

したに過ぎず、生産性の向上とか鋼種から見た普遍化など今後克服すべき問題は過去に克服した諸問題に比して優るとも劣らない困難さを含んでいるように見える。そうした観点から、設備や実操業を直接に改善して行く方法だけではなく、実操業に現れる諸問題を抽出しこれを基礎的な視野の中で検討した上で設備や実操業にフィードバックする態度が必要であり、そのことが問題の早期解決につながる近道になるのではないかと思います。

III. 鋼の疲労き裂の発生と伝播特性

金属材料技術研究所 工博

座長 荒木 透

本討論会は鋼材が繰返し応力-ひずみを受けたときの疲れ損傷によりき裂を発生しそのき裂が成長伝播する現象について、とくに冶金的要因との関連を追求する観点から討論することを主眼にして行なわれた。

討13「鋼の疲労損傷におよぼす微視組織因子の影響」は疲労き裂発生前の鋼疲労試片の内質変化、疲れ損傷の進行の問題を扱った研究で、東大工堀部氏により発表された。炭素鋼 (0.13~0.4%)、Nb 処理鋼、Fe-Ni-(Cu) 合金等を用いて、結晶粒径、析出物、(セメントイト、 ϵ -Cu 粒子等) の存在形態と安定度などの強化機構と関係ある組織因子および試験温度因子が疲れき裂発生に至るまでの微視的損傷程度に及ぼす影響を調べた研究で、この間の巨視的塑性ひずみ振幅の変化 (軟化/硬化) の観測結果とともに、表面疲労による初期の損傷特性は静的強度試験結果やそれに基づいた微視組織の強化機構とは異なるものがある点を明らかにしている。

討論として、新日鉄石黒氏、東工大小林氏よりそれぞれ電顕透過観察試片の採取位置ならびに試験機の条件などについての質問回答があつた後、疲労損傷が試片のどの場所でどう起つているかという点についての意見が求められた。これに対して、この場合の損傷は試片表面のストライエーション、スリップバンド等にみられるマクロ的な繰返しひずみ変形の局部集中現象から生じつつあるものと、全般的に生起する母質 (マトリクス) 組織のミクロ的变化、主として透過電顕組織で観察されミクロ硬度によつて測定し得る変化、に大別して考察し、それぞれの影響のもとにマクロ的塑性ひずみの挙動が観察され、き裂の発生へとつながると考える旨の見解が講演者より述べられた。

討14「5.5%Ni-C-Mo-V 鋼の組織と疲れ性質」は、き裂発生後 $150\mu\text{m}$ に達するまでの初期き裂の疲労伝播挙動および定荷重疲れ破壊強さに対する表記鋼の調質組織、オーステナイト粒度などの冶金的要因の影響を追求した研究であり、金材技研、角田氏より発表された。片切欠付板試片による $R=-1$ の繰返し荷重試験により得られた結果として、1) 焼入れ焼もどしあるいは類似熱処理の場合疲れ強さは組織因子に支配され、主として初期き裂 ($150\mu\text{m}$) までの繰返し数に依存する。2) オーステナイト結晶粒度が同じ場合、組織に関係なく繰返し降伏強さが疲れ破壊強さに比例する。また粒径の小さいほど疲れ強さは高い。3) ベイナイトマルテンサイト混合組織はき裂伝ば指数の点ですぐれており、恒温変態と細粒化処理の組合せにより高い疲れ強さが得られる。など

の成果が述べられた。

討論として、東工大小林氏より、予講にき裂発生繰返し数 (Ni) として扱っているのは発生ではなく、初期の伝播き裂の部分で、Nは大半伝播に費やされていることが過去の研究から明かであると述べた。また伝播速度がほぼ K_{max} に依存すると考えられる図2の結果については肯定の意見を述べ、 K_{max} の極めて低い領域では冶金的要因をさらに受けたデータが得られるであろうと考察した。新日鉄石黒氏は切欠試験片の加工残留応力のき裂発生への影響の懸念を述べ、またオーステナイト粒より切欠先端部ではさらにミクロ的なサブ構造が影響すると考える。むしろマクロ的に σ_g^2 、 ΔK^2 に依存する繰返し塑性域の大きさで考えた方が簡単ではないかとの意見を述べた。

さらに準備討論として、討14-1「フェライト系鉄合金における疲労のラック伝播速度と塑性域について」の発表が東北大鈴木氏によつて述べられた。これは Fe-10%Cr-2%Ni 鋼等のラスマルテンサイト、フェライト、冷間加工フェライト等異なつた相組織の試片を用意し、繰返し引張圧縮応力下のき裂伝播をしらべたもので、塑性域測定値の大きさとき裂長さ、き裂伝播速度等の関係の理論式との対応を見、 ΔK_{th} 、塑性域の組織依存性などを考察している。東工大、小林氏より、1) 試片が小規模降伏条件が満足されていないのではないかと 2) 定荷重試験での ΔK_{th} の値の求め方、等に関しては疑念を述べ、理論的な数式の導入にはその前提となる種々の条件についての慎重な吟味が必要である点を指摘した。これに対して鈴木氏からは純鉄試料以外は小規模降伏の条件は満たされていると考える旨の回答があつた。また新日鉄石黒氏より、雰囲気の影響によつて da/dN が変化することと塑性域の大きさととの関係および原因について質問したに対し、測定結果では塑性域の大きさはき裂伝播の遅くなるような雰囲気の方が少し小さいが、それのみでは速度の差を説明できない。き裂新生面へのガス吸着や給合エネルギーの低下などの要因も考えられるが決定的なことは現段階では言えないとしている。

つづいて、準備討論発表、討14-2「鋼の疲れ亀裂伝播速度の低 ΔK 側の遷移について」が東工大布村氏によつて述べられた。これは構造用鋼、Fe-3%Si 及びアルミ合金の切欠試験片について、 $dl/dN-\Delta K$ 関係をしらべ、疲れき裂つ初期の段階が遷移域的挙動を示し、発生前の損傷過程に影響されることを立証しようとした研究である。これに対し、小林氏はこの遷移域は、切欠き附与条件によつて影響を受ける領域であり、初期の ΔK を見掛けの ΔK で整理することによつて生じ ΔK_{th} とは無関係ではないかとコメントした。布村氏はこの遷移域はき裂伝播速度の下限を表わすいわゆる ΔK_{th} ではなく、 ΔK_{th} そのものの意義にも疑問がある。本実験の遷移域の伝播特性は実用構造物の疲れき裂と寿命の考察上重要として検討している旨を述べた。

さらに準備討論発表、討14-3「高張力鋼の $\Delta K_{\text{th}}/2$ におよぼす平均応力の影響」が金材研太田氏により述べられた。これは上記 ΔK_{th} を疲れの潜在する材料の疲れ限度に対応するものとして注目し、 ΔK 漸減法により履歴の影響を除きながら測定し、き裂伝播速度を R 、 ΔK_{th} 等により統一的に表わしうる実験式を提示したものであ

る。金材研角田氏より、 ΔK_{th} を空気中で測定するのは材料定数として不満足ではないか、との問いがあつたに対して、太田氏は、一般に材料定数としてまず空気中のデータを設計等に用いるが、今後さらに雰囲気や変動荷重の影響も求めてさらに普遍的な定数と関係式を得たいと答えた。また、神鋼溝口氏より、平均応力が疲れき裂に及ぼす影響については ELBER がき裂開口との関係について機構的に説明しているが本実験式との関係如何との問いに対し、太田氏は ELBER の有効応力拡大係数比 U は本実験式の $1/(1-R)^2$ に対応するものとの考え方を寄せている。さらに前出布村氏の ΔK_{th} の材料定数としての存在に対する疑問に対して、太田氏は ΔK_{th} が有限な値として存在するとする意見を述べ文献として M. KLESNIL の Engg. Fract. Mechanic (1972) を紹介した。文献は、小林氏が補足して、き裂試験片を焼なまして疲れ試験を行ない求めた疲れ限度からの ΔK が ΔK_{th} に回帰することを示していると述べた。以上のように ΔK_{th} の意義についての所見は現在の処、必ずしも一致していない。なお今後の実験的立証が必要と思われる。

さらに討 14-4 「疲労き裂伝播式における材料定数 c と m との関係」が金材研田中氏により述べられた。これは 4 種の鋼についてき裂伝播式の定数 c 、 m の依存性などをしらべ、さらに $\Delta K=100$ 近辺で Elber 式の U はほぼ一定となつたことを推察している。小林氏は、小規模降伏条件の満足されていること、破壊機構が過程の中で変化しないことが式の定数の解決に重要であることをコメントした。このことは小林氏の後述、討 15-1 でも強調しているところである。田中氏は小規模降伏条件はほぼ充されていると考え、また、一方向破壊に近い破壊機構が COD 影響内のひずみが大になるに従い存在しうることを肯定した。

討 15 「疲労き裂伝播特性におよぼす、材料の強度および介在物の影響」の講演は川鉄技研成本氏により発表された。これは、軟鋼から 100 キロ鋼までの 7 鋼種について伝播式の定数 c 、 m と材料強度との相互関係を調べ、また、 $S=0.004\sim 0.025\%$ の影響を c 、 m と介在物、 ΔK_{th} との関係等について縦および厚みの方向について

明らかにしたもので、溶接部についても若干の実験結果を発表している。東工大小林氏は、重ねて、小規模降伏点条件を充しているか吟味を求め、低 ΔK レベルまでデータの範囲を広げて結論に導くことをコメントした。成本氏は、 $K \leq 100 \text{ kg/mm}^{3/2}$ では条件を充していると考える旨を述べ、求めによつて、硫化介在物のき裂伝播上の役割りとその伝播速度への効果を組織にもとづいて説明を加えた。新日鉄、石黒氏は伝播式の c についての介在物因子の検討を求め、また厚み方向の m 、 c が $S\%$ のみによつてきまるとは言えないと述べた。これに対し成本氏は検討の結果、有効介在物面積率 A が ΔK 依存性を示すため m が変化するので単純に c を標価できないが、 m をまず推定し、 c を算出し、 ΔK と A の関係から推定することが可能である旨の回答を寄せている。

さらに小林氏は討 15-1 として、「鋼の疲労き裂の伝播特性（組織、破壊機構および破壊力学解析結果の相関性について）」を述べ、これまでの討論をさらに敷衍説明した。各種鋼について応力比を変えた繰返し引張りの疲労試験を行ない、破壊力学の解析をフラクトグラフ観察に合致させて解釈した結果、 c 、 m 、 ΔK_{th} の相互関係の合理的な説明を計つており、組織敏感な伝播から不敏感な伝播挙動への遷移は、主として粒径などのマイクロ組織とき裂先端の塑性域寸法の相対的關係によつてきまるとしている。

最後に討 15-2 として、高温構造安全研組の藤村氏が「構造物の疲れ挙動と試験片試験との関連」と題して、大型構造物の疲れ損傷過程は試験片試験とは異なる挙動を示し、き裂の伝播過程について構造モデル討論による結果にもとづき破壊機構の異りに着目すべきこと、構造物の安全評価、設計への反映等の観点に立つた予備討論発表を行なつた。

本討論会は疲れき裂への冶金的要因に焦点を絞り主として金属材料学的側からの研究発表に対して、力学的観点からの熱心な討論および発表を引き出すことができ、このような学際的領域の今後の発展のため非常に有意義であつた。なおこの種の討論がさらに深化してゆくことが望まれる。