

水素環境下における回転曲げ疲労試験方法の開発及び低合金鋼SCM435の高サイクル疲労特性に及ぼす水素の影響に関する研究

川上, 遼

<https://hdl.handle.net/2324/4475128>

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



氏 名：川上遼

論 文 名：水素環境下における回転曲げ疲労試験方法の開発及び低合金鋼 SCM435
の高サイクル疲労特性に及ぼす水素の影響に関する研究

区 分：甲

論 文 内 容 の 要 旨

日本が抱えるエネルギーに関する課題に対する切り札として、水素が掲げられている。水素をエネルギーキャリアとして用いることで、従来利用することが困難であった海外の豊富な再生可能エネルギー資源や、未利用エネルギー資源、二酸化炭素回収・貯留の適地等を活用するための取り組みが進んでいる。エネルギーとしての水素の利活用については、燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicle;FCV)の普及や水素ステーションの設置が進められてきた。これらのさらなる普及拡大のために、低コスト化が求められている。現在、水素ステーションや FCV において、高圧水素ガスに曝される金属部品には、水素による強度や延性の低下、いわゆる水素脆化の起こりにくいオーステナイト系ステンレス鋼やアルミ合金などが使用されている。しかし、オーステナイト系ステンレス鋼は Ni や Mo 等の希少金属元素を多量に含有していることから、高価であることが課題となっている。また、アルミ合金は、低強度であることが課題となっている。高圧水素用機器のさらなる低コスト化に向けて、希少金属元素の含有量が少なく安価であり、高強度な低合金鋼等への使用材料の拡大が期待されている。

高圧水素用機器に用いる部品の設計においては、部品に用いる材料の水素影響下における機械的性質及び、疲労特性を把握することが重要である。しかしながら、水素ガス中における低合金鋼の疲労強度特性に関する研究例は非常に限られている。特に、繰返し数 N が 10^6 回を超える高サイクル領域での疲労特性については、ほとんど研究例がない。そこで本研究では、水素影響下において高速の試験が可能であり、かつ、既存の大气中における疲労データと比較が可能な疲労試験方法の開発を目的に、水素連続チャージ中回転曲げ疲労試験方法と、高圧水素中回転曲げ疲労試験方法の開発に取り組んだ。それらの試験方法を用いて低合金鋼 SCM435 の疲労試験を実施し、疲労強度特性に及ぼす水素の影響を調査した。

第 1 章では、水素ステーションや FCV のさらなる普及拡大に向けた課題についてまとめ、解決策として、高圧水素用機器への低合金鋼の適用が必要であることを述べた。また、水素環境における低合金鋼の材料特性に関する従来の研究と課題についてまとめ、本研究の目的を示した。

第 2 章では、電解水素チャージ技術を回転曲げ疲労試験と組み合わせ、水素連続チャージ下で鋼材表面に水素が連続供給される状態で回転曲げ疲労試験を行う方法の開発に取り組んだ。電解液として用いた水酸化ナトリウム水溶液に、高分子凝集剤を混合することによってゲル状にし、回転する試験片に巻きつけるようにして浸漬した状態で、水素連続チャージ中での回転曲げ疲労試験を行う新たな試験方法を確立した。

第 3 章では、第 2 章で確立した試験方法を用い、水素連続チャージ下において、熱処理条件の異なる 2 種類の SCM435 (Heat A 材:引張強さ=996MPa および Heat B 材:引張強さ=1691MPa) の回転曲げ疲労試験を行い、疲労特性に及ぼす水素の影響を調査した。比較的短寿命の領域では、両材において、疲労寿命が顕著に低下する傾向が認められた。破面観察の結果から、水素連続チャージによる疲労寿命の低

下は、水素助長継続疲労き裂進展機構による疲労き裂進展の加速によるものと考えられた。Heat A 材では、水素連続チャージによる疲労限度の低下は 25MPa 程度と軽微であった。一方、Heat B 材では、疲労限度は水素連続チャージにより 235MPa 程度低下した。疲労限度において非破断となった試験片の表面には、Heat A 材と Heat B 材のいずれにおいても、チャージなしの場合には試験片平行部にき裂が認められ、水素連続チャージの場合には認められなかった。この原因として、水素の影響下で塑性誘起き裂閉口の発達が妨げられたことや下限界有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{\text{eff,th}}$ が低下した可能性が考えられた。

第 4 章では、高圧水素中回転曲げ疲労試験方法の開発に取り組んだ。試験容器内に回転曲げ疲労試験機構を格納し、マグネットドライブ方式により、動的なシールを用いることなく、試験容器の外部から内部へ回転の動力を伝達する構造とすることで、高圧水素ガス中で回転速度 990rpm の回転曲げ疲労試験が可能な試験方法を開発した。応力繰返し数 10^7 回を打ち切り回数とする回転曲げ疲労試験を実施した結果、試験中の水素ガスの温度は安定しており、水素ガス圧力の低下は認められなかった。著者が知る限り、70MPa 高圧水素中で、回転曲げ疲労試験により $N = 10^7$ までの疲労データを取得した例は世界初である。本試験機の開発により、高圧水素用機器の無限寿命設計に必要な不可欠な高サイクル疲労データを取得するための評価手法を確立した。

第 5 章では、第 4 章で確立した試験方法を用いて、70MPa 水素ガス中において SCM435 (Heat A 材) の回転曲げ疲労試験を行い、その疲労特性に及ぼす高圧水素の影響について調査した。連続水素チャージの場合と同様、70MPa 水素ガス中においても、比較的短寿命の領域において、疲労寿命が大気中に比べて顕著に低下した。 $\sigma_a = 468\text{MPa}$ において、大気中及び、70MPa 水素中のいずれも $N = 10^7$ の長寿命領域で非破断となる結果が得られた。非破断となった試験片の試験部表面を金属顕微鏡により観察した結果、大気中と 70MPa 水素中のいずれの場合においても、約 $50 \sim 70 \mu\text{m}$ 程度のき裂が認められた。このことから、両環境で、疲労限度は発生したき裂の伝ば停留限界で決まっていることが明らかとなった。また、この結果から、引張強さを 900MPa 未満に低減させた SCM435 においては、70MPa という高圧の水素ガス環境下でも、微小き裂の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は大気中に比べて低下しないことが示唆された。さらに、本研究と従来研究の結果から、引張強さが 1000MPa 以下の鉄鋼材料では、水素影響下においても疲労限度は低下しない傾向が確認された。これにより、鉄鋼材料の強度レベルを限定することにより、高圧水素用機器の設計において無限寿命設計が可能であるという重要な知見が示された。

第 6 章では、本論文を総括した。