



既存コンクリート橋の安全性および寿命評価に関する基礎的研究

森川, 英典

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1994-09-21

(Date of Publication)

2008-11-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1876

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3105476>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001876>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	もり かわ ひで のり 森 川 英 典	（大阪府）
博士の専攻 分野の名称	博 士（工 学）	
学位記番号	博ろ第114号	
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当	
学位授与の日付	平成6年9月21日	
学位論文題目	既存コンクリート橋の安全性および寿命評価に関する基礎的研究	

審 査 委 員	主査 教授	高 田 至 郎		
		教授	北 村 泰 寿	教授 河 村 廣
		助教授	宮 本 文 穂	

論 文 内 容 の 要 旨

近年、既存コンクリート橋において、自動車交通量の増大、車両の大型化等や橋梁自身の老齢化、種々の材料劣化等の要因により、当初予測し得なかった損傷劣化が生じており、早急な維持管理対策が要求されている。これに対して、現状の維持管理手法は、主として目視検査に基づく橋梁管理技術者の判断に依存しており、豊富な経験を要するとともに、主観的あいまいさが混入するために、今後急増すると予想される劣化橋梁を合理的に維持管理していけるとは言い難い。

本論文は、既存コンクリート橋に対する耐用性診断の過程における種々の評価に関して、客観性を有し、高精度でかつ簡便な方法について検討を行うとともに、これらの方法を利用して、維持管理作業をシステム化することについて検討した結果を取りまとめたものである。本論文では、これらの内、現場試験に基づく安全性および寿命の評価方法に関する研究を第1編としてまとめ、エキスパートシステムによる耐用性診断手法および第1編における評価方法をも包含した維持管理のシステム化に対する考え方を第2編としてまとめている。

第一編第1章では、まず、国内外における既存コンクリート橋における損傷・劣化の現状について概観した後、この状況に対する維持管理の現状についてまとめ、その問題点と課題について示した。さらに、これらの課題に取り組んだ既往の研究について、損傷評価、安全性評価、寿命評価という項目別に概観し、それらにおけるさらなる問題点と課題について指摘した。

第一編第2章では、既存コンクリート橋の動的挙動の変化を利用した損傷評価法に着目し、減衰を含む振動特性の損傷パラメータに対する感度特性を評価する手法として、区分モード合成法を利用した複素固有値解析法、また振動特性から損傷パラメータを同定するSystem Identification（構造同定、S I）法について検討を行い、人工損傷を導入した実橋への適用を試みた。この結果、区分モード合成法による解析は、通常の固有値解析の約半分の解析規模（自由度）で十分な精度の解が得られることを確認した。またS I法による実橋における人工損傷同定については、支点の回転拘束を考慮に入れることによりほぼ妥当な評価が行えることを確認した。さらに、損傷と振動特性との感度特性を変化させる方法として、質量を付加することにより橋梁の構造系を変化させた状態での振動試験を

行うことを検討した結果、連続桁橋の場合、外桁の質量／剛性バランスを変化させることにより、振動モードの感度特性を改善することが可能であることを明かにした。

第一編の第3章では、実橋載荷試験および材料試験に基づく既存コンクリート橋の安全性評価に含まれる種々の不確定性を合理的に取り扱う手法の検討を行った。まず、断面力解析において主桁剛性のばらつきを考慮するため、確率構造系モデルの解析を逐次摂動法を利用した効率的に行う手法を検討した結果、確率変数の摂動幅の分割数を増加させると解が安定し、モンテカルロシミュレーションの結果とほぼ一致することを確認した。断面力評価における不確定性として、車重および主桁剛性のばらつきを考慮し、主桁耐荷力の評価における不確定性として材料強度、評価式の精度、舗装の影響等を考慮してHasofer & Lindの安全性指標 β の算定手法を検討し、実橋への適用のためのフローを作成した。また同形式の橋梁に対して本手法を適用した結果を統計的に処理することにより安全性の経年変化の定性的な傾向が評価できることを示した。

第一編の第4章では、まず、損傷評価のためのモーダルパラメータとして固有振動数、振動モードの他に減衰定数、位相差を考慮し、損傷パラメータとして、主桁の曲げ剛性の他に減衰定数を上げて同定するS I法の検討を行い、解析の妥当性を確認した。次に、非比例減衰を考慮した動的感度解析を行った結果、曲げ1次とねじれ1次の減衰定数を用いることにより、損傷の位置と程度を、曲げ1次の位相差を用いることにより、損傷位置を推定することが可能であることを確認した。また、各モーダルパラメータの感度特性の相違を利用することにより、損傷位置の簡易推定フローを作成し、S I法を適用する前に、解析作業を伴わず損傷の概略判定が行えることを示した。また、動的載荷試験によって得られるモーダルパラメータの他に静的載荷試験によって得られるたわみ分布や非破壊検査、材料試験によって得られる各主桁毎のコンクリート材料特性の結果を合わせてS I法における損傷パラメータの初期値の推定を行うことにより、S I法における収束性、精度の向上を図れることを明らかにした。さらに、静的載荷試験、材料試験を用いたS I法における同定変数の初期値推定とS I法とを合わせた多段階的な損傷評価フローを作成した。

第一編第5章では、蓄積された安全性評価データに対して、影響因子としてコンクリートの中酸化速度を考慮した統計解析を行うことにより、簡易な材料試験と最適な時期に行う載荷試験に基づいて安全性の経年変化を推定する手法を検討した。ここで、中性化のメカニズムが現状において解明されていないため、コンクリートの材料劣化が伴わない場合と伴う場合の両方を考慮し、コンクリートの中酸化深さの測定のみで、安全性経年変化の上下限予測を行うことを可能とした。次に、安全性の経年変化の予測に対して、維持管理上の安全性限界値を設定するため、数橋の実橋について橋梁管理技術者に対して行ったアンケート調査によって得られた耐用性および余寿命との相関を利用し、回帰による評価式を作成した。これにより、現行の維持管理基準に対応した余寿命評価を行うことを可能とした。また中性化測定により作成された安全性の経年変化予測式の精度を高めるために、ある適切な時期に検証のための載荷試験を行い、予測式を更新することを考え、検証試験の実施時期を決定する手法を検討した。これにより、基本的に、対象橋梁に対して載荷試験を1回だけ行うことによる維持管理を可能とした。

第二編第1章では、まずエキスパートシステムに関する研究のこれまでの経緯と代表的なシステムの開発例をまとめた後、エキスパートシステムの実用化における問題点を取り上げ、本論文で取り組む主題について示した。次に、橋梁の維持管理のシステム化の現状について示し、今後の方向性について言及した。

第二編第2章では、まず、現在行われている目視検査結果に基づく橋梁技術者の判断による耐用性

診断の過程に内在する主観的なあいまいさを取り扱うため、ファジィ理論を適用し、ベグネス関数を用いて帰属度関数に内在するあいまいさを定量的にモデル化するとともに、Dempster & Shafer理論による基本確率に基づくDempsterの結合則を用いて、ベグネス関数を考慮した帰属度関数の結合を行う手法を検討した。これにより、診断の過程におけるあいまいさの取扱いを明確化することを可能とした。また、橋梁の状態と余寿命に関するアンケート調査結果にファジィ関係を適用し、主観的なあいまいさを考慮した余寿命予測を行う手法を検討した。さらに、橋梁管理技術者による診断プロセスを、階層構造モデル化するとともに、診断に関係する専門知識をアンケート調査により抽出してファジィルール化し、プロダクションシステムの方法によるエキスパートシステムを構築した。最後に、本システムを4橋の実橋に適用し、その診断結果を、別途実施した耐用性に関する橋梁技術者へのアンケート調査による診断結果と比較して妥当性を検証した。

第二編の第3章では、エキスパートシステムの実用化に際してボトルネックとなる知識の更新問題に対処するため、前章で構築したシステムにおいて、ニューラルネットワークと双方向連想記憶を組み合わせた推論システムを構築し、実橋試験時に実施した専門技術者に対するアンケート調査結果を教師データとして利用することにより、知識更新機能を付与することを試みるとともに、本システムにおける知識更新機能の有効性を検証した。ここで、ニューラルネットワークを適用する際に最も問題となる診断のブラックボックス化を最小限に抑えるため、各sub goalのルール毎に分割したネットワークを構築するとともに、連想記憶を組み合わせることにより、ファジィ推論への対応づけを行い、診断過程、根拠の明確化を図った。また、最後に第2編に示したエキスパートシステムによる手法と第1編に示した現場試験による安全性評価法を利用した、コンクリート橋の耐用性診断のシステム化の方向性とそれに基づく維持管理の流れについて示した。

以上のように、本研究では、橋梁の維持・管理の核となる損傷および安全性評価に基づく耐用性診断、余寿命評価をできる限り客観的、正確にしかも簡易に行う手法について検討するとともに、ファジィ理論を用いて主観的なあいまいさを合理的に取り扱い、エキスパートシステムの手法を利用することにより、専門家の有する知識、判断基準をコンピュータ上に移植して、橋梁の耐用性の概略診断システムを構築する検討を行った。さらに、これら両手法を組み合わせることにより、維持管理全体のシステム化へと結びつけることが可能であるとの考えを示した。

論文審査の結果の要旨

本論文は、既存コンクリート橋に対する耐用性診断の過程における種々の評価法に関して、客観性を有し、高精度でかつ簡便な方法について検討を行うとともに、これらの方法を利用して、維持管理作業をシステム化することについて検討した結果を取りまとめたものである。本論文では、これらの内、現場試験に基づく安全性および寿命の評価方法に関する研究を第1編としてまとめ、エキスパートシステムによる耐用性診断手法および第1編における評価方法をも包含した維持管理のシステム化に対する考え方を第2編としてまとめている。

第一編第1章では、まず、国内外における既存コンクリート橋における損傷・劣化の現状について概観した後、この状況に対する維持管理の現状についてまとめ、その問題点と課題について示した。

第一編第2章では、既存コンクリート橋の動的挙動の変化を利用した損傷評価法に着目し、減衰を含む振動特性の損傷パラメータに対する感度特性を評価する手法として、区分モード合成法を利用した複素固有値解析法、また振動特性から損傷パラメータを同定するSystem Identification（構造同

定, S I) 法について検討を行い, 人工損傷を導入した実橋に対してほぼ妥当な損傷評価が行えることを確認した。さらに, 損傷と振動特性との感度特性を変化させる方法として, 質量を付加することにより橋梁の構造系を変化させた状態での振動試験を行うことを検討した結果, 連続桁橋の場合, 外桁の質量/剛性バランスを変化させることにより, 振動モードの感度特性を改善することが可能であることを明かにした。

第一編の第3章では, 実橋載荷試験および材料試験に基づく既存コンクリート橋の安全性評価に含まれる種々の不確定性を合理的に取り扱う手法の検討を行った。まず, 断面力解析において主桁剛性のばらつきを考慮するため, 確率構造系モデルの解析を逐次摂動法を利用した効率的に行う手法を検討した結果, 確率変数の摂動幅の分割数を増加させると解が安定し, モンテカルロシミュレーションの結果とほぼ一致することを確認した。断面力評価における不確定性として, 車重および主桁剛性のばらつきを考慮し, 主桁耐荷力の評価における不確定性として材料強度, 評価式の精度, 舗装の影響等を考慮してHasofer & Lindの安全性指標 β の算定手法を検討し, 実橋への適用のためのフローを作成した。また同形式の橋梁に対して本手法を適用した結果を統計的に処理することにより安全性の経年変化の定性的な傾向が評価できることを示した。

第一編第4章では, まず, 損傷評価のためのモーダルパラメータとして固有振動数, 振動モードの他に減衰定数, 位相差を考慮し, 損傷パラメータとして, 主桁の曲げ剛性の他に減衰定数を取り上げて同定するS I法の検討を行い, 解析の妥当性を確認した。次に, 非比例減衰を考慮した動的感度解析を行った結果, 曲げ1次とねじれ1次の減衰定数を用いることにより, 損傷の位置と程度を, 曲げ1次の位相差を用いることにより, 損傷位置を推定することが可能であることを確認した。さらに, 静的載荷試験や材料試験によって得られる結果に基づいて損傷パラメータの初期値の推定を行うことにより, S I法における収束性, 精度の向上を図れることを明らかにした。

第一編第5章では, 蓄積された安全性評価データに対して, 影響因子としてコンクリートの中酸化速度を考慮した統計解析を行うことにより, 簡易な材料試験と最適な時期に行う載荷試験に基づいて安全性の経年変化を推定する手法を検討した。次に, 安全性の経年変化の予測に対して, 維持管理上の安全性限界値を設定するため, 数橋の実橋について橋梁管理技術者に対して行ったアンケート調査によって得られた耐用性および余寿命との相関を利用し, 回帰による評価式を作成した。これにより, 現行の維持管理基準に対応した余寿命評価を行うことを可能とした。また中酸化測定により作成された安全性の経年変化予測式の精度を高めるために, ある適切な時期に検証のための載荷試験を行い, 予測式を更新することを考え, 検証試験の実施時期を決定する手法を検討した。これにより, 基本的に, 対象橋梁に対して載荷試験を1回だけ行うことによる維持管理を可能とした。

第二編第1章では, まず, エキスパートシステムに関する研究のこれまでの経緯と代表的なシステムの開発例をまとめた後, エキスパートシステムの実用化における問題点を取り上げ, 本論文で取り組む主題について示した。次に, 橋梁の維持管理のシステム化の現状について示し, 今後の方向性について言及した。

第二編第2章では, まず, 現在行われている目視検査結果に基づく橋梁技術者の判断による耐用性診断の過程に内在する主観的なあいまいさを取り扱うため, ファジィ理論を適用し, ベーグネス関数を用いて帰属度関数に内在するあいまいさを定量的にモデル化することによって, 診断の過程におけるあいまいさの取扱いを明確化することを可能とした。また, 橋梁の状態と余寿命に関するアンケート調査結果にファジィ関係を適用し, 主観的なあいまいさを考慮した余寿命予測を行う手法を検討した。さらに, 橋梁管理技術者による診断プロセスを, 階層構造モデル化するとともに, 診断に係る専

専門知識をアンケート調査により抽出してファジィルール化し、プロダクションシステムの方法によるエキスパートシステムを構築した。最後に、本システムを4橋の実橋に適用し、その診断結果を別途実施した耐用性に関する橋梁技術者へのアンケート調査による診断結果と比較して妥当な結果が得られた。

第二編の第3章では、エキスパートシステムの実用化に際して知識の更新問題に対処するため、前章で構築したシステムにおいて、ニューラルネットワークと双方向連想記憶を組み合わせた推論システムを構築した。実橋試験時に実施した専門技術者に対するアンケート調査結果を教師データとして利用することにより、知識更新機能を付与することを試みるとともに、本システムにおける知識更新機能の有効性を検証した。また、最後に第2編に示したエキスパートシステムによる手法と第1編に示した現場試験による安全性評価法を利用した、コンクリート橋の耐用性診断のシステム化の方向性とそれに基づく維持管理の流れを示した。

以上のように、本研究では、橋梁の維持・管理の核となる損傷および安全性評価に基づく耐用性診断、余寿命評価をできる限り客観的、正確にしかも簡易に行う手法について検討するとともに、ファジィ理論を用いて主観的なあいまいさを合理的に取り扱い、エキスパートシステムの手法を利用することにより、橋梁の耐用性の概略診断システムを構築する検討を行ったものである。本論文は今後の既存コンクリート橋の維持・管理に関する評価手法に重要な基礎的知見を提供するものである。よって、学位申請者、森川英典氏は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。