

説明可能な深層学習と転移学習を用いた地震応答予測手法の開発

Seismic Response Prediction using Explainable Deep Learning and Transfer Learning

才田 大聖

京都大学 工学研究科

1. 研究目的

本研究の目的は、老朽化する橋梁等インフラ構造物の維持管理効率化に向けて、加速度センサーデータに基づく「説明可能な深層学習と転移学習を用いた地震応答予測手法」を開発することである。従来の耐震性能評価における数値解析は計算コストが高く、実挙動との乖離などの課題があった。本研究はこれを深層学習で代替し低コスト化を図る上で不可欠となる、「予測の妥当性の担保」と「限られたデータでの高精度予測」の実現を目指している。第一に、深層学習のブラックボックス化を防ぐため、モデルに SincNet と Attention 機構を導入し、地震波の周波数帯ごとの寄与度を可視化することで、振動工学的に解釈可能な「説明性」を付与する。第二に、地震観測データの少なさを補うため、「モード重ね合わせ法」に基づくモード応答を深層学習モデルに事前学習させる手法を開発し、転移学習に適用する。物理法則に基づく動的特性をあらかじめモデルに獲得させることで、実データが少ない対象構造物でも高精度な地震応答予測を可能にする。

2. 研究成果の内容

本年度の研究プロジェクトでは、「深層学習モデルへの説明性の付与」と「物理情報に基づく転移学習の構築」の双方において次のように目標を達成した。

第一に、予測結果に対する説明性の課題に対し、SincNet による周波数帯域分割と Attention 機構を組み合わせた深層学習モデル ExSRNet (Explainable Seismic Response Networks) を開発した。本モデルを RC 橋脚、9 層鉄骨造建物、実在する 6 階建て RC 造建物のデータに適用した結果、従来の深層学習手法が予測破綻を起こすような条件下においても高精度な時系列予測を維持し、最大応答値の予測誤差を従来比で半減させるなど、精度向上を達成した。さらに、モデル内部の Attention 機構が算出する周波数帯ごとの寄与度を分析した結果、モデルが着目している周波数帯域が、対象構造物の固有振動数や実際のセンサー応答の卓越周波数と整合することが確認された。これにより、深層学習が単なるブラックボックスではなく、振動工学的な物理特性を正しく捉えた上で妥当な予測を行っていることを工学的に証明することに成功した。

第二に、観測データが極めて少ない状況下での予測精度向上という課題に対し、構造力学におけるモード重ね合わせ法に着想を得た転移学習手法 MSTL (Mode Superposition Transfer Learning) を開発した。多自由度系の応答が 1 自由度系 (SDOF) の重ね合わせで表現できる物理的特性に着目し、多様な固有振動数と減衰を持つ SDOF に対し、数千も

の地震波形を入力した大規模な応答データセットを構築した。これを事前学習に用いて構造振動の基本法則をモデルに獲得させた後、対象建造物の少数の実地震データを用いて微調整を行った。実在する橋梁や建物を用いた検証の結果、わずか 5 件程度の地震観測データしか存在しない環境下であっても過学習を起さず、MSTL を用いない場合と比較して最大応答値の予測誤差を低減させることに成功し、未来の未知の地震に対する高い汎化性能を実証した。

本研究で得られた成果は国内外で評価されている。具体的には 5 項に示すように、周波数領域での解釈性と予測精度向上に関する成果をまとめた論文が、国際学術雑誌

「Engineering Structures」に出版された。また、学会発表においても「IABSE Symposium Tokyo 2025」での国際会議発表をはじめとして、「第 28 回応用力学シンポジウム」や「JSCES 夏季学生講演会 2025」において発表を行った。さらに、「第 30 回計算工学講演会」では本研究内容に関してキーノート講演を行うなどした。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

前項の成果を創出する上で、スーパーコンピュータの計算資源が不可欠であった。4,000 以上の地震波形に対する 64 種類の SDOF 応答という膨大な時系列データの効率的な計算に加え、ExSRNet モデルに対し数百万エポックに及ぶ大規模な事前学習と複数ケースのファインチューニングを行う必要があったが、GPU を駆使した並列計算によりこれらを短期間で高速に実行することができた。

4. 今後の展望

本研究で開発した予測手法は有効であるが、社会実装に向けては課題も残されている。第一に、大規模地震時の強い非線形挙動への対応である。現在の転移学習は線形なモード重ね合わせ法を事前学習するため、今後は非線形特性を組み込んだ 1 自由度系モデルを事前学習に導入するなど、ソースドメイン設計のさらなる高度化を進める。

5. 成果発表

(1) 学術論文

Taisei Saida, Mayuko Nishio. ExSRNet: Explainable deep learning model for seismic response prediction with frequency attention mechanism. Engineering Structures. 2025. Vol. 343. pp. 120953.

(2) 学会発表

才田大聖, 西尾真由子. 建造物地震応答予測のための 1 自由度系応答データを用いた転移学習. JSCES 夏季学生講演会 2025 2025 年 9 月 21 日.

才田大聖, 西尾真由子. 転移学習を用いた深層学習モデルによる観測データを基にした建造物地震応答の予測. 第 30 回計算工学講演会. 2025 年 6 月 4 日.

才田大聖, 西尾真由子. 周波数領域での解釈性を有する建造物地震応答予測モデルの観測データによる学習. 第 28 回応用力学シンポジウム. 2025 年 5 月 17 日.

Taisei Saida, Mayuko Nishio. Seismic Fragility Assessment using Explainable Deep

Kernel Learning Surrogate Model considering Structural and Seismic Uncertainties.

IABSE Symposium Tokyo 2025. 2025年5月20日.

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus				
Miyabi-G	○	8190		
Miyabi-C	○	1800		
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				