

多点センサを用いた振動モニタリングによる RC 柱の地震時損傷評価

東北大学 学生会員 ○安川 悠 東北大学 学生会員 藤咲友輔
 東北大学 正会員 内藤英樹 宇都宮大学 学生会員 藤岡 光
 宇都宮大学 正会員 藤倉修一

1. はじめに

著者らは RC 構造物の地震時損傷評価を目的として、加振器および加速度センサを用いた局所振動試験¹⁾と、機械学習を利用した異常検知²⁾の適用性を検討してきた。この手法は、加振器周りの局所的範囲に限定して、構造物内部の損傷を検知するものであるが、多点センサによる振動モニタリングに拡張することによって、構造物の広い範囲の情報を取得し、損傷状態を把握できると考えた。

そこで、本研究では RC 柱供試体の正負交番試験を実施し、多点センサを用いた振動モニタリングと機械学習により、柱に生じたひび割れの検出を試みた。

2. 実験概要

図-1 に示すように、軸方向鉄筋 D13 (SD295)、帯鉄筋 D6 (SD295)、および普通ポルトランドセメントから成る RC 柱供試体を使用した。軸方向鉄筋比は 1.65%、帯鉄筋比は 0.73% であり、コンクリートの弾性係数および圧縮強度はそれぞれ 28.5 kN/mm²、35.3 N/mm² である。

RC 柱供試体に対して鉛直一定軸力 122.5 kN を加えて正負交番载荷試験を行った。正载荷方向および負载荷方向の供試体面をそれぞれ S 面、N 面とし、図-2 に示すように、S 面に加速度センサを 8 つ、N 面に加速度センサを 3 つ取り付け付けた。RC 供試体 S 面上の一点から、加振器を用いて载荷方向にホワイトノイズを与え、センサによる加速度波形を取り出し、高速フーリエ変換 (FFT) することにより、各加速度センサ位置の周波数応答関数を得た。

加振条件はランダム加振とし、周波数帯域 1,000-20,000 Hz にわたり、パワースペクトル密度 (PSD) を 0.5 (m/s²)²/Hz に制御した。このときの加速度波形の振幅の実効値 (RMS) は 97.6 m/s² であった。

機械学習による異常検知では、最初に、正負交番試験前の健全状態で取得したデータ (周波数応答関数) を学習データとした。取得した学習データ数は、11

個の加速度センサに対してそれぞれ 396 個である。

柱の载荷パターンは、供試体の有効高さ 1,100 mm に対する水平変位の割合をドリフトと定義して、ドリフト 0.5 % 間隔で水平変位を増加させ、各ドリフトにおいて正载荷と負载荷を 3 回繰り返した。各载荷ステップにおいて、正負の最大変位時にセンサの加速度データを読み取り、テストデータを取得した。取得したテストデータ数は、11 個の加速度センサに対して、载荷ステップ正負ごとに 5 個である。

学習モデルの構築はニューラルネットワークの数理モデルであるオートエンコーダを用いた。本研究では周波数分解能 97.7 Hz の 194 パラメータを 1 次元データとして与えているため、オートエンコーダの入力層および出力層は 194 とした。中間層は 5 層、エポック数は 30、バッチサイズは 16 とし、中間層の活性化関数として入力層はランプ関数 (RELU 関数)、出力層の活性化関数は Sigmoid 関数とし、最適化手法は Adam を用いた。入力と出力データの誤差を周波数ごとに足し合わせたものを異常度と定義した。

モニタリングでは、学習データとテストデータは同じ加速度センサのものを使用する。計 11 箇所における異常度を算定し、水平変位増大に伴う RC 供試体の損傷評価を行った。

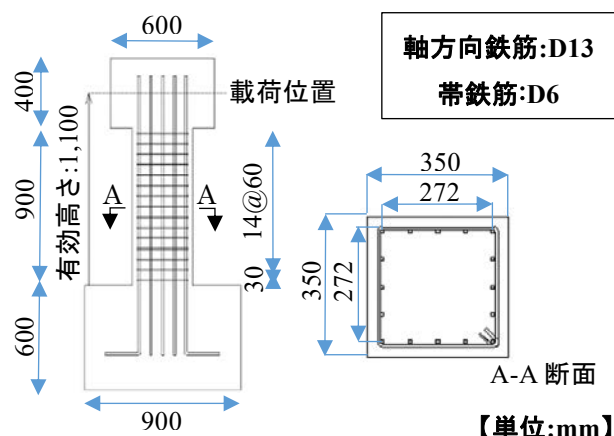
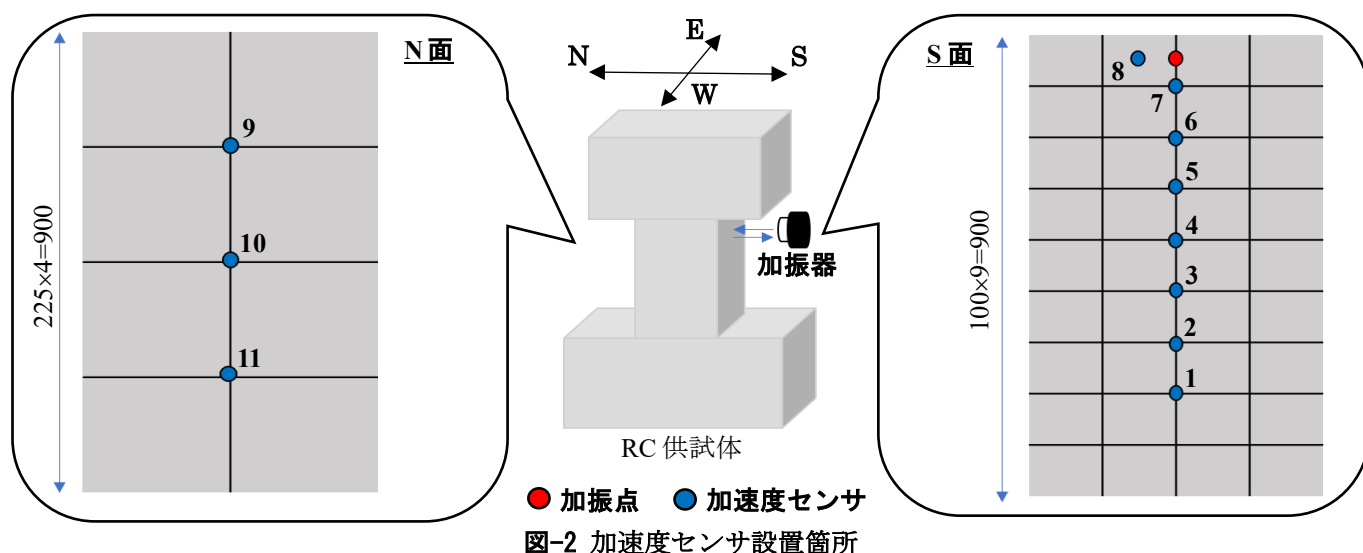


図-1 RC 供試体概要

キーワード 振動試験, RC 構造物, 機械学習, 多点センサ, 異常検知

連絡先 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL:022-795-7449



3. 結果と考察

各加速度センサ位置での異常度の変化を図-3 に示す。図は RC 供試体の S 面と N 面に分けて示した。载荷に伴い、柱基部の曲げひび割れが著しく進行したが、算出された異常度においても、柱基部に近い箇所程大きな値を示した。

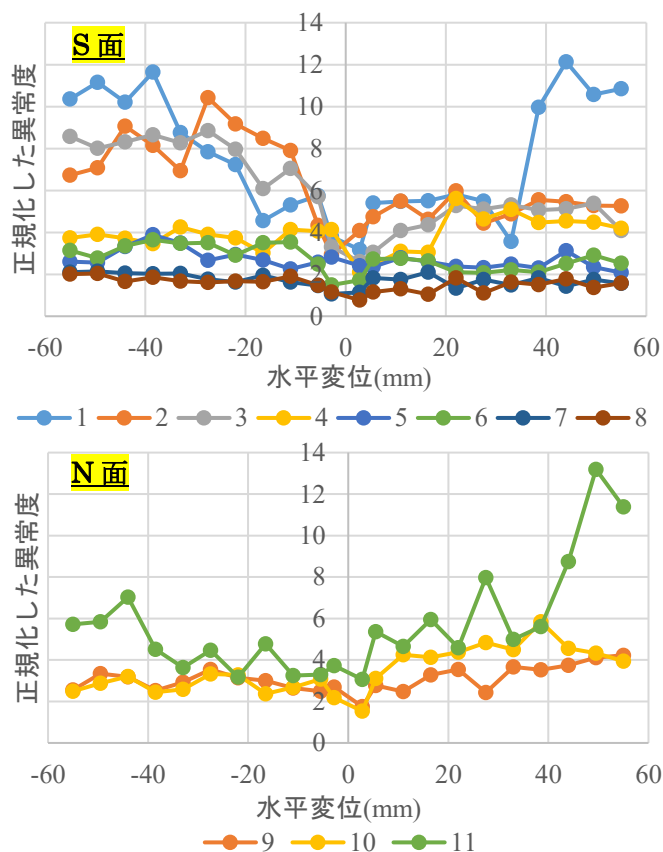
加速度センサ番号 1 の箇所においては、水平変位の絶対値が大きい程、異常度が增大した。正負交番载荷試験では、水平変位の増大に伴い、引張側では大きな曲げひび割れが発生し、圧縮側のかぶりコンクリートは剥落した。このような柱の損傷状態と異常度の大きさが対応したと考えられる。

柱基部に近い S 面の加速度センサ番号 2,3 においても、負荷荷側の異常度が正载荷側のものより大きいことが確認できた。これは、負荷荷側で発生していたひび割れが、正方向に载荷されると閉じることにより振動が伝達し、異常度が小さくなったと考えられる。また、基部に近い N 面の加速度センサ番号 11 でも、引張側のひび割れが進展すると、異常度が大きくなった。

一方、柱の中間および上部に取り付けたセンサでは、载荷に伴う異常度の増加はなかった。これらのセンサ周辺に大きなひび割れはなく、異常度の分布によって RC 柱の損傷状態が推定できる可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究では、RC 柱の正負交番载荷試験において、多点センサと機械学習を用いたモニタリングによる異常検知を検討した。その結果、柱基部での曲げひび割れの進展やかぶりコンクリートの剥落と対応して、機械学習による異常度が増加することが示された。



参考文献

- 1) Hideki Naito, John E. Bolander: Damage detection method for RC members using local vibration testing, *Engineering Structures*, Vol. 178, pp. 361-374, 2019.
- 2) 内藤英樹, 木本智幸, 藤岡光, 藤倉修一, 運上茂樹: 振動測定とオートエンコーダによる RC 部材の地震時損傷の検知, AI・データサイエンス論文集, 3 巻 J2 号, pp. 134-144, 2022.