

打音特性を用いた既設構造物の健全度評価に関する基礎的考察

九州大学大学院 学生会員 ○井上 健太
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 緒言

近年、老朽化したコンクリート構造物の数が非常に多くなり、既設構造物の健全度に関する調査・診断の必要性が高まる中で、打音法は簡易かつ低コストで実施可能な手法であることから、実際の診断業務で幅広く利用されている。しかし、打音による健全度の評価には熟練性を要する場合もあり、客観性に欠けることは否めない。また、打音データを用いた検討は、定量的な評価が容易な音圧の大きさに着目した事例が多く、音の周波数特性については欠陥状態との明確な因果関係を見出すことが困難なため、診断に直接的に用いた例は殆ど見受けられない。そこで、本研究では供用中の橋梁に対して打音検査を行い、音圧と周波数特性の両者を考慮した健全度診断を試みた。

2. 実験方法および考察

本計測では、打音検査で得られる音圧や周波数特性を把握するため、供用中の A 橋の橋台に対して、写真-1 のような浮きや剥離が認められる縦 35cm、横 45cm の部分の内部および周囲を打撃した際の音圧の時間的変化を計測し、欠陥の状態により音圧特性にどのような違いが現れるか調べた。実際に打撃した点は、写真-1 に示すように損傷領域を 5cm 四方に分割した格子点とした。

まず、健全部と欠陥部における最大音圧を比較したところ、健全部よりも欠陥部の方が音圧が大きくなる結果が得られた。そこで、最大音圧値を最大入力荷重で除した振幅比（単位入力荷重あたりの音圧の大きさ）を用い、健全部と欠陥部の振幅比にどのような相違が生じるか検討を行った。振幅比のコンター図を図-1 に示す。図-1 より検査部の上部と下部に振幅比が大きい部分が存在することが確認できた。この部分は、写真-1 に見られるような浮きや剥離が認められる部分に近い打撃点に対応している。したがって、定量的な評価が可能な音圧を特徴量として用いることで、欠陥部の特定は比較的容易であると考えられる。

音圧の継続時間は、健全部よりも欠陥部の方が減衰が遅いため長くなることが既往の研究により確認されている。打音の継続時間の定義として、単位荷重当たりの音圧波形に 0.002Pa/N（通常環境におけるノイズの音圧程度）という基準値を設け、打音の開始時から基準値を下回る時までの値を求めた（図-2 参照）。

次に、実橋梁に対する検査から得られた打音の周波数特性について検討した。周波数特性の評価は、打撃後 0.01 秒経過時点までのデータに対して FFT 処理を行うことで求めた。また、打音の周波数特性を定量的に評価するため、式(1)に示す周波数スペクトル差を定義した。

$$\text{周波数スペクトル差(Pa)} = \sqrt{\sum (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (1)$$

ただし、 x_i は健全部の i 番目における音圧スペクトル(Pa)、 \hat{x}_i は欠陥部の i 番目の音圧スペクトル(Pa)である。

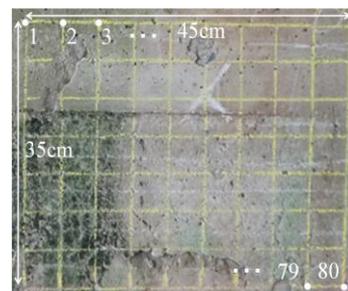


写真-1 検査部の写真と打撃点番号

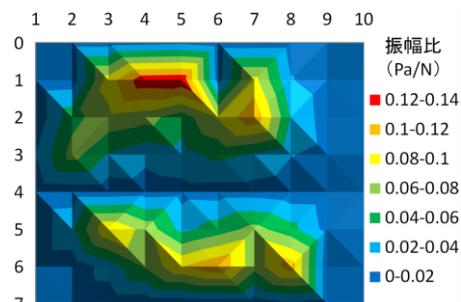


図-1 検査部の振幅比のコンター図

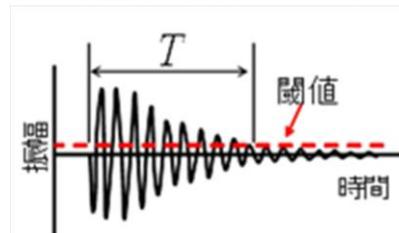


図-2 音圧の継続時間

キーワード 打音法, 維持管理, 欠陥検出, 周波数スペクトル
連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 電話: 092-802-3370

ここでは、0Hz から 10000Hz まで 100Hz 刻みの 101 個のデータを用いて周波数スペクトル差を求めた。周波数スペクトル差を求めるための参照データには、明らかに健全部と考えられる 10 箇所を選び、それらの平均値を採用した。全 80 打点において求めた周波数スペクトル差のコンター図を図-3 に示す。図-3 より、音圧の振幅比の図と概ね対応がとれていることがわかる。また振幅比によって欠陥と見なされる箇所は、周波数スペクトル差についても健全部とは明確な相違が認められ、音色や音質が異なることが推察される。

3. 健全度評価および欠陥検知

続いて、実橋の健全度評価を定量的に行うため、振幅比、継続時間および周波数スペクトル差の 3 データを総合的に用いた判定を試みた。上部、中部、下部および健全部からそれぞれ 4 箇所のデータを抽出した。なお、ここでは抽出した各点のデータについて、式(2)を用いて健全箇所の平均値で除すことで各特徴量の正規化を行った。

$$\text{正規化} = X / \bar{X}_{\text{健全}} \tag{2}$$

ただし、 X : 特徴量, $\bar{X}_{\text{健全}}$: 健全部の特徴量の平均値

以上の方法で得られたデータを定量的に評価するために、3 種類の特徴量を基底とする直交座標系を設定し、正規化された特徴量データを 3 次元グラフ中にプロットした結果を図-4 に示す。一般的に、損傷度が高いほど振幅比が大きく打音の継続時間が長くなると考えられる。また、健全音と音色や音質が異なるほど損傷度が高いと考えられることから、周波数スペクトル差は損傷度の評価に有効な特徴量であると思われる。そのため、各特徴量を基底とした直交座標系において原点からの距離が大きくなるほど損傷度が高いと考えられる。そこで、4 箇所において原点からの距離を求めると、図-4 に示すように、上部、下部、中部、健全の順に大きくなり、実際の各箇所の損傷の程度と合致することが確認された。このことから、3 つの特徴量を併用することで健全度を定量的に評価することが可能であると考えられる。

次に、欠陥領域を決定するために、3 つの特徴量を用いた 3 次元グラフにおいて、以下の式(3)に示すような健全部 10 箇所のデータを用いた 2 シグマ限界による欠陥領域の推定を試みた。

$$2 \text{ シグマ限界} = \mu + 2\sigma \tag{3}$$

ただし、 μ は健全部データの平均値、 σ は健全部データの標準偏差である。

ここでは、3 つの特徴量それぞれに 2 シグマ限界を計算し、図-5 に示すように 3 種類全ての特徴量の 2 シグマ限界を上回る箇所を欠陥と定義した。この判断基準を検査面の打音データに適用し、欠陥部と判断した打点を図-6 に示す。図-6 より、検査面上部と下部に欠陥の存在が確認され、欠陥範囲の推定が可能であることがわかった。

4. 結言

本研究では、健全度診断に利用することが困難な周波数情報に関して、健全箇所を基準とする周波数スペクトル差を指標として用いることで、欠陥箇所の抽出が可能であることを示した。また、振幅比、継続時間および周波数スペクトル差の 3 種類のデータを組み合わせて用いることで、コンクリート構造物の健全度評価および欠陥領域の推定が行えることが確認された。

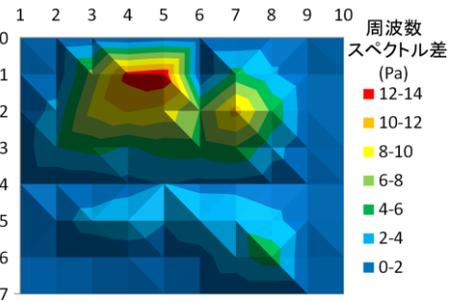


図-3 周波数スペクトル差のコンター図

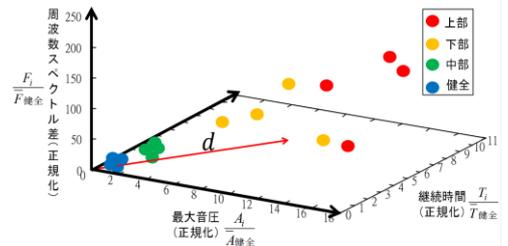


図-4 3次元空間における健全度評価

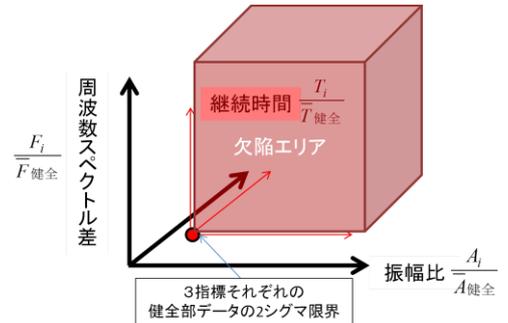


図-5 2σ限界を用いた欠陥検出手法

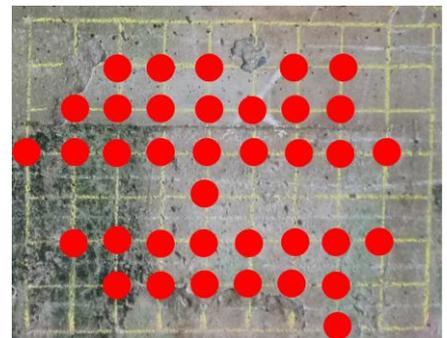


図-6 欠陥部と判断された打点