

地震工学分野における AI 活用

九州大学大学院工学研究院社会基盤部門教授 松田 泰治

1. はじめに¹⁾

わが国では少子高齢化の進行に伴い、人手不足が顕在化しつつあり、省力化に基づく生産性の向上を進めなければ労働力不足が企業活動のボトルネックになると指摘されている。このような状況の中で情報通信技術 (ICT: Information and Communication Technology) の有効活用が課題解決に大きく貢献するものと期待されている。筆者の専門である地震工学の分野一つを取ってみても 1995 年に発生した兵庫県南部地震の際に得られた情報量と、2016 年に発生した熊本地震の際に得られた情報量を比較すると、近年、比較的容易に入手可能となったデータ量の膨大さには驚かされる。例えば 2016 年熊本地震では地震発生後約 1 年の間に 4,000 回を超える余震が発生した。(国)防災科学技術研究所が地震観測を実施している強震観測網 (K-NET, KiK-net) の熊本県内の観測点だけでも 40 地点、これに気象庁の観測点が 25 地点、それぞれ最低でも地表面の水平 2 方向と鉛直方向の 3 成分の記録が得られている。これらのデータを分析してその内容を吟味するだけでも膨大な時間を必要とすることは容易に想像できる。また、国土地理院が有する全国 1,300 点の電子基準点からは 1 秒ごとに連続的に観測データを取得することが可能となっている。このようなビッグデータに相当するような莫大な情報を分析する手法の一つとして現在注目を集めている人工知能 (AI: Artificial Intelligence) が挙げられる。人工知能の研究は 1950 年代後半にスタートし、1980 年代に第 2 次ブームを迎えたが一旦は沈静化して、2000 年代から再びブームを迎えている。これらの背景にはコンピュータの処理能力が飛躍的に進歩したことや、先述したビッグデータに相当するような情報がデジタルデータとして比較的容易に入手可能となった点が挙げ

られる。以下では第 2 次ブームから現在に至る AI の活用に関わる研究の中で筆者の専門である地震工学の分野に焦点をあて変遷を概観するとともに、筆者がこれまで取り組んできた事例の紹介、今後の課題について述べてみたい。

2. 地震工学に関わる AI 活用の変遷

1980 年代から始まった第 2 次ブームにおいても地震工学の分野で様々な活用

事例の提案がなされているのでいくつかの事例を以下に紹介する。

山本²⁾ はニューラルネットワークの持つ自己組織化 (学習) 能力を利用し、実験データから直接非線形挙動を再現する近似関数を構築できる可能性に着目し、ニューラルネットワークによる非線形挙動のモデリングについて検討した。学習の対象とした非線形履歴モデルは図-1 に示す Ramberg-Osgood 型モデルであり、4 層構造の階層型ニューラルネットワー

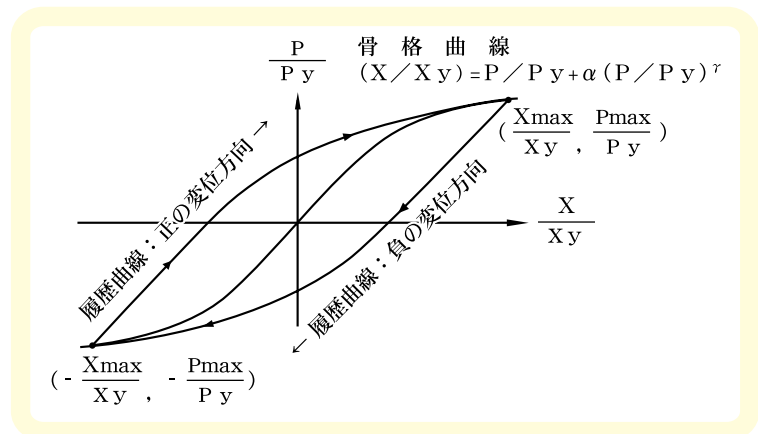


図-1 Ramberg-Osgood型履歴モデル²⁾

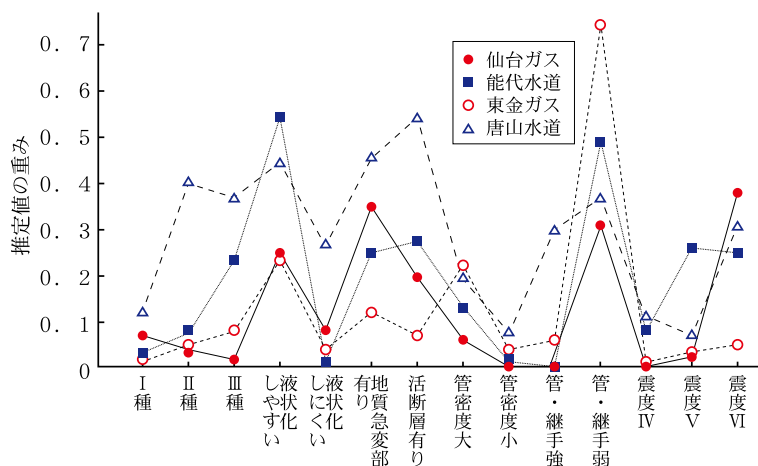


図-2 被災地データ別の入力要因影響度³⁾

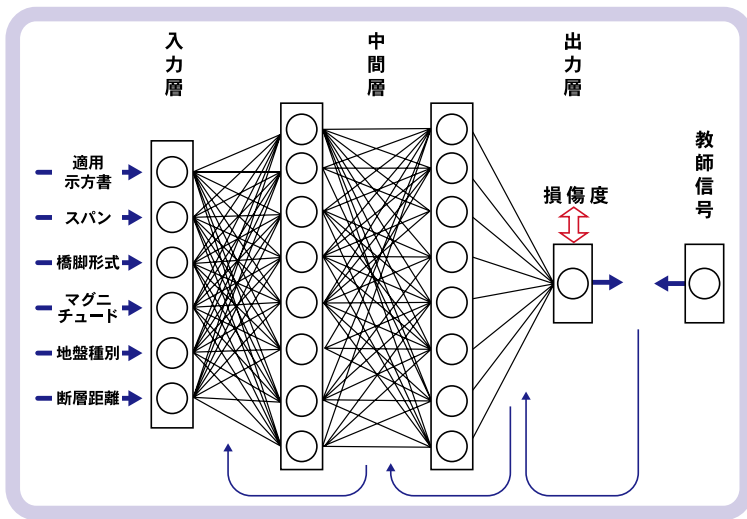


図-3 予測システムの構造⁴⁾

表-1 検証用画像の判別結果⁵⁾

		目視で判別	
		被害あり	無被害
判別モデルの結果	被害あり	447	190
	無被害	113	370

クを用いて解析を行い、従来の数学モデルと同等のモデリング能力があることを示した。

高田ら³⁾は地中ガス管路の被害発生が懸念される箇所、あるいは被害の波及的な影響を特に軽減すべき箇所をニューラルネットワークによって総合的に判断し、適切な箇所に地震計を設置することにより地震計情報を緊急対応や復旧計画に役立てようと試みた。地中管路に被害を与える要因として、地盤種別、液状化の可能性、活断層の有無、地盤急変部の有無、埋設管路敷設密度、管・継手強度特性、震度階の7項目を選定し、相対的な被害程度を4段階で出力している。図-2はそれぞれの要因の重みを評価したものである。この研究により被害予測に対するニューラルネットワーク活用の有効性を指摘している。

古川ら⁴⁾は過去に経験した地震被害についての被害調査報告書等をもとに戦後の代表的な12の地震による道路橋の被害調査を行い、それをもとに被害状況を定量的に評価した結果を用いてニューラルネットワークによる道路橋の地震被害予測システム構築した。橋梁の構造パラメータ（適用示方書、スパン、橋脚形式）

および地震パラメータ（マグニチュード、地盤種別、断層距離）から損傷度を評価して既存橋梁の地震被害予測を試みた。

筆者らもこの第2次ブームの時代にニューラルネットワークの有する認識能力に着目して非線形の履歴解析モデルを代替できる汎用の数値演算サブルーチンとして活用可能性について検討を行った。複数の非線形履歴モデルに対して単一のニューラルネットワークが十分な認識能力を有することは確認できたが、非線形動的応答解析に用いる汎用の数値演算サブルーチンとして活用するには精度的に十分ではないと判断して当時は研究を打ち切った。当時のニューラルネットワークに対する認識は、まだ十分に信頼されていない状況で、一応の答えは出てくるが、ブラックボックスから導き出された答えであるという認識だったように記憶している。近年の将棋や画像認識での実績などにより目に見える形で結果が出てきたので、ニューラルネットワークに関する信頼性も急激に向上したと考えられる。

近年行われている地震工学に関わる研究の事例を以下にいくつか挙げてみたい。瀬崎・丸山ら⁵⁾は2016年熊本地震の際

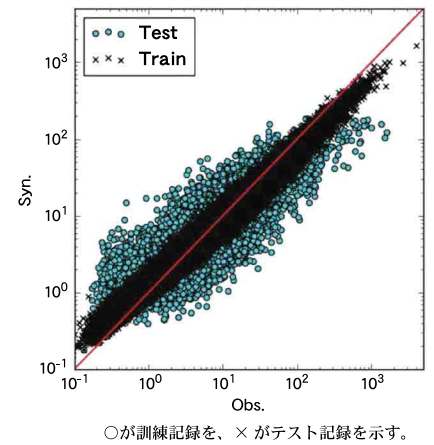


図-4 観測値と予測値の比較結果⁶⁾

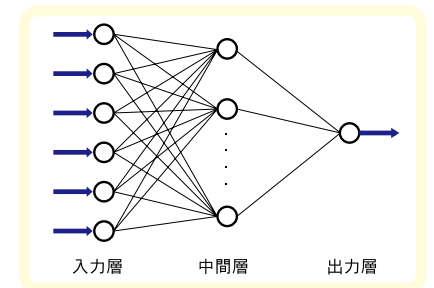


図-5 最初に検討を行った中間層が1層のニューラルネットワーク⁶⁾

に益城町をはじめとする被災地で撮影された車載カメラ画像を用いて深層学習に基づく被害有無の判別モデルを作成し、モデルの検証を行っている。人的に目視判定した結果を正解として560枚の画像を用いた正確性の検証を行った結果、正答率は72.9%と報告されている。このような研究は人工知能による画像認識の精度向上がもたらした結果であり、コンクリート構造物の劣化診断やトンネル切羽の健全性評価などにも応用されている。

久保ら⁶⁾はPythonのオープンソース機械学習ライブラリ scikit-learn に実装されているランダムフォレストにより、強震動ビッグデータを用いた地震動予測式の構築を試みている。図-4は観測値と予測値の比較結果である。いくつかの課題はあるものの得られた地震動予測式は実用レベルの地震動の予測に適用可能であることを指摘している。

3. 研究例の紹介

以下では筆者らが第2次ブームから現在に至るまでに取り組んできた研究事例のいくつかを紹介したい。筆者らが最初に取り組んだのは、山本の研究例にあるような非線形履歴挙動の認識問題である。

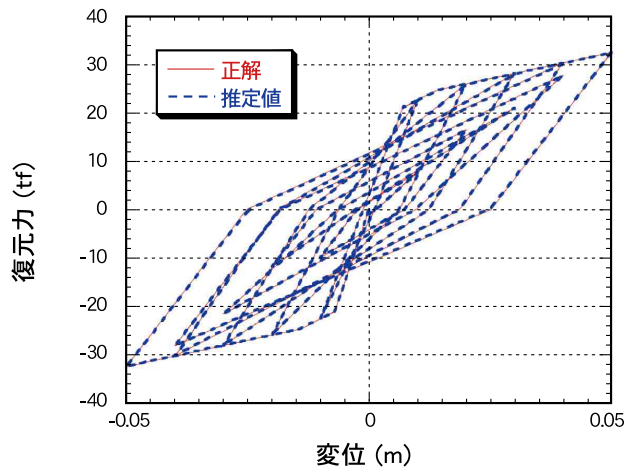


図-6 複雑な非線形履歴の認識例⁷⁾

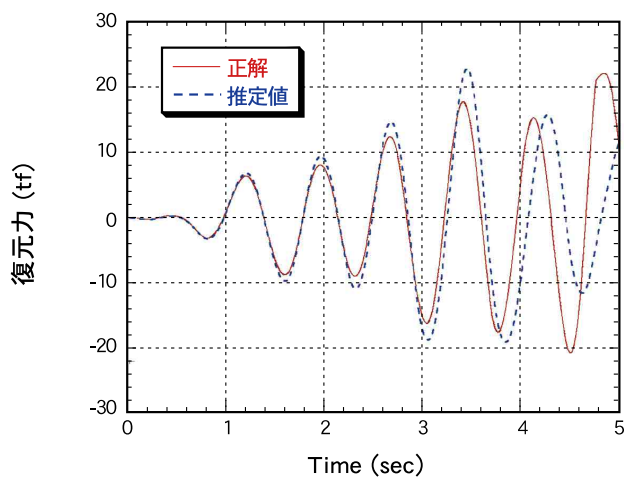


図-7 研究当初の推定精度⁷⁾

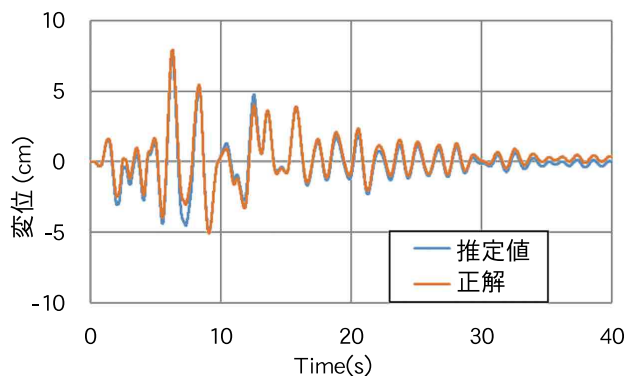


図-8 中間層を深層とした現在の推定精度⁸⁾

例えば、道路橋の耐震設計を行う際に、新しい材料や新たに開発された部材を適用するとき、それらが道路橋の耐震性にどのように影響を与えるかを評価するためには何らかのモデル化が必要となる。通常は様々な静的荷重試験や動的荷重試験、場合によっては振動台実験を行い、その複雑な非線形の荷重-変位関係や、エネルギー吸収性能、減衰特性などを実

験的に確認の後、それらの特性を模擬可能な数学的モデルを提案して解析プログラムの中に組み込むこととなる。このようにして得られる定式化された数学的モデルは提案者にとっては係数決定等は容易であると考えられるが、第三者が活用しようとする際にはその都度、評価対象となる材料や部材の非線形履歴特性を合理的に説明可能となるように係数等の修

正を行い活用することとなる。この研究ではこのような数学モデルの設定に関わる煩雑さを解消し、その機能を代替できるニューラルネットワークの構築を目指した。図-5が当時検討に用いていたニューラルネットワークの構造である。現在の研究の主流である中間層(隠れ層)の数が2層以上の深層と呼ばれているものではなく、中間層が1層のシンプルな浅層のネットワークである。まず最初にこのネットワークを活用して複数の非線形履歴特性の認識が可能であるかを検証した。当時の検証結果の一例を図-6に示す。図からわかるように当時のニューラルネットワークでも、異なる非線形履歴特性、定式化が容易で比較的単純な非線形履歴特性から、第三者が定式化するにはかなり時間を要すると考えられる複雑な履歴特性まで一定の精度で認識可能であることは確認できた。その際、ニューラルネットワークの学習データとして与えた履歴特性は、評価対象に対して変形として正弦波で漸増・漸減の荷重を行った場合に容易に得られるであろう、単純な荷重-変位関係である。認識能力としては一定の成果が確認できたので、次のステップとして学習を行ったニューラルネットワークを数値演算サブルーチンとして動的応答解析に活用可能であるかを検討した。当時の検証結果を図-7に示す。図からわかるように解析開始の初期段階では非線形の履歴を比較的忠実に再現できたが、時間の経過に連れて誤差が累積し、絶対値や位相に大きな差異が認められた。このような状況で精度の改善を試みたが、十分な成果が得られず当時は研究を中断した。

現在は、中間層の層数を増やして深層化して同様の取り組みを行っている。深層化により、より複雑な非線形履歴挙動の認識が可能なるものと考えている。教師データの方にも改善を加え、基本となる漸増・漸減荷重時の荷重-変位関係の非線形履歴データに加え、実際の地震応答で生じると考えられる比較的短周期で生じる位相の変化を重ね合わせるにより推定精度の改善を試みた。図-8が結果の一例である。従来の浅層のニューラルネットワークでは5秒程度の解析時間で誤差の累積が生じて評価結果に大きな差異が生じていたが、現在では通常地震の主要動の継続時間程度は追従可能な推定精度に達している。今後はさらに教師データの質と量の改善を図り推定精

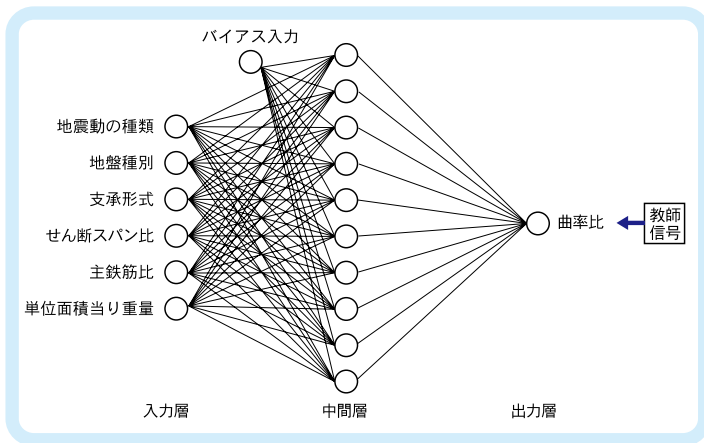


図-9 中間層が1層のニューラルネットワークの構造⁹⁾

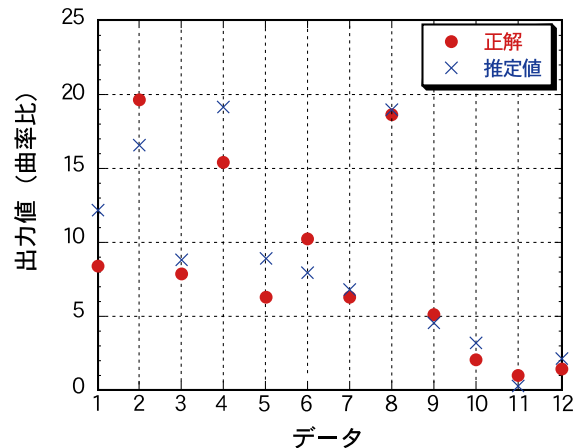


図-10 RC橋脚の損傷評価に対する適用例⁹⁾

度の向上に取り組む予定である。

もう一つの取り組みは、RC橋脚を有する道路橋の耐震補強に関する優先度評価に資する研究である。道路橋の耐震補強を計画する場合に、優先順位を合理的に決定するには実際に対象橋梁に対する動的応答解析を行い損傷の程度を予測して補強の優先度を決定する必要がある。しかし、モデル化や動的応答解析には多くの時間と費用を要するため、優先度の評価を簡便に行える手法の開発が望まれていた。本研究ではこのような優先度の評価にニューラルネットワークの適用を試みた。入力層として地震動の種類、地盤種別、支承形式、せん断スパン比、主鉄筋比、単位面積当たり上部工重量を入力し、出力として橋脚の損傷度を推定させるものである。用いたニューラルネットワークの構造は図-9に示すように中間層1層からなる浅層のものである。様々な構造のRC橋脚を有する道路橋72組の入出力データを作成し、そのうち60組を学習データとして、残り12組を学習後のネットワークシステムの精度確認用のデータとして使用した。評価結果を図-10に示す。図からわかるようにニューラルネットワークを活用することにより一定の精度でRC橋脚の損傷を推定可能であることを示した。本検討は限られたデータで行ったものであるが、このような活用の可能性を示した研究事例と考えている。

4. おわりに

人工知能に関わる研究は第3次ブームを迎え、いくつかの分野で人間の能力を上回るような成果を示してきている。これにより人工知能の信頼度が飛躍的に向上して今日の実装に結び付いたと考えている。現状では人工知能に関わる汎用のプログラムが無償で提供されるなど環境の変化は著しい。しかし、あくまで人工知能は人が使うための道具だと考えている。人工知能が判断するのではなく人工知能に判断させるのである。今後、地震工学の分野で人工知能を有効に活用するためには、学習に必要な情報の質と量を高めるだけでなく、地震工学の分野の研究者や技術者がこれまで培ってきたすべての情報を総合して、人工知能にふさわしい活用法を提案することが最も重要と考えている。

(公社)土木学会の地震工学委員会にも「AI・IoT技術の地震工学への有効活用検討小委員会(委員長:北原武嗣)」が設置され、近年のAI技術・IoT技術に関して、その手法や応用事例の観点から整理・把握し、それらが地震工学のどのような課題に大きな進展をもたらすか将来像について議論を深めるための活動が始まっている。今後、地震工学の分野で人工知能の活用に関する多くの新たな提案と実装がなされることを期待したい。

【参考文献】

- 1) 平成28年版情報通信白書
- 2) 山本広祐:ニューラルネットワークによる履歴挙動のモデリングと数値解析への応用, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 85-94, 1992. 3
- 3) 高田至郎ほか:ニューラルネットワークによるモニタリング地震計の配置優先度の決定, 構造工学論文集Vol. 40A, pp. 1169-1180, 1994. 3
- 4) 古川幸信ほか:道路橋の地震被害調査と被害予測への応用, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 1109-1112, 1997. 7
- 5) 瀬崎陸, 丸山喜久, 永田茂:車載カメラ画像を活用した地震による道路被害の抽出に向けた基礎検討, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集 1-087
- 6) 久保久彦・功刀卓・鈴木進吾・鈴木亘・青井真(2018), ランダムフォレストを用いた地震動予測式の構築, 2018年度 人工知能学会全国大会, 4Pin1-35, 鹿児島
- 7) 松田 泰治, 大塚 久哲, 矢野 亘, 鶴田 真紀: 非線形履歴挙動認識のための一般化ニューラルネットワークの構築, 地震工学研究発表会講演論文集 Vol. 25, pp.945-948, 1999
- 8) 明渡 貴史・玻座真 翼・松田 泰治・梶田 幸秀:ニューラルネットワークを活用した構造物の応答推定に関する一考察, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集 1-4, 2019
- 9) 鶴田 真紀, 松田 泰治, 大塚 久哲, 矢野 亘: 既設橋梁の耐震補強優先度の決定, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集 1-70, 1999