

## 学位論文題名

## 超音波による土木構造部材の点検評価に関する研究

## 学位論文内容の要旨

土木構造物が定められた耐用年数の間その機能を維持する為には、適切な維持管理を行う必要がある。土木構造物の適切な維持管理を行うためには、構造物の健全度を非破壊検査などによって診断するシステムが重要な役割を果たす。最近の非破壊検査では部材の健全度診断に対して破壊力学を応用することを目的とした欠陥の定量的非破壊検査の研究が進められている。一方、検査を受ける土木構造物のうちコンクリートは不均一性材料であり、鋼材は比較的均質な材料である。それぞれの材質や欠陥の種類によって異なる検査方法が選択されている。この検査方法の中での超音波探傷はエコー波形の振幅や到達時間から反射源となる欠陥の位置や寸法を推定する現場向きの手法として注目されている。さらに、試験装置の性能向上や画像処理技術の向上からその測定精度の改善が多く報告されている。しかし、定量的に欠陥を評価する検査方法は確立されていないのが現状である。

本論文は、土木構造部材の点検評価に重要な役割を果たす非破壊評価の測定精度の向上を目的としている。コンクリート構造物のような複合材料を超音波を用いて定量的に診断するためには、固体中を伝播する応力波動の散乱、減衰、逸散の特性を知る必要がある。そこでコンクリート構造部材の内部欠陥や内部構造による超音波伝播特性や減衰特性を明らかにする(第4章、第5章、第6章)。また鋼構造物の損傷の多くは、溶接部およびその近傍の疲労亀裂や塗装の劣化に伴う腐食、高力ボルトなどの高い応力を受ける部材の遅れ破壊である。本論文では、超音波法を用いて溶接部の破壊の原因となる微小欠陥の検出精度の向上を目的としている(第7章、第8章)。

第1章は序論であり本研究の目的と既往の研究、論文の構成を述べている。

第2章では、土木構造物の点検評価の現状と課題について明らかにする。ここでは土木構造物をコンクリート構造物と鋼構造物に大きく分けてそれぞれの点検評価に対する現状と課題についてまとめている。

第3章では、超音波による土木構造物の内部欠陥の評価を行うに当たり、部材内部を伝播する波動の理論解析が必要となる。そこで三次元波動理論のうち関連ある応力波動理論の基礎式について述べている。応力波動が構造物内部を伝播する過程で生ずる散乱、減衰、分散などの現象について概要を説明した。つぎに、構造物中の内部欠陥を有限要素法によりモデル化して動的解析を行っているので、その概要を示した。また、鉄筋コンクリート部材を有限帯板法によりモデル化しているため、動的応答解析に必要な理論についても示した。

第4章では、超音波測定システムの振動応答特性をあらかじめ確認した。また、実験で用いた圧電型トランスデューサの周波数特性や振動媒体との連成効果についてもその影響を検討し、超音波探傷において測定結果に影響を与える周波数特性、位相特性の範囲を明らかにし、再現性のある測定結果を得るための条件を示した。次に、複合材料中の波動伝播現象を詳細に検討するため、複合材料であるコンクリートを構成する各種要素(セメント、骨材、水)の構成割合を変えた供試体を作製して、波形解析とスペクトル解析により超音波の応答特性と減衰特性

を検討した。これらの検討より粘性材料減衰、散乱減衰、反射減衰を含んだ総合的材料減衰としての減衰定数とセメントペースト中にしめる骨材の体積率や最大粒径との関係を示した。

第5章では、モルタル中のInclusionによる応力波動散乱特性を検討するため、有限要素法によりモデル化を行い、直接積分法による過渡応答解析を行った。これらの解析結果を用いてInclusionを有するコンクリート中の応力波動伝播を合変位の等値線表示や主応力のベクトル表示によって可視化している。その結果、モデル内部の欠陥によって波動がどのように伝播するかを示した。これらの結果は以後の実験結果の検討資料として役立てることができる。実験は、モルタル中に骨材や欠陥などによって不均一性を有する供試体を作製し、超音波の伝播特性を検討した。コンクリート中に含まれる骨材や鉄筋、クラックや切欠き、またコンクリート表面に発生するクラックによって、超音波の到達時間、振幅、卓越振動数などの違いを比較し、欠陥やInclusionによる伝播特性の違いを示した。また複合材料部材中のInclusionの評価を行う基礎的資料を得ることを目的として、モルタル円盤中に材質、形状の相異なるInclusionを有する供試体について超音波の伝播実験を行なった。さらに、供試体中を伝播する超音波の透過と反射の特性を応用して、供試体中のInclusionの位置標定を行い、その精度や有効性を示した。

第6章では、鉄筋コンクリート部材の劣化現象のシミュレーションを行うために鉄筋コンクリートを有限帯板要素により積層長方形ばりとしてモデル化する。鉄筋コンクリートの劣化現象を表面層のコンクリートの弾性係数の低下で表し、鉄筋とコンクリートの付着力をばね要素でモデル化している。これらの解析結果より鉄筋コンクリートの劣化による波動の伝播特性を可視化によるシミュレーションによって示した。さらに、付着力をばね要素でモデル化した場合に、二次元の積層ばりモデルでは考慮できなかったコンクリート中の鉄筋の付着剥離の応答特性を改良鉄筋コンクリート（改良RC）モデルを用いて解析することが有効であることを示した。また複合材料に入射された波動エネルギーが伝播過程でどのように減衰するかを積層長方形ばりモデルにより検討した。解析結果から波動エネルギーのベクトル成分を表すEnergy FluxをWS上で求め、応力波動の伝播過程をシミュレーションできる数値実験システムを用いてエネルギー減衰特性について検討を行った。その結果、この数値実験システムを用いて積層長方形ばり中のInterphase層（母材弾性係数と補強層弾性係数との間に弾性係数の傾斜機能を有する層）の効果を評価できることを示した。

第7章では、鋼構造物の溶接部に生じるブローホールを想定した微小欠陥を検出するため、平板中の疑似欠陥モデルに対して超音波探傷映像装置から得られる欠陥の探傷画像に関するエコー波形情報を用いて、最大エコー高さ曲線、スペクトル解析などの高精度処理を施すことによって欠陥検出精度が向上する事を示した。またこれら手法を応用して、隅肉溶接部に発生するブローホールに着目し、 $\pi$ 形リップ、U形閉リップ鋼床版の隅肉溶接中にドリルホールによる疑似欠陥を作製しその検出精度を示した。

第8章では、超音波探傷映像装置から得られた画像データや波形データをSVAを用いて表示を行い、第7章で得られた超音波探傷画像データの欠陥の3次元表示処理結果をDスコープとして点検結果の判断に有効であることを示した。また、第7章の実験から得られた反射波形を用いて欠陥形状を考察する上でCGを用いると、現象を詳細点検する上で有効であることを示した。

第9章では、各章の主な結論をとりまとめた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 角 田 興史雄  
副 査 教 授 佐 伯 昇  
副 査 教 授 佐 藤 浩 一  
副 査 教 授 三 上 隆  
副 査 教 授 石 島 洋 二

## 学位論文題名

### 超音波による土木構造部材の点検評価に関する研究

近年、土木構造物の飛躍的な増加に伴い維持管理の重要性が極めて大きくなるとともに、建設時の品質保証や地震後の構造物の診断などの要求から、非破壊検査による構造物の健全度・損傷度の評価技術の発展と測定精度の大幅な向上が要望されている。

本論文は、このような背景から行われた超音波によるコンクリートおよび鋼構造物の点検評価に関する研究について述べたものであり、主な成果をまとめれば次のとおりである。

- ① コンクリートが複合材料であるとの観点から、応力波動の超音波応答特性について実験的に検討し、従来不明確であった減衰定数に対する骨材体積率や最大粒径の影響など、コンクリートの非破壊検査の精度向上に不可欠な基本的性状を明らかにした。
- ② コンクリート中の鉄筋やクラック等による応力波動散乱特性を有限要素解析および実験により明らかにし、さらに超音波の透過と反射の特性を利用して内在物の位置検定を行い、その有効性と精度を明らかにした。
- ③ 鉄筋コンクリート部材において、コンクリートが劣化した場合および鉄筋とコンクリートとの間の付着が劣化した場合について、帯板要素法による波動応答解析を行い、劣化による波動伝播特性およびエネルギー減衰特性を明らかにして非破壊検査の精度向上に有用な情報を提供するとともに、応力波動の可視化によるシミュレーション手法を開発した。
- ④ 鋼構造物中に生じた微小欠陥に対して、超音波探傷映像装置から得られる画像データと波形データの最大エコー高さ曲線およびスペクトル解析などを利用する高精度の欠陥検出法を提案するとともに、鋼床版の隅肉溶接部に作製した疑似欠陥の検出等に応用し、その有用性を実証した。
- ⑤ 画像データと波形データをSVAを用いて表示し、欠陥を3次元画像処理する新たな手法を開発し、それが欠陥の詳細点検にとって極めて有効であることを示した。

これを要するに、著者は、超音波によるコンクリートおよび鋼構造物の点検評価技術の発展と精度向上に関して研究し多くの新知見を得たもので、構造工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。