

学位論文題名

音響学的手法による構造材料の非破壊評価に関する研究

学位論文内容の要旨

産業構造物及び設備の劣化を測定し、設備の寿命を推定して更改の基準を定めることは、社会及び産業の基盤設備の信頼性確保並びに安全性向上の上から重要な課題である。本研究は、非破壊的な音響的計測手法を駆使して、構造物あるいは設備の金属材料について、その劣化の指数となる物理量を用いて解析、評価する技術確立することを目的とする。非破壊検査技術の分野では、構造物の内部欠陥、その基幹材料である金属材料の亀裂、腐食あるいは材質の劣化を定量的に捕らえるには、超音波、振動及びアコースティック・エミッション(AE)等の音響的手法が有効とされている。この理由は、音響的手法では、物質の内部にまで媒介役を務める音波あるいは振動エネルギーが伝播あるいは運動として捕らえることができるからである。また、従来の減衰、音速といった物理パラメータを周波数解析することによって、新しい材料評価手法が展開できる。最近、高性能なセンサ技術と高度な解析手法を融合することによってよりミクロな挙動あるいは高精度な計測が可能になってきている。こうした手法、技術を利用して、材料・物品のミクロな組織変化、亀裂、あるいは、マクロな形状変化を捕らえて、劣化要因について議論することは、計測技術と材料力学の融合分野として研究価値が高い。さらに、産業上の保守基盤技術として応用分野において期待は大きい。

1. 振動解析による疲労亀裂の評価(第2章)

打撃振動解析法を用いて鋳鉄の破壊における亀裂の進展挙動を定量的に検討した。従来の梁の曲げに対する自由振動理論を拡張し、微小な亀裂を有する棒が自由振動する際の共振周波数と減衰係数が亀裂量と材料強度により対応関係のあることを理論的に明らかにした。鋳鉄材では、亀裂進展の課程が、微小亀裂の成長段階と破壊進展課程に大別され、共振周波数の変化量がそれらの過程の伴って増加することを明確にした。そこで、鋳鉄の疲労試験に伴い、その共振周波数は荷重繰り返し数の増加と共に緩やかに低下し、目視できる程度に亀裂が生じたあたりから急激に低下する。一方、減衰係数はまず緩やかに増加し、目視できる程度の亀裂が生じたあたりから急激に増加する。これらの結果は、AE測定によって実験的に検証し、理論的な検討結果と概ね一致する。こうした技術の応用として、通信用マンホール鉄蓋の亀裂による劣化診断器の実用化を検討した。鉄蓋の繰返し荷重試験、現場設置鉄蓋の試験による劣化診断基準化を定めて、共振周波数と減衰係数から鉄蓋の亀裂に伴う劣化程度及び残存寿命を判別できることを明らかにした。

2. 超音波パルスの周波数解析による金属材料の評価(第3章)

超音波パルスエコー法を用いてそのエコー波形を抽出してスペクトル解析することによって、各種金属材料の材質の違い、疲労及びクリープによる損傷を定量的に評価する手法について検討した。超音波パルスは固体材料中を伝播中に非弾性的な減衰によってそのスペクトル・ピーク周波数が低下する。超音波の減衰は、レーリー散乱領域の波長では結晶粒

の体積及び周波数4乗に比例しての増加し、材質の音速が大きくなるに伴って増加する。この理論展開を基に、構造用金属材料、球状黒鉛鋳鉄及びオーステナイト系ステンレス鋼の劣化損傷を定量的に明らかにした。構造用金属材料は、抽出した超音波パルスエコー波形のスペクトル・ピーク周波数は近距離音場では伝播距離の増加に伴って変化せず、遠距離音場では伝播距離の増加とともに低下する。超音波パルスの散乱因子は結晶粒径が大きいものほど増加するため、減衰による超音波パルス・エコー波形のスペクトル・ピーク周波数は低下する。球状黒鉛鋳鉄の評価は、球状化率の増加に伴って底面エコー波形のスペクトル・ピーク周波数は増加することを明らかにした。基地組織に減衰性の高い結晶構造を有する場合は、スペクトル・ピーク周波数は低下する。この場合、音速と引張強さの相関関係は高いものの、引張強さが増加しても底面エコー波形のスペクトル・ピーク周波数はほとんど変化せず、両者の相関は低い。オーステナイト系ステンレス鋼は、引張変形によるマルテンサイト層の析出が組織構造の微細化を促し、散乱による減衰係数を低下させるため、伸び率の増加に伴って超音波パルス・エコー波形のスペクトル・ピーク周波数およびスペクトルQ値が増加することを明らかにした。

3. 電磁超音波法による腐食厚さの計測（第4章）

電磁超音波法による肉厚測定技術について周波数解析手法を応用した新しい処理技術について考察し、薄肉鋼板及び管路の腐食肉厚の測定技術について検討した。腐食肉厚を測定する方法として、繰返し反射波形に注目して、ノイズ中に埋もれた繰返し反射波形のスペクトル分布のピーク周波数から肉厚を測定できる信号処理技術を確立した。本信号処理技術によって、4 mm以下、1 mmまでの薄肉鋼板の肉厚測定を実現した。非接触距離（リフトオフ）が3 mm以内であれば薄肉鋼板1 mmまでの肉厚測定を実現できる。こうした技術の応用として、金属地下管路の腐食診断技術への応用を図り、管内挿入型の電磁超音波センサを開発し、管路外面の腐食による肉厚を測定する技術を実現した。

4. 水中超音波による信号伝送（第5章）

超音波で信号伝送する技術について、送水管内の音場の伝播モデルを導出し、水中の気泡、渦による超音波の減衰挙動を理論的解析して泥水中の超音波伝送について検討した。送水量が100 (ℓ/min)以上では、80～250 kHzの範囲で急激に超音波が減衰するため、80 mm径の鋼管に対して300～400 kHzの範囲で信号伝送が適していることを明らかにした。また、管構造は、推進管のように内径が均一でないものは減衰が大きく、伝送管の構造としては伝送の効率が低いことを明らかにした。こうした技術の応用として、通信用掘削推進機械の姿勢信号伝送技術に対する超音波送受信器の実用化を検討した。実機搭載実験、ノイズ低減処理を図り、100 bps程度のデジタル信号を40 m以上の近距離伝送できることを実現した。

以上の成果は、応用物理学と計測工学を有機的に結びつける研究分野の今後の展開と進歩に大きく貢献するものと期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 田 村 信一朗

副 査 教 授 中 山 恒 義

副 査 教 授 大 場 良 次

学 位 論 文 題 名

音響学的手法による構造材料の非破壊評価に関する研究

産業構造物及び設備の劣化を測定し、その寿命を推定して更改の基準を定めることは、社会及び産業の基盤設備の信頼性確保、並びに安全性向上の上から重要な課題である。本研究は、非破壊的な音響的計測手法、特に、超音波、振動及びアコースティック・エミッション等の音響的手法を駆使して、構造物の内部欠陥、またその基幹材料である金属材料の亀裂、腐食あるいは材質の劣化を定量的に解析、評価する技術を確立することを目的としたものである。音響的手法では、物質の内部にまで伝播する音波の振動エネルギーを捕らえることが可能であり、また減衰、音速といった物理パラメータを周波数解析することによって、新しい材料評価手法を展開できる。こうした手法、技術を利用して、材料・物品のミクロな組織変化、亀裂、あるいは、マクロな形状変化を捕らえて、劣化要因について議論することは、計測技術と材料力学の融合分野として研究価値が高く、さらに産業上の保守基盤技術として応用上も重要である。

本論文の構成は次の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的が述べられている。

第2章では、打撃振動解析法を用いて鋳鉄の破壊における亀裂の進展挙動を定量的に検討している。特に、従来の梁の曲げに対する自由振動理論を拡張し、微小な亀裂を有する棒が自由振動する際の共振周波数と減衰係数が、亀裂量と材料強度に相関を持つことを理論的に示した。さらに鋳鉄材では、亀裂進展の過程が、微小亀裂の成長段階と破壊進展過程に大別され、共振周波数の変化量がそれらの過程の伴って増加することを定量化した。これに基づき、共振周波数と振幅減衰係数から鉄蓋の亀裂に伴う劣化程度及び残存寿命を判別できることを明らかにした。

第3章では、超音波パルスエコー法に基づき、抽出エコー波形をスペクトル解析することによって、各種金属材料の材質の違い、疲労及びクリープによる損傷を定量的に評価する手法について検討した。超音波の減衰は、レーリー散乱領域の波長では結晶粒の体積、並びに周波数の4乗に比例して増加し、材質の音速が早くなるに伴って減少する。この結果を基に、構造用金属材料、球状黒鉛鋳鉄及びオーステナイト系ステンレス鋼の劣化損傷を、超音波パ

ルス・エコー波形のスペクトル・ピーク周波数、およびスペクトルQ値の増減により定量化した。

第4章では、電磁超音波法による肉厚測定技術について周波数解析手法を応用した新しい処理技術について考察し、薄肉鋼板及び管路の腐食肉厚の測定技術について検討した。腐食肉厚を測定する方法として、繰返し反射波形に注目して、ノイズ中に埋もれた反射波形のスペクトル分布から肉厚を測定できる信号処理技術を確立した。本信号処理技術によって、4 mm以下、1 mmまでの薄肉鋼板の肉厚測定を実現した。またこの技術の応用として、金属地下管路の腐食診断技術への応用を図り、管内挿入型の電磁超音波センサを開発し、管路外面の腐食による肉厚を測定する技術を開発した。

第5章では、超音波で信号伝送する技術について、送水管内の音場の伝播モデルを導出し、水中の気泡、渦による超音波の減衰挙動を理論的解析して泥水中の超音波伝送について検討した。特に管構造は、推進管のように内径が均一でないものは減衰が大きく、伝送管の構造としては伝送の効率が低いことを明らかにした。こうした技術の応用として実機搭載実験を行い、100 bps程度のデジタル信号を40m以上の近距離伝送できることを実現した。

第6章は研究の総括であり、本論文の結論並びに今後の課題について述べられている。

これを要するに、著者は、音響学的手法を構造材料評価に適用することによって、構造材料の非破壊評価について新知見を得たものであり、計測工学、材料工学と安全工学を有機的に結びつける研究分野の展開と進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。