

音響モニタリングによる PC ケーブル破断位置の同定

長岡技術科学大学 学生会員 松本 大樹

長岡技術科学大学 正会員 宮下 剛, 田中 泰司

1. はじめに

周知の通り, 橋梁の老朽化が急速に進行している。現に, 妙高大橋では同一断面で多くの PC 鋼材の破断が確認された。そこで, PC 鋼材の破断を合理的にモニタリングする方法が求められている。著者らは, これまで, PC 橋の PC 鋼材破断検出に向けた音響モニタリングシステムの開発を進めている¹⁾。本報では, 音源位置同定を目的とした取り組みを報告する。

2. 音響モニタリングシステムの概要

図 1 に, 開発を進めている音響モニタリングシステムを示す。本システムは, 弾性波を収録する入力部, 計測と収録信号の解析を行う計測・解析部から構成される。本研究では, 音源位置同定のためコンクリートマイクを 4 台接続した。

3. 音源位置同定手法

3.1 定式化

コンクリートマイクで, コンクリート内部を伝播する音の発生位置を同定するために, 3 次元の音源位置同定手法の定式化を行う。ここでは, 音源と各マイクの距離が, 弾性波速度と各マイクにおける音の検出時刻の積に等しいことを利用する。未知数を音源の 3 次元座標 (x_0, y_0, z_0) と音の発生時刻 t_0 とする。また, 既知数を弾性波速度 V , マイクの 3 次元座標 (x_i, y_i, z_i) , マイクにおける音の到着時刻 t_i とする ($i = 1 \sim N$), N はマイク数である。

いま, マイク i について, 音源とマイク間の距離について以下の関係式が成立する。

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = V(t_i - t_0) \quad (1)$$

しかし, 計測には不確定性があることから, 以下の残差は一般に 0 とはならない。

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - V(t_i - t_0) \quad (2)$$

マイク $i = 1 \sim N$ について上式を計算し, 残差の二乗和が最小となるように, 未知数 (x_0, y_0, z_0) , t_0 を決定する。ただし, 上式の残差は未知数について非線形関数であることから, 収束計算を伴う非線形最小二乗法を行う必要がある。まず, 未知数 (x_0, y_0, z_0) , t_0 を仮定し, 未知数の補正量 $(\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0)$, Δt_0 を次式から求める。

$$\begin{bmatrix} \sum \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \frac{\partial r_i}{\partial x_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \frac{\partial r_i}{\partial y_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \frac{\partial r_i}{\partial z_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \\ \sum \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \frac{\partial r_i}{\partial x_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \frac{\partial r_i}{\partial y_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \frac{\partial r_i}{\partial z_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \\ \sum \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \frac{\partial r_i}{\partial x_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \frac{\partial r_i}{\partial y_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \frac{\partial r_i}{\partial z_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \\ \sum \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \frac{\partial r_i}{\partial x_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \frac{\partial r_i}{\partial y_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \frac{\partial r_i}{\partial z_0} & \sum \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \\ \Delta t_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum r_i \frac{\partial r_i}{\partial x_0} \\ \sum r_i \frac{\partial r_i}{\partial y_0} \\ \sum r_i \frac{\partial r_i}{\partial z_0} \\ \sum r_i \frac{\partial r_i}{\partial t_0} \end{Bmatrix}$$

未知数の補正量 $(\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0)$, Δt_0 が, 収束条件を満足するまで, 未知数の更新を行い, 上記の計算を繰り返すことで音源位置を得る。

3.2 検証実験

前節で示した音源位置同定手法の妥当性を検証するために室内実験を実施した。本報では, 検証実験として, 2 次元の音源位置同定を行った。コンクリート床の上に, 4 台のコンクリートマイクを養生テープで固定, 設置した。マイクの座標値は, 座標の原点を定め, 各コンクリートマイクの座標を, $(-1, -1), (1, -1), (1, 1)$ とした。また, PC 鋼材の破断による音の発生は, インパルスハンマーによる打撃で模擬することにし, 打撃点の座標を $(0.5, -0.75)$

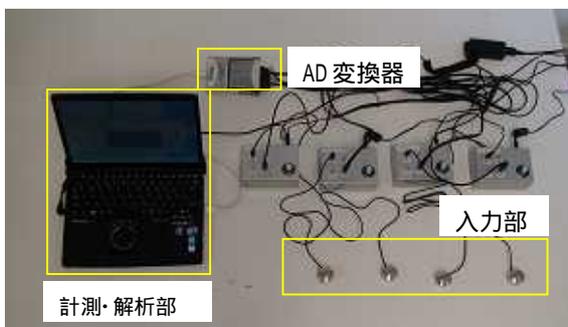


図 1 音響モニタリングシステム

キーワード 音響モニタリングシステム, PC 鋼材破断音, コンクリートマイク, 音源位置同定手法

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 TEL 0258-47-9641

とした。計測のサンプリング周波数は 22,050Hz であり、計測回数は 6 回である。

3.3 弾性波速度の計測

音源位置同定で用いるコンクリートの弾性波速度 V は既知とする必要がある。このため、弾性波速度は事前計測から算出することとした。本研究では、検証実験時にインパルスハンマーの打撃位置と各コンクリートマイクの直線距離を、各コンクリートマイクが音を検出する時刻 t_i とハンマーの打撃時刻の差で除して弾性波速度を算出する。これらの時刻歴波形からの読み取り方法は、無音の状態でマイクが出力する電圧の最大値と最小値を事前に調べ、その範囲を超える電圧値変化の 1 つ前の時刻を読み取り、音の検知点とする。計測は 6 回行い、その結果、 V の平均値は 2883m/s となった。

3.4 音源位置の同定

音源位置同定の収束計算の収束条件は補正量 ($\Delta x_0, \Delta y_0$), Δt_0 が 10^{-6} 以下となることとした。音源位置と同定結果の位置関係を図 2 に示す。グラフの縦軸、横軸はコンクリート床上の座標を表している。音源位置の正解を \circ で示し、同定された位置を \blacktriangle で示している。同定誤差は直線距離で 0.44mm となり、現場適用に向けては、同定精度の改善が課題となった。

3.5 同定精度の改善

同定精度の改善に向け、検知点の読み取り精度を向上させるために、バンドパスフィルターを適用して、周波数帯域を限定することとした。バンドパスフィルターの周波数帯域は、打撃音の周波数特性から 200-1000Hz とした。フィルター適用前後の時刻歴波形の変化を図 3 に、位置同定結果を図 4 に示す。位置同定の誤差の最大値は、X 軸方向で 9mm、Y 軸方向で 10mm、直線距離では 0.13mm となった。

4. まとめ

本研究では、PC 橋に埋設された PC 鋼材の破断を合理的に検出するモニタリング手法の確立に向け、音源位置同定に関する基礎的な検討を行った。

はじめに、3 次元の音源位置同定手法の定式化を行った。次いで、基礎検討として 2 次元の音源位置同定に関する屋内試験を実施したところ、時刻歴波形の読み取り誤差に起因して、音源位置の同定誤差が大きくなった。そこで、検出波形の周波数特性を

ふまえたバンドパスフィルターを適用することによって、音源位置の同定誤差の最大値は、X 軸方向で 9mm、Y 軸方向で 10mm、直線距離では 0.13mm となった。

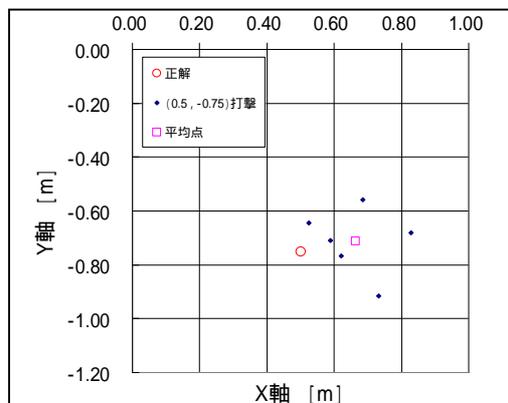


図 2 同定結果

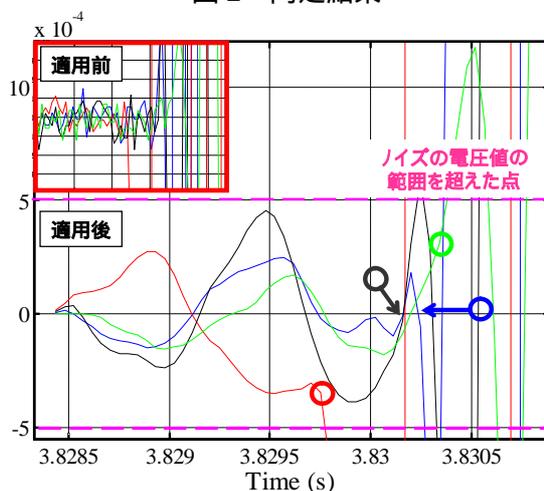


図 3 時刻歴波形の変化

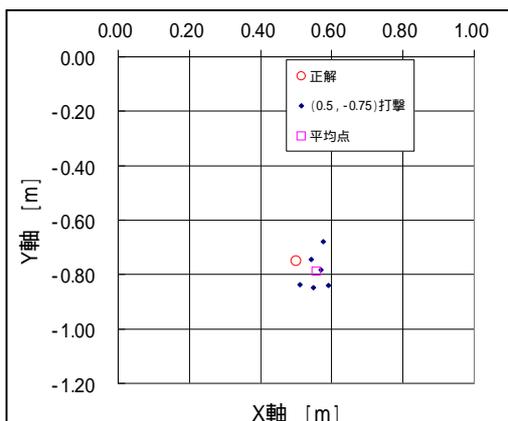


図 4 同定結果 (改善後)

参考文献

1) 稲葉, 宮下, 田中, 丸山, 登石: PC 鋼材破断検出に向けた音響モニタリングシステムの開発, 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集, pp.127-128, 2012.