

称号及び氏名	博士（工学）北 浦 堅 一
学位授与の日付	平成 17 年 2 月 28 日
論 文 名	「構造用鋼材の衝撃疲労挙動および発熱による 疲労損傷評価に関する研究」
論文審査委員	主査 教授 岡田 博雄 副査 教授 谷川 義信 副査 教授 杉村 信広

論文要旨

船舶や海洋構造物は荒天時にスラミングやパンチング等によって繰返し衝撃荷重を受けやすく、また機械構造物の駆動部は非常に高速で稼動することが求められ、それらの部材には衝撃的な繰返し荷重が作用することが多い。このため繰返し衝撃荷重を受ける構造部材の疲労強度や変形破壊挙動を明らかにすることは重要である。しかしながら現時点においても、衝撃疲労の研究は通常疲労に比べて、試験方法や計測方法が確立されていないこともあって十分研究されているとは言い難い。

また、船体は荒天時に塑性変形を伴う繰返し衝撃荷重により損傷を受ける可能性があることから、これに対する基礎的検討として、鋼材が低サイクル衝撃引張荷重を受ける場合の残留ひずみ、亀裂進展および応力の変化などの衝撃引張疲労挙動や疲労寿命を明らかにするとともに、これに及ぼす試験片形状、平均応力、塑性ひずみ速度、静的応力および予ひずみなどの影響について検討を行うことは重要である。

さらに、実働荷重下における構造物や構造要素は、長期間にわたり不規則な外力を繰返し受ける。このようなランダム疲労過程を追跡し、疲労現象を解明することが非常に重要であることは論をまたない。この方面の基礎的研究の一環として、疲労過程において塑性仕事の一部が熱エネルギーに変換されることに注目し、引張圧縮を受ける場合の軟鋼材の温度上昇挙動を中心に鋼材の疲労過程を追跡するとともに、それらの温度上昇挙動より疲労損傷度の評価を行うことも重要である。

以上のような研究の背景とその意義を踏まえて、本研究前半部では、試験片に矩形波状の応力を作用させることのできる衝撃引張疲労試験機を製作し、これを用いて軟鋼材および高張力鋼より製作された平滑ならびに切欠きを有する試験片に対して、応力の大きさや

その持続時間を系統的に変化させた疲労試験を行い、その挙動を追跡している。これにより、試験片の残留ひずみ、亀裂進展および応力の変化などの衝撃引張疲労挙動を明らかにするとともに、低サイクル衝撃引張疲労寿命に及ぼす試験片形状、平均応力、塑性ひずみ速度、静的応力および予ひずみなどの影響について検討を行っている。

また、本研究後半部では、引張圧縮を受ける場合の定荷重疲労試験および多段多重疲労試験における軟鋼材の温度上昇挙動を中心に計測を行い、鋼材の疲労過程の追跡を試みている。さらに、それらの温度上昇挙動より疲労損傷度の評価を行うとともに、これを利用して多段多重疲労試験における最終段目の残存寿命推定法についても検討している。

本論文は、9つの章で構成されており、以下にその内容についての要約を述べる。

第1章では、本研究の背景とその意義および本研究の目的と内容の概要を述べている。

第2章では、試験片に矩形波状の応力を作用させることのできる落重式衝撃引張疲労試験機を用い、鋼材SS400材で製作された平滑ならびに環状切欠きを有する丸棒試験片(A)、(B)、(C)（応力集中係数 $K_t=1.0, 1.8$ および 5.7 ）に対して、応力の大きさや持続時間を系統的に変化させた疲労試験を行っている。この結果より、試験片の残留ひずみ、亀裂進展および応力の変化などの衝撃引張疲労挙動を明らかにするとともに、低サイクル衝撃引張疲労寿命に及ぼす応力持続時間、試験片の切欠き形状の影響等を次のように明らかにしている。

- ・平滑試験片(A)および応力集中係数が比較的小さい試験片(B)の変形破壊挙動については、断面収縮型破壊を示した。また、安定域での繰返し1回あたりの残留ひずみ進展量 $\Delta\varepsilon_c$ と安定域での応力範囲 $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ の関係を明らかにした。さらに、 $\Delta\varepsilon_c$ や応力範囲 $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ と疲労寿命 N_f の関係式を導いた。
- ・V型切欠き試験片(C)の場合の変形破壊挙動については、低寿命域の場合を除いて亀裂進展型破壊であった。この場合についても、応力範囲 $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ と疲労寿命 N_f との関係を求めた。

第3章では、板状試験片の衝撃引張疲労挙動に関する基礎資料を得るため、試験片に台形波状の応力を通過させることのできる落重式衝撃引張疲労試験機を用い、鋼材SS400で製作された平滑ならびに円弧状およびV型切欠きを有する平板試験片に対して応力を系統的に変化させた衝撃疲労試験を行っている。これらの結果より、板状試験片における残留ひずみ、亀裂進展および応力の変化などの衝撃引張疲労挙動を明らかにするとともに低サイクル衝撃引張疲労寿命の特徴を明らかにしている。

第4章では、試験片に衝撃引張圧縮応力を発生させることのできる衝撃疲労試験機を製作するとともに、これを用いて鋼材SS400で製作された平滑ならびに環状切欠きを有する丸棒試験片(A)、(B)、(C)（ $K_t=1.8, 2.4$ および 4.7 ）に対して応力の大きさや応力比を系統的に変化させた疲労試験を行い、疲労挙動ならびに疲労寿命を明らかにするとともに、こ

れらにおよぼす平均応力の影響について検討を行っている。得られた結果を要約すると次の通りである。

- ・平滑材の変形破壊挙動については、第 2 章の場合と同様に平均応力の存在にかかわらず断面収縮型破壊を示した。また、平均応力が存在する場合の安定域での繰返し 1 回あたりの残留ひずみ進展量 $\Delta\varepsilon_c$ と安定域での応力振幅 の関係を明らかにした。さらに、 $\Delta\varepsilon_c$ や応力振幅 と疲労寿命 N_f との関係式を導いた。
- ・応力集中係数 K_t が比較的小さいU型切欠き材の場合の変形破壊挙動については、平均応力が存在することにより低寿命域の場合を除いて亀裂進展型破壊であった。また、 K_t が比較的大きいV型切欠き材の場合はすべて亀裂進展型破壊を示した。この場合についても、応力振幅 と疲労寿命 N_f との関係を求めた。
- ・また、疲労挙動に及ぼす平均応力の影響を考察し、衝撃疲労強度と平均応力の関係式を導いた。さらに、通常疲労試験も併せて実施し、衝撃疲労挙動との相違点についても比較考察を行った。

第 5 章では、繰返し衝撃荷重を受ける構造物や部材の強度設計においては、ひずみ速度依存性を考慮した変形挙動の解明も重要な問題であるので、鋼材SS400 の他にS25CおよびS45C材についても落重式衝撃引張疲労試験を行い、その挙動を追跡し、それらの結果より、

繰返し衝撃下での塑性ひずみ速度 $\dot{\Delta\varepsilon}_c$ ($\Delta\varepsilon_c$ を最大応力持続時間で割った値)、残留ひずみ進展および破断ひずみ等の衝撃疲労挙動を明らかにしている。また、低サイクル衝撃引張疲労寿命に及ぼす塑性ひずみ速度の影響を明らかにしている。

第 6 章では、構造部材に異常外力が作用した後少ない繰返しで破損する場合を想定して、静的応力や予ひずみが低サイクル衝撃疲労強度に及ぼす影響を調べるため、市販の鋼材SS400、S25C および S45C 材を用いて作製された試験片に数種の静的応力や予ひずみを与え、繰返し衝撃荷重下での変形挙動や低サイクル衝撃疲労強度を実験的に明らかにしている。また、これらの実験結果を基に破断延性や静的強度と低サイクル衝撃疲労破壊の関連性についても若干の考察を行っている。

第 7 章では、船舶・海洋構造物の構造部材としては、高張力鋼が多く用いられていることから、市販の高張力鋼材より作製された平滑および切欠き試験片の低サイクル域および高サイクル域での衝撃引張疲労挙動について実験的に検討を行っている。また、これらの結果より、衝撃応力変動、残留ひずみ進展および破断ひずみなどの衝撃疲労挙動および寿命の関係について軟鋼材との類似点および相違点を明らかにしている。

第 8 章では、疲労過程において塑性仕事の一部分が熱エネルギーに変換されることに注目

し、まず、定荷重疲労試験を実施し、繰返し過程における応力振幅、塑性ひずみ幅の変化とともに温度上昇挙動の計測を行い、疲労過程の追跡を試みている。次に、3段3重疲労試験を実施し、同様の計測を行い、これらの諸量を用いて疲労損傷評価を行っている。最後に、以上で得られた温度挙動やヒステリシス・エネルギーを考慮した場合の残存寿命推定法について検討している。得られた結果を要約すると次の通りである。

- ・定荷重疲労試験における温度上昇率 ΔT と繰返し数比 n/N_f の関係式を導いた。また、温度上昇率 ΔT をヒステリシス・エネルギー W_p で割った単位ヒステリシス・エネルギー当りの温度上昇率 $\Delta T/W_p$ の関係式を導いている。
- ・上述の定荷重疲労試験結果に基づいて3段3重疲労試験を行い、3段目の応力振幅での温度上昇率 ΔT および単位ヒステリシス・エネルギーあたりの温度上昇率 $\Delta T/W_p$ を計測した。また、これらの値と定荷重試験結果とを組み合わせることで3段目開始までの累積損傷量 D を推定した。さらに、線形累積損傷則を用いて、3段目における残存寿命推定式を導いた。
- ・3段目における残存寿命の実験結果との比較を行い、両推定式とも比較的对応がよいことを確かめた。また、平面曲げを受ける場合の2段2重疲労試験についても別途検討を行い、本推定式の妥当性を確かめた。

第9章では、本研究で得られた主な成果を要約している。

審査結果の要旨

本論文は、繰返し衝撃荷重を受ける場合の構造用鋼材の疲労強度や変形破壊挙動および鋼材の繰返し引張圧縮疲労過程における発熱現象とそれを用いた疲労損傷評価について実験を中心とした検討を行った結果をまとめたものであり、次のような成果を得ている。

- 1) 構造用鋼材の低サイクル衝撃引張疲労挙動を調べるため、落重式衝撃引張疲労試験機を製作するとともに、これを用いて軟鋼材で製作された平滑ならびに環状切欠きを有する丸棒試験片に対して、応力の大きさや持続時間を系統的に変化させた低サイクル衝撃引張疲労試験を行っている。この結果より、残留ひずみや亀裂進展などの衝撃引張疲労挙動や疲労寿命を明らかにしている。また、板状試験片についても同様の検討を行い、丸棒試験片の場合の結果との類似点および相違点を明らかにしている。
- 2) 試験片に衝撃引張圧縮応力を発生させることのできる衝撃疲労試験機を製作するとともに、これを用いて応力の大きさや応力比を系統的に変化させた低サイクル衝撃疲労試験を行い、変形破壊挙動ならびに疲労寿命に及ぼす平均応力の影響を明らかにしている。
- 3) 構造部材に異常外力が作用した後、少ない繰返しで破損する場合等を考慮して、低サイクル衝撃疲労挙動ならびに疲労寿命に及ぼす塑性ひずみ速度および静的応力や予ひずみの存在の影響を実験的に明らかにしている。
- 4) 高張力鋼材に対しても低サイクル域および高サイクル域での衝撃引張疲労挙動について実験的に検討を行い、これらの結果より、衝撃疲労挙動および寿命について軟鋼材との類似点および相違点を明らかにしている。
- 5) 鋼材の疲労過程における発熱現象に着目し、定荷重疲労試験および3段3重疲労試験を実施し、繰返し引張圧縮疲労過程における塑性ひずみ幅の変化とともに温度上昇挙動の計測を行い、これらの結果を用いて疲労損傷評価を行っている。また、以上で得られた温度挙動やヒステリシス・エネルギーを考慮した場合の残存寿命推定法について検討している。

以上の諸成果は、構造用鋼材の衝撃疲労挙動および発熱による疲労損傷評価についての実験を中心とした知見を加えたものであり、この分野の研究の進展に大いに寄与している。また、自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。

3. 審査委員会の所見

審査委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。