

空間自己相関法によるコンクリート構造物の表層劣化深さの推定

飛島建設 正会員 桃木 昌平

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化現象には、すりへり・凍結融解・化学的侵食・疲労などに伴う微細なひび割れの発生や多孔質化によって、表面より脆弱化していく表層劣化がある。この表層劣化への対処となる断面修復工法などを適用する際、脆弱化したコンクリートのみを除去することが合理的であることから、表面からのくらの深さまでコンクリートが脆弱化しているかという表層劣化深さを推定する方法を検討した。

本稿では、地盤構造の推定に利用される空間自己相関法に着目し、表層劣化を模擬したコンクリート試験体を用いて、コンクリート構造物の表層劣化深さ推定への活用可能性を検証した結果について示す。

2. 空間自己相関法

空間自己相関法は、地盤を伝搬する地震動や常時微動を観測し、得られた波形から表面波位相速度を求める方法である。表面波には、位相速度が波長によって変化する分散性という特性があり、波長に相当する深さごとに位相速度を求めることで、地盤の多層構造を推定することができる。この表面波位相速度を、比較的少ない数のセンサで求められる方法が空間自己相関法である。以下に特徴となる項目を示す。

2.1 センサ設置

空間自己相関法におけるセンサの設置例を図1に示す。センサは円の中心と同円周上に等間隔に設置することが基本であり、本研究では、地盤でも一般的なセンサ数4個の設置とした。なお、この空間自己相関法における波長は、この設置する円の半径の2倍から10倍までが対象となる¹⁾ため、地盤では観測場所の確保が困難な場合がある。しかし、コンクリート構造物の部材厚さを対象とするならば、センサ設置はコンパクトに収まることも利点と考えられる。

2.2 位相速度の求め方

空間自己相関法による各波長における位相速度の求め方²⁾を以下に示す。

円の中心点Aと半径 r だけ離れた点Bで観測される波形をフーリエ変換したものを次のように表す。

$$X_A(f) = U_A(f) \exp(-i\phi_A(f)) \quad (1)$$

$$X_B(f) = U_B(f) \exp(-i\phi_B(f)) \quad (2)$$

f は周波数、 U は振幅、 i は虚数、 ϕ は位相、下添字は観測点を表す。2点間の複素コヒーレンス $coh(f, r)$ は、次式となる。

$$coh(f, r) = \frac{X_A(f) \cdot X_B^*(f)}{U_A(f) \cdot U_B(f)} = \exp\{i(\phi_B - \phi_A)\} = \exp\left\{i \frac{2\pi fr}{c(f, \psi)}\right\} \quad (3)$$

*は共役複素数、 ψ は到来方向と2点間とでなす方位角、 c は見かけの位相速度である。実際の観測では到来方向が不明であることから、次式のように複素コヒーレンスに対し方位平均したものを空間自己相関係数 $\rho(f, r)$ と定義する。

$$\rho(f, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{i \frac{2\pi fr}{c(f, \psi)}\right\} d\psi = J_0\left(\frac{2\pi fr}{c(f)}\right) \quad (4)$$

$J_0(\dots)$ は第1種0次のベッセル関数である。したがって、実際の観測では中心点と円周上の観測点のペアからそれぞれ複素コヒーレンスを算出し、それらを平均した空間自己相関係数を、第1種0次ベッセル関数とフィッティングさせることで、各波長 $\lambda(=1/f)$ における表面波位相速度 $c(f)$ を推定することができる。

キーワード コンクリート構造物、表層劣化、空間自己相関法

連絡先 〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472 飛島建設(株)技術研究所 TEL04-7198-1101

3. 表層劣化模擬試験体による検証

空間自己相関法によりコンクリート構造物の表面波位相速度を波長ごとに求め、コンクリートの表層劣化深さを推定することが可能か確かめるため、表層劣化を模擬した試験体を作製し、検証を行った。

試験体の寸法は、 $\square 900 \times 780 \text{mm}$ 、厚さ 300mm である。表層劣化は、フレッシュコンクリートにアルミ粉末を混ぜ込み、水素ガスを発生させながら硬化させることで、多孔質で脆弱になる発泡コンクリートを打重ねることで模擬した。試験体は脆弱層（発泡コンクリート）が A：無し（健全）、B：表面から 50mm の深さまで、C：表面から半分まで、D：全ての 4 水準とした（図 2）。

センサは加速度計を用いた。試験体の中央に、図 1 と同様に半径 25mm の円の中心と同円周上の 3 等分点となるよう設置した。この場合、前述したように対象となる波長は半径の 2~10 倍である 50~250mm となるが、試験体底面からの反射波の影響を考慮し、対象となる波長は 200mm までとした。加速度計を設置した後、打音検査の要領で試験体表面をまんべんなく 10 秒間ハンマーで打撃し、データロガーで記録したその連続打撃波形に対して空間自己相関法を用いて、表面波位相速度を求めた（図 3）。

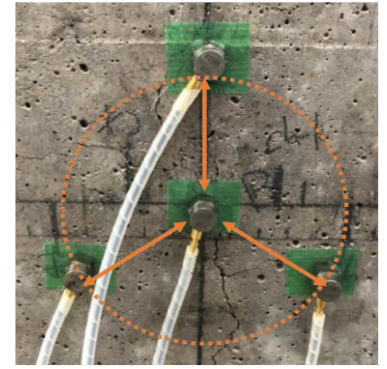


図 1 センサ設置例

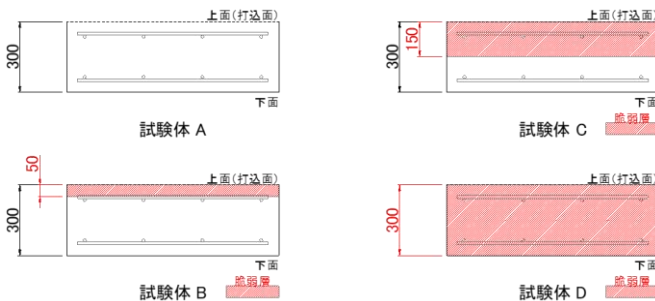


図 2 表層劣化模擬試験体

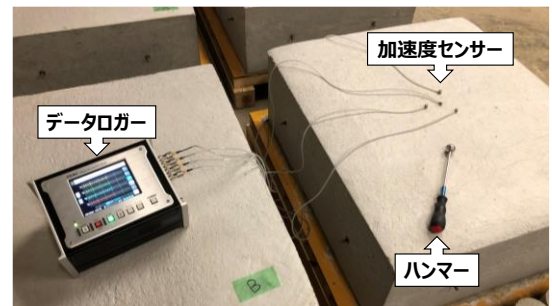


図 3 計測方法

4. 結果と考察

A~D の各試験体において空間自己相関法により求めた、波長 50・100・150・200mm の表面波位相速度を図 4 に示す。各波長の位相速度は、全て健全な A では概ね 2,100m/s（青）以上、全て脆弱層である D では 1,900m/s 未満（赤）であったのに対し、脆弱層を有する B と C では、脆弱層が対象範囲となる短い波長の位相速度は D と同程度、健全層まで対象となる長い波長の位相速度は D よりも速くなる傾向が確認された。また、B と C における長い波長の位相速度の差異は、対象範囲を占める脆弱層の深さの違いを分散性により示したものと考えられる。このように、空間自己相関法によって求められた表面波位相速度が、相対的ではあるが、表層劣化深さの違いによる分散性を示したことから、空間自己相関法により、コンクリート構造物の表層劣化深さを推定できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 紺野克昭：地下構造推定に用いる 2 点間および 3 点間空間自己相関法に関する理論的検討，土木学会論文集 No.654/I-52，pp.367-375，2000。
- 2) 岡谷智一他：微動計 McSEIS-MT NEO の開発と微動探査手法概説，応用地質技術年報 No.31，pp.75-84，2012。

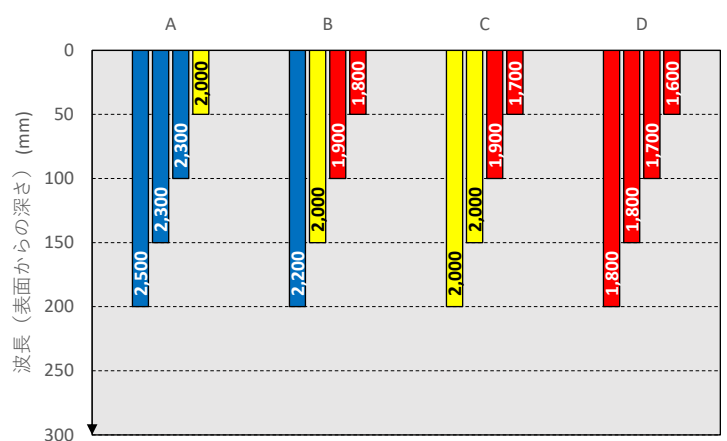


図 4 空間自己相関法により求めた波長ごとの表面波位相速度（単位：m/s）