

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15136

研究課題名（和文）多軸応力下の材料構成則へのニューラルネットワークの適用性に関する研究

研究課題名（英文）Applicability of neural network to constitutive model under multi-axial stress field

研究代表者

寺西 正輝 (Teranishi, Masaki)

新潟大学・研究推進機構・助教

研究者番号：80798322

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、計算負荷の大きい弾塑性有限要素解析の実現のために、多軸応力下での硬化現象を再現可能、かつ、計算負荷が小さい材料構成則の開発を行うことを目的とする。その中で、高い計算効率および回帰性能を持つニューラルネットワークを用いて、材料構成則の新たな応力計算手法の開発を行った。まずは、一軸応力場において、本手法を適用した結果、従来手法に比べ計算時間が約70%低減されることを確認した。また、非線形硬化則の応力ひずみ関係を精度よく再現可能であることを確認した。さらに、多軸応力場に本手法を拡張し、従来手法と比べ計算時間が約90%低減されることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ニューラルネットワークを用いて、多軸応力場において、硬化挙動を再現でき、かつ、計算負荷が小さい材料構成則を開発した。本手法を実装したFEMコードを用いて、これまで計算困難であった大規模解析を実用的な時間内で遂行可能となり、その結果により構造物の変形・破壊過程が明らかになり、構造物の適切な耐震性評価に繋がると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a novel constitutive model with low calculation cost and high reproducibility of hardening phenomena under multi-axial stress field. In the process, the neural network was employed because of its high calculation efficiency and high performance of regression. Firstly, the proposed method was employed the stress-strain relation under uni-axial stress field. The results obtained by the trained neural network under random loading agreed well with test data, along with a 70% reduction in calculation time as compared with a conventional method. Moreover, the proposed method was extended to the multi axial stress field, then a 90% reduction in calculation time was confirmed.

研究分野：建築構造

キーワード：材料構成則 リターンマッピングアルゴリズム ニューラルネットワーク 金属材料 多軸応力場 非線形硬化則

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地震時の鉄骨構造物において、接合部では局所的な応力集中や塑性変形が生じる可能性があり、複雑な多軸応力場を形成する。世界最大規模の震動台施設 E-ディフェンスでは、実物大建物の震動・破壊実験を実施し、建物の変形・破壊過程のメカニズムについて検討を行っている。しかし、実大構造物の震動実験には多大なコストと時間を要し、実験可能な構造物の規模や機器による物理量の計測にも限界がある。近年、これらの問題に対応する為に、実験に比べ安価かつ構造規模を仮想的に拡張可能なシミュレーションによる検討が実施されている。例えば、数値震動台 E-Simulator では、構造物全体を詳細にソリッド・シェル要素でモデル化し、スーパーコンピュータを駆使して、超並列有限要素解析を行っている。このような大規模解析を実用的な時間内で実行するには、計算負荷の低減が必要不可欠である。代表的な計算負荷の低減手法として、線形ソルバーの並列処理が挙げられ、有効なアルゴリズムが数多く提案されており、有限要素解析に実装された例が既に報告されている。一方、弾塑性応力の計算には多くの時間を要するにも関わらず、材料構成則の計算負荷の低減はほとんど行われていない。また、有限要素解析において、構造物の塑性変形挙動を正確に再現するには多軸応力状態における硬化現象を再現可能な材料構成則が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、計算負荷の大きい弾塑性有限要素解析の実現のために、多軸応力下での硬化現象を再現可能、かつ、計算負荷が小さい材料構成則の開発を目的とする。その中で、ニューラルネットワーク(NN)の計算効率および回帰性能に着目し、材料構成則における新たな応力計算手法の開発を行った。

### 3. 研究の方法

図1に示すように、リターンマッピングアルゴリズム(RMA)では、ひずみ入力後、いくつかの段階を経て、応力を算定する。この時、塑性修正子では、一般的に、陽に解を求めることが困難であるため、収束計算により数値的に解を求める必要がある。これに対し、既往のニューラルネットワーク(NN)構成則では、ひずみをネットワークに入力し、直接、解を求めるため、計算負荷が小さくなるが、学習範囲外の精度が著しく低下する欠点を有している。そこで、本研究では、RMAにおいて、計算負荷が大きい塑性修正子のみをNNで計算し、学習範囲外においても十分な計算精度を保持可能な手法を提案した。図2に示すように、提案手法では、ヤング率、降伏応力、硬化係数等の10個の材料定数と降伏応力の試行値をNNの入力値とし、隠れ層を介して、塑性ひずみ増分の絶対値を出力している。入出力の変数は、RMAの計算手順を参考に決定した。訓練データにはRMAで計算した数値解析結果を使用した。なお、訓練データ作成時に用いた構成則は、汎用有限要素ソフト ANSYS や Abaqus に実装され、構造解析への適用に実績のある、非線形硬化則を使用した。

はじめに、上記の手法を一軸応力場において、適用した。その際、適切な学習時のバッチサイズおよび隠れ層のニューロン数を試行錯誤的に検討した。また、一軸応力場での有効性を確認した後に、多軸応力場に提案手法を拡張した。なお、提案手法の妥当性は、学習範囲外のテストデータ(ひずみ履歴)を用いて、RMAと学習済みNNで計算した結果をそれぞれ比較することによって検討した。

### 4. 研究成果

はじめに、一軸応力場での結果について述べる。図3はネットワーク学習時における、バッチサイズ毎の誤差関数の収束性を検討したものである。なお、図中の実線および点線は、それぞれ訓練データおよび検証データにおける誤差関数を示す。この結果より、バッチサイズが1000の場合は、訓練データと検証データの誤差関数は概ね、同値に収束しており、また、収束過程でのバラつきも小さくなることが明らかとなった。また、図4は、各種誤差と隠れ層のニューロン数の関係である。この結果より、隠れ層のニューロン数が10以上で、各種誤差が頭打ちになるため、計算負荷を考慮し、隠れ層のニューロン数は10が適切であると判断した。以上により決定したネットワークの構成を用いて、ニューラルネットワーク(NN)の学習を実施した。図5は、テストデータとして使用したランダム負荷下における、学習済みNNとRMAの解析結果の比較である。なお、テストデータには、訓練データで使用した入力最大値の約2倍の値が含まれている。また、図6は両者の差異を定量的に示したものであり、両者の差異は最大25MPaとなったものの、繰返し負荷による誤差の累積は見られず、両者がよく対応していることを確認した。なお、RMAと学習済みNNの計算時間を比較し、提案手法により、計算時間が約70%低減されることを確認した。続いて、一軸応力場での手法を多軸応力場へと拡張した結果を示す。図7は、多軸ランダム負荷に対して、RMAと学習済みNNの結果を比較したものであり、両者がよく対応していることが明らかになった。なお、RMAと学習済みNNの計算時間を比較し、提案手法により、計算時間が約90%低減されることを確認した。

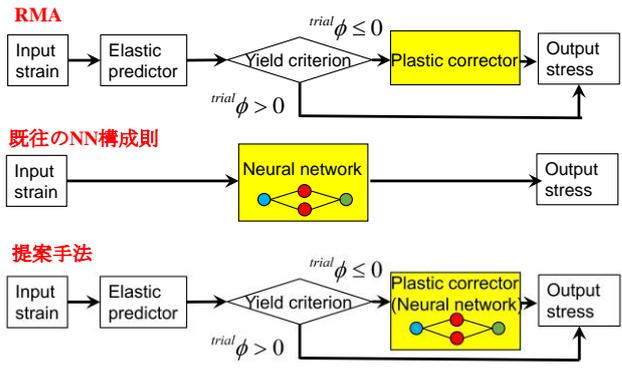


図1 ニューラルネットワークを組み込んだリターンマッピングアルゴリズム

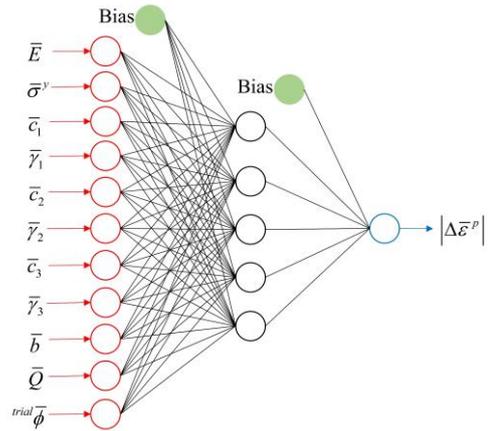


図2 ニューラルネットワークの構成

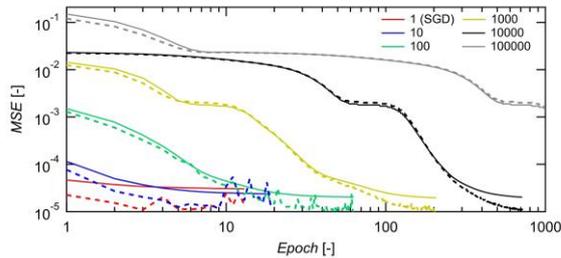


図3 学習時のバッチ数の検討

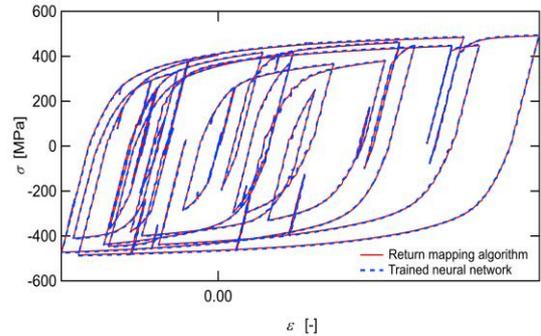


図5 ランダム負荷下における応力ひずみ関係

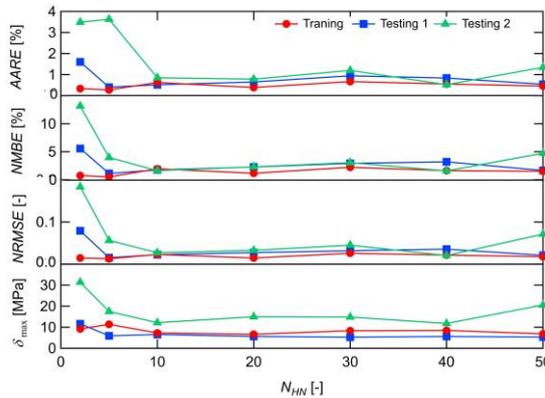


図4 隠れ層のニューロン数の検討

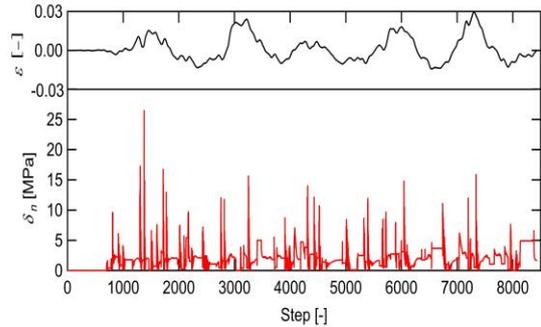


図6 ランダム負荷下における誤差の推移

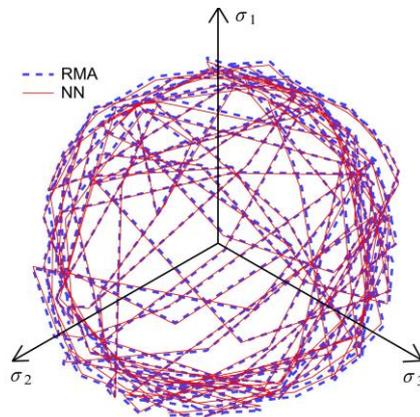


図7 多軸応力場における適用例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 TERANISHI Masaki	4. 巻 85
2. 論文標題 A STRESS CALCULATION METHOD FOR CONSTITUTIVE MODEL BASED ON RETURN MAPPING ALGORITHM EMBEDDING NEURAL NETWORK	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1565 ~ 1573
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.85.1565	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 寺西正輝, 平田寛
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた多軸応力下での材料構成則の応力計算 その1 応力計算手順の概要
3. 学会等名 2020年度 日本建築学会大会（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平田寛, 寺西正輝
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた多軸応力下での材料構成則の応力計算 その2 数値解析例
3. 学会等名 2020年度 日本建築学会大会（関東）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------