

論文の内容の要旨

論文題目 破壊靱性試験におけるポップインを再現可能な数値計算法の開発とポップインの合理的許容判定規格の新提案
Development of numerical method for reproducing pop-in on fracture toughness test and new proposal for reasonable pop-in acceptance criteria in standards

氏 名 漢那 宗平

溶接継手の破壊靱性試験において、疲労予き裂先端に脆性き裂が発生し、わずかに伝播した後最終破断することなく伝播停止に至る、ポップインと呼ばれる現象が起こる場合がある。現行規格のポップインの許容判定基準が過度に保守的であれば、破壊靱性値は過小評価され得る。このとき、微小な欠陥であっても許容されず、再製作や補修に高額な費用や多大な労力を要することになる。

そこで本研究では、ポップインの許容判定基準の緩和を目的とした検討を行った。さらに、ポップインの原因を分類し、主破面に発生する脆性き裂だけでなく、セパレーションと呼ばれる特に熱加工制御 (Thermo Mechanical Control Process: TMCP) 材で見られる板厚表裏面に平行な層状の割れも対象とした。

第 1 章の序論では、ポップイン現象について説明し、許容判定法における現状の問題点を整理した。また、本研究による解決課題、目的と構成を示した。

第 2 章の本論文遂行に必要な背景知識の整理では、鉄鋼材料の金属学的特徴、鋼の脆性破壊のマクロメカニズム、鋼構造物の大規模破壊の歴史、靱性評価の黎明期とシャルピー衝撃試験、破壊力学の創成、き裂先端開口変位 (Critical Tip Opening Displacement: CTOD) 評価式の確立と算定式改善の経緯、動的き裂伝播に関する基礎知識、数値解析による動的き裂伝播のシミュレーション技術について整理した。

第 3 章の低靱性層を含む溶接継手によるポップインの再現実験について、以下にまとめる。

- ・ 低靱性層を含む実溶接継手と靱性差を有する異材溶接継手について、引張試験と破壊靱性試験を実施した。
- ・ 各試験結果より、破壊靱性値と有限要素法（FEM: Finite Element Method）による弾塑性解析に必要な材料定数を取得した。
- ・ 靱性差を有する異材溶接継手の破壊靱性試験で、狙い通りポップインが発生した。よって、異材溶接継手における破壊靱性値の温度依存性の違いが、ポップインの再現に有効であることを示した。
- ・ 異材溶接継手には、試験片の切欠き部を板厚方向に押しして塑性変形により分布を持った残留応力を平準化する局所圧縮法を実施した。疲労予き裂の前縁形状の均一性は Valid であったことから、局所圧縮法の効果があったといえる。
- ・ 実溶接継手の破壊靱性分布が 2 母数 Weibull 分布に従うと仮定し、破壊試験結果にフィッティングして、代表値となる尺度母数を 0.064mm と求めた。試験片 5 本分で最低値の 0.025mm となる試験片 No. A-1 の破壊靱性試験結果を解析条件に入力した。入力値 0.025mm は代表値 $\delta_0=0.064\text{mm}$ より十分小さく、保守的な値である。

第 4 章の有限要素法シミュレーションによるポップイン現象の再現について、以下にまとめる。

- ・ き裂伝播問題に最も良く用いられる節点解放法を用いて、き裂伝播領域、材料定数およびポップイン発生時の荷重を正確に反映する解析を実施した。実溶接継手および異材溶接継手の破壊靱性試験でのポップイン発生前後で変化した荷重とクリップゲージ開口変位は、実験と解析でよく一致した。よって、ポップイン前後の静的平衡状況を FEM の節点解放法でよく再現できた。
- ・ 異材溶接継手の節点解放法による解析結果について、ひずみ速度に関する動的な影響を考察した。静的解析でもき裂前縁の節点を順次解放する節点解放法により、脆性き裂の伝播停止メカニズムを議論することが可能であり、簡易検討法としての可能性を示した。
- ・ FEM ソフトウェアに実装されている粘着面定義を用いて、実溶接継手の破壊靱性試験結果に粘着面の損傷則を合わせ込むことで、脆性き裂の伝播範囲やポップイン発生時の荷重が実験と解析で一致した。ポップインの要因である脆性き裂の発生伝播停止挙動を、FEM の粘着面を用いてよく再現できた。
- ・ 破壊靱性試験結果を解析で再現できたことから、構築した損傷則の妥当性を示した。
- ・ 構築した損傷則はポップインの許容判定条件の提案に必要なものである。

第 5 章のセパレーションき裂のポップイン許容判定法の構築および提案について、以下

にまとめる.

- セパレーションき裂が発生しやすい鋼材を用いて、シャルピー衝撃試験を実施した. 試験後に破面を解放し、セパレーションき裂の長さ l と深さ d の比が $1.5 \sim 2.5$ の間に留まる、すなわち半円 ($l/d=2$) に近いことを確認した.
- ポップインの許容判定法を構築するため、FEM の節点解放法を用いて、曲げの荷重モードの破壊靱性試験 SE(B)と、引張の荷重モードの構造物 SE(T)に円状セパレーションき裂が発生する仮想数値実験を実施した. SE(B)と SE(T)のセパレーション径とセパレーションき裂発生時の J 積分値を一致させた.
- 荷重-クリップゲージ開口変位線図を出力し、最も厳しいセパレーション径が 20mm, J 積分値が 1000 kJ/m^2 の荷重条件で、SE(B)の荷重降下率が最大の 7.95%であった.
- SE(B)と SE(T)の疲労予き裂前縁のき裂開口応力を大小比較し、荷重降下率が 5%を超えたとしても、き裂開口応力はほぼ同じであった. また、同じ J 積分値では SE(T)より SE(B)の板厚方向応力が大きく、SE(B)の方がセパレーションき裂は開口しやすい.
- セパレーションき裂の伝播停止に対する動的な影響を考察した. セパレーションき裂発生時の静的板厚方向応力を材料の局所限界破壊応力として、この局所限界破壊応力にき裂伝播中の動的板厚方向応力が一致するときのセパレーション径から、セパレーションき裂の臨界長さを求めた. SE(B)と SE(T)の臨界長さが同じとき、J 積分値は SE(T)より SE(B)が大きい. つまり、セパレーションき裂の伝播停止に要する荷重レベルは、SE(T)より SE(B)の方が厳しく、荷重レベルの厳しい SE(B)でセパレーションき裂が伝播停止すれば、構造物で発生したき裂も伝播停止することが見込まれる.
- これらの解析結果から、破壊靱性試験でセパレーションき裂によるポップインが発生した場合、ポップインは構造物にとって致命的ではないと考えられる.

第 6 章の主破面き裂のポップイン許容判定法の構築および提案について、以下にまとめる.

- 第 4 章で構築した損傷則を用いて、FEM の粘着面による仮想数値実験を実施した. 解析モデルは、破壊靱性試験を模擬した三点曲げ試験片 SE(B)と、構造物で支配的な引張の荷重モードを模擬した引張試験片 SE(T)の 2 つである.
- ワイブル応力はき裂材の寸法や形状、負荷様式に依存しない破壊パラメータである. SE(B)と SE(T)のワイブル応力を一致させる荷重条件とした.
- ポップインが発生した破壊靱性試験の試験片 No. A-1 とワイブル応力が同じ SE(T)の解析を実施した. SE(T)も全断面が破壊せず、脆性き裂が停止するポップインを示した.
- ポップインの許容判定基準を、保守的に最も脆性き裂が伝播停止しにくい条件で検討した. 破壊靱性試験で発生したポップインを再現するために、低靱性と高靱性に分けていた粘着面を、すべて低靱性粘着面とする解析を実施した. 解析条件は、ワイブル応力が 2500MPa より大きい条件と小さい条件の 2 つとした. 2500MPa より大きい条件では

SE(T)の全断面が破壊して脆性き裂は伝播停止しなかったが、2500MPa より小さい条件では SE(T)も脆性き裂が伝播停止するポップインを示した。

- ・ 全断面にき裂開口駆動力となる引張の負荷モードの SE(T)においても、2500MPa より小さい条件で脆性き裂が伝播停止した要因を考察した。その要因の一つに応力反射波があるが、SE(T)の長さ 280mm の場合、応力反射波による応力緩和の影響を受けないことを確認した。つまり、このき裂伝播停止は破面形成時の散逸エネルギーの蓄積により伝播停止したと考えられる。
- ・ SE(B)は 2500MPa より大きい条件でもポップインを示し、2500MPa より小さい条件と合わせて荷重低下率を求めた。2500MPa より大きい条件の荷重低下率は 13.1%、2500MPa より小さい条件は 10.6%であった。2500MPa より小さい条件で SE(T)の脆性き裂が伝播停止するため、ポップインを有意 (significant) とみなす荷重低下率を 5%から 10%に緩和しても差し支えないといえる。

本研究の解析的検討ならびにその他の研究者による実験的検討によって、日本溶接協会規格 WES1109 の改訂に、以下が反映されたことは強調しておきたい。

- ・ ポップインの要因がセパレーションき裂の発生であると判断された場合、セパレーションを脆性評価の対象から除外しても問題ないこと
- ・ ポップインの要因が脆性き裂の発生であると判断された場合、脆性評価の対象から除外する荷重低下率を 5%以下から 10%以下に緩和されたこと

これらの反映は、ポップイン起因の低靱性のために、これまで需要は多いものの高張力鋼の適用に制限があった、建築や造船など多くの分野で適用を拡げる 1 つのきっかけになる可能性があり、産業上で果たした役割は大きいといえる。

ただし、厳密に考えれば本研究で導出した許容判定基準は、すべてのポップイン現象について普遍的である保証はない。しかし、部材形状・寸法、材料強度（軟鋼・高張力鋼）、材質不均質（局所脆化域と周囲高靱性域との寸法差・靱性比）など、さらに網羅的な数値実験的計算を実施することで、普遍性を検証できる可能性がある。本研究はいったんここまででまとめるが、今後の課題として指摘しておきたい。

以上