

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	スマートモニタリングシステムとインテリジェントブリッジの実現に向けた基礎研究
氏 名	本 下 稔

我が国の橋梁は高度経済成長期以降に短期間かつ急速に整備され、近い将来、劣化に伴う維持管理や更新が集中的に発生ならびに増加することが懸念される。従来から、橋梁の振動特性を活用した損傷同定や性能評価のためのモニタリングなどが実施されてきたが、特定の橋梁を対象にした現地でのモニタリングの域に留まっている。厳しい財政制約と専門技術者不足の環境の中で、歴大な橋梁の性能評価や維持管理の戦略的な手法としてモニタリング技術の活用は重要であり、効率的かつ効果的なモニタリングシステムの開発は喫緊の課題である。従来的人力によるモニタリングに代わり、無人化と自動化による省力化を意図したモニタリングシステムやインターネットを活用したリアルタイムのモニタリングシステムの開発、ならびに、多数の橋梁関係者が時間や場所に制約されることなく必要なデータを閲覧や入手ができるとともに、遠隔地から計測指示ができる双方向のモニタリングシステムの開発が期待されている。また、従来の受動的な対症療法的維持管理から戦略的な予防保全型維持管理への方向転換が要請される状況になり、橋梁の生産体系と維持管理を総合的に捉えた生産管理体系を構想することが重要になってきたと言える。モニタリングにより予期していなかった橋梁の性能が明確になり、橋梁の新設や更新のみならず既設橋梁の性能向上においても合理的な管理が可能になる。

我が国では、橋梁設計の技術基準に基づき、通常交通では極めて稀にしか走行しない大型車両を対象にした画一的な荷重で設計されており、不経済な設計になっている可能性が想定される。近年、設計段階では通常に走行する活荷重を設計活荷重として設計しておき、橋梁に危険を及ぼす可能性がある大型活荷重が載荷された時に橋梁を安全な状態に制御することを想定したインテリジェントブリッジの開発が期待されている。未だ例を見ないインテリジェントブリッジが実現すれば、画一的な大型活荷重で設計された橋梁に比較して建設時の材料や建設費の削減および省資源への貢献、ならびに、インテリジェントブリッジの感知機能や判断機能の活用により供用期間中の点検回数の縮減および合理的な構造的自己診断による維持管理費や補修費の削減が図れ、将来的にはライフサイクルコストの軽減が期待できる。

本研究では、これらの要求や期待に対応するために、斜張橋模型を対象にしたモニタリングシステムおよびモニタリングシステムを活用したインテリジェントブリッジを開発し、模型実験によりシステムの動作と精度を検証した。本論文は、開発の背景と過程および模型実験によるシステムの実現性と有用性を論じるものである。

最初に、斜張橋模型を対象にして、主として現場に設置される計測サーバ上で動作して計測や計測結果の図表化と保存などを担うスタンドアロンモニタリングシステム、複数の関係者が遠隔地からリアルタイムでデータ収集や閲覧ができるネットワークを活用したインターネットモニタリングシステム、および、両システムを統合した遠隔地から計測指令ができる遠隔操作モニタリングシステムを開発し、斜張橋模型の挙動をモニタリングしてシステムの動作機能と計測精度の実用性を検証した。また、本システムでは、セキュリティとしてSSL (Secure Socket Layer) によるクライアント認証と通信の暗号化およびパスワード認証の多重化により、外部からの攻撃を防止するシステムを構築した。

次に、斜張橋模型をモデルにして、感知機能・判断機能・制御機能を備えたインテリジェントブリッジを開発した。本研究では、大型活荷重の載荷に対して大型活荷重による主桁変位を斜材ケーブルの緊張により設計活荷重による変位まで制御するシステムを採用し、制御の緊張力は本研究で開発した制御力算出システムで算出した。模型に種々の荷重を載荷した実験を行い、各機能の動作と制御力算出システムの精度を検証した。

続いて、モニタリングシステムによる模型の挙動計測、制御力算出システムによる制御の要否判断と制御力の算出、制御装置への制御命令、および制御装置による制御に至る一連の制御実験を行い、インテリジェントブリッジの動作性能と実橋梁への適用の可能性を検証した。制御実験では、主桁の荷重による変位と制御力による変位の復元量に関して、解析値と計測値の比較および解析復元量に対する計測復元量の比（復元率）を要因に制御精度と制御効果を確認した。

模型実験における各機能の自動的な動作、制御力算出システムの十分信頼できる精度、制御実験における計測値と解析値の良好な近似、概ね80%を示す復元率などにより、本研究で開発したシステムは全ての模型実験の範囲で十分に実用的であった。

最後に、研究を通じて習得した知見から、モニタリングシステムの高度化に関する提案とインテリジェントブリッジの可能性と課題を整理した。

## 【論文審査結果の要旨】

橋梁の現行設計基準では、全ての橋梁に対して通常交通では極めて稀にしか走行しない大型車両の荷重で設計されており、不経済な設計になっている可能性が想定される。橋梁の設計段階では通常に走行する活荷重を設計活荷重として設計しておき、橋梁に危険を及ぼす可能性がある大型活荷重が載荷された時に橋梁を安全な状態に制御することを想定した、パラストレッチングの概念に立脚したインテリジェントブリッジの開発が期待されている。本研究は、コンピュータと最新情報処理技術を用いて、社会基盤構造物の健康状態を自ら感知（センサー機能）・診断（判断機能）し、常に安全な状態を保つように制御力を作用させる（外からの力に抵抗する制御機能）という、ロボットのように知能を持たせて（インテリジェント化）、自己健康診断・長寿命化を目指す夢のある技術の発想である。本論文は、このような発想を実現するために、斜張橋模型を対象にしたモニタリングシステムおよび斜張橋模型にパラストレッチング技術を適用したインテリジェントブリッジを開発し、模型実験によりシステムの動作と精度を検証したものである。また、本研究を通じて習得した種々の知見から、モニタリングシステムの高度化とインテリジェントブリッジの課題をまとめ、将来の実現性と有用性を目指して得られたその成果とともにとりまとめたものである。

このように、本論文で提案されたインテリジェントブリッジの概念は、残された課題を順次克服していくことによって次世代の革新的技術に発展させることが十分期待できると考える。

本論文の構成と内容は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景と意義を整理し、本研究の対象範囲および研究の目的などを明らかにしている。

第2章では、斜張橋模型を対象にして、現場に設置される計測サーバ上で動作して計測や計測結果の図表化と保存などを担うスタンドアロンモニタリングシステム、複数の関係者が遠隔地からリアルタイムでデータ収集や閲覧ができるネットワークを活用したインターネットモニタリングシステム、両システムを統合した遠隔地から計測指令ができる遠隔操作モニタリングシステムを開発し、モニタリング検証実験によりシステムの動作機能と計測精度の信頼性を確認した。また、セキュリティとして、公開鍵暗号方式によるパスワード認証および機密深度によるパスワード認証の多重化を採用した。

第3章では、斜張橋模型をモデルにして、感知機能・判断機能・制御機能を備えたインテリジェン



トブリッジを開発した。大型活荷重の载荷に対して大型活荷重の主桁変位を斜材ケーブルの緊張により設計活荷重の変位まで制御するシステムを採用し、制御力は本研究で開発した制御力算出システムで算出した。模型に種々の荷重を载荷した検証実験を行い、各機能の計画通りの動作および制御力算出システムの精度の信頼性を確認した。

第4章では、モニタリングシステムを利用した模型の挙動計測、制御力算出システムによる制御の要否判断と制御力の算出、制御装置への制御命令、ならびに制御装置による制御に至る一連の制御実験を行い、インテリジェントブリッジの感知機能と判断命令機能および自動制御機能の動作性能ならびに実橋梁への適用の可能性を検証した。制御実験では、主桁の荷重による変位と制御力による変位の復元量に関して、解析値と計測値の比較および解析の復元量に対する計測の復元量の比（復元率）を要因に検証し、各機能の自動的な動作および信頼性の高い精度を確認した。

第5章では、研究を通じて習得した研究成果と知見を踏まえ、開発したシステムに対する改善の取り組み、課題の克服策として、①モニタリングシステムの環境改良、②インテリジェントブリッジの課題の考察、③モニタリングシステムの高度化に関する提案、などを整理した。

最後に、第6章の結言では本論文を総括し、その成果と今後の研究課題について述べている。

公聴会には、学内外より合計32名の参加があり、活発な質疑がなされた。公聴会での主な質問内容は、①インテリジェントブリッジを新設の橋梁に適用する特長は理解できたが、既設橋への適用は可能か？可能ならば、想定範囲でも構わないから具体例を聞かせて頂きたい、②本研究で提案されたシステムを、供用中の橋梁、特に中小橋梁に適用するための現実的な課題とその解決策を紹介してほしい、③宇宙開発や航空機などではインテリジェントな構造が考えられる。社会基盤構造物の分野で活用するというオリジナルな発想の原点は何か、④本提案システムの新規橋梁および既設橋梁への適用の見通しを示してほしい、⑤国土交通省では、大型車両の違反車が多いために現行基準で規定されている大型車両の軸重10トンを大きくしようとしている。軸重の増大に対してインテリジェントブリッジの考え方を有効に適用できると考えられるが、これに対する意見を聞かせて欲しい、などであった。いずれの質問に対しても、発表者からの確かな回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性および完成度ともに非常に優れており、博士（工学）の学位論文に十分値するものと判断した。