

脆性破壊限界に及ぼす二軸負荷の影響補正手法

清水 万真

大阪大学大学院 工学研究科

1 はじめに

実稼働下の原子力圧力容器やパイプラインの耐破壊性能を合理的に評価するには、亀裂深さや負荷様式によって異なる亀裂先端の塑性拘束度のみならず、内圧と外負荷の重畳による二軸荷重が脆性破壊限界に影響を及ぼすことに留意が必要である。破壊靱性に及ぼす塑性拘束効果を定量的に補正するためローカルアプローチに基づく手法が提案され、その適用実績が蓄積されてきた。一方で、破壊靱性が二軸荷重の影響を受けて一軸荷重下のそれよりも低下するとの実験結果が報告されているが、破壊靱性に及ぼす二軸荷重効果までも評価可能な手法は未だ構築されていない。

このような課題を解決すべく、本研究では既往のローカルアプローチを拡張した脆性破壊モデルを構築するとともに、提案モデルを用いて破壊靱性に及ぼす二軸荷重効果を定量的に評価する手法の構築に取り組んだ。

2 複雑負荷下での脆性破壊モデル

Beremin の脆性破壊モデル (Beremin model)¹⁾ に適用されてきた線形破壊力学ベースの破壊発生駆動力は、亀裂先端の塑性域内部で組合せ応力が異なるとその影響度を正しく捉えない²⁾。そこで、弾塑性破壊力学ベースの破壊発生駆動力として Local- J (局所 J 積分) を導入して塑性ひずみと組合せ応力の影響を取り入れた新たな破壊モデル (Local- J model) を提案してきた。種々の組合せ応力状態を Local- J が等価な応力比一定の軸対称問題 (クラック法線方向の垂直応力 $\sigma_{eq(J)}$) および相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_{p,eq(J)}$ で代表することで、マイクロクラックを含む高応力場 Ω での破壊指標 Σ_w は次式で表せる。

$$\Sigma_{w(J)} = \left[\frac{1}{V_0} \int_{\Omega} (R_{void} \sigma_{eq(J)} \bar{\epsilon}_{p,eq(J)})^M d\Omega \right]^{\frac{1}{M}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M は材料の加工硬化特性および微視亀裂寸法分布のみに依存する材料定数である。破壊指標に拡張ワイブル応力 Σ_w を適用して評価した脆性破壊限界 (破

壊限界拡張ワイブル応力 $\Sigma_{w,cr}$) は、次式の 2 母数ワイブル分布に従う。

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\Sigma_{w,cr}}{\Sigma_u} \right)^M \right] \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、脆性破壊限界拡張ワイブル応力 $\Sigma_{w,cr}$ は塑性拘束だけでなく二軸荷重にも依存しない材料固有の分布に従うことが期待される。

3 提案モデルによる破壊評価の妥当性

B.R.Bass ら³⁾ は表面亀裂に一軸および二軸荷重を作用させて脆性破壊させる実験を行い、二軸荷重下の脆性破壊限界は一軸荷重下と比べて低下するとの結果を報告している。そこで、Local- J model および Beremin model により評価される限界ワイブル応力分布を介して二軸効果の補正が可能かを、B.R.Bass ら³⁾ の実験を参照して検証した。図 1 は一軸荷重下での脆性破壊試験結果から限界ワイブル応力を介して二軸荷重下での破壊靱性 J_{cr} を予測した結果を、実験値と比較したものである。Beremin model による予測結果は実験値に対して過小であり、Beremin model は脆性破壊限界の二軸効果を適正に補正できないことがわかる。一方で、Local- J model に

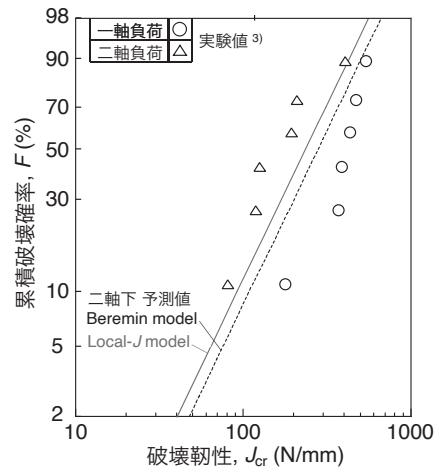


図 1 Beremin model および Local- J model による破壊靱性の二軸効果補正結果の比較

よる予測結果は実験値に近く概ね妥当であった。これは、新たに提案したLocal-J modelによる二軸効果補正の有効性を示す結果である。

4 脆性破壊限界に及ぼす二軸荷重の影響度解析

種々形状の亀裂を想定した仮想部材を対象にLocal-J modelを適用して脆性破壊限界の二軸効果を予測することで、提案モデルによる脆性破壊限界の二軸荷重補正の特徴を、Beremin modelによる補正と比較して検討した。表1に示すように、板厚相当の亀裂開口幅(25mm)に対して2種類の亀裂深さ($a_0/B=0.2, 0.33$)の半楕円型表面亀裂(CSCP), 1種類の板厚貫通亀裂(CTCP)の合計3条件の亀裂タイプを想定した。図2に示すように一軸荷重下の破壊靱性 $J_{一軸}$ に対してLocal-J modelベース拡張ワイブル応力(Beremin modelは従来定義ワイブル応力)が等しくなる二軸荷重下の破壊靱性 $J_{二軸}$ を求めた。このようにして得たLocal-J modelおよびBeremin modelによる破壊靱性の二軸効果補正ダイアグラム($J_{二軸}-J_{一軸}$ 関係)を、亀裂タイプごとに比較して図3に示す。脆性破壊限界の二軸効果の度合いは亀裂タイプの影響を受けて大きく異なることがわかる。Beremin modelにより予測される二軸効果の度合い($\gamma = J_{二軸} - J_{一軸}$)は、いずれの亀裂タイプでも負荷レベルにほとんど依存しない。一方で、Local-J modelを適用すると、特に浅い表面亀裂(CSCP, $a_0/B=0.2$)におい

て負荷レベル増大に伴い二軸効果による脆性破壊限界の低下が顕著であることが予測された。

5 主な研究成果

特に浅い表面亀裂型の欠陥に対して提案モデルはBeremin modelと比べて二軸効果を鋭敏に捉え、提案モデルを適用することで二軸荷重下における耐破壊性能を安全側に評価できることが示された。

6 おわりに

破壊靱性に及ぼす二軸荷重の影響を定量的に捉えることのできる脆性破壊モデル「Local-J model」を構築し、それに基づく破壊指標「拡張ワイブル応力」を提案した。本モデルによる二軸荷重下での脆性破壊評価は、従来のBeremin modelと比べて合理的かつ安全側の結果を与える場合が示された。今後は、複雑荷重下での脆性破壊評価における提案モデルの有用性を種々の材料で検証することを計画している。また、種々の材料特性(M値および加工硬化特性)を想定した二軸荷重効果の材料依存特性の解明が望まれる。

参考文献

- 1) F. M. Beremin, A. Pineau, F. Mudry, J.-C. Devaux, Y. D'eschatha, and P. Ledermann, Metallurgical Transactions A, Vol.14, No.11, (1983), pp.2277-2287.
- 2) K. Shimizu, M. Ohata, H. Shoji, H. Tanigawa, and T. Kato, Mechanics of Materials Vol.164, (2022) pp.104-115.
- 3) B.R. Bass, W.J. McAfee, P.T. Williams, W.E. Pennell, Nuclear Engineering and Design Vol.188 (1999) pp.259-288.

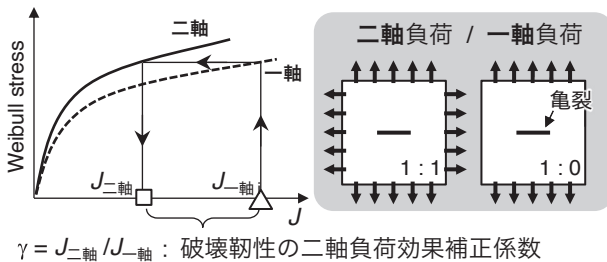


図2 ワイブル応力を介した破壊靱性の二軸効果補正の手順

表1 脆性破壊限界に及ぼす二軸負荷の影響度解析のための解析モデルおよび条件マトリクス

	CSCP		CTCP
亀裂深さ, a_0/B	0.2	0.33	1
亀裂長さ, $2c$	25 (=B)		
	CSCP 半楕円表面亀裂		CTCP 板厚貫通亀裂

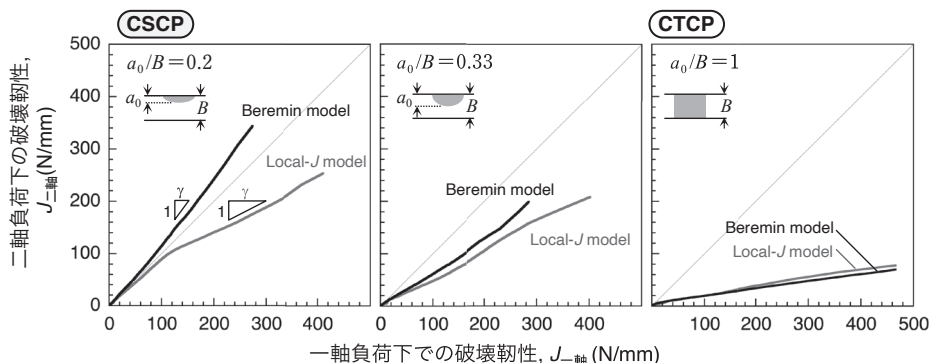


図3 Beremin model およびLocal-J modelに基づく破壊靱性の二軸効果補正ダイアグラムの比較