板幅・板厚方向に分布する圧縮残留応力場の 穴あけに伴う残留応力再分布と変形挙動*

本田 和 男^{*1}, 鳥居 太始之^{*1}, 費 中 敏^{*2}

Residual-Stress Redistribution and Deformation Due to Formation of a Hole in a Compressive Residual Stress Field Distributed along the Width and the Thickness of a Plate

Kazuo HONDA, Tashiyuki TORII and Zhongmin FEI

Residual-stress redistribution and the resulting deformation during the formation of a full-depth hole in a plate with residual-stress distribution along the width and the thickness were elastically calculated using the three-dimensional finite-element method. The initial residual stress was introduced into each element through the intermediary of the most suitable eigen-strain distribution in such a way that its redistribution due to the surface removal accorded with the X-ray residual stresses on the surface removed successively by electropolishing. The experimental results of the residual-stress redistribution and the resulting deformation due to hole cutting on the electric discharge machine were in good agreement with the analytical results. It was also found in the analysis that the shape of the hole was influenced by the residual stress released in the process of creating the hole.

Key Words: Elasticity, Metallic Materials, Residual-Stress Redistribution, Finite-Element Method, Three-Dimensional Analysis, Hole Cutting

1. 緒 言

残留応力をもつ物体の一部分が削り取られると残留応力再分布と変形が起こる。それらは材料強度と精密加工の両面において重要な問題であるが、これまでに系統的に調べた研究はあまり見当たらない。著者らは基礎的な立場から、板幅方向にのみ変化する軸方向残留応力をもつ板材に穴加工を行い、穴貫通までの残留応力再分布および変形挙動について実験および有限要素法弾性解析により検討を行ってきた。その結果、残留応力再分布および変形挙動を実験により確認でき、それらの挙動に対して、板貫通穴では二次元解析の適用が可能であるが非貫通穴では三次元解析が必要であった。さらに、解析結果は放電穴加工における実験結果とよく一致することを明らかにした⁽¹⁾⁽²⁾。

さて、一般に高温にある板材が急冷されるとき温度分布は、板の平面内のみでなく厚さ方向に沿っても変化する場合が少なくない。すなわち、残留応力も板厚方向にも変化する分布になるが、このような板材に非貫通穴はもちろんのこと、幾何学的二次元となる貫

通穴をあける場合の残留応力再分布および変形挙動についても、三次元的な力学的挙動の解析が必要である。とくにこの場合、厚さ方向に沿って変化する残留応力分布を解析の初期条件として導入する必要がある。

一方、これまでの著者らの報告において、引張残留応力場を対象とした場合、穴周囲に危険な引張応力の集中を生じることを明らかにしたが⁽¹⁾⁽²⁾、逆に圧縮残留応力場の穴加工においては穴周囲に圧縮応力の集中を生じることが予想される。この圧縮応力の集中は引張負荷時の穴周辺の引張応力を低減させるので、切欠部材の強度上昇に寄与する可能性もあると考えられる。

そこで、本研究では、まず軸方向残留応力が穴加工部の中央では圧縮となるように、また板厚方向に沿っても変化するような残留応力分布を有する板材を製作し、板材表面層の繰返し除去後の X 線残留応力測定値と三次元有限要素法弾性解析を用いて初期残留応力の分布を推定した。そして、板材中央部に放電穴加工を行い穴貫通までの残留応力再分布および変形挙動を実験により調べ、さらに三次元有限要素法による穴部除去に伴う残留応力再分布と変形の解析結果を実験結果と比較検討した。また、残留応力場での除去穴の形

* 平成 2 年 3 月 10 日 中国四国支部第 28 期総会講演会において講演、原稿受付 平成元年 7 月 25 日。

*¹ 正員、岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中 3-1-1)。

*² 正員、岡山大学大学院。

状が、穴加工時の板材拘束条件に関連してどのように変化するかについて解析的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試験片の製作 試験片は S45C 材で、図 1 の中央部に示す形状寸法に機械加工した後、加工などの影響を取り除くため 1 123 K・1 h 保持の真空焼なましを行った。

さて、軸方向残留応力が板幅中央部に圧縮(板厚に沿っても変化する)となる残留応力分布を次の方法により発生させた。まず、図 1 のように試験片中央部から板幅方向(表面から板厚内部方向にも)に急冷されるよう試験片の両側面を厚い治具で狭んでボルト・ナットを用い締め付けた。その状態で全体を真空中にて一様に加熱し 953 K から水冷を行った。このように、マルテンサイト変態を起こさない A₁ 変態点以下の温度から水冷を行うと、治具に挟まれた試験片中央部では両側の厚い治具よりも冷却が速いため圧縮の熱残留応力が生じると考えられる。冷却後ボルト・ナットを外し中央の試験片を取り出した。

2.2 残留応力測定法と硬さ測定 残留応力の測定は、島津製 DX-10 形 X 線応力測定装置を用い、C_r-K_α 回折線、4×4 mm² の X 線照射面積および ±2.5° の X 線入射角揺動の条件で行った。なお、測定の場所と方向を設定した後応力値が得られるまでは全自動である。すなわち、オプションとして半価幅によるピーク位置の決定、4 点測定値の最小二乗法による $\sin\psi$ -2 θ 線図こう配の決定および応力定数 -318.2 MPa/deg を指定した。

一方、水冷による材質変化がないことを確認するた

めの硬さ測定は、マイクロビッカース硬さ計により荷重 500 g および保持時間 30 s の条件で行った。

2.3 穴加工法 放電加工機 JAPAX-D 201 を用いて水冷材の中央に直径 18 mm の穴をあけ、穴貫通まで試験片表面での残留応力再分布、穴周辺の変形挙動および試験片全体の曲げ挙動(たわみ)を調べた。すなわち、穴加工前に試験片の両表面穴周辺および側面にマイクロビッカース圧痕をつけて、穴加工前後における圧痕間距離の変化量をそれぞれ光学顕微鏡および読取り顕微鏡で測定し、穴周辺の変形量と試験片全体のたわみを求めた。

3. 初期残留応力分布の推定

3.1 推定方法

3.1.1 初期残留応力の導入法 前報において、有限要素法の各要素に固有ひずみ ϵ^* を与えることにより初期残留応力の発生をシミュレーションできることを述べた⁽²⁾。すなわち、どのように固有ひずみ ϵ^* を決定するかが重要となる。ここで、固有ひずみ ϵ^* として等方的な熱膨張・収縮による残留応力発生条件、すなわち $\epsilon^*_{xx} = \epsilon^*_{yy} = \epsilon^*_{zz} = \epsilon^*_0$, $\epsilon^*_{xy} = \epsilon^*_{yz} = \epsilon^*_{zx} = 0$ (x, y, z は、板幅、軸、板厚の各方向とした) が用いられ、原則として初期残留応力が引張りの領域に負の固有ひずみを、圧縮の領域に正の固有ひずみが与えられる。そして、表面層除去後の残留応力推定値が X 線残留応力測定値に合致するよう試行錯誤により最終的に固有ひずみを決定することになる。なお、前報ではこの方法により板幅方向にのみ変化する残留応力の発生をシミュレーションした⁽²⁾。

3.1.2 部分的物体除去法 三次元有限要素法弾性解析において、残留応力 $\{\sigma_r\}$ をもつ立体要素 m を除去するために式(1)で計算された節点力 $\{f\}$ を負荷条件とし、そして要素 m の縦弾性係数 E を物体の E に比べて非常に小さい値、すなわち $E \approx 0$ にすれば要素 m の除去をシミュレーションできる⁽²⁾。

$$V \cdot [B]^T \{\sigma_r\} = \{f\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 V は立体要素 m の体積、 $[B]$ は、各節点の座標から決定される B マトリックスである⁽³⁾。除去される要素が n 個ある場合、上述の節点力 $\{f\}$ について n 個の総和をとった後、除去される n 個の要素の縦弾性係数 $E \approx 0$ とすればよい。詳細は前報で述べたが⁽¹⁾⁽²⁾、本報ではこの方法を用いて残留応力をもつ板材の表面層除去並びに穴部除去の解析が行われている。なお、解析では材料の縦弾性係数 $E = 205.8$ GPa、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。また、除去される要素では $E = 205.8 \times 10^{-11}$ GPa の十分小さい値とした。

図 1 試験片と残留応力の発生法

3・2 固有ひずみ分布の導入 図2は、試験片の両表面層を電解研磨により同時に少しずつ（約250 μm ）除去し、新表面で測定したX線残留応力値を丸印で示す。除去部は試験片中央 x 軸から軸方向の上下それぞれ10 mmの帯状部（右図の斜線部）である。図は、試験片中央 x 軸上（ a の位置）での軸方向残留応力（左側）と y 軸上（ a の位置）での幅方向残留応力（右側）を試験片表面から除去された厚さ t_0 に対して示している。なお、データは試験片板厚中心に対称であるので、板厚半分のみを示す。まず測定結果により、 x 軸上の軸方向残留応力は表面近傍では板幅全域で圧縮、表面層の除去後測定された新表面ではとくに板側面付近（ a の大きな値）になると引張側へ移動すること、および y 軸上の幅方向残留応力は中央軸上の測定位置に関係なく表面付近圧縮・内部引張りとなることがわかる。なお、水冷前後試験片表面の硬さの変化は小さく、水冷による材質変化はほとんど生じていないことが確認された。

さて、有限要素法弾性解析においては、軸、板幅、板厚の各方向の対称性から試験片1/8に対し図3のような要素分割を行い、5個の四面体により構成される六面体924個、すなわち4620個の四面体を用いた。初期残留応力を発生させるために導入した固有ひずみ分布は、初期残留応力分布が板厚（ t ）と板幅（ W ）の両方向に変化することに着目して図4（a）のような板厚方

向のみに変化する分布と図4（b）のような板厚と板幅の両方向に変化する分布により構成されている。なお、図4（b）において固有ひずみの分布は、板厚方向において板厚中央（ $z=0$ ）から $z=1.75$ mmまでは一定で、 $z=1.75$ mm～3.0 mm（表面）までは線形的に変化している。さて、図4の固有ひずみ分布を図3の各要素に導入し、初期残留応力を発生させた後、実際の表面層除去と同様に板材の両表面層を順次取り除き、再分布した新表面での残留応力の解析結果を図2の各線により示した。これより、両表面層除去後新表面での再分布した残留応力の解析結果が両表面層除去後のX線残留応力測定値をほぼ満足するので、試行錯誤の結果決定された図4の固有ひずみ分布により導入した初期残留応力分布は妥当であることがわかる。

3・3 推定結果 以上の方法により推定された初期残留応力分布を次に示す。まず、図5は、試験片中央から板幅方向各位置での軸方向残留応力の板厚方向の分布（左図）と各板厚方向深さにおける軸方向残留応力の板幅方向分布（右図）を示したものである。なお、各位置を表すパラメータ a は図2と同じであり、 t は表

図3 初期残留応力分布推定用の要素分割図

図2 表面層除去後の新表面での残留応力（測定値と解析値）

(a) Distribution in the thickness

(b) Distribution in the width

図4 固有ひずみの分布

面からの板厚方向の距離である。図6は、同様にパラメータ a と t を用いて幅方向残留応力の板厚方向分布(左図)と長手方向分布(右図)を示したものである。これより、図5から軸方向初期残留応力は試験片表面では全体的に圧縮、内部に近づくにつれてとくに板側面付近で引張側へ変化していること、および図6から幅方向初期残留応力は試験片中央からの長手方向距離 a に関係なく表面圧縮・内部引張りとなることがわかる。ここで、解析において表面の残留応力としては、表面に隣接する要素(表面から要素中心の距離 $t=0.25$ mm)内の応力が用いられている。以上の推定結果より、このような板幅方向および板厚方向に変化する初期残留応力分布が本試験片に生じていると考えられる。

4. 残留応力再分布と変形

4.1 実験的検討

4.1.1 残留応力再分布 図7は、穴深さ h をパラメータとして貫通までの軸方向残留応力再分布の実験結果を、試験片中央から幅方向への距離を横軸にとり示したものである。上表面と下表面の結果をそれぞれ左図および右図で表し、実線は初期残留応力を示している。これより、上表面においては穴加工に伴い除去部の残留応力が解放され残留応力再分布が生じ、そのため穴縁に圧縮応力の上昇(以下、絶対値を意味する)が起こり、穴深さ $h=4$ mm の近くで最大となりそ

の後低下することがわかる。下表面においては初期に残留応力再分布が引張側へ起こり、穴深さが増すにつれて圧縮側へ変わり、穴貫通後上表面と同じく穴縁に圧縮応力の上昇を生じることがわかる。このような穴周辺の圧縮残留応力の上昇は、前報⁽²⁾で述べた引張残留応力場の加工穴周辺にみられる危険な引張りの応力集中に替って、むしろ穴材の引張負荷による破壊を抑制するのに有効であると予想される。一方、実験結果は省略するが、試験片中央部下表面の幅方向残留応力については、穴深さが増すと応力は引張側へ少し変化する測定結果が得られた。

4.1.2 穴周辺の変形と曲げ変形 図8の上図は、貫通までの穴周辺の変形量を穴深さ h を横軸にとり示したものである。穴周辺上表面と下表面について、軸方向と幅方向の各標点距離 D_y , D_x に対する変化量 ΔD_y , ΔD_x がそれぞれ実線と破線で示されている。な

図6 幅方向初期残留応力の推定値

図5 軸方向初期残留応力の推定値

図7 放電穴加工に伴う残留応力再分布(測定値)

お、穴を含む標点距離は図のように種々変えている。
これより、穴加工による残留応力の解放に伴い変形が生じ、穴が深くなるにつれて上表面では軸方向は収縮し幅方向は初期に少し収縮その後伸びること、および下表面では幅方向は伸び軸方向は初期に伸び穴貫通付近で急に収縮することがわかる。

次に、図8の下図は、穴貫通まで試験片全体の曲げ変形挙動を示す。実線と破線は、それぞれ試験片中央からの距離 $L_1=85\text{ mm}$ と $L_2=50\text{ mm}$ のところでのたわみの測定結果である。これより、穴が深くなるにつれてたわみが生じ、穴深さ $h=3\sim 4\text{ mm}$ のところで最大となりその後減少することがわかる。このような穴周辺の変形および試験片全体の曲げ変形は、圧縮残留応力場の穴加工のため、前報⁽²⁾の引張残留応力場の穴加工とは逆符号となっていることがわかる。

4.2 解析的検討

4.2.1 残留応力再分布 図9は、板材に穴をあける実験の過程をシミュレーションする有限要素法弾性解析に使われた要素分割を示す。軸および幅方向の対称性から板材1/4について要素分割を行い、初期残留応力推定の場合と同じ5個の四面体からなる六面体828個、すなわち四面体4140個の要素を用いた。初期残留応力の発生に使われた固有ひずみ分布は、図4のものと同じである。

図8 放電穴加工による試験片表面穴周辺の変形と試験片全体のたわみ(測定値)

図10は、穴貫通まで板材表面での軸方向残留応力再分布の解析結果を示す。これより、左図の上表面においては、穴深さ $h=4\text{ mm}$ 程度までは穴周辺に圧縮応力が増加しその後減少すること、および右図の下表面においては、穴深さ $h=2\text{ mm}$ 程度までは残留応力再分布が引張側に变化し、その後圧縮側へ変わり穴貫通後上表面と同じく穴縁に圧縮応力の増加を生じることがわかる。このように解析結果は、全体として図7の実験結果とよく対応している。一方、板材下表面での幅方向残留応力再分布において、実験結果と同様に穴が深くなるにつれて幅方向の応力が引張側へ変化する解析結果が得られた。

図11は、穴深さ $h=0, 2\text{ mm}$ および 4 mm のとき、図中の穴底から下表面までの $a_1(a=1.0\text{ mm})$ 、なお、 a は図2と同様である)、 $a_2(6.0\text{ mm})$ 、 $a_3(8.0\text{ mm})$ および穴近傍 $a_4(9.5\text{ mm})$ での軸方向残留応力の板厚上の再分布を、上表面から板厚方向の距離 t を縦軸にとり示したものである。なお、穴近傍 a_4 での穴貫通後すな

図9 穴除去解析用の要素分割図

図10 穴貫通までの残留応力再分布(解析値)

わち $h=6\text{ mm}$ の結果も示した。これより、穴深さ $h=2\text{ mm}$ では除去された部分内の応力がほとんど圧縮のため、穴底前方周辺で残留応力再分布が圧縮側に移動していることがわかる。とくに大きな圧縮応力が解放された試験片中心に近い穴底 (a_1) で圧縮側への移動量が大きく、穴深さ $h=4\text{ mm}$ となると初期残留応力が引張りの部分もかなり除去部に含まれるため、圧縮側への移動量は小さい結果となっている。また、穴が深くなるにつれて、試験片内部での最大引張応力の位置が試験片の中央から下表面へ移動する (a_4 では再び中央に戻る) こと、および引張残留応力は初期値より常に小さいことがわかる。

4・2・2 穴周辺の变形と曲げ变形 図 12 は、穴貫通まで穴周辺の变形および試験片全体の曲げ変形の解析結果を示したものである。上図の穴周辺の变形について、穴が深くなるにつれて、上表面では軸方向は収縮し幅方向は初期に収縮その後伸びること、および下表面では幅方向は伸び軸方向は初期に伸びその後収縮することがわかる。このような解析結果は、図 8 で述べた実験結果の傾向とよく対応している。一方、下図の曲げ挙動について穴が深くなるとたわみが増加し穴深さ $h=4\text{ mm}$ の近くで最大となり穴貫通後元に戻ることをわかる。このような解析結果も、図 8 の実験結果の傾向とほぼ一致している。

4・2・3 穴の形状 残留応力を有する板材に穴加工を行うと、穴除去部の残留応力が解放されることに

より、希望する精度の穴形状にならない可能性がある。その場合、穴加工に伴って応力解放は連続的に生じようとするので、試験片拘束の強弱によっても穴の形状が影響を受けるものと考えられる。

図 13 は、3・3 節で推定した残留応力をもつ板材が完全に拘束された状態で貫通穴をあけ、そして拘束をはずした場合 (ケース I) の穴形状を示す。図 (b) は板材上下表面での穴形状を示し、図 (c) の左と右は図 (a) に示す板材の y - y 断面と x - x 断面内の穴形状を示し、実線と破線はそれぞれ残留応力がない場合とある場合の結果を表している。これより、穴除去部の残留応力解放のため、貫通穴が板厚全域にわたり幅方向に広がり真円とならないことがわかる。また、穴が貫通した後板材の拘束をはずして除去を続ける場合、図中の工具域内 (斜線付実線の内側) に入っている部分が最終的に除去されることになる。

図 14 は、板材の拘束条件を少し緩めて穴深さ h が 2 mm 進むごとにいったん拘束をはずし、その拘束のない間穴深さをそのままにして穴周囲の除去を続ける場合 (ケース II) の穴形状を示す。図 (a) と (b) は、それぞれ板材の上表面と穴底での穴形状を示している。なお、一点鎖線、点線および破線は、それぞれ穴深さ $h=2\text{ mm}$, 4 mm および 6 mm (貫通) のときの形状を表している。これより、除去穴が深くなるにつれて、穴

図 11 穴底前方の残留応力再分布 (解析値)

図 12 貫通までの試験片表面穴周辺の变形と試験片全体のたわみ (解析値)

図 13 貫通に至るまで完全に拘束された場合の除去穴の形状

が上表面では初期に圧縮されその後広がること、および穴底では初期に圧縮されその後広がるが、穴貫通の近くで再び圧縮されることがわかる。また、貫通後の上表面と下表面での穴形状が異なり、ケース I と違う拘束条件のもとでは穴の形状も違ってくることがわかる。なお、拘束によりこのような穴形状の変化が生じても、そのわずかな領域の応力解放によって、穴周辺の残留応力再分布と変形の解析結果が影響を受けることはないと考えられる。

5. 結 言

固有ひずみにより残留応力を発生させた板材の表面層繰返し除去の三次元有限要素法弾性解析と X 線残留応力測定値を用いて、板幅・板厚方向に変化する初期残留応力分布を推定した。さらに、板材に放電穴加工を行い、穴貫通までの三次元的な残留応力再分布および変形挙動について実験と解析の両面から検討を行った。得られた結果を以下に要約する。

(1) 電解研磨による板材表面層の繰返し除去を行い、その都度測定された板材表面での X 線残留応力測定値が、三次元有限要素法弾性解析を用いて同過程をシミュレーションした解析値と一致するように固有

図 14 穴深さが 2 mm 進むごとに拘束し直した場合の除去穴の形状

ひずみ分布を与えて、初期残留応力分布を推定した。その結果、軸方向残留応力は、試験片中央部付近では板厚内部も含めて圧縮、両側に近い場所では表面圧縮から板厚内部引張りへと変化することがわかった。

(2) 板幅と板厚の両方向に変化する圧縮残留応力場付近で放電穴加工を行った結果、穴貫通に至るまでの過程で残留応力再分布が生じて、穴周辺では圧縮応力の上昇を生じることがわかった。さらに、残留応力再分布の実験結果は、全体として穴部除去の三次元有限要素法による弾性解析結果とよく一致した。

(3) 穴貫通に至る過程において、残留応力再分布に伴い、穴貫通までの穴周辺の変形および試験片全体の曲げ変形が生じることを実験により確認できた。そして、圧縮残留応力場の穴加工では、残留応力再分布と同様に変形挙動も前報の引張残留応力場の穴加工の結果とは符号が逆となることがわかった。さらに、実験結果は全体として三次元有限要素法による弾性解析結果とよく一致した。

(4) 残留応力場では、加工時板材の拘束条件にも関連して、穴の形状が工具形状とは相違する可能性のあることを三次元有限要素法弾性解析により明らかにした。

終わりに、実験にご援助いただいた文部技官・徳田勝氏に謝意を表す。

文 献

- (1) 本田・ほか 2 名, 材料, 37-415, (1988), 391.
- (2) 本田・ほか 2 名, 機論, 55-512, A(1989), 879.
- (3) 例えば, 鷲津・ほか 4 名, 有限要素法ハンドブック-I 基礎編, (1982), 349, 培風館.

討 論

〔質問〕 佐々木 敏彦〔職業訓練大学校〕

(1) 図2において x 軸上の σ_y の分布(A)と y 軸上の σ_x の分布(B)について測定値と解析値との一致が示されているが、これら以外の応力成分も同様に一致すると考えてよろしいか。

(2) 初期残留応力分布および加工後の再分布を推定するための固有ひずみの導入に際し、前述のA、Bの測定データを使用することが最も好ましいと考えてよろしいか。

(3) X線応力測定法の使用に際して揺動法を用いた理由、および、測定応力値の精度(応力測定標準に示される $\Delta\sigma$ に相当するもの)をお教えいただきたい。

(4) 図2の測定結果を使用する場合、表面層の除去の影響に対する補正は必要ないのか。

〔回答〕 ご質問に感謝する。その中で、(1)と(2)は関連するのでいっしょに回答させていただく。

(1)および(2) 図1の方法では、板幅方向の冷却による残留応力は x 軸上の σ_y の分布をもち、また長手方向の冷却は支配的ではないので y 軸に沿う残留応力変化は現れないと予想される。このことを確認するために図2の(A)、(B)の位置を選び、この位置での深さに沿う残留応力分布を測定した。すなわち、板厚方向と板幅方向の冷却が支配的な残留応力発生において、図4の両方向に変化する固有ひずみを与える必

要があり、そのためには図2に示す位置での測定値が最も適していると考えられる。なお、解析に入力される残留応力値は中央付近穴除去部内のみ必要なので、図2のaは12mmまでの領域にした。その範囲内では、他の応力成分の解析値も十分信頼してよいと考えている。

(3) X線応力測定装置は、揺動法の使用可能なDX-10形(島津製)である。揺動法を用いれば、回折に与える結晶粒数も増加するので、半価幅法による $\sin^2\psi-2\theta$ 線図の直線からのばらつきは小さくなることを著者らは経験している。また、本装置の使用においても、揺動法が奨励されている。なお、本測定結果において、 $\sin^2\psi-2\theta$ 線図上の直線回帰による応力測定値の誤差 $\Delta\sigma$ は最大20MPa程度になっている。

(4) ご指摘のように図2の残留応力測定値は表面層除去による補正を行っていないが、表面層除去をシミュレートした解析値も補正しない新表面での値をとっている。図2の目的は、固有ひずみの導入による残留応力解析値が測定値に一致するか否かをみるためのもので、これには残留応力解放を補正しない解析値と実測値を比較しても問題はない。なお、表面層除去を補正した残留応力分布の解析結果は、図5と図6に示した。