

衝撃弾性波を用いた簡易な逆投影法による空洞探査

Inside Cavity Survey of Concrete Structure by Seismic Tomography

鈴木克利 山内比呂士 大石敏雄 大関安信

Katsutoshi Suzuki Hiroshi Yamanouchi Toshio Ooishi Yasunobu Oozeki

オリジナル設計株式会社 (Original Engineering Consultants Co.,Ltd)

極壇 邦夫

Kunio Gokudan アイテックス技術協会 (iTECS Association)

大型供試体に疑似ジャンカを設けて透過弾性波速度による弾性波トモグラフィを試行した。弾性波速度の測定が重要であり、疑似ジャンカと速度低下の弾性波経路線が一致していると良好な弾性波トモグラフィが得られる。しかし、対応が悪い場合は、実際の欠陥と計算の欠陥は一致しないでひずむ傾向を示す。弾性波トモグラフィの精度を向上させるには、適切なハンマーの使用、透過弾性波の経路数やブロック数を選定することが重要であるが、簡略な方法でも過去の超音波法とほぼ同等な結果が得られるので、実用的には有効と思われる。

keyword 弾性波トモグラフィ 衝撃弾性波 透過 P 波速度 逆投影法

1. はじめに

コンクリートの内部欠陥を探査する方法として、医療技術分野で発展した X 線 CT を参考にしたサイズミックトモグラフィ法がある¹⁾。超音波法を用いた研究事例は多いが、衝撃弾性波法では 4 方向から測定して空洞を検出した報告がある^{2),3)}。

最近、弾性波速度の低下だけではなく弾性波の減衰特性を利用した方法が開発され高精度の診断ができると報告されている⁴⁾。弾性波の減衰比を導入することで、微少なひび割れもこれまでより検知しやすくなり、アルカリ骨材反応や鉄筋腐食など内部の微少クラック発生の段階で検出できると報告されているが、高度の解析技術が必要とされ一般的には難解である。

今回は、基本的で簡単な弾性波コンピュータトモグラフィ(弾性波 CT) を大型供試体の疑似ジャンカに適用して、どの程度疑似ジャンカを探査できるか実験したので報告する。

2. 弾性波 CT について

弾性波 CT のサイズミックトモグラフィ法は、X 線 CT の原理を導入したもので、対象物の断面をいくつかのブロックに分割し、各波線の平均速度からブロックごとの速度を求めるものである。その解析法としては、逆投影法、同時反復直線波法があるが、最も簡易な逆投影法を用いることとした。

逆投影法は、コンクリートの測定断面において各方向で打撃点・受信点を設置し、弾性波伝搬波形から伝搬時間を測定する。また、測定経路の断面をブロック化して、ブロックごとの速度値を算出し、弾性波がブロックを通過する長さで重み付け、速度の重み付き平均値を求める。各波線がブロックを通過する長さで重み付けをすると j 番目のブロックの求める速度 V_j は

$$V_j = \frac{\sum(l_{ij}V_j)}{\sum l_{ij}} \quad (1)$$

である。X線CTは全方向から投射し多数の照射線を総合して判定する。今回は1方向だけの測定であるので、欠陥像は実際ものと異なると予想される。また、測定した弾性波速度と重み付き弾性波速度から推定した弾性波速度には誤差が生じるはずであるが、この誤差の補正も実施しない。最も簡単な方法で、どの程度疑似ジャンカを検出できるか確認するのが実験の二次的な目的である。

弾性波速度の低下について

縦弾性波(P波)の速度は、縦弾性係数 E 、密度 ρ 、ポアソン比 ν とすると、

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad Z = \sqrt{E\rho} = \rho C \quad (2)$$

弾性波が伝わる能力を示すパラメータは、インピーダンス Z と呼ばれる。波を伝える物質の力学的な性質は、物質の慣性を与える定数(密度)と変形にともなう生じる力を与える定数(弾性定数)で表される。物質を波を伝える媒質と見るとき、2つの定数は別々にではなく、波の速さ V とインピーダンス Z という2つのパラメータにまとまった形で役割を果たしていることがわかる。したがって、コンクリート構造物の内部に空洞が存在すると弾性係数と密度が変化するので、通常、弾性波速度は数パーセントは低下する。

3. 実験内容

供試体 $2000\text{mm} \times 2000\text{mm} \times 300\text{mm}$ のほぼ中央に図-1に示すような空洞を開けて疑似ジャンカを設けた。ブロックの大きさは $100\text{mm} \times 125\text{mm}$ で192個である。測定は2回ずつおこない、直径 16mm の鋼球ハンマーで打撃し、透過縦弾性波は加速度計 PCB352C66 で受信した。事前に上端に平行(疑似ジャンカに直交)するように測定し、疑似ジャンカの影響で透過弾性波が低下することを確認した。

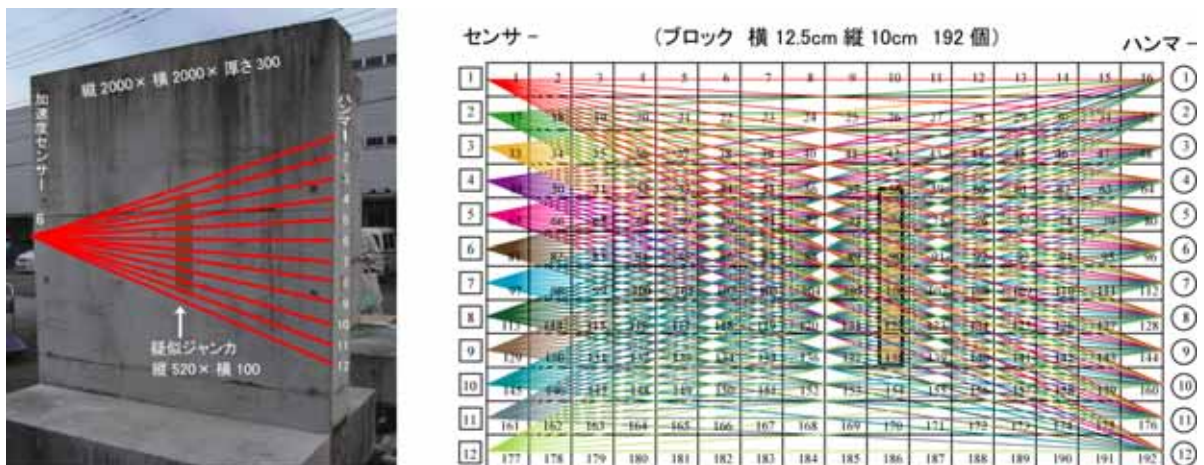


図 1: 供試体と弾性波経路線 (センサー 12, ハンマー 12)

4. 実験結果および考察

4-1. 透過 P 波速度分布

事前に鋼球 16mm ハンマーと 20mm ハンマーで透過弾性波速度を測定し、どちらが疑似ジャンカによる速度低下が顕著であるか確認した。実測した入力波長は、 20mm は 80cm 、

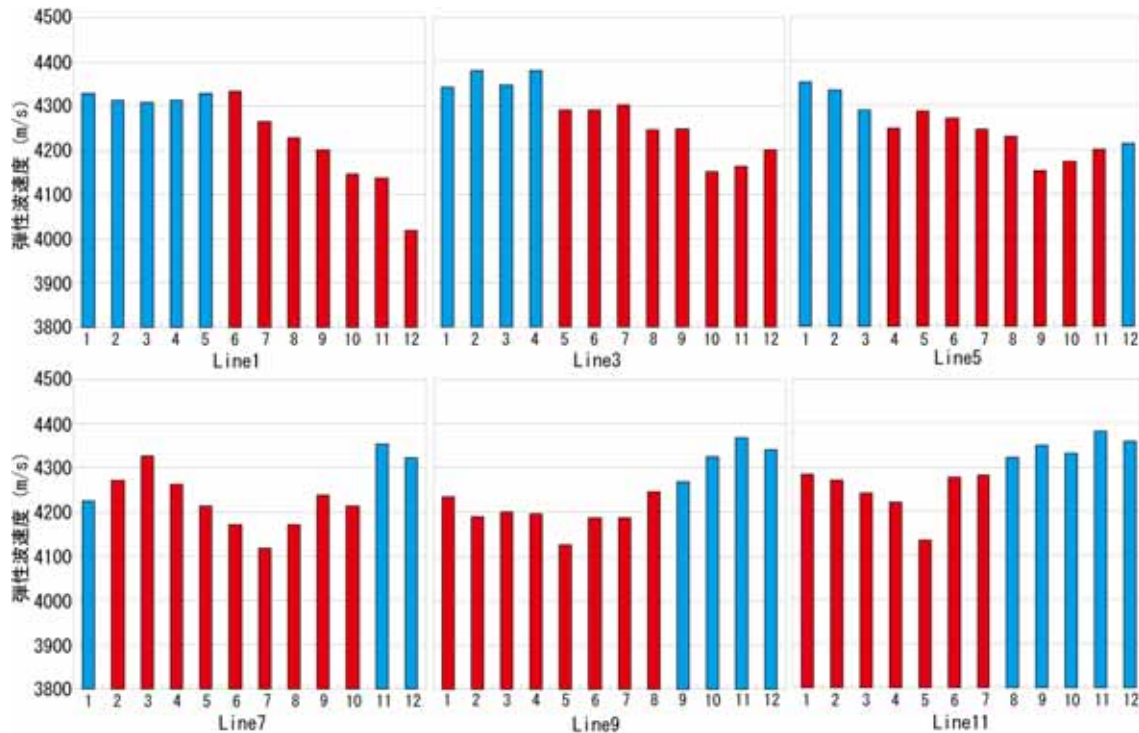


図 2: 透過弾性波速度分布 (奇数測定ラインを抽出)

16mm は約 65cm であったが、16mm 鋼球の速度低下割合が大きく、波長が短いと欠陥の影響が大きく現れる傾向と一致している。図-2 は透過弾性波速度分布である。

赤線は疑似ジャンカを横切る速度経路線で、青は横切らない線である。ライン 1 の赤線はジャンカを横切るため徐々に速度の低下が大きくなっている。ライン 5、ライン 7、ライン 9 は疑似ジャンカを正面から横切るが、ジャンカに対応して速度が低下している。ライン 7 の 1 番目の速度が遅いのは、測定ミスか表面劣化の影響か原因不明である。

4-2. 弾性波トモグラフィ

解析した弾性波トモグラフィを図-3 に示す。超音波法と同様に、1 方向の弾性波速度測定では疑似ジャンカは縦方向が短く、前後に虚像が現れている。測定方向が 1 方向では必ず測定方向の前後に虚像が現れるのが特徴である。

衝撃弾性波は超音波法と比べ前処理不要測定所要時間は短い、打撃するので表面荒さの影響を受け、データのバラツキが大きいと推測される。透過弾性波速度の速度低下線と疑似ジャンカが一致していると精度の高い欠陥の探査が可能と思われる。しかし、相関が悪いと計算した欠陥はひずむ傾向を示す。衝撃弾性波による弾性波トモグラフィは、適切なハンマーの使用、透過弾性波の経路数やブロック数を選定することが重要であるが、簡略な方法でも過去の超音波法とほぼ同等な結果が得られるので、実用的には有効と思われる。

5. まとめ

大型疑似ジャンカ供試体を用いて、衝撃弾性波の透過弾性波速度を測定し、弾性波分布図を検討し基本的で簡易な方法で弾性波トモグラフィを作成した結果をまとめると次のとおりである。

1. 表面から約 80cm の深さに幅 10cm 高さ 54cm の疑似ジャンカが存在するとき直径 16mm ハンマーは直径 20mm ハンマーよりも透過弾性波速度の低下率が大きい。

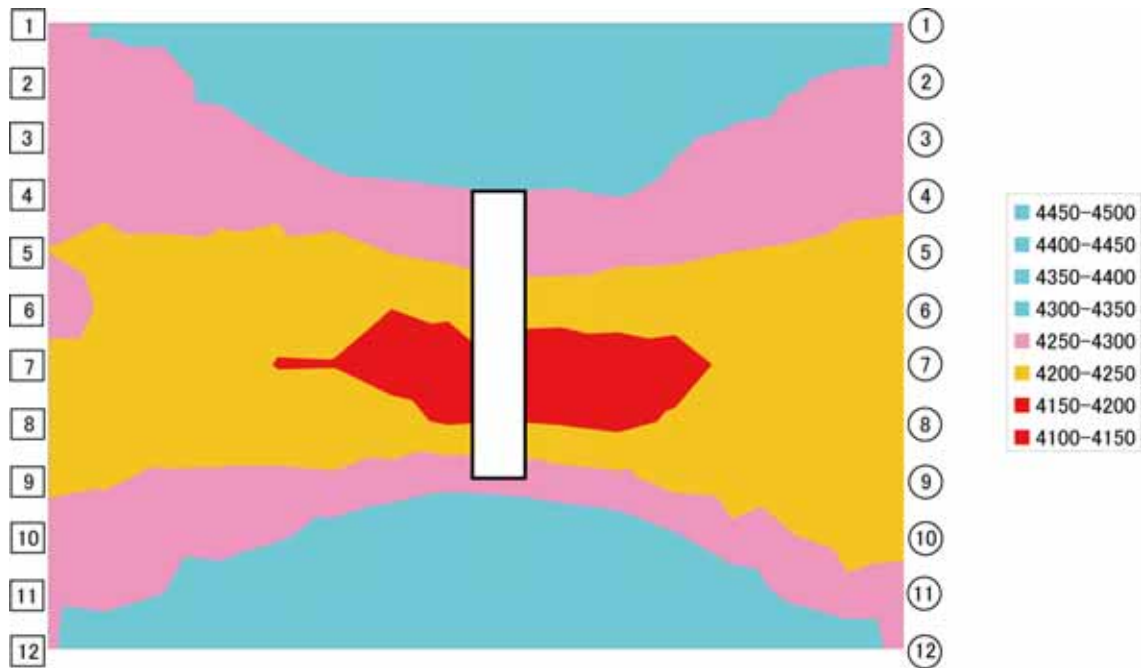


図 3: 弾性波トモグラフィ (赤色が計算疑似ジャンカ, 白色は実物疑似ジャンカ)

2. 衝撃弾性波による測定は超音波法と比較すると前処理不要なので測定所要時間は短時間であるが, 打撃するためコンクリート表面荒さの影響をデータのバラツキが大きいと推測される。
3. 透過弾性波速度分布は疑似ジャンカや内部欠陥と速度低下の弾性波経路線が一致していると良好な弾性波トモグラフィが得られる。しかし, 測定ミスや誤差により対応が悪い場合は, 実際の欠陥と計算の欠陥は一致しないでひずむ傾向を示す。
4. 弾性波トモグラフィの精度を向上させるには, 適切なハンマーの使用, 透過弾性波の経路数やブロック数を選定することが重要であるが, 簡略な方法でも過去の超音波法とほぼ同等な結果が得られるので, 実用的には有効と思われる。

参考文献

- [1] 魚本健人, 加藤潔, 広野進: コンクリート構造物の非破壊検査 森北出版 1990.
- [2] 鈴木章紘, 田村泰弘, 小原久敏, 極檀邦夫: 弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の内部空洞探査, 日本非破壊検査協会, 平成 20 年度秋期大会講演概要集, 107-110, 2008
- [3] 三上修一, 斉藤隆行, 川村幸司, 大島俊之: 逆解析によるコンクリート内部欠陥の非破壊調査, 土木学会第 51 回年次学術講演会, 26-27, 1996
- [4] 塩谷智基, 桃木昌平: 弾性波トモグラフィによる構造物の健全性評価技術, とびしま技報 No.56, 111-116, 2007