

報告番号 甲 第 1839号

# 主論文の要旨

題名 非比例繰返し負荷に対する塑性構成式の  
定式化に関する研究

氏名 大岡 昌博

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

大岡昌博

現在の非弾性構造解析は、大型計算機の発達に伴い、有限要素法等の数値解析によって行われるのが一般的である。このとき、その解析精度に最も大きな影響を与えるのは構造材料の力学的特性を記述する構成式の適否であり、このため、非弾性構造解析用プログラムに組込むのに最適な非弾性構成式の開発に対する要請が高まっている。

このような非弾性解析の最も重要な対象の一つに、繰返し負荷条件下での構造要素の塑性変形が挙げられる。この問題は、低サイクル疲労に関する寿命予測、破壊の開始条件の算定などに直接関連し、その解析精度は対象とする機器・構造物の信頼性に重大な影響を及ぼす。しかし、構造要素に応力あるいはひずみの各成分が非比例的に繰返し作用する場合の塑性変形挙動は単純繰返し負荷の場合に比べて著しく複雑であって、従来の塑性構成式では、定性的にさえも表現することはできない。このため、非比例繰返し負荷に対する塑性構成式の定式化は、先端工学分野の機器・構造物の設計精度を高める上で、現在最も注目を集めている課題の一つとなっている。本研究は、このような非比例繰返し負荷の下での変形挙動を記述できる新しい非弾性構造解析用塑性構成式を、系統的な実験に基づいて定式化したものである。

本論文は8章からなる。まず、第1章は緒論であり、本研究の背景、すなわちこのような研究の必要性並びに従来の研究の概要を述べるとともに、新しい構成式を定式化するための方法を検討した。その結果、このような構成式を定式化する最も有力な方法の一つは、まず、塑性ひずみ制御に基づく系統的な比例及び非比例繰返し負荷実験によって次の三つの課題、すなわち、

(I) 繰返し塑性ひずみ経路の形状及び形状履歴への繰返し硬化の依存性、

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

大岡昌博

(Ⅱ) 繰返し塑性ひずみ経路の振幅及び振幅履歴への繰返し硬化の依存性、

(Ⅲ) 異なる繰返し塑性ひずみ経路間における繰返し硬化の等価性、

を明らかにし、これに基づき比例及び非比例繰返し負荷の下での微視的変形機構を反映する新しい内部状態変数とその発展式を定式化するとともに、それらを最新の塑性流れ理論に組込む方法であることを指摘した。

第2章では、最初に、本論文で一貫して使用する偏差応力と塑性ひずみの便利な表示法について説明した。次に前述の課題(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)を明らかにするために行った各種の実験に共通する条件、すなわち試験片供試材(316ステンレス鋼)、試験片、実験装置、合理的な繰返し負荷実験を行う目的で開発した塑性ひずみ制御の実験システム、実験方法などについて述べた。さらに、実験精度と材料の基本的性質を明らかにするとともに、実験結果を合理的に評価するための応力振幅の定義についても検討した。

第3章では、前述の課題(Ⅰ)、すなわち繰返し塑性ひずみ経路の形状及び形状履歴への繰返し硬化の依存性を明らかにする目的から、7種類の基本的塑性ひずみ経路を選び、各経路に沿う繰返し負荷実験を順次行った。その結果、処女材に対する繰返し硬化は、比例、十字、八方向放射状、正方形経路の順で大きくなり、円形経路の場合に最大になることがわかった。これから、非比例繰返し負荷の下での硬化の主要な機構の一つは、塑性ひずみベクトルと塑性ひずみ速度ベクトルとの間の非共線性の継続にあることを指摘した。また、種々の先行履歴のうちに、円形サイクル試験を行った場合には、繰返し硬化が十分飽和した段階での応力振幅値がすべての試験で一致した。このような傾向は、十字サイクル試験の場合にも認められた。このことから、種々の比例及び非比例繰返し負荷の下で形

# 主 論 文 の 要 旨

報告番号

※ 甲 第

号

氏 名

大 岡 昌 博

成される転位構造は、それよりも大きな繰返し硬化を示す後続サイクルによって破壊され、後続サイクルに固有の新しい構造に作りかえられる傾向にあることがわかった。

第4章では、前述の課題(Ⅱ)、すなわち繰返し塑性ひずみ経路の振幅及び振幅履歴への繰返し硬化の依存性を検討した。このため、前章で検討した7種類の繰返し塑性ひずみ経路のうち、代表的な単純ねじり、十字及び円形経路を選び、これらの振幅を順次変動させる実験を行った。その結果、単純ねじりサイクルの実験において、小さな振幅の先行サイクルは、後続の大きな振幅のサイクルに対する繰返し硬化の飽和値に影響を及ぼさないこと、他方、大きな振幅のサイクルののちに小さな振幅のサイクルを与えた場合には、繰返し硬化の回復を生ずることがわかった。これらの事実から、塑性ひずみ空間内には、任意の比例負荷によって等方硬化を生じない領域が存在することを指摘した。また、これと同じ現象は、十字サイクル及び円形サイクルにおいても観察された。特に、前述の第2章の結果とこの実験事実とを総合して考えれば、繰返し硬化の飽和段階においては、円形経路の内部は任意の比例及び非比例負荷によって等方硬化を生じない領域であると考えることができる。最後に、繰返し硬化の回復挙動を検討した結果、単純ねじりと十字サイクルの場合には、先行サイクルによる繰返し硬化は、後続の小さな振幅のサイクルによって、処女材に後続サイクルを直接与えた場合の水準にまで完全に回復すること、これに対し円形サイクルの場合には、後続サイクルによる繰返し硬化の飽和値は処女材に対する値まで回復せず、先行繰返し履歴の若干の残留が認められることが明らかとなった。

第5章では、最後の課題(Ⅲ)、すなわち異なる繰返し塑性ひずみ経路間にお

# 主 論 文 の 要 旨

報告番号

※ 甲 第

号

氏 名

大 岡 昌 博

ける繰返し硬化の等価性を検討するため、繰返し硬化の飽和段階での応力振幅値が等しい種々の繰返し塑性ひずみ経路のサイクルを順次与える実験を行ない、後続サイクルでの応力振幅値が先行サイクルでのそれに等しいか否かを調べた。その結果、いずれの条件下でも、後続サイクルでの応力振幅は先行サイクルでのそれと大きくは異ならず、繰返し硬化の等価性を仮定しても大きな誤差は生じないことが明らかとなった。

第6章では、これまでの実験的検討から得られた知見に基づき、本研究の主題である繰返し塑性構成式を定式化した。まず、以上の事実に基づいて、

(1) 非比例繰返し負荷の下での硬化は、塑性ひずみと塑性ひずみ速度ベクトルとの間の非共線性の継続によって生ずる、

(2) 塑性ひずみ空間内には、任意の比例負荷によって等方硬化を生じない超球領域（比例非硬化領域と呼ぶ）が、存在する、

(3) 塑性ひずみ空間内には、あらゆる比例及び非比例負荷によって等方硬化を生じない超球領域（完全非硬化領域と呼ぶ）が、存在する、

(4) 飽和段階での繰返し硬化の大きさは、経路の形状及び振幅にかかわらず、一つのスカラ等方硬化変数によって記述できる、

と仮定した。このとき、完全及び比例非硬化領域の大きさ $\rho$ と $\bar{\rho}$ 、それらの中心 $\alpha$ と $\bar{\alpha}$ 、並びに等方硬化変数 $q$ が、比例及び非比例繰返し負荷の下での硬化を記述する内部状態変数となる。その結果、知見(4)によって、 $\rho$ 、 $\bar{\rho}$ 、 $q$ の間には、一義的な関係が存在することになる。

これらの内部状態変数に対する発展式は次のように定めた。まず $q$ は、知見(1)に基づき、塑性ひずみ点が完全非硬化領域上にあり、かつ外向きに変化する

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

大岡昌博

るときに限って発達し、またこの領域の外向き法線方向に対して $45^\circ$ をなす方向に塑性ひずみが増加するとき、 $\rho$ の変化率が最大となるように定式化した。これに対し、 $\bar{\rho}$ に対する発展式は、比例負荷の下での繰返し硬化に対する大野の概念を用いて定式化した。他方、完全非硬化領域の中心 $\alpha$ に対する発展式は、二つの非硬化領域が決して交差しない条件を用いて定めた。さらに比例非硬化領域の中心 $\bar{\alpha}$ の発展式は、この面に対する適応条件のほか、二、三の物理的な仮定を用いて導いた。

以上新しく導入した内部状態変数とその発展式を、組合せ等方-移動硬化則を用いる最新の塑性流れ理論、すなわち Kriegの2曲面理論に組み込み、構成式を定式化した。

第7章では、第6章で提案した構成式に含まれる材料定数と材料関数の決定方法を明らかにするとともに、この構成式による予測値と、第3章及び第4章で述べた実験結果を比較することによって、その精度と妥当性を検討した。すなわち、まず、単調単純負荷、一定塑性ひずみ振幅単純負荷サイクル、円形サイクルに対する予測値の解析的表示を求め、提案した構成式に含まれる8個の材料定数と1個の材料関数を、上述の負荷条件に対する実験結果から系統的かつ容易に定め得ることを示した。つづいて、この研究の実験で使用した316ステンレス鋼に対して材料定数と材料関数を決定し、種々の経路形状の非比例繰返し負荷、振幅変動を伴う非比例繰返し負荷などの荷重条件の下で計算を行った。これにより、この構成式が対応する実験結果をほぼ妥当な精度で予測することを確かめた。

第8章では、本研究で得られた結論をまとめて述べた。

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	大岡昌博
<p>以上のように、本研究で提案した構成式は、内部状態変数を用いる塑性流れ理論の範ちゅうに属し、しかもその構造は従来のこの種の構成式に比べてそれほど複雑ではない。したがって、それらの構成式と同様、容易に非弾性構造解析用プログラムに組込むことができる。すなわち、この構成式は従来の構成式では不可能であった非比例繰返し負荷の下での塑性変形挙動を記述できるだけでなく、十分に実用的であるから、非弾性構造解析の精度を高める上で大きな寄与をするものと考えられる。</p>				