

京都大学工学部地球工学科  
 京都大学大学院工学研究科  
 京都大学大学院工学研究科

学生員  
 正会員  
 正会員

○高田 雄大  
 塩谷 智基  
 大津 宏康

1. はじめに

近年、日本における土木構造物の供用年数の増加が問題となっている。特に、橋梁においては今後供用年数が50年を超える割合が増加し、維持管理の重要性が叫ばれている。また予防保全の観点から土木構造物の初期損傷段階を適切に評価することが重要となる。しかし、既存の点検で主に実施されている目視点検では、構造物表面のひび割れによって健全性をランク付けしており、構造物内部の損傷状態を早期に判断し得ない。そこで、内部損傷を精度よく把握できる評価手法の確立が補修・補強を合理的に実施する上で求められている。

このような背景から本研究では、非破壊検査の中でも用いる周波数により注目すべき損傷規模を変えることができる弾性波法を利用する。既往の研究<sup>1)</sup>により、数ある弾性波パラメータの中でも周波数が損傷に対して敏感で、初期損傷段階を把握することに有利な結果が得られることが判明している。そこで周波数に着目し、劣化の進行に従う挙動特性を評価する。さらに、材料中の弾性波の高周波減衰の要因として伝播距離と劣化の2つの観点に着目し、周波数応答特性を利用することで新たな視点から劣化評価を検討する。

2. 弾性波の周波数応答特性

弾性波のスペクトル分析を行ってその特徴を検討する場合、得られたスペクトルは発生源での周波数成分のみを表しているのではないことに注意する。つまり、計測して得られた周波数分布は、発生源から検出され記録されるまでにいくつかの変化を受けている。フーリエ解析の概念に従って、その大略は図1のように示すことができる。ここで、周波数を  $f$  とし、検出された弾性波波形のフーリエ変換を  $X(f)$ 、発生源のそれを  $S(f)$  で示しており、 $D(f)$  は伝播する際の系の応答フーリエ変換、 $T(f)$  と  $U(f)$  はそれぞれ受信センサとその後の計測系（増幅器、フィルタなど）の応答フーリエ変換を示している。このとき、検出波形のフーリエ変換  $X(f)$  は以下

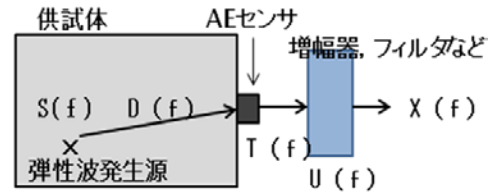


図1 弾性波の検出経路

の式のように、各要因の影響の周波数領域での積になると考えられる。

$$X(f) = U(f)T(f)D(f)S(f) \quad (1)$$

劣化評価する際には、 $D(f)$  の性質を検討すればよいが、例えば AE（アコースティック・エミッション）法といった計測方法では発生波の情報が得られないため、 $D(f)$  を評価できない。そこで、発生波の性質に依存しない評価方法を検討する必要がある。本研究では同一の弾性波発生源から得られた2つの検出波形を比較して、一方の検出波形のスペクトルをもう一方のそれで除することにより、 $U(f)$ 、 $T(f)$ 、 $S(f)$  が打ち消し合うと仮定し、劣化評価できると考え解析を進めた。

3. 健全コンクリート供試体を用いた検討

超音波法を用いて、健全とみなしたコンクリート供試体の様々な点から能動的に弾性波を発信させる実験を行い、距離差ごとに周波数応答を検討した。図2に実験に用いたコンクリート供試体の概略図を示す。供試体寸法は500mm×500mm×100mmであり、受信センサを

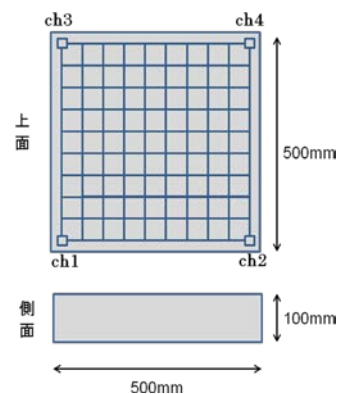


図2 コンクリート供試体の概略図

供試体裏面に4つ配置した。また、受信センサには60 kHz共振型のセンサを用い、超音波発信装置には、エネルギーが大きく、単一の周波数の超音波を発生させることのできる PUNDIT を使用し、発信センサには型式 1045S の広帯域型センサを使用した。

発信点から受信センサへの伝達距離に差がある2つの波の周波数応答を検討する。発信点と受信点の組み合わせから様々な距離差が存在するが、ここでは4つの距離差(0.201 m, 0.332 m, 0.451 m, 0.544 m)について検討する。それらの周波数応答関数をまとめたものを図3に示す。各距離差における周波数応答を見ると、低周波帯では距離差による差異は見られないが、約60 kHz~200 kHzにおいては対数軸上で線形性をもち、その傾きが距離差の増加に従って順に大きくなっていくことが明確に読み取れる。この高周波帯における周波数応答関数を指数関数で近似し、その近似曲線の傾きと距離差の関係を図4に示す。同図より、周波数応答関数の傾きと距離差にはよい相関がみられる。つまり、距離差  $\Delta d$  の周波数応答関数の傾き  $\alpha$  は  $\Delta d$  に比例するといえる。

一方、材料内の弾性波の伝播過程における周波数応答  $D(f)$  が距離減衰によるものと考えたと、 $D(f)$  は以下の式のように表現できる。

$$D(f) = \exp\left(-\frac{\pi f}{V Q} d\right) \quad (2)$$

ここで、 $f$  は周波数(Hz)、 $V$  は弾性波速度(m/s)、 $Q$  は材料の距離減衰特性を表す  $Q$  値、 $d$  は伝播距離(m)である。 $D(f)$  がこの距離減衰モデルに従うと仮定すると、供試体内での弾性波速度  $V$  と  $Q$  値が一定であれば、周波数応答関数は以下の式になる。

$$\frac{X_i(f)}{X_1(f)} \cong \frac{D_i(f)}{D_1(f)} = \exp\left(-\frac{\pi f}{V Q} \Delta d_i\right) \quad (3)$$

$$\Delta d_i = d_i - d_1 \quad (i = 2, \dots, n)$$

つまり、周波数応答関数は指数関数で表され、距離差  $\Delta d$  と周波数  $f$  の関数であるといえる。本実験の結果から、この関数モデルの適用性が示されたといえる。

本実験では、健全と見なしたコンクリートの供試体を用い、この時の図4における傾きは3.738であった。劣化が進行した場合、伝播距離が小さくても高周波減衰が生じるため、この傾きが小さくなっていくと考えられる。

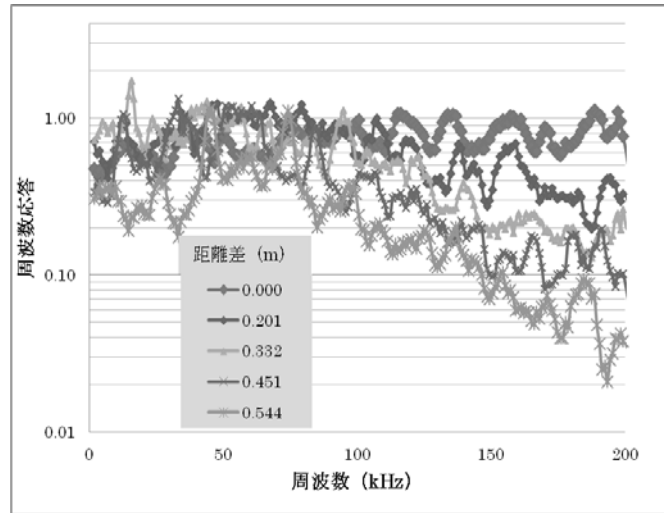


図3 距離差ごとの周波数応答関数

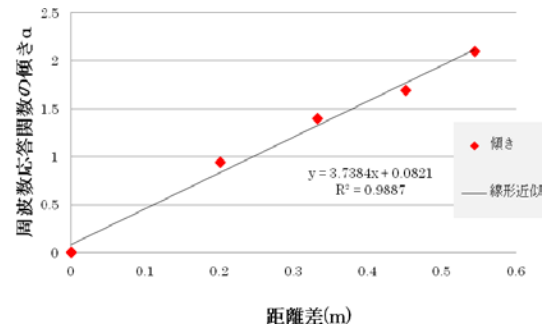


図4 周波数応答関数の傾きと距離差の関係

この傾向特性を把握し、劣化度として表現することでコンクリート材料の定量的な劣化評価ができる可能性が示された。

#### 4. まとめ

本研究によって、周波数応答関数の傾きが距離差に依存していることが示され、周波数応答関数のコンクリート材料への適用性が示された。今後、擬似損傷を与えたコンクリート供試体についても同様に実験を行い、その混入率の違いによる周波数応答特性を検証する必要がある。さらに、データベースの構築を図り、その傾きを劣化度と距離差の関数で表現することによってコンクリート材料を定量的に劣化評価できる可能性が示された。

#### 参考文献

- 1) T.Shiotani, D.G.Aggelis : Wave Propagation in Cementitious Material Containing Artificial Distributed Damage, Materials and Structures 42, pp. 377-384, 2009.