

情報地質学の社会インフラへの展開(3) : 三次元弾性波トモグラフィ法とBIM/CIMへの適用による ダム門柱コンクリートの健全性評価

小椋紀彦*・サグラジャン アルトウル**・麻植久史*・塩谷智基*

Evaluation of Concrete Integrity of Dam Columns by Three-Dimensional Elastic Wave Tomography and Application to BIM/CIM

Norihiko Ogura*, Artur Sagradyan**, Hisafumi Asaue*, Tomoki Shiotani*

*京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 インフラ先端技術産学共同講座 iTi Laboratory, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, C3-b4S15, Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-Ku, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail:ogura.norihiko.2z@kyoto-u.ac.jp

**株式会社 CORE 技術研究所 Department of Technology, CORE Institute of Technology Corp., 3-8-5 VORT Bld.8F, Asakusabashi, Taitou-ku, Tokyo 111-0053, Japan.

キーワード：弾性波トモグラフィ法, ダム, 三次元点群化, BIM/CIM

Key words : Elastic wave tomography, Dam, 3D point cloud, BIM / CIM

1. はじめに

大型コンクリート構造物の維持管理においては、損傷の規模や分布を全体的にかつ効率的に把握したうえで、経済性を踏まえた詳細調査を策定し、長寿命化を図るための維持管理計画を策定することが重要である。

三次元弾性波トモグラフィ法は、計測対象内部を通過した弾性波から対象の健全性に関わる空間的な情報を同定する手法であり、経年劣化した大型コンクリート構造物の健全性を合理的かつ定量的に評価できる手法として期待されている(國居, 2021)。

本研究では、竣工後40年以上経過したダムの門柱コンクリートで確認されたひび割れを対象に、三次元弾性波トモグラフィ法を用いた健全性評価の適用性を検証した。さらに、その調査結果をBIM/CIMへ適用することを試みた。

2. 解析手法

2.1 弾性波トモグラフィ法

弾性波トモグラフィ法は、計測対象に複数の発信点と受信点を設けることで、多方向の走査線情報(弾性波伝搬時間)を取得し、対象領域をそれら走査線情報のすべてに整合する有限要素モデルで表す手法である。ある発信点と受信点までの弾性波伝搬時間(観測走時)は、次式で求められる。

$$T_{obs} = T_o - T_s$$

ここで、 T_{obs} : 観測走時, T_o : 受信時刻, T_s : 発信時刻である。

対象とする構造物を要素に分割し、発信点と受信点の位置情報を節点に与える。そして、分割された要素に初期値として伝搬速度の逆数であるスローネス s を与え、初期モデルを作成する。その結果、この要素分割モデルで得られる理

論走時 T_{cal} 、走時時差 ΔT は次式で求められる。

$$T_{cal} = \sum_j s_j^* l_j$$

$$\Delta T = T_{obs} - T_{cal}$$

ここで、 T_{cal} : 理論走時, s_j^* : 要素 j に初期値として与えたスローネス, l_j : 要素 j を横切る波線長, ΔT : 走時残差である。

得られた走時残差 ΔT が許容値内の範囲内かどうかをチェックする。残差が大きい場合には、各波線経路で得られる観測走時に対する理論走時の走時残差を解消するために各要素のスローネスを補正する。このアルゴリズムにより、各要素のスローネスを得ることにより、対象領域を弾性波速度で表すことができる。各要素の速度値の補間には、逆距離加重法を用いた。

2.2 波線追跡法

トモグラフィ解析において理論上の弾性波の伝搬経路を特定するため、本研究では、波動の伝搬経路の計算に波線追跡法を用いた。波線追跡法は、精度の高いトモグラフィ結果を得るために、異なる媒質の境界面における弾性波の屈折や回折を考慮したものである。

3. 計測方法

3.1 対象施設の概要

対象施設は、竣工後40年以上経過したフィルダム洪水吐きのオリフィスゲートの門柱側壁である。鉄筋かぶりは150mmであることが確認されており、鋼製のアンカレッジが埋設されている。左岸側壁には鉄筋軸方向に沿ったひび割れやエフロレッセンスの析出等が確認されており、アルカリシリカ反応によるコンクリートの膨張によってひび割れが

生じたものと推定されている。ひび割れ幅は、門柱側壁で 4 mm 程度、門柱下流端の突出部で 7 mm 程度確認されている。これらのひび割れがアンカレッジまで到達した場合、アンカレッジの鋼材腐食の進行や門柱コンクリート変形によりゲート操作に支障をきたすことが懸念されている。

3.2 計測方法

門柱内部に存在する損傷の三次元分布を確認するため、三次元弾性波トモグラフィを適用した。計測用センサは圧電型加速度センサを用い、サンプリング周波数は 200kHz とした。弾性波の励起方法には鋼球打撃ハンマを用い、10 回の打撃で得られた波形をスタッキングしたものを解析に供した。解析精度を考慮してセンサ間隔を 1.3m~1.5m とした。また、調査対象範囲を 3 ヶ所に分割し、解析結果を三次元トモグラフィ作成時に統合して表示することとした。なお、コンクリートの弾性波速度の初期値は 4000m/s として解析した。

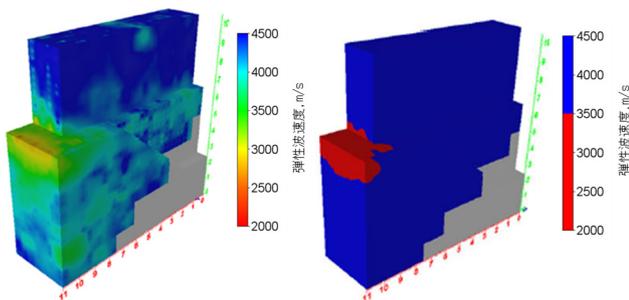
3.3 解析結果

第 1 図の左側に三次元弾性波トモグラフィの解析結果、右側に二値化表示した結果を示す。アルカリシリカ反応により劣化したコンクリートでは、弾性係数が顕著に低下するため、健全性評価に弾性波の速度変化を用いることは有効であると言われているが、本研究で行った三次元弾性波トモグラフィ法においても弾性波速度分布から低速度領域を捉えることができています。

ゲート室下流端突出部に 3000m/s 以下の低速度領域が現れている。これらの箇所は、外観目視調査でも顕著なひび割れが発生しており、低速度領域は概ねこの位置で整合している。

また、より健全性評価を明瞭にするため、弾性波速度の閾値を 3500m/s と仮定し、3500m/s 未満を損傷部として赤色、3500m/s 以上を健全部として青色の二値化で表示した。本研究における解析結果では、鉄筋のかぶりである 150 mm より深部には明瞭な低速度領域は見られず、門柱側壁の幅の広いひび割れは部材深部に至っていないと推定された。

大型コンクリート構造物の部材内部の健全性評価を合理的かつ効率的に実施できる可能性が示されたと考えられる。

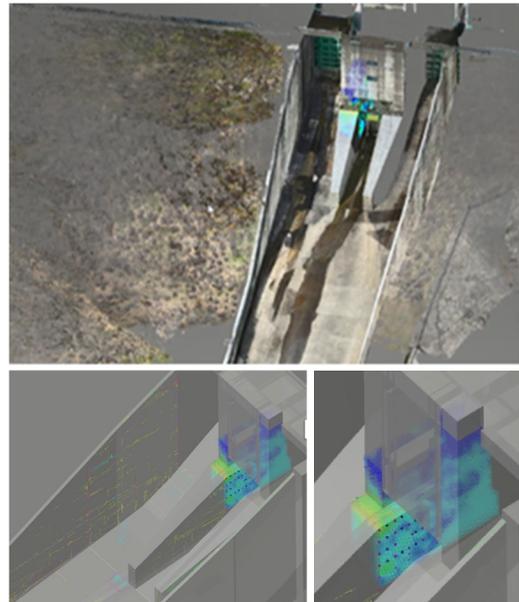


第 1 図 解析結果（左側：三次元表示，右側：二値化表示）

4. BIM/CIM と弾性波トモグラフィ結果の融合

クラウドサービスの三次元点群化技術を活用し、これまでに述べたオフィスゲートの門柱側壁で実施した弾性波速度分布の三次元弾性波トモグラフィのモデルに、ドローンで撮影した画像や動画データ、二次元の外観調査結果、および設計図面から作成した三次元 CAD モデルを全て重ね合わせる統合を試みた。詳細なデータがある箇所については、三次元 CAD 内に内部情報として定量的な数値を盛り込んでいる。

三次元点群化として統合したモデルの結果を第 2 図に示す。上段が三次元点群化の全体画像であり、360 度全方向の角度から観察が可能である。左下側が外観調査結果と静止画像をレイヤーとして重ね合わせた結果であり、変状の大きさや長さ、ひび割れ幅を含む情報が視覚的に捉えられる。さらに CAD 情報から定量的な数値を算出することも可能である。また、右下の三次元弾性波トモグラフィのモデルが、構造物内部に組み込まれることで、外観変状の結果と重ね合わせることができ、表面情報と内部情報の詳細な比較検討が可能となった。



第 2 図 三次元点群化として統合したモデル

5. まとめ

本研究では、ひび割れが顕在化した大型コンクリート構造物を対象に、三次元弾性波トモグラフィ法を用いた健全性評価を行い、それらを BIM/CIM へ適用させることによる有用性を検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 大型コンクリート構造物の健全性評価手法として、三次元弾性波トモグラフィ法で得られる速度分布を利用した部材内部の概略評価が有効であることが示された。
- (2) 弾性波速度にコンクリートの損傷にかかる閾値を設定してトモグラフィ結果を二値化表示することで、部材内部の損傷範囲をより明確に表示できることが示された。これにより、既存構造物の補修の優先度を効率的に評価できるだけでなく、新設構造物の設計に際しての予防保全にかかる基礎資料に資することができ、大型コンクリート構造物の維持管理コスト縮減に大いに期待できると考えられる。
- (3) BIM/CIM に弾性波トモグラフィ結果を適用させることにより、表面情報と内部情報の詳細な比較検討が可能となった。今後、これら BIM/CIM モデルに、さらに AI 技術を反映して外観変状の自動判定などが導入できれば、インフラ維持管理分野において更なる省力化が期待できると考えられる。

文 献

國居史武(2021) 三次元弾性波トモグラフィ法による河口堰堰柱コンクリートの健全性評価。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, vol.21, pp.478-483.