

コンクリート構造物の非破壊診断手法『VR コアサンプリング』の検討

Examination of “VR Core Sampling”

桃 木 昌 平^{*1}

Shouhei Momoki

【要旨】

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。この表層劣化を断面修復工法などにより補修する際、健全な部分を残して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、表面からどのくらい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非破壊で推定する方法を検討した。

本研究では、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適用可能性を検証した。試験体による検証の結果、空間自己相関法により求められた表面波位相速度が、表層劣化深さの違いによる分散性を示したことから、コンクリート構造物の表層劣化深さを推定でき、また、その分散性を示す画像が仮想的にコアを採取した様であることから、『VR コアサンプリング』として技術展開できる可能性が示唆された。

【キーワード】 コンクリート構造物 表層劣化 非破壊診断 空間自己相関法

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化現象には、経年の環境作用（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で、表面より脆弱化する『表層劣化』があり、脆弱化したコンクリートを取り除き、取り除かれた断面を新たにコンクリート等で修復する断面修復工法により補修する必要がある。

脆弱化したコンクリートだけを取り除き、健全なコンクリートは残したまま断面修復することが合理的であるが、表層劣化したコンクリート構造物において、「表面からどのくらいまでコンクリートが脆弱化しているか」を調査するためには、ボーリングによりコアを採取し観察するか、ドリルで削孔しながら触感で判断するといった、破壊を伴う『サンプリング』に頼らざるを得なかった。

コア採取やドリル削孔といった『サンプリング』による調査は、破壊を伴うことから多用不可であり、局所的な評価となる。その局所的な評価が、対象となるコンクリート構造物の代表値として扱えるかは不透明であり、時には過大評価のため、脆弱化したコンクリートを取り除ききれなかったり、健全なコンクリートまで取り除き過ぎたりしてしまうこともある。また、破壊により調査箇所は失われてしまうため、同一箇所での繰返し調査による経年変化の確認も不可となり、合理的ではない。

筆者は、実態を直接的に評価する『サンプリング』の実施（破壊）は最小化し、結果はより効果的に利用できるよう、何か所でも何度でも「表面からどのくらいまでコンクリートが脆弱化しているか」評価可能な非破壊による診断手法を開発し、『サンプリング』と照合して評価することが、表層劣化したコンクリート構造物の断面修復工法における最も合理的な調査方法であると考えた。

そこで本研究では、地盤構造の推定に利用される空間自己相関法に着目し、何か所でも何度でも「表面からどのくらいまでコンクリートが脆弱化しているか」評価可能な非破壊診断手法『VR コアサンプリング』の検討を行った。本稿では、空間自己相関法の概要を述べるとともに、表層劣化を模擬したコンクリート試験体を用いた検証の結果、空間自己相関法で求められた表面波位相速度の分散性により、「仮想的にコアを採取し、表層劣化深さを非破壊で評価できる」可能性が見出されたことについて述べる。

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(図-1)。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-2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を以下に示す。

図-3に示すように、円の中心点Aと半径rだけ離れた点Bについて、特定の方向から到来する表面波を仮定する。点A及び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。

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

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

ここに、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。

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

*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ρ(f,r)と定義する。

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

$J_0(\dots)$ 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λ(=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。

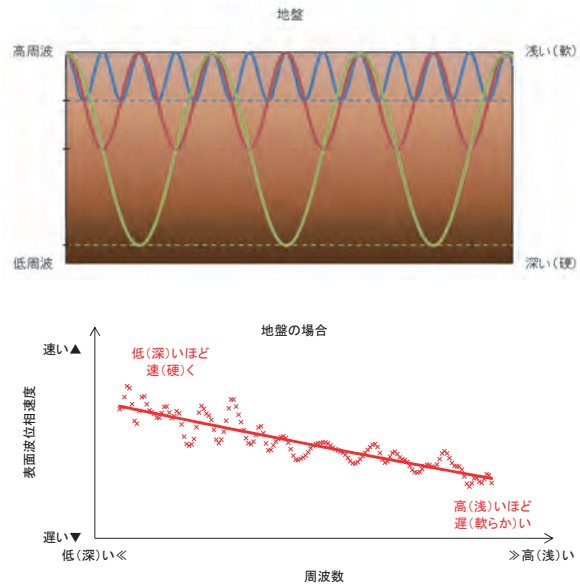


図-1 表面波位相速度分散性による地盤構造推定

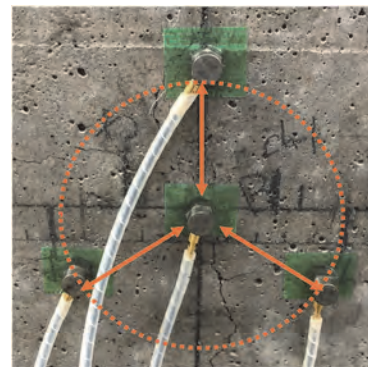


図-2 センサ設置例

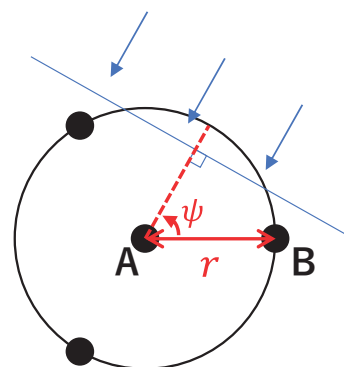
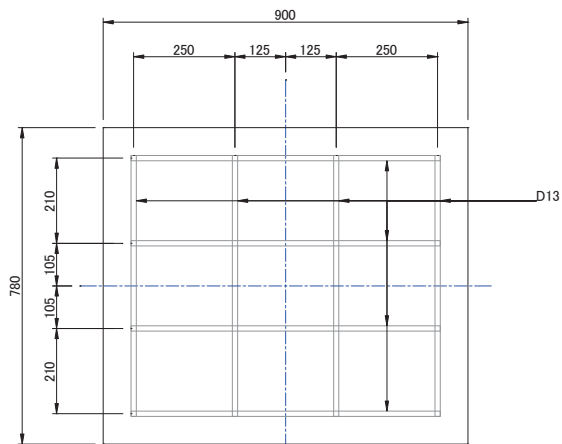


図-3 空間自己相関法による表面波の観測模式図

3. 表層模擬劣化試験体による検証

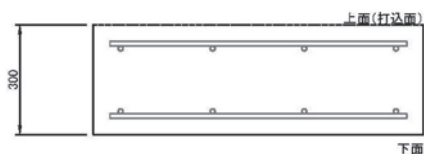
空間自己相関法によりコンクリート構造物の表面波位相速度を波長ごとに求め、コンクリートの表層劣化深さを推定することが可能か確かめるため、表層劣化を模擬した試験体を作製し、検証を行った。

試験体の寸法は、 $\square 900 \times 780 \text{mm}$ 、厚さ 300mm である

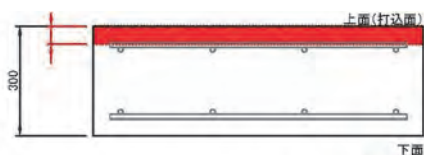


平面図

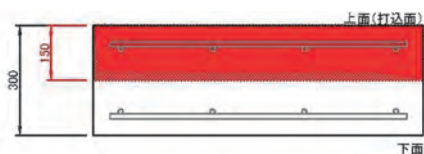
図-4 試験体寸法



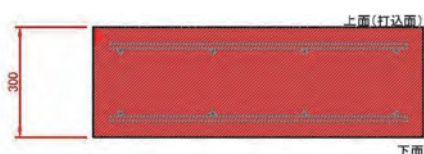
試験体 A



試験体 B



試験体 C

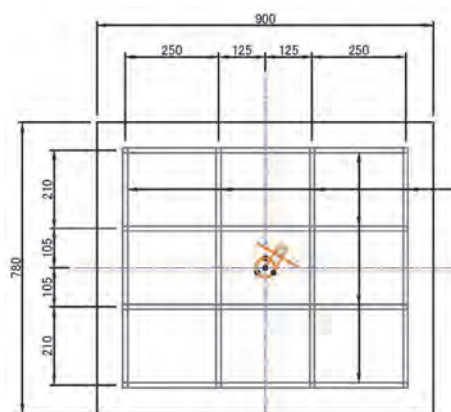


試験体 D

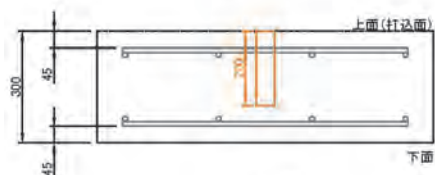
図-5 表層劣化模擬ケース

(図-4)．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 ケースとした（図-5）．

センサは加速度計を用いた．試験体の中央に、図-2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 $50 \sim 250 \text{mm}$ 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（図-6）．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-7）．



平面図



断面図

図-6 センサ設置および評価範囲

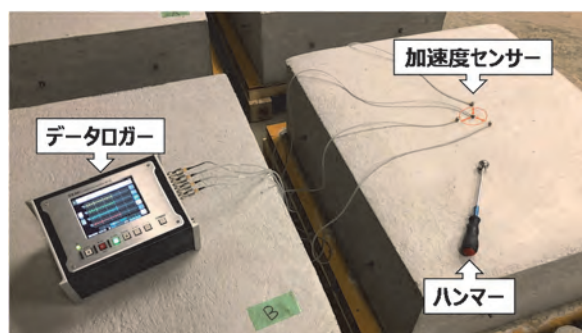


図-7 空間自己相関法による計測状況

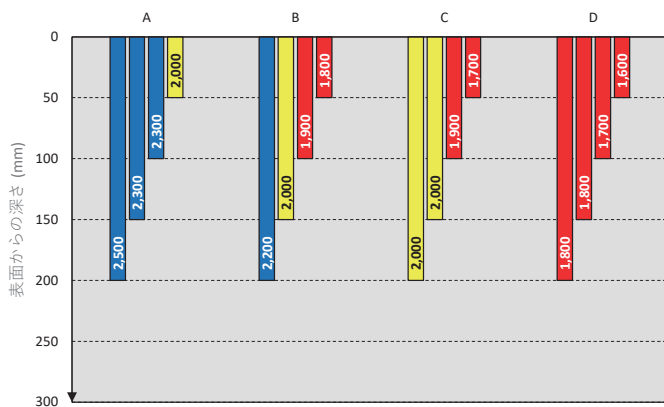


図-8 空間自己相関法により求めた波長ごとの表面波位相速度

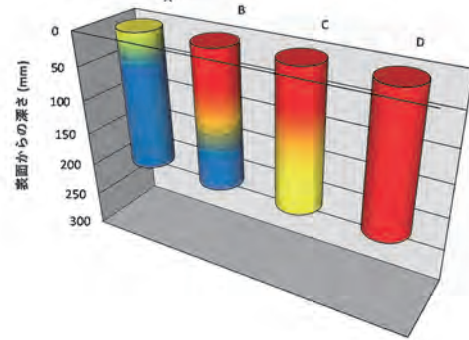


図-9 評価画像『VR コア』

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-8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。また、これらは図-9に示すように半径 25mm×深さ 200mm の仮想的なコア『VR コア』として表すことができ、「仮想的にコアを採取し、表層劣化深さを非破壊で評価できる」可能性が見出された。

5. おわりに

本研究では、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適用可能性を検証した。試験体による検証の結果、空間自己相関法により求められた表面波位相速度が、表層劣化深さの違いによる分散性を示したことから、コンクリート構造物の表層劣化深さを推定でき、また、その分散性を示す画像が仮想的にコアを採取した様であることから、『VR コアサンプリング』として技術展開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，鈴木晴彦，中川博人：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, 1996.

Summary The degradation phenomena of concrete structures include the generation of fine cracks due to abrasion, freezing and thawing, chemical corrosion, and fatigue, as well as surface layer degradation in which the structures are gradually embrittled from the surface due to the generation of porosities. When repairing this surface layer in the section repair method, it is rational to remove only embrittled concrete and allowing the sound part to remain. Therefore, we studied the nondestructive method for estimating the surface degradation depth, which means how deep the concrete is embrittled from the surface.

This paper focused on the spatial autocorrelation technique utilized for the estimation of the soil structure and verified the possibility of the application to the estimation of surface layer degradation depth of a concrete structure using a concrete specimen simulating surface layer degradation. As a result of the verification using the specimen, since the surface wave phase speed obtained by the spatial autocorrelation technique showed dispersibility due to the difference in the surface layer degradation depth, we can estimate the surface layer degradation depth of a concrete structure, and since the image showing its dispersibility appeared to be virtual sampling of the core, the possibility of technical development as VR core sampling was suggested.

Key Words : Concrete structure, surface layer degradation, non-destructive diagnosis, spatial autocorrelation technique