

## 【委員会報告】

## Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring 研究の動向

## RESEARCH TRENDS ON INTELLIGENT BRIDGE/STRUCTURE AND SMART MONITORING

構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会

Subcommittee on Investigation of Bridge Vibration Monitoring

## 1. はじめに

橋梁振動モニタリング研究小委員会は構造工学委員会内の研究小委員会として1996年5月に設置され、2期4年間に渡って調査研究活動を行ってきた。調査研究の主な内容としては、橋梁振動的な確かな把握、橋梁の健全性、使用性の確保、損傷同定などを、橋梁の短期的および長期的モニタリングによって評価するための手法の検討である。またこの4年間の期間中に1997年10月には橋梁振動コロキウム<sup>1)</sup>、1999年11月 Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring に関する公開講演会<sup>2)</sup>を開催して新しい技術に関する情報交換を行った。またこのような調査研究活動の集大成として、2000年10月に「橋梁振動モニタリングのガイドライン」を土木学会より出版することが確定している。さらに継続してこの日本語版の出版物を再編して英語版のガイドラインを出版するための準備作業に取りかかっている。本研究小委員会では1997年よりISO/TC108(機械振動と衝撃)に委員を派遣し、橋梁振動計測、解析に関する国際基準の作成に参画している。また引き続き、ISO/TC108/SC2/WG3 においては日本からの委員が提案した「橋梁振動計測結果の評価」に関する国際基準作業がISOメンバー各国から了承され、2004年2月の完成を旨として作業が開始された。このようなISO/TCにおいて橋梁振動計測評価に関する国際基準を作成することの意義は先進各国における橋梁振動計測評価の技術を統一するとともに、統一された基準に基づく計測データの蓄積をはかり、後進各国においてこれらが参照され、高価な実験が重複されることを避けることにある。さて我国における橋梁振動に関する研究は昭和40年(1965年)頃より、研究論文の発表が始まっているが、組織的に橋梁振動研究に関する情報交換の集まりが開始されたのは、金沢大学の梶川康男教授を中心とする橋梁振動研究会が主催した1987年7月の橋梁振動コロキウム<sup>3)</sup>が最初である。その後、平成4年(1992年)5月に構造工学委員会内に橋梁交通振動研究小委員会(委員長梶川康男金沢大

学教授)が設置され、橋梁交通振動に関する調査研究活動が1996年まで4年間実施された<sup>4)</sup>・<sup>5)</sup>。またこれに関連して1995年8月には構造工学委員会振動制御小委員会(委員長宮田利雄横浜国大教授)が第3回振動制御コロキウムを開催して橋梁振動の制御に関する情報交換を実施している<sup>6)</sup>。一方、1989年の冷戦時代の終了を転換点として、これまで戦略的に研究されてきた新しい科学技術の開発の成果を、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近年アメリカなどにおいて活発である<sup>7)</sup>・<sup>8)</sup>。したがって橋梁振動研究の分野においても新しい技術の展開が目ざましく、光ファイバーセンサーの応用や光通信技術、遠隔ネットワーク技術、新素材、先端材料の応用などによって橋梁のStructural Health Monitoring(構造健全度モニタリング)の技術は21世紀前半に花開く信頼性が確実な分野となりつつある。このような状況から、本報告においては1999年11月に開催した Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring に関する公開講演会論文集の概要を紹介して、今後のこの分野の研究動向を理解するための一助とするものである。

## 2. 全体的動向の解説

## (1) 概要

橋や建築などに知的機能を持たせることを目的として行われている最近の研究動向について概観する。知的機能は大きくセンサ機能、プロセッサ機能、アクチュエータ機能に分類されるが、それらに関する研究はさらに細分化できる。例えばセンサ機能については、インテリジェント材料そのものの創製に関する研究や光ファイバー、圧電素子、形状記憶合金などの応用技術に関する研究、さらにそれらを用いたスマートモニタリングに関する研究に大別できる。プロセッサ機能については、複合材料を含めた新材料の開発やER流体の利用技術に関する研究などが挙げられる。さらにアクチュエーター機能についても、受動的(passive)、準能動的(semi-active)、

能動的 (active), 混合的 (hybrid) 各制御に関する技術開発や、自己修復機能を持つ材料について極めて幅広い研究が行われている。機械製品等のように規模が小さく、また作用力にも比較的不確実性の少ない人工物と異なり、一般に土木や建築構造物はその規模が大きく、また、作用する荷重の時空間的特性についても不確実性が大きいので、技術的な面のみでなく、コストの点からも完全なインテリジェント化を実現することは極めて難しい。しかし、その一部の機能を有する構造物は、室内およびフィールドでの試験研究の段階を経て、近い将来にも現実化する可能性は高い。

## (2) “Intelligent” および Smart の概念

世界で初めて「Intelligent material (インテリジェント材料, 知能材料あるいは知的材料)」の概念が提唱されたのは、故島村機械技術研究所次長による 1978 年であるとの説もあるが、科学技術庁長官の諮問機関である航空・電子等技術審議会の第 1 3 号答申書(「環境条件に知的に应答し、機能を発言する能力を発揮する新物質・材料の創製に関する総合的な研究開発の推進について」)が出された 1989 年を Intelligent material が認知をされた元年と考えるのが妥当であるとの見方が強い。もっとも、それ以前の 1971 年に、自動制御の分野ですでに「Intelligent systems」という用語が使われている<sup>9)</sup>。

ともあれ、1992 年には「インテリジェント材料に関する第 1 回の国際会議」がわが国 (大磯) において開催され<sup>10)</sup>、高木は、「センサ (検知), プロセッサ (判断), エフェクタ (指令, 行動) の全機能を有する材料がインテリジェント材料である」との概念を諸外国に先駆けて提唱した。

ただ、この点についても、それらの全機能を有する材料は「インテリジェント複合材料」であり、「インテリジェント材料は、複合材料を構成するひとつひとつの素子の性能を高めるために利用される材料である」との定義がある。さらに、「複数の材料を組み合わせて単一の材料で得られない機能を発揮させる材料はスマート材料である」との定義もあり、今後、国際的なレベルでの統一化を図る必要がある。

一方、アメリカでは、1989 年頃から宇宙・航空機分野の研究者を中心にして「Smart structure (知的構造物, スマート構造物, スマートストラクチャー)」の概念構築がなされ、産業プラント、原子力プラント、建築・土木構造物、自動車、船舶などへの応用が図られるようになった。わが国では、先に挙げた高木らを中心にしてスマートストラクチャー研究会が設立され、1993 年 9 月には、「環境応答・内部診断機能自蔵型材料の創製に関する調査研究報告書」が刊行されている<sup>11)</sup>。なお、その中で科学技術庁金属材料技術研究所の新谷は、スマートストラ

クチャーとスマートマテリアルに関する、その時点での研究動向を精確にまとめている<sup>12)</sup>。基本的には現在でもその動向に大きな変化はない。

さて、「スマートストラクチャー」と「インテリジェントストラクチャー」の概念についても、上述のインテリジェント材料、インテリジェントシステム、スマート材料と同様、完全に確立された概念ではない。しかし、「インテリジェントストラクチャー」は、あらかじめ予見できない環境の変化や外乱に対して、自身で適切に対応できる構造物、一方、「スマートストラクチャー」は、ある程度設計段階で予測できる外乱に対してのみ自ら適切に対応する構造物であるという考え方が我が国では有力であるように思われる。

## (3) 橋梁における Smart Monitoring の具体例

耐用期間における構造物の状態を、センサ機能を持つひとつの材料あるいは複合材料によって監視することを Smart Monitoring という。Health Monitoring もほぼ同義的に使われている。

現在、わが国でも、

①光ファイバー ②圧電素子 ③形状記憶合金 ④最大ひずみ記憶合金

などの比較的新しい各種センサと、多点測定伝送システムなどの複合応用技術によって、構造物に生じるひずみや変位の自動監視を行い、得られた情報を電話回線によって所定の場所まで伝送するシステムが開発されつつある<sup>13)</sup>。

ここでは、ハンガリーのプレストレストコンクリートアーチ橋と、アメリカにおけるプレストレスト連続けた橋のスマートモニタリングに関して掲げられている課題を簡単に紹介しておく。

### a) コンクリートアーチ橋<sup>2)</sup>

試験的研究の対象となったプレストレストコンクリート床版を有するアーチ橋は、静的および動的実験の結果、直ちに補強する必要はないと判断された。しかし、プレストレスト材の腐食の進行が懸念されたため、長期に渡る自動観測システムの構築が図られ、現在、

- ・強度の異なる非金属繊維から成るスマート材料によって、ひずみが検出できるか。
- ・ガラス繊維光ファイバーを橋の表面に貼付して、応力を連続的に制御できるか。
- ・レーザー変位計によって中央スパンのたわみを、ストレーンゲージによって任意点の変形を、さらに加速度計によって振動数の分布を、いずれも連続的に測定し、電話回線によって所定の所にデータを送信できるかななどの諸項目が実測データに基づいて検討されている。

### b) プレストレスト連続けた橋<sup>14)</sup>

規模の大きい構造物のヘルスマニタリングにおいては、

局所的なモニタリングと同時に構造物全体の挙動を監視する技術の開発が重要であるとし、解決すべき課題として、

- 1) センサの配置：できるだけ少ない数のセンサで最大の情報を得るにはどのようにセンサを配置すればいいか？なお、この問題は経済性の面から極めて重要である。
  - 2) ワイヤレス伝送技術の利用：数多くのセンサから情報の処理とセンサからの情報をいかに伝送するか？
  - 3) 2)で得られた情報を、橋の危険性を判定したり、崩壊を防ぐシステムにどのようにしてうまく利用するか？
- などが挙げられている。

#### (4) Intelligent Bridge/Structure の動向

スマートモニタリングの結果を自ら<診断>し、例えば予期せぬ回りの環境の変化や外乱を受けて、計画より大きな振動や変形が発生するようであれば自ら過大な振動や変形を<制御>し、一部が破損した場合には<自己修復機能>によってクラックを修復する夢のような構造物が、知能を持った構造物という意味でインテリジェント構造物と称されている。

しかし、当面は、あらかじめほぼ想定できるような環境変化や外乱に対して、自ら適切な対応のできるスマートストラクチャーに関する研究が先行するようになる。

例えばアメリカにおけるこの分野の近年の研究動向については文献<sup>15)</sup>で詳述され、その中で多くの新しいコンセプトが示されている。すなわち、

wireless sensors, optical fiber sensors, data acquisition and processing systems, advanced composite materials, structural controls, dampers, geothermal energy bridge deck de-icing などである。

さらに、最近の MCIS (Multidisciplinary civil infrastructural systems) の研究で必要とされている研究領域については、

- deterioration science
- assessment technologies
- renewal engineering
- institutional effectiveness and productivity at the system level

が挙げられており、また、加えて、

- reliable accelerated tests for long term durability behavior
- improved computers microprocessors and the information highway
- more accurate/complete modeling of lifetime

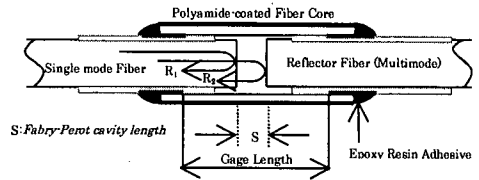


図-1 EPFI センサーの構造

predictions

- new sensors and control systems ; NDT ; new materials
- electro-rheological fluids ..... shape memory alloy, etc.
- understanding corrosion better at the detail level
- life-cycle performance and costs

などの問題解決の必要性を挙げている。

### 3. 光ファイバーなど先端材料の利用技術

#### (1) 光ファイバーセンサー

新素材として注目される材料の中でも光ファイバーは大量・高速情報通信時代を支える重要な材料として欠かせないものとなっている。この光ファイバーを利用して構造物の欠陥や変形を測定する研究が行われている。光ファイバー中を伝播するレーザー光線の性質を利用して幾つかの測定方法が提案されている。構造物のひずみを測定する方法として損失統合型 OTDR 法<sup>16)</sup>、FBG 法<sup>17)</sup>、EPFI 法<sup>18), 19), 20)</sup>がある。

損失統合型 OTDR 法 (Optical Time Domain Reflectometer) は光ファイバーの長さ方向に発生したひずみに比例して変化する特性を利用して長さ方向のひずみ分布を測定する方法である。

FBG (Fiber Bragg Grating) 法は一本の光ファイバー中にブラッググレーティングと呼ばれる回折格子を内蔵した一定長の光ファイバーを固定すると光ファイバーの伸縮に合わせて反射光の波長が変化する。これを測定することによって点ひずみの変化を測定することが出来る。この方法はブラッグ波長の異なるブラッググレーティングを一本の光ファイバーに繋いで測定することによって数十チャンネルの測定が可能である。

EPFI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometric) 法は図-1 に示すようなセンサー先端にギャップ (s) を持つ構造である。白色光が光ファイバー中を伝播しセンサー先端で特定波長 R1 だけが反射する。この時センサー部分が伸縮すると先端のギャップ長が変化して、図-1 のように反射波 R1 と R2 が反射し、反射強度の変化や到達時間の変化を周波数領域で測定することが出来る。この

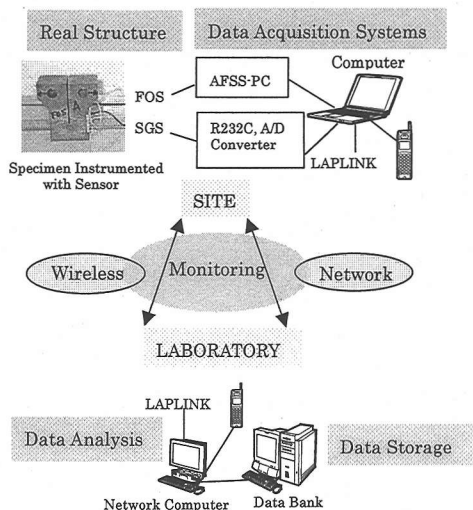


図-2 リモートモニタリングシステム

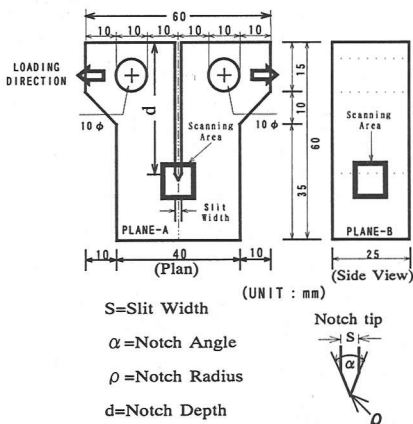


図-3 Y型Vノッチ供試体

変化を測定してセンサー貼付け位置の変位を測定できる。この原理を使った測定器 AFSS の仕様は変位測定範囲 30 ~ 300  $\mu\text{m}$ 、ひずみ測定範囲 10%、変位測定解像度 5nm、ひずみ解像度 1  $\mu\text{Strain}$  で、最大 5Hz のサンプリング周期を持つ。ここで使用した EPFI センサー測定範囲はひずみで 5000  $\mu\text{Strain}$  まで測定可能である。EPFI センサー (FOS: Fiber Optic Sensor) の直径は 350  $\mu\text{m}$  と小さく、光ファイバーの直径はさらに小さく約 100  $\mu\text{m}$  程である。

## (2) 光ファイバーセンサーを用いた疲労実験のモニタリング

### a) 実験概要

モニタリングシステムは図-2 に示すとおりで、疲労載荷実験を行うサイトとモニタリングを行うサイトは大

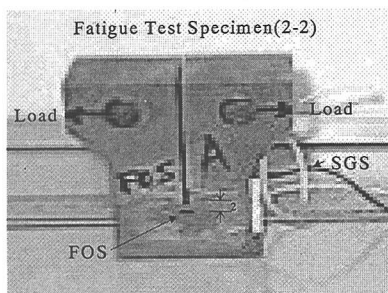


写真-1 供試体とセンサー配置

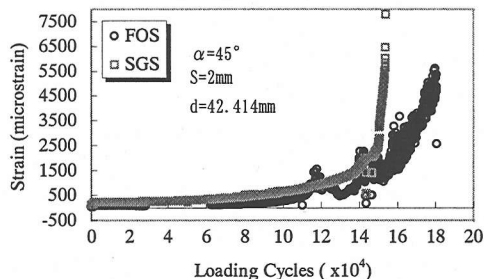


図-4 FOS と SGS のひずみ履歴の比較

学内の専用ケーブルで LAN 接続されている。これとは別に、携帯電話によるワイヤレス接続を行ってリモートモニタリングを行った。疲労試験供試体は、図-3 に示すようなノッチを有する供試体で、ノッチ先端の角度  $\alpha = 45^\circ$  として疲労試験を行い、長時間繰返し荷重を受けた場合のリモートモニタリング測定上の問題を検討することにする。モニタリング用に写真-1 のように埋め込み型 FOS ゲージ (F&S 社: S-E-AFSS-01-T) をノッチ先端直下の 2mm の位置にひずみゲージ用の瞬間接着剤で固定した。また裏面の同じ位置にひずみゲージ (共和電業: KFG-5-120-C1) を貼り付けて FOS との比較を行う。すでに前章で述べたように、ゲージの接着方法が測定精度に影響を与えるので、FOS センサーヘッド部分を覆うように接着した。疲労試験の荷重振幅は 5kN ~ 1kN、140000 サイクルまで載荷周期は 2Hz で、140000 サイクル以降は 1Hz で行った。この時の光ファイバーを用いた絶対変位測定装置 (F&S 社製 AFSS-PC) のサンプリング間隔は 5Hz である。FOS と SGS の時間当たりの最大をモニタリングするためにモニタリング監視プログラムをサイト側コンピュータで起動させておく、このプログラムでは設定された監視開始時刻と終了時刻内を一定間隔で最大値ひずみ、最小値ひずみ、測定時間をファイルに保存する。実験では載荷周期が 1Hz の時には 1 分間隔、2Hz の場合には 2 分間隔に設定している。この間にモニタリングしているひずみが管理値を超えるとアラームを出す設定になっている。ここで測定された最大ひずみの変化をモニタリングサイトで観察する。またモニタリングサイ

トのディスプレイには FOS や SGS のひずみの時間変化が表示されているので、アラームが出た場合でもその内容をモニタリングサイトに居ながら表示を切り替えて目視で確認し次の措置を決定することが出来る。

#### b) 測定結果

図-4 はひずみのモニタリング結果である。横軸に繰返し載荷回数を取り、縦軸にはモニタリング監視プログラムによって求めた最大ひずみをプロットしたものである。疲労亀裂が進展してセンサーに近づくとひずみは大きくなる。ひずみが  $1500\mu\epsilon$  に達してからほぼ 10000 サイクルで疲労亀裂が進展してどちらのセンサーも測定できなくなっている。その能力は FOS も SGS のほぼ同程度である。SGS が早く測定できなくなったのは SGS のグリット幅が 1.3mm あり、FOS より早く疲労亀裂が到達するためであると考えられる。また、FOS のひずみが  $1500\mu\epsilon$  を超えて疲労亀裂が近づいたときの最大ひずみが大きく変化するのは、AFSS の測定画面に現れる絶対変位の測定値が大きく変化しているためである。もともとこの絶対変位測定装置は静的変形を測定する装置であるため、動的変形にあまり適していないことによる結果と考えられる。これらの情報をモニタリングすることによって疲労亀裂発生箇所を監視することが可能であることが確認できた。

従来用いられてきた電気抵抗式ひずみゲージに対して、本文で用いている光ファイバーセンサーによるひずみ計測の利点を再掲すると

- (1) 電氣的絶縁の心配がいない。
  - (2) ひずみの計測可能範囲が広い。(±5000 $\mu$ )
  - (3) 超低温(-200°C)から高温(+900°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)計測可能
  - (5) ひずみゲージに比べて経年的変化が少なく、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。

### (3) 最近の国際会議における研究報告

清水建設の Mi ta<sup>21)</sup> は阪神大震災における鋼構造物の多くの被害や米国カリフォルニア Northridge 地震の被害などを教訓として、被害を受けた構造物の損傷度を的確に判定できる Advanced Structure Health Monitoring (先端的構造健全度モニタリング) システムの開発に関する建設省-通産省-NEDO による共同研究プロジェクトの紹介をしている。上記の構造物被害のうち、概観検査によって発見できない構造物の骨組や基礎、杭の損傷の発見を先端材料の技術開発を応用して実施できるようにしようとするものである。これらのプロジェクトのうちで特に関連あるものとして、東大国際・産学共同研究センターの武田展雄教授をリーダーとする以下の研究プロジ

エクトは先端材料の利用技術開発に関するものである。

#### 健全度モニタリング研究プロジェクト

##### 1) 高性能センサーシステム技術

###### (a) 光ファイバーセンサー (OFS) 技術開発

- ・ひずみ、温度、荷重検出技術 (OFS 利用)
- ・Fabry - Perot, Bragg Grating, BOTDR
- ・OFS による損傷検出システムの開発
- ・OFS 埋設複合材料の応用技術

###### (b) 新しい OFS 技術

- ・直径 50 $\mu\text{m}$  以下の OFS の開発
- ・OFS 被覆の改良

###### (c) 形状記憶合金利用による損傷制御複合材料システムの開発

積層複合材料による横断クラック発生制御

クラック進展制御

層間剥離制御

###### (d) 最大ひずみ記憶パッチセンサーの開発

- ・炭素繊維の組み合わせによる先端ハイブリッドパッチセンサー (Smart Hybrid Patch Sensors, SHPS) の開発
- ・SHPS のファイバー被覆と母材の開発
- ・SHPS の自己診断とアラーム機能の開発

###### (e) 透明複合材料と光透過反射計測による損傷検出システムの開発

###### (f) 高精度 AE センサーシステムの開発

##### 2) 構造健全度のための自己診断と損傷制御システムの開発

- (a) センサー出力と力学的/物理的意味の関連づけ
- (b) センサー出力と損傷メカニズム
- (c) 自己診断と損傷制御システム

##### 3) 代表的スマート構造に対する実施技術開発

- (a) CFRP 空間構造システム
- (b) 超高速列車の荷重支持構造
- (c) 高層ビル、橋梁

## 4. 道路橋振動の遠隔モニタリング

### (1) 遠隔通信技術

遠隔通信技術として公衆電話回線によるインターネットについて述べる。従来の専用線による遠隔計測は、近年の通信技術の進歩により大きく変更されると思われる。現在の遠隔計測の通信技術は、①専用回線によるインターネットの利用と②公衆電話回線のデジタル通信の利用が考えられる。表-1 にデータ通信の通信速度を示した。

#### ①専用回線によるインターネットの利用

専用回線によるインターネットの利用は、様々な利用形態が考えられるが、大学間や研究所内の実験室や構内の実験に使用が限られる。専用線であるために高速通信

表-1 データ通信の通信速度

		現在	将来
モデム		最大 57.6Kbps	最大 57.6Kbps
ISDN	INS ネット 64	64Kbps	64Kbps
	INS ネット 1500	1.5Mbps	1.5Mbps
ATM	ATM	156Mbps	156Mbps
	ATM25	25Mbps	25Mbps
PHS		32Kbps	64Kbps
デジタル携帯電話	PDC 方式 (回線交換型)	9.6Kbps	9.6Kbps
	PDC 方式 (パケット交換型)	最大 28Kbps	最大 28Kbps
	IS-95 方式 (cdmaOne)	14.4Kbps	64Kbps
	W-CDMA 方式	—	384Kbps
衛星携帯電話	イリジウム	—	2.4Kbps
	グローバルスター	—	9.6Kbps
	テレデシック	—	最大 2.048Kbps

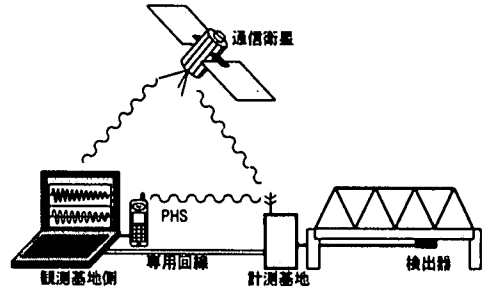


図-5 遠隔計測の構成とデータ転送経路

の転送速度が32kbpsであり、携帯電話より高速通信が可能である。

c) 携帯衛星電話

1998年から運用が始まったイリジウムがある。高度780kmに衛星を66機打ち上げ、全地球をカバーする衛星電話システムである。当面、2.4kbpsのデータ通信を提供するが、転送速度は速くない。しかし、どここの場所からでも使用できることは、現在の都市域に限定された無線電話の使用範囲を飛躍的に拡大することになる。

d) ワイヤレス LAN (無線 LAN)

ワイヤレス LAN は通常のケーブルを用いた LAN の一部を無線化した装置である。規格は、STD-33 と STD-34 があり、それぞれ2.4GHz と 19GHz の周波数帯域を使用する。屋内用の LAN 用に開発されたシステムであるが、屋外用のアンテナを使用すると、最大 3km の通信が可能である。

が可能であるために、大量のデータのみならず、画像データも転送可能である。

② 公衆電話回線のデジタル通信の利用

遠隔モニタリングを実現可能にしたのは、公衆回線によるデータ通信の実現にある。NTT は、デジタル通信の国際規格 ISDN(Integrated Services Digital Cellular) や PHS(Personal Handyphone System)などの公衆無線通信の発展がある。図-5 に公衆電話回線を利用した場合と、近い将来可能になる衛星電話を利用した遠隔計測の事例を示した。

遠隔計測には、検出器(センサー)の場所とデータを受け取る基地の組み合わせにより、固定した電話を利用した場合と、移動可能な無線電話を利用する場合に大別することができる。検出器側の電話機の組み合わせにより、①固定-固定、②移動-固定、③固定-移動、④移動-移動の組み合わせができる。

a) 公衆回線

NTT の電話回線が利用できる場合、ISDN 回線である「ネット 64」を利用する。このデータ転送速度は 64kbps である。この転送速度では、多量のデータをすべて実時間で遠隔計測できる環境にはないが、検出器を切り替えることにより、遠隔モニタリングが可能である。測定データは、計測終了後データ通信により、取得することができる。

b) 公衆無線電話

公衆無線電話が利用できる範囲では、検出器側、あるいは計測基地側が、電話回線でつながれていない場合、公衆電話、すなわち携帯電話や PHS が利用できる。現在 PHS

(2) 可搬型振動計測技術とモバイルコンピューター技術の融合

岡林ら<sup>22), 23)</sup>は、パーソナルコンピューター(PC)上に LabVIEW を用いた仮想計測器システムを構築し可搬型の効率良い振動特性推定システムを実用化させている。構造同定の手順として次の2つのデータ処理法を用いている。

- ①バンドパスフィルタにより多自由度系振動を1自由度系振動へ還元する。
- ②フィルタ処理した k 次振動の自由振動波形より、時間領域における非線形最小二乗法による曲線適合理論を適用して振動特性を求める。

このようなシステムを遠隔操作のモニタリングシステムとして用いることによってリアルタイムで振動特性を推定可能であることを示している。

(3) PHS による実橋実時間遠隔計測

a) 無線遠隔計測の実橋への適用

PHS による無線実時間遠隔計測システムを岡林らは長崎市内の実橋に適用した。対象とした橋梁は、2径間連続鋼斜張橋(歩道橋)である。表-2 にその諸元を示している。実験は、図-6 に示すように、加速度計を6ヶ

表-2 橋梁の諸元

構造形式	2径間鋼連続斜張橋
橋長	$L=79.450\text{m}$
支間長	$L_L=28.000\text{m}$
	$L_R=50.700\text{m}$
有効幅員	4.600m

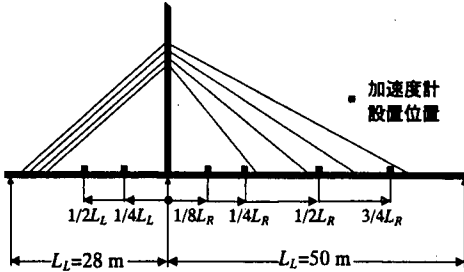
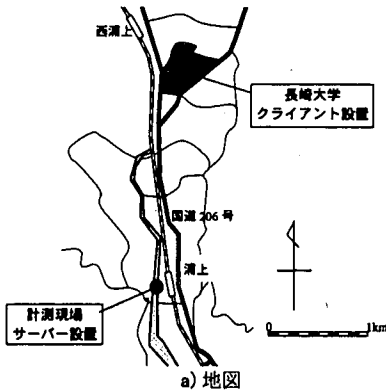
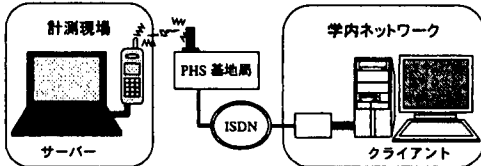


図-6 加速度計設置位置



a) 地図



b) ネットワーク経路

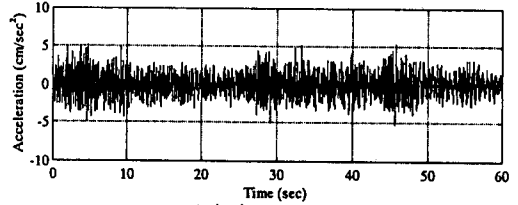
図-7 クライアント・サーバーの位置

所に設置し、常時微動の計測を行った。サンプリング周波数は100Hz、計測時間が90秒以上となるようにした。

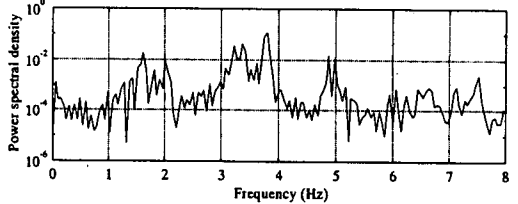
b) 無線システムのネットワーク構成

無線システム実験では、サーバーを計測現場に設置しαDATE方式によって長崎大学総合情報処理センターのISDNターミナルアダプタにダイヤルアップ接続し、クライアントを長崎大学の学内にLANに接続している。図-7にサーバーとクライアント周辺の地図およびデータ通信経路を示した。サーバー・クライアント間の距離は、約2kmである。

ダイヤルアップによる接続では、接続時にIPアドレスが動的に割り当てられるため、サーバーをネットワーク接続した後、電子メールを使用して割り当てられたIP

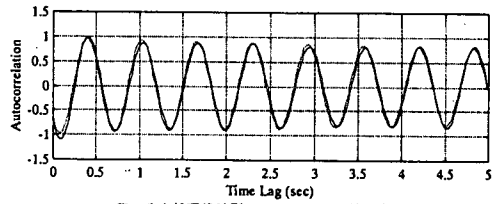


a) 常時微動波形

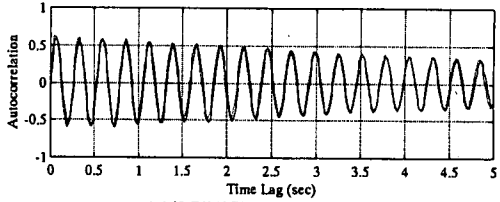


b) 常時微動波形のパワースペクトル密度

図-8 計測結果 (右側径間1/8地点)



a) 1次振動



b) 2次振動

図-9 自己相関関数と曲線適合結果

アドレスをクライアント側に通知した。

本システムでは、最大8チャンネルのA/D変換が可能である。サンプリング周波数100Hzでサンプリングした場合、必要なデータ転送速度は、約25kbpsとなる。サーバーからクライアントの間のネットワーク上において、ボトルネックとなるのは、PHSによる無線接続区間である。実験で使用したPHSのデータ転送速度は、29.2kbpsであり、電波の状態が良ければ、データ転送可能であると考えられる。

c) 計測結果

図-8に常時微動計測結果およびそのスペクトルを示している。自己相関関数をとることによって、常時微動に含まれる不規則振動成分が低下し、固有振動成分が卓越する。これをフィルタ処理して、各固有振動成分の自己相関関数を抽出し、図-9に示すように、曲線適合し常時振動から振動特性を推定する。

このような操作によって得られた動特性の推定結果を

表-3 動特性推定結果

次数	解析値	推定値			
		サーバ側		クライアント側	
		固有振動数 (Hz)	減衰定数	固有振動数 (Hz)	減衰定数
1	1.340	1.6570	0.0045	1.6570	0.0045
2	3.148	3.7236	0.0049	3.7236	0.0049
3	4.253	4.9517	0.0043	4.9517	0.0043

表-3に示す。ここで解析値は設計時の資料を参考にしている。図-10に振動モードの推定結果を示しているが、いずれも、解析結果と良く一致している。

以上の結果から、本システムを用いることにより、実橋の振動特性を推定するために、遠隔地から振動の計測をリアルタイムで実行することが可能であることを示した。また、計測結果を用いて、橋梁の振動特性を精度良く推定できることが確認された。

### 5. 建築におけるエネルギー吸収機構の実例

エネルギー吸収機構はいわゆるダンパー（減衰機構）であり、地震時の入力エネルギーを吸収し構造物の振動応答を減少させるもので、金属の塑性履歴エネルギーを利用した履歴減衰型や摩擦エネルギーを利用した摩擦減衰型と、流体の粘性抵抗力や粘弾性体のせん断抵抗力を利用した粘性減衰型とに分類される。この機構は、構造物に生ずる変位差（層間変形、ビル間の相対変形など）を利用して、ダンパーに変形や速度を与えて仕事をさせようというものである。

具体的には、壁、間柱、ブレース部材などの地震時の抵抗部材に地震入力エネルギーの吸収能力に優れた特殊部材を導入し、建物自重を支える柱、梁等の骨組を大地震時においても可能な限り弾性範囲内に留めようとする手法がある。

制振部材は、一般構造用鋼材であるSS400などの軟鋼、軟鋼に比べて降伏点がさらに低い極軟鋼（100N/mm<sup>2</sup>級、240N/mm<sup>2</sup>級）などの塑性履歴特性を利用した履歴減衰型、粘性および粘弾性材料の減衰力を利用した粘性減衰型が挙げられる。履歴減衰型制振部材の特徴は、比較的少ない量で大きな減衰力が期待できるが、振動振幅の大きさにより減衰効果に変化する。1種類の制振部材に対して、減衰効率が最大となる入力レベルが存在し、微小振動変位から大変位まで減衰効果を発揮させるためには、異なった特性の制振部材を組み合わせる必要がある。経済的で経年劣化の心配が少なく、信頼性の高い制振部材である。

粘性減衰型制振部材は、微小振動から減衰効果を発揮

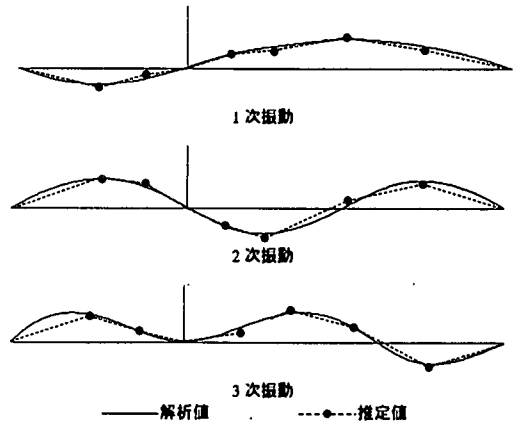


図-10 モード推定結果

することが出来るが、履歴減衰型制振部材に比べて減衰力が小さく、大量の制振部材が必要となる。この種の制振部材は、減衰特性が温度、振動速度等の影響を受けるので、設計をする際に使用時に想定される平均温度、最高温度、最低温度に対応する特性値を設定し、それぞれの値について制振部材の変形能力や減衰性能を検討する必要がある。特に、繰り返しにより粘弾性体や粘性体の温度が上昇し減衰力が減少するので、熱容量の大きな鋼板等を用いるなどの熱環境に対する工夫が必要となる。オイルダンパーにおけるオイル交換のように経年劣化に対する点検が必要となるものがある。

以下に、各制振部材ごとにその概要を示す。

(a) リブ補剛鋼製制振壁は、エネルギー吸収機構として、一般構造用鋼材SS400などに比べて、降伏点強度を1/2-1/3程度に低く押さえた低降伏点鋼の塑性履歴エネルギー吸収能力を利用した鋼板壁（極軟鋼制振壁）である。低降伏点鋼（100N/mm<sup>2</sup>級）や極低降伏点鋼（235N/mm<sup>2</sup>級）の降伏点の低さを利用して、構造骨組に先行して制振壁を降伏させ、建物の地震応答を制御する履歴減衰型ダンパーとして利用するものである。

(b) 座屈拘束軟鋼製ブレースは、外側に鋼管コンクリートや鋼管などにより、圧縮力に対する座屈拘束がされた鋼管ブレースをいう。ブレースに地震時のせん断力が集中することを利用して、構造骨組に先行してブレースを降伏させ、建物の地震応答を制御する履歴減衰型ダンパーとして利用するものである。ブレース材としては、降伏点が低く伸び特性に優れた低降伏点鋼（100N/mm<sup>2</sup>級）や極低降伏点鋼（235N/mm<sup>2</sup>級）が用いられる。

(c) シリコン系粘性流体制振壁は、地震時に相対変化を生じる2つの部分間に高粘性流体を置き、相対変形により生じる粘性体のせん断粘性抵抗により振動を減衰させるものである。高い減衰作用を持つものが、比較的コンパクトに製作できるが減衰特性が、温度、振動速度などの影響を受けるので、特性値の設定に注意を払う必要がある。



る。

(d) アクリル系粘弾性ダンパーの代表的なものとしては、高分子材料で作られた VEM (Visco Elastic Material) がある。これは、弾性体としての耐荷力よりも粘性体としての減衰力を期待したもので、鋼板に VEM をサンドイッチ状に交互に挟み、せん断ひずみを生じさせることで減衰効果を発生する。

(e) 高減衰ゴム系制振ダンパーは、高減衰ゴムを鋼管内に充填したシリンダ型の高減衰ゴムダンパーは、ブレースや PC 版を介することなく直接フレームに取り付け、室内に見せることをねらったものである。このダンパーは、SEBS (Styrene-Etyrene-Butadiene-Styrene) 系のゴムを主構成材料とする高減衰ゴム材料を使用している。ダンパーの特徴は、低い剛性で高減衰性能を持ち、材料の高い接着強度によりせん断ひずみで 300% を超える極めて大きな変形まで良好なエネルギー吸収能力を持つことにある。

(f) オイルダンパーは粘性ダンパーの一種で、シリンダ内にオイルを充填し、その中をピストンが動く際にオリフィス部で発生する乱流抵抗力を利用するものである。オイルダンパーは比較的粘度が低い粘性流体を使用しているため、最初のききが小さく、変形が大きくなるに従って大きな抵抗力を示す。抵抗力が過大になるとリリーフ機構が働き、抵抗力の上昇を抑える。大地震動に対しては、リリーフ機構が働くことが前提に設計されているものが多く、荷重-変形関係は、履歴減衰型に似た性状を示す。

## 6. 機械工学分野における定性的同定法

インテリジェント構造物の普及は構造物の状態のセンシング装置の普及をもたらし、センサー技術そのものの発展とセンサーのコストの低下から、構造物に関する様々な情報を大量に得ることが可能な時代になりつつある。そのような新しい環境に対しては、モニタリングの方法も多様になることが考えられ、機械工学分野における定性的な手法について紹介する。この方法は、シュミレーション技術によってモニタリングや診断のための知識ベースを作成し、定性的な情報から現在の状況を判断する技術である。特に非線形振動の定性的な同定手法について紹介する<sup>24)</sup>。

### (1) 非線形振動の定性的同定手法

線形システムの同定問題は、システムの構造が線形であることがわかっているため、その多くは次数とパラメータを出入力データから決める問題に帰着されている場合が多い。一方非線形システムの同定問題を考察する場合、その構造そのものが未知な場合が多く、構造の決

定そのものが同定過程に含まれることが多い。言い換えると、非線形要素として様々なものが考えられ、またその存在場所もいろいろな場合が考えられる。非線形要素の種類などが識別できれば、構造を決定することができパラメータの同定問題に進むことができるし、またその種別から振動診断などの判断材料とすることができる。なお、機械系に限れば、非線形要素や、その存在場所はある程度限定されたものとなる。

以上のような背景から、ここでは、非線形特性の識別を目的とした同定手法を考察し、この手法に AI の応用を試みる。すなわち、前もって代表的な非線形特性を有する系の振動特性を調べておき、その特徴を知識ベースに蓄え、実際のデータから得られる特性をこれと比較することによって実データに潜む非線形特性を識別することになる。具体的には、非線形特性の同定・診断手法として、機械系を対象とし、代表的な非線形要素を有する 1 自由度系に白色雑音入力を印加して系の時間領域の特性と周波数領域の特性を計算機シミュレーションで調べ、これらの特性の非線形量の増大に伴う変化の傾向(以下トレンド)から非線形特性を同定するものである。

### (2) 同定パラメータ

特性を抽出するためのデータ処理として時間領域の特性と周波数領域の特性を用いるが、これらのパラメータを同定パラメータとよぶ。同定パラメータは大きく分けて時間領域のパラメータと周波数領域のパラメータに分類する。

#### (a) 時間領域

時間領域のパラメータとしては、以下の統計パラメータを用いる。処理するデータの時刻歴波形を  $x(i, t)$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) とすると、

(1) 平均値:  $\mu = E(x)$

(2) 二乗平均値:  $\psi = E(x^2)$

(3) ひずみ度:  $S = E\{(x-\mu)^3\} / [E(x-\mu)^2]^{3/2}$

(4) とがり度:  $K = E\{(x-\mu)^4\} / [E(x-\mu)^2]^{2-3}$

ただし、 $E$  は時間平均操作を意味し、すべて時間平均を行っているため、いわゆる集合平均の統計量とは異なる。なぜなら非線形系の応答においてはたとえ定常過程であってもエルゴード性が仮定できない場合がある。

#### (b) 周波数領域

(5) 周波数ゼロにおける伝達関数の値

(6) 第一次共振周波数における伝達関数の値

(7) 第一次共振周波数の値

(8) 第一次共振周波数における位相の勾配

(9) 周波数ゼロにおけるコヒーレンスの値

(10) 第一次共振周波数におけるコヒーレンスの値

以上の同定パラメータに現れる非線形特性の特徴を基礎にして非線形要素の識別を行う。したがって、実際の

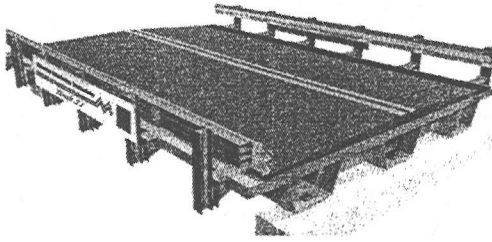


図-11 Martin Marietta Material's Tech 21 橋

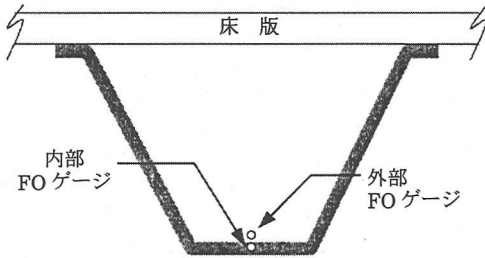


図-12 箱桁のセンサー配置

波形から上記の項目のデータ処理を行う必要がある。

(3) 非線形不規則振動に関する知識ベース

吉田<sup>24)</sup>は以上の考え方にに基づき、非線形1自由度系振動モデルとして

- a) Duffing 型
- b) 流体型
- c) 衝突型
- d) すきま型

の4種類について白色雑音を入力した場合の系の応答をルンゲ・クッタ法を用いてコンピュータシミュレーションによって求め、それぞれの時刻歴波形より平均値、分散、ひずみ度、とがり度などの定性的データを知識ベースとして整理した。次にAIのプロログ言語を用いて、非線形性のトレンドを自動的に抽出できるシステムを開発して、非線形性の特徴が推論可能であることを示し、これらの手法が将来構造物の健全度モニタリングに応用可能であることを示している。

7. FRP 道路橋への先端モニタリング技術の応用

(1) 米国 Martin Marietta Material's Tech 21 橋の例

Foster<sup>25)</sup>は、1997年6月オハイオ州に支間10mの図-11に示すようなFRP道路橋を完成させた。この橋は、床組構造を直交異方性の引抜き成型のGFRP、桁構造を図-12のようにHand Laid-upのFRP箱桁によって組み立てている。

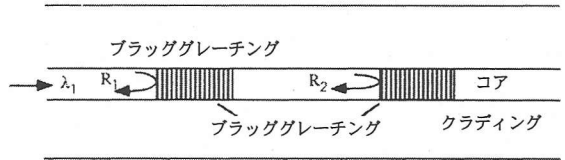


図-13 BGによるIFPIセンサーの概要

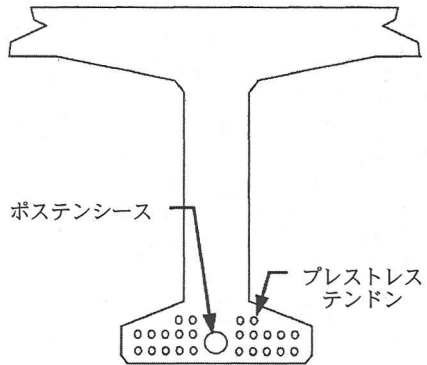


図-14 T桁の断面

また図-12に示すようにサファイアの光ファイバーセンサーを箱桁の接着部に配置して、接着部の施工管理と完成後の化学的変化をモニタリングしている。

図-13のIntrinsic Fabry-Perot interferometer (IFPI)センサーは数mm離れた $R_1$ と $R_2$ の2つのBragg Gratingからの反射波の変化を干渉法によって検出し、ひずみを測定することができる。またFRP橋に設置されたこのようなセンサーは、ひずみや湿度などの構造内部の変化を長期的なモニタリング計測として活用できることが利点である。

(2) カナダPC橋の例

アルバータ州カルガリーのBeddington橋<sup>26)</sup>は、22.8mと19.2mの2径間のPC橋の斜橋である。桁は、図-14に示すようにT桁断面であり、PC鋼線とCFRPの緊張材を用いており、それぞれに光ファイバーセンサーを張力のモニタリングのために取りつけている。光ファイバーセンサーは、緊張ひずみが約 $8000 \mu \epsilon$ の時に緊張材表面に接着固定された。このような長期モニタリングの応用例の場合の留意点は、センサーの生存割合の向上であるが、この橋の場合、慎重かつ用心深いセンサー設置によってすべてのセンサーが建設終了後まで生存していた。この橋は、1993年に完成している。

この橋の完成後の18ヶ月の計測によってCFRPテンダンの緊張力の低下はPC鋼線より25%低いことが確認された。

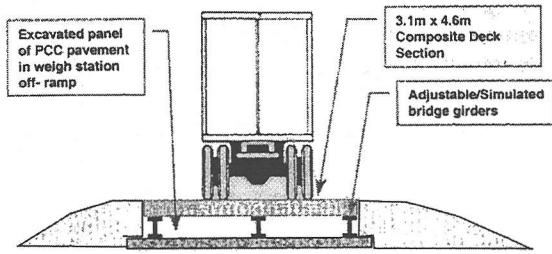


図-15 計量ステーションの断面図

### (3) 米国バージニア州計量ステーションの例

大断面引抜き成型 FRP 橋の例として米国バージニア州の Interstate81 の Troutville における車両重量計量ステーションに設置された FRP 床組構造の一部を図-15 に示している。床組構造は、長方形断面の FRP 引抜き成型部材を横断的に接着させた構造となっており、隅角部には、計測のための光ファイバーセンサーが図-16 のように配置されている。これらの FRP 橋梁構造は現在実用化を検討中の段階であり、部材の接着や成型過程、さらには供用後において構造の健全度をモニタリングするためのセンサーが配置されている。特に AE センサーとして光ファイバーセンサーをシステムの中に組み込んでいる点が新しい試みである。この橋は、1999 年 11 月に完成している。

## 8. おわりに

本報告の詳細については文献<sup>2)</sup>として土木学会から発行されているので参照していただきたい。本報告をまとめるにあたって文献<sup>2)</sup>の各章を執筆された方々の執筆の意図を反映しているか不安であり、詳細は原論文をお読みいただきたい。最後に本報告をまとめるにあたって、文献<sup>2)</sup>の公開講演会にご協力いただいた講師の方々、また委員会の幹事および委員の方々に新たためて深く感謝の意を表す次第である。本報告がこの分野のさらなる発展、向上に役立つことを願うものである。

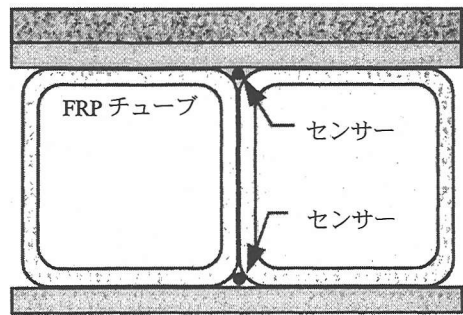
なお、本研究小委員会の委員構成は以下の通りである。

委員長：大島俊之（北見工業大学）

幹事長：中島章典（宇都宮大学）

幹事：阿部雅人（東京大学）、岩本政己（名古屋工業大学）、小幡卓司（北海道大学）、坂野昌弘（関西大学）、田中信治（中部復建）、角本 周（オリエンタル建設）、西星匡博（フジエンジニアリング）、麻生稔彦（山口大学）、岩崎正二（岩手大学）、上野健治（鹿島技術研究所）、鳥野清（九州共立大学）、金子 誉（熊谷組）、岡林隆敏（長崎大学）、梶川康男（金沢大学）、加藤雅史（九州東海大学）、川谷充郎（神戸大学）、菅野 匡（日本道路公団）、

## Polymer Concrete Wearing Surface



FRP 板

図-16 引抜き成型 FRP 床組構造

呉 智深（茨城大学）、小林義和（ニチゾウテック）、佐々木伸幸（三菱重工業）、佐藤恒明（木更津工業高等専門学校）、佐藤弘史（建設省土木研究所）、鈴木博之（明星大学）、田中秀秋（日本製鋼所）、土田貴之（建設技術研究所）、津村直宜（NKK基盤技術研究）、徳永法夫（阪神高速道路公団）、外山義春（北海道開発コンサルタント）、中原淳一郎（横河工事）、中山隆弘（広島工業大）、林 暢彦（宮地鐵工所）、藤澤利彦（瀧上工業）、本田秀行（金沢工業大学）、前田研一（東京都立大学）、松井義孝（開発工営社）、松本信之（鉄道総合技術研究所）、三ツ木幸子（総合技術コンサルタント）、宮崎正男（住友重機械工業）、山口宏樹（埼玉大学）、山田 淳（首都高速道路公団）、山田靖則（高田機工）、米田昌弘（近畿大学）、萩本正信（フジエンジニアリング）、林川俊郎（北海道大学）、宮本 裕（岩手大学）

（所属は平成 1 2 年現在を示す）

## 参考文献

- 1) 構造工学委員会，橋梁振動モニタリング研究小委員会：橋梁振動コロキウム'97 論文集，1997.10.
- 2) 構造工学委員会，橋梁振動モニタリング研究小委員会：Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring に関する公開講演会論文集，構造工学技術シリーズ No.12，1999.11.
- 3) 橋梁振動研究会：橋梁振動に関するコロキウム講演概要・資料集，1987.7.
- 4) 構造工学委員会，橋梁交通振動研究小委員会：交通荷重による橋梁振動に関する研究の現状と課題，研究小委員会報告書，1994.4.
- 5) 構造工学委員会，橋梁交通振動研究小委員会：橋梁交通振動コロキウム論文集，1995.11.
- 6) 構造工学委員会，振動制御小委員会：第 3 回振動制御コロキウム論文集，Part A，Part B，1995.8.
- 7) Chang, F.K. : Structural Health Monitoring 2000,

- Stanford University, 1999. 9.
- 8) SPIE The International Society for Optical Engineering: 5<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure, 2000. 3.
  - 9) Fu, K.S. : Learning control systems and intelligent systems, An intersection of artificial intelligence and automatic control, IEEE Trans. On Automatic Control, Vol.16, pp. 70-72, 1971.
  - 10) Takagi, T. : The Present State and the Future of the Intelligent Material and Systems, Proc. of the 4<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Materials (Plenary Lecture), 1998. 10.
  - 11) スマートストラクチャー研究会 : 環境応答・内部診断機能自蔵型材料の創製に関する調査研究, SMART STRUCTURE, 1993. 9.
  - 12) 新谷紀雄 : 環境応答・内部診断機能自蔵型材料の創製に関する調査概要, SMART STRUCTURES, pp. 7-11, 1993. 9.
  - 13) 阿部 允, 杉箱政雄, 小芝明弘 : 鋼橋の点検・診断用システムと機器, 橋梁と基礎, pp. 173-179, 1997. 8.
  - 14) Wang, M. L. and Satpathi: Advanced Monitoring System for Large Structural Systems, Smart Structures, Kluwer Academic Publishers, pp. 383-390, 1999.
  - 15) Chong, K.P. : Smart Structures Research in U.S., Smart Structures, Kluwer Academic Publishers, pp. 37-44, 1999.
  - 16) 倉島利雄, 佐藤昌志 : 光ファイバーを用いた構造物のひずみ分布計測, 土木学会誌, Vol. 82, pp. 18-20, 1997. 12.
  - 17) 共放鳴, 日向洋一, 藤井信二, 佐々木一正, 太田敏彦 : 光ファイバーによる土木構造物の診断-FBG によるひずみ計測に関する研究-, 第2回構造物の診断に関するシンポジウム論文集, pp. 163-170, 1999. 8
  - 18) Claus, R. O., Gunther, M. F., Wang, A. and Murphy, K. A. : Extrinsic Fabry-Perot Sensor for Strain and Crack Opening Displacement Measurements from -200 to 900°C, Journal of Smart Materials and Structures, 1992.
  - 19) 大島俊之, 三上修一, 山崎智之 : 橋梁振動のモニタリングによる Intelligent Bridge の提案, 橋梁交通振動に関するコロキウム論文集, Part B, 1995.
  - 20) 大島俊之, 三上修一, 山崎智之 : 光ファイバーセンサーによる鉄筋コンクリート構造のモニタリングに関する研究, 第53回年次学術講演会, 1998.
  - 21) Mita, A. : Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technology in Civil and Building Structures, Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring, pp. 56-67, 1999.
  - 22) 岡林隆敏, 山森和博, 田丸康博, 吉村徹 : 可搬型振動計測システムによる構造物の振動特性推定, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 327-337, 1998. 4.
  - 23) 岡林隆敏, 山森和博, 讃岐康博, 田村太一郎 : 近接固有値を有する構造物の振動特性推定, 土木学会論文集, No. 633/I-49, pp. 93-102, 1999. 10.
  - 24) 吉田和夫 : 非線形振動の定性的同定, 計算力学[II]-計算力学とAI-, 矢川・福田共編, 養賢堂, pp. 95-119, 1991.
  - 25) Foster, D.C. : Fabrication, Installation and Health Monitoring of the Tech-21 Composite Material Highway Bridge, Butler County Ohio, Final Report, 1998.
  - 26) Maaskant, R., Alavie, T., Measures, R.M., Tadros, G., Rizkalla, S.H., & Guha-Thakurta, A. : Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring, pp. 21-33, 1996.
  - 27) Farkas, G.Y. : Supervision, Maintenance and Renovation of Reinforced and Prestressed Concrete Bridges, Smart Structures, Kluwer Academic Publishers, pp. 63-70, 1999.

(2000. 6. 12 受付)