

博士論文

高強度複合組織鋼板の低温脆化挙動における

二段階延性脆性遷移

Two-step ductile to brittle transition on low-temperature
embrittlement for high-strength multi-structural steel sheets

横浜国立大学大学院理工学府

機械・材料・海洋系工学専攻

川田 裕之

Hiroyuki Kawata

2021年3月

要旨

本研究では、高強度複合組織鋼板の低温脆化における二段階延性脆性遷移に着目し、サブサイズ試験片を用いたシャルピー衝撃試験を中心とした実験および考察を行った。

複合組織鋼の低温脆化において、吸収エネルギーが二段階で大きく低下する、二段階延性脆性遷移挙動が見られる場合がある。吸収エネルギーは、温度の低下に伴い、高位の upper shelf から、中位の middle shelf を経て、低位の lower shelf へと遷移する。一方、破面は、upper shelf から middle shelf への遷移と対応して、ディンプルに覆われたマイクロボイド連結型破面から、ディンプルをほとんど含まない平坦な低エネルギー破面へと遷移する。middle shelf から lower shelf への遷移では、破面はほとんど変化しない。このため、吸収エネルギーと破面との関係を整理することにより、低温脆化挙動が一段階と二段階のいずれであるかを見分けることができる。

middle shelf における破壊は、塑性変形を受けた後に発生し、平坦な破面を呈しつつ進展する。この破壊は、フェライト粒内および粒界を伝播経路とし、フェライト粒内では{112}を主として、{001}、{011}に沿って進展している。一方、同様の破面を呈する lower shelf での破壊は、塑性変形をほとんど受けずに発生し、フェライト粒内の{001}を主な伝播経路として進展している。両者は、発生と伝播の両方の機構が異なる破壊である。

複合組織鋼における延性脆性遷移が二段階となる理由は、軟質組織と硬質組織のそれぞれにおける降伏応力とへき開破壊応力の大小関係を考える、破壊発生の定性モデルによって理解することができる。高温では、2つの降伏応力のいずれもが硬質組織のへき開応力よりも小さく、塑性変形が進行して破壊に至って、高い吸収エネルギーを示す upper shelf となる。低温では、2つの降伏応力のいずれもが硬質組織のへき開応力よりも小さく、塑性変形の前にへき開破壊が発生し、吸収エネルギーの小さい lower shelf となる。中間の温度域では、軟質組織の降伏応力は硬質組織のへき開破壊応力よりも小さいので、塑性変形が軟質組織で開始するが、硬質組織の降伏応力はそのへき開破壊応力よりも大きいため、硬質組織が大きく塑性変形する前にへき開破壊が発生し、吸収エネルギーが中位である middle shelf となる。

二段階延性脆性遷移の発現、および、遷移温度には、マイクロ組織の因子が大きく影響する。塊状

フェライトと硬質組織からなる複合組織鋼では、硬質組織分率の増大によって一段階から二段階へと延性脆性遷移挙動が変化し、更に分率が増えると、再び一段階へと変化する。前半の挙動は、破壊発生の定性モデルにおいて、分率に伴って塑性変形後の硬質組織への応力集中度合いが大きくなることによる印加応力に対する硬質組織のへき開破壊応力の低下を考慮することで、upper shelf から middle shelf への遷移温度が上昇し、middle shelf から lower shelf への遷移温度との差が広がって middle shelf を認識しやすくなることで理解できる。後半の挙動は、発生したへき開き裂の伝播を抑制するフェライト粒界が硬質組織分率の増大によって消失したため、マクロなへき開破壊の発生が硬質組織でのへき開破壊の発生のみで律速されることで理解できる。また、構成組織の強度の変化による影響は、その降伏応力と破壊応力の変化を、破壊発生の定性モデル上で考慮することにより、遷移温度の挙動を理解することができる。

過去の文献との比較から、二段階延性脆性遷移は一般的に起こる事象と考えられる。材料としては、複合組織において見られる事象であり、構成組織の分率や特性などによって、2つの遷移温度の差が大きくなることで認知される。また、応力集中の緩和やひずみ速度の低下によって、軟質組織が降伏しやすくなると、2つの遷移温度の差が大きくなり、認知されやすくなると考えられる。

この知見により、技術的・産業的には材料の適正な設計・利用・評価につながる。また、学術的には、複合組織における組織と靱性の関係を表す定性モデルを提案し、その破壊機構の遷移における塑性変形の重要性を示すものである。