

博士学位論文審査要旨

2019年1月15日

論文題目：軽量・低振動フレーム構造の創出に資する設計評価技術に関する研究

学位申請者：森 辰宗

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副査：同志社大学大学院理工学研究科 准教授 伊藤 彰人

副査：同志社大学名誉教授 小泉 孝之

要 旨：

建設機械の軽量化、低振動化を目指すためには、フレーム構造の強度・剛性などの設計要件を満たしながらも軽量化を実現し、エンジンの振動入力为前提に振動の伝達特性の低減を可能とするフレーム構造の開発が重要であり、これらを満足するような設計評価技術の確立が必要である。本研究では有限要素法に基づく伝達経路解析手法に対し、フレーム構造の改善指針が得られる手法の構築と、また経路の寄与度評価だけではなく、経路外の構造部位の評価を可能とし、改善指針が得られることを目的に相互平均コンプライアンス手法を取り入れ併用することで、建設機械のフレーム構造に対する強度・剛性要件を満足し、軽量化・低振動化構造の開発に活用できる設計評価技術の開発を目的とする。

本論文は全7章で構成されている。第1章では、建設機械におけるフレーム構造の強度・剛性要件を満足しながら軽量化・低振動化構造の開発に活用できる設計評価技術の必要性と研究目的を述べている。第2章では、有限要素法に基づく伝達経路解析手法の基礎理論から記述し、伝達経路解析手法で算出する伝達力や寄与度の特徴について述べている。第3章では、建設機械のフレーム構造を対象とし伝達経路解析を用いた振動応答の低減に対する有効性の検証について述べている。第4章では、フレーム構造に対する振動の伝達経路と伝達する方向の解明を目的とした伝達経路解析のマクロな自由度成分別評価手法について述べている。第5章では、振動の伝達経路だけではなく改善すべき構造部位と改善指針の明確化を目的とした相互平均コンプライアンス手法について述べている。第6章では、建設機械のフレーム構造を対象とし、相互平均コンプライアンス手法を用いた振動応答の低減に対する有効性について述べている。第7章では、伝達経路解析手法および相互平均コンプライアンス手法の特徴と建設機械のフレーム構造における軽量化、低振動化に対する活用方法について得られた結果を纏めている。伝達経路解析手法および相互平均コンプライアンス手法を併用することで、建設機械に対する強度・剛性などの設計要件を満足しながら軽量化・低振動化が可能なフレーム構造の開発に活用できる設計評価技術を開発しており、本論文は工学的に極めて価値のあるものと評価できる。よって、本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2019年1月15日

論文題目： 軽量・低振動フレーム構造の創出に資する設計評価技術に関する研究

学位申請者： 森 辰宗

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 准教授 伊藤 彰人

副査： 同志社大学名誉教授 小泉 孝之

要 旨：

本論文提出者は、2015年4月に同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、2018年3月に退学している。

本論文の主たる内容は、SAE Technical Paper 2016-01-8101, ICSV25 #209, 日本機械学会論文集 Vol.84 No.865 p.18-00168 DOI: 10.1299/transjsme.18-00168 に掲載され十分な評価を受けている。

2018年12月22日9時より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、提出者は、英語による論文発表や語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士学位論文要旨

論文題目： 軽量・低振動フレーム構造の創出に資する設計評価技術に関する研究
氏名： 森 辰宗

要 旨：

一般的な機械製品の開発において、生産性や機能性の向上が図られる一方で、原価低減や省エネルギー化を目的とした軽量化が進められる中、性能不良等による耐久性の低下や振動・騒音品質の低下による居住・作業環境の悪化など、背反する問題が顕在化し、これらを改善する効率的な施策・開発手法が求められている。

建設機械はトレーラ、トラック、船舶、航空機などで運送されることが多いが、移動地の条件や道路条件によっては、作業状態のままでは質量、寸法の関係で移動出来ない場合があり、道路運送の際には制限値におさまるよう機械およびフレーム構造を分割する必要がある。建設機械を扱う顧客の作業性の観点から、機械およびフレーム構造の組立て・分解の作業性や重量も含めた運送性に関しては、大型建設機械の商品性に大きく関わるものとなっている。一方、建設機械の振動に目を向けてみると、周囲環境やオペレータの健康や快適性の観点から、機械の振動低減の要求が高まっている。特に移動式クレーンの場合、エンジン全駆動時間における待機時間の割合は50~75%である場合も多く、アイドリング時の振動は、機械乗車時の顧客の商品に対する評価につながる事が多く、重要な要素の一つとなっている。また、建設機械メーカーの開発事情に触れると、動力源となるディーゼルエンジンは購入することが多く、エンジンによる振動入力がある前提のもと、防振マウントによるフレーム構造への振動伝達の低減や、フレーム構造の工夫、高剛性化による振動変位の低減、振動の伝達特性の低減により、機械自身およびオペレータに対する低振動化の開発を進める必要がある。また、排気ガス規制への対応として、搭載するエンジンの変更や排気ガス後処理装置搭載など、これまで以上に搭載物重量が大きくなり、建設機械としての機能性や商品性の向上以外の要件において搭載機器の費用(コスト)および開発工数が大きくなっている。そのため、フレーム構造の開発においては、原価低減と機械重量低減のための軽量化や開発工数削減の要求が大きくなってきている。

以上より、建設機械の軽量化、低振動化を目指すためには、フレーム構造の強度・剛性などの設計要件を満たしながらも軽量化を実現し、エンジンの振動入力を前提に振動の伝達特性の低減を可能とするフレーム構造の開発が重要であり、これらを満足するような設計評価技術の確立が必要となっている。本論文は全6章で構成されている。第1章では、建設機械における法規制に関連して運送性や排気ガス規制、低振動化やそれら規制や性能に対する開発における状況と先行研究の事例について述べた。建設機械においては、フレーム構造の強度・剛性要件を満足しながら軽量化・低振動化構造の開発に活用できる設計評価技術の必要性と研究目的を示した。

第2章では、有限要素法に基づく伝達経路解析手法の基礎理論について述べ、バネ-マスモデルおよび板モデルに適用することで、伝達経路解析手法の特徴を明らかにした。算出する寄与度が大きな部位は改善の対象とする変形モードの腹となり、その経路を除去することにより評価点の振動応答の低減が可能であること、またその振動応答の低減効果は他の経路の寄与度の足し合わせにより予測可能であることを示した。しかし、複数の経路に寄与度が分散する場合、各経路の寄与度は相関関係を持ち、ひとつの経路を除去する構造の変更は他の経路の寄与度を大きく変化させるため、応答の低減効果が期待できない場合がある。それは、伝達経路解析手法はある切断面を設定し、切断面の経路内で寄与度を評価するため、切断面の変更は算出する寄与度を変化させ、算出する伝達力は選択する切断面に大きく影響されるためである。伝達方向を正しく知る

ためには切断面の設定方向に注意しなければならない。そのため伝達経路解析手法を適用する際、振動伝達の経路が明らかでない場合は、複数切断面を設定する必要があることを示した。

第3章では、実問題として建設機械のフレーム構造を対象として伝達経路解析手法を適用し、振動応答低減を目的とした改善手段について検討することで、実問題へ適用する際の伝達経路解析手法の特徴と課題を明らかにした。伝達経路解析手法より得られた寄与度に基づきフレーム構造の改善手段を検討する場合、経路を切断するような変更が可能な場合は大きな応答低減効果は得られるが、経路途中がフレームの支持構造の場合、強度や剛性などフレーム構造の設計要件を満たさない可能性がある。また、評価対象とする切断面の寄与度に基づき板厚を変更した場合、応答の低減効果はほとんど得られないという結果が得られた。このことから、伝達経路解析手法から得られる寄与度は、評価点の応答に対して着目した切断面の寄与度の高い経路を特定することは可能だが、必ずしもその切断面上の構造部位が評価点の応答に寄与しているとは限らないという課題が得られた。

第4章では、第3章で示した課題に対する解決手法として考案したマクロな自由度成分別評価手法の基礎理論を述べ、建設機械のフレーム構造に適用し、提案手法の有効性と特徴を明らかにした。考案したマクロな自由度成分別評価手法により、対象とした経路のマクロな伝達力の自由度方向の把握が可能となり、寄与度の高い経路の除去ではなく、寄与度の高い自由度方向の伝達力を抑制することで、強度や剛性などの設計要件を考慮した振動応答を低減できるフレーム構造の創出が可能であることを示した。

第5章では、寄与度の高い振動伝達経路の伝達力の抑制ではなく、改善すべき部位の特定と改善指針の明確化を目的とし、相互平均コンプライアンス手法の基礎理論を述べ、板モデルに適用することで相互平均コンプライアンス手法の有効性と特徴を明らかにした。板モデルの単純曲げモードに対し、固有値解析により得られる変形モードおよびモードの歪エネルギー・運動エネルギーと相互平均コンプライアンスとを比較し、また、相互平均コンプライアンスの特徴でもある質量と剛性に対する成分別の感度に基づきフレーム構造を改善した結果、感度結果が示すように評価点の応答の増加、あるいは低減を確認できた。以上の結果により相互平均コンプライアンス手法の評価点の応答に対する感度の有効性と特徴を明らかにした。

第6章では、建設機械のフレーム構造を対象として、相互平均コンプライアンス手法を適用し有効性を明らかにした。解析モデル上に質点やバネ要素など、構造メッシュより要素特性が集中したスカラー要素が在る場合、相互平均コンプライアンスで算出される感度はそれらスカラー要素に集中する可能性がある。その際には、それら要素を評価対象とせずその要素の感度を除去することで、フレーム構造の感度を評価することができ、振動応答の低減に資する適切なフレーム構造の創出が可能であることを示した。また、相互平均コンプライアンス結果を各部分構造ごとに分け、それら部分構造内の要素の感度を足し合わせる評価手法、および伝達経路解析と同様にベクトル表記による評価手法を提案し、評価点の応答に対する各部分構造の感度に基づいて、補強や軽量化など応答の低減を実現するフレーム構造の改善指針が得られることを示した。さらに、提案した設計変更範囲探索手法を用いれば、複数周波数領域における応答低減を実現するフレーム構造の改善指針が得られ、応答の低減効果を確認した。これらの結果により、相互平均コンプライアンス手法の実問題への適用性を示した。

結論では、伝達経路解析手法および相互平均コンプライアンス手法の特徴と建設機械のフレーム構造における軽量化、低振動化に対する活用方法について得られた結果を纏めて示した。伝達経路解析手法は、設定切断面にある経路内の寄与度を算出し、入力点から応答点までの構造部材間で複数の設定切断面の寄与度を計算することで、対象とする振動の伝達経路を明らかにすることが可能である。また、相互平均コンプライアンス手法は、振動応答の低減に資するフレーム構造に対する改善すべき部位と改善指針を把握することができる。よって、ある振動問題に直面した際には、まず伝達経路解析手法と提案した自由度別評価手法を適用することで、入力点から応

答点までの振動の伝達経路および各経路の伝達力の自由度方向を把握する。それにより、把握した寄与度の高い振動の伝達経路の除去、もしくは寄与度の高い伝達力の自由度方向を抑制するようなフレーム構造の創出が可能となり、振動応答の低減が実現できる。次に伝達経路解析手法にて寄与度を明らかにした経路上での改善が困難な場合、もしくは他構造部位にて改善が可能な場合には相互平均コンプライアンス手法を適用する。相互平均コンプライアンス手法の感度に基づき、部分構造ごとに評価することで部分構造ごとに補強や質量の低減などの改善指針を明らかにすることができ、解析モデル上であれば要素ごとの感度が明確であるため、感度が高い箇所に着目したフレーム構造の創出が可能である。また、相互平均コンプライアンスは質量や剛性成分を正負の感度として評価することが可能であり、従来手法で課題であった剛性の増加ではなく、質量や剛性の低下による振動応答の低減も可能である。

本研究の成果により、伝達経路解析手法および相互平均コンプライアンス手法を併用することで、建設機械に対する強度・剛性などの設計要件を満足しながら軽量化・低振動化が可能なフレーム構造の開発に活用できる設計評価技術を開発した。本技術により、建設機械の軽量・低振動フレーム構造の創出に貢献できる。