

氏 名	かとうまさふみ 加藤政史
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2900号
学位授与の日付	平成20年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科社会基盤工学専攻
学位論文題目	列車走行に起因する地盤振動の粘弾性波動論に基づく数値シミュレーションに関する研究
論文調査委員	(主査) 教授 松岡俊文 教授 田村武 教授 朝倉俊弘

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、有限差分法 (FDM) と有限要素法 (FEM) による粘弾性波動方程式の数値シミュレーションを用いて、列車走行に起因する地盤振動の現象解明と、線路構造物が振動に与える影響の評価等の結果をまとめたものであって、6章からなっている。

第1章は序論であり、数値シミュレーションによる地盤振動現象の説明や応用に関する概要を示し、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、粘弾性波動方程式が標準線形固体モデルから導出される。ここでの導出方法は、過不足なく丁寧に論述されている。また、数値計算スキームへの展開を見据えて弾性定数の定義等が明確に示されているという点で、過去の文献よりも簡潔に整理されているといえる。

第3章では、弾性波動方程式の差分法 (FDM) と有限要素法 (FEM) のための数値計算スキームについて述べられる。また、FEMについてはエレメントフリーガラーキン法の移動最小二乗法から求める内挿関数を用い、さらに剛性マトリクスを構成せずにタイムステップごとに応力を評価する計算スキームである DEFGM (Decomposed Element Free Galerkin Method) が提案される。そしてこの手法と FDM4 (Finite Difference Method with 4th order accuracy in space) との比較を中心に議論を進める。DEFGMを考案した理由は、空間内挿の次数を必要以上に上げることなく精度を向上させるためである。

PS反射波による比較検討では、FDM4の精度がDEFGMのものより少し良かった。この理由は、DEFGMの空間精度が3次であるのに対し、FDM4の空間精度が4次だった点にあると考えられる。一方、最短波長に対して8グリッドの条件で行ったレイリー波の合成テストにおいては、グリッド分散なしに正しいレイリー波が合成できるのは、FDM4では5波長 (Ricker waveletの中心周波数に対する) であったのに対し、DEFGMでは50波長以上を伝播した。この理由としては、FDM4が自由表面の近くが空間精度2次であったためと考えられる。このように、計算精度を計算時間との両面から評価した結果、自由表面を含まないモデルではFDM4が、一方、自由表面を含むモデルではDEFGMが効果的なシミュレーション手法であるということがわかった。また、DEFGMにおいて、基底ベクトルと重み関数を変化させながら比較検討を行った。過去の研究に示された基底ベクトルと重み関数の組み合わせは、今回の弾性波動伝播シミュレーションという問題においては期待されるほどの精度は得られなかった。しかし、本論文で提案された新たな基底ベクトルと重み関数の組み合わせはEFGMの精度を劇的に向上させた。さらには、通常FEMを上回る精度を与える組み合わせを見いだすことができた。また、以上の成果は空間内挿の次数を必要以上に上げることなく実用上十分な計算精度を得たという点で画期的といえる。

第4章では、新幹線の走行に起因する地盤振動のFDMシミュレーションによる再現が試みられた。この際、新幹線の車両の挙動分析や安全点検のために計測される走行中の車輪に掛かる力を直接シミュレーションにおける入力として利用している。この利点は、入力が既知であるため、波動場を再構成する際、伝達系の波動論の妥当性に絞った議論ができることで

ある。まずフィールドサイトの速度検層記録と、周辺地域での盛土の物性値を文献等から整理した。そしてそのサイトで列車から到来する地盤振動の時系列・振幅スペクトル・FKスペクトルを観測した。このようにして得られた振源力と地盤のパラメータを入力し、FDMシミュレーションを行った。粘性Q値は確定していないパラメータである。従って、Q値は5, 6, 7.5, 15, 25, 50の6通りで別々に計算が行われる。シミュレーション結果の振幅スペクトルを現場記録と比較したところ、 $Q \leq 7.5$ の設定において、シミュレーション結果はフィールドで記録された波動の時系列と非常に良い一致を示した。このQ値の範囲は、地表面近傍における経験的値から、妥当であるといえる。また、シミュレーション結果をFKスペクトル解析することで、現場記録にドップラー効果が含まれることが明らかになった。

ここでは、列車が盛土という連続的な構造の上を走行していることと、新幹線という極めて重量バランスに優れた列車を対象としているという2つの理由から、あらゆる車軸からの応答は同じであるということと、場所によっていくらか列車の重量から大小する変化分のみが地面振動を引き起こすという2つの仮定が設けられている。これらは、計測方法の限界等を補うという意味もある。シミュレーション結果は、地面振動現象を十分説明しているといえ、これらの仮定は肯定される。

第5章では、3次元FEMとDEFGMを用いて複雑な構造問題の評価が行われる。まず、3次元FEMの精度を弾性体半無限空間の解析解、弾性体2層無限空間の準解析解、粘弾性体2層無限空間の準解析解の3つのモデルおよび別解との比較により評価を行った。このように精度評価を3通りに分けた理由は、解析解も準解析解も数値積分等を含む近似解法であるからだ。シミュレーションの結果、弾性半無限空間の解析解と極めて良く一致している。一方、準解析解とはわずかな誤差があった。明らかに、解析解は準解析解よりも厳密解に近いので、粘性を含めたFEMの精度は極めて良いと結論付けることができる。また、FEMにおける粘性による減衰については、コンスタントQにおける準解析解との比較において精度良く計算されていると判断できる。さらに、並列計算によってプロセッサ台数以上の高速化が望めることもわかった。

以上のような精度評価をもとに、高架橋連結部に取り付けた補強鋼が地盤振動に与える影響の評価が行われた。これには、梁理論と3次元DEFGMの結合理論を導入した。この理論の妥当性については付録Bで示される。次いで、鋼矢板による地中防振壁の評価が行われた。線路近傍の有限要素は深さ1m×幅1m×厚さ1mであるが、座標変換により鋼矢板近傍では厚さのみ10cmまで縮小される。ただし鋼矢板は、1cmの厚さなので、周辺地盤との物性値において時間平均公式等を用いて10cmの厚さの有限要素で評価される。以上のように、問題のモデル化における妥当性が十分議論されているだけでなく、計算結果は、過去の実験的研究の成果を肯定的に説明できる値を示しているといえる。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、有限差分法（FDM）と有限要素法（FEM）による粘弾性波動方程式の数値シミュレーションを用いて、列車走行に起因する地盤振動の現象解明と、線路構造物が振動に与える影響を評価することが目的である。得られた結果の概要は以下の通りである。

- ① 2次元のFDMとFEMの計算精度を評価した。この際、エレメントフリーガラーキン法による内挿関数が、通常のFEMよりも計算精度が良いことを示した。また、剛性マトリクスを構成しない計算スキームを考案した。これをDEFGM（Decomposed Element Free Galerkin Method）とよぶ。DEFGMは、計算メモリの節約が可能のため、波動問題に適した方法であるといえる。自由表面を含む問題は、DEFGMが優位で、含まない問題は空間精度4次のFDMが優位であることを、計算時間と解析解による比較検討により導いた。DEFGMは、低次内挿を利用するにも関わらず、実用上十分な計算精度がある。
- ② 3次元粘弾性波動方程式のFDMによるシミュレーションで、新幹線走行に起因する地盤振動を再現した。特徴的な点は、計測された車輪に掛かる力を直接シミュレーションの入力としたことである。これは、入力を推定する工程を必要とする過去の研究における問題点を解決し、地盤の粘性に対する議論を可能としている。そして、シミュレーション結果は、現場記録と良い一致を見せる。この際、数値計算上の線路の長さを有限に打ち切ることが結果に与える影響や、線路を離散的に扱うことに対する安定条件を考案し、FDMが信頼に足る結果を提供していることを成功裏に考察している。
- ③ 3次元DEFGMを梁理論と結合させることによって、高架橋連結部の鋼部材による補強が、地盤振動に与える影響を評

価した。また、FEMを用いて埋設された鋼矢板が地盤振動に与える影響を評価した。これらに対する計算結果は、過去の実験的研究の成果を肯定的に説明できる理論的検証となり得る。

- ④ 3次元FDM, FEMおよびDEFGMは、解析解や準解析解との比較によって、極めて高い計算精度があることが示されている。また並列計算による高速化が可能であることを示した。ここで考案された一連のプログラムは、地盤振動の分野だけでなく、波動現象を扱うさまざまな分野への発展が期待できる。

以上、本論文は、FDMとFEMの特徴をよく整理し、実用上十分な計算精度や安定条件を精緻に評価した。これにより、列車走行による地盤振動の現象解明と、線路構造物が振動に与える影響の評価に対して、数値シミュレーションを用いた効果的な理論的予測の方法論を考案したといえる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。