

局所振動試験および機械学習を用いた RC はりにおけるひび割れ検知

東北大学 学生会員 ○牛山 琉就

東北大学 学生会員 藤咲 友輔

東北大学 正会員 内藤 英樹

鉄道総合技術研究所 正会員 稲葉 紅子

1. はじめに

土木業界において、高度経済成長期での急速なインフラ整備によってもたらされた、土木構造物の老朽化が深刻化している。点検作業は主に打音検査が一般的だが個人差が生じ、多大な時間と労働力が必要である。近年の労働者の高齢化のため、維持管理における労働力の省力化が求められる。また、多大にあるコンクリート構造物の維持管理において、迅速な損傷箇所と損傷程度の把握が求められる。

内藤らの先行研究では、RC 床板に対し局所振動試験を用いて健全性評価を検討している。そこで、本研究では構造物の一次点検における打音検査に代わる方策として、局所振動試験を行い、共振周波数の低下に着目して内部ひび割れを推定するとともに、機械学習による健全性判断を検討する。

2. 実験概要

2.1 静的載荷試験

せん断破壊型の RC はり試験体(断面幅 300×断面高さ 400×長さ 2400mm)を作製し、静的載荷試験において、載荷前および載荷後において 3 測線、50mm 間隔で供試体上面から局所振動試験を行った。局所振動試験から周波数応答関数を得た。載荷前の周波数応答関数を学習させることで、載荷試験後の RC はりの健全性の評価を行った。図-1 に供試体概要図を、表-1 に測定の詳細、図-2 に測定箇所図(供試体上面)を示す。

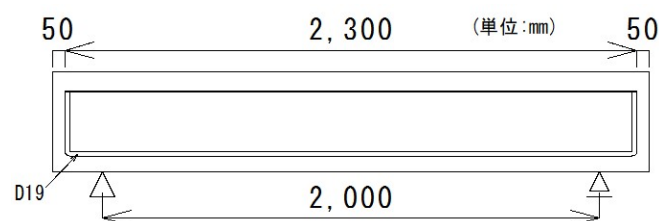


図-1 供試体概要図

表-1 測定の詳細

測線	測定回数(測線当たり)(回)		測点数
	載荷前	載荷後	
N-Line	5	1	47
C-Line	10	2	47
S-Line	5	1	47

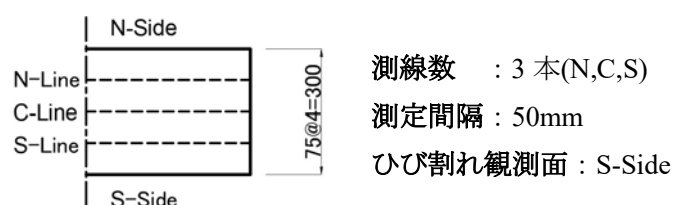


図-2 測定箇所図(供試体上面)

2.2 局所振動試験

本手法にて、加振器を用いて構造物の局所的な振動を励起し、周波数特性に基づいて構造物の内部状態を推定した。加振器と加速度センサを都度設置して測定を行った。入力波はホワイトノイズとし、周波数帯域 1000~20000Hz にわたってパワースペクトル密度を $0.5(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ に一定制御した。加振点から 50mm 程度離れた点にて圧電式加速度センサを固定し、1~2 秒程度の応答を平均化処理して周波数応答関数を得た。周波数分解能は 20Hz である。

2.3 機械学習

機械学習ライブラリ scikit-learn の主成分分析を用いて異常検知を行った²⁾。主成分分析は、データの次元削減に用いられる手法だが、次元削減後の再構成が可能である。これに着目し健全データを学習させ、非健全データを再構成すると誤差が大きくなる。この再構成誤差を異常度パラメータとして設定した。正規化した各周波数振幅を特徴量とし、次元削減は、全体の分散の 95%を維持する次元まで削除した。

キーワード RC はり, 非破壊試験, 振動試験, 機械学習

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, TEL:022-795-7449, FAX:022-795-7448

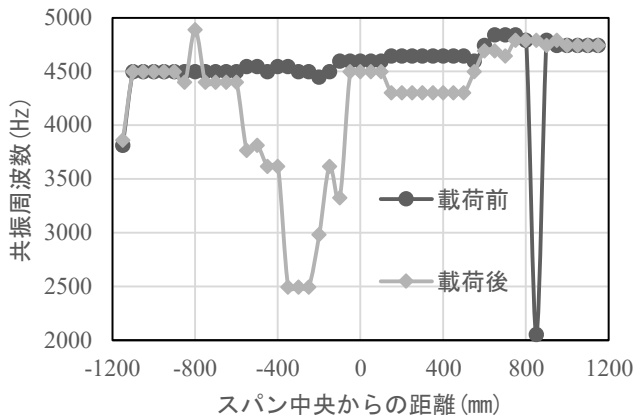


図-3 共振周波数の変化 (S-Line)

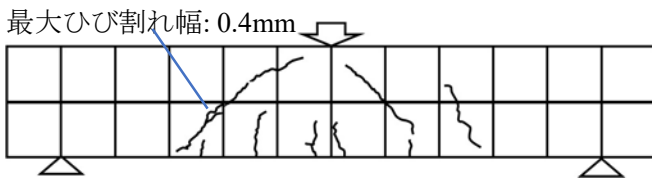


図-4 ひび割れ観測図（载荷後：S-Side）

3. 実験結果

図-3に S-Side から見た供試体载荷前後の共振周波数の変化を示す。図-4に S-Side からのひび割れ図を示す。供試体の共振周波数 f は、音速 $c=3670\text{m/s}$ と部材厚さ $H=0.4\text{m}$ を用いて、

$$f = \frac{c}{2H}$$

より、 $f = 4587\text{Hz}$ であり、载荷前実験値とよく対応した。载荷後は、共振周波数の低下箇所とひび割れ箇所が一致している様子が示された。これは、ひび割れによる剛性低下により共振周波数が低下しているためと考えられる。これより、共振周波数とひび割れの関係性から、共振周波数の低下から内部ひび割れ箇所の推定が可能であることが推察された。

図-5 および図-6 に供試体上面からの载荷前後の異常度コンター図を示す。载荷前後において異常度

が増加している様子が示された。これは、载荷によるせん断破壊によって、周波数応答関数が変化したためと考えられる。破壊時のせん断ひび割れは、非常に視認が困難なほど微細であったが、異常度を視覚化することで、健全性判断が可能であることが示唆された。一方、S-Side においてひび割れが発生していない箇所でも異常度の増加が見られた。図-3に示した共振周波数は、加振器直下の構造物内部の状態を表しているが、周波数応答関数は、測点付近のひび割れからの波の反射や回折など、より広範囲の影響を含んでいると推察される。このことから、従来の共振周波数による健全性評価と比較すると、機械学習を用いて周波数応答関数を分析する手法は、より高精度に異常の有無を推定できることが示唆された。

4. おわりに

本実験で以下の知見を得た。

- (1) ひび割れ発生により共振周波数の低下が確認された。このことより、共振周波数の低下から内部ひび割れ箇所の推定の可能性が示唆された。
- (2) 機械学習による異常検知により、異常度を可視化することで、構造物内部の劣化の有無や程度などの健全性を評価できる可能性が確認された。

【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) Yusuke Fujisaku et al.: Detecting Delamination of Pavement Layers in Airfield Runways Using Local Vibration Testing and Machine Learning, Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment, pp.83-95, 2021.



図-5 異常度コンター図(载荷前：平面図)

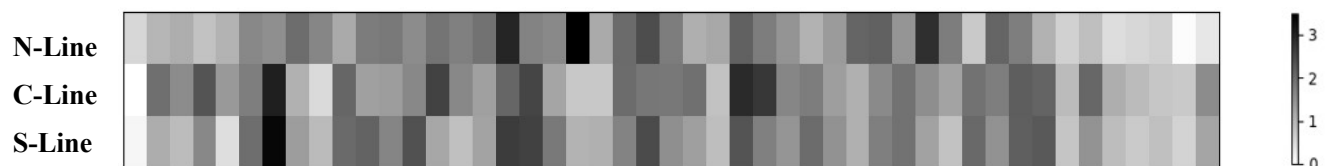


図-6 異常度コンター図(载荷後：平面図)