氏　　名	みやむら　まさき 宮　村　正　樹
研究科，専攻の名称	
学 位 論 文 題 目	高周波数領域の振動特性を用いた 橋梁コンクリート床版の構造性能評価手法
論 文 審 査 委 員	主査　東北大学教授　鈴木基行　　東北大学教授　岩熊哲夫 東北大学教授　京谷孝史　　東北大学教授　久田真 東北大学准教授　内藤英樹

要約

本論文は，コンクリート構造物の経年劣化による損傷の顕在化や補修・補強対策において大きな問題となっている床版劣化(疲労損傷，土砂化等)を取り上げ，構造性能評価方法として高周波数領域に着目した衝撃振動試験及び FEM 構造解析を用いて，剛性を指標として構造物の部位・部材毎に設計値との差異を定量的に表示する点検・評価方法を提案したものである．

衝撃振動試験とは，重錘や掛矢等で構造物に衝撃荷重を与えて，その応答から構造物の周波数応答関数を算出し，この関数の振幅の卓越と位相差から構造物の固有振動数を把握する試験である．本試験法は，標準設計が多く採用されている鉄道構造物の健全度評価手法として用いられているが，構造形式や幅員構成等が多岐に亘る道路構造物では，構造性能評価に用いる標準値(統計処理に基づく構造物の固有振動数の標準的な値)の設定が困難であるため，これまで適用されていなかった．

一方，コンクリート構造物の設計方法は性能照査型設計法に移行した．この設計方法は構造物の目的に適合する機能を明示し，その機能を備えるために必要となる要求性能を規定し，構造物の供用期間中に性能を確保することで機能を満足させる設計方法であるが，照査方法は限界状態設計法が基本となっており，この概念は剛性を指標とした構造性能評価と結び付くものである．

そこで，RC 床版供試体を対象とした室内試験を行い，衝撃振動試験に基づく構造性能評価手法の構築に向けた基礎的研究を行うとともに，それを供用環境下における鋼鈑桁道路橋と PC 箱桁道路橋に適用して検証した．最後に，本研究全体を受けて，衝撃振動試験から得られる高周波数領域の振動特性を用いた橋梁コンクリート床版の構造性能評価手法をまとめた．

本論文は 6 章で構成される．以下に，各章ごとの概要をまとめる．

第 1 章では，研究の背景として，社会資本ストックの現状や維持管理の動向，性能照査型設計法への移行等の概要をまとめ，点検結果に基づき構造物の要求性能を定量的に評価する性能照査の体系化が必要であることを示した．なお，既設橋梁の安全性や使用性の照査についても，新設設計時と同様に構造解析に基づいた部材毎の構造性能評価を行うことの重要性を示し，これまで構造物の全体剛性評価として適用していた衝撃振動試験の適用

範囲を広げ，高周波数領域の振動特性に着目した部材剛性評価手法を確立することが本研究の目的であることを示した．また，本論文の構成についても示した．

第 2 章では，コンクリート構造物の欠陥・劣化の検査を目的とした各種非破壊試験の特徴を示すとともに，本研究の対象とする衝撃振動試験の位置付け及び着目周波数帯域(数十 Hz～百数十 Hz)について示した．また，振動・波動に基づいた表面性状及び部材剛性，全体剛性評価に関する既往の研究についてレビューを行い，本研究の位置付け・特徴を示した．

第 3 章では，輪荷重走行試験装置を用いて，健全な状態の床版供試体および塩害劣化を模擬した床版供試体の疲労試験を行い，各段階における静的載荷試験により床版の疲労損傷に関する基礎的データを収集した．また，輪荷重走行試験中の動的たわみや鉄筋の動的ひずみといった RC 床版の動的な挙動に関する計測結果から床版の剛性低下のメカニズムを考察した. 次に, 各段階において重錘落下による衝撃振動試験の簡便な振動試験を行い，床版の疲労損傷度と振動特性に関する基礎的データを収集するとともに，RC 床版の疲労損傷度評価手法としての適用性を検討した．本検討から得られた結論を以下に示す.

1)疲労限界状態における等価繰返し走行回数は，健全供試体の 350 万回に対して浸漬供試体が 180 万回とほぼ半分であり，塩害による鉄筋の腐食と腐食ひび割れが等価繰返し走行回数の増加に伴って曲げ剛性の低下に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった.

2)健全供試体と浸漬供試体において，疲労損傷に伴うたわみ挙動の増加傾向に明らかな違いが確認されたが，疲労限界状態に近付くと何れの供試体も活荷重たわみの増加傾向が顕著となることから，剛性を指標とした疲労限界状態の検知および構造性能評価の有効性が示唆された.

3)活荷重たわみは等価繰返し回数の増加に伴い徐々に増加し，疲労限界時の走行回数で急増するのに対し，固有振動数においても疲労限界時に顕著な低下傾向を示すなど概ね傾向は一致した．このように，簡便な衝撃振動試験によって得られる固有振動数の変化に着目することで，床版の疲労損傷度の指標である活荷重たわみの増加傾向を把握可能であることが示唆された.

4)等価繰返し走行回数の増加に伴う RC 床版の疲労損傷度は，衝撃振動試験により得られる床版の固有振動数の変化として表されることが明らかとなった．さらに，床版供試体の剛性低下箇所と固有振動数が顕著に低下するモード次数とは整合が取れることが分かり，高周波数領域の振動特性を分析対象とすることによって床版の局所的な剛性低下を把握できることが明らかとなった.

第 4 章では，供用下にある高規格幹線道路の鋼鈑桁道路橋 RC 床版を対象として，重錘落下による衝撃振動試験を実施して，床版格間単位の固有振動数が把握可能か確認するとともに，得られた振動特性と外観性状との関連性について検討した．また，衝撃振動試験の妥当性を検証するひとつの情報として，一般走行車両による動たわみ試験も実施した．さらに，衝撃振動試験で得られた床版格間の剛性低下を考慮した FEM 解析を実施して，定量的な損傷度合いとの整合性や試験方法の妥当性を数値解析的に検証するとともに，設計時からの性能低下量

を数値表示する方法を提示した．本検討から得られた結論を以下に示す．

1)供用環境下の実橋を対象とした衝撃振動試験により，橋梁全体系および床版部分系の固有振動数が把握可能であることが明らかとなった．

2)本研究で対象とした橋梁の範囲内では，路肩側床版部分系の固有振動数に明確な差異は確認されなかった．これは，実橋 RC 床版の拘束条件は主桁による 2 辺固定で，橋軸方向には RC 床版が連続していることから同様の挙動を示したものと考えられる．さらに，床版補修時のはつり調査結果では床版上面における土砂化等の損傷は橋梁全体に亘って確認されており，劣化分布と固有振動数の傾向は一致していた．

3)一般走行車両を用いた動的載荷試験結果により，橋梁全体系 1 次の固有振動数は把握可能であることが明らかとなり，衝撃振動試験結果との整合性も確認された．但し，橋梁全体系 2 次以降の振動モードや床版部分系の固有振動数の把握は困難であった．

4)実測固有振動数と設計基準強度想定時の解析固有振動数を比較した結果，橋梁全体系 1 次～3 次の固有振動数は概ね一致する傾向が見られたが，床版部分系の固有振動数には乖離が見られた．これは，床版の剛性のみが設計計算時と比較して低下していることを示唆しており，床版はつり調査で確認された床版上面の土砂化が影響しているものと考えられる．

5)設計基準強度想定時の解析固有振動数は，Bernoulli-Euler ばりの非減衰自由振動の振動方程式から算定した両端ヒンジと両端固定の理論値との間にあることが確認され，はり曲げ理論による固有振動数では主桁の変形が床版部分系の固有振動数に及ぼす影響を考慮できないことが確認され，実橋 RC 床版の構造性能評価を行う上では FEM 解析が必要であることが示された．

6)床版部分系の解析固有振動数は床版の剛性低下に伴って顕著な低下傾向を示したが，橋梁全体系の固有振動数には大きな変化が認められなかった．このように，局所的な部材単位の剛性低下は高周波数領域の振動特性に着目することによって把握できることが明らかとなった．

7)本研究で対象とした橋梁の床版剛性は，設計計算時に対して約 40%まで低下していたことが確認された．なお，対象橋梁の材料試験結果から得られた静弾性係数は，設計基準強度から求まる静弾性係数以下となっていることが確認された．加えて，補修時の床版はつり調査結果では，床版上面の土砂化(損傷深さ 50mm 程度)が広範囲で確認され，この損傷に伴う有効高さの減少は約 50%の剛性低下に相当し，固有振動数に基づき算定した残存剛性率との整合性が確認された．

8)実測固有振動数から算定した床版の残存剛性率は，静弾性係数試験結果や損傷深さとの整合性が確認され，固有振動数を指標として，RC 床版の剛性低下を評価できる可能性が示唆された．

第 5 章では，厳しい塩害環境下の PC 箱桁道路橋を対象として，検測車両による静的および動的載荷試験，重錘による衝撃振動試験，小型加振器による強制加振試験を実施して，検査範囲の異なる種々の振動試験の整合性や試験方法の妥当性を実橋レベルで検証した．さらに，衝撃振動試験や強制加振試験で得られた局所的な剛性低

下を考慮した FEM 解析を実施し，全体剛性および部材剛性に着目した総合的な構造性能評価の適用性や損傷箇所の同定手法について数値解析的に検証を行い，本論文で提案する手法の汎用性を示した．本検討から得られた結論を以下に示す．

1)検測車両を用いた動的載荷試験および重錘を用いた衝撃振動試験により橋梁上部工の全体振動に関する固有振動数を把握でき，両者の試験結果に整合性が見られた．このことから，全体剛性評価手法としての衝撃振動試験の妥当性を客観的な根拠に基づいて確認できた．

2)衝撃振動試験および強制加振試験により格間単位の固有振動数および平均剛性分布が把握でき，両者の傾向に整合性が見られた．このことから，部材剛性評価手法としての衝撃振動試験の妥当性を客観的な根拠に基づいて確認できた．

3)床版格間の局所劣化を考慮した劣化モデルにおいて，たわみ挙動や橋梁全体系の解析固有振動数は実測値とより良好に整合したが，健全モデルと有意な差異は見られなかった．このことから，全体剛性の評価では，局所的に生じる劣化・損傷の検知が難しいことを，実橋の現場試験データにより示した．

4)床版格間毎の局所劣化を考慮した劣化モデルにおいて解析固有振動数は実測固有振動数と良好に整合しており，衝撃振動試験が部材剛性の評価指標として有用であることが示唆された．これに対して，剛性分布を均一とした健全モデルの解析固有振動数は実測値との乖離が見られた．このことは，部材剛性(格間)の評価において，健全モデルと劣化モデルに差異が表れることを示唆しており，格間単位の振動性状を適切に把握することが重要であることが示された．

5)コンクリート床版の構造性能評価方法として，高周波数領域に着目した衝撃振動試験および FEM 構造解析により，現行の設計手法で用いる部位・部材の剛性を定量的に示す点検・評価方法を提示した．

第 6 章では，本研究を総括した．

以上，本論文では，橋梁コンクリート床版の高周波数領域の振動特性を用いた構造性能評価手法について実橋試験により検証するとともに，現行の設計手法で用いる部位・部材の剛性を定量的に評価する方法を提案したものである．本研究結果として得られた構造性能評価手法は，力学的根拠に基づいて橋梁の損傷状態を把握するだけでなく，損傷橋梁の詳細点検やモニタリング等の重点箇所を抽出するとともに，補修・補強対策工法の選定や効果確認，使用性の照査等が可能となる．また，剛性分布は FEM 構造解析の入力値として使用できるため，材料劣化を考慮した構成則を整理することにより，将来的には安全性や耐久性の劣化予測手法にも応用が可能となるものと考えられる．今後，劣化部位の常時モニタリング等への適用が可能であると考えており，広く普及することを望むものである．