

コンクリート構造物におけるひび割れ周りの弾性波伝搬特性の評価モデル

東北大学 学生会員 ○橋本 龍
東北大学 正会員 内藤英樹

1. はじめに

我が国の社会インフラは高度経済成長期に急速に整備され、近年、一斉に老朽化が進行している。コンクリート構造物の維持管理にあたり、ひび割れ位置を特定し、損傷レベルを判定する迅速な点検が望まれる。著者ら¹⁾は、これまで局所振動試験によるコンクリート内部のひび割れ評価を検討してきた。本手法は、部材の局所的な振動を励起し、振動特性の変化から損傷を検知するものである。本研究では、RC梁の載荷試験²⁾で描かれたひび割れ図をもとに解析モデルを作成し、局所振動試験の再現解析を行った。また、機械学習による損傷評価に向けた基礎検討として、局所振動試験および数値解析で得られた周波数スペクトルを機械学習の特徴量とし、ひび割れ長さに対してクラス分類を行った。実験データおよび解析データを用いた機械学習の結果を比較することで、RC梁のひび割れ評価に対する解析モデルの有用性を検討した。

2. 波動解析

2.1 解析概要

本研究では、曲げ破壊型供試体9体、せん断破壊型供試体3体について、2次元有限差分法による解析モデルを作成した。供試体長さは1200～5000 mmの範囲である。材料特性として、供試体のコンクリートの音速および質量密度を与えた。解析モデルにおいて、波の伝搬に伴う減衰や、せん断波の影響は無視した¹⁾。ひび割れ面および供試体面の境界条件には、粒子速度=0を与え、固定端とした。

解析モデルの空間刻み(メッシュサイズ)は2 mmとし、時間刻みは0.376 μs、時間ステップ数は 2^{16} とした。音圧をスイープサイン波として与え、加振時間で周波数を線形に増加させた。これによって得られた音圧の時刻歴応答波形に対して高速フーリエ解析を行い、周波数スペクトルを算定した。この周波数スペクトルのうち、振幅が最大となる周波数を共振周波数とした。

2.2 ひび割れモデルの検討

簡易なひび割れモデルとして、供試体実験から得られたひび割れ図をもとに、実際のひび割れ形状を模擬した空隙メッシュを作成した。オープンソースのコンピュータビジョン向けライブラリであるOpenCVを用いて、PNGファイルとして保存したひび割れ図を取り込み、ひび割れ部分の座標を取得した。

ここで、ひび割れ幅を変えた2つのモデルを作成し、部材軸方向に加振した際の共振周波数を比較した。モデル1ではひび割れ幅をメッシュサイズ(2 mm)とし、空隙メッシュにおいて粒子速度=0とした。モデル2では、ひび割れ幅をゼロとして、ひび割れ線上の粒子速度=0とした。

モデル1およびモデル2を用いて、縦振動試験の再現解析を行った。実験と解析結果の比較を図-1に示す。各載荷ステップで、実験値と解析値が良好に一致した。また、それぞれのモデルで算定した共振周波数は概ね一致した。ひび割れ幅が0.1 mm程度以上の目視可能なひび割れは、波動伝搬を完全に遮断するため、ひび割れ幅の影響は小さいと考えられる。以後の解析はモデル2の手法で行った。

2.3 局所振動試験の再現解析

局所振動試験の再現解析の結果の例を図-2に示す。今回の解析条件では、空隙メッシュで音速をゼロとした。そのため、測定点がひび割れで囲まれた場合、音圧の出力が無かった。この場合、データプロットはグラフから削除した。実験および解析の両方で、ひび割れ箇所の共振周波数が低下した。加振方向とひび割れ方向が平行に近い場合でも、実験における共振周波数の低下を波動解析で再現することができた。

キーワード RC梁、ひび割れ、非破壊試験、波動解析、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

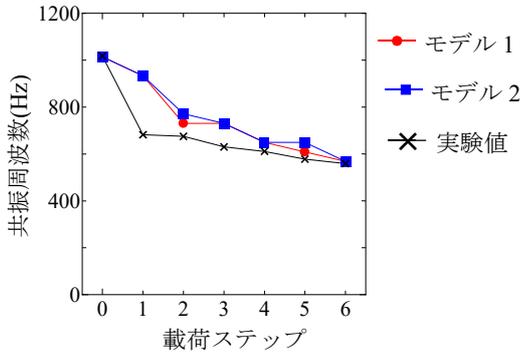


図-1 ひび割れモデルの比較

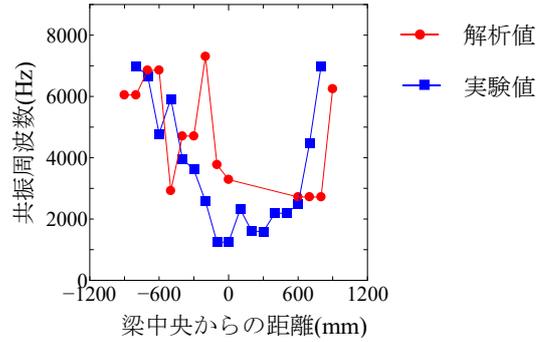


図-2 共振周波数分布 (F900-3.9 供試体 6 δ y)

3. 機械学習

3.1 概要

周波数スペクトルを特徴量とし、ひび割れ長さに対して2クラス分類を行った。局所振動試験の有効測定範囲を H 、有効測定範囲内のひび割れの水平投影長さを L とし、測定位置ごとに L/H を算出した。 $L/H > 0.2$ および $L/H > 0.5$ をそれぞれ損傷の基準として定め、オープンソースの機械学習ライブラリである `scikit-learn` を使用し、クラス分類を行った。機械学習の手法はランダムフォレストとし、パラメータは初期設定の通りとした。特徴量として、解析と実験のそれぞれで得られた周波数スペクトルを与えた。

3.2 結果

2つの L/H 基準におけるクラス分類の精度を表-1に示す。また、各測定位置の L/H と、解析および実験データによる健全クラスの分類確率を図-4に示す。この分類確率は、ランダムフォレストを構成する100本の決定木のうち、健全と予測した決定木の数である。ひび割れ位置では、解析および実験データともに、健全クラスの分類確率が顕著に低下した。また、図-2の共振周波数分布と比較すると、梁中央付近のひび割れ位置では、共振周波数が高い場合でも健全クラスの分類確率は低下しており、機械学習の有用性が示された。

表-1 分類精度

L/H 基準	解析	実験
0.2	0.943	0.717
0.5	0.897	0.807

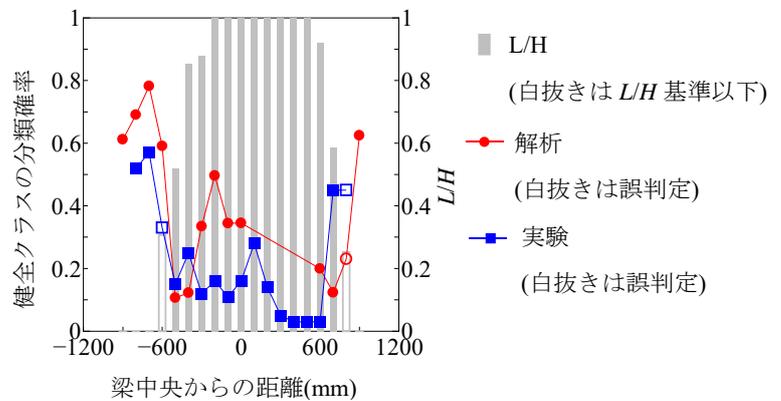


図-3 健全クラスの分類確率 (F900-3.9 供試体 6 δ y, L/H 基準 0.5)

4. まとめ

簡易なひび割れモデルを組み込んだ波動解析では、共振周波数の算定や、機械学習によるクラス分類において、実験と同様の評価結果を得ることができた。また、共振周波数の算定と周波数スペクトルの分析によって、コンクリート部材の損傷状態を推定できる可能性が示唆された。今後は、波動解析による局所振動試験の適用条件の整理や、機械学習における特徴量の分析に取り組む予定である。

参考文献

- Hideki Naito, John E. Bolander: Damage detection method for RC members using local vibration testing, *Engineering Structures*, Vol. 178, pp. 361-374, 2019.
- 近栄一郎, 内藤英樹, 五十嵐亜季, 鈴木基行: 強制加振試験によるRCカルバートの損傷同定に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 38, No. 2, pp. 967-972, 2016.