

## 学 位 論 文 題 名

ニューラルネットワークを用いた履歴復元力モデル  
の作成と非線形解析への応用に関する研究

## 学位論文内容の要旨

近年、画像パターンの認識や非線形関係の近似手法としてニューラルネットワークが注目を集めており、この手法を用いれば簡易で精度の高い数値モデリングが可能になると考えられている。構造工学においてもニューラルネットワークの活用が模索されており、構造物の荷重－変位関係に現れる非線形挙動のモデリングなどは関数近似の一種として適切な応用分野と考えられる。特に、限界状態を考慮した耐震設計への移行期にある今日、座屈等に代表される非線形挙動に関して多くの実験データや構造解析事例が蓄積されていることから、ニューラルネットワークが有効活用できれば、あらかじめ数式で表現する従来手法よりモデリングの近似精度が改善され、非線形構造解析の精度や効率の大幅な向上に役立つものと期待されている。本研究は、以上のような状況に鑑み、ニューラルネットワークを用いて一般的な履歴挙動のモデリングを行い、適用の可能性を考察するとともに、作成したネットワークを動的応答解析や離散化極限解析に活用して数値解析への応用性を明らかにしたものである。

本研究で用いた誤差逆伝搬学習に基づく階層型ニューラルネットワークは、1986年にRumelhartらにより開発され、舟橋により数学的な近似能力が証明されている。階層型ニューラルネットワークの特徴は、あらかじめ与えられた多数の入出力関係（学習データ）から任意の写像関数を自動的に作成できることにあり、関係式の形が事前に明示できなくても簡易に近似関数を作成できる手法として応用事例が蓄積されつつある。構造あるいは材料強度特性のモデリングに関していえば、Ghaboussiらによるブレンコンクリートを対象にした先駆的な研究をはじめ、Alamらによる合金材料モデルに関する研究、吉村らによるChaboche粘弾性モデルに関する研究などがある。また、動的システムの同定も構造システム挙動の定式化を目指したものであるが、例えば、線形システムを対象にしたRehakらの研究、非線形システムを対象にしたMasriらの研究などもこの範疇に含めることができる。しかしながら、これらの応用事例においては、ネットワークの作成に多くの試行錯誤過程が含まれており、また、作成したネットワークの検証方法も明確になっていない場合が多い。従って、履歴復元力のモデリングにニューラルネットワー

クを活用して妥当性を検証するためには、基本的な学習アルゴリズムの検討に加えて、ネットワーク構造の決定方法、ネットワークの初期値、学習パラメータ、学習データの選定方法などを明らかにして作成したネットワークの信頼性を高める必要がある。

本研究では、ニューラルネットワークによる履歴モデリングの適用対象として Ramberg-Osgood型モデル (R-Oモデル) およびプラント配管の繰り返し曲げ実験・解析結果を選定した。まず、R-Oモデルによる検討ではニューラルネットワークの表現能力と有効性を考察するため簡易な履歴モデルを対象とした。本来なら、挙動が全く不明のものに適用できて初めて有効性が確認されたものと判断できるが、初めから複雑な実験データのモデリングに適用した場合、実験操作・計測やデータ収録に含まれる誤差や挙動の再現精度等が障害となって十分な検証が行えない可能性があることを考慮し、定式化された既往の数学モデルを用いた。ニューラルネットワークの一般的な作成方法を整理し、履歴則を変えた2種類のR-Oモデルを用いて考察した。ネットワークへの入力として、過去の典型的な履歴(複数の(変位,荷重)データ)と応答を求めようとする変位値を与え、その変位値に対する荷重値を出力するネットワークを作成した結果、十分な推定精度が得られることを示した。次に、プラント配管の履歴挙動に関する検討として、一端固定直管の繰り返し曲げ実験結果および有限要素法による両端ピン支持曲り管の繰り返し曲げ解析結果を取り扱った。一端固定直管は、繰り返し载荷と変位振幅の増大に伴い、直管固定部に累積変形が生じて復元力の低下を伴う履歴を呈し、正負荷重域ではほぼ対称の繰り返し劣化型履歴則を示した。従って、履歴復元力の低下を推定するネットワークと剛性低下を含んだ履歴曲線を推定するネットワークを直列的に組み合わせた履歴モデルを作成し、近似精度の考察を行った。一方、曲り管の面内曲げは、極端な正負非対称の履歴を呈し、加工硬化と繰り返し劣化が生じる複雑な挙動を示した。この問題においても、履歴現象の特徴と履歴の対称性などを踏まえて複数のネットワークを作成し、組み合わせて用いることがモデリングの精度を向上させることを示した。

最後に、数値解析への応用例として、ニューラルネットワークを用いて作成した履歴復元力モデルが数値演算サブルーチンとして容易に活用できることを明らかにした。履歴復元力特性のモデル化さえ可能になれば、従来、行ってきた非線形解析の該当部分を取り替えるだけでよく、容易に実現することができる。具体的には、R-Oモデルによる1自由度系の非線形動的応答解析および曲り管の履歴挙動を剛体-ばねモデルに組み込んだ離散化極限解析を行い、十分な精度を有していることを示した。

構造物を荷重-変位の関係でマクロにとらえ、地震時の崩壊(大変形)挙動を予測できることは限界状態設計に極めて有効であり、その際、履歴復元力モデルの精度が現象把握の鍵となることから、本研究を通してニューラルネットワークのような事例学習により履歴モデルの精度を追求する試みが重要であることを論じた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 角 田 與史雄

副 査 教 授 佐 藤 馨 一

副 査 教 授 三 上 隆

副 査 教 授 鏡 味 洋 史

## 学 位 論 文 題 名

### ニューラルネットワークを用いた履歴復元力モデル の作成と非線形解析への応用に関する研究

本論文は、ニューラルネットワークによる構造物の履歴復元力特性のモデル化と、構造物の動的応答解析および離散化極限解析に対する応用に関する研究について述べたもので、その主要な成果をまとめれば、次のとおりである。

① 定式化されている履歴復元力特性であるRamberg-Osgood型モデルにニューラルネットワークを適用することにより、ネットワーク構造の決定方法、ネットワークの初期値や学習パラメータの選定方法など、履歴復元力特性のモデル化にニューラルネットワークを適用する際の基本的特性を明らかにした。

② プラント配管の交番繰返し載荷実験による測定結果に対してニューラルネットワークを適用することにより、繰返し載荷に伴って耐力が低下する劣化型の履歴復元力特性に対しては、劣化を推定するネットワークと履歴曲線形状を推定するネットワークを直列に組み合わせることにより、高精度のモデル化が可能であることを明らかにした。

③ 曲がり管の面内曲げにおける履歴復元力特性に対してニューラルネットワークを適用することにより、極端な正負非対称な履歴特性を有し、かつ加工硬化と劣化を伴う複雑な履歴復元力特性に対しても、複数のネットワークを適切に組み合わせることで用いることにより、高精度のモデル化が可能であることを明らかにした。

④ ニューラルネットワークを用いて作成した履歴復元力特性モデルを、1自由度系の非線形振動応答解析および曲がり管の離散化極限解析に応用し、高い精度の解析結果が得られることを示すことにより、ニューラルネットワークによるモデル化が十分な応用性を有していることを実証した。

これを要するに、著者は、ニューラルネットワークによる構造物の履歴復元力特性のモデル化とその応用について検討したもので、劣化型や極端な正負非対称など、複雑な履歴復元力特性を有する場合に対しても高精度での適用が可能であることを示すなど、多くの新知見を得ており、構造工学の発展に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。