

パイプライン用鋼の落重試験における破面形成過程の動的弾塑性解析

Dynamic elasto-plastic analysis of fracture surface evolution in drop weight tear tests for pipeline steel

学籍番号 03090881

滑川 哲也

指導教員

栗飯原周二

(平成 23 年 2 月 3 日提出)

Keywords: 落重試験, パイプライン, 脆性破壊, 延性破壊, 動的弾塑性解析

1. 序論

パイプラインにおける脆性亀裂伝播の評価方法の 1 つに落重試験がある。鋼材の靱性は、API(American Petroleum Institute)の基準に基づく SA(Fraction of Shear Area)を計測して算出される [1]。しかし、最近の高強度鋼管では、落重試験において切り欠き底とは反対側に発生する異常破面が観察され、API の基準では遷移温度を保守的に見積もることや、SA の計測の際に異常破面の取り扱いが問題となっている [2]。本研究では、異常破面の発生原因を実験と数値計算によって推定する。また、AHM(Arrow head marking)という矢じり模様の破面が観測され、異常破面の発生に関係している可能性がある。よって、本研究では AHM の発生メカニズムについても考察する。そして、異常破面および AHM が存在する際の SA の計測方法を提案する。

2. 実験結果

2.1 落重試験

落重試験を試験温度を変えて行い、亀裂進展の様子を高速度カメラで撮影し、亀裂伝播速度を求めた。また、荷重、変位を動的に計測し、荷重変位曲線から算出した吸収エネルギーを Table. 1 に示す。吸収エネルギー遷移温度は -76°C である。

2.2 破面観察

得られた破面を観察し、延性破面率の測定、異常破面および AHM の発生過程を調査した。

延性破面率は API の規定にしたがって、両側から板厚分を除いて計測し、AHM および異常破面を脆性破面として計算したため、低目の見積もりとなっている。延性破面率遷移温度は -62°C であり、吸収エネルギー遷移温度と比べると、過度

に安全側の評価となっている。

AHMはFig. 1に示すように高温側で観察され、矢じり模様の破面で、亀裂進展方向に周期的に発生しているように見える。また、AHMのミクロ構造はFig. 2に示すように、板面に平行な劈開破面と延性破面が交互に段差を形成している [3]。

SEM(Scanning Electron Microscope)による発生起点の観察の結果、AHMの破面進行方向は全体の亀裂進展方向に一致していることが確認された。

異常破面はAHMの中央の1枚であるセパレーションの直後に発生している。しかし、打撃部に向かうにつれて、破面の向きが盤面に平行な角度から傾いてくる。つまり、異常破面の発生にはセパレーションが関係しているが、それとは異なる破壊過程であると考えられる。また、SEM観察

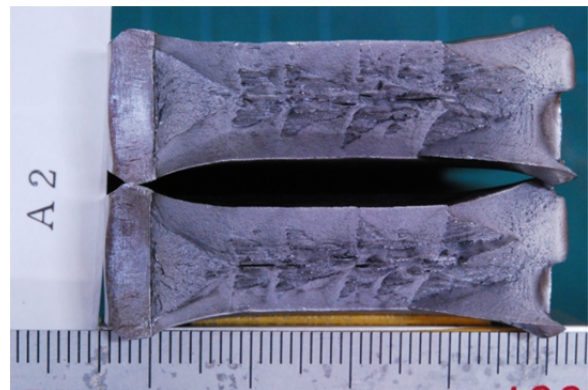


Fig. 1 Fracture photograph, A2(-40°C).



Fig. 2 Microstructure of AHM.

Table. 1 Test condition and result.

Test temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Test specimen number	Absorbed energy (J)	Fraction of Shear Area (%)
-100	A4	250	22
-80	A3	637	33
-60	A1	1020	54
-40	A2	1241	69

によると、異常破面の進展方向は全体の亀裂進展方向と一致していることが確認された。

3. 数値計算

3.1 固有振動解析

試験片の固有周期を計算すると、 4×10^{-4} sである[4]。AHM 発生部における平均亀裂伝播速度を4 m/sとしてAHMの間隔を算出すると、1.6mmとなり低温側の発生間隔と一致した。低温でのAHMは切り欠き底から発生した脆性破面のリガメントに発生するため間隔が狭いが、高温でのAHMは板厚方向全体に発生するため間隔が広い。発生間隔とは一致していない。

3.2 動的弾塑性解析

予断面を亀裂進展方向に0.5mm間隔で分割し、計測した亀裂長さのデータを入力し節点力を解放することで、亀裂を進展させた。

まず、荷重変位曲線求めたところ、実験値より高い結果となった。これは、亀裂伝播速度を断面で一様に仮定したため、内部での亀裂進展を考慮できておらず、剛性が大きくなってしまったことによると推定できる。

次に、亀裂伝播速度のひずみに及ぼす影響を調べるため、増減のある実験値による速度と、単調減少する近似した速度を入力し比較をした。Fig. 4を参照すると、実験値でのひずみの分布は、近似した場合に比べて振動していた。これは、亀裂伝播速度が大きくなると亀裂先端のひずみが解放され、亀裂伝播速度が小さくなると亀裂先端のひずみが蓄積されるからである。

最後に各点におけるひずみの最小値を計算し、異常破面の発生点でのひずみを調べた。その結果Fig. 5に示すように、最も打撃部の近くで異常破面が発生した試験片でもひずみは2%であり、異常破面の発生原因は塑性ひずみによる脆化ではないと考えられる[5]。

5. 結論

AHMは亀裂伝播速度の低下により、亀裂先端にひずみが蓄積された状態で、試験片の固有周期に達したとき発生する。また、AHM発生時のマイクロ機構は、板面に平行なセパレーションに起因している。よって、亀裂伝播抵抗靱性の低下には関与しない。

異常破面はAHMの板厚中央付近のセパレーションの直後に発生しているが、破面が進行すると主破面である延性破面の方向に破面が傾く。よって、亀裂伝播抵抗靱性を低下させる要因となる。

以上により、AHMの脆性破面は板面に平行であるからSAに考慮する必要はないが、異常破面は鋼材の内部欠陥であり靱性低下に影響すると考えられるためSAの計測に含むべきである。

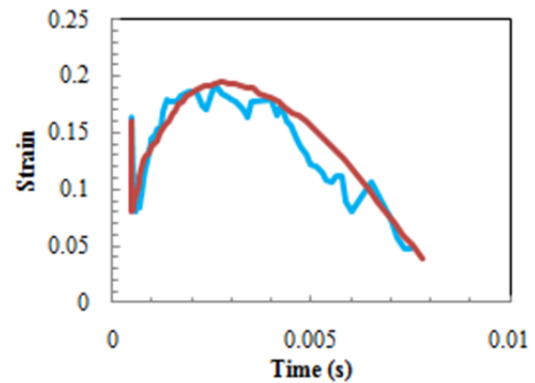


Fig. 4 Crack tip strain.

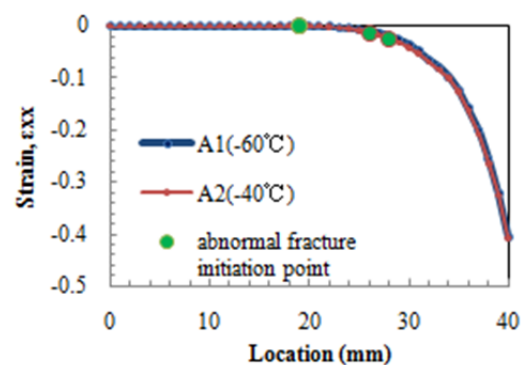


Fig. 5 Plastic strain at abnormal fracture initiation.

参考文献

- [1] American Petroleum Institute, 'Recommended Practice for Conducting Drop-Weight Tear Tests on Line Pipe', API Recommended Practice 5L3 Third Edition, February 1996.
- [2] B. Hwang, S. Lee, Y.M. Kim, N.J. Kim, J.Y. Yoo, C.S. Woo, "Analysis of Inverse Fracture Occurring in Hammer-impacted Region during Drop-weight Tear Test of a High-Toughness Linepipe Steel", Materials Science and Engineering A368 (2004)18-27.
- [3] R. Schofield, G. Rowntree, N. V. Sarma, R. T. Weiner, "Arrowhead fractures in controlled-rolled pipeline steels", Metals Technology, July 1974.
- [4] K. Kishimoto, S. Aoki, and M. Sakata, "Simple formula for dynamic stress intensity factor of pre-cracked charpy specimen", Engineering Fracture Mechanics Vol. 13, pp. 501-508 Pergamon Press Ltd., 1980.
- [5] 栗飯原周二, 中島清孝, 島貫広志, "塑性歪による構造用鋼の靱性低下に関する一考察 "CAMP-ISIJ Vol.13(2000)-431