

高速列車走行に伴う低周波音の発生・影響と その制御に関する研究

学位論文内容の要旨

1964年の東海道新幹線開業から現在にかけ新幹線網の整備と高速化が進められ利便性が高まっている。一方で騒音・振動・低周波音等の環境問題も深刻となっている。本研究は在来鉄道では問題とならなかった高速列車の走行により発生する低周波音に注目し、列車軌道を覆う構造物の無い区間(明かり区間)で観測される低周波音、明かり区間からトンネル区間へ突入する際に発生する低周波音の発生原理と特性について模型実験およびシミュレーションにより解明をおこない、山陽新幹線岡山-博多間開業時から問題となっているトンネル出口からの放射音(トンネル微気圧波)について新しい動的な制御法を提案する。また高速列車の低周波音による苦情で主に問題となっている建具のがたつきについてがたつき開始の閾値を調査し、高速列車の走行に伴う低周波音により苦情となる可能性のあるレベルを示す。さらに低周波音とともに建具がたつきの原因となる地盤振動についても建具がたつきの閾値を調査し、適切ながたつき対策のための評価基準を示す。

第1章では、本論文の背景および研究の必要性と目的を簡単に説明している。

第2章では、本論文における研究背景として、日本国内における新幹線網整備の歴史と最高営業速度の推移、将来の高速営業運転のための試験車両による最高速度の推移および海外における高速鉄道網の整備と最高速度の推移、新幹線に係る公害訴訟と騒音・振動に関する環境基準、低周波音問題の推移と現状での対策について解説している。また低周波音の定義と物理的な特性、低周波音の人体への生理・心理的反応、低周波音苦情の評価と対応の現状について解説するとともに、高速列車による低周波音の直接的な人体影響の可能性について述べている。

第3章では、高速列車走行による低周波音に関する苦情の主要因である建具のがたつき現象について、低周波音と地盤振動による影響を調べた。低周波音による影響については、国内で一般的に使われている6種類の建具をサンプルとして聴覚的がたつき閾値および視覚的がたつき閾値を計測・評価した。低周波音によるがたつき閾値は聴覚的にも視覚的にも建具の固有振動数である10Hz前後において最も低くなり、それより低い或いは高い周波数では高くなることを示した。またガラス板がはめ込まれた建具のがたつき閾値は、ガラス板がはめ込まれていない建具に比べ低い周波数域で音圧レベルが20dB程低いことを示した。がたつき閾値は10Hz付近の周波数において50dBとなっており、環境省の示す物的苦情の参照値よりも20dB程低いことを示した。

地盤振動によるがたつき現象は、鉛直振動についてがたつきやすいガラス板のはめ込まれた建具2種類を試験し、建具の面に垂直となる水平振動について低周波音による影響評価に用いた6種類の建具を評価した。鉛直振動によるがたつき閾値は振動加速度レベル75dB以上となり、水平振動によるがたつき閾値は振動加速度レベル40dB~70dBであり、建具のがたつきは水平振動に敏感で

あることを示した。振動による建具のがたつき閾値は、周波数に応じて緩やかに上昇する傾向を示し、低周波音によるがたつき閾値と同様にガラス板のはめ込まれた建具が低いことを示した。また建具ががたつく際に建具振動の高調波のレベルに急激な変化が現れることを示した。

第4章では、列車軌道を覆う構造物の無い明かり区間において観測される低周波音について、模型実験および非圧縮・非粘性を仮定したポテンシャル流れモデルによりシミュレーションしている。シミュレーションにより、高速列車の周囲には列車前方に正圧、列車先頭部側面に負圧、列車後端部側面に負圧、列車後方に正圧となる特徴的な圧力場が分布していることを示した。この圧力場が列車と共に移動することによる圧力変動は、模型実験で観測される低周波音波形とよく一致した。そこで明かり区間で観測される低周波音は音波として放射されるものでなく、列車と共に移動する列車周りの圧力場の移動により地上に設置された家屋等では擬似的に音として観測されるものであることを示した。シミュレーションから、明かり区間における低周波音の距離減衰は列車長さの1/2の位置までの近傍では倍距離-11dBの低減を示し、列車長さの1/2以遠では倍距離-17dBの低減となることを示した。さらに列車速度上昇による圧力増加は倍速度12dBの増加となることを示した。また列車長さの低周波音レベルへの影響、観測位置の低周波音スペクトルへの影響も示した。

第5章では、高速列車がトンネルに突入する際にトンネル入口で放射する低周波音を、模型実験および非粘性・圧縮性を仮定したオイラー方程式を基礎方程式とする差分法によりシミュレーションを行っている。高速列車は明かり区間において第4章に示した圧力場を形成しながらトンネルに突入し、トンネル入口において圧力場が変形することにより音波として放射していることを明らかとした。トンネル入口における放射音は、列車先頭部側面の負圧部が最も強く放射しており、列車進行方向に強い指向性を有していることを示した。放射音の距離減衰は倍距離-6dBの減衰を示し、トンネル径を大きくすると倍直径-9dBの減少を示し、列車速度の上昇により倍速度18dBの上昇を示すことが明らかとなった。

第6章では、トンネル出口で放射する音波(トンネル微気圧波)について、トンネル微気圧波の音圧がトンネル内を伝搬する進行波の時間圧力勾配に比例することに着目し、トンネル内進行波の急激な圧力上昇を負圧および正圧による制御波を重ね合わせることで制御し、微気圧波を低減する手法を提案し、模型実験により制御の可能性を確認した。負圧波制御波による手法では、弱い進行波に対しては微気圧波制御効果が得られたが、バルブ部におけるチョーク現象により制御波の体積流量が制限されることから、強い進行波に対しては十分な制御圧力波を発生することができず、微気圧波制御効果にも限界があることが明らかとなった。正圧制御波による手法は、制御波発生装置のタンク圧力を高く設定することができるため、バルブ部においてチョークした状態でも質量流量を大きくすることができ、任意の制御波が生成可能であった。また進行波に対し過小・過大な正圧制御波による微気圧波制御効果の評価を行い、過小な制御においては制御効果が小さくなるが、過大な制御においては制御効果が落ちることが少ないことを示した。また進行波に対して早い制御および遅い制御を行い、早い制御では制御効果が著しく低下するが、遅い制御では比較的高い制御効果が得られることが明らかとなった。

第7章では、本論文の結論として以上の結果を簡単にまとめている。

最後に本研究は、明かり区間およびトンネル入口において発生する低周波音の発生原因および特性を明らかにし、高速列車による低周波音環境の予測を可能とした。トンネル出口におけるトンネル微気圧波を正圧制御波により低減できることを示した。また、低周波音による苦情の可能性のあるレベルを建具のがたつき閾値として示した。さらに振動による建具がたつき閾値を示した。

学位論文審査の要旨

主査	助教授	長谷部	正基
副査	教授	繪内	正道
副査	教授	小林	幸徳
副査	教授	佐藤	馨一
副査	教授	横山	真太郎

学位論文題名

高速列車走行に伴う低周波音の発生・影響と その制御に関する研究

近年、高速鉄道網の拡充と高速化が進められ、移動時間および都市時間距離の短縮による利便性の向上と経済的効果が上げられている。一方で走行速度の向上による沿線における騒音・振動・低周波音による環境影響が懸念されている。従来、列車の高速化に関する研究は盛んに行われているが、多くは「高速走行技術」、「車両内の快適化技術」、「法規制に沿った一般騒音・振動の対策技術」等の向上を目的としており、高速走行により新たに問題となった低周波音の発生と低周波音による環境影響の評価および対策に関する研究は少なく、今後の発展が望まれている。

本論文は、高速列車の走行により発生する低周波音について、開放区間走行時およびトンネル突入時の発生プロセスおよび低周波音の特性に関する模型実験及びシミュレーションによる解析、以前から問題となっているトンネル微気圧波のトンネル内における進行波制御による低減法の提案と模型実験による有効性の検証、高速列車による低周波音の主な苦情である建具のがたつき現象の閾値について研究した結果を述べたものであり、7章で構成されている。

第1章では、研究背景と研究目的および論文構成を述べている。

第2章では、日本国内および海外における高速列車網の整備の状況、日本における新幹線の騒音・振動による公害訴訟および環境基準、新幹線による低周波音問題と現在実施されている対策について解説している。また低周波音による直接的な人への心理・生理影響、低周波音に関する苦情と評価基準、高速列車による人体への直接影響の可能性について解説している。この章により本研究の必要性および意義を明らかにしている。

第3章では、高速列車による低周波音の主な問題である建具のがたつき現象について、日本における代表的な建具6種類の低周波音による聴覚的閾値および視覚的閾値を実験により求め、がたつき現象が起こり得る最小レベルを示している。また地盤振動によるがたつき閾値についても鉛直振動および水平振動について実験により示している。がたつき現象により人に知覚し得る低周波音のレベルを示すことにより、高速列車による低周波音の目標レベルを示している。

第4章では、開放区間を走行する高速列車による低周波音について、模型実験とシミュレーション

により解析している。高速列車を非圧縮性・非粘性を仮定したポテンシャル流れの考え方から定常流れ中に直列においた吹き出しと吸い込みによりモデル化することで、列車周りの圧力場を計算できることを示している。またシミュレーションと模型実験の結果を比較し、その一致から開放区間で観測される低周波音が圧力場移動による擬似的な音であることを明らかとしている。更に低周波音の距離減衰、列車速度の影響、軌道からの距離による波形および周波数への影響等の特性について明らかにしている。

第5章では、高速列車がトンネルに突入する際にトンネル入口で放射する低周波音を、圧縮性・非粘性を仮定したオイラー方程式を基礎方程式とし、MUSCL内挿により高精度化したTVD差分法によりシミュレーションを行っている。その結果から列車のトンネル突入にともない、低周波音の放射に4段階の過程が存在することを示している。また低周波音の列車進行方向に対する指向性、距離減衰、列車直径とトンネル直径の比の影響、速度影響について評価している。シミュレーションと模型実験との比較により、本手法による評価が信頼できることを示している。

第6章では、新幹線トンネルにおいて問題となっているトンネル微気圧波について、トンネル内における圧力波の重ね合わせによる動的制御法を提案し、模型実験により評価を行っている。トンネル内進行波に負圧の制御波を重ね合わせる手法では、負圧制御波がチョーク現象により十分な出力ができないことから有効性が低いことを示している。正圧制御波を重ね合わせる手法では、支障なく任意の制御波の出力が可能であり、高い制御効果が得られることを示している。正圧制御波の圧力および制御タイミングに対するロバスト性についても評価し、安定した効果が得られることを示している。実際の新幹線トンネルへの実現性についても言及し、本手法がトンネル微気圧波の新しい対策として期待できることを示している。

第7章では、本論文の結論として本研究において得られた成果についてまとめられている。

これを要するに、著者は高速列車の速度向上により新たに問題となった「低周波音の発生プロセスと特性」、「トンネル微気圧波の制御波による動的制御」および「低周波音による建具のがたつき現象の評価」について新知見を得たものであり、高速列車網の拡充・高速化計画における環境評価および対策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。