九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

パンチ穴加工を受けた薄鋼板の引張・疲労強度特性に及ぼすき裂進展機構の影響：高強度低合金（HSLA）熱延鋼板の例

張，珂謹

https://hdl.handle.net/2324/4475129

出版情報：Kyushu University, 2020, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

（様式２）

氏　　名　：張　珂謹（ちょう　かきん，Zhang Kejin）

論 文 名　：パンチ穴加工を受けた薄鋼板の引張・疲労強度特性に及ぼすき裂進展機構の影響：高強度低合金（HSLA）熱延鋼板の例

区　　分　：甲

論　文　内　容　の　要　旨

自動車産業における軽量化の要求の増大による高強度鋼の使用増加に伴い，せん断加工の一種であるパンチ穴加工の適用拡大が期待されている．パンチ穴加工は，加工時間が圧倒的に短いというコスト上の優位点を有している．しかし，加工による穴周辺の塑性変形は避けられず，その領域はせん断影響域（shear-affected-zone: SAZ）と称されている．そして，SAZ を有する材料の強度特性の低下が問題となっている．SAZ は，材質・表面形状・平均応力が，母材のそれらとは異なる．これまで SAZ を有する構造について，個々の材料および個々の加工条件毎に，単純な力学条件下での引張もしくは繰返し引張/曲げ条件における巨視的な強度特性が，荷重―伸び曲線や *S-N* 線図の形で測定され，それらの特性に及ぼす主要因が定性的に考察され，考察結果を基にした個別の改善がなされている．しかし，任意の材料・任意の加工条件・任意の使用条件に対して有効な，統一的な考察は行なわれていない．そのため，測定された巨視的な強度特性データは活用されていない．

そこで本研究では，引張強度特性および疲労強度特性に代表される巨視的な強度特性は，破壊時に生じるき裂進展の特性に依存していることに着目している．機械部品の強度は，素材，形状・加工，使用条件に応じて多様に変化するが，これら変化がき裂の進展挙動，特に SAZ におけるき裂の進展挙動に対してどのように影響するかという視点で現象を整理することを目指している．この整理によって，多様に変化する条件における強度特性に関する，統一的な考察が可能になると考えている．また，対象とする材料は，低コストかつ高強度の高強度低合金（High-Strength-Low-Alloy: HSLA）熱延鋼板としている．HSLA 鋼の両極端な例として，高降伏強度・低加工硬化率の析出強化鋼と，低降伏強度・高加工硬化率の Ferrite-Martensite 二相鋼，それぞれの引張強さ 590MPa 級と 780MPa 級の鋼を用いている．

第 1 章では，最初に研究の背景として，従来の研究で判明している疲労強度特性に関する問題点を指摘し，次に研究の目的を述べ，最後に本研究で対象とする技術的な課題に対する概説を行なっている．

第 2 章では，パンチ穴加工によって，疲労強度特性が大幅に低下し，さらに素材の引張強さが異なっていても同程度の疲労強度特性になるという，特異な疲労強度特性を示した析出強化鋼パンチ加工材について，特性を際立たせる工夫を凝らした疲労試験を実施し，疲労き裂進展過程を，レプリカ法およびフラクトグラフィを駆使して調査している．その結果，析出強化鋼パンチ加工材の SAZ を進展する疲労き裂に，数百 μm の長さの，通常の塑性変形モードとは異なる，損傷蓄積モードの疲労き裂進展が生じていることを見いだした．そして，この特異な疲労き裂進展機構が，特異な疲労強度特性の原因と結論付けた．

第 3 章では，特異な疲労き裂進展機構を示した析出強化鋼パンチ加工材に対して，疲労限度低下

の機構を調査している．SAZ 領域内を進展する損傷蓄積モードの疲労き裂によって，疲労限度の物理的意味が変化したという仮説を立て，力学を用いて定量的に検定している．パンチ加工穴内面に観察される表面粗さを曲率半径 ρ の切欠きと見なし, 疲労き裂発生限界 σ_{w1} と疲労き裂停留限界 σ_{w2} の関係を論じ，加工による結晶粒微細化と損傷蓄積モードへの疲労き裂進展機構の変化によって σ_{w2} が大幅に低下し，その結果疲労限度の物理的意味が σ_{w2} から σ_{w1} に変化することが，疲労限度低下の原因と結論付けた.

第 4 章では，前章までの疲労に関する結果から，同材料の静的引張においても SAZ においてき裂進展機構の変化を原因とする, 特異な現象が生じるのではないかと考え, 検証している. その結果，あるひずみ速度条件において，巨視的な弾性変形の段階で破壊が生じる，脆性破壊が生じることを明らかにした. 破面の詳細観察によって, 破壊時に SAZ 領域内を進展するき裂の進展モードが, SAZ が無い場合と比較して異なること明らかにしている．このき裂は，荷重負荷方向に対して約 45 度傾斜しており，せん断き裂と名付けた．せん断き裂形成の後に，ひずみ速度に応じてき裂進展モードが変化し，その結果延性破壊もしくは脆性破壊が生じると結論付けた.

第 5 章では, 静的引張を受けた同材料パンチ加工材の破面詳細観察によって, せん断き裂は a, b, c の３つの領域によって形成されていることを見いだしている．そして，せん断き裂によってき裂材と見なせるパンチ加工材の延性・脆性破壊の区別は，力学的視点から，応力遮蔽効果によりき裂先端の鈍化・応力緩和の有無に依存することに着目し，せん断き裂の発生時期，加工の影響について考察している．その結果，領域 a, b は弾性ひずみに駆動され弾性段階で発生すること，加工条件を変えることによって脆性破壊の危険性を減らすことができることを明らかにしている．そして今後の研究課題として，パンチ穴縁という不均一な応力場，SAZ という不均質な塑性ひずみ場に対応させた，新たな力学モデルが必要であることを論じている.

第 6 章では，各章の研究結果をまとめ，本論文の結論を示した.