

博士学位論文審査要旨

2007年11月6日

論文題目： 油圧ショベルの乗心地に関する振動シミュレーション技術の研究

学位申請者： 安藤 博昭

審査委員：

主査	同志社大学大学院工学研究科	教授	小泉 孝之
副査	同志社大学大学院工学研究科	教授	青山 栄一
副査	同志社大学大学院工学研究科	教授	辻内 伸好

要旨：

様々な建設機械の中で、油圧ショベルが国内建機需要の約80%を占めている。油圧ショベルは、多くのフロントアタッチメントを有した土木作業の汎用機であり、様々な現場で使用される。したがって、作業内容によって異なる様々な振動外力が運転室（以下キャブと呼ぶ）に伝達される。世界的規模で作業環境の改善に対する取り組みが活発になり、乗心地振動レベルの規格化が推進されてきている中で、乗心地に対するユーザの関心も高く、より快適に作業を行えるキャブ・オペレータステーションの開発が進んできている。開発期間の短縮が加速する現在、様々な振動外力に対する乗心地を実機試験によって評価することは困難である。開発コストを抑えながら、乗心地向上を目的とした改良検討を行うためには、既販機における多種多様なアプリケーションの実振動挙動を的確に把握し、理論や従来製品性能に基づいた迅速なコンポーネント開発が要求されるとともに、乗心地という観点からの系統立った振動シミュレーション技術の構築が必要である。

本論文は8章で構成されており、第1章では前述の通り、建設機械の動向と油圧ショベルの乗心地振動を考慮したキャブやマウント開発における課題と本研究に関する必要性について述べている。

第2章では、実機におけるキャブに対する振動外力を分析することによって、機体サイズやアプリケーションによってキャブが受ける振動外力の周波数スペクトルの特徴を説明している。さらに、それら周波数スペクトルパターンからニューラルネットワークを利用することにより、4つの主要な操作における時間比率を算出する方法を提案している。これにより、操作時間比率に基づいて周波数スペクトルパターンの異なる振動外力に対して効果的な乗心地改良するための手がかりを得ることを示している。

第3章では、乗心地に大きく影響を及ぼすコンポーネントとしてキャブマウントの動特性算出方法を提案している。マウント単体における周波数スイープ加振試験を行い、測定されたマウント変位と反力データから容易かつ迅速に動剛性および損失剛性を算出するためのデジタルデータ分析技術について述べており、測定されたデータにノイズや異常値があっても、より正確にかつ迅速に動特性を算出できる実用上有効な方式を導出している。

第4章では、非線形動特性を有するビスカスマウントの応答計算プロセスを構築している。まず、ビスカスマウントの非線形特性を表わす数式モデルを提案し、計測された動特性から、その回帰係数を同定している。その同定された数式モデルを用いて、2次元のニュートンラフソン法による周波数・振幅依存性を考慮した周波数応答計算手法を説明するとともに、別途実施した剛体キャブを想定した加振試験結果と比較することにより、同定結果および計算手法の妥当性を検

証している。周波数・振幅に対して一定のばね定数および減衰係数を用いた従来の応答計算よりも精度が向上していることを示している。また、高粘性流体を利用した新しい構造のマウントを開発する際の設計指針も確立している。考案した空気ばねと粘性流体を組み合わせた複合マウントにおいて、設計パラメータに基づいた動特性の定式化を行い、実測値と比較した結果、周波数・振幅依存性を有する動特性を、動剛性については4%、損失剛性については12%の誤差で算出できている。その際、高粘性流体の粘性係数のせん断速度依存性は、実設計上貴重な結果である。

油圧ショベルの乗心地改善を図る際には、マウントの定常応答のみならず衝撃応答特性も考慮した開発を推進することが要求される。第5章では、ビスカスマウント単体の衝撃特性についても論述し、衝撃特性同定方法を確立している。同定された衝撃特性は、定常特性と大きく異なることを定量的に示している。さらに実機落下衝撃時におけるキャブの過渡的な振動シミュレーション手法を構築し、同定したマウントの衝撃特性値を用いて実施したシミュレーション結果を実機落下衝撃試験結果と比較することにより、同定値およびシミュレーション手法の妥当性を示している。

待機中におけるキャブの振動低減は、重要な課題の1つである。第6章では、特別なベンチ試験を実施することなく、連動して稼動する搭載起振源の実機計測データを用いて、偏関連度関数を利用することによる寄与度分析を試みている。油圧ショベルに搭載されている互いに連動して稼動する3つの起振源とキャブプラットフォーム応答加速度の関係を3入力1出力のMISOシステムと考え、伝達関数や通常の間連度関数のみならず、偏関連度関数を算出することにより、キャブプラットフォームに対する起振源の寄与度を定量的に把握している。

本研究のテーマである“油圧ショベルの乗心地に関する振動”という観点から、開発初期段階で役立つキャブ系応答シミュレーション技術として、第7章にサブシステムレベルでのキャブ振動予測について述べている。主要フレーム材のねじり剛性や減衰特性の設計パラメータによる導出を行い、キャブ主要梁にそれらのフレーム特性を有した簡易FEモデルを構築している。この簡易FEモデルとマウント非線形特性を含めたライザ構造物のサブシステムモデルを用いた周波数応答計算は、解析先行型開発プロセスにおいて実用的価値が高い。

最後に第8章において本研究の成果を総括するとともに今後の展望を記している。振動解析対象をキャブマウントといった部品レベルから、キャブ構造物も含めたシステムレベルへと拡張し、系統立った振動解析モデルおよび手法を構築しており、開発現場において有効であると期待される。また、実機振動データのデジタルデータ分析技術、マウントの非線形特性の同定、そのモデル化技術、振動応答シミュレーション技術について詳細に検討し、その活用方法を示したことにより、本論文は工学的に見て極めて価値のあるものと評価できる。したがって、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

2007年11月6日

論文題目： 油圧ショベルの乗心地に関する振動シミュレーション技術の研究

学位申請者： 安藤 博昭

審査委員：

主査	同志社大学大学院工学研究科	教授	小泉 孝之
副査	同志社大学大学院工学研究科	教授	青山 栄一
副査	同志社大学大学院工学研究科	教授	辻内 伸好

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を1995年3月に修了し、2005年に同博士課程（後期課程）に入学し現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、SAE2006-01-3464, SAE2007-01-2360, CMEM-X II, 同 X IV, APVC2005, SUSI-IV, 日本設計工学会 2007-09 に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

本年10月27日午前10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、種々の質疑討論が行われたが、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、論文に関連する諸問題につき口答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、英語に関しては本工学研究科博士課程後期課程在学中に合格しており、また、ドイツ語に関しては本学工学部在学中に単位認定されており、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力なら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。

博士學位論文要旨

論文題目： 油圧ショベルの乗心地に関する振動シミュレーション技術の研究
氏名： 安藤 博昭

要 旨：

様々な建設機械の中で、油圧ショベルが国内建機需要の約80%を占めている。油圧ショベルは、多くのフロントアタッチメントを有した土木作業の汎用機であり、様々な現場で使用される。したがって、作業内容によって異なる様々な振動外力が運転室（以下キャブと呼ぶ）に伝達される。世界的規模で作業環境の改善に対する取り組みが活発になり、乗心地振動レベルの規格化が推進されてきている中で、乗心地に対するユーザの関心も高く、より快適に作業を行えるキャブ・オペレータステーションの開発が進んできている。開発期間の短縮が加速する現在、様々な振動外力に対する乗心地を実機試験によって評価することは困難である。開発コストを抑えながら、乗心地向上を目的とした改良検討を行うためには、既販機における多種多様なアプリケーションの実振動挙動を的確に把握し、理論や従来製品性能に基づいた迅速なコンポーネント開発が要求されるとともに、乗心地という観点からの系統立った振動シミュレーション技術の構築が必要である。

本論文は8章で構成されており、第1章では前述の通り、建設機械の動向と油圧ショベルの乗心地振動を考慮したキャブやマウント開発における課題と本研究に関する必要性について述べている。

第2章では、実機におけるキャブに対する振動外力を分析することによって、機体サイズやアプリケーションによってキャブが受ける振動外力の周波数スペクトルの特徴を把握することに努めた。その結果、スイングフレーム左前コーナー部の上下方向加速度は、操作によって周波数スペクトル成分が異なることが明らかとなり、その分布傾向は機体サイズが異なっても類似した傾向であることが分かった。30トン機、45トン機、65トン機のいずれの機種においても、壁面搔き下げの乗心地振動レベルが高く、走行時には5~6Hzに加速度ピークが存在する。このように振動外力を把握することにより、キャブが搭載されているスイングフレームの加速度は、操作に応じたキャブへの外力指標となり得る。油圧ショベルにおける測定加速度データから、4つの主要な操作の時間比率を、ニューラルネットワークを用いて算出する方法を提案した。まず、数値シミュレーションによって、提案した方法による操作比率結果が妥当であることを確認した。さらに、短時間FFTでは操作比率を正しく分析できない異なるサイクルの実データにおいても、ニューラルネットワークを適用した周波数スペクトルパターン分析が有効であることを示した。

第3章では、乗心地に大きく影響を及ぼすコンポーネントとしてキャブマウントの動的挙動について分析した。油圧ショベルのキャブマウントとして用いられているビスカスマウントは、周波数依存性と振幅依存性を有している。そのビスカスマウントの制振性能は、マウント単体における加振試験データをもとに算出された動特性によって評価される。周波数ス

イープ加振試験を行い、測定されたマウント変位と反力データから容易かつ迅速に動剛性および損失剛性を算出するためのデジタルデータ分析技術について検討した。測定されたデータにノイズや異常値があっても従来の方法より頑健にかつ迅速に処理できるFFTを利用した動特性算出方法を確立した。

第4章では、非線形動特性を有するビスカスマウントの応答計算プロセスを構築した。まず、ビスカスマウントの非線形特性を表わす数式モデルを提案し、計測された動特性から、その回帰係数を同定した。同定された数式モデルを用いて、2次元のニュートンラフソン法による周波数・振幅依存性を考慮した周波数応答計算を行い、別途実施した剛体キャブを想定した加振試験結果と比較した。その結果、同定したマウントの数式モデルを用いれば、周波数・振幅に対して一定のばねおよび減衰係数による応答計算よりも解析精度が向上することを示した。

ビスカスマウントには、搭載負荷によってはマウントの中立位置がストロークの中央からずれるあるいは動剛性と減衰特性を独立して設計できないなどといった課題がある。そこで、高粘性流体を利用した新しい構造のマウントを開発する際の設計指針の確立を目的として、空気ばねと粘性流体を組み合わせた複合マウントを考案した。加振試験によって、その動特性を明らかにし、マウントの中立位置を任意にコントロールでき、動剛性と減衰特性を独立して設計できることを確認した。さらに、複合マウントの設計パラメータに基づく動特性の定式化を試みた。定式化によって求めた動特性を実測値と比較した結果、周波数・振幅依存性を有する動特性を、動剛性については4%、損失剛性については12%の誤差で算出できた。

油圧ショベルの乗心地改善を図る際には、マウントの定常応答のみならず衝撃応答特性も考慮した開発を推進することが要求される。第5章では、ビスカスマウント単体の衝撃特性についても論述し、マウント単体におけるインパルス試験を行い、衝撃特性同定方法を確立した。同定された衝撃特性は、定常特性と大きく異なることを定量的に示した。さらに実機落下衝撃時におけるキャブの過渡的な振動シミュレーション手法を構築した。同定したマウントの衝撃特性値を用いて実施したシミュレーション結果を実機落下衝撃試験結果と比較することにより、同定値およびシミュレーション手法の妥当性を示した。

待機中におけるキャブの振動低減は、重要な課題の1つである。油圧ショベルに搭載されている起振源コンポーネントは、エンジン、油圧ポンプそしてクーリングパッケージのファンモータの3つである。これらの起振源コンポーネントの振動抑制は、乗心地向上に対して大きな影響を及ぼす。アイドル時のキャブプラットフォーム応答振動に対する起振源の寄与度分析については様々なアプローチが考えられるが、第6章では、特別なベンチ試験を実施することなく、実機計測データを用いて偏関連度関数を利用することによる寄与度分析を試みた。油圧ショベルに搭載されている互いに連動して稼動する3つの起振源とキャブプラットフォーム応答加速度の関係を3入力1出力のMISOシステムと考え、伝達関数や通常に関連度関数のみならず、偏関連度関数を算出することにより、キャブプラットフォームに対する起振源の寄与度を定量的に把握した。起振源寄与度の分析結果からキャブプラットフォーム応答に対して最も寄与している起振源コンポーネントを特定し、ファンモータの制振補強検

討に注力した。特定コンポーネントの制振対策前後におけるプラットフォーム応答加速度を実機で計測した。それらと比較し、キャブプラットフォームの応答加速度が効果的に低減されていることを確認した。

本研究のテーマである“油圧ショベルの乗心地に関する振動”という観点から、開発初期段階で役立つキャブ系応答シミュレーション技術として、第7章に『サブシステムレベルでのキャブ振動予測』をまとめた。主要フレーム材のねじり剛性や減衰特性の設計パラメータによる導出を行い、キャブ主要梁にそれらのフレーム特性を有した簡易FEモデルを構築した。簡易FEモデルを用いて算出した静的たわみ量および周波数応答計算結果を、実キャブを用いた試験結果と比較することによって、簡易FEモデルの妥当性を示した。この簡易FEモデルとマウント非線形特性を含めたライザ構造物のサブシステムモデルを用いて周波数応答計算を行い、キャブ揺れを定量的に把握した。また、実機計測データとの比較により、算出された応答加速度の妥当性も検証した。

従来の開発プロセスでは、概念設計、レイアウト設計を経て詳細設計が完了してからシミュレーションモデル作成に着手し、振動解析を実施していた。振動解析の内容によってモデルの規模や求める精度が異なるが、試作機による実機試験開始時点でモデリングが完了するケースが多く、試作機製作前に実機振動外力を想定した詳細な振動解析結果を得ることが困難であった。したがって、簡易FEキャブモデルは、解析先行型開発プロセスに大いに役立つものとなり得る。

第8章では、本研究の成果をまとめている。振動解析対象をキャブマウントといった部品レベルから、キャブ構造物も含めたシステムレベルへと拡張し、系統立った振動解析モデルを構築した。油圧ショベルのキャブやマウント開発において必要である、実機振動データのデジタルデータ分析技術、マウントの非線形特性の同定、そのモデル化技術、振動応答シミュレーション技術についても詳細に検討し、その活用方法を確立した。

最後に、キャブ乗心地振動のみならず、本研究で得た成果を発展させた今後の展望を述べる。