

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

東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻 学籍番号 37-167281 漢那 宗平
指導教員 川畑友弥 准教授

Keywords: fracture toughness test; pop-in; material heterogeneous; finite element method

1. 序論

1.1. ポップインとは

図1に模式図を示す溶接継手の破壊靱性値を取得する3点曲げ試験において、図2の荷重-き裂開口変位 (Crack Mouth Opening Displacement) 線図で荷重低下が見られ、試験片に生じた破壊が微小なき裂伝播で停止することがある。この破壊の停止現象をポップインと呼ぶ^{1,2)}。ポップイン現象は、発生機構や継手の破壊強度に及ぼす影響が明確ではない。このため、現行規格では安全側の立場からポップインをもって破壊と見なし、ポップイン発生時の破壊靱性値を破壊発生時の破壊靱性値と見なしている。表1に破壊靱性試験規格におけるポップインの許容判定法を示す。一方、前者の破壊靱性値は後者に比べて極めて小さく評価される場合があり、前者を満足する設計には再製作や補修に多大な費用や労力が必要になる。実構造物において、ポップインが生じてても大規模破壊に至らないことが保証されるのであれば、ポップイン発生時での評価は過度に安全側となるため、ポップインの合理的な安全性評価手法の確立は実用上極めて重要である³⁾。

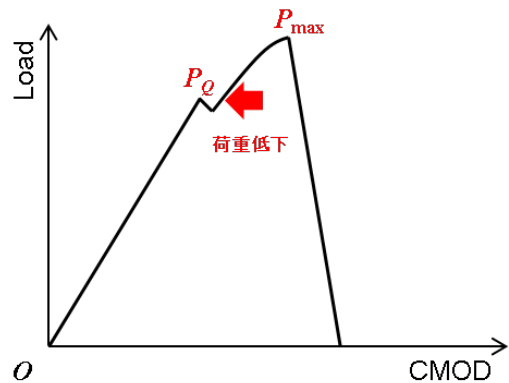


図2. 荷重-CMOD 線図の模式図

表1. 破壊靱性試験規格におけるポップインの許容判定法

WES 1108-1995	WES1108-2016	WES1109-1995	ASTM E1820-99	
き裂先端開口変位 (CTOD)試験方法	き裂先端開口変位 (CTOD)試験方法	溶接熱影響部CTOD試験方法に関する指針	Standard test method for Measurement of Fracture toughness	
(1) ASTM E-1290の方法 $\Delta a_p < 0.04a_0$ でかつ95%以内なる許容 (2) 有持、井坂の方法 * $a_0 < t_0$ 許容 (tp: t_0 停止時間, $t_0 = 0.3S$ (限界値)) * $\Delta a_{pr} < \Delta a_{acr}$ (Δa_{pr} : 限界ポップインき裂長さ)	・初期コンプライアンスに対する変化量 P を求め、 $P_0 = 0.05$ となる最初のポップインを限界値とみなす。 ASTM E1820-11に準拠。	WES1108に準拠	初期傾きの線を荷重低下開始点より引き、X軸との交点から傾き8%線を引く、これを超えることをポップイン。	
API RP22Z (1989)	BS 7448	BS-7448 Part2	ISO 12135	ISO 15653
Recommended Practice for Preproduction Qualification for Steel Plates for Offshore Structures	Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and J values of	Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of	Metallic materials - unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness	Metallic materials - Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds
BS7448 Part1 ASTM E1290に準拠	荷重低下および変位増加1%以下は無視。荷重低下および変位増加1%以上のものを検出し、トータルで5%オフセットラインを超える最初のものをポップインとする。	BS-7448 Part 1 or 4 に準拠	初期コンプライアンスに対する変化量 P を求め、 $P_0 = 0.05$ となる最初のポップインを限界値とみなす。	荷重低下および変位増加1%以下は無視。1%以上でISO12135で破壊にならなければ1. 破面上に停止靱性き裂が見つからなければ破壊ではないと判定 2. 破面上に停止き裂が見つかった場合、荷重低下率が5%以下でへき開き裂が発生部の組織が占める長さ a_0 と距離中央75%の領域で疲労き裂前縁にない最大のCGHAZ寸法 a_2 を計測し、 $a_2 > a_1$ であれば破壊と判定する。

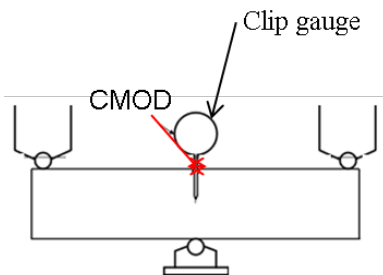


図1. 3点曲げ試験の模式図

1.2. 目的

破壊靱性試験で脆性き裂が伝播停止した場合、実構造物においても同様に伝播停止するかどうかを評

価する手法を、シミュレーションに基づいて構築することを目的とする。

本報では、ポップインの許容判定条件の緩和を目的に、その第一歩として均質材試験片に発生したセパレーション（縦割れ）に関する解析を実施する（2章）。3点曲げ破壊靱性試験でポップインを再現するために、異材溶接継手を作製して実験する（3章）。ポップインを再現できた溶接継手を用い、引張の負荷形態が支配的な実構造物においてポップインが同様に発生するのを実験的に検証する（4章）。ポップイン評価法の実機適用に向けて、実機溶接継手の3点曲げ破壊靱性試験を実施する。さらに、実構造物で発生した脆性き裂が伝播停止する、あるいは伝播停止せずに最終不安定破壊する、この両者を判定するクライテリアを、解析的に評価する技術を構築する（5章）。

2. セパレーションで生じたポップインの解析的検討

図3にセパレーションに関する解析モデル外観（曲げ負荷）を示す。曲げ（破壊靱性試験）と引張（実機模擬）の負荷形態の違いが、き裂開口応力に及ぼす影響を確認した。曲げと引張でセパレーション発生時のJ積分値を一致させた。図4(a)の100kJ/m²のとき、縦軸、すなわち引張負荷に対する曲げ負荷のき裂開口応力の比は1より大きく、曲げ負荷のときき裂開口応力が引張負荷のときより大きい。このとき、曲げ負荷でき裂が伝播停止すれば、引張負荷であっても同様に伝播停止するといえる。一方、図4(b)の1000kJ/m²のとき、1以下となり引張負荷の方がき裂開口応力が大きい。

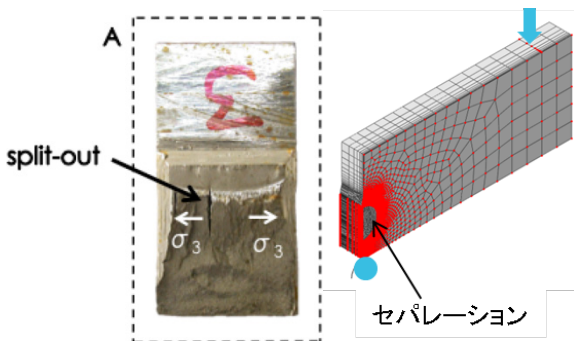
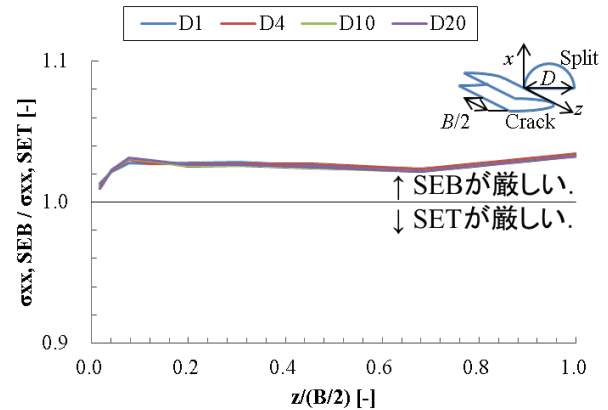
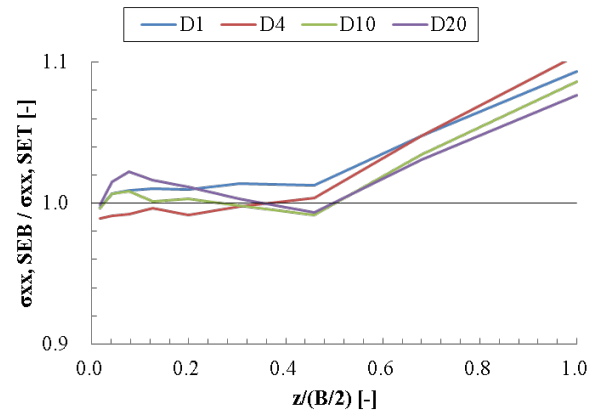


図3. セパレーションの写真⁴⁾と解析モデル（曲げ負荷）



(a) 100kJ/m²



(b) 1000kJ/m²

図4. 引張負荷（SET）に対する曲げ負荷（SEB）のき裂開口応力の比

3. 異材溶接継手試験片によるポップインの再現

3.1. 異材溶接継手の作製

試験片レベルで発生したポップインが、実構造物でも発生するのを実験的に検証する。まず、3点曲げ試験でポップインを確実に発生させることを目的として、図5に示す異材溶接継手を作製した。異材溶接継手の母材は780MPa級高張力鋼、板厚中央は780MPa級高張力鋼用溶接材料で低靱性材、板厚両端はオーステナイト系ステンレス鋼用溶接材料で高靱性材、とした。

3.2. 試験温度

低靱性材のみ脆性破壊する-80℃に設定した。

3.3.3 点曲げ試験

作製した試験片を用いて、3点曲げ試験を実施した。図6に示すように、ポップインの発生を確認した。

3.4. ポップインの発生要因の考察

節点解放法⁵⁾による静的なき裂伝播解析を実施した。板厚中央の低靱性材でき裂が発生し伝播すると、き裂開口応力のピーク位置は、板厚中央から高靱性材材端部に移り、低靱性材のき裂開口応力は減少した。さらに、Cowper-Symonds⁶⁾の式を用い、ひずみ速度を 10^{-1} ~ 10^4 /sまでパラメトリックに変えて動的効果を考慮すると、ひずみ速度が 10^1 /sのときのポップイン発生後のき裂開口応力（緑色実線）は、ポップイン発生前（黒色破線）より小さい。この応力の減少が、ポップインの要因であると推定した。

4. 異材溶接継手試験片によるポップインに及ぼす負荷形態の影響の評価

3点曲げ試験でポップインが発生した異材溶接継手を用いて、実構造物で支配的な引張の負荷形態においてポップインが発生するののかを、実験的に検証するために引張試験を実施した。

図7に示すとおり、ポップインき裂を確認した。曲げの負荷形態では、き裂伝播初期は引張側、後期は圧縮側の負荷形態となり、き裂伝播の停止、すなわちポップインが発生しやすい。一方、実構造物で支配的な引張の負荷形態では、全域で引張側となるので、き裂伝播の停止は起こりにくい。しかし、この引張試験結果から、引張の負荷形態であっても、ポップインが発生しうることを示した。

ただし、疲労予き裂の湾曲による局所的な応力分布が、ポップインに影響した可能性がある。このため、実構造物において、ポップインが生じてても大規模破壊に至らないことを保証するには、さらなる検討が必要である。

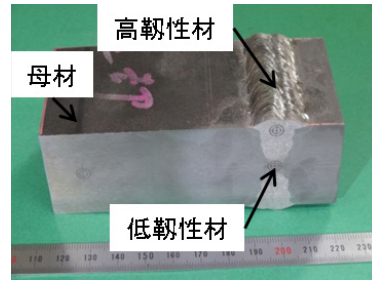


図5. 異材溶接継手

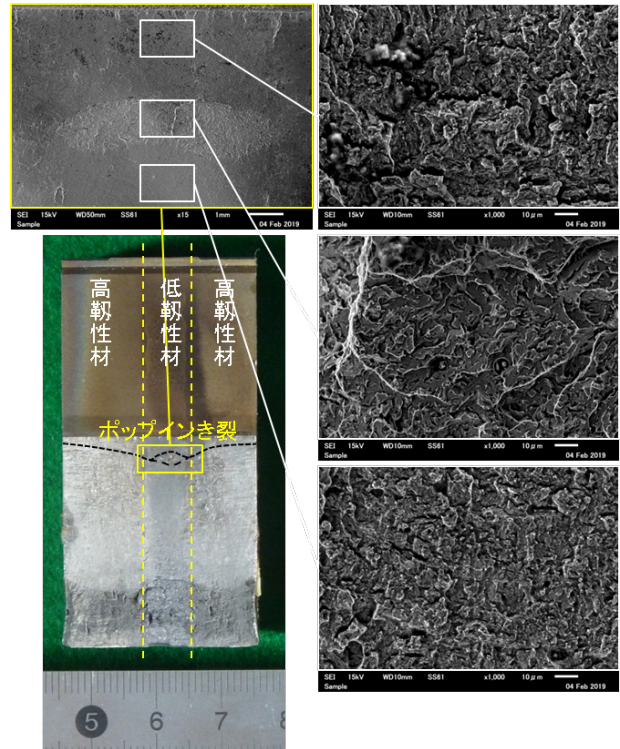


図6. ポップインき裂の確認（3点曲げ試験片）

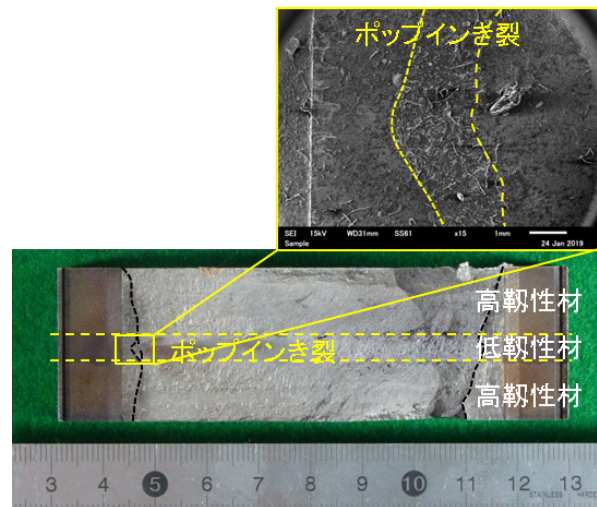


図7. ポップインき裂の確認（引張試験片）

5. 実機溶接継手試験片によるポップインへの材質不均質の影響の評価およびポップインの許容判定法の構築

ポップイン再現のために作製した異材溶接継手は、板厚の両端にオーステナイト系ステンレス鋼用溶接材料を含み、実構造物で使用される溶接継手とは異なる。そこで、ポップイン評価法の実機適用に向けて、実機溶接継手の3点曲げ破壊靱性試験を実施する。この試験結果を再現する解析手法を、亀裂を想定する節点間に結合力モデル (Cohesive Zone Model: CZM) を用いて構築する。さらに、実構造物で発生した脆性き裂が伝播停止する、あるいは伝播停止せずに最終不安定破壊する、この両者を判定するクライテリアを、CZM を用いて評価する解析技術を構築する。

5.1. 解析条件

図8にCZM外観を示す。ポップイン発生前をStep 1とし、強制変位を付加した解析を実施した。ポップイン発生後をStep 2とし、図8右に示したCZMの鏡面対称面に設定した粘着面に破壊を生じさせた。

図9と表2に損傷則を示す。低靱性粘着面の垂直方向破壊応力を、Step 1のき裂開口応力のピーク応力とした。第1,2せん断方向の応力は、垂直方向の100倍とした。破壊エネルギーは実験結果のポップインき裂長さに合わせて込んで $1.00 \times 10^3 \text{ J/m}^2$ とした。曲げ (SEB) と引張 (SET) の解析を、Step 1終了時のワイブル応力を 1944 MPa ($m = 30$) で一致させて実施した。解析ケースは、高靱性粘着面の破壊応力と破壊エネルギーを、低靱性のそれぞれ1.0, 1.2, 1.5倍の3条件とした。

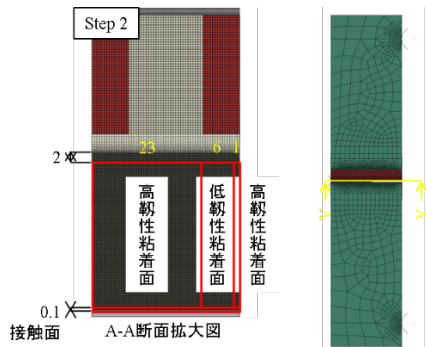


図8. CZM 定義を考慮した FE モデル概要

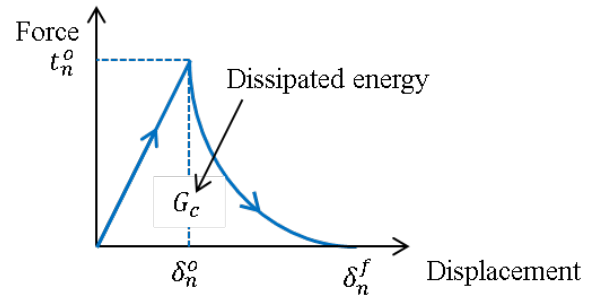


図9. 損傷則の模式図

表2. 損傷則

粘着面	破壊応力		破壊エネルギー G_c [J/m ²]
	垂直方向 t_n^o [Pa]	第1,2せん断方向 t_s^o, t_t^o [Pa]	
低靱性材	2.16×10^9	2.16×10^{11}	1.0×10^3
高靱性材	低靱性材 $\times 1.0$	2.16×10^9	1.0×10^3
	低靱性材 $\times 1.2$	2.59×10^9	1.2×10^3
	低靱性材 $\times 1.5$	3.24×10^9	1.5×10^3

5.2. 解析結果

表3にSEBとSETの荷重低下率を示す。高靱性材の破壊応力および破壊エネルギーを低靱性材と同じ、すなわち低靱性材 $\times 1.0$ とした場合、SEBでは荷重が0となり荷重低下率が100.0となった。一方、SETではすべての条件で荷重低下率はSEBより小さく、き裂が伝播停止しポップインが生じた。高靱性材を低靱性材の1.5倍以上としても、結果は1.5倍とほとんど変わらない。本研究によって、靱性差の臨界性を確認することができた。

今後、脆化域寸法の影響を検討しつつ、この手法を用いて、破壊靱性試験で脆性き裂が伝播停止して、実構造物においても同様に伝播停止する条件を特定していく予定である。

表3. SEBとSETの荷重低下率

解析条件材		荷重低下率 $\Delta F/F$ [%]	
		SEB	SET
高靱性材	低靱性材 $\times 1.0$	100.0	18.3
	低靱性材 $\times 1.2$	21.5	2.3
	低靱性材 $\times 1.5$	10.8	2.4

6. 結言

本研究では、溶接継手の破壊靱性評価試験時に発生する場合のあるポップインの判定方法について検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- 各国各業界の破壊靱性試験規格におけるポップインの許容判定法を調査したところ、アレスト時の荷重が ASTM で規定されるポップイン発生時の荷重から 95%の荷重以下になると破壊とみなすものが多く、試験片と構造物での評価の差異について必ずしも丁寧な検討を経て決定されていないことが判った。
- TMCP 鋼などでは母材試験時にセパレーション亀裂を原因とするポップインが発生する場合がある。この場合について、静的弾塑性解析節点解放法による検討を行い、同じ CTOD の場合に引張負荷と曲げ負荷とでポップインが発生することを想定した場合の円弧上に伝播した亀裂端での応力分布を比較したところ、曲げ負荷の方が常に厳しい応力分布を呈することが判った。これにより曲げ試験によりポップイン亀裂が発生した場合には引張モードでは曲げ試験よりも短く亀裂が停止することが言える。つまり、セパレーション起因でポップインが起こった場合には、構造物で致命的な破壊につながる危険性は小さいと考えられる。
- 次に主破面でポップインが発生する場合について、まず 3 点曲げ試験により再現実験を行った。工夫した材料の組み合わせにより、実験室での再現に成功した。次いで同継手を同温度にて引張負荷試験実施したところ、曲げ試験と同様、破壊現象はポップインに留まった。さらに荷重低下率は曲げ試験よりも小さく留まった。この実験事実は「実構造物で支配的な引張の負荷形態では、全域で引張側となるので、き裂伝播の停止は起こりにくい」とする見方を覆すものである」
- しかしながら、全ての曲げ試験におけるポップイン発生継手の引張負荷の場合に破壊がポップインで留まることを保障できるものではない。CZM を適用した FEM 解析技術を構築することによりは

より一般的な場合での定量的議論が行える環境を整備した。

- 数値解析の一例として靱性差を変化させた場合について検討したところ、引張負荷では限界応力が 1.2 倍まで差が付くと軽微なポップインで停止することが判った。これは無視できるポップイン亀裂の条件範囲を現在規格より拡大できることを示唆している。
- 今後は、さらに脆化域幅も含めたパラメトリック解析を進め、確証を得るための実験を進め、最終的に規格改訂の提言を行う予定である。

参考文献

- 1) WES 1108. Standard test method for crack-tip opening displacement (CTOD) fracture toughness measurement, The Japan Welding Engineering Society, 2016.
- 2) WES 1109. Guideline for crack-tip opening displacement (CTOD) fracture toughness test method of weld heat-affected zone. The Japan Welding Engineering Society; 1995.
- 3) 有持和茂, 井坂和実, 中西睦夫: 溶接部 COD 試験における Pop-in 現象とその安全性評価法に関する研究, 溶接学会論文集, 第 3 巻, 第 1 号, 1985.
- 4) P.J.L. Melcher, E.M. Castrodeza. Fracture toughness of SE(B) specimens of steel in the presence of splitting, 13th International Conference on Fracture, 2013.
- 5) Kobayashi A.S., Emery A.F., Mall S. Dynamic-finite-element and dynamic-photoelastic analyses of two fracturing homalite-100 plates, Experimental Mechanics, Vol. 16, Issue 9, pp. 321-328, 1976.
- 6) Cowper G.R, Symonds P.S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams, Brown University, Division of Applied Mathematics technical report, No. 28, 1957.
- 7) Camacho G.T., Ortiz M. Computational modelling of impact damage in brittle materials, International Journal of Solids and Structures, 33, 2899-2938, 1996.