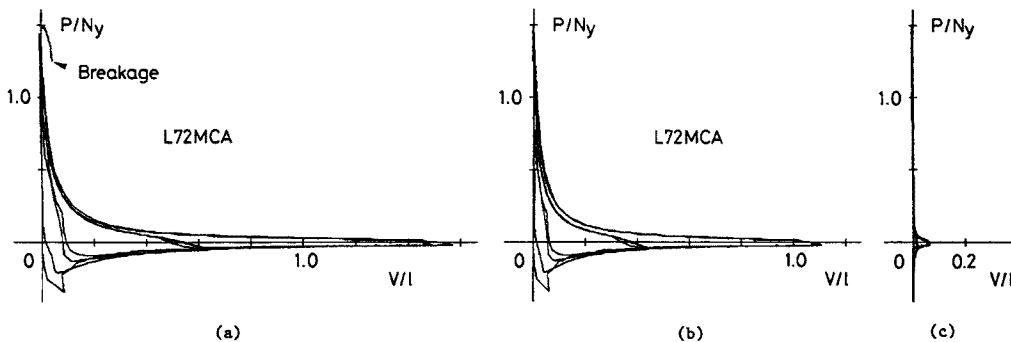


Fig. 10 Load-deflection relations at (a) mid-height, (b) tip of thick part, and (c) pinned support.

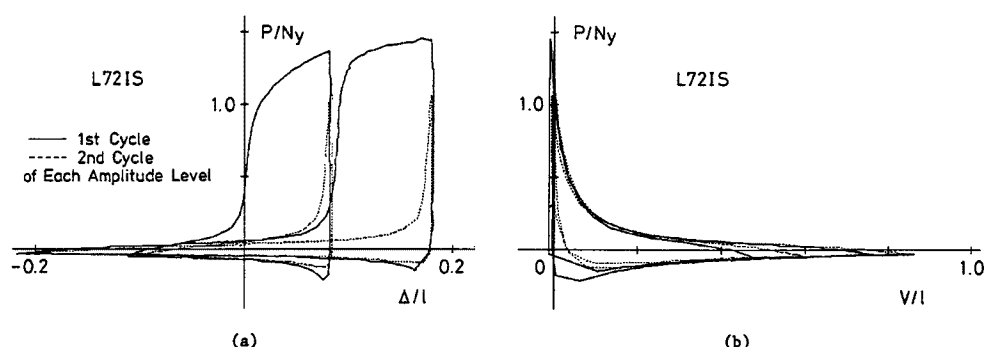


Fig. 11 Comparison of 1st and 2nd cycles in each amplitude level.

(a) Load-axial displacement relation.

(b) Load-midheight deflection relation.

線を比較したものを Fig. 11 に示す。

3.4 荷重—ひずみ関係

試験体の厚肉部分は全载荷過程を通じて弾性挙動を示したことが、ひずみゲージの計測結果から確認できた。

実験時の試験体の変形状態の観察に基づいて、試験部が等曲率曲げ変形を生じ、厚肉部は剛体変位をするとして、中央試験部における断面の最外縁ひずみ ε の大きさを計算^{*2}したものを Figs. 6, 7, 8 の横軸に対応して各図に描き添えた。これによると本実験の場合、試験体 L72 シリーズでは最大圧縮変位を与えた時でもせいぜい 7.5% のひずみが生じた程度で、曲げ圧縮繰返しによる破壊は起こらなかったのに対して、疲労破壊した L18 および L09 シリーズではひずみ値が 15~20% となっていることが知れる。ひずみ値 20% は通常の SS41 材の引張破断ひずみのオーダーであり、材料特性としての引張破断ひずみとの相関が推測できそうである。もちろん断面にひずみ勾配が存在するために縁ひずみ値と材の亀裂や破断とが直接関係するわけではない。また繰返し効果がどのように関わっているかも不明である。しかし縁ひずみのオーダーが 20% 程度となるように設定した载荷によって、ごく低サイクルの疲労破壊を実現させ得たことは重要な結果であるといえる。これより断面要素のひずみ履歴を調べることが、このような塑性破壊性状を明らかにするための次の課題として考えられる。特に今回見られたような凹側部に最初に大きな亀裂損傷が出たことはひずみ履歴を調べることの意義を示唆するものであろう。

3.5 履歴吸収エネルギー

各試験体の荷重—変位履歴曲線で囲まれる面積から算定した累積履歴吸収エネルギー E と繰返し数 f との関係を図 12 に示す。図の縦軸では E を試験部に蓄えられる最大弾性ひずみエネルギー E_0 で無次元化した。Fig. 12(a) 中の鎖線は No. 2 による単調载荷破断時の履歴吸収エネルギー量を示す。試験体 Nos. 1, 3, 4 の累積エネルギーの急激な上昇は各振幅の第 1 サイクルでの引張側履歴性状によるところが大であることを示す。繰返し载荷時の引張破断点におけるエネルギー量が単調载荷時のものに比して大きいことは、損傷の評価を行う際には繰返しによる効果を考慮する必要性のあることを示す。また破断に至っていない No. 3 の方が No. 4 の破断点における履歴吸収エネルギーよりも大きいことから、载荷履歴の影響も考慮に含めるべきであると考えられる。

圧縮側の载荷だけで破断した試験体の場合 (Fig. 12(b), (c)), 各サイクル毎の履歴吸収エネルギーには特に大きな変動もなくほぼ一定の増加を示しており、累積エネルギー量からは破壊前の顕著な兆候が特にあるとは思えない。履歴吸収エネルギー量は構造体の破壊に対して何らかの関わりを持つと考えられるが、このような形で表現する限り、破断もしくは破壊に対して単純で直接的な関係があるようには思えない。しかし

*2 ひずみの計算式の誘導を付録 2 に示した。

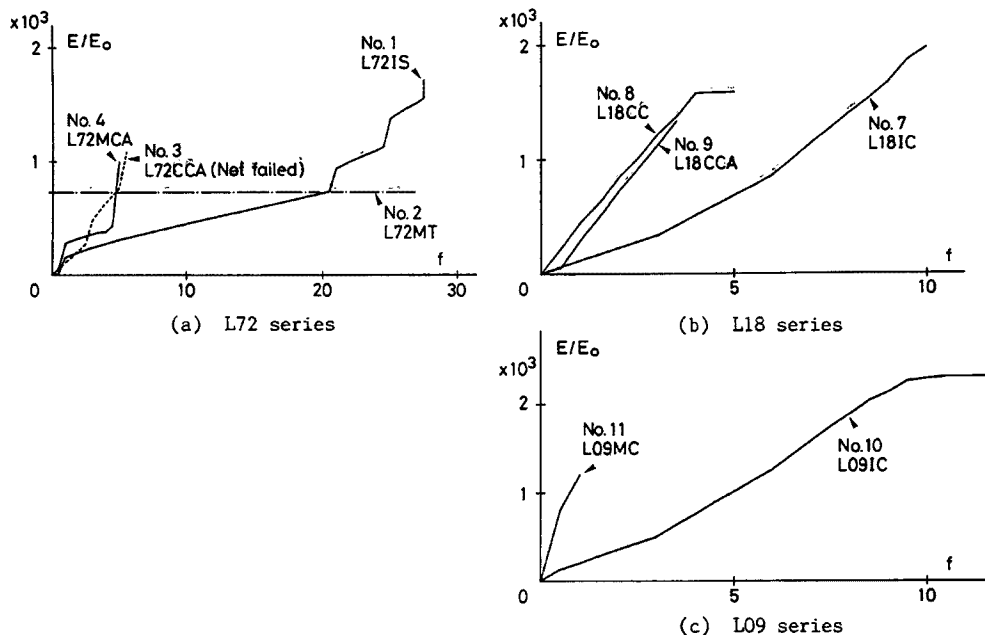


Fig. 12 Absorbed energy vs. number of cycles.

(a) L72 series. (b) L18 series. (c) L09 series.

ながら荷重-変位関係においては亀裂の発生と共に急激な耐力の減少が現れたことから、荷重-変位関係・履歴吸収エネルギー量・載荷履歴といった指標を組み合わせ用いて損傷評価あるいは破壊時期の予測が可能かどうか今後の検討を要するところである。

3.6 今後の研究課題

今回の実験的研究によって十回程度のごく低サイクルで疲労破壊を生じると考えられる領域を探ることができた。この後、特に圧縮曲げ側領域での種々の載荷パターンによる損傷進展過程や破壊性状への影響を詳細に調べることが重要な問題である。まだ現段階では得られた実験データの解析が十分になされていないので、各データに関する詳細な検討の結果は別の機会に報告したい。また構造物の耐震安全性に関する損傷評価の試みを本実験結果に基づいて行っており、これについては文献7), 8)で論述している。

板要素の実験結果と部材レベルの塑性破壊現象との対応を調べることも今後の課題である。構造部材を扱ったこれまでの研究では、ここで扱っているようなごく低サイクルでの繰返しによる破壊を対象としたものはほとんどない。一般に柱などの部材レベルの実験では、圧縮軸方向力を伴う繰返し曲げ加力により、一断面の曲げ引張側では軸方向圧縮応力が減少すると共に、曲げ圧縮側では圧縮応力がさらに増大するため、素材レベルより過酷な応力条件で負荷されることになる状態が考えられる。このような応力条件で、塑性ヒンジならびに局部変形の形成過程に、素材実験による結果だけでは推し量れない局面が現れることになる可能性がある。そこで素材と部材の実験結果の対応関係を調べ、これまで集積されてきた実験データと合理的に関係づける方法を体系化する必要があると思われる。

さらに動的破壊の問題として、地震動による構造物の応答の場合、動的に連続した入力もしくは衝撃的な一過性の入力による動的効果の現れる可能性がある。静的載荷時と衝撃的載荷時とでは降伏点強度などに顕著な差があることがよく知られている。また骨組の振動実験や部材レベルの動的載荷実験で、より特徴的かつ厳しい結果として現れているのは、破壊位置が動的な場合に局所に集中することで、ボルト孔などによる断面欠損部や不良接合部などの構造体最弱部での応力集中の影響とあわせて注目すべき所であろう。なお載荷速度の影響を調べることも今後の研究課題として考慮しており、この場合には現行速度の $10^2 \sim 10^3$ 倍の

高速載荷を行うことによって、地震時の部材の塑性破壊に対する動的効果として今回の研究結果と対応させ得る。これも今回、静的な定速度載荷を行った重要な理由の1つである。

4. 結び

破壊的な地震などによる厳しい繰返し載荷を受けて構造物が数回から十数回程度のごく低サイクルの塑性疲労によって破壊する場合を対象に、鋼板要素が一旦座屈した後で更に圧縮・引張の繰返し加力で破壊に至る過程を実験的に調べ、次の知見が得られた。

- (1) 実験挙動に関しては載荷装置・計測方法とも問題なく、信頼できるデータが得られた。今回の実験的研究によって十回程度のごく低サイクルで疲労破壊を生じると考えられる領域を探ることができた。繰ひずみのオーダーが20%程度となるように設定した載荷によって、ごく低サイクルの疲労破壊を実現させ得た。
- (2) 引張破断型の破壊の場合、単調載荷による軸方向荷重—変位曲線と比較的小振幅の塑性変形領域での繰返し載荷による各振幅第1サイクルの包絡曲線ならびに引張破断点伸びはほぼ一致しており、これらには繰返しによる顕著な効果が見られない。しかし非常に大きな圧縮曲げ塑性変形を受けることによって引張側の軸方向荷重—変位曲線の形状に差が生じることも実験的に観察され、載荷履歴の違いが荷重—変位関係にほとんど影響を与えない場合と、著しい影響を与える場合が出てくることを示した。
- (3) 履歴吸収エネルギー量は構造体の破壊に対して何らかの関わりを持つと考えられるが、構造体の破断もしくは破壊と単純で直接的な関係があるようには思えない。
- (4) 繰返し載荷時の引張側では各振幅レベルで第1サイクルと第2サイクル以降の曲線の形状に大きな差がみられ、履歴吸収エネルギー量にも大きな差が出る。しかし圧縮側では各振幅の履歴ループで最大圧縮耐力に若干の差が生じる以外は繰返しによる顕著な差はない。破壊や履歴損傷を考える場合に、引張側、圧縮側それぞれの履歴性状の差をどう捉えるかが問題となることが指摘できる。また破断点に至るまでの繰返し載荷時の累積履歴吸収エネルギー量は単調載荷時に比べて大きく、損傷や破壊に対する繰返しの効果として考慮する必要性のあることを示している。
- (5) 引張変位を与えない圧縮変位のみ繰返し載荷で破断した試験体では、各サイクルの履歴吸収エネルギー量やその累積量にも破壊に対する顕著な兆候は現れないが、荷重—変形挙動においては亀裂の発生に伴う急激な耐力の減少が現れた。荷重—変形関係・履歴吸収エネルギー量・載荷履歴といった指標を組合わせた損傷評価や破壊時期の予測が可能か、今後の検討を要する。

謝辞

本研究の遂行に当たっては、京都大学防災研究所都市耐震センターの亀田弘行教授と多くの議論の機会を得、研究の動機付けならびに研究内容に関して貴重な助言を得た。また財団法人日本建築総合試験所の若林實所長ならびに京都工芸繊維大学の中村武教授からは実験計画段階で有益な示唆を得た。京都大学防災研究所の赤松純平助教には実験計測装置の考案に積極的に協力して頂き、同研究所都市耐震センター配属の大学院生森田環・北啓之両君には実験開始時期に長時間にわたって手伝って頂いた。京都大学工学部建築学教室の西澤英和助手ならびに同大学院生平野浩二君には、X線回折法による試験体ひずみ探査を眼前で実施し、解説して頂いた。また本報告の第二著者 Ulrich Bourgund が防災研究所に外国人共同研究者として1年半の間、滞在して研究を進めるに際して日本学術振興会による若手研究者招致事業の援助があり、研究経費の一部は昭和63年度文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)(研究代表者岩井 哲：課題番号63750604)に依った。ここに記して、深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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, 昭和63年4月, pp.89-104.

- 2) T. Nonaka and S. Iwai: Failure of Bar Structures under Repeated Loading, Chap. 12 in "Structural Failure", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989, pp.389-433.
- 3) 若林 實・野中泰二郎・小城 修・山本 昇: 繰返し軸方向力を受ける部材の挙動に関する一実験, 京都大学防災研究所年報, 第14号 A, 昭和46年4月, pp.371-381.
- 4) 若林 實・野中泰二郎・中村 武・森野捷輔・吉田 望: 繰返し軸方向力を受ける部材の挙動に関する実験(1), 京都大学防災研究所年報, 第16号 B, 昭和48年4月, pp.113-125.
- 5) 金多 潔・西澤英和: X線応力測定技術の系譜(1) 鋼構造物のX線応力測定への歩みと将来一, 季刊カラム, No. 95, 昭和60年1月, pp.80-86.
- 6) 金多 潔・西澤英和: X線応力測定技術の系譜(2) 鋼構造物のX線応力測定への歩みと将来一, 季刊カラム, No. 96, 昭和60年4月, pp.54-62.
- 7) U. Bourgund, S. Iwai and H. Kameda: A Continuous Damage Index for Seismic Reliability Assessment of Structural Steel Elements, 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, San Francisco, Aug. 1989.
- 8) U. Bourgund, S. Iwai, H. Kameda and T. Nonaka: Damage Assessment of Steel Elements for Seismic Reliability Estimation of Structural Systems, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol. 39, Part 3, 1989 (印刷中).

付録1. X線回折法による塑性変形量の検査

X線の回折像を撮影する最も簡単な方法であるデバイ(Debye)写真法⁵⁾によるSS41材の処女材と2.5%引張材および5%引張材の例を**Photo. A.1**に示す。[1]円環*³⁾上の1つの斑点は1つの結晶の反射像に対応しているので、斑点のパターンからだけでも結晶の粒度や塑性変形量の大きさなどの金属学的な情報を得ることができる。3つの写真の著しい差異は、塑性変形による結晶の格子ひずみや細粒組織の差によるものである。本実験に用いた試験体の载荷後のデバイ写真結果を**Photo. A.2**に示す。**Photo. A.2(a)**は厚肉部、**Photo. A.2(b)**は薄肉部の凹側変形した中央部分を撮影したものである。**Photo. A.1**の材料とは異なるため直接比較することはできないが、ひずみ状態の傾向は知れる。弾性挙動を示した厚肉部では処女材とほぼ同等の斑点が現れているのに対して、薄肉部では**Photo A.1(c)**と同等かそれ以上の塑性変形の度合を示しているように見える。なお試験部の等曲率曲げ変形を仮定して計算した薄肉部のひずみは7~8%を越えており、デバイ写真の結果と対応している。

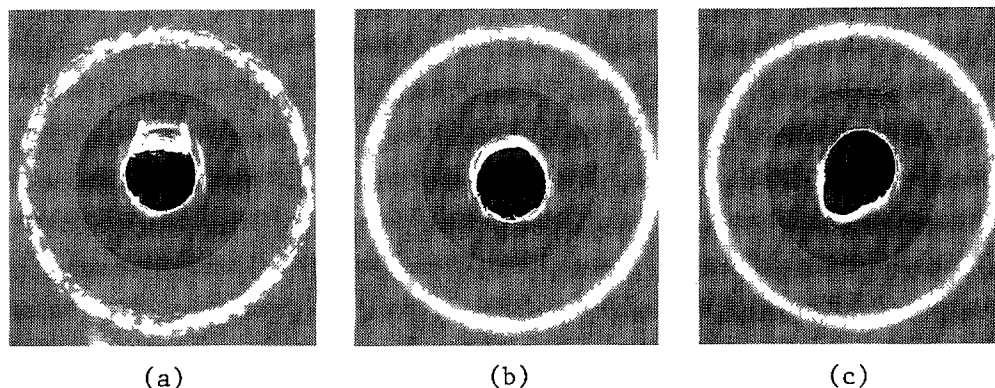
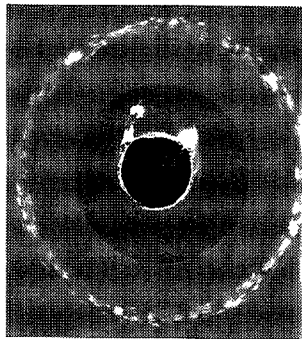


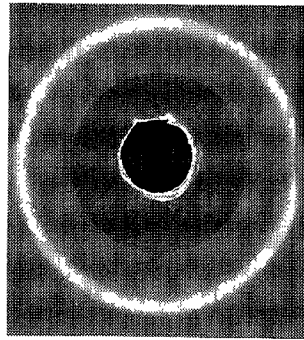
Photo. A.1. Samples of Debye photo.

(a) 0% strain. (b) 2.5% strain. (c) 5% strain.

*³⁾ フィルムの中央には、X線照射用ピンホール治具を挿し込むための穴がけられており、穴周辺が感光しているが検査対象とは無関係である。



(a)



(b)

Photo. A.2. Debye photos of Specimen No. 3.

(a) Thick portion. (b) Thin portion.

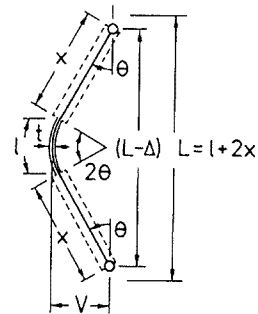


Fig. A.1 Deflected shape.

付録 2. 試験体ひずみの略算法

実験時の試験体の変形状態の観察に基づいて、試験部が等曲率曲げ変形を生じ厚肉部は剛体であると仮定して、中央試験部における断面の最外縁ひずみ ϵ の大きさを計算した。Fig. A.1 に示すように、試験体の全長を L 、中央の長さ l の部分の厚さを t 、両端部の厚肉部の長さを $2x$ とおく。いま材端たわみ角を θ とすると、中央部の曲率は $2\theta/l$ となり、最外縁ひずみは次式で与えられる。

$$\epsilon = \pm l\theta/l \dots\dots\dots \text{付一(1)}$$

また幾何学的関係から軸方向相対変位 Δ (ここでは両端が近づく向きを正とした) ならびに中央横たわみ V は次式で与えられる。

$$\Delta = L \left(1 - \frac{l}{L} \cdot \frac{\sin \theta}{\theta} - \frac{2x}{L} \cdot \cos \theta \right) \dots\dots\dots \text{付一(2)}$$

$$V = x \left\{ \sin \theta + \frac{l}{2x} \cdot \frac{(1 - \cos \theta)}{\theta} \right\} \dots\dots\dots \text{付一(3)}$$