

繰り返し軸力と曲げを受ける鋼部材の累積塑性変形下での 初亀裂発生に関する解析的評価

岩 井 哲*・横 山 誉**

(平成14年9月5日受理)

Analytical evaluation of crack initiation of steel members subjected to repeated axial force and bending under cumulative deformation in plastic range

Satoshi IWAI and Homare YOKOYAMA

(Received Sep. 5, 2002)

Abstract

The objective of this study is to establish damage criteria for steel members at crack initiation due to very low cycle large deformation under repeated axial force and bending in plastic range. It is found that, from analytical results using simple member model and finite element method, axial and lateral deformation vs. load relations well correspond to the results of the previously conducted experiment. A plastic strain per one cycle of stress-strain hysteresis at the critical section, which related to crack initiation, showed 9% to 18% in the case of incremental displacement amplitude loading and about 18% in the case of constant displacement amplitude loading. Cumulative plastic strain values at which a crack occurs are strongly dependent on repeated loading patterns rather than deformed length of the test specimen.

Key Words: steel structure, repeated loading, crack initiation, damage evaluation, cumulative strain

1. 研究目的

鋼構造物が地震などにより激しい外乱を受ける場合、その構造物の部材は全体座屈・局部座屈を伴って部分的に大きな塑性変形を繰り返し受けることがある。この時、繰り返し数は少なくとも塑性化の度合いが大きくなると、構造物は数回から十数回程度の数少ないサイクル数（以下、「ごく低サイクル」と称する）の繰り返しによって損傷し、亀裂発生から破断にいたる場合がある。本研究はこのようなく低サイクルでの繰り返しによって亀裂が発生した部材の損傷を調べた既往の実験の結果^{1),2)}に対して、解析的に初亀裂発生条件を評価することを目的としている。解析

では、部材モデル、ならびに有限要素モデルを用いて、部材中の最も厳しい応力-ひずみ履歴を受ける局所における累積塑性ひずみ量を推定し、鋼部材の損傷破壊を評価する³⁾。また対応する鋼部材の実験による累積塑性ひずみ量のレベルを検証する。

2. 平鋼材のごく低サイクル繰り返し損傷実験挙動

比較の対象とした実験に用いられた試験体は図1のような平板形状で SS400 材相当の鋼材で製作された。試験体の両端をピン支持とし、支持部間距離が 300mm、部材中央に薄肉の試験部を有している。薄肉部の長さ L_0 は 9mm（試験体名に L09 と表示、以下同様）、18mm（L18）

* 広島工業大学工学部建設工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻（現在、株式会社 森組）

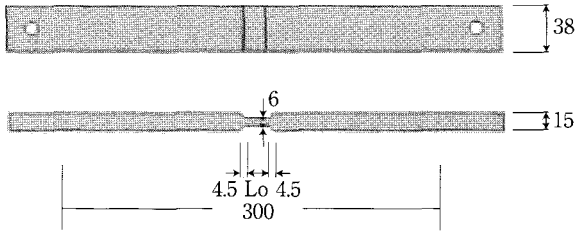


図1 平鋼試験体

である。実験では軸方向変位を制御する静的な定速度荷重を行っており、荷重パターンは漸増振幅荷重 (IC)、単調荷重 (MC)、定振幅荷重 (CC)、あるいは定振幅荷重に付加的に引張を加えた荷重 (CCA) で、各試験体とも 4 ~ 12 回までの繰り返し数で材中央に亀裂を発生し、その後、数回以内で破断に至っている。

3. 平鋼の部材モデルによる解析

平鋼部材の解析モデルは図1の試験体形状を模擬している。実験では、試験体両端の厚肉部に貼付したひずみゲージの計測によって、この部分が弾性挙動を示すのを確認している。このことから、座屈後の全体の変形に対して厚肉部の弾性変形分は無視できるものと考え、部材モデル解析ではここを剛体であるとし、薄肉部が荷重による変形をすべて受けるものとした。また実験の観察から薄肉部が等曲率曲げ変形を生じると仮定した。

図2のように試験体が繰り返し軸力 P を受け、圧縮で座屈変形した時の軸方向変位を U 、部材中央の最大横たわみを V とすると、試験体厚肉部の部材回転角 θ を用いて、変位 U と V は以下の式のようにになる。

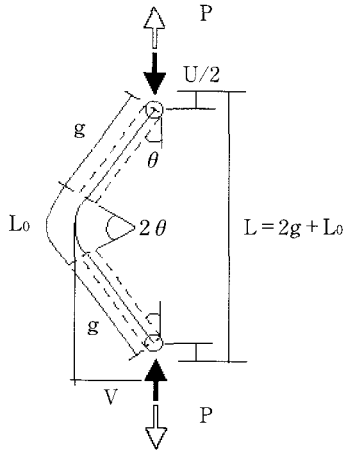


図2 解析モデル

$$U = L \left(1 - \frac{L_0}{L} \cdot \frac{\sin \theta}{\theta} - \frac{2g}{L} \cos \theta \right)$$

$$V = g \left(\sin \theta + \frac{L_0}{2g} \frac{1 - \cos \theta}{\theta} \right)$$

解析では薄肉部断面を厚さ方向に要素に等分割し、各断面要素の平均ひずみを求め、図3に示すポジティブ・バイ

リニア型応力-ひずみ関係の履歴から応力を計算した。解析に用いたヤング係数、降伏応力は実験値に基づいて、 $E = 2100 \text{ t/cm}^2$ 、 $\sigma_y = 2.9 \text{ t/cm}^2$ とした。ここでは、軸方向応力-ひずみ関係の塑性域の二次勾配の係数 r を 0, 0.001, 0.005 の3種に変えて解析を行った。また薄肉部断面分割数 n を 3, 6, 12 と3種に変えて解析を行った。

軸方向変位 U を制御変位として与え、各荷重段階で、モデル中央部の内力曲げモーメントと軸方向外力による外力モーメントが釣合を保つよう繰り返し収束計算して求めている。収束条件は、中央の全塑性モーメントの10万分の1とした。なお解析では軸力の存在による軸方向ひずみと応力については釣合上正しく算定されているが、繰り返しによる薄肉部の伸びはごく小さいと考え、全体の変形に算入していない。釣合による変形の確定後、曲率 $2\theta/L_0$ から、薄肉部中央断面のひずみ分布を求めている。

なお、荷重および応力は引張を正としており、変形・ひずみの符号もそれに対応する。

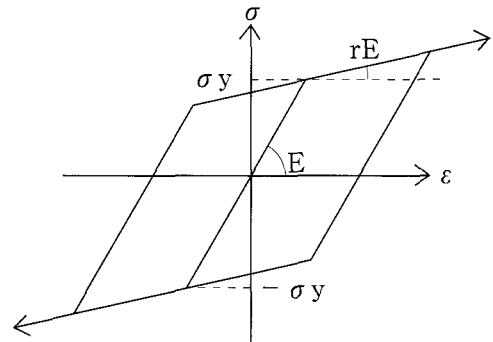


図3 軸方向応力-ひずみ関係の仮定

4. 部材モデルによる解析結果と実験結果の比較

解析から得られた荷重-軸方向変位関係 ($P-U$ 関係) を図4~6に、荷重-横たわみ関係 ($P-V$ 関係) を図7に、それぞれ実験結果と比較して示す。ここに比較例示した試験体 L18IC は薄肉部の長さが 18mm、試験体 L09IC は薄肉部の長さが 9mm で、それぞれ漸増振幅荷重を受けたものである。全体的に解析値が実験値と比べて、荷重が多少低めに出ているものの解析モデルが実験時の挙動をよく表していると言える。

薄肉部断面の分割数 n を 3 から 6 に大きくするにつれて、引張側でも圧縮側でも荷重がやや大きく出る傾向となったが、分割数 6 と分割数 12 とでは大差ない結果となった。断面の分割数を増やすと、解析に要する時間は増大するが、収束回数は減少する。また軸方向応力-ひずみ関係における塑性域の二次勾配の係数 r による影響は、 $r = 0$ と 0.001 の2つについてはほとんど差はなかったが、0.005 と大きくすると、少しではあるが荷重 P が引張側で小さく圧縮側に大きく出る結果となった。

以上により、次節5.の部材モデル解析によるひずみ履歴推定における基本的な解析への付与条件として、各試験体の断面分割数は6、二次勾配は弾性勾配に対する比率が0.001のものを用いることとした。

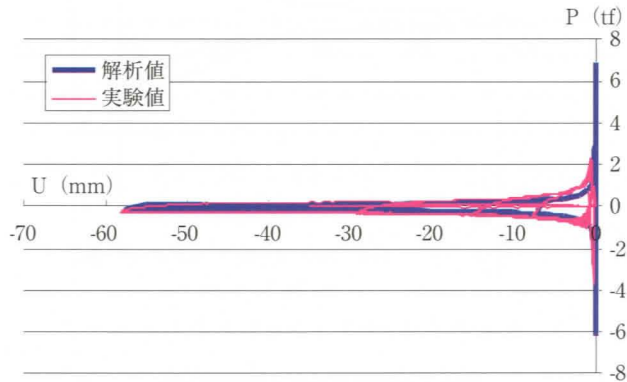


図4 荷重-軸方向変位関係 (L18IC)

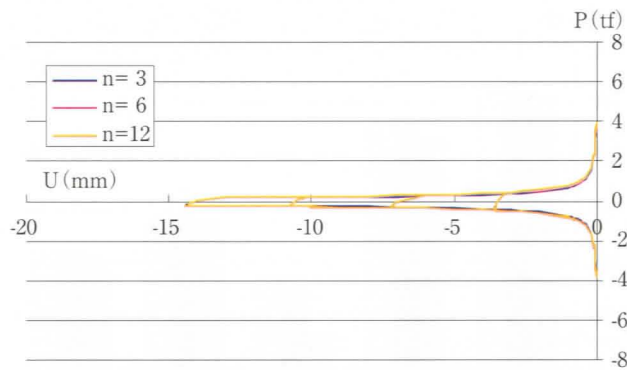


図5 荷重-軸方向変位関係；要素分割数ごとの比較 (L09IC)

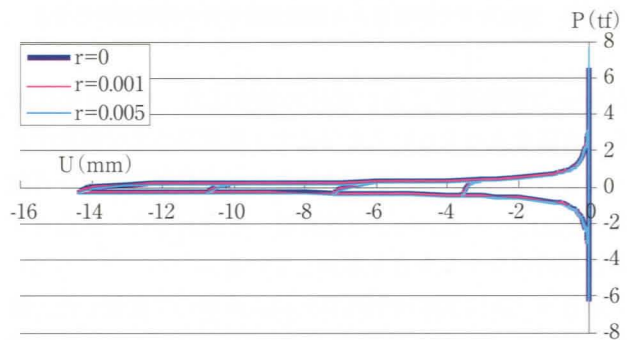


図6 荷重-軸方向変位関係；二次勾配ごとの比較 (L09IC)

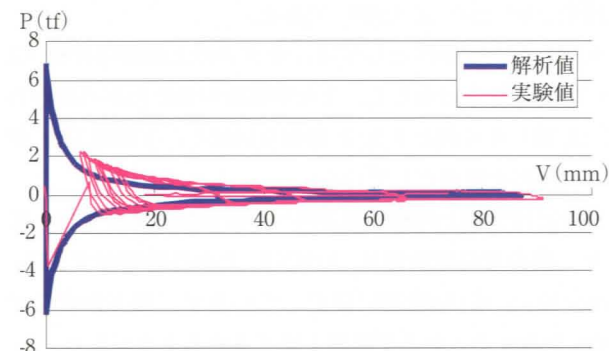
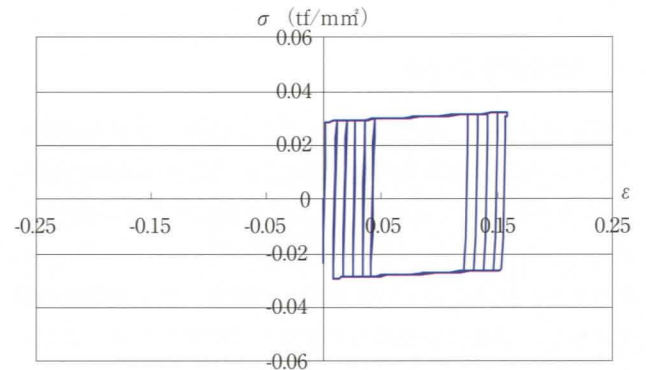


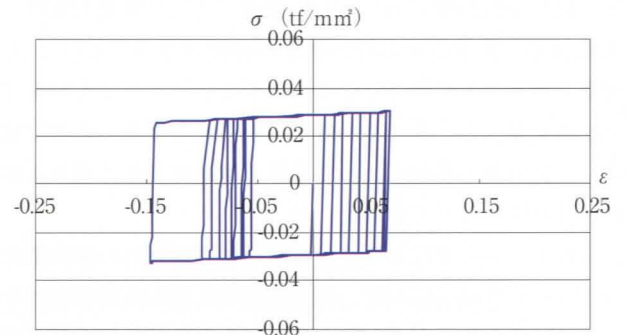
図7 荷重-横たわみ関係 (L18IC)

5. 部材モデル解析によるひずみ履歴

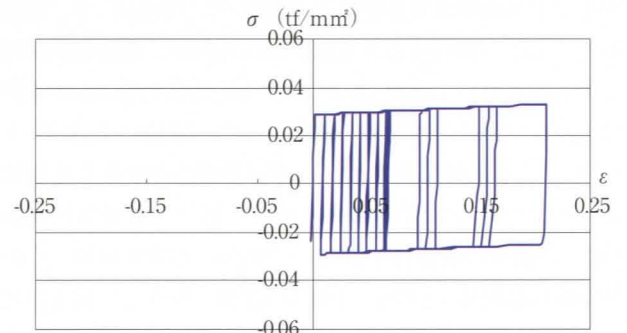
解析結果より得られた部材中央断面における最外縁要素の応力-ひずみ履歴の例を図8(a)~(d)に示す。



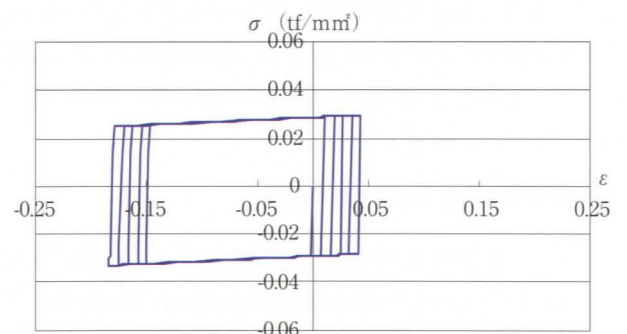
(a)試験体 L18IC (曲げ引張側要素)



(b)試験体 L18IC (曲げ圧縮側要素)



(c)試験体 L18CC (曲げ引張側要素)



(d)試験体 L18CC (曲げ圧縮側要素)

図8 部材中央における要素の応力-ひずみ履歴

全試験体の部材中央断面における最外縁要素の応力-ひずみ履歴によると、1サイクル当たりのひずみ振幅は、実験を行った漸増変位振幅（IC）型载荷の試験体で9～18%、定変位振幅（CC）型载荷の試験体で18%程度となった。

6. 累積塑性ひずみ

解析結果から、薄肉部で最も厳しい応力-ひずみ履歴を受けている圧縮側の最外縁要素におけるひずみ振幅の絶対量を、実験において初亀裂が発生した载荷サイクル数まで、随時足し合わせたものを、累積塑性ひずみとして計算した。累積塑性ひずみの算定方法を図9の荷重-ひずみ関係の図中に示す。部材に圧縮軸力が作用して座屈した後、加力方向を反転して圧縮側（-）から引張側（+）に荷重が変わった場合で、荷重が0の時のひずみの絶対量（ $|\epsilon_a|$ ）と、同じく引張側（+）から圧縮側（-）に荷重が変わった場合で、荷重が0の時のひずみの絶対量（ $|\epsilon_b|$ ）の和を1サイクルの塑性ひずみ量とする。こうして実験時に初亀裂が発生したサイクル数までを塑性ひずみの総和で算定し、繰り返し载荷によって部材の初亀裂発生に関わる累積塑性ひずみとして求めた。

部材モデル解析によるひずみ履歴から得られた累積塑性ひずみの値を図10に示す。初亀裂発生に関わる累積塑性ひずみは、変位振幅と繰り返し数の組み合わせによる载荷履歴に強く依存する結果となった。漸増変位振幅型载荷の試験体で中央薄肉部長さが同じ L09IC と L09MC で、累積塑性ひずみの値には大きな差が見られたが、载荷履歴が同じであるモデル L09IC と L18IC の亀裂発生時における累積塑性ひずみは比較的近い値となった。同様に L18CC と L18CCA の亀裂発生時における累積塑性ひずみも比較的近い値となった。累積塑性ひずみの値は、漸増変位振幅（IC）型载荷の試験体で230%～260%、定変位振幅（CC）型载荷の試験体で110%～140%の範囲となった。軸方向応力-ひずみ関係の仮定で、二次勾配を弾性勾配に対する比率 r で0%、0.1%、0.5%と変化させた場合、二次勾配が大きくなるにつれて累積塑性ひずみはやや小さくなるが、その差は数%程度の違いしかなく、累積塑性ひずみには応力-ひずみ関係の二次勾配はあまり影響しない結果となった。

7. 有限要素モデルによる解析

汎用の弾塑性有限要素法プログラム（ADINA; Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis）による解析を行い、部材モデルによる解析の結果と比較した。ここでの解析の目的は、全体座屈と局部座屈を生ずる部材の全体ならびに局所の挙動を調べることで、実験で得られ

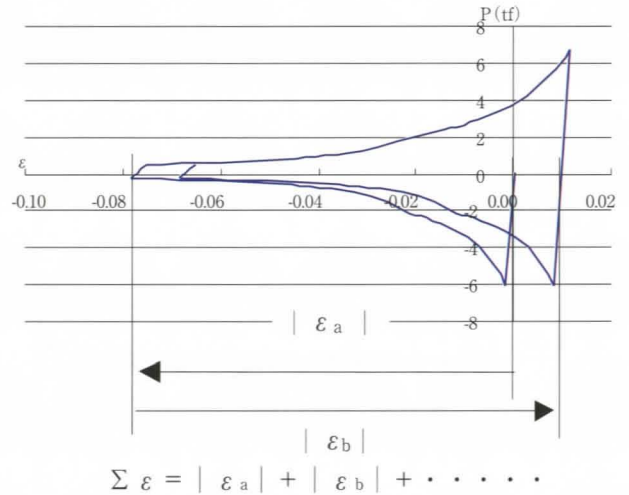


図9 累積塑性ひずみの算定方法

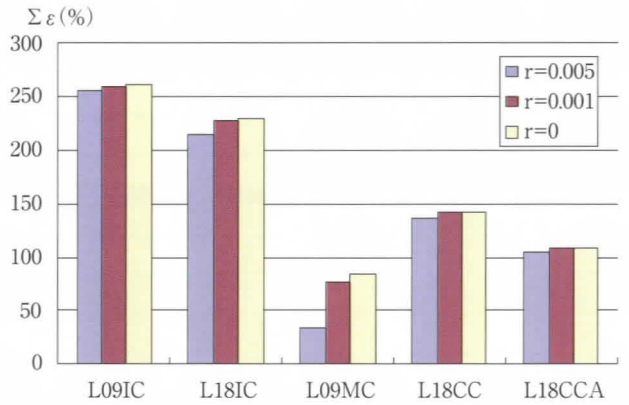


図10 部材モデル解析による初亀裂発生時の累積塑性ひずみ

なかった载荷段階ごとの部材の局所応力-ひずみの状態を、有限要素モデルによる手法で、亀裂発生まで把握することを目指している。解析方法として変位制御载荷が可能な Collapse Analysis（崩壊解析）を選択した。構造モデルは薄肉のシェル要素を選択している。

解析モデルは実験の試験体形状に基づいて作製した。材料特性は3.の解析の部材モデルと同じく、ヤング係数 2100tf/cm²、ポワソン比 0.3、降伏応力 2.9tf/cm²、ひずみ硬化係数 2.1tf/cm²（E/1000）である。

モデルの拘束条件としては、モデルの上端部は材軸（Z軸）方向変位を自由とし、また座屈後の横たわみの進行方向（X軸）を可能とするY軸回り回転と、下端部でY軸回りの回転を自由としている。

载荷には実験と同様に軸方向への変位制御载荷を行っており、载荷変位増加量はADINAでの自動増分である。Time Stepは100段階に設定しているが、軸方向変位が10cmを越えるとそこで解析を終了させるようにした。

座屈変形の進行方向を特定するために解析モデル中央に

あらかじめ部材長の1/1000の初期横たわみを与えている。薄肉中央部も前節の曲率計算式を用いて、初期たわみとして等曲率曲げ変形を与えている。

要素の分割法は解析結果に大きく影響する。まず図11に示すような A タイプとした。これは幅方向に4等分、軸方向に弾性挙動を示す厚肉部を8等分、中央薄肉部の分割数を軸方向に8等分している。A タイプの要素数は $8 \times 4 + 8 \times 4 + 8 \times 4 = 966$ 要素である。

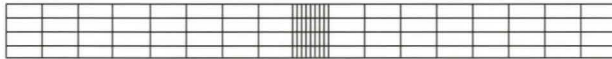


図11 解析モデル (A タイプ)

A タイプで解析を行った結果を図12に示す。座屈は生じたものの、試験体断面厚さが15mmから6mmに変わった部分にひずみ(変形)が集中した形で、座屈しているのがわかる。これは試験体の厚肉部から薄肉部への急激な厚みの変化によるものと思われる。

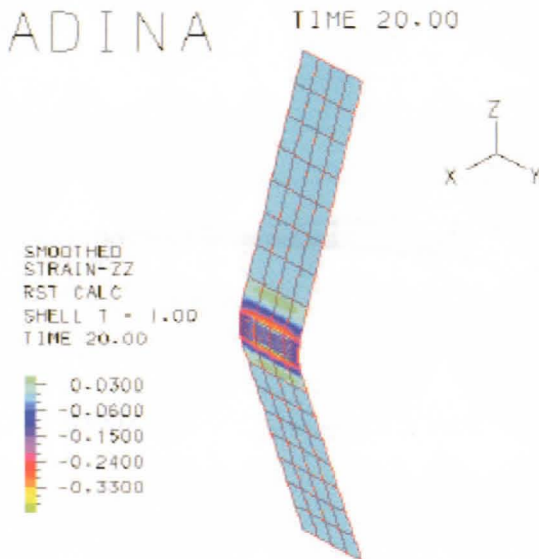


図12 Aタイプ解析モデルによる座屈変形

この厚さの急激な変化部分におけるひずみ集中をなくすために、厚さが15mmから6mmまで連続的に変えたモデル(図13)を作成した。このモデルは厚肉部から薄肉部への厚さの変化を15mmから1mmずつ変化させている。このように、部材の厚さの急激な変化により応力が集中しないようにしたモデル(Bタイプ, 図14)を設定して解析を行った。Bタイプの要素数は $4 \times 4 + 2 \times 4 \times 8 + 8 \times 4 + 2 \times 4 \times 8 + 4 \times 4 = 192$ 要素である。



図13 解析モデル (B タイプ) 厚さの変化



図14 解析モデル (B タイプ)

Bタイプのモデルの解析の結果、図15に示すように部材薄肉部で座屈変形したものの、薄肉部中央1断面要素にひずみが極端に集中する形になった。

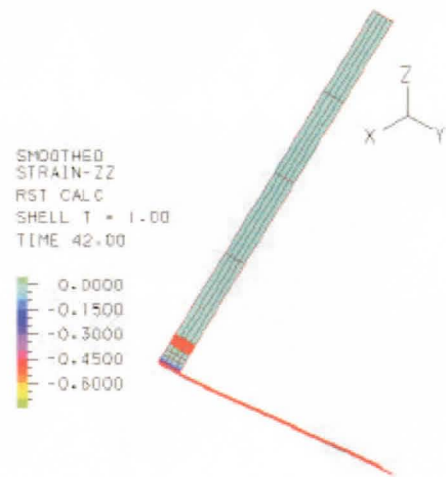


図15 Bタイプ解析モデルによる座屈変形

このため薄肉部の要素数を減らすことにより、薄肉部長さ方向にひずみを分散させるように要素数を減らしたモデルがCタイプ(図16参照)である。Cタイプのモデル要素数は $4 \times 4 + 1 \times 4 \times 8 + 3 \times 4 + 1 \times 4 \times 8 + 4 \times 4 = 108$ 要素である。



図16 解析モデル (C タイプ)

Cタイプの解析結果を図17, 18に示す。Bタイプに比べてひずみは分散しているが、等曲率曲げ変形というよりは材中央にひずみが集中しているのがわかる。モデルの厚さ方向には中央と、両外縁のひずみの値を計算出力させており、実験値等と比較する場合には曲げ圧縮側の値に注目した。

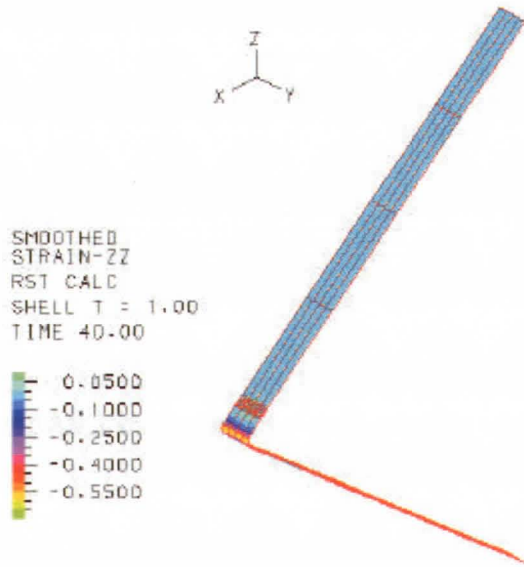


図17 Cタイプ解析モデルによる座屈変形

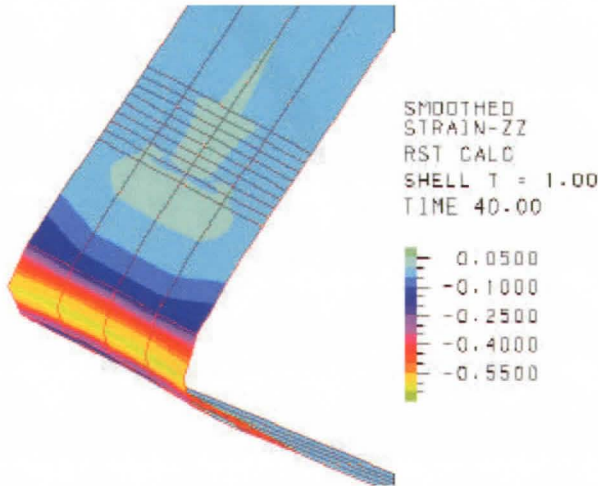


図18 Cタイプ解析モデルによる材中央の変形

8. 有限要素モデル解析における累積塑性ひずみ

Cタイプのモデルを用いた解析から得られた荷重-軸方向変位 ($P-U$) 関係と荷重-横たわみ ($P-V$) 関係の実験との比較結果を図19, 20に示す。ここで対象とした試験体は中央部長さ 18mm で、定変位振幅型载荷の L18CC である。繰り返し载荷実験に対して、本解析では単調载荷しか行っていないが、荷重-軸方向変位関係 $P-U$ と荷重-横たわみ関係 $P-V$ ともに、座屈時の荷重に少しの誤差があるものの、全体的には概ね実験と近似した結果を示している。特に座屈発生後の $P-U$ 曲線と $P-V$ 曲線はほぼ一致していることを示している。

この有限要素モデルでの最外縁ひずみを計算し、前章の解析プログラムでのひずみと比較する。部材中央薄肉部の最外縁ひずみについて、軸方向変位 U - ひずみ ϵ 関係で、

有限要素解析から得られた結果と、部材モデルによる解析結果を比較したものを図21に示す。有限要素解析と部材モデル解析における軸方向変位に対する最外縁ひずみは、18%あたりまでの大変形域において追跡した結果、ひずみ(振幅)のオーダーが概ね近似した値を示していると言える。

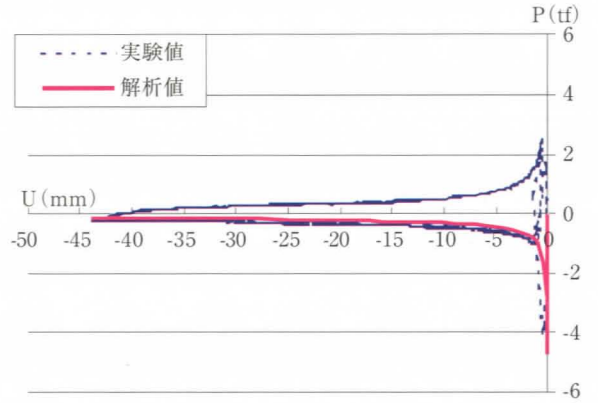


図19 荷重-軸方向変位 ($P-U$) 関係 (L18CC)

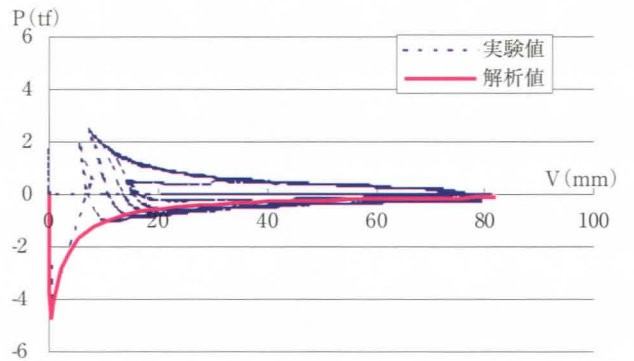


図20 荷重-横たわみ ($P-V$) 関係 (L18CC)

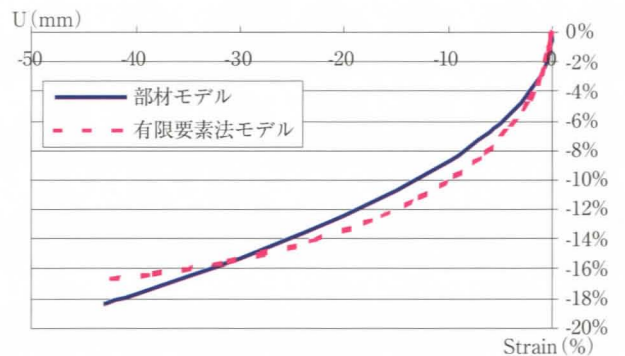


図21 軸方向変位-ひずみ関係

9. 山形鋼の実験結果における累積塑性ひずみ

図22は、SS400 材相当の山形鋼部材の繰り返し軸方向力载荷実験²⁾ 終了後に測定した残留ひずみを基に、そのひずみが、繰り返しサイクル毎に累積していると仮定して算定

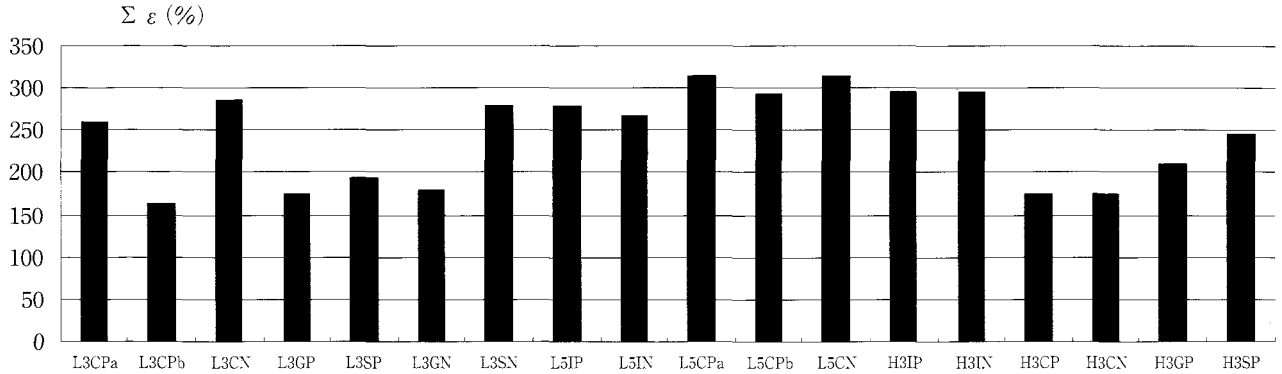


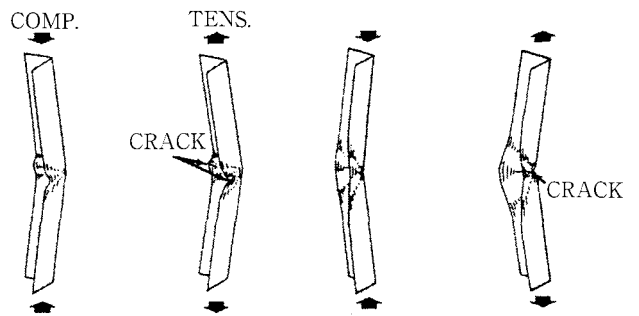
図22 山形鋼の実験による初亀裂発生時の累積塑性ひずみ推定値

した初亀裂発生時における累積塑性ひずみの推定値である。

山形鋼の実験では、亀裂発生後の試験体表面の局部残留ひずみを測定するため、桑村・前田⁴⁾が用いた局部ひずみの測定方法を参考にした。これは大きな塑性変形を生じる試験体表面に、実験前に機械的に精度のある標点群を打ち、実験後にその標点間隔の変位を測定することによって残留ひずみを算定するものである。本実験では、Vickers 硬度試験装置を用いて、山形鋼断面の脚縁部ならびに稜角部において縁端から 2mm 入った位置に、試験体材軸方向に機械的に 2mm のピッチで中央試験区間の 80mm にわたってヌープ (Knoop) 圧痕 (線条痕) を標点として打った。打痕荷重は 196N (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 1/10mm 精度で伸び量を読みとった。これにより 5% 精度のひずみ計測が可能となった。実験結果から、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、ひずみ絶対値で 25~40% の範囲にあり、載荷履歴・たわみモード・幅厚比・細長比にかかわらず、ほぼ同一であることが認められた²⁾。

山形鋼が中心圧縮荷重によって座屈変形する時、たわみの発生の向きは図23のように、実験では 2 通りの方向の座屈変形が現れている (試験体名で P よび N と表示した) が、図22の亀裂が発生した局所における累積塑性ひずみ値にはあまり影響が出ていない結果となった。亀裂発生時における圧縮側の局所の累積塑性ひずみは 160%~310% の範囲となった。山形鋼実験で実施した載荷履歴は漸増変位振幅型載荷 (I) 型、定変位振幅型載荷 (C) 型、大・小変位の組み合わせ振幅型載荷 (G)・(S) 型の 4 種類である。小変位振幅のサイクルでは図 2 の解析モデルに対応して塑性ひずみを受けたと仮定している。

載荷履歴では、漸増変位振幅型載荷 (I) 型が 268%~295%、定変位振幅型載荷 (C) 型が 163%~315%、大・



(a) 脚縁部に初亀裂発生 (b) 稜角部に初亀裂発生
図23 山形鋼実験による座屈変形と初亀裂発生位置

小変位の組み合わせ振幅型載荷 (G) 型は 175%~210%、(S) 型は 195%~280% の範囲であった。定変位振幅型載荷 (C) 型では試験部の長い場合に累積塑性ひずみが小さく出る現象が見られた。(I) 型の試験体でも、座屈方向、試験体長さ、厚さに関わらず、累積塑性ひずみはかなり近い値となったことから、先の平鋼試験体の場合と同様に、試験体の長さ、厚さよりも載荷履歴が累積塑性ひずみにより影響する結果となっている。

10. H 形鋼の実験結果における累積塑性ひずみ

SS400 材棒鋼を焼鈍した後、機械切削により仕上げた H 形鋼の筋かい材において、曲げ座屈・局部座屈・構面外座屈を伴う実験³⁾から計測して得られた累積塑性ひずみを図24に示す。H 形鋼のひずみは実験での塑性ひずみゲージによる計測値に基づいている。H 形鋼実験での 1 サイクル当たりのひずみ振幅は 5%~10% の範囲であった。塑性ひずみゲージは材長方向の中央付近 2 断面と両材端付近の 4 断面について、H 形鋼の両フランジの外面で縁に近いところの 4 点ずつに貼付された。但し、ひずみゲージ貼付断面位置は、計測の都合で材中央と材端からいずれも断面せいの半分の距離をおいており、かつ断面の縁端部から少し内側の距離にあり、亀裂発生を正に生じた材中央あるいは材端における最外縁のひずみ履歴が計測されている

わけではない。またひずみゲージは亀裂の発生と共に切断したり、亀裂の近傍においても途中で剥離したため、累積塑性ひずみも亀裂発生時に対応するものとしているが、目安程度と認識することが必要である。ひずみゲージの剥離などが原因で、破断時まで計測できなかった点も多かったが、概ね破断部位に最も近い所は、他の箇所と比較して、初期の荷重サイクルで急激に累積塑性ひずみが増大し、その後も最大の累積塑性ひずみを記録し保持した。また、局部座屈を生じる条件として確たることは判明していないが、初亀裂発生時において、最大の累積塑性ひずみは60%~80%の範囲で似ている。断面形状の大きい試験体が断面形状の小さい試験体に比べて若干、累積塑性ひずみが大きくなったが、その差は10%程度であり、細長比による差、荷重位置による差もあまり見られなかった。

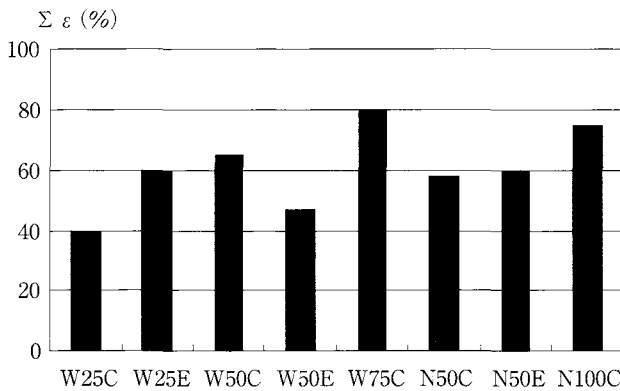


図24 H形鋼の実験による初亀裂発生時の累積塑性ひずみ

11. 結 論

繰り返し軸力と曲げを受ける鋼部材の累積塑性変形下での初亀裂発生に関する解析的評価において、部材モデル、ならびに有限要素モデルを用いた平鋼の解析、ならびに山形鋼、H形鋼の実験結果より算出した累積塑性ひずみより以下のことが認められる。

- (1) 部材モデルによる解析が荷重-軸方向変位関係、荷重-横たわみ関係の実験値との比較結果で近似していることから、実験での部材挙動をよく表していると判断できる。
- (2) ごく低サイクル繰り返し下での亀裂の発生は、ひずみ履歴から、1サイクル当たりのひずみ振幅が漸増変位振幅型荷重の試験体で9~18%、定変位振幅型荷重の試験体で18%の繰り返しにより、起こりうるということがわかった。

(3) 残留ひずみの絶対値を逐次加算したもので定義した累積塑性ひずみは、部材モデルによる解析より計算した場合、荷重履歴が同じものは試験部の長さに関わらず、漸増変位振幅型荷重である試験体では累積塑性ひずみが230%~260%程度の値になり、定変位振幅型荷重の試験体でも110%~140%程度の値が出ている。初亀裂発生時における累積塑性ひずみには荷重履歴がより影響を与える。

(4) 山形鋼実験の残留ひずみの計測結果より推定された、曲げ圧縮側の初亀裂発生時における累積塑性ひずみは、漸増変位振幅型荷重で268%~295%、定変位振幅型荷重で163%~315%、大小の変位振幅の組み合わせ型荷重では175%~210%、もしくは195%~280%の範囲であった。山形鋼実験において、亀裂発生時における累積塑性ひずみは、座屈方向、試験体長さ、断面厚さに関わらず、荷重履歴が影響する結果となった。

(5) H形鋼の実験における塑性ひずみゲージの計測結果より、亀裂発生箇所近傍における累積塑性ひずみは約60%~80%であった。断面形状、細長比による差、荷重位置による差はあまり見られなかった。計測の都合で断面のひずみゲージ貼付位置は、亀裂発生を正に生じた材中央あるいは材端における最外縁のひずみ履歴が計測されているわけではないので、やや小さめに出ると考えるのが妥当であるが、平鋼・山形鋼と同じオーダーのひずみを示した結果となっている。

参 考 文 献

- 1) 岩井 哲, 他: 繰り返し荷重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.
- 2) 岩井 哲, 他: 極低サイクル繰り返し荷重を受ける鋼素材ならびに鋼部材の亀裂発生・損傷過程, 科研費(一般研究C)報告書, 1996年3月, 56p.
- 3) 横山 誉: 大変形繰り返しを受ける鉄骨部材の損傷評価, 広島工業大学大学院修士論文, 2001年2月, 66p.
- 4) 桑村 仁, 前田孝一: 低Y R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. 36B, 1990年, pp. 385-397.
- 5) 野中泰二郎: 鉄骨筋かい材挙動における曲げ座屈・局部座屈・構面外座屈の相関, 平成9年度科研費補助金研究基盤B(2)成果報告書, 1998年3月, 134p.