

## RC 部材を対象とした弾性波試験の解析的検討

東北大学 学生会員 ○橋本 龍  
 東北大学 正会員 内藤 英樹  
 東北大学 非会員 渡邊 園子

## 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、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おいては、目視困難なひび割れの危険性を評価可能な点検手法が求められる。コンクリート構造物の点検手法として、弾性波を用いた非破壊検査が挙げられる<sup>1)</sup>。これは、打撃や加振によって対象構造物の振動を励起し、その応答から損傷を検知するものである。弾性波試験はコンクリート構造物の損傷検知に有用である一方、ひび割れ性状を直接的に評価することは困難である。試験の高度化を目指すにあたり、ひび割れの生じた RC 部材内部の弾性波伝搬挙動の特性を理解する必要がある。そこで、本研究ではひび割れ解析および波動解析により、荷重によって生じる RC はりのひび割れと弾性波試験の再現解析を行った。また、周波数スペクトルを特徴量とし、教師あり学習によるひび割れ性状の推定を試みた。実験結果と解析結果を比較することで解析の妥当性を評価するとともに、応答周波数特性による損傷推定の可能性について検討した。

## 2. 実験

曲げ破壊型およびせん断破壊型の RC はり供試体を作製し、静的荷重試験および弾性波試験を行った。供試体概略図を図-1に示す。曲げ破壊型供試体は、降伏変位  $\delta_y$  を基準とし、変位が  $6\delta_y$  に達するまで荷重を行った。変位が降伏変位の整数倍に達するごとに除荷し、弾性波試験を実施した。せん断破壊型供試体は、せん断ひび割れの発生により荷重が低下した時点で荷重を終了し、弾性波試験を行った。

弾性波試験では、梁上面で部材軸方向に等間隔に定めた測点において、パワースペクトル密度を  $0.5 (m/s^2)^2/Hz$ 、周波数帯域を  $1000-20,000 Hz$  に制御したホワイトノイズを小型加振器で与え、センサで加速度を測定した。時刻歴加速度波形から高速フーリエ変換で

周波数スペクトルを算出し、そのうち振幅が最大となる周波数を共振周波数と定義して測点ごとに求めた。

## 3. 数値解析

荷重試験による RC はりのひび割れを、剛体ばねモデルによる 2 次元ひび割れ解析でシミュレーションした<sup>2)</sup>。破壊基準は修正モールクーロンの条件とし、コンクリートの引張軟化はバイリニア型でモデル化した。鉄筋は 1 次元のはり要素とし、非線形の応力-ひずみ関係および付着-すべり関係を与えた。

また、弾性波試験による部材内部の弾性波伝搬挙動を、2 次元音波理論に基づいて FDTD 法でシミュレーションした。損傷した RC はりに対する弾性波試験の再現として、ひび割れ解析で  $0.1 mm$  以上開口したひび割れ位置に対応する空間メッシュを空隙として取り扱った。空隙および解析領域端部では粒子速度=0 を境界条件として設定した。実験に準じてランダム波を音圧として与え、時刻歴応答波形について周波数スペクトルを算出し、共振周波数を求めた。

## 4. ひび割れ性状の推定

実験および解析で得られた周波数スペクトルを特徴量とし、ひび割れ性状の多クラス分類を行った。実験で得られたひび割れ図、ひび割れ解析における破壊要素に基づき、各測点における有効測定範囲内<sup>3)</sup>の損傷状態を、①健全、②曲げひび割れ（軽度）、③曲げひび割れ（重度）、④せん断ひび割れの 4 段階でラベリングした。

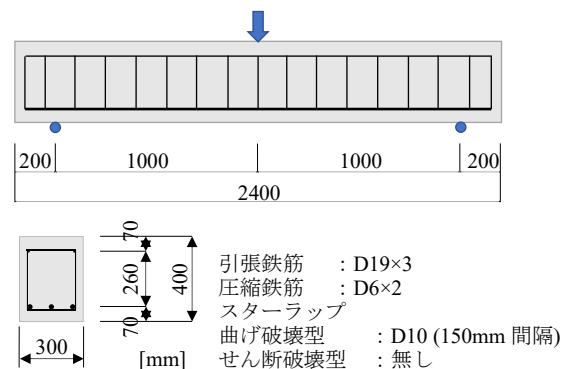
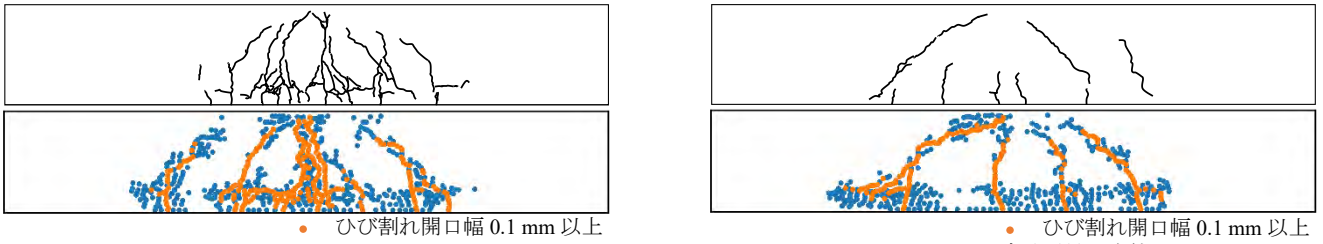


図-1 供試体概略図

キーワード 非破壊検査, RC 部材, ひび割れ解析, 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



(a) 曲げ破壊型供試体 (b) せん断破壊型供試体  
 図-2 ひび割れ図（上）とひび割れ解析における破壊要素（下）

分類モデルの構築にはオープンソースの機械学習ライブラリである scikit-learn (ver. 1.0.2) を使用し、手法はランダムフォレストとした。

5. 結果

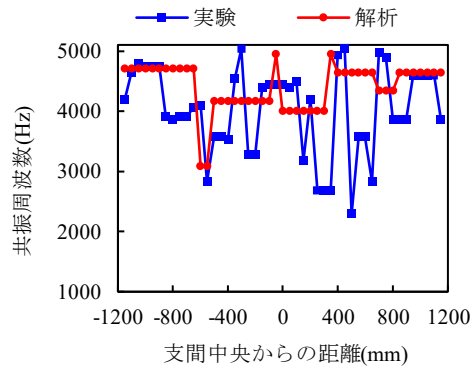
ひび割れ解析の結果を図-2 に示す。実験と同様に、曲げ破壊型供試体ではせん断ひび割れが抑制される一方、荷重の進展にしたがって主鉄筋に沿ったひび割れが生じており、構造諸元に応じたひび割れ性状の差異が再現された。また、各供試体で得られた共振周波数の分布を図-3 に示す。せん断破壊型供試体においては、やはり左側で共振周波数が大きく低下した。これは、斜めひび割れにより弾性波が回折して伝搬したためと考えられる。一方で、曲げ破壊型供試体では付着ひび割れの進展などによって弾性波伝搬挙動が複雑化するため、やはり全体で共振周波数が低下する傾向が見られた。このような場合、共振周波数の変化に着目した損傷推定は困難であると考えられる。ここで、機械学習によるひび割れ性状のクラス分類の結果を図-4 に示す。実験、解析ともにはり中央部で重度の曲げひび割れと判定されており、周波数スペクトルの全体的な分析からひび割れ性状を推定できる可能性が示された。

6. まとめ

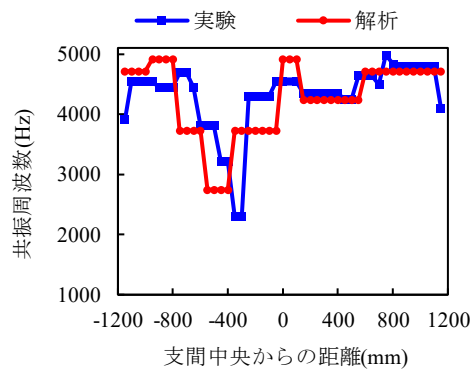
数値解析により、RC 部材のひび割れ進展および損傷部材における弾性波伝搬挙動が再現された。また、ランダムフォレストを用いた多クラス分類より、周波数スペクトルからひび割れ性状を推定できる可能性が示された。試験の高度化にあたり、シミュレーションによるひび割れと振動特性の関係性の分析が期待される。

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) J. E. Bolander Jr. & S. Saito: Fracture analyses using spring networks with random geometry, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 61, No. 5-6, pp. 569-591, 1998.

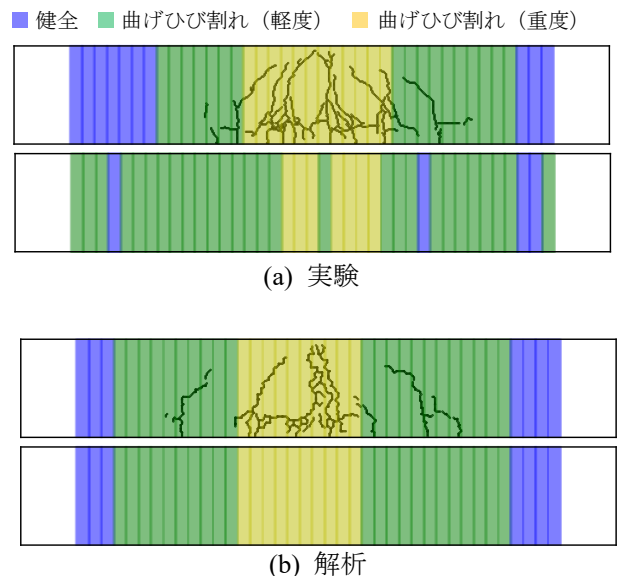


(a) 曲げ破壊型供試体



(b) せん断破壊型供試体

図-3 共振周波数分布



(a) 実験 (b) 解析  
 図-4 曲げ破壊型供試体のラベリング（上）と分類結果（下）