

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

Feasibility Study on Realization of the Intelligent Bridge
Integrated with a Smart Monitoring System

平成 27 年 3 月

本 下 稔
MOTOSHITA Minoru

山口大学大学院理工学研究科

学位論文の要旨

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、厩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。従来の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。

Abstract

Most bridges in Japan were constructed in a short span of time after the period of high economic growth in the 1960s. There are concerns that owing to deterioration, these bridges will require operation, maintenance, and upgrading simultaneously or the demands for these tasks will increase dramatically in the near future. Although damage identification by considering the vibration properties of bridges and monitoring for performance evaluation have been performed conventionally, the extent of such activities is limited to the field monitoring of specific bridges. Application of monitoring technology as a strategic means for performance evaluation and operation and maintenance of a large number of bridges is important, and the development of an efficient and effective monitoring system is an urgent issue in a challenging environment with severe financial constraints and few available specialists. Instead of conventional, manual monitoring, an automated monitoring system intended to save labor, an Internet-based real-time monitoring system, and a two-way monitoring system that allows many bridge administrators to view and obtain necessary data and remotely send instructions to take measurements without being restricted by time or place are desirable. The anticipated situation also calls for a transition of strategy from the conventional passive symptomatic treatment style of maintenance and management to a strategic preventive maintenance style. Planning a comprehensive production management system encompassing the production system and the maintenance and management of bridges has become important. Monitoring can reveal unexpected bridge performance and enable rational management from the perspective of performance upgrade of not only new and updated bridges but also existing bridges.

According to the bridge design code, Japanese bridges are designed for standard loads of heavy vehicles rarely seen in ordinary traffic, and therefore, it is possible that they are uneconomically designed. In recent years, there has been a demand for the development of an intelligent bridge that is designed with the live load of ordinary traffic but can be controlled to maintain a safe state when stressed with a potentially dangerous large live load. Unlike a bridge designed under the standard large live load, the yet-to-be-realized intelligent bridge, has the potential to reduce the initial material and construction costs, thus contributing to resource savings; the number of inspections necessary during its service life with its sensing and decision-making functions; the maintenance and repair costs through rational structural self-diagnosis; and the future potential life cycle costs.

To respond these demands and expectations, in this study, a monitoring system and an intelligent bridge using this monitoring system were developed for a cable-stayed bridge model, and the system operation and accuracy were verified via model experiments. In this paper, the

background and process of development and the feasibility and benefits of the system are discussed using the example of the model experiment.

In the first phase, three systems were built: a stand-alone monitoring system, which is primarily installed in the field and which measures and displays measurement results saved in the form of charts; a web-based Internet monitoring system, which allows multiple authorized personnel at remote locations to collect and view data on a real-time basis; and a remote monitoring system that integrates both of these systems and that remotely sends instruction to measure. The operation functionality of the systems and practicality of the measurement accuracy were verified by monitoring the behavior of the cable-stayed bridge model. Furthermore, a security measure was built in to protect the system from external attacks like external security risks and breaches; this security measure comprised client authentication and encryption of communication using SSL (Secure Socket Layer) and multi-level authentication of passwords.

In the next phase, using a cable-stayed bridge model, an intelligent bridge equipped with sensing, decision-making, and control functions was developed. This study adopted a system that changes the main girder displacement caused by the application of a large live load to the displacement caused by the design live load by tensing the stay cables. The counteracting tension was calculated by the counterforce calculation system developed in this study. An experiment was conducted to test the model with various kinds of loads, and the operation of different functions and the accuracy of the counterforce calculation system were verified.

Subsequently, a series of control experiments were carried out to verify the performance of the intelligent bridge and the feasibility of its application to actual bridges: (1) measuring by using the monitoring system to understand the behavior like main girder displacement and tensile force of stay cables of the model; (2) determining the necessity for controlling and calculating the counterforce using the counterforce calculation system; (3) sending instructions to the control device; and (4) controlling by using the control device. The control experiments confirmed the control accuracy and effectiveness based on a comparison of calculated and measured values and based on the ratio of the measured restoration amount for the calculated (rate of restoration) regarding to the displacement of the main girder due to the load and the restoration amount attributed to the counterforce.

The automatic operation of the respective functions in the model experiment, the sufficiently reliable accuracy of the counterforce calculation system, the good approximation of the measured values in the control experiments and calculated values, and the approximately 80% rate of restoration all indicate that the developed system has sufficient practicality.

Finally, based on the findings of this study, suggestions for enhancing the monitoring system and the possibilities and challenges in developing an intelligent bridge are summarized at the end of the paper.

目次

第1章 緒論	1
1.1 本研究の背景と動向	1
1.1.1 橋梁のモニタリング	1
1.1.2 インテリジェントブリッジ	3
1.1.3 本研究の周辺環境	5
1.2 本研究の目的と概要	6
1.2.1 モニタリングシステムの開発	6
1.2.2 インテリジェントブリッジの開発	8
1.3 本論文の構成と概要	11
参考文献	13
第2章 モニタリングシステムの開発	15
2.1 はじめに	15
2.2 モニタリングシステムの開発	16
2.2.1 モニタリングシステムの概要	16
2.2.2 スタンドアロンモニタリングシステムの開発	17
2.2.3 インターネットモニタリングシステムの開発	21
2.2.4 遠隔操作モニタリングシステムの開発	26
2.3 セキュリティシステムの開発	28
2.3.1 認証機能の現状	28
2.3.2 SSLによるクライアントの認証	29
2.3.3 認証の多重化	33
2.4 モニタリングシステムの検証	34
2.4.1 斜張橋模型の諸元とセンサの概要	34
2.4.2 実験手順とシステム画面	36
2.5 結論	38
参考文献	40

第3章 インテリジェントブリッジの開発	42
3.1 はじめに	42
3.2 インテリジェントブリッジの概要	43
3.2.1 インテリジェントブリッジの概念	43
3.2.2 制御システムの概要	43
3.3 制御システムの開発	46
3.3.1 制御力算出システムの開発	46
3.3.2 制御システムの開発	48
3.4 制御システムの検証	51
3.4.1 解析精度の検証	51
3.4.2 システムの妥当性検証	53
3.5 結論	54
参考文献	56
第4章 斜張橋模型を用いた インテリジェントブリッジの制御実験	58
4.1 はじめに	58
4.2 斜張橋模型と制御システムの概要と計画	59
4.2.1 斜張橋模型の概要	59
4.2.2 制御実験の概要	59
4.2.3 制御実験の計画	61
4.3 制御実験の結果と考察	63
4.3.1 制御実験の結果	63
4.3.2 実験結果の考察	67
4.4 結論	67
参考文献	69
第5章 システムの高度化に関する提案	70
5.1 はじめに	70
5.2 モニタリングシステムの環境改良	71
5.2.1 モニタリングシステムの環境改良の背景	71
5.2.2 システムの環境改良の位置付け	72
5.2.3 小型工業用制御収録装置の活用	75
5.2.4 Compact-RIO を用いた遠隔モニタリングシステム	77
5.2.5 システムの検証	78
5.3 インテリジェントブリッジの課題と提案	80
5.3.1 制御装置 (アクチュエータ)	80

5.3.2 インテリジェントブリッジの実現の環境	80
5.4 モニタリングシステムの高度化	82
5.4.1 モニタリングシステムの高度化の背景	82
5.4.2 モニタリングシステムの費用低減	82
5.4.3 モニタリングシステムに関する提案	84
5.5 まとめ	86
参考文献	90
第6章 結論	93
謝辞	104

第1章 緒論

1.1 本研究の背景と動向

1.1.1 橋梁のモニタリング

国民の豊かな暮らしや経済を支えてきた我が国の社会基盤は、その多くは1960年代後半に始まった高度成長期以降に継続的に増加の一途を辿り、短期かつ急速に整備された施設が多数を占め、近い将来、その劣化に伴い維持管理ならびに更新の需要が集中的に発生すること、あるいは、大幅に増加することが懸念される。また、近年の頻繁に発生する大地震や津波、洪水による斜面崩壊や水害、大型台風による被害などに象徴されるように自然現象は年々過酷化し、公共土木施設への負荷の増大は顕著になっている。一方、我が国では少子高齢化や経済の低成長時代に直面し、社会基盤整備に対する財政的な制約は極めて厳しい状況にある。このような状況の下、安心して暮らせる安全な社会生活を保証するためには、未だ十分でない社会基盤の整備が必要であることは当然であるが、現存する社会基盤の長寿命化ならびに効果的な運用と維持管理は喫緊の課題になっている。

近年の通行車両の大型化ならびに交通量の増大が損傷の原因と考えられる既存橋梁の性能不足と性能低下は、経年劣化による性能低下と相乗して著しい橋梁の性能低下を招いている。長年に渡り過酷な環境の中で過剰なサービスを提供してきた橋梁の老朽化ならびに性能低下は、橋梁の調査・点検の必要性を増大させ、橋梁管理者に大きな負担を強めている。限られた財源の中で更新ならびに補修・補強費や維持管理費の最小化、長寿命化、ライフサイクルコストの低減を図り、橋梁のサービス水準を維持するためには、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に大きく舵を切る段階を迎えている。その対処方法として早期調査・早期対処が求められ、橋梁状態の適切な把握や評価と診断および将来劣化の的確な予測が要求されている。橋梁を管理するための調査・点検や診断技術を備えた技術者も不足しており¹⁾、頻繁に調査・点検

や診断をするのが困難な現状の中で、このような要求に対応できる精緻かつ効率的な調査・点検技術が期待されている。

近年、橋梁の健全度評価ならびに診断のために橋梁の経常的なひずみ、変位、振動等のモニタリング結果を利用することが多くなっている。そこでは、単に橋梁の変状計測に留まることなく、その計測結果を効率よく収録、加工、活用して、橋梁の合理的な管理に関する有用な知見を得ることを目指すモニタリングでなければならないことは当然である。

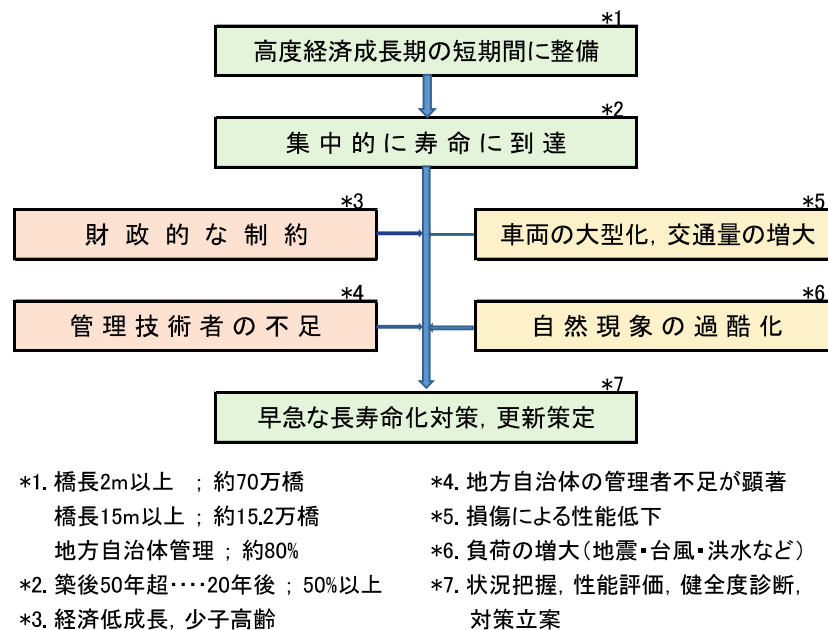


図 1-1 橋梁の置かれている環境

モニタリングも含めて橋梁の維持管理においては、各橋梁に適合した計画的な調査ならびに調査結果に基づく合理的な性能評価や補修・補強の立案は不可欠である。橋梁の維持管理に精通した技術者の不足や厳しい財政的な制約の中で、短期間に急速に整備された多数の橋梁に対して集中的に調査や診断ならびに処置をすることが求められている^{2),3)}。この様な環境に対応するためには、従来の専門技術者による調査点検も必要であるが、従来の調査点検では迅速な調査や診断および性能回復には制約がある。また、モニタリングにおいても従来の人力によるモニタリングに代わり、モニタリングの無人化や自動化などの省力化、計測結果の効率的な収録および加工、合理的かつ迅速な診断ならびに性能評価を始め、インターネットを活用して異なる場所から、必要な時間に計測結果の閲覧ができだけでなく、リアルタイムの計測を可能にするために遠隔地から計測指示の発信もできる双方向（閲覧と指示）のモニタリングシステムの構築が求めら

れている⁴⁾⁶⁾。

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、社会基盤、取り分け橋梁の生産工程と維持管理を総合的に捉えた生産管理体系を考えることが重要になってきたと言える。新設橋梁の設計・建設工程にモニタリング工程を追加することにより設計段階では想定できなかった新しい性能が明確になり、新設や更新の橋梁においてもモニタリングに伴って新たに想定される性能評価を通じて合理的な維持管理を可能にする⁷⁾。図1-2に橋梁の建設工程とモニタリングによる性能照査を示す。

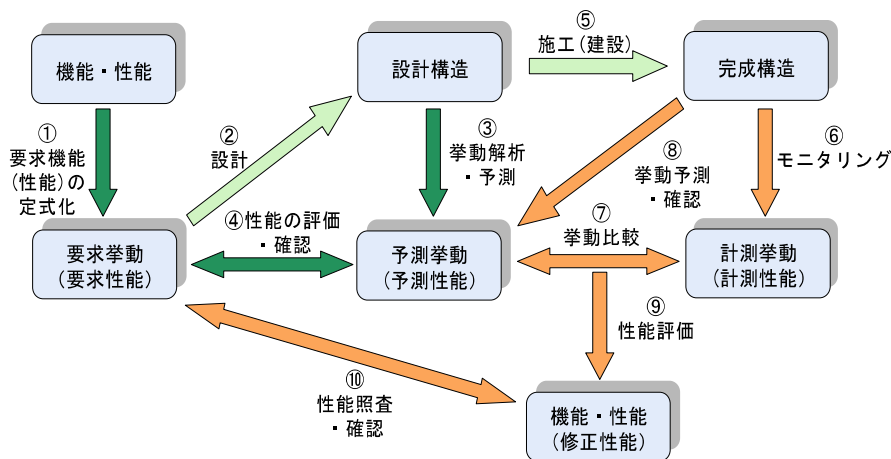


図1-2 橋梁の建設工程とモニタリングによる性能照査

現行の橋梁の一般的な建設工程は①～⑤であり、建設までの一連の工程は一方通行である。今これらの工程に工程⑥のモニタリングを追加することにより、例えば、想定と異なる地盤による過度な橋梁の振動、重車両の通行車線の偏り、想定を超える過剰積載車両の通行などの計測挙動(計測性能)が明確になり、⑦～⑩の工程を追加することができる。その結果、設計や施工時のみならず供用中においても種々の性能が双方向での照査が可能になり、モニタリングシステムの生産体系への導入は、設計時における解析モデルの改良や要求性能の再確認および維持管理事業における長期性能照査に利用が可能になる。

1.1.2 インテリジェントブリッジ

近年、橋梁分野でも橋梁の状態を感知し、判断し、応答する機能を有する構造物、いわゆるインテリジェントブリッジと呼ばれる橋梁の知的化の実現が期待されている

8)-10). インテリジェントブリッジを含むスマート構造物分野の研究は、インテリジェント材料とともに、古くは1980年代中頃から宇宙科学分野で提案され、1990年代においては航空、建設、自動車、および船舶などの産業分野に拡大した。しかし、その後はインテリジェント材料に関する研究が主になり、建設分野では高層建築物の耐震を目的にした制振・免震に関する研究やパンタグラフの原理（MMF 概念）に基づくモバイルブリッジに関する研究など物体の反発または復元の原理を利用した研究は見当たるが、その研究数は極めて少ない^{11),12)}。

海外においては、例えばアメリカでは、1989年頃から宇宙や航空機分野の研究者を中心にした「スマートストラクチャー」の概念が構築され、産業プラント、原子力プラント、土木建築構造物、自動車、船舶などへの応用が図られるようになった。土木建築の分野においては、冷戦時代に蓄積された科学技術の開発成果の平和利用を目的とする社会基盤施設の維持管理分野へ応用するための技術開発が活発になった。しかし、その方向は光ファイバーセンサー、光通信技術、遠隔ネットワーク技術、インテリジェント材料の応用など構造物のヘルスマonitoringの方向に向かい、センサ機能、プロセッサ機能、アクチュエータ機能を総合した構造物の知的化の方向に向かうことはなかった。この動向は我が国においても同様であり、知的機能は細分化され、センサ機能ではインテリジェント材料の創製や光ファイバーなどの応用技術に関する研究、プロセッサ機能では複合材料を含めた新材料の開発研究、さらにアクチュエータ機能では受動的・準能動的・能動的・混合的など各制御に関する技術開発や自己修復機能を持つ材料に関する研究は盛んであるが、全機能を統合したインテリジェントブリッジやインテリジェントストラクチャーの開発研究は殆ど報告されていない¹³⁾。海外・国内を問わず土木建築構造物のインテリジェント化においては、遠隔通信技術を活用した遠隔モニタリングシステムの開発、および、インテリジェント材料の開発・インテリジェント材料を活用したスマートセンサの開発・スマートセンサネットワークなどを活用したヘルスマonitoringの開発の方向に向かっており、宇宙開発や航空機以外の分野での全機能を備えたインテリジェントストラクチャーの開発は極めて低調である。

インテリジェントブリッジは、狭義的には、センサ機能（検知あるいは感知機能）、プロセッサ機能（判断と命令機能）およびアクチュエータ機能（制御機能）の全てを備え、予期せぬ環境変化や外乱に対しても、構造物自身がこれ等の全機能を発揮すること

によって、橋梁の安全性と計画された性能を維持できる橋梁を指すことが多い⁹⁾。橋梁の知能化が実現すれば、橋梁の各部材に設置されたセンサ機能で部材の変形や変位などの変状ならびに振動の状況や損傷の程度など橋梁の状態を監視し、プロセッサ機能で各部材の危険性や安全性を自己診断して、アクチュエータ機能を備えた制御装置によって構造的な不安定状態を常に正常な状態に制御でき、安全性と信頼性の高い橋梁を建設することができる。

我が国の橋梁設計に関する現行の技術基準¹³⁾では、多くの橋梁においてその橋梁の供用期間中に殆ど走行することがない大型車両を対象にした画一的な設計荷重に基づいて設計することが規定されている。設計時には通常に走行する車両を想定した低い設計活荷重で設計しておき、橋梁に危険を及ぼす可能性がある大型車両が載荷された場合に橋梁を危険な状態から回避できる制御ができれば、設計活荷重強度を超える大型車両の走行に対しても橋梁の安全性と信頼性が確保できる。未だ例のない、このようなシステムを備えたインテリジェントブリッジが実現すれば、設計荷重を低減させることにより画一的な条件で設計された橋梁に比較して建設時の材料の削減および初期建設費の低減、ならびに省資源への貢献が図れる。また、インテリジェントブリッジのモニタリングシステムを活用することにより、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、ならびに将来的にはライフサイクルコストを軽減することができる可能性が期待できる。

知能化されたインテリジェントブリッジのセンサ機能およびプロセッサ機能を活用すれば、橋梁管理者は遠隔地から橋梁の状態を常時監視するとともに診断ができ、合理的かつ効率的な橋梁のモニタリングも可能になり、供用中の橋梁点検作業の削減や自己診断による運用費用の縮減を図ることができる。このように橋梁の知能化技術はインテリジェントブリッジの実現のためだけではなく、橋梁の生産工程と維持管理を総合的に捉えた生産管理体系の構想にも極めて有用であり、**図 1-2**に示すように、合理的な建設工程や維持管理の形態が生まれる。例えば、新設橋梁においては、設計荷重と異常な荷重の設定ならびに制御手法と制御力などの設定と橋梁の性能を勘案して合理的なインテリジェントブリッジを計画することになる。また、既存橋梁の維持管理においては、モニタリングと橋梁の性能評価ならびに確認により補修や補強を含めた現有性能の確定、ならびに継続的なモニタリングにより劣化予測や余寿命予測を可能にする。更に、既存橋梁に性能向上が要求される場合は、新設橋梁と同様に制御と橋梁の要求性能を勘

測して制御装置の増設を図り、既設橋梁の現有性能の要求性能への向上を可能にする。

1.1.3 本研究の周辺環境

橋梁のモニタリングにおいては、種々のセンサに象徴される計測技術、コンピュータやインターネットに象徴される通信技術、検知と判断と行動機能を備えたロボット技術、および損傷の程度や原因の把握ならびに進行を予測する技術など個々の要素技術においては十分な蓄積があり、かつ目覚しく発展している。また、センサやコンピュータの大幅なコスト低下、ならびにインターネットや携帯電話などの有線や無線を問わないデータ通信技術の発達により従来よりも格段に優れた機能を有するインテリジェントブリッジを実現できる環境が整ってきた。このような環境の中で、電気や電子工学など異分野の技術と長年に渡って蓄積してきた土木工学の技術との融合、および、種々の技術を統合したシステムの構築、ならびに種々のシステムを統合した橋梁の維持管理と建設の革新的な形態の構築などに取り組む時代が到来したと言える。

1.2 本研究の目的と概要

1.2.1 モニタリングシステムの開発

モニタリングシステムは、橋梁の応力や変位や振動などをリアルタイムで計測し、計測結果の評価や橋梁の性能診断をする重要な技術であり、単に橋梁の変状の把握に留まらず計測結果の効果的な管理、収録、加工および活用によって橋梁の管理に対する有用な知見を得ることにその目的がある。モニタリングを必要とする多数の橋梁の集中的な増加が懸念され、維持管理に携わる技術者の減少が著しく、財政制約によるコスト縮減が要求される環境の中では、効率の高いモニタリングシステムが要請される。従来のモニタリングは手作業の計測に頼っていたが、本研究で開発したモニタリングシステムでは、モニタリングの効率を向上させるために無人化や自動化およびリアルタイムモニタリングの実現を図り、かつ、多くの橋梁関係者が必要なデータを必要な時に、必要な場所から閲覧や入手ができる環境を構築する。

本研究では、主として現場に設置されてリアルタイム計測や計測結果の図表などを表示するシステムとしてスタンドアロンモニタリングシステム (SMS) を開発し、続いて複数の関係者が遠隔地からデータ収集や閲覧を可能にするための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 (IMS) を開発する。次に両システムを統合

して、遠隔地から計測項目の設定ならびに計測の開始と終了の指令を発信でき、計測結果の受信も可能な双方向性を備えた遠隔操作モニタリングシステム (RMS) を構築する⁵⁾⁷⁾(図 1-3 参照)。

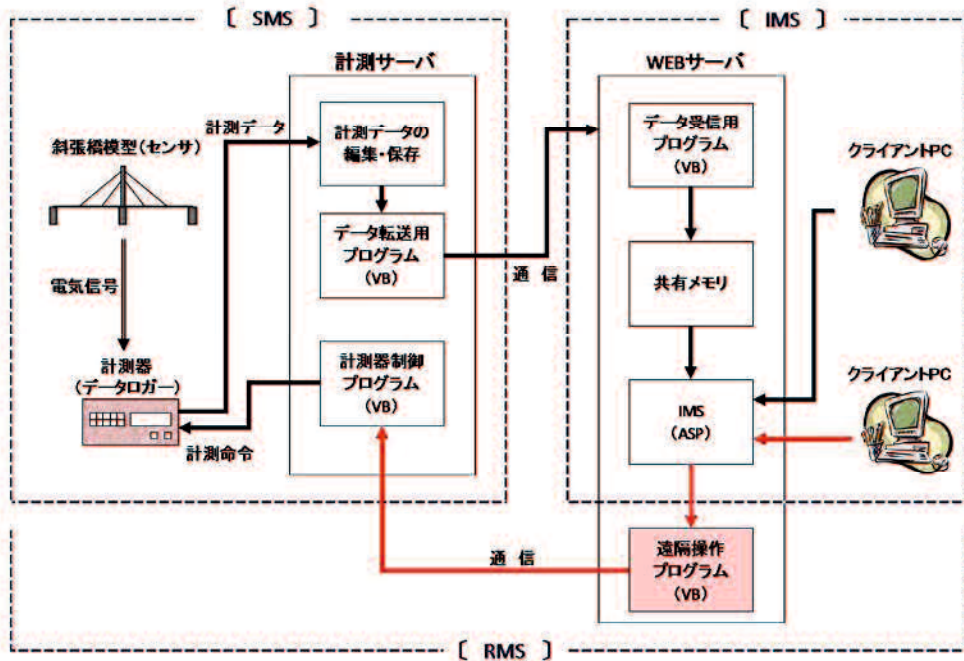


図 1-3 モニタリングシステムの構成

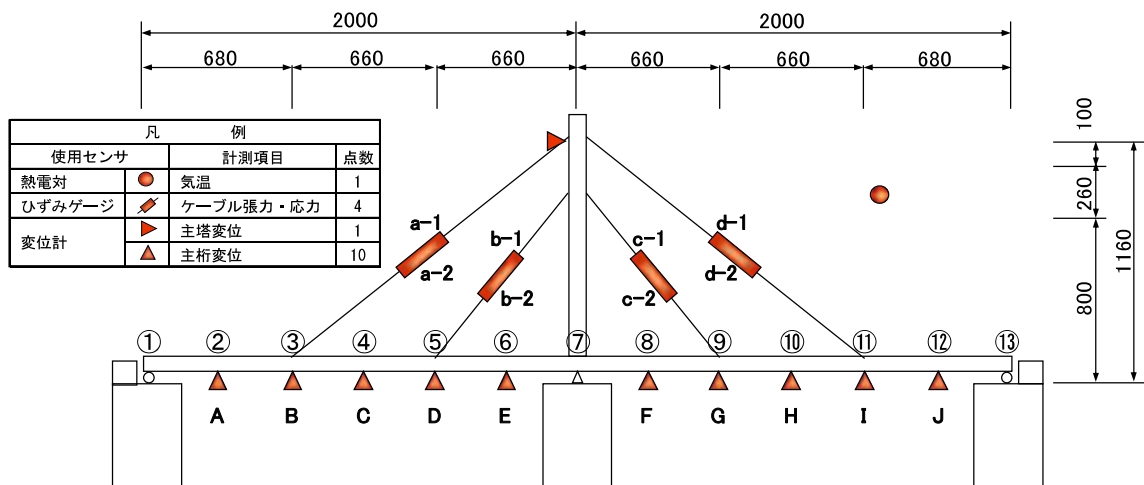


図 1-4 斜張橋模型における計測センサと計測位置

インテリジェントブリッジの開発を想定して、本研究で開発したモニタリングシステムを図 1-4 に示す斜張橋模型に適用のうへ、斜張橋模型の斜材ケーブル張力、主桁や主

塔の変位および模型周辺の気温などのモニタリングを行い、本モニタリングシステムの動作機能を検証する。斜張橋模型は模型周辺の気温の変化に対応して、主桁や主塔の変位、斜材ケーブルの張力などが連動して変化する構造であるため、モニタリングの動作検証には他の橋梁形式に比較して要因の相関関係が観察できるため信頼の高い検証が可能になる。

本モニタリングシステムにおける SMS では、各センサが感知した橋梁模型の変状は計測器に取り込まれ、計測器内でセンサから得られた変状は温度やひずみ等の物理量である計測データに変換され、計測器から計測用サーバに転送され、計測用サーバ内に保存される。さらに、計測用サーバ内の SMS プログラムは計測データを気温、ケーブル張力や応力、主桁や主塔の変位などのシステム利用者に分かり易い物理量に変換するとともに、視覚的に理解し易く図表化された計測データに編集することもできる。さらに、計測用サーバ内に保存された計測データは、IMS により Web サーバに転送され、遠隔地のクライアント PC はブラウザ上で計測された全てのデータを見ることができる。また、遠隔モニタリングシステム (RMS) は遠隔地から計測サーバ内に設置された計測器制御プログラムを操作することにより、模型の計測設定や計測内容を変更することができる。本システムを実橋梁に適用することにより、様々な橋梁管理事務所ならびに点検現場や工事現場などでも計測データの閲覧ならびに獲得が可能になるとともに、橋梁管理事務所などから遠隔地の橋梁のモニタリング操作も可能になる。

また、IMS および RMS には貴重な橋梁のデータが格納されており、そのデータの加工ならびにデータに基づく計測の指示ができるシステムになっている。さらに、RMS の延長線上には RMS から橋梁を制御することも考えられるので、悪意を持ってシステムの深部まで侵入されることは極めて危険なことであり、個人を特定するセキュリティは RMS にとって最重要な事柄である。本システムでは、ハッカーなどからのパスワードへの攻撃、ネットワークの盗聴ならびに成りすましなどに対して SSL (Secure Socket Layer) によるクライアント認証、通信の暗号化に加えて、パスワード認証の多重化を採用することにより、外部からの攻撃を防止するシステムを構築する¹⁵⁾。

1.2.2 インテリジェントブリッジの開発

パラストレスングは「必要な時に、必要に応じて、作用力を相殺するような力が働く」と言う概念^{6)・16)}に立脚する構造物への外力の作用に対する応答の新しい着想に基づ

く知能化技術の一種であり、構造物に作用する外力に対して構造部材(材料特性も含む)を自己制御する、自己完結型に自己組織化されたシステムとして構造物全体を保守する概念である。したがって、本研究においては、インテリジェントブリッジはパラストレッチングに立脚した知能化された橋梁と換言することができる。

我が国の橋梁は従来から、技術基準¹⁴⁾に規定されている画一的な設計荷重に基づいて設計されてきたが、交通量が少ない地域に限らず、多くの橋梁では設計基準に規定されるような大型車両の荷重は橋梁の供用中には殆ど発生することがない。現行の設計基準では、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を対象に設計することが規定されており、極端な言い方をすれば相当に不経済な設計になっている可能性が想定され、合理的な設計法とは言い難い部分がある。

本研究では、このような構造特性を勘案して、感知機能、判断と命令機能および制御機能が自動的に作動するシステムを備えたパラストレッチング技術を図 1-3 に示す斜張橋模型に適用して、知能化された斜張橋模型のインテリジェントブリッジを開発し、その動作性能を検証することにより橋梁のインテリジェント化の可能性を検証するとともにインテリジェント化を実現するための課題を抽出する。

斜張橋は通常最大中央支間長 200m～900m と幅の広い支間長に適用される吊橋に次ぐ長大橋に適した橋梁形式である。長大橋であるため、橋梁を構成する部材の形状や寸法を決定する要因である応力や変形は死荷重(自重)が支配的な要因になり、活荷重の影響は極めて少ない。そのために、本研究のように活荷重の影響を相殺する制御は、橋梁全体の材料削減や初期工費縮小への貢献は殆ど期待できない。本研究では、制御による経済的な効率を見込むことは困難であるが、斜張橋が持つ構造特性を活用することに重点を置いて斜張橋模型をインテリジェントブリッジの開発の対象とする。斜張橋は斜材ケーブルの張力を任意に設定できる構造形式であり、斜材ケーブルが直接に主桁を吊る構造であるため、重力を始め橋梁に作用する荷重を相殺する構造として明瞭かつ理解し易く、荷重の載荷位置に対して斜材ケーブルの緊張により主桁変位を制御する現象についても概念的に理解し易い構造である。

開発するインテリジェントブリッジの概念を図 1-5 に示す。本システムにおいては、橋梁模型の変状やひずみなどの状況はスタンドアロンモニタリングシステム(SMS)を基盤にした計測装置により感知され、計測サーバに設置されたプログラムより荷重強度や安全性が判断され、制御が必要な場合は制御力が算定されて制御装置への制御命令が

発信され、アクチュエータのような制御装置により橋梁は制御される。

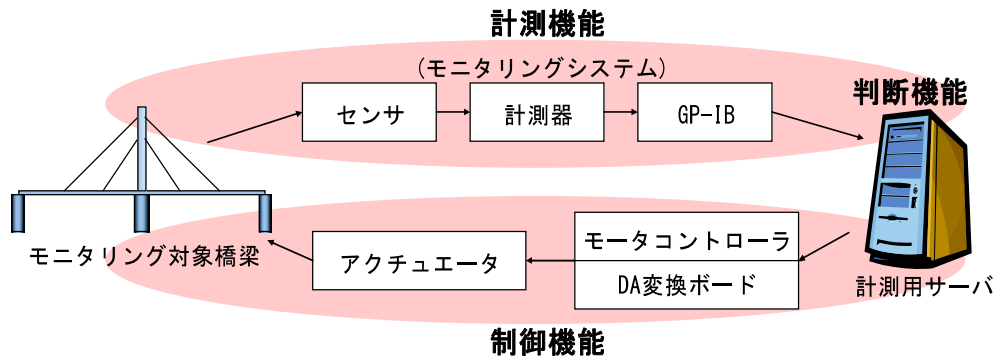


図 1-5 インテリジェントブリッジの概念

(パラストレッシングシステムの概念)

本研究においては、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した場合に橋梁を安全な状態に制御することを想定して、制御システムは大型活荷重が斜張橋模型に載荷された場合の主桁変位を設計活荷重による主桁変位まで抑制させるシステムにし、主桁変位を抑制するための制御は斜材ケーブルの緊張によって主桁変位を減少させる方法を採用する。一連の動作は次の通りである。

斜張橋模型の変位や斜材ケーブルの張力などの構造物としての状況は、模型に設置されたセンサから伝達される情報により感知する。判断機能として重要な要素である変位を抑制するために用いられる斜材ケーブルの張力は、FEM 解析を活用して開発した制御力算出システムにより計測サーバで算出し、最適制御力として斜材ケーブルに作用させる。また、斜材ケーブルを緊張するための制御装置（アクチュエータ）は、モーターと直線動作機構を一体化した電動シリンダーを採用する。

以上の感知・判断・制御機能が全て一体化して、遠隔操作モニタリングシステムの中の主としてスタンドアロンモニタリングシステム上で自動的に動作するインテリジェントブリッジを開発し、斜張橋の模型実験によりシステムの動作と精度を検証するとともに、インテリジェントブリッジ実現の可能性を考察する。

1.3 本論文の構成と概要

本論文は6章で構成され、その構成を図1-6に示すとともに、以下に各章を概説する。

【第1章 緒論】

本章では、本研究の背景と目的を明確にし、論文の構成と概要を説明する。

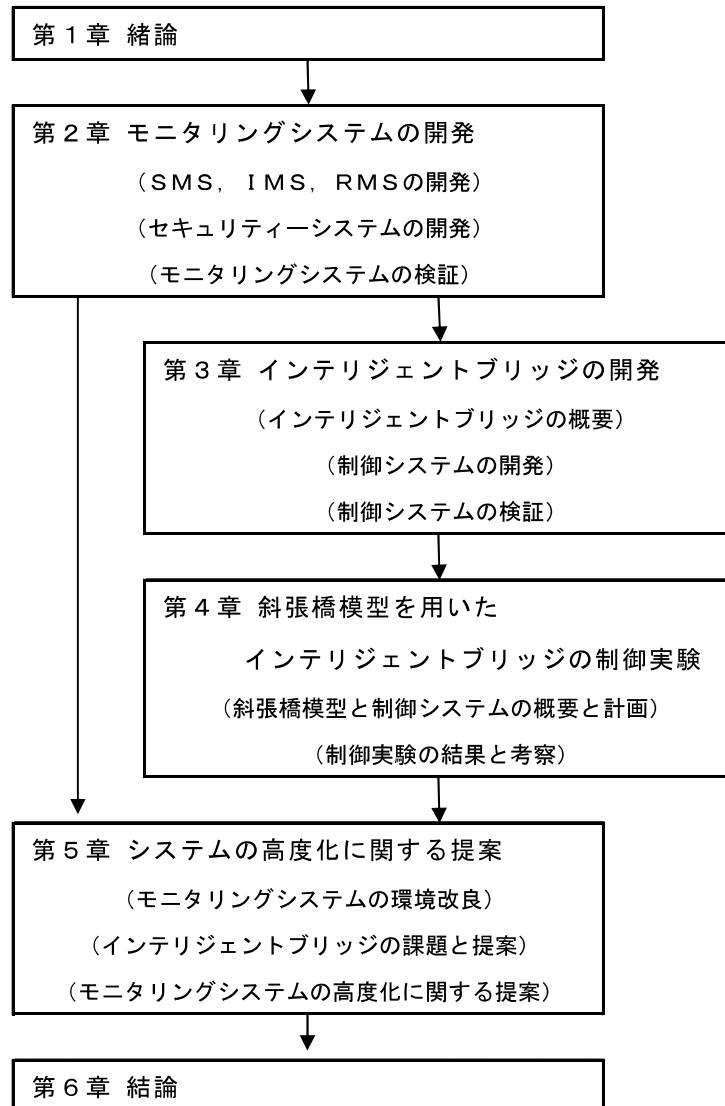


図1-6 本論文の構成

【第2章 モニタリングシステムの開発】

本章では、斜張橋模型を対象にして、主として現場に設置されてリアルタイム計測や計測結果の図表などを表示する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, 斜張橋模型の温度や主桁変位などの挙動をモニタリングしてシステムの計画通りの動作機能と計測結果の良好な図表化などシステムの信頼性を確認した.

また, 本モニタリングシステムでは, セキュリティとして SSL (Secure Socket Layer) によるクライアント認証, 通信の暗号化に加えて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開発した.

【第3章 インテリジェントブリッジの開発】

本研究では, 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. 本研究におけるインテリジェントブリッジでは, 大型活荷重が載荷された場合に大型活荷重による主桁変位を設計活荷重による変位まで制御するシステムを採用し, 必要な制御力は本研究で開発した FEM 解析に立脚した制御力算出システムで算出され, 制御は模型の斜材ケーブルの緊張によっている. 種々の荷重を載荷した模型実験を行い, 各機能の計画通りの動作および解析結果と計測結果の比較により制御力算出システムの精度の信頼性を確認した.

【第4章 斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジの制御実験】

本章では, 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, FEM 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) を要因に制御精度を確認した.

【第5章 システムの高度化に関する提案】

本章では, これまでの研究の成果と知見を踏まえ [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, などを整理する.

参考文献

- 1) 地方自治体に対するアンケート調査結果（社会資本メンテナンス戦略小委員会中間答申（平成25年5月30日）参考資料より）。
 - 2) 国土交通省ホームページ，国道（国管理）の維持管理に関する検討会参考資料，老朽化対策参考資料より。
 - 3) 内閣官房「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」参考資料より，平成25年10月16日：http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/dai1/sankou。
 - 4) BanFu Yan, Minoru Motoshita, Hideaki Nakamura, Ayaho Miyamoto; Development of Remote Monitoring System for Bridge Evaluation, Journal of Applied Mechanics Vol.5 (August 2002) JSCE.
 - 5) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita, Banfu Yan; Internet Monitoring System for Bridge Performance Evaluation, Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2003.3, pp.362-373.
 - 6) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita; An Integrated Internet Monitoring System for Bridge Management, Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, ISIS CANADA RESEARCH NETWORK, pp.573-584, 2004.
 - 7) Minoru Motoshita, Ayaho Miyamoto, Naoki Kawanishi and Risto Kiviluoma; Fundamental Study on the Intelligent Bridge with an Advanced Monitoring System and Smart Control Techniques, ASCE Journal of Bridge Engineering (ASCE), Vol.20, Issue, 2015. (掲載決定)
 - 8) C. Boller, F. Chang and Y. Fujino (Ed.): Encyclopedia of Structural Health Monitoring, A John Wiley and Sons, Ltd., Publication, Vol. 1-5, 2009.
 - 9) 土木学会構造工学委員会(編): 構造工学シリーズ10, 橋梁振動モニタリングのガイドライン, (社)土木学会, 2000.12.
 - 10) スマートストラクチャー研究会編: SMART STRUCTURES, p.14, 1993.
 - 11) 鎌田崇義: ピエゾアクチュエータを用いた構造による建物のアクティブ制御, 日本地震工学シンポジウム論文集, 10 - 3巻, 1998.11.
-

- 12) 中沢正利, 有尾一郎, 谷倉 泉, 小野秀一: MFM概念とそれを応用したモバイルブリッジの研究開発, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, 2009.9.
- 13) 構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究委員会; Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring 研究の動向, 土木学会論文集, No.654/I-12, 2007.7.
- 14) 道路橋示方書・同解説, I 共通編, 社団法人日本道路協会, 平成24年2月.
- 15) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita and T. Ogawa; Development of an Integrated Remote Monitoring Technique and its Application to Para-stressing Bridge System, Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 415 39652 2, pp. 1597-1604.
- 16) S. Montes: A Global Concept for 21st Century Bridge: Para-stressing, Proceedings of FIP Symposium on Post-tensioned Concrete Structures, London, pp 739-744, 1996.

第2章 モニタリングシステムの開発

2.1 はじめに

我が国の経済の発展や国民の安全な暮らしを支えてきた既存の橋梁では、通行車両の大型化や交通量の増大による損傷が原因と考えられる性能低下と経年劣化の相乗作用による性能低下が生じており、従前の生活や経済を持続するために現存する橋梁の効果的な運用と合理的な維持管理は喫緊の課題になっている。1960年代の高度成長期以降に短期間かつ急速に整備された現存する多数の橋梁は集中的に供用後50年目を迎えるようとしており、早期にその状態把握、健全度の診断、長寿命化対策が求められている¹⁾。一方では、少子高齢化に伴う人口減少や経済成長の鈍化により社会基盤整備に対する財政の制約は厳しく、維持管理の低コスト化や省力化が求められている。また、維持管理に携わる専門技術者不足の現象は取り分け地方自治体において顕著であり、早期解消は困難な状況にある²⁾。

このような環境の中で、近年、橋梁の健全度の評価や性能診断のために橋梁の経常的な変位、ひずみ、振動などのモニタリング結果を利用することが多くなっている³⁾⁴⁾。また、日本再興戦略（2013年6月14日閣議決定）においては、2030年の目標として「国内の重要インフラ・老朽化インフラは全てセンサ、ロボット、非破壊検査技術等を活用した高度で効率的な点検・補修」が実現されていることが揚げられている⁵⁾。この様に、従来の目視や機器による点検や調査と平行して、ICTを介したモニタリングの活用が期待されている⁶⁾¹²⁾。

本研究では、従来の手作業によるモニタリングに代わり、計測の無人化や自動化による省力化、遠隔操作によるリアルタイム計測、ならびに、計測結果の効率の高い収録と加工を実現して、インターネットを介して多くの関係者が様々な場所から、必要な時に必要なデータを閲覧ならびに入手することが可能なモニタリングシステムを開発し、効

果的かつ効率的な橋梁の状況把握、性能診断の実現を目指す。

本システムは、斜張橋模型を対象にして、情報の収集および加工をするためのシステム（スタンドアロンモニタリングシステム；SMS）、インターネットを活用した計測命令などの情報の伝達および計測結果の閲覧や入手をするためのシステム（インターネットモニタリングシステム；IMS）、および、遠隔地から計測項目の設定ならびに計測の開始と終了などの指令ができるとともに計測結果の閲覧が可能な双方向のシステム（遠隔操作モニタリングシステム；RMS）から構成され、斜張橋模型に適用した模型実験を介してシステムの動作と精度を検証し、システムの実橋梁への適用の可能性と課題の抽出を行う（図 1-3 参照）。

2.2 モニタリングシステムの開発

2.2.1 モニタリングシステムの概要

本モニタリングシステムは、橋梁の応力や変位や振動などをリアルタイムで計測し、計測結果の評価や橋梁の性能診断をする重要な技術であり、単に橋梁の変状の把握に留まらず計測結果の効果的な管理、収録、加工および活用によって橋梁の管理に対する有用な知見の取得が必要である²⁾。本研究では、図 1-3 に示した斜張橋模型を対象にして、図 1-3 の構成図に示した SMS、IMS、RMS を開発する。各システムの概要は、下記の通りである。

- ・ SMS；本モニタリングシステムの基盤システムで、主に現地に設置された計測 PC からの指示で動作する。斜張橋模型の状況を計測するとともに計測データを視覚的に判断しやすい図表に変換し、計測結果を計測サーバ内に保存する。
- ・ IMS；計測結果を計測 PC から Web サーバに送信し、Web ブラウザを利用できる環境にさえあれば、インターネット上で何処からでもモニタリング結果の閲覧や入手を可能にする。
- ・ RMS；上記の両システムを統合したシステムであり、遠隔地からでもインターネットを介して計測の指示を可能にする。

本研究での開発システムでは、各センサが感知した橋梁模型の変状は計測器に取り込まれ、計測器内でセンサから得られた変状は温度やひずみなどの物理量である計測デー

タに変換され、計測データは計測器から GP-IB インターフェースを通して計測を命令する計測用 PC に転送され、計測用 PC 内に保存される。さらに、計測用 PC 内の SMS プログラムは計測データを気温、斜材ケーブルの張力や応力、主塔や主桁変位などをシステム利用者に分かり易い物理量に変換するとともに、視覚的に理解し易い図表化された計測データに編集する。また、計測用 PC 内に保存された計測データは、IMS により Web サーバに転送され、遠隔地のブラウザ上で計測された全てのデータを閲覧することができる。さらに、計測を命令する権利を有するクライアントからは、IMS を介して計測サーバ内の遠隔操作プログラムを起動させて、計測器制御プログラムにより計測項目の設定や計測の開始と終了を命令することができる。

2.2.2 スタンドアロンモニタリングシステム

スタンドアロン・モニタリングシステム (SMS) は、計測用 PC 上で動作するシステムで、計測器 (データロガー) を制御して、モニタリング対象の橋梁の状態を計測し、計測データの加工と保存をするシステムである。

(1) システムの開発環境と構成

SMS は、図 2-1 の構成図に示すように計測器 (データロガー)¹³⁾ と計測用 PC からなるシステムで、計測用コンピュータ内に組み込まれた計測器制御プログラムとデータ収録・表示プログラムにより、計測器への計測命令とデータの収録・表示をする。

計測器と計測用 PC のインター・フェース¹⁴⁾ には、RS-232C (Recommended Standard 232 version C) または GP-IB (General Purpose Interface Bus) の使用が可能であるが、本システムではパラレル通信のため各機器に GP-IB アドレスを割り当てて識別することにより複数の計測機器を同時に接続・制御することが可能で、RS-232C に比べ転送速度が高速である GP-IB を用いる。

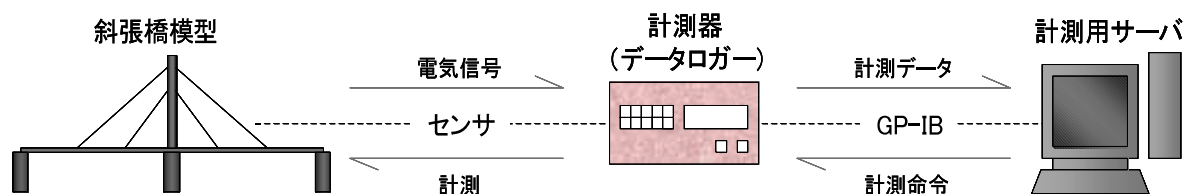


図 2-1 スタンドアロンモニタリングシステムの構成

(2) システムの機能とフロー

本研究で開発したSMSの機能とシステムフローを図2-2に示し、機能 (I) ~ (V) を以下に概説する。

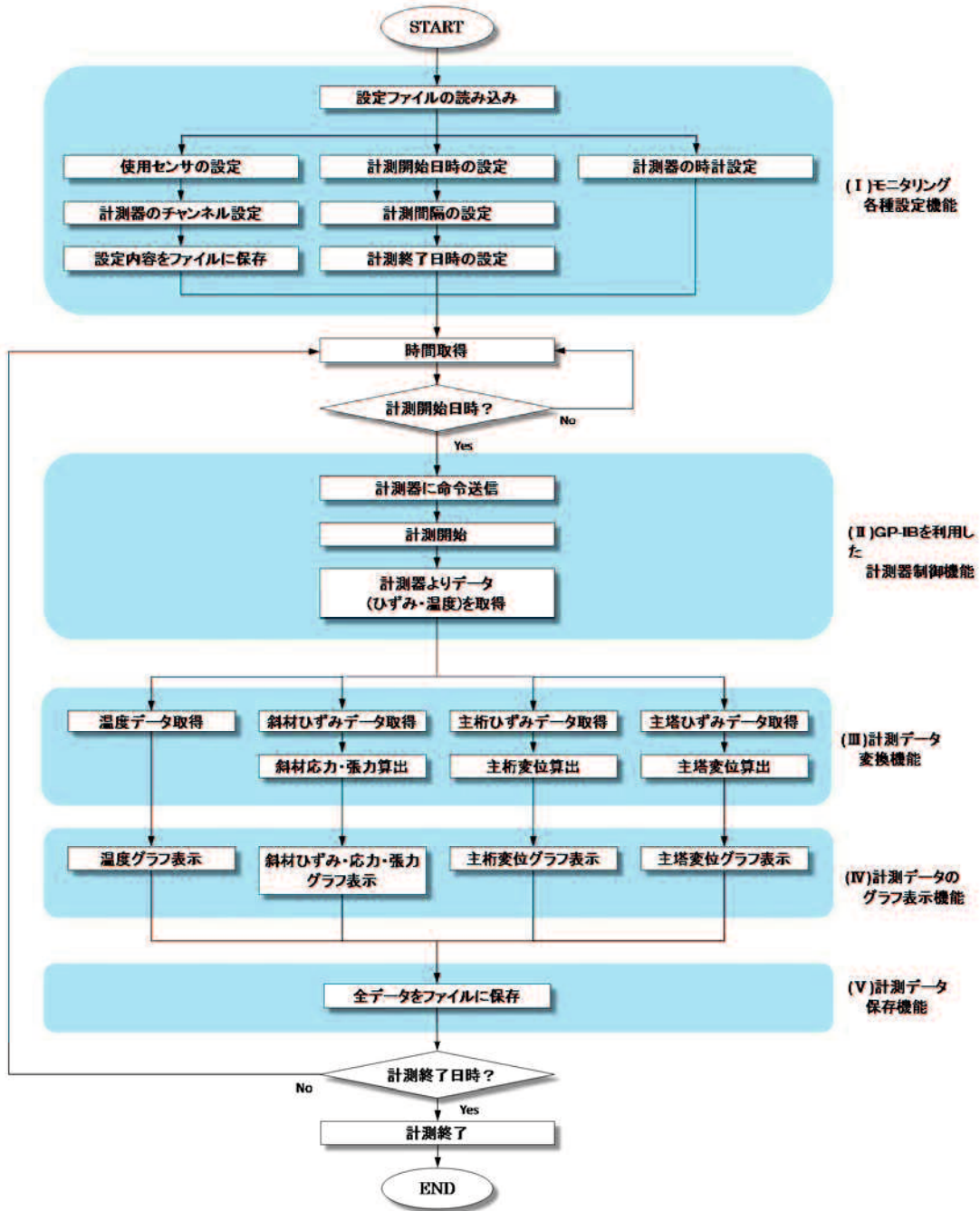


図 2-2 スタンドアロンモニタリングシステムのフロー

(I) モニタリング各種設定機能

モニタリング開始前に以下の設定を行う。

- ①熱電対，ひずみゲージ，変位計等の使用するセンサの種類，特性を設定する。
- ②センサの種類に対応する計測器（データロガー）のチャンネルを設定する。
- ③自動的にモニタリングの開始，計測，終了を可能にするために，モニタリングの開始日時，終了日時，計測間隔を設定する。
- ④再計測のために実施済のモニタリング設定内容をファイルに保存する。
- ⑤計測命令日時は計測PC内の時計，計測記録は計測器内の時計によるために計測器の時刻を計測PCの時刻に整合させる。

(II) GP-IBを利用した計測器制御機能

計測コマンドは，モニタリングに関するすべての設定を行った後に行い，設定した開始日時およびインターバル毎に計測用PCから計測器へ計測コマンドが送信され，計測器は計測したデータを計測用PCへ返す。

(III) 計測データ変換機能

センサから計測器を通じて計測用PCに転送されたデータを解り易い物理量に変換してユーザに提供する。本システムでは，ケーブルのひずみデータをケーブルの張力や応力に，変位計のひずみデータを主桁や主塔の変位量に変換する。ただし，熱電対は温度が測定されるため，斜張橋周辺の気温としてそのまま用いる。

(IV) 計測データのグラフ表示機能

ユーザに解り易い物理量に処理されたデータを，リアルタイムで計測用PCのモニタに数値表示するとともに，同時にデータをグラフ化する。表示された図表により，計測時の斜張橋模型の状態変化を時間経過とともに視覚的に把握することができる。

(V) 計測データのファイル保存プログラム

物理量に変換されたデータを，一回のモニタリング毎に計測日時とともに，月毎に年月をファイル名としたテキストファイルに保存する。

(3) システム画面による操作手順

モニタリングシステムを起動させると，モニタリング設定確認画面に表示される3種の設定方法から設定方法を選択する。[前回の設定を用いる]を選択すれば モニタリン

グ設定画面が表示され、前回の設定内容が書き込まれている。[既存の設定ファイルを開く] を選択すると、コモンダイアログが表示され、ファイルを選択すればモニタリング設定画面が表示され、選んだファイルの設定内容が書き込まれる。[新しく設定する] を選択すると、センサとチャンネルについてすべて未設定の状態でのモニタリング設定画面が表示される。

モニタリング設定画面は図2-3に示すように、モニタリング対象の斜張橋模型図および橋梁諸元とともに、[センサ]、[チャンネル]、[計測時間/ファイル]と3種のタブで区切られた設定内容が表示される。

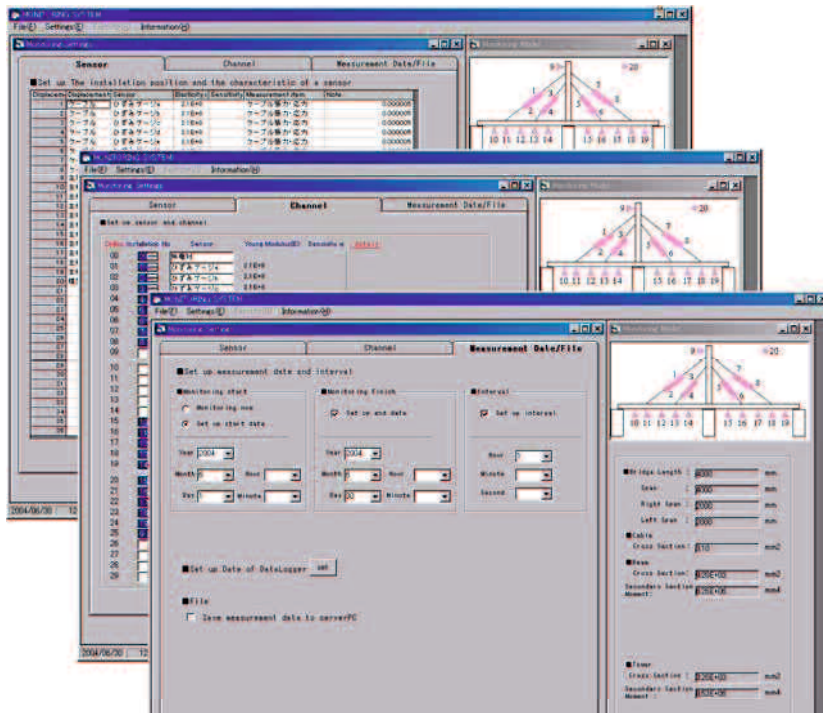


図 2-3 モニタリング設定画面

[センサ]の設定では、設定画面に表示される斜張橋模型図の設置番号のもとに、設置位置・センサの種類・センサの特性・測定項目・部材に関する情報などを書き込む。

[チャンネル]の設定では、計測器（データロガー）のチャンネルナンバとセンサ端子の設置位置番号とセンサを整合させる。

[計測日時/ファイル]の設定では、計測開始日時・計測終了日時、計測間隔を設定する。なお、開始日時を指定しない場合は[即計測を行う]を選択して、ユーザは任意にモニタリングを開始でき、終了日時を指定しない場合は任意にモニタリングを終了できる。ま

た、計測間隔を指定しない場合、計測は一回で終了する。開始日時、終了日時およびインターバルを設定しておけば、モニタリングの開始から終了までの一連の作業が自動的に実行される。

以上の3つのタブについてすべて設定が完了すれば、計測開始日時の確認画面が表示され、モニタリングの開始が可能になる。開始日時を設定していない場合は、即時計測開始の確認画面が表示され、確認すればモニタリングを開始する。

(4) 計測画面表示

モニタリングが開始すると、設定の計測終了日時まで図2-4に示すようにリアルタイムでモニタリングデータが表示される。気温、ケーブルのひずみ・応力・張力、主桁および主塔の変位が左側に数値データで表示され、右側にはそれぞれのデータがグラフで表示される。

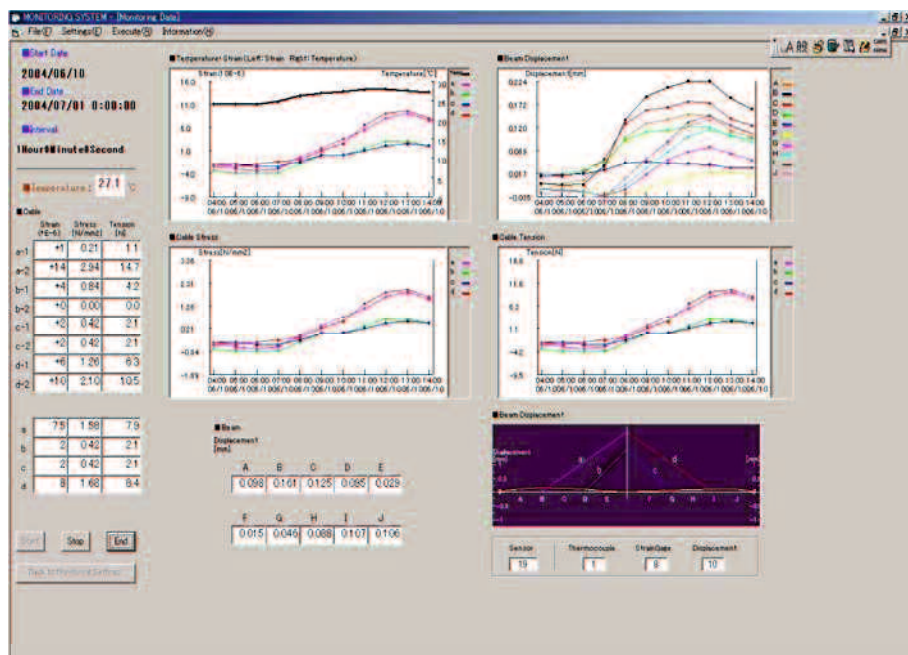


図 2-4 モニタリングデータ画面

2.2.3 インターネットモニタリングシステム

(1) システム構築の概要

スタンドアロン・モニタリングシステム (SMS) では、基本的に 1 台のコンピュータ上でしか稼働せず、限られたユーザしか利用することが出来ない。モニタリングシステム

ムを利用したより効率的な橋梁維持管理を実現するためには、同時に多数の橋梁管理関係者が、必要な時にモニタリングシステムを扱える環境が必要である。

本研究では以上の要素を考慮して、ネット上に公開された1組のシステムを多数の端末から使用することができるインターネットインターネットを利用したクライアント・サーバシステムによるモニタリングシステムのネットワーク化を試行する。インターネット上にシステムを構築するための技術は多数存在するが、本研究ではサーバサイドスクリプトであるASP技術を用いてシステムの構築を行う。

(2) サーバサイドプログラム

インターネット上で動作するプログラムは大きく下記の2種類に分類される。

- ・クライアントサイドプログラム; アプレットやスクリプトのようなWebサーバからクライアントにダウンロードされ、クライアントのWebブラウザ上で動作するプログラム。
- ・サーバサイドプログラム; CGI (Common Gateway Interface) やASP (Active Server Pages) のようにサーバ上で処理を行い、その結果のみをクライアントに送信するプログラム。今回のインターネットモニタリングシステム構築では、後者のサーバサイドプログラムを使用する。

(3) サーバサイドプログラムの特徴

アプレットやスクリプトであるクライアントサイドプログラムで構築されたシステムにユーザがアクセスをした場合、Webサーバ上に存在するプログラムがHTML (Hyper Text Markup Language) ファイルと一緒にクライアントに送信される。これは、静的コンテンツに比較してネットワークのトラフィック量が増大するために、データ通信速度が低下し、ブラウザ上のページ表示速度も低下する。

サーバサイドプログラムでは、ネットワークを流れるデータはシステムに必要な入力データと処理結果として出力されるデータが大半であるため、ネットワークのトラフィック量は静的コンテンツとほぼ同等であり、データ通信速度やページ表示速度の低下も懸念することはない。また、サーバサイドプログラムではシステムがWebサーバでのみ動作するため動作環境が同一であり、クライアントのOSやハードに対する依存性が低くなるが、クライアントサイドプログラムはクライアント側で動作するためクライアントのOSやハードが動作速度に影響を与える。

本研究では、サーバサイドプログラムとして、サーバ上でWebアプリケーションが必要とする処理を行い、その結果 (HTML) のみをクライアントに返す「技術」であるASPを利用してシステムを開発した。システム開発に利用したASPの利点と欠点、および、仕組みを以下に概説する。

・ASPの利点

①技術の互換性、汎用性 (クライアント環境に非依存)

ASPは、すべての動作をサーバサイドで処理するために、クライアントに返信される情報が基本的には純粋なHTMLであるため、クライアントはWebサーバから返された結果のHTMLを表示できる機能があれば十分であり、開発者はただサーバ側の処理だけに専念すればよいと言える。

②ネットワーク負荷の軽減 (処理結果のみを返す)

ASPではサーバ側ですべての処理を完結させ、ブラウザには必要最低限のデータのみを返すので、DynamicHTMLのようにすべてのプログラムロジックをクライアント側にダウンロードするような不要なトラフィックの発生はないと言える。

③取得の容易さ

ASPを操るスクリプト言語の一つであるVBScriptは、VBA (Visual Basic for Application) のサブセットであり、取得が極めて容易である。また、オープン系システムの開発言語として長い歴史を誇るVBは、安心して取得できる。

④豊かな開発・周辺実行環境

ASPは、WindowsOSに標準添付されているIIS (Internet Information Server/Services) やPWS (Personal Web Sever) で動作可能である。

⑤ソース管理の効率化

ASPは、拡張子「.asp」ファイルの中に表示させたいHTMLと実際の処理を行うロジックの部分が一体化しているため、大きなサイトの管理にも容易に対応できる。

⑥サーバ資源の有効利用

ASPの場合、各コンポーネントがDLL (Dynamic Link Library) という単体の塊となっており、多数の処理が要求されても同じ処理の要求ならば、ASPはただ一つのコンポーネントを呼び出すだけで済む。

⑦充実したコンポーネント群

Webページの処理には、定型化した処理が多く見られるが、ASPはこのような一般化された処理は共通したコンポーネントという形で提供している。

・ ASPの欠点

サーバがクライアントからのリクエスト処理に加え、クライアントが要求するシステムの動作も実行する必要がある、またアクセス数が極端に多くなった場合にサーバにデータが集中するためにWebサーバ側のネットワークトラフィックが増大することが推定される。

・ ASPの仕組み

SMSで得られる計測データをIMSで操作する際、ファイル操作などに関する各オブジェクトをWebサーバ用に変換する形式として、静的なホームページを作成する最も一般的な形式である“HTML (Hyper Text Markup Language) ”，動的なHTMLを実現する方式である“ASP (Active Server Pages) ”，画像処理 (グラフ表示) をするための“VML (Vector Markup Language) ” の3つの形式を使用した。ASPの仕組みを図2-5に示す。

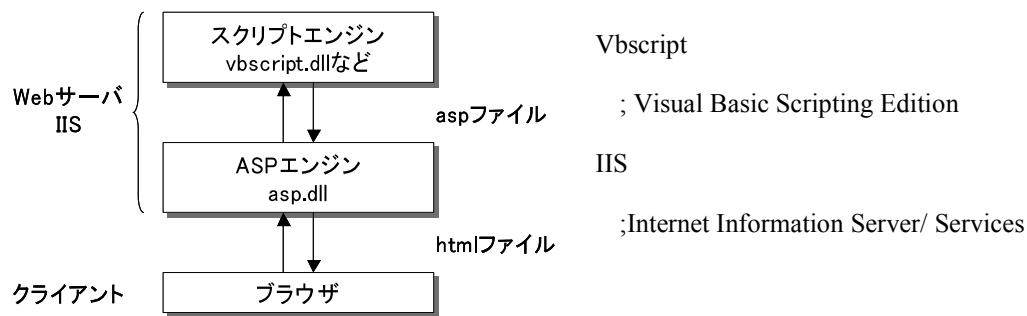


図 2-5 ASP の仕組み

(4) システムの機能とフロー

本IMSの機能は図2-6の機能階層図に示すように6つの機能に分けられるが、IMSの主な機能である、①ユーザ認証機能、②グラフ表示機能、③共有ファイルサーバ機能、④ファイルアップロード機能の4つの機能について、本IMSがプログラムした内容を以下に説明する。

①ユーザ認証機能

インターネットにおいては、データの書き換えやデータの外部への流出などに対するセキュリティは欠くことができない要素である。本システムでは、クライアントを

橋梁管理者 (Administrator) と関係者 (Member) および一般ユーザ (Guest) に分け、各々セキュリティの深度により、橋梁管理者にはSMSで実行する全ての計測に関するモニタリングシステムの全ての操作を行う権利、関係者には計測データを活用する権利、また一般ユーザには計測データの閲覧のみの権利を持たせ、それ以上の権利を与えないことにする。ここでは、クライアント認証や通信の暗号化からなるSSL (Secure Socket Layer) によりクライアントの身元確認を行い、パスワードの多重化により関係するセキュリティ深度に制限を加える。

②グラフ表示機能

グラフ表示機能は、気温、ケーブルひずみ、ケーブル張力、主塔変位、主桁変位などの計測結果を視覚的に解り易くするために、計測データファイルの表示、その中から選択した計測データのデータ内容表示、そのデータをグラフ化する。

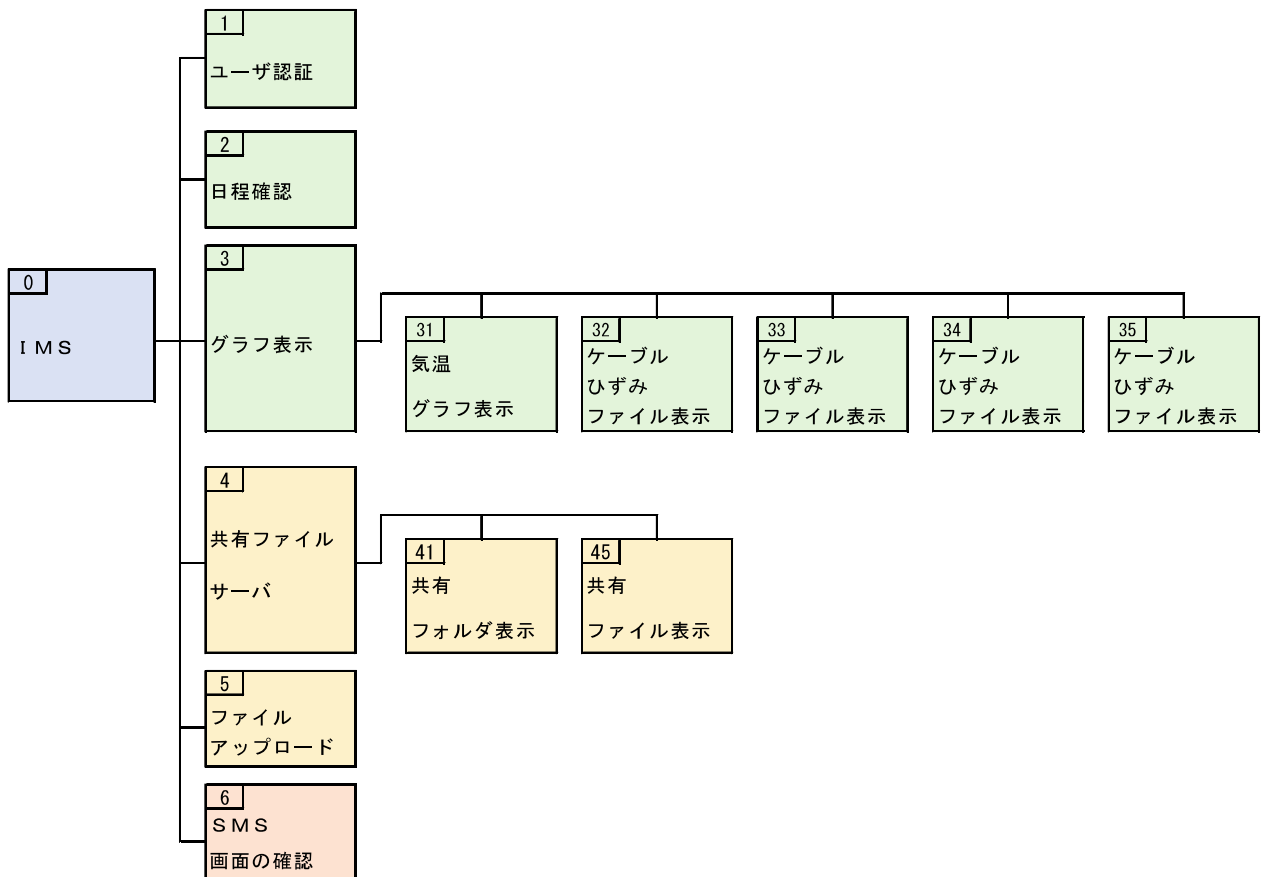


図 2-6 インターネットモニタリングシステムの機能階層

③共有ファイルサーバ機能

共有ファイルサーバ機能は、共有フォルダ内のサブフォルダやファイルへのリンクおよび表示が可能な機能であり、グラフ表示には不可欠の機能である。本共有ファイルサーバの特徴は、特定のフォルダ（共有フォルダ）に置くだけで、データがファイル情報の一覧表となってWeb上に公開されることであり、本IMSのように常に計測データが増加していく可能性のあるシステムでは、有効な機能であると言える。

④ファイルアップロード機能

ファイルアップロード機能は、共有したいファイルをサーバにアップロードする場合に用いる。例えば、クライアントが持っている計測データをインターネット上でグラフ化したい場合、クライアントのPCからファイルをWebサーバにアップロードして、ブラウザ上に表示されたそのファイルを選択してグラフ化することができる。前述の共有ファイルサーバ機能と併せて用いることで、Webサーバ上の共有フォルダにクライアントが持っている計測データを追加することが可能である。

以上の4つの機能が、本IMSの主要な役割であり、ブラウザ上でモニタリング状況を確認したい場合は、以上の機能を使用することで円滑にシステムを使用することができる。

2.2.4 遠隔操作モニタリングシステムの開発

従来のモニタリングは現場での手作業で実施されていたが、橋梁の維持管理に携わる専門技術者の減少とともに多数の橋梁が集中的にその状態調査や健全度診断の要請が懸念される状況の中では、モニタリングの省力化は喫緊の要事である。開発してきたインターネットモニタリングは、スタンドアロンモニタリングシステムの計測データを受信することしかできないために、複数の橋梁を同時にモニタリングする際にSMSの計測条件の設定や設定変更の必要が発生すれば、SMSが設置されている橋梁の現場に向くことになり、極めて非効率である。本研究では、本研究で開発したスタンドアロンモニタリングシステム（SMS）とインターネットモニタリングシステム（IMS）を統合して、遠隔地の管理事務所などからでも計測サーバ内に設置されているSMSを操作して、計測項目および計測の開始と終了などの設定や設定変更の命令ができる遠隔操作モニタリングシステム（RMS）を開発する。

遠隔操作モニタリングシステム (RMS) の構成を図 2-7 に示す。Web サーバ内に設置される遠隔操作プログラムは、計測サーバ内に設置されているシステム画面と同じ画面を使用し、遠隔操作プログラム上で実行した設定内容がそのまま SMS に反映するシステムを採用する。例えば、遠隔操作プログラム上で計測間隔などの計測条件を変更すれば、その情報が SMS に送信され、SMS 側で変更情報が受信されて SMS の画面上でも同じ計測条件が表示され、計測が実行される。

橋梁管理者であるクライアントは、図 2-7 に示すように、IMS を介して Web サーバ内に設置された遠隔操作プログラムを起動して、計測項目や計測時間や計測間隔などの計測条件を設定する。遠隔操作プログラムは、RMS のシステムとして計測サーバ内に設置された計測器制御プログラムに遠隔操作プログラムで設定した計測条件を送信する。計測器制御プログラムは、クライアントが指示する計測項目や計測時間や計測間隔などに従って計測器を動作させる。

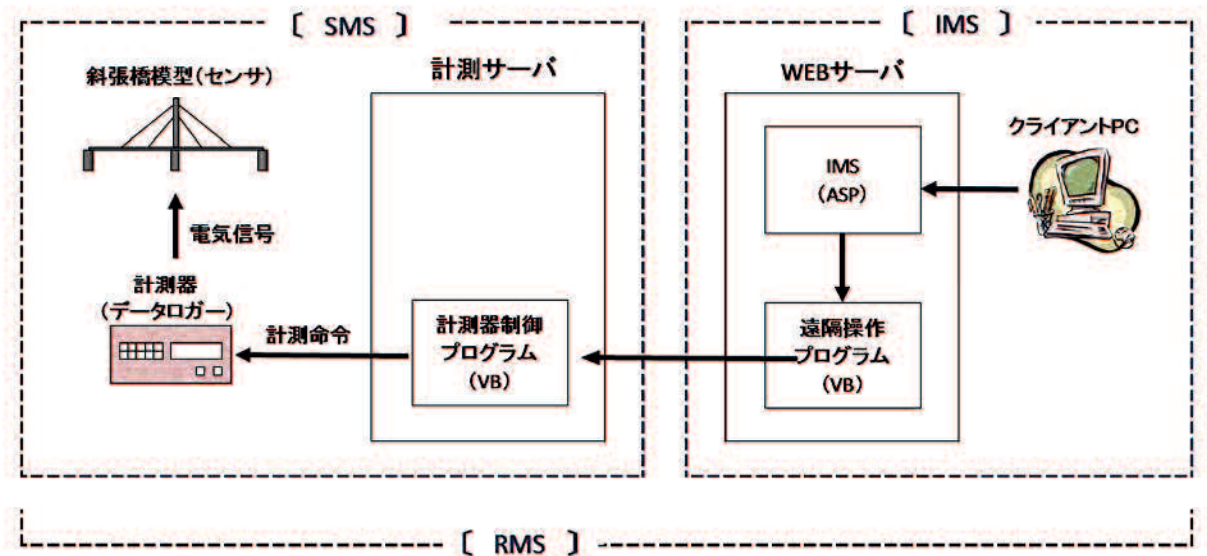


図 2-7 遠隔操作モニタリングシステムの構成

橋梁管理者は、インターネットを介して管理事務所のような遠く離れた場所からでも橋梁を容易にモニタリングすることができ、IMS の活用により多数の橋梁を同時にモニタリングすることも可能になる。

2.3 セキュリティシステムの開発

2.3.1 認証機能の現状

現在使用されている認証方法は、「パスワードに基づく認証」、ICカードや鍵などの「持ち物による認証」、指紋などの生体情報を用いる「バイオメトリクス認証」の大きく3種類に大別される。パスワードに基づく認証は、定められた文字列、数字列を専用端末やWebページ内の認証画面に入力して認証を行う方法。最も広く認知されている認証方法でクライアントの受容度も高いが、セキュリティ上の問題も数多く持ち合わせている。持ち物による認証は、認証端末を必要とするため、限られたネットワーク上のコンピュータを使用する際の認証や、入退室管理といった分野に特化していると言える。バイオメトリクス認証は、人の生体的特徴や特性といった固有の情報を使用して認証を行う方法であり、指紋、声紋、膜、顔、掌形、掌の静脈など生体情報の特徴をデータベースに保管し、これをテンプレートとして認証端末のセンサで読み取った情報と照合して判定を行う。どの生体情報を使うかによってセンサが異なり、特徴を抽出する方式もさまざまであり、この認証方法も専用の認証端末を必要とするので、持ち物による認証と同様に入退室管理などの分野に特化していると言える。

ICカードによる認証や指紋などのバイオメトリクス認証をIMSの認証システムに導入すると、認証の信頼度は飛躍的に向上すると考えられるが、Webページにおける認証システムには端末が必要であるために、ユーザを極端に限定してしまうことや、現時点におけるユーザの受容度を考え、本研究ではパスワードによる認証を採用する。

パスワードはパスワードに設定できるASCII文字95種の文字の組み合わせで作成されるが、パスワードには「総当たり攻撃」や「辞書攻撃」ならびに「ネットワークの盗聴」などの攻撃があり、常にこれらの攻撃からシステムを保守することが重要である。パスワードの文字数とその組み合わせ数では、例えば、パスワードが4文字の場合の組み合わせは8,000万以上であるが、パスワードを8文字に増すと組合せは6,600兆にも上り、総当たり攻撃には長いパスワードが有効であると言える。しかし、如何に長いパスワードの設定でも盗聴に対しては必ずしも有効とは言えない。ネットワークの盗聴によりアカウントやパスワードが盗聴された場合でも、内容が判別されない保守対策として、データ通信の暗号化の手法がある。また、認証の信頼性を向上させる手法として、認証の

多重化を採用することも極めて有効である。

2.3.2 SSLによるクライアントの認証

本研究では、Web サーバの OS に Windows2000Server を導入し、自己認証局機能¹⁵⁾を利用して SSL (Secure Socket Layer) をパスワード認証の際のデータ通信に導入する。インターネット上で情報を暗号化して送受信するプロトコルである SSL は、現在インターネット上で WWW や FTP などのデータを暗号化し、オンラインショッピングやオンラインバンキングなどの電子決済、ならびに、プライバシーに関わる情報やクレジットカード番号や企業秘密などを安全に送受信する手法として広く使われ、クライアントの認知度も高く、安全で確実な通信の暗号化手法である。本研究のセキュリティでは、データの盗聴および改ざんに対して2つの鍵を使ってデータの暗号化と復号を行う SSL の暗号方式を採用し、成り済ましに対して SSL の重要な機能であるデジタル証明書を活用する。

鍵暗号方式には、共通鍵暗号方式と公開鍵暗号方式がある¹⁶⁾。共通鍵暗号方式は、通信を行う両者が同じ鍵を使用して暗号化通信を行う方式であり、暗号化および復号化の処理は速いが、共通鍵を第三者に知られることなく送ることが困難である。他方、公開鍵暗号方式は対になる2つの異なる鍵を使ってデータの暗号化と復号を行う暗号方式であり、公開鍵暗号方式では片方の鍵は他人に広く公開するため公開鍵と呼ばれ、もう片方の鍵は本人だけの所有で厳重に管理される秘密鍵と呼ばれる。公開鍵暗号方式では秘密鍵で暗号化されたデータは対応する公開鍵でしか復号できず、公開鍵で暗号化されたデータは対応する秘密鍵でしか復号できないため、公開鍵暗号方式は暗号化と復号化を同じ鍵で行う共通鍵暗号方式に比較して、鍵を安全な経路で輸送する必要がないため、鍵の管理が容易で安全性や信頼性が高い。公開鍵暗号方式の具体的な原理を図 2-8 に示す。

通信を行う一方(A)が公開鍵と秘密鍵のキーペアを作成し、公開鍵のみを通信相手(B)に送信する。公開鍵を受信したBはAの公開鍵でAに送信するファイルを暗号化し、暗号化ファイルをAに送信する。受信したAは自分の秘密鍵でBからのファイルを復号することができる。ここで、公開鍵で暗号化されたBからのファイルはAの秘密鍵でしか復号できないが、逆にAが自分の秘密鍵で暗号化したファイルはAの公開鍵を使

例えば誰でも復号できるため、Aが暗号化したファイルの機密性はない。しかし、Aの秘密鍵を知っているのはA自信のみであるため、Aの公開鍵で復号したファイルは秘密鍵を保有するA以外の誰でもないと判別できる。このように、誰でも復号できるが作成は秘密鍵を持つ本人以外の誰もできないシステムが、電子署名の原理である（図 2-9 参照）。

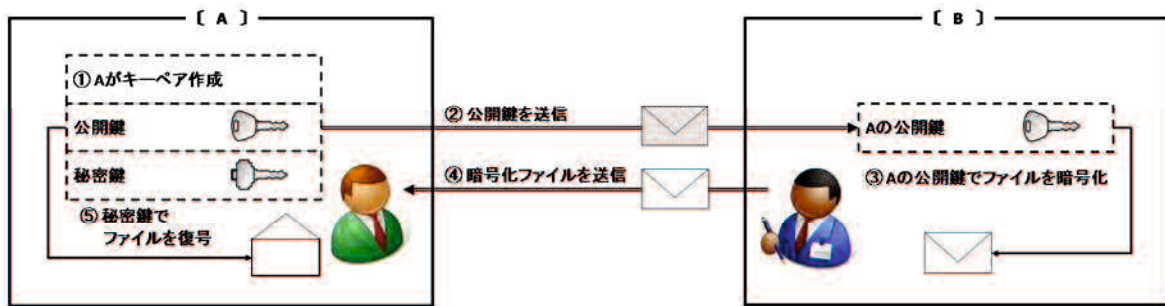


図 2-8 公開鍵暗号の原理

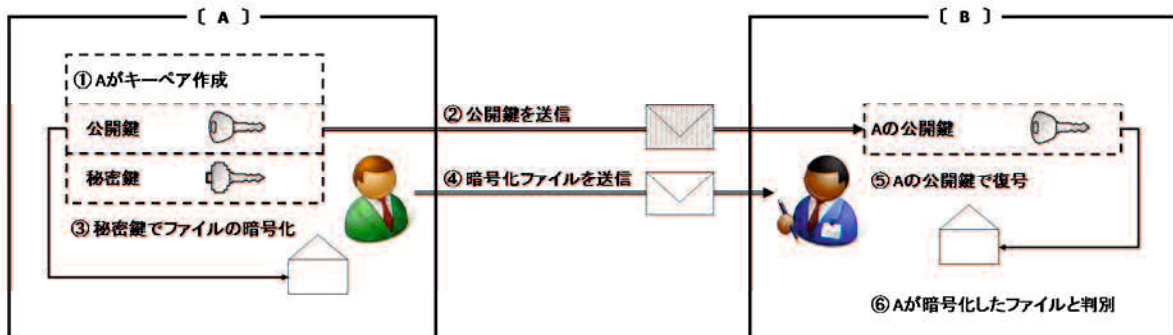


図 2-9 電子署名の原理

データが改ざんされていないことを確認するためにはデジタル署名を用いることが有効である。デジタル署名は手書きのサインや印鑑を電子的に代用し、インターネット上で利用できるようにする技術を意味し、例えば、電子商取引やネットバンキングで入出金や振込みなどで、本人であることを証明する必要があるときに、署名や印鑑の代わりに電子署名を利用することができる。データにデジタル署名を付加することにより、データの作成者（署名者）の人物を確認することと、データが改ざんされていないことが確認できる。

しかし、デジタル署名単独では提供された公開鍵が本人の公開鍵であることが確認できないため、成り済まし妨害に対しては不十分である。本研究では、通信相手が本当に間違いのない相手であることを確認する手段として、デジタル証明書の機能を利用する。デジタル証明書は第三者機関である認証機関が発行し、本人を確認するためにデジタル署名復号用の公開鍵が真正であることを証明するデータであり、デジタル署名にデジタル証明書を付属させることにより、データの改ざんや公開鍵の偽造がされていないことの確認とともに、認証機関を通してデータの作成者を証明することができるデータである^{17),18)}。図2-10に証明機関の役割と証明手順を示す。

デジタル証明書は誰でも作成できるが、デジタル証明書の信頼性は認証機関の信頼性に依存する。したがって、特に本人確認が重要となる用途では、信頼のある認証局にデジタル証明書を発行してもらうことによって、データの出所を確実にすることができる。しかし、本システムにおいては、システムの運用が学内に限定されるため、認証機関をWindows2000Serverの機能の一つである自己認証局機能を用いて構築し、証明書の管理、発行を行う。

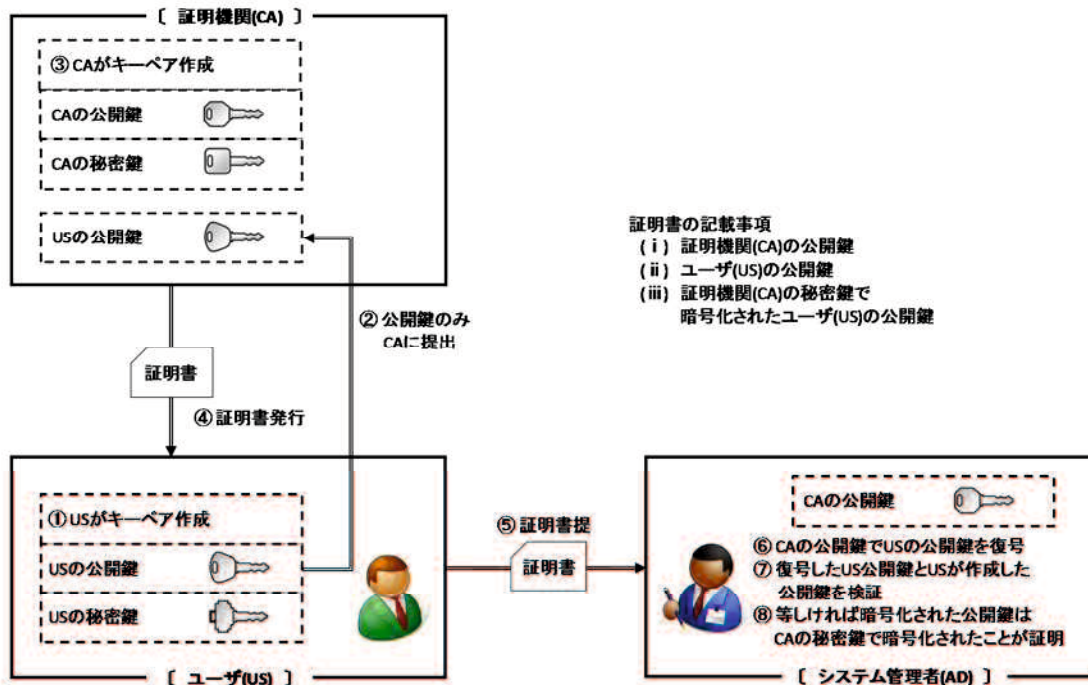


図2-10 証明機関の役割

SSLには大きく分けて、サーバ認証と通信の暗号化をする方法と、サーバ認証、クライアント認証、通信の暗号化をする方法の2種類の方法がある。前者はサーバ側に秘密鍵、公開鍵、それに対する証明書を使用する。後者はサーバ側とユーザ側に秘密鍵、公開鍵、それに対する証明書を用意する必要がある。本研究ではインターネットモニタリングシステムでは特にクライアントの身分証明に重点を置いているので、後者の方式を選択した。

本研究におけるサーバ、クライアント、認証機関間で行われる証明書の発行、手順および、認証、通信の暗号化手順を図2-11、図2-12に示す。

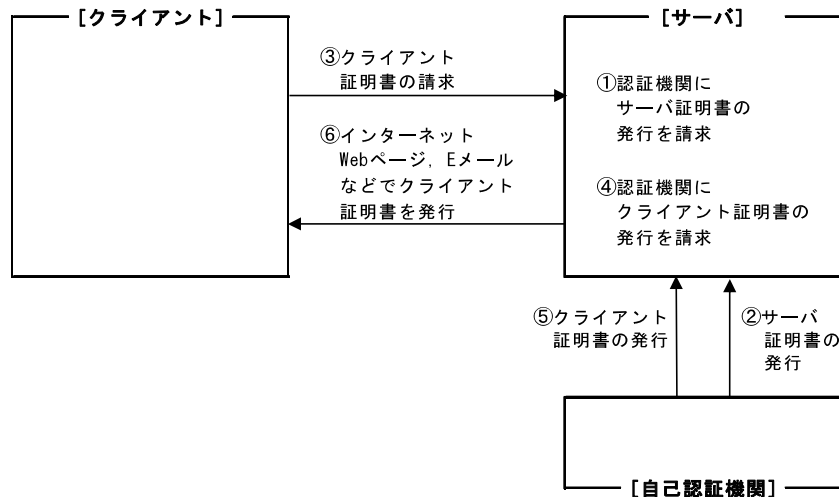


図2-11 証明書発行の手順

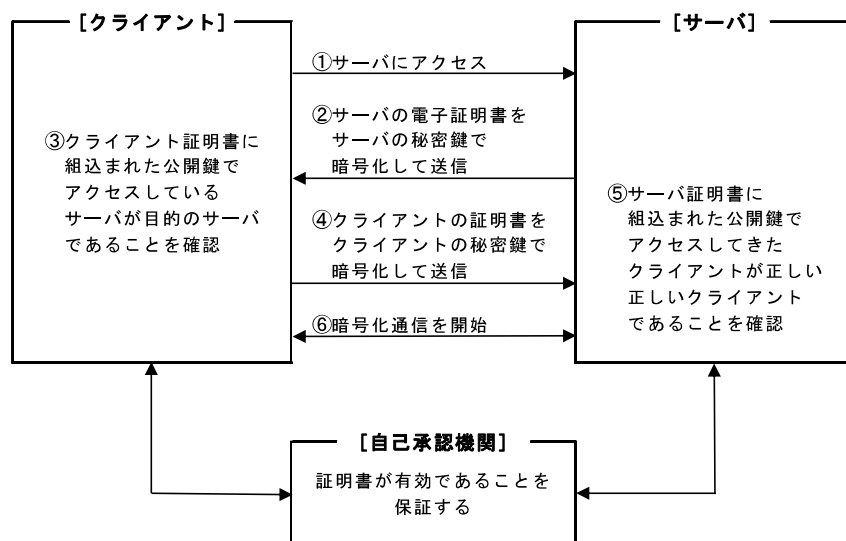


図2-12 認証、通信の暗号化手順

2.3.3 認証の多重化

本モニタリングシステムは、インターネットを利用したシステムであり、最も機密性が高い調査の遠隔操作から、調査結果の加工や活用、最も機密性が低い閲覧までシステムの機密性の深度は異なる。モニタリングシステムの延長線上に橋梁の制御もありうることを考えれば、機密性の高低によりクライアントの進入範囲を規制することが重要である。

本研究では、クライアントをシステムとの関係により、一般ユーザ、関係者、管理者に分類し、各々に GUEST 権限、MEMBERS 権限、ADMINISTRATORS 権限を認めることとし、権限の強弱に従って前述の SSL によるクライアント認証、通信の暗号化に加えて、パスワード認証の多重化を行う。ここでは、強い権限を持つ層に移動するたびにパスワードの入力を求め、最高の権限を持つ ADMINISTRATORS 権限の機能を使用するには3回のパスワードの入力を要請する。

GUEST 権限では“データの閲覧”を行う権限が与えられ、MEMBERS 権限では“データの活用”までを行う権限が与えられ、ADMINISTRATORS 権限では“計測の遠隔操作”を行うことができる権限までを与えられている。各権限と使用を許容する IMS の実務的な関連機能を以下のように規定する。

- ・ GUEST 権限；日程確認，データ検索，グラフ表示機能
- ・ MEMBERS 権限；GUEST 権限，共有ファイルサーバ，ファイルアップロード機能
- ・ ADMINISTRATORS 権限；MEMBERS 権限，計測の遠隔操作機能

IMS における各権限の概念図を図 2-13 に示す。

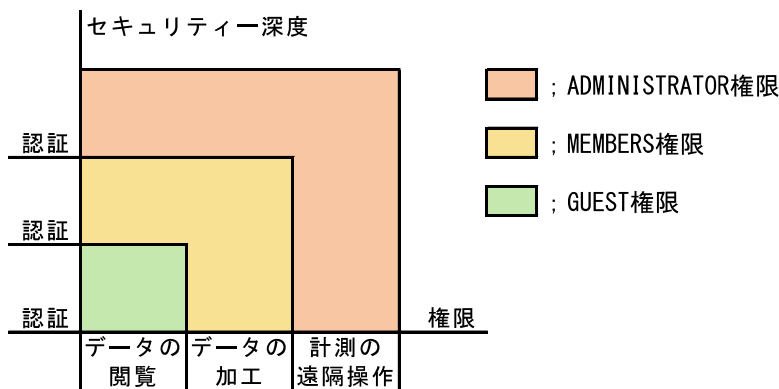


図 2 - 13 各権限の概念図

2.4 モニタリングシステムの検証

前項で開発したスタンドアロンモニタリングシステム (SMS) , インターネットモニタリングシステム (IMS) および遠隔操作モニタリングシステム (RMS) の実用性を検証するために, これ等のシステムを斜張橋模型に適用してモニタリングの実験を行う。斜張橋模型の諸元, 実験に使用したセンサの種類と配置, IMSを適用した計測結果を示して, 開発したシステムの実用性を検証する。

2.4.1 斜張橋模型の諸元とセンサの概要

モニタリング実験の対象にした斜張橋模型の外観を写真2-1, 斜張橋模型の諸元ならびに計測に使用するセンサの位置および種類を図2-14に示す。また, 斜張橋模型に設置されているセンサとその計測項目を表2-1に示す。

図2-14の計測センサは次の通りである。主桁の変位計A~Jは主桁の鉛直方向の変位を計測し, 主塔先端の変位計は主塔の橋軸方向の変位を計測する。①~⑬は実験で載荷する活荷重の載荷位置を示す。斜張橋模型の4本の斜材ケーブルには各々鋼板を取り付け, 鋼板の表裏にa-1~d-2に示す8枚のひずみゲージを添付して, それぞれの斜材ケーブルの応力と張力を計測する。また, 斜張橋模型付近に熱電対を設置して, 周辺の気温を計測する。

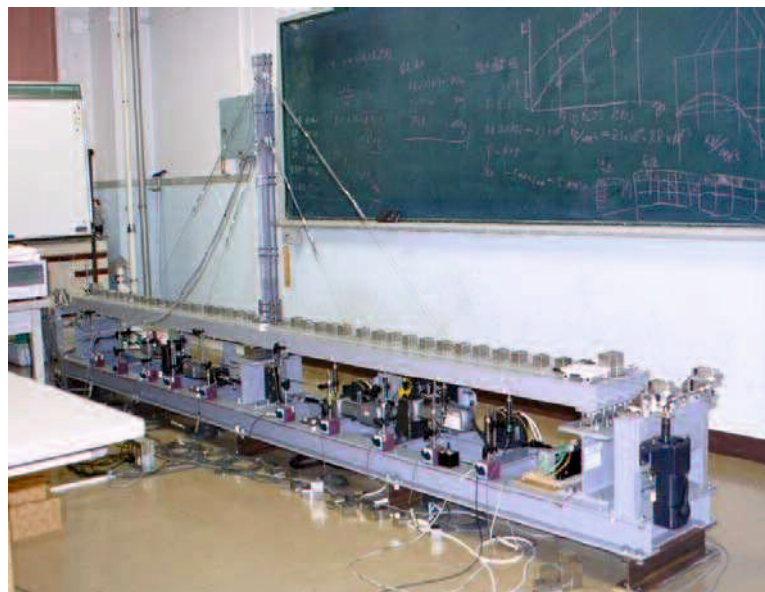


写真 2-1 モニタリングに使用する斜張橋模型の外観

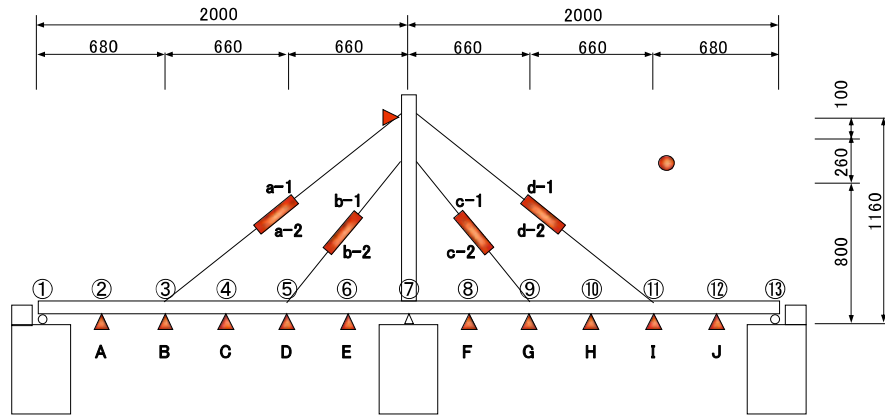
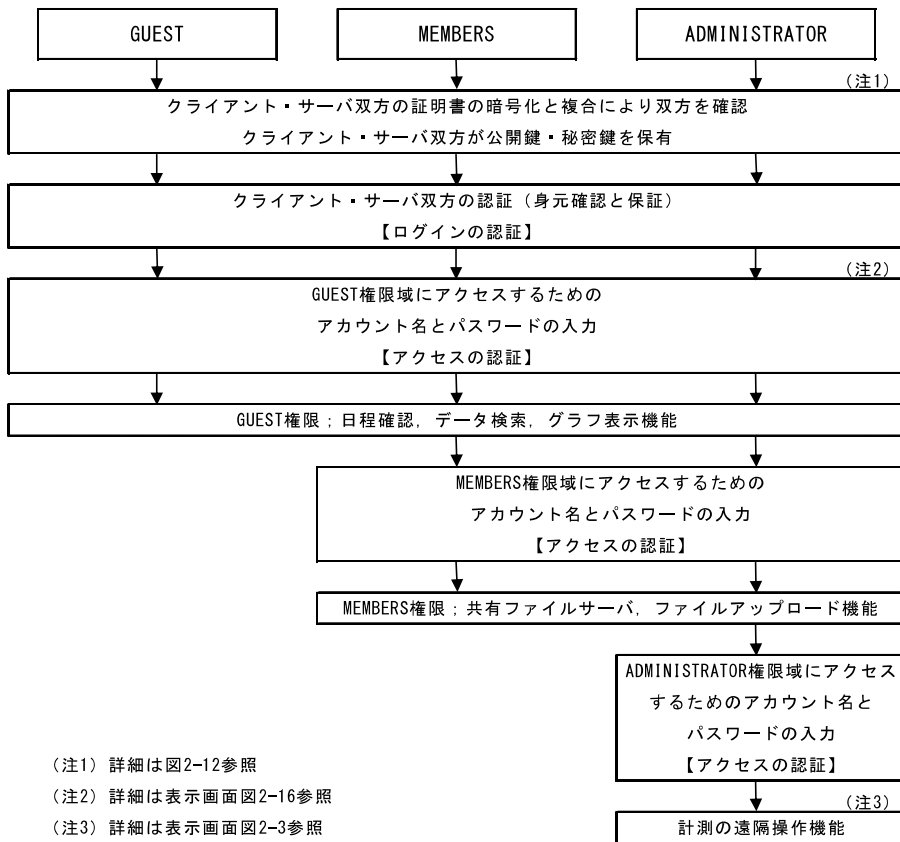


図 2-14 斜張橋模型の諸元と計測センサ

表 2-1 斜張橋模型の諸元と計測センサ

使用センサ		計測項目	点数
熱電対	●	気温	1
ひずみゲージ	↗	ケーブル張力・応力	4
変位計	▶	主塔変位	1
	▲	主桁変位	10



(注1) 詳細は図2-12参照
 (注2) 詳細は表示画面図2-16参照
 (注3) 詳細は表示画面図2-3参照

図 2-15 クライアントのシステム進入の手順

2.4.2 実験手順とシステム画面

斜張橋模型のモニタリング実験の実験手順の概要およびシステムの実行画面をそれぞれ図2-15および図2-16～図2-20に示す。

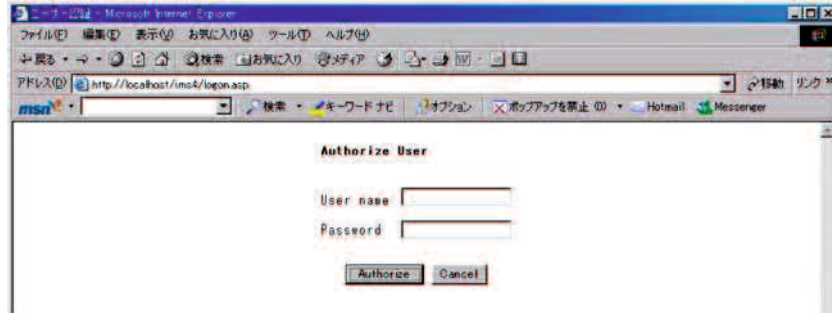


図 2-16 ユーザ認証画面

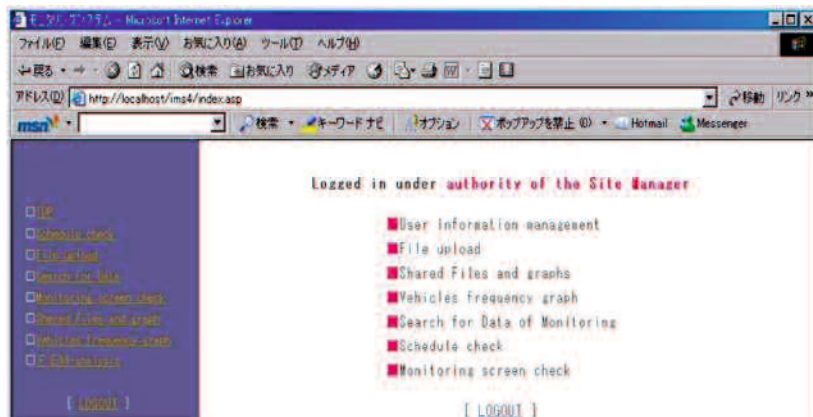


図 2-17 メニューとアクセス権によるコンテンツ表示

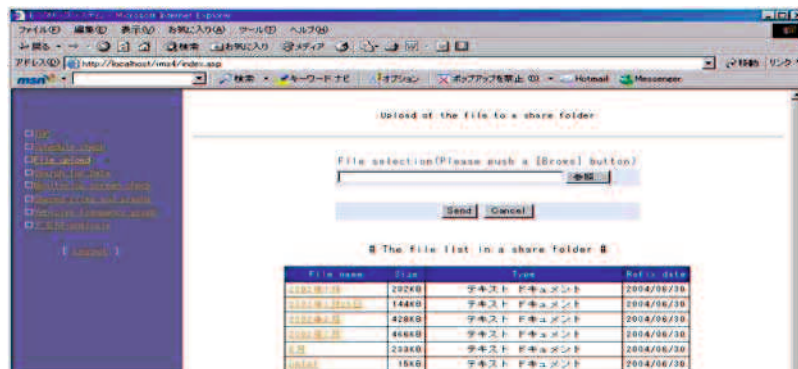


図 2-18 共有フォルダ内の計測データファイルとファイル情報

クライアントがサーバにログインするための手順は図2-15に示すが、詳細な手順については図2-12に示す通りである。ログインが承認されたクライアントは、アクセス権の有無を確認するための画面図2-16に従いアカウント名とパスワードの入力により、権利が確認されたユーザのみが当ホームページに進入することが許可される。

図2-17の画面は、本IMSのメニューとログインが認められたユーザに対するコンテンツの表示内容（画面右）である。画面左に表示されるメニューで、[共有ファイルとそのグラフ]を選択すると、図2-18の画面が表示される。図2-18の画面は共有フォルダにある計測データファイル名およびそのファイル情報を示す。画面表示された計測データファイルの情報からグラフ化したいファイルを選択すると、図2-19の画面が表示される。図2-19は斜張橋模型のモニタリング結果であり、グラフにはモニタリング時の気温、斜張橋模型のケーブルひずみ、ケーブル張力、主塔変位、主桁変位が表示されている。計測データは月単位で保存しているため、他の月の計測データのグラフ表示が見たい場合は、計測データファイルを再度選択し変更すれば、同様に異なる月のグラフが表示される。

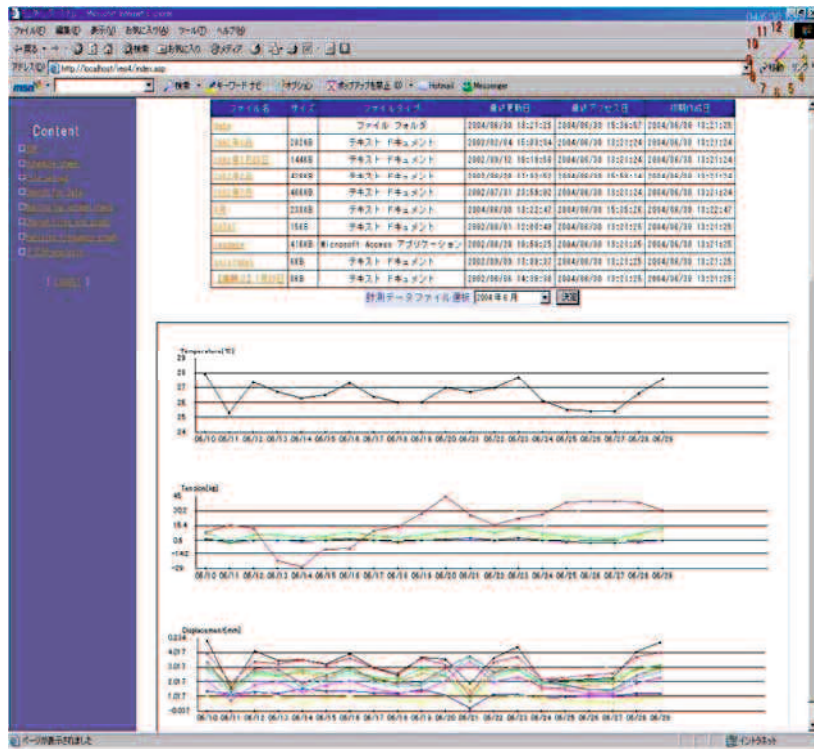


図 2-19 計測結果の計測データとグラフ表示

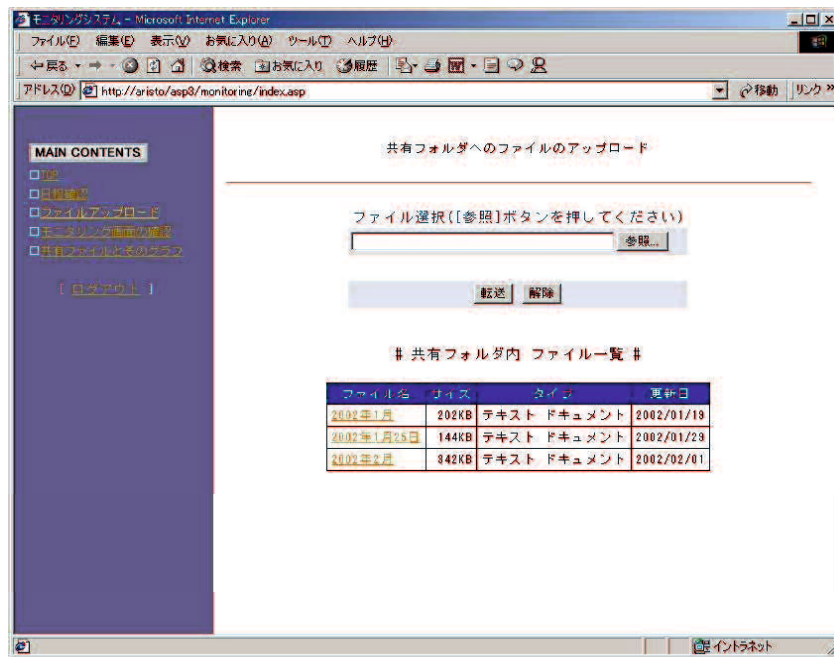


図 2-20 ファイルアップロード画面

また、ユーザが保有している計測データファイルをグラフ表示させたい時は、ファイルアップロード機能を用いる。共有フォルダへのファイルをアップロードさせたい場合は、画面左のメニューの[ファイルアップロード]を選択して図2-20の画面を表示させ、参照ボタンのダイアログを使用してユーザのPC内にあるファイルを選択して、転送ボタンを選択すれば自動的に共有フォルダにファイルがアップロードされる。

2.5 結論

センサ、計測器、計測用PC、GP-IBインターフェイス、計測操作プログラムで構成された橋梁の変状を計測するために主として現場に設置されるスタンドアロンモニタリングシステム (SMS) , インターネットを活用して遠隔地から計測結果路閲覧や加工ができるインターネットモニタリングシステム (IMS) , 両システムを統合して遠隔地から計測の指令ならびに計測結果の閲覧ができる双方向の遠隔操作モニタリングシステム (RMS) を開発し、これ等のシステムを斜張橋模型に適用して実用性の検証実験を行った。計測の手順と内容ならびにクライアントの認証などのシステムは、計画通り動作することが確認できた。特に自動化を図ったRMSについては、過去に例の無い新規シ

テムの開発であったが、システムの信頼性と有用性を確認することができた。

本研究の主要な結果と今後の課題は次の通りである。

1. SMSは計測開始日時と終了日時ならびに計測間隔を設定すれば、自動的に計測して計測結果を図表化して保存できる。SMSの活用により、計測の無人化と自動化による省力化ならびにリアルタイム計測を可能にした。
 2. PHSまたはLANを活用して、遠隔地からSMSを操作して橋梁をモニタリングする遠隔操作モニタリングシステム（RMS）は、時間と場所に制約されずにモニタリングすることを可能にしたのみならず、本システムに多数の橋梁関係者が同時にアクセスすることができ、最新の計測データを共用ならびに活用することを可能にした。
 3. 本RMSを適用した橋梁模型の応力、変位などのモニタリングにおいては、クライアントからの指示ができることによりモニタリングが有効に機能し、維持管理などのためのデータは従来に比較して容易に獲得できるものと推定できる。
 4. 維持管理に携わる専門技術者不足、多数の橋梁の集中的なモニタリング要請ならびにモニタリングのコスト低減が叫ばれる環境の中では、今後、下記の課題を克服することが重要である。
 - (a) 同一の橋梁管理者が、複数の橋梁を同時にモニタリングすることが求められる。本研究では単一橋梁に対してのシステム開発であったが、複数橋梁を対象にしたシステムを開発する。
 - (b) 現場での電源が懸念される施設であるため、橋梁現地でのソーラー発電や風力発電による電源確保ならびに無線充電の開発、計測機器やセンサおよびデータ処理装置や通信装置の省電力のためのコンパクト化や開発が望まれる。
 - (c) モニタリングは長期に及ぶことがあり、調査中にシステム、特にハード部分のトラブルは容易に推定される所である。モニタリングに空白が発生しないように、予め故障の検知機能を備えたモニタリングシステムの開発が必要である。
 - (d) 限られた財政の中で、多数の橋梁を集中的にモニタリングするための最大の課題は費用の低減である。設置と撤去に要する時間と労力の低減化とともにシステムの維持管理費の低減が重要であり、温度や湿度の対策を始め地震や台風ならびに落雷や誘雷などの自然災害の回避、計測センサや計測システムの無線化と省電力化などに対して、異分野の技術を融合した研究開発が望まれる。
-

【第2章 研究成果と将来展望】

本研究で開発した SMS, IMS, および RMS により, 遠隔地からでもモニタリングの指令ができ, 同時にモニタリング結果の活用や管理ができる過去に例のない双方向のモニタリングシステムを完成することができた. 無人化と自動化を実現した本システムの活用により, 限られた橋梁管理者が多数の橋梁の多様な要因を同時にモニタリングすることが可能になり, モニタリングの汎用が飛躍的に進歩することが期待される.

モニタリングシステムはセンサや計測機器および通信機器などで構成されているが, システムの初期費用および運用負担の軽減が大きな課題になっている. ハードウェアにおける課題としては, 現場での電源の確保, センサや通信の無線化, 機器のコンパクト化, 全システムの省電力化, センサや機器の低廉化などが挙げられるが, 土木分野のみの努力では限界がある. 土木分野からは異分野である我が国の電子産業や通信産業は目覚ましい進歩を遂げていることを認識し, これらの異分野技術と土木分野の知見や経験に立脚した土木技術との融合を図ることができれば, 課題の克服に対する障害は少ない. また, ソフトウェアにおける課題としては, センサや機器の省電力化や送受信データの重要性の識別などを勘案したシステムの構築が挙げられるが, 上記のハードウェアとの連携により課題の解決を図ることができる.

近い将来, 例えば本研究のモニタリングシステムを基盤にしたワイヤレスセンサネットワーク形成による橋梁のモニタリングも決して夢ではない.

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ, 国道(国管理)の維持管理に関する検討会参考資料, 老朽化対策参考資料.
- 2) 内閣官房「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」参考資料, 平成25年10月16日 : http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/dai1/sankou.
- 3) 土木学会 : 鋼橋における劣化現象と損傷の評価, 鋼構造シリーズ 7, 1996.
- 4) 安部允, 杉舘政雄, 小芝明弘 : 鋼橋の点検・診断用システムと機器, 橋梁と基礎, 31 巻 8 号, pp. 173-179, 1997. 8.
- 5) 日本再興戦略「戦略市場創造プラン(ロードマップ)」平成25年6月14日 :

- http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/rm_jpn.pdf.
- 6) 山本鎮男：ヘルスマニタリング，共立出版，1999.8.
 - 7) 安部 允，杉館政雄，小芝明弘：鋼橋の点検・診断用システムと機器，橋梁と基礎，31巻8号，pp.173-179，1997.8.
 - 8) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita, ; An Internet Para-Stressing System for Intelligent Bridge, Technical Notes, The MONITOR, International Society forStructural Health Monitoring of Intelligent (ISHMII), Vol.3,Issue2,pp.6-9.
 - 9) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita and Joan R Casas, ; Development of an integrated remote monitoring technique and its application to para-stressing bridge system. International Journal of Advanced Structural Engineering 2013,5:28, Springer,Vol.5,No.28,pp.1-8.
 - 10) BanFu Yan, Minoru Motoshita, Hideaki Nakamura , Ayaho Miyamoto ; Development of Remote Monitoring System for BridgeEvaluation,, Journal of Applied Mechanics Vol.5 (August 2002) JSCE.
 - 11) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita, Banfu Yan ; Internet Monitoring System for Bridge Performance Evaluation,Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures , American Society of Civil Engineers (ASCE), 2003.3, pp.362-373.
 - 12) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita, ; An Integrated Internet Monitoring System for Bridge Management , Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, ISIS CANADA RESEARCH NETWORK, pp.573-584.
 - 13) TDS-303 データロガー；製品総合カタログ 2005-2006，東京測器研究所，pp. 304～306.
 - 14) 株式会社東京測器研究所：製品総合カタログ 2003-2004.
 - 15) Windows Server で学ぶサーバ OS 入門「Windows Server を認証局しよう」：
<http://ascii.jp/elem/000/000/533755/>.
 - 16) 暗号入門：<http://dev.sbins.co.jp/cryptography/cryptography01.html>～[011.html](http://dev.sbins.co.jp/cryptography/cryptography011.html).
 - 17) デジタル証明書の仕組み：<http://www.infraexpert.com/study/security6.html>.
 - 18) 認証局運用ガイドライン 1.0 版，1998，電子商取引実証推進協議会.
-

第3章 インテリジェントブリッジの開発

3.1 はじめに

我が国の橋梁設計に関する現行の技術基準では、すべての橋梁に対して画一的な活荷重を適用して設計するように規定しているために、交通量の少ない橋梁に対しても供用中に稀にしか走行することがない大型車両の荷重を適用して設計している。斜張橋やアーチ橋のような長支間の特殊橋においては通行頻度が少ない過大な活荷重を適用している可能性があり、中小支間の橋梁においても通常は技術基準が規定する活荷重が載荷されることは極めて少なく、支間の大小に関わらず基準通りの適用荷重は過大になっていると考えられる。通常に走行する車両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車両の荷重に対して、構造的に過剰な荷重を相殺するように橋梁の性能を制御できれば、予期せぬ大型活荷重対しても橋梁の安全性と信頼性が保証できる²⁾⁻⁵⁾。

探知と感知機能、判断と命令機能、および制御機能で構成されているインテリジェントブリッジでは、橋梁の各部材に設置されたセンサ機能で部材の変形や変位など橋梁の状態を監視し、プロセッサ機能で各部材の危険性や安全性を自己診断して、制御装置であるアクチュエータを起動させ、異常荷重による橋梁のひずみや変形による応力を相殺して設計荷重による変状の状態に復元させることが最大の使命である。感知機能は荷重の検知および構造物の状態の確認の役割を担い⁶⁾、判断命令機能は制御処置の要否を判断し、必要な場合は制御機能へ制御命令を発信する。制御機能は構造物に必要な制御力を作用させるために、アクチュエータや周辺装置を操作する役割を司る。このような機能を有するインテリジェントブリッジにおける制御に関する研究は見受けられるが⁷⁾、まだ理論的な取組の範囲であり、FEMを使ったプロトタイプの制御手法（概念）の域を出ていない⁸⁾。インテリジェントブリッジにおける制御の可能性も含めて、制御手法の実行の可能性や動作の可能性を検証する必要がある。本研究では、異常荷重として大型車両を適用して、物理的かつ数理的な制御手法で模型実験を実施する方向で、インテリ

ジェントブリッジを開発する。

上記のようなシステムを備えた、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、設計荷重を低減させることにより画一的な条件で設計された橋梁に比較して、建設時の材料の削減、初期建設費の低減や省資源への貢献、供用期間中の点検回数の縮減、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、ならびに将来的にはライフサイクルコストの軽減が期待できる。

3.2 インテリジェントブリッジの概要

3.2.1 インテリジェントブリッジの概念

インテリジェントブリッジの構想の基本であるパラストレスング (Para-stressing) は「必要な時に、必要に応じて、作用力を相殺するような力が働く」という概念⁷⁾に立脚する構造物への外力の作用に対する応答の新しい着想に基づく知能化技術の一種であり、構造物に作用する外力に対して構造部材（材料特性も含む）を自己制御する、自己完結型に自己組織化されたシステムとして構造物全体を保守する概念である。したがって、本研究においては、インテリジェントブリッジはパラストレスングに立脚した知能化された橋梁を指すこととする。

構造物のインテリジェント化は、構造物を自己組織化し、外界からの外力を自己感知、自己判断と命令および自ら制御ができるシステムの構築を指す。本研究では、遠隔操作モニタリングシステムの中のスタンドアロンモニタリングシステム (IMS) を基盤にして、知的構造物の必要条件である感知機能、判断と命令機能および制御機能の3機能を自動的に作動させるシステムを追加することにより、**図 3-1** の概念図に示すインテリジェントブリッジ (パラストレスングシステム) を開発する。

3.2.2 制御システムの概要

斜張橋模型 (**図 1-4**, **図 2-14**, **写真 2-1** 参照) を対象にして、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する。設計活荷重以上の大型活荷重が模型を通過すれば、主桁部材は大きく変位するとともに設計応力を超過する応力が発生する。大型活荷重を安全に走行させるためには、一定の制御力を作用させて変位や応力超過を抑制する必要がある。本インテリジェントブリッジは、橋梁の設計段階では通

第3章 インテリジェントブリッジの開発

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载荷した場合に、橋梁を安全な状態に制御することを想定して、制御システムとしては、大型活荷重が斜張橋模型に载荷された場合の主桁変位を設計荷重による主桁変位まで回復させるシステムにし、主桁変位を抑制するための制御は斜材ケーブルの緊張によって主桁変位を減少させる方法を採用する。

本研究で開発したインテリジェントブリッジの構造諸元と各機能およびセンサの位置などの概要は写真 2-1、図 3-1、表 3-1 に示す通りである。

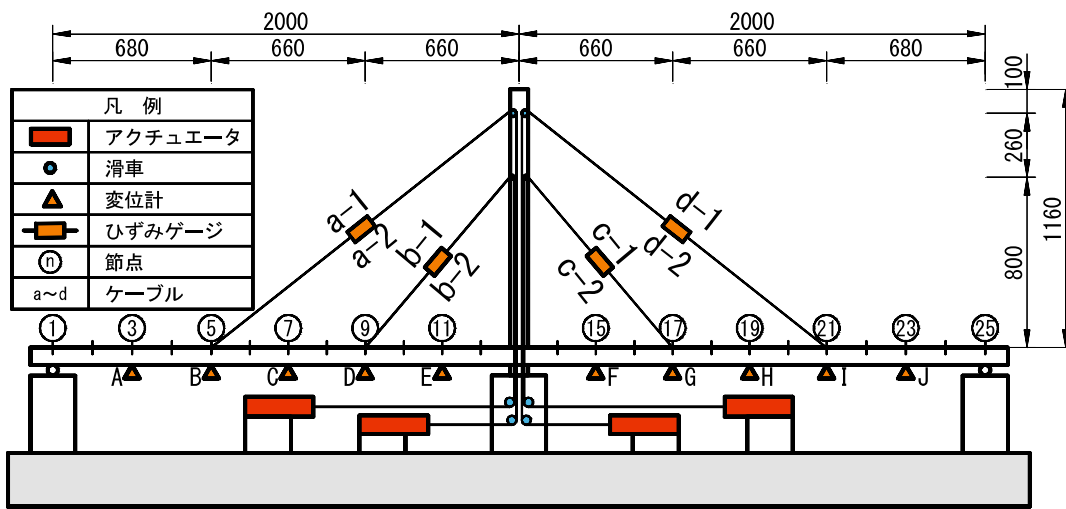


図 3-1 斜張橋模型の諸元

表 3-1 使用センサと計測項目

使用センサ	計測項目	計測点数
熱電対	気温	1
ひずみゲージ	ケーブル張力・応力	8
変位計	主桁変位	10

感知機能；感知機能は橋梁の状態を正確に把握する機能であり、スタンドアロンモニタリングシステムで構築したセンサを活用する。主桁および主塔の変位は各部材に設置された変位計で計測する。斜材ケーブルの張力は斜材ケーブルに設置されたひずみゲージが計測するひずみを元に斜材ケーブルの応力と張力を算出する。斜材ケーブルには表裏にひずみゲージを貼り付けた鋼板を設置（写真 3-2 参照）し、表裏で計測されたひずみの平均を当該斜材ケーブルのひずみとする。

判断機能；大型活荷重による主桁変位を設計活荷重載荷時の変位まで復元させるための斜材ケーブルの張力は，FEM 解析を活用して開発した制御力算出システムにより計測サーバで算出し，最適制御力として斜材ケーブルに作用させる．同時に，感知機能で計測された斜材ケーブルの張力と算出された最適制御力を比較して，斜材ケーブルの張力が最適制御力に一致するまで，制御機能から制御機器（動作機能）への指令は繰り返されるが，その指令を判断する機能も兼ね備える．最適制御力算出システムの詳細については，次節に記述する．

制御動作機能；制御動作機能は活荷重による超過荷重を相殺するために橋梁に設置されたアクチュエータを使って，斜材ケーブルの緊張と緩和により斜材ケーブルの張力を調整する．斜張橋模型においては，斜材ケーブルを緊張するための制御装置（アクチュエータ）は，モーターと直線動作機構を一体化した電動シリンダ¹⁰⁾を採用する．また，当電動シリンダは外部パルスによる制御が可能であるという特徴を活かして，パルス発信ボード¹¹⁾を介して計測用サーバから外部パルスを発信し，電動シリンダに駆動命令を送信できるシステムにする．写真3-1に電動シリンダとパルス発信ボードを示す．



(1) 電動シリンダ (EZHP6A-05A)



(2) パルス発信ボード

写真3-1 制御動作機能

斜材ケーブルの張力算定；斜材ケーブルは写真3-2に示すように，鋼より線を使用したため，ケーブルに直接ひずみゲージを貼り付けることは困難かつ合理的でない．当橋梁模型では写真のように斜材ケーブルの中間にひずみゲージを貼り付けた鋼板を設置し，貼付したひずみゲージにより斜材ケーブルの張力を算出する．本研究では，制御実験に先立ち図3-2のように斜材ケーブルに張力を作用させて張力とひずみの関係を把握するキャリブレーションを行い，次式により斜材ケーブルの計測張力を算出する．キャリブレーションにおける各斜材ケーブルの張力とひずみの関係を図3-2に示す．

$$P = k \times \xi \quad (3-1)$$

ここで、

P : 斜材ケーブルの張力[N]

ξ : ケーブルに設置したひずみゲージのひずみ

k : 張力と歪の比例定数 [50,000N]

斜材ケーブルの弾性係数についても、同様にキャリブレーションにより決定する。

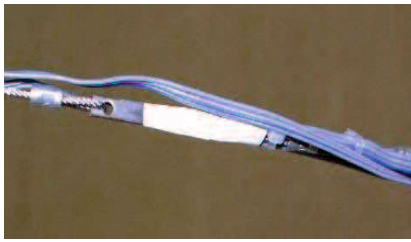


写真 3-2 ひずみゲージ貼付部

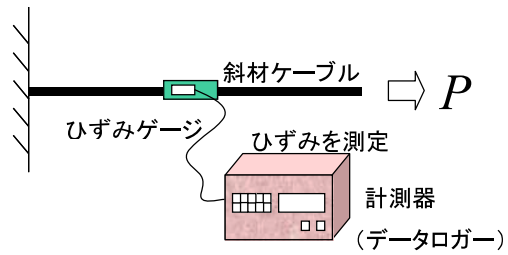
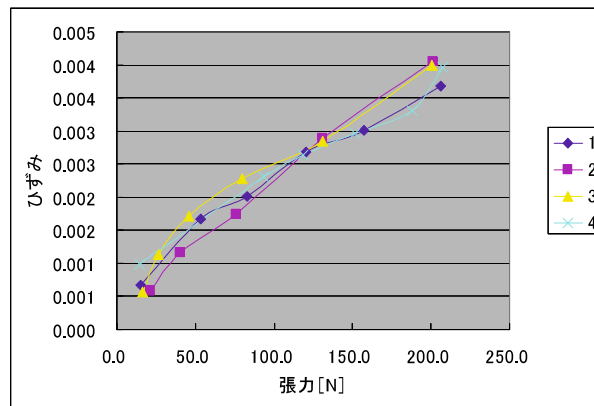


図 3-2 キャリブレーション



(注) 図中の 1~4 は斜材ケーブル番号を示す

図 3-3 各斜材ケーブルの張力とひずみの関係

3.3 制御システムの開発

3.3.1 制御力算出システムの開発

本制御力算出システムは、インテリジェントブリッジのモデルにした斜張橋モデルの斜材ケーブルの張力や各部材の変位などを解析して通常の状態を把握するとともに、大型活荷重による主桁変位を制御するために必要な制御力を算出する制御力算出システム

第3章 インテリジェントブリッジの開発

として機能する重要なシステムである。また、本システムは、橋梁制御の状態を視覚的に確認するために制御力算出中のシステム画面上に橋梁の状態を変位図として表示(図3-3参照)することも可能にした。

本研究では、大型活荷重の载荷により発生する主桁変位を、設計活荷重の载荷による主桁変位まで復元させるための最小の制御力を最適制御力と定義し、斜張橋模型を対象にして最適制御力を算出する。最適制御力は、構造解析として最も一般的かつ信頼性が高い FEM 解析を活用して本研究で開発した制御力算出システムを用いて算出する。FEM 解析は構造解析のシステムとして汎用性ならびに信頼性の高い FEM 解析を活用した「DIANA RELEASE7.2」¹²⁾などにより、開発したシステムの精度検証にも整合性が良い。具体的な FEM 解析の開発においては、斜張橋模型の構造部材を有限個に分割した節点、構成要素、各部材の特性、各支点の固定条件などの境界条件を設定し、橋梁の死荷重や载荷する活荷重などの荷重条件を想定して、制御力算出システムを開発する。

本システムでは、アクチュエータを使って斜材ケーブルを緊張することで斜張橋模型の主桁変位を復元させる手法を採用したので、制御力として斜材ケーブルの緊張力を決定することが必要である。斜張橋模型を構成する全部材の内の斜材ケーブルのみの温度を降下させれば、斜材ケーブルの張力は増加し、主桁変位は減少する。本研究では、この現象を活用して、FEM 解析により制御力を算出する。主桁変位を復元するための斜材ケーブルを緊張する手法としては、斜材ケーブルの温度を降下させる手法以外にも、斜材上端に直接張力を印加する手法が考えられる。直接印加の場合は、斜材ケーブルの上端近傍に節点を設置して、設置した節点に緊張力を印加するとともに、斜材ケーブルと主塔との接点に緊張力と同じ値の逆方向の作用力を印加することになる。当手法の場合、印加の方向を斜材ケーブルの方向に整合させる必要があり、主桁変位や主塔変位による斜材ケーブルの方向の変化を把握することが求められる。節点の増加と構造解析の付加は解析の効率を低下させることとなり、直接印加の手法は合理的とは言えない。

斜材ケーブルの温度降下の手法においては、具体的には、FEM 解析の中で、主桁の変位が所定の変位に復元するまで斜材ケーブルのみの温度降下を繰り返す、斜材ケーブルの張力を増加させ、復元すべき所定の変位に到達した時点の斜材ケーブルの張力を必要制御力とする。

下記の計算式により差分の減少を繰り返し、大型活荷重载荷時の主桁変位が設計活荷重载荷時の主桁変位と等しくなる斜材ケーブルの温度を算出する。

$$\Delta T(n) = \left\{ \frac{\Delta D(n-1)}{D_p - D_1} \right\} \times \Delta T(n-1) \quad (3-2)$$

$$\Delta Tn = \sum_{i=1}^n \Delta T(i) \quad (3-3)$$

$$\Delta D(n) = D_p - D(n) \quad (3-4)$$

ここで,

D_p : 大型活荷重を載荷時の主桁変位 (mm)

D_1 : 設計活荷重を載荷時の主桁変位 (mm)

$\Delta T(n)$: 解析で変化させる温度量 (°C)

ΔTn : 累計温度変化量 (°C)

$D(n)$: 累計温度変化に対する主桁変位 (mm)

$\Delta D(n)$: 制御を必要とする変位量 (mm)

以上の計算を $\Delta D(n) = 0$ になるまで繰り返す.

FEM 解析により ΔTn (°C) を算出して, 斜材ケーブルの温度を ΔTn (°C) 低下させたことによる斜材ケーブルの張力を最適制御力とする.

3.3.2 制御システムの開発

本研究におけるインテリジェントブリッジは, 下記の現象を自動的に制御するシステムとして開発する.

大型活荷重が橋梁に到達すれば, 橋梁の端部に設置されたロードセルで荷重強度が計測され, 計測された活荷重が設計荷重を超過する荷重強度の場合, 活荷重が橋梁に載荷されると同時に主桁変位の制御に必要な制御力を算出するためのプログラムが始動する. 大型活荷重が図 3-1 における最初の変位計測点【A ; ③】に到達した状態を想定して, 設計活荷重載荷時と同等の変位を保持するための最適制御力(斜材ケーブルの張力)を制御力算出システムにより算出する. 算出された最適制御力は直ちに制御操作を担当するアクチュエータに指令され, 斜材ケーブルを緊張または緩和する制御操作とともに, モニタリングシステムにより斜材ケーブルの張力が計測される. 斜材ケーブル張力の計測結果と最適張力を比較して, 両張力が一致するまで斜材ケーブルの緊張と緩和の操作を繰り返す. 斜材ケーブルの張力調整が完了すれば, 大型活荷重は最初の変位計測点

【A ; ③】まで移動する。大型活荷重が計測点【A ; ③】に到達すれば、次の計測点【B ; ⑤】に対して上記の過程を繰り返す。大型活荷重が橋梁の始点 (①) から終点 (②⑤) に到達するまで操作を繰り返すとともに、各制御段階における主桁変位を計測する。

以上の制御の流れを図 3-4 に示し、制御システムの処理過程を下記に示す。

ただし、本システムでは、荷重の移動を自動的に稼働させるシステムには至っていないために、システムの一部を手動で処理する。

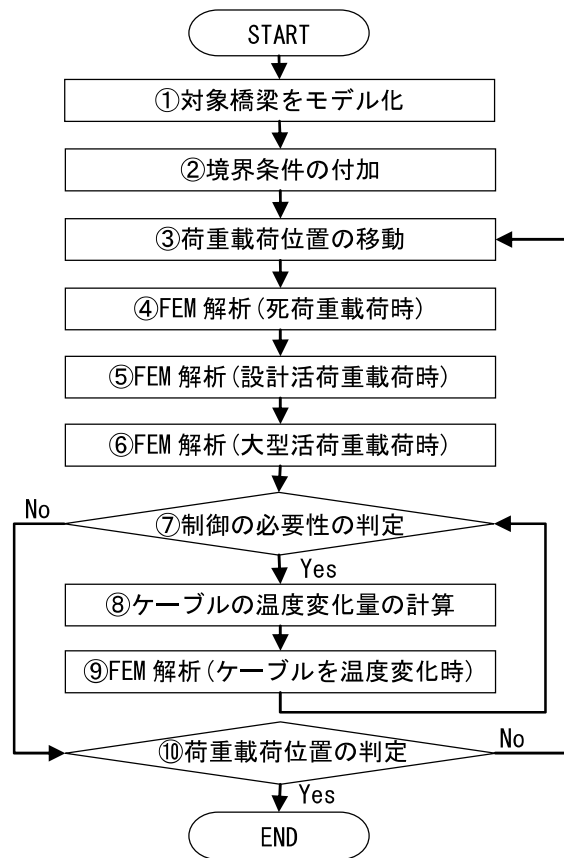


図 3-4 制御システムのフロー

① 対象橋梁のモデル化

有限要素分割を行い、対象橋梁をモデル化する。

② 境界条件の付加

モデル化された対象橋梁の支点の固定条件、死荷重および活荷重の条件を付加する。

③ 荷重載荷位置の移動

交通荷重を想定した活荷重が対象橋梁を通過することを想定して、荷重を移動させる。

④ 死荷重載荷時の FEM 解析

第3章 インテリジェントブリッジの開発

斜張橋模型に載荷する死荷重を橋梁モデルに等分布荷重で載荷してFEM解析を行う。

⑤ 設計活荷重載荷時のFEM解析

橋梁モデルに集中荷重として設計活荷重を載荷してFEM解析を行う。

⑥ 大型活荷重載荷時のFEM解析

橋梁モデルに載荷された大型活荷重（設計活荷重の約2～5倍）を集中荷重として載荷してFEM解析を行う。

⑦ 主桁の変位が設計活荷重による変位以内かどうかの判定

設計活荷重載荷時と大型活荷重載荷時の主桁部材の変位を比較し、斜材ケーブルによる変位制御の必要があると判断した場合は、最適制御力の算出に進む。

⑧ 斜材ケーブルの温度調節量の計算

斜材ケーブルによる制御が必要な場合、斜材ケーブルの温度調節量を計算する。

⑨ 斜材ケーブルの温度を調節した時のFEM解析

上記⑧で計算した温度調節量を斜材ケーブルに与え、FEM解析を行う。

⑩ 活荷重の載荷位置の判定

活荷重が橋梁モデルの終端部まで移動していれば解析を終了し、移動していなければ

③に戻り荷重の載荷位置を移動する。

制御力算出中のシステム画面上に表示される主桁変位の状況を図3-5に示す。

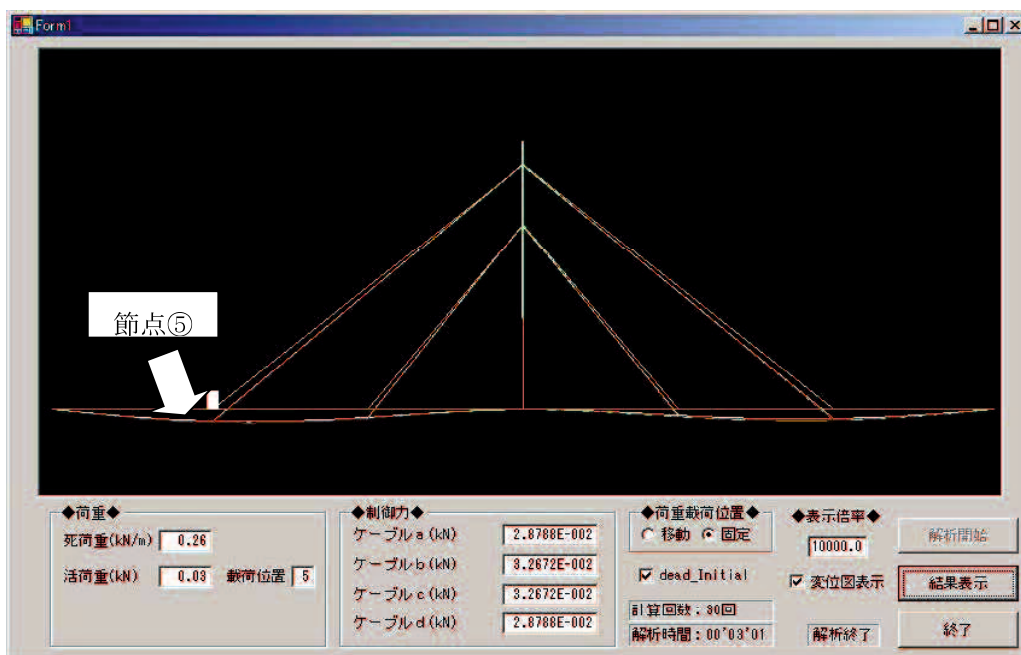


図 3-5 制御力算出システムの出力例

3.4 制御システムの検証

開発した制御力算出システムの信頼性と妥当性を検証するために、本システムの解析結果と信頼性の高い汎用プログラムを使用した解析結果の比較により解析の信頼性および本システムの解析結果と実験における計測結果の比較によりシステムの妥当性を検証する。

3.4.1 解析精度の検証

開発した制御力算出システムによる解析結果の信頼性を確認するために、汎用のFEM解析プログラムである「DIANA RELEASE7.2」¹²⁾を使用し解析結果と本システムの解析結果を比較する。死荷重載荷状態および活荷重載荷状態における主桁変位および斜材ケーブルの張力について解析結果を比較する。検証するための解析においては、死荷重は160.0N/mの等分布荷重、活荷重は20.0Nおよび50.0Nの集中荷重とし、活荷重の載荷位置は主桁部材に最も大きな変位が発生する主桁と外側の斜材ケーブルとの交点(節点⑤; 図3-1, 図3-5参照)を選定する。解析結果を表3-2, 表3-3, 表3-4に示す。

本システムと「DIANA RELEASE7.2」の解析結果では、死荷重載荷時および活荷重載荷時のいずれの場合も、解析結果にわずかな差異が見られる。主桁の鉛直方向の最大変位差は0.006 [mm] , 斜材ケーブルの最大張力差は0.100 [N] である。

差異の発生原因は2要素が考えられる。最初の原因は、主桁変位の解析結果の表記有効桁数が少なく、1/1000 [mm] 単位の有効数字3桁で出力された結果であると考えられる。次の原因は、断面の形状から予め計算した断面2次モーメントや断面積などの断面諸定数を入力する本システムと断面の縦横寸法などの部材形状を入力してプログラムのなかで断面諸定数を計算する「DIANA RELEASE7.2」との入力形式の違いによるものと考えられる。

主桁の鉛直方向の変位については、活荷重50.0N載荷時の最大変位-0.788 [mm] に対して最大の変位差0.006 [mm] , 活荷重20.0N載荷時の最大変位-0.645 [mm] に対して最大の変位差0.005 [mm] は制御力算出のための解析結果としてはほぼ影響がないと考えられる。また、斜材ケーブルの張力についても同様であり、活荷重50.0N載荷時の斜材ケーブル張力の最大値38.210 [N] に対する張力の最大差異0.100 [N] , 活荷重20.0N載荷時の斜材ケーブル張力の最大値34.700 [N] に対する張力の最大差異0.100 [N] は本制御システムの解析を行う上でほぼ影響がないと考えられる。

表 3-2 死荷重載荷時の解析結果

節点番号	鉛直変位 [mm]		変位差 [mm]	比 (本システム/DIANA)
	本システム	DIANA		
1	0.000	0.000	0.000	—
2	-0.178	-0.179	0.001	0.99
3	-0.334	-0.336	0.002	0.99
4	-0.453	-0.456	0.002	1.00
5	-0.526	-0.528	0.002	1.00
6	-0.548	-0.550	0.002	1.00
7	-0.522	-0.526	0.005	0.99
8	-0.454	-0.455	0.002	1.00
9	-0.354	-0.355	0.001	1.00
10	-0.239	-0.240	0.001	1.00
11	-0.126	-0.126	0.000	1.00
12	-0.037	-0.037	0.000	1.00
13	0.000	0.000	0.000	—
14	-0.037	-0.037	0.000	1.00
15	-0.126	-0.126	0.000	1.00
16	-0.239	-0.240	0.001	1.00
17	-0.354	-0.355	0.001	1.00
18	-0.454	-0.455	0.002	1.00
19	-0.522	-0.524	0.002	1.00
20	-0.548	-0.550	0.002	1.00
21	-0.526	-0.528	0.002	1.00
22	-0.453	-0.456	0.002	1.00
23	-0.334	-0.336	0.002	0.99
24	-0.178	-0.179	0.001	0.99
25	0.000	0.000	0.000	—
ケーブル	斜材ケーブル張力 [N]	張力差 [N]	比 (本システム/DIANA)	
a	21.020	21.120	0.100	1.00
b	32.430	32.530	0.100	1.00
c	32.430	32.530	0.100	1.00
d	21.020	21.120	0.100	1.00

表 3-3 死荷重+20.0N 載荷時の解析結果

節点番号	鉛直変位 [mm]		変位差 [mm]	比 (本システム/DIANA)
	本システム	DIANA		
1	0.000	0.000	0.000	—
2	-0.207	-0.208	0.001	0.99
3	-0.390	-0.392	0.002	1.00
4	-0.531	-0.533	0.002	1.00
5	-0.617	-0.619	0.002	1.00
6	-0.643	-0.645	0.002	1.00
7	-0.613	-0.618	0.005	0.99
8	-0.535	-0.537	0.001	1.00
9	-0.422	-0.423	0.001	1.00
10	-0.290	-0.291	0.001	1.00
11	-0.159	-0.159	0.000	1.00
12	-0.052	-0.053	0.000	1.00
13	0.000	0.000	0.000	—
14	-0.024	-0.024	0.000	1.00
15	-0.103	-0.103	0.000	1.00
16	-0.209	-0.209	0.001	1.00
17	-0.319	-0.320	0.001	1.00
18	-0.416	-0.418	0.001	1.00
19	-0.484	-0.486	0.002	1.00
20	-0.512	-0.514	0.002	1.00
21	-0.495	-0.497	0.002	1.00
22	-0.428	-0.431	0.002	0.99
23	-0.317	-0.319	0.002	0.99
24	-0.169	-0.170	0.001	0.99
25	0.000	0.000	0.000	—
ケーブル	斜材ケーブル張力 [N]	張力差 [N]	比 (本システム/DIANA)	
a	21.560	21.650	0.090	1.00
b	34.700	34.800	0.100	1.00
c	33.110	33.200	0.090	1.00
d	22.880	22.980	0.100	1.00

表 3-4 死荷重+50.0N 載荷時の解析結果

節点番号	鉛直変位 [mm]		変位差 [mm]	比 (本システム/DIANA)
	本システム	DIANA		
1	0.000	0.000	0.000	—
2	-0.251	-0.252	0.001	1.00
3	-0.473	-0.475	0.002	1.00
4	-0.646	-0.649	0.002	1.00
5	-0.753	-0.755	0.002	1.00
6	-0.785	-0.788	0.002	1.00
7	-0.750	-0.756	0.006	0.99
8	-0.658	-0.659	0.001	1.00
9	-0.523	-0.524	0.001	1.00
10	-0.366	-0.367	0.001	1.00
11	-0.208	-0.209	0.000	1.00
12	-0.076	-0.076	0.000	1.00
13	0.000	0.000	0.000	—
14	-0.005	-0.005	0.000	0.98
15	-0.068	-0.069	0.000	1.00
16	-0.163	-0.164	0.001	1.00
17	-0.266	-0.267	0.001	1.00
18	-0.360	-0.361	0.001	1.00
19	-0.428	-0.430	0.002	1.00
20	-0.459	-0.461	0.002	1.00
21	-0.448	-0.450	0.002	0.99
22	-0.391	-0.393	0.002	0.99
23	-0.290	-0.292	0.002	0.99
24	-0.155	-0.156	0.001	0.99
25	0.000	0.000	0.000	—
ケーブル	斜材ケーブル張力 [N]	張力差 [N]	比 (本システム/DIANA)	
a	22.370	22.460	0.090	1.00
b	38.110	38.210	0.100	1.00
c	34.130	34.220	0.090	1.00
d	25.670	25.770	0.100	1.00

3.4.2 システムの妥当性検証

開発した制御力算出システムの妥当性を検証するために、活荷重載荷時の斜張橋模型の主桁変位と斜材ケーブルの張力について当システム解析値と模型実験における計測値を比較する. 比較結果は図 3-6 の通りである. 比較する活荷重強度は 40N および 50N, 活荷重載荷位置は図 3-1 における節点番号⑰および⑳, それぞれの位置に各活荷重を載荷した状態における主桁各部の鉛直変位および各斜材ケーブルの張力を比較する.

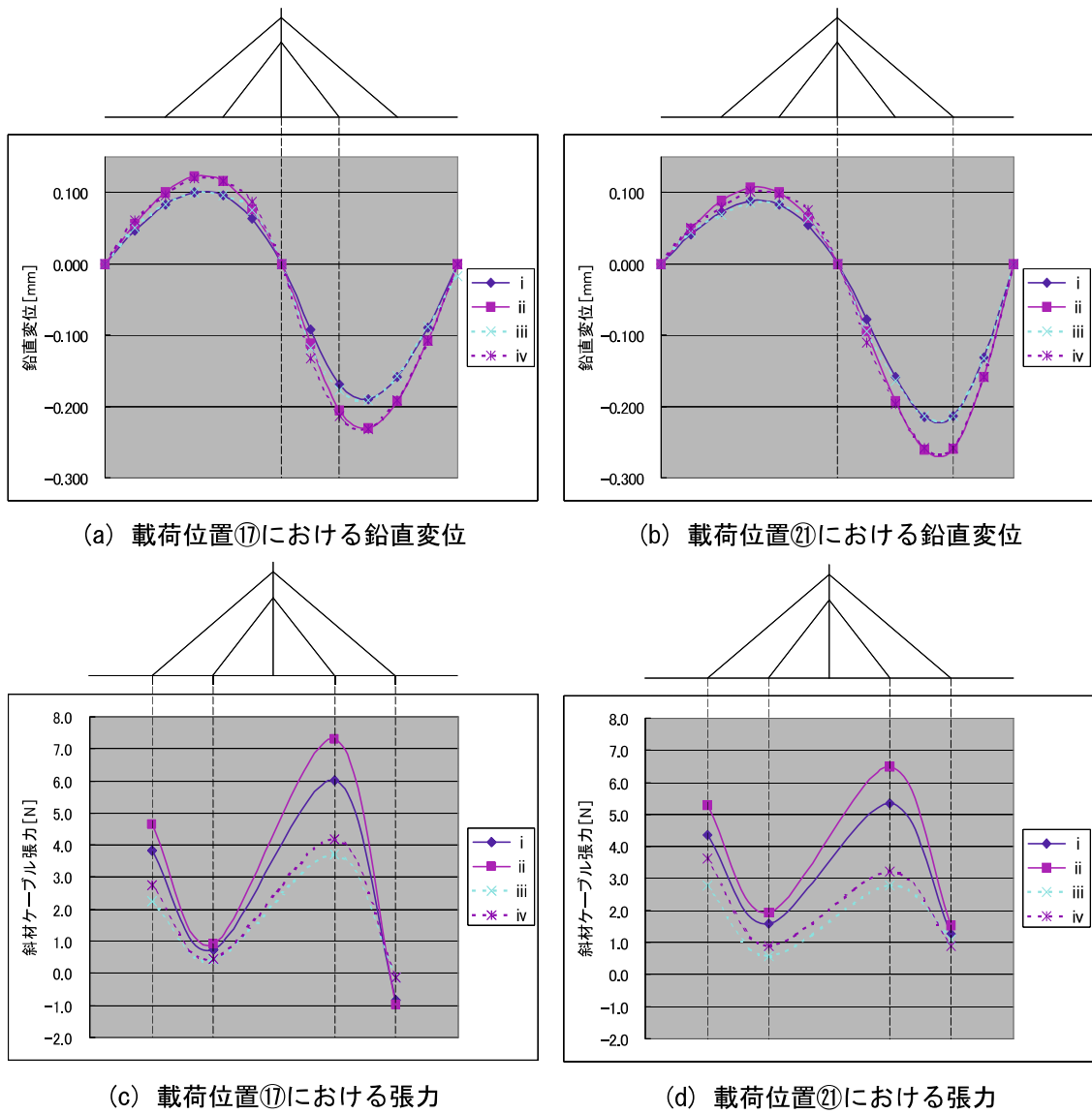


図 3-6 活荷重による主桁の鉛直変位と斜材ケーブル張力

図中の各データは下記の通りである、

- I ; 活荷重強度 40N 載荷時の解析値
- II ; 活荷重強度 50N 載荷時の解析値
- III ; 活荷重強度 40N 載荷時の計測値
- IV ; 活荷重強度 50N 載荷時の計測値

主桁変位については、活荷重の載荷位置ならびに活荷重強度に関係なく解析値と計測値は極めて良く近似している。一方、斜材ケーブルの張力については、外側のケーブル（ケーブル a および b）は解析値と計測値が比較的良く近似しているが、内側のケーブル（ケーブル c および d）の解析値は計測値の約 2 倍に近い張力を示す。

この現象は、主桁と主塔の曲げ剛性のバランスによるものと推定される。主桁の曲げ剛性に比較して主塔の曲げ剛性が低いため、主塔の変位が大きく、内側ケーブルが外側ケーブルより鈍感になったものと考えられる。更に、荷重載荷時の内側ケーブルの張力が外側ケーブルと同等の張力に達していなかった影響も考えられる。換言すれば、内側ケーブルは外側ケーブルに比較して緩んだ状況にあった結果と推定される。実験開始前に、解析により死荷重載荷状況の斜材ケーブルの張力を算出して、斜材ケーブルに死荷重時の張力を作用させておくことにより解決が可能であると考えられる。

3.5 結論

開発したインテリジェントブリッジは感知機能、判断機能、および制御機能から構成されるが、制御力を判断する最適制御力算出システムは重要な役割を司る。FEM 解析理論に基づいて開発した最適制御力算出システムの信頼性と妥当性を検証するために、汎用の FEM 解析プログラムである「DIANA RELEASE7.2」を使用した解析結果と本システムの解析結果の比較、および、本システムの解析結果と実験における計測値の比較を行った。

本章の主要な結果と今後の課題は下記の通りである。

1. 本システムの解析結果と「DIANA RELEASE7.2」を用いた解析結果には、主桁の変位および斜材ケーブルの張力ともに僅かな差異が見られるが、制御システムの中での制御機能として影響する差異ではない。よって、本システムで開発した FEM 解析は十分信頼できるシステムであると判断する。

2. 解析値と計測値との比較の結果、主桁変位は活荷重の載荷位置や活荷重強度に関係なく解析値と計測値は極めて良く近似しており本システムの妥当性は確認されるが、斜材ケーブルの張力は外側ケーブルと内側ケーブルで異なる現象が見られる。外側ケーブルでは解析値と計測値が比較的良く近似しているが、内側ケーブルの解析値は計測値の約2倍に近い張力を示す。この現象は、主桁と主塔の曲げ剛性の差によるものと推定される。主桁の曲げ剛性に比較して主塔の曲げ剛性が低いため、主塔の変位が大きく、内側ケーブルが外側ケーブルより鈍感になったものと考えられる。また、荷重載荷時に内側ケーブルが外側ケーブルに比較して緩んだ状況にあった結果と推定され、実験開始前に斜材ケーブルの張力を調整すれば解決できるものと考えられる。
3. 開発した制御力算出システムの信頼性と妥当性は確認されたが、今後に向けて下記の課題の克服が必要である。
- (a) 本研究における解析結果を有効数字3桁で表記したために、当システムと汎用プログラムとの解析結果に差異が発生したと推定される。有効数字5桁にすれば、差異は減少して結果検証の信頼性は更に明確になると考えられる。
 - (b) 当システムの検証実験において、実験の計測値の精度を向上させるためには、実験開始前に死荷重載荷相当の斜材ケーブルの張力を斜材ケーブルに作用させておく準備調整は必須である。
 - (c) インテリジェントブリッジは橋梁が更新されるまで機能する必要があるが、稼働中にシステム、特にハード部分のトラブルは容易に推定される。制御が必要な時に機能が停止しないように、予め故障の検知機能を備えたインテリジェントブリッジの開発が必要である。
 - (d) 本システムでは、荷重の移動を自動的に稼働させるシステムには至っていないためにシステムの一部を手動で処理している。今後、インテリジェントブリッジの実現に向けて、車両の移動を検知できるセンサを設置するなどの手法の採用で、全工程を自動化したシステムの開発を目標にした研究の継続が必要である。

【第3章 研究成果と将来展望】

本研究で開発した斜張橋模型のインテリジェントブリッジは、感知機能、判断機能および制御機能ともに計画通りの性能を果たし、橋梁のインテリジェント化の可能性を確認することができた。実橋梁に適用するについては、車両の移動と統合した制御機能の動作や大規模な制御力の載荷装置などの課題はあるが、制御効果が明確な構造である斜

張橋模型のインテリジェント化は実現できた。

今後は、スマート材料の活用を含めて、インテリジェントブリッジに適合する橋梁形式や橋梁規模と制御の手法や手段を体系的に構想した研究が求められる。本研究では、通常に走行する小規模車両と稀に通行する大型車両の荷重強度の差に着眼してインテリジェントブリッジを構想してきたが、我が国の現行技術基準では総重量 250kN の大型車両を対象にしたAまたはB活荷重のみの定義であり、荷重強度差によるインテリジェントブリッジの利点を主張することは困難である。性能設計が積極的に議論されている状況の中、インテリジェントブリッジも検討の俎上に載せ、構造特性の合理性を十分に議論して技術基準への導入を図ることが大切である。

また同時に、本研究が対象にした自動車荷重に拘ることなく、近年、頻繁に発生している地震や台風、津波や洪水などの自然災害を対象にしたインテリジェントブリッジの開発にも着眼すべきである。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説, I 共通編, 社団法人日本道路協会, 平成 24 年 2 月.
- 2) C. Boller, F. Chang and Y. Fujino (Ed.): Encyclopedia of Structural Health Monitoring, A John Wiley and Sons, Ltd., Publication, Vol. 1-5, 2009.
- 3) 土木学会構造工学委員会(編): 構造工学シリーズ 10, 橋梁振動モニタリングのガイドライン, (社)土木学会, 2000.12.
- 4) スマートストラクチャー研究会編: SMART STRUCTURES, p.14,1993.
- 5) S. Kim, C. Yoon and B. Kim: Structural Monitoring System based on Sensitivity Analysis and a Neural Network, Comput-Aided Civil Infrastructure Engineering, Vol.15, No.4, pp.309-318, 2000.
- 6) Yan Z, Miyamoto A, Jiang Z, Liu X (2010), An overall theoretical description of frequency slice wavelet transform, Mech System Signal Process 24(2);491-507.
- 7) S. Montes: A Global Concept for 21st Century Bridge: Para-stressing, Proceedings of FIP Symposium on Post-tensioned Concrete Structures, London, pp 739-744, 1996.
- 8) M.E. Magaña, J. Rodellar, J.R. Casas and J. Mas: Active Control of Cable-stayed Bridges, Smart Structures, NATO Science Series, Kluwer, Boston, Vol. 65, p. 65, 1998.

- 9) A. Miyamoto and M. Motoshita: An Integrated Internet Monitoring System for Bridge Maintenance, Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, ISIS Canada Research Network, Manitoba, pp. 573–584, 2004.
- 10) EZHP6A-05A 電動シリンダ;総合カタログ 2005-2006, オリエンタルモーター株式会社.
- 11) PMC-4P(PCI) パルス発信ボード;総合カタログ 2005-2006, 株式会社コンテツ.
- 12) DIANA(Finite Element Analysis) User's Manual (Dynamic Analysis, etc), TNO Building and Construction Research, Release 7, 2000.

第4章

斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジの制御実験

4.1 はじめに

斜張橋模型を対象にして、本研究で開発したインテリジェントブリッジについて制御実験を行い、斜張橋のインテリジェント化の検証および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の検証、ならびに、課題の抽出を行う。

制御実験では、感知機能、判断命令機能および制御機能を備えた斜張橋模型に開発したシステムを適用して、模型の挙動を把握するための計測、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う。具体的には大型活荷重による主桁の変位を設計活荷重載荷時の変位まで復元させるために必要な制御力を制御力算出システムで算出し、アクチュエータにより制御し、制御前後の斜材ケーブルの張力と各段階の主桁変位を計測し、解析値と計測値との比較によりインテリジェントブリッジの妥当性および制御力算出システムの精度と信頼性を検証する。

本研究においては、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した場合に橋梁を安全な状態に回復させることを想定して、大型活荷重が斜張橋模型に載荷された場合の主桁の変位を、斜材ケーブルの緊張によって設計荷重による主桁変位まで抑制させる制御システムを備えたインテリジェントブリッジを開発する。

実験の各機能は次の通りである。斜張橋模型の変位や斜材ケーブルの張力などは模型に設置された感知機能であるセンサにより計測し、判断機能として重要な要素である変位を抑制するための斜材ケーブルの張力は FEM 解析を活用して開発した制御力算出システムにより算出し、制御装置としてはモーターと直線動作機構を一体化した電動シリンダーを備えた制御装置（アクチュエータ）で斜材ケーブルを緊張する。

本研究では、大型活荷重による主桁変位と設計活荷重による主桁変位の解析値、ならびに、大型活荷重による未制御の主桁変位と斜材ケーブルの緊張による制御後の主桁変

第4章 斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジ制御実験

位の計測値を把握し、解析における活荷重強度による主桁変位の差（解析における主桁変位の復元の期待値）と計測における制御の有無状態の主桁変位の差（実験における主桁変位の復元の計測値）を比較することにより制御による復元効果を検証する。

4.2 斜張橋模型と制御実験の概要と計画

4.2.1 斜張橋模型の概要

本研究では、写真2-1に示す斜張橋模型（橋長4.0 m）を対象構造物として、インテリジェントブリッジの制御実験を行う。

斜張橋模型の形状諸元、モニタリングや計測のためのセンサ、斜材ケーブルの張力調節のための仕組みとアクチュエータの位置などの概要は図3-1に示す通りである。模型の主桁と主塔はポリカーボネート板を使用し、主桁は桁幅310mm・桁高70mmの箱形断面、主塔は2枚の橋軸方向幅80mm・直角方向50mmのI形断面で構成されている。表3-1にセンサの計測項目と計測点数を示す。図3-1におけるa-1～d-2は各斜材ケーブルの裏表に貼付けられたひずみゲージを示し、各斜材ケーブルの張力を計測する。A～Jは主桁変位を計測するための変位計、①～⑤は主桁の節点を示す。また、斜張橋模型の近傍に熱電対を設置し、模型周辺の気温を計測する。

本実験では計測計として、静的測定のみならず動的な測定も可能な、出力が大きく安定性に優れた高精度なCPD高速度変位計¹⁾を使用する。また、斜材ケーブルの緊張により主桁変位を制御するアクチュエータとしては、モーターと直線動作機構を一体化した電動シリンダ²⁾を採用し、アクチュエータを駆動させることにより主塔の頂点と下端に配置した滑車を通して斜材ケーブルに制御力を作用させる。さらに、電動シリンダは、計測用サーバからの命令で、パルス発信ボード³⁾を介して駆動する。

4.2.2 制御実験の概要

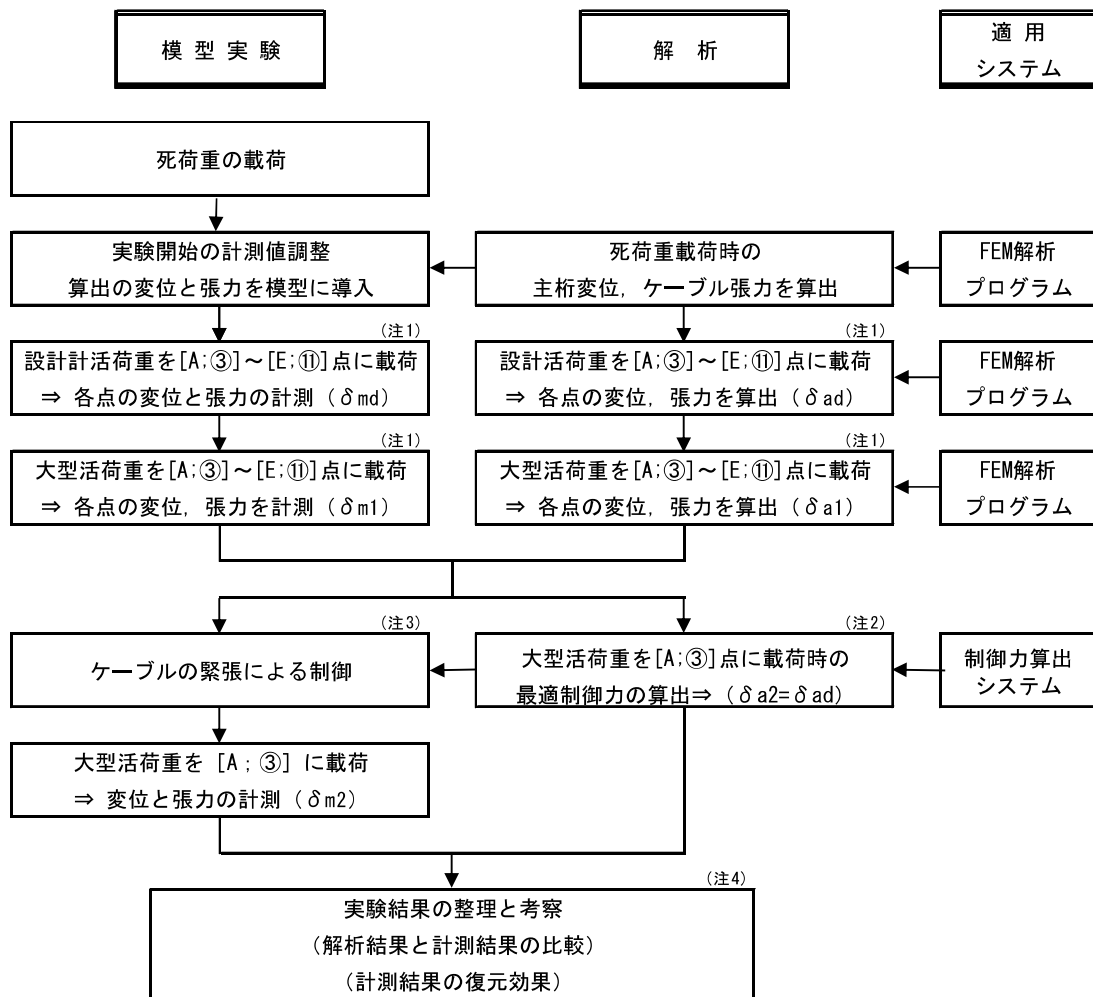
本実験では、本研究で開発したインテリジェントブリッジを対象にして大型活荷重載荷による主桁変位を制御操作により設計活荷重による主桁変位まで復元させて、その復元効果を検証することを主要な要因とする。模型実験は図4-2に示す手順で、下記のよう

に実施した。

主桁の変位を抑制するために制御力を作用させる斜材ケーブルの張力は実験における計測結果の精度に極めて多大な影響を及ぼすため、斜材ケーブルに緩みが残ることは

第4章 斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジ制御実験

許容されない。そのために、実験の計測に先立って斜材ケーブルの緩みを排除するために斜材ケーブルの張力を調整する。本実験では、斜張橋模型の主桁上に1個5Nの錘40個を等間隔で載荷し、この錘に主桁部材の自重を加えたものを斜張橋模型の死荷重とする。死荷重を載荷した状態で構造解析を行い、算出した斜材ケーブルの張力をアクチュエータにより斜材ケーブルの張力として模型に導入する。この状態の主桁の変位を主桁変位の初期値として主桁の変位計の値を零に設定する。



- (注1) 活荷重を端支点①から主塔まで移動して、各主桁変位計設置点で解析と計測を行う。
 (注2) 制御を行う点の起点側に活荷重が到達する。
 制御を行う点の起点側に活荷重が到達した時点で最適制御力算出を開始する。
 (注3) 算出された制御力は直ちに制御装置に伝達され、アクチュエータで制御する。
 (注4) 主桁変位で検証する。

図 4-2 斜張橋模型実験のフロー

実験の初期調整が終了すれば、活荷重を載荷した実験を開始する。図 3-1 に示す各主桁変位の計測点【A ; ③】～【E ; ⑩】における設計活荷重および大型活荷重を載荷し

第4章 斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジ制御実験

た状態の主桁変位および斜材ケーブルの張力を計測ならびに解析する。各々の変位の計測点における設計活荷重による計測値を δ_{md} , T_{md} , 解析値を δ_{ad} , T_{ad} とし、大型活荷重による計測値を δ_{m1} , T_{m1} , 解析値を δ_{a1} , T_{a1} とする。

大型車両が橋梁に到達すれば、橋梁の端部に設置されたロードセルで荷重強度が計測され、計測された荷重が斜張橋に載荷されれば、主桁変位の制御に必要な制御力を算出するための最適制御力算出システムが始動する。大型活荷重が最初の主桁変位計測点【A ; ③】に到達した時に、次の変位計測点【B ; ⑤】に大型活荷重が到達したときの制御に関する準備を行う。大型活荷重が【A ; ③】に到達した時点で、変位計測点【B ; ⑤】における大型活荷重による主桁変位を設計活荷重載荷時と同等の主桁変位に保持するための最適制御力（斜材ケーブルの張力）を算出するとともに制御を行う。

制御力算出システムにより算出された最適制御力は直ちに制御操作を担当するアクチュエータに指令され、斜材ケーブルを緊張または緩和する制御操作が作動するとともに、モニタリングシステムにより斜材ケーブルの張力が計測される。斜材ケーブル張力の計測結果と最適張力を比較して両張力が一致するまで斜材ケーブルの緊張と緩和の制御操作を繰り返す。斜材ケーブルの張力調整が完了すれば、制御後の状態として主桁変位 (δ_{m2}) と斜材ケーブルの張力 (T_{m2}) を計測する。

斜張橋模型実験のフロー (図 4-2) の制御操作と計測は主桁変位計測点【A ; ③】と変位計測点【B ; ⑤】に関する概要であり、同様の解析、制御、計測を主塔に近接する主桁変位計の設置点【E ; ⑪】まで繰り返す。なお、本制御実験では制御と計測結果の精度を向上させるために、上記の制御操作と計測を5回繰り返して平均値を制御による計測値とする。

4.2.3 制御実験の計画

本研究で開発したインテリジェントブリッジは感知機能、判断機能、制御機能が自動的かつ正常に作動することが最大の課題である。また、最適制御力算出システムは判断機能の最も重要な要因であり、最適制御力算出システムにはシステム自身が動作することとシステムの精度が要求される。本実験では、インテリジェントブリッジ全体の作動性と最適制御力算出システムの作動性と精度を検証する。

具体的には、FEM 解析に基づいて開発した制御力算出システムの解析結果と計測結果における主桁変位を比較することにより、判断機能としての解析の機能と精度、感知

第4章 斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジ制御実験

機能および命令機能としてのモニタリングシステムの機能と精度、制御機能としての制御装置（アクチュエータ）の機能と精度を検証する。また、当システムは異常な状態の主桁変位を正常な状態に復元させることが目的であるため、制御の前後における主桁変位の復元効率を検証することも重要な要因である

本制御実験では下記の2種類の実験を実施して、主桁変位を対象にして解析値と計測値を比較することによりシステムの機能と復元の効率を検証する。

(1) 制御実験 [I]

主桁変位を対象にした解析結果と計測結果の比較および制御による復元効率を検証するために、下記の表 4-2 に示す8ケース（Case-1～Case-8）の実験を実施する。

表 4-2 制御実験 [I] の実験ケース

設計活荷重	大型活荷重	活荷重載荷位置	
		⑤	⑨
10.0 N	40.0 N	Case-1	Case-5
	50.0 N	Case-2	Case-6
30.0 N	40.0 N	Case-3	Case-7
	50.0 N	Case-4	Case-8

(2) 制御実験 [II]

荷重の載荷位置、設計活荷重強度、大型活荷重強度、ならびに、その組み合わせにより発生する可能性がある主桁変位の復元効率の差異を検証するために、下記の表 4-3 に示す12ケース（Case-A～Case-L）の実験を実施する。

表 4-3 制御実験 [II] の実験ケース

設計活荷重	大型活荷重	活荷重載荷位置	
		⑤	⑨
10.0 N	40.0 N	Case-A	Case-G
	50.0 N	Case-B	Case-H
20.0 N	40.0 N	Case-C	Case-I
	50.0 N	Case-D	Case-J
30.0 N	40.0 N	Case-E	Case-K
	50.0 N	Case-F	Case-L

4.3 制御実験の結果と考察

4.3.1 制御実験の結果

(1) 制御実験 [I]

未制御の主桁に大型活荷重が載荷された時の変位と制御をした主桁に大型活荷重が載荷された時の主桁変位について、計測結果と解析結果の比較を図 4-3 に示す。

主桁変位の比較

図における各データは、下記の通りである。

- I. 未制御の主桁に大型活荷重を載荷した時の主桁変位の測定値 ($\delta m1$)
- II. 大型活荷重の主桁変位を設計活荷重の主桁変位に相当する変位まで制御した主桁に大型活荷重を載荷した時の主桁変位の測定値 ($\delta m2$)
- III. 未制御の主桁に大型活荷重を載荷した時の主桁変位の解析値 ($\delta a1$)
- IV. 大型活荷重の主桁変位を設計活荷重の主桁変位に相当する変位まで制御した主桁に大型活荷重を載荷した時の主桁変位の解析値 ($\delta a2$)

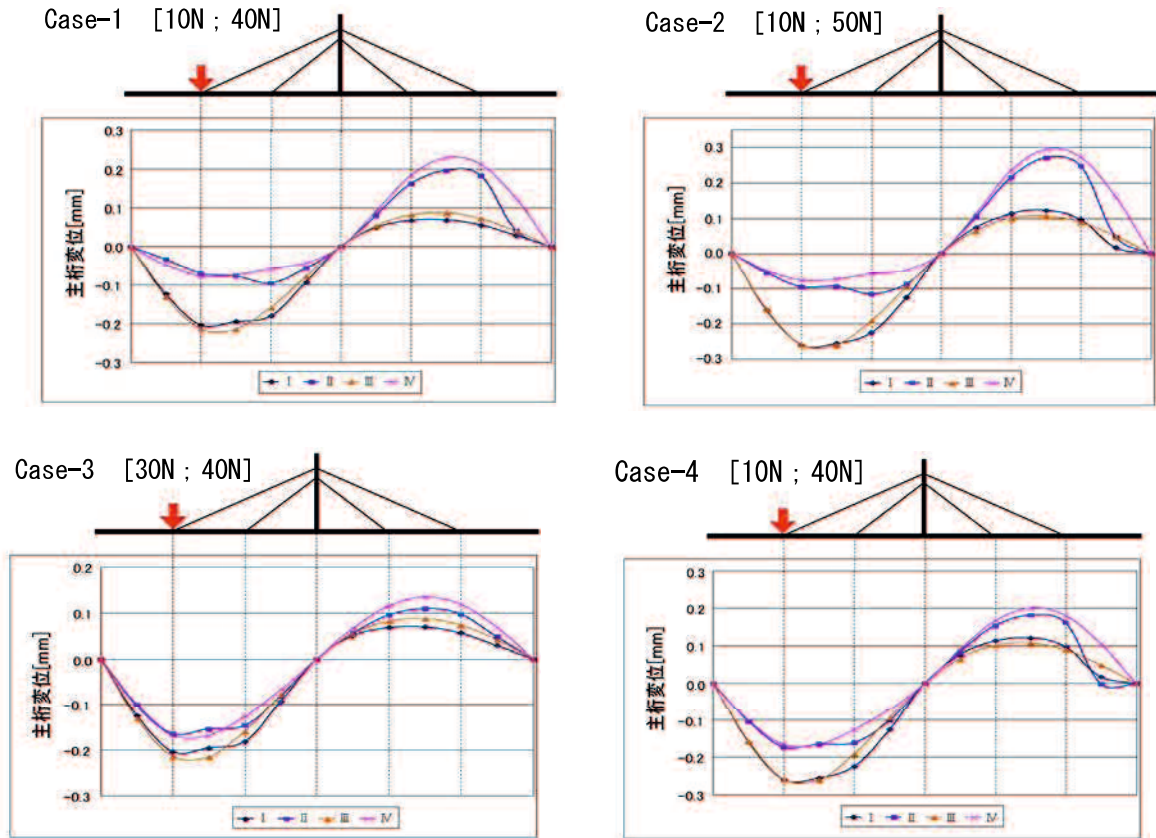


図 4-3 主桁変位の比較【その 1】

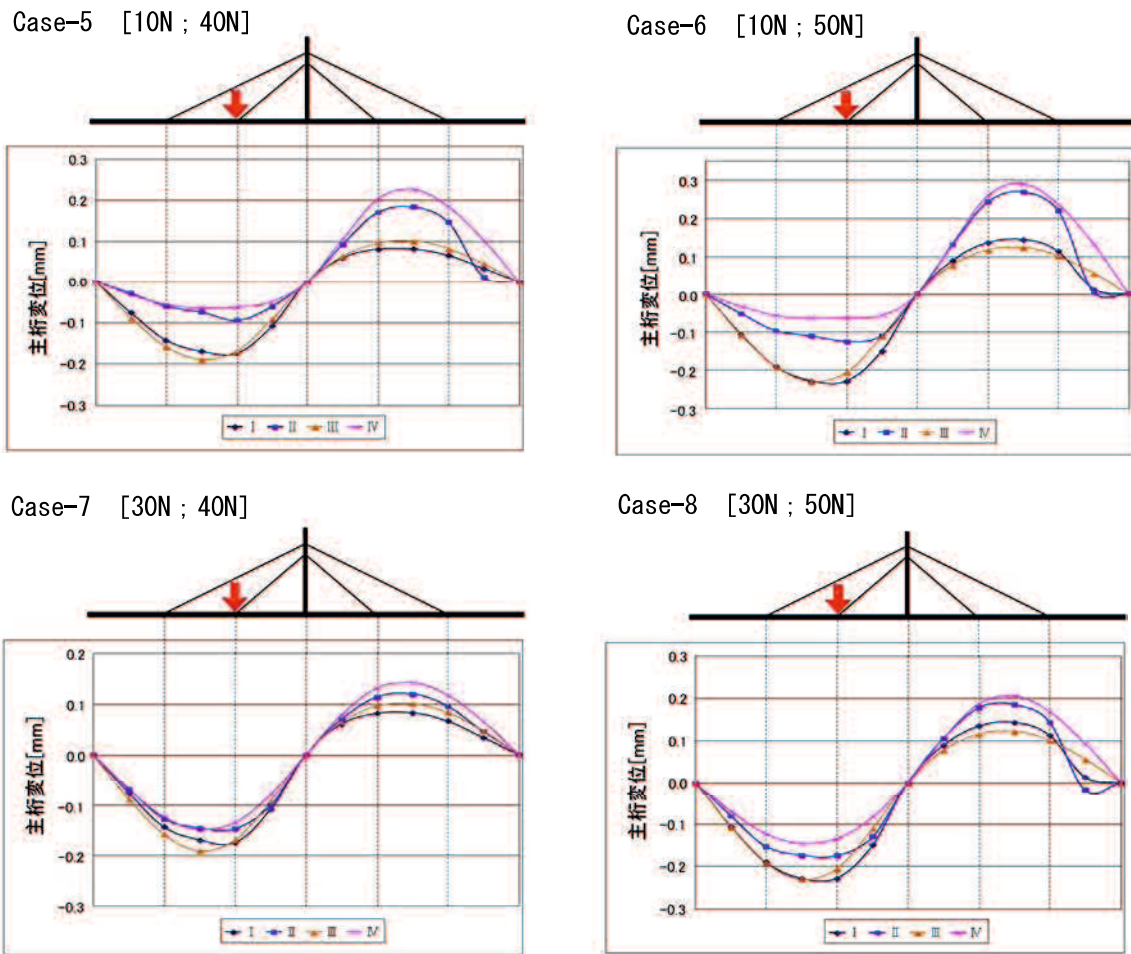


図 4-3 主桁変位の比較【その2】

復元効率

計測結果と解析結果を下記の復元率 (Rma) で比較して、制御の復元効果を検証する。

$$Rma = \frac{\delta m1 - \delta m2}{\delta a1 - \delta a2} \times 100 (\%) \quad (4-1)$$

ここで、

$\delta m1$: 未制御主桁への大型活荷重載荷時による主桁変位計測値

$\delta m2$: 制御済主桁への大型活荷重載荷時による主桁変位計測値

$\delta a1$: 未制御主桁への大型活荷重載荷時による主桁変位解析値

$\delta a2$: 制御済主桁への大型活荷重載荷時による主桁変位解析値

第4章 斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジ制御実験

各実験ケースの復元率を表4-4に示す。

表4-4 主桁変位の復元率(%)

Case-1, Case-5

10N : 40N		載荷位置					平均
		A	B	C	D	E	
計	端	—	—	—	—	—	
	A	128	109	95	86	90	102
	B	110	98	88	82	68	89
	C	95	85	78	76	62	79
	D	83	86	79	75	54	75
	E	117	104	105	113	74	103
測	主塔	—	—	—	—	—	
	F	76	85	82	79	136	
点	G	86	93	90	83	114	
	H	86	90	86	81	109	
	I	89	92	86	79	98	
	J	49	16	4	-38	-139	
	端	—	—	—	—	—	
	平均		107	96	89	86	70

Case-2, Case-6

10N : 50N		載荷位置					平均
		A	B	C	D	E	
計	端	—	—	—	—	—	
	A	100	96	88	74	57	83
	B	94	90	83	70	51	78
	C	89	86	79	71	54	76
	D	81	82	78	73	43	71
	E	80	82	82	73	42	72
測	主塔	—	—	—	—	—	
	F	65	63	67	72	98	
点	G	78	76	76	75	89	
	H	83	80	78	75	89	
	I	85	82	78	78	88	
	J	50	27	17	-11	-88	
	端	—	—	—	—	—	
	平均		89	87	82	72	49

Case-3, Case-7

30N : 40N		載荷位置					平均
		A	B	C	D	E	
計	端	—	—	—	—	—	
	A	120	85	74	42	-11	62
	B	122	87	73	47	6	67
	C	130	90	76	58	37	78
	D	167	107	81	80	84	104
	E	218	104	89	66	94	114
測	主塔	—	—	—	—	—	
	F	-47	52	68	74	67	
点	G	43	82	94	91	105	
	H	67	85	92	89	100	
	I	78	89	93	85	92	
	J	72	67	70	63	42	
	端	—	—	—	—	—	
	平均		151	95	79	58	42

Case-4, Case-8

30N : 50N		載荷位置					平均
		A	B	C	D	E	
計	端	—	—	—	—	—	
	A	119	101	42	64	73	80
	B	107	94	36	54	60	70
	C	106	97	38	66	74	76
	D	133	95	49	76	63	83
	E	92	102	51	72	133	90
測	主塔	—	—	—	—	—	
	F	61	34	23	58	-20	
点	G	74	60	32	59	13	
	H	77	64	34	50	5	
	I	80	70	43	47	-3	
	J	110	-34	81	-78	-246	
	端	—	—	—	—	—	
	平均		111	98	43	66	80

上記の復元率を活荷重の載荷位置，設計活荷重強度，大型活荷重強度，活荷重強度の組み合わせなどを要因にまとめ，図4-4に示す。

なお，図中の [] は荷重位置が⑤， () は荷重載荷位置が⑨であることを示し，記号の 1～8 は実験ケースを示す。

また，[] および () 内の実験ケース番号の後の数字は大型活荷重強度 (N) を示す。

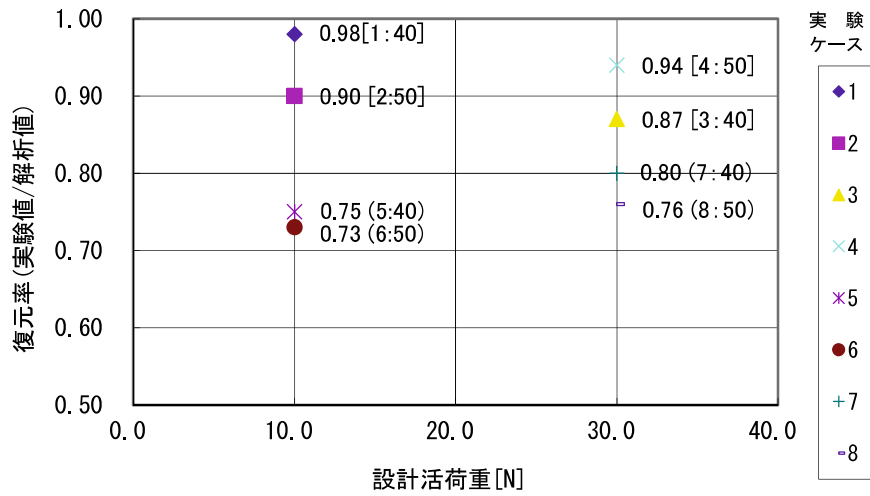


図 4-4 主桁変位の復元率 (%)

(2) 制御実験 [Ⅱ]

荷重の載荷位置，設計活荷重強度，大型活荷重強度，および，その組み合わせにより発生する可能性がある主桁変位の復元効率の差異を検証するために行った制御実験の結果を下記の図 4-5 に示す．なお、図中の [] は荷重位置が⑤， () は荷重載荷位置が⑨であることを示し，記号の A~L は実験ケースを示す．また，[] ならびに () 内の実験ケース番号の後の数字は大型活荷重強度 (N) を示す．

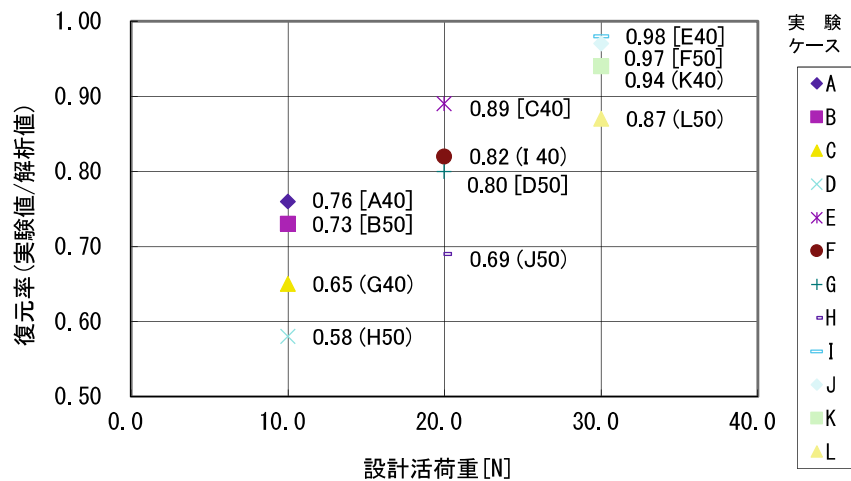


図 4-5 主桁変位の復元率 (%)

4.3.2 実験結果の考察

(1) 制御実験 [I]

図 4-3 中の実験結果(I)と解析結果(III), 実験結果(II)と解析結果(IV)が良く近似していることから, 本研究で開発したインテリジェントブリッジの感知機能, 判断機能, 制御機能は計画通り動作し, 制御力算出システムも良好な精度を発現できるシステムであると考えられる.

表 4-4 の青色着色部分(計測点 A~E), 図 4-4 は各計測位置により差異はあるが復元率は概ね約 80%に達しているので, 本研究で開発したインテリジェントブリッジは橋梁変位の復元に有効であると考えられる.

図 4-3 では無載荷側の支間に大きな負の変位が発生しているが, この現象は主桁の剛性が主塔に比較して高いことによるものと考えられる. 図 4-4 では主塔の近傍より橋梁端部の方が高い復元率を示しているが, これは主桁, 主塔, 斜材ケーブルの剛性の差に起因する斜張橋模型の構造特性によるものと考えられる.

(2) 制御実験 [II]

図 4-5 から主要な観察は以下の通りである.

1. 活荷重の載荷位置, 大型活荷重強度に関係なく, 設計活荷重強度が大きくなるほど主桁変位の復元率は向上し, 解析値と計測値が良く近似する傾向にある.
2. 設計活荷重強度や載荷位置に関係なく, 大型活荷重強度の小さい実験ケースの方が, 復元率および解析値と計測値の近似性は良好な結果を示す.
3. 載荷位置については, 活荷重強度に関係なく, 載荷位置⑤の方が載荷位置⑨に比較して復元率, 解析値と計測値の近似性ともに良好な結果を示す

4.4 結論

本制御実験は, 大型活荷重による主桁変位を設計活荷重による主桁変位まで復元させるための制御に関する検証実験である, 未制御の主桁に大型活荷重を載荷した場合と制御済の主桁に載荷した場合について解析値と計測値とを比較して, 本研究で開発したインテリジェントブリッジの信頼性と妥当性および制御の可能性を検証する. システムの動作および実験結果の精度 [解析精度, 計測精度, 制御精度] において, 本実験で一定の結論は確認されたが, 主桁と主塔の相対的な剛性が制御の効率に影響することが判明

第4章 斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジ制御実験

した。今後は制御の均質性や有効性を向上させるために橋梁の構造特性を再検討することが重要である。また、本実験では主桁部材の変位に着目した制御を行ったが、今後は橋梁の全部材の応力を考慮した制御が必要である。

本実験の主要な結果と今後の課題は下記の通りである。

1. 斜張橋模型では荷重載荷位置、設計活荷重および大型活荷重の強度の差により実験値と解析値に差異は生じたが、斜材ケーブルの張力調節による主桁変位の制御が有効であることが検証できた。
2. 荷重載荷位置に関係なく、設計活荷重と大型活荷重の強度差が小さい方がより解析値と計測値の変位は近似することが判明し、設計活荷重と大型活荷重の強度差を小さくすることで、斜張橋模型の主桁部材変位を精度良く制御することが可能であることが確認できた。
3. 大型活荷重と設計活荷重の組合せに関係なく、荷重載荷位置が主塔に近い方が実験値と解析値に大きな差異が見られた。
 - (a) 主塔の剛性が主桁の剛性に比較して極端に低いために、斜材ケーブルの張力を調節した際に、解析値以上に主塔が傾斜したことが要因であったと考えられる。
 - (b) 主塔に近い載荷位置は主塔から離れた載荷位置と比較して、活荷重載荷による変位の増加が顕著に現れ難い節点であるため重大な問題にはならないと考える。
4. 本制御実験では、アクチュエータとして電動シリンダを使用した。今後のインテリジェントブリッジの実用化に向けて下記の課題に向き合う必要がある。
 - (a) 本実験では、主桁変位を制御するために、電動シリンダの駆動で斜材ケーブル張力を調整しながら所定の張力を導入する手法を採用したが、斜材ケーブル張力の調整はケーブル長の調整と同様の結果を得ることができる。今後、電動シリンダの駆動で張力を導入場合には、調整を省略するために、解析で算出したケーブル長の短縮量で張力を導入する手法に改善する。
 - (b) 実橋の斜材ケーブルの張力導入は、数百トンに及ぶ張力を瞬時に導入する必要がある。今後は、機械工学などの異分野の技術と土木の知見や経験を融合させたアクチュエータの研究開発が望まれる。

【第4章 研究成果と将来展望】

斜張橋模型インテリジェントブリッジの検証実験では、システムの動作、精度ならびに復元率ともに概ね計画に近い結果が確認でき、課題を残しつつも斜張橋模型のインテ

第4章 斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジ制御実験

リジェント化を実現することができた。

実橋梁への適用にあたっては様々な課題が残っているが、制御装置の性能も課題の一つである。本研究では電動シリンダをアクチュエータとして使用したが、実橋梁では制御命令の受信と同時に瞬時に数百トンの制御動作が必要となる。このような制御装置は未経験ではあるが、我が国にはロボット技術が象徴するように極めて高度な制御技術が蓄積されている。このような技術を考えれば、技術的には制御装置の開発には大きな障害はないものと推定できる。

今後は、このように土木分野から見た異分野の電子や電気技術ならびに機械や制御技術との連携や融合を図って行き、インテリジェントブリッジの実現に向けて協同することが重要である。既往のインテリジェントブリッジに関する研究は概念の域に留まり、本研究のような実験までには至っていない。本研究がインテリジェントブリッジに対する関心を変える契機になることを期待する。

参考文献

- 1) CDP 高速度変位計；製品総合カタログ 2003-2004, 株式会社東京測器研究所.
- 2) EZHP6A-05A 電動シリンダ；製品総合カタログ 2005-2006, オリエンタルモーター株式会社.
- 3) PMC-4P(PCI) パルス発信ボード；製品総合カタログ 2005-2006, 株式会社コンテックス.

第5章 システムの高度化に関する提案

5.1 はじめに

第4章までは、モニタリングシステムの開発、インテリジェントブリッジの開発と制御実験の経緯と成果、ならびに、その有用性を述べた。本章では、上記システムの開発や模型実験の過程で得られた知見と、開発したシステムの高度化と合理化を目指した改善や課題に関するアイデアや提言などを交えて、モニタリングシステムおよびインテリジェントブリッジの高度化に関する提案を述べる。

我が国の社会基盤は、1960年代後半からの高度経済成長期以降に短期かつ急速に整備された施設が多数を占め、近い将来、その老朽化に伴う維持管理や更新の需要が集中的に発生または増加することが懸念される。社会基盤の重要な役割を担う橋梁に着目すれば、橋長が2m以上の橋梁は70万橋に達しており、橋長が15m以上の主要な橋梁だけでも約15.2万橋を越えており、かつ、その約80%の橋梁が地方自治体の管理下にある^{1),2)}。

社会基盤施設が建設中心の時代から、これらを効率的かつ効果的に活用する時代に移行しており、現存する橋梁においても正確な現有の性能評価ならびに性能把握は極めて重要になってきている。社会基盤を保全するための予算の制約が厳しく、維持管理に精通した専門技術者が不足している環境³⁾においては、構造物に対する調査や点検の省力化や効率化と同時に定量的に現有の性能を評価する手法の確立が期待されている。いま、合理的な性能評価の手法として、構造物に様々なセンサを設置または埋め込み、これらから得られる計測データを基に構造物の現有の性能を正確に評価するヘルスマニタリングに関する研究や開発が国内外で精力的に行われている。

本章では、上記の環境を踏まえ、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、下記の3点について本研究における知覚を整理する。

- 【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と提案
- 【3】モニタリングシステムの高度化に関する提案

5.2 モニタリングシステムの環境改良

5.2.1 モニタリングシステムの環境改良の背景

従来の維持管理では専門技術者が目視点検により劣化や損傷を発見し、その結果から施設が現有する性能を評価することで補修や補強などの維持管理計画を策定してきた。しかし、目視点検は専門技術者の主観や技量によるところが大きく、定量的な評価が困難であるために点検を行った技術者によって現有性能の評価が異なるといった問題がある。また、点検技能を保有する専門技術者の減少³⁾とも重なり、多様な形式や材料で形成される多数の橋梁を集中的に点検や診断することは極めて困難な状況になっている。

これらの問題点を解決するために、構造物に対する点検・調査などの維持管理業務の効率化や定量的に現有性能を評価する手法の確立が期待されている。その手法として、構造物に様々なセンサを設置または埋め込み、これらから得られる計測データを基に構造物の現有性能を正確に評価するヘルスマonitoringに関する研究また開発が国内外で精力的に行われている⁴⁾。

これら国内外での研究では、現在のところ高精度な計測用センサの開発や計測方法は検討されているものの、現有性能の評価に利用できる適切な構造物の調査箇所、調査の物理量、調査や計測の数量、ならびに、計測データを橋梁の劣化や損傷度評価に関連付けて維持管理計画に反映させる手法に関しては確立された手法が未だなく、計測に用いられるセンサの種類や個数は試行錯誤的に選定されているのが現状である。試行錯誤的なセンサの選定は、使用するセンサの種類や個数に対応させてセンサからの信号を集録する計測機器をも変更する必要があるが生じる。たとえば損傷同定また現有性能を評価するために振動計測が行われているが、その計測機器は高価でもあり、センサの変更に合わせて追加や新規に購入することは決して合理的ではない。そのために、頻繁に変更されるセンサの種類や個数に柔軟に対応できる汎用性の高い計測環境や計測システムの構築が必要とされている。

近年の高分解能および高サンプリング周波数を有し、高精度な計測を可能にするセンシング技術や、あらゆる場所から高速にデータ通信を可能にするネットワーク技術の発展は目覚ましいものがある⁵⁾⁻⁷⁾。このようなセンシング技術により施設の現有性能を高精度に評価、さらには損傷同定し、ネットワーク技術を活用した遠隔での監視、あるいは

情報の公開や情報の送信を可能とする技術の実現が期待されている。

構造物の遠隔モニタリングシステムを構築するためには計測器や計測器制御用PCやデータ通信機器が必要となるが、実際の構造物での利用を考慮すると高い可搬性と設置や除去が容易な作業性を備えたコンパクトな構成にすることが重要である。また、遠隔モニタリングシステムは単一の構造物に止まらず、他の多数の構造物への流用や並行して複数構造物の同時調査ができ、特定の構造物に特化したものではなく、センサの種類や計測点数の合理的な計画で多様な構造物へ柔軟に転用できる汎用性の高いモニタリングシステムが求められる。

本章では、近年、工学分野での計測技術として注目されている耐久性に優れた小型の工業用制御・集録装置を用いることで「センサの種類や個数」また「通信方法」に関して高度な汎用性ならびに拡張性を持つコンパクトな遠隔モニタリングシステムとして、本研究で開発したモニタリングシステムを改良・改善する。

5.2.2 システム環境改良の位置付け

現在、一般に実施されているモニタリングでは、図5-1に示すように、各計測点にノートPCとデータロガー⁸⁾のような計測器が必要であり、それらを設置するための空間(計測室)が要求される。また、現場近傍には計測室からの情報を集約するための現場事務所が必要となり、システムに要する空間に止まらずシステムのコストも重要な要素となる。さらに、計測項目を変更する際には、それに対応する計測器の変更なども必要になる。

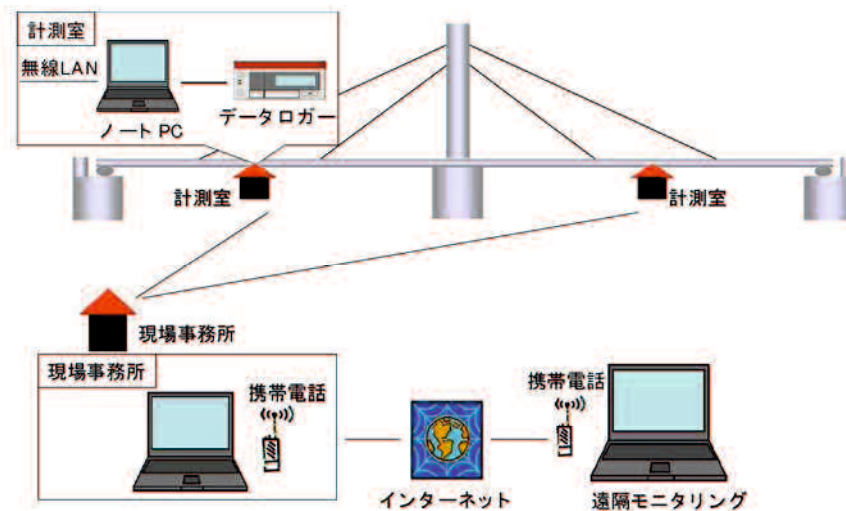


図 5-1 遠隔操作モニタリングシステムの計測環境

第5章 システムの高度化に関する提案

本節では、上記の課題解決のために、コンパクトで、計測項目の変更に対しても柔軟に対応でき、計測機器を変更する必要のない高い汎用性を持つシステム環境（計測環境）の改良を目指す。

また、計測項目や橋梁に設置するセンサの種類、使用する計測器、計測のサンプリング周期や計測時間、ネットワーク環境、通信手段、通信データ量、データを効率よく管理するためのデータ管理システムなどのシステム環境について、「第2章モニタリングシステムの開発」および「第3章インテリジェントブリッジの開発」で構築したシステムを改善および改良する。図5-2にシステム環境改良の位置付けを示す。

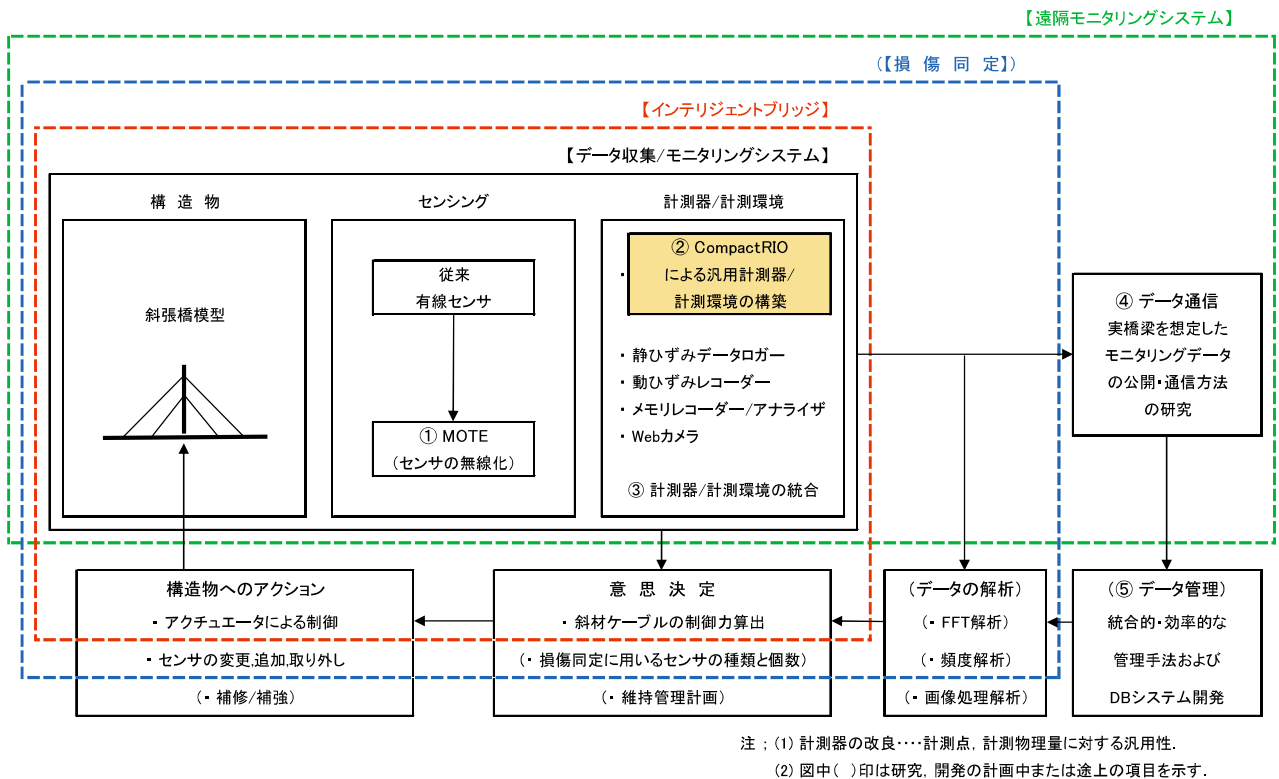


図 5-2 システム環境改良の位置付け

本システムの環境改良の開発および研究の計画中ならびに途上の項目を含めて、改良の主要内容を下記に述べる。

① MOTEによるセンサの無線化（無線ネットワーク）

一般的に構造物のモニタリングシステムには有線のセンサが用いられているが、センサケーブルの敷設作業に伴うコストと時間に課題があり、特に重要な構造物への適用を除き多数の構造物を監視するには至っていない。近年、センシング機能、演算処理機能および無線通信機能を備えた小型端末を対象構造物に複数設置し、温度や加速

度などの物理量を収集するワイヤレスネットワーク技術の活用が散見される。本改良においてもワイヤレスセンサネットワーク端末「Micaz-MOTE」（Crossbow社製）を用いて、構造物のモニタリングへのワイヤレスセンサネットワーク技術の適用を計画している。

② CompactRIOによる汎用計測器/計測環境の開発

構造物のモニタリングでは対象となる構造物の付近にセンサからの計測データを収集するデータロガーのような計測器や、計測器に計測命令を送信ならびに計測データを加工および保存する計測用PCの設置が標準であり、さらに、遠隔モニタリングを行う際にはウェブサーバも必要となることがある。実構造物でのモニタリングを想定すると、これらの機器は可搬性や設置や除去の作業性およびコストに課題がある。

構造物の力学的挙動から損傷の箇所や程度を同定する損傷同定の研究が積極的に行われているが、未だ損傷を同定する確立した手法はなく、計測する物理量や計測箇所、計測点数を試行錯誤的に実施している状況にある。計測する物理量や計測点数を変更した場合に、それに合わせて計測器や計測システムを変更する必要があり、時間やコストの面で合理的とは言えない。

本システム改良では、計測する物理量や計測点数に対する汎用性が高く、計測データの高周波フーリエ変換（FFT）解析などが可能なCPUやフラッシュメモリ、開発したモニタリングシステムを書き込みが可能なFPGAチップ、ウェブサーバとしての機能を内蔵しているCompactRIO（National Instruments社製）を採用して、可搬性や作業性ならびに汎用性に富んだシステム環境の改良を行っている。

③ 計測器/計測環境の統合

多様な計測器の統合が可能なLabVIEW（National Instrument社製）をシステムに組み込むことにより、様々な計測器を活用することができる多様な機能を備えたシステム環境の改良を計画している。

④ データ通信

社会基盤構造物、特に橋梁やダムなどは市街地に限らず山岳地などに建設されたものが多く、電源や通信方法の確保が重要な要因になる。ネットワーク環境では、専用線や携帯端末などが考えられるが、専用線は新たに敷設する必要があり現実的でなく、携帯端末を用いる場合には送信するデータ量を考慮することが必要になる。

本システム環境改良では携帯端末を使用することを前提に、温度と加速度のモニ

第5章 システムの高度化に関する提案

タリングが常時行われていることを想定し、最適なサンプリングレートの設定を始めサンプリングキューからの最適な読み込みデータ量の設定，ならびに，予め設定した計測間隔の中で最大値を含む数秒から数分間のデータを電子メールとして送信，あるいは，予め設定した加速度の閾値を超えた場合に警告メールとして送信するなどのシステムの環境改良を実施する。

⑤ データ管理

構造物のモニタリングは多様なセンサや計測器を用いて行われるため出力される計測データファイルも多様になり，その計測データファイル数も膨大なものになることが考えられる．このように多様かつ大量な計測データから構造物の維持管理に必要なデータを抽出するためには，計測データファイルを効率よく管理し，必要に応じて要求する計測データを検索できる管理データベースシステムが必要になる．具体的には計測データファイルのヘッダ情報を読み込み，計測物理量や計測点数を抽出し，それらを基に検索やダウンロードが可能なシステムが期待される．本システムの改良では，混在する様々なデータの統合管理システムとして，計測器から出力される計測データファイルの管理ならびにデータの検索，ダウンロード，アップロードの機能を持つシステム環境の改良を進めている．

5.2.3 小型工業用制御収録装置の活用

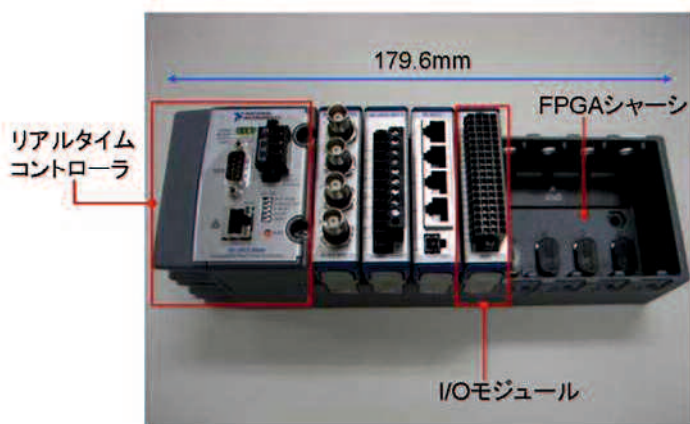


図 5-3 CompactRIO の外観



図 5-4 CompactRIO の I/O モジュールの外観

システムの環境改良策として，計測用サーバやウェブサーバなどを省略できるシステムのコンパクト化の実現，多様なセンサに対応して計測物理量や計測個数の面で高い汎

用性、ならびに、小型化による優れた可搬性と設置や撤去における高い作業性を備えた小型工業用制御収録装置として、RIO(Reconfigurable I/O) テクノロジーを利用した CompactRIO再構成可能組込システム⁹⁾を採用した。

CompactRIO再構成可能組込システムの外観を図5-3に、CompactRIOのI/Oモジュールの外観を図5-4示す。

本システムの環境改良の制御収録装置として採用の動機になったCompactRIOの特徴的な機能について述べる。

LabVIEWの機能

グラフィカル言語と呼ばれるLabVIEWで構築したプログラムをCompactRIOの再構成可能組込システムFPGA (Field Programmable Gate Array) チップに組み込むことによりグラフ表示関数や解析関数などの機能が得られ、開発者は電気回路を組む感覚で用意された関数を配置することによりシステムを開発できる。損傷同定に不可欠な計測データの高速フーリエ変換 (FFT) 解析なども作動が可能である。

I/Oモジュール機能

制御収録装置のI/Oモジュールには組込みの信号調節、スクリュー端子、BNC、DSUBコネクタが備わっており、再構成可能組込型シャーシのI/Oモジュールを換装することで目的にあった項目を計測できるため、極めて汎用性に富んだモニタリングシステムを構築することが可能である。

リアルタイムコントローラ機能

制御収録装置に内蔵されたリアルタイムプロセッサによりリアルタイムの制御、データロギング、解析、通信などが可能な組み込みシステムの構築ができる。

サーバ機能

当装置はCompact Flash ストレージを備えており、計測データの収集・加工・保存など計測用PCと同等の役割を担う。また、FTP (File Transfer Protocol) サーバとしての機能も備えており、LabVIEWのウェブパブリッシングツールで作成したHTML ファイルをウェブブラウザ上でCompactRIO にアクセスすることで、システムに保存した計測データを閲覧や取得が可能である。

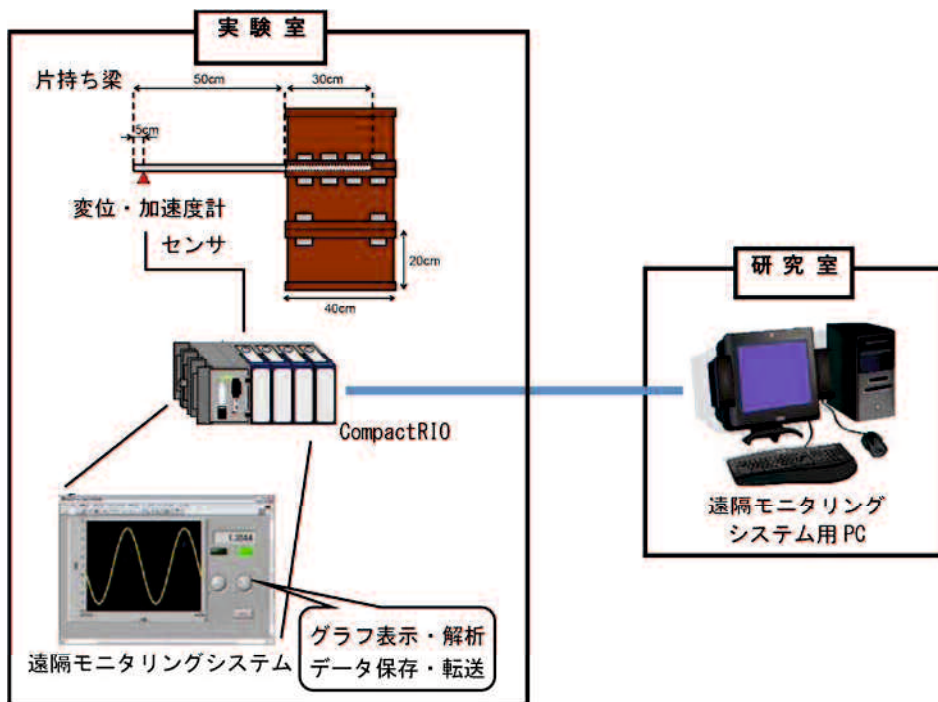
本改良で採用したCompactRIOは、計測項目や計測方法に整合させてセンサの種類や個数を自由に対応できるハード面だけでなく、上述のようにソフト面においても高度な汎用性と拡張性があり、計測器 1 台で全てに対応が可能である。また、コンパクトな計

測機器と通信機器から構成されているために、可搬性に優れ、設置や撤去が容易なシステムの構築が可能である。

5.2.4 CompactRIO を用いた遠隔モニタリングシステム

本システム的环境改良では、実験室に設置した片持ち梁の模型を別室の研究室からモニタリングする遠隔操作モニタリングシステムとしてシステム全体を構築した。片持ち梁の模型にCompactRIOを設置し、熱電対による模型付近の温度ならびに加速度計と変位計による設置点の加速度と変位を計測する。


CompactRIO内には、計測データのグラフ表示、高速フーリエ変換（FFT）解析、保存などの機能を実現するシステムを組み込み、このシステムをウェブブラウザで閲覧できるようにHTMLファイルに埋め込んだものが保存されている。また、10/100BaseTXイーサネットケーブルで研究室LANと接続されておりHTMLファイルを組み込んだシステムをネットワークに公開している。遠隔地からのモニタリングとして、図5-5に示すように研究室から実験室に設置したCompactRIOにアクセスし、計測データを閲覧する構成になっている。




(注) 実験室と研究室は10/100TXイーサネットケーブルで接続

図5-5 遠隔操作モニタリングシステムの構成

5.2.5 システムの検証





本システムの環境改良で採用したCompactRIOの動作性と精度を確認するために、 5-5に示すシステムを構築して検証実験を行う。

(1) 実験の概要

片持ち梁の自由端に加速度計とレーザー変位計を設置し（ 5-5参照），片持ち梁に振動を加えてその振動を計測器で計測する。センサからの信号を途中で分岐させ、一方を既存研究で使用してきたデータロガーに接続し、他方をCompactRIOに接続して両計測器が同質の信号を受信できる装置にし、各計測器で受信した信号をグラフ表示させて比較する。

また、計測のサンプリングレートによる振動波形や振動特性に及ぼす影響を把握するために、サンプリングレートをデータロガーは100KHz、CompactRIOは2 KHzに設定して計測を行う。

(2) 実験の結果と考察

変位に関しては 5-6に示すように波形、数値ともに両計測器の計測結果は極めて酷似した波形を示す。また、加速度についても 5-7に示すように、両計測器の計測結果は概ね同じ特徴を持った波形を示し、加速度もほぼ同じ値を示しているが、同図の0.05秒近傍における極小時間での加速度の急激な変化がCompactRIOでは計測されていない。当現象が周波数特性に及ぼす影響を確認するため、これらの波形をFFT 解析し、周波数特性を分析した。加速度および変位の波形をFFT 解析した結果を 5-8、 5-9に示す。

パワースペクトルのピークは同じ周波数で出現し、その振幅も同じ値を示しており、一方にのみ出現しているピークは存在していない。したがって、0.05秒付近に見られた急激な加速度の変化は周波数特性を分析する際の大きな影響要因にならない判断できる。以上より、片持ち梁に対してCompactRIOのサンプリングレートを2 KHzで計測を行ってもデータロガーの計測結果と遜色のない高精度な計測が可能であることが確認できる。

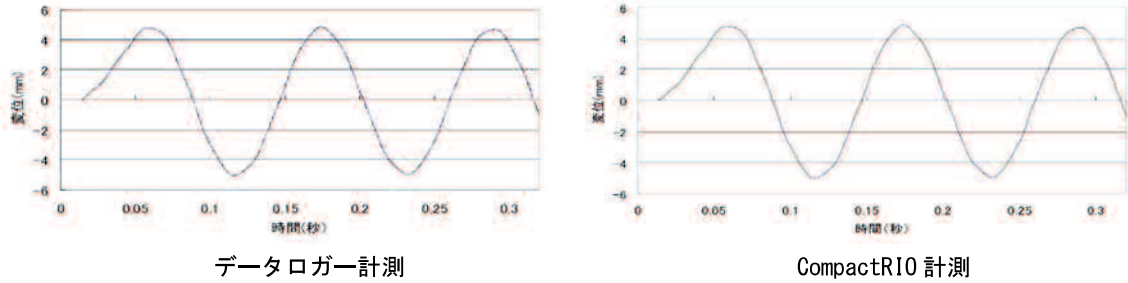


図 5-6 変位の計測結果

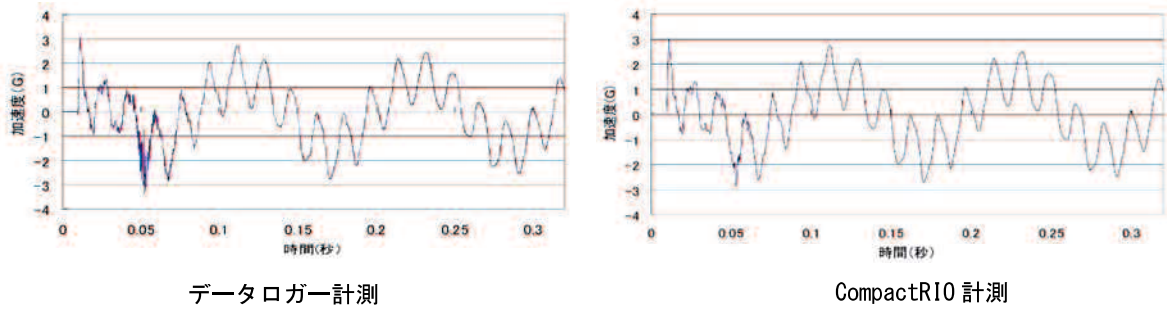


図 5-7 加速度の計測結果

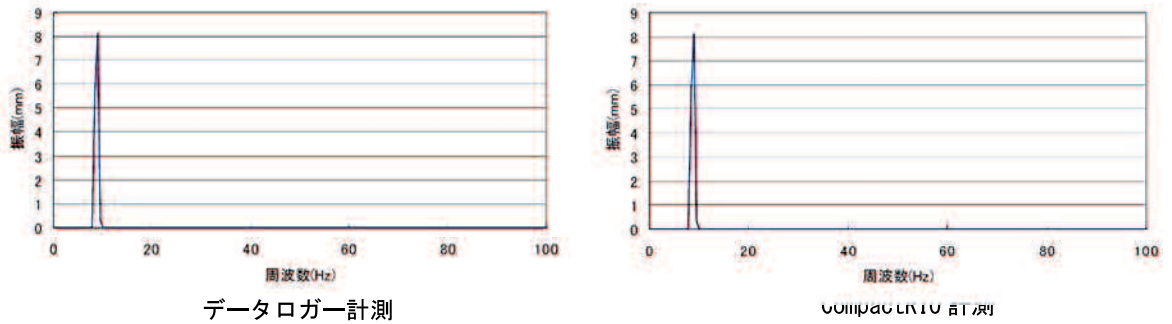


図 5-8 変位の FFT 解析結果

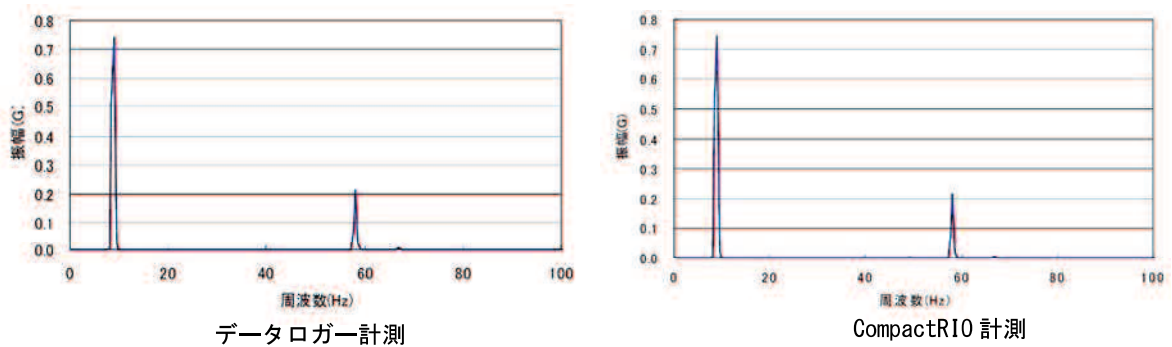


図 5-9 加速度の FFT 解析結果

5.3 インテリジェントブリッジの課題と提案

5.3.1 制御装置（アクチュエータ）

(1) 制御力の導入方法

本研究での制御実験では、電動シリンダ¹⁰⁾の駆動にて斜材ケーブルの張力を調整しながら、斜材ケーブルに所定の張力を導入する手法で主桁変位を制御したが、斜材ケーブル張力の調整はケーブルの応力を計測しながら張力を決定することになり、瞬時の制御には課題が残る。第4章のインテリジェントブリッジにおける最適制御力算出システムは、本来斜材ケーブル長の必要な短縮量を算出するシステムとして開発しているため、張力に換算することなく直接に斜材ケーブル長を短縮する方が合理的である。また、張力の調整のような繰り返しの作業を省略することができ、瞬時の動作の面からも合理的である。

今後、電動シリンダの駆動で張力を導入する場合は、解析で算出したケーブル長の短縮量で張力を導入する手法に改善する。

(2) アクチュエータの研究

本研究における斜張橋モデルのモデルにした元の斜張橋は、有効幅員 9.85m（車道 7.5m, 歩道 2.35m）、橋長 62m、斜材ケーブル 4 本（1 面）の小規模な斜張橋である。当斜張橋における、斜材ケーブル 1 本当たりの張力は約 200 トンであり、斜材ケーブルへの張力導入時は約 200～250 トンの張力下で、瞬時にケーブル長を約 1 cm 短縮することになる。斜張橋モデルを用いた制御実験では、アクチュエータとしてモーターと直線動作機構を一体化した電動シリンダを採用したが、瞬時に巨大な力で駆動させることが要求される実橋梁での制御が簡単でないことは容易に推定できる。

インテリジェントブリッジの実現に向けては、様々な目的の大規模な制御装置が要求される。今後の制御装置の研究開発では、土木工学から見た異分野である電気・電子工学や機械工学などの技術とこれまで蓄積してきた土木分野の知見と経験を融合することが必要であり、大きな荷重下で制御指令に鋭敏に反応ができ、かつ安価な制御装置の研究開発が期待される。

5.3.2 インテリジェントブリッジの実現の環境

インテリジェントブリッジが実現すれば、設計活荷重を低減させることにより画一的

第5章 システムの高度化に関する提案

な大型活荷重で設計された橋梁に比較して、建設時の材料と初期建設費の削減、省資源への貢献、供用期間中の点検回数の縮減、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、ならびに将来的にはライフサイクルコストの軽減が期待できる^{11)~13)}。

現行の道路橋示方書の活荷重体系を標準的な板桁橋と箱桁橋に適用して、鋼材重量と概略工事費を試算した結果を表5-1に示す。試算橋梁の形式および支間割や幅員などの橋梁諸元は表に示した通りであり、試算では活荷重として現行の道路橋示方書に規定されているA活荷重とB活荷重を対象にした。ここでは、A活荷重で設計した橋梁にB活荷重が載荷された場合に、A活荷重で設計した橋梁の保有性能をB活荷重に対して安全な性能に向上させる状況を想定して、両活荷重による試算結果を比較する。

現行の道路橋示方書¹⁴⁾の活荷重は総重量250kNの大型車両を対象に規定されており、A活荷重とB活荷重はL荷重における載荷長に差があるのみで、荷重強度は基本的には大差がない。そのため、試算結果では、両活荷重による差は微小であり、インテリジェントブリッジとしての顕著な有用性は認められない。インテリジェントブリッジの有用性を顕著にするためには、設計活荷重と大型活荷重の強度差を拡大するように例えば技術基準の改訂が必要になる。性能照査型設計の合理性が議論されている場で、インテリジェントブリッジをも対象にした設計法が提唱されることを期待する。

表 5-1 鋼材重量と概略工費の試算結果

形 式	橋 長	荷 重 種 別	鋼 重	概略工費
3径間連続 非合成鋼板桁橋	97.5 m	B 活荷重	185 (t)	205 百万円
		A 活荷重	172 (t)	195 百万円
		荷重種別比較	13 (t)	10 百万円
3径間連続 非合成鋼箱桁橋	162.5 m	B 活荷重	505 (t)	484 百万円
		A 活荷重	487 (t)	471 百万円
		荷重種別比較	18 (t)	13 百万円

注 板桁支間割：30.0 + 37.5 + 30.0 (m)
 箱桁支間割：50.0 + 62.5 + 50.0 (m)
 有効幅員：9.5 (m)

長大橋の性能は死荷重に大きく影響（支間長700mの長大橋では90%、支間長40mの中小橋梁では50%）されるために、活荷重の強度差が大きい場合でもその有用性は期待できない。一方、中小橋梁では、設計活荷重と大型活荷重の強度の差を拡大することにより顕著な効果が期待される。今後は、中小橋梁を対象にして橋梁の知能化が期待できる橋種や形式と制御手段を研究することが必要である。同時に、本研究が対象にした自

自動車荷重に拘ることなく、近年、頻繁に発生している地震や台風、津波や洪水などの自然災害を対象にしたインテリジェントブリッジの開発にも着眼すべきである。

5.4 モニタリングシステムの高度化

5.4.1 モニタリングシステムの高度化の背景

高度経済成長期以降に建設された多種多様かつ多数の橋梁の老朽化とともに近年の大型車両による損傷が懸念されており、限られた財源と管理体制を一層効率的かつ効果的に運用する管理手法が要求されている。橋梁の調査や点検の省力化と効率化の手法として、また、橋梁の定量的な状態の把握の手法として橋梁のモニタリングは不可欠な手法である。

日本再興戦略（2013年6月14日閣議決定）においても、2030年の目標として「国内の重要インフラ・老朽化インフラは全てセンサ、ロボット、非破壊検査技術等を活用した高度で効率的な点検・補修」が実現されていることが掲げられている¹⁵⁾。この様に、従来の目視や機器による点検や調査と平行して、電子技術や情報技術を活用したモニタリングの運用が期待されている。

モニタリングにおける重要な課題のひとつは、モニタリングシステムを構成するセンサや計測機器および通信機器の初期費用、ならびに、システムの運用負担を軽減することである。ナノセンサデバイス¹⁶⁾などを活用したセンサの開発、センサなどの設置作業や通信線の維持管理の簡易化を目指した無線化、ハードとソフトの両面からの省電力化、災害に対して強靱なシステムの構築などを通じてモニタリング費用の軽減が求められている¹⁷⁾。

5.4.2 モニタリングシステムの費用低減

(1) 計測システムの無線化

橋梁のモニタリングは実験室とは異なり自然環境の中で実施される調査であり、温度や湿度の変化は元より地震や台風、落雷や誘雷の影響を避けることができない環境に置かれているために自然災害に耐え得る強靱なシステムが必要である。また、計測対象構造物の綿密な挙動を把握するためには、高精度なセンサ配置計画に基づき、橋梁の任意の個所に多数個のセンサを設置したセンサネットワークの形成が必要である。

橋梁のモニタリングにおいては上記のように、橋梁の多様な個所に多種多様かつ多数のセンサが設置され、長期間に亘って橋梁の状態を観測することが一般的である。センサ設置時の配線作業の時間と労力の低減化と同時に、システムのメンテナンスフリーが理想であり、断線による計測中断や計測不能などのトラブルを回避するために要する維持管理の省力化ならびに費用の軽減には計測システムの無線化は極めて重要である。

また、モニタリング現場の無線化と同時に、現場の基地局と遠隔の管理事務所間の情報伝達は携帯電話に代表される通信技術を活用して無線化を図り、自然災害や予期せぬ断線などによるトラブルの解消により、モニタリング制度の向上とともにシステムの維持管理の作業と費用を低減する。

(2) 計測センサの無線化

計測システムの無線化と無線化に伴う計測精度の高度化の基本は、計測センサとデータ集約機器間の情報伝達の無線化にある。我が国の電子産業における技術はナノテクノロジーのような新技術の分野を築き、通信産業における技術は携帯電話に代表されるように全世界的に確固たる地位にある。土木分野の需要と異分野である電子や通信分野の新技術の融合により、シリコン基板上に様々なセンサを組み込んだ各種電子回路を集積化したセンサとして、MEMS (Micro Electro Mechanical System) , NEMS (Nano Electro Mechanical System) と言われているコンパクトで安価なナノセンサデバイスの開発が報告されている¹⁸⁾。

安価な無線のセンサを実現することにより、センサの設置や通信線の管理などに要する時間と労力が削減でき、モニタリングのコスト削減に寄与することになる。

(3) 計測システムの省電力化

センサやデータを送受信するモニタリングのデバイスは、電池を電源にするシステムが殆どであるため、電池交換は有線における維持管理と同様に時間と労力が必要であり、運用の負担になっている。

ワイヤレスネットワーク技術では、ネットワークの全てのノードに高性能な時計を内蔵して、予め設定された時刻にシステムが覚醒し、極短時間だけ送信して送信完了とともにスリープ状態に入るようなシステムを構築する。あるいは、モニタリングデータに閾値を設定して、閾値以上のデータのみ送信するようなシステムまたは閾値以上の異常な挙動を計測すれば警告を送信するシステムにして、他の時間はスリープ状態に入るようなシステムを構築する。計測システムの省電力化には、上記のようなソフトの開発と

ともに電力消費を極力抑制したセンサや通信装置などハードの開発が重要である。

省電力化されたモニタリング装置の活用と省電力化を意図したソフトの開発により、長期に亘ってデバイスの電池交換が不要なモニタリングシステムの実現を可能にすることが重要である。

5.4.3 モニタリングシステムに関する提案

(1) モニタリングデータの蓄積

モニタリングの対象にする橋梁は、材料や形式や構造、橋梁の周辺環境ならびに交通量や荷重強度などが多種多様であり、劣化や損傷を判断するための計測部位や計測項目および計測回数、ならびに集約方法などの判断と計画は極めて困難である。様々な橋梁に対してモニタリングが実施されてはいるが、未だ客観的な判断や計画を支援するに十分なデータの蓄積がない。橋梁の損傷が振動特性に及ぼす影響は少ないと言われているが、固有振動数の経年的変化を精度よくモニタリングすることができれば、微小な変化を検出することができる。橋梁の損傷はひび割れ、断面欠損、座屈、腐食、材料劣化など多岐に渡るが、その影響は曲げ剛性の変化や減衰定数の変化および構造の支持状態の変化などとして捉えられる。種々の損傷要因の振動特性に及ぼす影響を検証することにより、その結果を健全度診断に応用することができる。

ナノセンサデバイスのようなセンサの無線化、計測システムの無線化、計測システムの省電力化などを通じてモニタリングの精度の向上とコスト削減を図ることにより、多岐に渡る多数の橋梁のモニタリングを実施してデータを収集・解析するパイロット的な事業を立ち上げて、データや経験を蓄積することが重要である。

(2) 異分野との連携

現行のモニタリングには、計測機器や計測のコスト低減ならびに計測システムの維持管理に要する時間と労力および運用コストの低減などが大きな課題である。費用のみならず、高度なモニタリング精度を達成するためには、センサの高度化とともに上述のように無線化および省電力化されたセンサやシステムの構築が重要である。

例えば、前述のMEMSやNEMSと言われる技術に象徴されるように、我が国の電子産業におけるナノテクノロジーのような新技術、携帯電話に代表される通信産業におけるハードおよびソフト技術の革新や進歩は目覚ましい。土木分野から見て異分野である電子分野や通信分野の技術とこれまで蓄積してきた土木分野の知見と経験の融合を促進

して、最先端技術によって課題の克服に取り組むことが期待される。

(3) モニタリングとセンサの長寿命化

現在、モニタリングにおいては海外・国内ともに、モニタリングの費用対効果、モニタリングによる健全度予想や余寿命把握、ならびに、センサの長期耐久性と信頼性が共通の課題になっている。ここでは、モニタリングによる長期観測とセンサの長期耐久性について現状を述べ、その高度化に対して提案する。

米国においては、オハイオ州のシルバー橋崩壊（1967年）を契機に橋梁の定期的な点検の重要性が認識されることになり、全国橋梁点検基準が制定（1971年）され、本格的な橋梁の維持管理が始まった。その後は、主として目視を基本とした点検データをもとに橋梁マネジメントシステムにより橋梁の健全度を把握していたが、目視点検の重要性は軽視できないものの技術者による点検結果のばらつきが課題であることが指摘されることになり、長期観測による橋梁の性能を定期的に把握する長期橋梁性能プログラム（LTBP ; Long-Term Bridge Performance Program）が20年間の研究開発プロジェクトとして発足（2006年）し、直後に発生したミネソタ州の落橋事故（2007年）を機に本格的なモニタリングシステムの開発が始まった。その後のシステム開発期を経て、現在 Long-Term Data Collection Phase に移行（2013年3月～）している処である¹⁹⁾。

国内においても、モニタリングの評価、モニタリングシステムの開発、モニタリングの実施などの発展は米国と殆ど同様の過程を辿っている。

各種変状の感度解析を行い、変状を特定した上で局所的な応力集中箇所を狙った測定などでは短期のモニタリングで目的を達成することが可能であるが、その他の変状監視のためのモニタリングは長期になるのが一般的である。近年、期待が高まっている橋梁の健全度評価や性能評価のためのヘルスマニタリングでは、当該橋梁が役割を終えるまでの供用期間中間断なく監視することが要求される。最近、従来使用されてきた電気抵抗式ひずみゲージに代わって光ファイバーセンサが注目されている。光ファイバーセンサは、①電氣的絶縁の心配がない、②ひずみの計測可能範囲が広い（±5000 μ ）、③超低温（-200 $^{\circ}$ C）から高温（+900 $^{\circ}$ C）まで計測可能、④変調光波送受信によって多モード（多チャンネル）計測が可能、⑤ひずみゲージに比較して経年変化が少なく長期間の構造モニタリングに適している、など多くの応用可能な特徴がある。これらの特徴を活用して、鋼橋の累積疲労損傷度を半永久的にモニタリングする

センサとして FGB (Fiber Bragg Grating) センサ (光ファイバーセンサ) が使用されている例がある²⁰⁾.

計測データの収集・更新・伝送についても長期モニタリングに向けた研究開発, ならびに, 実用化が進展している. 電源として圧電素子 (桁などの振動で自己発電する電源) を利用し, 特定小電力無線 (Zig-Bee 無線) で発信し, RF-ID (Radio Frequency Identification) タグでデータの収集や伝送を行う. かつ, 従来の RF タグは複数の電子素子が乗った回路基板で構成されていたが, 近年, IC タグと呼ばれる小さなワンチップの IC (集積回路) で実現できるようになった. IC タグには, 電池を内蔵せずにリーダからの電波をエネルギー源として動作するパッシブタグ, 電池を内蔵して通信時に自らの電力で電波を発するアクティブタグ, 上位システムへの通信起動をパッシブ方式で起動して内蔵した電池で発信するセミアクティブタグがあり, 各特性を活用した使用方法が採られている.

また, センサの長寿命化が困難な場合, 振動を計測する加速度センサなどは無線センサを用い容易に設置できる器具を活用してセンサを更新する手法が採られ, モニタリングの中断が回避されている.

長期モニタリングに向けた研究開発と実用化を述べたが, センサ技術, 情報発信機器, ネットワークシステムなどの道具立ては重要であるが, モニタリングにおいては「橋梁のどのような変状を, どの段階で, どのような精度で把握して, どのような対策に繋げていくのか」を常に意識した研究開発であるべきである.

5.5 まとめ

(1) モニタリング

我が国の高度経済成長期以降に急速に整備された橋梁の維持管理において, モニタリングの有用性および重要性は広く認知されている技術と言えるが, 積極的かつ広範囲に活用されているとは言い難い. 多種多様かつ膨大な数の橋梁に対するモニタリングシステムの適用には, システムの初期費用の削減ならびにシステムの維持管理を含めた運用負担の軽減などが課題になっている. また同時に, 様々な橋梁に対するモニタリングの実施が散見されるが, 未だ客観的な橋梁の保有性能や損傷同定などの判断ならびに橋梁の長寿命化を含む運用や活用計画を支援するための満足なデータの蓄積が少ないことも課題である.

第5章 システムの高度化に関する提案

モニタリングシステムはセンサや計測機器および通信機器などで構成されるが、これらの機器は電子や通信の産業界の貢献によるところが多である。我が国の電子産業はナノテクノロジーのような新技術の分野を築き、通信産業は携帯電話に象徴されるように世界的に確固たる地位を築いている。モニタリングにおける今後のハードウェアは、電子や通信などの異分野の技術と土木分野の知見や経験に立脚した土木技術との融合による研究開発に委ねることが重要である。例えば、ナノセンサデバイスのようにMEMSやNEMSと言われるシステム、大量の情報伝達と小型化を指向する携帯電話の技術、汎用性や多機能性に優れたデータ集約機器を実現したRIO技術などの活用により、センサや計測機器および通信機器のコンパクト化、低廉化、無線化、省電力化を図り、初期費用の削減や運用負担の軽減を志向すべきである。

ハードウェアと同様に、高性能な時計を内蔵させたネットワークのノードにシステムの覚醒とスリープ状態の詳細な計画を組み込んだシステムの構築、あるいは、モニタリングデータに閾値を設定して閾値以上のデータのみを送信するシステムまたは閾値以上の異常な挙動のみを警告として送信するシステムの構築などにより省電力化を図り、電池交換を長期化するソフトウェアの開発も重要である。また、モニタリングに関するデータの蓄積は重要であることは論を俟たないが、一方では橋梁形式や材料毎に分類した標準的なモニタリングシステムの構築を試行することも重要である。上述した機能を備えた安価なハードウェアが実現すれば、本研究で開発したSMSやIMSならびにRMSなどのモニタリングシステムを活用することにより、橋梁の構造特性とモニタリング目的を明確にした標準的なモニタリングシステムの構築を可能にすることができる。

さらに、ハードウェアとソフトウェアを融合することによりセンサネットワークを形成して、橋梁の挙動の変化をモニタリングする状況が実現すれば、橋梁の性能の変化や劣化の把握は飛躍的に高速化ならびに高精度化することが期待できる。また、モニタリングと従来の橋梁の点検調査が補完しあうことにより、橋梁の状態の精度の高い客観的判断や合理的な維持管理計画を可能にすることは確実である。ハードウェアが充実すれば、本研究で開発したモニタリングシステムは、あらゆるモニタリングシステムの構築に十分に有用な役割を果たすとともにモニタリングの飛躍的な進歩が期待できる。

(2) インテリジェントブリッジ

本研究では、斜張橋モデルを対象にしたインテリジェントブリッジを開発し、その動作と精度を検証する模型実験を実施した。開発したインテリジェントブリッジは、本研究

第5章 システムの高度化に関する提案

で開発したモニタリングシステムを活用した感知機能, 制御力算出システムを活用した判断と命令機能, アクチュエータとして電動シリンダを使用した制御機能を備え、各機能間の情報伝達も研究で開発したモニタリングシステムを適用している。制御実験では車両の移動において一部に手動部分が残存したが、インテリジェントブリッジとしての全機能は計画通りの自動的な動作ができた。また、未制御の主桁変位と制御後の主桁変位に関するFEM解析結果と計測値の比較では極めて近似した結果となり、解析による制御すべき主桁の復元変位（期待復元量）に対する計測による制御された主桁の復元変位（実復元量）の比（復元率）は約80%以上の結果となり、精度の面においても満足な性能を確認した。

斜張橋模型のインテリジェント化は実現したが、実橋梁への適用については様々な課題が残っている。通常で走行する車両の運行に整合した俊敏な制御動作ならびに制御命令の受信と同時に瞬時に数百トンの制御動作などの課題克服が必要である。しかし、ロボット技術が象徴するように我が国の制御技術は目覚ましい進歩を遂げ、世界的に高い評価を得ている。電子・電気技術や機械・制御技術など異分野技術と土木技術の融合を図ることができれば、大きな障害にならないと推定できる。

今後は、スマート材料の活用を含めて、インテリジェントブリッジに適合する橋梁形式や橋梁規模と制御の手法や手段を体系的に構想した研究開発が求められる。活荷重に比較して死荷重の影響が大きい長大橋へのインテリジェントブリッジの適用は、初期費用の低減などの面では効果や効率が悪いことが容易に推測できるため、橋梁数が多い中小橋梁に適用することが望ましい。しかし、我が国の現行技術基準では総重量250kNの大型車両を対象にしたAまたはB活荷重のみの定義であり、両活荷重による初期費用の差は極めて微小であるため、現在の規定活荷重では中小橋梁においても効果的なインテリジェントブリッジの構築は期待し難い。

性能照査型設計が活発に議論されている現在、インテリジェントブリッジも検討の俎上に載せるとともに、技術基準への導入を目的に構造特性の合理性を十分に解説して行くことが重要である。

性能照査型設計は、「設計された構造物が要求性能さえ満足していれば、どのような構造形式や構造材料、設計手法、工法を用いてもよいとする設計方法。」より具体的には、「構造物の目的とそれに適合する機能を明示し、機能を備えるために必要とする性能を規定し、規定された性能を構造物の供用期間中確保することにより機能を満足さ

せる設計方法。」と定義されている。定義の精神に則れば、本研究におけるインテリジェントブリッジについても性能照査型設計法で設計することが可能であり、効果的なインテリジェントブリッジ構築の可能性は期待できる。ただし、「道路協会橋梁委員会の改訂方針では、要求性能を明確化して法令に基づき強制する方針となっており、その場合には、要求性能の表現には性能を満たしていることが判断できるような定量性が求められる」と報告されているが、まだ「要求性能（応答値 $S \leq$ 限界値 R ）をどのような方法で算出して、どのような値にするか」が議論されている段階であり、性能照査のための性能規定において、応答値を算出する荷重値である作用・環境影響が、どのように規定されるかは全く不確定である²¹⁾²²⁾。

いま、性能照査型設計法の導入に向けて、技術基準（道路橋示方書）の改訂が繰返されている時期に、インテリジェントブリッジの実現と性能照査型設計法との関係を考察する。インテリジェントブリッジは、設計活荷重と大型活荷重の強度差を大きく設定できる場合に、その特徴が顕著になることは上述の通りである。ところが、現行の道路橋示方では、車両の総重量が 250kN の大型車両以外は橋梁の設計に適用することは不可能である。そのため、インテリジェントブリッジの実現に向けて、技術基準の活荷重に関する条項の改訂が望まれるが、車両の重量は、技術基準の上位の道路法で制定されており、荷重強度の改訂は難問であると考えられる。

道路法改訂の有無に関わらず、性能照査型設計法においてインテリジェントブリッジが設計法の一方法として認知されるためには、工学的根拠に基づいた性能照査の確立が重要である。性能照査に於ける応答値について、インテリジェントブリッジの構造特性に適合した制御の仕組、制御の手法、制御力などについて実験などによる検証、ならびに、制御の各段階を勘案した解析モデルや解析理論・解析手法など解析に関わる工学的根拠に基づいた論理の明瞭化が求められる。

新技術開発など設計者の創意工夫の活用、工期短縮、建設コスト縮減に向けて、性能を明示することによる国際化対応を目指す性能照査型設計の導入に際し、インテリジェントブリッジに着眼された検討を期待したい。

ただ、「構造物の構成部材の中で損傷する部材を制御して、構造系全体の性能を高める設計法」、つまり、「強度の低い部材のエネルギー吸収性能を高めることにより、構造系全体のエネルギー吸収性能を合理的に向上させる設計法」としてキャパシティ・デザイン（損傷制御設計；capacity design）があるが、この設計法は性能照査型設計

の一部、すなわち、性能を確保するための一種のアプローチの仕方であると位置づけられている²⁾。本研究のインテリジェントブリッジも、斜張橋の構成部材中の損傷する可能性のある主桁を制御して、構造系全体の性能を高める手法としては類似した設計法であると考えられる。性能照査型設計に移行した場合のインテリジェントブリッジの活用は、性能規定における荷重の定義によるところが大きい。

過去のインテリジェントブリッジの研究は概念の域に留まり、本研究のような実験は殆ど見られない環境の中で、本研究がインテリジェントブリッジブリッジに対する注目度を変える契機になることを期待する。同時に、本研究が対象にした自動車荷重に拘ることなく、近年、頻繁に発生している地震や台風、津波や洪水などの自然災害を対象にしたインテリジェントブリッジの開発にも着眼すべきである。

モニタリングシステムに立脚したインテリジェントブリッジは、新設や更新橋梁への適用による資源の削減のみならず既往橋梁の性能向上などにも有用な技術であり、モニタリングシステムを適切に活用することにより維持管理における調査点検の省力化にも汎用でき、将来的にはライフサイクルコストの低減にも貢献することが期待できる。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ，国道（国管理）の維持管理に関する検討会参考資料，老朽化対策参考資料。
- 2) 内閣官房「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」参考資料より，平成25年10月16日：http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/dai1/sankou。
- 3) 地方自治体に対するアンケート調査結果（社会資本メンテナンス戦略小委員会中間答申（平成25年5月30日）参考資料。
- 4) 土木学会；モニタリングによる橋梁の性能評価指針（案），構造工学シリーズ16，2006.5
- 5) BanFu Yan, Minoru Motoshita, Hideaki Nakamura, Ayaho Miyamoto ; Development of Remote Monitoring System for Bridge Evaluation, Journal of Applied Mechanics Vol.5 (August 2002) JSCE.
- 6) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita, Banfu Yan ; Internet Monitoring System for Bridge Performance Evaluation, Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures, American

Society of Civil Engineers (ASCE), 2003.3, pp.362-373.

- 7) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita, ; An Integrated Internet Monitoring System for Bridge Management, Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, ISIS CANADA RESEARCH NETWORK, pp.573-584.
- 8) TDS-303 データロガー ; 製品総合カタログ 2005-2006, 東京測器研究所, pp. 304～306.
- 9) 再構成可能組込システム ; <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ja/nid/14145>.
- 10) EZHP6A-05A 電動シリンダ総合カタログ 2005-2006, オリエンタルモーター株式会社.
- 11) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita, ; An Internet Para-Stressing System for Intelligent Bridge, Technical Notes, The MONITOR, International Society forStructural Health Monitoring of Intelligent (ISHMII), Vol.3,Issue2,pp.6-9.
- 12) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita and Joan R Casas, ; Development of an integrated remote monitoring technique and its application to para-stressing bridge system. International Journal of Advanced Structural Engineering 2013,5:28, Springer,Vol.5,No.28,pp.1-8.
- 13) Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita and T. Ogawa ; Development of an Integrated Remote Monitoring Technique and its Application to Para-stressing Bridge System, Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure,Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 415 39652 2, pp. 1597-1604.
- 14) 道路橋示方書・同解説, I 共通編, 社団法人日本道路協会, 平成24年2月.
- 15) 日本再興戦略「戦略市場創造プラン(ロードマップ)」平成25年6月14日 :
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/rm_jpn.pdf.
- 16) 田中雄三, 西山哲 : 無線センサデバイスを活用した道路管理手法について, 平成23年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 新技術・新工法部門No. 05, 2011.
- 17) 科学技術イノベーション総合戦略「科学技術イノベーションが取り組むべき課題(工程表)」平成25年6月7日閣議決定 :
<http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/koteihyo.pdf>.
- 18) 小野武, 西山哲 : 無線センサデバイスを活用した道路管理手法について, 平成23年度国土交通省国土技術研究会論文集.

- 19) 国土交通省，社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会（第3回），資料2-3，平成26年3月20日．
- 20) 森田康夫；土木構造物のリスクマネジメントとインフラ・イノベーション，JICE REPORT，Vol.15/2009.07.
- 21) 井上雅夫，和作幹雄；我が国における橋梁設計基準の性能規定化に関する調査，土木学会構造工学委員会性能設計推進のための審査体制検討委員会第1回議事録，2005年3月．
- 22) 杉山俊幸；性能照査型設計に基づく橋梁設計の基礎知識と応用，civil-eye.com. webセミナー，2004年8月．

第6章 結 論

橋梁の振動制御に関する研究成果はかなり蓄積があり、スマートモニタリングの重要性についても最近は多くの技術者に認識されつつあるが、橋梁のインテリジェント化に対する研究は未成熟である。橋梁のインテリジェント化が進展し難い理由の一端は、その規模が大きいこと、風や地震のように時空間的に外乱の性状予測が困難なものが多いこと、ならびに多くの橋梁が公共財であるために安全性や信頼性とライフサイクルコストとの関係などの説得力のある説明が必要であることなどが挙げられる。

本研究では、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スングの概念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や精度を検証した。

本研究で得られた成果について、各章毎に以下にまとめる。

【第2章 モニタリングシステムの開発】

センサ、計測器、計測用PC、GP-IBインターフェイス、計測操作プログラムで構成された橋梁の変状を計測するために主として現場に設置されるスタンドアロンモニタリングシステム（SMS）、インターネットを活用して遠隔地から計測結果路閲覧や加工ができるインターネットモニタリングシステム（IMS）、両システムを統合して遠隔地から計測の指令ならびに計測結果の閲覧ができる双方向の遠隔操作モニタリングシステム（RMS）を開発し、これ等のシステムを斜張橋模型に適用して実用性の検証実験を行った。計測の手順と内容ならびにクライアントの認証などのシステムは、計画通り動作することが確認できた。特に自動化を図ったRMSについては、過去に例の無い新規システムの開発であったが、システムの信頼性と有用性を確認することができた。

本研究の主要な結果と今後の課題は次の通りである。

1. SMSは計測開始日時と終了日時ならびに計測間隔を設定すれば、自動的に計測して計測結果を図表化して保存できる。SMSの活用により、計測の無人化と自動化によ

る省力化ならびにリアルタイム計測を可能にした。

2. PHSまたはLANを活用して、遠隔地からSMSを操作して橋梁をモニタリングする遠隔操作モニタリングシステム (RMS) は、時間と場所に制約されずにモニタリングすることを可能にしたのみならず、本システムに多数の橋梁関係者が同時にアクセスすることができ、最新の計測データを共用ならびに活用することを可能にした。
3. 本RMSを適用した橋梁模型の応力、変位などのモニタリングにおいては、クライアントからの指示ができることによりモニタリングが有効に機能し、維持管理などのためのデータは従来に比較して容易に獲得できるものと推定できる。
4. 維持管理に携わる専門技術者不足、多数の橋梁の集中的なモニタリング要請ならびにモニタリングのコスト低減が叫ばれる環境の中では、今後、下記の課題を克服することが重要である。
 - (a) 同一の橋梁管理者が、複数の橋梁を同時にモニタリングすることが求められる。本研究では単一橋梁に対してのシステム開発であったが、複数橋梁を対象にしたシステムを開発する。
 - (b) 現場での電源が懸念される施設であるため、橋梁現地でのソーラー発電や風力発電による電源確保ならびに無線充電の開発、計測機器やセンサおよびデータ処理装置や通信装置の省電力のためのコンパクト化や開発が望まれる。
 - (c) モニタリングは長期に及ぶことがあり、調査中にシステム、特にハード部分のトラブルは容易に推定される所である。モニタリングに空白が発生しないように、予め故障の検知機能を備えたモニタリングシステムの開発が必要である。
 - (d) 限られた財政の中で、多数の橋梁を集中的にモニタリングするための最大の課題は費用の低減である。設置と撤去に要する時間と労力の低減化とともにシステムの維持管理費の低減が重要であり、温度や湿度の対策を始め地震や台風ならびに落雷や誘雷などの自然災害の回避、計測センサや計測システムの無線化と省電力化などに対して、異分野の技術を融合した研究開発が望まれる。

【第2章 研究成果と将来展望】

本研究で開発した SMS, IMS, および RMS により、遠隔地からでもモニタリングの指令ができ、同時にモニタリング結果の活用や管理ができる過去に例のない双方向のモニタリングシステムを完成することができた。無人化と自動化を実現した本システムの活用により、限られた橋梁管理者が多数の橋梁の多様な要因を同時にモニタリングする

ことが可能になり、モニタリングの汎用が飛躍的に進歩することが期待される。

モニタリングシステムはセンサや計測機器および通信機器などで構成されているが、システムの初期費用および運用負担の軽減が大きな課題になっている。ハードウェアにおける課題としては、現場での電源の確保、センサや通信の無線化、機器のコンパクト化、全システムの省電力化、センサや機器の低廉化などが挙げられるが、土木分野のみの努力では限界がある。土木分野からは異分野である我が国の電子産業や通信産業は目覚ましい進歩を遂げていることを認識し、これらの異分野技術と土木分野の知見や経験に立脚した土木技術との融合を図ることができれば、課題の克服に対する障害は少ない。また、ソフトウェアにおける課題としては、センサや機器の省電力化や送受信データの重要性の識別などを勘案したシステムの構築が挙げられるが、上記のハードウェアとの連携により課題の解決を図ることができる。

近い将来、例えば本研究のモニタリングシステムを基盤にしたワイヤレスセンサネットワーク形成による橋梁のモニタリングも決して夢ではない。

【第3章 インテリジェントブリッジの開発】

開発したインテリジェントブリッジは感知機能、判断機能、および制御機能から構成されるが、制御力を判断する最適制御力算出システムは重要な役割を司る。FEM 解析理論に基づいて開発した最適制御力算出システムの信頼性と妥当性を検証するために、汎用のFEM解析プログラムである「DIANA RELEASE7.2」を使用した解析結果と本システムの解析結果の比較、および、本システムの解析結果と実験における計測値の比較を行った。

本章の主要な結果と今後の課題は下記の通りである。

1. 本システムの解析結果と「DIANA RELEASE7.2」を用いた解析結果には、主桁の変位および斜材ケーブルの張力ともに僅かな差異が見られるが、制御システムの中での制御機能として影響する差異ではない。よって、本システムで開発したFEM解析は十分信頼できるシステムであると判断する。
2. 解析値と計測値との比較の結果、主桁変位は活荷重の載荷位置や活荷重強度に関係なく解析値と計測値は極めて良く近似しており本システムの妥当性は確認されるが、斜材ケーブルの張力は外側ケーブルと内側ケーブルで異なる現象が見られる。外側ケーブルでは解析値と計測値が比較的良く近似しているが、内側ケーブルの解析値は計

測値の約2倍に近い張力を示す。この現象は、主桁と主塔の曲げ剛性の差によるものと推定される。主桁の曲げ剛性に比較して主塔の曲げ剛性が低いため、主塔の変位が大きく、内側ケーブルが外側ケーブルより鈍感になったものと考えられる。また、荷重載荷時に内側ケーブルが外側ケーブルに比較して緩んだ状況にあった結果と推定され、実験開始前に斜材ケーブルの張力を調整すれば解決できるものとする。

3. 開発した制御力算出システムの信頼性と妥当性は確認されたが、今後に向けて下記の課題の克服が必要である。

(a) 本研究における解析結果を有効数字3桁で表記したために、当システムと汎用プログラムとの解析結果に差異が発生したと推定される。有効数字5桁にすれば、差異は減少して結果検証の信頼性は更に明確になると考えられる。

(b) 当システムの検証実験において、実験の計測値の精度を向上させるためには、実験開始前に死荷重載荷相当の斜材ケーブルの張力を斜材ケーブルに作用させておく準備調整は必須である。

(c) インテリジェントブリッジは橋梁が更新されるまで機能する必要がある。稼働中にシステム、特にハード部分のトラブルは容易に推定される。制御が必要な時に機能が停止しないように、予め故障の検知機能を備えたインテリジェントブリッジの開発が必要である。

(d) 本システムでは、荷重の移動を自動的に稼働させるシステムには至っていないためにシステムの一部を手動で処理している。今後、インテリジェントブリッジの実現に向けて、車両の移動を検知できるセンサを設置するなどの手法の採用で、全工程を自動化したシステムの開発を目標にした研究の継続が必要である。

【第3章 研究成果と将来展望】

本研究で開発した斜張橋模型のインテリジェントブリッジは、感知機能、判断機能および制御機能ともに計画通りの性能を果たし、橋梁のインテリジェント化の可能性を確認することができた。実橋梁に適用するについては、車両の移動と整合した制御機能の動作や大規模な制御力の載荷装置などの課題はあるが、制御効果が明確な構造である斜張橋模型のインテリジェント化は実現できた。

今後は、スマート材料の活用を含めて、インテリジェントブリッジに適合する橋梁形式や橋梁規模と制御の手法や手段を体系的に構想した研究が求められる。本研究では、通常に走行する小規模車両と稀に通行する大型車両の荷重強度の差に着眼してインテ

リジエントブリッジを構想してきたが、我が国の現行技術基準では総重量 250kN の大型車両を対象にしたAまたはB活荷重のみの定義であり、荷重強度差によるインテリジェントブリッジの利点を主張することは困難である。性能設計が積極的に議論されている状況の中、インテリジェントブリッジも検討の俎上に載せ、構造特性の合理性を十分に議論して技術基準への導入を図ることが大切である。

また同時に、本研究が対象にした自動車荷重に拘ることなく、近年、頻繁に発生している地震や台風、津波や洪水などの自然災害を対象にしたインテリジェントブリッジの開発にも着眼すべきである。

【第4章 斜張橋模型を用いたインテリジェントブリッジの制御実験】

本制御実験は、大型活荷重による主桁変位を設計活荷重による主桁変位まで復元させるための制御に関する検証実験である、未制御の主桁に大型活荷重を載荷した場合と制御済の主桁に載荷した場合について解析値と計測値とを比較して、本研究で開発したインテリジェントブリッジの信頼性と妥当性および制御の可能性を検証する。システムの動作および実験結果の精度〔解析精度、計測精度、制御精度〕において、本実験で一定の結論は確認されたが、主桁と主塔の相対的な剛性が制御の効率に影響することが判明した。今後は制御の均質性や有効性を向上させるために橋梁の構造特性を再検討することが重要である。また、本実験では主桁部材の変位に着目した制御を行ったが、今後は橋梁の全部材の応力を考慮した制御が必要である。

本実験の主要な結果と今後の課題は下記の通りである。

1. 斜張橋模型では荷重載荷位置、設計活荷重および大型活荷重の強度の差により実験値と解析値に差異は生じたが、斜材ケーブルの張力調節による主桁変位の制御が有効であることが検証できた。
2. 荷重載荷位置に関係なく、設計活荷重と大型活荷重の強度差が小さい方がより解析値と計測値の変位は近似することが判明し、設計活荷重と大型活荷重の強度差を小さくすることで、斜張橋模型の主桁部材変位を精度良く制御することが可能であることが確認できた。
3. 大型活荷重と設計活荷重の組合せに関係なく、荷重載荷位置が主塔に近い方が実験値と解析値に大きな差異が見られた。

(a) 主塔の剛性が主桁の剛性に比較して極端に低いために、斜材ケーブルの張力を調

節した際に、解析値以上に主塔が傾斜したことが要因であったと考えられる。

- (b) 主塔に近い荷位置は主塔から離れた荷位置と比較して、活荷重荷による変位の増加が顕著に現れ難い節点であるため重大な問題にはならないと考える。

4. 本制御実験では、アクチュエータとして電動シリンダを使用した。今後のインテリジェントブリッジの実用化に向けて下記の課題に向き合う必要がある。

- (a) 本実験では、主桁変位を制御するために、電動シリンダの駆動で斜材ケーブル張力を調整しながら所定の張力を導入する手法を採用したが、斜材ケーブル張力の調整はケーブル長の調整と同様の結果を得ることができる。今後、電動シリンダの駆動で張力を導入場合には、調整を省略するために、解析で算出したケーブル長の短縮量で張力を導入する手法に改善する。
- (b) 実橋の斜材ケーブルの張力導入は、数百トンに及ぶ張力を瞬時に導入する必要がある。今後は、機械工学などの異分野の技術と土木の知見や経験を融合させたアクチュエータの研究開発が望まれる。

【第4章 研究成果と将来展望】

斜張橋模型インテリジェントブリッジの検証実験では、システムの動作、精度ならびに復元率ともに概ね計画に近い結果が確認でき、課題を残しつつも斜張橋模型のインテリジェント化を実現することができた。

実橋梁への適用にあたっては様々な課題が残っているが、制御装置の性能も課題の一つである。本研究では電動シリンダをアクチュエータとして使用したが、実橋梁では制御命令の受信と同時に瞬時に数百トンの制御動作が必要となる。このような制御装置は未経験ではあるが、我が国にはロボット技術が象徴するように極めて高度な制御技術が蓄積されている。このような技術を考えれば、技術的には制御装置の開発には大きな障害はないものと推定できる。

今後は、このように土木分野から見た異分野の電子や電気技術ならびに機械や制御技術との連携や融合を図って行き、インテリジェントブリッジの実現に向けて協同することが重要である。既往のインテリジェントブリッジに関する研究は概念の域に留まり、本研究のような実験までには至っていない。本研究がインテリジェントブリッジに対する関心を変える契機になることを期待する。

【第5章 システムの高度化に関する提案……まとめ】**(1) モニタリング**

我が国の高度経済成長期以降に急速に整備された橋梁の維持管理において、モニタリングの有用性および重要性は広く認知されている技術と言えるが、積極的かつ広範囲に活用されているとは言い難い。多種多様かつ膨大な数の橋梁に対するモニタリングシステムの適用には、システムの初期費用の削減ならびにシステムの維持管理を含めた運用負担の軽減などが課題になっている。また同時に、様々な橋梁に対するモニタリングの実施が散見されるが、未だ客観的な橋梁の保有性能や損傷同定などの判断ならびに橋梁の長寿命化を含む運用や活用計画を支援するための満足なデータの蓄積が少ないことも課題である。

モニタリングシステムはセンサや計測機器および通信機器などで構成されるが、これらの機器は電子や通信の産業界の貢献によるところが多である。我が国の電子産業はナノテクノロジーのような新技術の分野を築き、通信産業は携帯電話に象徴されるように世界的に確固たる地位を築いている。モニタリングにおける今後のハードウェアは、電子や通信などの異分野の技術と土木分野の知見や経験に立脚した土木技術との融合による研究開発に委ねることが重要である。例えば、ナノセンサデバイスのようにMEMSやNEMSと言われるシステム、大量の情報伝達と小型化を指向する携帯電話の技術、汎用性や多機能性に優れたデータ集約機器を実現したRIO技術などの活用により、センサや計測機器および通信機器のコンパクト化、低廉化、無線化、省電力化を図り、初期費用の削減や運用負担の軽減を志向すべきである。

ハードウェアと同様に、高性能な時計を内蔵させたネットワークのノードにシステムの覚醒とスリープ状態の詳細な計画を組み込んだシステムの構築、あるいは、モニタリングデータに閾値を設定して閾値以上のデータのみを送信するシステムまたは閾値以上の異常な挙動のみを警告として送信するシステムの構築などにより省電力化を図り、電池交換を長期化するソフトウェアの開発も重要である。また、モニタリングに関するデータの蓄積は重要であることは論を俟たないが、一方では橋梁形式や材料毎に分類した標準的なモニタリングシステムの構築を試行することも重要である。上述した機能を備えた安価なハードウェアが実現すれば、本研究で開発したSMSやIMSならびにRMSなどのモニタリングシステムを活用することにより、橋梁の構造特性とモニタリング目的を明確にした標準的なモニタリングシステムの構築を可能にするこ

とができる。

さらに、ハードウェアとソフトウェアを融合することによりセンサネットワークを形成して、橋梁の挙動の変化をモニタリングする状況が実現すれば、橋梁の性能の変化や劣化の把握は飛躍的に高速化ならびに高精度化することが期待できる、また、モニタリングと従来の橋梁の点検調査が補完しあうことにより、橋梁の状態の精度の高い客観的判断や合理的な維持管理計画を可能にすることは確実である。ハードウェアが充実すれば、本研究で開発したモニタリングシステムは、あらゆるモニタリングシステムの構築に十分に有用な役割を果たすとともにモニタリングの飛躍的な進歩が期待できる。

(2) インテリジェントブリッジ

本研究では、斜張橋模型を対象にしたインテリジェントブリッジを開発し、その動作と精度を検証する模型実験を実施した。開発したインテリジェントブリッジは、本研究で開発したモニタリングシステムを活用した感知機能、制御力算出システムを活用した判断と命令機能、アクチュエータとして電動シリンダを使用した制御機能を備え、各機能間の情報伝達も研究で開発したモニタリングシステムを適用している。制御実験では車両の移動において一部に手動部分が残存したが、インテリジェントブリッジとしての全機能は計画通りの自動的な動作ができた。また、未制御の主桁変位と制御後の主桁変位に関するFEM解析結果と計測値の比較では極めて近似した結果となり、解析による制御すべき主桁の復元変位（期待復元量）に対する計測による制御された主桁の復元変位（実復元量）の比（復元率）は約80%以上の結果となり、精度の面においても満足な性能を確認した。

斜張橋模型のインテリジェント化は実現したが、実橋梁への適用については様々な課題が残っている。通常で走行する車両の運行に整合した俊敏な制御動作ならびに制御命令の受信と同時に瞬時に数百トンの制御動作などの課題克服が必要である。しかし、ロボット技術が象徴するように我が国の制御技術は目覚ましい進歩を遂げ、世界的に高い評価を得ている。電子・電気技術や機械・制御技術など異分野技術と土木技術の融合を図ることができれば、大きな障害にならないと推定できる。

今後は、スマート材料の活用を含めて、インテリジェントブリッジに適合する橋梁形式や橋梁規模と制御の手法や手段を体系的に構想した研究開発が求められる。活荷

重に比較して死荷重の影響が大きい長大橋へのインテリジェントブリッジの適用は、初期費用の低減などの面では効果や効率が悪いことが容易に推測できるため、橋梁数が多い中小橋梁に適用することが望ましい。しかし、我が国の現行技術基準では総重量250kNの大型車両を対象にしたAまたはB活荷重のみの定義であり、両活荷重による初期費用の差は極めて微小であるため、現在の規定活荷重では中小橋梁においても効果的なインテリジェントブリッジの構築は期待し難い。

性能設計が活発に議論されている現在、インテリジェントブリッジも検討の俎上に載せるとともに、技術基準への導入を目的に構造特性の合理性を十分に解説して行くことが重要である。

性能照査型設計は、「設計された構造物が要求性能さえ満足していれば、どのような構造形式や構造材料、設計手法、工法を用いてもよいとする設計方法。」より具体的には、「構造物の目的とそれに適合する機能を明示し、機能を備えるために必要とする性能を規定し、規定された性能を構造物の供用期間中確保することにより機能を満足させる設計方法。」と定義されている。定義の精神に則れば、本研究におけるインテリジェントブリッジについても性能照査型設計法で設計することが可能であり、効果的なインテリジェントブリッジ構築の可能性は期待できる。ただし、「道路協会橋梁委員会の改訂方針では、要求性能を明確化して法令に基づき強制する方針となっており、その場合には、要求性能の表現には性能を満たしていることが判断できるような定量性が求められる」と報告されているが、まだ「要求性能（応答値 $S \leq$ 限界値 R ）をどのような方法で算出して、どのような値にするか」が議論されている段階であり、性能照査のための性能規定において、応答値を算出する荷重値である作用・環境影響が、どのように規定されるかは全く不確定である²¹⁾²²⁾。

いま、性能照査型設計法の導入に向けて、技術基準（道路橋示方書）の改訂が繰返されている時期に、インテリジェントブリッジの実現と性能照査型設計法との関係を考察する。インテリジェントブリッジは、設計活荷重と大型活荷重の強度差を大きく設定できる場合に、その特徴が顕著になることは上述の通りである。ところが、現行の道路橋示方では、車両の総重量が250kNの大型車両以外は橋梁の設計に適用することは不可能である。そのため、インテリジェントブリッジの実現に向けて、技術基準の活荷重に関する条項の改訂が望まれるが、車両の重量は、技術基準の上位の道路法で制定されており、荷重強度の改訂は難問であると考えられる。

道路法改訂の有無に関わらず、性能照査型設計法においてインテリジェントブリッジが設計法の一方法として認知されるためには、工学的根拠に基づいた性能照査の確立が重要である。性能照査に於ける応答値について、インテリジェントブリッジの構造特性に適合した制御の仕組、制御の手法、制御力などについて実験などによる検証、ならびに、制御の各段階を勘案した解析モデルや解析理論・解析手法など解析に関わる工学的根拠に基づいた論理の明瞭化が求められる。

新技術開発など設計者の創意工夫の活用、工期短縮、建設コスト縮減に向けて、性能を明示することによる国際化対応を目指す性能照査型設計の導入に際し、インテリジェントブリッジに着眼された検討を期待したい。

ただ、「構造物の構成部材の中で損傷する部材を制御して、構造系全体の性能を高める設計法」、つまり、「強度の低い部材のエネルギー吸収性能を高めることにより、構造系全体のエネルギー吸収性能を合理的に向上させる設計法」としてキャパシティ・デザイン（損傷制御設計；capacity design）があるが、この設計法は性能照査型設計の一部、すなわち、性能を確保するための一種のアプローチの仕方であると位置づけられている²⁾。本研究のインテリジェントブリッジも、斜張橋の構成部材中の損傷する可能性のある主桁を制御して、構造系全体の性能を高める手法としては類似した設計法であると考えられる。性能照査型設計に移行した場合のインテリジェントブリッジの活用は、性能規定における荷重の定義によるところが大きい。

過去のインテリジェントブリッジの研究は概念の域に留まり、本研究のような実験は殆ど見られない環境の中で、本研究がインテリジェントブリッジブリッジに対する注目度を変える契機になることを期待する。同時に、本研究が対象にした自動車荷重に拘ることなく、近年、頻繁に発生している地震や台風、津波や洪水などの自然災害を対象にしたインテリジェントブリッジの開発にも着眼すべきである。

モニタリングシステムに立脚したインテリジェントブリッジは、新設や更新橋梁への適用による資源の削減のみならず既往橋梁の性能向上などにも有用な技術であり、モニタリングシステムを適切に活用することにより維持管理における調査点検の省力化にも汎用でき、将来的にはライフサイクルコストの低減にも貢献することが期待できる。

【第6章 結論】

本研究における各章の結論と課題や将来展望は上述の通りであるが、本研究の主要な要因である「モニタリングシステムの開発」および「インテリジェントブリッジの開発」の結論は下記の通りである。

[モニタリングシステムの開発]

開発した遠隔操作モニタリングシステムは新規開発のシステムであったが、双方向のモニタリングシステムが計画通り動作することが確認でき、システムの信頼性と有用性が明確になったと考える。

モニタリングの費用対効果の向上、モニタリング結果の損傷同定・性能評価・健全度診断・余寿命予測などへの活用、長期モニタリングへの対応、電源の確保と省電力化、システムの無線化、システムの高度化・耐久化・低コスト化に向けた異分野技術と連携・融合などの課題の克服が必要であるが、モニタリングの無人化と自動化による省力化、リアルタイム計測、遠隔地のPCからモニタリングの計測命令ができる効率的なモニタリングシステムの基礎が確立したと考える。

[インテリジェントブリッジの開発]

本研究で開発したインテリジェントブリッジの検証実験の結果、システムは計画通り自動的に動作し、システムは良好な精度〔解析精度・計測精度・制御精度〕ならびに復元効率を示したことにより、インテリジェントブリッジの信頼性が確認された。

インテリジェントブリッジの適用対象になる橋梁形式・橋梁規模・制御手法と制御力などの調査研究、アクチュエータの研究開発、性能照査型設計法への対応などの課題の解決が重要であるが、工学的根拠に基づいたインテリジェントブリッジの実現に向けた基礎の確立、および、課題の明確化を達成することができたと考える。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、長期に亘り終始、丁寧なご指導を戴きました山口大学大学院理工学研究科教授 宮本文穂先生に衷心より感謝の意を表しますとともに、厚く御礼を申し上げます。宮本先生には、研究者としての心得や研究をする上での基本的かつ重要な事項のご指導は元より、地域社会に貢献できる産官学の実質的な連携、専門分野を超えた異分野との柔軟な融合、国際的な視野や感覚に立脚した海外の研究者や技術者との交流などの理念を掲げられて、かつ、実践しておられる様子を長年に亘って目の当りにさせて戴きました。社会基盤整備に携わる研究者・技術者として掛替えの無い時空を戴きましたことに深甚なる感謝の意を表します。

本論文を纏めるにあたり、ご多忙な公務中にも拘わらず時宜を得た有益なご教示、ご助言を戴きました山口大学大学院理工学研究科教授 兵頭正幸先生、同教授 喜多英敏先生、同教授 中村秀明先生、同助教 江本久雄先生に深く感謝を申し上げます。特に、中村先生には、研究における実験装置の更新や補修ならびにシステム構築に関する先端技術の活用など多くのご助言を戴きました。また、情報処理技術に疎い私の稚拙な相談にも寛容なご指導を賜りました。改めて深く感謝を申し上げます。

若い頃に、恩師 元神戸大学工学部教授 故・西村昭先生と故・藤井学先生から研究開発の大切さをご高教戴きました。特に、藤井先生からは本研究の動機になった「パラストレッチ」の概念を教示して戴きました。高齢になるまで研究の意志を持続できたのは、両先生から戴いた夢と希望のお蔭です。厚く感謝を申し上げます。

山口大学大学院理工学研究科博士前期課程に所属し、本研究のシステムの構築および検証実験を終始積極的に支援を戴いた故・坂本直樹氏、坂井隆記氏、谷郷順一郎氏、小川隆司氏、松本祐樹氏に衷心より感謝いたします。

長期の研究生活で退嬰した際に、常に温かい激励と適正な助言を戴きました後藤悟史氏（宇部興産機械株式会社）、長田幸晴氏（株式会社構造物クリニック）に厚く感謝を申し上げます。併せて、リハテック研究会会員の皆様に感謝を申し上げます。

本論文を纏めるにあたり、資料整理や資料作成のご支援を戴きました川西直樹氏（協和設計株式会社）ならびに櫻井文子氏（同）に深く感謝を申し上げます。

最後に、山口大学大学院理工学研究科博士後期課程への進学ならびに社会人博士課程の意義を十分に理解して、常に温かく支援して呉れ、最終成果を誰より強く期待しながら天国へ旅立ってしまった最愛の妻 比呂美に心から謝意を表します。妻の存在が無ければ研究の継続も研究の纏めも不可能でありました。ありがとう。