

京都大学 学生員 ○森石 理絵 京都大学 正会員 大島 義信
 京都大学 正会員 高谷 哲 京都大学 正会員 山本 貴士
 京都大学 フェロー 宮川 豊章

1. 研究目的

従来の弾性波を用いたコンクリート内部状況の評価手法において、弾性波速度を利用した方法では、初動波の到達時間のみに着目している¹⁾。また、初動波に続く干渉波の評価に関しては、スペクトル解析を用いた方法が提案されているが、この場合波形の位相情報が欠落してしまう²⁾。一方、カオス理論に基づけば、任意の波形からアトラクタと呼ばれる多次元の状態構造を構築することが可能であり³⁾、このアトラクタから位相情報を欠落することなく、時系列波形の特徴を抽出できる。

そこで本研究では、位相情報も加味した波形評価が可能なカオス時系列解析を用いて、初動波に後続する干渉波の特徴を多方面から評価した。まず、カオス波形を定常波として入力し、定常的に出力される受信波および入力波からアトラクタを構築した。その後、構築したアトラクタ構造を、カオス特徴量であるリアプノフ指数、相関次元、およびアトラクタ予測誤差により評価した。ここでは、コンクリートにおける品質評価の基礎的研究として、内部構造のなかでも干渉波の影響を強く受けると考えられる骨材が、上記3つのカオス特徴量に与える影響について定量的に評価を行った。

2. 実験概要

供試体は100×300×300mmで作製し、通常の骨材を用いたコンクリート供試体を作製した。ここでは、粗骨材の最大寸法、粗骨材混入率（全体積に対する粗骨材体積の割合）、およびW/Cが弾性波伝播挙動に与える影響について検討する。そのため、粗骨材の骨材混入率を68%として、骨材最大寸法(Gmax)を15mm、20mmと変化させた。また、骨材混入率の影響を評価するため、骨材最大寸法を15mmとして、

骨材混入率を55, 68, 78%と変化させた。ただし、これらのW/Cは50%とした。それぞれの要因に対し、供試体を3体作成し、それぞれ3回の計測を行った。

全供試体において、300×300mmの両側面の中央に受信機と送信機をそれぞれ接触させた。ただし、共振周波数は送信機が100kHz、受信機が40kHzとした。入力波形であるカオス波形は、ローレンツ方程式(式(1))の変数 x の時刻歴を用いた(図-1)。ただし、図中Source signalは発信電圧、Received signalは発信機と受信機を直接接触させて得られた波形である。また、

$$\begin{cases} \dot{x} = -\alpha(x - y) \\ \dot{y} = \beta x - y - xz \\ \dot{z} = xy - \gamma z \end{cases} \quad (1)$$

カオス時系列解析では、ローレンツ方程式の次元3、およびリアプノフ指数が最大となる遅れ時間1を利用して、入力波形と受信波形からアトラクタを構築した。次に、相関次元およびリアプノフ指数については、受信波形のアトラクタから求め、予測誤差は入力波形のアトラクタを基準に受信波形のアトラクタを予測することで求めた。また、すべての供試体について、供試体中の弾性波伝播時間より得られる弾性波伝播速度、および中心周波数（スペクトル重心）も求めた。

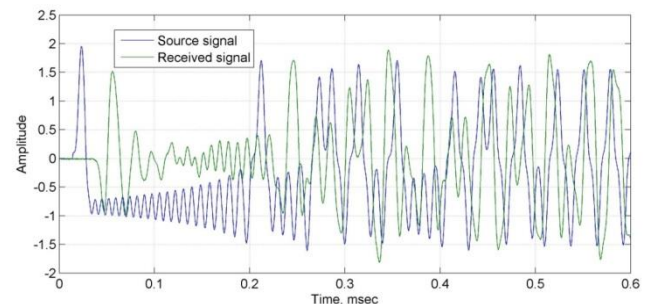


図-1 カオス入力波形

3. 実験結果および考察

3.1 骨材混入率による違い

W/C が 50%, 骨材最大寸法が 15mm で等しく, 骨材混入率を 55, 68, 78%と変化させた場合の解析結果を図-2 に示す。ただし, 塗りつぶした丸は平均を表している。弾性波速度は, マトリクス部分よりも骨材の方が弾性波速度は大きいため, 混入率が大きくなると大きくなった。また中心周波数は, 混入率が大きいほど反射界面の影響が大きくなり, 高周波成分の減衰が大きくなるため, 混入率が大きくなると小さくなった。次に, 相関次元とリアプノフ指数については, 混入率が大きいほど小さくなった。今回入力した波形は, 軌道不安定性の高いローレンツ方程式の解を用いているため, 骨材の減衰効果により高周波成分が失われたことによって波形がより単調となり, これらの指標は小さくなったものと考えられる。予測誤差では, 混入率が大きくなるほど小さくなった。骨材の混入率が大きくなると, マトリクス部よりも密実な骨材の部分が増加し, 予測誤差に影響を与えられ考えられる入力波と出力波の位相変化が小さくなり, 結果として予測誤差が小さくなったものと考えられる。また, 中心周波数と相関次元およびリアプノフ指数には, 比較的明確な相関が確認された。

3.2 W/C による違い

骨材最大寸法 15mm, 骨材混入率 68%において, W/C を 30, 50, 65%と変化させた場合の結果を図-3 に示す。この場合, 弾性波速度は W/C が大きくなるほど小さくなった。これは W/C が大きくなるほどマトリクス部分の密実性が低下するためである。予測誤差は W/C が大きくなるほど大きくなった。これは W/C が大きいほど全体としての均質性が低下し, 位相の変化が大きくなるためと考えられる。中心周波数, 相関次元, およびリアプノフ指数では顕著な変化はみられなかった。

3.3 最大骨材寸法による違い

最大骨材寸法の違いについても検討を行ったが, 今回用いた入力波形の周波数帯域が 40~80kHz と比較的 low, 波長として 100mm 程度であったため, 最大骨材寸法が 15mm および 25mm 程度では, 明確な違いが確認できなかった。

4. 結論

本研究における検討の結果, 以下の結論を得た。

- 1) 相関次元およびリアプノフ指数は, 周波数の情報を持ち, 骨材(径, 混入率, 界面)の影響を受ける。
- 2) 予測誤差は, 位相の情報を持ち, マトリクス部の密実性に影響を受ける。

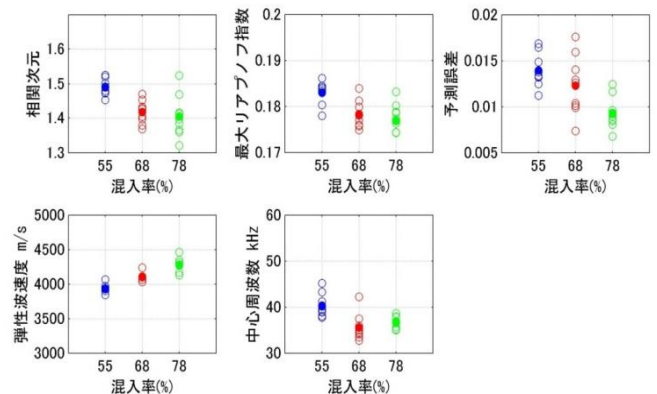


図-2 骨材混入率による違い

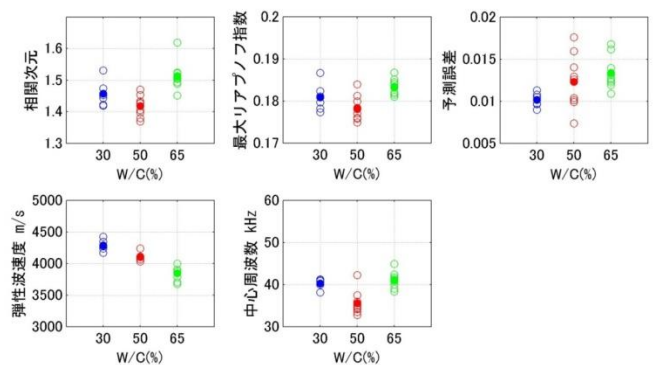


図-3 W/C による違い

【謝辞】

本研究の一部は科学研究費（萌芽研究 23656280）の助成を受けた。ここに記し謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 岩波光保ら：コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 NO.627/V-44, 223-238, 1999. 8
- 2) 宮川豊章ら：ASR 劣化構造物安全性能評価手法の開発, 道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート No.17-1, 新道路学術会議, 2008.
- 3) 合原一幸ら：カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書株式会社, 2000. 11