

氏 名	工 藤 裕 之
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 61 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 資源工学専攻
学 位 論 文 題 目	封圧下において繰り返し圧縮荷重をうける岩石の力学的挙動に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 小林 良二
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 川島 俊夫 東北大学教授 八嶋 三郎 東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 佐武 正雄 東北大学教授 高橋 秀明

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

長期の安全性を考慮して基礎岩盤の設計を行うためには、対象となる基礎岩盤のクリープ、繰り返し疲労特性などの時間依存的変形挙動や、さらには、クリープ限度や疲れ限度などの長期強度を求めておくことが必要である。しかし、岩石の繰り返し疲労試験は、クリープ試験に比べてこれまであまり行われていないのが現状である。

これに対し、昨今建設されている本州四国連絡橋や工場等を見るとスパン長の増大、往復内燃機関等の機械類の大型化が目立ち、これに伴って基礎岩盤に加わる振動荷重もますます大きくなっていく。また、今日、狭い国土の各地で建設が進むにつれて、いわゆる軟岩と呼ばれる一軸圧縮強度が約 100 kg/cm^2 以下の岩石から成る岩盤も基礎岩盤とせざるを得ない状況が生じている。また、長大スパン橋梁の橋台下にある基礎岩盤の中には、水中に位置して水圧を受けているものもある。

このような振動荷重の増加、対象となる基礎岩盤強度の低下により、軟岩を含む岩石の繰り返し疲労特性を調べることがますます重要になってきていると考えられる。

岩石の繰り返し疲労特性についてのこれまでの研究の多くは大気圧下で行われ、封圧下での研究は極めて少ない。さらに、封圧及び間隙水圧の両圧力の影響を検討したものはほとんど見られない

のが現状である。また、疲れ限度に至っては、通常の岩石に対して大気圧下で求められているのみである。

本研究では、軟岩を含む2種の岩石試料に対して、封圧及び間隙水圧の両圧力のもとで片振り圧縮の繰り返し疲労試験(1 Hz, 正弦波, 最大繰り返し数 10^6 回)を行い、特に疲れ限度や下限軸ひずみ、すなわちこれは除荷時の軸ひずみで非弾性ひずみに相当するが、これらに注目して、有効封圧が繰り返し疲労特性に及ぼす影響について検討した。さらに、従来、あまり考慮されていなかった下限軸ひずみを用いて繰り返し疲労特性を整理し直し、岩石の繰り返し疲労過程に関するモデルを提案して実験結果との比較・検討を行った。

第2章 岩石試料の物理的及び力学的性質

本研究では、岩石試料として、岩石力学の分野で標準的に用いられている来待砂岩とともに軟岩試料として広野砂質泥岩を用いたが、本章では、これらの岩石の物理的性質と自然及び飽和含水状態で行った三軸圧縮試験結果について述べている。なお、不飽和含水状態に相当する自然含水状態は非排水条件で、また飽和含水状態は排水条件で行われた。

両含水状態の広野砂質泥岩の一軸圧縮強度は、自然含水状態来待砂岩の一軸圧縮強度の約10%であることなどから、広野砂質泥岩は骨格構造が弱く多孔質であり、また、透水試験から、透水係数も高いことが示された。

また、両岩石の破壊挙動を体積ひずみに注目して比較すると、来待砂岩の破壊挙動は、通常の岩石に見られるような膨張挙動が主であるのに対し、広野砂質泥岩の場合は、空隙の収縮によると考えられる収縮挙動が主である。この収縮挙動は封圧の増加とともに著しくなることが明らかになった。

この結果、広野砂質泥岩の非排水条件の繰り返し疲労試験では過剰間隙水圧が発生する可能性が予測された。それゆえ、岩石の疲れ限度や繰り返し疲労特性に及ぼす有効封圧の影響を正しく把握するためには、繰り返し疲労試験においても体積ひずみを測定することが重要であると結論づけられた。

第3章 試験装置

岩石の繰り返し疲労試験において、封圧や間隙水圧を一定に保持し、かつ試験中に体積ひずみを測定するために克服する必要がある問題点は以下のようなものである。

- ① 従来の試験装置では、軸圧用ピストンが圧力釜内部に出入りする際に、封圧が変動する。
- ② 試験片への载荷-除荷や破壊挙動に伴って試験片体積が変動し、その結果、封圧及び間隙水圧が変動する。
- ③ 抵抗線ひずみゲージを湿った試験片表面に貼ることができないため、繰り返し疲労試験中の急速な体積変化を測定することが難しい。

本研究では、①の問題点を解決するために、試験装置をBredthauer型とし、軸圧用ピストンと連動する同径の圧力調整用ピストンを備え付けた。また、②の問題点については、増圧器とガスボ

ンベを備え付け、ガス圧が体積変化に鈍感であることを利用した。さらに、③については、抵抗線ひずみゲージ式カンチレバー型変位計を製作して横変位の測定を行った。

予備試験の結果、封圧は±2.5%以内で一定に保たれ、また、間隙水圧もほぼ一定であることが確認された。また、カンチレバー型変位計も、0.44mmの変位を与えて24時間放置しておいても約0.04%の変動を生じたのみであった。

従って、試作した試験装置は、一定の封圧及び間隙水圧における繰り返し疲労試験に使用できると判断された。

第4章 封圧下における自然含水状態岩石試料の繰り返し疲労特性

本章では、地下水面上にある岩盤を想定して、自然含水状態（不飽和含水状態）の試験片に対して封圧下・非排水条件における繰り返し疲労試験を行い、繰り返し疲労特性を調べた。

上限軸ひずみの繰り返し数当りの増分である上限軸ひずみ増加率と繰り返し数の関係をみると、これまでの研究と同様、両対数グラフ上で、繰り返し数とともに上限軸ひずみ増加率がほぼ直線的に減少する段階と上限軸ひずみ増加率が最小となった後、繰り返し数とともに上限軸ひずみ増加率が反転して増加し、破壊に至る、いわゆる3次段階に分かれるが、上限軸ひずみ増加率のかわりに、これまでほとんど注目されなかった下限軸ひずみ増加率についてみても同様の関係が成り立つことを確かめた。また、繰り返し疲労の3次段階についても、上限または下限軸ひずみ増加率と破壊までの残存繰り返し数との関係でみると、両対数グラフ上でほぼ直線関係にあることが認められた。これは、第5章で述べる飽和含水状態の繰り返し疲労試験でも同様であった。

疲れ限度についてみると、10⁶回の繰り返し数の範囲内において、来待砂岩には疲れ限度が見られ、また、その疲れ限度は封圧の増加とともに大きくなるのに対して、広野砂質泥岩については、最大封圧10kg/cm²の範囲内では、疲れ限度を認めることができず、むしろ、繰り返し疲労寿命の増加に対する封圧の効果が、封圧の増加とともに小さくなる傾向が認められた。

体積ひずみの挙動については、来待砂岩が膨張挙動であったのに対し、広野砂質泥岩では、収縮挙動を示し、収縮量が封圧とともに増加することがわかった。この結果、広野砂質泥岩では、最大封圧10kg/cm²で、過剰間隙水圧が発生する可能性が示された。

これらのことから、特に非排水条件下の広野砂質泥岩に疲れ限度が現れない理由として以下のことが考えられた。すなわち、低封圧下で疲れ限度が現れないのは、広野砂質泥岩自体の骨格構造が弱いためであると考えられ、疲れ限度が現れるには、より大きな繰り返し数が必要であると推察された。一方、高封圧下では、体積収縮に伴って過剰間隙水圧が発生するために、疲れ限度が現れないものと考えられた。また、封圧とともに疲労寿命に及ぼす封圧の効果が小さくなる原因としても、封圧とともに過剰間隙水圧が増加するためであろうと考えられた。

第5章 封圧下における飽和含水状態岩石試料の繰り返し疲労特性

本章では、地下水面下に位置する岩盤を想定して、飽和含水状態岩石試験片に対して封圧及び間隙水圧の両圧力を一定にした状態で繰り返し疲労試験を行った。なお、封圧は第4章での最大封圧

として、来待砂岩では 40 kg/cm^2 、広野砂質泥岩では 10 kg/cm^2 と設定して、間隙水圧の影響について検討を行った。

その結果、本条件下では、両岩石で疲れ限度が認められ、間隙水圧の低下とともに疲れ限度が大きくなることが明らかになった。

このことから、広野砂質泥岩のような軟岩においても、過剰間隙水圧の発生を抑制すれば、疲れ限度が存在することが示された。

また、第4章と本章の結果を有効封圧についてまとめると、有効封圧が大きいほど疲れ限度が大きくなり、また、疲れ限度が大きくなるほど応力低下とともに急速に疲れ限度に収束する傾向があることが示された。

第6章 繰り返し疲労破壊過程に関する考察

本章では、第4章、第5章で求めた繰り返し疲労試験の結果を下限軸ひずみと下限軸ひずみ増加率に注目して整理するとともに、新たに繰り返し疲労試験に準じた条件で定ひずみ速度の載荷一除荷試験を行い、主応力差-永久軸ひずみ（繰り返し疲労試験の下限軸ひずみに相当する）曲線、以下、 $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線と呼ぶ、を求めて繰り返し疲労試験結果と比較・検討を行い、さらに、これらの結果から、繰り返し疲労過程に関するモデルを提案して検討した。

繰り返し疲労過程と $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線を比較した結果、まず第1に、繰り返し疲労過程における3次段階開始点（下限軸ひずみ増加率が最小となる点）の下限軸ひずみと $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線の最大強度到達点における永久軸ひずみとがほぼ一致すること、及び繰り返し疲労試験における破壊点が、ばらつきながらも、 $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線のネガティブスロープ上にあることが明らかになった。これらのことから、試験片内部で生じた損傷の累積量を表わすと考えられる下限軸ひずみ（永久軸ひずみ）を介して、繰り返し疲労過程を $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線と関連づけるモデルを提案した。すなわち、試料が最大主応力差 σ_m で繰り返し疲労を受ける場合、試料に生じた下限軸ひずみ（永久軸ひずみ）に対応する一種の耐力を表わすと考えられる $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線から求められる主応力差 σ_D と繰り返し疲労における最大主応力差 σ_m の差（ $\sigma_D - \sigma_m$ ）に応じて疲労過程が進行すると仮定した。このように考えることによって、繰り返し疲労過程で生じた下限軸ひずみに対応する $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線上の主応力差 σ_D が下限軸ひずみ（永久軸ひずみ）とともに増加する繰り返し疲労の初期段階では、 σ_D と σ_m との差が増加するために下限軸ひずみ増加率が減少し、逆に、繰り返し疲労過程の後期になって、下限軸ひずみとともに $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線上の主応力差 σ_D が減少する段階にまで達すると、 σ_D と σ_m との差が小さくなるので、下限軸ひずみ増加率も増加に転じるという繰り返し疲労過程の基本的性質が説明された。この場合、繰り返し疲労過程の3次段階開始点は、下限軸ひずみが $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線のピークに達したために生じ、また、繰り返し疲労における破壊は、下限軸ひずみが $\sigma_D - \epsilon_p$ 曲線のネガティブスロープに達したために起ると考えられる。

以上の考え方を定量的にも検討するために、繰り返し疲労過程における下限軸ひずみ増加率の $\sigma_D - \sigma_m$ に対する依存性を調べたところ、大きなばらつきは認められるものの、 σ_m が疲れ限度付近やそれ以下の場合を除けば、繰り返し疲労過程における下限軸ひずみ増加率が、 σ_D によらず、基本

的に $\sigma_D - \sigma_m$ に依存していることが確認された。

一方、疲れ限度付近やそれ以下の σ_m の場合には、Goodman が提案しているターミナルローカスの考え方で定性的に説明できることが示された。

また、本章では、主応力差-体積ひずみ関係のヒステリシスループの挙動も調べた。その結果、ヒステリシスループのパターンが含水状態や排水条件によって変化すること、また、排水条件では、空隙を満たした水が空隙の収縮を防ぐ働きをすることなどが明らかとなった。

第 7 章 結 論

本章は、結論であり、第 2 章から第 6 章までの主要な結果を要約したものである。

審査結果の要旨

長期の安全性を考慮して基礎岩盤を設計するためには、対象となる岩盤の時間依存的変形挙動や長期強度を明らかにすることが必要不可欠である。しかし、既往の研究の多くはクリープ特性に関するものであり、基礎岩盤に加わる封圧や間隙水圧の影響を考慮した岩石の繰り返し疲労特性に関する研究は極めて少ないのが現状である。

本論文は、軟岩を含む2種の岩石試料に対して、片振り圧縮の繰り返し疲労試験を行い、疲れ限度など岩石の繰り返し疲労特性におよぼす封圧と間隙水圧の影響を明らかにし、さらに、岩石の繰り返し疲労過程に関するモデルを提案して実験結果と比較・検討した研究成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、本研究で用いた砂岩と砂質泥岩試料の物理的および力学的性質について述べている。

第3章では、本研究で用いた試験装置の性能が試験条件を長期的に十分維持できるものであることを確かめている。

第4章では、自然含水状態の試料に対して封圧下における繰り返し疲労試験を行っている。その結果、砂岩試料では封圧とともに疲れ限度が大きくなるのに対して、軟岩である砂質泥岩では本研究の範囲内では疲れ限度が認められず、むしろ、封圧とともに繰り返し疲労寿命の増加におよぼす封圧の効果が減少することなどを明らかにしている。これは、基礎岩盤の設計上有用な成果である。

第5章では、一定封圧下にある飽和含水状態の試料の繰り返し疲労特性におよぼす間隙水圧の効果について、封圧と間隙水圧が一定の試験の場合には、両岩石試料とも与える間隙水圧の減少とともに疲れ限度が大きくなることなどを確かめている。

第6章では、一定ひずみ速度の載荷－除荷試験で得られた主応力差－永久ひずみ曲線($\sigma_D \sim \epsilon_p$ 曲線)と繰り返し疲労過程における下限軸ひずみとを対比・検討している。岩石の繰り返し疲労過程が、生じた下限軸ひずみに対応する $\sigma_D \sim \epsilon_p$ 曲線の主応力差と負荷応力の差に依存して進行するというモデル提案し、かつ、この考え方が実験結果をよく説明できることを確かめている。これは、岩石の繰り返し疲労過程を理解する上で優れた成果といえる。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、軟岩を含めた岩石の圧縮応力下における繰り返し疲労特性について、封圧と間隙水圧の影響に関する重要な知見を得るとともに、岩石の繰り返し疲労過程を説明し得るモデルを提案し、かつ、これを実証したもので、資源工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。