

繰返し荷重による応力集中部の残留応力の変化について On the behavior of the residual stresses near a notch after cyclic loadings

小畑 誠*、伊藤 孝広**、後藤 芳顯***、松浦 聖****

by Makoto OBATA, Takahiro ITO, Yoshiaki GOTO and Sei MATSUURA

Residual stresses affect the load carrying capacity, ductility and fatigue strength of steel structures. Residual stresses often appear near stress concentrators like notches and holes. However, their behaviors there are very complex because of the inevitable plastic deformation even under service load. This study aims to examine the behavior of residual stress under cyclic loading both by experimental and numerical analysis. X-ray stress measurement revealed that they increase near notch after cyclic loading. They will fade out only after large number of cyclic loading. Three dimensional elasto-plastic FEM analysis can predict initial residual stress distribution well but not quite exactly after cyclic loading.

Keywords: residual stress, cyclic loading, elasto-plastic analysis

1 はじめに

鋼構造部材中の残留応力が構造物全体の耐荷性能や変形能、さらには疲労強度にまで広く影響を及ぼしていることはすでに良く知られている。そしてこれに関する数多く実験的、理論的な検討がなされてきており構造物の設計法においても考慮されているのは周知のとおりである。この残留応力は大まかにいえば製作中に溶接のために生ずるものと使用状態において過荷重や地震荷重によって生ずるものに分けて考えることができる。後者のものは構造部材中に必ず存在するノッチやホールなどのなどの応力集中部に生ずるものであり、発生のメカニズムは過載移動荷重や地震荷重などによって生ずる局所的な塑性変形により説明することができる。しかしながら応力集中部では比較的小さい荷重での繰返しであっても部分的には塑性変形が起こるために1回の過荷重による塑性変形によって生じた初期残留応力のその後の繰返し載荷による変化の挙動は複雑であると考えられ、比較的回数の少ない繰返し載荷で残留応力が消失してしまうのかどうかについては議論の残るところである。それについてはいくつかの疲労実験などによって間接的に推定されているのみであり直接的には未だ必ずしも明確にされているわけではない。^{1~3)}

これをあきらかにするために本報告では切り欠きを持つ供試体に塑性履歴を与えることによって残留応力を導入し、その後の比較的小さい繰返し載荷によって残留応力がどのように変化していくかを実験と解析の両面から検討した。実験としては残留応力を非破壊的測定法のひとつであるX線応力測定法を用いて測定した。また加えて大変形弾塑性解析も行い残留応力変化の数値的なシミュレーションも行いその可能性について検討した。

* Ph.D. 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科

** 工修 日本道路公団 札幌建設局千歳工事事務所

*** 工博 名古屋工業大学教授 社会開発工学科

**** 工博 名古屋工業大学教授 社会開発工学科

(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

(〒066 北海道千歳市新富町1-2-14)

(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

2 実験

構造部材中の応力集中部のモデルとしてここでは最も単純に切欠きを考え、切欠きを持つ供試体を用いて実験を行った。まずそれを単純引張りを行うことによって応力集中部を塑性変形をさせて残留応力を導入する。そしてその時点での残留応力を測定し、その後繰り返し荷重を加えて再び残留応力を測定し、与えた繰り返し荷重により残留応力がどのように変化していくかを観察することを目的とする。用いた鋼材のミルシートによる機械的性質と化学成分は表1に示すとおりである。

表1 鋼材の機械的性質および化学成分

引張り試験				
降伏点(MPa)		引張り強さ(MPa)		伸び(%)
287		423		36
化学成分(%)				
C(x100)	Si(x100)	Mn(x100)	P(x1000)	S(x1000)
15	14	56	12	5

(1) 素材試験

まず素材試験を行い鋼材の基本的な機械的性質を求めた。供試体は図1(a)に示すようなものであり、加工精度は1/10mmとした。供試体の作製にあたってはJIS規格の5号試験片を参考としたが、実験では引張りだけではなく圧縮の荷重も行うので圧縮荷重時での座屈を避けるために供試体の平行部の長さを幾分短くしている。なお供試体の厚さは試験機のグリップの規定により決定した。また、実験装置の概要を図2に示す。素材試験としてはヤング率とポアソン比を求めるものと通常の引張り破断試験それぞれ1体のほかに2種類の引張り圧縮荷重試験も行い、計4体とした。引張りおよび圧縮荷重試験は、後に行う数値解析に用いる材料定数の同定をするためのもので、供試体中央部での公称ひずみが4%,6%になるまで引張り側に荷重した後、再び公称ひずみが0%になるまで圧縮側に荷重したものである。いずれの場合も荷重方法はJIS規定の標準試験法によった。弾性係数と引張り破断試験の結果を表2と図3(a)に示す。また繰り返し荷重実験における応力ひずみ曲線を図3(b)に示した。いずれの場合も加工硬化はひずみが1.8%付近より始まっていることがわかる。また図3(b)より繰り返し挙動におけるバウシinger効果と弾性域の縮小も観察される。

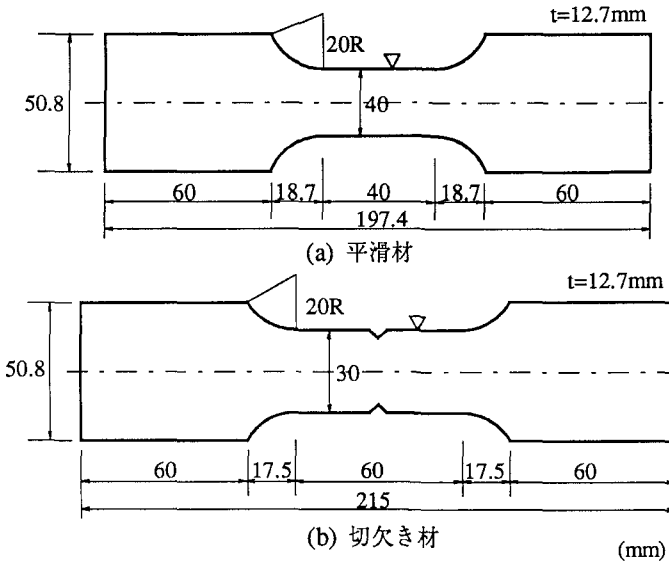


図1 供試体の形状と寸法

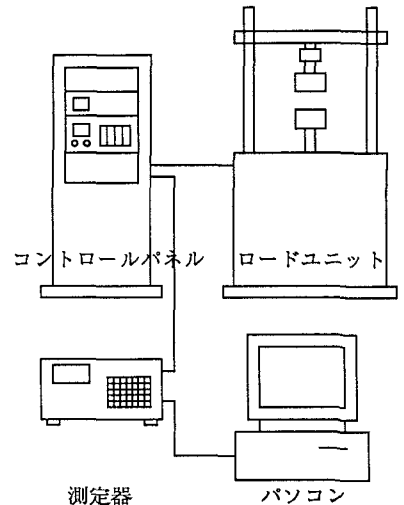


図2 実験装置

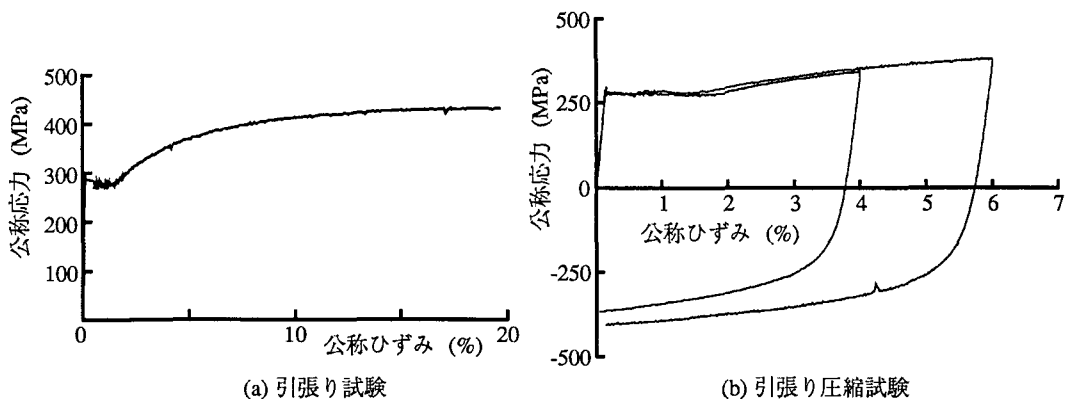


図3 応力ひずみ曲線

表2 素材試験の結果

降伏点 σ_y (MPa)	引張り強さ σ_b (MPa)	伸び %
287.3	431.0	36.1
ヤング率 E (GPa)	ポアソン比 ν	最大荷重時の伸び ϵ_b (%)
215.1	0.293	19.6

(2) 残留応力測定試験^{4,5)}

残留応力測定試験は図1(b)に示すような切欠き付き供試体を用いて行った。供試体は図1(a)の平滑材を基本に両側に深さ3mmの切欠きを付けたものである。ただし切欠き底部には半径0.5mmの丸みを持たせている。実験は次の手順で5本の供試体について行った。まずすべての供試体について切欠き部断面中央部での伸びひずみが2.8%になるまで塑性変形を与えることにより、残留応力を導入する。そしてその初期残留応力を図4に示すように切欠き底から対称軸上にある0.5, 2.0, 3.0mmの3点において測定する。この3点の位置は後に述べるように、X線残留応力測定装置の分解能により決定した。次に繰り返し载荷を行った後再び同一点での残留応力を測定する。それぞれの供試体No.1~5に対する繰り返し载荷の方法は表3にまとめるとおりである。No.1~4の応力レベルと繰り返し回数は文献3)の実験結果を参考に疲労き裂が発生しない程度のものを選んだ。実験においてはMTS社製電気油圧式動的材料試験機を用い

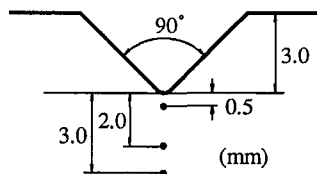


図4 切欠き部詳細と応力測定点

を用い载荷波形はサイン波、周波数はいずれも5Hzとした。No.5の供試体は、No.1~4の供試体とは異なり切欠き断面での公称応力が降伏点程度と大きくとり繰り返し回数を少なくしたものである。具体的には図5に示すように切欠き断面中央部に貼付したひずみゲージによりひずみを制御し、0.2%まで引っ張った後、圧縮側に0.2%まで载荷しふたたび引張り側に0.2%まで载荷した後に除荷する。

このようにこの実験では同一点での複数回の精密な測定を必要とするために残留応力の測定では切断法などの方法は適切ではない。そこで非破壊的なものとしては最も一般的なX線残留応力測定法を使用した。

表3 繰り返し载荷の条件

供試体	最大応力(MPa)	最小応力(MPa)	繰り返し回数
No.1	170	30	1000
No.2	170	30	10000
No.3	145	30	1000
No.4	145	30	10000
No.5	引張り圧縮ともに0.2%の歪みを静的に与える。		

X線残留応力測定はCr-K α 回折線を用いた $\sin^2 \psi$ 法によって行った。測定される残留応力は供試体長手方向の成分でX線を照射した範囲内での平均的な値である。本実験の場合は応力集中によって応力勾配が大きくなると思われる領域での測定となるために照射面積は可能な限り小さくとり、 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ と

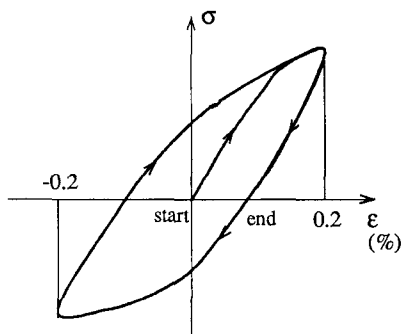


図5 供試体No.5の繰り返し载荷パターン

表4 X線応力測定条件

測定装置	理学電機(株)製 ストレインフレックス PSPC/MSF-2M
特性X線	Cr-K α
回折面	α(211)
入射角(ψ_0)	0,10,20,30,40(deg)
照射面積	1×1mm ²
回折角決定法	半価幅法
応力算法	$\sin^2 \psi$
応力定数	-318MPa deg. ⁻¹

した。使用機器は理学電機社製ストレインフレックスであり、測定点において50μmの電解研磨を実施した。その他の測定条件は表4に示す。

各供試体における、初期と繰り返し载荷後の残留応力の分布を図6(a-e)にまとめて示す。これより今回の実験では、塑性変形により切欠き付近に発生する初期残留応力は圧縮側に100～200MPaであり切欠き底から離れると急速に減少し約3mm程度で0に近い値になることがわかる。また、供試体No.4での切欠き底より3mmの測定位置での僅かな減少があったものの、それ以外のすべての供試体のどの測定点でも繰り返し荷重後の残留応力は初期の値に比べて圧縮側に増加している。このことは、残留塑性変形によって導入された応力集中部の圧縮残留応力は今回の実験で行ったような繰り返し载荷では消失することはなくむしろ逆に増大することを示している。これは文献3)の実験結果と良く対応するものである。

図7(a,b)は繰り返し回数の影響を見るためにNo.1～4の供試体について2種類の応力振幅ごとに、1000回繰り返し後と10000回繰り返し後での初期残留応力からの変化量を各測定点ごとにまとめて比較したものである。10000回繰り返し後の圧縮残留応力の増加量は1000回繰り返し後の増加量よりも小さくなっている。また繰り返し载荷を続行していくと最終的には切欠き底から疲労き裂が発生することから、残留応力は減少を続け最終的には解放されるものと予想される。このことから、応力集中部に導入された圧縮残留応力は繰り返し

荷重によっていったんは増加しその後、解放されて減少していくものと考えられる。ただし残留応力の消失にはかなりの数の繰り返し载荷を要するので、たとえ応力集中部であっても繰り返し荷重下において初期残留応力の影響を無視することはできないことになる。次に測定位置での変化量の差を見ると、切欠き

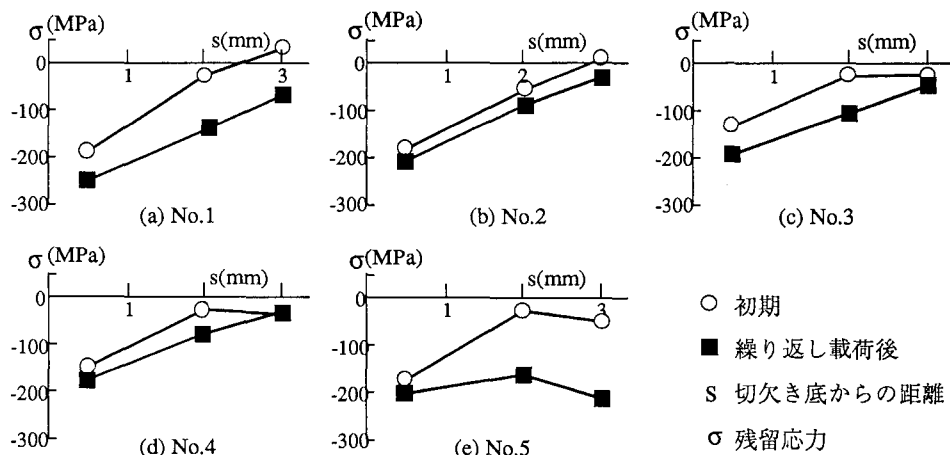


図6 残留応力の変化 (実験値)

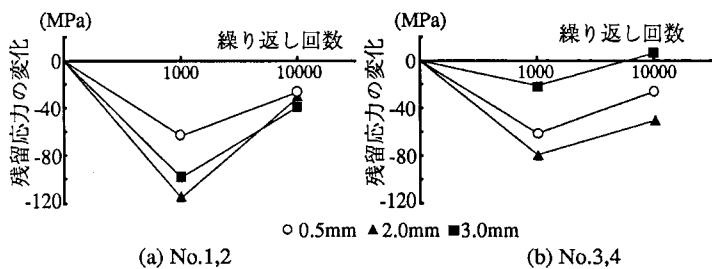


図7 繰り返し回数による残留応力の変化

の挙動を示した。しかしながら圧縮残留応力の変化の分布は特徴的であり、切欠き底から遠い2mm, 3mmの測定点において大きな増加を示した。これは繰り返しにおいて塑性変形が関与した範囲が他の場合に比べて広範囲にわたったためと考えられる。

3 数値解析

ここでは実験に対応した数値シミュレーションを行い比較を行うことにより、実構造物における残留応力の変化の推定がどの程度可能であるかについての基本的な目安を与えることを目的とする。ここでは応力集中部を含む領域の大きな弾塑性変形を解析する必要があるため、具体的な数値解析手法としては有限要素法を用いる。また切欠き周辺では板厚方向の変化、すなわち3次元的な変形も考慮する必要があると思われるために、汎用有限要素法プログラムであるMARC®を用いた大変形弾塑性解析を行った。

(1) 解析の概要

図1(b)の切欠き材を対象とした要素分割と境界条件を図8に示す。解析対象は図に示すように対称性を

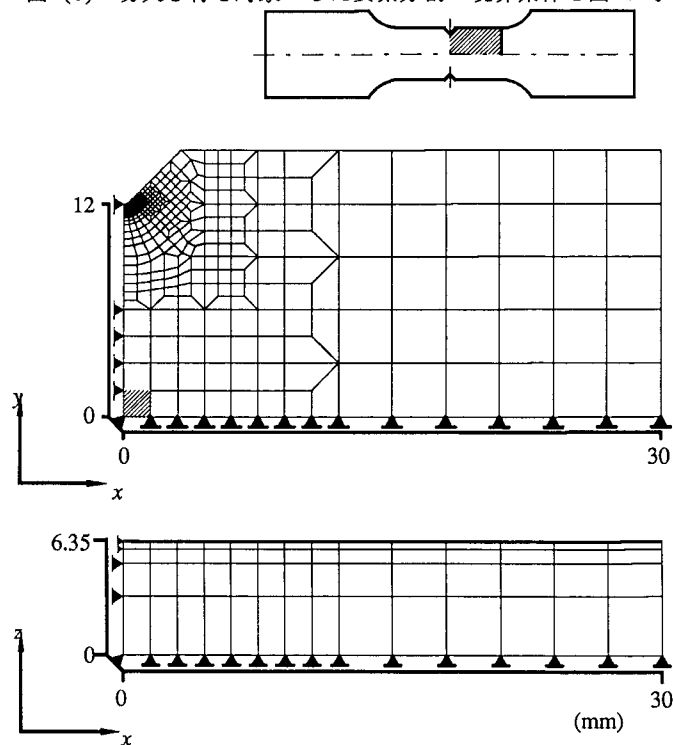


図8 解析モデル

考慮して厚さ方向も含めて平行部の8分の1とした。要素には8節点アイソパラメトリックソリッド要素を用い応力集中部での分割を密に、かつ切欠き表面付近での要素形状が立方体に近くなるようにした。また板厚方向には特に注意を払いながらいくつかの要素分割について検討し、十分な精度が得られることを確認した。節点数は2514である。荷重は $x=30$ 上の節点を変位制御することによって与えた。変形解析の手順は次の通りである。まず、ひずみゲージの測定値に対応するように図8のハッチを施した要素の表面での伸びひずみが2.8%になるまで引っ張る。そして $x=30$ 上での境界上の節点の合力が0になるまで除荷し、切欠き断面での残留応力の分布を求める。次に繰り返し载荷のシミュレーションを行うわけであるが、No.5の供試体に対しては大

ひずみ低回数繰返しに関しては実験通りのシミュレーションを行った。またNo.1～4に相当する1000回、10000回の繰返しを行うのは現実的ではないので、No.1とNo.2に対しては5回の繰返しにとどめた。

数値シミュレーションにおける材料定数は弾性係数については表2の実験結果をもとにして、

$$E = 215 \text{ GPa}, \nu = 0.29 \quad (1)$$

とした。また材料降伏後の加工硬化については、広範囲で正確なものを与えることは現在のところ困難であるが図3(b)の実験結果と繰返し载荷も含むことを考慮し、MARC®で使用可能な移動硬化および混合硬化の両方のモデルについて考えた。まず、移動硬化モデルの場合には材料降伏後の真応力(σ)-相当塑性ひずみ(ϵ^p)の関係は降伏だなを無視したべき乗則

$$\sigma = H(\epsilon^p + \alpha)^n \quad \text{ただし} \quad H = 706 \text{ MPa}, \alpha = 1.12 \times 10^{-2}, n = 0.2 \quad (2)$$

を用いた。本問題で特に注目する応力集中部では塑性変形は数10%にもおよぶので高々2%付近で問題となる降伏だなは無視しても影響は無い。一方、混合硬化モデルは塑性変形に伴い降伏曲面が拡大する等方硬化の性質も加味したものでその詳細は文献6)に示されているが、以下に概略を示す。このモデルでも材料定数としては一軸の応力ひずみ曲線を与える。そして降伏曲面の移動と拡大については図9にあるように降伏曲面の中心は一定の割合で応力空間内を移動し同時に降伏曲面も混合硬化領域では拡大するものとしている。そして相当塑性ひずみが一定の値を越えて移動硬化領域に入ると降伏曲面の拡大はとまり移動硬化としての挙動をする。この場合の材料定数としては式(2)を相当塑性ひずみが20%になるまでは1%きざみで線形補間を行い、その後は20%と50%の値を結ぶ直線として与えた。相当塑性ひずみが20%を越える領域が移動硬化領域である。

(2)初期残留応力

切欠き付き供試体を引張った後除荷したときの初期残留応力の分布についてまず考える。図10はX線残留応力の測定値と計算結果とともにプロットしたものである。計算値は $x=0$ の自由表面上での値であり、測定値は既に述べたように $1 \times 1 \text{ mm}^2$ での平均値を測定した5本の供試体について平均したものである。切欠き底部での圧縮応力の定性的な傾向はいずれの加工硬化則に対しても正確に再現されている。圧縮残留応力の最大値は切欠き底部ではなく少し離れたところで現れているのが特徴である。定量的にはこの図よりわかるように移動硬化が最も測定値と良く一致していることがわかる。これは、大変形により除荷時に応力集中部付近で再降伏が生じるためであると考えられる。混合硬化則での一致はあまり良くないが、これはここでの加工硬化モデルでは図3(b)で現れているような塑性変形に

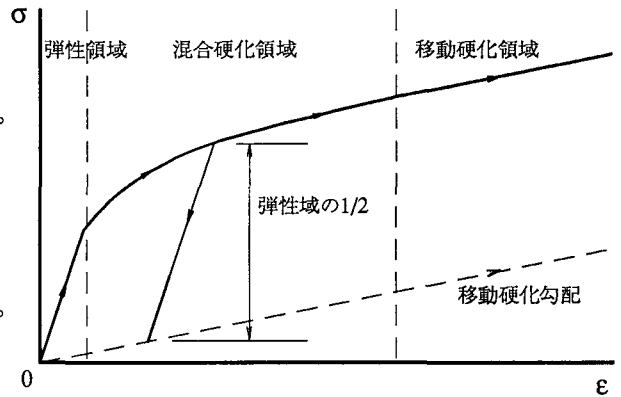


図9 混合硬化モデル

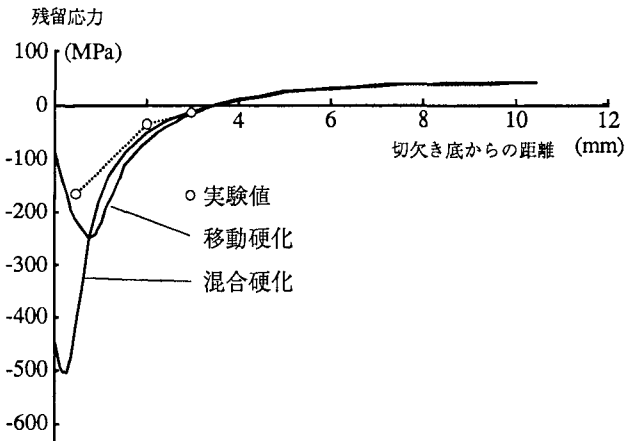


図10 解析による初期残留応力の分布

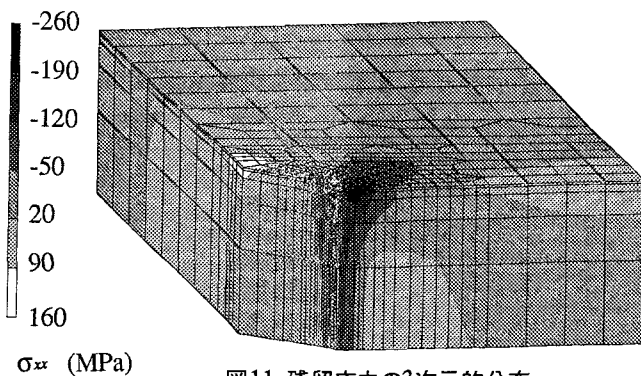


図11 残留応力の3次的分布

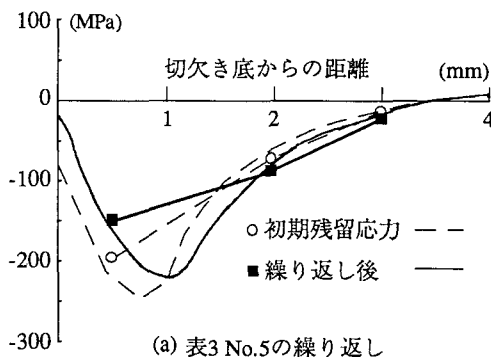
伴う弾性領域の縮小を表現できないためであると考えられる。また移動硬化モデルによる残留応力の3次元的な分布を図11に示した。これより切欠き断面における残留応力は表面付近で特に大きい値をとりその場所的な変化も著しいことがわかる。文献3)では同様の問題を2次元平面応力問題として扱っているがその結果と本結果は定量的に大きく異なっている。平面応力問題シミュレーションは変

形を過大に評価する傾向があり、応力集中部に対してはその近似値としては慎重でなければならないことを示している。

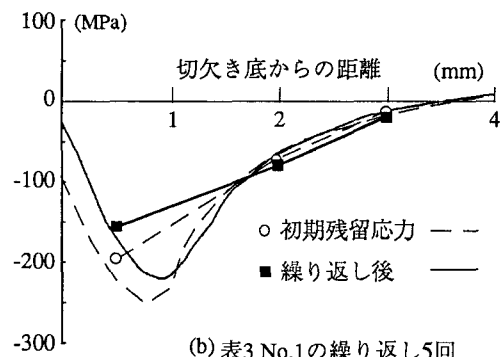
(3)繰り返し载荷による残留応力の変化

まず実験のNo.5の供試体に与えた繰り返し载荷に対応する数値シミュレーションを行った。すなわち図8のハッチングを施した要素の長手方向の伸びひずみを図5と同様に制御する。加えてNo.1,2の供試体に対して与えた繰り返し载荷についてもについても極めて初期の段階についてシミュレーションを行った。この場合は切欠き断面での平均応力が実験に対応するように0MPa～85MPa～170MPa～100MPa～30MPa～100MPa～170MPa～となるように繰り返し载荷を5回行った。この場合は両方ともに加工硬化モデルは初期残留応力の解析において良い一致をみた移動硬化則を用いた。

図12(a,b)に残留応力の分布と繰り返し载荷を行った後の残留応力分布を示す。また測定値に対応するように1×1mm²の範囲での応力の解析値の平均値も示した。このように大きなひずみをとまう繰り返しの载荷では、圧縮残留応力のピークの位置が切欠き底から離れていく傾向があることがわかる。図6(e)の実験値を比較すると実験値はすべての測定点で圧縮残留応力が大きく増加している。それに対し解析値では切欠き底に最も近い0.5mmのところで実験値との隔離が甚だしく逆に圧縮残留応力が減少し、その他の測定点で残留応力の増加がみられる。これは先にも述べたように繰り返し载荷時の加工硬化則の問題であると考えられる。MARC®ではユーザー定義サブルーチンを用いても非常に単純な硬化則しか用いることができない。比較的ひずみの小さい範囲ではあるが繰り返し载荷時には既に多数の研究にみられるように2



(a) 表3 No.5の繰り返し



(b) 表3 No.1の繰り返し5回

図12 繰り返し载荷による残留応力の変化

曲面モデルなどが実験値に良く合うとされている。^{7,8)}加工硬化則に対する結果の依存性は図10からもわかるように敏感であるので大ひずみ下も含めた構成則に関する考慮は繰り返し荷重下での応力集中部の挙動あるいは変形の集中を考える上では必要であろう。

図12(b)は荷重で制御した繰り返し载荷による残留応力の変化を表したものである。残留応力の変化の傾向は基本的には図12(a)と同様であり、圧縮残留応力のピークの位置が切欠き底から離れていく。加えて残留応力の変化量については载荷方法が全く異なるにも関わらず図12(a)のものに近いものになっている。このことから残留応力の大きな変化は繰り返し载荷の比較的早い段階で起こっており、その後の繰り返しでの変化はゆるやかであると考えられる。

4 まとめ

構造部材中の応力集中部のモデルとして切欠き材を用いて塑性履歴による残留応力を導入し、その後の繰り返し荷重による残留応力の変化をX線を用いた非破壊的残留応力測定実験および数値解析により検討した。本研究により次のことがあきらかになった。

1. 応力集中部に塑性履歴により導入された圧縮残留応力はその後の繰り返し载荷によって単純に消失してしまうことはない。切欠き底にごく近い一点に注目するとむしろ逆に初期の段階では増加する傾向が見られる。したがって繰り返し荷重を考える上において初期残留応力が消失するとして無視することは適当ではない。
2. 低レベル荷重での繰り返し回数10000回での残留応力の変化は繰り返し回数1000回のものより小さかった。したがって残留応力は繰り返し载荷の初期の段階では増加する傾向にあり、その後は次第に減少していくことがわかる。
3. 塑性履歴により導入される初期残留応力に関しては、3次元弾塑性変形解析により良い精度で予測できる。
4. しかしながら複雑な塑性変形を伴う繰り返し载荷の数値シミュレーションでは残留応力の定量的な変化量を予測するにはいたらなかった。正確な数値シミュレーションのためには数10%のひずみ領域までカバーする繰り返しを考慮した応力ひずみ関係のモデルが必要であると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたりご協力をいただいた住友金属工業㈱の飯田毅氏と同中央研究所のみなさまに感謝します。また日本車輛㈱の小澤一誠氏にも感謝いたします。

参考文献

1. 後藤 芳顯、柴山 昌和、長谷川彰夫、松浦 聖：塑性履歴を受けた鋼切欠き部および2、3の溶接継手の疲労強度、構造工学論文集、Vol.32A、pp.1-9、(1986)
2. 大野 貴志、石黒 幸文、山田健太郎、青木尚夫：応力集中部材の残留応力場における疲れ亀裂進展挙動、構造工学論文集、Vol.34A、pp.459-468、(1988)
3. 小畑 誠、峯村 充、後藤 芳顯、松浦 聖：塑性履歴による切り欠き部の残留応力の発生機構とその疲労強度への影響について、構造工学論文集、Vol.35A、pp.301-307、1989
4. 日本材料学会編：X線応力測定法、養賢堂、1971
5. 日本熱処理技術協会 ひずみ研究部会 編：残留応力ー発生・影響・測定・対策ー、共立出版株式会社、1970
6. 日本マーク株式会社：非線形構造解析FEMプログラム MARC K-4 マニュアル、Vol.A-E2、1992
7. Dafalias, Y.F. and Popov, E.P.: A model of nonlinear hardening materials for complex loading, Acta Mech., Vol. 21, pp. 173-192, 1975.
8. 水野 英二、沈 赤、宇佐美 勉：鋼部材の繰り返しねじり実験と二曲面モデルによる数値シミュレーション、構造工学論文集、Vol.39A、pp.221-234、(1993)

(1993年9月16日受付)