

鋼構造物の地震時脆性破壊における亀裂先端の限界応力状態

東北大学大学院	正生員	○田村 洋
東京工業大学大学院	正会員	佐々木 栄一
横浜国立大学大学院	フェロー会員	山田 均
横浜国立大学大学院	正会員	勝地 弘
横浜国立大学大学院	正会員	西尾 真由子

1. はじめに

ノースリッジ地震（1994）や兵庫県南部地震（1995）においては、多くの鋼構造物に想定外の脆性破壊（地震時脆性破壊）が発生し大きな問題となった。地震時脆性破壊の発生プロセスは、繰返し塑性変形下における微小な亀裂（延性亀裂や低サイクル疲労亀裂が想定され、以下では先行亀裂と呼ぶ）の発生、その進展、そして先行亀裂先端からの脆性破壊への移行の3段階に分けることができる¹⁾。脆性破壊移行時には繰返し塑性変形により材料の破壊じん性は大きく低下しているため、先行亀裂の深さが1mm程度、あるいはそれ未満の浅い状態でも脆性破壊に移行する可能性があり、そうであったと疑われる事例も報告されている²⁾。鋼材のような延性材料の脆性破壊支配パラメータとしては、J積分値やワイブル応力が提唱されているが、浅い亀裂先端では限界J積分値が一定とならないことが確認されている³⁾。1mm以深の先行亀裂を対象としたWES2808（日本溶接協会）では、限界ワイブル応力一定の仮定の下、脆性破壊移行評価手法が提案されているが、1mm未満の浅い亀裂の場合には限界ワイブル応力が一定とならない可能性がある。

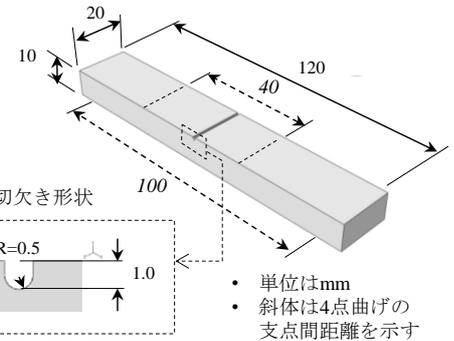


図-1 対象供試体の形状と寸法

本研究では、実構造物における地震時の亀裂先端の応力状態を再現できる供試体の破壊実験と弾塑性 FEM 解析により、浅い亀裂先端の限界応力状態を検討する。

2. 地震時の負荷状態における低温破壊実験

実験に用いた供試体を図-1 に示す。供試体は一般構造用鋼材 SS400 を、長手方向が圧延方向と一致するように切り出して製作した。中央の切欠き（深さ：1mm、底の半径：0.5mm）には、供試体が降伏しないレベルの荷重下で、0.5~1.5mm程度の深さの疲労亀裂を発生させ、任意の深さの先行亀裂を再現した。供試体の初期亀裂先端近傍には、4点曲げ荷重によって、地震時の実構造物溶接部（フランク角：63°、止端半径：0.5mm）の先行亀裂先端近傍における負荷状態が再現される（図-2 参照）。初期亀裂を導入した供試体の破壊実験は、地震時のひずみ履歴によるじん性劣化状態を再現するため、液体窒素を満し-197±1℃とした低温槽内で行った。荷重は準静的荷重とし、荷重の推移を100Hzにて計測することで、限界値を特定した。

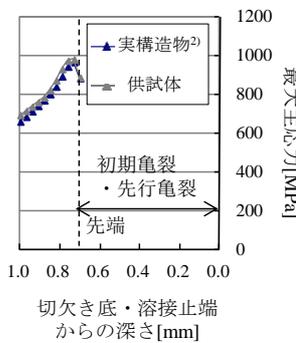


図-2 供試体による亀裂先端負荷状態の再現性

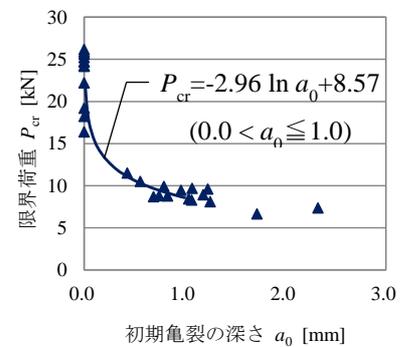
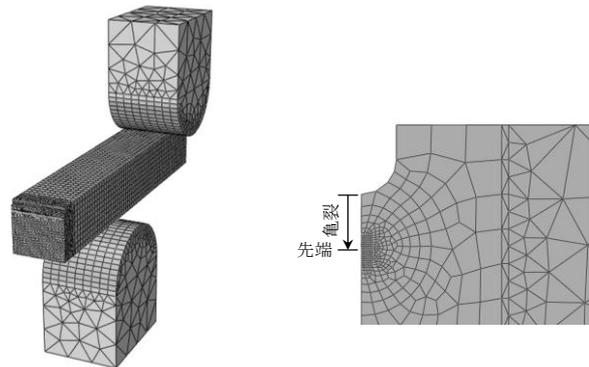


図-3 供試体の脆性破壊移行限界荷重



(a) 解析モデル全体図 (b) 亀裂先端の要素分割状況

図-4 供試体の解析モデル

図-3 に、初期亀裂を有する計 15 体の供試体と初期亀裂を入れず実験に供した計 12 体の供試体

の限界荷重を示す. 同図に示されているように, 限界荷重は初期亀裂が浅いほど高まる明瞭な傾向が得られた. そこで, 実験では検討できなかった深さ 0.43mm 未満の場合における限界荷重を, 図中に併記した回帰曲線によって推定して用いることとした.

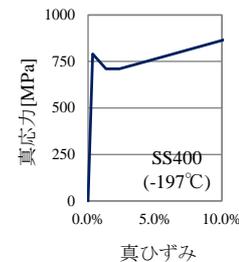


図-5 解析で使用した
応力-ひずみ関係

3. 実験時における亀裂先端負荷状態の弾塑性 FEM 解析

解析モデルは対称性を考慮して供試体の 1/4 と治具を再現したソリッド要素モデルとした. 図-4 に示すように, 既往の報告⁴⁾に基づき亀裂先端近傍の最小要素サイズは 0.03mm とした. 初期亀裂は切欠き底から所定の深さまで対称条件を解除することで再現している. 材料特性は, 実験温度における供試体製作に用いた板の応力-ひずみ関係を同定して使用した (図-5 参照). 液体窒素中の供試体と治具の摩擦係数も実験で同定した 0.21 を用いた.

亀裂先端近傍の限界負荷状態の評価は, 最大主応力のピーク値ならびにワイルド応力によって行った. ワイルド応力の算定⁴⁾にあたっては, 基本堆積を 1 とし破壊に関与するプロセスゾーンを塑性域 (ただし, 亀裂面から 2mm 以上離れた領域は, 実際の破断状況より破壊に関与しないと判断し除外) とし, 初期亀裂を有する 15 体の供試体の解析結果から同定された供試材の形状母数は 29.0 であった.

図-6 に, 供試体の初期亀裂深さごとの限界ワイルド応力を示す. 図中に△で示すプロットは推定した破断荷重に基づいて評価した値であることを示す. 図-6 に示されているように, 限界ワイルド応力は初期亀裂深さが 1mm 以下となると徐々に低下する結果となり, 浅い亀裂先端では限界値が一定とならないことが示された. 先行亀裂の深さが約 0.7mm の段階で発生した可能性のある, 神戸市ハーバーハイウェイ P75 橋脚隅角部の脆性破壊においては, CTOD 試験などから特定されるよりも低いワイルド応力で脆性破壊に移行していたと考えられる.

浅い亀裂先端における限界ワイルド応力の低下の原因としては, 脆性破壊移行までの初期亀裂の開口とそれによる亀裂先端の局部拘束の低下が考えられる. それは, 初期亀裂が浅いほど脆性破壊移行までの開口量が大きくなり, 亀裂先端の拘束が低下するためである. 図-7 に, 破断時の供試体の亀裂先端における拘束度を応力三軸度 T_1 (静水圧応力をミーゼス応力で除したもの) によって評価した結果を示す. 同図には, ワイルド応力を示した図-6 と同様の傾向が示されており, 亀裂先端の拘束度が限界ワイルド応力に大きな影響を与えていることがわかる. この亀裂先端の拘束状態や, 開口量を決定づける亀裂先端の局部変形が脆性破壊移行条件に関連している可能性がある.

4. まとめ

1mm 程度以下の浅い亀裂先端から脆性破壊に至る場合, 亀裂先端の限界ワイルド応力は一定とならず, 亀裂が浅いほど低い値となる. その原因としては, 浅い亀裂先端ほど顕著な脆性破壊移行までの先行亀裂の開口と, それによる亀裂先端の局部拘束の低下が考えられる. 脆性破壊移行条件には亀裂先端の拘束と局部変形が関連している可能性がある.

参考文献

- 1) Kuwamura, H. and Yamamoto, K.: Ductile crack as trigger of brittle fracture in steel, *Journal of Structural Engineering*, pp. 729-735, 1997.
- 2) 岡下勝彦, 大南亮一, 道場康二, 山本晃久, 富松実, 丹治康行, 三木千壽: 兵庫県南部地震による神戸港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討, *土木学会論文集*, No. 591/I-43, pp. 243-261, 1998.
- 3) P. M. S. T. De Castro, J. Spurrier and P. Hancock: Comparison of J Testing Techniques and Correlation J-COD using Structural Steel Specimens, *International Journal of Fracture*, Vol. 17, No. 1, pp. 83-95, 1981.
- 4) 南二三吉: ワイルド応力を用いた破壊評価手法—Part I, *溶接学会誌*, 第 75 巻, 第 5 号, 2006.

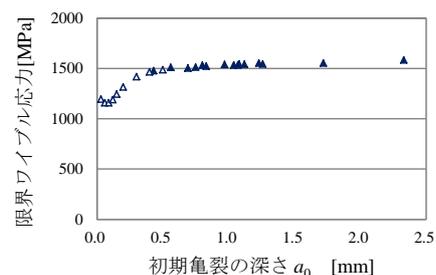


図-6 脆性破壊移行
限界ワイルド応力

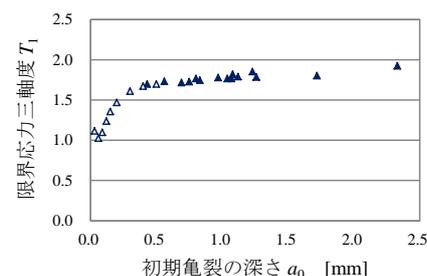


図-7 脆性破壊移行
限界応力三軸度