

# エネルギー分野に用いる TMCP 鋼板におけるセパレーション発生メカニズムの考察 Investigation on Formation of Separation Crack in TMCP steel plate applied for energy field

学籍番号 03-140872 尾形 賢翔  
指導教員 川畑 友弥

(平成 29 年 2 月 2 日提出)

Keywords: セパレーション, TMCP 鋼, 脆性破壊, FEM 解析, ボイド形成

## 1. 背景と目的

海底油田やガス田の開発に用いられる海洋構造物, エネルギー輸送において不可欠なパイプラインや LNG タンカーには, 過酷な使用環境に耐えるために高い強度が要求されている. これらの鋼構造物に対して, 近年では TMCP 法を適用し結晶粒を微細化した高張力鋼が導入されている. しかし, TMCP 鋼は低温側で強い制御圧延を施すことによって, 従来の手法で圧延された鋼には見られなかった高い残留応力を生じることに加え, セパレーションと呼ばれる破面形態を呈する場合がある. セパレーションとは, 低温において衝撃荷重を受けて生じた延性破面内部に板厚表裏面に平行な層状の割れを生じる現象を指し, 靱性の低下が生じる原因となるため, 安全設計上問題視されている. セパレーションの形成機構として, 先行研究において山口ら[1]の{100}集合組織説をはじめ様々な説が提案されているものの, 未だに決定的な原因は明らかになっていないのが実情である. セパレーションが具体的にどのような機構で形成されているか, どのような力学的条件で説明が可能であるかは不明なままである.

以上の先行知見を踏まえ, 本研究では TMCP 鋼に発生するセパレーションの形成メカニズムを解明するために様々な実験と観察, 数値解析を行った. セパレーションの形成メカニズムを解明することができれば, TMCP 鋼に対する品質要求をより適切なものとし, 安全性を担保しつつ生産にかかるコストを削減し, 産業分野に大きな利益を与えることが期待される.

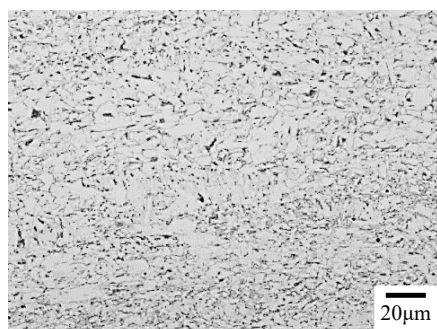


Fig. 1 Microstructure of tested steel

## 2. 供試材

試験に用いた供試材は (株) 神戸製鋼所製の板厚 20mm の鋼板であり, 未結晶域での圧下率を 50%以上確保した典型的な TMCP 材である. 供試鋼のミクロ組織を Fig.1 に示す.

## 3. セパレーション現出実験とその観察

供試鋼の材料特性・セパレーション発生条件を調べることを目的に引張試験, シャルピー衝撃試験, 途中止め(セパレーション発生前)引張試験, 途中止め(セパレーション発生直後)引張試験, 板厚方向を長手方向とした CTOD 試験の 5 種類の実験を実施した.

シャルピー衝撃試験によって得られたセパレーションを有する破面を Fig.2 に示す. シャルピー衝撃試験によって得られた温度とセパレーションの有無の発生を考察した結果, ある程度先端の塑性変形が拡大することがセパレーション発生の必要条件であると推察された.

また, セパレーション発生直後に除荷した引張試験片から, 内部のセパレーション破面を割り出して観察した. この断面は脆性破壊の様式を示す部分と延性破壊と見られる部分が混同しており, セパレーションの明確な起点を探すことは難しかった. 一方で, 伸長ボイドと見られるようなものが破面中に存在することが認められた.

先行研究で, セパレーションの発生と延性ボイドの関連が指摘されていたため, セパレーション



Fig. 2 Fracture surface of Charpy impact test (-140°C)

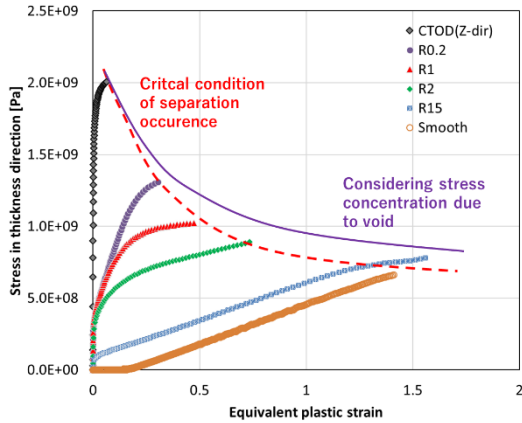


Fig. 3 Critical stress of separation occurrence

が発生するより前に除荷を行った引張試験片の断面を切り出し、光学顕微鏡によって試験片中心部を観察した。観察では、セパレーションが発生する試験片は引張試験の途中において多数のボイドを生成することが分かった。

最後に、板厚方向（セパレーション面と垂直方向）を長手方向にとった CTOD 試験を行い、 $-100^{\circ}\text{C}$ において破壊靱性値である限界 CTOD を取得した。

#### 4. FEM 解析

セパレーション発生時の応力状態を詳細に知るため、FEM を用いて実験の再現解析を行った。解析においては、FEM による逆解析によって相当応力-相当塑性ひずみ曲線のパラメーターを各温度について取得し、材料の構成則として用いた。

解析では、引張試験と CTOD 試験の再現解析を行い、引張試験についてはセパレーションが発生した瞬間までのセパレーション位置での応力・ひずみ、CTOD 試験については脆性破壊発生時までの起点位置の応力・ひずみを取得した。Fig. 3 に、それぞれの解析で取得した、元の板厚方向（セパレーション面に垂直な方向）の応力と相当塑性ひずみの履歴を示す。図に示されるように、それぞれ異なる履歴を辿りながらも、セパレーション発生時・脆性破壊発生時の元の板厚方向応力とひずみの関係は滑らかな曲線によって整理できる。本研究では、セパレーション発生時・脆性破壊発生時の元の板厚方向応力がセパレーション発生の限界応力であると考え、限界応力  $\sigma_f [\text{Pa}]$  と相当塑性ひずみの関係式を以下のように定義した。

$$\sigma_f = -3.94 \times 10^8 \ln \bar{\epsilon}_p + 8.25 \times 10^8 \quad (1)$$

相当塑性ひずみの増加に伴って限界応力が低下するのは、3章の観察結果から、先行して生成されるボイドの増加・成長によるものと考えられる。

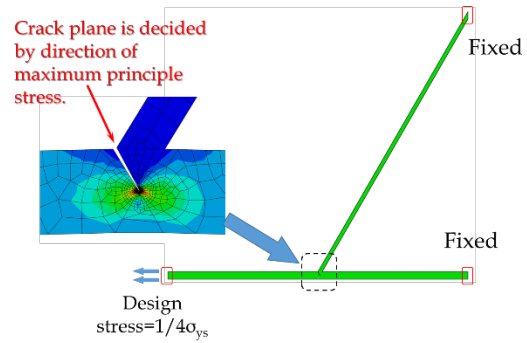


Fig. 4 2D analysis for offshore structure assessment

#### 5. 海洋構造物へ適用した場合のセパレーション発生可能性の考察

4章で算出した限界応力と相当塑性ひずみの関係式を用いて、本供試材が実際に海洋構造物において最も過酷な部位に適用された場合に、セパレーションが発生するかどうか、あるいはどの程度の安全余裕度があるかを検討した。本解析では、Ou[2]が対象として取り上げた鋼管継手形状を、問題を単純にするために対象部位を二次元問題として扱った。本研究では扱う、Fig. 4 に示すような有限要素モデルを用いた。解析の結果、板厚の1/2までの疲労き裂が作用するという極めて過酷な状況を想定しても、式(1)に示した条件は満足しないことがわかった。このことから、セパレーションが試験片固有の現象であり、実構造物においては生じない可能性が高いことがわかる。

#### 6. 結論

本研究では以下の成果を得た。

- (1) シャルピー衝撃試験によって得たセパレーション発生の有無と温度の関係から、先行する塑性変形の進行がセパレーション発生の必要条件であると考えた。
- (2) セパレーション発生直前の断面観察から、セパレーションに先行して延性ボイドが発生・成長していることを確認した。
- (3) FEM を用いた引張試験・CTOD 試験の再現解析から、セパレーション発生の限界応力と相当塑性ひずみの相関式を構築した。
- (4) 疲労亀裂を有する海洋構造物の FEM 解析と、本研究で構築した限界応力と相当塑性ひずみの相関式から、セパレーションが試験片固有の現象であり、実構造物においては生じない可能性が高いことが示唆された。

#### 参考文献

- [1] 山口哲夫, 平忠明, 平林清照, 引張変形によって生じるセパレーションの発生について, *CAMP-ISIJ*, 1974
- [2] Ou Zhiyong, Fracture and Failure Assessment of Fatigue-Cracked Circular Hollow Section X-Joints, Doctoral thesis of National University of Singapore, 2013.