

図・本館

報告番号

※甲第 1268号

主論文の要旨

題名 損傷を伴う有限クリープ変形
に対する構成式とその応用

氏名 大野信忠

主論文の要旨

報告番号

※甲第1268号

氏名

大野 信 忠

最近のエネルギー工学あるいは動力工学では、極めて高度の安全性が要求されるので、材料の使用温度の上昇と相まって、材料の高温変形挙動ならびに破壊に対する考慮が重要になり、精密な非弾性解析が要求されている。すなわち、高温では弾性変形、塑性変形のほかに、一定荷重について時間とともに進行するクリープ変形が顕著となるから、高温用構造要素は、クリープひずみが過大となってその機能を損なったり、材料の劣化（損傷）、クリープ座屈などによって破壊することがある。したがって、その設計に際しては、適当なクリープ変形解析に基づいて、応力および変形状態あるいは上述の破壊の条件を検討しておかなければならない。

高温用構造要素には、複雑な荷重が作用するから複雑な組合せ応力状態が現れるばかりでなく、一般にその応力状態は時間とともに変化する。したがって、上で述べたクリープ変形解析で用いられる構成式には、一般に非定常かつ多軸状態でのクリープ変形を十分な精度で記述することが要求される。しかし、従来のクリープ構成式のほとんどは、荷重一定の単軸クリープ変形に対して形式化された理論であって、このような条件を満足しないことが知られている。

例えば、現在最も普及しているクリープ構成式の一つである、古典ひずみ硬化理論による構成式では、各瞬間のクリープひずみ速度がその瞬間に作用する応力の大きさと、それまでに生じた全クリープひずみ量だけによって定まり、それ以外の変形履歴には依存しないと仮定されている。しかし、この構成式では、クリープ変形で生じる加工硬化の主な微視的機構の一つである、転位の障害物への異方的たい積を表現できないから、この理論は必ずし

主 論 文 の 要 旨

報告番号	※甲第	号	氏名
------	-----	---	----

も妥当ではなく、例えば応力の符号反転後に変形異方性の効果として生じる大きなクリープひずみを表し得ない。

同様な問題は、クリープ損傷の構成式においても見られる。クリープ損傷の微視的原因である空どうや微視的き裂は、各瞬間の応力状態に対応して、特定の方向の面上に多く発達することが知られている。したがって、多軸状態でのクリープ損傷を表現する変数は、一般にこのような方向性のある量でなければならない。ところが、Kachanov、Rabotnov、Hayhurstらの多軸クリープ損傷理論は、損傷の等方性を仮定して、その効果をスカラー変数によって表したのか、あるいは応力の主軸が物質要素に固定された場合に異方性を表現したものにすぎない。また、KachanovおよびHayhurst-Storåkersは、物質内の各点に対して、その点を通るすべての面に損傷変数を割り当てる理論を提案しているが、その損傷変数は数学的性質が不明確である。

以上の問題点は、主に転位の異方的たい積あるいは微視的空げきの生成と成長という微視的構造変化が、材料の変形に及ぼす影響に関連している。クリープ変形には、このほか転位の増殖と消滅、転位の上昇運動、セルの形成、亜粒界の形成などの微視的変化が影響する。したがって、上述の問題を解決するためには、このような微視的構造変化の効果を構成式に反映しなければならない。これが可能な一つの方法として、影響が顕著な微視的構造変化を適当な力学変数（内部状態変数）で表すことによって、非弾性ひずみ速度に対する状態式の存在を仮定する内部状態変数理論がある。

クリープひずみ速度が次第に減少して一定値に至る第1期および第2期クリープ変形に対しては、転位密度、背面応力、抗応力

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名
------	-----	---	----

などを内部状態変数として選択したいくつかの理論が発表されているが、必ずしも完全なものではない。一方、クリープひずみ速度が一定値から次第に増加し破断に至る第3期クリープ変形に対しては、その構成式を内部状態変数理論によって形式化した理論は数少ない。しかし、第3期クリープ変形は、一般に微視的明けきの生成と成長という微視的構造変化を伴うから、内部状態変数理論によってその構成式を形式化するのは、有効な方法であると考えられる。

さらに、高温高応力のもとでの第3期クリープ変形においては、クリープひずみが著しく大きくなり、形状変化の効果が無視できなくなる。したがって、このような変形過程の一般的な解析は有限変形理論によらなければならないが、有限クリープ変形過程に対する構成式は十分に確立されておらず、またこれによりクリープ問題を解析した例は見当たらない。

本論文では、従来の理論では考慮されていない損傷の方向性を表現するために、クリープ損傷に対する2階対称の損傷テンソルの妥当性を検討した。つづいて、内部状態変数として、ひずみ硬化係数とこのような損傷テンソルを選択し、損傷を伴う有限クリープ変形の構成式を、厳密な有限変形理論に基づいて形式化した。このクリープ過程は構造要素が破断に至る過程であり、工学的にも重要であるから、その変形過程と限界時間に対する損傷および形状変化の効果を明らかにすることは、高温用構造要素のクリープ設計に対して多くの知見を与える。したがって、上述の構成式の応用例として二、三の問題を解析し、このような効果について議論した。なお、前で述べた異方的ひずみ硬化を表すためには、ひずみ硬化係数はあるテンソル量でなければならないが、ここで

報告番号	※甲第	号	氏名
------	-----	---	----

の議論は異方性を損傷によるそれに限り、ひずみ硬化係数はスカラーとして規定した。

2章では、有限クリープ変形の構成式を形式化するための準備として、材料が初期等方である場合に対して、その微小弾性-有限非弾性変形の運動学的関係式と内部状態変数理論による一般的構成式を、有限弾性-有限非弾性変形の場合の対応する関係式から導いた。

3章では最初に、2章に述べた内部状態変数がスカラーのひずみ硬化係数だけからなる場合に、Prager-Druckerのクリープ・ポテンシャルを仮定して、偏差応力テンソルの第3不変量を考慮した第1期および第2期の有限クリープ変形の構成式を導いた。

一方、第3期クリープ変形では、主要な微視的構造変化として、一般にある方向性を持って生成および成長する微視的空けきが観察される。そこで、この方向性を考慮して微視的空けきの効果を内部状態変数によって表すために、それを2階のき裂密度テンソルで表現することの妥当性を検討した。この結果、クリープ損傷の主要な微視的構造変化であるw形き裂とr形空どうに対しても、その妥当性が認められた。クリープ損傷の機構の複雑さを考慮して、このような損傷テンソルを一般の2階対称テンソルと見なし、クリープひずみ速度テンソルおよび損傷速度テンソルを、Cauchyの応力テンソル、損傷テンソル、ひずみ硬化係数および温度の関数として表現した。次に、この構成式を具体化するために、各種の空けきの存在による応力効果の拡大を表す実質応力テンソルを定義した。応力効果の拡大の機構として、応力を支える実質面積の減少だけを考えると、クリープ速度と損傷速度は実質応力、ひずみ硬化係数、温度の関数として表し得る。しかし、一般には

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名
<p>き裂縁での応力集中による応力効果の拡大があるから、それらはさらに損傷状態にも依存すると考えられる。このようにして書き直した構成式の具体例を、従来の実験結果を参考にして示した。この際、損傷速度テンソルに対する構成式では、応力規準として最大引張り主応力と八面体せん断応力の線形結合を、また損傷の方向性としては損傷の等方性、および損傷が最大引張り主方向に垂直な面上にだけ発達する異方性を仮定した。</p>			
<p>この理論は、従来理論を特別な場合として含み、しかも一般の多軸状態に対しても十分な妥当性を持つ。したがって本理論を用いれば、従来理論では不十分であった、任意の荷重あるいは変形履歴を受ける構造要素のクリープ損傷解析が可能となる。</p>			
<p>以上で導かれた構成式の応用として、4～6章では内圧厚肉円筒および複合負荷を受ける薄肉円筒のクリープ変形を解析し、形状変化と損傷の各効果、これらの連成効果および損傷のテンソル的特性について議論した。</p>			
<p>まず、内圧厚肉円筒の有限定常クリープ変形に対する解析結果によると、形状変化の効果は、物理学的非線形性（構成式の非線形性）によって拡大されることがわかった。すなわち、同一内圧に対してNortonのクリープ指数の大きい材料ほど、クリープひずみ速度が無限大となる限界時間は小さくなる。また、本解析の結果は平・大谷の実験結果と変位に関してかなりの精度で一致し、厳密な有限変形理論に基づいて3章の最初で導いた構成式の妥当性が確められた。これに関連し、偏差応力テンソルの第3不変量の効果を無視すると内圧厚肉円筒の限界時間を危険側に見積り、その効果もまた精密なクリープ解析においては無視し得ないことがわかった。</p>			

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名
------	-----	---	----

次に、損傷と形状変化の両者を考慮して内圧厚肉円筒を解析した結果は、内圧が小さくなると形状変化を無視し損傷だけを考慮した結果に、逆の場合には形状変化だけを考慮した結果に漸近した。このことは、構造要素の第3期クリープ変形に影響を及ぼす因子としての、形状変化と損傷の各効果の相対的重要性は、それに作用する荷重の大小に依存することを意味する。また、形状変化と損傷の連成効果は無視すると、限界時間を最大2倍程度大きく見積り、この効果もまた精密なクリープ解析では無視できない。

最後に、組合せ負荷を受ける薄肉円筒の解析では、損傷法則の違いによる影響および損傷のテンソル的特性について検討した。この結果、限界時間は損傷法則の応力規準に大きく依存し、また損傷の方向性による影響も無視し得ないことがわかった。したがって、高温用構造要素の限界時間の見積りでは、使用材料に対する損傷規準の吟味が重要であり、今後それに関するさらに詳細な研究が行われなければならない。次に、損傷のテンソル的特性は、ひずみ経路が最大主応力の方向へずれる形で現れることがわかった。このような現象は、損傷の方向性の有無を実験的に検討する際の一つの目安となる。