

鋼部材の極低サイクル繰り返し载荷による亀裂発生と 損傷の評価のための有限要素解析

岩井 哲・朴 鍊洙・亀田 弘行・野中泰二郎

FEM ANALYSIS FOR ASSESSMENT OF CRACK INITIATION AND DAMAGE OF STEEL MEMBERS UNDER VERY LOW-CYCLE LOADING

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

Synopsis

This study deals with damage process of steel structural members up to an ultimate cracking state caused by local buckling that occurs under large deformations due to very low-cycle loading. Very low-cycle loading implies load repetitions of the order of a few to twenty cycles including large plastic deformations. To simulate the experimental behavior of steel angles, previously done by the authors, and to make clear the local stress-strain history at the member's critical part, the nonlinear numerical analysis of steel angles under very low-cycle loading was performed by using the FEM program, MSC/NASTRAN. From the results of the numerical study, the significance of finite element method has been established in the description of local behavior and the step-by-step tracing of deformation for steel members under severe cyclic deformations in the post-buckling range. On this basis, a concept is proposed that cumulative plastic strain of critical parts of the steel members subjected to large repeated deformations can be a key index of failure.

1. 研究の背景

本研究は、地震時における鋼構造部材の局部座屈に伴う亀裂の発生という、終局状態に至るまでの過程を対象とするものである。土木・建築構造物に用いられる柱、はりやブレースなどの鋼構造部材の地震時繰り返し载荷下の復元力特性を調べるため、これまで数多くの実験的研究が行われてきた。それらの実験中で、全体座屈が局部座屈を伴って発生し、その局部座屈による大きな塑性変形が生じた箇所においては、数回から二十回程度の非常に少ない繰り返し数で亀裂を生じ、亀裂の進展が部材の破断の主原因となる現象が見られた。また局部座屈箇所において破断に至った地震災害例も報告されている。これを低サイクル疲労破壊と捉える見方がある¹⁾。

低サイクル疲労は、大体 10^4 サイクル以下の繰り返しを対象とする塑性疲労をいうが、この用語は弾性応力下の高サイクル疲労と区別するために用いられてきた。ここで取り扱う繰り返し数はさらに少なく、著者らはこれを「極低サイクル（疲労）破壊」^{2)~9)}と呼ぶことにした。一般に、疲労（fatigue）ないし疲労破壊（fatigue fracture）とは、変動する応力によっておこる破壊をいうが、疲労破壊には次の特性がある。

(1) 巨視的変形を生ぜず亀裂のみが進行し、破面は極めて滑らかである。

(2) 応力振幅 S に対する破壊までの繰り返し数 N の関係が、一般に $S-N$ 曲線またはヴェーラー（Wöhler）曲線といわれる、

$$S = A N^{-m} \quad (1)$$

$$\text{または} \quad S = a - b \log N \quad (2)$$

などの関数形で表される。ここで A , m , a , b は定数である。

(3) 一定の S に対する N のばらつきが大きい。

従って、本研究で扱っているような塑性大変形域での繰返し載荷による破壊を、疲労と呼べるかどうかには、やや疑問があった。

強震時における構造物の弾塑性応答では、繰返し数は数百回を数えることができようが、その中で構造物の損傷に直接関わる大きな塑性変位応答は数が限られ、多くてもたかだか 20~30 回程度と考えられる。このような極少ない繰返し数の範囲内で、亀裂を発生するような現象を把握するには、部材レベルでの全体挙動と、その中の亀裂発生箇所での局所挙動を同時に扱う必要がある。しかし、このような現象に関わる、実験的ならびに解析的研究はまだほとんど手がつけられていないのが現状である。本研究の目的の主とするところは、このような損傷過程を解明し、地震時損傷評価法を導出するための基礎資料を得ることにある。

2. これまでの実験的研究の成果と本解析の目標

著者らは先に、局部座屈部分における亀裂の発生挙動を調べるため、まず鋼板要素を試験体に用い、初期段階で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観察した^{2), 3)}。その結果、板要素の極低サイクル破壊においては、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のあることを確認した。

さらに、全体座屈が局部座屈を伴って生じるような部材の挙動を調べるため、山形鋼を対象として、極低サイクルの軸方向繰返し載荷実験を実施して亀裂の発生する現象を観察した^{4) ~ 9)}。これらの実験的研究から得られた主な成果は以下のようにまとめることができる。

1. 山形鋼部材を試験体とし、軸方向荷重下で全体座屈と局部座屈による曲げ変形を繰返し発生させる極低サイクル載荷実験を広範囲に行い、亀裂発生に至る損傷過程は、従来一般に扱われてきた疲労破壊というよりは、塑性大ひずみ下での延性破壊の様相を示す。

2. 局部座屈による大きな塑性変形が生じた箇所において数回から二十回程度の非常に少ない繰返し数で亀裂を生じる実験挙動は、同じ載荷パターンと変形モードによる実験を行った試験体では、復元力履歴特性・亀裂発生サイクル数・破断サイクル数はほぼ同じとなって、再現性があり、ばらつきはかなり小さい。

3. 極低サイクル載荷による亀裂の進展は引張応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が発生すること、そして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観察された。

4. 実験手法の工夫により試験体の残留ひずみを実測した結果、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 % の範囲にある。このひずみの大きさは載荷履歴・たわみ変形モード・幅厚比・細長比にかかわらず、ほぼ同一であった。

5. 荷重-軸方向変位曲線から囲まれる面積から算定される累積履歴消費エネルギーは、累積消費量がある値を越えた時に亀裂が発生するという訳ではなく、また破断に関わる消費エネルギー量を特定の値で表すことはできない。繰返しに伴う履歴消費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。

本報告では、弾塑性有限要素法 MSC / NASTRAN を用いた詳細な数値解析によって、これら実験における亀裂発生までの試験体の全体挙動・局所挙動を克明に追跡・検証する。さらに実験では測定できなかった局所応力-ひずみの荷重段階ごとの変動などを調べることによって、鋼構造部材の局部座屈に伴う亀裂発生

に関わる要因とその効果を明らかにする。ここで実行した解析プログラムには亀裂の発生・伝播に関する数値計算は含まれていない。従って実験における亀裂発生以後の挙動を、本解法で議論することは無意味である。しかし、亀裂発生以前については充分解析可能であり、両者の限界状態としての亀裂発生に関わる物理的挙動を推定するのに有効であると考ええる。これより本解析では、実験による亀裂発生サイクルに到るまでの繰り返し挙動を、弾塑性連続体モデルで解析的に追跡することで、亀裂発生に関わる要因とその効果を調べるというアプローチをとっている。

なお本報告は、第二著者が京都大学大学院工学研究科博士後期課程土木工学専攻在学中ならびに防災研究所研修員在籍中における研究の成果をまとめ、学位請求論文として京都大学に提出したもの¹⁰⁾の中から、関連部分を基にして手を加えたものである。

3. 有限要素解析による山形鋼部材の極低サイクル破壊挙動の追跡

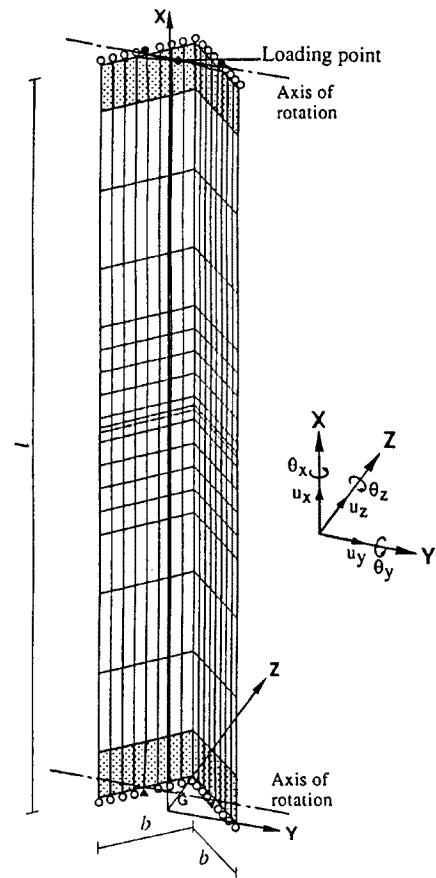
3.1 解析方法

(1) 有限要素解析プログラム

ここで解析の対象としたのは、圧縮载荷により全体座屈を生じると同時に、局部座屈変形を伴い、その後、大きな塑性変形の繰り返しを受ける山形鋼部材である。このような部材の弾塑性挙動は、材料非線形ならびに幾何学的非線形を考慮した有限要素法を適用することにより追跡できる。本解析には汎用構造解析プログラム MSC/NASTRAN の version 66 に用意されている SOL66 (材料および幾何学的非線形解析) を利用した。数値計算には、京都大学大型計算機センターの主システム Fujitsu M-1800 を用いた。

(2) 有限要素モデル

解析した山形鋼部材の有限要素モデルならびに基本座標系を Fig. 1 に示す。解析モデルは、実験に用いたものと同じ山形鋼 L-40×40×3 および L-40×40×5 を模擬したものである。モデルは上下端で、断面重心を通る弱軸 (Y 軸) 回りの回転を自由とする両端ピン支持としている。両端ピン間の材長 l は 318 mm で一定としている。材の細長比は約 40 である。構造モデルには、膜-プレート曲げアイソパラメトリック要素である四辺形面要素 (QUAD 4) を用い、材端载荷点近傍において一部に三角形面要素 (TRIA 3) を用いた。アイソパラメトリック要素とは、要素の形状を表す関数と変位関数が同じであるような要素で、この場合座標変換と変位関数が全く同じ変換に従う。これらの要素は、厚肉シェルを模擬でき、曲げに対しては厚さ方向の 5 点で応力が算定され、非線形材料にも適用可能である。QUAD4 は要素内で曲率が線形変化すること、TRIA3 はひずみと曲率が一定であることが仮定されている。連結する節点の変位は 6 自由度を持つが、プレート要素は法線回りの回転に対して拘束を受けるものと与えられ



[Note] Boundary conditions for symbols (in global coordinate)
 ▲ ; only θ_y is free
 ● ; u_x & θ_y are free
 ○ ; u_x, u_z & θ_y are free

Fig. 1 Finite element idealization of steel angle.

ている。**Fig.1** で、モデルの両端のドットを施した要素は、実験では鋼製ブロックではさまれて補剛した部分で、弾性剛性、降伏強度ともに大きい値を与え、剛体に近い挙動をとるものとした。モデルの各寸法は、実験に用いた試験体の計測寸法を参照して、**Table 1** のように決めた。

(3) 材料特性の仮定

材料特性としては、**Fig. 2** に示す移動硬化型の bilinear 応力-ひずみ関係を与えた。塑性域における単軸応力-ひずみ曲線の傾き E_t を、ヤング係数 E_s の $1/100$ とした。材料定数には、降伏応力 σ_y として実験で使用了 SS400 相当材で測定した降伏応力の平均値 349N/mm^2 を、ヤング係数 E_s は 206kN/mm^2 、弾性域でのポワソン比 ν は 0.3 を与えた。また von Mises の降伏条件を用いた。

一般に、部材の履歴挙動の解析精度に及ぼす材料構成則の影響は大きく、ひずみ硬化域に入るような解析では、構成則の精密なモデル化が必須である。しかしながら、本解析では結果的に $\pm 20\sim 30\%$ のひずみ域での応力の繰り返しを受けることになるが、このような非常に大きなひずみを受ける鋼材の繰り返し応力-ひずみ関係を調べた研究はほとんど見当たらないのが現状である。**Fig. 3** は穂積ら¹¹⁾ が実験的に調べた冷間成形角形鋼管 STKR400 材の繰り返し引張圧縮試験による応力-ひずみ履歴曲線である。ここで座標軸は公称応力と工学ひずみで示されている。これは、非常に大きなひずみ域での鋼材の繰り返し応力-ひずみ関係を調べた数少ない例であるが、まだ一般化できるほどにはデータが揃っていない。本研究で与えた構成則は、1 次近似の範囲を出るものではないが、これによると bilinear 応力-ひずみ関係の仮定もそれほど無理なものではないと考えられる。より精密な解析のためには、Bauschinger 効果ならびに等方硬化も含んだ履歴構成則モデルが想定されるべきであろう。

(4) 載荷方法の設定

数値解析における載荷条件も、実験と同様に、**Fig. 1** の載荷節点の材軸 (X 軸) 方向相対変位を段階毎に与えて設定した。繰り返し載荷パターンは **Fig. 4** に示す (1) 圧縮域・定変位載荷 LC 型、(2) 圧縮引張交番・漸増変位載荷 AI 型、(3) 圧縮引張交番・定変位載荷 AC 型、(4) 引張域・定変位載荷 TC 型の全部で 4 種類である。ここで変位、ひずみならびに荷重、応力は、すべて引張を与える方向を正としている。解析した繰り返し回数の総数は、基本的に、実験で肉眼による確認ができた亀裂の発生サイクル数までとした。

実験では、**Fig.5** に示す正たわみモードと負たわみモードの 2 種の座屈たわみ変形が観察された。実験においては、材端の載荷点で $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 程度の小さな偏心を与えることによって座屈たわみ変形の発生方向を制御した。本解析においても全く同様の方法をとった。すなわち、載荷節点を断面の重心から Z 軸方向へ、**Table 1** に示す偏心量 e だけずらせた。なお上下材端では、同じ偏心を与えている。

実行した数値計算は全部で 6 ケースで、山形鋼 L-40 $\times 40 \times 3$ を用い正たわみモードとなる繰り返し載荷パ

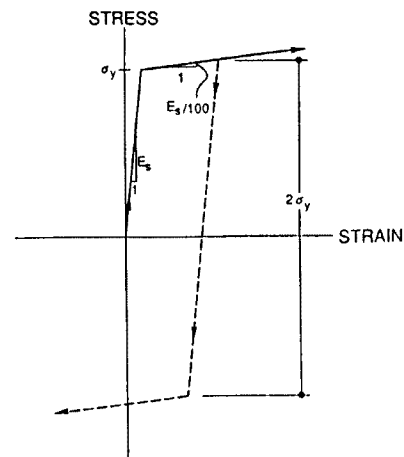


Fig. 2 Assumed stress-strain relation for elasto-plastic material (bilinear Kinematic hardening).

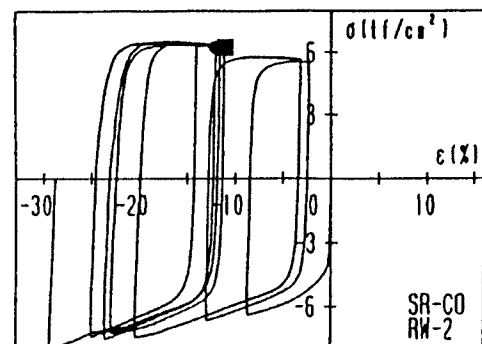


Fig. 3 Experimental curve of stress-strain relation¹¹⁾.

Table 1 Models and results of main analysis

Model name	Angle type	Thickness t (mm)	Length l (mm)	Width b (mm)	Poisson's ratio ν	Yield stress σ_y (N/mm ²)	Loading pattern	Eccentricity e (mm)	Deflection mode	No. of cycles	Maximum absolute strain of mid-critical element	
											Concave side ϵ_{comp} (%)	Convex side ϵ_{tens} (%)
L3CP	L-40x40x3	2.66					LC	-0.5	Positive	8	-26.5	24.8
L5CP	L-40x40x5	4.56					LC	-0.5	Positive	12	-29.5	21.6
A3IP	L-40x40x3	2.66	318	40	0.3	349	AI	-0.2	Positive	8	-15.0	25.7
A3CP	L-40x40x3	2.66					AC	-0.2	Positive	8	-21.3	33.1
T3CP	L-40x40x3	2.66					TC	+1.0	Positive	8	36.5	-
T3CN	L-40x40x3	2.66					TC	-0.5	Negative	8	26.2	-

Table 2 Models and results of preliminary analysis

Angle type	Thickness t (mm)	Length l (mm)	Width b (mm)	Poisson's ratio ν	Yield stress σ_y (N/mm ²)	Eccentricity e (mm)	Deflection mode	No. of cycles	No. of elements	Buckling load P_{cr}/N_y	Maximum absolute strain of mid-critical element	
											Concave side ϵ_{comp} (%)	Convex side ϵ_{tens} (%)
L-40x40x3	2.52	300	40	0.3	336	-0.5	Positive deflection mode	0.5	154	-0.92	-10.1	6.4
									230	-0.92	-17.1	10.8
									306	-0.91	-25.4	15.5
									466	-0.92	-23.3	14.2
L-40x40x3	2.52	300	40	0.3	336	+0.5	Negative deflection mode	0.5	154	-0.93	-6.9	-4.9
									230	-0.92	-9.9	-7.8
									306	-0.92	-12.6	-10.6
									466	-0.92	-13.0	-10.5

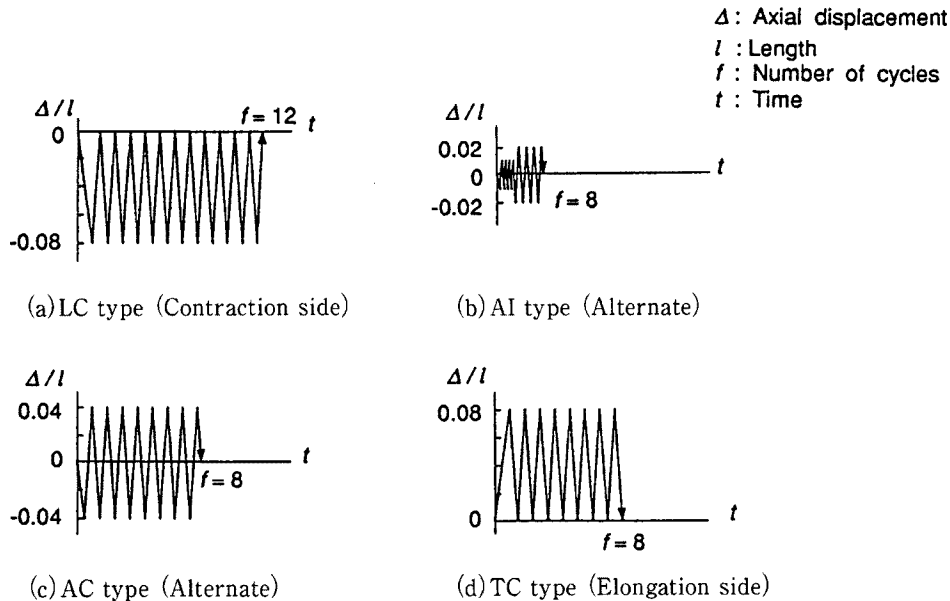


Fig. 4 Loading patterns.

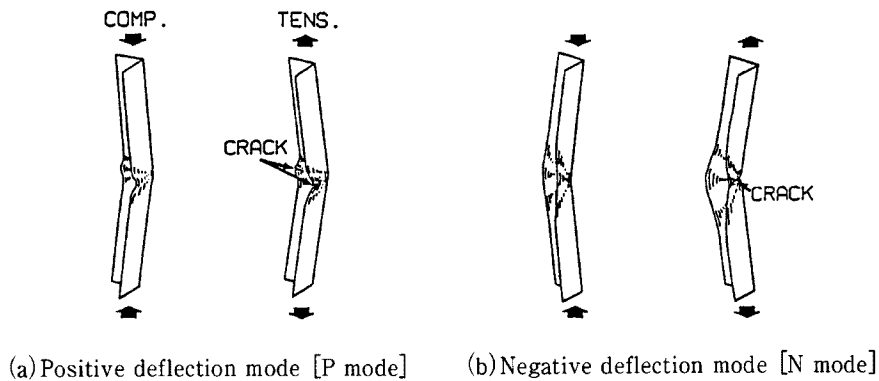


Fig. 5 Deflection modes and cracking patterns.

ターン 4 つのケースと、負たわみモードの引張域・定変位 TC 型载荷の 1 ケース、および山形鋼 L-40×40×5 を用いて正たわみモードとなる圧縮域・定変位 LC 型载荷の 1 ケースである。

3. 2 要素分割数の検討

繰り返し载荷下での履歴挙動の解析に先立ち、準備計算として、全体変形、荷重-軸方向相対変位関係、ならびに局所ひずみの大きさに及ぼす要素分割数の影響に関する検討を行った。有限要素モデルは、対象とした構造体の解析精度を直接に支配する最大の要因である。有限要素解の精度は要素の分割数を増すこと、あるいは高次の要素を採用することにより、向上させることができる。しかし反面、データの処理、計算時間からの制限を受けることになる。ここでは Table 2 および Fig. 6 に示した要素分割の異なる 4 つのモデルに対して、1 方向圧縮载荷を行い、山形鋼部材の弾塑性挙動における解析解の差異を調べた。4 モデルの内、154 要素モデル、230 要素モデル、306 要素モデルの 3 つは材長方向に 19 分割し、断面方向に片脚をそれぞれ 4, 6, 8 分割したものである。466 要素モデルは材長方向に 29 分割し、断面方向に片脚を 8 分割

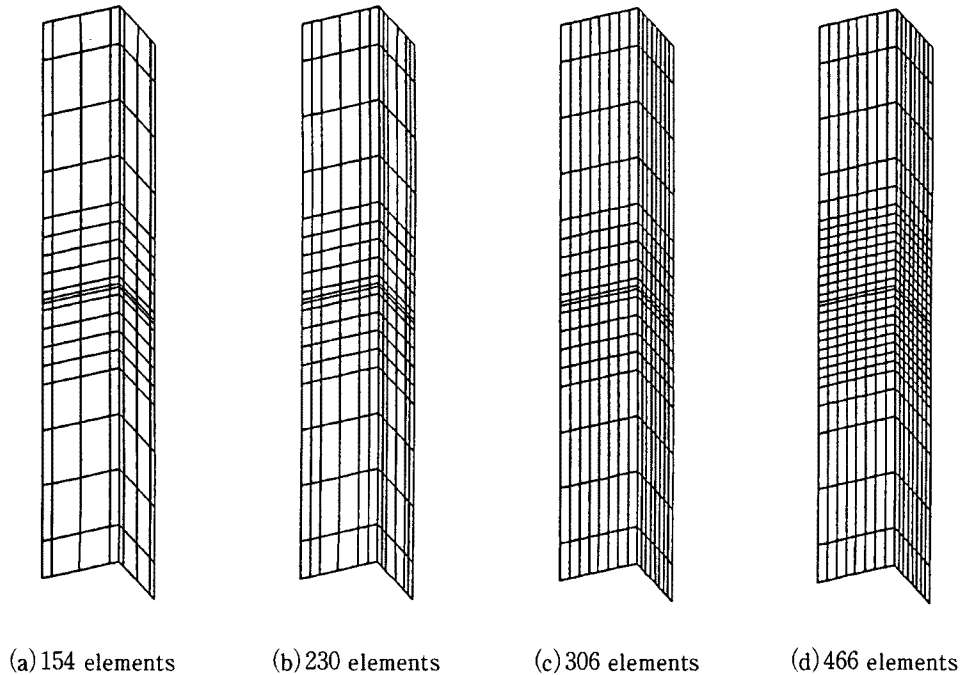


Fig. 6 Models for preliminary analysis.

したものである。これらのモデルの要素分割は、実験における全体座屈・局部座屈などの部材変形状況の観察に基づいているだけでなく、実験で計測した変位やひずみなどの位置との対応をできるだけ取れるように設定したため、要素分割の自由度は幾分制限されている。

(1) 部材変形状況

軸方向相対変位 Δ が材長 l の8%となるまで圧縮载荷した段階での4つの分割モデルにおける正たわみモードと負たわみモードの部材変形状況のそれぞれの比較をFig. 7に示す。全体変形ならびに局所変形は、正たわみモード・負たわみモードとも、要素数の最も少ない154要素モデルを除くと、残りのモデルでは大きな差異はない。

(2) 荷重-軸方向相対変位関係

荷重-軸方向相対変位($P-\Delta$)関係を正たわみモードの場合と負たわみモードの場合に分けて、Fig. 8に示した。前述のように、若干の偏心 $e = -0.5\text{mm}$ (正たわみモード時)あるいは $e = +0.5\text{mm}$ (負たわみモード時)を与えているが、座屈荷重に相当する最大圧縮荷重 P_{cr} の降伏軸力 N_y に対する大きさは、Table 2にも示すように、どちらのたわみモードにおいても要素数の違いによる差異はほとんど見られない。しかし、荷重-軸方向相対変位関係の座屈以後の下降部では、306要素モデルと466要素モデルとでは両たわみモードともほとんど差が見られないが、これらに比べると154要素モデルと230要素モデルの2つは明らかな差を生じている。

(3) 局所ひずみの分布

本解析で重要なポイントとなる局所ひずみについて、材軸方向分布状況をFig. 9に描いた。また最大圧縮変位点 $\Delta/l = -8\%$ での中央断面におけるひずみの最大値と最小値とをTable 2に示した。ここではL形断面の凹型変形部ならびに凸型変形部の、それぞれの側での縁ひずみを ϵ_{comp} 、 ϵ_{tens} と記した。部材中央のひずみの集中の度合ならびにひずみの大きさからは、上記の(2)と同様に、306要素モデルと466要素モデルとが分割数に拘わらずほぼ同程度の解を与えていることがわかる。

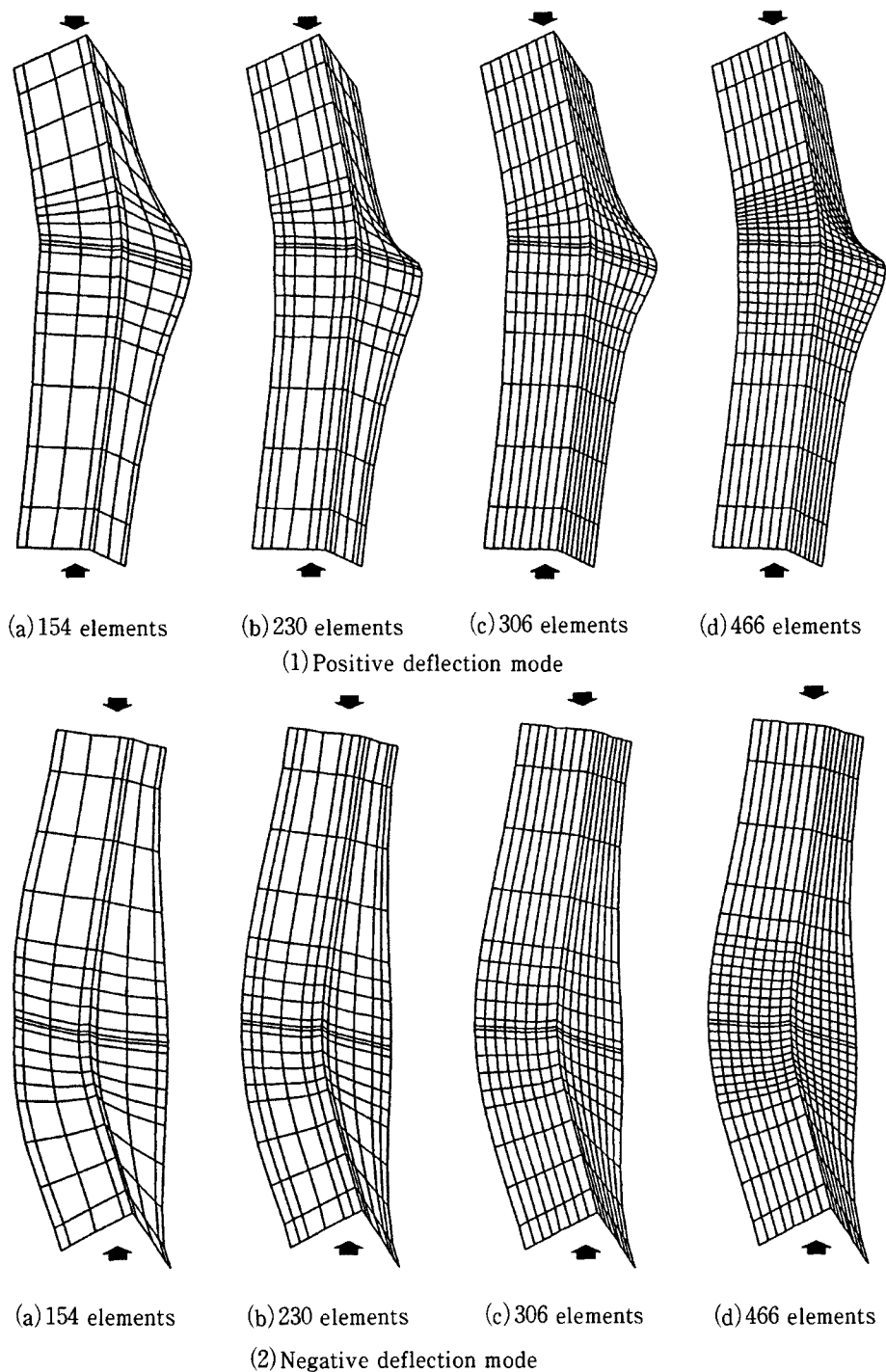


Fig. 7 Deformed shapes according to stepwise prescribed displacement loading.

以上、3つの観点からの考察により、次節の繰り返し挙動の解析には306要素モデルを使用することが適当であると判断した。

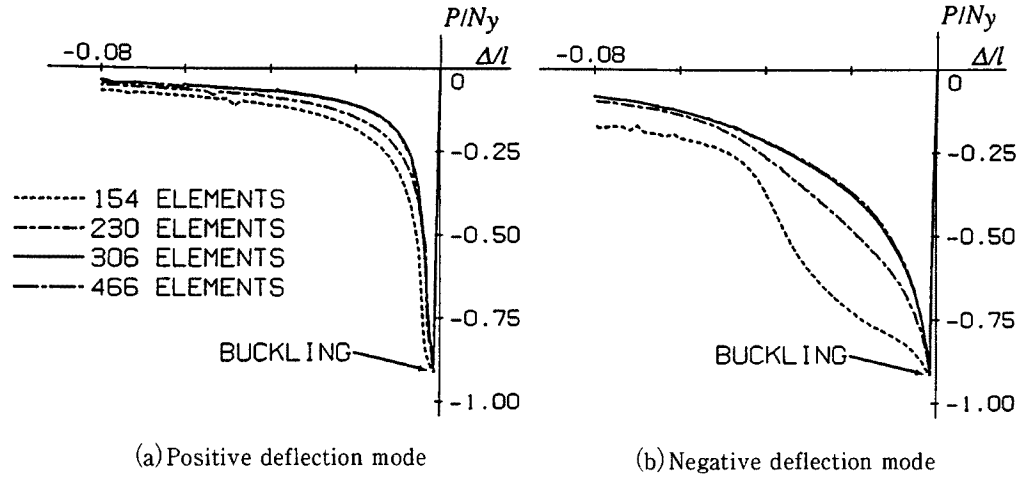


Fig. 8 Load-axial displacement relations.

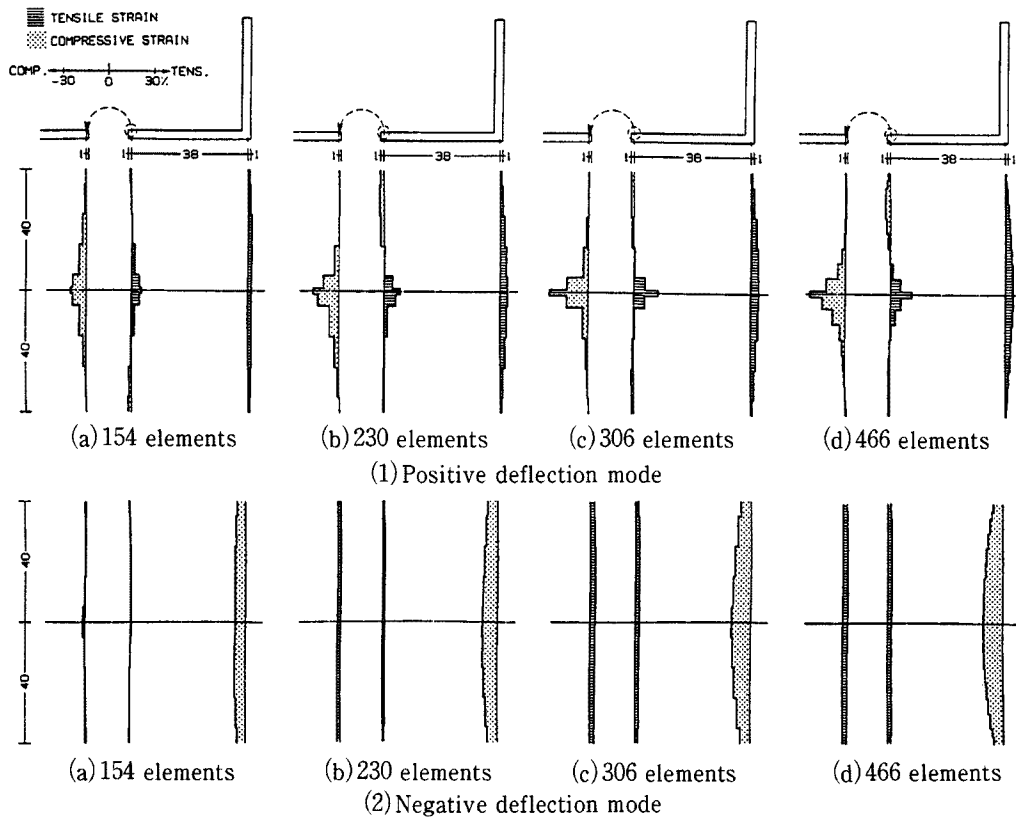


Fig. 9 Longitudinal distribution of strain at $\Delta/l = -0.08$.

3.3 解析結果と考察

3.2節の考察を基に、4種の要素分割モデルの中から、最もふさわしいと考えられる306要素モデルを採用し、実験と同様の繰り返し载荷を数値計算で行って、実験挙動の追跡を行った。なお数値計算は、1モ

デルの全載荷過程を 20 回程度に分割して実行した。1 モデルの計算終了までの全 CPU 時間は 3 ～ 7 時間であった。

(1) 部材変形

正たわみ変形モードの L5CP モデルと負たわみ変形モードの T3CN モデルに対する部材変形状況を Fig. 10 に示す。正たわみ変形モードの他のモデルも変形状況はほぼ同様で、軸方向の圧縮変位载荷によって、全体座屈と共に部材中央の両脚部に局部座屈変形を生じる。軸方向変位を再度 0 (初期状態) に戻しても部材中央には曲げ塑性変形が残っている。これによって部材中央の脚部内側要素はさらに引張られる状況になることがわかる。負たわみ変形モードを生じさせた場合では、両脚の交差部 (稜角部) 外側を曲げ圧縮側とする凹型変形が生じ、それに伴って両脚のなす角度が直角から大きく広げられている。この場合も、軸方向変位を再度 0 に戻しても、部材中央は塑性変形が残ったままになっている。

(2) 復元力履歴曲線

解析で得られた荷重-軸方向変位履歴曲線を、それぞれ対応する実験曲線と比較して Figs. 11 - 16 に示す。Figs. 11 - 14 は、圧縮载荷から開始したもので、座屈荷重は実験値とかなり類似した結果を得ている。解析による座屈荷重の大きさの違いは、材端偏心量のみによると考えてよい。座屈後の耐力の下降部の形状、荷重反転による引張载荷時の耐力の上昇の具合、さらに圧縮・引張各領域での繰返しに伴う耐力劣化性状など、どの载荷パターンのモデルのいずれの部分と比較しても、全体として解析結果は実験挙動をきわめてよく捉えている。このことは、弾塑性有限要素解析により、亀裂発生直前までの試験体の全体挙動・局所挙動を克明に追跡できることを示しているといえる。一方、载荷中に引張降伏変形を受けた Figs. 13 - 16 の場合では、引張载荷による降伏伸び変形を受けた後、荷重を反転して圧縮载荷した場合の最大圧縮耐力は、実験に比べて解析の方がより高い傾向にある。これは、繰返しに伴う圧縮耐力の劣化性状にも違う傾向となって若干現れている。これは解析で、材料構成則を bi-linear 型に仮定しているため、実際には圧

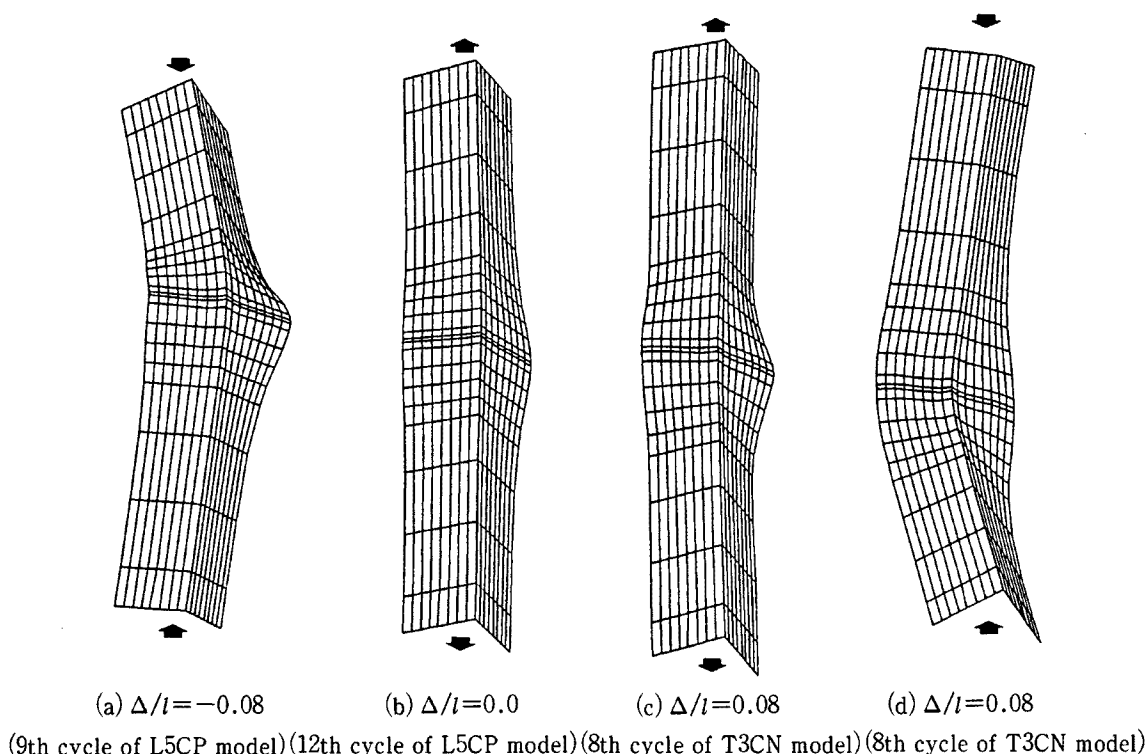


Fig. 10 Deformed shapes under stepwise enforced displacement loading.

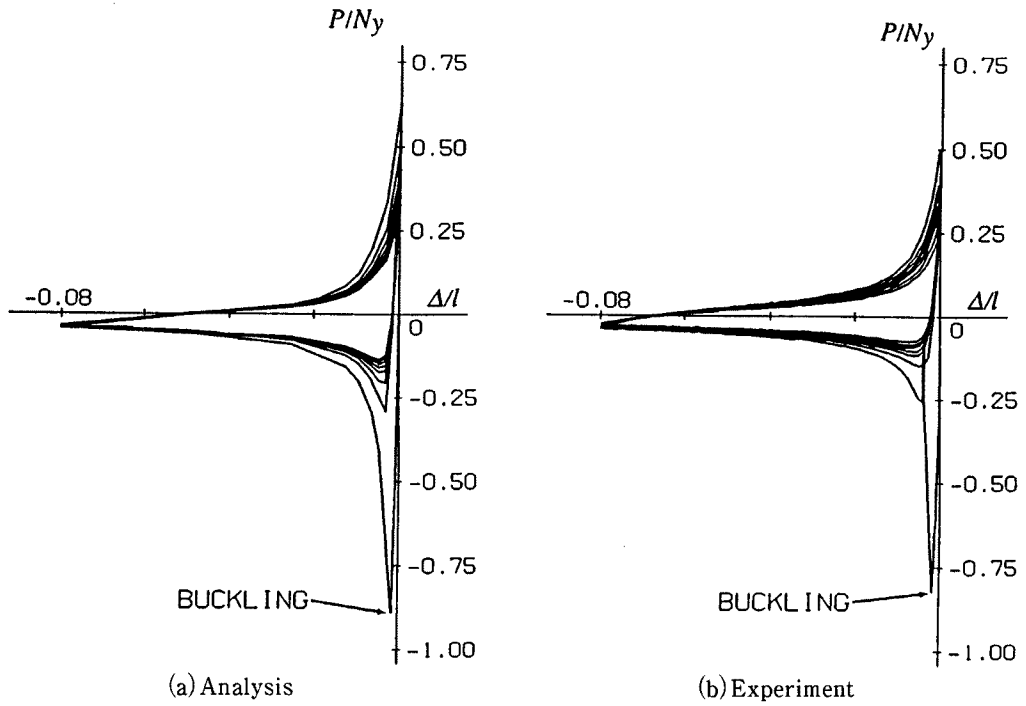


Fig. 11 Load-axial displacement relations (L3CP model).

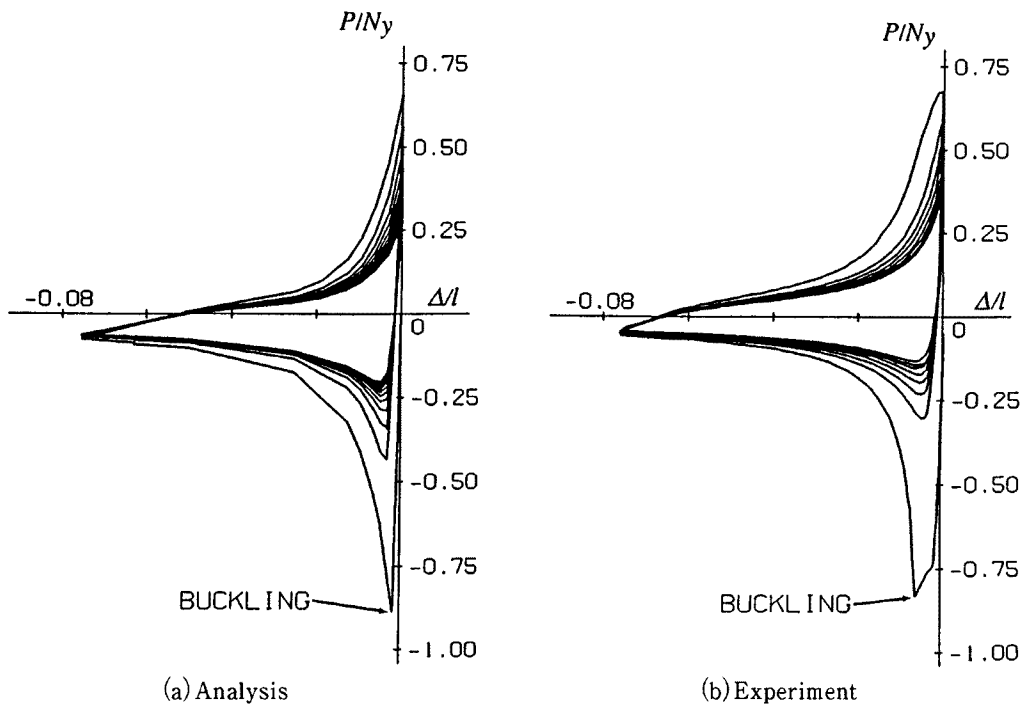


Fig. 12 Load-axial displacement relations (L5CP model).

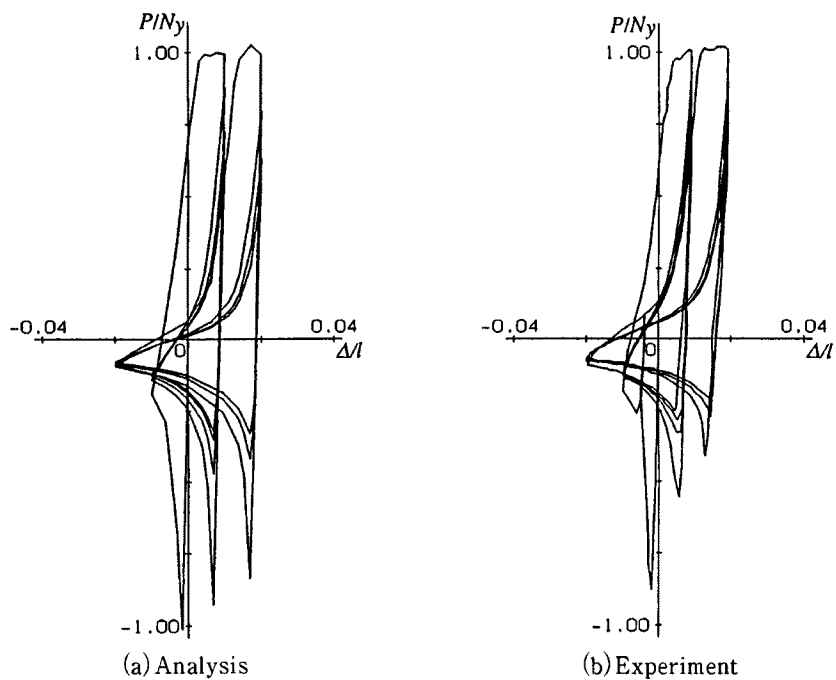


Fig. 13 Load-axial displacement relations (A3IP model).

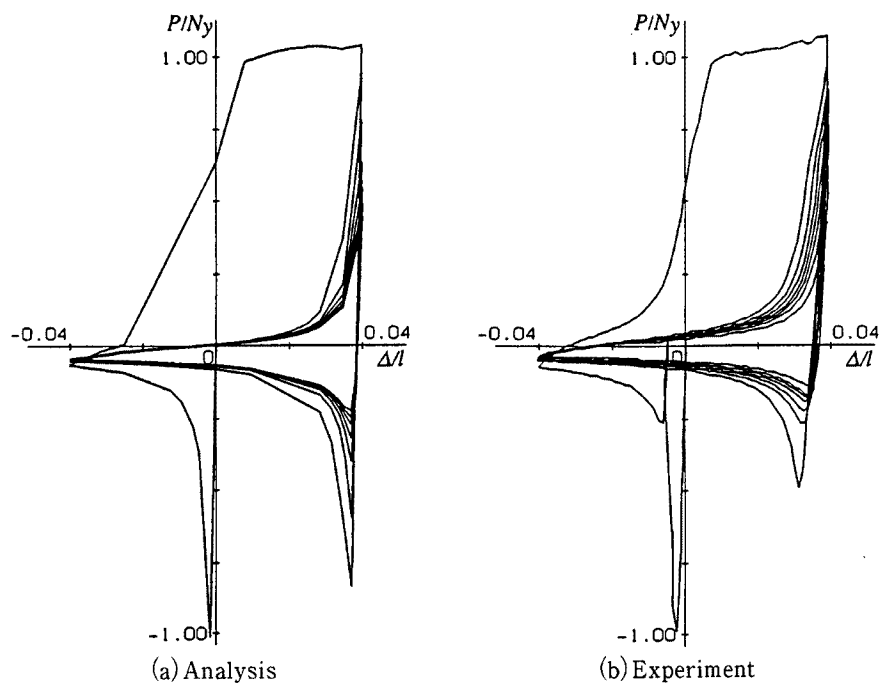


Fig. 14 Load-axial displacement relations (A3CP model).

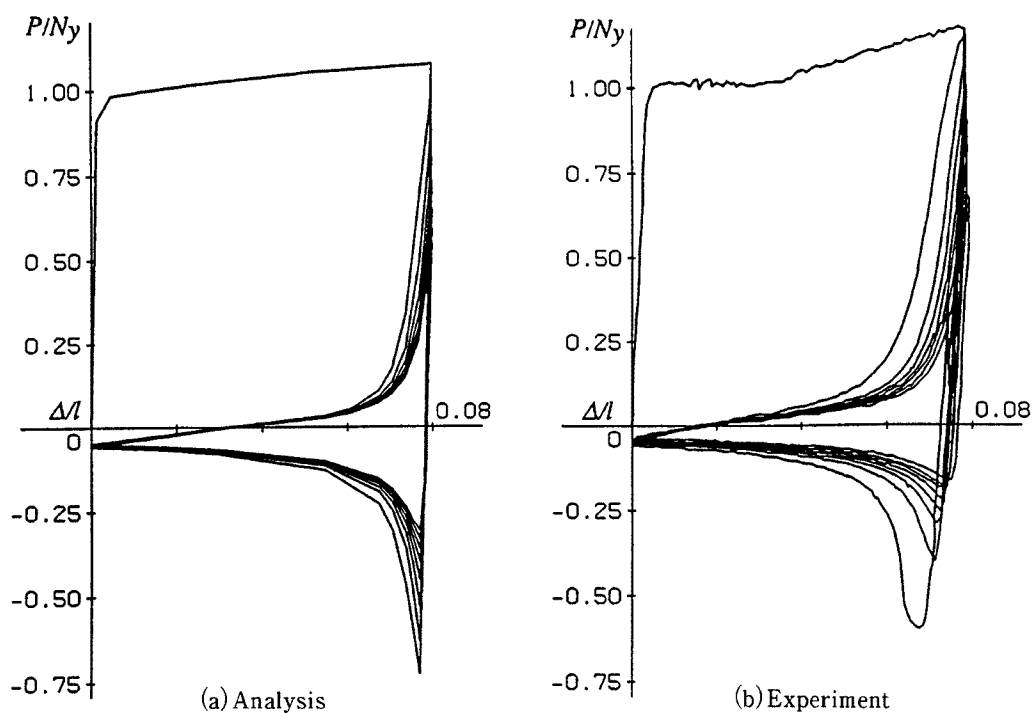


Fig. 15 Load-axial displacement relations (T3CP model).

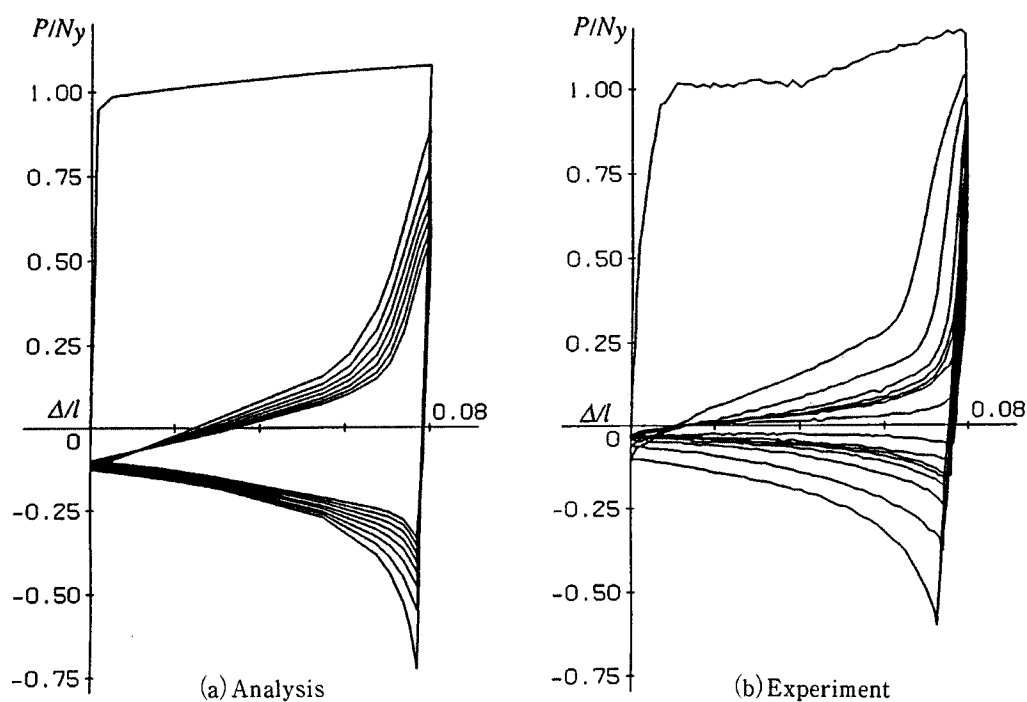


Fig. 16 Load-axial displacement relations (T3CN model).

縮軟化が早く始まることと差のあることが原因していると考えられる。また解析では、モデルが引張降伏応力を受ける場合には実験で見られるよりも更に真直な要素に戻る状態が繰り返されることも影響しているかもしれない。

(3) 軸ひずみの材軸方向分布

全体座屈と局部座屈による部材中央での変形の集中は、軸方向ひずみの局所的な増大を引き起こす。載荷変位の最大点と最小点における、山形断面の脚端部の内側縁・外側縁と、隅角部要素外側ひずみの材軸方向分布を **Figs. 17, 18** に示す。**Fig. 17** は解析結果と実験終了後における残留ひずみ分布との比較を示したものである。ここでハッチを施した部分は引張ひずみを、ドットを施した部分は圧縮ひずみを表す。部材の中央の局部座屈変形を受けた部分で、軸方向ひずみの集中している状況が、実験による亀裂発生以後の残留ひずみ分布とよく対応している。なお、この L5CP 試験体の実験では第 9 サイクルで脚端部に亀裂が確認されたが、亀裂発生箇所では応力の再配分が生じ、これがたわみ変形にも影響するため、隅角部外側縁のように、本来引張ひずみを受けていた部分にも圧縮残留ひずみが生じている。しかし特に定変位振幅載荷では亀裂を生じた部分が、さらに絶対量の大きな圧縮ないし引張ひずみを受ける可能性は少ないため、亀裂発生時から実験終了した残留ひずみ計測時まで変形・ひずみ性状に大きな変化はないと考えられる。従って、仮に実験時と同じ繰り返しサイクル数で亀裂が発生すると設定した場合の、局所ひずみの（絶対値の）最大の大きさは、**Table 1** に示すように、定変位振幅載荷では 21～37 % と算定される。これらの大きさはまた実験結果と同様に載荷パターンに拘わらずほぼ同じオーダーであることがわかる。

但し、引張載荷を受けた場合 (T3CP) の解には、第 1 サイクルで一様引張を受けるべき部材であるにも拘わらず、部材中央において変形の集中が見られている点でむしろ解析上の問題があると考えられる。

(4) 局所の応力-ひずみ履歴性状

部材中央断面で最もひずみ変動が大きい要素の縁応力-ひずみ関係を **Fig. 19** の各 (a) 図に示す。これらの応力-ひずみ履歴は、正たわみモードでは、局部座屈変形した脚端部要素について、曲げ引張縁 (外側縁) と曲げ圧縮縁 (内側縁) の状況を表し、負たわみモードでは、全体座屈した部材の脚交差部の曲げ圧縮縁 (外側縁) の状況を表したものである。また **Fig. 19** の各 (b) 図は、ひずみと繰り返し数との関係から、ひずみ変動の経過を示したものである。図 (b) 中で太線で表示した載荷段階は、実験において亀裂が肉眼で確認できたサイクルを示している。

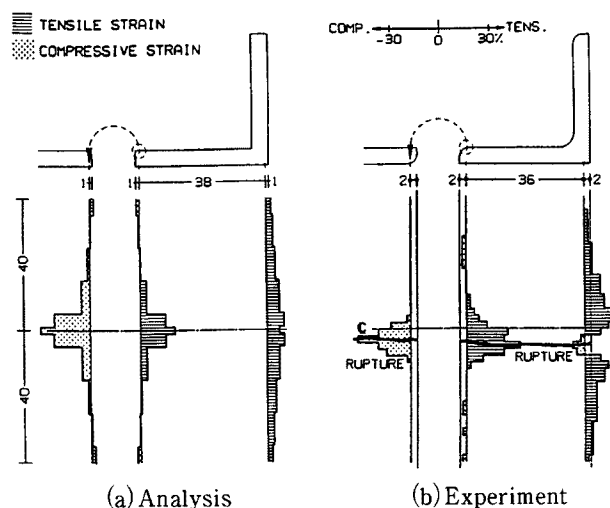


Fig. 17 Comparison of strain distributions (L5CP model).

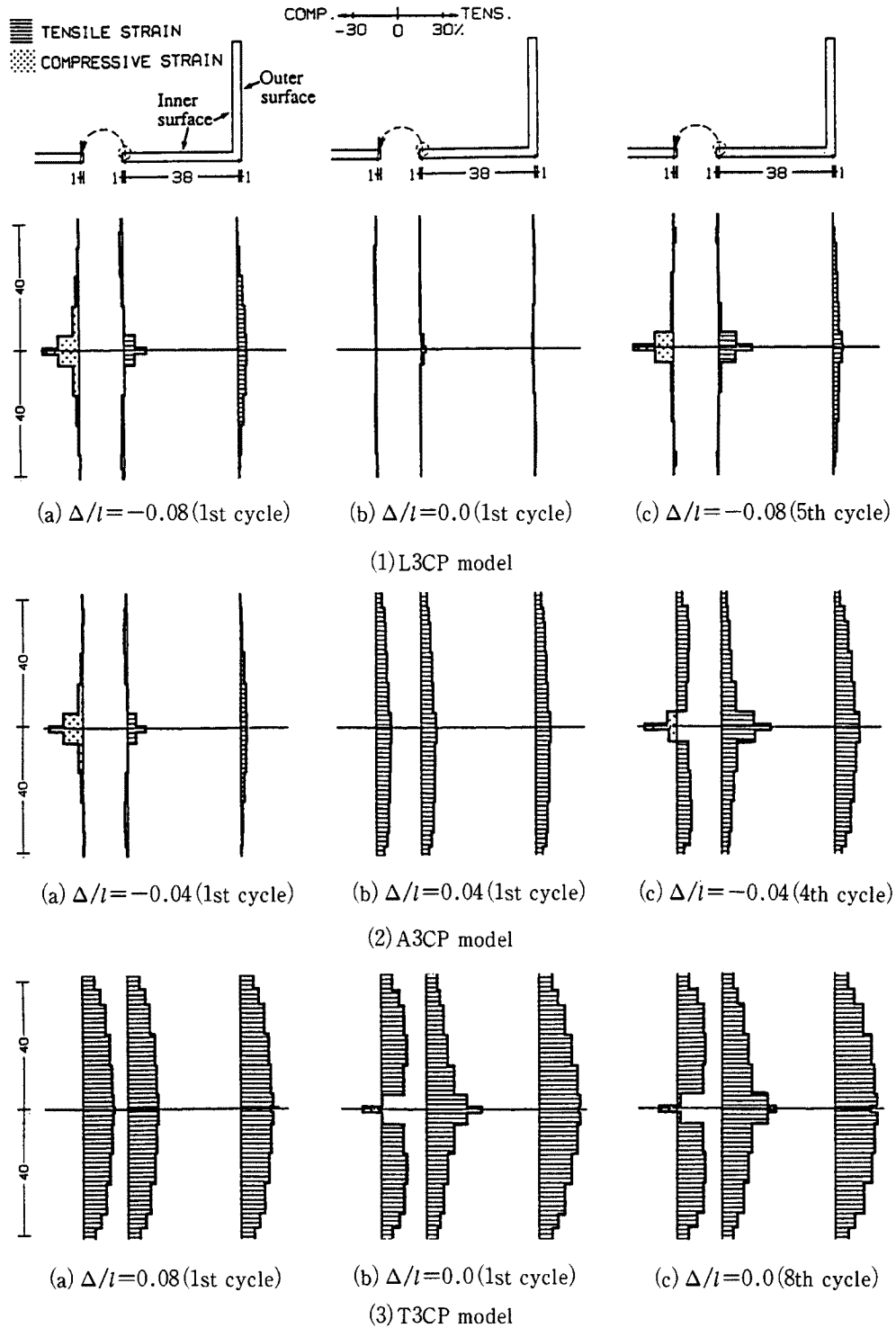


Fig. 18 Logitudinal distribution of strain under prescribed displacement loading

正たわみモードの場合，ここで解析的に得られたひずみ変動幅には，曲げ圧縮側が曲げ引張側よりも大さくなる傾向が载荷パターンに拘わらず認められる。漸増変位载荷型の A3IP を除いた相対軸ひずみ Δ/l の変動幅が 8 % の定変位振幅载荷のものは，ひずみ変動幅が曲げ圧縮側で 25～35 % の範囲であるのに，曲げ引

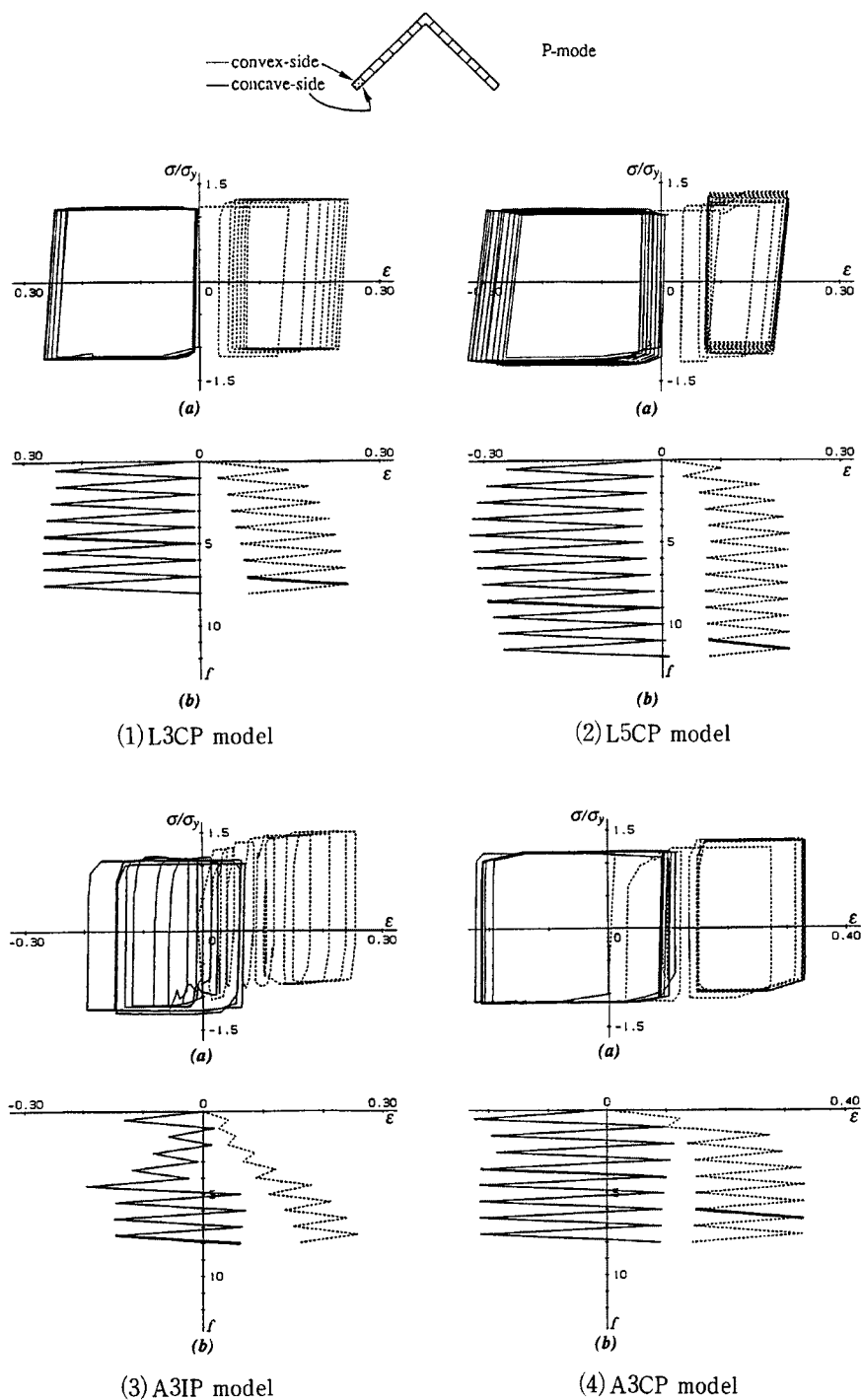


Fig. 19 Stress-strain hysteresis.

張側では15~20%の範囲となっている。即ち、ひずみの履歴は曲げ圧縮側がより厳しい状況であることを意味している。これは、実験で正たわみモードで局部座屈変形を生じた部分で、曲げ圧縮（凹型変形）側から亀裂が発生し始めてから、次に曲げ引張（凸型変形）側での亀裂発生が見られたことと、符合していると考えられる。

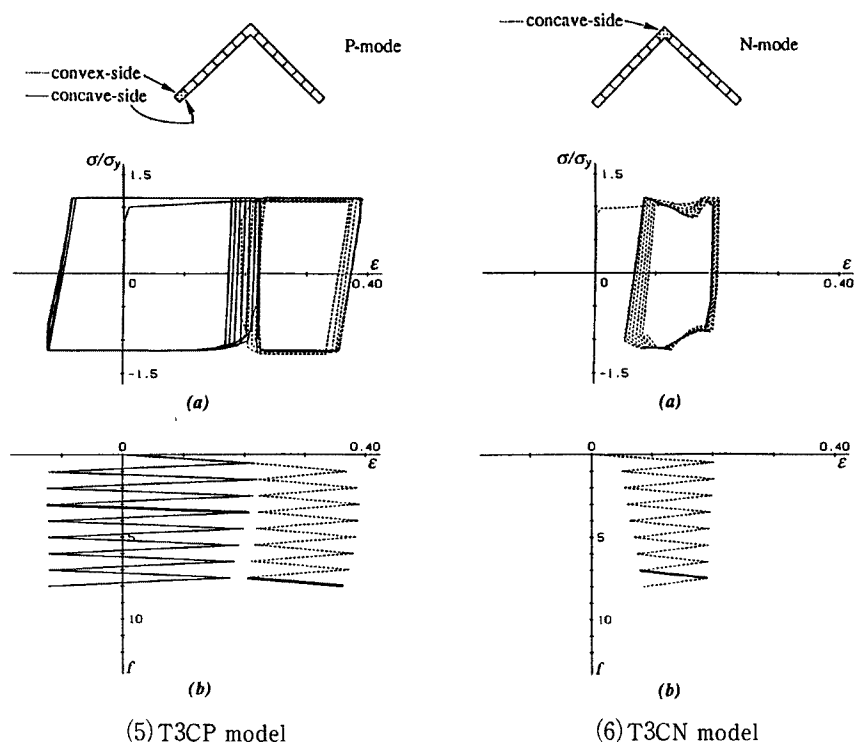


Fig. 19 (Continued) Stress-strain hysteresis.

負たわみモードの場合も、同様のひずみ変動の差が生じている可能性はあると考えるが、脚交差部の曲げ引張側、即ち山形鋼の脚交差部内側は現実にはモデルよりも断面幅が広がっており、また2軸応力状態となっているため、ここでは議論しない。

塑性ひずみの繰り返し亀裂の発生に関わりがあるとして、各サイクルでの引張応力域における塑性ひずみの絶対量の総和をとった「累積塑性ひずみ量」を考える。例えば、曲げ圧縮縁と曲げ引張縁での、繰り返しサイクル毎の累積塑性ひずみ量をプロットすると Fig. 20 となる。▼印は実験での亀裂発生確認サイクル時点を表し、この時の累積塑性ひずみ量は 105 % ~ 255 % の範囲となっている。値のばらつきは大きいものの、このひずみ量のオーダーは、単調引張载荷による素材試験の引張破断箇所における局所残留ひずみが 100 % 前後 (Fig. 20 の 2 本の破線で表示した範囲) であったこと^{4)~7)}と、対応している可能性もある。しかし、値の真の意味するところはまだ今後の検証によって確かめるべき必要があろう。

4. まとめ

本報告では、極低サイクル载荷のもとでの鋼構造部材の亀裂・破断に到る実験的損傷過程を解析的に詳細に検討し、特に破壊の直接的なきっかけとなる局所ひずみの性状について新たな知見を提示した。得られた成果をまとめると、次のようである。

1. 弾塑性有限要素解析により、亀裂発生直前までの試験体の全体挙動・局所挙動を克明に追跡できることを示した。
2. 実験では測定できない局所ひずみの荷重段階ごとの変動を、局所応力-ひずみの履歴曲線の形で明らかにした。

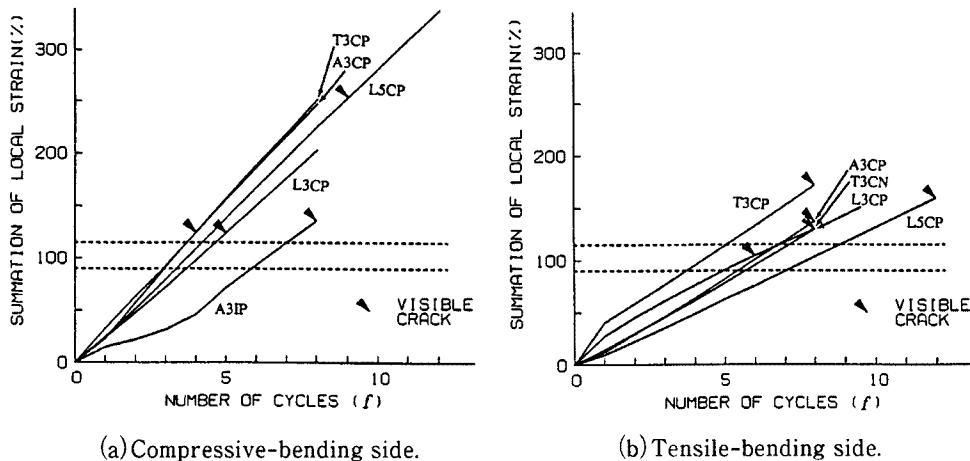


Fig. 20 Cumulative plastic strain with increasing number of cycles.

3. 局所ひずみの解析結果から、亀裂の発生がまず、曲げ圧縮側に起こり、続いて曲げ引張側に現れるという実験的事実を説明できることを示した。

4. 累積塑性ひずみをもって極低サイクル载荷のもとでの鋼構造部材の亀裂発生条件を設定しうる可能性があることを示した。

参考文献

- 1) 岩井 哲・野中泰二郎：繰返し载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-1，1988 年 4 月，pp.89-104.
- 2) 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-1，1989 年 4 月，pp.133-147.
- 3) Iwai, S., Nonaka, T., Bourgund, U., and Kameda, H.: Structural Failure Due to Very Low Cycle Fatigue of Steel Members and Elements under Earthquake Loading, Proc. of 8th Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, Vol. 2, Dec. 1990, pp.1377-1382.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Iwai, S., Park, Y.-S., Nonaka, T. and Kameda, H.: Very Low-Cycle Fatigue Tests of Steel Angle Members under Earthquake Loading, Proc. of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Vol. 5, Jul. 1992, pp.2879-2884.
- 7) 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.
- 8) 岩井 哲・朴 鍊洙・磯部恭二・野中泰二郎・亀田弘行：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，京都大学防災研究所年報，第 36 号 B-1，1993 年 4 月，pp.121-133.
- 9) Iwai, S., Nonaka, T., Park, Y.-S., and Kameda, H.: Experimental Observation on Fatigue of Steel

Members and Elements under Very Low Load-Cycles, Proc. of the Second European Conference on Structural Dynamics, Trondheim, Norway, Jun. 1993, pp.771-778.

- 10) Park, Y.-S.: Damage Process of Steel Members under Very-Low-Cycle Loading, 京都大学工学博士学位請求論文, 1993年9月.
- 11) 穂積秀雄・浅野和宏・花井厚周・平野道勝：鋼部材の座屈後破断に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集・構造Ⅱ, 1993年9月, pp. 1317-1322.