

### 自己回帰モデルを用いた打音信号解析

|               |     |      |
|---------------|-----|------|
| 日東建設 (株)      | 正会員 | 久保 元 |
| 日東建設 (株)      | 正会員 | 久保元樹 |
| 日東建設 (株)      |     | 中野泰宏 |
| アプライドリサーチ (株) | 正会員 | 境 友昭 |

#### 1. まえがき

打音技術は、ハンマ等でコンクリート構造物表面を打撃し、その時に発生する「音」を人が聴取して、打撃面下のコンクリート状況を判別するものである。人の官能によることから、客観性、再現性に乏しいとして、判別のシステム化に関する研究<sup>1)</sup>が進められている。打音信号では時間の経過によって音圧レベル、周波数構成などが変化する事は、稲葉ら<sup>2)</sup>が指摘しているとおりであり、実際、人は周波数構成やその音圧レベルの変化を「音質」として知覚し、音の違いを聞き分けていると考えられる。本論では、波形に着目し自己回帰モデルの打音信号解析への適用性について検討した結果を報告する。

#### 2. 自己回帰モデル

自己回帰モデルでは、過去の測定値と係数ベクトルの1次結合で、現在の値を推定する。式(1)において添字の*i*は、離散時間間隔  $\delta t$  で測定波形を数値化したときの時刻  $i\delta t$  を意味する。

$$\hat{y}_i = a_1 y_{i-1} + a_2 y_{i-2} + \dots + a_N y_{i-N} \tag{1}$$

式(1)における係数列  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  は自己回帰モデルの回帰係数であり、この数列によってシステムの挙動が決定される。自己回帰モデルによる予測残差は、

$$Q = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum (y_i - a_1 y_{i-1} - a_2 y_{i-2} - \dots - a_N y_{i-N})^2 \tag{2}$$

であり、自己回帰係数を、この予測誤差が最小化、あるいは白色化(ランダムノイズ化)されるように決定する。しかし、打音信号は、定常確率過程にある信号とは異なっているところから、その適用性については検討が必要である。いずれにしろ、残差が限りなく白色化されているのであれば、非定常衝撃音に対しても自己回帰モデルが適用できると推測されると考えて良い。

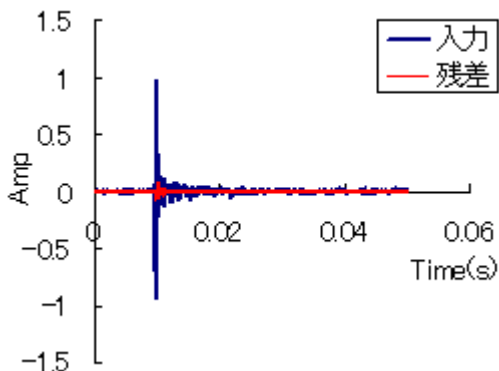


図1 測定波形と自己回帰モデルによる残差

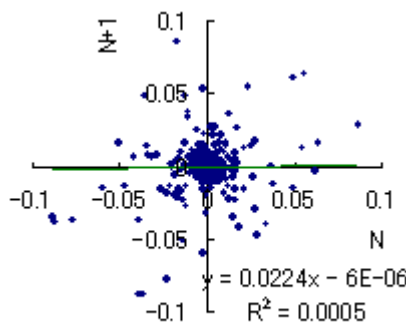


図2 残差の回帰写像

図1は、測定した打音(音圧)波形と自己回帰モデルを適用した場合の残差波形、図2は残差の回帰写像である。自己回帰モデル係数は、式(2)で残差が最小となるように決定している。回帰写像は、時刻  $N$  と  $N+1$  の値を直交空間に配置したものである。図中に回帰式と寄与率を示しているが、回帰写像での相関係数は非常に小さく、残差はほぼ白色化されていると言えるであろう。このことから、打音信号に対して自己回帰モデルを適用することが可能であると考えられる。

キーワード コンクリート構造物, 非破壊検査, 自己回帰モデル, 内部欠陥

連絡先 〒003-0833 札幌市白石区北郷3条4丁目9-8 日東建設(株)札幌支店 TEL011-874-6200

### 3. 自己回帰モデルの適用

図3は、入力信号のパワーと残差のパワーの時系列変化を比較したものである。図から入力振幅が大きい時刻で、残差パワーも大きくなるのがわかる。これは、波形全体を用いて作成した自己回帰係数が、信号成分が強い時間で適合していない可能性を示唆しているものと思われる。これに対し、図4は、入力パワーに対する残差パワーの比率関係を計算したものである。図は、入力パワーが大きい場合、相対的に残差が小さくなることを示している。つまり、非定常衝撃音を対象とした自己回帰モデルでは、全時間帯の全てについて適合した自己回帰係数が算出されているわけではないものの、振幅が大きい、すなわち、波形に関する情報を多く含んでいる領域に対する適合性がより高いことを意味している。

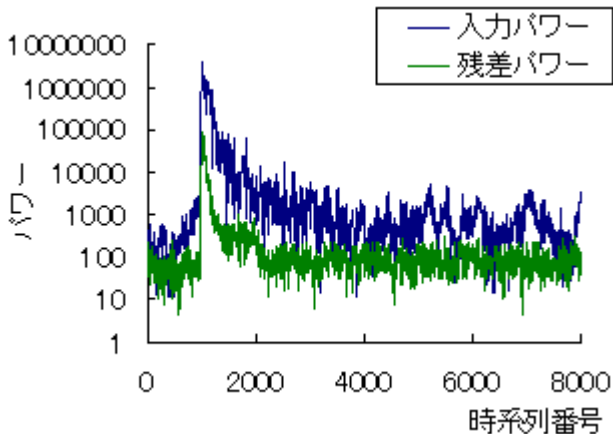


図3 入力信号と残差のパワー変化

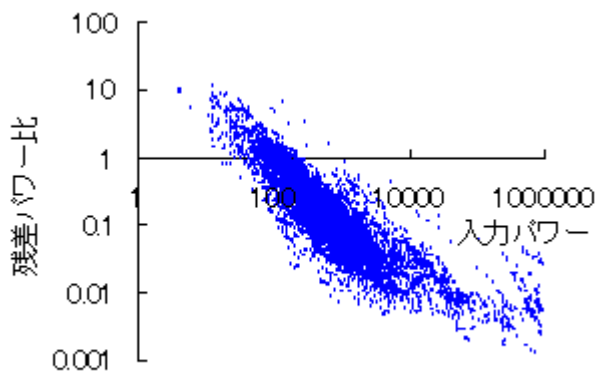


図4 入力信号のパワーと残差パワーの比率

自己回帰モデルを利用した健全性診断では、初めに健全部での自己回帰係数を算出する。ついで、測定データにその自己回帰係数を適用し、残差を求める。残差パワー、回帰画像での相関係数は、その値が閾値よりも大きい場合には、健全部とは異なる状況がある、すなわち、この場合は何らかの欠陥があると判断することになる。表1は、測定点(2-2:健全部)で測定した波形から算出した自己回帰係数を他の測定点データに適用した結果を示すものである。状況が異なる測定点では、残差、あるいは相関係数が大きくなる傾向になり、両者が閾値以上となれば、「非健全部」と評価できる可能性が示される。

表1 自己回帰モデルを他測定点に適用した結果

| 測定位置      | 2-2   | 2-3   | 2-4   | 2-5   | 2-6  | 2-7   | 2-8   |      |
|-----------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
|           | 健全部   | 健全部   | 空洞部   | 空洞部   | 健全部  | 健全部   | 端部    |      |
| 残差パワー比(%) | 1.44  | 1.44  | 4.77  | 2.22  | 2.17 | 2.65  | 1.77  |      |
| 回帰画像相関係数  | 0.022 | 0.022 | 0.122 | 0.116 | 0.28 | 0.022 | 0.129 |      |
| 相対値       | 残差    | 1     | 1     | 3.31  | 1.54 | 1.51  | 1.84  | 1.23 |
|           | 相関係数  | 1     | 1     | 5.54  | 5.27 | 12.7  | 1     | 5.86 |

### 4. まとめ

非定常衝撃音である打音信号解析に対する自己回帰モデルの適用性について検討した結果、自己回帰モデルによる残差出力はほぼ白色化され、自己回帰モデルが適用出来ることがわかった。また、内部欠陥を持つ供試体の打音データに適用した結果、内部欠陥をほぼ検出出来ていることがわかった。今後は、自己回帰モデルの算出方法、種々構造物に対する適合性について検討を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 下村雄介, 稲田昌俊, 鎌田敏郎: 打撃音によるコンクリート表層部の品質評価手法土木学会第60回年度学術講演会 5-607 他
- 2) 稲葉智明, 羅休, 羽矢洋: 打音解析法の検証と評価の適用事例(その1: 試験及び解析結果) 土木学会第57回年度学術講演会 V-170