

## 論文の内容の要旨

氏名：岩野 聡 史

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：コンクリート構造物の品質管理および点検・診断への衝撃弾性波法の適用に関する研究

現在の我が国の社会資本整備額は、税収の低下および社会保障費の増加などの厳しい財政状況を反映し、年々減少していることが報告されている。この状況から、継続可能な社会の実現には、今後はより合理的に社会資本を整備し、維持管理をしていくが必要不可欠になると考えられる。この課題に対して、社会資本を構築する主要な構造材料であるコンクリートについては、新設時に耐久性能に優れた品質の高いコンクリートを建設すること、供用後には構造物に重大な劣化が発生してから修繕をするのではなく、予防保全型の維持管理を行うこと、これらが重要になると考えられる。さらにこれらには、新設時の品質管理および供用後の点検・診断方法を高度化させることが有効になると考えられる。

本論文の研究対象は、コンクリートの非破壊試験の一手法である衝撃弾性波法である。衝撃弾性波法は、コンクリート表面を鋼球やハンマで打撃することにより衝撃を与え、この衝撃によってコンクリート内部に発生した弾性波を測定して、コンクリートを評価する手法である。非破壊試験は、構造物を壊すことなく実施できる、任意の箇所で実施できる、構造物を直接評価できる、これらの特長がある。さらに、本論文で研究対象としている衝撃弾性波法には、コンクリート内部の欠陥評価や圧縮強度評価など多くの評価に適用できること、短時間での測定が可能であること、厚さ 2500mm 程度のコンクリートにまで適用できること、これら土木のコンクリート構造物の評価に有効な特長がある。従って、衝撃弾性波法を活用することにより、新設するコンクリートに対する品質管理および既設のコンクリートの点検・診断方法の高度化が実現されることが期待される。

しかしながら、非破壊試験での正確な測定や評価には専門知識が必要であり、さらには、適用条件、適用方法が明確になっていることが要求されるが、衝撃弾性波法については、これまで十分な研究がされているとは言いがたい。つまり、衝撃弾性波法によるコンクリートの評価方法は、適用条件や適用方法が十分に確立されていないのが現状である。そこで、本研究では、衝撃弾性波法による測定値をどのように活用すればコンクリートの評価に適用できるのかを検討し、適用条件や適用方法を明らかにした。

本論文は全 6 章から構成されており、各章の要旨を以下に述べる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、本研究の目的と特徴、既往の研究および本論文の構成を述べている。

第 2 章と第 3 章では、新設時の品質管理、既設構造物の点検、診断に利用できる衝撃弾性波法の測定値について、より多くのコンクリート構造物に適用できる測定方法を検討した結果について述べている。

第 2 章では、縦弾性波がコンクリート内部を繰り返し反射（以下、多重反射という）することにより、コンクリートに生成される周波数（以下、基本周波数という）の測定方法を検討した。この周波数はコンクリート内部を多重反射する縦弾性波の往復時間から決定される。この往復時間はコンクリートの状態によって変化する値であり、コンクリートの部材厚さの評価や、コンクリート内部の欠陥評価に利用できる測定値である。しかしながら、衝撃弾性波法によってコンクリート中に発生する弾性波には、縦弾性波以外にもレイリー波などが存在する。さらに、このレイリー波は縦弾性波よりもエネルギーが大きいことから、測定した振動（以下、測定振動という）から基本周波数を容易には測定できない。この課題に対して、コンクリート厚さ 100mm～2400mm を対象とし、レイリー波の影響を除去した測定方法を検討した。

その結果、周波数の解析方法として既往の研究などで一般に利用されているフーリエ変換は、厚さ 1900mm 以上のコンクリートでは縦弾性波が著しく減衰することから、レイリー波の影響を受け、基本周波数を測定することが困難であることが確認された。これに対して、鋼球打撃時に発生した弾性波

(測定振動の初期部分)と測定振動との相互相関関数を求めると、この相互相関関数には、縦弾性波の減衰の影響を除去して、多重反射する縦弾性波の往復時間と一致する周期性が確認された。この性質から、この相互相関関数に対してフーリエ変換を実施すれば、厚さ 100mm~2400mm のコンクリートにおいて基本周波数の測定が可能であることを確認した。さらに、より正確に基本周波数を測定するには、複数の出力点での相互相関関数を加算した関数に対してフーリエ変換を実施することや位相差を利用した解析方法を併用することが有効であることを確認した。

第3章では、コンクリート中を伝搬する縦弾性波の伝搬時間差を利用した縦弾性波速度の測定方法を検討した。この伝搬時間差はコンクリートの弾性係数や欠陥の有無によって変化する値であり、コンクリートの圧縮強度評価や内部欠陥評価に活用できる測定値である。しかしながら、コンクリート内部の鉄筋やコンクリート表面の乾燥状態の影響により正確な伝搬時間差を測定できない場合がある。このことから、この影響を除去する測定方法について検討した。

その結果、コンクリートに表面の打撃により入力された縦弾性波は、入力面側のコンクリートの縦弾性波速度が内部の縦弾性波速度よりも遅い場合には、スネルの法則に基づき伝搬することが確認された。このことから、縦弾性波の入力点と受信点を鉄筋に対して斜めとなる直線上に設定し、さらに、入力点と受信点の距離を多点設定して伝搬時間差を測定することにより、鉄筋や表面の速度低下の影響を除去できることを明らかにした。

第4章では、第2章と第3章により得られる測定値を利用した、新設構造物の品質管理に適用できる2つの評価方法の検討を行った。

まず、コンクリート構造物の圧縮強度はコンクリートの品質を示す代表値であるが、これを衝撃弾性波法により、評価する方法について検討した。その結果、衝撃弾性波法で測定される縦弾性波速度とコンクリートの圧縮強度の間には正の相関関係があるが、この両者の関係式はコンクリートの使用材料、配合などによって変化することを確認した。このことから、試験の対象であるコンクリート構造物と同一配合の円柱供試体で縦弾性波速度と圧縮強度との関係式を求め、この関係式を利用して、コンクリート構造物で測定した縦弾性波速度から圧縮強度を評価する方法を提案した。提案した評価方法と測定位置の近傍から採取したコア試験体による圧縮強度を比較すると、高い精度で圧縮強度を評価できることが明らかになった。

次に、新設コンクリートの表層付近の品質評価方法について検討を行った。コンクリートは表面からさまざまな劣化因子が侵入して劣化する性質があり、新設時の表層付近の品質は耐久性能に多大な影響を及ぼすことになる。近年は、構造物の長寿命化が求められ、コンクリートの表層付近の品質を向上させる施工が実施されている。この品質の変化を、コンクリート表面をハンマで打撃したときのハンマとコンクリート表面との接触時間を測定することにより、非破壊で評価する方法を検討した。

その結果、接触時間はコンクリート表面の弾性係数とブルネル硬さによって変化するところから、コンクリートの養生条件、使用する型枠、水セメント比、これらの相違によって変化することを確認した。さらに、新設のコンクリート構造物の品質管理に適用できる、この性質を利用した評価方法を提案した。実構造物でこの評価方法を検証したところ、湿潤養生期間を延長したことによるコンクリートの表層付近の品質の変化を、接触時間を測定することにより評価できることが確認された。

第5章では、既設のコンクリート構造物の評価方法として、第2章と第3章により得られる測定値を利用した、コンクリート内部欠陥と圧縮強度の評価方法について検討した。これらはコンクリート構造物の維持管理における補修や補強の要否の判断などに有効な情報になると考えられる。これらを高い精度で実施するための適用方法について検討した。

まず、コンクリート内部欠陥評価方法では、縦弾性波の伝搬時間は伝搬経路中に空隙や豆板などの内部欠陥が存在すると変化することを確認した。この性質を利用した多重反射波法および伝搬時間差法による評価方法を提案し、供試体と実構造物で提案した評価方法を検証した。その結果、多重反射法では、測定点を多数設定し、各点で測定される周波数を比較することにより、内部欠陥の平面位置および内部欠陥が空隙の場合には、この空隙までの深さの評価が可能であることを確認した。ただし多重反射法は、内部欠陥が豆板の場合には深さ位置の評価ができないことと、柱部材には適用できないことが確認された。これに対して、伝搬時間差法は、縦弾性波の入力点と受信点を複数方向に設定

し、各方向での測定値を比較することにより、柱部材での内部欠陥評価や内部欠陥が豆板の場合でも深さ位置の特定が可能であることを確認した。

次に、既設のコンクリート構造物の圧縮強度の評価方法では、66種類の配合の異なる円柱供試体を用いて、縦弾性波速度と圧縮強度の関係を明らかにし、微破壊試験方法の小径コア法の圧縮強度試験結果を併用する評価方法を提案した。構築後43年経過したコンクリート橋台を対象として検証したところ、近傍で採取したコアによる圧縮強度と比較して微差の誤差内で圧縮強度を評価できることが確認された。

第6章は、本論文の結論であり、各章における成果と、更なる適用範囲の拡大ならびに精度向上への課題を述べている。

以上の結果から、新設するコンクリート構造物の品質を向上させるための品質管理、既設のコンクリート構造物での適切な点検・診断の構築、これらが望まれている現状において、本論文により衝撃弾性波法が有効に適用できることが示されたと考えられる。