

論文名： 交通振動レベル予測のための既設道路橋振動の
ARMA過程によるモデル化に関する研究

生産科学研究科 古川 毅

都市高速道路の建設，交通量の増大，道路と建築物の接近など，都市化の進展と道路橋の老朽化などにより，道路橋環境振動問題が増加している．道路橋交通振動問題の対策のためには，走行車両による道路橋の動態観測と共に振動レベル予測が必要である．

道路橋交通振動の原因となる外乱である路面凹凸を，確率過程でモデル化すると，道路橋交通振動解析は，不規則振動解析が可能になる．路面凹凸のパワースペクトル密度を1次遅れ系の定常解過程でモデル化すると，橋梁一車両一路面系の変位・速度応答の分散は伊藤型の確率微分方程式により誘導される共分散方程式により求めることができる．このとき，道路橋振動の最大応答は，共分散方程式の定常解により予測できる．しかし，従来の路面凹凸モデルを用いると，橋梁の加速度応答が求められない限界があった．本研究では，新しい路面凹凸モデルを仮定して，共分散方程式の定常解析から，橋梁加速度応答の簡易レベル予測法を可能にした．本解析法を斜張橋（長崎県）の交通振動に適用し，加速度の最大応答が発生する場所の予測を行うための，最大応答評価曲線の提案をした．

既存橋梁の交通振動予測を行う場合，有限要素法を用いて計算すると，部材の算定をする必要があり，膨大な経費がかかることになる．本研究では，衝撃加振実験データから推定された橋梁振動のARMAモデルから構成された橋梁系の状態方程式と，他方，路面凹凸と車両の仮想モデルを構成して，コンピュータ上で合成して振動レベルを計算する手法を提案し，その有効性を検証した．この結果，既存橋梁に仮想的な路面凹凸や車両モデルを適用し，コンピュータシミュレーションを行う交通振動レベル予測が可能になった．さらに，より一般的に本手法を用いると，既存橋梁の動的解析が，橋梁の衝撃加振実験データよりARMAモデルを経て構造同定された橋梁の状態方程式より解析可能になる．

戦後60年かけて建設されてきた橋梁は，急激な老朽化時代を迎え，交通の骨格の社会基盤である道路橋の維持管理は緊急の課題になっている．維持管理の対策において，保有耐力の評価や環境振動の予測には，既存橋梁の振動の支配方程式を推定する必要がある．本論文は，道路橋交通振動の新しい加速度応答レベル予測法の提案，さらに衝撃加振実験に基づく既存橋梁のモデル化による交通振動レベル予測手法の提案を行い，これらの手法の有効性を示したものである．

本研究の内容は以下のとおりである．

第1章では，本研究の背景，目的および論文の構成と内容について示した．

第2章では，確定論的手法である有限要素法によりモデル化された運動方程式を誘導し，基本的な振動特性である固有振動数と固有振動モードを算出し，応答解析の基本について示した．また，統計データの解析に利用される状態空間法の基礎について述べた．

第3章では，不規則路面凹凸を有する道路橋の走行車両による交通振動応答は，強い非定常性を示すため，共分散方程式により表される．この際の路面凹凸は1次遅れ系でモデル化されるため，加速度応答分散が発散し解を求めることができない．そのため，新しい高域路面

凹凸レベルを遮断するモデルを導入した定式化を行った。

第4章では、橋長 670m を有する鋼 3 径間連続斜張橋を対象モデルとし、3 章で誘導した共分散方程式により定常応答解析を行った。その結果、標準偏差値が一致するとともに、標準偏差の 2 倍が時刻歴応答解析の最大応答とほぼ一致することを確認した。交通振動により高次振動が励起する橋梁において、最大応答が発生する場所を特定する最大応答評価曲線を提案した。

第5章では、対象とする橋梁自体も不確定量であると考えた場合の解析モデルとして ARMA モデルを導入した。ARMA モデルは線形統計モデルであり、入出力関係よりパラメータを同定する必要がある。また、ARMA モデルは時系列解析に用いられ、離散系のデータを処理するものである。本章では可観測性および運動方程式の離散化について示した。

第6章では、橋長 59m を有する単弦アーチを対象モデルとし、5 章で定式化した ARMA モデルのパラメータ同定法を示した。本研究では、衝撃加振実験データから推定された橋梁振動の ARMA モデルから構成された橋梁系の状態方程式を用いた。橋梁の動的解析モデルとして、橋梁の運動方程式を離散化して状態空間表示し、これより多次元 ARMA モデルを構成した。衝撃加振試験より最小二乗法による多次元 ARMA モデルの構造同定法を示した。

第7章では、車両の運動方程式を離散化し、橋梁と車両の相互連成項のモデル化を行い離散化された橋梁 - 車両系の方程式を誘導した。さらに路面凹凸を確率過程でモデル化し、橋梁 - 車両 - 路面系の離散化された共分散方程式を誘導した。次に ARMA モデルで表現した既設橋梁の交通振動レベル予測を行った。また、ARMA モデルの有効性を検証するため、有限要素モデルの数値積分法から得られた衝撃加振応答と比較し、解析精度について評価した。その結果、ARMA 過程による既設橋梁のモデル化は、断面算定等の煩雑な作業を省くことができるとともに、現状の劣化や損傷状況を加味した実橋に近いモデル化が可能となり、現状の健全度把握が基本となる維持管理業務に有効に利用することができることを検証した。また、ARMA モデルで表現した既設道路橋の交通振動レベルの予測法は有効な手法であり、環境交通振動問題の解決策や長期保全のための維持管理手法の立案に有効に活用することができることを検証した。

第8章では、第2章から第7章で述べた結果に基づいて結論を述べた