

溶接継手破壊靱性試験におけるポップインの生成メカニズム把握と
許容判定基準の刷新

Investigation of Pop-in Formation Mechanism in Fracture Toughness Test of Welded Joint and
Improvement of Acceptance Criteria

学籍番号 03-190881 八木 透
指導教員 川畑 友弥 教授

(2021 年 1 月 28 日提出)

Keywords: 脆性破壊, ポップイン, 溶接構造物, 動的破壊力学, 有限要素法

1. 序論

溶接構造物の構造健全性を確保する上で最も重要な課題は、脆性破壊の防止である。脆性破壊を防止するためには、その起点となりうる欠陥から破壊が発生しないように評価する必要がある。破壊靱性の評価には、種々の試験規格[1][2]に準拠した破壊靱性試験が用いられる。破壊靱性試験において、靱性不均一を有する溶接部を対象とするとき、しばしばポップイン (Fig.1) と呼ばれる微小な荷重低下を伴う微小割れが生じる。このポップインを、脆性破壊の発生とみなすか、許容するかは、試験規格が規定するポップインの許容判定基準による。多くの規格で応力波反射の理論から荷重低下率 5%[3]という基準が採用されている。この基準はかなり保守的で、過度に安全側である可能性が指摘されている[4]。ポップインの許容判断は場合によっては構造物の経済性や設置判断にも関わる大問題にも発展するため、過不足のない判断基準が望まれている。本研究ではポップインを人為的に発生させる実験と数値解析および破壊力学を用いた検討を通じてこれまでの判断基準の妥当性を見直す。

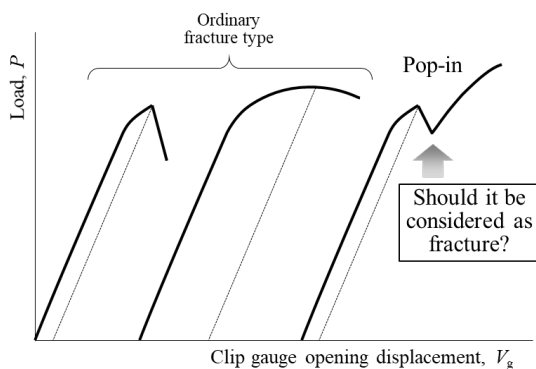


Fig.1 Pop-in in CTOD test and its problem

2. 実験

ポップイン研究の困難さの原因は再現試験が難しいことであった。今井ら[5]は多くの試行錯誤の後に確実にポップインを発生させることのできる溶接継手の製作方法を開発した。ここではその脆化度の大きい溶接材料を初層に溶接した溶

接継手を使用した。試験は破壊靱性試験として標準的に実施する 3 点曲げ試験と構造物を模擬した形式として引張試験を実施した。また、脆化層の配置の影響を評価するため、Fig.2 に示すように試験片の採取方向を表面切欠きおよび断面切欠きの 2 種類に設定した。ここで、断面ノッチ試験片は通常溶接熱影響部に起こりうる LBZ (局所脆化域) を反映したものとして現実であり得るが、表面ノッチは実際の継手評価ではあり得ない研究のための試験片採取方向である。

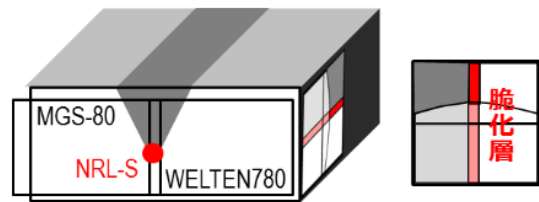


Fig.2 Welded joint which is likely to occur pop-ins developed by Imai [5]

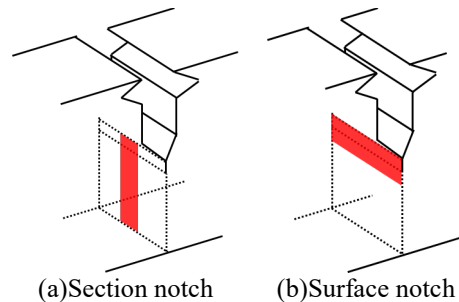
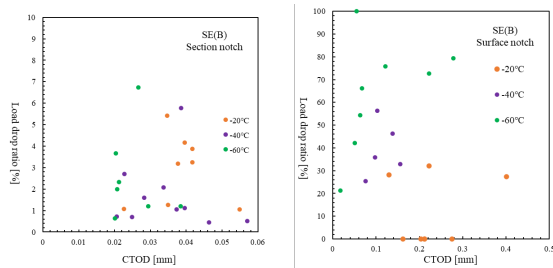


Fig. 3 Direction of specimen

試験は-20~-60℃にて十分な繰り返し数にて実施し、多くの試験片でポップインを発生させることができた。結果を Fig.4 に示すが、特徴的であったのは、どちらの切欠き方向においても曲げ試験ではポップインの発生頻度はそれほど変わらなかったのに対し、引張試験では表面切欠きでは殆どポップインの発生は見られず、全部破壊が発生しないかのどちらになる傾向が強く、面切欠き材ではポップインが見られた。ポップインとしてき裂が停止するという事は構造物として致命的な破壊を免れるということであるため、今回の断面切欠き材の実験結果を持って荷重低下率

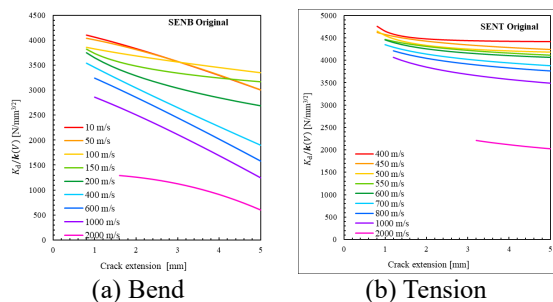
の許容範囲を論じることができる。曲げ試験で10%程度の荷重低下が見られる場合でも引張では完全破壊に至らないことから判定基準を現行の5%から10%に緩和しても良いことが示唆された。



(a)Section notch (b)Surface notch
Fig.4 CTOD test results for special welded joint

3. 有限要素法解析

ポップインの発生メカニズムを詳細に解明するために材料定数など妥当な条件を付与した3次元動的有限要素法を実験と同じく曲げモデル・引張モデルの双方にて実施した。解析として簡易な二次元き裂を前提とした。これは前章の表面ノッチ材に相当する。得られた動的応力拡大係数 K_d の推移を Fig.5 に示す。曲げでは K_d はき裂伝播につれ減少するが、引張では殆ど一定あるいはやや増加し、表面切欠き×引張ではき裂の途中停止が見込めないことが確認できた。また、伝播速度が速くなるほど静的解から離れ K_d は減少することが判った。これはジグ近接による応力波反射の影響を受けなくなることによると考えられる。「荷重低下率5%」の基準を英国で策定した背景が応力波反射による駆動力減少効果を含めないようにするという考えだったことを振り返ると、彼らの考えが全く間違っていたことが判る。曲げ試験片中の動的伝播き裂先端の K_d は基本的に顕著な減少[6]が見られ、応力波反射により増加するのである。



(a) Bend (b) Tension
Fig.5 History of dynamic stress intensity factor

4. K 値重ね合わせモデルによる3次元き裂の K 値算定

埋もれき裂形状のき裂駆動力低下は線形破壊力学を用いたリガメントの閉口効果との重ね合わせで論じることができる。Fig.6 の斜線部分に閉口力が生じていると仮定することで二次元き

裂解を用いて計算することとした。閉口力が一定であること、ポップインき裂を半円状であることなど本モデルでは現実的な単純化を行っている。

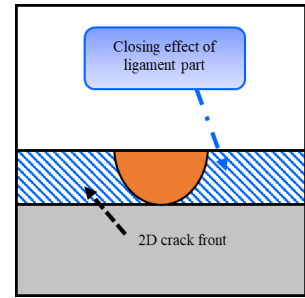


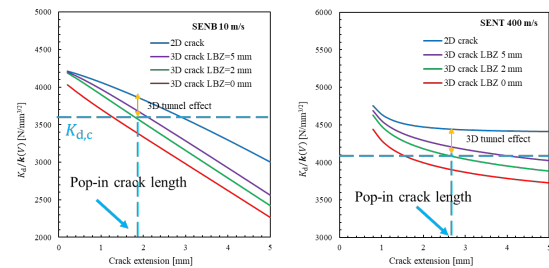
Fig.6 Assumption of superposition of simplified closure effect

$$K = K_{2D} + 2(K_{closure1} + K_{closure2})$$

$$K_{closure1} = \int_0^d \int_0^{-\sqrt{d^2-z^2}+d} \frac{\sqrt{2}}{(\pi x)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{1}{1 + (\frac{z}{x})^2} \cdot (-\sigma_Y) dx dz \quad (1)$$

$$K_{closure2} = \int_0^{B/2} \int_0^d \frac{\sqrt{2}}{(\pi x)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{1}{1 + (\frac{z}{x})^2} \cdot (-\sigma_Y) dx dz$$

曲げ・引張双方の発生 K 値、実現可能き裂伝播速度帯を考慮の上計算した結果を Fig.7 に示す。曲げ試験のみならず、確かに構造物を想定した引張試験でも実験を再現するように脆性亀裂伝播が停止することを示すことができた。



(a) Bend (b) Tension
Fig.6 K_d history for rapid crack with tunnel shape

5. ポップイン判定基準の新提案

これまでのポップインの取り扱いはそのメカニズムの理解が間違っていると考えられ、過度に安全側になっている。本研究からはまずは許容荷重低下率を10%に緩和することを提案するが、適した判断基準について今後も検討を継続していく。

参考文献

- [1] ISO12135 (2018), [2] ASTM E399 (1970), [3] A.A. Willoughby (1986), International Journal of Fracture 30., [4] 有持和茂, 井坂和美 (1987), 溶接学会論文集, 5,131-137., [5] 今井康仁, 溶接構造シ, ポジウム 2019 講演論文集, 2019, [6] Kawabata et al, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 92, December 2017, Pages 266-275.