

# コンクリート透過弾性波の複雑性に関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 1

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、大島義信

## 【要旨】

現在行われている超音波法などの弾性波を用いたコンクリートの非破壊試験では、主に弾性波速度を指標とした評価が行われている。しかし、コンクリートは様な材料ではなく骨材の形状や配置は不規則であり、周波数ごとの到達時間も骨材の形状や位置に応じて不規則となる。

本研究では、弾性波数値シミュレーションを用いて、コンクリート透過弾性波における散乱減衰の厳密な評価、および散乱減衰に影響を及ぼすと考えられる骨材の複雑性の評価を行った。その結果、既設コンクリート部材の健全性を透過弾性波で評価する場合には、骨材配置の複雑さに起因する散乱減衰を除き、コンクリートの品質に係る材料減衰を評価することによって、より正確な品質評価が行える可能性を示すことができた。

キーワード：コンクリート透過弾性波、ハースト指数、セミバリオグラム、散乱減衰

## 1. はじめに

現在行われている超音波法などの弾性波を用いたコンクリートの非破壊試験では、主に弾性波速度を指標にした評価が行われている。しかし、弾性波速度は弾性波の到達時間のみに着目するものであり、コンクリートの品質に対する感度は必ずしも高くはない。

コンクリートを透過する弾性波は、骨材とセメントマトリクスの境界面で複雑に多重反射し、合成波(Coda波)として伝播する。コンクリート中における骨材の形状や配置は不規則であり、周波数ごとの到達時間も骨材の形状や位置に応じて不規則となる。すなわち、周波数ごとの到達時間である群遅延時間の不規則性と、骨材の形状や配置の不規則性には一連の関係性があると推察される。

一方、多重反射する弾性波は散乱減衰という形で減衰することが知られている。また、乱反射だけでなく、摩擦エネルギーによっても減衰が生じ、材料減衰として知られている。この材料減衰は、コンクリートの品質(密実性等)に直結する減衰と考えることができる。

これまで、弾性波の波形から減衰を評価する場合、散乱減衰と材料減衰を明確に分離することができず、評価精度を下げる要因となっていた。

よって、本研究では、コンクリート透過弾性波の減衰特性に基づくコンクリートの品質評価の精度向上をめざし、弾性波数値シミュレーションを用いて、Coda波における散乱減衰の厳密な評価、および散乱減衰に

影響を及ぼすと考えられる骨材の不規則性の定量化を行った。

## 2. 数値解析

コンクリート中の粗骨材を大小様々な球体に仮定し、二次元の伝播波動問題を解いた。解析ケースを表1に示す。骨材分布は実際のコンクリートを模擬し、 $\beta$ 分布によって骨材径と含有率を定めた。いずれのケースも $100 \times 400$  (mm)の領域とした(図1)。弾性波は差分法による数値シミュレーションを用いて再現した。

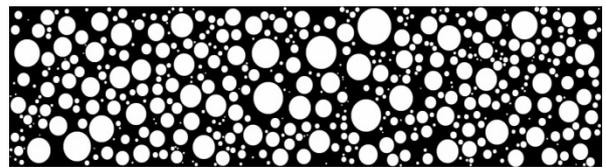


図1 解析領域(白抜きは骨材を表現している)

## 3. ハースト指数

群遅延時間は、弾性波の周波数ごとの到達時間を表すものであり、フーリエ変換で得られる位相の周波数による微分によって算出できる<sup>1)</sup>。すなわち、位相を $\phi(\omega)$ 、角周波数を $\omega$ とすれば、群遅延時間 $\xi(\omega)$ は

$$\xi(\omega) = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega}$$

である。この群遅延時間にフラクタル性を仮定し、群遅延時間の分散を評価することで、ハースト指数 $H$ を用いて表現することができる<sup>2)</sup>。

表1 異なる骨材混入率(混入率が小さい順)

名前	骨材混入率(%)	骨材最小径(mm)	骨材最大径(mm)	a	b
No 1	27.56	1	10	0.2	3
No 2	32.34	1	10	0.2	1
No 3	36.11	1	10	0.1	3
No 4	43.38	1	10	0.1	2
No 5	44.21	1	10	0.3	2
No 6	44.44	1	15	0.2	3.5
No 7	45.53	1	10	0.2	3
No 8	46.20	1	10	0.3	1
No 9	61.72	1	10	0.2	1

a, b: 骨材のβ分布のパラメータ

#### 4. セミバリオグラム

本研究では、骨材配置を定量化する方法として、確率場の2次特性であるセミバリオグラムを用いる<sup>3)</sup>。一般に、領域 $D \subset \mathbb{R}^d$ 上の確率場 $Z := \{Z(\mathbf{x}); \mathbf{x} \in D\}$ を考えた場合、観測位置 $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n \in D$ における確率変数 $Z(\mathbf{x}_1), \dots, Z(\mathbf{x}_n)$ の実現値を $z(\mathbf{x}_1), \dots, z(\mathbf{x}_n)$ とする。このとき、相対的な分散値が相対位置 $\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$ のみに依存する場合、すなわち $\text{Var}\{Z(\mathbf{x}_1) - Z(\mathbf{x}_2)\} = 2\gamma(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)$ を満足する場合、関数 $\gamma$ をバリオグラムとよぶ。本研究では、図2に示す標本分散からの収束値であるシルと、その収束までの距離であるレンジを指標として採用した。

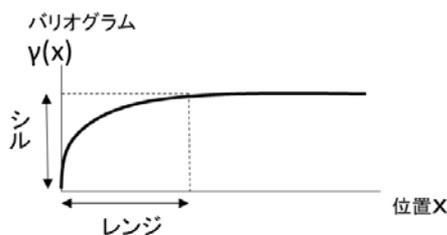


図2 バリオグラムの指標 (シル、レンジ)

#### 5. ハースト指数とセミバリオグラムの関係

図3には、9ケースで得られた、それぞれの指標(シル及びレンジ)とハースト指数との関係を示す。また、それぞれの相関係数は0.49と0.752となった。これより、ハースト指数はシルとの関係性は比較的低いが、レンジとの関係が強いことがわかる。レンジは、相似関係にある幾何形状のスケールを表現している。そのため、レンジが大きい図形は、細かいスケールから大きなスケールまで形状にフラクタル性があることを示している。一方、ハースト指数は、その数値が大きくなる

ほど複雑な挙動を示す。よって、弾性波のハースト指数は、骨材配置のフラクタル性に応じて増大するといえることから、位相構造の不規則性は骨材配置の不規則性を表すものであるといえる。今後、ハースト指数から散乱減衰を推定する方法が確立されることによって、時系列波形の振幅減衰から、散乱減衰を除することによって、材料減衰が評価できる可能性がある。

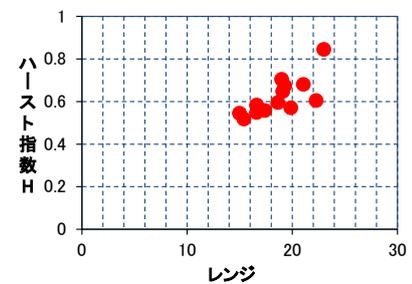
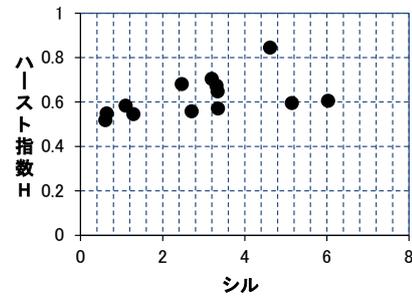


図3 ハースト指数Hとシル及びレンジとの関係

#### 6. まとめ

本研究では、散乱減衰を生じさせる要因である骨材の不規則性と、位相構造の不規則性に相関があることを明らかにした。よって、今後は、位相構造の不規則性を表すハースト指数から、散乱減衰を推定する方法を確立していくことによって、材料減衰を間接的に評価することが可能となり、より高い精度でコンクリートの品質評価が可能になると考えられる。

今後、弾性波を用いたコンクリートの品質評価にあたっては、骨材の形状や配置の不規則性による影響があることに留意して、その精度を評価するのがよい。

#### 参考文献

- 1) 佐藤忠信：地震動位相差分の確率特性とその数理的解釈、土木学会論文集 A1、Vol. 70、No. 2、pp. 295-305、2014
- 2) 松葉育雄：長期記憶過程の統計 自己相似な時系列の理論と方法、共立出版、pp. 85-120、2007
- 3) 間瀬茂、武田純：空間データモデリング 空間統計学の応用、共立出版、pp. 170-176、2001