

機械学習に基づく PC 鋼材破断位置の推定

福井大学 学生会員 ○富田 尚人
福井大学 正会員 鈴木 啓悟
西日本高速道路エンジニアリング関西 (株) 正会員 橋本 怜於
(株) 日本ピーエス 正会員 天谷 公彦
(株) 日本ピーエス 正会員 寺口 秀明
(株) 日本ピーエス 正会員 栗原 勇樹

1. 研究の背景と目的

プレストレストコンクリート(PC)橋梁において近年、グラウト未充填や定着部からの雨水浸入に伴う PC 鋼材の損傷や破断が問題になっている。PC 鋼材の破断は一般の目視点検では発見が難しく、定期点検まで放置されることもありえる。そこで、PC 鋼材破断の即時検知および破断位置の特定が必要である。

PC 鋼材破断時のラム波は、PC 構造物の表面打撃によって疑似的に励起できる¹⁾。ラム波は減衰しにくい性質があることから、大規模構造物を限定的なセンサ数でモニタリングする際、有効であると考えられる。

そこで本研究は、実橋において PC 鋼材の破断を模した打撃実験を多数行い、打撃によって励起する弾性波をリアルタイムで記録しデータを蓄積する。また、PC 鋼材の緊張力が高い状態にある場合や、破断位置とセンサ位置が近接している場合は計測レンジを超えデータ欠損が生じる可能性があり、これを想定したモニタリングを行う。そのうえで機械学習を用い、弾性波データの処理、学習モデルの構築と手法の検討を行い、PC 鋼材の破断検知及び破断位置特定の自動判断結果を出力する分類器を構築する。

2. PC 鋼材破断模擬実験

本実験では、PC 鋼材破断時と同様の波を構造体の表面打撃によって励起し、その弾性波を記録する。自動車専用道路において供用中の橋梁で破断模擬実験を行った。本実験の対象橋梁の諸元を表-1 に示す。

実験方法はまず、橋梁の箱桁内部において、桁端から径間の中央に設けられている隔壁付近までを実験範囲とし、桁側面および下面をおよそ 1.5m の間隔でエリア分けする。つぎに、桁両端にそれぞれ 2 センサ、実験範

囲中央に 2 センサの計 6 センサを弾性波の減衰を考慮し配置した。エリア分け及びセンサ配置位置を示した西側側面図を図-1 に示す。なお、隔壁を挟んだ一部エリアを赤色で示している。最後に、各エリアにつきネイルハンマー、片口ハンマーで各 5 回、計 10 回打撃を行い、弾性波を記録しデータを蓄積する。この際、構造的な対称条件の適用による学習データ蓄積の半減化を考慮し、下面東側では打撃数を半数とした。

データロガーによる記録の際、計測サンプリング周波数は 100kHz とした。

3. 機械学習による破断位置の推定

機械学習は、ロジスティック回帰(LR)、Random Forest(RF)、サポートベクターマシン(SVM)の 3 モデルを用い、破断に伴う波源位置の推定を試みた。これらはいずれも広範に使われている多クラス分類器であり、汎化性と精度を期待できる。

学習モデル構築には時間領域波形、高速フーリエ変換で得られる周波数情報、時間領域波形を正規化した波形の 3 つを用い、学習データを拡張した。これらの特徴量について、時間領域波形が最大値を励起した時刻

表-1 対象橋梁の諸元

構造形式	ポストテンション方式 5 径間連続ラーメン橋
竣工年月	昭和 62 年(1987 年) ※供用後 35 年
PC 鋼材	PC(主)ケーブル φ32mm (PC 鋼棒) 床版横締め PC 鋼材 φ32mm (PC 鋼棒)
橋 長	310.00m
幅 員	全幅員 11.00m 有効幅員 9.00m
断面形状	箱桁

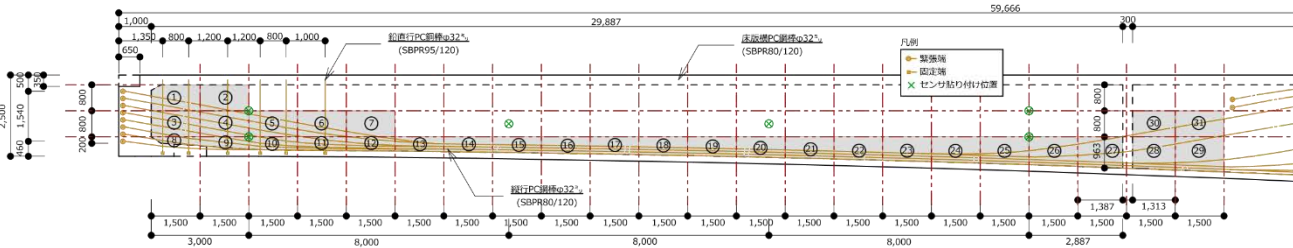


図-1 エリア分け及びセンサ配置位置を示した西側側面図

キーワード プレストレストコンクリート PC 鋼材破断 機械学習 弾性波モニタリング
連絡先 福井大学 〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1 TEL:0776-27-8596

から前時刻に 500 点、後時刻に 2000 点を切り出し、組み合わせを検証しつつ学習させた。

対象橋梁においてデータ蓄積の際、一部データはログガーの記録上限に設定した $\pm 55\text{m/s}^2$ を超えて記録した。これらのデータは、時間領域波形の連続的特徴が失われている。したがって、記録上限を超えたデータを含むもの、排除したもの、K-最近傍法(KNN)により補間したもの、の3パターン検証した。KNNで補間した際の時間領域波形を図-2に示す。

4. 結果と考察

本実験は、実橋において交通振動を含む暗騒音下でデータ蓄積を行った。交通振動のみを記録した弾性波にフーリエ変換を適用し、周波数情報をデータ数で平均化すると、側面、下面の記録に関わらずおよそ 700Hz 以下で卓越したパワースペクトルを得た。これにより、周波数帯域の大きな違いから破断時の弾性波は交通振動に影響されず、十分に検知されることが示唆された。また、本検証結果より、700Hz をカットオフ周波数とし、ハイパスフィルター(HPF)の適用有無による精度の違いを検証した。

破断位置推定においては、学習とテストを同面で行う同面評価と、対称条件を考慮し西側で学習、東側でテストを行った対称条件評価を行った。推定には、学習器で推定したエリアに近接する 4.5m のエリアを正解ラベルとした。同面評価では、いずれのモデルも高い精度を示し、特に西側側面においては、LR と SVM で精度 100% となった。これは、過学習が起きている可能性がある。過学習は、モデルの汎化性が低下するため一般的に適さないとされているが、破断位置特定においてその構造物に特化した分類器を構築するという観点では、有用である可能性がある。

対称条件評価においては、RF が最も優れた精度を示した。データ拡張の違いでは、時間領域波形に正規化した波形を加えたものがどのモデルでも高精度を示す傾向を確認した。この条件において、KNN、HPF 適用有無による推定精度を図-3に示す。RF が最も良い推定精度を示したため、グリッドサーチによるハイパーパラメータチューニング(HT)を行ったところ、側面では 90.83%、下面では 69.22%まで精度が向上した。側面の結果と比べ、下面の精度が劣る理由としては、下床版の PC 鋼材定着部における突起が大きく影響し、弾性波の伝播が阻害されたと考えられる。KNN、HPF、HT を適用した RF の同面評価、対称条件評価における精度の差異を図-4に示す。

また、側面の対称条件評価において RF に HT を行った際の破断位置推定結果を図-5に示す。縦軸、横軸に図-1に示したエリア番号を表す。結果が打撃位置と一致した際を青点、隣接するエリアを解答した際を橙色、いずれでもない場合を緑色で示した。図の赤色で示した範囲は、隔壁を挟んだエリアであり、このエリア付近では推定精度が低下していることが明らかになった。

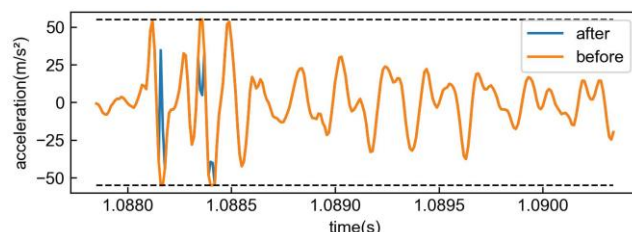


図-2 K-最近傍法により補間した時間領域波形

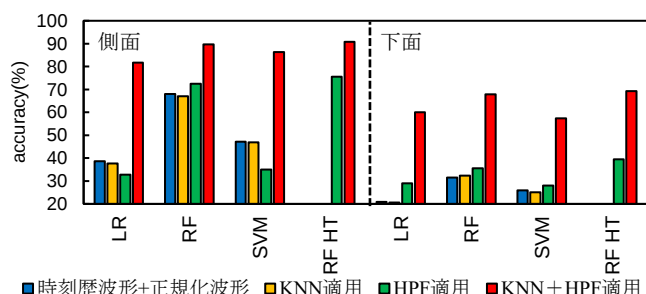


図-3 対称条件評価における破断位置推定精度

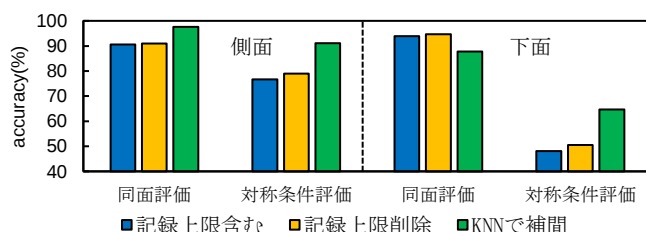


図-4 同面評価、対称条件評価による精度の差異

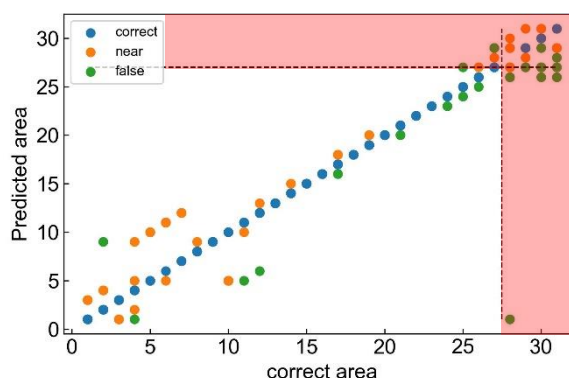


図-5 側面对称条件評価における破断位置推定結果

5. 結論

本研究は、機械学習を用いることで、PC 鋼材の破断位置推定を試みた。以下に得られた知見を示す。

- 交通振動による周波数を分析し取り除くことで、PC 鋼材の破断による弾性波と区別でき、さらにデータ拡張を行うことで破断の検知が可能である。
- 箱桁下面において、PC 鋼材定着突起が存在する場合、同面評価による過学習状態を含み学習させることで有用な分類器となる可能性がある。
- 計測範囲内に隔壁が存在する場合、弾性波の伝播が阻害され、破断位置の推定精度が低下する。

参考文献

- K. Suzuki, et al.: Lamb Wave Analysis for Health Monitoring of PC Tendons, SHMII 10, 2021.