

論文 周波数分布のパターン認識を活用した衝撃弾性波法によるコンクリート管のひび割れ評価

田中 洋輔^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・石田 誠^{*3}・浅野 雅則^{*4}

要旨：本研究では、コンクリート管に生じるひび割れを評価する方法として、周波数分布のパターン認識を活用した衝撃弾性波法に関して検討した。実験では、対象とするコンクリート管に打撃位置に対して対称に2つの加速度センサを配置した計測を行い、周波数分布を相互比較した。周波数分布の類似性の評価には、パターン認識の手段としてユークリッド距離を用いた。その結果、実験で得られたユークリッド距離はひび割れ管の場合は健全管よりも明らかに大きな値を示すことが確認された。これより、周波数分布のパターン認識に基づくひび割れ評価の可能性が示された。

キーワード：非破壊検査, 衝撃弾性波法, 周波数分布, パターン認識, ひび割れ評価

1. はじめに

鉄筋コンクリート管の劣化評価のための非破壊試験法として衝撃弾性波法¹⁾がある。この手法では、たとえば、コンクリート管にひび割れが存在する場合は、健全なものに比べて受振波の周波数分布における低周波成分の割合が増加する特性を用いてひび割れの存在などを評価しているのが現状である。本手法では、基本的には、いわゆる健全の場合の周波数分布自体が既知であることが前提となる。しかしながら、実構造物への適用を考えた場合、対象とする管が健全の場合における周波数分布を、管径や材質などの異なるあらゆるケースについて事前に把握しておくのは必ずしも容易ではない。

そこで本研究では、健全なコンクリート管での周波数分布にたよることなく評価対象となっているコンクリート管の計測データのみを用いてひび割れ評価を行う新しい手法について検討した。

実験では管中央部を打撃部とし、管中央から等距離の位置に、それぞれ1個、合計2個の加

速度センサを対称に配置した。1回の打撃により得られた2つの周波数分布について両者の分布形状の類似性を評価することにより、ひび割れの有無などを判断する手法を検討した。健全なものであれば2つの周波数分布の類似性は高く、ひび割れなどの存在により、管の状態が不均一になるに従って、両者の類似性は低下するものと考えられる。

本研究では、周波数分布の類似性を定量的に評価するため、ユークリッド距離をベースとしたパターン認識を活用した。

2. 実験概要

2.1 供試体

本実験では、JISに規定されるB型1種遠心力鉄筋コンクリート管(長さ1900mm, 内径250mm, 管厚28mm)を使用した。なお、実験に際しては、図-1に示すように管の首部を切断したものをを用いた。実験では、同一製品における個体差を確認するために、健全供試体は2本(以後、この供試体を「健全管1および2」とする)を用意

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教授 工博 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 学部生

*4 積水化学工業(株) 環境・ライフラインカンパニー 環境土木システム事業部 工博 (正会員)

表-1 供試体種類

供試体種類	ひび割れ状況
ひび割れ程度小	ひび割れ幅：0.05以下～0.50mm, 本数：6本程度
ひび割れ程度大	ひび割れ幅：0.05以下～0.60mm, 本数：9本程度
健全管	ひび割れなし



図-1 ひび割れ発生状況イメージ図

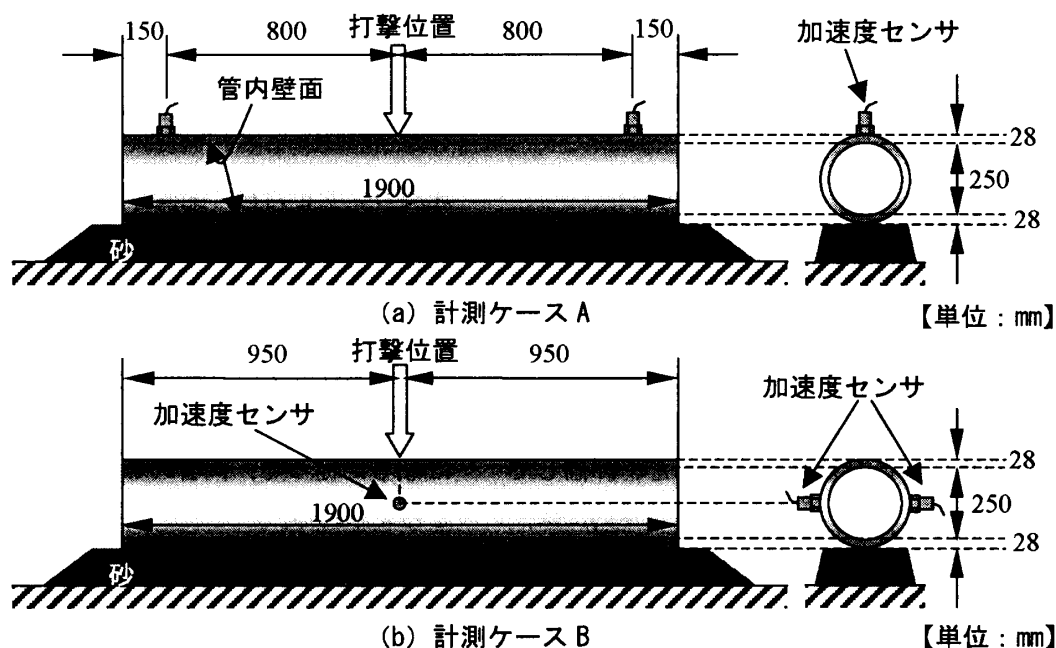


図-2 入力および受振の位置関係

した。一方、ひび割れモデル供試体として、健全管を高さ 30cm から 1 回落下させることによる衝撃によりひび割れを導入した供試体（以後、この供試体を「ひび割れ程度小」とする）を作製した。ひび割れの程度を変化させるために、ひび割れ程度小を再度高さ 30cm からもう 1 回落下させひび割れを進展させた供試体（以後、この供試体を「ひび割れ程度大」とする）を作製した。なお、ひび割れの発生状況としては、図-1 に示すように、管の軸方向のひび割れと周方向のひび割れの両者が混在するものであった。表-1 に各供試体のひび割れ幅および本数を示す。

2.2 衝撃弾性波法

(1) 弾性波の入力および受振方法

弾性波は鋼球（直径 30mm）を高さ 10cm の位置から落下させることにより図-2 に示すように管中央部に入力した。弾性波の受振には、周波数範囲が 0.003～30kHz の加速度センサを 2 個使用した。加速度センサは両面テープで管壁面に接着固定した。弾性波の入力および受振は、ともに管の外面上において行った。加速度センサで受振された波形は、アンプを介して高速波形収集システムによりパソコンにて記録した。計測におけるサンプリングタイムは $10 \mu \text{sec}$ とした。本研究では、受振波形に対して FFT（高速

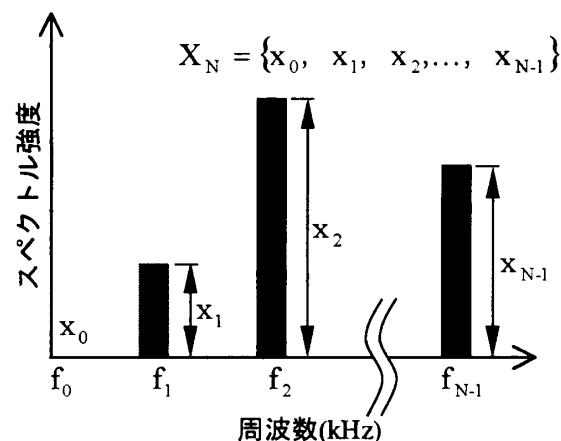
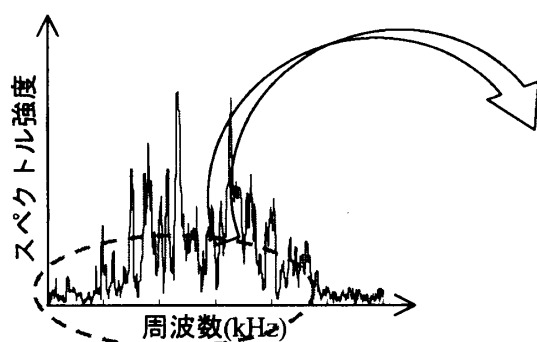


図-3 パターン認識の概要

フーリエ変換)により周波数分布を求めた。供試体は、厚さ 100mm の砂層上に設置し、供試体の全長にわたって、砂層との接触領域が幅約 5cm となるように底面全面支持とした。

(2) センサ貼り付け位置

本研究では、加速度センサで得られる周波数分布の類似性を検討するために、打撃位置を中心に対称となるよう等距離に加速度センサを配置した。本研究では、打撃と受振の位置関係が周波数分布に与える影響を確認することを目的とし、弾性波の入力および受振の位置関係を 2 パターン設けた。各計測ケースを図-2 に示す。いずれの場合も管中央部において弾性波を入力することとし、打撃位置から軸方向に等距離の位置にセンサを配置するパターンをケース A、打撃位置から円周方向に各 90° ずつずらしてセンサを設置した場合をケース B とした。

(3) パターン認識

周波数分布の分布形状を、パターン認識²⁾を用いて定量的に比較した。以下にこの手順を示す。2 つの加速度センサから得られたそれぞれの周波数分布をベクトル X と Y とする。図-3 に示すように、要素数を N とした場合のベクトルの成分を $X_N = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}\}$ とする。 Y についても同様に、 $Y_N = \{y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N-1}\}$ とする。本研究では、実験で得られた周波数分布において、主たる成分が分布する 0~10kHz に着目し、この範囲を 819 分割することとした。分割後の周波数に対応したそれぞれのスペクトル

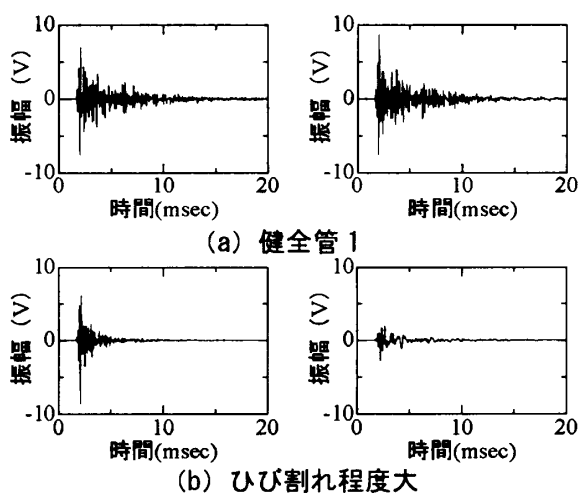


図-4 計測ケース A における受振波形

強度を、要素数 819 のベクトルの成分とみなした。パターン認識には、ユークリッド距離 D を用いた。その計算式を示す。

$$D = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

ここで、 D はパターンを表現する空間における、2 つのパターンに対応する 2 点間の距離を示す。2 つの周波数分布の類似度が高くなるほどユークリッド距離 D の値はより小さな値を示す。したがって、この指標を用いれば、周波数分布の類似性を定量的に評価することが可能となる。

3. 実験結果および考察

3.1 周波数分布による評価

計測ケース A で得られた代表的な受振波形を図-4 に示す。健全管の両センサで得られた波形

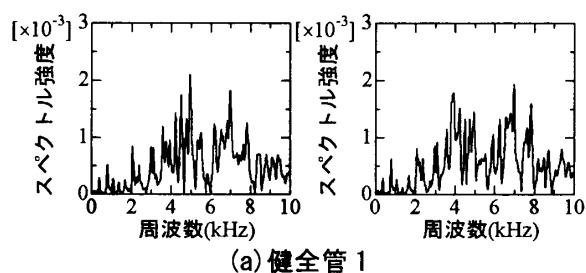


図-5 計測ケース A で得られた周波数分布

を比較すると、波形の振幅や減衰の傾向といった特徴はよく類似していることがわかる。一方、ひび割れの程度大の波形では、両加速度センサで振幅の値が大きく違っていることがわかる。

続いて、図-5 および 6 に健全管とひび割れ管について、計測ケース A および B で得られた周波数分布をそれぞれ示す。なお、本実験では、周波数分布の再現性を確認するため各計測ケースで 10 回の計測を行ったが、再現性が良好であったため、代表的な結果を示している。健全管 1 の計測ケース A の各加速度センサで得られる周波数分布を比較 (図-5) すると、各加速度センサ両方ともに 5kHz および 7kHz 付近に成分が集中しており、分布形状の特徴はほぼ一致していると考えられる。これは、健全管 2 においても同様な結果が得られた。これより、損傷を与えていない場合には、センサ間の距離を等しくしたケースにおいてほぼ等価な周波数分布となることがわかった。

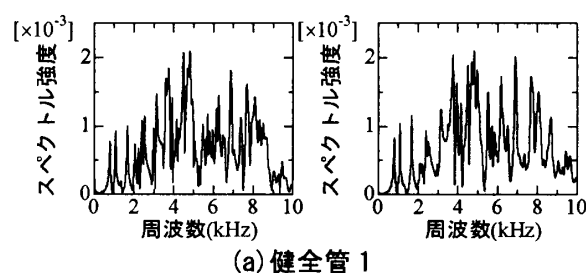


図-6 計測ケース B で得られた周波数分布

一方、ひび割れ程度小および大のケースにて計測ケース A において 2 つのセンサで得られた周波数分布は全く異なるものであった。これは図-1 に示したようにひび割れは管軸方向に対してかならずしも対称な位置に発生せず、これが、打撃により入力された弾性波の減衰の程度に影響を与えるためであると考えられる。ひび割れ管での周波数分布の違いは、図-6 より、計測ケース B でも明らかである。ひび割れ程度小および大と健全管の周波数分布とを比較すると、ひび割れ程度小、大の周波数分布は、いずれもより低周波成分の割合が増加する傾向が明らかである。これは、既往の研究結果³⁾にて示される傾向と一致しており、本実験でも、ひび割れの存在によりコンクリート管の剛性が低下したため、結果として低周波成分の割合が増加したものと考えられる。

以上の結果より、コンクリート管を対象として、加速度センサを打撃位置を中心に対称とな

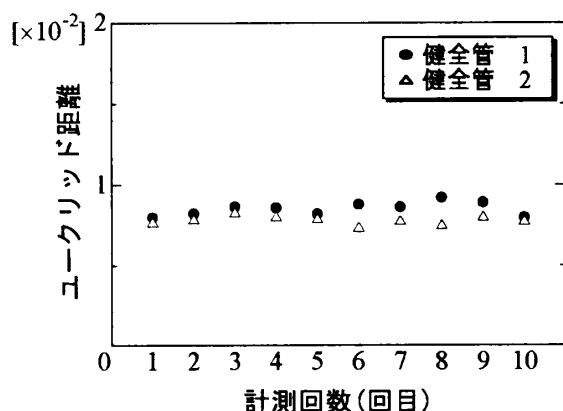


図-7 健全管におけるユークリッド距離

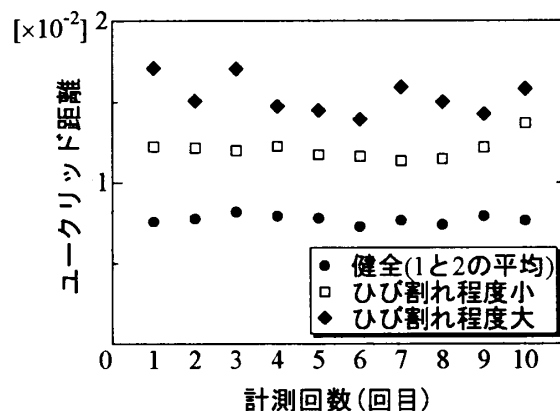


図-8 計測ケースAにおけるユークリッド距離

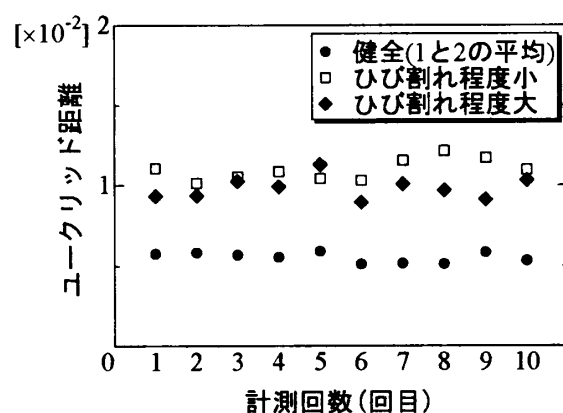


図-9 計測ケースBにおけるユークリッド距離

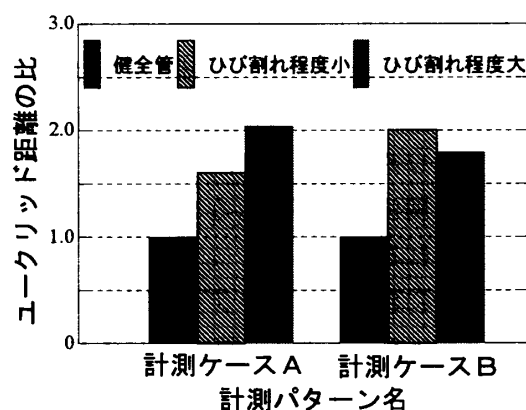


図-10 ユークリッド距離の変化

るように配置すれば、健全の場合には、形状の類似した周波数分布が得られることが確認できた。また、管にひび割れが存在する場合、この類似性が損なわれることも明らかとなった。しかしながら、健全管とひび割れ管との間、あるいはひび割れ程度小と大との間での周波数分布形状の違いの程度を視覚的に評価し、その差を詳細に比較することは困難である。そこで次節において、周波数分布の類似性の定量的な評価を試みた。

3.2 パターン認識による評価

本研究では、パターン認識を活用して周波数分布の形状の類似性を数値的に表現することとした。図-7, 8, 9 に、図-5, 6 に示した周波数分布の形状の類似度をパターン認識により数値的に表したグラフを示す。縦軸はユークリッド距離を、横軸は計測回数を表している。

図-7は供試体の個体差を確認することを目

的とし、計測ケース A についての健全管における結果である。健全管のユークリッド距離はどちらの供試体についても、0.005～0.008 に分布しており、大きなバラツキはなく再現性の良いものであった。これより、コンクリート管が健全であれば、2つの加速度センサで得られた周波数分布のユークリッド距離は、ほぼ同様の値を示すことがわかった。

図-8 に計測ケース A における健全とひび割れ程度小および大の結果を示す。なお「健全」の結果は健全管 1 および 2 の平均値である。計測ケース A において、ユークリッド距離は、健全が最も小さく、ひび割れ程度小、ひび割れ程度大の順に大きな値となっている。これは、ひび割れの存在の影響により周波数分布の形状の類似性が低くなることを示しており、健全管とひび割れ管との差が、数値で明瞭に表現されている。また、本実験の範囲では、ひび割れ程度

が大きい方が、周波数分布の類似性もより低くなっていることもわかった。

また、計測ケース B についても、図-9 に示すようにひび割れ程度の違いによる差こそ小さいもののひび割れ管でのユークリッド距離は健全管のユークリッド距離に比べ約 2 倍の値となっている。これよりひび割れの存在により、2つの周波数分布から計算されるユークリッド距離が大きくなることがわかる。なお計測ケース B ではケース A のようにひび割れ程度の違いによるユークリッド距離の差は明確ではなかった。これは、センサの設置位置が打撃位置に近い場合、ひび割れの非対称性の影響を受け難かったこと等が理由として考えられる。衝撃弾性波法によるひび割れ評価では、打撃位置とセンサ位置の相互関係が重要であることを示唆するものと考えられる。

健全管におけるユークリッド距離のばらつきが小さかったことより、図-10 に各ケースにおけるユークリッド距離の平均値の変化を示す。縦軸は、健全管のユークリッド距離を 1 とした場合のユークリッド距離の比を示している。これによれば、いずれの計測ケースにおいても、ひび割れ程度小および大のユークリッド距離が増加していることがわかる。計測ケース A において、健全管に比べひび割れ程度小は約 1.5 倍、ひび割れ程度大では約 2 倍増加している。計測ケース B では、健全管に比べて、ひび割れ程度小、大はそれぞれ約 2 倍増加している。

このように、パターン認識を用いて、コンクリート管に存在するひび割れの存在を十分に判別することができた。この方法は従来法で用いられる健全管での標準的な周波数分布が不要のため、さまざまな条件のコンクリート管に対して、広く適用が可能と考えられる。今後はさらに、打撃位置とセンサ位置の関係を検討し、ひび割れ程度の評価精度の向上を目指すとともに、腐食による管厚の減少などに対する本手法の適用性についても検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究では、周波数分布のパターン認識を活用した衝撃弾性波法によるコンクリート管のひび割れ評価を行った。以下に、本研究で得られた結果を示す。

- 1) 本実験の範囲内では、2 個の受振センサを打撃位置から対称となるよう設置して計測した周波数分布から求めたユークリッド距離は、健全管とひび割れ管との間で有意な差を示すことがわかった。
- 2) 本実験の範囲内では、健全管での周波数分布が得られない場合でも、計測された周波数分布のパターン認識を行うことによって、コンクリート管のひび割れの有無を判別できる可能性が示された。

謝辞

本研究の遂行にあたり岐阜大学工学部応用情報学科横田康成助教授に貴重なご助言を頂いた。記してここに謝意を表する。

参考文献

- 1) たとえば、皆木卓士，鎌田敏郎，野崎善治，舟橋孝仁：弾性波によるコンクリート下水管路の劣化診断手法に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1539-1544，2002
- 2) たとえば，安居院猛，長尾智晴：画像の処理と認識，昭晃堂，pp.83-114，2000
- 3) 鬼塚哲雄，鎌田敏郎，浅野雅則，下村雄介：弾性波挙動に基づくコンクリート管のひび割れ評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1675-1680，2005