

打撃音による経年構造のヘルスマニタリング技術の開発に関する研究

山崎 憲 (電気電子工学科)

霜山竜一 (電気電子工学科)

まえがき

トンネル壁面の崩落事故や地震による建造物の倒壊を防ぐため、建造物の経年変化による損傷や欠陥箇所を診断する信頼性の高い技術の確立が望まれている。欠陥箇所の診断には従来、インパルスエコー法やインパルス音響法などの、物体内部の欠陥が共振周波数に及ぼす影響を検出する手法が用いられている。物体に機械的な衝撃を加えた後に、インパクトエコー法では弾性波のエコー、インパルス音響法では音響エコーを計測して共振周波数を解析する。共振周波数の変化は有限要素法等を用いて予測されるが、有限要素法解析は、対象となる物体の物質定数、形状、境界条件が既知である必要があるうえ、不均質な物質への適用には限界がある。物体を周期的に加振して表面振動の振幅や位相分布から欠陥を推定する試みもあるが、通常振動の振幅は非常に小さいため精密な計測が必要であり、広範囲な表面の検査には向かない。

一方、表面の打撃音から物体内部の状態を推定する検査法(打音法)は、非破壊で比較的簡単に実施できる利点があり、農産物の品質や施工後のコンクリート内部の空洞や亀裂の有無など、多くの検査に用いられている。この検査法は、物質定数、形状、境界条件等に拘わらず比較的良く物体内部の欠陥の検出が可能であるが、人間の聴覚と経験に依存する主観的判断に基づいており、検査に人手と時間を要するため機械化が望まれている。

本研究は打音法を機械化することを目的としている。不均質な材質の一例として木板を取り上げ、節目を含んだ木板の裏面に貫通しない孔をあけ、表面の複数箇所を打撃した際に生じる音の周波数特性の差から穿孔部や節目の位置を実験的に検出した結果を示す¹⁾。節目を含まない木材の裏面に欠陥を想定した複数の貫通しない孔を穿孔し、計測された表面の打撃音から相対音圧分布を求め、音圧振幅の空間的な微係数が最大となる比較的高い周波数において、複数の孔の周辺部で音圧振幅が顕著に変化する様子を示す²⁾。

計測システムの概要

図1に計測システムの構成を示す。木板表面の打撃箇所の15cm上方に設置したマイクロホンで打撃音を計測し、増幅後の信号をパーソナルコンピュータに記録した。波形データはFFTで周波数特性を計算した(サンプリング周波数 80kHz)。ペンシル型ハンマーを打撃位置に設置後、トリガを機械的に外して底部に取り付けられた直径1cmの鉄球が表面を叩く仕組みである。2種類の木板(サンプル1, 2)で欠陥の検出を行った。木板の寸法は共に284×284×19(単位 mm)である。

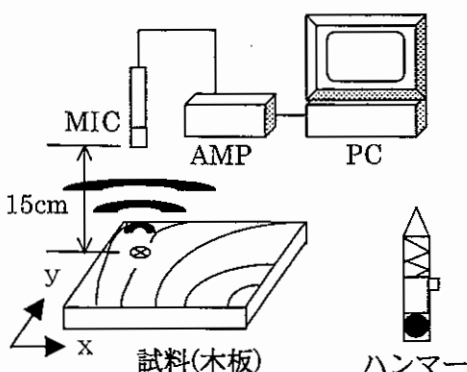


図1 計測システムの構成

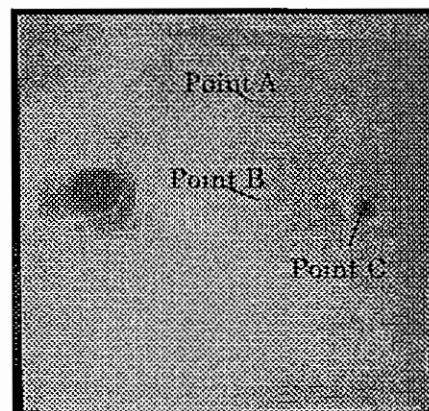


図2 木板の外観 (サンプル1)

サンプル1の木板の概観を図2に示す。サンプル1は大小2個の節目のある木板で、両節目は裏面にまで達しており、木目は一様ではない。欠陥を想定した直径13(mm)、深さ17(mm)の貫通しない孔を裏面中央に1箇所穿けてある。サンプル2は節目を含まず比較の木目の様な木板で、木板の裏面の4箇所貫通しない孔(直径13(mm)、深さ17(mm))をドリルで穿けてある。打撃音は木材表面の状態や打撃箇所依存して変化することが予想されるため、同一箇所でも5回打撃音を計測し、FFT解析後の振幅スペクトルの類似した3例を平均化したデータを評価した。

欠陥位置と相対音圧分布

図2の木材表面(サンプル1)の3箇所(Point A(木目部)、Point B(裏面に孔のある部分)、Point C(節目部))で計測した打撃音の相対音圧振幅の時間変化を図3(a),(b),(c)に示す。音圧振幅は3例の最大値で規格化されている。穿孔部(b)では音圧が比較的緩やかに減衰する様子がみられる。節目部(c)では音圧の最大振幅値が3例中最も大きく、減衰は比較的早い。聴覚上は(b)が濁った音、(c)が堅い音として判別できる。

図4は図3(a)~(c)に対応する周波数特性である。3例の周波数特性の差は15kHz以上では僅かであるが、1kHz~10kHzの範囲で3例の音圧値の顕著に異なる周波数帯域がいくつかみられる。節目部(Point C)は比較的高い周波数まで(~10kHz)音圧値が高いのに対して、穿孔部(Point B)は高い周波数の音圧値は全体的に低い。

3箇所の音圧値の大きく異なる周波数3145Hzにおける、木板表面に沿う打撃音の等音圧分布を図5(a)(b)に示す。同図(a)は穿孔前、(b)は穿孔後の音圧分布である。図5(a)(b)とも2箇所の節目部では音圧値が高い(白色)。穿孔前と比較して穿孔後はPoint B付近の音圧分布に

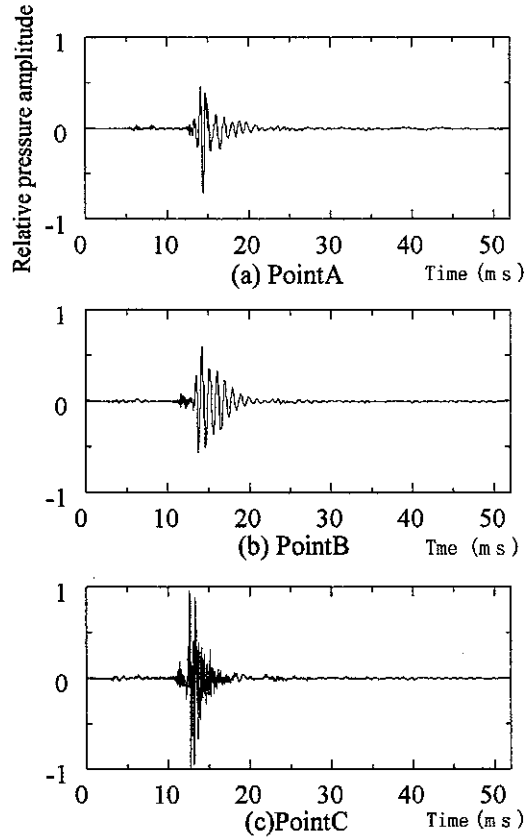


図3 相対音圧振幅の時間変化

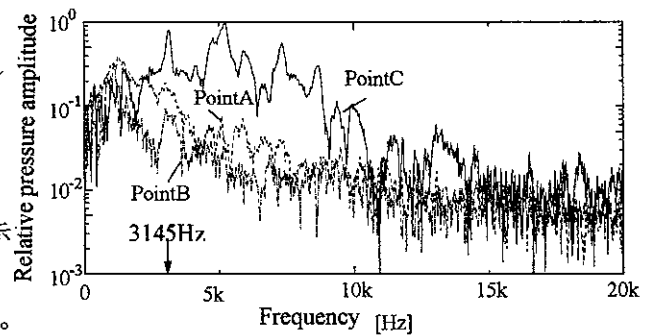


図4. 打撃箇所による周波数特性の違い

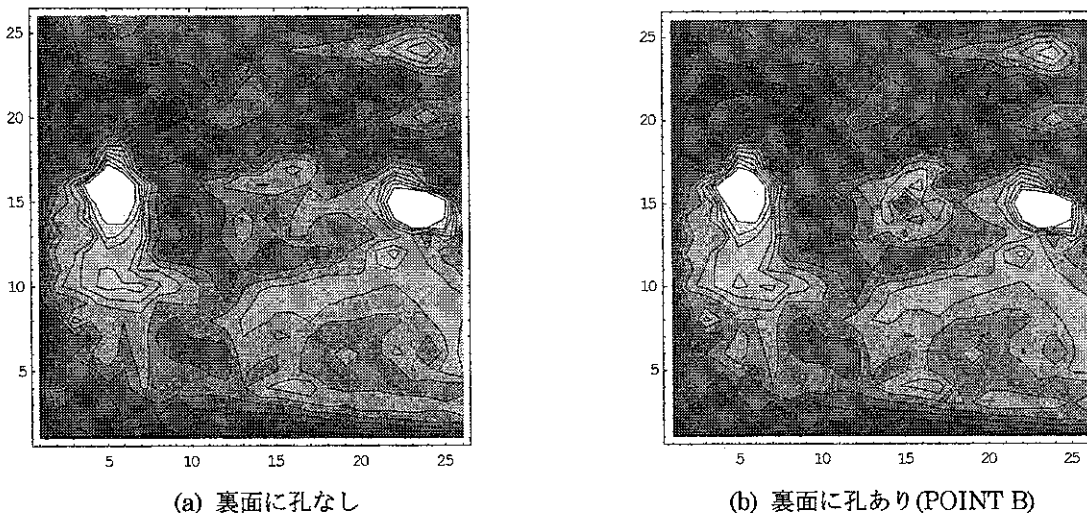


図5 等音圧線の分布

変化が見られる。特に Point B を含む小さな領域の音圧値が板面全体で最も低くなった（黒色）。その他の領域でも音圧分布は複雑に変化する様子が分かる。節目周辺の音圧値の高い箇所では木目が湾曲し木目間隔は広がっている。特定の周波数を選択することにより、裏面の孔や節目の位置に関する特徴が相対音圧分布に反映される可能性の高いことが分かる。

周波数検出法

本報では、試料内部の欠陥位置に関する特徴が相対音圧分布に反映されると考えられる周波数を、次のようなアルゴリズムで求めた。

試料表面の x, y 方向にそれぞれ一定間隔 $\Delta x, \Delta y$ で m, n 箇所の打撃を行うものとする(図 6)。任意の周波数における打撃箇所 (i, j) の音圧振幅 $S_{i,j}$ の x, y 方向空間的微係数 $d^{(x)}_{i,j}, d^{(y)}_{i,j}$ を次式で近似する。

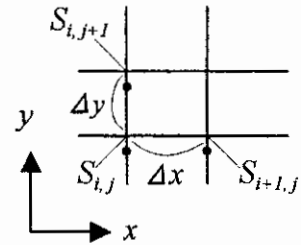


図6 打撃箇所の配置と任意の周波数における音圧の振幅の関係

$$d^{(x)}_{i,j} = \frac{S_{i+1,j} - S_{i,j}}{\Delta x} \quad (1)$$

$$d^{(y)}_{i,j} = \frac{S_{i,j+1} - S_{i,j}}{\Delta y} \quad (2)$$

ただし、 $i = 1 \sim m-1, j = 1 \sim n-1$ である。(1), (2)式から $|d^{(x)}_{i,j}|$ または $|d^{(y)}_{i,j}|$ が特定の周波数範囲内で最大となる周波数を数値的に求め、得られた周波数における試料表面に沿う打撃音の相対音圧分布を求める。亀裂や空洞などの材質の不連続箇所では材質内を伝わる弾性波の反射が大きく、したがって打撃音の振幅も不連続箇所周辺で顕著に変化することが予想される。

検出結果

サンプル 2 を用いて打撃箇所の上方で計測された音圧の相対振幅分布を図 7(a), (b)に示す。同図(a)は穿孔前、(b)は裏面に 4 箇所の孔(A, B, C, D)を穿けた場合の分布である。各孔とも内径 1.3cm, 深さ 1.7cm で、木板表面の厚さは最小で 2mm となる。周波数は 20Hz~10kHz の範囲を数値的に探索した結果得られたもので、同図(a)では 1054Hz, (b)では 1015Hz である。穿孔前の木板を打撃した場合でも(同図(a)), 音圧振幅は表面に沿い複雑に分布する様子が分かる。同図(b)では木板中央部の孔 B 付近に音圧振幅の大きい箇所が見られる。更に高い周波数帯を調べるために、2kHz~10kHz の周波数範囲を探索して得られた音圧分布を図

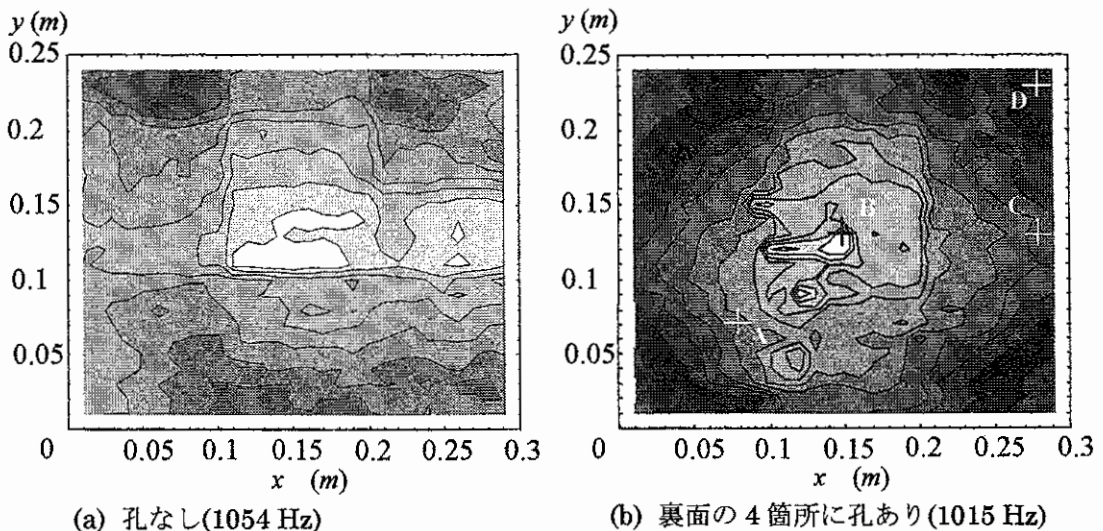


図 7 打撃音の相対振幅の分布(周波数探索範囲：20Hz - 10kHz)

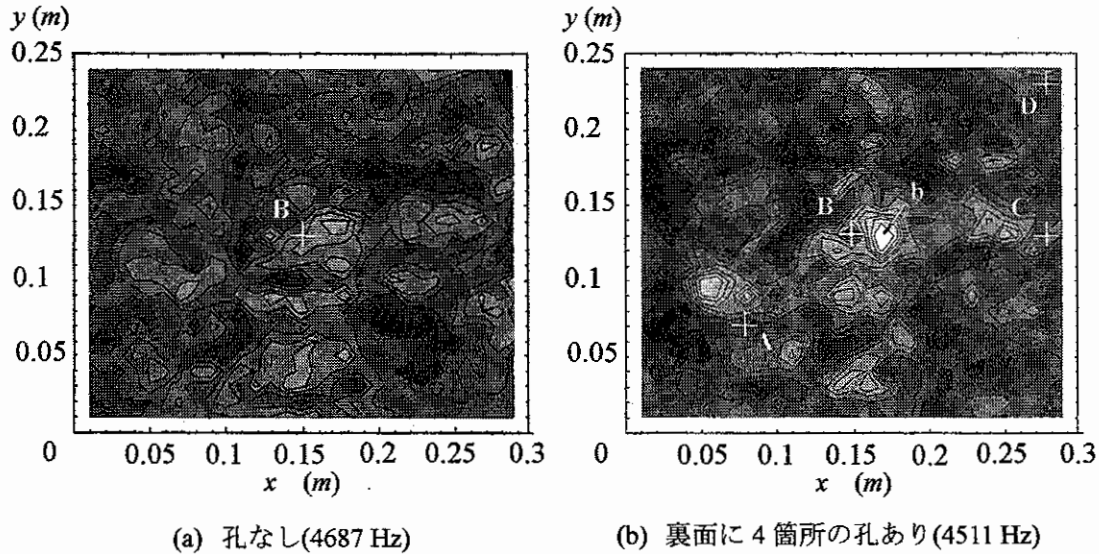


図 8 打撃音の相対振幅の分布(周波数探索範囲：2kHz - 10kHz)

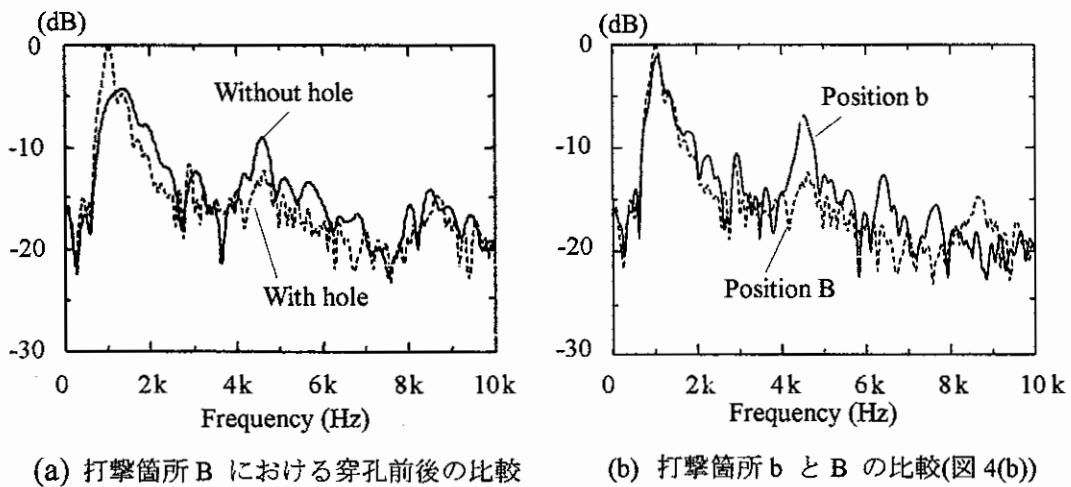


図 9 音圧の振幅スペクトルの比較

8(a), (b)に示す。図 7 と同様に同図(a)は穿孔前、(b)は穿孔後の分布である。両音圧分布は振幅の最大値で規格化してある。同図(b)では孔 A, B, C の周囲に比較的振幅値の大きい領域がいくつかみられる。これらの領域は他の領域と比較して振幅の変化が著しい。図 8 に対応する音圧の振幅スペクトルの比較を図 9 に示す。同図(a)は中央部 B(図 8(a), (b))における打撃音を穿孔前後で比較したもので、同図(b)では孔 B 上とその近傍の点 b における打撃音を比較している(図 8(b))。図 9(b)では 4.5kHz 付近で音圧振幅に著しい違いがみられる。

おわりに

打音法の機械化を目的として、節目を含んだ不均質な木板の裏面に貫通しない孔をあけ表面上の複数箇所を打撃した際の、特定の周波数における相対音圧分布と穿孔部や節目の位置の関係を実験的に示した。また節目を含まない木材の裏面に欠陥を想定した複数の貫通しない孔を穿け、表面上の複数箇所を打撃した際に得られる相対音圧分布から、音圧振幅の空間的な微係数が最大となる比較的高い周波数において、複数の孔の周辺部で音圧振幅が顕著に変化する様子を示した。今後は様々な材料について、欠陥部の種類や形状、寸法を変えて検査精度に関して定量的な検討を行う予定である。

参考文献

[1] 霜山, 山崎 「打撃音による非破壊検査について」日本音響学会講演論文集 3-JB-17, (2000) 123-124
 [2] R.Shimoyama and K.Yamazaki 「Nondestructive acoustic detection of material discontinuities by hammering on the surface」 Proc. of WESTPRAC VII, (2000) 349-352