

## 情報地質学の社会インフラへの展開 (2): コンクリートのひび割れ深さ推定へのレイリー波の減衰理論の適用

奥出 信博\*, 麻植 久史\*, 山本 貴士\*, 塩谷 智基\*

### Expansion of Geoinformatics to Social Infrastructures (2): Application of Rayleigh wave attenuation theory to depth estimation of surface-opening crack in concrete

Nobuhiro Okude\*, Hisafumi Asaue\*, Takashi Yamamoto\*, Tomoki Shiotani\*

\*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, C3-b4S15, Nishikyo, Kyoto 615-8540  
E-mail: okude.nobuhiro.2w@kyoto-u.ac.jp

キーワード: コンクリート, ひび割れ深さ, レイリー波, 減衰理論

Key words: concrete, crack depth, Rayleigh wave, attenuation theory

#### 1. はじめに

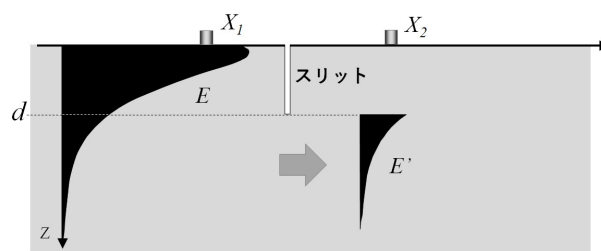
コンクリート構造物のひび割れは、必ずしも構造物としての性能を直ちに損なわせるものではないが、劣化因子の侵入や躯体の一体性を損なわせる要因となり得る。そのため、ひび割れの幅、深さなどの特徴を把握することは、構造物の適切な維持管理において重要であるといえる。ひび割れ幅については外観から判断できるが、ひび割れ深さについては外観からは判断できない。このため、ひび割れ深さの推定には非破壊検査手法、とりわけ弾性波を利用した手法が一般的に用いられる。最も代表的な手法は超音波法であり、 $T_c$ - $T_0$ 法、BS法、修正BS法、位相反転法など複数の手法がある。ただし、これら手法はP波（縦波）の初動部に着目した手法であるため、ひび割れ面の局所的な接触や鉄筋、水等の影響により、ひび割れ深さを過小評価してしまうことが知られている（平田ら、2000）。そこで、呉ら（2003）により、表面波を用いた新たな手法が提案されている。この手法は表面を伝わる弾性波の振幅が、ひび割れの深さに応じて減衰することを利用した方法である。本手法はP波を扱う従来法の欠点を補う手法として期待される。しかし、経験式に基づく評価手法にとどまっておき、理論的考察が不足していることが課題として残る。

著者らは、ひび割れ深さに伴う弾性波の減衰挙動をレイリー波の減衰理論により説明できると考え、その実験的検証を行うとともに、この減衰理論を利用した新たなコンクリートのひび割れ深さ推定法について検討した。

#### 2. レイリー波の減衰理論

第1図に示すように、材料表面に生じたレイリー波の伝播経路にスリットが存在する場合、スリット深さまでのエ

ネルギーのほとんどは反射し透過できない。そのため、スリットの通過後の表面で観測される弾性波の振幅  $X_2$  には、スリットよりも深い部分の入射波のエネルギー  $E'$  のみが寄与すると考えられる。つまり、スリット通過前後の表面における振幅比  $A' (= X_2/X_1)$  は、 $E$  と  $E'$  に依存する。 $E$  と  $E'$  は、レイリー波の上下振動の振幅分布関数  $W(z)$  から運動エネルギーとして理論的に計算することができ、振幅比  $A'$  は、この運動エネルギーの比の平方根として式(1)のように近似的に得ることができる（江島ら、1980）。これはレイリー波の減衰理論として知られる。



第1図 レイリー波の減衰理論の概念図

$$A'(f) = \sqrt{\frac{\int_d^\infty W^2(z) dz}{\int_0^\infty W^2(z) dz}} \quad (1)$$

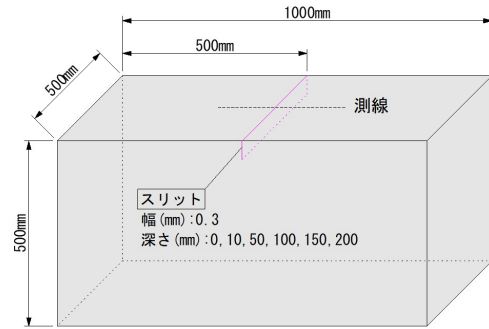
#### 3. コンクリート供試体を用いた検証

コンクリートのひび割れ深さに伴う弾性波の減衰挙動をレイリー波の減衰理論により説明するため、第2図のような模擬的なひび割れを与えたコンクリート供試体を作製し、基礎的な実験を行うこととした。ひび割れを模擬したスリ

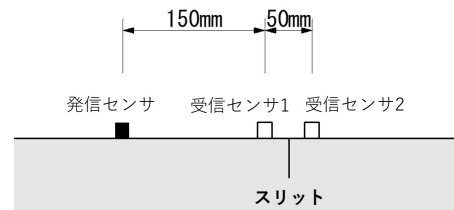
ットは、厚さ 0.3 mm の SUS 板をコンクリートの硬化後に抜き取るにより与えた。スリットの深さを 0 mm (スリットなし)、10 mm、50 mm、100 mm、150 mm、200 mm とした 6 種類の供試体を作製した (コンクリートの圧縮強度 44.8 N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比 0.2、静弾性係数 37.6 kN/mm<sup>2</sup>)。各供試体の測線において、第 3 図に示すとおり発信および受信センサを配置した。センサはいずれも 30 kHz 共振型の圧電型 AE センサとし、ホットメルトボンドでコンクリート表面に接着した。発信センサからファンクションジェネレータを用いて、20 kHz、30 kHz、40 kHz、50 kHz、60 kHz、70 kHz、80 kHz の正弦波パルス 1 波長分を発信し、受信センサ 1, 2 で検出波形を記録した。これらの各波形を Wavelet 変換し、受信センサ 1, 2 の Wavelet 係数の比を振幅比  $A$  として算出した。このとき、受信センサ 1 の Wavelet 係数は最大値を用い、受信センサ 2 では  $\Delta t$  における Wavelet 係数を用いた。ここで  $\Delta t$  とは、スリットのない供試体の受信センサ 1, 2 で得られた Wavelet 係数の最大値の時間差である。さらに、コンクリートの伝播における減衰を除外するため、得られた振幅比  $A$  を、スリットのない供試体で得られた振幅比  $A_0$  で除した値をスリットに伴う振幅比  $A'$  と定義づけた。第 4 図に、実験で得られた振幅比  $A'$  と波長  $\lambda$  との関係を示す。ここで、 $\lambda$  は、 $\Delta t$  とセンサ間隔 (50 mm) から算出される見かけのレイリー波速度  $V_R$  を基に、 $\lambda = V_R / f$  の関係から算出した。 $f$  はファンクションジェネレータで設定した発信周波数 (kHz) とした。図中に示す曲線は、各スリット深さ  $d$  および各波長  $\lambda$  を用いて式(1)から求めた理論的な振幅比  $A'$  を示す。理論曲線と実験値を比較してみると、若干の差異は認められるものの、いずれの  $d$  においても概ね似た傾向が示されていることがわかる。つまり、ひび割れ深さに伴う弾性波の減衰挙動をレイリー波の減衰理論を用いて概ね説明できているといえる。さらに、実験値と式(1)との最小二乗法によるフィッティングにより、ひび割れ深さ  $d$  を推定することを試みた。真値と推定値の比較を第 1 表に示す。スリット深さ 150 mm を除き、10 mm 以内の絶対誤差で推定できることが確認できる。誤差の要因については今後詳細に検討する必要があるが、例えば第 4 図が示すように、波長  $\lambda$  によって理論値と実験値との誤差には差異が認められる。つまり、精度の高いひび割れ深さ推定において、対象とするひび割れ深さに対し、それに最適な波長を採用することなどが必要と考えられる。

4. まとめ

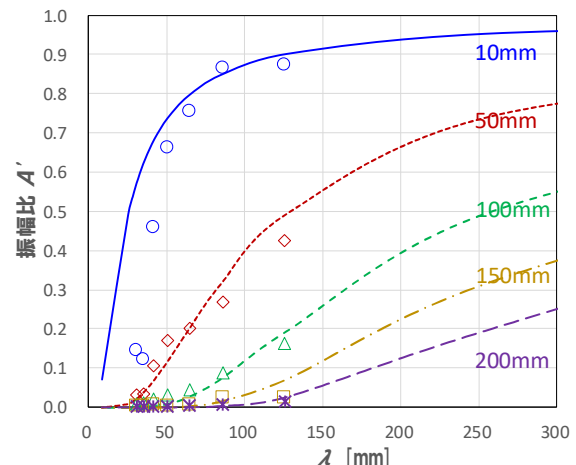
コンクリートのひび割れに伴う振幅の減衰挙動について、レイリー波の減衰理論により説明できると考え、ひび割れを模擬したコンクリート供試体を用いてその検証を試みた。その結果、理論値と実験値は似た傾向を示すことを確認した。つまり、本理論に基づき、コンクリートのひび割れ深さが推定できることを示した。本実験値と理論式とのフィッティングによりひび割れ深さを推定したところ、絶対誤差として概ね 10 mm 以内の範囲で推定できることがわかった。本研究の範囲では、誤差要因の明示や、実際のひび割れに対する適用性を示すには至らなかったが、これまで報告されてきた表面波法によるひび割れ深さ推定法の課題 (理論的考察の不足点) を補う一知見を示した。



第2図 コンクリート供試体



第3図 スリットとセンサの配置



第4図 実験値と理論値の比較

第1表 真値と推定値の比較

	真値 (mm)	推定値 (mm)	絶対誤差 (mm)
実験	10	16	6
	50	46	4
	100	92	8
	150	181	31
	200	208	8

文 献

平田隆祥, 魚本健人 (2000) 超音波法によるコンクリート構造物のひび割れ調査に関する研究(1), 生産研究, 第 52 巻, 10 号, pp.493-496  
 吳佳擘, 堤知明, 江川顕一郎 (2003) 表面波を用いたひび割れ深さの新しい測定技術, コンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集, 日本非破壊検査協会, pp.243-252  
 江島淳, 吉岡修, 坂田英洋, 吉村正義 (1980) 空溝と地中壁による振動遮断効果, 土と基礎, 28-3, pp.49-55