

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：14301  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23656280  
 研究課題名（和文） コンクリート内部を多重伝播する弾性波の複雑性に着目した劣化評価法  
 研究課題名（英文） Quality evaluation of concrete material by attractor analysis for Coda waves  
 研究代表者  
 服部 篤史 (HATTORI ATSUSHI)  
 京都大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号：30243067

研究成果の概要（和文）：コンクリートに入力された弾性波は、骨材や空隙などの内部構造の影響を受けながら、反射や干渉を繰り返し、伝播していく。本研究では、コンクリートを透過した弾性波の初動波に続く干渉波に着目し、そのアトラクタ構造を評価することで、コンクリートの内部構造と各種カオス特徴量との関連性について検討を行った。その結果、リアプノフ指数、フラクタル次元は骨材界面の影響を受け、予測誤差は弾性体としての均質性に影響を受けることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

The elastic waves propagating in concrete material are interfered with each other and reflected by aggregates and then the observed waves become much complicated but must have the information of aggregates or other influential factors. Thus in this study chaotic theory is applied to evaluate the complicity of the waves transmitted throughout concrete material. As a result it is found that prediction error of the received signal has some correlation with the homogeneity of the material, and that correlation dimension and maximum Lyapunov exponent have strong correlation with the bond matrix around the aggregates.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート

#### 1. 研究開始当初の背景

コンクリートに入力された弾性波は、骨材や空隙などの内部構造の影響を受けながら、反射や干渉を繰り返し、伝播していく。よって、初動波（第一到達波）に後続する干渉波には、骨材を含めたコンクリート内部の情報が多く含まれていると考えられる。後続する波形の評価として、スペクトルに着目する方法がある<sup>2)</sup>。この方法では、波形のスペクトルに着目し、そのピーク周波数やスペクトル重心

などを利用して評価を行っている。しかし、波形の特徴量としてスペクトルに着目した場合、各周波数成分のパワーは反映されるものの、位相の情報が欠落しているため、波形の情報を十分に引き出しているとはいえない。

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<sup>3)</sup>、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。すなわち、アトラクタには波形の有する様々な特徴量が保存されており、特にカオス波形からアトラクタを構築した場合、他の波形では見られない特徴的な挙動を示すことが知られている。

## 2. 研究の目的

本研究では、コンクリートを透過した弾性波の初動波に続く干渉波に着目し、そのアトラクタ構造を評価することで、コンクリートの内部構造と各種カオス特徴量との関連性について検討を行った。ここでは、干渉波に影響を与える骨材をパラメータとし、またカオス特徴量として相関次元、最大リアプノフ指数、予測誤差を用いた。一般に、コンクリート部材に対する弾性波の入力には、パルス波が用いられている。しかし、パルス波では波が時間とともに減衰するため、アトラクタでは一点に収束する構造となってしまう。そこで本研究では、カオス波形を定常波として入力することで、出力される干渉波を定常的に発生させ、そのアトラクタを評価した。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験の概要

本研究では、普通骨材を用いたコンクリート供試体を作製し、コンクリート中に存在する骨材の最大寸法、骨材混入率、水セメント比(W/C)の違いが供試体中を伝播した弾性波に与える影響について検討した。

供試体寸法は100×300×300mm、供試体数は各検討ケースで3個とした。ここでは、標準的な供試体の骨材最大寸法を15mm、骨材混入率を68%、W/Cを50%として、骨材最大寸法(Gmax)を15mm、20mmと変化させた場合、骨材混入率を55、68、78%と変化させた場合、またW/Cを30、50、65%と変化させた場合について、カオス特徴量の変化を確認した。ただし、適切な流動性と材料分離抵抗性を確保するため、骨材混入率が55%とW/Cが65%のケースにおいては分離低減剤を、また骨材混入率が78%とW/Cが30%のケースにおいては高性能減水剤を使用した。表-1に供試体要因を示す。

表-1 コンクリート供試体一覧

Case	W/C (%)	Gmax (mm)	骨材混入率	供試体数(個)
1	50	15	68%	3
2	50	20	68%	3
3	50	15	78%	3
4	30	15	68%	3
5	50	15	55%	3
6	65	15	68%	3

測定では、任意の波形を電圧に変換した後、発信探触子で弾性波を入力、その後コンクリートを透過した弾性波を受信探触子で受信し、入力波形とともにロガーで記録した。ただし、入出力の探触子は300×300mm面の中心位置に設置した。また、入力波形であるカオス波形として、以下に示すローレンツ方程式の変数xの時刻歴を用いた。また、供試体中に入射された弾性波を、広帯域垂直型超音波探触子(直径40mm)の共振周波数を40kHzとした受信器により受信した。ここでは、受信した波動を電圧増幅装置で増幅させ、 $2 \times 10^{-7}$ 秒で収録した。また、入力波形も同時に収録している。発信側探触子と受信側探触子を直接接触させて受信した波形を図-1に示す。図中、Source signalは発信波形を示し、Received signalは受信波形を示す。以上の方法により収録した入力波形と出力波形に対し、カオス時系列解析を行った。ここでは、ローレンツモデルの次元が3であることより、埋め込み次元を3とした。遅れ時間については、いくつかの方法が提案されているが、正しく遅れ時間を推定する明確な方法はない。そこで本研究では、標準的な波形(W/C=50%、骨材混入率65%、Gmax=15mm)に対して、最大リアプノフ指数が最大となる遅れ時間を採用した。これより、埋め込み次元3、遅れ時間を1として、全ての波形に対してアトラクタを構築した。

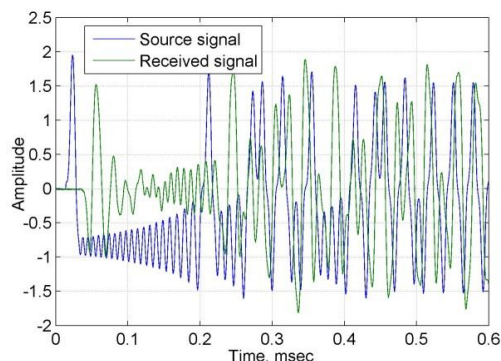


図-1 入力波形

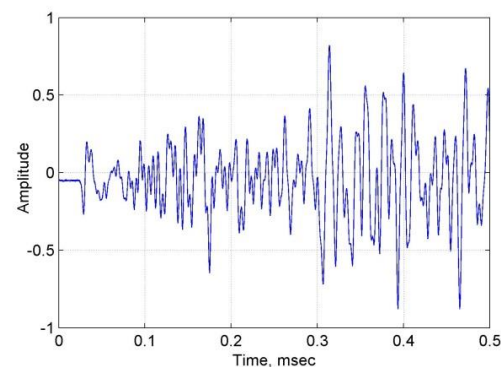


図-2 透過弾性波受信波形の一例

#### 4. 研究成果

##### (1) W/C の影響

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, 出力波形の相関次元, 最大リアプノフ指数, 予測誤差の解析結果を図-3 に示す. また, 合わせて弾性波速度, 中心周波数の結果も同図に示す. ただし, 白抜きの丸は各測定結果を示し, 塗りつぶした丸はこれらの平均を表している. ここで, 弾性波速度の単位は(km/s), 予測誤差は正規化(最大値最小値を±1 に正規化)した波形出力との誤差を表し, 相関次元と最大リアプノフ指数はともに単位を持たない. また, 予測誤差については, 5000 データの平均値を示している.

まず弾性波速度と中心周波数について考察する. 図より, W/C の増加にともない弾性波速度が減少していることがわかる. これらは, W/C の増加によりセメントペーストの密実性が低下し, 骨材との音響インピーダンス差が大きくなり, 骨材界面における弾性波の散乱, 反射が顕著になったことによると考えられる. この結果は既往の研究とも一致している. また, 上記の理由より, W/C が増加するほど弾性波は伝播しにくいと考えられる. また中心周波数では, W/C による顕著な変化はみられない.

次に各種カオス特徴量について考察する. 予測誤差では, W/C の増加にともない値が増加していることがわかる. 予測誤差は, 入力波形と出力波形のアトラクタ上での近さを表すが, 中心周波数にはほぼ変化がないことから, 位相に関連する部分での差異が広がった可能性がある. また, 相関次元およびリアプノフ指数においても中心周波数同様, W/C との明確な関係は確認できなかった.

相関次元は, アトラクタ構造の自己相似性が低くなる時, その値が小さくなる. 例えば, 少ない種類の振幅や振動数で波形が構成されている場合など, アトラクタ構造の自己相似性が少なくなる. いま, W/C の変化に対して弾性波の周波数の変化が小さいことから, 構成される波形の種類そのものは変化しにくいから, 相関次元に対する影響も小さいと考えられる.

リアプノフ指数は, アトラクタの軌道不安性を示すため, リアプノフ指数が小さくなる場合, アトラクタ上の近傍二点は近い軌跡を描くことになる. これは, 時系列上において波形形状の似た箇所が出現することを意味している. よって相関次元と同様の理由により, W/C がリアプノフ指数に与える影響が小さいものと考えられる.

##### (2) 骨材最大寸法の影響

W/C が 50%, 骨材混入率が 68%で等しく, 骨材最大寸法を 15, 20mm と変化させた場合の

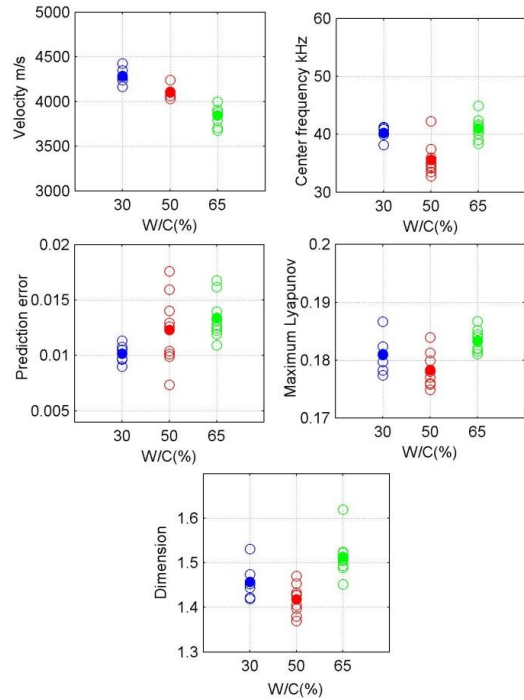


図-3 W/C による違い

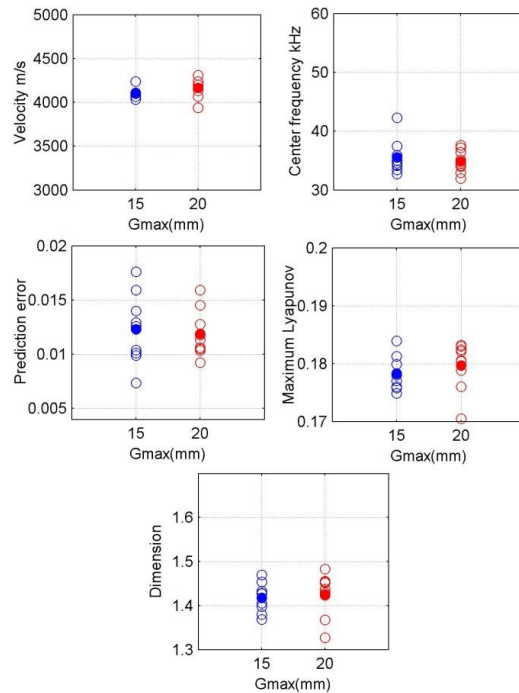


図-4 骨材径による違い

各特徴量の値を図-4 に示す. 図より, 弾性波速度は, いずれの供試体においてもほとんど変化していない. 中心周波数は, 最大寸法が大きくなるほど値が微小ではあるが減少している. これは, 骨材の最大寸法が小さくなるにつれて, 骨材の比表面積が大きくなり, 骨材周囲に形成されるポーラスな遷移帯の量が多くなることによるものと考えられる.

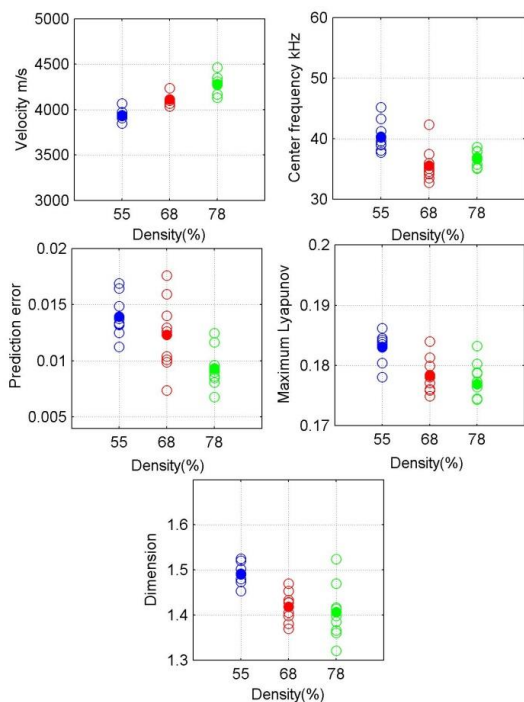


図-5 骨材径による違い

またこの結果は既往の研究結果とも一致している。

次に各カオス特徴量について考察する。リアプノフ指数については、骨材最大寸法が大きくなるほど値が微増している。相関次元および予測誤差においては、骨材最大寸法の変化による顕著な影響はみられない。また、骨材最大寸法の変化による全体の結果から、すべての特徴量において、骨材最大寸法の変化による影響が、他の要因による変化と比べて比較的小さいことがわかる。これは、骨材径に比べ波長が十分長いため、最大寸法による変化が弾性波伝播挙動に及ぼす影響が小さかったことが理由として考えられる。

### (3) 骨材密度の影響

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各種カオス特徴量について、図-5 に示す。

図より、骨材混入率の増加とともに弾性波速度が大きくなり、また中心周波数が低くなることからわかる。骨材混入率が低い場合、相対的にマトリックス部分が多くなり、コンクリートの単位水量も多くなる。そのため、結果としてブリーディングが著しくなり、マトリックス部分に脆弱な遷移帯量が多く形成されたものと考えられる。この結果は既往の研究結果と一致している。

次にカオス特徴量について考察する。相関次元、リアプノフ指数、および予測誤差のすべてにおいて、骨材混入率が大きくなるほど、値が減少しているのがわかる。骨材混入率が増加すると、波形の減衰が大きくなること

考えられる。また、骨材量が増えると均質な部分が増すために位相が変化せず、予測誤差が小さくなると考えられる。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

大島義信, 森石理恵, 宮川豊章: カオス時系列解析を利用したコンクリート透過弾性波の評価, 土木学会論文集 A2, Vol. 68, No. 2, 2013. (掲載予定)

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

服部 篤史 (HATTORI ATSUSHI)  
 京都大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号: 30243067

#### (2) 研究分担者

大島 義信 (OSHIMA YOSHINOBU)  
 京都大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号: 10362451  
 野村 泰稔 (YASUTOSHI NOMURA)  
 立命館大学・理工学部・助教  
 研究者番号: 20372667