打音特性を用いたコンクリート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　○渡邊 達郎
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，その診断には熟練性を要することが多く，その評価は客観性に欠けている．また，打音に関する検討は，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，周波数特性については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，現在も供用中の橋台に対して打音検査を行い，音圧特性および周波数特性を総合的に考慮した構造物の健全度診断を行った．

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の特性を把握するため，供用中である A 橋の橋脚部において，**写真-1** のような浮き・剥離が認められる縦 35cm，横 45cm の部分の周囲及び内部を打撃した際の音圧を計測し，欠陥の状態により音圧特性にどのような違いが現れるのかを調べた．打撃点は**写真-1** に示すように，この損傷領域を 5cm 四方に分割した格子点とした．

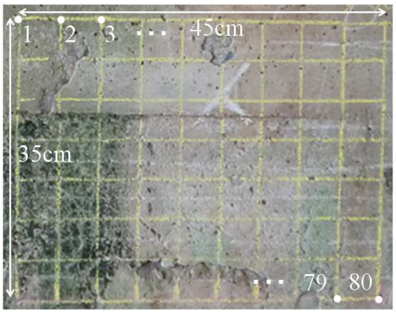

写真-1　検査部と打撃点番号

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差が生じるのか検討を行った．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によって，欠陥部の特定は比較的に容易であると考えられる．

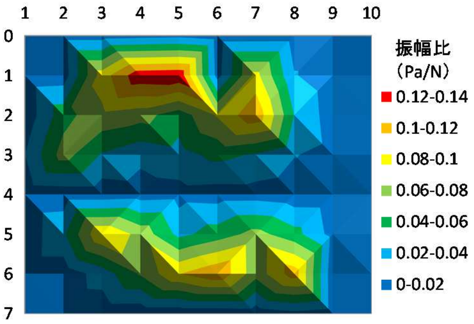

図-1　検査部の振幅比のコンター図

次に，実橋梁の打音検査から得られたデータ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に，式(1)に示す周波数スペクトル差を定義した．

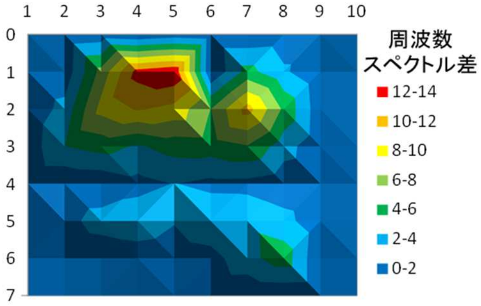

図-2　周波数スペクトル差のコンター図

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

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．

周波数スペクトル差を求めるために，0Hz から 10000Hz まで 100Hz 刻みで 101 データを用いた．周波数スペクトル差が大きいほど，両者の周波数スペクトルの差が大きいことになり，音色や音質の差も大きくなると考えられる．周波数スペクトル差を求めるための基準データには，明らかに健全部と考えられる周辺部 8 箇所を選び，そ

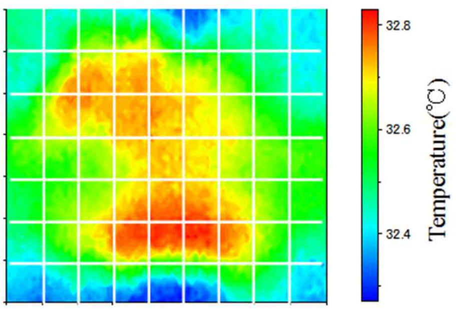

図-3　熱赤外線画像(14:50)

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-2** に示す．**図-2** より，音圧の振幅比コンター図との対応が概ね取れていることがわかる．また振幅比によって欠陥部とされた箇所は，周波数スペクトル差についても明確な相違が認められ，明らかに健全部とは音色や音質が異なることがわかる．

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．音の継続時間は，音圧値が 0.002Pa/N（ノイズレベル）を下回るまでの時間をとした．打音データを用いた健全度の定量的評価を行う前に，計測対象領域に熱赤外線サーモグラフィ法を用いた欠陥部の評価を行った．計測は 8 月に行い，11 時 20 分から 13 時 20 分と 14 時 50 分から 15 時 50 分の 30 分間隔の測定を行った．**図-3**，**4** に，それぞれ 14 時 50 分および 15 時 20 分に測定した赤外線画像を示す．**図-3** より，測定面に対して，上部と下部の 2 箇所が高温を示し，欠陥部であることが確認できた．**図-4** を見ると，下部の温度が低下して高温部が消えていることが確認できる．このことから，上部と下部の欠陥状態には相違があると考えられる．そこで，測定面の欠陥部を，上部，中部，下部と 3 つのエリアに区分し，その他の健全部を加えた 4 箇所に対して，健全度の推定を試みた．**図-5** に，4 エリアの代表点における表面温度の時間的変化，**表-1** に，13 時 20 分から 14 時 50 分，また 14 時 50 分から 15 時 20 分における温度変化を示す．**図-5** より，14 時 50 分まで表面温度が下部，上部，中部，健全の順番に高く推移していることがわかる．**表-1** より，下部の温度変化が最も大きく，上部の温度変化が最も小さいなど，温度変化率がそれぞれの箇所で異なることがわかる．温度変化率と欠陥の持つ熱容量の一般的な関係を踏まえると，上部の欠陥箇所は深く広い欠陥で，下部は浅く狭い欠陥であると推定され，欠陥体積が大きい上部のほうが危険で損傷度も高いと考えられる．一方，中部の欠陥箇所については，表面温度の時間変化が上部や下部よりは低く，健全部より高く推移していることから，損傷度は低いと考えられる．

以上の熱赤外線サーモグラフィ法による推定結果に加え，打音検査においても健全度評価を行った．上部，中部，下部および健全部からそれぞれ抽出した点を**表-2** に示す．抽出した点において，健全箇所を基準として正規化を行った．健全箇所データには，人間の感覚で明らかに健全と評価した 8 点データの平均値を採用した．以上の方法により 3 種類の特徴量を基底とする直交座標系を設定し，**表-2** の点における 3 つの特徴量をプロットした結果を**図-6** に示す．ここでは，健全度を D3 から D0 の 4 段階で評価しており，数字が小さくなるほど健全度が高いことを示す．一般的に損傷度が高いほど，振幅比が大きく，また音の継続時間が長くなる．さらに，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，周波数スペクトル差は損傷度の評価に優位な特徴量であると考えられる．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，各打点において原点からの距離(d)を求めると，D3 から D0 の順に原点からの距離が遠くなり，サーモグラフィ検査による健全度診断と同様の結果を得ることができた．

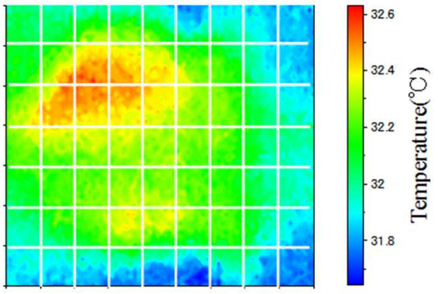

図-4　熱赤外線画像(15:50)

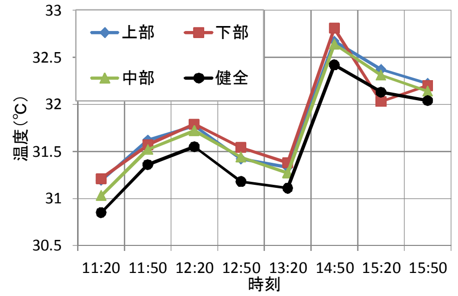

図-5　表面温度の時間変化

表-1　各部の温度変化

	温度変化(℃)	
	13:20～14:50	14:50～15:20
上部	1.28	-0.32
下部	1.41	-0.58
中部	1.37	-0.39
健全	1.35	-0.35

表-2　健全度診断に用いた打点番号

	健全	中部	下部	上部
打点番号	1,11,21,31	44,45,46,47	56,57,67,68	14,15,25,24

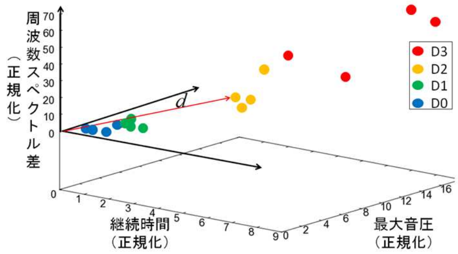

図-6　各特徴量を用いた健全度評価

3．　結言

本研究により，振幅比，継続時間，周波数スペクトル差の 3 つの特徴量を併用すれば構造物の健全度を定量的に評価することが可能であることが確認できた．