

論文内容の要旨

博士学位請求論文

高速列車走行時の桁式高架橋周辺の地盤振動伝播に関する研究

1964年の新幹線の営業開始以降、様々な環境問題、わけても沿線の地盤振動問題が顕在化し、環境省より基準値が示されることとなった。鉄道構造物周辺の地盤振動特性については多くの研究が行われているが、構造物と地盤の連成現象である、桁式高架橋周辺の地盤振動に着目した事例は少ない。車両から発生する振動は軌道、桁および橋脚を経て地盤に入力され、周辺地表面上の受振点へ達する。本研究ではこのうち、橋脚振動から受振点に至るまでの部分に着目し、桁式高架橋の橋脚部の振動から周辺地表面の振動を計算する手法を提案することを目的とする。また、振動対策工として、鉄道用地内に地中防振壁を配置する場合、敷地制約から橋脚に近接して線路方向に配置せざるを得ない。本研究ではこの対策工の振動低減効果について、防振壁と橋脚の線路方向の位置関係の違いの影響を実験により明らかにするとともに、評価モデルの汎用性を確認することを目的とする。

振動加速度測定によれば、橋脚および地盤に生じる振動の性状の一致性は高い。振動方向に着目すると、鉛直方向と線路方向の成分が大きく、線路直角方向の成分は小さいことがわかる。地表面の鉛直応答に影響を及ぼす橋脚の振動成分を、各方向の橋脚振動を説明変数とした重回帰分析により検討した。この結果地表面の鉛直振動への、橋脚の鉛直方向振動と線路方向振動の影響感度の大きさを定量的に示すことが出来、線路直角方向振動の影響との対比が明確となった。

これら両方向の振動には強い相関性があり、この事実はロッキング振動といわれる橋脚の回転挙動の影響の存在を強く示唆するものである。そこで、現地橋脚に複数の加速度計を、各方向成分に対して取付け、計測結果の同期性をつぶさに検討することにより、橋脚の線路直角方向軸周りの回転挙動の存在を確認した。さらに、これらの加速度計測値から、橋脚柱部の曲げ変形成分と剛体回転成分を分離し、後者の影響を評価した。この結果、橋脚フーチング部の振動の鉛直成分は、線路方向の端部において最大で中心部の約3.9倍となる場合があることが明らかになった。

次に、線路方向/鉛直方向の並進挙動と回転挙動の3種類の振動モードの橋脚振動から、周辺地表面の鉛直振動を有限要素法により計算するモデルを構築した。実測値をとの比較により、提案モデルの検証を行った結果、前記の主要な橋脚モードを考慮することで、精度よく周辺地盤の振動を評価できることを確認した。

最後に、橋脚に近接して配置した地中防振壁の振動低減効果について、防振壁と橋脚の線路方向の位置関係の違いの影響を縮小模型実験により確認した。この振動低減効果の結果を整理したところ、従来提案されてきた防振壁の長さの影響の評価結果の式に加え、防振壁端部の構造的振動を取込んだ、新しいモデル提案を行うことができた。

論文審査の結果の要旨

博士学位請求論文

高速列車走行時の桁式高架橋周辺の地盤振動伝播に関する研究

論文審査の結果の要旨（当該分野における位置づけ、論文構成、独自性や成果、課題、評価）

1964年の新幹線の営業開始以降、様々な環境問題、わけても沿線の地盤振動問題が顕在化し、環境省より基準値が示されることとなった。鉄道構造物周辺の地盤振動特性については多くの研究が行われている。高速鉄道車両が加振源となる環境地盤振動では、加振源の延長が長いことや車両速度が変化する等の要因より、加振源の振動特性が複雑となる。また、加振源となる車両が走行する軌道は、地盤上に直接敷設されている場合のほか、ラーメン高架橋、桁式高架橋、盛土およびトンネル等の種々の構造物上に設置されている。

本論文はこれらの構造物のうち、桁式高架橋周辺の地盤振動の地盤振動伝播を対象とし、橋脚振動から地表面振動を計算する手法と橋脚近接して線路方向に地中防振壁を配置した場合の振動低減効果について述べたものである。軌道から桁に伝わる振動の問題は構造工学の問題として、また軌道から地盤に伝わる振動の問題は地盤工学の問題として多くの研究実績がある一方で、構造物と地盤の連成現象である、桁式高架橋周辺の地盤振動に着目した事例は少ない。本研究では高速車両の通過による橋脚のロッキング振動の励起という新しい課題に挑むとともに、この現象を加振条件とする地盤振動の解析という、これも新しくかつ困難な課題に挑んでいる。

本論文は8章で構成されている。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的について述べている。新幹線の速度向上に際し、地盤振動が変化することが想定され、地盤振動の増加を予測する手法が求められている。本研究では特に桁式高架橋周辺の地盤振動を対象とし、橋脚の振動に基づき、周辺地盤の地盤振動を計算する手法明らかにすることと、防振壁と橋脚の線路方向の位置関係の違いの影響を実験により明らかにすることの必要性を確認し、また従来研究成果のレビューを行っている。

第2章「橋脚の地表面近傍部の振動」では、地盤への振動入力源となる橋脚の振動特性を明らかにした。橋脚に加速度計を設置し、列車が走行した際の、直交する3方向の振動加速度計測を実施した。橋脚振動のフーリエスペクトルは、最も低いピークの振動数を基本振動数とすると、他のピークは基本振動数の整数倍となっており、基本振動数と列車速度は正比例の関係が見られる。列車速度と各ピーク振動数の振幅の関係に着目すると、多くの場合は速度の増加とともに振幅が増加する正の相関関係を示す。しかし、負の相関を示す場合や、明確な相関を示さない場合も確認された。また、振動方向毎に振幅の大きさを比較すると、振幅が最大となる振動方向は鉛直方向または線路方向であり、線路直角方向の振幅は他の振動方向よりも小さいことが明らかになった。

第3章「列車走行に伴う地表面と振動と地盤内の振動伝播特性」では、列車走行時の地表面鉛直振動の特性と橋脚振動の関係を明らかにしている。列車振動時の地表面の鉛直振動は基本振動数の3倍のピーク振動数での振幅が大きく、ここに着目して、地表面の鉛直応答に影響を及ぼす橋脚の振動成分を、各方向の橋脚振動を説明変数とした重回帰分析により検討した。この結果地表面の鉛直振動への、橋脚の鉛直方向振動と線路方向振動の影響感度の大きさを定量的に示すことが出来、線路直角方向振動の影響との対比が明確となった。このことは、地表面の鉛直振動には橋脚の線路方向水平振動が影響していることを示している。

第4章「橋脚の回転挙動」では、ロッキング振動と呼ばれる、橋脚の回転挙動について明らかにしている。第2章および第3章で、橋脚の線路方向水平振動が、地表面の鉛直振動に及ぼす影響が大きいことが判明したことに伴い、線路方向水平振動の性状ならびに鉛直振動の同期性を、より詳細に把握するためにこの検討を実施したものである。橋脚の線路方向に水平振動を生じさせる外力としては、隣接桁を支持する支承部からの反力が想定される。支承を挟み、桁側と橋脚側の2点に加速度計を設置し2点間の相対加速度から、支点反力を算出し、橋脚柱部の曲げモーメント分布が高さ方向に一定として近似できることを明らかにした。また、鉛直方向と線路方向に離隔を持つように設置した3点の加速度計の相対加速度から、橋脚は線路直角方向水平軸周りに回転(ロッキング)していることを示した。さらに、3点の加速度計測値から、橋脚柱部の曲げ変形成分と剛体回転成分を分離する方法について提案した。橋脚の剛体回転により、橋脚フーチング部の振動の鉛直成分は、線路方向位置により異なり、端部の振幅は最大で中心部の約3.9倍となる場合があることを示した。

第5章「橋脚から地表面に伝播する地盤振動の計算モデルの提案」では、軸対称FEMを活用した橋脚周辺の地盤振動の計算モデルを提案した。第2章から第4章で明らかにした橋脚の振動挙動に基づき、橋脚の回転、鉛直併進および水平併進の3種類の挙動を再現するための有限要素モデルを示した。軸対象FEMを用いる場合本来矩形である基礎を円形でモデル化する必要が生じる。この影響を、基礎縁辺から着目点までの伝播距離の差および振動数と振動伝播速度の関係から定量化する方法について示した。また、複数橋脚から伝播する振動の位相差による干渉の影響についても検証を行い、橋脚間隔が15mの場合、伝播する波長がおおむね10m未満となると、振幅を正しく評価することが困難となることを明らかにしている。

第6章「地盤振動計算モデルの検証」では、第5章で提案した振動計算モデルについて実測値に基づき精度を検証した結果を示している。振動計測箇所での地質調査結果に基づき軸対称FEMモデルを作成し、回転、鉛直併進、水平併進の3種類の橋脚の挙動に応じた加速度伝達関数を計算した。橋脚振動の実測値から地表面の振動を計算した結果、提案したモデルでは31.5Hz以下の振動数の振幅を概ね再現できることを示した。特に振幅の大きい8Hzと10Hzの帯域においては、ロッキング挙動の考慮の有無により計算値に約5dBの差が生じており、ロッキング挙動を考慮した場合のほうが、実測値を精度よく再現できることを確認した。また、基礎形状の違いについても、その影響を考慮した場合のほうが、実測値

を精度よく再現できることも明らかにした。

第7章「地盤振動対策工」では、鉄道用地内で適用可能な振動対策工として、橋脚基礎に近接して線路方向に配置する防振壁を対象とし、防振壁と橋脚の位置関係が振動低減効果に及ぼす影響について縮小模型実験により明らかにしている。この結果は、従来芦谷らにより提案されてきた方法による防振壁の長さの影響の評価結果の式に加え、防振壁端部の構造的振動を取込んだ、新しいモデル提案を行うものとなっている。

第8章「結論と今後の課題」では、本研究の成果を総括し、今後の課題について示している。

本論文の独自性は2点ある。1点目は高速列車走行時の桁式高架橋橋脚について、地盤に対する振動の入力源としての振動挙動に着目した点である。鉄道構造物周辺の地盤振動伝播に関する研究は多くなされているが、桁式高架橋に着目した事例は少なく、特に列車速度が240 km/h を超える高速域での速度変化の影響を明らかにした点は大きな成果といえる。

橋脚および周辺地盤の振動測定により得られた以下の知見が得られている。

①列車走行に伴い発生する振動は、車両の種類と走行速度が同一であれば、橋脚および地盤に生じる振動はほぼ同一となる。

②列車走行時の橋脚の振動モードは鉛直方向と橋軸方向の並進挙動と橋軸直角方向軸周りの回転挙動が卓越し、これらの振動モードは周辺地表面の鉛直応答に及ぼす影響が大きい。

地盤振動伝播計算の有限要素法モデルにおける加振力特性に上記の知見を適用することで、橋脚の振動から周辺地表面の振動を計算する上での精度の向上が図られている。また、車両から軌道、桁を経て橋脚に至る振動伝播を再現するモデルの提案が今後の課題となるが、本研究で得られた橋脚振動データはモデルを構築する上で有用なデータとなる。

2点目は橋脚に近接して配置した地中防振壁の振動低減効果について、防振壁と橋脚の線路方向の位置関係の違いの影響を明らかにした点である。本研究では、橋脚が高速列車走行時に独自の振動モードで振動した場合の振動低減効果について実験により明らかにするとともに、既往の研究で提案されている評価手法との比較を行っている。この結果は芦谷が提案する方法による防振壁の長さの影響の評価結果の式に加え、防振壁端部の構造的振動を取込んだ、新しいモデル提案を行うものとなっている。

本論文は、独自性が高いうえ、環境地盤振動に係る分野において有用な成果を得ている。また、同分野におけるさらなる課題の解決に貢献する展開も期待できる。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。