コンクリート表面波減衰トモグラフィにおけるスパース逆解析手法の提案

孫 文旭*, 麻植 久史*, 桑谷 立**, 塩谷 智基*

Sparse Inversion Approach for Surface Wave Attenuation Tomography in Concrete

Wenxu Sun^{*}, Hisafumi Asaue^{*}, Tatsu Kuwatani^{**}, Tomoki Shiotani^{*}

*京都大学成長戦略本部 インフラ先端研究部門 Laboratory on Innovative Techniques for Infrastructures,

Institutional Advancement and Communication, Kyoto University, Kyotodaigaku-Katsura,

Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8245, Japan.

E-mail: sun.wenxu.3c@kyoto-u.ac.jp

**国立研究開発法人 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 火山・地球内部研究センター

Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.

キーワード:損傷評価, 可視化, 劣化・損傷, インフラ構造物, シミュレーション Key words: Damage evaluation, Visualization, Deteriolation, Infrastructure, Simulation.

(3)

1. はじめに

橋梁・トンネルなどのインフラ構造物を安全に供用する ためには健全性評価が重要である。特にコンクリート構造 物では、ひび割れなどの劣化・損傷進展が構造耐力に影響す るため、それらが顕在化する前に非破壊で検知することが 望まれている。内部損傷を検知する手法として、表面波速度 トモグラフィが良く用いられる。また、速度に比べて振幅減 衰特性の方が劣化・損傷に対して高感度であることが示さ れている¹⁾。しかし、この減衰を利用した表面波トモグラフ ィでは、供試体を対象としており逆解析で誤差項のみ考慮 しており、実構造物での適用では解析の発散や虚像が生じ る可能性が高い。そのため、本研究では、表面波減衰トモグ ラフィにおけるスパースモデリング手法を提案し、高精度 な可視化方法の開発を目的とした基礎的検討を実施した。

2. 減衰トモグラフィ理論式

表面波が媒体中を伝播する際,その振幅 A(l) は距離に応じて指数的に減衰する。伝播距離を l,送信点での振幅 eA_0 ,減衰パラメータを mとしたとき,波形減衰比は次式で表される:

$$A(l)/A_0 = l^{-0.5} \cdot e^{-ml} \tag{1}$$

ここで、 $l^{-0.5}$ は距離減衰、 e^{-ml} は粘性減衰を表す項である。両辺の自然対数を取ることで、線形和の形に変換でき、逆解析に利用しやすい形となる:

 $\ln(A(l)/A_0) = -0.5 \sum \ln l_i - \sum m_i l_i$ (2)

このように、各セルの波線長 l_i は既知であり、減衰パラ メータ m_i の空間分布を推定変数とすることで、損傷部の 高感度な可視化が可能となる。式(2)の左辺は観測された振 幅から直接計算可能であり、右辺第 1 項は既知の幾何モデ ルに基づく既知量であるため、本研究では、右辺第 2 項の みに着目する。このため、式(3)のように整理できる。

$$d = Gm + \varepsilon$$

ここで、d は観測振幅から得られる有効減衰量ベクトル (幾何項を差し引いたもの);m はセルごとの減衰パラメ ータ;G は各観測においてセル iを通過する波線長さ l_i を成分とする感度行列; ε は観測ノイズである。

3. シミュレーション実験

本研究では、劣化・損傷を模擬した 2 次元表面を伝搬す る表面波の減衰特性から、その劣化・損傷位置の再現を試み た。具体的には,正則化項および制約条件の導入効果を検討 するため、以下の3条件において数値シミュレーションを 実施して、その精度を検証した:① 正則化項なし、② L2 正則化項付き、③スパースモデリング(L2 正則化と制約条 件の併用)。パラメータ推定には最小二乗法による最適化を 行った。ここで,許容誤差は1.0×10-6,最大反復回数は100 回に設定した。解析モデルは、650mm×650mmの正方形 領域を 50 mm 間隔で格子分割し, 各格子には, 減衰率 m が 設定されている。計 16 点にセンサ(送受信点)を 200 mm 間隔で配置している(図1)。すなわち,合計 240本の波線 (センサ間の伝播経路)が対象内に存在する。モデル内には 大小3カ所の劣化・損傷が模擬されており、健全部はm = 1.0, 劣化・損傷は m = 50 と, を明示的に区分した。この とき、ノイズフリーおよび5%ランダムノイズの2条件で解



図1 センサ配置と欠陥の位置



図2 推定結果. ① 正則化項なし, ② L2 正則化項付き; ③ スパースモデリング.

析精度の比較を行った。

①と②では式(4)を目的関数とした。①では $\alpha = 0$, $\beta = 1$ に固定,②では、の以下の条件で解析を実施した。

$$\min \beta |\boldsymbol{Gm} - \boldsymbol{d}|^2 + \alpha |\boldsymbol{Lm}|^2 \tag{4}$$

ここで, α , β : ハイパーパラメータ; **L**: モデル空間のスム ージング演算子である。③では式(4)に示す目的関数に対 し、制約条件 **m** ≥ m_{\min} を加えた。ここで、 m_{\min} を1に 設定した。ハイパーパラメータの推定には、桑谷ら³⁾が提案 した解像度行列を用いたベイズ推論に基づくハイパーパラ メータ推定手法を用いた。

4. 解析結果

①~③の各手法について、ノイズフリーおよび 5%のラン ダムノイズでの解析結果を示す。結果の精度評価には、真値 との相関係数(Correlation Coefficient: CC)および、二乗平 均平方根誤差(Root Mean Square Error: RMSE)を用いた。 ノイズフリーの条件において、③が最も良好な結果を示し、 CC および RSME はそれぞれ 1.0 と 0.0 となった。一方、① および②の結果では、両者とも CC と RSME がそれぞれ 0.92 および 0.88、5.28 および 6.36 となっており、モデルの推定 結果(図 2)も③に比べて再現度が低くなった。次に、5% のランダムノイズを加えたデータに対する解析結果は、③ で CC と RMSE が 0.98 と 2.45 となり高精度を維持した。 これに対して①の CC と RMSE が 0.08,と 1830、②では 0.86 と 6.88 となった。結果として、表面波減衰トモグラフィの 逆解析においてスパースモデリングの導入は効果的である ことが示された。

5. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の内部劣化・損傷を高感 度に評価するため、スパース逆解析アルゴリズムを導入し た表面波減衰トモグラフィを提案し、その性能を数値シミ ュレーションにより検証した。ここで、正則化項なし、L2 正則化項付き、および正則化項と制約条件を効果的に組み 込んだスパースモデリングの3条件で比較した。

その結果,スパースモデリングは,ノイズフリーで CC 1.0, RMSE 0.0 という高精度を示し,5%のランダムノイズが存 在する条件下でも CC 0.98, RMSE 2.45 と高精度を維持した。 一方,L2 正則化付き最小二乗法はノイズ条件下で一定の推 定能力を示したが,スパースモデリング手法に比べて精度 が劣り,正則化なしの最小二乗法はノイズに対して極めて 脆弱であった。

これらの結果から、表面波減衰トモグラフィの逆解析手 法におけるスパースモデリングの導入は、表面波伝搬にお ける減衰特性からの劣化・損傷位置の際現に優れた性能を 有し、現場応用に向けた信頼性の高い劣化・損傷可視化が可 能であることが確認された。今後は社会実装を見据え、実構 造物から取得された計測データを用いた検証に取り組む予 定である。

謝辞

本研究の一部は,戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)第3期「スマートインフラマネジメントシステムの 構築」JPJ012187(研究推進法人:土木研究所)によって実 施した。本研究にあたりご協力いただいた関係各位に感謝 の意を表する。

文 献

- H.K. Chai et al., Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound, NDT & E International, 44 (2), pp.206-215, 2011.
- 桃木昌平,蔡 華堅,塩谷智基,小林義和.弾性波の 減衰特性を用いたコンクリート内部損傷可視化の開発 とびしま技法 No.58,2009.
- Tatsu Kuwatani et al., Hyperparameter estimation using a resolution matrix for Bayesian sensing, *Inverse Problems* 38 124004, 2022.