

モニタリング技術を用いた 橋梁の知的制御に関する基礎的研究

宮本文穂 (山口大学名誉教授)

本下 稔 (協和設計(株), 元山口大学大学院博士後期課程学生)

川西直樹 (協和設計(株))

A Study on the Intelligent Bridge with an Advanced Monitoring System and Smart Control Techniques

Ayaho MIYAMOTO(Professor Emeritus),

Minoru Motoshita(Special Adviser of Kyowa Sekkei CO., LTD) and

Naoki Kawanishi(Kyowa Sekkei CO., LTD)

Abstract: This paper introduces an approach to the realization of an ICT-based bridge remote monitoring system which enables real-time monitoring and control for unexpected heavy loads such as big earthquake and strong typhoon. In this paper, the integrated bridge remote monitoring system called the “Intelligent Bridge” consists of a stand-alone monitoring system (SMS) and a web-based internet monitoring system (IMS) for bridge maintenance but also its application to para-stressing bridge system as an intelligent structure. For the purpose of verifying its validity to actual bridge structure, an attempt is made to study the possibility of controlling the actual structural performance by adjusting the cable forces on a 2-span continuous cable-stayed bridge model. The experimental results demonstrate that the implemented monitoring system supplies detailed and accurate information about bridge behavior for further evaluation and diagnosis, and it also opens up prospects for future application of web-based remote system to actual in-service bridges under field conditions.

Key Words : *intelligent bridge, Stand-alone Monitoring System, Internet Monitoring System, Control Power Calculation System*

1. はじめに

近年、橋梁分野でも橋梁の状態を感知し、判断・命令し、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構造物化の実現が期待されている^{1)~3)}。この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。しかしながら、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制振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りますが、その研究数は極めて少ない^{4),5)}。

橋梁は従来から、技術基準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。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、橋梁に危険を及ぼす可能性がある大型車両が荷重された場合に、橋梁が危険な状態から回避される制御ができれば、設計活荷重強度を超える大型車両に対しても橋梁の安全性と信頼性が確保できる。設計活荷重強度を超える大型活荷重の作用に対して危険を感知して、その荷重を相殺するようにアクチュエータなどの制御装置が作動して、橋梁を安全な状態に復元することが可能なシステムを備えた橋梁が実現すれば、画一的な条件で設計された橋梁に比較して橋梁建設時の材料の削減が図れ、省資源に貢献すると同時に初期建設費の縮減や供用中の維持管理費を削減することも可能になると考えられる。

このような知的構造物を実現するためには、橋梁に作用する異常な外乱や外力および応力や変形など

橋梁の変状を計測する感知機能（センサ機能），計測結果に基づく橋梁の状態把握と橋梁の安全性や信頼性の自己診断ならびに危険な場合の制御方法や制御力の決定をするとともに制御装置への制御命令の発信をする判断命令機能（プロセッサ機能），および制御装置を起動させる制御機能（アクチュエータ機能）のすべてを実行できるシステムが不可欠である。また同時に，各機能のシステム内部では前工程から受信したデータを有効に活用するために，効率的なデータの収録と管理および加工が必要であり，各機能システムの間では大量の情報やデータの相互移動を可能にするシステム間を連繋するシステムが必要である。知的構造物には，これら一連の機能とシステムを瞬時かつ自動的に実行できるシステムが要求される。

本研究では，リアルタイムの自動計測ならびに計測結果の収録と図表化などができるシステムとして計測用コンピュータ上で動作する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），複数の関係者が複数のSMSの計測操作ならびにデータの閲覧や収集ができるシステムとしてネットワークを活用したモニタリングシステム（インターネットモニタリングシステム；IMS），およびインターネットを介して時間や場所に支配されることなく両システムを作動するためのシステムとしてSMSとIMSの両システムを統合した遠隔モニタリングシステムを構築する。更に，構造物の性能を制御する時に指令する必要制御力を算出するためのシステムとしてFEMに基づく制御力算出システムの構築，ならびに，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を備えた斜張橋模型の性能を制御するために遠隔モニタリングシステムを活用した制御システム（パラストレスシステム）を開発する。

更に，構築したシステムを感知機能，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い，遠隔モニタリングシステムの動作性能，制御力算出システムなど構造解析システムの精度，ならびにパラストレスシステムの動作性能を検証する。更に，すべての検証結果を総合することにより，橋梁のインテリジェント化の可能性の検証とインテリジェント化を実現するための課題の抽出を行う。

上述のような本研究の流れを図-1にまとめて示す。



図-1 研究のフロー

2. 本研究の目的と概要

(1) 目的

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²⁾。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。

知能化された橋梁は，設計荷重を低減させることによる初期建設費や資源の削減，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を持っている。違った観点では，近年のコンピュータや構造制御技術の目覚ましい発展，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

境が整ってきたと言える。

更に、智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、橋梁の維持管理システムの構築にも極めて有用である。我が国の社会基盤の多くは高度成長時代に整備されており、近い将来、その老朽化とともに補修補強ならびに更新の需要が集中的に、あるいは大幅に増大する状況にあり、社会基盤の維持管理や長寿命化は喫緊の課題になっている。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、社会基盤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時がきたと言える。

図-2 に橋梁建設工程とモニタリングによる性能照査を示す。現行の橋梁の建設工程は①～⑤であり、発注者が示す橋梁に対する要求性能を定式化し(①)、そこで得られた構造的な情報を総合して設計し(②)、解析を通じて挙動予測する(③)。予測結果に基づいて要求性能を確認した(④)後、実際の施工に移り(⑤)、供用が開始される。以上のような性能確認の結果、不満足であれば②または③に戻って再検討される。以上の建設までの工程は一方通行であるが、工程⑥～⑩のモニタリングを追加することにより計測挙動(計測性能)ができ、設計や施工時だけでなく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、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長期性能照査に利用が可能になる。新設橋梁や既存橋梁の実際の建設工程や維持管理にモニタリングの工程を追加すれば、様々な建設工程や維持管理の形態が生まれる。新設橋梁の場合は、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、モニタリングを介して橋梁性能を評価ならびに確認して補修や補強を含めた要求性能の確定、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性能を勘案して制御装置の増設を計画することになる。

また、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

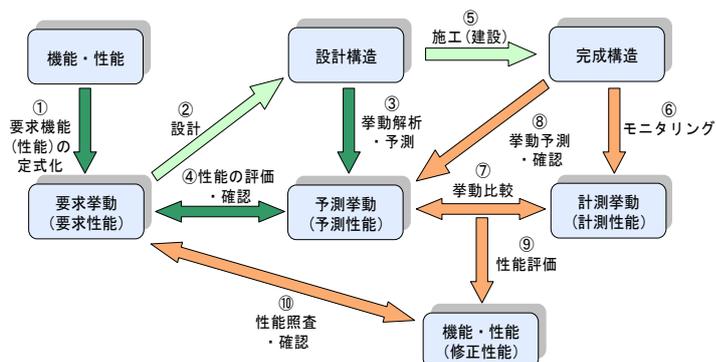


図-2 橋梁の建設工程とモニタリングによる性能照査

ーネットに象徴される通信技術、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は十分な蓄積があり、かつ目覚しく発展しているが、種々の技術を統合したシステムの構築や種々のシステムを統合した橋梁建設形態のフレームの構築などは未だ十分とは言えない。本研究は橋梁の知能化の概念に基づく種々のシステムの開発ならびにインテリジェントブリッジの実現と橋梁のモニタリングシステムの構築を目指す。

(2) 概要

橋梁の知能化の標準は、ひずみや変位など橋梁の状態を感知(検知)するセンサ機能、得られた情報を管理や分析をするとともに判断(安全性や信頼性の自己診断)と命令(制御命令)をするプロセッサ機能、および制御命令を作動させるアクチュエータ機能を備えていることである。また同時に、制御手法の確定とともに合理的な制御力を設定するためのシステムの構築、効率的な制御方法を備えた制御システムの構築、更に制御に必要なすべての情報を伝達するためのシステムの構築が必要である^{1),6),7)}。

本研究では、斜張橋模型を対象構造物として知能化のためのシミュレーションおよび模型の制御実験を行い、構築したシステムの性能や精度の検証ならびに斜張橋のインテリジェント化の可能性の検証とインテリジェントブリッジ実現のための課題を抽出する。

本研究のシミュレーションでは、通常に通行する車両を想定した荷重を設計活荷重、稀にしか通行することのない大型車両を想定した荷重を大型活荷重と定義し、大型活荷重を載荷した場合でも橋梁の安全を保持するために斜材ケーブルの張力を調節して主桁部材の変位を制御するシステムを対象とする。

本研究では、図-3 に示すように斜張橋模型をモデルにした解析と実験を行って、斜張橋における知能化の可能性と解析精度を検証する。解析では、制

御力算出システムを開発し、その構造解析により最適な制御力を算出する。算出した制御力を橋梁モデルに作用させた状態で同様に構造解析することにより制御力作用後の橋梁の挙動を把握する。模型実験では、知能化された斜張橋模型に大型活荷重を載荷して主桁部材の変位と斜材ケーブルの張力を計測した後、アクチュエータを用いて斜材ケーブルに最適制御力を作用させて主桁部材の変位を制御し、制御前と同様に制御後の斜材ケーブルの張力と主桁の変位を計測する。

その後、主桁変位の計測結果から変位の復元率を算出して斜張橋のインテリジェント化を検証し、解析結果と実験結果との比較により解析の手法と精度を検証する。

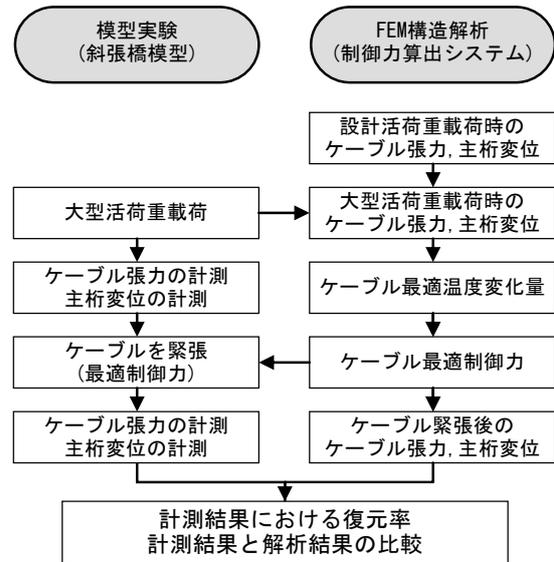


図-3 模型実験のフロー

3. システムの開発

(1) システム開発の目的

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を得ることにその目的がある。従来のモニタリングは手作業の計測に頼っていたが、モニタリングの効率を向上させるためには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ならびに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の構築が必要である。本研究では、リアルタイム計測や計測結果の図表などを表示する、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)、ネットワークの活用による複数の関係者の遠隔地から遠隔計測指令ならびにデータ収集や閲覧を可能にするインターネットモニタリングシステム (IMS)、およびこの両システムを統合する遠隔モニタリングシステムを構築した(図-4 参照)。

構造物のインテリジェント化の実現には、構造物を自己組織化し、外界からの外力を自己感知、自己判断および自ら命令制御ができるシステムの構築が必要である。本研究では、遠隔モニタリングシステムを基盤にして、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して、図-5 に示すパラストレスシステムを開発した。

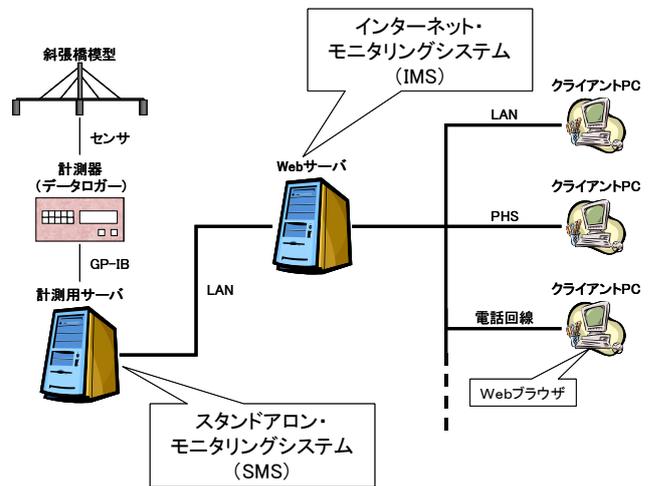


図-4 モニタリングシステムの構成

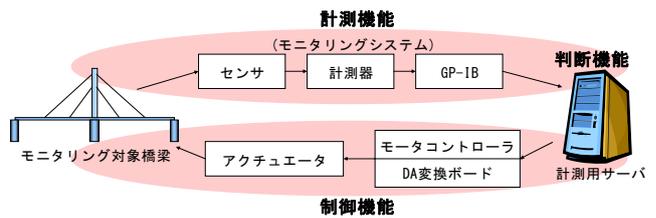


図-5 パラストレスシステムの構成 (インテリジェントブリッジの概念)

(2) 遠隔モニタリングシステム

本遠隔モニタリングシステムは、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) の2つのシステムから構成されている。

SMSは、計測器の制御、ならびに橋梁に設置されたセンサからの計測データの計測用サーバ内への取り込みはできるが、橋梁現場のコンピュータ上でのみ動作しているため限られたユーザ以外は利用ができない。橋梁の維持管理において計測データをより効率的に利用するためには、必要な時に、必要なデータを、迅速に参照または収集できることが求められる。多数の橋梁管理関係者が遠隔地の管理事務所などからでも計測データおよびシステムの動作状況の確認および遠隔地からの計測命令ができるシステムが必要である^{6), 8), 9)}。

SMSならびにIMSによるモニタリングシステムの構成を図-4に示す。

i) スタンドアロンモニタリングシステムの概要

SMSは橋梁の現場に設置された計測用コンピュータ上で動作するモニタリングシステムであり、橋梁に設置されたセンサにより橋梁部材の応力や変位などの橋梁の挙動ならびに橋梁周辺温度の周期的な計測、収集したデータの図や表への表記、計測サーバへの収録、ならびにWebサーバへの転送機能を持つシステムであり、橋梁の遠隔モニタリングを実現するための基盤となる^{10), 11)}。SMSは図-4に示すように斜張橋模型の挙動を監視する計測器（データログ）、および計測器への計測指令とデータ収録を担う計測サーバから構成される。計測サーバは計測制御とデータ収録プログラムを備え、監視データの記録やデータの図表化の機能を有する。

ii) インターネットモニタリングシステムの概要

橋梁の現場に設置されたSMSの計測やデータ収録の効率の向上には、Webサーバの統合および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)の構築が必要である。モニタリングデータのリアルタイム送受信が可能なIMSの活用により、インターネットに接続できる環境にあれば橋梁状態の迅速な認識、ならびに効率的な管理や時間と場所に支配されない収録データの使用や計測指令が可能になる。IMSの活用は現場モニタリングにおける課題の早期発見、複数橋梁の同時モニタリング、橋梁管理以外の目的へのデータ活用、データの適用性への保証、ならびに調査や維持管理の削減を可能にする。

一方、IMSを実務で使用する場合はシステム破壊のようなインターネット侵害者の不法な攻撃、データの改ざん、および他人の傍受と成り済ましを防御することが重要になる。IMSにおいては、利用者が

システムやデータに接続する許可範囲を計測結果の処理、データ使用、またはデータ検索などに分類し、ある利用者はWebサーバの共有ファイルサーバに接続できるが、他の利用者は許可されないようにシステム利用に制限を掛ける必要が出てくる。システムは可能な限り多数の橋梁関係者がデータの検索や利用ができるように意図して構築されるべきであるが、システムの安全性の領域に基づいてシステムの管理者、関係者、特別関係者などに分類してシステムへの接続を制限するとともに、各安全性の程度に基づいた多重の認証を設定することが必要である。本研究では、管理者と同等の広範囲な接続において暗号化したSSLに基づいたサーバ認証、クライアント認証、およびパスワード認証の3段階の認証を設定している。

本研究で開発したIMSによるモニタリング結果の出力例として、気温と斜材ケーブルのひずみのグラフを図-6に、通行頻度グラフを図-7に示す。

図-6は、1ヶ月間の気温変化と斜材ケーブルのひずみのモニタリング結果の出力例である。これにより、長期間の気温の変化とそれに伴う斜材ケーブルのひずみの変化を見ることができる。

図-7は、通行頻度グラフの出力例である。交通量や車両区分は橋梁管理関係者がモニタリングに求める情報の一つであり、モニタリング結果を閲覧できるデータとして荷重別の通行頻度をグラフ化したものである。

(3) パラストレッシングシステムの概要

i) パラストレッシングシステムの着想^{12), 13)}

パラストレッシングは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。図-5は構造物自身が外力を感知、判断および制御する組織化されたパラストレッシングシステムの構成(インテリジェントブリッジの概念)を示す。本研究では、遠隔モニタリングシステムを活用して、計測結果に基づいた変状やひずみなど橋梁の状況の感知、計測サーバによる活荷重強度およびサービス水準や安全性の判断、制御が必要な場合の制御力の算出および制御装置への制御命令の送信、ならびに性能を復元する制御ができる機能に指示を与え、これら一連の動作を自動的に実行するパラストレッシングシステムを構築した。

ii) パラストレッシングシステムの開発

インテリジェントブリッジの概念であるパラストレッシングシステムは図-5 に示すように感知, 判断, および制御動作の3機能で構成され, 遠隔モニタリングシステムを使ってこの機能を遂行するシステムである. 感知機能は橋梁の状態を正確に把握する機能であり, 斜張橋模型の斜材ケーブル張力の調整により主桁の変位を制御するパラストレッシングシステムを使った. 本実験においては, 制御動作前後の斜材ケーブル張力の正確な計測と把握に対して重要な役割を担う. 判断機能は大型活荷重載荷時の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に必要な斜材ケーブルの張力を算出する機能であり, 同時に, 制御時においては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と最適制御力が一致するまで制御機器への命令を繰り返すが, その命令を判断する機能も兼ね備える. 制御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.

4. 制御システム

(1) 制御システムの目的および概要

設計活荷重以上の大型活荷重が対象橋梁を通過すれば, 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. 橋梁の安全を担保するための制御システムは, インテリジェントブリッジを実現するために必要かつ橋梁の制御機能の重要な部分を担っている.

本研究では, 主桁変位を斜材ケーブルの張力調節によって制御する手法を採用するため, 主桁変位を抑制するために必要な制御力を構造解析により算出し, その制御力を斜張橋の模型に作用させて斜材ケーブルの張力と主桁の変位を計測する. この一連の動作と計測の結果によりインテリジェントブリッジ実現の可能性を追求する基礎資料にする.

本実験では, 斜張橋模型における斜材ケーブル張力の調節は主塔側から斜材ケーブルを巻取る手法で緊張することにより制御力を作用させ, 大型活荷重による過大な主桁変位を設計活荷重による変位まで復元させる仕組みを採用する.

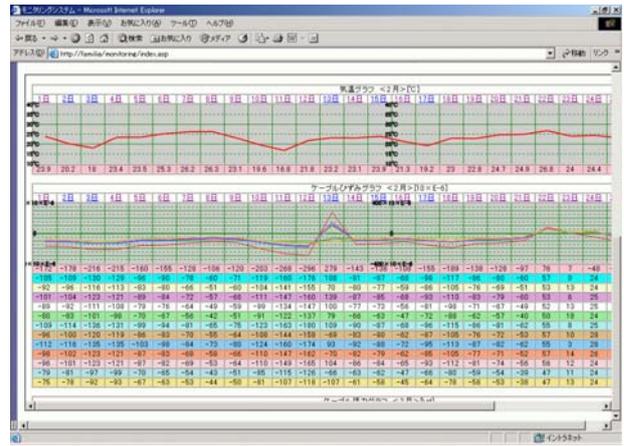


図-6 気温と斜材ケーブルのひずみ

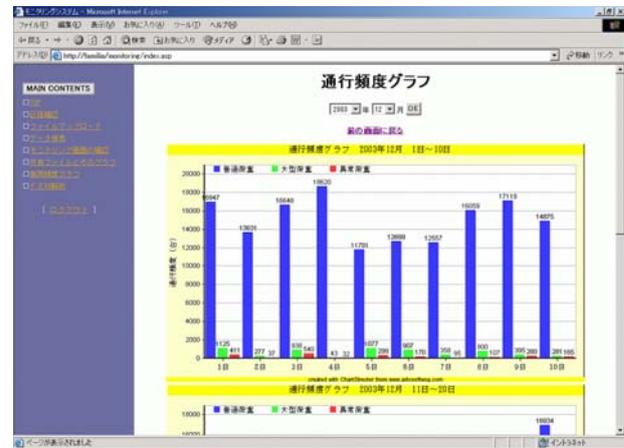


図-7 通行頻度グラフ

(2) システムの構築

i) 制御力の算出方法

本研究では, 大型活荷重載荷時の主桁変位を, 設計活荷重載荷時の変位まで復元させるための最低限の制御力を最適制御力と定義し, 斜張橋模型をモデルにしたFEM解析により最適制御力を算出する.

制御力の導入はアクチュエータを用いて斜材ケーブル長を緊張する手法であるため, FEM 解析においても同様に斜材ケーブル長が短縮する状態を形象して, 斜材ケーブルの温度低下による斜材ケーブル長の短縮の原理を適用する.

下記の計算式により差分の減少を繰り返し, 最適制御力と同等になる斜材ケーブルの温度を算出する.

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

$$\Delta T_n = \sum_{i=1}^n \Delta T(i) \quad (2)$$

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

ここで、

D_p : 設計活荷重を載荷時の主桁変位 (mm)

D_i : 設計活荷重載荷時の主桁変位 (mm)

$\Delta T(n)$: 解析で変化させる温度量 (°C)

ΔT_n : 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)

である。

以上の計算を $\Delta D(n) = 0$ となるまで繰り返す。

FEM 解析により ΔT_n (°C) を算出して、斜材ケーブルの温度を ΔT_n (°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。

ii) 制御力算出システムの概要

本研究では、斜張橋模型を対象として、斜張橋モデル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、橋梁の死荷重、載荷する活荷重など様々な境界条件や荷重条件を入力して、FEM 解析により適切な制御力を求める制御力算出システムを構築する。

本システムは斜材ケーブルの張力や各部材の変位を解析する通常の状態把握のほかに、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重要なシステムである。また、解析システムの妥当性検証を考慮して、制御力の算出に加えて死荷重載荷状態、設計活荷重載荷状態、大型活荷重載荷状態および制御力作用状態など 4 状態における橋梁各部材の変位、斜材ケーブルの張力および変位図を解析結果として同時に出力する。また、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するシステムを構築した。

iii) 制御力算出の流れ

図-8 に、制御力算出システム処理過程を示す。

- 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

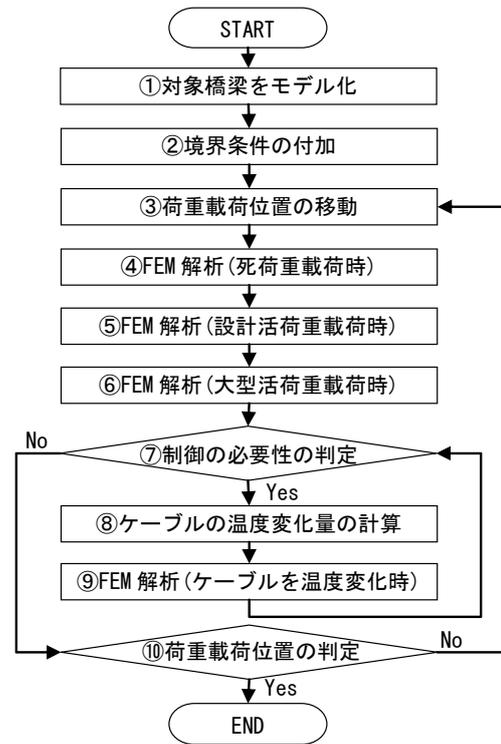


図-8 制御力算出システムフロー

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
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
設計活荷重の約 2~5 倍の大型活荷重を集中荷重として載荷して FEM 解析を行う。
- ⑦ 主桁変位が設計値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、最適制御力の算出を行う。
- 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
活荷重が移動していれば解析を終了し、移動していなければ①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-9 に示す。

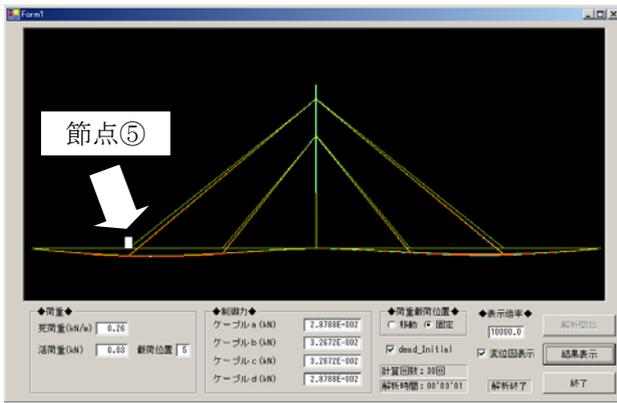


図-9 制御力算出システムの出力例

(3) システムの検証

構築した制御力算出システムによる解析結果の妥当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」¹⁴⁾を用いて解析結果と本システムの解析結果を比較して検証する。

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の2要素について解析結果を比較する。検証の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-9, 図-10 参照)にした。解析結果を表-1, 表-2に示す。

本システムとDIANA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。

主桁の鉛直方向の最大変位は50.0Nの活荷重載荷時の-0.788 [mm]に対して、最大の変位差0.006 [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、50.0 Nの活荷重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]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。以上より、本システムでのFEM解析結果は十分信頼できる値である判断する。

表-1 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-2 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

5. 斜張橋模型を用いたモニタリング制御実験

(1) 斜張橋模型の概要

本研究では、岐阜県内の斜張橋（橋長62.0 m）の縮尺1/15の写真-1のような橋梁模型（橋長4.0 m）を対象構造物として、パラストレスシステムによるモニタリング制御の模型実験を行う。模型の主桁は、桁幅310mm、桁高70mmの箱断面、主塔は橋軸方向幅80mm、直角方向50mmの箱断面で構成されている。

図-10に橋梁模型の構造形状、モニタリングのためのセンサ、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等の概要、表-3にセンサの計測項目と測定点数を示す。図-10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変位計を示す。①～⑫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。

斜張橋模型には、1個5Nのおもり40個を等間隔で載荷し、これ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。

(2) 制御の復元効率の検証実験

i) 実験の概要

本実験では、本研究で開発したパラストレスシステムに基づいて活荷重載荷による主桁変位を制御操作により復元し、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-3に示す手順で、下記のように実施した。

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プログラムが始動する。大型活荷重が最初の変位計測点(A)に到達した時に、設計活荷重載荷時と同等の主桁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の計測が始まる。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、大型

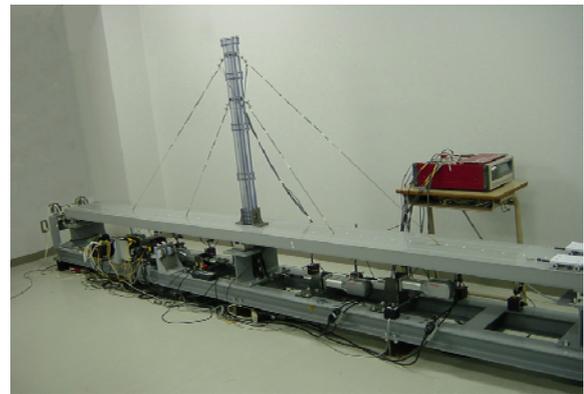


写真-1 斜張橋模型の外観

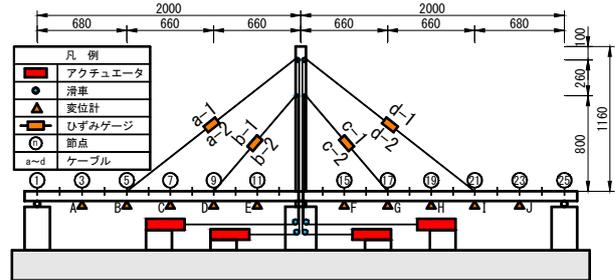


図-10 斜張橋模型における計測位置

表-3 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

表-4 実験ケースと荷重強度

実験ケース	大型活荷重(N)	設計活荷重(N)
Case(i)	40	10
Case(ii)	40	30
Case(iii)	50	10
Case(iv)	50	30

活荷重は図-10に示す主桁変位の計測器が設置されている計測位置(A)まで移動する。大型活荷重が計測点(A)に到達すれば、次の計測点(B)に対して上記の過程を繰り返す。以上のように、大型活荷重が橋梁の始点から終点に到達するまで操作を繰り返すとともに、各制御段階の主桁変位を計測する。本模型実験の対象活荷重の種類を表-4に示す。

許容活荷重は対象橋梁を通常に走行する、現行の設計基準に規定する設計活荷重以下の活荷重を想定し、大型活荷重は対象橋梁を稀に走行する、橋梁に危険を及ぼす可能性がある活荷重を想定する。実験では大型活荷重載荷時の制御前の主桁変位、ならびに設計活荷重載荷時の主桁変位まで変位を減少させ

た制御後の主桁変位を計測する。

本実験の目的は、遠隔モニタリングシステムおよび制御力算出システムを活用して、最適制御力の算定、制御力操作ならびに各段階の主桁変位の計測を行い、計測結果に考察を加えて制御操作による主桁変位の復元の効果を検証するとともに、本研究で開発したパラストレスシステムの妥当性を検証することである。

表-4 に実験ケース Case(i) ~Case(iv) における大型活荷重と設計活荷重の強度およびその組合せを示す。ここでは、大型活荷重 40N, 設計活荷重 10N を載荷時の表-4 における実験ケース Case(i) を取り上げて説明と考察をする。

最初に大型活荷重 40N を各載荷点 (A~E) に載荷して、各大型活荷重載荷時の各計測点 (A~J) の主桁変位を計測し、制御前の大型活荷重による主桁変位 ($\delta m1$) とする。続いて、すべての載荷点毎に 40N 載荷時の主桁変位を 10N 載荷時の主桁変位まで制御した主桁変位を計測して、制御後の主桁変位 ($\delta m2$) とする。制御前の主桁変位と制御後の主桁変位の計測値の差 (実際の復元量) と 10N の設計活荷重載荷時に計測した主桁変位 ($\delta m3$) と制御前の主桁変位 ($\delta m1$) の差 (期待する復元量) を比較して、下記の復元率 $Rr(\%)$ によりパラストレスシステムの効率を検証する。

$$Rr = \frac{\delta m1 - \delta m2}{\delta m1 - \delta m3} \times 100 (\%) \quad (4)$$

ii) 実験結果

ここでは、表-4 の実験ケース Case(i) の結果について考察する。図-11 は節点 B に大型活荷重が載荷した時の実験結果と有限要素法 (FEM) による解析との比較を示す。

図-11 における各データは、下記の通りである。

- I. 制御前の大型活荷重による主桁変位の測定値
- 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後の主桁変位測定値
- III. 制御前の大型活荷重による主桁変位の FEM 解析値
- 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復元させた制御後の主桁変位 FEM 解析値

各活荷重載荷点 A ~E における制御前後の計測結果による復元率 (Rr) を表-5 に示す。

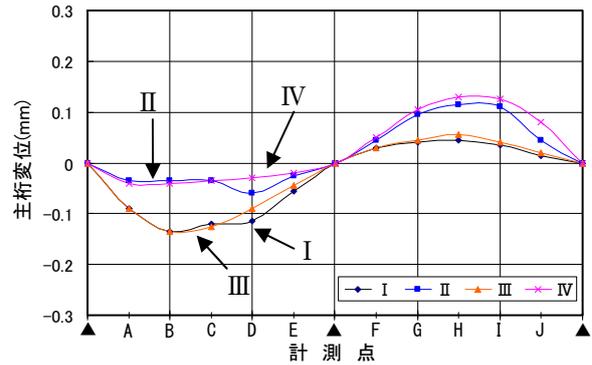


図-11 節点⑤載荷時の復元状況 (Case(i))

表-5 計測結果の復元率, Rr (Case(i))

計測点	載荷点					平均値
	A	B	C	D	E	
支点						
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
支点						
F	76	85	82	79	136	
G	86	93	90	83	114	
H	86	90	86	81	109	
I	89	92	86	79	98	
J	49	16	4	-38	-139	
支点						
平均値	107	96	89	86	70	90

iii) 実験結果の考察

図-11 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、パラストレスシステムの開発で採用した FEM 解析の妥当性が検証された。

表-5 の青色の塗り潰し部分(支点 A~E)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、本研究で採用したパラストレスシステムは橋梁変位の復元に有効であることが検証できた。

図-11 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。表-5 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。

iv) 実験の結論

本研究では、大地震や大型台風のような予期しない大規模な荷重をリアルタイムのモニタリングや制御ができる橋梁のパラストレスシステムを開

発したが、パラストレッチングシステムはインターネットの活用だけではなく、最新の情報処理やコンピュータ技術などの情報技術を活用した構成が重要である。

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. 本研究で構築された遠隔モニタリングシステムは構造物の調査や点検において十分に機能し、異常な荷重の作用時に橋梁の性能を正常な状態に制御するパラストレッチングシステムの開発において有効である。
2. 本研究で開発したパラストレッチングシステムは主桁変位の復元率において 80%を確保できた。これは極めて有望な結果ではあるが、当復元率を更に向上させるためには、橋梁を構成する構造部材の相対的な剛性など橋梁の構造的な特性の把握が必要である。
3. パラストレッチングシステムも遠隔モニタリングシステムと同様にネットワークの連携が支配的な課題であり、下記の必要条件を満足させることが重要である。
 - (a) セキュリティ対策として、暗号化してデータを保護する SSL やセキュリティの程度による多層認証を採用したが、セキュリティを向上するための更なる努力が必要である。
 - (b) パラストレッチングシステムの活用においては、複数橋梁の同時モニタリングと同様に効率的なデータ処理、データの信頼性と適合性の保証、ならびにシステムの機能不全の早期発見と回復が必要である。

(3) 解析結果の検証実験

i) 実験の概要

斜張橋模型に本研究で構築した遠隔モニタリングシステムと制御力算出システムを統合して開発したパラストレッチングシステムを適用して、各システムの機能、モニタリング制御の機能、ならびに斜張橋のインテリジェント化を実験によって検証する。

本実験では、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最適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、解析値と計測値の比較により制御力算出システムの妥当性と遠隔モニタリングシステムのパラストレッチングシステムへの適用の可能性を検証する。

大型活荷重 (40N, または, 50N) を主桁変位の計測点に載荷し、斜材ケーブルの 4 本すべての張力と主桁変位を計測する。次に、制御力算出システムで斜材ケーブルの制御に必要な最適制御力を求め、アクチュエータにより前項の模型実験と同様の手法で最適制御力を導入し、制御後の斜材ケーブルの張力および主桁の変位を計測する。表-6 に活荷重の種類と各実験ケースにおける荷重の組合せと載荷位置を示す。制御前後でそれぞれ計測結果と FEM 解析結果とを下記の復元比 (Rma) で比較して、制御力算出システムと制御操作の妥当性を検証する。

$$Rma = \frac{\delta m1 - \delta m2}{\delta a1 - \delta a2} \quad (5)$$

ここで、

$\delta m1$: 大型活荷重載荷時の主桁変位計測値

$\delta m2$: 大型活荷重載荷時の変位制御後の主桁変位計測値

$\delta a1$: 大型活荷重載荷時の主桁変位解析値

$\delta a2$: 大型活荷重載荷時の変位制御後の主桁変位解析値

である。

なお、模型実験で導入する制御力は、制御力算出システムにおける斜材ケーブルの温度低下 ΔTn に伴う斜材ケーブルの増加張力として算出した張力を最適制御力とする。一方、模型実験における計測では、前もって実施したケーブル張力とケーブルに設置されたひずみゲージにより計測されるひずみとの関係のキャリブレーション結果を用いて斜材ケーブルの張力とする。斜材ケーブルの計測張力は次式により決定する。

$$P = k \times \xi \quad (6)$$

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[50000]

である。

ii) 実験結果と考察

実験の考察項目を表-7 に示し、制御前後の主桁変位の差の解析値と実験値の比 (復元比 ; Rma) を図-12 に示す。

- I. 組合せケース A : C : E では、大型活荷重強度が同じであったにもかかわらず張力調節後の載荷位置での Rma 比が、実験ケース A, C, E で

各々0.76, 0.89, 0.98 となり, 設計活荷重強度が大きくなるほど解析値の変位に近い結果となった. 実験ケース B : D : F おいても同様の傾向を示した.

- II. 組合せケース A : B では, 張力調節後の荷重位置での *Rma* 比は, 実験ケース A, B でそれぞれ 0.76, 0.73 となり, 大型活荷重強度の小さい実験ケース A の方が解析値の変位に近い結果となった. 組合せケース C : D および E, F においても同様の傾向を示した.
- III. I の組合せケースと同様に, 設計活荷重強度が大きくなるほど解析値の変位に近い結果となった.
- IV. II の組合せケースと同様に, 大型活荷重強度の小さい方が解析値の変位に近い結果となった.
- V. 組合せケース A : G では, 設計活荷重強度, 大型活荷重強度がともに同じであったにもかかわらず張力調節後の荷重位置での *Rma* 比が, 実験ケース A, G でそれぞれ 0.76, 0.65 となり, 荷重位置⑤の場合の方が解析値の変位に近い結果となった. 組合せケース B : H の場合でも同様に張力調節後の荷重位置での *Rma* 比は, 実験ケース B, H でそれぞれ 0.73, 0.58 となり, 荷重位置⑤の場合の方が解析値の変位に近い結果となった. また, 大型活荷重強度が小さい方が解析値の変位に近い結果となった.
- VI. V の組合せケースと同様に, 荷重位置②の場合の方が解析値に近い結果となった. また, 大型活荷重強度の違いにおいては, 大型活荷重強度の小さい方が解析値の変位に近い結果となった.
- VII. V の組合せケースと同様に, 荷重位置⑤の場合の方が解析値に近い結果となった. また, 大型活荷重強度の違いにおいては, 大型活荷重強度の小さい方が解析値の変位に近い結果となった.
- VIII. 設計活荷重強度が大きい場合の方が解析値に近い結果になった. また, 荷重位置⑤においては, 荷重位置⑤の場合の方が解析値に近い結果となった.
- IX. VIII と同様に, 設計活荷重強度においては設計活荷重強度が大きい場合, 荷重位置⑤においては荷重位置⑤の場合の方が解析値に近い結果となった.

iii) 実験の結論

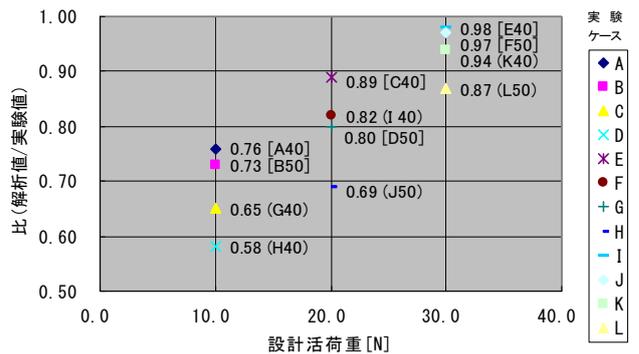
本実験では, 大型活荷重による主桁変位や斜材ケーブルの張力ならびに主桁変位を復元させるための制御力について, 制御操作前後の解析値と実験値と

表-6 実験ケースの一覧

設計活荷重 [N]	大型活荷重 [N]	実験ケース	
		荷重位置 : ⑤	荷重位置 : ⑨
10.0	40.0	Case-A	Case-G
	50.0	Case-B	Case-H
20.0	40.0	Case-C	Case-I
	50.0	Case-D	Case-J
30.0	40.0	Case-E	Case-K
	50.0	Case-F	Case-L

表-7 比較項目の一覧

考察ケース	組合せケース	考察項目
I	A : C : E	荷重位置⑤での設計活荷重強度の違いによる挙動差
	B : D : F	
II	A : B	荷重位置⑤での設計活荷重強度の違いによる挙動差
	C : D	
	E : F	
III	G : I : K	荷重位置⑨での設計活荷重強度の違いによる挙動差
	H : J : L	
IV	G : H	荷重位置⑨での設計活荷重強度の違いによる挙動差
	I : J	
	K : L	
V	A : G	設計活荷重10.0N時の大型活荷重強度および荷重位置の違いによる挙動差
VI	B : H	設計活荷重20.0N時の大型活荷重強度および荷重位置の違いによる挙動差
	C : I	
VII	D : J	設計活荷重30.0N時の大型活荷重強度および荷重位置の違いによる挙動差
	E : K	
VIII	F : L	設計活荷重40.0N時の大型活荷重強度および荷重位置の違いによる挙動差
	A : G	
	C : I	
IX	E : K	設計活荷重50.0N時の大型活荷重強度および荷重位置の違いによる挙動差
	B : H	
	D : J	



(注) 図中の [], () は荷重位置②, ⑤, ⑨, A~L は実験ケース, 数字は大型活荷重強度 (N) を示す.

図-12 各実験ケースによる解析値と実験値の比

を比較して, 本研究で開発した遠隔モニタリングシステムの信頼性と妥当性および制御の可能性を検証する. 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とともに効果的に活用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, 今後は応力を考慮した制御が必要であると考える.

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の変位に近い値になることが判明し、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を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。

6. 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て、インテリジェントブリッジの実現に向けたシステムの構築とシステムを利用した斜張橋模型のモニタリング制御実験を行った。実験では、本研究で構築した遠隔モニタリングシステムと制御力算出システムおよび両システムを活用したパラストレスシステムを活用して、斜張橋模型に対してセンサ機能、プロセッサ機能およびアクチュエータ機能の全機能を作動させ、斜張橋模型に載荷される荷重の検知から、載荷荷重による橋梁の状態把握と安全性の判断、危険な場合は制御力の算定と制御装置への制御命令、制御操作により安全な状態に復元するまでの一連の動作を実施した。各動作段階における斜張橋模型の斜材ケーブル張力と主桁変位を計測して、計測結果の

分析および計測結果と解析の比較と考察により、橋梁知能化の手法、制御のために開発した種々のシステムの性能と精度、および橋梁の知能化の可能性を検証した。

以下に本研究の成果をまとめて示す：

- ① 本研究で採用した構造物知能化の手法および構築したシステムは、妥当かつ有効であることが検証できた。とりわけ、遠隔モニタリングシステムは、パラストレスシステムの構築に有用であり、更にパラストレスシステムの感知機能と判断機能の部分は構造物の実用的なモニタリングに十分に活用できる。
- ② パラストレスシステムは斜張橋の知能化に対して、模型実験の計測値から得られる制御による復元率は有望な結果を示し、実験値と解析値の比較においても精度良く制御されていることが確認できた。ただ、復元率や制御の精度を向上するためには構成部材の相対的な剛性など構造物の特性の把握と活用が重要である。
- ③ パラストレスシステムを実用化するためには、ネットワークにおけるセキュリティ対策ならびにデータ処理の効率化やシステムの機能不全対策に課題がある。

なお、本実験では制御動作を除く一連の動作はすべて自動的に実施したが、斜材ケーブルを牽引する手法で張力を導入する制御は一部手動で行った。今後は、斜張橋模型に設置してあるアクチュエータをPCから操作して自動的に制御を可能にするため、パルス発振ボードやモータコントローラプログラムなどの開発が必要になると考えられる。また、実橋に適用する場合、瞬時に巨大な制御力を作用させることになり、現時点ではアクチュエータの開発が課題になる。

参考文献

- 1) C. Boller, F. Chang and Y. Fujino (Ed.): Encyclopedia of Structural Health Monitoring, A John Wiley and Sons, Ltd., Publication, Vol. 1-5, 2009.
- 2) 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.
- 3) スマートストラクチャー研究会編：SMART STRUCTURES, p.14,1993.
- 4) 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.

- 5) 中沢正利, 有尾一郎, 谷倉 泉, 小野秀一 : MFMM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
- 6) J.R.Casas: Structural Control of Bridges: Recent Experiences in Cable-stayed Bridges, Structural Control for Civil and Infrastructure Engineering, Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Control, Paris, World Scientific, New Jersey, pp. 85–92, 2000.7.
- 7) 山本鎮男 : ヘルスモニタリング, 共立出版, 1999.8.
- 8) J. Holnicki-Szulc and J. Rodellar: Requirements and Potential Applications in Mechanical and Civil Engineering, Vol. 65, Smart Structures, NATO Science Series. Kluwer, Boston, 1998.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 金藤仁 : 自動計測システムのためのVisualBasic6入門, 技術評論社, 2000.3.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) DIANA(Finite Element Analysis) User's Manual (Dynamic Analysis, etc), TNO Building and Construction Research, Release 7, 2000.

(平成28年11月4日受理)