

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 アミン ホナルバクシュ

産業プラントのベルトコンベアには、設置から多年が経過し腐食などの劣化が進むものも多い。特に、搬送物の粉塵が堆積する部材は劣化が著しい。十分な耐力が確保できず、ベルトコンベアが落下する事故も国内外で発生している。人的事故やプラント全体の休止にも繋がるため深刻な問題である。一方で、堆積物は部材表面に強固に付着し、目視点検を困難なものとしている。総延長の長いベルトコンベアを適切に管理・運用していくため、構造状態を定量的にかつ効率的に評価する技術の開発が急を要する課題となっている。

構造状態を評価する取り組みとして、これまで振動計測に基づく損傷同定が研究されている。損傷による剛性や質量の変化が、系全体の振動数やモード形に影響することを利用してのものである。しかし、ベルトコンベアでは多数の変状が混在することや、構造部材と比べて頻繁に更新されるベルトや回転部品、歩廊部材などが動特性に影響することから、従来の手法の適用は難しい。そこで本研究は、損傷など変状の影響が局所的に現れる 2 種類の局部振動モードに着目して、ベルトコンベアの損傷部材の特定と損傷度合いの定量的評価を行う同定法を提案し、数値モデル、模型および実構造物で検証するものである。

第一章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。ベルトコンベアの特徴を損傷同定の観点から説明するとともに、遠隔非接触計測が可能で周波数帯域の広いレーザードップラー速度計を利用することで、局部振動モードを効率的に把握できることを述べている。

第二章は振動計測に基づく損傷同定技術の最新の状況を概括している。計測物理量と解析手法の観点から説明し、ベルトコンベアへの適用にあたっての課題を整理している。

第三章では、有限要素解析を利用して、ベルトコンベアの全体系振動モードと局部振動モードの特徴を明らかにしている。代表的なベルトコンベアをモデル化し、部材剛性が低下した場合の振動数とモード形の変化を調べている。全体系振動モードでは振動数、モード形ともに変化が小さいこと、モード形の空間 2 階微分では損傷部材近くで形状変化が認められることを示した。一方で、部材長や断面等の諸元が等しい 2 次部材のみが振動する周期的局部振動モードと、1 部材のみが振動する孤立局部振動モードに着目すると、部材の剛性変化により振動数が顕著に変化することを示した。さらに、ハンマーによる衝撃加振試験を想定して、局所振動モードの可観測性を、有限要素モデルの時刻歴応答解析から検討している。諸元が等しい部材の 1 つを衝撃加振すると、周期的局部振動モードあるいは孤立局部振動モードが励起されることを示している。

第四章では、局部振動モードの存在条件を明らかにしている。まず、主部材と 2 次部材からなる 3 自由度集中質点系モデルを利用して、2 種類の部材の剛性比により振動モードの局所化が決まることを理論的に示した。次に 21 自由度系モデル上で、この局所化条件を数

値的に検証している。さらに有限要素モデルにおいて主部材と 2 次部材の剛性比を変えてモード分析し、剛性比により局部振動モードの有無が決定されることを示した。

第五章では、周期的局部振動モードと孤立局部振動モードを利用した損傷同定法を 2 つ提案し、ベルトコンベアの有限要素モデルに適用している。

1 つ目の同定法は、諸元の等しい部材群をそれぞれ衝撃加振し局部振動モードを計測・同定する。局部振動モードの振動数が、各部材の剛性と境界条件にのみ大きな感度を持つことを利用して、無損傷部材の振動数から境界条件を、損傷部材の振動数から損傷部材の等価剛性を算出する。有限要素モデルに適用し、多数の損傷であっても高精度で同定可能であることを示している。

2 つ目の同定法は、諸元の等しい部材群の全てを衝撃加振することが困難な場合を想定し、部材群の中から無損傷部材 1 つを選び衝撃加振をする。各部材の振動応答を計測し、周期的局部振動モードが存在する周波数帯域のフーリエ振幅を、部材間で比較する。振幅の小さな部材が損傷部材である。有限要素モデルに適用したところ、損傷部材の振幅は無損傷部材と比べ明らかに小さく、さらに、損傷部材のフーリエ振幅の大きさと損傷の程度には負の相関があることを明らかにした。各部材に衝撃加振を加えられない場合であっても損傷部材の検知と相対的な損傷程度の評価が可能である。

第六章では、トラスのスケール模型を制作し、提案した手法を適用することで、損傷同定性能を実験的に明らかにしている。多数の損傷部材が混在する場合でも同定に成功している。さらに、主部材の剛性が異なるモデルを 2 つ制作し、動特性を比較することで、両モデルの局部振動モードの違いが明らかにし、第 4 章の局所化条件を確認している。

第七章では、実スケールのトラス模型および実在するベルトコンベアにおいて、提案した損傷同定法を適用し、部材毎の構造特性の違いの検知に成功している。ベルトコンベアの部材には、断面を貫通する腐食など明らかな劣化が見られたが、同定された等価剛性はこれと整合的である。

第八章では、本論文のまとめを述べている。

本論文は、対象構造物と遠隔非接触計測機器の特性を考慮して、これまで損傷同定に利用されることの少なかった局部振動モードに着目した、ベルトコンベアの損傷同定法を提案した。有限要素モデル、スケール模型、実スケール模型、ベルトコンベアでそれぞれ適用性を検証し、多数の損傷が混在する場合においても定量的に損傷同定できることを示した。実用化を視野に入れた手法の提案であり、本論文の工学上の貢献は大きい。よって、博士（工学）の学位請求論文として合格と認める。