

PC 鋼材破断検知を目的としたリアルタイムモニタリング手法の検討

福井大学 学生会員 ○久世 右近
 福井大学 正会員 鈴木 啓悟
 (株) 日本ピーエス 天谷 公彦
 (株) 日本ピーエス 正会員 濱岡 弘二
 西日本高速道路エンジニアリング関西(株) 正会員 河田 直樹

1. はじめに

我が国の橋梁の建設数は高度経済成長期以降大きく増加し、それに伴い、プレストレストコンクリート(PC)橋梁数も増大してきた。近年これらのPC橋においてPC鋼材の破断や損傷が問題となっている。PC鋼材の破断を目視点検で把握することは困難であり、これまでは各種非破壊試験や削孔等による破壊的試験が実施されてきた。しかしこれらの手法ではリアルタイムでの破断を検知することは困難である。そこで本研究では、実橋で約30年間使用されたPC桁を用いて載荷試験を行い、PC鋼材を破断させ、発生する弾性波を圧電センサーで動的に捕捉し、ガイド波の特定モードを抽出した上で、破断位置の推定を試みる。

2. ラム波に関する検討

破断時に生じる可聴音レベルの弾性波は波長が長く、PC桁のウェブをラム波として伝搬する傾向があり、低減衰で長距離を伝搬する。そのためラム波の捕捉が破断検知モニタリングに有効であると考えられる。ラム波は板厚や材質、周波数により位相速度と群速度が変化する速度分散性、及び多数の伝搬モードが存在する多モード性を有する。この特性はRayleigh-Lamb周波数方程式で算出される¹⁾。

図1に本研究が対象とする桁ウェブ厚80mmのコンクリート平板に関する速度分散曲線を示す。これまでの研究より破断時に生じる波の周波数成分は主に5kHz以下である¹⁾。本研究では、ラム波非対称基本モードのA0モードを抽出し、波断位置の特定に利用する。A0モードは同波の対称基本モードであるS0モードに比べ、波の振幅も大きいため離れた点でも捕捉できる可能性があり、大規模構造物モニタリングに適すると考えられる。しかし速度分散曲線より、5kHz以下ではA0モードの波速は安定しない。そこで主要周波数帯に応じた群速度を評価することで破断位置の同定が可能であると考えた。

3. PC 破断模擬実験

本研究で用いたPC桁の試験体の概要及びセンサー配置位置・破断位置を図2に示す。全長9980mm、支間長8500mm、I型プレテンションPC桁を用いた。実験方法は桁両端に6センサーを1グループとしてウェブ片面に圧電センサーを配置する。PC鋼材を破断させる位置は予めPC鋼材をはつり出しておく。本研究で用いたPC桁には7本の素線を撚り合わせたPC鋼より線が

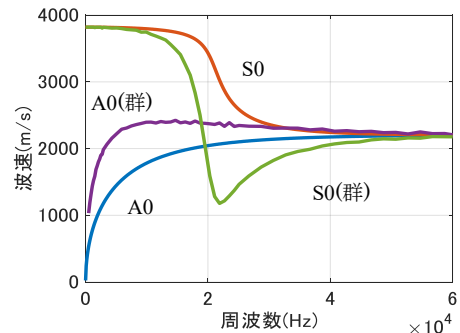


図1 速度分散曲線 (コンクリート・板厚 80mm)

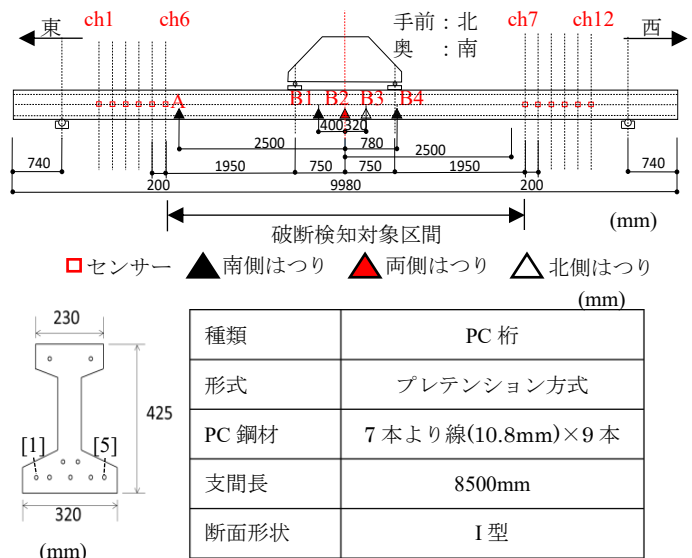


図2 試験体概要とセンサー配置位置・破断位置

使用されており、全ての素線を載荷によって破断させることは困難なため、一定荷重を保持した状態で素線1本ずつをグラインダーで切断し、最後の1本になったところで抜重する。そして再度載荷し、残りの1本をグラインダーで傷つけた上で荷重で押切る。

計測サンプリングレートは200kHzとし、破断時に発生する弾性波を取得する。はつり出す断面を図2の東側(左)からA、B1~B4とし、センサー番号も同様にch1~ch12とした。検知対象区間は桁中央部の5400mmの区間とした。また試験体の北側(手前)から順にPC鋼材を[1]~[5]と称する。またB1~B4は等曲げ区間である。

4. Mode Extraction Method による破断位置特定

4.1 主要周波数帯の把握と単一モードの抽出

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

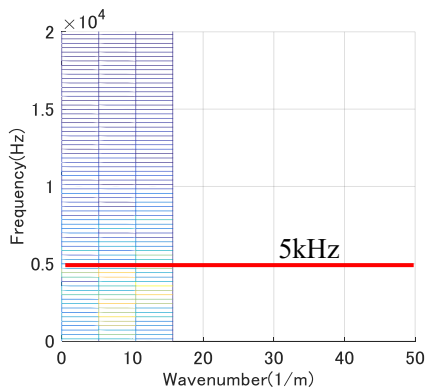


図3 生波形の2DFFT後のk(波数)-f(周波数)分布

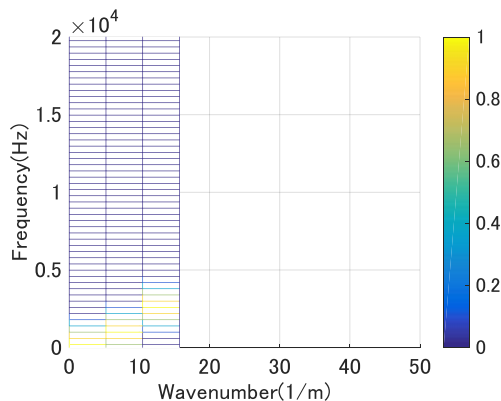


図4 A0モード抽出用窓関数群

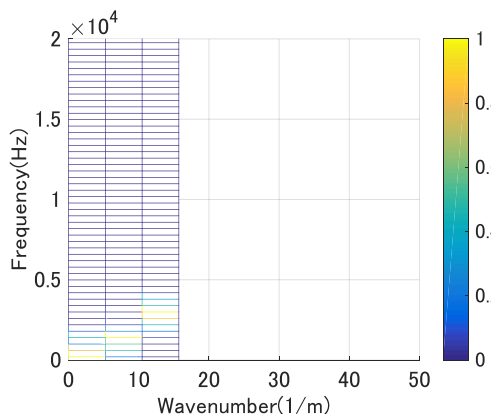


図5 A0モード抽出後のk-f分布

特定モードを抽出し、破断位置を算出する方法を Mode Extraction Method とし、以下 MEM と呼称する。

まず計測した電圧の時刻歴データにおいて最大値の20%が初めに記録された点から前時刻に200点、後時刻に300点の範囲で切り抜き、さらにデータの正規化を行った。つぎに ch1~6, ch7~12 について、それぞれ位置-時刻歴情報として生成したマトリクスに二次元フーリエ変換を行い、波数-周波数情報に変換する。その結果を図3に示す。弾性波の主な周波数帯は5kHz以下であり、さらに3~4kHzが主であることが確認された。そして図4に示す波数-周波数領域上のA0モードに該当する成分のみを抽出する窓関数群を作成した。最後にこれを波数-周波数領域に変換した計測波形に掛け合わせることでA0モードのみを抽出する。A0モード抽出後の波数-周波数(k-f)分布を図5に示す。

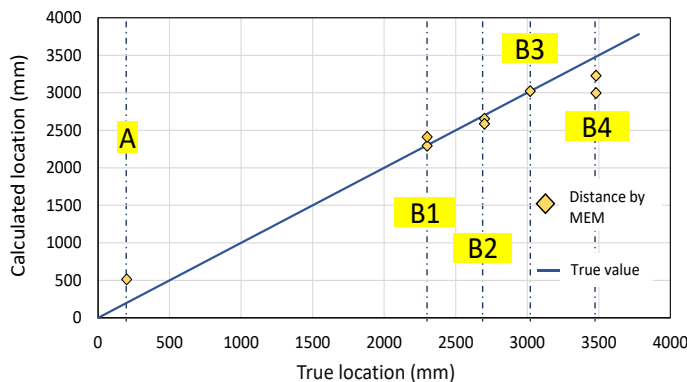


図6 MEMによる各破断位置における算出破断位置と真値との距離誤差

4.2 相互相関関数における波源位置算出

A0モード抽出後、逆二次元フーリエ変換を施し、位置-時間情報へ変換することで、各chで記録されたラム波A0モードの時刻歴が得られる。そして相互相関関数により全ての断面において2つのセンサーグループの対称に配置したセンサーの組み合わせ(ch1-12・ch2-11・ch3-10・ch4-9・ch5-8・ch6-7)から得られた時間差を平均化し、これと速度分散曲線のA0モードの3kHz~4kHzの周波数帯に相当する群速度の1800m/sを用いて破断位置の算出を行う。

各破断位置で同じセンサー間隔ごとに算出した破断位置と真値における式(1)で表される百分誤差率(Percentage Error Rate)を算出した。ここで x_t は実際の破断位置、 x_e は算出した破断位置である。 x の原点は2つのセンサー間中心(B2断面)であり、 X は検知対象区間である5400mmとした。各破断位置の結果について図6に示す。

$$PER(\%) = \frac{|x_t - x_e|}{X} \cdot 100 \quad (1)$$

4.3 精度評価と誤差要因の考察

図6より算出した破断位置の誤差率は10%未満であり、絶対平均誤差率3.2%、最大でもB4断面で誤差率8.9%であった。段階的破断において各断面のPC鋼線の破断によりプレストレスの減少、これによるひずみの増加、桁表面におけるひび割れの発生などが確認されたが、精度よく破断位置を特定できた。

5. まとめ

MEM適用に際し、A0モード抽出とA0モード主要伝搬速度を把握することで破断位置特定は可能である。本研究では破断発生時に生じる弾性波を桁ウェブ面において200kHzの動的計測でリアルタイムに捉えた。200mm間隔の6センサー1群として2群のセンサー配置に基づく破断位置推定は絶対平均誤差率3.2%となった。

参考文献

- 1) H. Kaneko, et al.: Influence of Tendon Breaks on Structural Behavior of Concrete Beams, Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges, pp.1074-1081, 2018.