単発放電痕におけるき裂発生域の解析*

楊 友沈** 向山芳世*** 加藤秀雄† 花岡忠昭†

Analysis of Crack Generative Region in Crater Machined by Impulsive Electrical Discharge

Youshen YANG, Yoshitsugu MUKOYAMA, Hideo KATO and Tadaaki HANAOKA

In Electrical Discharge Machining(EDM), the residual stress generates on the surface of the workpiece because of repetitive heating and cooling process. The stress causes decrease of fatigue strength, delayed fracture and stress corrosion which affect quality of the workpiece. In the previous papers, the distributions of temperature and thermal stress in impulsive EDM has been analyzed by means of Finite Element Method taking into consideration the temperature dependency of mechanical properties and thermal physical properties of workpiece material. In this paper, the procedure for analysis of the region in which the crack must be generated is developed and time variation of the region is investigated under various machining conditions. The result shows that, on the machined surface, it is possible to generate cracks along radial and circumferential directions, because the residual stress exceeds the tensile strength.

Key words : electrical discharge machining, crack, thermal stress, residual stress, non-steady finite element analysis

1. 緒 言

放電加工において、加工部には放電の発生に伴う局所的な急速加熱と加工液による急速冷却が繰り返される。その際、電極（工作物および加工電極）各部の温度上昇・下降過程が異なるため、電極各部の自由な熱変形が拘束される、また、一般に周囲の部材による外部的拘束も存在するから、電極には必然的に熱応力や熱変形が発生する。さらに、熱応力が電極材料の降伏応力を超過すれば、塑性変形が起こり、残留応力が生じる¹⁾。この応力は加工部にき裂を発生させ、また、疲れ強さの低下や遅れ破壊等の原因となるから²⁾、系統的な検討が不可欠である。そのため、著者の一人はモンテカルロ法および熱弾性理論による解析やX線応力測定法による実験を行っている^{3)~5)}。しかし、3次元的な応力分布やその時間的変動などについては十分解明されているとはいえない。

そこで著者らは、熱物理定数の温度依存性および熱弾塑性理論を考慮した有限要素法を用いて、より厳密に放電加工過程の計算機シミュレーションを行うことを目的とし、既報⁶⁾⁷⁾で単発放電加工における工作物の3次元非定常温度分布および応力分布について報告した。本報では、さらに材料の引張強さ—温度特性を考慮し、有限要素法により、き裂発生域およびその時間的変動について検討した。

2. 解 析 方 法

半径1mm、厚さ0.68mmの軟鋼材の円筒部分に放電が行われたとし、図1に示すように12012個の三角形リング1次要素からなる軸対称体としてモデル化した。力学的境界条件としては、工作物底面の軸方向の変位のみが拘束されたとした。また、放電柱（供給熱流束）は直径dの円筒形で、放電エネルギー W_0 は工作物上面の直径dの範囲内の節点に均一に分散供給されるもの

とする。放電エネルギー波形は図2に示すような方形波とし、冷却時間 t_{off} は加熱時間（放電パルス幅） t_{on} に比べて十分大きい値とする。初期節点温度と冷却液の温度は20℃と仮定し、熱的境界条件として、加熱中はエネルギーが供給される節点以外の表面節点から冷却液への熱伝達があり、冷却中は全表面節点からの熱伝達があるものとする。

Fig.1 Finite element model of workpiece

* 原稿受付 平成5年5月10日

** 学生会員 千葉大学大学院（千葉市稲毛区弥生町1-33）

*** 正 会 員 山梨大学工学部（甲府市武田4-3-11）

† 正 会 員 千葉大学工学部

Fig.2 Wave form of discharge pulse

Fig.4 Tensile strength dependent on temperature

解析の手順を図3に示す。非定常解析のために時間増分 Δt ごとの繰返し計算を行う。1回の時間増分 Δt に対して、まず、温度分布を求め、ついで、熱応力分布を求める。また、温度分布の結果より各要素の材料の引張強さを求める。この引張強さと熱応力分布を比較し、熱応力が材料の引張強さを越える部分はき裂発生域であると判定する。 Δt は加熱中 ($0 \leq t \leq t_{on}$) は $5\mu s$ とし、冷却中 ($t_{on} \leq t \leq t_{end}$) は温度および応力の変化が時間とともに小さくなるため $5 \sim 50\mu s$ とした。引張強さの温度依存性は文献8)9)などを参考にして、図4に示すように仮定した。また、他の

Fig.3 Flow chart

材料特性は文献8)と同じものを用い、溶融残留層は溶融部のうち低温側30%とした。

Fig.5 Temperature and thermal stress just after completing an impulsive discharge ($t=t_{on}=100\mu s$)

Fig.6 Temperature and thermal stress during cooling process($t=350\mu s$)

Fig.7 Temperature and thermal stress(residual stress) after cooling process($t=t_{end}=3000\mu s$)

Fig.8 Change of crack generative region during cooling

Fig.10 Relationship between pulse duration and depth of stressed region

3. 解析結果

投入エネルギー $W_0=0.25\text{J}$ 、放電パルス幅 $t_{on}=100\mu\text{s}$ の単発放電実験を行い、平均的な放電痕から、放電柱直径 $d=0.6\text{mm}$ を見出した¹⁰⁾。この条件で計算を行い、放電終了時点 $t=t_{on}$ における温度分布を図 5 (a) に示す。熔融温度以上の 70% の領域が除去され、新しい表層が現れている。図中の () 内の数値は各温度における材料の引張強さを示す。図 5 (b) はその時点の半径方向、軸方向および円周方向の熱応力分布を示す。図中、負の応力値は圧縮を、正は引張りを示す。この場合、工作物表層の応力は記入していないが、熔融部はほぼ零、その近傍では高温のため弾性係数が非常に低くなり、非常に小さな圧縮応力となる。加熱中 ($t < t_{on}$) の熱応力も同様であった。従って、加熱中および放電終了直後はき裂は発生し難い。

図 6、7 は冷却途中の時点 $t=350\mu\text{s}$ および冷却終了時点 $t=t_{end}=3000\mu\text{s}$ における温度分布と応力分布を示す。 $t=t_{end}$ では温度がほぼ均一となり、熱応力は残留応力となる。両図の応力分布を比較すると、冷却時間の増加につれて、加工表面部の応力値は大きくなり、応力作用領域も広くなることがわかる。また、工作物の加工表層部に引張応力、内部に圧縮応力が存在し、網点を施した領域では残留応力が材料の引張強さを越えていることがわかる。すなわち、工作物の加工表層部及び近傍では、深さ方向の残留応力は小さいが、半径方向と円周方向の残留応力は大きく、引張強さを越えるため、表層部には円周方向と半径方向のき裂が発生しやすいことになる。これは文献 4) の結果とも合致している。なお、他の条件の場合においても半径方向と円周方向の応力分布はほぼ同じ傾向であった。残留応力が引張強さを越える領域をき裂発生域と呼ぶこととし、以下では、半径方向の応力及びそれによるき裂発生域の深さについて検討す

Fig.9 Change of residual stress σ_r along z-axis

Fig.11 Relationship between pulse duration and depth of crack generative region

る。

図 8 は $t=t_{on}$ から $t=t_{end}$ までの工作物に発生するき裂発生域深さの変化を示す。この図から冷却開始 ($t=100\mu\text{s}$) から約 $180\mu\text{s}$ までの間はき裂が全く発生せず、 $180\mu\text{s}$ 付近でき裂発生域深さが、急激に大きくなるが、 $200\mu\text{s}$ 付近から、ほぼ一定となることがわかる。これは、温度の低下による引張応力の増加が、引張強さの回復より大きいため、ある時点でき裂発生域深さの急増が生じるものと考えられる。

放電エネルギー量を一定 ($W_0=0.25\text{J}$) にし、放電パルス幅 t_{on} を $50\mu\text{s}$ 、 $100\mu\text{s}$ 、 $250\mu\text{s}$ 、 $500\mu\text{s}$ 、 $1200\mu\text{s}$ とした場合の工作物の半径方向残留応力の変化を図 9 に示す。横軸は加工表面からの深さを示す。いずれの場合も、加工表面ではほぼ同じ大きさの引張応力が発生しているが、深くなるにつれて次第に減少し、圧縮応力となった後、再び 0 となることがわかる。表面で同じ応力値をと

Fig.12 Effect of discharge energy on residual stress σ_r along z-axis

Fig.13 Relationship between discharge energy and depth of stressed region

るのは材料の応力-ひずみ特性において最大応力に達しているためである⁹⁾。文献5)に報告された実験結果の数値は上記の結果とはほぼ一致しており、本解析方法の妥当性を裏付けている。

なお、 $t_{on}=500\mu s$ の結果を見ると、加工表面から深さ $15\mu m$ までの残留応力値は工作物材料(軟鋼)の引張強さ($\sigma_{ts}=550MPa$)を超え、き裂発生域深さは $15\mu m$ と判定される。また、引張応力作用域深さは $88\mu m$ である。圧縮応力は深さ $123\mu m$ 付近で最大値(約 $240MPa$)をとる。他の場合についても引張応力作用域深さ l_t 、圧縮応力作用域深さ l_c を読みとり、それらと放電パルス幅の関係を図10に示す。この図から、 l_t 、 l_c ともに放電パルス幅の増大につれて大きくなることがわかる。文献5)の結果と比較すると、例えば $W_0=0.25J$ 、 $t_{on}=250\mu s$ の場合、実験結果では $l_t+l_c=440\mu m$ であるのに対し、本解析結果は $l_t+l_c=420\mu m$ である。また、 $W_0=0.5J$ 、 $t_{on}=500\mu s$ の場合、実験結果では $l_t+l_c=650\mu m$ に対し、本解析結果は $l_t+l_c=678\mu m$ であり、ほぼ一致することがわかる。

図11は放電パルス幅とき裂発生域深さの関係を示す。この図からき裂発生域深さが最大となる放電パルス幅が存在することがわかる。これは、放電パルス幅の増大につれて応力作用領域が順次広がる一方、放電エネルギー密度は低くなるため、最大値をもつものと考えられる。また、放電パルス幅が $500\mu s$ 以下では、放電パルス幅の増加に対してき裂発生域深さの増加の割合が大きくなる。

図12は、放電パルス幅を一定($t_{on}=500\mu s$)とし、放電エネルギーを $0.125J$ 、 $0.25J$ 、 $0.5J$ とした場合の工作物軸上の残留応力を示す。なお、実験結果等¹¹⁾に基づき放電柱直径もそれぞれ $0.45mm$ 、 $0.6mm$ 、 $0.8mm$ と変化させた。この図から引張応力作用域深さ l_t および圧縮応力作用域深さ l_c を読み取り、放電エネルギー

Fig.14 Relationship between discharge energy and depth of crack generative region

ギーとの関係を図13に示す。この図から、 l_t および l_c はともに放電エネルギーを増加すると大きくなることがわかる。

図14は放電エネルギーとき裂発生域深さとの関係を示す。放電エネルギーが増加するにつれてき裂発生域深さも大きくなるが、図11と比較するとその影響はかなり小さい。これは、放電エネルギーが増加しても放電柱直径が大きくなるため、放電エネルギー密度は必ずしも大きくならないためである。

なお、本論文では、残留応力が引張強さを越える領域をき裂発生域としたが、き裂の発生・進展により、応力が緩和されるので¹²⁾、実際にき裂が発生する領域はこれより小さくなると考えられる。今後、き裂発生・応力緩和を考慮した解析を行う必要がある。

4. 結 言

単発放電痕における工作物のき裂発生域について、有限要素法により解析した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 加熱中は、熱応力が低いため、き裂は発生し難い。
- (2) 加工表層部の半径方向と円周方向の残留応力は材料の引張強さを越え、この2方向にき裂が発生しやすい。
- (3) き裂発生域深さは冷却過程のある時点で急増し、その後一定となる。
- (4) 放電エネルギー量より、放電パルス幅の方がき裂発生域深さに大きく影響する。

参 考 文 献

- 1) 米谷 茂：残留応力の発生と対策，養賢堂，(1975) 6。
- 2) 松山晋作：遅れ破壊，日刊工業新聞社，(1989) 4。
- 3) 向山芳世，三橋真成：放電加工における応力分布に関する研究(第1報)，電気加工学会誌，9, 18 (1976) 39。
- 4) 倉藤尚雄，向山芳世：放電加工の研究，電気加工学会誌，3, 4 (1969) 3。
- 5) 向山芳世，緒方 勲，日原政彦：放電加工における応力分布に関する研究(第2報)，電気加工学会誌，26, 13 (1980) 33。
- 6) 向山芳世，楊 友沈：放電加工における溶融層の3次元解析，電気加工学会誌，26, 53 (1992) 13。
- 7) 向山芳世，楊 友沈：放電加工に基因する残留応力の3次元解析，1991年度精密工学会秋季大会講演会論文集，891。
- 8) 上田幸雄，山川武人：有限要素法による熱弾塑性挙動の解析，溶接学会誌，26, 42 (1973) 70。
- 9) 日本金属学会：金属材料の強度と破壊，丸善，(1964) 77。
- 10) F.Von Dyck and R.Snoeys：Investigations of EDM of operations by means of Thermo-Mathematical Models, Ann. CIRP, 20, 1 (1971) 6。
- 11) A.S.Zingerman：Propagation of a Discharge Column, Soviet Physics-Technical Physics, 1, 5 (1958) 992。
- 12) 向山芳世，緒方 勲，日原政彦：放電加工における応力分布に関する研究(第3報)，電気加工学会誌，15, 29 (1981) 20。