

衝撃弾性波法による複数の反射経路を考慮した内部欠陥探査手法の基礎的検討

Basic examination on the detection method for internal defects
from multi reflex pathways of impact elastic wave.

○ (株)東洋計測サーチ 山下 健太郎 アプライド・リサーチ(株) 境 友昭
Kentarō Yamashita (Toyo survey and research Inc) Tomoaki Sakai (Applied Inc.)
一般社団法人 iTECS 技術協会 極檀 邦夫
Kunio Gokudan (iTECS Association)

概 要

コンクリート内部の欠陥を可視化する手法の確立を目的として、衝撃弾性波法によって観測される波形に着目し、内部欠陥との境界からの複数の反射経路を解析する手法を用いた。本論では、理論的に成立性の確認を行い、次いで、1個の空洞を有する2次元モデル供試体を用いて実験を行った。その結果、複数の反射経路を解析することによって、内部欠陥のおおよその深さが確認できる事が分かったので報告する

キーワード：衝撃弾性波、内部欠陥探査、欠陥深さ、死角フィルター

1. はじめに

衝撃弾性波法を用いた内部欠陥探査では、波動が対向面あるいは内部欠陥などの自由端との間を多重反射することを成立条件とし、測定した波形の定在波の周波数からその位置を計算することを技術の基本としている¹⁾。しかしながら、内部欠陥の形状、寸法、変状の度合いは多様であり、自由端とみなしえない場合が圧倒的に多く、周波数解析に耐えうる安定した多重反射が成立しているかどうか疑問がある。実測定においては、内部欠陥部での見掛けの弾性波速度が低下する現象に着目して、欠陥の平面位置やその程度を推定することとどまっている²⁾。本論では、多数点の掃引測定によって得られる測定波形の微細構造に着目することによって内部欠陥の位置を可視化する方法について検討した結果を報告する。

2. 測定理論

2.1 衝撃弾性波法

基本的な衝撃弾性波法では、測定表面から入力された弾性波が自由面となる対向面で反射し、構造物の厚さ方向に多重反射することを前提としている。図1に測定方法の概念を示す。図1に示すように、衝撃弾性波は、鋼球などでコンクリート表面を打撃して入力し、コンクリート内部の波動現象を打撃点近くに設置した超高感度加速度計によって測定する。波動が多重反射すると、往復時間を周期とする固有振動数が見られるようになる。

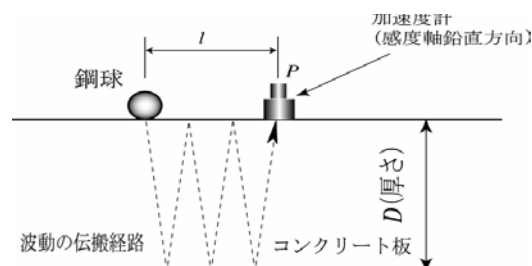


図1 衝撃弾性波法概念図

測定面およびこれと平行な対向反射面の両方が自由面の場合、定在波の波長は「厚さ」の 2 倍となることが知られており、これから厚さは

$$D = \frac{1}{2} \frac{V_p}{f_0} \quad (1)$$

として算出される。なお、 f_0 は定在波の周波数である。

しかしながら、内部欠陥による反射面は、その形状が曖昧であると同時に反射面が小さく定在波が発生するほど安定した多重反射が生じることは少ない。このため、衝撃弾性波法では、見かけの弾性波速度の低下などを指標として内部欠陥の探査を行っているが、内部欠陥の深さ方向の位置を決定することが難しい、という問題点を抱えている。

2.2 マルチパスウェイ方式

固体表面を打撃したとき、表面波、横弾性波および縦弾性波が発生する。この中で表面波は、構造物の内部を伝搬する訳ではないので、構造物の内部欠陥探査には適しない。測定の利便性を考慮すると、打撃面と測定面を同一面とし、また測定面の上下方向の振動成分を測定する方法が望ましい。

これは、打撃によって、主として上下方向の振動成分が卓越して発生するからである。構造物表面に発生した波動(入力)と応答波形として測定された波動の間には、

$$y(t) = \int_0^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

の線形伝達関係を仮定することができる。ここで、 h は、伝達関数であり、固体表面を打撃することを考慮すると、図 2 に示すようなシステムを示している。固体が単に波動を伝搬させるのみで、特段に周波数特性を持つものでなければ、それぞれの伝達関数は、

$$h(t)_{t=t_0} = R, \quad h(t)_{t \neq t_0} = 0 \quad (3)$$

である。ここで、 t_0 は構造物内部に波動を反射させる境界があったとして、波動が打撃点から境界に向い、そこで反射して測定点に到達する時間である。 R は、境界での波動の反射率を示す。

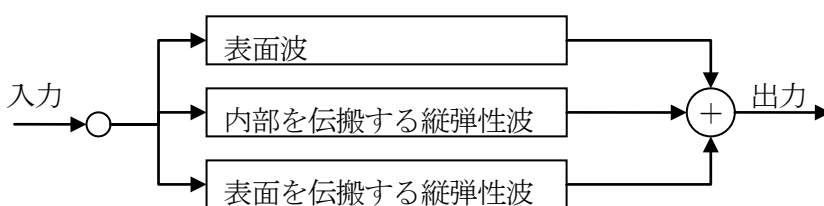


図 2 波動の伝搬システム

構造物内部の状況を波動の伝搬で解析する方法は、正規化された反射波の強さと到達時間を求めることに帰着する。しかしながら、1点の入出力関係では、同一到達時間を持つ境界の位置は、入出力点を焦点とする楕円上にあることは決定出来ても、その位置を同定することは出来ない。

そこで、入出力点を複数用い、インパルス応答を重合することによって、反射点(面)の空間位置を決定する手法が必要である。この理論的背景および成立性については、筆者らが既に報告³⁾している。

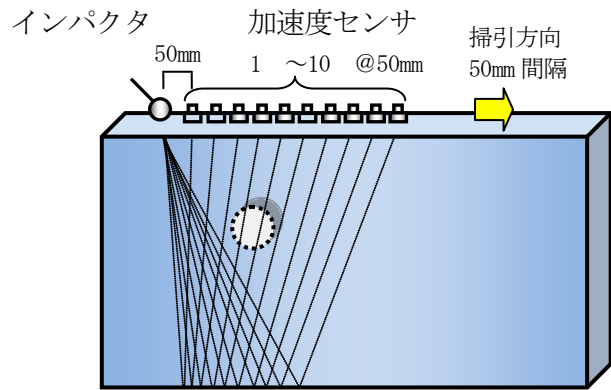
3. 実験の概要

3.1 供試体測定方法

本研究では、等方均質で2次元とみなせるMCナイロン板（幅50mm、高さ600mm、長さ1200mm）を用いて、健全な状態と内部欠陥を模擬して、直径100mmの孔をあけた状態で測定を行った。測定のイメージを図3に示す。測定はインパクトと10個の特性の揃った加速度計をそれぞれ50mm間隔に並べたものを1つのユニットとし、供試体上面の端部から100mmの位置から550mmまで50mm間隔で掃引しながら測定を行うことを計画した。実際には、2chの測定でセンサの位置を50mmずつずらしながら1ユニット分の測定を行った。

測定点番号を図3下に示しているが、本論では打撃点の番号を測定点番号とする。

測定には、iTECS-6（アプライトリサーチ社製）を用いた。センサは加速度計（100mV/G）を用い、波動の入力にはインパルスハンマを用い、入力波形の記録も行った。計測条件は、サンプリング速度 $0.1\mu\text{s}$ 、測定時間3msとした。孔の位置は端部から400mm、測定面から250mmを孔の中心とした。



測定点 No. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

図3 実験イメージと測定点配置

3.2 信号処理

3.2.1 相互相関によるインパルス応答の代替

測定した入出力波形を元にインパルス応答解析を行う方法が一般的であるが、波動の反射経路が比較的単純で、先験的に応答関数が数個パルスとして記述できることがわかっている。このため、ここでは、打撃力によって供試体に生成される粒子速度信号(打撃力波形を微分)と応答の粒子速度波形(加速度で測定した波形を積分)の相互相関を求める方法を用い、測定点(ユニット)毎に平均化する処理を行った。

3.2.2 死角フィルターによる表面波の影響の除去

図4に測定点7での相互相関の平均波形を示すが、図中▲の位置に大きな相関信号が見られる。これは、供試体表面を伝搬する表面波によるものであり、内部欠陥を探索する上では好ましいものではない。そこで、表面波の伝達関数を先験的に仮定して表面波成分の応答を求め、これを測定波形から除去する方法を用いた。いわば、表面波の見えない波形を生成することになり、ここでは、これを死角フィルターと呼ぶ。

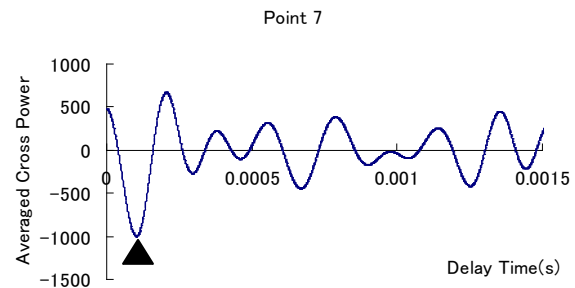


図4 個別点での相互相関

死角フィルターを用いることによって、浅い位置での反射波を分析することが可能となる。

ここで、測定点7における死角フィルター処理後の相互相関の平均波形を図5に示す。孔無し、有りとも、△に示す位置に最も下に凸となるピークが見うけられるが、供試体の厚さから弾性波速度を

計算すると MC ナイロンのものとほぼ一致するため、縦弾性波が底面で反射し、測定面に到達した波形を示していると考えられる。また、右図中▼部のピークから深さを計算すると約 220mm であり、孔部からの反射波が明瞭にとらえられていると言える。

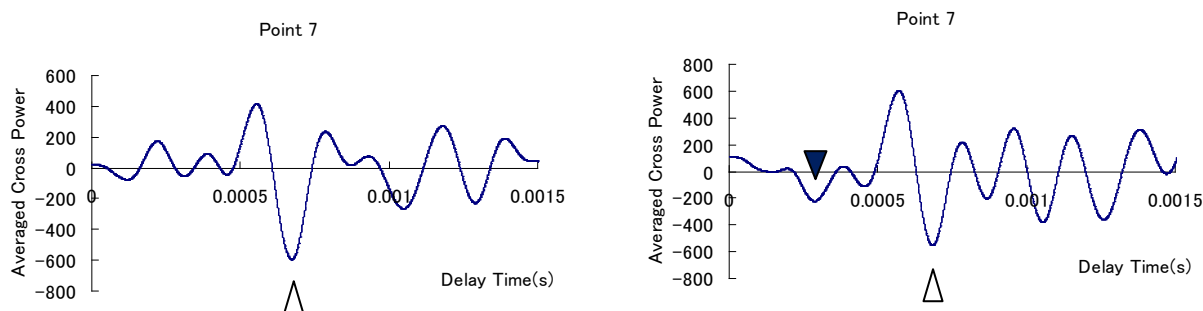


図5 測定点7 死角フィルター後相互相関波形（左：孔無し 右：孔有り）

3.3 相互相関の重合

図6は、相互相関を重合し、供試体の厚さおよび、孔の位置の検知を試みたものである。縦軸は厚さ(0~1.0m)、横軸は供試体の長さ(0~0.5m)を示し、図の濃淡は信号の強さを示す。

重合時には、波動が斜め入射している方向成分については、その余弦成分のみを重ね合わせした。これは、受信センサー(加速度計)の感度軸が垂直方向であり、斜め入射信号に対しては、その余弦成分のみを検出するからである。図より、供試体の厚さに相当する位置に反射面があることが示された。また、厚さ0.2m付近にも、反射面があるように見うけられるが、いずれも除去しきれなかった表面波の影響を受けているものと推察される。しかしながら、左図では厚さに相当する箇所、右図では孔の深さに相当する箇所に最大となる反応が見られたことから、およそその孔の位置も表現されていると言えよう。

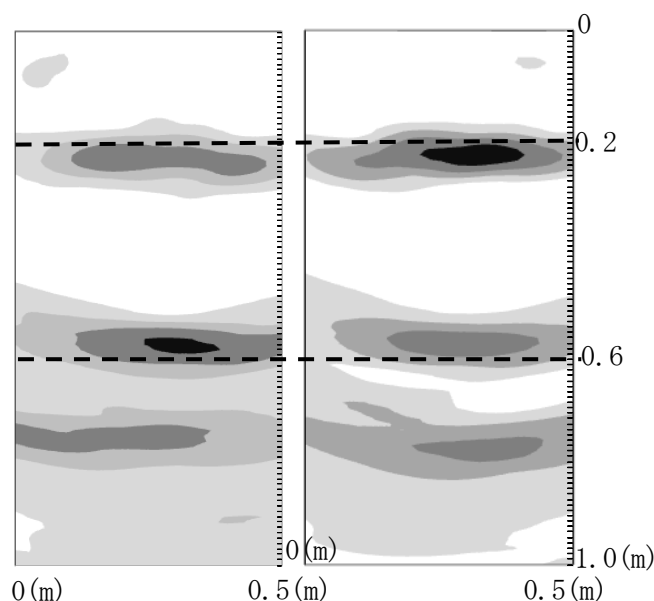


図6 探査結果のコンタ（左：孔無し，右：孔有り）

4. まとめと考察

衝撃弾性波法では、使用する打撃入力信号の波長が長いため、構造物の厚さや内部欠陥を定在波の波長を元に測定する方法が用いられてきたが、内部欠陥の実際の位置を同定できないという問題点が残されていた。本検討により、反射波の到達時刻を直接測定する方法によって、内部欠陥の深さを検知できる可能性が示されたと考える。また、表面波の影響の除去に関する検討が今後の課題である。

【参考文献】

- 1) Mary J. Sansalone, William B. Strett IMPACT-ECHO Bullbrier Press
- 2) 山下 健太郎, 境 友昭, 極 檀 邦夫：衝撃弾性波法を用いた PC 橋梁のシースの位置および充填度の検知 日本非破壊検査協会 平成 17 年度 秋季大会講演概要集
- 3) 境友昭, 極檀邦夫：インパルス応答の畳み込みによるコンクリート構造物の内部欠陥の可視化, 第 62 回土木学会年次学術講演会講演概要集 P5-0003