

Three dimensional simulation of brittle crack propagation in welded joint of steel

学籍番号 03080860 中居 寛明

指導教員 栗飯原 周二

(平成 22 年 2 月 3 日提出)

Keywords: 鋼、溶接継手、脆性破壊、き裂伝播、シミュレーション

1. 序論

1.1 コンテナ船の大型化

近年、市場の国際化に伴い世界的規模で海上輸送量が増大しており、効率化のためにコンテナ船の大型化が進んでいる。コンテナ船は構造的にねじれやすい。そのため大型化に伴い、強度保持の観点から鋼板もより厚いものが使用されるようになってきている。[1,2]

また、鋼板の厚肉化により溶接方法も小入熱溶接から大入熱溶接へと変化した。大入熱溶接は厚肉な鋼板を一度に一気に溶接する方法であり、工期の短縮には大きく貢献している一方で、溶接部の粗大化による靱性劣化のために、溶接部の脆性破壊に悪影響を与えているのではないかと懸念されている。

1.2 溶接部の脆性破壊

脆性破壊は一瞬にして建造物に致命的な破壊をもたらすために、脆性き裂の発生場所となる可能性が高い溶接部は多くの研究、実験の対象となってきた。

従来の知見では、溶接部における脆性破壊は残留応力等の影響を受け母材側に逸れると考えられていたが、最近の研究によると、き裂が逸れず直進する実験結果が報告されている。[3,4]このことは、従来の設計では脆性破壊に至る危険性を示唆しており、溶接部におけるへき開き裂伝播挙動に関する新しい知見が求められている。

1.3 研究の概要

以上より、本研究では応力場や靱性分布が不均一である溶接部におけるへき開き裂伝播挙動をシミュレートし、負荷応力・残留応力・靱性分布といった要素がき裂伝播挙動に及ぼす影響を考察した。

2. 理論とモデル化

へき開破壊はあるへき開面に対して引張垂直応力が作用することで生じ、き裂先端近傍の応力場は線形破壊力学における応力拡大係数 K によって記述される。本研究では、シミュレーション上のき裂先端計算要素において近似計算により K を求め、局所的なアレスト靱性 $Kc\text{-local}$ と比較することでき裂伝播条件を仮定した。

モデルの対象は、(財)日本海事協会の脆性き裂アレスト設計委員会 (H20~H21 年度) の共同研究一環として新日本製鐵 (株) にて行われた超広幅混成 ESSO 試験である。Fig.1 に示すように、0.2m の初期き裂、初期き裂面に垂直な負荷応力と平行な残留応力、そしてシャルピー衝撃試験より求めた靱性分布を与えて溶接部のへき開き裂伝播挙動をシミュレートした。

3. 実験

3.1 超広幅混成 ESSO 試験

モデルの対象となった実験であり、実際に溶接部におけるへき開き裂の伝播の様子を観察し、破面を撮影した。負荷応力が大きい場合は、靱性が劣化しているボンド部を直進していたが、負荷応力が小さい場合はボンド部から他方のボンド部に移り乗るなど不安定な挙動を示していた。

3.2 シャルピー衝撃試験

超広幅混成 ESSO 試験の破面近傍から加工片を採取し、シャルピー衝撃試験により溶接部の靱性分布を求めた。ボンド部で靱性が最も劣化し、熱影響部の細粒域では靱性が回復しており、それ以外の熱影響部では母材に比べやや靱性が劣化していた。また、溶接金属部も母材に比べてやや靱性が劣化していた。

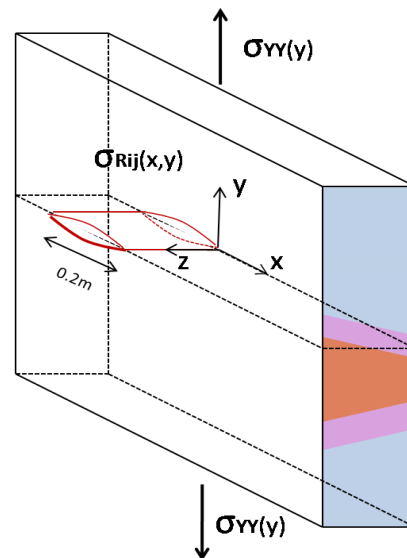


Fig.1 overview of model

4. シミュレーション結果

4.1 超広幅混成 ESSO 試験に即したシミュレーション

ESSO 試験に即してシミュレーションを行い、Fig.2 のようなシミュレート破面が得られ、溶接部をへき開き裂が直進する様子を再現できた。

4.2 き裂伝播開始直後の挙動

Fig.3 に示すように、き裂伝播開始直後の特異な挙動を再現した。

5. 溶接部のへき開き裂伝播挙動に及ぼす負荷応力・残留応力・靱性分布・溶接形状の影響

5.1 負荷応力と残留応力関係の関係

残留応力が負荷応力に対して大きいと残留応力に垂直な面が優先的に選択され、Fig.4 に示すように全体としてもき裂が逸れやすくなる。

5.2 靱性分布と負荷応力との関係

靱性分布と負荷応力を変化させてシミュレーションによる仮想実験を行い、靱性の谷間（靱性が劣化した場所）が浅く、負荷応力が小さいほどき裂は逸れやすいという傾向を示した。その傾向は実際に日本造船研究協会の第 147 研究部会が行った実験結果と同様のものであった。[5]

5.3 溶接形状が及ぼす影響

溶接形状と初期き裂の三次元における相対的位置関係がき裂伝播挙動に影響を及ぼすことを提示した。傾向としては、傾斜形状では逸れやすく、X 型形状では停止しやすい。

6. 結論

- (1)超広幅混成 ESSO 試験に即して三次元シミュレーションを行い、き裂が母材に逸れずに溶接部を直進する様子を再現した。
- (2)負荷応力、残留応力、靱性分布といった要素がき裂伝播挙動に及ぼす影響を考察し、初期き裂と溶接形状の相対的位置関係がき裂伝播挙動に影響を及ぼすという三次元シミュレーションならではの要素も提示した。

7. 今後の展望と課題

①さらに詳細な靱性分布と応力場、②板表面では塑性拘束が弱くへき開き裂が進展しにくい等の板厚効果、③定量的評価のため直進するか逸れるかを確率的に記述すること、④二枚き裂の表現、⑤へき開破面と延性破面の共存を表現、⑥き裂伝播速度という概念をモデルに組み入れること、⑦シミュレーションの高速化、といった改善を行うことで、より再現性が高く、実用に耐えうるシミュレーションになるとと思われる。

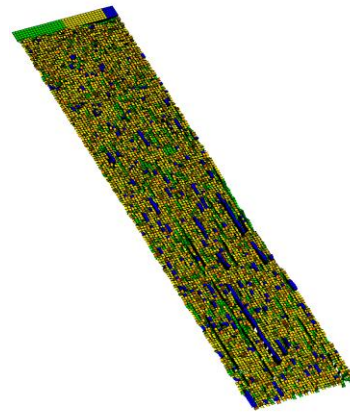


Fig.2 Simulation of brittle crack propagation in welded joint of steel

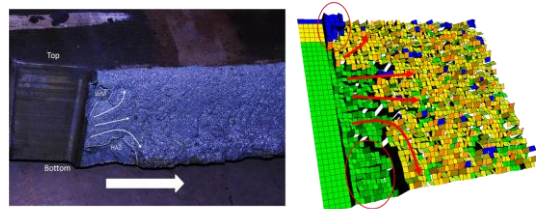


Fig3 Simulation of initial-stage brittle crack propagation in welded joint of steel

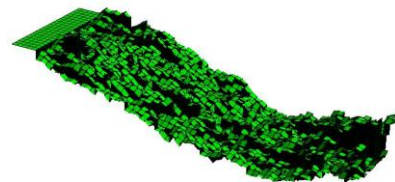


Fig4. Simulation of curved crack

8. 参考文献

- [1]山口欣也,北田博重,矢島浩 他,超大型コンテナ船の開発-新しい強度極厚鋼板の実用-,日本船舶海洋工学会誌第 3 号,pp.70-76,2005.
- [2]長塚誠治,超大型コンテナ船の今後の展望-コンテナ物流の変化とメガ・コンテナ船の推移-,日本船舶海洋工学会誌第 11 号,pp.11-16,2007.
- [3]日本造船研究協会・第 147 研究部会,「船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度に関する研究」報告書,1976.
- [4]Inoue T,Ishikawa T,Imai S *et. al.*,Long crack arrestability of heavy-thick shipbuilding steels,In Proceedings of the sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference,pp132-136,2006.
- [5] 日本造船研究協会・第 147 研究部会,日本造船研究協会報告書第 87 号-船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度評価に関する研究-,1978.