

京都大学工学部地球工学科  
 京都大学大学院工学研究科  
 飛鳥建設技術研究所  
 京都大学大学院工学研究科

学生員  
 正会員  
 正会員  
 正会員

○後藤 基芳  
 塩谷 智基  
 蔡 華堅  
 大津 宏康

## 1. はじめに

近年、橋梁やダム、トンネルなどの土木構造物の老朽化が社会問題となっており、これらの効果的な維持管理手法の確立が急務とされている。土木材料の中でも、コンクリートは複合材料であることや様々な環境で用いられていることなどが原因で、その劣化予測を定量的に精度良く行うことは容易ではない。コンクリートの劣化には外的・内的に様々な要因があるが、結果的に生じたクラックは劣化程度を判断する指標として様々な機関で利用されている。一般に、表面クラックに比べ内部クラックの深さや方向などの特性評価は容易ではなく、その進展が定量的に判断できないので、表面で観察できるクラックの幅や長さで劣化程度が検討されてきた。

例えば、土木構造物の一つであるトンネルにおいて、覆工コンクリートのクラック発生要因は様々であるが、施工方法とコンクリートの若材齢に起因した三日月状クラックが存在する。この三日月状クラックが打継ぎ目に連続する場合や、覆工を貫通する場合にはコンクリート片がはく落し、第三者被害を引き起こす危険性がある。しかし、この覆工コンクリートに生じるクラックを定量的に推定する手法は確立されていないため覆工内部の詳細な変状を把握することは難しく、目視点検や打音検査で健全性が判断されている現状にある。

従って、本研究では、健全性評価に寄与できるトンネル覆工コンクリートに生じるクラックの深さ方向の特性評価を弾性波を用いて検討する。

## 2. 評価手法

本研究では、表面波の媒体中の影響範囲が鉛直方向に約1倍波長であることを用いて、表面波の減衰の大きさとクラック深さについて検討した。表面波の減衰特性を利用した垂直クラックのひび割れ深さは、Chaiら<sup>1)</sup>により実験的に評価されている。Chaiらはクラック深さを評価するために表面波の振幅率Fを用いた。Fは受振セン

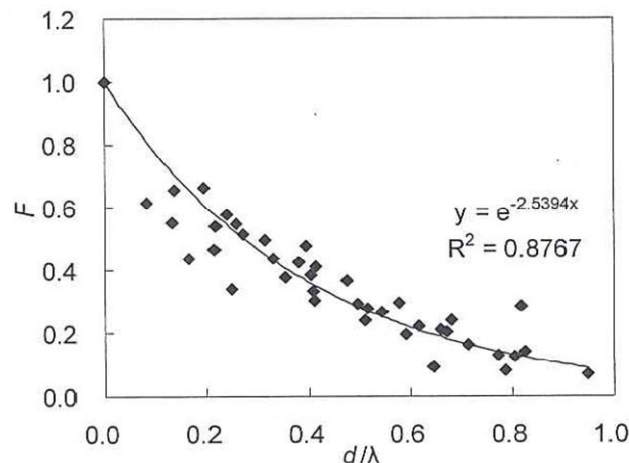


図1<sup>1)</sup> 垂直クラック実験結果

サで収録した表面波の振幅を、健全部のそれで無次元化した値である。表面波の主要波長を $\lambda$ 、クラックの深さを $d$ とすると、図1のようにFと $d/\lambda$ の良い相関が認められ、その近似式は下記のように表現できる。

$$d = -a\lambda \cdot \ln F \quad (1)$$

ただし、 $a$ は近似式で求めた定数である。表面波の波長 $\lambda$ は発振センサで収録した波形から求めることで、実際に伝播している波をより正確に捉えることができる。

## 3. 解析手法と結果

本研究では、数値解析ソフトWave2000(サイバーロジック社製)を用い波動伝播シミュレーションを行った。本解析は、二次元の弾性波動方程式について近似解を計算するもので、このアルゴリズムは有限差分法を基本とし、粘性損失も含め、式(2)で示す弾性方程式を用いている。

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left[ \mu + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla^2 w + \left[ \lambda + \mu + \phi \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta}{3} \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla (\nabla \cdot w) \quad (2)$$

本解析では、単位体積重量、ラメ定数 $\lambda$ 、および $\mu$ により材料の物性を設定する。ラメ定数は弾性係数とポアソン比から算出する。ここで、本研究では粘性係数は考慮せず、均質なコンクリートモデルとして解析した。送信波はサインパルス波とし、半波長分送信されるように

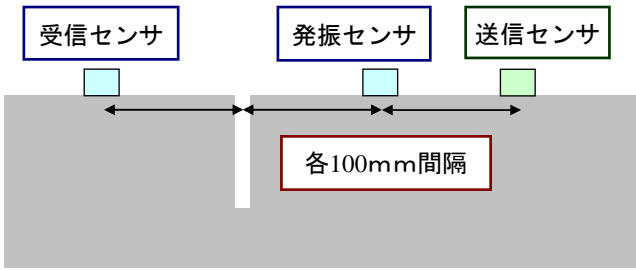


図2 センサ配置

表1 物性パラメータ

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Young modulus (GPa)	Poisson's ratio
Concrete	2.38	33.0	0.210

送信周波数, 振幅, 時間を設定した.

また, 解析時間の短縮と境界面での反射による波形の読み取りの複雑さを考慮し, 左右と下面の境界条件を無限とした. さらに, 受信センサの縦方向と横方向の感度特性を同じとして, 各方向の振幅値の二乗和の平方根をその時間の振幅値と定めた.

センサは, 垂直クラックにおいては, 図2のような実験と同じセンサ配置とし, 送信波の周波数を 10, 20, および 40 kHz とした. 結果を図3に示す. 解析結果はいずれの周波数でも指数関数的な減衰を示し, それぞれの送信周波数での結果を重ね合わせても良い相関が得られた. 近似した指数関数の定数は図1に示す実験結果とは異なっていたが, 同様な減衰傾向を得ることができた. 定数が異なった理由としては, 数値解析では均質な材料を想定し, また粘性係数を考慮していないこと, 更に, 解析では, 縦方向と横方向の感度が等しいと仮定したことによるものと考えられる.

以上より, 表面波を用いた垂直クラック深さの実験的推定手法は, その特徴を数値解析により大過なく表現できたと考えられる.

垂直クラックに関するシミュレーション結果は実験結果を包含する特徴を示したので, 斜めクラックに対しても同様に解析を行うことにより実験結果の特徴を予測し, 表面波法の適用性を検討することが可能であると考えられる. 斜めクラックの解析における物性とセンサ配置は垂直クラックの解析と同じにし, 送信波の周波数は 10 kHz とした. クラック角度は鉛直方向から左右に 30° 傾きを持った2パターンで解析を行った. 結果は図4のようになり, 垂直クラック同様減衰曲線が得られた. この結果から, 表面波の減衰はクラックの角度に関係なく,

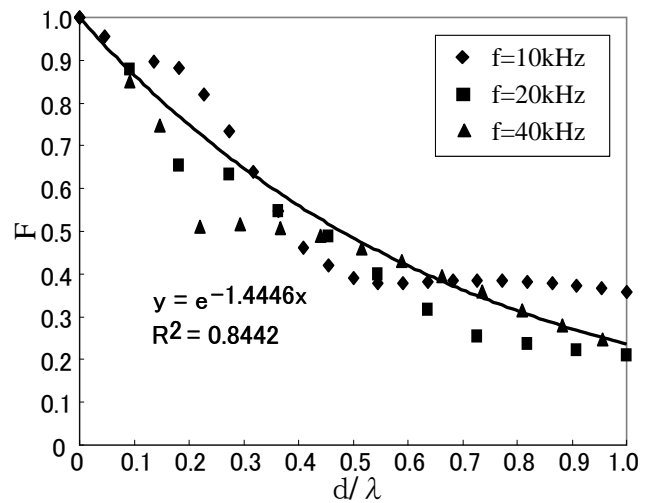


図3 垂直クラック数値解析結果

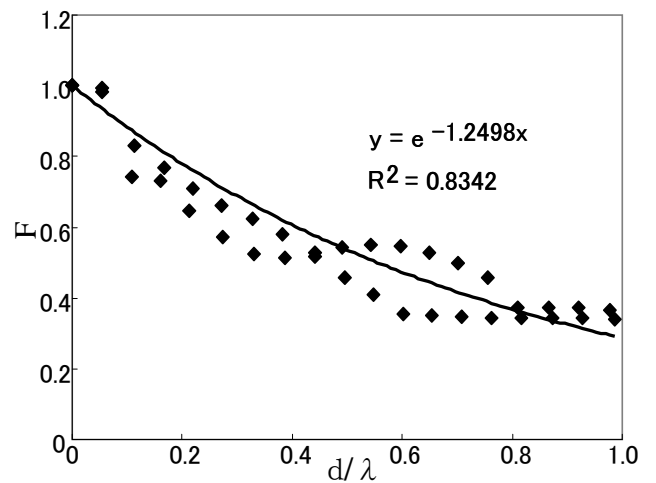


図4 斜めクラック数値解析結果

クラック深さにのみ起因すると考えられる.

#### 4. まとめ

本シミュレーションを用いることで, 実験結果の特徴を大過なく表現できた. したがって, 本数値解析は実験的に再現不可能な大規模構造物に適用できると考えられる. 更に, 斜めクラックに関しても表面波を用いて深さ推定が可能であることが認められたことから, 今後は, 様々な角度と鉛直深さのクラックを有する実供試体を用いた実験を行うことで, 表面波を用いた斜めクラックの深さ推定が可能であるか検証する予定である.

#### 参考文献

- 1) 蔡華堅, 桃木昌平, 塩谷智基: Rayleigh 波減衰特性によるコンクリートひび割れの定量評価に関する基礎研究. コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集第9巻. pp.25-30, 2009.