

打撃音による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様々な方法が提案されているが、表面の亀裂もしくは表面近傍に生じた剥離を診断するものと物体内部を診断する方法に大別される。本研究では物体内部の欠陥を対象としている。物体内部の欠陥検出法としては欠陥の共振周波数に及ぼす影響を検出する、インパルスエコー法やインパルス音響法などがある。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。超音波探査、電波レーダ、放射線透過試験法などの検査法では、検査の対象や範囲が限られる、電波や放射線は取り扱いが難しい、などの問題がある。

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、比較的良好に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うえ、慣れや疲れなどにより検出精度が低下する。人が音の違いを聞き分けて欠陥を検出する事実から類推して、打撃音には欠陥に関する情報が含まれるものと考えられる。

筆者らは、打撃音から欠陥の情報を取り出すためのアルゴリズムが解明し、打音検査を機械化することを目的として、木板の裏面に欠陥を想定した貫通しない孔を穿け、表面の複数箇所を打撃した際に生じる音圧を計測して音圧分布を調査した。その結果、特定の周波数において欠陥部周辺で音圧分布に顕著な変化の生ずることを報告した¹⁾²⁾。

本報では、2枚の木板を張り合わせて内部に空洞を形成した木材表面の複数箇所を打撃し、発生した音の周波数特性の差から空洞の位置を実験的に検出した⁴⁾。さらに損失係数が比較的大きく振動しにくい材質である制振ゴムを用いて、自動打撃装置により打撃した際に計測された音圧分布と欠陥位置の関係と、打撃音から聴覚による欠陥検出が可能かどうか、などについて検討した結果を示す⁵⁾。

計測システムの概要

図1に計測システムの構成を示す。エアシリンダ(径1cm)に加圧空気を供給・排気してシリンダ軸を駆動した。加圧空気によりシリンダ軸が押し出されて、シリンダ軸の先端に装着された鉄製ハンマー(先端は球状)が試料を叩く仕組みである。エアシリンダの位置はx, y, z方向に調整可能である。減圧弁で0.2Mpaに減圧された空気は3方電磁弁で供給と排気が制御される。試料表面の打撃位置を変えて

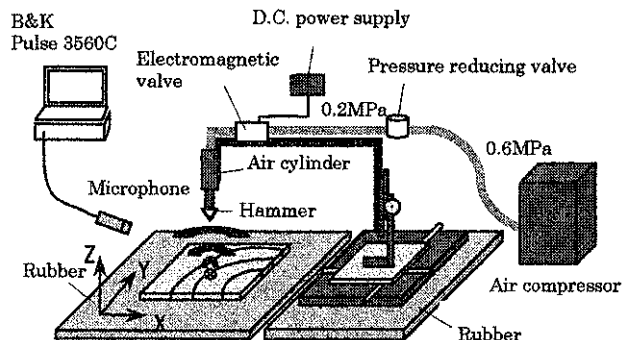


図1 計測システム

複数の打撃音を計測した。

欠陥検出法

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 2)。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

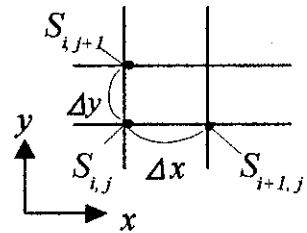


図 2 打撃位置と音圧振幅

方向空間的微係数 $d^{(x)}_{i,j}, d^{(y)}_{i,j}$ を次式で差分近似する。

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

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

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探索し、得られた周波数における打撃音の相対音圧分布を求める。すなわち、観測領域内で計測された全音圧データを用い空間と周波数の両領域を探索して、音圧振幅の空間的変化率が最大となる位置を求めている。

検出結果

a) 木材内の空洞の検出

図 3 に試料の概観と打撃領域を示す。2 枚の木材(W25 xL30xH1.5, unit:cm)がエポキシ系接着材で張り合わされており、内側に設けた溝が張り合わされることで内部に空洞(W1.3xL7.3xD2.2)が形成される。領域 A には人工的な欠陥がなく、領域 B には内部に空洞(点線部)がある。表面の打撃間隔は x, y 方向とも 1cm, 打撃箇所は x, y 方向とも 11 点である。マイクロホンは座標(15, 10)に固定した。木材表面の状態に依存して打撃音が変わることが予想されるため、同一箇所を 20 回打撃した後に、3 回の打撃音を記録し FFT 解析後に平均化したデータを評価した。図 4 に人工的な欠陥のない領域 A を打撃時に計測された相対音圧分布を示す。音圧値の高い箇所を白く、低くなるほど暗く表示してある。周波数範囲 4.2kHz~6.4

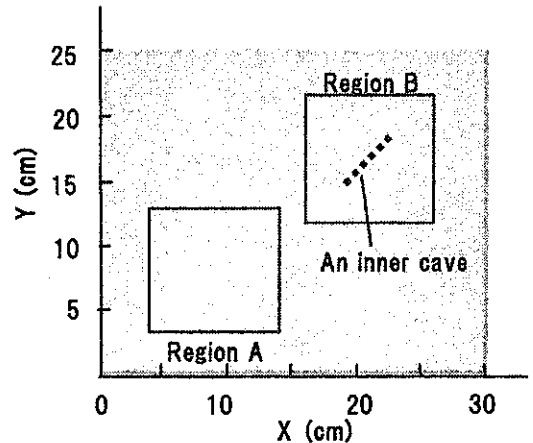


図 3 木板の概観と打撃領域

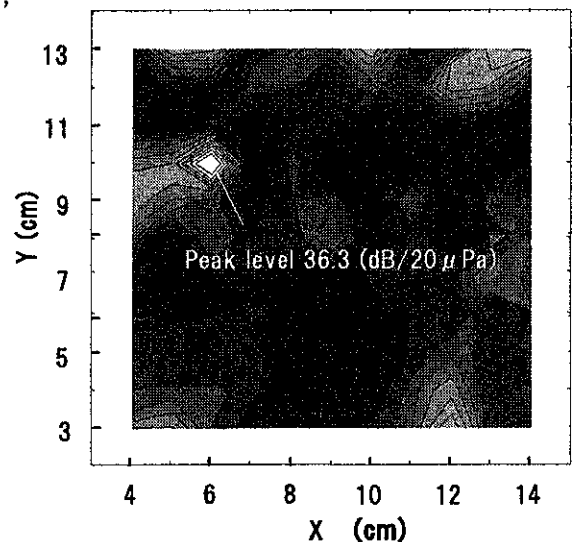


図 4 相対音圧分布
(領域 A, 欠陥部なし, 5320Hz)

で音圧振幅の空間的微係数の最大となる周波数は 5320Hz となった。打撃音の音圧振幅は座標(6, 10)で最大となる。空洞を含む領域 B における打撃音の相対音圧分布(図 5)では、空洞からやや離れた周辺部に音圧振幅の最大となる箇所がみられる。領域 B の音圧の最大値は 46.2(dB/μPa)であり、欠陥のない領域 A と比較して約 10(dB)ほど高い。図 5 に対応する、 x 軸方向の音圧レベルの変化を図 6 に示す。同一箇所でも 5 回繰り返し打撃して計測された音圧値が全て表示されている。打撃音の音圧レベルにかなりばらつきがみられるが、平均化された音圧レベルは空洞部を境に急激に変化しており、空洞部の位置が音圧レベルの変化から推定できる可能性がある。

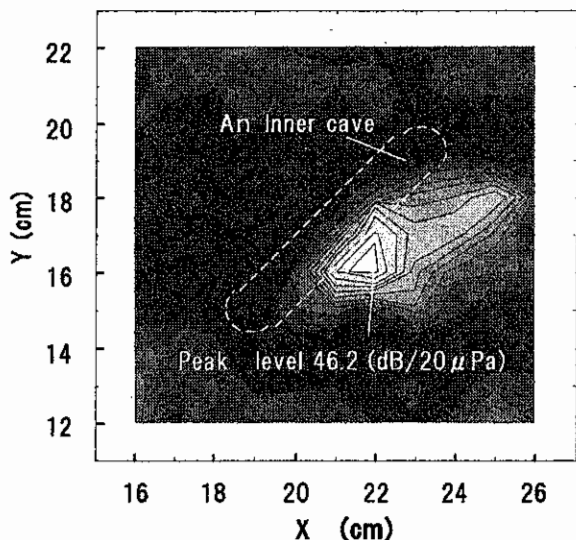


図5 相対音圧分布
(領域 B, 空洞部あり, 5472Hz)

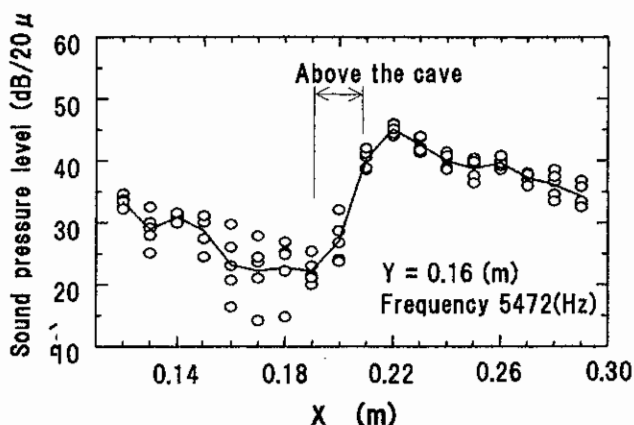


図6 x軸方向の音圧レベルの変化
(領域 B, 空洞部あり)

b) 制振ゴムの裏面に設けた孔の検出

木材では欠陥部周辺の近接した2箇所の打撃音に音圧レベルの差や聴感上の差の生じる場合があるが、金属のような材質では、木材と比べて叩く位置を変えても、発生する音に有意な聴感上の差が認められない。木材と金属は材質としての特徴という点で多くの違いがあり、どの性質の差がそのような音質の差を生むのかは現段階では不明である。材質としての違いの一つに損失がある。損失が大きければ加えた打撃のエネルギーはその近傍で吸収、反射されるため、その結果発生する音も局所的な材質の違いを反映したものになることが予想される。

そこで次に、損失係数が比較的大きく振動しにくい材質である制振ゴムを用いて、打撃した際に計測された音圧分布と欠陥位置の関係と、打撃音から聴覚による欠陥検出が可能かどうか、などについて検討した。

計測システム

支持台からの反射音を抑制するため打撃装置と試料全体を鋳鉄製の台(厚み3cm)に乗せ、一般的な合成ゴム W30×L30×H2(単位cm)を敷いてその上に試料である制振ゴム W25×L25×H1.5を設置した(図7)。制振ゴムは比重:1.24, tan δ:約1(1kHz), 反発弾性が約2%である。点Aの裏面に直径1.3(cm)、深さ1.0(cm)の貫通しない孔(先端は平坦)を1箇所穿けてある(図8)。マイクロホンは観測領域中央に向けて座標(16, 6, 10)に固定した。

結果

図8の領域内を打撃した際に計測された音圧データを用いて1.5kHz~6.4kHzの範囲の周波数を探索した。得られた周波数1656(Hz)における相対音圧分布を図9に示す。穿孔部の音圧は周囲と比較すると顕著に高いが、そのレベルは低い(ピーク値:40.2dB/20 μPa)。図10に点A(穿孔部)と点Bにおける打撃音の周波数特性を示す。1656(Hz)付近で、近接する2箇所の

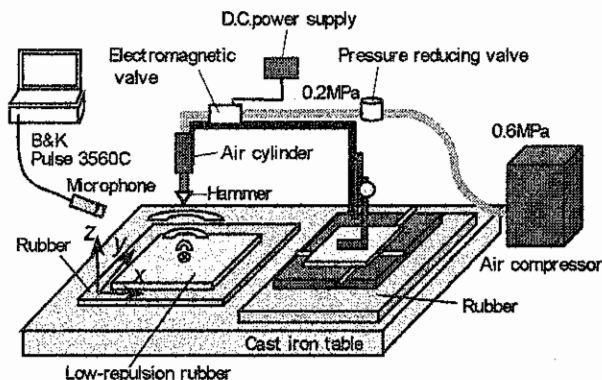


図7 計測システム(2)

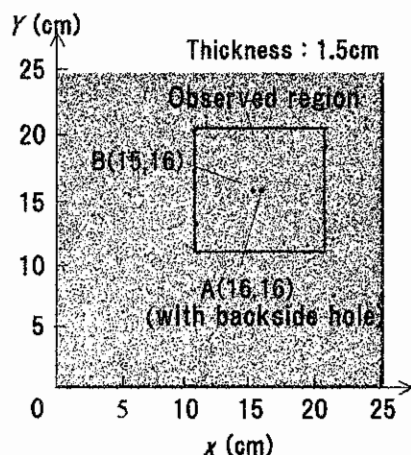


図8 制振ゴムの概観と打撃領域

音圧値に約 8(dB)の差がある。図 10 に点 A(穿孔部)と点 B における打撃音の周波数特性, 穿孔部を通り ($y=16\text{ cm}$), x 方向に表面を打撃した際の音圧レベルの変化を図 11 に示す。音圧レベルは最大で 2(dB)程度のばらつきがある。穿孔部から 1(cm)離れた位置では音圧レベルが約 7~8(dB)低下する様子が分かる。

5名の被験者(成人男性)に, 小型の金槌で, 欠陥部を含む, 試料表面 10箇所を打撃した際に発生する音を提示し, 特異な音を選択するように指示した。被験者は試料から 1(m)離れた位置に座り, 同一箇所の打撃音を連続して 3回繰り返して聞かせた。その結果, 全員が欠陥部に対応する打撃音を特異な音として指摘した。

あとがき

2枚の木板を張り合わせて形成された内部の空洞の位置を, 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実験的に検出した。損失係数が比較的大きな制振ゴムを用いて, 打撃した際に計測された音圧分布と欠陥位置の関係と, 打撃音から聴覚による欠陥検出が可能かどうか, などについて検討した。その結果, (1)特定の周波数における相対音圧分布から空洞や穿孔位置が推定可能なこと, (2)近接する2箇所の打撃音の音圧レベルの変化は欠陥部周辺で著しいこと, (3)穿孔部とその他の箇所の打撃音に聴感上の有意な差が認められること, などが分かった。

今後は, 音の発生箇所について検討する予定である。また, 人はハンマーによる数回の打撃音を聞いてその特徴を把握できることから, ばらつきを有する音の特徴を抽出するアルゴリズムについても検討中である。

参考文献

- 1) 岩瀬昭雄「コンクリート構造物の欠陥の非破壊検知診断法」日本音響学会誌, 57, 10 (2001) 668-674
- 2) 霜山竜一, 山崎 憲「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
- 3) R.Shimoyama and K.Yamazaki「Nondestructive acoustic detection of material discontinuities by hammering on the surface」Proc., 7th WESTPRAC, (2000) 349-352
- 4) R.Shimoyama and K.Yamazaki「The acoustic location detection of the defects in in-homogeneous material by tapping on the surface」Proc. 17th Int. Cong. Acoust., Vol.II, Measurement methods of acoustic properties of materials, (2001) 38-39
- 5) 霜山竜一, 山崎憲「打撃音による欠陥位置の検出—制振ゴムの場合—」日本音響学会講演論文集 3-Q-17, (2001) 689-690

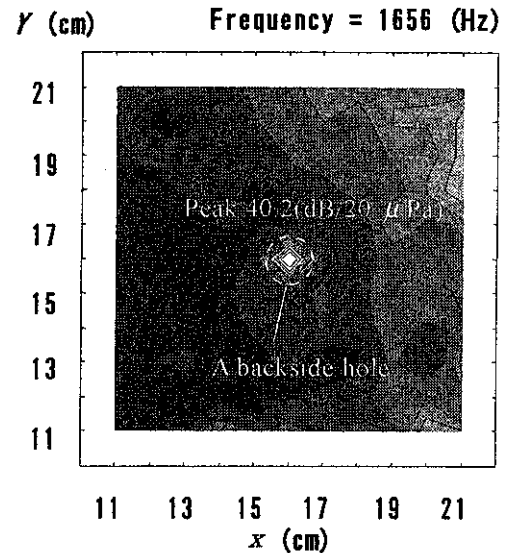


図 9 相対音圧分布

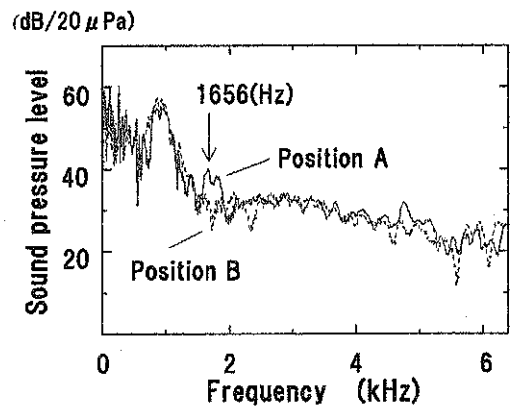


図 10 音圧の周波数特性

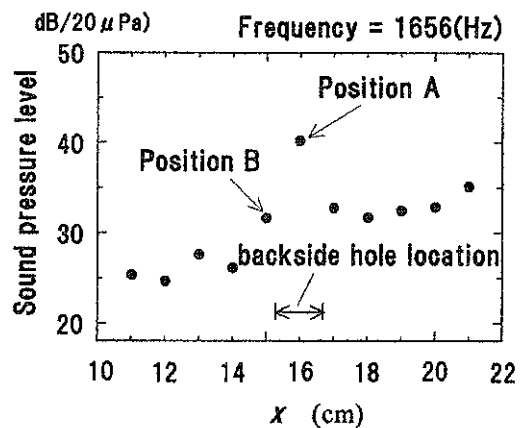


図 11 x 軸に沿う音圧レベルの変化 ($y=16\text{ cm}$)