

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 小 林 義 和

（副査） 教授 梅 村 靖 弘

特任教授 野 村 卓 史

高度経済成長期に多数建設された日本の社会資本施設においては、近年、その性能低下（劣化）の進行が深刻化している。特に劣化が進行した社会基盤施設であるコンクリート構造物で発生した事故を発端に、その維持管理の重要性が認識されている。これを受けて、例えば国土交通省の道路橋定期点検要領では、5年毎の近接目視や打音検査等による診断をすることが指針として定められているが、これらの手法は主としてコンクリート構造物の表層近傍の状態を把握するためのものであり、内部に存在する欠陥の評価には適していない。しかし、例えばひび割れ等を介して雨水が侵入した結果として生じた内部空洞の評価や、構造物内部に設置されたプレストレストコンクリート構造物のPC鋼線配置用シース内におけるグラウト材の充填状況の調査など、コンクリート構造物内部の状態を適切に把握しなければならぬ事例も多く存在する。このようなコンクリート構造物の内部を調査するための方法の一つとして Impact-Echo 法が挙げられる。この検査方法は、衝撃弾性波法に分類され、コンクリートの表層に打撃を与え入力した衝撃弾性波に対する応答波形の周波数解析から欠陥評価を行う方法である。Impact-Echo 法は計測が容易であることから広く使われているが、その適用範囲には制限があり、対象の構造物の形状が板状ではない場合には欠陥の検出ができないことが広く知られている。

本論文では、そのような状況に鑑み、Impact-Echo 法の応答波形の周波数解析と同程度の計測時間で、より汎用的な欠陥検出手法となりうる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法を提案している。差分値は、衝撃弾性波に対する応答が、同じ部材であれば時間領域において同一になるという前提に基づき、ある時点での衝撃弾性波に対する部材の応答の時系列とそこから状態が変化した部材の応答時系列の差の平方和の平均値として本論文提出者が定義したものである。内部の状態の変化によって応答の時系列が変化することにより、その結果として差分値が増大することから、内部欠陥を差分値によって評価しうることに着想したものである。この手法は、差分値を求めるための基準となる衝撃弾性波に対する構造物の応答の時系列が必要となることから、健全な状態からの変化を評価するためには、その基準となる健全時の衝撃弾性波に対する応答の時系列が必要となる。このため、実構造物で健全性の診断をするためには、新設の構造物に対して衝撃弾性波に対する応答を計測しておく必要がある。また、プレキャストコンクリート製品などでは、同規格で多数の製品が製作されているため、このような健全時の応答の時系列を取得することが容易であることから、プレキャストコンクリート製品の健全性診断等に利用されることも想定している。

提案された手法については、数値実験と模型実験によってその妥当性の検討がなされている。数値実験においては、有限差分法を用いた数値シミュレーションの結果に基づいて差分値を求め、差分値によって内部欠陥の評価が可能であることが示されている。また、板状のコンクリート試験体による実験では、内部欠陥の大きさを差分値によって評価し、さらに差分値の分布を使って内部欠陥の存在を平面的に可視化できることが示されている。従来の Impact-Echo 法では発見することができなかった欠陥を発見できることも示されており、提案手法の有用性が確認されている。また、従来の Impact-Echo 法では適用対象外であった矩形断面を有する試験体に対しても提案手法が適用され、断面形状によらず、その内部欠陥を差分値によって評価可能であることが確認されている。

以上の検討結果から、本論文で提案された差分値を指標とするコンクリート構造物の内部欠陥評価法は、健全時の応答の時系列が必要ではあるものの、従来の周波数の変化から内部欠陥を評価する手法における問題点を解決したものであると考えられる。

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、また、本研究の測定手法である衝撃弾性波法に分類される従来の内部欠陥評価法の課題を網羅的に示し、本研究の目的を明らかにした上で、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、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まとめ、従来手法の評価課題を示している。最後に、衝撃弾性波法の一つである 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、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を行い、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を策定している。

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想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想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。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を示している。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が確認されている。

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が行われ、その結果が示されている。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留め板を用いて測定し、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が確認されている。また差分値は、数値実験の結果と同様に、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確認されている。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が行われており、最大差分値を基準とした平面コンターによって欠陥部の可視化が可能であることが示されている。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も示されている。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、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、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ている。加えて、入力点が欠陥位置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できることが示されている。

第6章の『結論』では、本研究の成果を要約し、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。

以上に示したように、本論文は衝撃弾性波法に分類され、衝撃弾性波に対する周波数応答に着目して

内部欠陥評価を行う Impact-Echo 法の問題点を克服する差分値による内部欠陥の評価手法を提案し、その妥当性を数値実験及び模型実験によって評価したものである。提案手法は、Impact-Echo 法では評価が困難であった対象に対しても、その内部欠陥の評価を可能とするものであり、社会基盤施設の維持管理に大きく貢献する有用な知見を得たものであると判断する。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和4年2月17日