

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

Inside Cavity Survey of Concrete Structure by Elastic Wave Tomography

○(株)コサカ技研 鈴木 章紘 (株)コサカ技研 田村 泰弘 (株)コサカ技研 小原 久敏

Takahiro Suzuki Yasuhiro Tamura Hisatoshi Obara

(Kosaka Engineering Consultants)

iTECS 技術協会 極檀 邦夫

Kunio Gokudan (iTECS Association)

概 要

透過弾性波速度を利用したCT (Computerized tomography) の基礎的実験である。疑似空洞として直径 200mm 厚さ 20mm の発泡スチロールを埋設した 1600×1600×300mm の供試体を作成し、インパルスハンマーと加速度計を用いて透過弾性波速度を計測した。透過弾性波速度の低速度線を抽出し、逆投影法による低速度線の重複範囲と、埋設発泡スチロールの位置はほぼ一致した。表面からの厚さ測定では、発泡の埋設深さ 150mm、180mm は直径 200mm に対応する範囲が検出でき、逆投影法による結果とほぼ一致した。

キーワード：透過弾性波， トモグラフィ， 空洞探査

1. はじめに

大規模コンクリート構造物の施工時に表面にジャンカが観測されることがある。施工監理者は内部にもジャンカあるいは空洞の存在を危惧し非破壊試験による調査が要請されることがある。厚さが2メートル程度までなら衝撃弾性波は表面と反射面で反射を繰り返すので、その多重反射を解析して内部のジャンカ、空洞などを探査する方法が採用される。しかし、調査対象が十数メートルの大型構造物では多重反射波による解析は不可能である。本研究では内部に発泡スチロールを疑似空洞として埋設した大型の模型供試体を作成し、供試体側面をハンマーで叩き反対側面に加速度計を設置し、透過弾性波速度を計測・解析した。透過弾性波速度の低速度線を抽出し4側面の低速度線の重複によって疑似空洞を検出できるかを検討することを目的とする。

2. 透過弾性波速度による内部空洞の測定

透過弾性波が遅くなるのは内部の空洞が原因と仮定した。低速度線上が交差する点に欠陥があると推定する方法は医学のCTスキャナの簡易版と考えられる。CT スキャナとは、被検査体内にX線を全方向から透過し、その透過率をデータ処理して断層画像図(トモグラフィ)として表示する。

本実験では、X線の代わりに透過弾性波を用いる。図-1は、測定方法の考え方を説明するため、模式的な例として、検査する物体の断面が3×3=9個のブロックからできているとする。その一つひとつのブロ

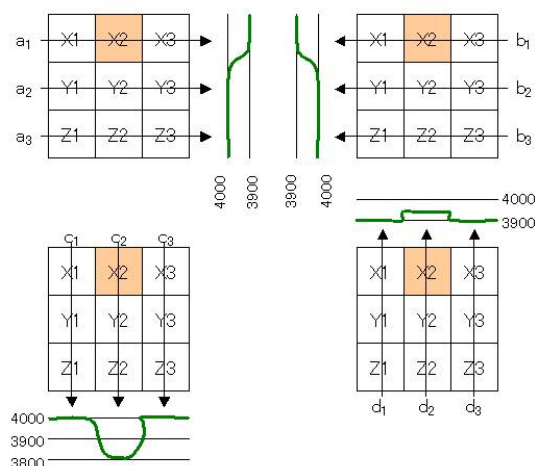


図-1 4側面からの透過弾性波速度と空洞検出

ックに弾性波速度を減少させる要素（数値）があるものとする。しかし、外からはブロックごとの要素（数値）は分からない。方向を決めて弾性波を入力すると、その通過したブロック要素の合計を知ることができる。図-1ではX2に弾性波速度を減少させる欠陥があると仮定する。a1方向からの弾性波速度は、中央に位置する欠陥X2によって3,900m/sに速度低下した。a2, a3方向の弾性波速度は、欠陥が無いので4,000m/sの速度である。c2方向では、打撃面表層に欠陥X2があるため強い影響を受けて弾性波速度は、3,800m/sと大きな速度低下となる。打撃点の近傍に欠陥があると弾性波速度の減少は大きくなる。d2方向では、伝播距離の長い部分に欠陥X2があるため欠陥の影響は弱まり弾性波速度は3,950m/sと速度低下は小さくなる。1方向の弾性波速度の減少からはどの位置に欠陥があるか特定するとはできないが、4方向あると欠陥部分は低速度線の交点として決定できると考えた。

3. 実験概要

3. 1 円孔供試体による基礎実験

まず、透過弾性波速度による空洞探査の有効性を確認するために写真-1のような直径100mmの円孔をあけた550mm×550mm×100mmの供試体を用いて実験した。測定方法は打撃面の反対面に加速度計を設置し、25mm間隔で透過弾性波速度を測定する。測定装置はiTECS-6でインパルスハンマーと鏢付きの加速度計を使用した。解析方法として各側面で透過弾性波速度低速度線を統計的に4分位(25%)で抽出する。東西面、南北面で低速度線が一致した複低速度線を選出し、逆投影して交差した範囲を内部空洞として検討する。

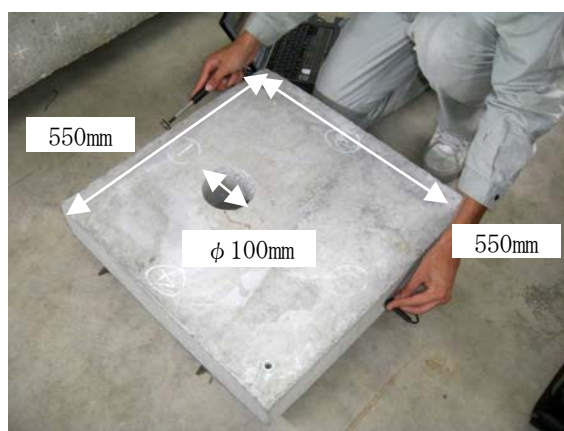


写真-1 円孔供試体測定風景

3. 2 発泡供試体による空洞探査実験

φ200mm×20mmの発泡スチロールを疑似空洞とした1600mm×1600mm×300mmの供試体を製作した。測定は打設面を下側になるように裏返して、厚さ測定と側面での透過弾性波速度を計測した（写真-2）。

厚さ測定は、表面に50mm間隔のメッシュを記し、装置はiTECS-6、インパクトは20mm鋼球、PCB加速度計との間隔は10cmである。20mm鋼球は鋼球接触時間を測り弾性波速度を乗じて入力波長を算出し、厚さの往復長さの60cmとほぼ同等になるように選定した。透過弾性波速度の測定線は、発泡スチロールの中心を通るように160mm, 190mm, 220mmとし、50mm間隔で4測面を測定した。測定機器はiTECS-6で、インパクトは先端10mm鋼球、PCB加速度計である。サンプリングレートは0.1μ秒で連続測定を採用した。6回から10回程度の連続測定で弾性波のノイズは除去され、打撃力波形の異常も監視できる。

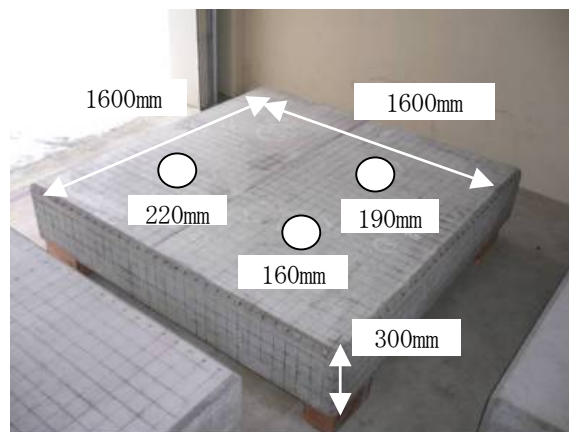


写真-2 発泡供試体

円孔供試体と同様に各側面で透過弾性波低速度線を統計的に4分位(25%)で抽出し、東西面での複低速度線と南北面での複低速度線を選定し、東西、南北の複低速度線が交差した範囲と埋設した発泡スチロールがどの程度一致するかを検討する。

4. 実験結果と考察

4.1 円孔供試体の透過弾性波速度

図-2に東面、北面の透過弾性波速度の横断分布を示した。青枠は東面で円孔を通過する透過弾性波速度を、赤枠は北面で円孔を通過する透過弾性波速度を表している。図を見て分かるように東面・北面の円孔を通過する測定点では、透過弾性波速度の低下が確認された。

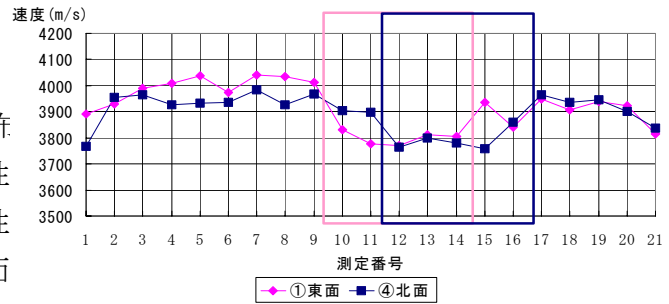


図-2 東面・北面透過弾性波速度の分布

東面北面の1~2, 20~21は弾性波速度が低下している。これは側面近傍に空洞あるいは欠陥が存在するためではなく、弾性波がコンクリート内部を伝播するとき、弾性波の応力変形が拘束されるか否かに依存することが原因と考えられる。いわゆる棒状弾性体と半無限弾性体の縦弾性波速度と同様である。

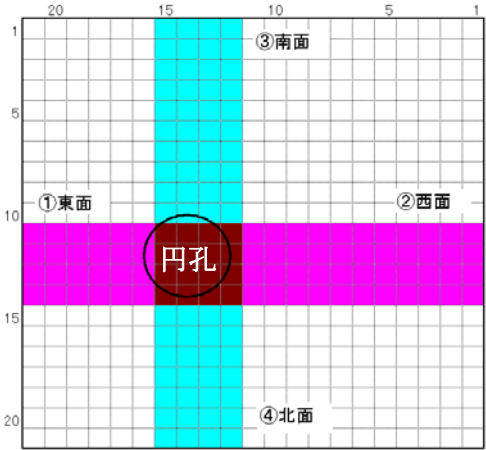


図-3 複低速度線交差範囲

各面について透過弾性波速度低速線を統計的に4分位(25%)で抽出し、東西方向、南北方向の複低速度線を選定した。図-3は複低速度線の交差位置を示したものである。この図がCTスキャナの断層画像図と類似となる。交差した位置は円孔の位置と合致した。

この実験結果によって透過弾性波速度による内部空洞探査は可能であることが証明された。

4.2 発泡供試体の透過弾性波速度

発泡供試体の各側面の透過弾性波速度をiTECS-6の解析ソフトを用いて算出した。算出した速度から透過弾性波低速線線を統計的に4分位(25%)で選出する。東西面、南北面の低速線が重複する位置を示したものが図-5、図-6である。

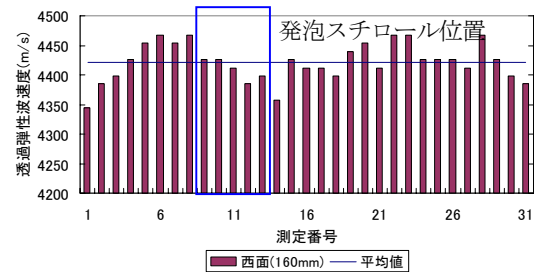


図-4 西面透過弾性波速度の分布

図-5は測定線160mmの東西面、南北面の複低速度線である。横の青色が東西面の複低速度線、縦の赤色が南北面の複低速度線で東西面、南北面の交差する位置は発泡スチロールの位置と概略一致した。

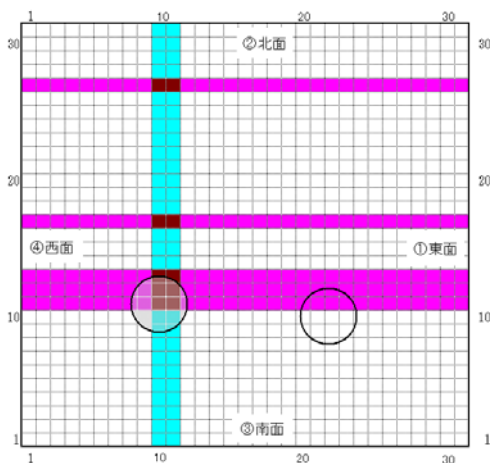


図-5 160mmの複低速度線の重複範囲

図-6は測定線190mmの東西面、南北面の複低速度線である。発泡スチロールの位置で交差する複低速度線は縦1本横1本だけで、発泡空洞の検出度合いはよくない。特徴的なのは、東西面の中央部に低速線が5本も集中していること。南北にも2本存在する。弾性波がコンクリートを伝播するときの抵抗(インピーダンス)は、 $(\text{弾性係数} \times \text{密度})$ の平方根である。コンクリートはセメントを水、砂、砂利、空気と混ぜ合わせて凝固させる複合材料である。空気のインピーダンスが極端に異なる

ので、弾性波の伝播に対する空気量の影響は大きい。低速度線の原因として、微小気泡集団の存在が考えられる。経験からコンクリート締め固めが不十分であると表面近傍に気泡が集まることが分かっている。発泡の破損を危惧して製作時の締め固め不足が推測される。透過弾性波速度による逆投影法を用いた複低速度線重複範囲について、測定線160mmでは概略一致し、190mmでは発泡と複低速度線の重複範囲は東西1本南北1本しか一致しなかった。

4.3 発泡供試体の厚さ測定による検討

表面を50mmメッシュで測定した厚さの結果を図-7に示す。上図は健全部での多重反射波の速度波形と発泡空洞での多重反射波の速度波形である。空洞では弾性波の周期が長く減衰が小さい。これは空洞のかぶり厚さが薄いので膜振動が発生している特有の現象である。膜振動の周期は多重反射よりも長いので、多重反射による厚さ計算式で厚さを算出すると、実寸よりもかなり厚い結果となる。

下図は測定で求めた厚さの分布を示した図である。着色されている部分は厚さの異常値である。水色は実寸よりも薄め、橙色はやや厚め、赤色は異常に厚い測点である。発泡測定線深さ160mm、190mmの発泡φ200mmの投影面積と赤色の異常な厚さの範囲が対応している結果となった。実寸よりも厚め、薄めの測点は微小空隙の影響である。透過弾性波速度の低速度線の重複範囲ともほぼ一致した。

5. まとめ

円孔供試体の透過弾性波速度の結果、東西方向および南北方向の複低速度線を逆投影したところ、円孔に対応して東西4本10cm、南北4本10cmが交差した。円孔は10cmであるので複低速度線が交差する位置に内部欠陥が存在することが立証でき、透過弾性波速度を用いて複低速度線を逆投影するという簡単な方法による欠陥探査の有効性が確認された。発泡供試体の多重反射波による測定では、発泡空洞の位置では膜振動が発生するため実寸よりも異常に厚い（平均値+3×標準偏差よりも厚い）点に着目すると空洞範囲が検出できた。ただし、発泡までのコンクリート厚さは測定できなかった。

発泡スチロール埋設供試体は、打設面が下になるように裏返して測定した。発泡中心を通る測定線の160mmは打設面からの深さに換算すると130mm、190mmは100mm、220mmは70mmである。発泡供試体の製作時に発泡スチロールの破損を危惧してバイブレータの締め固めが不十分となり、空隙が打設面近傍に多量に残存したと思われる。厚さ測定で実寸と異なる測点の多いことから立証される。

測定線160mmの発泡空洞の位置で複低速度線が交差した。測定線を一定間隔に設定して断層画像図を作成すると深さ方向の様子も把握できる。190mm、220mmの発泡は締め固め不良による微小空隙の影響を強く受けている。厚さの実寸測定が困難となるような微小空隙が多量に存在する場合は、透過弾性波速度による内部空洞の探査は、今回の簡単な逆投影法による方法では難しいと思われる。

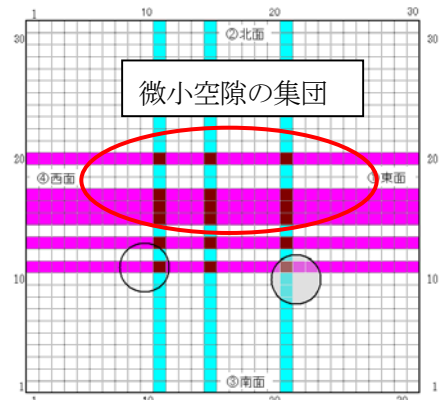


図-6 190mmの複低速度線の重複範囲

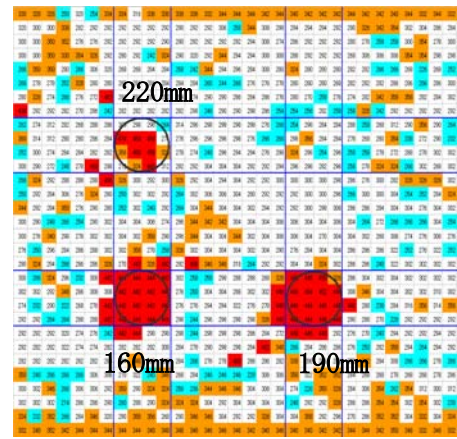
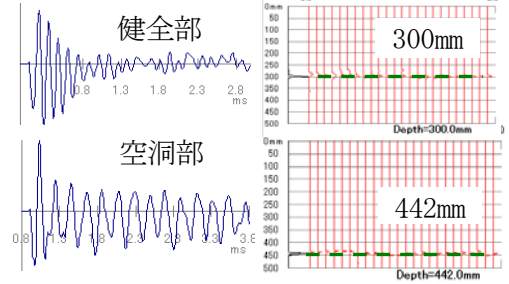


図-7 多重反射波の波形と厚さ分布

■ 267以下 ■ 324~360 ■ 360以上