

構造工学技術シリーズ No. 12

Intelligent Bridge/Structure and Smart
Monitoring
に関する公開講演会

日時：1999 年 11 月 26 日（金）

場所：土木学会土木図書館講堂

土木学会・構造工学委員会・橋梁振動モニタリング研究小委員会

まえがき

1999年9月、米国 Stanford 大学において第2回の構造物健全度モニタリング (Structural Health Monitoring) に関する国際会議が開催された。これは2年に1度の国際会議で、1997年の第1回会議に続くものである。会議の全体的特徴は Stanford 大学を中心とする米国西海岸における、最近の新技術開発の進展を背景として、光ファイバーを応用した新しい計測技術の研究発表など多くの新技術開発が、航空、宇宙関係のハイテク分野、および建築、土木などのインフラストラクチャー (社会基盤施設) の分野において活発である。特に今回の第2回会議の特徴はこれまで主として航空、宇宙関連分野で活発であった、構造物の健全度診断、特に構造物の振動状態を高精度で計測することによって、局所的な損傷、欠陥を検出する構造同定 (Structural Identification) の技術を土木、建築などのインフラストラクチャーの分野に技術移転する研究が急激に増加している。

最近のアメリカ、およびヨーロッパにおけるこの分野の国際会議の増加傾向からみても、この Intelligent Structure および Smart Monitoring の分野の技術展開は21世紀の初頭に急速に発展するものと予測される。

ここに土木学会として、この公開講演会を開催して、この分野の最近の研究を会員の皆様にご紹介できることは、大変時機を得たものと思われます。この分野のさらなる発展に貢献できることを念願するものであります。

この講演会開催にあたり、資料原稿の執筆、講演などにご協力いただいた方々に御礼申し上げますとともに、講演会開催にあたり各方面に渡りご尽力いただいた研究小委員会の方々、及び土木学会事務局の河西貴志氏に対し深甚なる感謝の意を表する次第である。

1999年11月

土木学会構造工学委員会

橋梁振動モニタリング研究小委員会

委員長 大 島 俊 之

土木学会構造工学委員会 橋梁振動モニタリング研究小委員会名簿

委員長	大島俊之	北見工業大学工学部土木開発工学科
連絡調整幹事	中島章典	宇都宮大学工学部建設学科
幹事	阿部雅人	東京大学工学部土木工学科
"	岩本政巳	名古屋工業大学工学部社会開発工学科
"	小幡卓司	北海道大学工学部土木工学科
"	坂野昌弘	関西大学工学部土木工学科
"	田中信治	中部復建(株)設計第一部
"	角本 周	オリエンタル建設(株)技術部
"	西星匡博	(株)フジエンジニアリング
委員	麻生稔彦	山口大学工学部社会建設工学科
"	岩崎正二	岩手大学工学部建設環境工学科
"	上野健治	鹿島技術研究所第一研究部第2研究室
"	鳥野 清	九州共立大学工学部土木工学科
"	金子 誉	(株)熊谷組技術研究所土木系研究開発部土木グループ
"	岡林隆敏	長崎大学工学部社会開発工学科
"	梶川康男	金沢大学工学部土木建設工学科
"	加藤雅史	九州東海大学工学部土木工学科
"	川谷充郎	大阪大学工学部土木工学科
"	菅野 匡	日本道路公団試験研究所保全技術研究室
"	呉 智深	茨城大学工学部都市システム工学科
"	小林義和	(株)ニチゾウテック技術本部第1技術部
"	佐々木伸幸	三菱重工(株)広島研究所鉄構土木研究室
"	佐藤恒明	木更津工業高等専門学校環境都市工学科
"	佐藤弘史	建設省土木研究所構造研究室
"	鈴木博之	明星大学理工学部土木工学科
"	田中秀秋	(株)日本製鋼所室蘭製作所品質管理部検査課
"	土田貴之	(株)建設技術研究所道路本部技術第4部
"	津村直宜	NKK基盤技術研究所都市工学研究部
"	徳永法夫	阪神高速道路公団保全施設部
"	外山義春	北海道開発コンサルタント(株)橋梁部
"	中原淳一郎	横河工事(株)技術本部
"	中山隆弘	広島工業大学工学部建設工学科
"	林 暢彦	(株)宮地鐵工所技術本部先行技術研究室
"	藤澤利彦	瀧上工業(株)橋梁本部技術部
"	本田秀行	金沢工業大学土木工学科
"	前田研一	東京都立大学工学部土木工学科
"	松井義孝	(株)開発工営社企画調査室
"	松本信之	(財)鉄道総合技術研究所構造物技術開発事業部構造システム
"	三ツ木幸子	(株)綜合技術コンサルタン
"	宮崎正男	住友重機械工業(株)鉄構機器事業本部技術部
"	山口宏樹	埼玉大学工学部建設工学科
"	山田 淳	首都高速道路公団保全施設部保全技術課
"	山田靖則	高田機工(株)技術研究所
"	米田昌弘	近畿大学理工学部土木工学科
"	秋本正信	(株)フジエンジニアリング調査設計部
オブザーバー	林川俊郎	北海道大学工学部土木工学科
"	宮本 裕	岩手大学工学部建設環境工学科

Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring

に関する公開講演会

目 次

全体的動向の解説（広島工業大学 中山隆弘）	1
光ファイバーなど先端材料の利用技術（北見工業大学 大島俊之）	9
道路橋振動の遠隔モニタリング（長崎大学 岡林隆敏）	23
建築における制御構造の概要と事例紹介（日建設計 北村春幸・鳥井信吾）	33
機械工学分野における定性的同定法の紹介（慶応義塾大学 吉田和夫）	47
Advanced Monitoring Techniques for Fiber Reinforced Polymer(FRP) Composite Highway Bridge Structures （先端材料の利用による構造物のインテリジェント化の動向） （Virginia Tech. John J. Lesko, Fiber, Sensor Technology Inc. Paige Clifton-Furrow）	57

全体的動向の解説

中山隆弘

正会員 工博 広島工業大学教授 工学部建設工学科 (〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1)

本稿では、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、さらには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ように思われる。

Key Word: *intelligent material, intelligent bridge, smart structure, smart monitoring, damage detection, smart control self-renovation*

1. はじめに

山陽新幹線における最近のトンネル事故に代表されるように、わが国でも土木や建築に関わる種々の社会基盤施設や構造物の老朽化が深刻な問題になってきた。さらに、情報の透明性という観点からも、特に公共財の安全性や信頼性に対する説明責任はますます厳しく要求されるようになってきている。

しかし、一方で国の財源を見れば、それらの維持・管理に膨大な予算を投入できそうな状況ではない。そのような現状を踏まえ、近年、できるだけ人間を介在させず、自ら損傷の程度や振動の大きさを発見、判断し、本来の機能を発揮するように適切に対応する能力を有する構造物、すなわちインテリジェント構造物に関する研究に目が向けられ始めている。

そのような背景には、大きく分けてふたつの理由があるように思われる。ひとつは、老朽化した施設や構造物の数が増大する一方で、人件費や収益性の問題もあって、ひとつひとつの構造物の点検や維

持に多大の時間と費用を掛けることが困難であること、すなわち省力化の問題、他のひとつは、いかに人件費と時間を掛けても損傷の発見確率を 1 にすることはできず、しかも、前述のようなトンネル内のコンクリート塊の剥離、落下のように、点検と点検の間に起きている破損に対しては対処の方法がないという本質的な問題である。

損傷の個所や規模を自ら発見して (センサ機能)、修復等の必要性を自ら判断し (プロセッサ機能)、そして修復などの適切な対応を自ら行う (アクチュエータ機能) 構造物、すなわちインテリジェント構造物の実現が待たれるのはこれらの理由によるものと思われるが、もちろん、他にも、光ファイバや新しい記憶素子によるモニタリング技術の発展、さらにはコンピュータや通信技術の急速な発達なども期待感を膨らませるひとつの要因であろう。

本稿では、インテリジェント材料や、それらを利用した構造物のスマートモニタリングおよびインテリジェント構造物に関する最近の国内外の研究動向を概観する。

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13号答申書(「環境条件に知的に応答し、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。もともと、それ以前の1971年に、自動制御の分野ではすでに「intelligent systems」という用語が使われている¹⁾。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²⁾、高木は、「センサ(検知)、プロセスサ(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³⁾。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⁴⁾。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

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有力であるように思われる。

3. Smart Monitoring に対する研究動向

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等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⁵⁾。

(1) 光ファイバーによるモニタリング

ごく最近、一般の新聞紙上でも、アメリカ杯2000に挑戦する、軽さと強度を迫及したわが国のヨットに光ファイバーを張り巡らし、わずかなひずみや変形を検知する損傷検出システムが取り上げられた。NTT、東京大学、ジーエイチクラフトの共同研究によるもので、NTTがビルや堤防などの構造診断用に研究を進めていた光ファイバー⁶⁾を船体の状態監視に応用したものである。なお、NTTによるこの技術は、構造物の新たなひずみ分布計測技術として土木学会誌の技術最前線でも紹介されている⁷⁾。

また、後ほど「光ファイバーなど先端材料の利用技術」について講演される大島らは、橋梁振動のモニタリングによる橋梁のインテリジェント化の提案を行っている⁸⁾。その後の室内実験等の結果や、光ファイバーによるひずみ測定の実理等については、後ほど詳しく紹介、解説されるはずである。

一方、国外では、かなり古くから光ファイバーによる構造物のモニタリングが行われており、例えば、旧東ドイツでは、1980年代後半には、すでにPC橋体中のPC鋼材とコンクリートに光ファイバーを設けて、コンクリートのひび割れの発生と進展状況、およびPC鋼材の応力計測を行うことのできる橋梁が造られている⁹⁾。

しかし、その後も各国で研究は続いている。例えば、昨年6月にポーランドで開催された「スマートストラクチャー」に関するワークショップでは、ハシガリーにおける数多くの橋梁の管理・維持・補修システム (BMS) を構築するための試みとして、コンクリートアーチ橋に、従来のストレインゲージや加速度計と共に、光ファイバーを利用した観測事例が報告されている¹⁰⁾。また、同年7月に英国で開催された「スマートストラクチャーとスマートマトリアルに関する第4回の欧州会議」では、橋梁の状態監視にふさわしい光ファイバーの種類 (光の干渉を利用するタイプと光強度の変化を利用するタイプ) に関する研究成果¹¹⁾や、架設後73年が経った67mの古いトラス橋の床版に埋め込まれた光ファイバーによる観測例が紹介されている¹²⁾。

なお、本年9月に米国で開かれた国際ワークショップで発表された研究事例については、この後の講演で紹介がある。

(2) 圧電素子や形状記憶合金によるモニタリング

圧電効果を利用すれば圧電材料に加わる力を電気信号に変換できるので、この原理を利用して、構造物に生じる力や加速度を圧電素子によって計測することができる。

近年、航空機分野を中心として、光ファイバー等と圧電素子を組み合わせてモニタリング技術を統合化し、疲労亀裂や腐食などの種々の損傷を比較的広い面積に渡って発見できる技術を開発しようとする試みが見られる (MONITOR)¹³⁾。

また、これも直接、土木や建築構造物を対象とした研究ではないが、チタン酸ジルコン酸鉛のセラミックス微粉末とエポキシ樹脂から成る圧電性塗料を構造物の表面に塗布し、その塗膜を構造物と一体化した振動センサおよび亀裂センサとして使用することも試みられている¹⁴⁾。振動実験の結果、材料の固有振動数のみでなく、振動モードをも決定できるとの結果を得ている。また、亀裂の発生に伴うアコースティック・エミッションを検出できるとも示されている。

圧電高分子をアルミニウム板にコーティングし、静的なひずみを検出する試みもなされている¹⁵⁾。これによって、アルミ板に対する引張試験後のノッチ先端部のひずみ分布の計測が可能になったとしている。

一方、形状記憶合金を構造物に組み込み、自身にセンサ機能とアクチュエータ機能を持たせようとする研究も、特にインテンジエント材料の開発研究

の分野で盛んである¹⁶⁾。毎年開かれているインテンジエント材料シンポジウムでは、ひとつのセッションを構成している。

なお、モニタリングではないが、構造物に作用する地震力の軽減を図り、形状記憶合金をアクチュエータとして利用しようとする研究もなされている¹⁷⁾。

(3) 最大ひずみ記憶型センサによるモニタリング

現時点では、圧電素子や形状記憶合金よりも、より構造物の状態監視に適していると思われるのが最大ひずみ記憶型センサである^{18)~20)}。このセンサはアメリカで開発されたもので、マルテンサイト変態した組織は除荷後もオーステナイト組織に戻ることはないという鋼の性質を利用した新たな合金センサである。アメリカではすでに実際の橋に取り付けられて自動監視がなされているようであるが、わが国では、その有効利用について検討が進められつつある段階で、地震や事故によって生じる橋梁の支点部の変位や部材の破断などをこれによって検出しようとする試みがある²¹⁾。

合金を利用したこのセンサよりも、より原始的とも言える発想で生まれたのが、異なる長さの炭素繊維を複数本ならべて、荷重に切れた本数から最大変位を計測する技術である^{22) 23)}。MASC (Maximum Strain sensor composed of Carbon fiber) センサと名付けられたこのセンサは、建物、橋梁、プラント、のり面など、ほとんどの構造物の変位のモニタリングに利用できる可能性がある。

(4) CFGFRPによるモニタリング

一方、柳田は大型構造物へこそインテンジエント材料を適用すべき²⁴⁾であるとして、炭素繊維・ガラス繊維複合強化プラスチック筋 (CFGFRP 筋) の利用を提案し、一連の研究^{25)~28)}によって、その実用性を検証している。

誘電性と高弾性を持つ炭素繊維と、高靱性と絶縁性を持つガラス繊維を複合化して、炭素繊維が破壊を生じるときの大幅な抵抗の増加を観測し、危険な状態を比較的簡単に監視できるので、炭素繊維補強コンクリート (CFRC) よりもより靱性に優れた点で、よりスマートな構造物材料といえる。

壁構造部材であれば、震災時や震災後の亀裂発生による漏水の検知も可能であろうである。

(5) 橋梁におけるスマートモニタリングの具体例

ここでは、前述した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

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定された。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²⁹⁾

規模の大きい構造物のヘルスモ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の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/Structures 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抑制し、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思われる。

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 30) で詳述されている。図 1 は、その中で将来のスマートストラクチャーを概念的に表したもので、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。

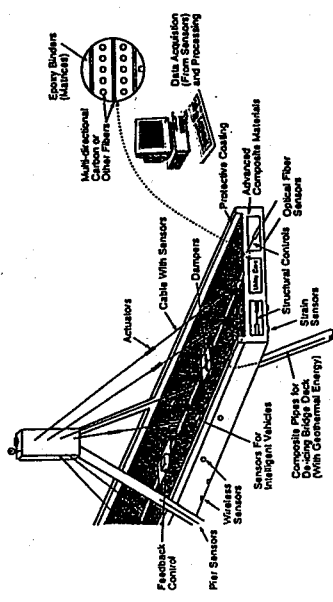


図 - 1 Smart Bridge のイメージ図

さらに、最近の CIS(multidisciplinary civil infrastructural systems)の研究が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 predictions
 - ・ new sensors and control systems ; NDT ; new materials
 - ・ electro-rheological fluidsshape memory alloys, 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。

このように、インテリジェント橋梁やインテリジェント構造を現実のものにするためには、解決すべき技術的課題が山積しているが、ここでは「構造制御技術」と「自己修復材料」に絞って、現在の研究動向を探っておく。

3.1 構造制御技術

いかなる外部環境の変化にも構造物自身が適応して振動や変形等の制御を行う知的機能を持った構造システムは、極めて高い安全性と信頼性を持つ正に夢のようなシステムであろう。

1996 年頃までの構造物の制御に関する研究については、Housner ら³¹⁾が極めて精力的にレヴェーしている中で、ここでは、1998 年に欧州で開かれた前述のふたつの会議で発表された研究を紹介して、今後の研究の方向性を探る参考に供したい。

まず、前述した Smart Structures and Materials に関する第 4 回の欧州会議では、

- ① Adaptive Structures and Adaptive Control
- ② Active Control : Actuators
- ③ Active Control : Applications
- ④ ER Fluids
- ⑤ ER Properties
- ⑥ ER Models and Applications
- ⑦ MR/ER Fluids
- ⑧ Shape Memory Alloys
- ⑨ Actuators: Shape Memory Alloys

のセッションで、45 件の研究発表がなされている。

さらに、Demonstrator Workshop では、Adaptive aero-structures, demonstration of flight-worthy hardware, Active control using shape memory materials, Electro-structured fluids and their applications などに関する研究成果が報告されている。

これらを見ると、まず、航空機分野からの発表が目につく。形状記憶合金や圧電素子をアクチュエータとして利用したり、ER 流体（電気粘性流体）と圧電素子の特徴を活かして振動を最適に制御しようとする研究が多い。すなわち、あらかじめ任意の形状を記憶させておけば、低温相で変形を加えても、加熱し高温相にすれば元の形状に戻る形状記憶合金、電気を加えると形が変わる圧電素子、電圧を加えれば粘性が変化する ER 流体などを利用して、最適な振動制御を行おうとする研究である。

土木や建築構造物に関しては、地震や風から橋、ビル等を守るための強力な手法として構造制御技術が使われる³²⁾。

文献 33) には、土木構造物に関する能動的制御

技術に対する数多くの研究が紹介されている。特に土木構造物は、システマ的にも、また、外乱についても不確実性が大きい。文献ではそのことを踏まえた制御技術が詳しく述べられている。

また、最近の研究として、入力、出力および外乱に対する事前の知識が乏しい場合を想定したニューラルネットワークやフuzzy理論によるアプローチに対する研究事例も挙げられている。

いずれにしても、機械製品に比較して土木構造物はスケールが大きいために、能動的制御によって構造物の変形等をあらかじめ設定した許容値内に収めるためには、数多くのセンサとアクチュエータを適切な位置にセットし、それらを最適にコントロールしなければならない。この問題解決は、技術的にもコストの点からも容易ではない。このため、近年、可変型オイルダンパーによる準能動的制御に関する研究などが盛んである³⁴⁾。

3.2 自己修復材料

インテリジェント化を目指して始まった構造物金属材料の研究の方向性については、文献 35) に詳しく紹介されている。ただ、自己修復材料に関する研究で挙げられているのは、表面析出現象の真空容器材料あるいは耐熱鋼への応用、粒子分散による Fe-20Cr 合金の高温疲労亀裂成長の抑止などに関するもので、残念ながら、橋梁や建築構造物に使われるような材料に対するものではない。

一方、建築材料の分野で進められているのは、自己カプセル化による自己修復コンクリートや、ガラス管や細孔ネットワークによる自己強度回復コンクリート^{36), 37)}の開発研究である。

例えば、自己カプセル化による自己修復コンクリートのアイデアは、図-2 に示しているように、硬化材無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモ

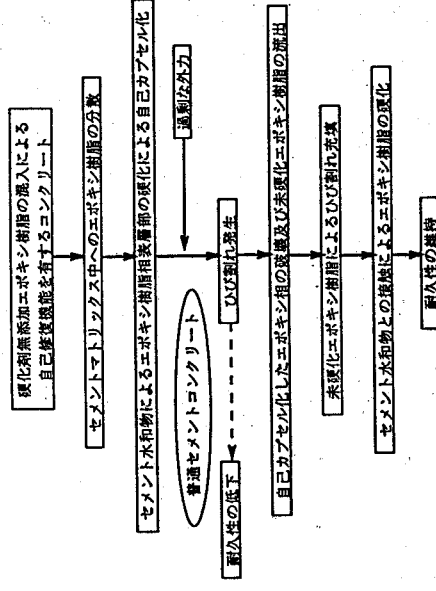


図-2 自己修復機能を有するコンクリートの概念

ルタルにひびわれが発生した際に、モルタル中の未硬化エポキシ樹脂がひびわれを充填し、セメント水和物の作用により硬化することでひびわれを修復させようとするものである。

4. まとめ

橋梁等の構造物のスマートモニタリングや、それらのスマート化、インテリジェント化に関する最近の研究動向を概観した。最終目標、換言すれば、計画や設計段階では予測のできなかった外乱や、構造物の剛性、靱性等に不確実性があったがために不安定状態に陥るような可能性があっても、所定の機能を果たすように自らをコントロールできる夢のような構造物の実現には、解決が極めて困難な問題が数多くある。土木構造物のコントロールが難しい理由のひとつに、その規模が大きいこと、外乱に風や地震など、時間間的に予測の困難なものが多いことなどが挙げられるが、その他にも、公共財であることから、安全性レベルとコストとの関係についても、クリアーしなければならぬ課題がある。

したがって、一気にインテリジェント構造の実現が難しいとすれば、スマートモニタリングと、それによる準能動的制御法に照準を合わせた、すなわち、スマート構造物の実現に必要な開発研究を推進させるべきであると考ええる。

なお、ここで紹介した研究は、著者が入手できた範囲の資料によるもので、見逃している重要な研究が多々あることと思われる。記してお断りしておきたい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Takagi, T.: The Present State and the Future of the Intelligent Material and Systems, Proc. of the 4th International Conference on Intelligent Materials (Plenary Lecture), October, 1998.
- 3) 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 STRUCTURES, 1993年9月。
- 4) 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年9月。
- 5) 阿部 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, pp. 173~179, 1997年8月。

- 6) 宮原俊介：NTT, 構造物の変形を検出する光ファイバセンサを開発, 日経メカニカル, p. 14, 1997年7月。
- 7) 倉嶋利雄, 佐藤昌史：光ファイバ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年12月。
- 8) 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年。
- 9) 小川孝寿, 柿沢忠弘：スマートストラクチャーの研究事例—建築・土木構造物における事例, SMART STRUCTURES, pp. 37~41, 1993年9月。
- 10) Farkas, G.Y.: Supervision, Maintenance and Renovation of Reinforced and Prestressed Concrete Bridges, Smart Structures, Kluwer Academic Publishers, pp.63-70, 1999.
- 11) Casciati, F. and Zonta, G.: Intensity Based Optical Fiber Monitoring For Infrastructures, Proc. of the 4th European and 2nd MIMR Conference, pp.413-419, 1998.
- 12) Fuhr, P.L., Spammer, S. and Huston, D.R.: Bridge Deck Measurements Using Embedded Fiber Optic Sensors, Proc. of the 4th European and 2nd MIMR Conference, pp.443-447, 1998.
- 13) Ball, A.S.: Monitoring ON-line Integrated Technologies for Operational Reliability (MONITOR), Proc. of the 4th European and 2nd MIMR Conference, pp.435-441, 1998.
- 14) 江草茂則：ヘルスモニタリング機能内蔵型構造材料への挑戦, 自動車技術, Vol. 50, No. 6, 1996年。
- 15) 江頭 満：金属材料のインテリジェント化, インテリジェント材料, Vol. 6, No. 2, pp. 5~7, 1996年。
- 16) 吉田 均, 熊谷八百三, 矢島勝司, 矢野彰一郎, 舟木淳夫：TiNi 形状記憶合金をエフェクタとする環境応答複合材料の可逆的形状応答及び発現力について, 第6回インテリジェント材料シンポジウム講演要旨集, pp. 4~6, 1997年。
- 17) Casciati, F.C., Faravelli, L. and Petri, L.: Testing a SMA Energy Dissipation Device, Proc. of the 4th European and 2nd MIMR Conference, pp.321-328, 1998.
- 18) Thompson, L.D. and Westermo, B.D.: Applications of an Innovative Structural Damage Detection and Monitoring Technology, Proc. of the The Mouchel Centenary Conference on Innovation in Civil & Structural Engineering, pp.19-21, 1997.
- 19) Tominaga, M., Thompson, L. and Westermo, B.: Passive Peak Sensor Technology: Development and Applications, Proc. of International Conference on Current and Future Trends in Bridge Design Construction and Maintenance, October, 1999.

光ファイバーなど先端材料の利用技術

大島俊之¹

¹フエロー 工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

本稿は最近の光ファイバーセンサーに代表される先端材料を用いた新しい構造健全度モニタリング手法を紹介している。特に光ファイバーセンサーの種類としてEFPI方式とFBG方式があり、それぞれの計測事例を紹介している。また将来的な先端材料の応用としては形状記憶合金 (Shape Memory Alloy) や圧電素子センサー/アクチュエータなどの発展も期待される。

Key Words : optical fiber sensor, OTDR, Fabry-Perot sensor, Bragg grating sensor, smart health monitoring

1. はじめに

近年の我が国における阪神大震災や米国におけるノースリッジ地震などの被害を契機として、社会基盤施設 (Civil infrastructure) の外観検査では発見できない損傷を発見できるシステム開発の社会的要請が強くなってきている。また一方、従来より整備されてきた社会資本 (ストック) が高度経済成長期に集中していることから、これらの施設の維持管理が今後の大きな課題であるが、これらの維持管理のための点検作業量やその経費を削減し、より有効な維持管理用データを遠隔操作でモニタリングできるシステム開発に対するニーズも高まってきている。このような分野は従来 NDE (Nondestructive evaluation) 技術として評価されてきたが、最近の傾向はさらにそれらを実構造物に應用して、Structural Health Monitoring (構造健全度モニタリング) として発展しつつある。本文では以下にこれらの新しい先端材料を応用した測定技術について紹介している。

2. EFPI センサーの測定への応用

長期間安定した測定結果を得るためにはセンサー自体の耐久性と周辺環境の影響を受けづらいたが必要である。つまり、従来の歪みゲージ式センサーは寿命や電磁誘導の影響などの欠点を持つ。そこで温度変化、電磁誘導、耐腐食性に優れた光ファイバーをセンサーとして用いる研究が盛んである。長期間測定を続ける場合には耐久性以外にセンサーの取り付け方法が問題

となる。センサーの設置方法については疲労試験のような繰り返し載荷を受ける条件でその性能について検討する必要がある。

(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なか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さ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。構造物の歪みを測定する方法として損失統合型 OTDR 法⁹⁾、FBG 法^{10) 16)}、EFPI 法^{11) 12) 17)}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歪みに比例して変化する特性を利用して長さ方向の歪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歪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。

EFPI (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、

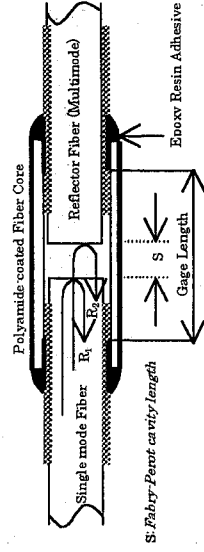


図-1 EFPI センサの構造

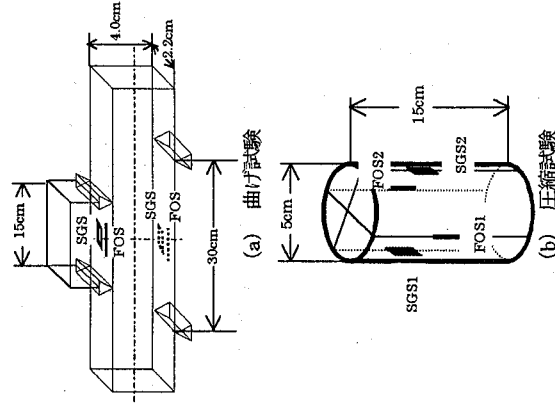


図-2 FOS の特性試験

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 μm 、ひずみ測定範囲 10%、変位測定解像度 5nm、ひずみ解像度 1 μStrain で、最大 5 Hz のサンプリング周期を持つ。ここで使用した EFPI センサー測定範囲は歪みで 5000 μStrain まで測定可能である。EFPI センサー (FOS: Fiber Optic Sensor) の直径は 350 μm と小さく、光ファイバーの直径はさらに小さく約 100 μm 程である。

(2) EFPI センサの特性

本節では EFPI 法による測定方法と電気式歪みゲージ (SGS: Strain Gage Sensor) による測定を比較してその適用性について検討するため二種類の試験を行った結果を示す。一つは長方形断面の鋼棒を図-2 (a) のようなスパン 30cm、荷重間隔 15cm の 2 点曲げ試験を行い支間中央の引張側と圧縮側にそれぞれ一点ずつ FOS と SGS を貼り付けて荷重を 60kN まで増加させたときの歪み変化を比較した。図-3 はこの時の荷重歪み曲線である。FOS と SGS は 1500 $\mu\epsilon$ までほぼ一致した傾向

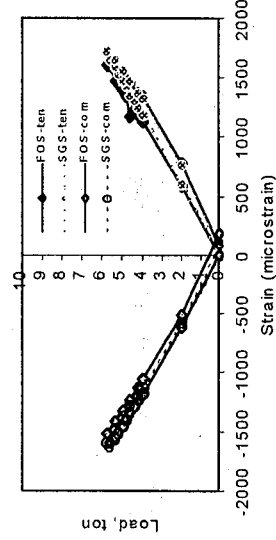


図-3 曲げ試験による FOS と SGS の特性比較

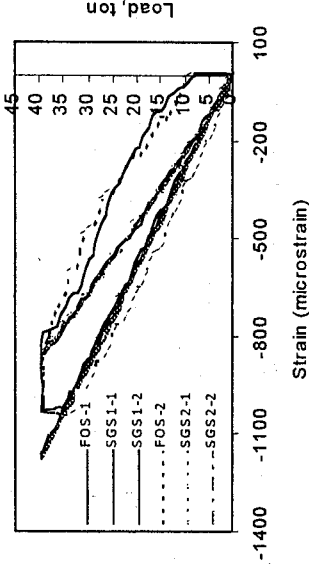


図-4 FOS と SGS の圧縮試験時の特性比較

であることがわかる。同じ荷重に対しては FOS が SGS に対して小さき目に出る傾向にある。ここで EFPI センサー (F&S 社: S-E-AFSS-03-F) には埋込型センサーを用いた。

次に図-2 (b) のような直径 50mm 長さ 150mm の鋼円柱の圧縮試験を行い圧縮軸方向の歪みを測定するため FOS と SGS を貼り付けて歪み変化を比較した。荷重は 40tf (3920kN) まで載荷を行い、荷重をホールドした後で除荷した。図-4 はこの時の荷重-歪み曲線である。縦軸は荷重、横軸は歪みである。この時 SGS 1 と SGS 2 は -1150 $\mu\epsilon$ と -850 $\mu\epsilon$ まで増加して除荷時ほぼ同じ経路で歪みは減少した。これに対して FOS 1 と FOS 2 は荷重増加の時は -1008 $\mu\epsilon$ と -1031 $\mu\epsilon$ まで直線的に増加したが、35tf (3430kN) から歪みの増加が止まり、荷重ホールド時には歪みが減少する現象が起きている。除荷時にはこの分だけ歪みが小さい方にシフトしているが、その傾きは載荷時とほぼ一致している。35tf (3430kN) の荷重段階で歪みが増加しなくなった原因として、光ファイバーの接着方法に問題があると考えられる。このことは荷重がゼロになった時点で残留歪みが無くなっており、除荷後 FOS の接着部が滑って変形を続けていることからそのように考察される。本研究では光ファイバーの接着に歪みゲージ用の速乾性接着剤 (共和電業 CC-33A) を使用している。光ファイバーは円筒形をしているため接着面積が小さく、相対的に SGS より接着力が弱くなっている可能性がある。光ファイバーセンサーを変形の大きな測定に用いる場合には、センサーの接着面積を大きくした表面接着タイプの EFPI センサーを用いて測定するか、接着方

- 20) Tominaga, M., Kato, Y. and Shinkawa, H. : A New Technology Using Strain Memory System and Remote Data Acquisition for Maintenance of Structures, Proc. of the International Conference on Advances in Engineering and Mechanics, 1999.
- 21) 葛 守隆, 吉池純一, 小林俊夫, 伊藤祐一 : 異常検知によるモニタリング手法の検討, 土木学会第 53 回年次学術講演会, I-A255, pp. 510~511, 1998 年 10 月.
- 22) 戸田郁也 : 大型構造物の診断, 機能材料, Vol. 15, No. 1, pp. 27~33, 1995 年 1 月.
- 23) 戸田郁也 : 最大変位量記憶センサー, 現代科学, pp. 38~40, 1996 年 2 月.
- 24) 柳田博明 : 大型構造物へこそインテリジェント材料の適用を, インテリジェント材料, Vol. 5, No. 3, pp. 3~5, 1995 年.
- 25) 柳田博明 : インテリジェント材料の設計, インテリジェント材料, Vol. 4, No. 1, pp. 5~10, 1994 年.
- 26) Muto, N., et al. : Materials design of CFGFRP-reinforced concretes with diagnosing function for preventing fatal fracture, Adv. Composite Mater., Vol. 4, No. 4, pp. 297-308, 1995.
- 27) 岸本 昭, 柳田博明 : 炭素繊維ガラス繊維補強プラスチックにおける自己診断機構の統計的解釈, 材料システム, 第 14 巻, pp. 29~35, 1995 年 11 月.
- 28) 武藤範雄, 柳田博明 : 地震による損傷を自己診断する賢い材料, 現代化学, pp. 32~40, 1996 年 2 月.
- 29) Wang, M.L. and Satpathi : Advanced Monitoring System for Large Structural Systems, Smart Structures, Kluwer Academic Publishers, pp. 383-390, 1999.
- 30) Chong, K.P. : Smart Structures Research in U.S., Smart Structures, Kluwer Academic Publishers, pp. 37-44, 1999.
- 31) Housner, G.W., et al. : Structural Control : Past, Present and Future, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, pp. 897-971, September, 1997.
- 32) 岡林隆敏, 小松正貴, 角本 周, 下田郁夫 : 歩行者による吊床版橋の H[∞]制御理論によるアクティブ制御, 土木学会論文集, No. 577/ I -41, pp. 153~163, 1997 年 10 月.
- 33) Rodellar, J. : Control Theory Sources in Active Control of Civil Engineering Structures, Smart Structures, Kluwer Academic Publishers, pp. 285-294, 1999.
- 34) 佐藤忠信, 土岐憲三, 佐藤 誠 : 可変減衰装置の開発と減衰力の制御システムの構築, 土木学会論文集, No. 570/ I -40, pp. 203-215, 1997 年 7 月.
- 35) 新谷紀雄 : 構造材料のインテリジェント化の試み, インテリジェント材料フォーラム, 第 14 回ワークショップ, pp. 19~32, 1996 年 11 月.
- 36) 三橋博三 : 自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する研究 (平成 7 年度~平成 9 年度科学研究費補助金研究成果報告書), pp. 65~91, 1998 年 3 月.
- 37) 乾 弘泰, 三橋博三, 西脇智哉 : 建築材料のインテリジェント化に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 643~644, 1997 年 9 月.

(1999. 10. 10 受付)

TRENDS IN DEVELOPMENTS OF TECHNIQUES IN INTELLIGENT BRIDGE STRUCTURES AND SMART MONITORING

Takahiro NAKAYAMA

It is the purpose of this paper is to introduce the trends in developments of techniques in the intelligent structures which possess the sensing function, the processing function and the function of actuator (effector). As to the function of actuator, the recent strategies for structural control and new technologies in self-renovation of structural materials are briefly presented. Moreover, extensive studies on the smart monitoring of structures using various sensors, such as fiber optic sensor, piezoelectric device, shape memory alloys, CFGFRP(carbon- fiber-glass-fiber-reinforced plastic composite), are provided.

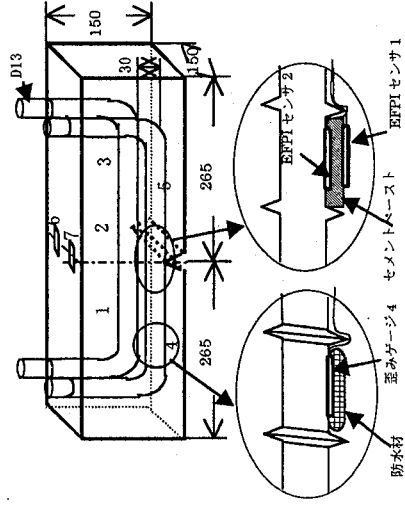


図-5 EPPI センサを設置した曲げ供試体

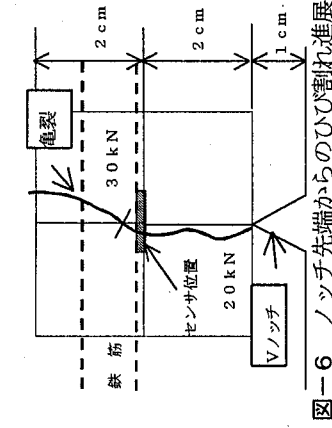


図-6 ノッチ先端からのひび割れ進展

法の検討が必要になる。

(3) コンクリート内部の歪み測定への応用

a) 実験概要

供試体は図-5に示すような寸法 150×150×530mm の直方体で、図のように D13 の鉄筋を 2 本かぶり 30mm で配置し、コンクリートの代わりにモルタルを用いて二つの供試体（供試体 A と供試体 B）を作製した。この供試体を用いて曲げ試験を行い、引張側に発生する曲げひび割れ発生位置での鉄筋のひずみと付着コンクリートのひずみ分布を測定する。鉄筋を配置した引張側のモルタルには高さ 10mm の切り欠きを設けてこの位置からひび割れが発生しやすいように誘導している。実験は、JISA1106 の曲げ強度試験の要領で行った。光ファイバーセンサーは図-5 の右丸の中に示すように鉄筋中央部下側に EPPI センサー 1 および 2 をエポキシ系の接着剤で貼り付けた。ここで EPPI センサーには張付けタイプ（F&S 社：S-A-AFSS-03-F）を使用した。EPPI センサー 2 は鉄筋に直接張付け、その上にセメントペーストを約 4mm 重ねさらにセンサー 1 を貼り付けた。さらに鉄筋には 1～5 の数字の位置にひずみゲージを貼り付けた。またひずみゲージは表面を防水材で防水した。圧縮側のコンクリート表面中央には鉄筋の真上位置（図中の 6、7 番に対応する位置）にひずみゲージを貼り付けた。静的載荷実験は 5kN 刻みで 100kN まです測定を行い、曲げひび割れの発生状況を観察した。

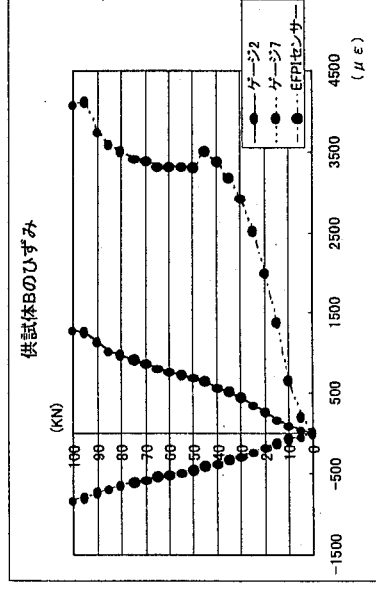


図-7 供試体 B の歪みの比較（支間中央）

b) 測定結果

図-6 は供試体 B の切欠き周辺の曲げひび割れの発生状況図である。実験の結果 20kN で最初の曲げひび割れが切欠き先端から発生し、光ファイバーセンサー位置を通過して 30kN で曲げひび割れは完全に鉄筋を通過している。図-7 はこのとき測定されたゲージ 7 と 2 のひずみとセンサー 1 のひずみを比較した図である。圧縮側のひずみゲージ 7 も鉄筋に貼り付けたゲージ 2 もひずみはほぼ直線的に増加している。実験より求めたモルタルの引張強度は約 4.1N/mm² であるから、引張強度は 20kN から 30kN の間にあり初期ひび割れ発生荷重とほぼ一致している。センサー 1 のひずみは約 45kN まではほぼ直線的に増加しているがその後はひずみの増加は止まっていることがわかる。

3. 経時変化モニタリング

(1) 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-8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-9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 $\alpha=45^\circ$ を供試体 7-2、 $\alpha=60^\circ$ を供試体 8-2 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 のように埋込型 FOS ゲージ（F&S 社：S-E-AFSS-01-T）をノッチ先端直下の 2mm の位置に歪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歪みゲージ（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

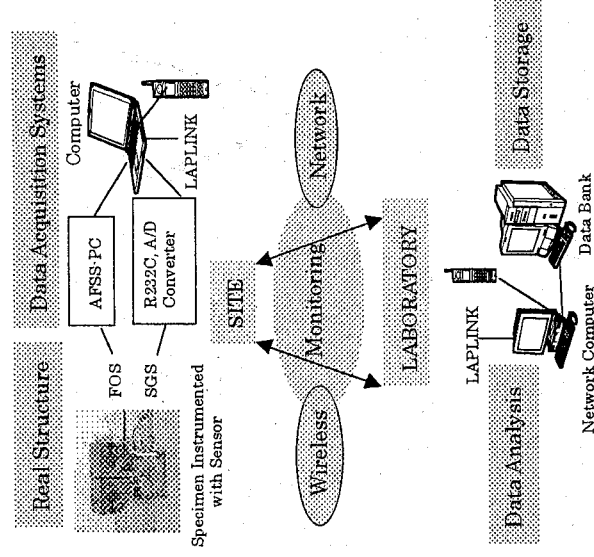
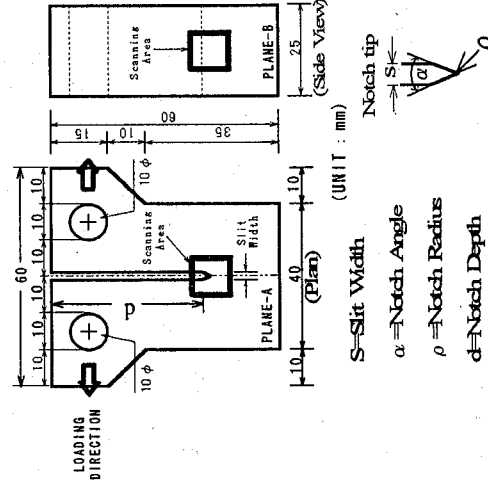


写真-1 試験体とセンサ配置

図-10 モニタリングデータ監視プログラム

b) 測定結果



度に影響を与えるので、FOS センサへヘッド部分全体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 サイクル以後は 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歪みをモニタリングするために図-10 のモニタリング監視プログラム Labasist 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歪み、最小値歪み、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歪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。

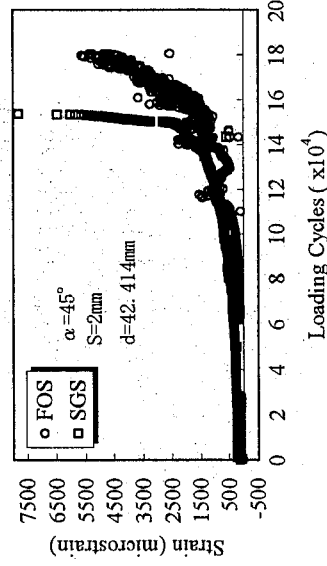


図-11 FOS と SGS の歪み履歴の比較 (供試体 7-2)

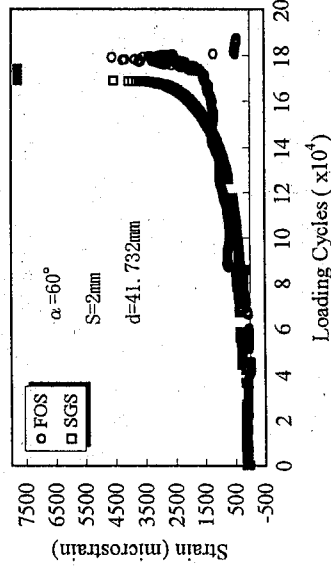


図-12 FOS と SGS の歪み履歴の比較 (供試体 8-2)

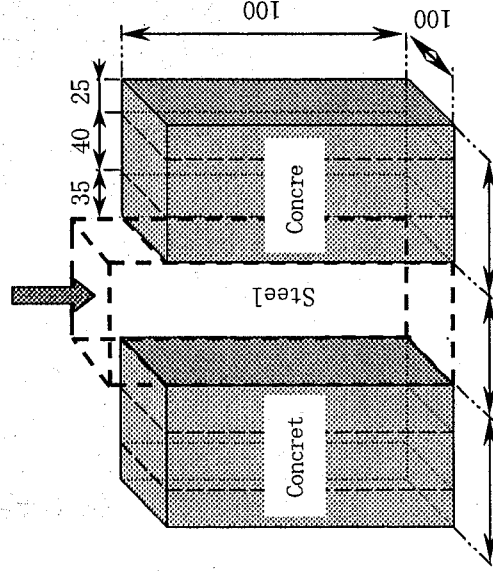


図-13 3層鉄筋コンクリートモデル供試体

比べて疲労亀裂が急激にセンサーに近づいている事を表している。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。

(2) 光ファイバーセンサーを用いた鉄筋コンクリート養生過程のひずみ計測

構造部材の内部、特に鉄筋コンクリート部材の鉄筋周辺のコンクリート中の応力分布またはひずみ分布を計測した事例はこれまでに非常に限られている。一般的には鉄筋表面に貼付けたひずみゲージにより内部のひずみの代表的な値を計測している例が多い。また一方異形鉄筋の異形部周辺の母材としてのコンクリート中のひずみ分布は応力集中などを伴い平均的なひずみ分布とは異なるものと思われるが、これらに関する実測例はあまりない。しかし鉄筋の引き抜き挙動など鉄筋コンクリート部材の非線形挙動を明確にするには、複合材料部材としての鉄筋とコンクリート間の相互作用をできるだけ正確に評価する必要がある。本文で示す実験結果はこのうち養生中のコンクリート内部の歪変化と光ファイバーセンサーによって計測した結果を示すもので、コンクリート内部の初期残留歪に相

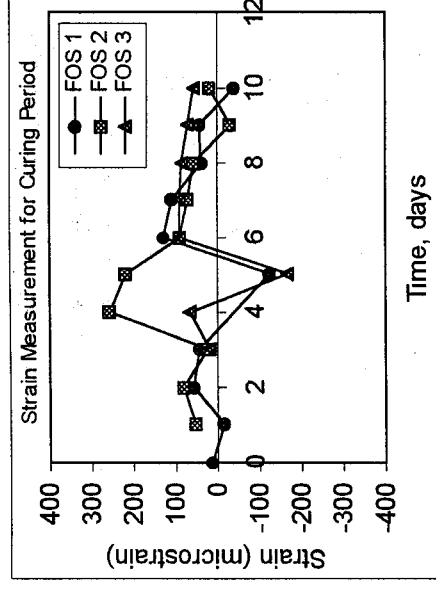


図-14 養生過程での内部歪計測

当するものである。

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らない。
- (2) ひずみの計測可能範囲が広い。(±5000 μ)
- (3) 超低温 (−200℃) から高温 (+900℃) 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。²⁾

a) 実験概要

鉄筋コンクリートの異形部を含めた応力伝達機構の解明を目的として、二次元の応力伝達状況を計測するための図-13 のような鋼板と3層のモルタルからなる供試体を作成した。鋼板表面には異形部をモデル化するため高さ2mm、幅6mmの突起を奥行き方向に連続して3箇所加工した。光ファイバーセンサーの配置についてはモルタルを3回(3層)に分けて打設し、その度毎にセンサーを埋設した。次の打設の前にはセンサ

一部位外のモルタル表面はブラシで凹凸を大きくし、層間の接着を確保するように配慮した。センサーは高さの1/2 (50mm) の位置とし、鋼板表面上 (FOS1)、第1層と第2層のモルタル境界 (FOS2) および第2層と第3層の境界 (FOS3) のそれぞれに3箇所設置した。光ファイバーセンサーの設置方法はFOSを最初薄いビニールシートに貼り付け、防水も考慮して、アラルダイドで固定した。モルタルの配合は硬化促進剤入り速乾セメントを用い、水セメント比50%、単位水量255kgf/m³、単位細骨材料1018kgf/m³である。

b) 実験結果

実験では鋼板上にFOS1を設置した後、第1層のモルタル層を打設し、1日後のモルタル層硬化後にFOS2を設置して第2層目のモルタルを打設した。またさらに2日後にFOS3を打設した後、第3層目のモルタル層を打設した。図-14にはこれらのFOSの内部歪計測の時間的経過を示している。これらの結果よりモルタル中の内部歪は打設後4、5日程度で安定的な歪に収束するとともに、収束する過程で200μs程度の内部歪が発生するが、これらは内部応力の再配分の過程で減少する傾向が見られている。

4. 最近の国際会議における研究報告

今年9月上旬、米国Stanford大学において第2回Structural Health Monitoring (構造健全度モニタリング) に関する国際ワークショップが開催され、100件を超える研究報告が発表された。このStanford大学におけるワークショップは1997年9月に開催された第1回会議に続くもので、アメリカ西海岸地域での新しい技術展開を象徴しており、今後ますます発展する様相を呈している。会議の全体的傾向としては、米国におけるこれまでのNASAや軍事技術に関連する新しい技術開発の成果を民生用に技術移転するための方向として、社会基盤施設である建築構造物や土木構造物 (Civil Structure) へ応用するための研究開発を推進していることである。

以下に今年開催された会議の中から先端材料の利用技術に関連するものをいくつか紹介する。これらは近い将来に必ず土木工学の分野に取り入れられる将来性のある技術である。

(1) NEDO プロジェクト¹⁴⁾

清水建設のMita¹⁴⁾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適確に判定できる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ェ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

- ・歪、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50μm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) 最大歪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

- ・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

(2) Fiber Bragg Grating (FBG) センサーの利用技術

Foedinger ら¹⁵⁾は複合材料圧力容器の構造健全度モニタリングのためにFBGセンサーを応用した研究を報告している。

Bragg 波長 λ_B の変化 $\Delta \lambda_B$ は内部歪 ε と温度変化 ΔT に比例するものとして (図-15 参照)

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \varepsilon + \zeta (\Delta T)$$

ただし P_e は有効光弾性係数 ($=0.21$)、 ζ は温度光波長係数 ($=3.5 \times 10^{-6} \text{ nm/mm} \cdot ^\circ\text{F}$)。また図-16 および図-17 のように温度補償のための FBG センサーや周方向応力成分分離のためのセンサーを開発している。図-18 には計測システムを示しているが、複数本のファイバーストリップと 1 本当たり多数の Bragg Grating を設置することによって同時に多点計測が可能であり、これらは Labview 上ソフトウェアでコントロールされている。

一方 Johnson ら¹⁰⁾ は船体構造の健全度モニタリングに FBG センサーシステムを用いた研究成果を報告している。計測には図-19 のようなシステムを図-20 の船体に設置し、On-line で船体の健全度をモニタリングしている。モニタリング項目は (i) 船体全体の曲げ変形 (ii) 局所的歪 (iii) 船体の推進時の振動応答 (iv) 波浪による甲板の動的歪応答である。FBG センサーは 4 本から 8 本のケーブル上に設置した FBG により 64 個所に配置されており、360Hz のサンプリング間隔を用いている。図-20 の C 点から計測された断面方向歪と D 点において計測された船体軸方向歪の時間変化の例を図-21 に示している。断面方向歪には高次モードの断面変形曲げ振動モードの影響が見られる。

また Todd ら¹²⁾ は図-22 のような橋梁の鋼桁断面に FBG センサーを配置し、図-23 のような計測システムを用いた計測結果を示している。図-24 には上下フランジと復板の歪応答およびランニングスプレクトルを示している。これらの結果は New Mexico city にある Interstate 高速道路の上に架かる橋梁に関するもので 64ch の歪計測用 FBG センサーを配置している。モニタリングの項目は①交通荷重モニタリング②長期間振動応答モニタリング (健全度診断) ③実時間桁たわみの評価となっている。

またこれらの計測システム開発の目的として通常実施されている「目視」による点検では点検頻度が限られ、時間経費の節約から充分なデータが得られず、また劣化メカニズムが目視によって発見しにくい内部的なものであれば、有効な構造状態診断が困難であるためと述べている。この研究はアメリカの Federal Highway Administration (FHWA) との共同研究である。

(3) コンクリート構造への光ファイバセンサーの応用

Moerman ら¹³⁾ はコンクリート構造に FBG センサーを用いて遠隔モニタリングを実施した例を紹介している。

図-25 には $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ のコンクリートブロックを軸方向に 10 N/mm^2 の圧縮力を与えたときのクリーブ挙動を計測した結果を Demec 変位計と FBG の比較としているが、両者良い一致を示している。

また同じ試験の荷重載荷直後の歪変動を計測した結果を図-26 に示しているが FBG センサーは Demec 変位計や通常の電気式歪ゲージより安定的に歪変化を計測できている。

FBG センサーによる歪計測システムにおいては温度変化による影響を代償して補正しなければ真の歪値が得られない。また FBG センサーをエポキシ樹脂によって供試体に貼付する場合には、固化するまでの養生期間の BG による歪変化を計測しておく必要がある。エポキシ樹脂が固化するまでの時間は 7, 8 時間程度であり、図-27 に示すように 20 時間程度経過すればほぼ安定的な歪計測が得られている。

(4) PZT アクチュエータの応用

Park ら¹⁰⁾ は橋梁構造の損傷検出法として PZT アクチュエータによる構造の部分加振によってボルトの欠陥など微小な損傷を検出する方法を示しており注目されている。これはバージニア工科大学 Intelligent Material Systems and Structures (CIMSS) センターで開発された方法であり、たとえば図-28 のようにトラス骨組構造において Damage 1 から 3 のボルトのゆるみを発生させたとする。PZT アクチュエータ 1 および 2 を Damage の近くに配置し、加振するとともに構造の各部で振動を計測することにより、応答波形のピーク振動数の微小な変化としてボルトのゆるみ個所を特定することができものである。すなわちボルトのゆるみのない健全状態で振動応答を計測しておく、応答波形のピーク振動数を高次まで確認しておく。次にボルトのゆるみを与えて、その影響を振動数の変化としてとらえることができることに、健全時のピーク値と一致する振動数によって PZT アクチュエータで加振すれば応答波形に Beating が発生して、微小な構造変化が発生したことを検出することができる。図-29 には PZT 2 の位置で計測された波形の応答倍率を周波数領域で Damage 2 と Damage 3 について比較している。PZT 2 に近い Damage 2 の応答の変化が明確に得られている。

このように構造欠陥が微小の場合には構造全体を加振するのではなく、局所的に加振して効率良く欠陥を検出することが可能である。ただし欠陥の可能性のある範囲は事前に特定する必要がある。

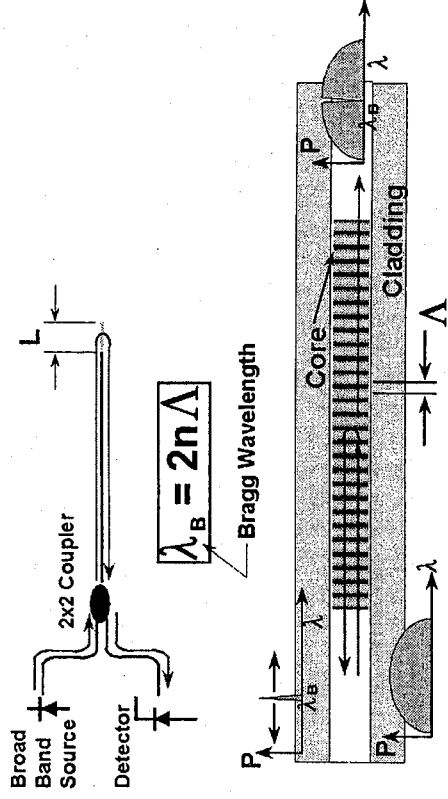


图-15 Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor

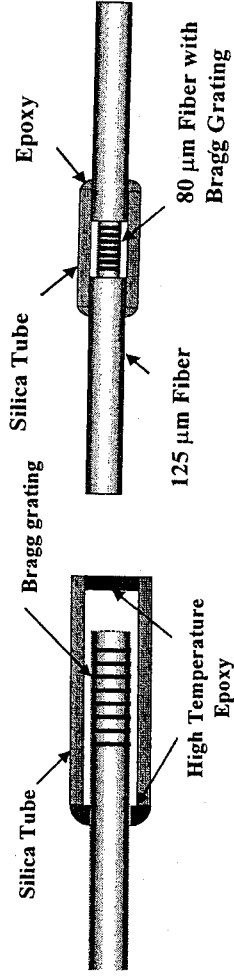


图-16 Fiber Optic Temperature Sensor

图-17 Transverse Insensitive Grating Sensor

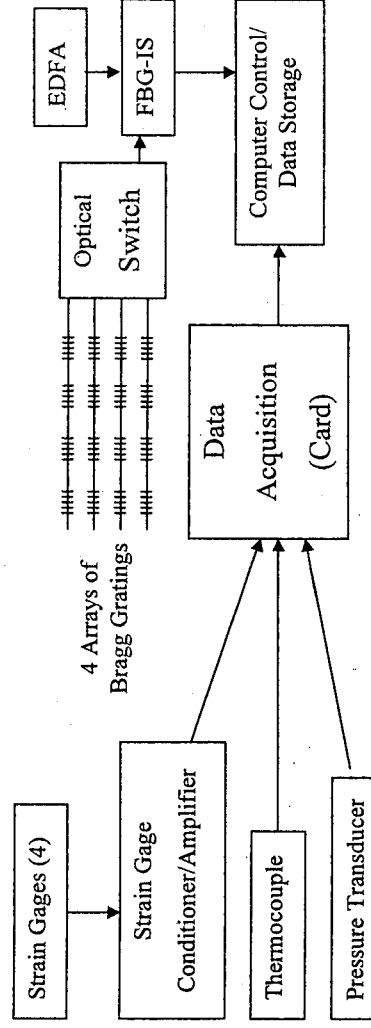


图-18 Sensor Instrumentation System

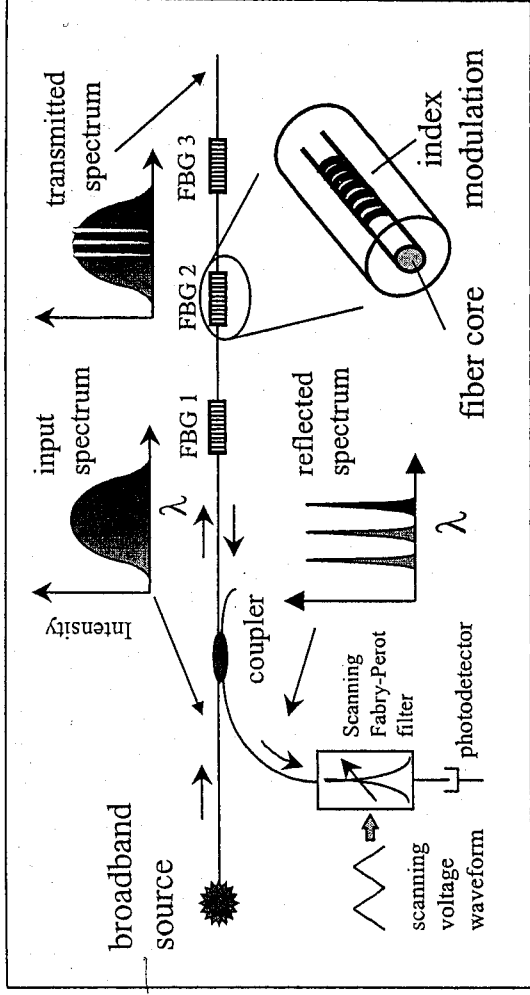


图-19 The scanning Fabry-Perot filter technique for strain sensing with fiber Bragg gratings.

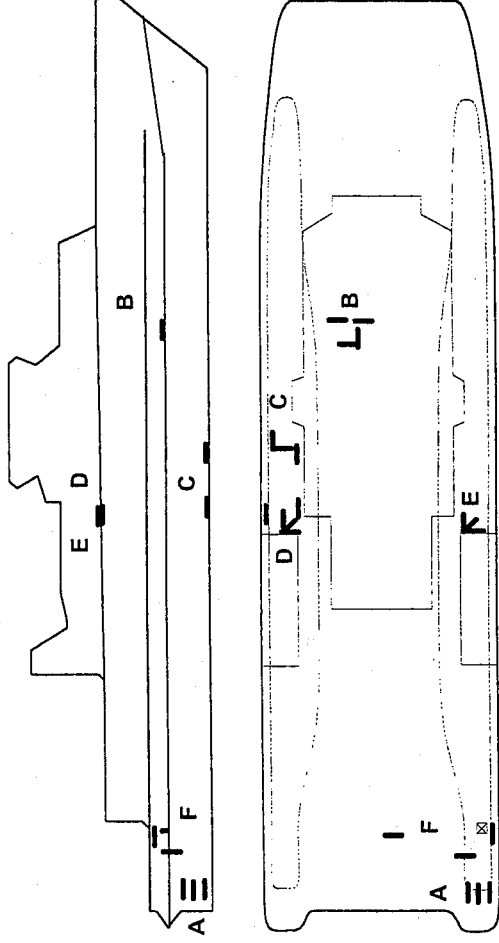


图-20 Fiber Bragg grating placement on the mine counter-measure vessel KMM Hinnoy

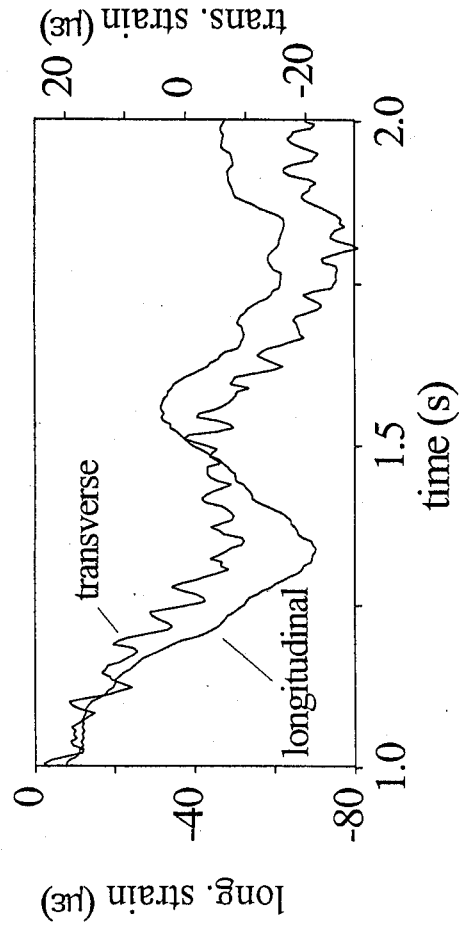


图-21 Transverse and longitudinal signals.

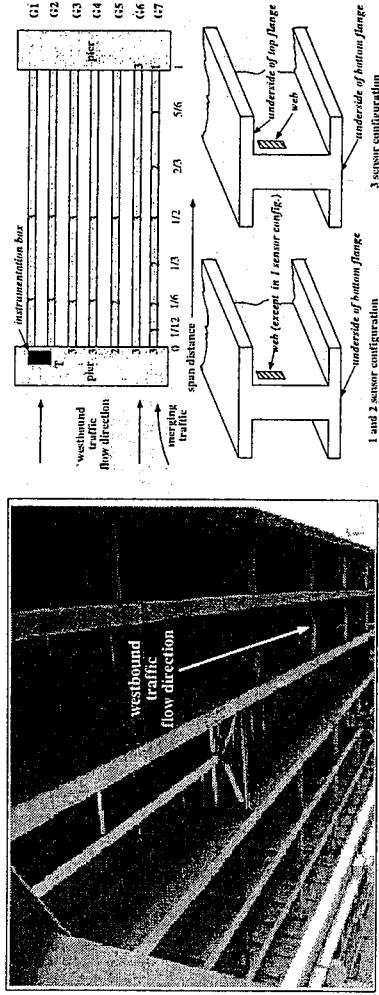


Figure 22 A photograph of the I-10 bridge span upon which the FBG sensor were attached.

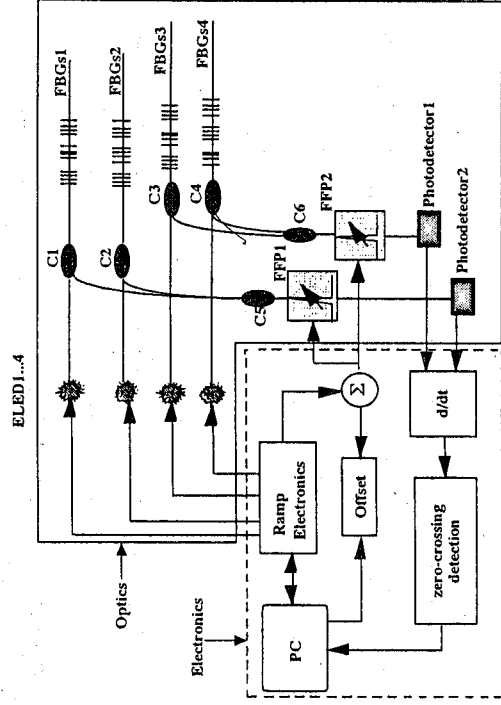


Figure 23 A schematic of the FBG strain measurement system with a 64-channel architecture.

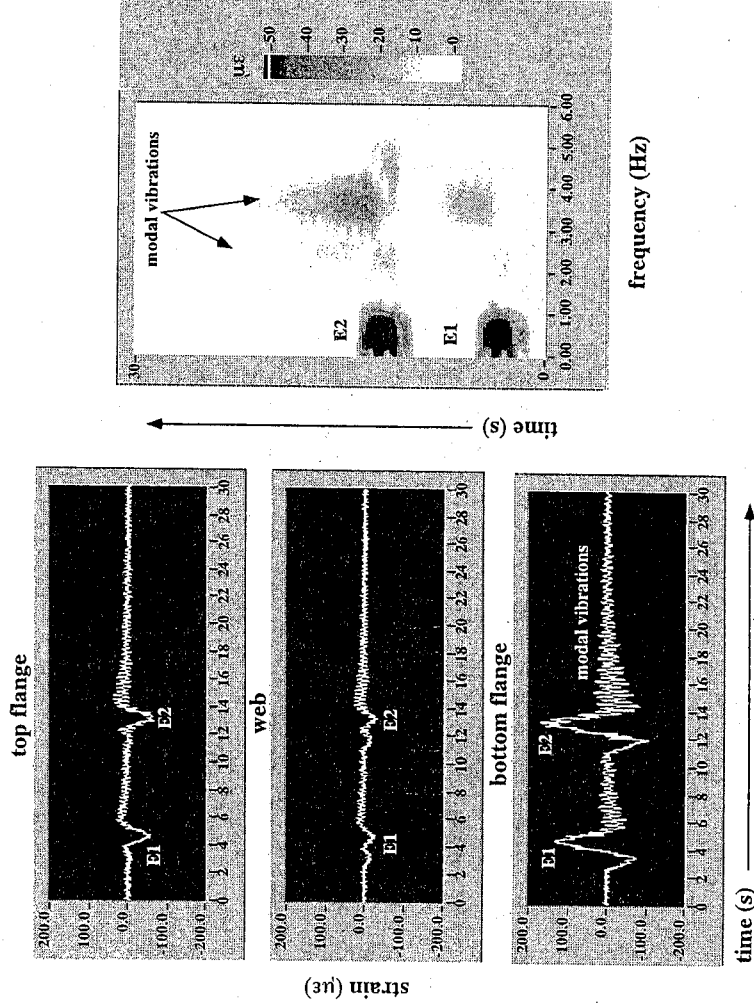


Figure 24 Strain responses at the web and flanges due to traffic at the mid-span location of girder G6

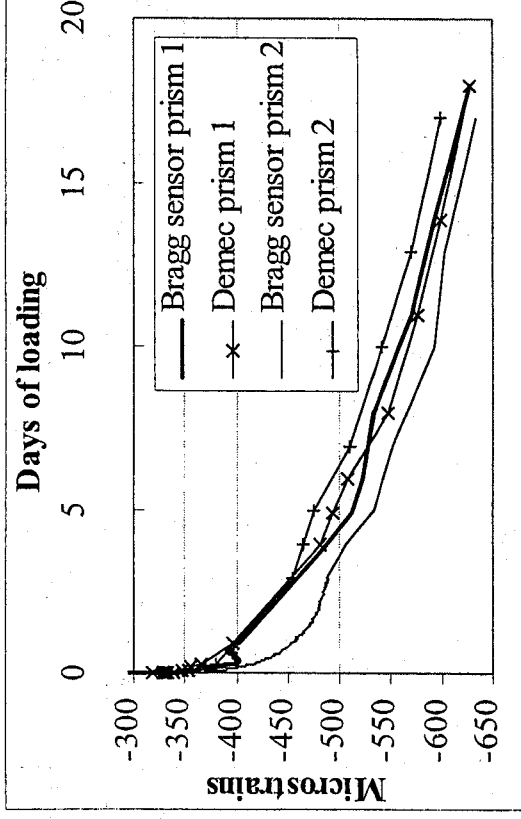


图-25 Creep measurements on prism 1 and 2.

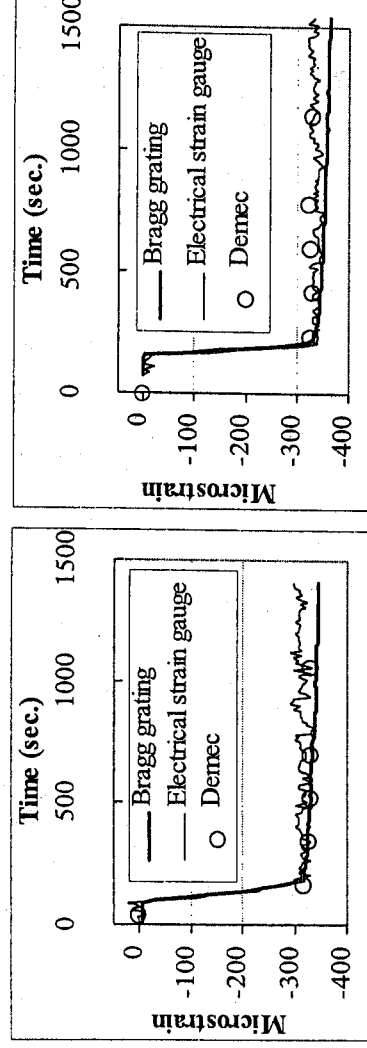


图-26 Measurements immediately after loading of prism 1(left) and prism2(right).

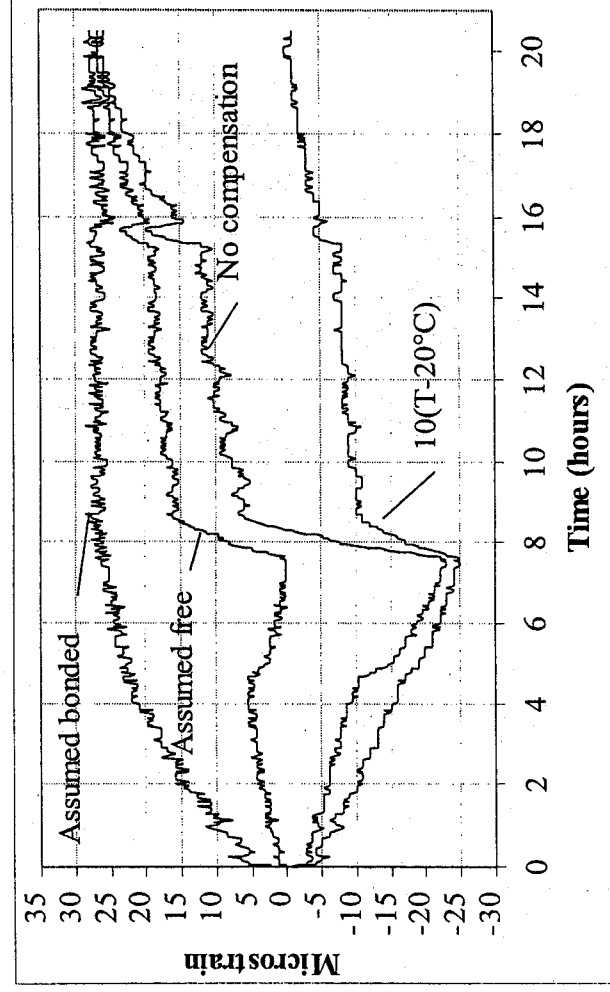


图-27 Bragg grating measurements during curing of the epoxy.

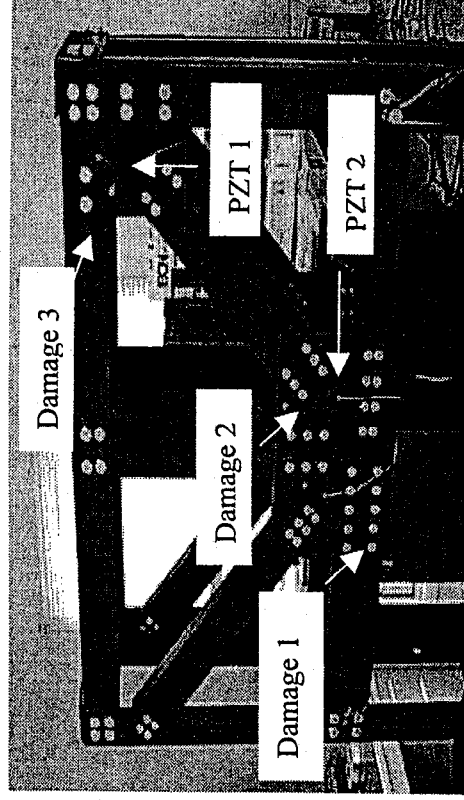


図-28 A 1/4 scale bridge section.

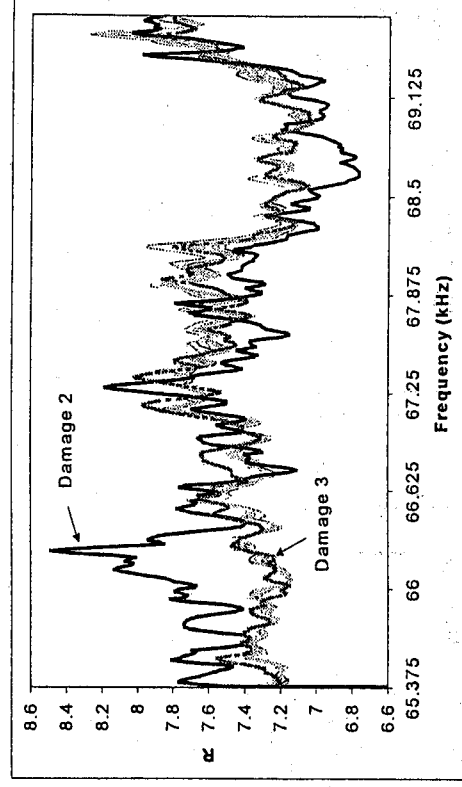


図-29 Impedance vs. Frequency plots for PZT2.

5. まとめ

本稿では光ファイバーセンサーの応用による計測事例を中心に述べた。光通信技術やネットワーク技術、さらには新素材、先端材料技術の応用によって、Structural Health Monitoring (構造健全度モニタリング) の技術は21世紀に花開く、信頼性が確実な分野となりつつある。土木工学の分野においてもこれらに関する研究活動を広範囲に実施して、新しい時代の実践に答えるべきものと考え。これらのいわば新しい分野の技術開発のためには従来の研究分野にとらわれず、光通信やSignal Processing・Network、新素材、複合材料など他の分野の研究との共同研究の組織化は欠かすことができない。社会基盤整備充実に責任のあたる土木工学はこの分野でもInitiativeを取って、広く研究プロジェクトを展開すべきものと考え。

参考文献

- 1) 倉島、佐藤：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、1997. 12、pp. 18-20.

- 2) 共、日向、藤井、佐々木、太田：光ファイバーによる土木構造物の診断—FBGによる歪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、1999. 8、pp. 163-170.
- 3) 猪俣、野引、倉嶋、中井、日下部：OTDRを用いた岩盤変位測定の可能性に関する課題、土木学会北海道支部論文報告集、第54号(A)、1998. 2、pp. 402-405.
- 4) Rahman, M. S., et al. : Diagnosis of Aged Bridge by Using Intelligent Monitoring System, 2nd International Health Monitoring Workshop, pp. 484-494, Stanford University, CA, USA, 1999.
- 5) Rahman, M. S., et al. : Crack Propagation for Fatigue Test and Monitoring by Fiber Optic Sensor, Proceedings of the Hokkaido Chapter of JSCE, No. 55 (A), 1999.
- 6) Udd, E., : Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, Wiley (Interscience) Publication, New York, 1991.
- 7) Measures, R. M., : Structural Sensing with Fiber Optic Systems, Proceedings of 11th Engineering Mechanics Conference, ASCE, New York, pp. 224-227, 1996.
- 8) Masri, S. F., et al. : Optical Fiber Sensors for

- Structural Analysis, Smart Structures and Materials, SPIE's 4th Annual Symposium, 2-6 March, USA, 1997.
- 9) R.O. Claus, et al. : Extrinsic Fabry-Perot Sensor for Strain and Crack Opening Displacement Measurements from -200 to 900°C, Journal of Smart Materials and Structures, 1992
- 10) 大島、三上、山崎：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
- 11) 大島、三上、山崎：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
- 12) Todd, M., et al. : Civil Infrastructure Monitoring with Fiber Bragg Grating Sensor Arrays, Proc. of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, pp.359-368, 1999
- 13) Moerman, W., et al. : Remote Monitoring of Concrete Elements by Means of Bragg Gratings, Proc. of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, pp.369-378, 1999
- 14) Mita, A. : Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technology in Civil and Building Structures, Proc. of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, pp.56-67, 1999
- 15) Foedinger, R., et al. : Structural Health Monitoring and Impact Damage Detection for Filament Wound Composite Pressure Vessels, Proc. of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, pp.159-169, 1999
- 16) Johnson, G.A., et al. : Structural Monitoring of a Composite Hull Air Cushion Catamaran with a Multi-Channel Fiber Bragg Grating Sensor System, Proc. of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, pp.190-198, 1999
- 17) Park, G., et al. : Impedance-Based Health Monitoring Technique for Civil Structures, Proc. of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, pp.523-532, 1999
- (1999. 10. 10 受付)

APPLICATION TECHNOLOGY OF ADVANCED MATERIALS USING FIBER OPTIC SENSOR ETC.

Toshiyuki OSHIMA

New development of structural health monitoring by applying advanced materials like fiber optic sensors (FOS) and others, is explained in this paper. Specially Extrinsic Fabry-Perot Interferometric (EPFI) method and Fiber Bragg Grating (FBG) method are shown in experimental result. Shape Memory Alloy (SMA) sensor and piezo-electric sensor / actuator will be also applied more as an advanced material on structural health monitoring in near future.

道路橋振動の遠隔モニタリング

岡林隆敏

フェロー 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

本文は、①橋梁の維持管理における遠隔計測の必要性、②遠隔モニタリングにおける通信技術、③振動遠隔計測について説明したものである。橋梁維持管理のための振動遠隔モニタリングは、検出部、データ転送部、解析部に分けられる。ここでは、特にインタネットによるデータ転送について詳細に説明した。事例研究として、電話回線を利用した振動モニタリング、無線回線を利用した場合、衛星通信を利用した場合について述べた。

Key Words : bridge vibration, remote measurement, mobile communication, Internet, PHS

1. 橋梁維持管理と遠隔計測技術

橋梁の振動計測は、供用前の新設橋梁と供用中の既設橋梁について行われる場合がある。前者の目的は、設計時に予測した振動特性の確認であり、後者は、橋梁の振動や騒音による環境問題や橋梁の維持管理のために行われる。新設橋梁の振動計測は、所定の振動特性を確認するためであり、実験は短期間であるが、供用中の既設橋梁の振動計測は、振動原因の交通荷重の変動や周辺環境の変動のために、比較的長期間モニタリングされる場合が多い。橋梁の維持管理に関して行われる計測では、ひずみや変位と共に振動が計測される。近年、橋梁の健全度評価を橋梁の経常的なひずみ、変位、振動等のモニタリングにより診断する技術が確立されつつある。

長期的あるいは経常的な橋梁のモニタリング^{1),2),3)}を実現する経済的な側面として、計測機器の経費と人件費の削減が考えられる。これを実現するために、遠隔計測が必要であり、このために①計測の無人化、②自動化、③随時計測を実行できる計測システムを構成する必要がある。

振動の遠隔計測は、①検出器(センサー)、②信号処理、③信号伝送の各部から構成される。検出器は近年、光ファイバーや炭素繊維など^{4),5),6),7),8)}の新しい振動検出法が開発されている。パーソナルコンピュータの飛躍的な機能向上と新しいソフトウェアの開発により、可搬型の高精度な信号処理装置が実現可能になってきた。さらに、インタネットと公衆無線電話の急速な普及により、これまで考えられなかった遠隔の信号転送^{9),10)}が実現した。振動遠隔計測の技術革新は急速な勢いで進展しており、このような技術は数年後には、日常的な環境になるものと思われる。

2. 遠隔計測システムの構成

遠隔計測システムは、①検出器(センサー)、②信号処理、③信号伝送の各部から構成される。現在、それぞれの分野において技術革新が進行している。図-1に遠隔計測の構成と関連技術を示した。ここでは、振動の遠隔計測技術の主要な要素である、信号転送について説明する。

(1)検出器(センサー)

構造物の計測には、ひずみゲージ、変位計、加速度計のような、従来の検出器が用いられる。近年、次世代の知的構造物^{11),12)}(Smart Structure, Intelligent Structure)のために、光ファイバーや炭素繊維を使用したセンサーが開発されている。新しい考え方の検出器は、構造物の維持管理のために構造物の健全度を評価¹³⁾する検出器として実用化が進められている。

(2)信号処理

振動実験の現場では、振動計測から得られた信号から構造物の振動特性(振動数、減衰定数、振動モード)を推定する。近年、モード解析法の理論^{14),15)}により高い精度の振動特性の推定が可能になった。また、パーソナルコンピュータの飛躍的な発達や、A/Dコンバータなどのインタフェイス

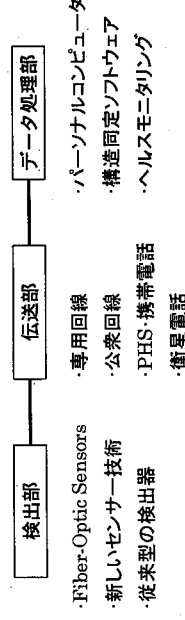


図-1 遠隔計測の構成

ボードの低価格化により、現在では、高精度の可搬型振動特性推定システムが実現されている。

構造物から発生する信号、すなわち、ひずみ、変位、加速度等の高速な測定と、コンピュータによる高精度な特性推定により、近年、構造物の健全度評価が可能になりつつある。

(3) 信号伝送

大規模構造物の専用線によるモニタリングはすでに行われている。さらに、専用の無線による、無人化施工¹⁰⁾も実現している。今後、振動の遠隔計測に重大な影響を及ぼす技術は、公衆電話回線によるデジタル通信と移動体無線通信の爆発的な普及である。従来の専用線あるいは専用無線による計測では、設備投資に膨大な経費がかかり、特殊な長大構造物以外はモニタリングの対象にならなかった。近年の公衆電話回線のデジタル通信と移動体無線通信の普及は、通信施設を独自に準備することなく、回線使用料のみで信号伝送をすることを可能にした。現在、観測データを実時間で十分余裕をもってモニタリングできる環境にはないが、近い将来、高速通信の実現の可能性がある。また、移動体無線通信は、通信可能範囲の制約はあるが、計測現場と観測基地の自由な移動を可能にし、高速道路などの振動計測に飛躍的な技術革新を起すことが考えられる。さらに、インターネットの活用は、公衆回線使用料の劇的な低下を実現する可能性をもっている。

3. 遠隔通信技術

遠隔通信技術として公衆電話回線と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が可能であるために、大量のデータの伝送が可能である。実験の波形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 Network)で、「ネット64」と「ネット1500」を提供している。さらに、携帯電話(Personal Digital Cellular)やPHS(Personal Handyphone System)などの公衆無線通信の発展がある。図-2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

表-1 データ通信の通信速度

モデム		現在	将来
ISDN	INS ネット 64	最大 57.6Kbps	最大 57.6Kbps
	INS ネット 1500	64Kbps	64Kbps
	ATM	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
	イリジウム	—	2.4Kbps
衛星携帯電話	グローバルスター	—	9.6Kbps
	テレデジック	—	最大 2.048Mbps

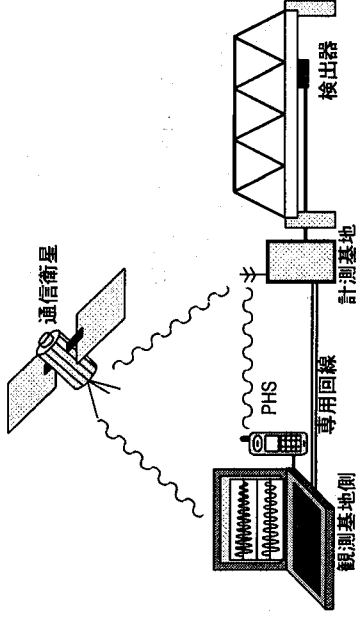


図-2 遠隔計測の構成とデータ転送経路

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る基地の組み合わせにより、固定した電話を利用する場合と、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。検出器側の電話機と、計測基地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、多量のデータを全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、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STD34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。

4. 可搬型振動計測技術とモバイルコンピュータ技術の融合

(1) データ処理と曲線適合

構造物の動的特性の推定は、経験的な工夫に頼っていた振動測定が、モード解析法による同定理論の普及により、高い精度で実現できるようになった。

その後、パーソナルコンピュータが飛躍的に高性能化し、さらに実験に特化した仮想計測器ソフトウェア分野のソフトウェア技術が開発された。そこで、効率的なプログラミングにより、様々な振動特性の推定の手法を実時間処理することが可能になってきた。

著者らの研究は、モード解析法による同定理論の視点から見ると、偏分反復法やプローニの方法などの多自由度法でなく、多自由度系の振動を1自由度系に還元する1自由度法を採用している。

構造同定の手順として、次の2つの主要なデータ処理を行う。

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。バンドパスフィルタの構成には、デジタルフィルタを用いる方法とフーリエ変換による方法を適用した。前者をデジタルフィルタ法、後者をフーリエ変換法と呼ぶ。デジタルフィルタ法では、リアルタイムのデータ処理が可能になる。

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、これらのデータの処理の手順を図-3に示した。

(2) 可搬型振動計測システムのハードウェア

可搬型振動計測システムの構成概要を図-4に、実際の構成システムを図-5の写真に示した。システムは、検出器(加速度計)と増幅器、PCMIA用のカード型のAD・D/Aコンバータおよびノート型パーソナルコンピュータで構成されている。パーソナルコンピュータの中には仮想計測器ソフトウェアが組み込まれている。表-2にシステム構成の仕様を示す。可搬型計測器にするために、ノート型パーソナルコンピュータを採用した。構造同定のためのプログラムを仮想計測器ソフトウェアを用いて作成した。加速度計の増幅器は、可搬型であることを考え、単三電池4本

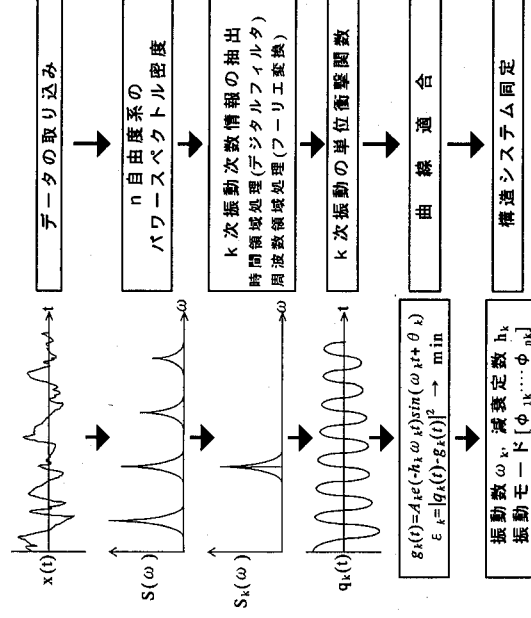


図-3 データ処理手順

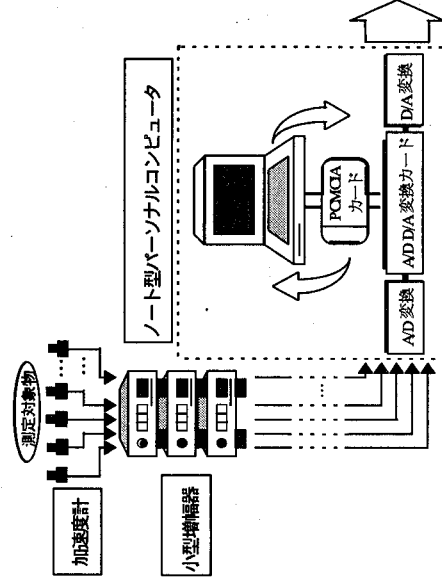


図-4 可搬型振動計測システムの概要

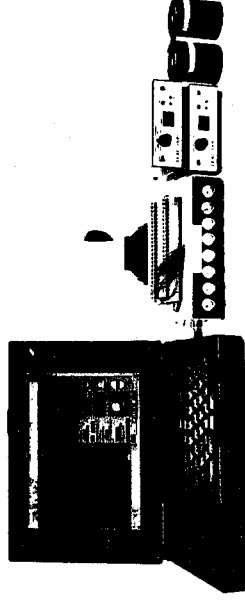


図-5 可搬型振動計測システム

で作動する小型で軽量ものを用いた。加速度計は半導体型のものを用いている。

計測は次のような手法で行われる。対象物に検出器(加速度計等)を取り付け、多チャンネルのアナログ信号を増幅器に取り入れ、パーソナルコンピュータ本体に組み込まれたデータ集録用のカードによりA/D変換する。LabVIEWは、A/D変換された信号を読み取り、データ処理を視覚的にモニターに表示する。この信号はさらに、D/A変換することにより、アナログ信号として出力することも可能である。

A/D変換されたデータは、構造同定のためのプログラムにより処理され、振動特性が推定される。従来の振動計測で用いられた装置が、全て仮想計測器としてソフトウェアで処理される。そのために、計測装置の

表-2 システム構成装置とソフトウェア

	装置とソフトウェア	製品名
パーソナル コンピュータ 関連	パーソナルコンピュータ	Think Pad 345C (IBM 製)
	AD・D/A 変換用カード	DAQ Card-1200 (National Instruments 製)
	仮想計測器ソフトウェア	LabVIEW (National Instruments 製)
検出器	加速度計	Model 710 (TEAC 製)
	加速度計増幅器	SA-610/H (TEAC 製)

アプリケーション業務
(データ処理など)

アプリケーション層	アプリケーションサービスの実現
トランスポート層	相手マシン上のプログラムとデータ交換
ネットワーク層	指定された相手マシンとデータを交換

伝送媒体

図-7 TCP/IP の各層の働き (18)

ストラクチャが研究されており、常時計測を前提とした構造物を開発することが考えられている。このような橋梁の維持管理に関する計測や適応型構造物・スマートストラクチャの実現では、遠隔計測や計測システムの低価格化が重要な技術的課題となっている。

振動遠隔計測の現場では、コンピュータの電源が無くかつ遠隔操作で駆動する環境を考える必要がある。電源には、太陽電池が利用可能になってきた。さらに、遠隔操作には、パーソナルコンピュータの遠隔操作用のソフトウェアや TCP/IP 通信による遠隔操作が可能である。このように、測定データの高度な処理と共に遠隔データ転送が、パーソナルコンピュータにより実現できる環境が整いつつある。

(2) 遠隔計測システムの概要

著者は、すでに橋梁現場での計測から動特性推定までの一連の処理を 1 台のノート型パソコンに集約した、可搬型動特性推定システムを開発している。ここで述べる実時間遠隔モニタリングシステムは、可搬型動特性推定システムをもとに、通信手段として TCP/IP を利用したデータ転送プログラムを追加している。

著者の研究で採用した通信手段である TCP/IP と、それを利用したデータ転送プログラムおよび計測現場における TCP/IP 接続の方法について説明する。

(3) TCP/IP の機能

狭義の TCP/IP はインターネット接続のためのプロトコルの一部である TCP (Transmission Control Protocol) と IP (Internet Protocol) のことであるが、一般的には、それらを含めたインターネット上の通信に必要なプロトコル群であるのことである。これらは、図-7 に示すように、ネットワーク層、トランスポート層、アプリケーション層の 3 階層に分けることができる。

現在、インターネット上で一般的に用いられている WWW や電子メールなどは、アプリケーション層のプロトコルを利用して実現されている。

(4) データ転送プログラムと計測システムへの組み込み
作成したデータ転送プログラムについて説明する。このプログラムは、図-7 のトランスポート層に位置する TCP を利用したサーバー・クライアント型プログラムであり、信頼性の高いデータ転送を実現している。著者らの開発したシステムでは、計測側

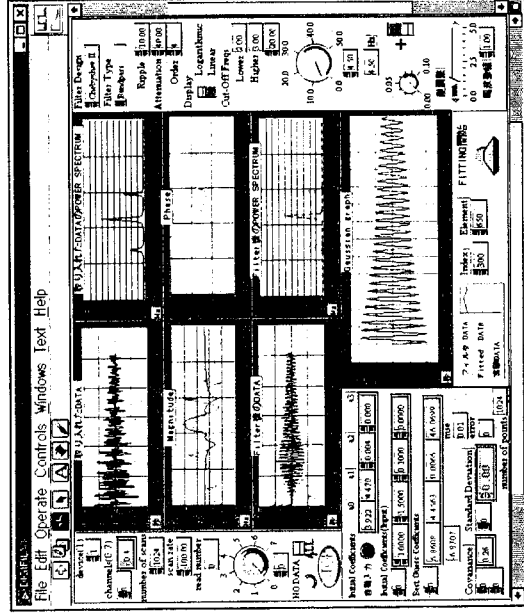


図-6 パネル画面

軽量化、データ処理の高速化および統一した処理が可能になる。

(3) 仮想計測器ソフトウェア

ここでは、仮想計測器ソフトウェアにナショナルインストルメンツ社製の LabVIEW[®]を用いた例を示す。LabVIEW は、2 つの画面ウィンドウから構成されている。一般的に仮想計測器ソフトウェアは、プログラミングを行うプログラムウィンドウとデータ集録および解析処理を視覚的に表示できるパネルウィンドウを持っている。パネルウィンドウの具体的な事例を図-6 に示したが、画面上にダイヤルやスイッチが配置されている。これらのものを、実際の計測器を操作するかのよう、マウスで仮想的に動かし、コンピュータ画面をインターフェースにして、仮想的な計測器を操作する構成となっている。

5. 実時間遠隔計測システム

(1) モバイル計測技術

今後、橋梁に関わる計測技術は、情報化施行による施工時の計測、完成時の静的・動的性能確認試験、維持管理のための経常的な計測など、計測機材の低価格化と計測業務の低価格化が進めば、各種の計測が日常的に行われるようになることが予想される。また、将来の構造物として適応型構造物、スマート

がサーバーになり、モニタ側がクライアントとなる。可搬型動特性推定システムの開発に使用した仮想計測器ソフトウェア LabVIEW には、ネットワークプロトコルである TCP/IP を利用して、データ通信を行うためのプログラム群が用意されている。これらを利用して、データ転送プログラムを作成し、可搬型動特性推定システムに組み込むことで、遠隔計測システムを開発した。

図-8 にデータ通信におけるサーバーとクライアントのデータ処理の流れを示す。サーバーで計測されたデータは、TCP 接続に書き込む。ここで、計測した二次元配列に記憶されているデータを効率よく送信するために、サーバー側で、一次元配列に変換し、データサイズとともに送信する。

クライアントでは、送信された一次元データとデータサイズを読み込み、二次元配列データに復元して、図-9 に示すようにモニタ上に時系列波形とパワースペクトルを表示し、ハードディスクに計測データを保存する。表示された波形を確認した後、クライアントから計測終了要求をサーバーに送ることで、計測が終了する。

図-10 に開発した遠隔計測システムのサーバーを示している。本システムは、電池駆動の加速度計および増幅器と最大 8 チャンネルの A/D 変換が可能な PCMCIA カード型の計測ボード、通信を行うための通信カードを内蔵したノート型パソコンで構成される。

サンプリング周波数 100Hz で計測を行う場合、必要なデータ転送速度は、約 25kbps となる。サーバー・クライアント間のネットワーク上のボトルネックが、それ以上の転送速度を持っていれば、ほぼ実時間での遠隔計測が可能となる。

(5) TCP/IP 接続の方法

本文においては、サーバー・クライアント間が有線接続、すなわち、電話回線で常時接続された遠隔地における構造物の振動データを転送する場合と、無線でデータ転送する場合について実験を行った。

a) 有線接続システムの構成

有線接続システムでは可搬型動特性推定システムに LAN カードを搭載したものをサーバーとし、インターネットワークに接続されたパーソナルコンピュータをクライアントとしている。

b) 無線接続システムの構成

無線接続システムでは、現在最も高速なデータ転送速度が期待できる PHS を使用し、PHS 用データ通信カードを組み込んだモバイルコンピュータをサーバーとした。クライアントは、有線接続システムと同様に、インターネットワークにアクセスできるパーソナルコンピュータを用いた。

計測現場に設置するサーバーとモニター側のクライアントとの間でデータ通信を行うために、インターネットワークサービスプロバイダに対して、ダイヤルアップ PPP 接続を行う。インターネットワークサービスプロバイダを利用することで、計測現場とモニタする側との距離が離れていても通信コストを抑えること

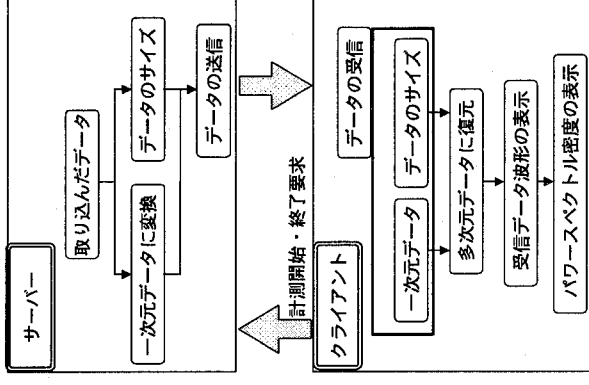


図-8 データ転送プログラムの流れ

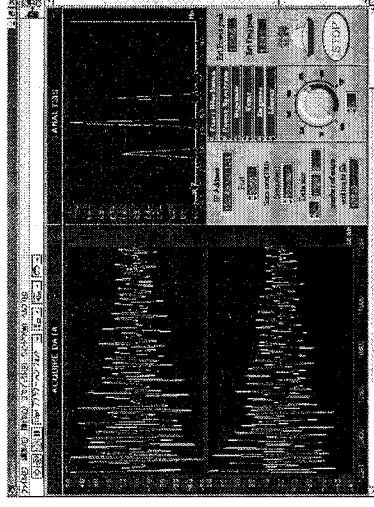


図-9 パネル画面

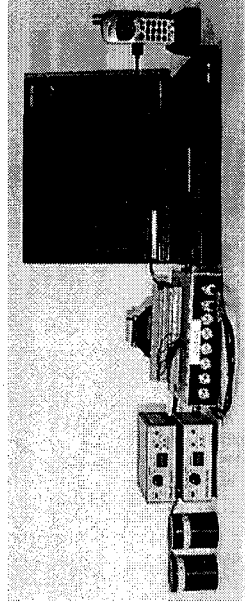


図-10 遠隔計測システム

ができる。

c) 接続における問題点

TCP/IP によるサーバー・クライアント型のアプリケーションにおいては、クライアントを接続する場合にサーバーの IP アドレスを特定する必要がある。

インターネットに常時接続されている環境では、ネットワーク内に設置されるコンピュータの IP アドレスは固定されているが、ダイヤルアップによる接続では、通常、接続時に IP アドレスが動的に割り当てられる。そのため、計測現場に設置したサーバーからダイヤルアップ接続した後でなければ、サーバーの IP アドレスが特定できず、接続後に何らかの方法でクライアントに通知する必要がある。

現段階では、ハードウェア上の制約から、サーバーから手動でダイヤルアップ接続を行う必要がある

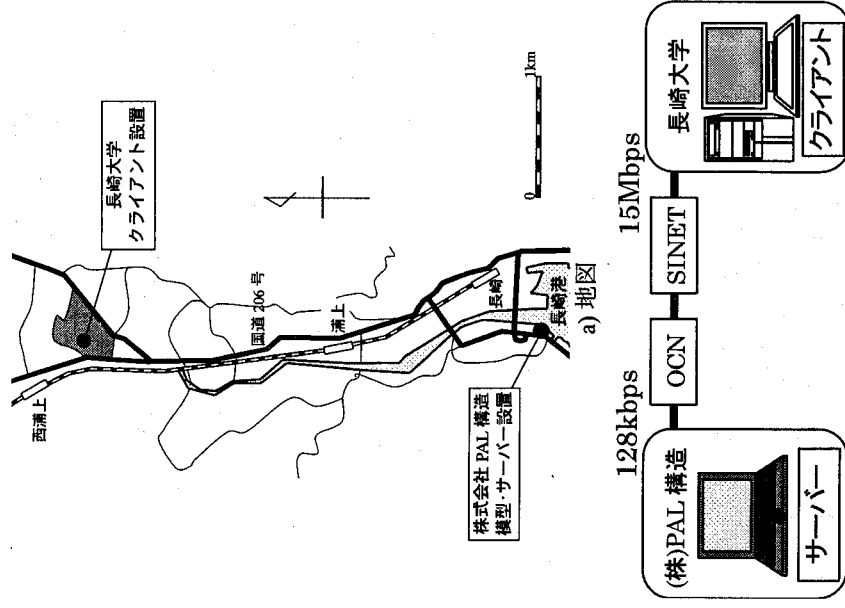


図-11 サーバー・クライアントの位置

るため、完全に無人化することはできないが、将来的には、必要に応じて自動的にダイヤルアップし、完全無人計測できるようになる。その場合においても、この IP アドレスの動的割り当てに関する問題が発生すると考えられる。

6. 事例1 インターネットを利用した有線実時間遠隔計測

(1) 有線システムでのネットワーク構成

遠隔計測システムの有効性を確認するために、長崎大学内のネットワーク NUnet と外部のネットワークとの間で計測実験を行った。

本実験において、クライアントは長崎大学の学内 LAN に接続し、サーバー（計測）側として、株式会社 PAL 構造に協力して頂き、社屋の一室を借用して模型構造物および有線実時間遠隔計測システムのサーバーを設置した。図-11 にこの実験におけるサーバー・クライアント間のネットワークの経路を示す。株式会社 PAL 構造では、OCN エコノミーで ISDN 回線を利用した常時接続サービスでインターネット接続されており、伝送速度は 128kbps である。地理的にはサーバー・クライアント間は 4km ほどの距離であるが、ネットワーク的には、OCN、学術情報センター・民間 ISP ゲートウェイ、学術情報ネットワーク SINET を経由している。

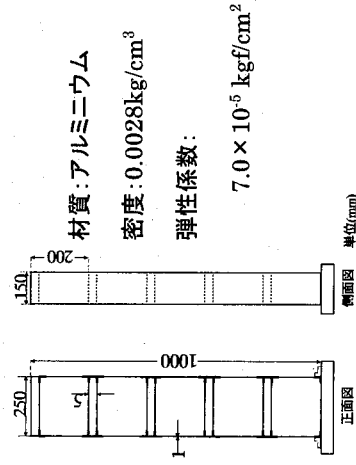


図-12 5層ラーメン模型

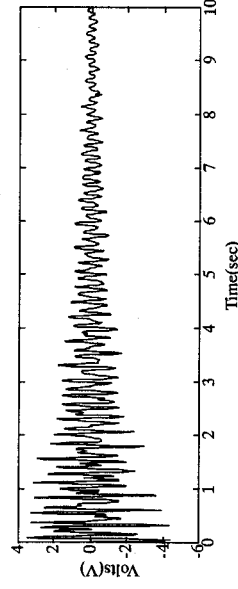


図-13 計測波形

表-3 動特性推定結果

次数	固有振動数 (Hz)	解析値		推定値	
		サーバー側データ	クライアント側データ	サーバー側データ	クライアント側データ
1	2.2214	2.2730	0.0092	2.2730	0.0092
2	6.3966	6.8255	0.0091	6.8255	0.0091
3	9.9871	10.9087	0.0104	10.9087	0.0104
4	12.8047	14.2716	0.0101	14.2716	0.0101
5	14.6424	16.3687	0.0081	16.3687	0.0081

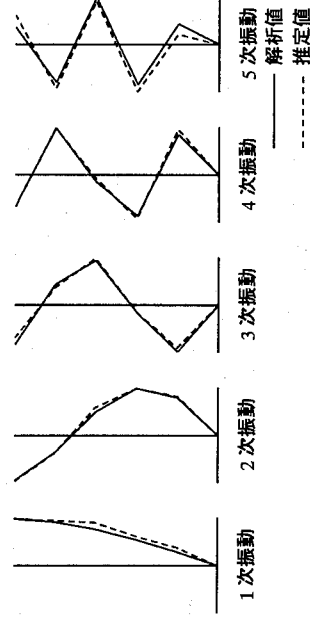


図-14 振動モードの推定結果

(2) 模型構造物による有線システム実験

図-12 に示すような 5 層ラーメン模型構造物の各層に加速度計を設置し、1 層目に衝撃加振を加え、衝撃加振試験を行った。遠隔計測システムを用いて、サーバーの計測結果とネットワーク経由でクライアントに送信された計測データの両方を保存し、その両者を用いて動特性の推定を行った。なお、サンプリング周波数は 100Hz とし、1024 点 (10.24 秒) のデータを 1 度に転送することとし、計測時間を 40.96 秒以上となるようにした。

図-13 に 2 層目の加速度のクライアント側での受信波形を示す。計測は約 40 秒間行っているが、本実験で使用した模型では、加速度の減衰が大きいため 10 秒間の結果のみ表示している。この波形から、衝撃加振による振動特性推定プログラムを使用して得られた

2 徑間連續鋼斜張橋

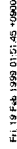
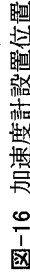
4.600 m

図-15 ブラウザに表示されたパネル画面

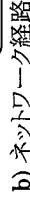
(3) HTTPとe-mailを利用した遠隔計測システム

計測結果の一例を図-15 に示した。ブラウザ上に計測時のパネル画面が表示され、あらかじめ設定された時間毎にその画面が更新される。そのため、計測状況をクライアント側からリアルタイムで視覚的に把握することができる。また、計測したデータは e-mail によって、指定したアドレスに送信することができ、

PHS による無線実時間遠隔計測システムを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-4 にその諸元を示している。実験は、図-16 に示すように、加速度計を 6 ヶ所に設置し、常時微動の計測を行った。サンプリング周波数は 100Hz とし、計測時間が 90 秒



a) 地区



以上となるようにした。

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 アドレスをクライアント側に通知した。

-29-

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。

(3)計測結果

図-18 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、固有振動数成分が卓越する。これをフィルタ処理して、各固有振動数成分の自己相関関数を抽出し、図-19 に示すように、曲線適合⁹⁾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-5 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-20 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。

8. 事例3 陸陸間通信構造物振動遠隔監視システム

三菱重工(株)長崎研究所振動研究室では、陸陸間通信機能を搭載した、振動監視システムを運用している。

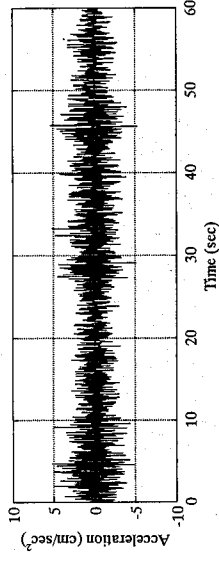
1)発電所発電プラント軸振動監視システム

発電所発電プラント軸振動監視システムを完成させ、長崎と現地で軸振動のデータ転送を実現させている。このシステムは、アナログ電話回線に接続し、長崎から現地システムを完全にリモート操作できるシステムである。通信回線の選択にあったっては、現地常設ではなく、テンポラリーな軸振動計測を主目的とすることから、プラント設置場所の通信手段を利用する場合が多いと予想されるため、アナログ電話回線を利用するシステムとしている。

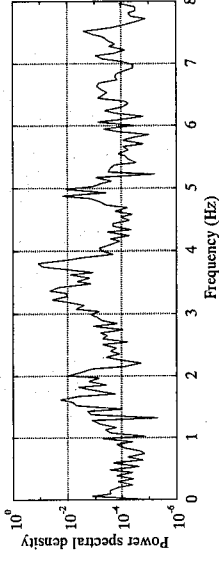
2)風力発電プラント監視システム

風力発電プラントの自動計測システムを実用化している。この計測システムの目的は、風車の基本特性(発電機出力、風速、風向、ピッチ角等)に加えて、翼の応力を測定し、翼の構造強度を把握することである。

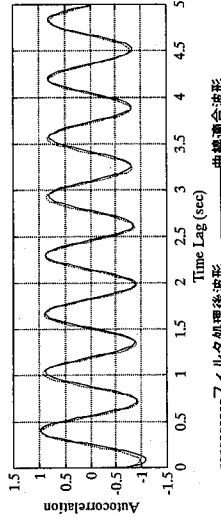
ハードウェアの構成は、次のようになっている。信頼性能計測PC、性能計測用PC、振動計測用トリガ発生PC、振動データ収録PC、騒音データ収録PC、サーバーPC、通信用PC、電源用コントローラシステムである。全てのPCはイーサネットにより



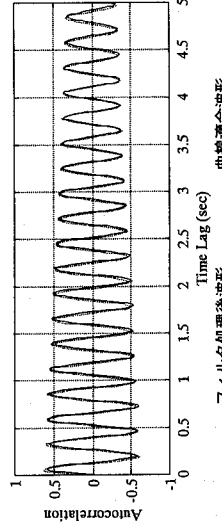
a) 常時微動波形



b) 常時微動波形のパワースペクトル密度
図-18 計測結果 (右側径間 1/8 地点)



a) 1次振動



b) 2次振動

図-19 自己相関関数と曲線適合結果

表-5 動特性推定結果

次数	解析値		サーバー側		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	固有振動数 (Hz)	減衰定数
1	1.340	0.0045	1.6570	0.0045	1.6570	0.0045
2	3.148	0.0049	3.7236	0.0049	3.7236	0.0049
3	4.253	0.0043	4.9517	0.0043	4.9517	0.0043

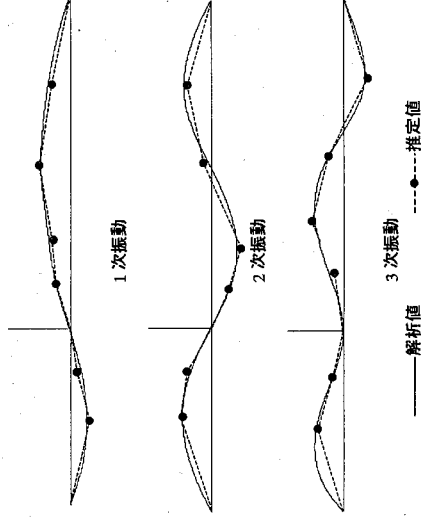


図-20 モード推定結果

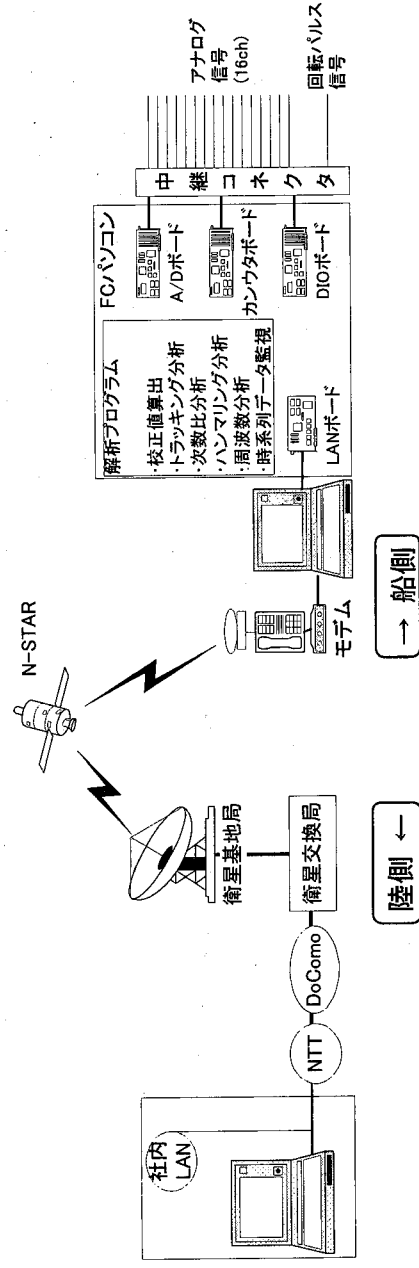


図-21 船体振動解析システムの構成

LAN接続されており、ISDN回線を通じて現地と長崎がリモート接続されている。このシステムは、長崎から現地のプラントを完全にリモート操作可能である。

9. 事例4 衛星通信による船体振動解析システム

三菱重工横浜研究所振動研究室では、衛星通信による船体振動解析システムを運用している。この衛星通信による船体振動解析システムの目的は、海上運転のみならず就航中も含めた様々な運転・運行コンディションに対抗した長期計測データ及び振動トラブリング中の計測データをリアルタイムに取得し、振動現象をタイムリーに把握することにある。さらに、振動現象の傾向を詳細に把握し、的確かつ迅速な防振対策を実施する必要がある。そのためには、計測技術の効率化・省力化と高度化を行い、データの信頼性を損なうことなく、少ないコストで解析・対策に必要なアウトプットを得ることが必要である。

このために次のような実施事項を考えたシステムを構成した。現有・従来システム機能および現状の通信サービスの調査を実施し、船体振動計測に適したハード構成、および大容量データ転送通信を考慮した通信サービスを選定した。図-21に船体振動解析システムの構成を示す。

①高性能パソコン可搬型船舶用振動解析システムによる自動計測

ベースシステムである船舶用振動解析システムを実船に適用

②衛星通信機能搭載システムによる実船試用

陸間での動作要素試験にてデータ転送、遠隔操作機能等を確認し、船・陸間での実船試用

③システムの適用正・実用性の評価

船体振動計測における省力化・効率化実現の可能性を確認

このシステム構成の成果として、次の点が確認できた。

①海上試運転中の快速データ転送

海上試運転中におけるコンテナ船の振動データおよび画像データの基地局への転送

②遠隔制御

基地局からの遠隔操作による振動計測が可能になった

③振動現象のタイムリーな把握

海上運転のみならず、就航中も含めた様々な運転・運行コンディションに対応した長期計測データ及び振動トラブリング時の計測データをリアルタイムに取得し、振動現象をタイムリーに把握することが可能となった。

④計測技術の効率化・省力化と高度化

データの信頼性を損なうことなく、少ないコストで、船体振動解明に必要なアウトプットを得る見出しを得た。

今後の課題として、次のようなことが考えられる。

①地球規模システムへの拡張

海外の通信システム環境（通信費とインフラ）の整備にあわせ、200海里以上に就航する船舶とデータ通信が可能なシステムへと機能強化を図り、振動計測データ解析の高度化・省力化・迅速化を可能にする。

②トラブリング発生スピーディーな対応を実践

本システムの活用により、基地局において船上の詳細な状況をリアルタイムに把握し、トラブリング発生時のスピーディーな対応を可能にする。

10. まとめ

本文では、橋梁維持管理のための橋梁振動遠隔モニタリングで必要な、要素技術について説明し、遠隔計測システムの事例を紹介した。

戦後建設した膨大な土木構造物の維持管理が、次の世紀の重要な課題になる。さらに、少子化傾向に連動して、技術者の数が減少する。このような制約条件の中で、橋梁をはじめとする土木構造物の維持管理には、モニタリングの省力化と高度な情報化が要求されるであろう。

近年のパーソナルコンピュータ技術の発展とデジタル通信の飛躍的な技術革新は、計測、通信、解析を融合させた新しい広域遠隔モニタリング技術を実現させつつある。計測・通信・解析が複合した技術

が、次世代の構造物の維持管理を実現可能にするものと考えられる。さらに、衛星通信が普及すれば、地球規模でのモニタリングが実現される。今後10年以内に、橋梁の無人遠隔モニタリングが実現し、橋梁振動計測が大きく変化するものと考えられる。

参考文献

- 1) 安部允, 杉箇政雄, 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.
- 2) 寺尾圭史, 松本好雄: 橋梁モニタリングシステムの開発, 横河ブリッジグループ技報, No.27, pp.186-188, 1998.1.
- 3) 総合的な橋梁リエンジニアリング橋梁(鋼橋)の健全度診断調査, JCCA, No.201, pp.48-51, 1998.10.
- 4) 越出慎一: 光ファイバ・センサとその知的構造への応用, 非破壊検査, 第3号, pp.152-156, 1994.4
- 5) R. M. Measures: Monitoring composite Structures, Transportation Research Broad Convention, pp1-4, 1993.1.
- 6) S. Vurpillot, D. Inaudi and J.M. Ducret: Bridge monitoring by fiber optic deformation sensors: design, emplacement and results, SPIE, Vol.2719, pp.141-149, 1996.
- 7) 技術フラッシュ: 光ファイバで変位を測定, 日経コンストラクション, 1999, 10-22
- 8) 技術フラッシュ: 光ファイバ利用の非破壊検査, 日経コン

- ストラクシジョン, 1999, 8-13
- 9) 山内雪路: モバイルコンピュータのデータ通信, 東京電機大学出版会, 1998.3.
- 10) MC & MD研究会編: モバイルコンピュータイング・日刊工業新聞, 1998.8.

- 11) 藤田隆史: スマート構造の建築・土木構造物への応用, 日本機学会誌, Vol.2, No.963, pp.23-26, 1999.2.
- 12) L. K. Matthwewsd: Smart System for Bridges, Structures and Highways, Smart Structures and Materials, SPIE, Vol.2719, 1996.
- 13) 山本鎮男: ヘルズモニタリング, 共立出版, 1999.8.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) テレアースワークシステム(遠隔土工システム)の開発「雲仙復興工事への適用」, フジタ技術研究所報, 第31号, pp.73-78, 1995.
- 17) LabVIEWユーザマニュアル, National Instruments, 1998.7.
- 18) 若林宏: 図解標準TCP/IPハンドブック, 秀和システム, 1999.1.
(1999.10.10 受付)

REMOTE MONITORING OF BRIDGE VIBRATION

Takatoshi OKABAYASHI

In this paper, we discuss: 1) the necessity of remote measurement for the management control of bridges, 2) the communication technology by remote monitoring, 3) example of remote vibration measurement. The remote vibration monitoring system, used for bridge management, is divided by three parts with measurement, transmission and analysis. Particularly, the data transmission using the Internet is studied in detail. The examples of vibration monitoring by using the phone line, PHS and satellite phone are explained.

建築における制御構造の概要と事例紹介

北村春幸¹・鳥井信吾²

¹ 日建設計 東京本社構造設計室長 工博

(〒112-8565 東京都文京区後楽 2-1-2)

² 日建設計 東京本社構造設計主管

(〒112-8565 東京都文京区後楽 2-1-2)

建築物が地震に対抗する手段として、古くから耐震構造の設計が行われてきた。一方、建築物の振動応答を制御して応答量を低減しようとする試みがなされ、この種の構造は免震・制振構造と呼ばれている。制振構造が対象とする外乱は地震動に限らず、風その他の振動全般を対象としている。本論はこれら建築における免震・制振構造について最新の知見を交えながら、その歴史、分類手法、実例を設計コンセプトと共に述べたものである。

Key words : *structural control system, base isolation structure, performance based design, earthquake, wind load*

1. はじめに

21 世紀に向けたキーワードとして、個の自律、高度情報化などと共に顧客満足度 (Customer Satisfaction) が上がっている。医療の世界では、インフォームド・コンセント (informed consent) が要求され、患者に疾病に関する充分な情報を与え、患者と対話しながら治療内容と方法を決めていく手法が求められている。顧客は自分で考え、判断し、自ら責任を負っていくことを求めており、技術内容が高度化・専門化した時代の専門家 (profession) には、顧客と対話するためのシステムの透明性・公開性 (アカウンタビリティ: Accountability) を高めることが求められている。

もう一つの動きとして、国際化・市場開放の問題がある。これまでの閉鎖的な業界内の常識や慣習が、日本流の高い性能・品質を確保してきたが、これらの情報化社会を迎えて建設業界の企業体質が大きな転換期を迎えており、海外企業に加えて国際化した国内の建築主にも、従来の手法だけでは対応できなくなってしまう。

これらの流れの中で、建築物の設計も性能指向型への変換が求められ、1998 年 6 月には建築基準法が性能規定型へと改正され 2000 年 6 月に施行される。性能規定型に改正されたと言えども、建築基準法は

人命を損なうような損傷を建築物に生じさせないことを最低限の性能として規定するものである。従って、構造設計者のめざす性能設計においては、建築主の要求を対話を通して的確に把握する方法や、様々な性能レベルを具体的な設計内容に変換する技術や、設計した性能を確実に作り込むための監理手法に加えて、性能を保持するための維持管理に関する助言や協力までを対象とする必要がある。

耐震設計は、これまで最低限の耐震安全性である建築基準法で規定された人命の保護を目標として発展してきた。地震時の建築物に生じる加速度や変位を低減し、機能性や居住性を確保する場合や、建築物の安全性を格別向上させる必要がある場合は、免震・制振構造の採用を検討する。

免震・制振構造は、従来の耐震設計では困難であった性能設計を可能にする新しい構造形式である。また、免震・制振を用いた構造設計においては、性能設計の手順に従って、建築主や使用者が建築物に求める要求性能、構造設計者が建築主の合意のもとに設定する目標性能、性能が作り込まれていることの検証方法を明らかにすることがよりいっそう重要になる。

本論では建築分野での免震・制振構造について、最新の情報をとりいれつつその歴史、分類、適用例について概要を紹介する。

2. 免震・制振構造の歴史

(1) 工学における応答制御法の比較

はじめに建築における免震・制振構造を応答制御の観点から他の構造物等と比較することを試みる。ここでは、橋梁、建築物、船舶・海洋構造物、航空機・宇宙構造物、鉄道車両、自動車の分野を対象として、表 2.1 に振動制御の比較をまとめて示す。

表より、対象とするものによって、動的外乱、応答量は異なり、応答制御の方式は様々であり、各分野で、より高度な制御法が追求されていることがよくわかる。いずれの分野でも、1970 年代以降に研究が本格化し、1980 年代から実用化が本格化しているが、建築の分野ではアイデア段階と実用化段階に比較的時間を要していることが特徴的であろう。これは、建築構造物という規模の問題、構造性能が不特定多数の人命に関与する問題、また建築は似たものこそあれ、それぞれが別の条件をもつ特注品であるという用途の性格によるためであると考えられる。しかしながら近年、動的外乱を受ける構造物の動的応答を抑制するために応答制御の考え方が建築構造物の設計にとりわけ積極的に採り入れられるようになった。この背景には次のような要因があるといえる。

- ・ 動的外乱の観測・計測技術の発展
- ・ 構造解析技術の進歩
- ・ 制御機構の開発
- ・ 地震被害の教訓

(2) 免震構造の歴史

免震とは、地盤と構造体との間に何らかの工夫をして縁を切ろうとする工法で、地震動による入力エネルギーが構造物に入力しないことを理想とする構造であり、古くから考え方やアイデアとして提案されていた。我が国において免震構造が、現在のように構造設計の手段の一つとして考えられるようになったのは、耐震設計における動的解析法の確立、積層ゴムアイソレータの開発を背景にして、多田英之・山口昭一により八千代台免震住宅(1982 年)が建設されたことに始まると言ってよい。約 10 年間で約 80 棟の実施例であった免震建物が、1994 年のノースリッジ地震において免震病院が被害も受けず地震後も病院としての機能を維持できたことや、1995 年の阪神淡路大震災における免震建築が被害も受けず地震後も建築物としての機能を維持できたことから、その後の 4 年間で 600 棟を超える免震建物が建設さ

れ、耐震性能設計の切り札として定着したと言える。

今日の免震構造は、高い鉛直支持能力と水平方向に柔らかく大きな変形能力を持つゴムシートと鋼板をサンドウィッチ状に重ね合わせた積層ゴムと、大きなエネルギー吸収能力を持つダンパーで構成される。大地震時においても構造骨組が損傷を受けることがないことに加え、床加速度や層間変位などの地震応答が $1/3-1/5$ に小さくなる特性を示す。

(3) 制振構造の歴史

制振構造の誕生には超高層建物の耐震設計技術の発展が関与する。即ち、建物がより高層化し、建築物のアスペクト比が大きくなるに従って、耐震安全性を構造骨組で確保したとしても、強風時の風揺れに対する居住性を確保することが困難になり、これに対する技術として制振構造が生まれてきたといえる。

機械分野での制振技術は、古くから防振・除振装置として、共振現象を利用して機械の振動を付加量の振動に移すことで機械振動を小さくする動吸振器(ダイナミックダンパー)、振動エネルギーを吸収するオイルダンパー・粘弾性ダンパーなどのダンパーや、機械と基礎の間に柔らかいゴムやばねを挟んで振動を絶縁する防振材が用いられてきた。建築分野では、制振構造の設計にとって不可欠な動的解析手法が、コンピュータ、大型振動台、アクチュエータを制御する動の実験などの周辺技術の進歩に伴い、超高層ビルなどの設計技術として確立するのを待たなければならなかった。

動吸振器の原理を適用した制振装置(Semi-Active Mass Damper)が 1970 年代の後半にはニューヨークのシティーコープセンター(Citicorp Center, New York, 63 階建: 1978 年設置, 頂部: $373\text{ton} \times 1$ 台)とボストンのジョンハンコックセンター(John Hancock Tower, Boston, 60 階建: 1977 年設置, 頂部: $273\text{ton} \times 2$ 台)に、建物形状に由来する風ゆれによる不快感を解消する目的で設置された。また、シドニータワー(Sydney Tower, Sydney, 250m: 1981 年設置, 頂部: $180\text{ton} \times 1$ 台, 中間部: $40\text{ton} \times 1$ 台)では、1 次周期と 2 次周期の風ゆれを減少させるための振り子式の TMD (Tuned Mass Damper) を 2 箇所に取り付けている。

我が国では、台風に加えて強大な地震力に対応可能な、十分な性能を持つ制振装置の開発が必要であった。1986 年に我が国で初めて高さ 125m の千葉ポートタワーに TMD (Tuned Mass Damper) が設置された。頂部まで菱形の同一平面を採用し、全体をハーフミラーガラスで覆った軽量でスレンダーな形状の千葉

表2. 1 各分野における振動制御の比較

対称構造環境生産形態	動的	的	外	常時	非常時	乱	応	振動モード	振動数	答	要	求	性	能	制	免	制	防	方	式	歴	研	実			
橋梁	自然外乱	地震、風	地震、風	○	○	○	○	溜動振、フラッター	0.05Hz～50Hz	○(交通)	○(地震、風)	○	溜動振	水平たわみ、鉛直たわみ、振れ	0.05Hz～10Hz	低周波振動、騒音	○	○	○(防音壁)	○(防音壁)	○(防音壁)	1980～(フクチ空力)	1990～(フクチ空力)	1940～(パンプ空力)	1985～(TMD)	1990～(フクチ空力)
船舶	風、波浪	風、波浪	○(荒天、波浪、衝撃)	○	○(突風)	○	○	溜動振(マストなど)	0.1Hz～数kHz	○(突風)	○(突風)	○	溜動振	梁理論～高次振動モード	0.5Hz～数kHz	騒音	○(強度、疲労)	○(スライディング)	○(振動許容限界)	○(乗り心地)	姿勢制御、高度制御	軽量化、省エネルギー	1980～(免震)	1980～(免震)	1980～(免震)	1985～フクチ空力制御
航空機	突風荷重	操縦荷重、着陸荷重、滑走荷重、エンジン騒音、振動	○(突風)	○	○(突風)	○	○	剛体運動モード	0.5Hz～50Hz	騒音	○(材料疲労)	○(飛行安定性)	○(操縦性)	○(乗り心地)	姿勢制御、高度制御	姿勢制御/輪荷重制御	高速度化	○(フロッタ制御)	車内、車外騒音低減	○(客室防音)	軽量化、省エネルギー	1950～フロッタ制御	1970～フロッタ制御	1987～突風荷重低減	1985～振子車両	
鉄道車両	突風、すれ違い外乱、横風	路面、トンネル内外、橋梁	○(路面外乱)	○	○(路面外乱)	○	○	上下、横振れ、ヨーイング、構造振動モード	0.5Hz～25Hz	騒音	○	○	○(乗り心地)	姿勢制御、高度制御	姿勢制御/輪荷重制御	高速度化	○(フロッタ制御)	車内、車外騒音低減	○(客室防音)	軽量化、省エネルギー	1980～パンプ空力制御	1970～フクチ空力制御	1989～フクチ空力制御	1985～振子車両		
自動車	波浪、風、潮流	路面外乱、制動慣性力	○(路面外乱)	○	○(荒天時の波)	○	○	剛体6自由度、たわみ	0.01Hz以上	騒音	○	○	○(乗り心地)	姿勢制御、高度制御	姿勢制御/輪荷重制御	高速度化	○(形状設計)	車内、車外騒音低減	Dynamic Positioning System	低燃費、軽量化、低価格	1950～フロッタ制御	1960～DPs、動揺補償	1980～パンプ空力制御	1985～DPs、動揺補償		
宇宙構造物	微小(1/1000Nm)な環境外乱(重力、空力、磁力)	軌道周期程度	○(通常の波)	○	○(荒天時の波)	○	○	ローリング、ピッチング、ヨーイング	0.1Hz以上	無定位の不安定系	○	○	○	角度、角速度	高精度化	○(形状設計)	○	○	○	○	○	○	○	1970～スピン衛星		

ポートタワーは、建物重量の約1%に当たると比較的小さい重量の制振装置で、地震や台風に対して建物のゆれを $1/3 \sim 1/2$ に低減することができた。本タワーでは1987年8月より藤田隆史東京大学教授を委員長とする「地震・風観測研究委員会」を組織し、観測記録や制振効果を公表してきた。これを契機に、各地に建設された展望タワーには、制振装置が設置されるようになり、実施例として福岡タワー(1989年)、秋田タワー(1994年)がある。

1990年代の前半までには、40棟を超える建物に、質量効果機構(TMD, TLD)やアクティブ制御機構(AMD, HMD, Sem-AMD)が設置され、強風に対する応答制御技術が実用化した。

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、摩擦ダンパーや鋼材・金属が塑性化する際のエネルギー吸収能力を利用した履歴減衰型ダンパーと、オイルダンパーや粘性・粘弾性体に変形する際のエネルギー吸収能力を利用した粘性減衰型ダンパーがある。これを建物に取りつけ、風や地震による建物の振動エネルギーを吸収し、建物に加わる力や変形を減少させるのがエネルギー吸収機構で、超高層ビルでは各階に分散して多数取り付けることが多い。

1970年代には風ゆれを低減する目的で、ニューヨークのワールドトレードセンター(World Trade Center, New York, 110階建)に約1万個の粘弾性ダンパー(Visco Elastic Material)が取り付けられた。1980年代後半に我が国で、地震を対象に摩擦ダンパーを超高層ビルに使用した例が、大宮ソニックシティ(1988年)、吾妻橋アサヒビルタワー(1989年)である。

1994年のノースリッジ地震、1995年の兵庫県南部地震において、地震後の再利用に際して、骨組のなかで塑性化した部材の調査や継続使用が可能か否かの確認に多大な労力が必要なが分かり、大きな問題となった。このような状況に対して、従来から耐震設計で行われてきた、地震入力エネルギーの吸収を目的とした耐震壁などの耐震部材を積極的に組み込み、柱・梁等の建物自重を支持する部材の損傷を可能な限り低減させる設計が、地震後の再利用を考える上でも有効であることが再認識された。

この解決策の一つとして、耐震部材として地震入力エネルギーを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弾性範囲内に留める耐震設計法が提唱され、実際の建物に適用され始めた。これらの特殊部材としてエネルギー吸収機構が利用され、新しい耐震工法

して広く適用され始めた。

3. 免震・制振構造の分類

(1) 動的外乱を受ける構造物の分類

振動外乱を受けた際に、建築物に投入される総エネルギーが、どのように配分されるか、どこでエネルギー吸収が行われるのかの視点にたって免震制振構造を分類し、表3.1に示す。

同表では動的外乱を受ける構造物として、大きく耐震構造・応答制御機構に分け、後者を免震構造・制振構造に分け、さらに制振構造をエネルギー吸収機構、質量効果機構、アクティブ制御機構の3種類に分類して位置づけている。なお、耐震構造については、それがエネルギー的視点によれば免震・制振構造と同一の尺度で評価でき、分類が可能となるということのみ述べることにとどめ、以降詳細は省略する。

これら動的外乱を受ける構造物を大きくパッシブ制振構造とアクティブ制振構造と大きく2つに分類する方法がある。この分類は表3.1の質量効果機構とアクティブ制御機構の間で上下に分けることができ、現在の免震・制振構造においてはパッシブ制振機構が主流をなしているといえよう。パッシブ制振構造は地震動などの振動外乱により構造物に入力したエネルギーを、共振現象や剛性・降伏耐力・減衰力の違いなどから生まれる物理現象を利用して、制振要素にエネルギー集中させることにより構造物の振動低減を計るものである。一方、アクティブ制振構造の基本的な考え方は、センサーにより地震動または構造物の振動を計測し、構造物の応答量が最小となるように種々のメカニズムを介して人工的なエネルギーを投入し、構造物の応答を制御しようとするものである。

また、実際に建築物に採用される場合は2種類以上の制振装置を併用する場合が多く、例えば積層ゴムアイソレータ+鉛ダンパー>、<TMD+粘性ダンパー>などが代表的なものといえる。このような場合に、表3.1では免震構造の積層ゴムアイソレータに蓄えられる弾性歪エネルギー、TMDの付加質量の運動エネルギーというように、エネルギー種別に着目して主として負担する要素により、細かく分類を施している。

表 3.1 動的外乱を受ける構造物の分類

構造形式	機構	種 別	部材・装置・システム
耐震構造		弾性歪エネルギー抵抗型	弾性設計
応答制御構造 または 制振構造 (広義)		塑性履歴エネルギー吸収型	弾塑性設計
動的 外 乱 を 受 け る 構 造 物	免震構造	積層ゴム支承	天然ゴム系積層ゴム+ダンパー
			高減衰ゴム系積層ゴム
			鉛プラグ入り積層ゴム
			テフロン支承
		滑り・転がり支承	ローラー支承+ダンパー
			転動コロ支承+ダンパー
		ソフトストリー	可撓柱+ダンパー
			二重管杭
		履歴減衰型	鋼製弾塑性ダンパー
			極軟鋼制振振部材
	エネルギー 吸収機構 (ダンパー)	摩擦減衰型	鉛ダンパー
			摩擦ダンパー
			オイルダンパー
		粘性減衰型	シリコン系粘性ダンパー
			アクリル系粘弾性ダンパー
パッシブ制御 ↕ アクティブ制御	質量効果機構		高減衰ゴム系ダンパー
			TMD
			TLD
			HMD
			AMD
	アクティブ 制御機構	可変剛性・減衰機構	可変減衰
			可変剛性
			アクティブ制御絶縁
			アクチュエータ+積層ゴム

(2) 免振・制振の機構による分類

それぞれの構造・機構毎にエネルギー収支の観点からと
らえた特徴を述べる。

図 3.1 には上記で分類された免震構造(a)と機構
で分類された制振構造(b~d)の概念図を示し、それ

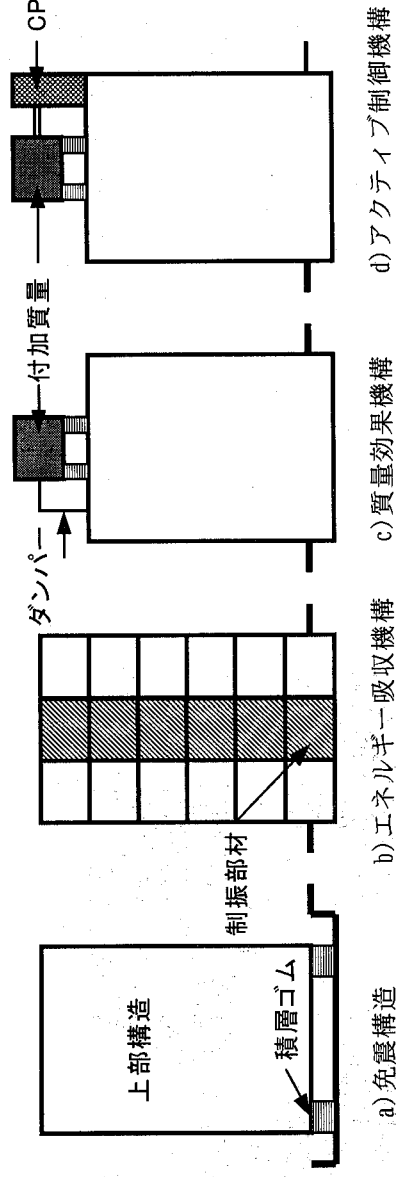


図 3.1 免震・制振構造の概念図

a) 免震構造

免震構造は、地震動を対象とし、地盤と構造物の間に何らかの工夫をして縁を切ろうとする工法(Base Isolation, Seismic Isolation)であり、地震動の入力エネルギーが構造物に入力しないことを理想とする構造である。

地盤と構造物を絶縁するための方法として、水平方向に構造物を柔らかいバネで移動させる、あるいは構造物を滑らせる方法が採用されている。一般的には、水平方向に大きな変形能力と柔らかいバネの性状を示すとともに、大きな鉛直支持能力を持つ、ゴムと鋼板をサンドイッチ状に交互に積層させた積層ゴムアイソレータを利用している。柔らかいバネと大変形能力を持つアイソレータの効果は、構造物を長周期化して加速度応答を低減すると共に、地震動の入力エネルギーを弾性歪エネルギーとして一時的に大量に蓄えることができることにある。アイソレータの一時蓄えたエネルギーを消費するためにダンパーが併設される。ダンパーは地震入力エネルギーを塑性履歴減衰エネルギーないし、熱エネルギーとして吸収し、免震層の水平変形を抑制し、応答せん断力を低減させる効果を持つ。

b) エネルギー吸収機構

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。

c) 質量効果機構

振動外乱により構造物に入る入力エネルギーを、共振現象を利用して内部に付加した振動系の振動エネルギーに変換すると、構造物自体が受持つエネルギーが減少し、構造物の応答量は減少する。振動エネルギーに変換するためには、付加質量が振動することが必要であることから、質量効果機構と呼ぶ。

質量効果機構の能力は、いかに多くの入力エネルギーを振動エネルギーに変換できるかにより、建物

質量に対する付加質量の比率が大きいほど減衰効果が大きくなり、付加質量の振動振幅に余裕があるほど、大きな入力まで効果を発揮することができる。

付加質量の振動エネルギーは、一時的にエネルギーを蓄えておくだけであり、エネルギーを消費するためにダンパーが取り付けられている。付加質量の振動エネルギーの構造物への逆流を抑制することや、付加質量の過度の振動振幅を制御することもダンパーの役割になる。

d) アクティブ制御機構

アクティブ制御機構の基本的な考え方は、センサーにより地震動または構造物の振動を計測し、応答量が最小となるように種々のメカニズムを制御してやろうというものである。この機構は、他のものが構造物の応答に応じて反応するパッシブな機構であるのに対し、油圧(油圧アクチュエータ)や電力(ACサーボモーター)など他の力を利用して積極的に構造物の応答を制御しようとするアクティブな機構である。

アクティブ制御機構として、最も一般的なのは、アクティブマスダンパー(AMD)と呼ばれるもので、構造物への入力エネルギーをより多く、振動エネルギーとして吸収できるように付加質量の振動をアクチュエータで制御するものである。AMDの制振効果は、構造物の質量に対する付加質量の比率が大きいほど、また大きな振動振幅で付加質量を制御できるほど効果が大きくなる。AMDには、付加質量の支持機構が復元力を持たないかまたは建物周期に比べて十分に長い周期で支持したものと(狭義のAMD)、支持機構の周期を積極的に建物周期に一致するようにしたもの(HMD)があり、最近の実施例では、アクチュエータのエネルギー効率から後者を採用するものが多い。

その他にアクティブ制御機構としては、地震動の持っている周波数特性性を利用して、建物のせん断剛性や減衰力を制御することで応答を減らそうとする可変剛性・減衰機構、アイソレータで地面と絶縁した構造物を空中に設けた仮想の不動点との相対変位が小さくなるように、アクチュエータを用いて地面と建物の相対変形を制御するアクティブ制御絶縁法などがある。

4. 免震構造の実例

(1) 免震部材の概要

免震構造が備えている機構は、次のように分ける

ことができる。

- ①鉛直荷重を支持する機構
- ②水平方向の復元力を与える機構
- ③変形を抑制する減衰機構

①と②の機構を備えている部材をアイソレータ、③の機構を備えている部材をダンパーと呼ぶ。

図 4. 1 に免震構造の構成部材を示す。図中の数字は免震部材が備えている機構を示す。

以下に、現在免震構造に採用されているアイソレータとダンパーについて分類し、その特徴をのべる。

(図 4. 2 参照)

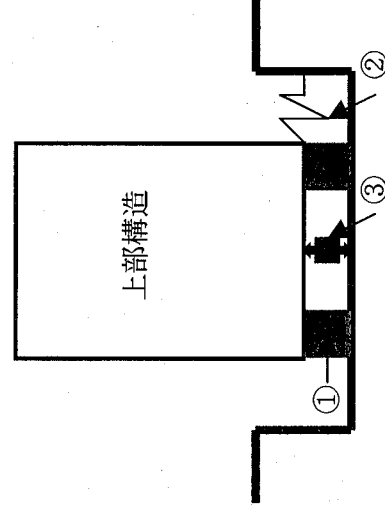


図 4. 1 免震機構の概念図

a) アイソレータの種類

我が国において主に用いられているアイソレータには、図 4. 3 に示すようなものとして、天然ゴムを積層してゴムと鋼板を加硫接着した天然ゴムアイソレータ、鉛プラグを中央に持つ積層ゴムによる鉛

入りゴムアイソレータ、高減衰ゴムを使用して減衰性を高めた高減衰ゴムアイソレータの 3 種類が存在する。

いずれのアイソレータも、円形断面を用いている。アイソレータの直径は、180～1600mm と小さいものから大きいものまで幅広く用いられているが、直径 700～1000φ のものが多用されている。長期最大面圧 (鉛直荷重/ゴム面積) は、30～150kg/cm² とこれら数値的には大きく変動しているが、面圧を大きくとっているものはアイソレータの 2 次形状係数 (直径/ゴム総厚) を 5 程度以上に大きくとり、ずんぐりしたプロポーションを採用している。最近の傾向として、長期面圧を 70～100kg/cm² のものと 120～150 kg/cm² のものに 2 分されてきた。

b) ダンパーの種類

我が国において用いられているダンパーは、大きくは履歴減衰型、摩擦減衰型と粘性減衰型に分けられる。履歴減衰型は、履歴エネルギーにより減衰効果をもたらすもので、一般的には金属材料の塑性履歴減衰エネルギーを利用してエネルギー吸収を行なうものである。粘性ダンパーは、速度比例型の減衰力を与えるものである。通常は、シリコンオイルなどの粘性体を使用する。速度比例の減衰力は、構造系としては魅力有るものであるが、実際には減衰力の温度依存性や維持管理の必要性などが問題となる。ダンパーのなかでは、図 4. 4 に示す鋼製ダンパーと鉛入り積層ゴムを含む鉛ダンパーがほとんどを占めている。

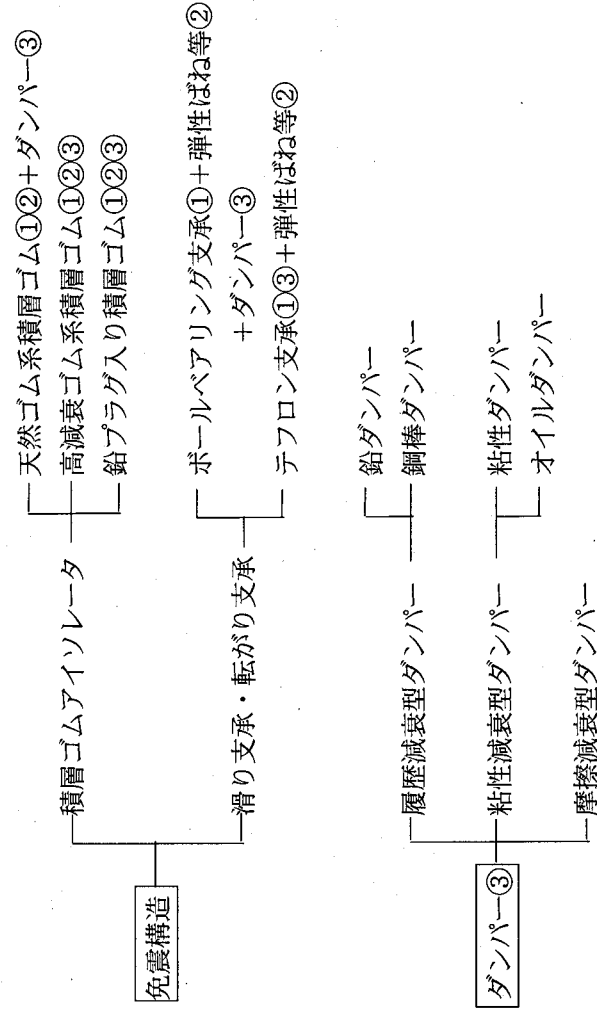
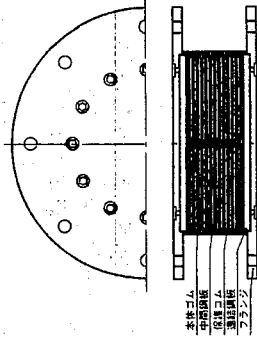


図 4. 2 免震部材の種類



・天然ゴムアイソレータ

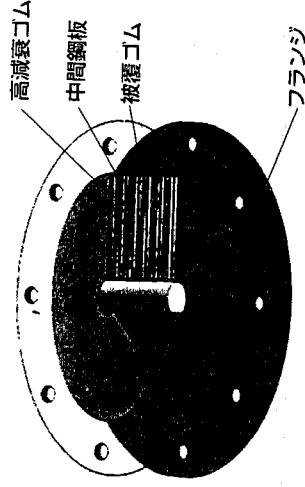
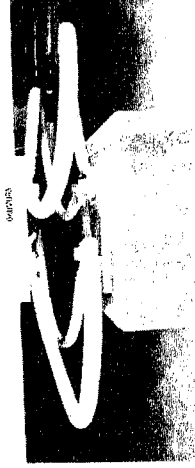
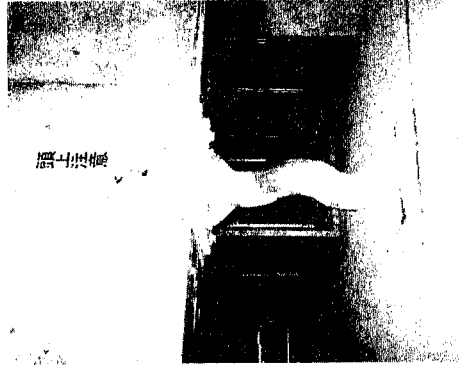


図 4.3 積層ゴムアイソレータ

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/mm²級、240 N/mm²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効力が期待できるが、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、微小振動変位率が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合わせる必要がある。経年的に経年劣化の心配が少なく、信頼性の高い制振部材である。

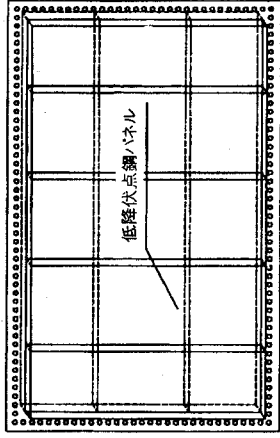


4.4 ☒ダンパー

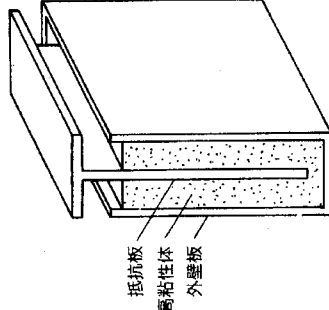
繰り返により粘弾性体や粘性体の温度が上昇し、減衰力が減少するので、熱容量の大きな鋼板等を用いるなどの熱環境に対する工夫が必要となる。オイルダンパーにおけるオイル交換のように経年劣化に対する点検が必要となるものがある。

以下に、各制振部材ごとにその概要を示す。
(図5.1参照)

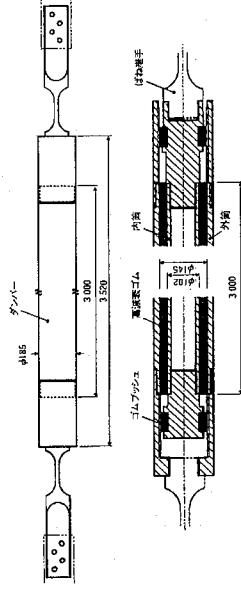
(1)リブ補剛鋼製制振壁は、エネルギー吸収機構として、一般構造用鋼材 SS400 などに比べて、降伏点強度を $1/2 \sim 1/3$ 程度に低く押さえた低降伏点鋼の塑性履歴エネルギー吸収能力を利用した鋼鈑壁(極軟鋼制振壁)である。低降伏点鋼 (100N/mm^2 級)や極低降伏点鋼 (235 N/mm^2 級)の降伏点の低さを利用して、構造骨組に先行して制振壁を降伏させ、建物の地震応答を制御する履歴減衰型ダンパーとして利用するものである。



・極軟鋼制振壁の例



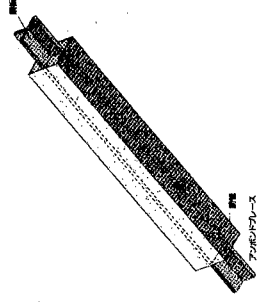
・シリコン系粘性流体制振壁の例



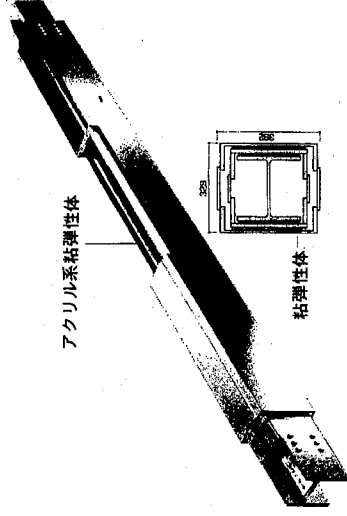
・高減衰ゴム系制振ダンパーの例

(2)座屈拘束軟鋼製ブレースは、外側を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言う。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、構造骨組の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、降伏点が高く伸び特性に優れた低降伏点鋼 (100N/mm^2 級)、極低降伏点鋼 (235 N/mm^2 級)が用いられる。

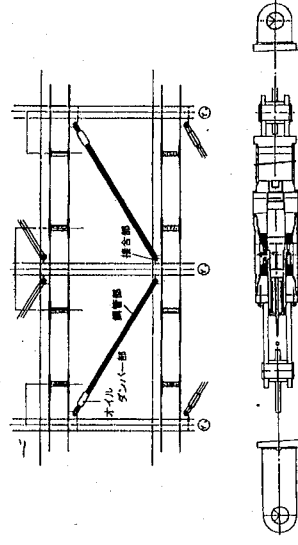
(3)シリコン系粘性流体制振壁は、地震時に相対変位を生じる2つの部分間に高粘性流体を置き、相対変形により生じる粘性体のせん断粘性抵抗により振動を減衰させるものである。高い減衰作用を持つものが、比較的コンパクトに製作できるので、特性が温度、振動速度などの影響を受けるので、特性値の設定に注意を払う必要がある。



・座屈拘束軟鋼製ブレースの例



・アクリル系粘性ダンパーの例



・オイルダンパーの例

図 5.1 制振部材の概念図

(4)アクリル系粘弾性ダンパーの代表的なものとして、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、せん断歪を生じさせることで減衰効果を生ずる。

(5)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ドラ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もち、材料の高い接着強度によりせん断歪で 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。

(6)オイルダンパーは粘性ダンパーの一種で、シリンドラ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. 質量効果機構の実例

質量効果機構としては、TMD (Tuned Mass Damper: バネマス式)、TLD (Tuned Liquid Damper: スロッシング式) が用いられている。これらの装置は、全て建物の 1 次固有周期に対する振動の減衰効果を期待するものである。

(1) TMD

代表例として、千葉ポートタワーに設置したローラーベアリング・コイルバネ式支持機構の TMD を図 6.1、図 6.2 に示す。図 6.3 にはタワーの全景と断面図を示す。ローラーベアリング・コイルバネ式は、水平方向のバネ力により復元力を得るもので、スペースは比較的小さいコンパクトに納まる。重量の比較的小さい TMD については大きな振幅と周期調

整の容易さから、この機構が採用されることが多い。この方式は、付加重力の水平方向の運動に対し、運動面の摩擦抵抗を低減する工夫が必要である。

a) 質量比と最大ストローク

TMD の応答低減効果は、質量比と最大ストローク (可動寸法) によって決まる。建物周期が長く外乱が大きいほど付加質量の振動振幅が大きくなり、応答を低減させるためには大きな可動振幅が必要になる。

図 6.4 に $(M_D/M_S) \cdot T$ と δ_d/T の関係を示す。ここで、 M_D/M_S は地上部の建物総質量 (M_S) に対する付加質量 (M_D) の比率を表し、 δ_d は付加質量の最大ストロークを、 T は建物の 1 次固有周期を表す。図中の実線は、質量比と最大ストロークの積 $(M_D/M_S) \cdot \delta_d$ が 0.1 から 1.0 の値になるときの関係を示している。 $(M_D/M_S) \cdot \delta_d$ は、付加質量が蓄積可能な運動エネルギーに比例する量である。風と地震の両方の応答低減効果を期待した TMD の $(M_D/M_S) \cdot \delta_d$ 値は、風用に設置された TMD のものに比べ、2～4 倍大きい 0.5cm 以上の値を持っている。一方、風に対する応答低減効果を期待して設置された TMD の $(M_D/M_S) \cdot \delta_d$ 値は、0.2cm 以下の小さな値になっている。地上部の建物総質量に対する付加質量の比率は、コストパフォーマンス・装置の作り易さ等から、1% 程度のものである。

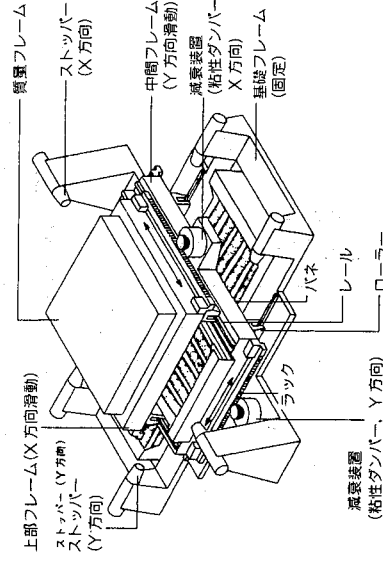


図 6.1 TMD の機構



図 6.2 TMD の外観

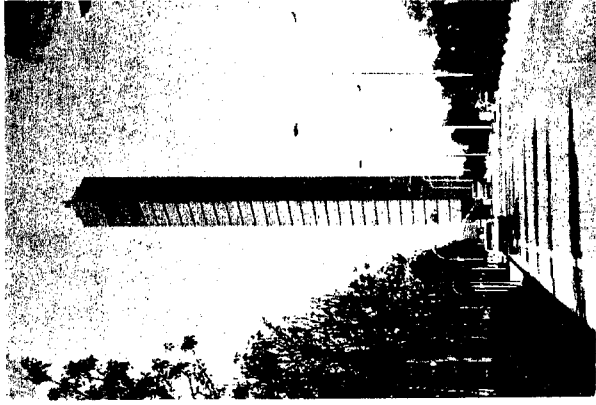


図 6.3 千葉ポートタワーの全景

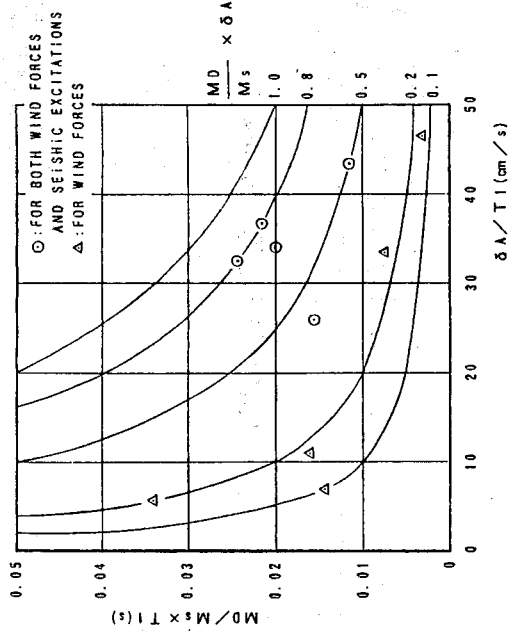


図 6.4 付加質量と最大ストロークの比較

b) 応答低減効果

TMD の応答低減効果の 1 例として千葉ポートタワーにおける風観測記録を用いた検証結果を示す。千葉ポートタワーでは、1987 年 8 月に地震・風観測を開始し、1988 年 1 月に風応答のような比較的小さい応答にも制振効果を発揮するように TMD を調整し直した。ここでは、調整前の最大風応答を記録した台風 8719 号とその後の強風記録との比較から TMD の制振効果を推定する。風向が台風 8719 号の記録とほぼ同じであった 1988.2.5 の季節風を調整後の記録として採用する。

図 6.5 に、○印で示した台風 8719 号と△印で示した 1988.2.5 の季節風の際のタワー頂部の加速度記録の R.M.S 値 (root-mean-square value) を比較して

示す。これらの値は 10 分間隔で評価されたものを用いている。図 6.5 より、風速 20m/s の時の加速度値を例にとると、調整後の強風時の応答の方が X 方向で約 40%、Y 方向で約 50% 小さくなっている。Y 方向の方が制振効果が大きいのは、Y 方向の TMD 重量が X 方向より 1.5 倍重いことによるものと考えられる。

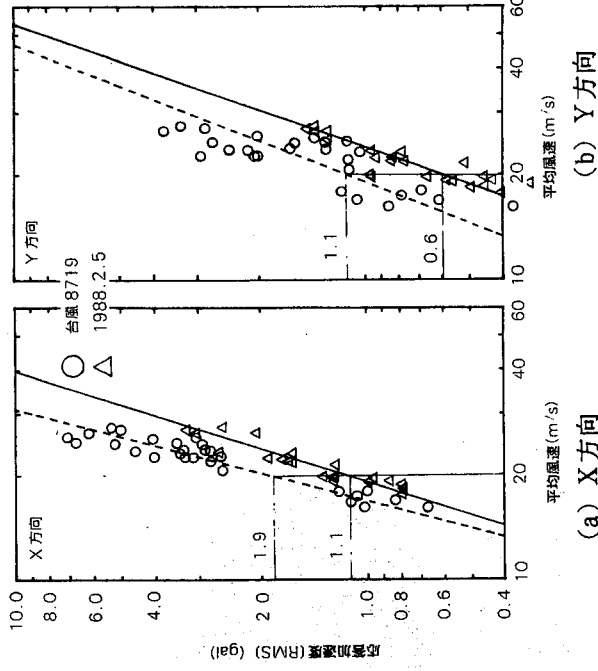


図 6.5 強風時の応答加速度の比較

(2) TLD

TLD 機構のタイプとしては、浅い水槽のスロッシングを利用したもの、深い水槽のスロッシングを利用したもの、ウォーターピストンにより共振周期を調整したものがある。水槽の形状としては、浅い水槽のものは全て円筒形状をしており、深い水槽のものは直方体、ウォーターピストンを利用したものは U 字形のタンクを使用している。

TLD は水の揺動 (sloshing) を利用したもので液体を質量とし、重力を復元力とするもので、液体のスロッシング周期を建物の一次周期を一致させている。このダンパーは、複雑な機構を必要とせず経済性にすぐれているが、理論解析にのり難いという欠点がある。TMD と同様に入力が大きくなるに従って、液体の運動エネルギーに対して何等かのエネルギー吸収を行なう必要がある、その方法により、浅い水槽と深い水槽の 2 通りの例がある。

浅い水槽を用いた質量効果機構の減衰は、主として水槽内の波が砕波することで減衰をとろうとしたものである。比較的小さな振幅から制振効果を発揮するが、非常に大きな振幅の場合は若干制振効果が低減する。浅い水槽の場合は、水槽内の波が砕波す

るため非線形振波を扱う流体解析が必要となり、解析により効果を検証することが困難になる。

深い水槽では水中にネットを張り、ネットを通してする時に生じる液体の粘性抵抗により減衰エネルギーを吸収している。深い水槽では、液体重量の7～8割程度が付加質量として揺動し、浅い水槽に比べて有効な質量では若干少なくなるが、線形振波を扱う流体解析で解析できるため、効果の検証が解析に載り易い。

a) 質量比

TLD の応答低減効果は、建物有効質量に対するTLDの有効質量の比率である質量比が制振効果を左右する。建物周期が長く外乱が大きいほど、大きな直径と深い水槽が必要となり、大きな応答低減を期待するには、より多くの水量が必要になる。TLDの有効質量比は、質量が大きいほど制振効果も大きくなるが、コストパフォーマンス・装置の作り易さ等から、建物の1次有効質量に対して1%程度のものが多い。

b) 応答低減効果

全ての建物においてTLDを設置した目的は、強風時の風応答の低減にある。これらのTLDを設置した建物では、平均風速 20m/s の強風に対して、構造体の応答が1/2～1/3程度に低減している。

7. アクティブ制御機構の実例

アクティブ制御機構は振動しようとする構造物に対して、付加的なエネルギーを加えて、能動的にその振動を抑えようとする機構である。AMD はAMD (Active Mass Damper) と HMD (Hybrid Mass Damper) に分類される。AMD は完璧な応答制御を目的とし、AMD の支持機構は復元力が無いか、建物に比べて十分に長い固有周期としている。一方、HMD はTMDの応答低減効果を積極的に利用するもので、付加質量の支持機構は建物の1次固有周期と同じ固有周期に設定している。

HMDの例を図 7.1 に示す。このHMDを設置した日本長期信用銀行本店ビル全景を図 7.2 に示す。HMDは建物の屋上階に設置され、制御のための振動センサーは屋上階、中層階、1階に置かれている。

a) 支持機構

AMDの支持機構としては、振り子式、多段振り子式、多段積層ゴム、中空積層ゴム、リニアベアリング、V字型ローラーベアリング等があるが、当該例

は振り子式が採用されている。なお、多段振り子式は、振り子式支持機構のなかで固有周期を長くするために開発されたものである。

b) 質量比と最大ストローク

図 7.3 に $(M_b/M_s) \cdot T$ と δ_d/T の関係を示す。AMD の $(M_b/M_s) \cdot \delta_d$ の値は、0.5cm 以下と TMD のほぼ半分以下の小さな値になっている。これは TMD に比べて AMD が高い応答制御効率を持っているためである。

c) アクチュエータ

使用されているアクチュエータの種類は、油圧アクチュエータ、AC サーボモーター・ボールネジとなっている。地震用の AMD のアクチュエータと風用のアクチュエータは、最大ストローク長さにより区別することはできない。しかしながら建物の規模が大きくなるに従って、最大ストロークが長くなり、付加質量比が小さくなる傾向が見られる。また、付加質量が増加するに従って、一般的により大きな制御力が使われている。付加質量に対する制御力の比率は、地震に対しても制御可能な AMD ではだいたい15～25%の範囲にあり、風に対するAMDでは10%以下の比率になっている。

d) 応答低減効果

AMD およびHMDを建物に設置する目的として、風力と地震力の両方に対して構造体の応答低減を期待するものと、風力のみに対して構造体の応答低減を期待するものが実在している。例えば強風に対して、これらの建物の応答は1/2～1/3程度に低減している。また建物の等価減衰定数は、AMD およびHMDを設置することで3.7～20%に増加している。

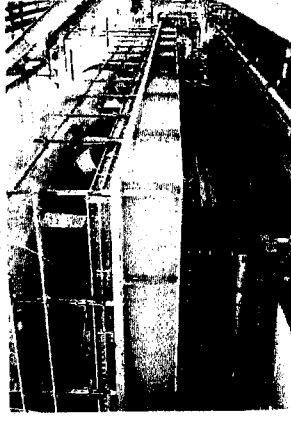
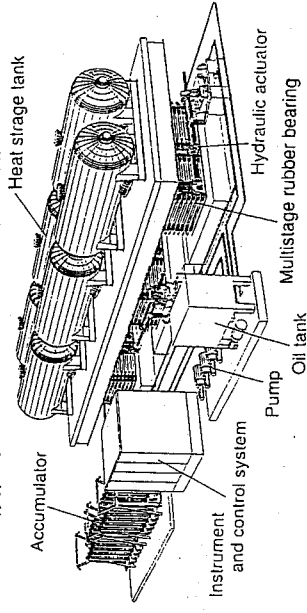


図 7.1 AMD の機構

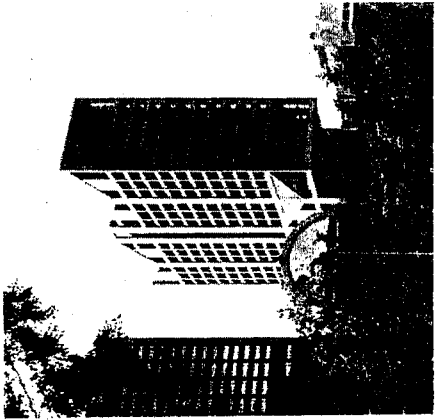


図 7.2 日本長期信用銀行本店ビル

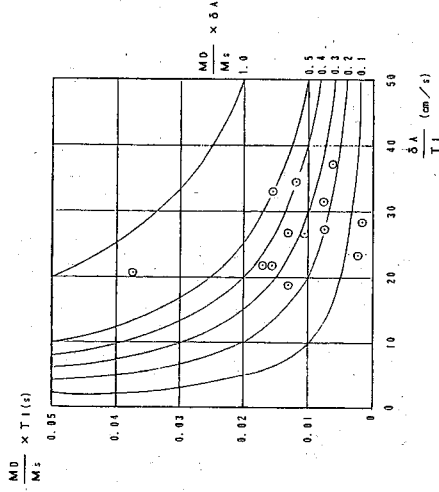


図 7.3 付加質量比と最大ストロークの比較

8. おわりに

以上日本の建築構造物における免震・制振の概要と実例を述べた。本論ではなるべく最新の情報を伝達することを大きな目的としているが、これらの開発技術は現在日進月歩の状態にあり、既に新しい工法が生み出される状態にあるといっても過言ではない。例えば、ダンパー等においても電磁石の原理を応用したものが開発段階を終え、実用段階に向かっ

ていること等があげられる。

一方、これらの免震制振工法の開発における課題あるいはこれからの動向としては以下のことをあげ、本論を終わることとする。

- ・ 非常に多くの工法があるなか、コストの検討を含め一般の設計者にとっては最善の選択をするのに非常に労力を要する。技術的にすぐれていることはもちろんであるが、経済性にも優れたものが残り、既成品的な資材が整備されて良い意味での自然淘汰が生じることが望まれる。
- ・ 実用上技術的に問題なくとも、建築基準法の上においては新しい工法が確認申請において認可されるためには建築センター認定等、詳細な検討が要求されており、設計施工期間の短いプロジェクトにおいては導入が難しいことなどが問題となっているのも事実である。
- ・ 社会貢献の意味では新築建物だけでなく、既存建物の耐震補強の一貫としての免震・制振工法の導入が期待されているとあって良い。実際にアンダーピンニングを行って既存建物下部に免震層を設けた例や耐震壁を追加補強するかわりにエネルギー吸収部材を設けた例等も数例みられるようになってきた。しかし、まだ大規模建物や歴史的保存建築物で工費を多くかけられるものに限定されている場合が多く、比較的古い一般建築物の補強対策までには至っていないのが事実である。近年、国内外に生じた大地震による被害を振り返るまでもなく、この様な観点からも免震・制振構造に対する社会的期待は大きいと考える。

参考文献：

- 1) 社団法人日本溶接協会：構造動態の制御，1994.11
- 2) 日本建築学会：動的外乱に対する設計の展望，1996.11
(1999. 10. 10 受付)

SUMMARY AND EXAMPLE OF STRUCTURAL CONTROL SYSTEM IN THE BUILDING CONSTRUCTION FIELD

Haruyuki KITAMURA, Shingo TORII

Earthquake-resistant design has a very long history as a technique by which buildings survive from severe earthquakes. More recently, an attempt has come to reduce building responses that caused by seismic motions. Buildings designed in this way are generally known as the seismic isolation structures or structural control system. This paper describes the history, classification, and example with design concept of such a seismic isolation

機械工学分野における定性的同定法の紹介

吉田和夫

工博 慶應義塾大学教授 理工学部システムデザイン工学科 (〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)

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同定手法について紹介する。この手法は、シミュ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。

1. まえがき

1980年代の後半に誕生したインテリジェント構造あるいはスマート構造の概念は、航空工学の分野が中心となつて機械工学、土木・建築工学の横断的な研究分野としてこれまでに育ってきた。具体的な実用化は建物の制振技術として現れ、宇宙構造物にも徐々に実用化が行われようとしている状況である。そして、機械工学の分野におけるインテリジェント構造とそのモニタリング技術は、現在盛んに研究されている。航空機、鉄道、自動車の分野におけるスマート構造に関する研究の概要を図-1, 2, 3に示す。これらの図から理解されるように、これらのインテリジェント構造は、振動制御を主目的とした、一種の構造の知能化を指したものである。インテリジェント構造の研究は、材料と構造の健全性監視の研究、構造の制御の研究、構造の利用の研究3種類に大別される。項目ごとの研究の概要は以下の通りである。

- (1) 材料と構造の健全性評価
 - ①製造プロセスのスマート化
 - ②構造のヘルスモニタリング
- (2) 構造の制御
 - ①形状制御
 - ②振動制御
 - ③衝撃制御
- (3) 構造の利用

(1)の②は、構造物の使用過程で監視を行うことを前提とにして、安全率を限界まで下げる限界設計を行い、軽量化を図る技術であったり、残存寿命の把握、

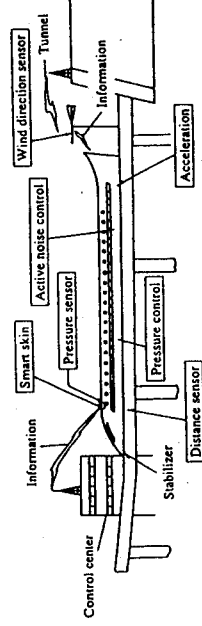


図-2 鉄道のスマート構造

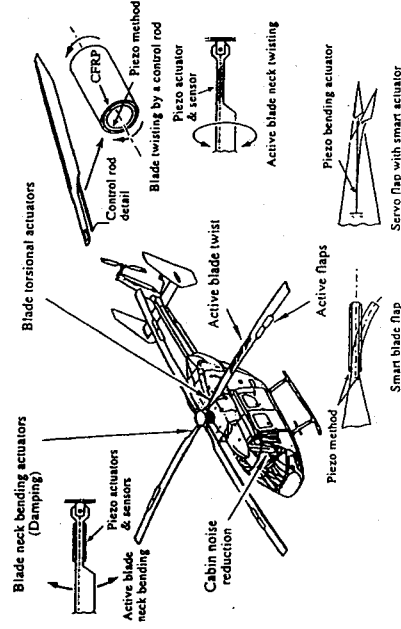


図-1 ヘリコプターのスマート構造

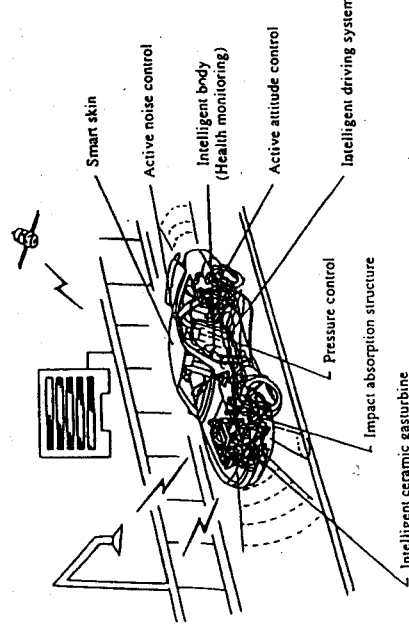


図-3 自動車のスマート構造

使用過程での損傷評価, 交換指示, リサイクル促進等の価値の高い技術として活用されている。(2)の構造の制御は, 主に制御技術でセンサーは制御のために装着されており, アクチュエータ技術に比重が大きい。(3)の構造の利用は, 構造物の表面を電波の送受信として用いたり, 電磁波や音波の吸収面として利用するような技術である。

このようなスマート構造に用いるセンサの材料は, 金属, 半導体, 高分子, セラミックスなど多様である。構造複合材料を知能化するのに用いるセンサは主にひずみを測定できるものとなる。この候補材料としては歪ゲージの他に光ファイバーや圧電性高分子が有望であるようだ。光ファイバーは光の強度や位相, 偏光などの特徴を測定するもので, 耐環境性があり, 電磁氣的ノイズがない利点がある。ポリフッ化ビニリデン(PVDF)のような圧電性高分子膜は弾性的で軟らかく, 衝撃に強い特徴を有している。このようなセンサが安価に大量に使用できるようになるであろう。

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, ソフトウェアの重みも増すものと考えられる。そこで本稿では, 機械工学分野における定性的な同定手法について紹介する。この手法は, シミュ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。

2. 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もので, その多くは次数とパラメータを出入力データから決きめる問題に帰着される場合が多い。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A I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, その特徴をデータベースに蓄え, 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方法について述べる。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方法を考察する。

3. 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 $x(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) とすると,

$$(1) \text{平均値: } \mu = E(x)$$

$$(2) \text{二乗平均値: } \psi = E(x^2)$$

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

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

- 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ので, 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, 実際の波形から上記の項目のデータ処理を行う必要がある。

ではあるが見られる。共振周波数は変化しない。コヒ

4. 計算機シミュレーション

非線形要素によって、非線形量の増大による系の応答の変化の仕方は異なる。非線形系といえどもある程度周波数領域を限定すれば非線形一自由度系の特性が基本になることが予想されるので、ここでは機械系の代表的な非線形一自由度系を取り扱う。

3. 1 非線形一自由度モデル

機械系の代表的な非線形要素としては様々なものが考えられるが、ここではダフイング型、流体型、衝突型（すきま型）、履歴型に限定し、これらの非線形要素を有する一自由度系を図1に示す。

非線形要素を含まない、基礎とする線形の方程式は次式で示される。

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = u/m \quad (1)$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m}, \zeta = c/(2\sqrt{mk})$$

以下のように無次元化を行う。

$$\xi + 2\zeta\xi + \xi = \eta \quad (2)$$

$$\tau = \omega_n t, \eta = u/mL\omega_n^2, \xi = x/L, L = \sqrt{D/m^2\omega_n^3}$$

上記の線形モデルに非線形要素が基本的に付加された非線形一自由度系を考察する。

(1) ダフイング型

$$\xi + 2\zeta\xi + \xi + \varepsilon\xi^3 = \eta \quad (3)$$

(2) 流体型

$$\xi + 2(\xi + \gamma\xi|\xi|) + \xi = \eta \quad (4)$$

(3) 衝突型

$$\xi + 2\zeta\xi + g_c(\xi, \rho_c, x_g/L) = \eta \quad (5)$$

$$\rho_c = (k_0 + k_g)/k_0, x_g$$

$$g_c = \begin{cases} \rho_c\xi + (\rho_c - 1)x_g/L & \xi < -x_g/L \\ -x_g/L \leq \xi \leq x_g/L \\ \rho_c\xi - (\rho_c - 1)x_g/L & \xi > x_g/L \end{cases}$$

(4) すきま型

$$\xi + 2\zeta\xi + g_1(\xi, \rho_1, x_g/L) = \eta \quad (6)$$

$$\rho_1 = k_0/(k_0 + k_g)$$

$$g_1 = \begin{cases} \xi + (1 - \rho_1)x_g/L & \xi < -x_g/L \\ -x_g/L \leq \xi \leq x_g/L \\ \rho_1\xi & \\ \xi - (1 - \rho_1)x_g/L & \xi > x_g/L \end{cases}$$

(5) 履歴型

$$\xi + 2\zeta\xi + h(\xi, \lambda/L) = \eta \quad (7)$$

$$h(\xi, \lambda/L) =$$

$$\begin{cases} -\lambda/L & \xi < (a_1 - 2\lambda)/L \\ \xi - (a_1 - \lambda)/L & (a_1 - 2\lambda)/L \leq \xi \leq a_1/L \\ \xi - (a_2 + \lambda)/L & a_2/L \leq \xi \leq (a_2 + 2\lambda)/L \\ \lambda/L & (a_2 + 2\lambda)/L \leq \xi \end{cases}$$

非線形パラメータは、それぞれ $\varepsilon, \gamma, x_g/L, L/\lambda$ である。

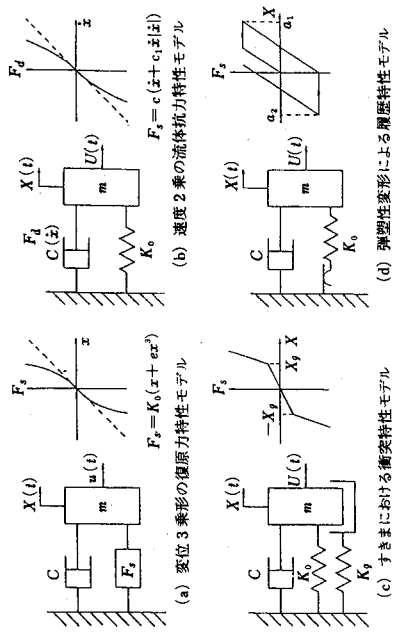


図-4 1 自由度系非線形特性要素

3. 2 シミュレーションとデータ処理の方法

図-4に示される一自由度系に白色雑音を印加した場合の応答を計算機シミュレーションによって調べた。入力としては正規乱数からインテンシティ1の白色雑音を発生させ、2次のルンゲ・クッタ法を用いて応答計算を行い、過渡成分を除いた16384点の変位および速度のデータを取得した。図-5に作成した白色雑音入力とパワースペクトル密度を示す。

計算機シミュレーションにおける緒言を以下に示す。

さきみ幅: $\Delta\tau = 0.1$

ステップ数: 20,000点

減衰比: $\zeta = 0.05$

非線形パラメータ (各5段階の非線形量)

(1) ダフイング型 $\varepsilon = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$

(2) 流体型 $\gamma = 2, 4, 6, 8, 10$

(3) 衝突型 $\rho = 10$

$L/Xg = 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3$

(4) すきま型 $\rho = 0.1$

$Xg/L = 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5$

(5) 履歴型 $L/\lambda = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$

以上それぞれの時刻歴波形より、平均値、分散、ひ

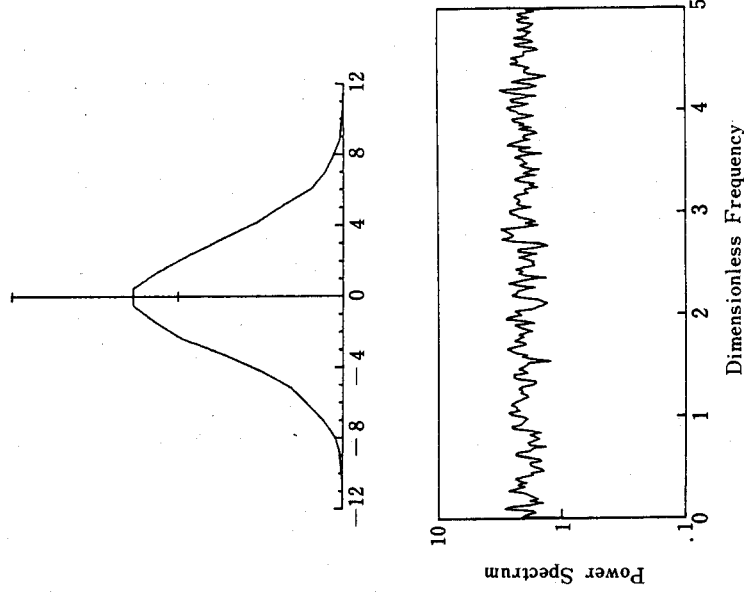


図-5 作成した白色雑音入力の特徴

ずみ度、とがり度を求めた。さらに、周波数領域の解析としては、2048点から成る8つの標本に分割し、それぞれにハニングウィンドウをかけてFFTを行い、スペクトル密度関数を求め、平均化を行った。このスペクトル密度関数を用いて周波数応答関数およびコヒーレンス関数を求めた。

5. 非線形不規則振動に関する知識ベース

ここでは計算機シミュレーションの結果について述べる。

図-6に、ダフティング型のとがり度に関する結果の一例を示す。図-7には、履歴型の非線形量の増大に伴う伝達関数のゲイン特性の変化の一例を示す。図-8には、線形の場合の周波数特性(伝達関数のゲインと位相、コヒーレンス関数、応答のパワースペクトル密度)を示している。図-9, 10, 11は、これに対応するダフティング型, 衝突型, 履歴型の周波数特性を示している。表1, 2はダフティング型と履歴型非線形モデルに対してそれぞれの非線形要素ごとに得られた結果をまとめたものである。

表3は、各非線形要素ごとに得られた非線形量の増大に伴う変化のトレンドを大まかに図示したものである。表中 Disp. は質点の変位、Vel. は速度を示す。

得られた結果をタイプ別にまとめると以下の様になる。

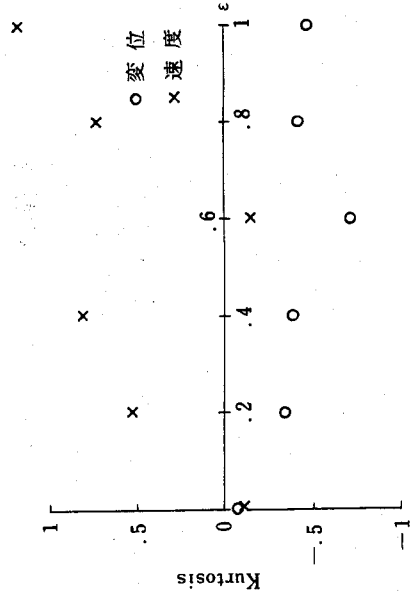


図-6 ダフティング型モデルの非線形パラメータに対するとがり度

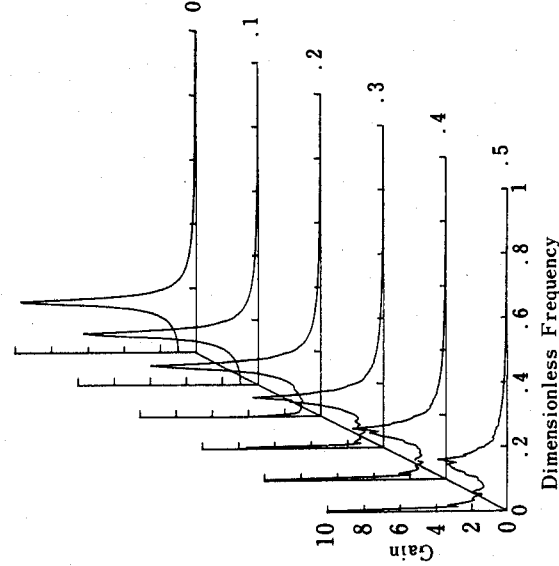


図-7 履歴モデルの非線形パラメータに対するゲイン特性

(1) ダフティング型

(a) 時間領域

このモデルは対象非線形系だから、平均値およびばねみ度は変位、速度ともにほとんど零で、非線形パラメータ ϵ を大きくしても変化はない。しかし、分散は、 ϵ を大きくするにつれて変位において減少し、速度において増加する傾向が見られる。とがり度は、変位においては減少するが、速度においては多少増加するもののあまり規則性がないように考えられる。

(b) 周波数領域

周波数応答関数は、 ϵ が大きくなるとともに低周波数領域におけるゲイン要素およびピーク値の低下が見られる。共振振動数は上昇する。コヒーレンス関数では大きな減少が見られ、特に共振周波数および共振長の低下が著しい。

(2) 流体抗力型

(a) 時間領域

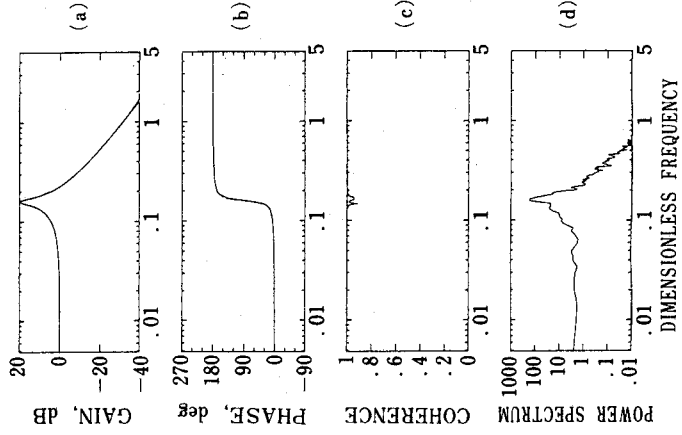


図-8 線形モデルの応答特性

図-10 衝突型非線形モデルの応答特性の一例

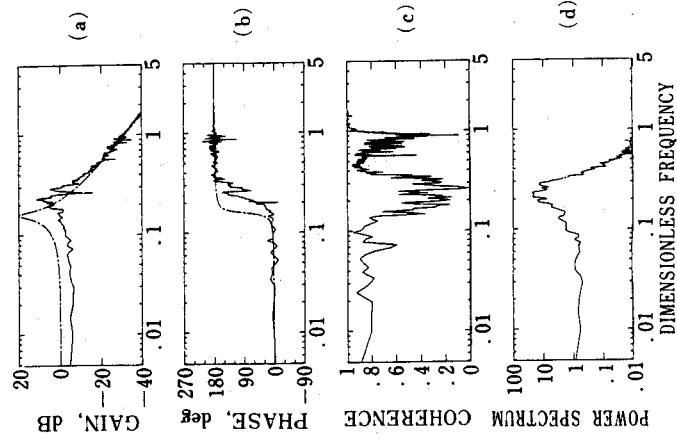


図-9 ダフティング型非線形モデルの応答特性の一例

これも対称非線形系であるので、平均値およびひずみ度は、変位、速度ともに零である。分散は非線形パラメータ γ を大きくするにつれて変位および速度において減少が見られる。またたがり度も変位、速度の両方において減少が見られる。

(b) 周波数領域

周波数応答関数は γ を大きくするのにともないピーク値の低下が見られるが、これは線形の場合に減衰比を上げた場合と同じ傾向を示す。また、コヒーレンス

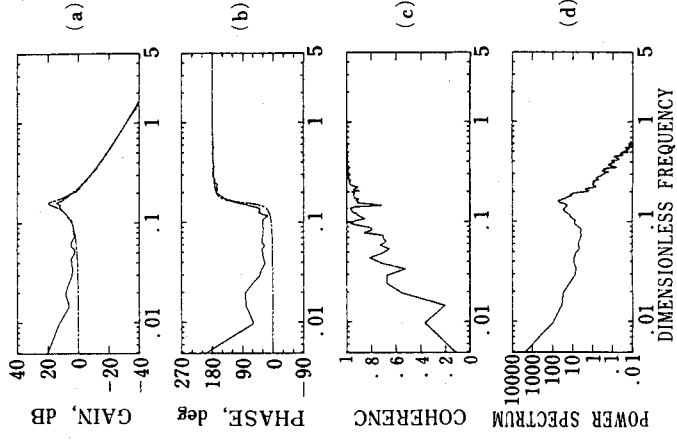
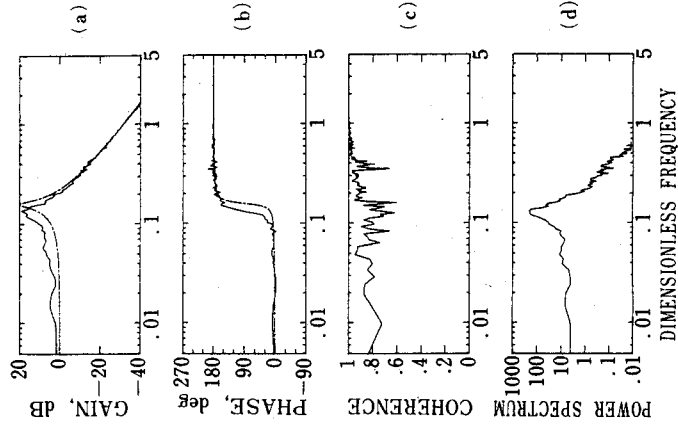


図-11 履歴型非線形モデルの応答特性の一例

関数ではあまり変化が見られず、僅かに減少するにすぎない。

(3) 衝突型

(a) 時間領域

これもまた平均およびひずみ度は変位、速度ともに零である。分散は非線形パラメータ L/xg を大きくするにつれて変位において減少し、速度においては増加する。とがり度に関しては、変位においては減少し、速度においては変化は見られるものの規則性はあまり

表-1 ダフティング型の非線形特性

FUNCTION	PARAMETER	TREND	COMMENTS
TRANSFER FUNCTION	D.C. Value	Down	
	Peak value	Down	
	Resonant frequency	Up	
	Slope of phase at Peak	Down	
COHERENCE FUNCTION	Value at Resonant fr.	Down	< 2
	Lower fr.	Down	< 8
	Higher fr.	Down	< 3 #Higher harmonics appear #High frequency (> 3) =1
STATISTICAL VALUE	Mean value displacement	Not change	=0
	velocity	Not change	=0
	Variance	Down	
	displacement	Up	
	velocity	Down	
	RMS	Up	
	displacement	Down	
	velocity	Up	
	Skewness	Not change	=0
	displacement	Not change	=0
	velocity	Down	irregular
	Kurtosis	Change	
	displacement		
	velocity		

表-2 履歴型の非線形特性

FUNCTION	PARAMETER	TREND	COMMENTS
TRANSFER FUNCTION	D.C. Value	Up	
	Peak value	Down	
	Resonant frequency	Not change	
	Slope of phase at Peak	Not change	
COHERENCE FUNCTION	Value at Resonant fr.	Down	< 2
	Lower fr.	Down	< 1
	Higher fr.	Not change	
STATISTICAL VALUE	Mean value displacement	Change	irregular
	velocity	Not change	=0
	Variance	Not change	divergence
	displacement	Up	
	velocity	Down	
	RMS	Up	divergence
	displacement	Down	
	velocity	Up	
	Skewness	Change	irregular
	displacement	Not change	=0
	velocity	Change	irregular
	Kurtosis	Change	
	displacement	Down	
	velocity		

表-2 非線形パラメータの増加に伴う同定パラメータの傾向

	平均値	分散	ひずみ度	とがり度	周波数応答関数			コヒーレンス関数		
					D.C.Value	Peak Value	Peak Frequency	位相の勾配	D.C.Value	Peak Value
(A) ダフティング型	Disp. $\frac{1}{\epsilon}$									
(B) 流体抗力型	Vel. $\frac{1}{\gamma}$									
(C ₁) 衝突型	Disp. $\frac{1}{L/\bar{X}_0}$									
(C ₂) すきま型	Disp. $\frac{1}{X_0/L}$									
(D) 履歴型	Vel. $\frac{1}{X_0/L}$									
(E) 履歴型	Disp. $\frac{1}{L/\lambda}$									
(F) 履歴型	Vel. $\frac{1}{L/\lambda}$									

ない。

(b) 周波数領域

周波数応答は L/xg の増加とともに低周波数領域でのゲイン要素の低下が見られ、またピーク値もそれにともなって下がる。共振振動数は上昇する。コヒーレンスは、これも低周波数領域で大きな減少がみられ、共振周波数、高調波周波数での低下が著しい。

(4) すきま型

(a) 時間領域

平均値およびひずみ度は変位、速度ともに零であった。分散は非線形パラメータ xg/L の増加とともに変位、速度の両方増加する。また、とがり度は、変位、速度ともに減少する。

(b) 周波数領域

周波数応答関数はゲイン要素においてわずかに増加が見られ、共振振動数は下がる。コヒーレンス関数は低周波数領域での低下が見られる。

ーレンス関数もまた低周波数領域において低下が見られるが、共振振動数以上の領域ではほとんど1からの低下は見られない。

以上の結果は、ある程度物理的な直感と合致するものであるが、特に流体抗力型の場合は非線形系にも拘らずコヒーレンスが減少しないことは興味深い。また、履歴型のコヒーレンスにおいては直流成分が大きく減少することと一つの特徴と言える。このように各非線形要素によってかなりそれぞれのトレンドが異なることが明かとなったので、これらの情報を用いれば、未知の非線形要素を有する振動系のデータからその特性の識別の可能性が示唆された。

6. 知識ベースの表現

同定パラメータの非線形量の増大に伴う変化のトレンドが非線形要素によって異なることに着目し、そのトレンドを知識ベースとして表現することを考える。この場合トレンドをどのように知識ベース化するかが問題となる。人工知能言語としてはまずプロログ言語を用いることを前提とし、なるべく述語論理型のスタイルで記述することを考える。さらに知識ベースが膨大にならないように配慮して、以下の三つの場合に分類して、知識ベースを記述する。

(1) 上昇 (UP)

非線形量の増大にともなって同定パラメータが増加するならばその知識ベースとして

「トレンドは上昇する」とする。

(2) 下降 (DOWN)

非線形量の増大にともなって同定パラメータが減少するならばその知識ベースとして

「トレンドは下降する」とする。

(3) 変化なし (NOT-CHANGE)

非線形量の増大にともなって同定パラメータが変化しないならばその知識ベースとして

「トレンドは変化なし」とする。

増加するのか、減少するのか、変化しないのかをどのように判断するかという問題が残されている。非線形量を横軸にとり、同定パラメータを縦軸にとりて帰直線を求め、その傾きから判断することが当然考えられるが、その場合でも何らかの判断基準が必要になる。そこで以下のような手法によってデータから同定パラメータのトレンドを自動抽出し、その結果を上記の知識ベースとして表現することを考えた。

7. トレンドの自動抽出

いま最小二乗近似によって図-12のような回帰直線が得られたとする。まず、この回帰直線から

- (1) 回帰直線の方程式 ($y = ax + b$)
 - (2) 絶対値の最大値 ($\max |y|$)
 - (3) 単調増加か否か
 - (4) 単調減少か否か
 - (5) プロット点の二乗平均値 (y^2)
- を求め、これらの値と回帰直線から次の判断値を算出する。

- (6) 最小二乗法による回帰直線の始点と終点
- (7) 傾斜指数 ($a / \sqrt{\text{var}(y^2)}$)
- (8) 各点と回帰直線との差の二乗平均値 ($\text{d}y^2$)
- (9) ちらばり指数 ($\text{d}y^2 / y^2$)

(10) 突出点の除外操作 (プロット点の回帰直線と差の絶対値があるいき値 (いき値1) を越えると除外される)

- (11) 突出点の除外による回帰直線の再計算
- 以上の回帰直線に関するパラメータを求めておき、以下のルールによって知識ベース化する。

(a) 上昇：
もし単調増加で、(7) の傾斜指数があるいき値 (いき値2) より大きければ上昇と判断する。

もし単調増加でもなくとも、(7) の傾斜指数があるいき値 (いき値3) より大きく、ちらばり度があるいき値 (いき値4) より小さければ上昇と判断する。

(b) 下降：
もし単調減少で、(7) の傾斜指数があるいき値 (いき値2) より小さければ下降と判断する。

<Trend Indication Mode>
Please select
Displacement: 00)average 01)mean square 02)variance 03)skewness
 04)kurtosis
Velocity : 10)average 12)mean square 12)variance 13)skewness
 04)kurtosis
operation : -1)exit to MS-DOS -2)print screen -3)process other file
The trend curve of menu 02 is indicated as

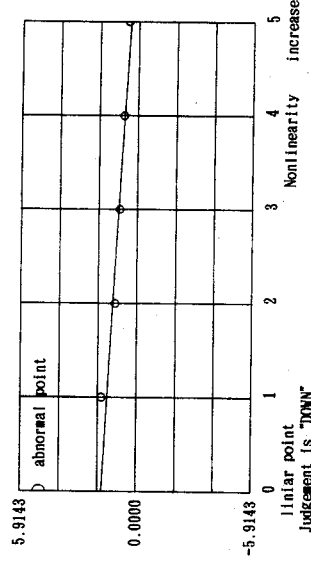


図-12 非線形量の増大に対する統計パラメータの変化

もし単調減少でもなくとも、(7)の傾斜指数があるいき値(一いき値3)より小さく、ちればり度がああるいき値(いき値4)より小さければ下降と判断する。

(c) 変化なし

もし(2)の最大値があるいき値(いき値2)より小さくて、単調増加、単調減少でもなければ変化なしと判断する。さらに上昇と下降に関する上記の基準を満たさない場合は変化なしと判断する。

上記のルールによって、いき値1-4を与えれば自動的にトレンドを判断することができる。しかしながら、これらのいき値をどうやって決めるかは大きな問題であるが、ここでは熟練者が決定することにしておく。いき値を適当に設定した上で表3のデータからトレンドを自動抽出した例を図-13に示す。

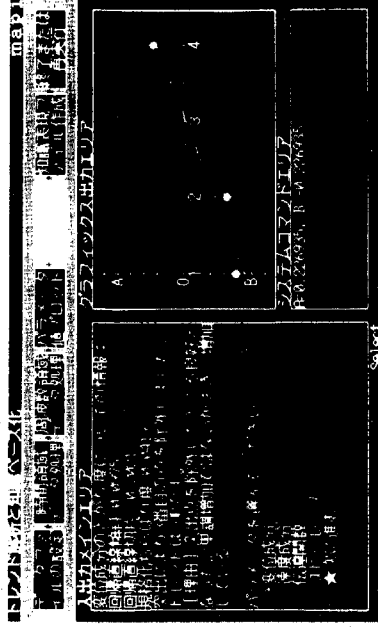


図-13トレンド解析と知識ベース画面

8. 人工知能言語による知識ベースの表現と推論

ここでは既に述べたように人工知能言語プロログを用いて知識ベースを記述する場合の例について述べる。

プロログ言語は、パターンマッチングとバックトラックを特徴とする言語であり、このような非線形要素の識別に適した言語と言える。この知識ベースは、各同定パラメータの非線形量の増大に伴うトレンドをそのまま述語論理形式で表現したものである。

この知識ベースを用いて振動データからその波形の中に潜む非線形現象の原因となる非線形要素を推論する方法としては、様々なものが考えられる。基本的には、プロログ言語がパターンマッチングを得意とするので、未知の振動データのデータ解析を行って、その同定パラメータのトレンド解析を行い、そのトレンドと同じ非線形要素をマッチング手法によって探す方法がある。この場合推論結果としてマッチングした知識ベースの数を与える得点法を採用すると、推論結果は例えば図-14のように得点が表示され、その得点か

ら潜む非線形特性を判断することになる。ただしその判断は、現状では人間に任せられる。一方、得点法ではなく、すべての知識ベースの項目で一致する場合の非線形特性を答えとする方法も考えられるが、既に述べたようにトレンド解析などに存在するいき値に関する曖昧性やもとの知識ベースが一自由度系のものであり、実際のものと異なるなどの点を考慮すると、得点法の方が技術者に多くの情報を与えるものと考えられる。

9. あとがき

非線形要素の識別を目的とした同定手法について述べた。ここで述べた同定手法において用いている知識ベースは一自由度系の知識ベースであったり、その数値モデルもかなり限られたものであったり、トレンドの自動抽出もいき値の設定によっては異なるるるようになったり、いろいろな問題点が考えられる。最後に関連する研究について述べる。

(1) ファジィ理論やニューラルネットの応用

まず、実際のデータからのトレンドの自動抽出とその知識表現化におけるあいまい性を導入するためにファジィ理論の適用を試み、その有効性を確認している。また、各同定パラメータのトレンドの傾斜角を入力とし出力を非線形特性に対応付けた数値としてニューラルネットを定義して、トレンドに関する知識ベースを学習させ、ニューラルネットを用いた非線形振動の定性的同定システムを構築し、やはりその有効性を確認している。

(2) 多自由度系への応用

知識ベースは、一自由度系の応答から作られたが、非線形系の場合モード分離ができないので、この知識ベースが適用できるのかという疑問が当然生じる。このことについても、多自由度モデルによる計算機シミュレーションおよび非線形構造物の加振実験の結果

において検討した結果、多自由度系への応用の可能性を確認しており、特にその場合にはニューラルネットワークを用いる方法の優位性が生じる。

(3) 実際の振動診断システムへの応用

実際の振動系の場合、非線形量を変化させて振動試験することは困難であるが、振動系の応答の時間的な変化傾向を対応させることができる場合もあり、異常振動診断システムへの発展性はあるものと判断している。

(4) 土木構造物への応用

インテリジェント土木構造物だけでなく、最近の事故に見られるように、たとえば既存のコンクリート構造物に関しても今後モニタリングの要請が増えるものと考えられる。そのような環境に対応するモニタリング技術も多様であるべきと考えられる。これまでのモニタリング技術は、正確な情報を得て、確実な同定と診断を下すことが求められてきた。もちろんモニタリングの対象となる構造物が限定されているときはそのような技術だけで十分であった。しかしながら、今後は大量のセンサから得られる大量の情報から何らかの判断をしなければならぬような場合が増えるものと考えられる。あいまいな情報も取り扱わなければならないような状況が増すものと考えられる。そのような場合には、定性的な情報処理が必要になってくるものと考えられる。その意味では、本稿で紹介したようなアプ

ローチの発展も必要なのではないだろうか、少しでも本稿が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 次世代金属・複合材料研究会開発協会：平成6年度スマートコンポジットに関する調査報告書 (NEDO-IT-93001), 平成7年度知的構造システムの先導研究報告書 (NEDO-PR-95011)。
- 2) 谷順二, インテリジェント材料・流体システムの研究動向, 流体研報告, 第9巻 (1998), pp. 62-70.
- 3) 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 (1991), pp. 95—119.
- 4) Uchiyama, J., Yoshida, K. and Shimogo, T. Vibration Diagnostic System of Reactor Equipment, Proceedings of 1989 ASME Pressure Vessels & Piping Conference, Vol. 177, 1989, pp. 13-18.
- 5) 吉田和夫, プラント構造物の非線形振動の同定・診断・制御システム, 日本機械学会研究協力部会RC94プラントの設計・運用における知能化技術の開発と応用に関する研究分科会研究成果報告書 (1991), pp. 141 - 146.

Advanced Monitoring Techniques for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Highway Bridge Structures

John J. Lesko¹ and Paige Clifton-Furrow²

¹Dr., Professor, Materials Response Group, Department of Engineering Science & Mechanics, Virginia Tech (Blacksburg, Virginia, 24061 USA)

² Senior Engineer, Luna Innovations: Fiber and Sensor Technology, Inc. (2851 Commerce St., Blacksburg, Virginia, 24060 USA)

Greater emphasis is being placed on ensuring the proper function of our infrastructure. Systems of bridges, highways buildings, and utilities are critical to commerce and economic growth. In the United States a large number of bridges were constructed in the 1930's, 1940's, and 1960's. This has lead to the present high rate of deficiencies in our highway infrastructure, forcing the investigation community to examine means of extending the life of existing bridges and means to construct a new more efficient and durable structures. Advanced materials and monitoring techniques are providing opportunities to achieve these goals. This paper focuses on fiber optic sensing technologies in FRP bridges.

Key Words: *Fiber optic sensors health monitoring, Bragg grating, Sapphire fiber sensor, IFPI, EFPI*

1. INTRODUCTION

As the turn of the century approaches, deterioration of the U.S. civil infrastructure is causing growing concern. Civilization support facilities such as water piping and power supply systems, and transportation systems are long overdue for maintenance or repair. Presently, insufficient financial resources are available for timely response to the needs. For example, bridge construction has been non-uniform over the past 95 yrs. A large number of bridges were constructed in the 1930's and 1940's, and again during the period from 1960 to 1975. Average bridge replacement and major rehabilitation ages are 70 and 35 yrs, respectively. This has lead to the present high rate of deficiencies in our highway infrastructure: 11% of the U.S. highway bridges are presently structurally deficient and 19% are functionally obsolete^{1, 2}. Thus, bridge replacement and major rehabilitation costs will overlap resulting in an estimated annual cost of \$50 billion by the year 2000 where only 1/10th of these funds are allocated annually³.

In response to transportation needs, the recent Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA21) highway legislation set forth two central goals: (1) reduced user delays and (2) deployment of advanced materials². The Innovative Bridge and Construction Program, born out of this legislation, has yielded opportunities for examining, not only new high performance materials in highway bridges, but also identified a need to monitor and non-destructively investigate their condition. The

resulting program and guidance from the Federal Highway Administration yields opportunities for enhancing our nations infrastructure through the use of advanced health monitoring systems. These systems must however, be robust enough to tolerate construction and possess stability over long periods of time.

Fiber optic based sensors are proving to be the system of choice in these applications. Variations on the theme of the interferometer, changes in index of refraction, intensity differences and the availability of a light path to a remote region, have enabled a variety of sensing configurations. Moreover, fiber optics present an additional advantage, long-term stability. Although glass fiber is sensitive to moisture via the stress crack corrosion mechanism as well fatigue and sustained loading⁴, technologies are available to mitigate these effects. Typically, foil resistance strain gages over long periods of time and under environmental exposure will experience corrosion of the metal foil, fatigue cracking and creep of the adhesive. These effects can corrupt the gage factor and introduce zero shift⁵.

With these long-term concerns in mind, the community is looking closely at the fiber optic sensing technologies for stability over long service periods and harsh environmental conditions. Moreover, the variety of phenomena that can be sensed with light based sensors enables the community to measure features of the structure, in production and in service, that were never considered before.

In this paper we discuss these features by reviewing several applications of fiber optic sensors implemented in fiber reinforced polymer (FRP) composite structures. By completing this brief review we hope to demonstrate the utility of these monitoring systems in practical applications. Following this review our focus will turn to discussions of what the future holds for this technology and the evolution of future sensing techniques.

2. DISCUSSION

(1) Fiber Optic Sensing: Bridge Applications

(a) "Tech 21" all-composite highway bridge

Martin Marietta Materials (MMM) in cooperation with the Butler County Engineers Office (BCEO) of Butler County, Ohio, and the Wright Patterson Airforce Base (WPAB) implemented a 10m (33 foot) span all-FRP composite highway bridge in July of 1997⁶. The unique structure consists of a deck constructed from an array of bonded pultruded orthotropic fiberglass/polyester trapezoidal tubes and a hand laid-up FRP box girder sub-structure, shown in Figure 1.

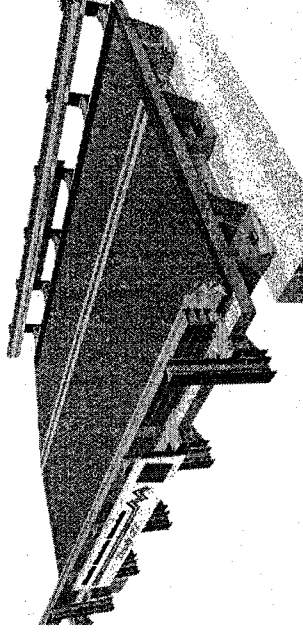


Fig. 1 Martin Marietta Material's Tech 21 all-composite bridge

In constructing this bridge, three sections were longitudinally joined and adhesively bonded to form the final structure, shown in Figure 2. This field installed joint was critical to the constructability and performance of the bridge and was therefore a region of concern in terms of the manufacture and long-term stability of the joint. A Sapphire fiber optic chemical sensor was installed in the center 3.7m of each bond line. This sensor was designed to monitor adhesive cure and detect chemical changes to the bondline adhesive. This was accomplished through infrared spectroscopy, where the fiber serves as the light paths to and from the point of interest. The reflected light form the sensing point is fed back the spectrometer and

analyzed for shifts, rise and fall of various chemical bond group vibrations. Analytically the absorbance in various frequency ranges and the shifts of various spectra can be quantitatively correlated to the change in chemical structure. For instance, in monitoring the moisture content in the polymer adhesive, the intensity of stretch of the oxygen-hydrogen bond in the chemical structure of the adhesive (at a wave number of $\sim 4380 \text{ cm}^{-1}$) will show a shift in frequency as water assimilates within the polymer.



Fig. 2 Field installed and adhesively bonded joint in the Tech 21 all-composite bridge

Additionally, strain and chemical sensors are also incorporated into the box girder substructure. Bragg grating based strain sensors⁷⁾ and the Sapphire chemical sensors were embedded and surface attached, shown in Figure 3.

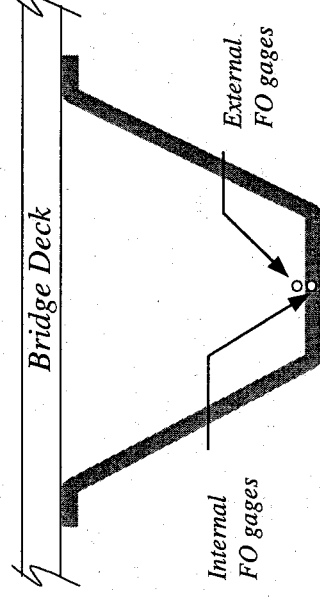


Fig. 3 Sensor locations within the cross section of the box girder of the MMM Tech 21 bridge

The intrinsic Fabry-Perot interferometer (IFPI) consists of two reflective regions within the core of an optical fiber separated by a few millimeters. IFPI's can be formed in optical fiber using pairs of identical Bragg gratings as shown in Figure 4 below. Light injected into the optical fiber at wavelength Λ_1 will reflect off each Bragg grating and interfere with one another. The interference pattern generated by the interaction of R_1 and R_2

are extremely sensitive to strain which modulate both the Fabry-Perot cavity spacing and index of refraction when they impinge on the sensor.

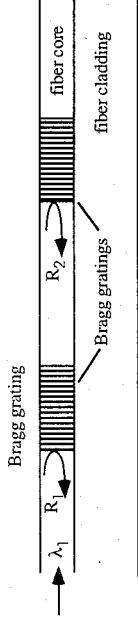


Fig. 4 Schematic of Bragg grating-based IFPI sensor

Bragg gratings are formed in the core of Ge-doped optical fiber when exposed to the interference pattern of two, crossed UV laser beams, as shown in Figure 5. Here, the photoinduced planes of constant index of refraction are perpendicular to the axis of the fiber. In this configuration, part of the light incident on the grating gets back-reflected while most of the light is transmitted. The reflected part of the spectrum, λ_g , will interfere constructively after reflecting off each of the layers, obeying the relationship,

$$\lambda = 2n\Lambda, \quad (1)$$

where n is the mode index of refraction, and Λ is the grating spacing.

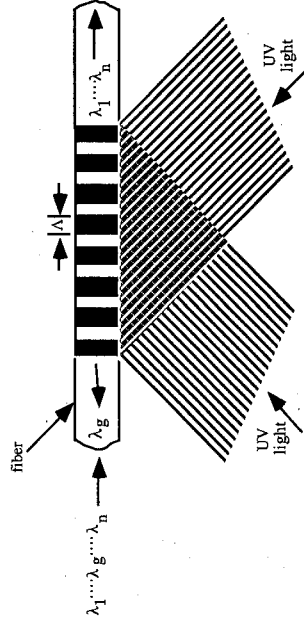


Fig. 5 Cross sectional view of the Bulb-Tee precast sections used in the Beddington Bridge; Bragg grating sensors were applied on the surface of the prestressing tendons

These sensors, installed in and on the FRP composite structure, serve as a long-term measurement of strain and moisture ingress internal to the composite material as well as the structure. A total of nine sensors were placed within the bridge structure; three in each of the three box girders (at quarter point and mid span). Sensors embedded within the composite were placed in the midplane of the laminate during the hand lay-up process.

Readings from the bondline sensors suggest that resin cure advanced no more than 4 months and that the state of the bond remains stable (nearly a year

later)⁸⁾. As this joint is critical to the performance of the bridge, access to this information provides the design engineer with a degree of confidence not accessible from laboratory testing.

(b) Beddington Trial Bridge

The Beddington Bridge, Calgary, Alberta, is a two-span, skewed bridge, with spans of 22.8 and 19.2m⁹⁾. Each span consists of 13 bulb-Tee section, pre-cast, prestressed concrete girders. Within this particular structure are two different types of FRP tendons used to pretension six of the precast concrete girders (see Figure 6). Carbon fibre composite cables produced by Tokyo Rope of Japan, were used to pretension four of the girders. The remaining two girders were pretensioned with Leadline rod tendons, produced by Mitsubishi Kasei. The bridge was opened to traffic in 1993.

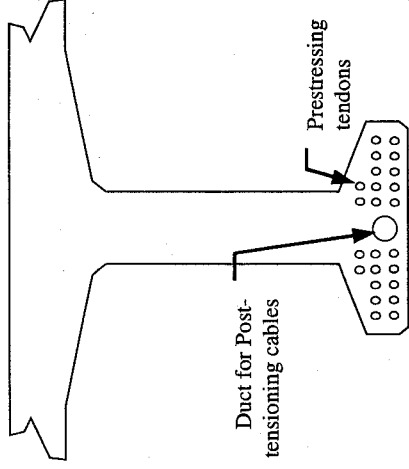


Fig. 6 Cross sectional view of the Bulb-Tee precast sections used in the Beddington Bridge; Bragg grating sensors were applied on the surface of the prestressing tendons

Monitoring of the fiber-reinforced polymer tendons was accomplished by a system of structurally integrated optical sensors. Bragg grating strain sensors were employed not only on the FRP tendons but also on several steel tendons. The sensors were surface attached to the tendons while the tendons were placed in tension to approximately 8000με. This placed the sensors in compression after installation of the sensors; a favorable state for protection from stress corrosion mechanism.

A central concern in the application of delicate instrumentation in this application was survival of the sensors during the placement and compaction of the concrete. The use of proper cabling can protect against excessive bending, pinching and exposure to the alkaline environment. The efforts of the authors resulted in the successful installation of all gages through the final stages of construction.

This was accomplished even under the employment of standard practices used in placing the concrete.

Following casting of the girders, strain measurements were made over the course of 18 months and the loss in prestressing was followed. Taking into account temperature corrections, the loss in prestressing over this period was determined. These studies determined that due to the lower stiffness of the FRP tendons, losses were 25% less than those observed in the steel tendons. Absolute measurements of this kind would have been difficult using conventional foil resistance gages; the Bragg grating strain gage inherently allows for absolute measurements.

Live load tests were also conducted with instrumentation that enabled strain resolution of 1 $\mu\epsilon$. The fiber optic strain system was able to distinguish small strains histories in the tendons (strains histories ranging from 0 – 5 $\mu\epsilon$). Again, this would have been difficult to achieve in a field installation with conventional resistance gages, particularly in the presence of electromagnetic fields (e.g. the field electrical generator).

Further advantages of the intrinsic Bragg grating sensor is that the sensing region can be applied in several locations along the length a single fiber optic cable. That is, several gratings can be distributed on a single cable allowing multiple sites for making strain measurements. This requires the light source and sensing system be capable of distinguishing various wavelength of the spectrum as reflected from the wavelength sensitive grating distributed along the fiber optic. Given the proper distance between sensing sites along a given length, an accurate strain distributions can be determined with one sensor. This is particularly helpful when attempting to assess the development length in a prestressed tendon/concrete system. Significant advantages are provided by the presence of a single small diameter lead which can make many measurements that would otherwise require several leads that could interfere with the phenomena.

(b) Interstate 81, Troutville, Virginia Weigh Station FRP bridge deck test bed

Approximately 132,000 of 200,000 bridges labeled as either "structurally deficient" or "functionally obsolete" in the U.S. are attributable to deterioration of the bridge deck or a substandard bridge deck design for current service²⁾. Thus, developing FRP bridge deck systems has become a national priority. A number of advantages result by employing FRP deck systems. By reducing the weight on the superstructure (replacing the concrete deck with a FRP deck), the dead load experienced

by the superstructure is reduced and thus the live load rating of the bridge is raised. This is particular advantageous when retrofitting bridges that were originally designed for traffic loads that are presently exceeded by current service conditions. Moreover, the reduced weight of FRP deck systems (typically on the order of a factor of 1:5) enables rapid replacement schemes when appropriate connection designs accommodate retrofit of existing superstructures. Potential construction practices incorporating modular FRP deck systems will minimize the time a bridge will be out of service.

Thus, an interdisciplinary team at Virginia Tech and Strongwell, Corp. have co-designed a novel bridge deck system comprised of adhesively bonded, pultruded FRP plates and tubes (see Figure 7)¹⁰⁾. This pre-competitive design was developed from pultruded structural shapes that are mass-produced by leading composite pultruders in the U.S. Moreover, the design can be extended to other configurations by adjusting tube and plate dimensions to achieve desired structural performance under specified service conditions. Repeatability of this design is therefore likely given proper design guidelines.

However, a number of questions remain as to the appropriate design of intercomponent adhesion, structural connection to the superstructure, adequacy of the polymer concrete wearing surface material, and the long-term durability of the FRP structural shapes and the adhesive that binds them.

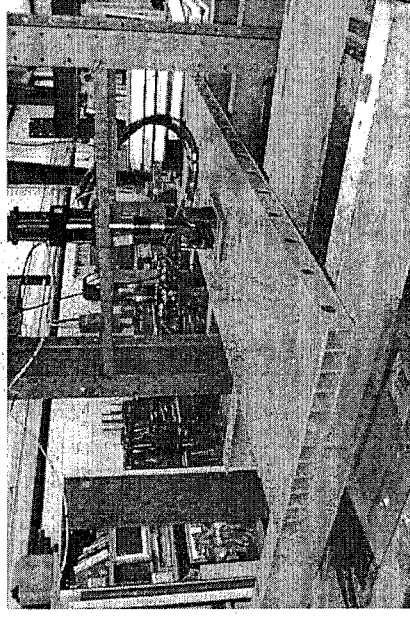


Fig. 7 Representative test set up for laboratory performance characterization of a 4.5" deep tube and plate prototype composite deck.

In an effort to monitor these details during proof testing and service, a number of fiber optic sensing technologies have been installed in this experimental bridge deck system. The cavities formed by the intersection of pultruded components serve as a natural conduit for both conventional and new sensors (see Figure 8).

Polymer Concrete Wearing Surface

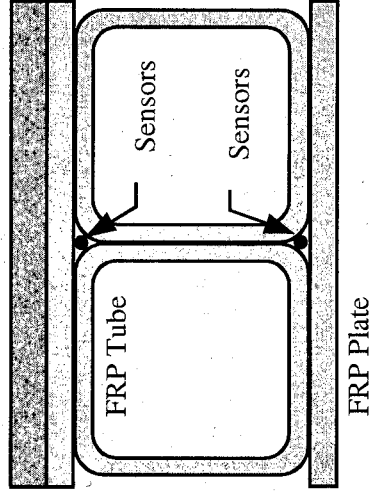


Fig. 8 Pultruded FRP plate and tube deck cross section illustrated with polymer concrete wearing surface and natural conduits for sensor runs.

Defining the strain distribution through the depth of the FRP deck system was achieved by installing Extrinsic Fabry-Perot interferometers (EFPI's) in these cavities prior to the adhesion of the plates to the top and bottom of the tubes. The EFPI's function similarly to the IFPI's in that an interferometer is formed physically and through the induction of internal gratings. The conventional extrinsic EFPI sensor geometry is shown in Figure 9. Here, a 1300 nm singlemode fiber transmits light from a laser diode to the sensor element. At the opposite end of the input fiber, the laser light signal is partially reflected and partially transmitted across the gap separating the ends of the input fiber and an output fiber used solely as a reflector. This signal and the signal reflected from the facing fiber endface interfere and propagate back through the input fiber to a photodiode detector. The detected photodiode signal current is proportional to the phase difference between the two reflected optical fields.

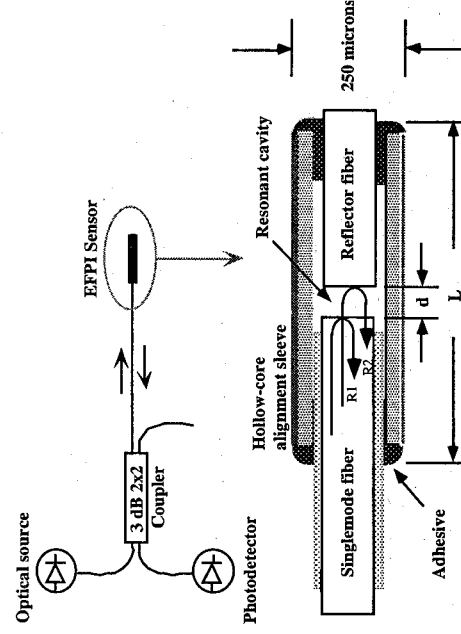


Fig. 9 Conventional EFPI strain sensor element.

Typically the gage lengths available in these sensors are in the 4-6 mm range. The EFPI is insensitive to

transverse strains presented to the sensor in contrast to the ~2% cross sensitivity observed in IFPI's.

Conventional resistance foil gages were collocated with the EFPI's. These foil gages were adhered to the outside radius of the tube just inside the cavity. In addition, foil gages were also placed on the bottom surface of the deck to assist in identifying debonding of the plate from the tube assembly, by monitoring the presence or absence of a linear strain distribution through the depth of the deck.

In an effort to correlate the recorded strains and finite element predictions for failure with damage events, acoustic emission (AE) sensors were also implemented. The IFPI sensor, in an optimized form, and with high frequency response computer acquisition, is used to develop a broadband AE system. Modifications to the convention IFPI strain sensor include selection of optimal sensor gage length, cavity reflectivity, as well as attachment issues. F&S, Inc. also considered techniques to bias the sensors at their most sensitive operating point. By actively varying the laser diode wavelength, the sensor signal can be tuned to the highly sensitive region of its transfer function and optimized for detection of AE events.

Other areas of concern centered on the integrity of the wearing surface during service. Analysis of the wearing surface applied to the top surface of the FRP deck system revealed the potential for a thermal mismatch problem. The thermal expansion coefficient of the wearing surface is 4 to 5 times that of the FRP deck system. Upon lowering the temperature too nearly -40°C, the predicted peel stresses are large enough to peel the wearing surface (given a lower bound on adhesion). This situation could be exacerbated by thermal gradients. Thus, both conventional and fiber optic based sensors have also been applied in the cavities noted in Figure 8, on the bottom surface and in the wearing surface itself. Sensors are aligned through the thickness along an edge of the deck and at the mid-span of one of the free spans. A silicon based fiber optic temperature sensor is employed here. These sensors monitor the change in optical properties (index of refraction) of the silicon with change in temperature and referenced to a calibration.

This FRP bridge deck and the experimental fiber optic sensing technologies will be studied under realistic traffic conditions. A facility for assessing the viability of proposed bridge deck systems will be installed in November of 1999 at the Troutville, VA weigh station on Interstate 81 (1 hour from Virginia Tech). This unique test facility (designed by Virginia Tech and Virginia

Transportation Research Council (VTRC)) allows examination of bridge deck systems under heavy and recorded loading conditions (environment and load) and in a low risk setting (see Figure 10). The site allows for the installation of a 3.1m x 4.6m deck system. A section of the existing portland cement concrete roadway will be removed and replaced with a steel reinforced concrete pad, 455mm below the surface of the existing road surface. Girders will be placed on grade, with the FRP deck attached to the top flange of these girders. Instrumentation conduits are provided to bring the sensing leads back to the data logging and high-speed data acquisition systems required.

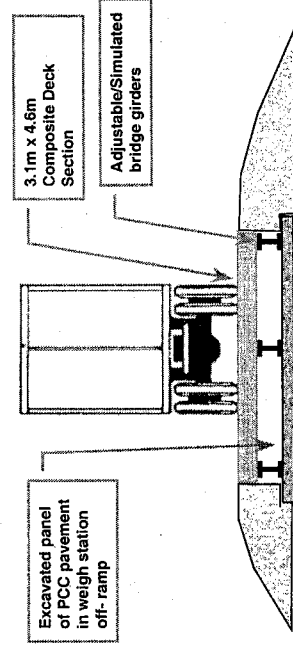


Fig. 10 Cross sectional view of the composite deck layout and integration into the roadway for the weigh-in-motion station at Interstate 81 Troutville, Virginia.

The deck test bed facility is designed to facilitate rapid removal of the deck and to accommodate new and experimental deck and sensor technologies. Controlled vehicle field tests will be conducted in conjunction with VTRC. Decks that have been subjected to specified periods of service will be removed and inspected at the university. This unique capability will allow determination of damage mechanisms and environmentally induced deterioration and correctly correlates it to sensor measurements. This presents a valuable opportunity to validate and adjust the focus of service life prediction schemes under development.

Further information on this effort is forthcoming and will be reported in latter publications and oral presentations.

(2) Future Fiber Optic Sensing Technologies

(a) FRP process monitoring

The least expensive high production process for fabricating constant cross-section FRP composite products is pultrusion (see Figure 11). The pultrusion industry currently supplies about 150,000 tons/yr. of polymer composites worldwide and is growing by ~10% annually. This is primarily a U.

S. industry, with ~65% of the products produced in the U. S. and most of the remainder in Europe.

Pultrusion produces constant cross-section shapes similar to thermoplastic and aluminum extrusion, except that continuous fiber is impregnated with a resin in a resin dip-bath prior to being pulled through a heated die of the desired cross-sectional shape. In the original pultrusion process, dry continuous unidirectional fiber bundles were pultruded. Currently, unidirectional, woven, and stitched fabric forming cross-ply and quasi-isotropic laminates are fabricated by the pultrusion process. Another variation of the dip-bath pultrusion process is the continuous resin transfer molding (CRTM) pultrusion process where resin is injected into a dry fiber pre-form as it is pulled through the die.

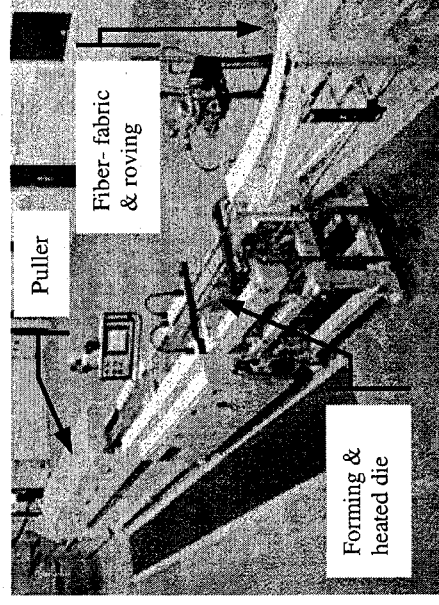


Fig. 11 A pultrusion machine for the high rate production of constant cross-section FRP composite laminates and structural shapes.

In the all of the FRP bridges applications sited above, pultrusion was used to produce some or all of the parts. Not surprisingly their low cost compared to FRP composites produced by other methods, is the primary driver for their popularity in designs. However, the costs are still high in comparison to conventional construction materials, and efforts are underway by material suppliers and manufacturers to reduce these costs. Reducing scrap, increasing the speed of production, and producing structurally efficient parts are three of the primary means the industry is looking to for improved economics.

Making these changes requires a careful analysis of the process and changes in resin and fiber performance during the inline consolidation. This close inspection of the pultrusion process reveals that highly variable conditions can occur in the forming/curing die as a result of variations in compaction pressure, temperature and the viscosity

evolution of the resin upon cure. Thick section pultrusions present the greatest challenge to ensuring proper cure and minimal residual manufacturing stress. In addition, complex fiber architectures are needed to combine cost effective designs with structurally optimal performance. These often involve fabrics with combinations of carbon and glass fiber. Hybridization and anisotropy of these fiber architectures result in residual stresses that can compromise the quality performance of the part; i.e. leading to cracking within the plies. Thus, with the ability to point-wise monitor the changing conditions during process design and manufacturing, one can optimize the pull speed, force and curing conditions throughout the die. The ability to measure variables like real-time viscosity, temperature, die pressure, resin cure state and residual strain will enable the fabricators to push the limits of production and shape design.

Thus, it has been proposed by several researchers that fiber optic sensors be incorporated in the pultrusion process to monitor details such as compaction pressure, temperature, residual strain build up and degree of cure. The sensors noted above in the field applications can be directly used in such a processing monitoring configuration. However, other sensor types are needed to assist in the characterization of the pultrusion kinetics while remaining benign to the process itself.

Miniature Pressure-Temperature Transducer:

F&S, Inc. has developed a high temperature miniature optical fiber pressure transducer. The sensor is a modified version of an acoustic transducer, miniaturized to enable embedding into a composite for the measurement of both resin pressure and temperature. The prototype **TSPI** sensor is shown in Figure 12, photographed next to the edge of a US coin (dime).

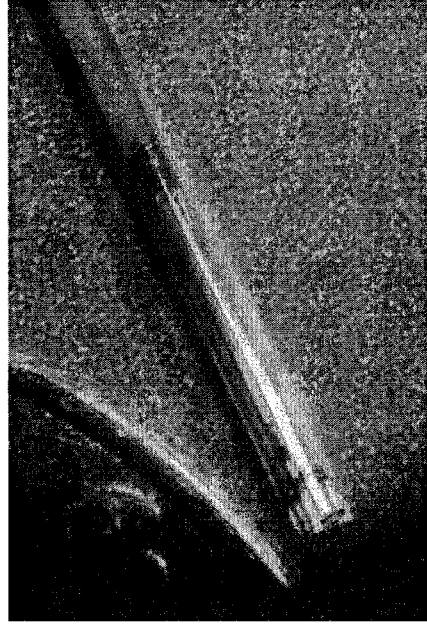


Fig. 12 Photograph of actual **TPSi** sensor relative to a dime. The sensor is around 0.5 mm in diameter with a pressure resolution of better than 0.1% F.S. (500 psi

full scale) and a temperature resolution of 0.25% F.S. (200 °C full scale). A prototype sensor was tested over cycles of pressure and cycles of temperature; the sensor was found to have minimal hysteresis and be very repeatable.

Flow Front Sensor: One of the important issues in liquid composite molding (LCM) (e.g. pultrusion CRTM and resin transfer molding) is the complete saturation of the preform by the resin to reduce the likelihood of voids or dry spots in the structure. These aspirates adversely affect the structural integrity of the part. While there have been efforts in developing reliable mold filling simulations for LCM, very few successful flow sensing systems exist for detecting actual resin arrival during mold filling. The feasibility of using optical fibers with long period gratings (LPG) as sensors for monitoring flow in the RTM process has been investigated by F&S, Inc. An advantage of using LPGs is that they are more robust and less susceptible to background noise than simple bare fibers. Furthermore, the location of resin arrival can be easily identified as the signals from each LPG uniquely correspond to predetermined wavelengths along the source spectrum.

The principle behind the LPG sensor is that germania doped fused-silica glass is photosensitive such that fiber exposure to certain wavelengths of light, particularly 244 nm, will cause the refractive index of the glass to increase slightly⁷⁾. If the fiber is exposed to a periodic index variation, the refractive index of the optical fiber is modulated forming a structure analogous to the Bragg gratings formed by crystal lattices. This grating, based on its periodicity, will selectively reflect wavelengths. A schematic of an optical fiber grating (shown in Figure 13) and illustrates how the LPG interacts with light propagating in the fiber. The system functions as an on/off sensing mechanism where the LPG phase matching condition is disrupted when the environmental refractive index exceeds the index of the fiber cladding.

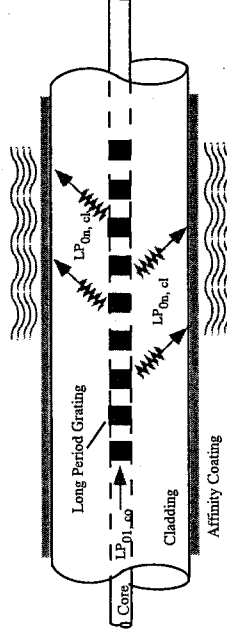


Fig. 13 Schematic of long-period grating sensor.

Specifically, these sensors can be used effectively in monitoring resin infusion in the

CRTM process, where the die limits the time the resin has to infuse the fiber preform. Federal regulation will soon enforce that the dip-bath method of resin infusion with vinyl ester and polyester resins incorporating volatile styrene will be restricted. Thus, the CRTM method of pultrusion will become a necessity in the future. The LPG sensor can provide critical inline information regarding the resin infusion front and based on resin viscosity and pull speed.

(b) Advances in acoustic sensing

With the advent of FRP composites in the civil infrastructure, questions concerning the field inspection of these structures arise. In many composite applications acousto-ultrasonic techniques have proven successful in measuring changes in stiffness and alerting to the presence of various types of damage (e.g. delamination and matrix cracking). Moreover, as the cost of FRP materials is high in comparison with convention construction materials, reducing the cost of in-service inspection may help to speed acceptance. Thus, several organizations have begun studying low cost alternatives to traditional larger piezoelectric transducers that require pre-amplification. The broad band IFPI AE sensor discussed above is an excellent example of such a system, where in-plane acoustic energy can be sensed via a small and noninvasive transducer that requires no pre-amplification. However, there are presently no optical methods for examining the out-of-plane modes required to fully describe the acoustic signature.

Resonant frequency optical fiber AE sensors:

Measurement of out-of-plane acoustic energy has lead to a the development of a resonant-type sensor consists of a single-mode optical fiber polished to obtain a 45° endface. The fiber is aligned parallel to a mirrored glass or silicon substrate and attached in a cantilever geometry, shown in Figure 14. The fiber is aligned parallel to a mirrored glass substrate at a distance, D, away. As shown in the beam trace of Figure 15, a low finesse Fabry-Perot cavity was formed between the fiber and substrate, which leads to a reflection from the fiber/air boundary and the air/substrate boundary. The two reflections generate interference fringes with any change in the cavity spacing, D. In response to an acoustic wave, the fiber cantilever will resonate at its natural frequency, which can be tuned by selecting the appropriate fiber size and length.

The resonant-type acoustic emission sensor operates on the principle that acoustic emission

causes the cantilevered fiber to resonate in its first vibration mode, which is given by:

$$f = \frac{1}{2\pi L^{2/3}} \sqrt{\frac{12EI}{M}} \quad (2)$$

where L is the length of the cantilevered optical fiber, E is the modulus of elasticity of silica, I is the moment of inertia, and M is the mass of the fiber. From Eq. (2), the resonant frequencies for fiber cantilever beams ranging in length from 1-25 mm's can be adjusted between 98.5 to 0.44 kHz.

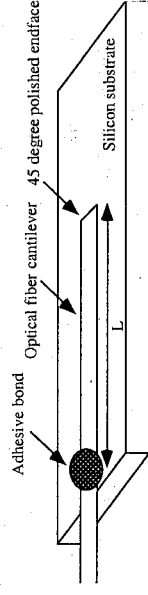


Fig. 14. Schematic of resonant-type optical fiber acoustic emission sensor.

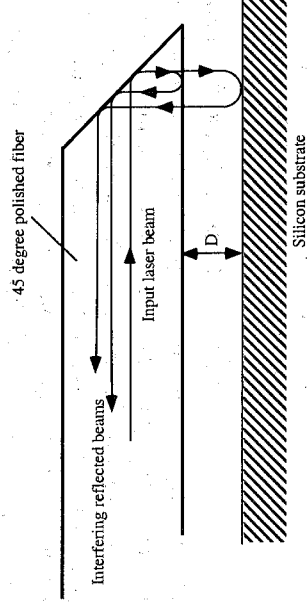


Fig. 15 Ray trace of resonant-type optical fiber acoustic emission sensor.

A prototype cantilever AE sensor was fabricated on a small piece of mirrored glass with a gap of 59 μm and length of approximately 5 mm. The sensor was then surface-attached to a 3/8" thick aluminum plate and coupled to a piezo. Voltage applied to the piezo was varied while monitoring the sinusoidal transfer function on the oscilloscope screen. After biasing the signal at the center of the linear region, a pencil lead break test was used to test the operation of the sensor. An FFT of the signal indicates a well-isolated resonant frequency of 3,645 Hz, which is quite close to the 3,900 Hz predicted.

Silicon microcantilever approach: F&S, Inc. is also developing silicon microcantilevers for resonant-type AE sensors. Silicon microcantilever beams (see Figure 16) are used primarily as the probe in Atomic Force Microscopes to resolve fine surface structures of materials. The

microcantilevers are fabricated in mass quantities, resulting in extremely low cost per piece.

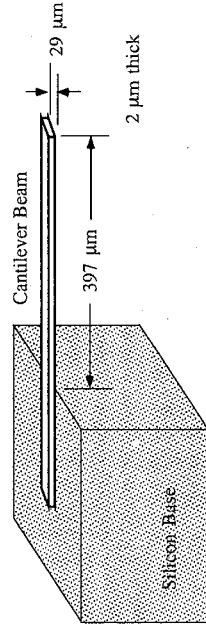


Fig. 16 Cantilever beam under evaluation by F&S.

Similar to the cantilevered fiber described in the previous section, the micromachined silicon cantilever beam resonates at its natural frequency when an acoustic wave containing the resonant frequency encounters the sensor. By designing the microcantilever appropriately, a range of resonant frequencies can be obtained up to 200 kHz. A prototype "low profile" system is shown in Figure 17.

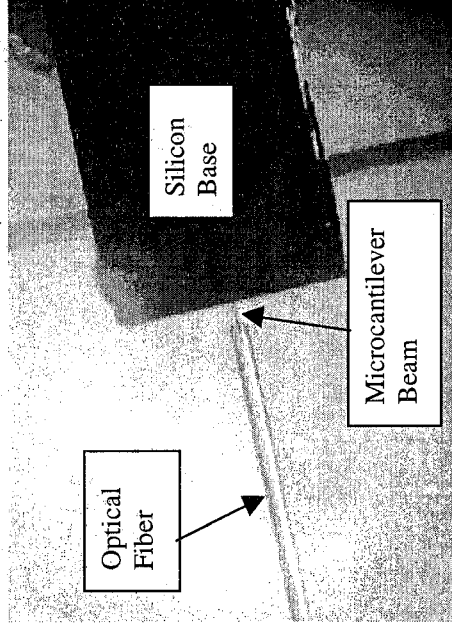


Fig. 17 Top view of 45° polished optical fiber placed under a microcantilever beam to obtain a low-profile AE sensor.

These low profile sensors show the greatest promise for implementation within the composite or adhered to the structure given the appropriate encapsulation and protection. Coupling these sensors with acoustic generation system can make in-situ acousto-ultrasonic inspection integrated and inexpensive for civil composite, and other applications.

(3) SUMMARY

The evolution of advanced monitoring methods for composites and application of these FRP structural composite systems in the highway bridges has lead to a number of advantages. Certainly, the FRP materials themselves have the potential to provide environmental resistance and long-term

durability as well as reductions in weight enabling rapid deployment of large structures. However, the material itself makes possible the integration of noninvasive fiber-optic sensing technologies that enable long-term monitoring of various phenomena of interest to the processor and field engineer. As these two technologies mature together it is hoped that great acceptance of these systems will be made. Both have the potential to reduce first, inspection, and maintenance costs.

ACKNOWLEDGEMENT:

The authors would like to thank NASA for their finical support of this program through contract NAS-2T-4006. The authors also acknowledge FHWA & VTRC for their support through the Innovative Bridge Program (contract number 00-0337-08).

REFERENCES:

- 1) U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics, web site, <http://www.bts.gov/aboutbts.html>, 1998.
- 2) Civil Engineering Research Foundation, "Partnership for the Advancement of Infrastructure and its Renewal: Transportation Component (PAIR-T) Technology & Investment Plan," CERF white paper, 1998.
- 3) Brailsford, B., Milkovich, S. M., Prine, D.W., Fildes, J. M., "Definition of Infrastructure Specific Markets for Composite Materials: Topical Report," Northwestern University BIRL Project P93-121/A573, 1995.
- 4) Kurkjian, C.R., Krause, J.T., & Mathewson, M.J., "Strength and Fatigue of Silica Optical Fibers," *J. Lightwave Tech.* Vol. 7 No. 9, pp. 1360-1369, 1989.
- 5) Shay, W.M., "Strain gage stability measurements for three years at 150Cin air," *Expr.Mech.*, pp. 158-163, 1991.
- 6) Foster, D.C., "Fabrication, Installation and Health Monitoring of the Tech-21 Composite Material Highway Bridge," Butler County Ohio, Final Report, 1998.
- 7) Hill, K.O., Fujii, Y., Johnson, D.C., Kawasaki, B., "Photosensitivity in optical fiber wave guides: application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, 32, pp. 647-649, 1978.
- 8) Richards, D., Solomin, G., Jack, R. Thomson, D. & Dumlao, C., "Review of Field Data on the All-Composite Highway Bridge, Tech-21," International Composites Expo, 99, Session 25-B, May 10-12, 1999.
- 9) 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.
- 10) Hayes, M. D., Lesko, J. J., Haramis, J., Cousins, T. E., Gomez, J., and Massarelli, P., "Laboratory and Field Characterization of the Tom's Creek Bridge Composite Superstructure," Accepted to the ASCE, *Journal of Composites for Construction*, to appear Dec. 1999.

構造工学技術シリーズNo.12

Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring に関する公開講演会

平成11年11月15日印刷

平成11年11月25日発行

編 集 者 東京都新宿区四谷一丁目無番地

土木学会 構造工学委員会
橋梁振動モニタリング研究小委員会

発 行 者 東京都新宿区四谷一丁目無番地
発 行 所 東京都新宿区四谷一丁目無番地

委員長 大島 俊之
土木学会 三好 逸二
社団法人 土木学会

〒160-0004/電話 (03) 3355-3441(代表) ・振替・東京6-16828番