

鋼の脆性き裂分岐に及ぼす結晶異方性の影響に関する実験と数値解析

Experiments and Numerical Analyses on the Effects of Steel Texture on Brittle Crack Branching in Steel

学籍番号 03-110856 川田 樹
指導教員 栗飯原 周二

(平成 25 年 2 月 06 日提出)

Keywords: 破壊力学, 脆性破壊, 鉄鋼材料, 集合組織, 数値モデル

1. 背景と目的

近年の海上輸送の活発化に伴い、コンテナ船の大型化が進んでいる。このような大型コンテナ船では従来にない極厚の鋼板が使用され、脆性破壊による事故が危惧されている。脆性破壊は溶接欠陥に起因する 경우가多く、その発生を確実に防止することは困難である。このため、材料のき裂伝播停止性能が重視され、我が国では日本海事協会による設計指針が示されている[1]。しかし、本指針はき裂の直線伝播を前提としており、き裂が分岐した場合については、その発生メカニズムは未解明であり、定量的な評価手法も確立されていない。特に、近年建造される船体の安全上重要な部材に使用され、従来鋼に比べて強い結晶方位の異方性(集合組織)を有する TMCP 鋼では、伝播中のき裂の分岐が頻繁に生じることが知られている。このため、分岐き裂の評価は大型コンテナ船の脆性破壊に対する安全性を保证する上で重要な課題である。

本研究では、TMCP 鋼の集合組織に着目し、き裂分岐の発生とその後の伝播挙動を再現可能なモデルを構築し、集合組織がき裂の分岐に与える影響を評価するとともに、分岐を伴う脆性き裂の伝播挙動のメカニズム解明し、直線き裂を前提とした従来の設計指針の問題点を明らかにすることを目的とする。

2. き裂分岐予測モデル構築

2.1 小型実験による分岐発生挙動の解明

モデル化に向けた基礎理論を実験的に構築す

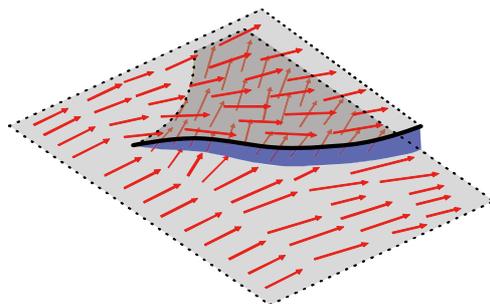


Fig. 1 Crack branching initiation

るため、異なる破壊試験を実施した。さらに、SEMを用いた破面の詳細な観察を実施し、実験事実として、以下に示す知見を得た。

- ・ き裂分岐はき裂の伝播に伴って形成した連続するへき開面間の段差が拡大することで引き起こされる (Fig. 1)。
- ・ へき開面間に段差が形成され始めてから分岐き裂破面の明確な形成に至るまで、結晶粒 5~10 個分の幅がある。
- ・ 分岐の起点は板厚中心部近傍である。

2.2 モデル化

鋼のへき開破壊は結晶中の{100}面に沿って伝播するという事実を利用し、Fig. 2に示すような結晶方位分布とき裂速度を用いて、結晶粒レベルのき裂の伝播経路を再現可能なモデルを構築した (Fig. 3)。モデルの手順を以下に示す。

- ① 動的解析解を用いて、一定の速度でき裂が直線的に伝播した場合のき裂先端近傍応力場とともに応力拡大係数を求める。
- ② 結晶粒の結晶方位を計測により得られた分布に基づきランダムに選択し、き裂先端位置に存在する最大の垂直応力を持つ{100}面を決定する。
- ③ 選択した{100}面を2次元平面に投影し、元のき裂に接続させることで、き裂形状を更新する。
- ④ 更新されたジグザグのき裂形状を多項式近似し、Cotterell & Riceによる近似式[2]を用いてき裂先端の応力拡大係数を求める。
- ⑤ ②~④を6回繰り返す、計7個の結晶粒を伝播した微小き裂の伝播経路を得る。

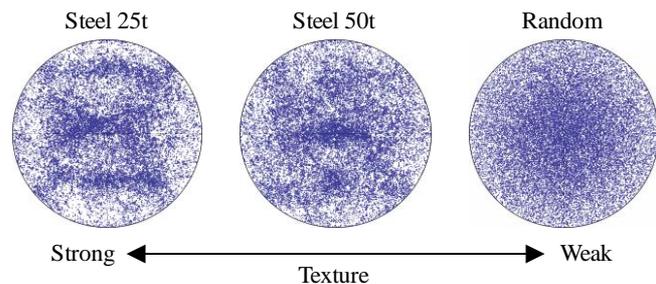


Fig. 2 Texture of steels

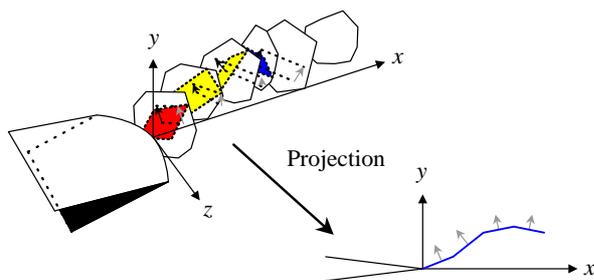


Fig. 3 Schematic diagram of a model

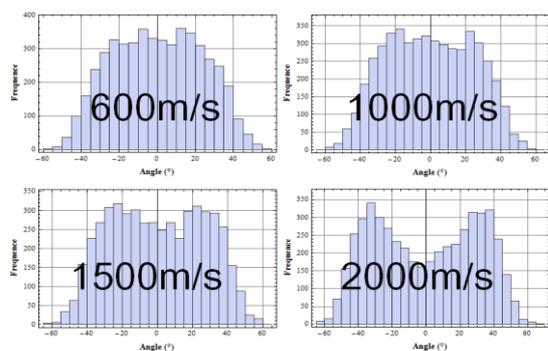


Fig. 4 Example of model analysis (Random)

⑥ ①～⑤の手順を独立に十分な回数試行し、き裂伝播方向の分布を求める (Fig. 4).

2. 3 分岐発生の可否及び伝播方向の決定

事前に実施した各小型試験に対して、き裂伝播速度を変えたモデル解析を行い、実験結果と整合するようなき裂分岐発生基準を決定した。具体的には、ミクロレベルの伝播方向のばらつきが大きさが分岐発生の主要因と考え、解析における伝播角度分布の分散より分岐発生の限界値を定めた。また、各条件下において伝播角度の最頻値を用いて分岐き裂の伝播方向の予測を可能とした。

3. モデルの妥当性検証

モデルの妥当性を検証するため、超広幅混成 ESSO 試験における分岐の可否・分岐き裂の角度を予測し、実験結果と比較した (Table 1)。分岐の可否については試験 25-2 を除いて正しく予測し、精度よくき裂伝播角度を再現可能であることが明らかとなった。

4. 集合組織が分岐発生に与える影響

モデル解析により、集合組織がどのように分岐発生に作用するかを評価した。その結果、き裂伝播方向に対して 90° 方向を向く法線ベクトルを持つ結晶面の密度が小さいほど分岐が発生しやすく、大きいほど発生しにくくなるように作用することが明らかとなった。

5. き裂分岐の安全性の検証

モデルによって発生が予測された分岐き裂について、微小分岐応力拡大係数の数値解[3]を用いて、き裂先端近傍の結晶粒の {100} 面に作用す

Table 1 Comparison of results between predictions and actual results

Test name	Results of simulation		Actual results of tests	
	Branching initiation	Branched crack angle ($^\circ$)	Branching initiation	Branched crack angle ($^\circ$)
25-1	○	27	○	30, 20
25-2	○	28	×	None
25-3	○	27	○	25, 20
50-1	×	None	×	None
50-2	×	None	×	None
50-3	×	None	×	None

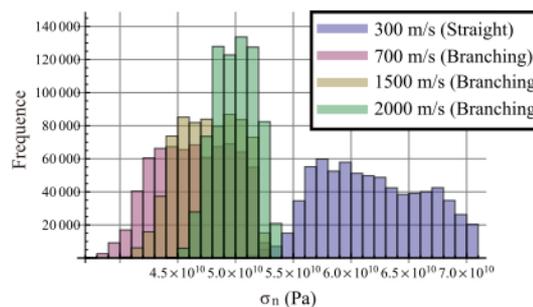


Fig. 5 Example of branched crack safety analysis

る最大垂直応力の分布を直線き裂と比較し、分岐後の安全性を検証した (Fig. 5)。

分岐き裂前縁の結晶粒の {100} 面に作用する垂直応力は、直線き裂の場合よりも低いことが明らかとなった。従って、分岐き裂は直線き裂に比べ安全側に作用することが判明した。この結果は、き裂分岐が発生した試験からアレスト靱性が算出された場合、アレスト靱性を過剰に算出してしまいう可能性を示唆するものである。

6. 結論

本研究の成果を以下に示す。

- 分岐を伴う脆性き裂のメカニズム解明へ向けて、き裂分岐予測モデルを構築した。
- き裂予測モデルの結果を分析し、分岐発生に影響を及ぼす集合組織の影響を評価した。
- 分岐発生後の安全性を明らかにし、現状の ESSO 試験の問題点を示唆した。

今後の課題として、より高い精度で分岐の再現を可能とするため、実験事実に基づき、3次元的な要素が分岐に与える影響をモデルに組み込むことで、板厚等の3次元的效果を考慮したモデルの修正が挙げられる。

参考文献

- [1] 財団法人日本海事協会：脆性き裂アレスト設計指針 (2009)。
- [2] B.COTTERELL, J.R.RICE, Slightly curved or kinked cracks. *International Journal of Fracture*, Vol. 16, pp. 155-169, (1980).
- [3] H. NOGUCHI, M.ISIDA, Stress intensity factors at tips of branched cracks under various loadings. *International Journal of Fracture*, Vol. 54, pp. 293-316, (1992).