

論文の内容の要旨

氏名：池 端 宏 太

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：衝撃弾性波を用いた応答波形の時系列変化量である差分値を指標としたコンクリート構造物の内部欠陥評価

主要な建設材料であるコンクリートは、材料単価が安く現場施工が容易であることから、経済性と施工性の観点から多くの構造物に利用されている。我が国では、高度経済成長期から日本全土で急速な社会資本の整備が行われ、橋梁等の社会資本構造物に大量のコンクリートが用いられている。従来、コンクリートはメンテナンスの必要がないと考えられてきた。しかし、山陽新幹線のコンクリート剥落等の経年的な劣化や損傷を起因とした事故を受け、メンテナンスの必要性が顕在化した。このため、社会資本構造物の急速な老朽化が問題視され、調査や点検及びメンテナンスの対象となる件数が増加している。このような社会資本構造物の老朽化問題を受けて、国は社会資本の効率的な運用を目的とした長寿命化計画の一環として、大規模な目視点検や打音点検等を義務付けている。しかし、目視点検や打音点検は、スクリーニングを目的とした簡易的な点検手法であり、評価範囲は構造の比較的表層の部分に限る。また、構造の状態を視覚や聴覚によって判断するため、点検者の感覚や技術力によって評価にばらつきが生じる。加えて、客観的な数値データがないため評価の信憑性が乏しい。また、コンクリート構造物は材料の性質上、大型になることが多く、目視や打音では内部の状態を適切に評価することは難しい構造体であると同時に調査点検に時間を要する。したがって、調査結果の客観性を確保し、構造物全体の状態を適切に可及的速やかに評価するには、技術的根拠のある非破壊検査手法の活躍が期待されている。

コンクリート構造物の非破壊検査手法のひとつである衝撃弾性波法は、入力エネルギーが大きく減衰の影響を受けにくいことから、長距離を伝搬する弾性波を励起することができる。このため、複合材料でマッシュなコンクリート構造物の測定に適しているといった特徴がある。衝撃弾性波法を用いた非破壊検査分野において、Sansalone らは、厚さ方向に多重反射する弾性波の定在波の卓越周波数から、コンクリート構造物の板厚を評価する手法を確立している。また、対象の厚さが持つ固有周波数と得られる卓越周波数の比較から、内部欠陥評価手法としても利用されている。この手法は、Impact-Echo 法と呼ばれ、衝撃弾性波法を用いたコンクリートの非破壊検査手法の基本概念となっている。しかし、周波数を指標とした内部欠陥評価には、明確な評価基準は定まっていない。これは、欠陥の深さ位置や大きさ及び測定条件の変化によって、卓越する周波数の変化が一樣ではないことが要因となっている。これに加え、測定対象の形状に制約があり、ASTM International「ASTM-C1383-04」では、「Impact-Echo 法の測定対象となるコンクリート部材は、厚さに対して幅が少なくとも6倍」と定義している。このため、梁や柱部材などの矩形断面を有する部材は厚さ測定の対象外となる。したがって、固有周波数に基づいた欠陥評価手法を適用することはできない。このように、周波数を指標とした内部欠陥評価には課題がある。

本研究では、周波数を用いた評価手法の課題である、測定及び評価方法の標準化と断面形状の制約を克服するため、衝撃弾性波法を用いた新しい評価手法として、応答波形の時系列変化量である差分値を指標とした内部欠陥評価手法を提案する。差分値は、構造物の完成直後あるいは出荷前を健全時として、予め測定した応答波形に基づいて算出される応答波形の時系列変化量である。差分値を用いた内部欠陥評価は、差分値の大小関係によって欠陥を評価するため評価が単純である。また、予め測定した応答波形に基づいて評価を行うことから、評価時の測定条件が不変的に定まっている。このため、測定や評価における標準化が容易である。さらに、健全時における形状固有の応答波形を基準としているため、あらゆる断面形状の構造物に適用できる。

評価指標である差分値は、数値シミュレーションを用いた数値実験によって検証され、指標の有用性が明らかとなった。衝撃弾性波法を用いた実務的な測定を考慮するため、測定方法固有の誤差について検討を行い、測定波形の標準化方法を構築した。板状コンクリート試験体を用いた実験では、内部欠陥の大きさを差分値の大小関係によって評価可能であることを示した。また、差分値の分布を用いて、内部欠陥の平面的な可視化が可能であることが示され、従来の周波数を用いた内部欠陥評価手

法以上の検査能力があることを確認した。加えて、測定間隔を広げた場合においても、測線上の欠陥の有無を評価可能であることから、スクリーニング手法としても利用可能であることが明らかとなった。さらに、矩形断面を有する試験体を用いた実験によって、提案手法は、断面形状に左右されることなく、構造物内部の欠陥を評価可能であることを示した。

以上の検討結果から、本研究の成果は、従来の周波数を用いた内部欠陥手法の課題を満足するものであり、実務的な新しい内部欠陥評価手法として、コンクリート構造物の維持管理に寄与するものである。

本論文は1章から6章の章立てによって構成されている。各章の概要を以下に示す。

第1章の『序論』では、我が国の社会情勢を踏まえて、コンクリート構造物の維持管理の課題から調査点検及び非破壊検査の必要性を述べている。また、本研究の測定手法である衝撃弾性波を用いた従来の内部欠陥評価の課題を概略的に示し、本研究の目的を明らかにしている。最後に論文の構成を述べている。

第2章の『衝撃弾性波法』では、弾性波の反射や伝搬速度等に関する弾性波の基本的な物理現象についてまとめている。また、衝撃弾性波法がコンクリート構造物の測定に適している理由を測定方法の特徴から示している。そして、衝撃弾性波を用いた従来の内部欠陥評価手法の測定方法及び評価原理と課題について概略的にまとめ、従来手法の評価課題を示している。最後に、Impact-Echo法を基本としたコンクリート構造物の内部欠陥の評価原理と課題について、既往の研究成果を含めながら具体的に明示している。

第3章の『Difference Value Analysis(DVA)』では、差分値を指標とした新しい内部欠陥評価手法であるDVAの測定及び評価方法について述べている。衝撃弾性波法の入力から波形の出力の過程を基に差分値の考え方を示している。また測定条件について、衝撃弾性波法を用いた既往の研究や厚さ測定規格を基に考察している。最後に、測定時に生じる誤差や測定過誤等の取り扱いについて検討し、差分値を算出するまでの手順と方法について検討した結果を述べている。

第4章の『数値実験による基礎検討』では、数値シミュレーションを用いてコンクリート板を仮定した二次元モデル及び、矩形断面を有するコンクリートを仮定した三次元モデルを用いた数値実験によって差分値の基礎検討を行った。欠陥の大きさや位置の条件を変化させた計算波形から差分値を算出し、差分値の大きさや分布から内部欠陥を評価することで差分値の有用性を確認した。いずれの計算モデルであっても、内部欠陥の影響によって差分値が増加することを確認した。また差分値は、欠陥の長さが増加することで大きくなることを確認した。さらに、内部欠陥の深さ位置が浅くなることで差分値は増加した。その結果、差分値は内部欠陥が長く、深さ位置が浅い場合に大きくなることが示され、差分値の大きさから欠陥の大きさや深さ位置を簡易的に評価できる可能性が示された。また、入力点が欠陥から離れた場合においても、欠陥近傍の受信点から内部欠陥を評価可能であることが示され、差分値はスクリーニング手法としても利用できることを確認した。

第5章の『コンクリート試験体を用いた実験的検討』では、板状構造の既製品土止め板を用いた実験、未充填シースを埋設したコンクリート版を用いた実験及び、矩形断面を有するコンクリート試験体を用いた実験を行った。差分値は正規化した測定波形によって算出され、差分値の大きさと分布から内部欠陥を評価した。既製品土止め板を用いた実験では、製品のばらつきを考慮するため、健全時状態の応答波形を、同じ三枚の土止め板を用いて測定した。その結果、製品による波形のばらつきは小さく、一つの健全時応答波形から同一試験体を評価可能であることを確認した。また差分値は、内部欠陥の大きさと深さ位置との間に高い相関関係があることがわかった。未充填シース試験体の実験では、平面的に配置した測点から、差分値と周波数を指標とした内部欠陥評価の比較等を行った。最大差分値を基準とした平面コンタによって欠陥部の可視化が可能となった。さらに、周波数を指標とした内部欠陥評価結果と比較した結果、周波数では評価が難しい小さな欠陥であっても、平面的な位置を評価できることが示された。また、差分値の算出に用いるデータ数の設定が適切ではない場合に内部欠

陥の評価が難しくなることを確認した。矩形断面を有するコンクリート試験体を用いた実験においても、同様に、内部欠陥の位置で差分値が増加し、欠陥位置の可視化が可能であることが示された。全ての実験結果から、内部欠陥によって差分値は増加し、欠陥位置の評価が可能であることを確認した。また、数値実験の結果と同様に、欠陥のサイズが大きくなることで差分値が増加することを確認した。加えて、入力点が欠陥から離れた場合においても、欠陥近傍の受信点の差分値から内部欠陥を評価可能であることが示された。

第6章の『結論』では、本研究の成果を要約し、研究の成果を明確に示す。また、今後の検討事項として、提案手法の評価精度向上及び、評価指標の拡張に関する課題と展望を述べている。