

# 複合材破壊センサを用いたインターネット利用 構造破壊モニタリングシステム

轟 章<sup>\*1</sup>, 竹内祐介<sup>\*2</sup>  
島村佳伸<sup>\*1</sup>, 杉谷恒也<sup>\*3</sup>

## Structural Fracture Monitoring with Composite Fracture Sensors via the Internet

Akira TODOROKI<sup>\*3</sup>, Yusuke TAKEUCHI  
Yoshinobu SHIMAMURA and Tsuneya SUGIYA

<sup>\*3</sup> Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1, Ohokayama, Meguro, Tokyo 152-8552, Japan

Seismic damage is significant for civil structures like bridges, highways, gas pipelines, water pipe lines and sewerage pipelines. Sewerage pipeline breakage is reported in some earthquake. It is important to know fracture of the sewerage pipelines after the earthquakes even though the recover of the sewerage pipelines are not emergent. To know the damage, a low-cost structural-health-monitoring system is required. In the present study, a new distributed fracture sensor is developed using glass composites and a tiny embeddable Internet terminal. The Internet terminal has four A/D converter channels and web-server function. This can be embedded in glass composite structures. The new fracture sensor is made from glass composites and carbon black composites. In one of the surface layers, the glass fiber is cut to make a crack starter. When large deformation is loaded, a crack start to grow, and the crack breaks electric conductance of the carbon black layer embedded in the glass composites. This causes electric voltage change, and the change is monitored through the Internet. Several experiments are performed to confirm the effectiveness of this system here. As a result, this system successfully provided the fracture information through the Internet

Key Words: Structural Health Monitoring, Sewerage Pipe, Composites, Sensor, Fracture

### 1. 緒 論

橋梁や高速道路, ガス水道下水のパイプラインなどの大型構造物に各種センサを取り付け, その構造物全体の健全性を常時または緊急時に短時間で検査する構造ヘルスマニタリング手法が注目されている<sup>(1-12)</sup>. 地震などの大規模自然災害発生時には上下水道管, ガス管, 橋梁, トンネルなどの土木構造物の破壊が同時に多数の場所で発生し, 早急に被害を把握する必要がある. しかし, このような大規模自然災害時には交通手段も麻痺している場合が多いため破壊発生の正確な情報を早急に把握することは非常に困難である. また, 現状の目視点検では中規模地震時でも, 広範囲の安全確認は多大なコストが要求される上に迅速な損傷報告

は困難である.

これらの要求に対して, 多くの研究では光ファイバセンサを構造に設置し, ひずみ情報から構造の健全性を評価している<sup>(1,2,8,11)</sup>. 光ファイバセンサは1本のセンサ設置で長距離センシングが可能であり, さらに電磁ノイズに強い利点を有する. 反面, システムに冗長性がなく, 一箇所の破断で機能が失われてしまうこと, ひずみや温度などの限られた情報しか測定できないことなどの問題点を有している.

近年, インターネットを利用した構造遠隔モニタリングが提案されている<sup>(9)(12)</sup>. インターネット利用の場合, センサ種類は無制限で, 本来分散型でないセンサを分散型に配置可能であり, システム冗長性がある. このため, インターネット利用構造ヘルスマニタリングが注目を集めている. しかし, 実機構造に設置したセンサをインターネットに接続するにはEthernetインターフェース付属のPCやデータロガーが必要であり, 取り扱いが困難であった. このため, 構造ヘルスマニ

<sup>\*</sup>原稿受付

<sup>\*1</sup>正員, 東京工業大学 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 1-12-2).  
Email: atodorok@ginzamstitech.jp

<sup>\*2</sup> 東京工業大学 大学院

<sup>\*3</sup> (株)電業社機械製作所・静岡県三島市三好町 3-27

タリング用の小型のインターネット接続端末開発が望まれていた。

下水道管は地下に埋設されているため、地震時には通常は大きな被害を受けない。しかし、多数の分岐やマンホールなどの不連続点が存在し、これらの不連続の箇所での地震時の被害が想定される<sup>(13)</sup>。下水道の健全性確認は緊急性を有しないが、衛生上の問題があること、多数の危険箇所の点検を人手に頼ると点検コストが非常に高くなる問題がある。このため、破壊センサを設置し、比較的短時間・低コストで破壊を検知するシステムの必要性がある。下水道には光ファイバのインターネットが設置される例があり、インターネット利用の遠隔モニタリングが期待されている。

そこで本研究では、まず初めに機械駆動部分のない小型のインターネット接続可能なセンサ接続端末を開発し、その実証試験を実施した。さらに下水道管の破壊をモニタすることを目的として、複合材を使った低コストの簡易破壊センサを開発し、これらを既存のインターネットケーブルに接続することで破壊箇所を遠隔地からモニタリングするシステムを提案する。さらに実際の下水管を模擬した部分構造に設置して実証試験を実施する。

## 2. モニタリングシステム

### 2.1 モニタリングシステムの構成

モニタリングシステムの構成の概略を図1に示す。下水道構造の破壊検知対象の部位に本研究で開発した複合材のセンサを設置し、複合材センサ構造にインターネット接続端末を埋め込み、インターネットケーブルに接続することでインターネットに接続する。下水道管は延性材料の鉄筋で補強されているため、破壊時には大変形を伴う。そこで、大きな変形に対応する複合材センサを設置し、この変形をインターネットで遠隔モニタリングする。インターネット接続端末は複合材構造に埋め込み可能な程度に小型化する。ここではこの小型のインターネット接続端末（Internet-Station）を略して i-Station とよぶ。

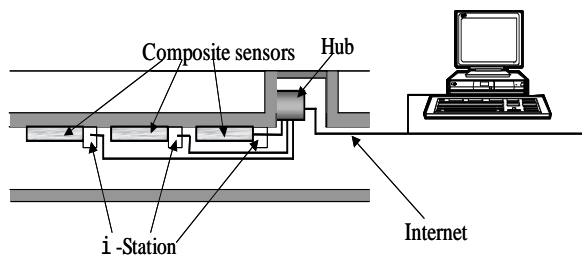


Fig.1 Schematic image of monitoring system

### 2.2 インターネット接続端末 (i-Station)

インターネット接続端末は、複合材センサ部分の出力電圧変化を A/D 変換機で検知し、WEB サーバー機能により、インターネット上に情報を送信する。A/D 変換機能は 4 ch あり、端末一つで 4 箇所の破壊検知が可能である。37mm x 47mm の基盤に両面実装されており、複合材に埋め込み可能であるほどに小型である。接続端末 (i-Station) の写真を図2に示す。回路は PIC 16F877 と Ethernet IC の二つの IC からなる超小型端末である。インターネットから WEB サーバーポートにアクセスされると、A/D 変換した結果を Http プロトコルで送信し、受信側では図3のような WEB 画面上で表示される。枠内の 4 つの数字が 4 箇所の電圧の測定結果を示し、0 ~ 5[V] までの電圧を 0 から 1023 までの 1024 段階で表示している。

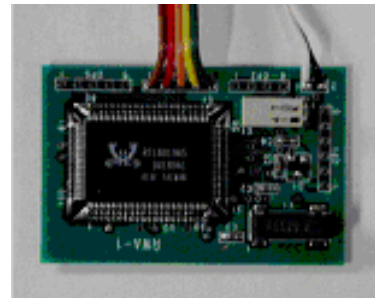


Fig.2 Configuration of the i-station

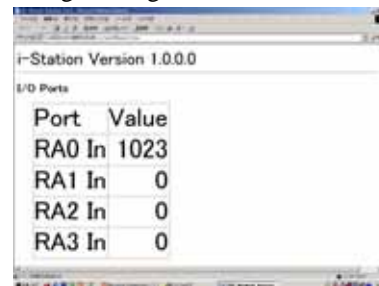


Fig.3 Display window of the measured results

### 2.3 複合材破壊センサ

複合材破壊センサは下水管破壊時の構造の大変形を電圧変化にするセンサである。外側は GFRP 製で電氣的に絶縁されており、内部にカーボンブラックをエポキシで固定した導電性シートが埋め込まれている。GFRP は剛性を保持する基盤部と成形前に繊維を切断して、大変形時に埋め込み導電性シート部分の破壊を誘発する表層部からなる。繊維を切断したき裂部分にも成形時にエポキシ樹脂が浸透するため、カーボンシート部は完全に電氣的に絶縁されている。しかし、繊維切断部の強度は非常に小さいため、引張負荷に対し

で容易にき裂が発生し、このき裂がカーボンシート部に進展する．これによりセンサは導電性を失う．

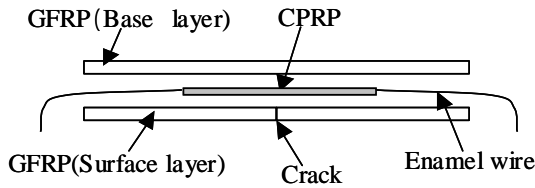


Fig. 4 Schematic image of a fracture sensor

### 3. 接続端末 (i-Station) の実証試験

実構造においては、接続端末 (i-Station) は防水と保護のため、複合材破壊センサのガラス織物マットとエポキシの複合材料に埋め込んで使用される．そこで、この使用環境を想定して以下に示す 2 種類の動作実証試験を行った．接続端末をガラス織物複合材料に埋め込んだ例を図5に示す．

- (a) 複合材料中に埋め込んだ端末に電源を供給した状態で一週間稼働させ、PC 側から正状動作の確認を実施した．同時に、接続端末の表面温度を熱電対によって測定した．
- (b) インターネットケーブルで PC に接続した複合材料中に埋め込んだ接続端末を炉の中に入れ、環境温度を変化させて測定の正確度を確認した．AD チャンネルに 5V を負荷し、Web 画面上で動作試験を実施した．試験温度は 30 から 100 まで 10 ごとに実施した．

試験(a)で測定した接続端末の表面温度の時間変化を図6に示す．図中、横軸は時間(日数)、縦軸は温度である．複合材中に埋め込まれているが機械的駆動部分が無いために駆動中も温度上昇はなく、一定温度であることがわかる．また、試験(b)の結果、試験温度 100 でも 5V の測定値を Web 画面上で正確に表示し、接続端末が少なくとも 100 までは正常に動作することが確認された．下水環境では稼働温度として十分実用的であると判断される．なお、100 を超えると故障した．このことから実用的には 100 未満での使用が望まれる．

以上の結果から、接続端末 (i-station) を実際の下水環境でモニタリングシステムに適用する際に、複合材料中に埋め込んで使用することが可能なことが確認された．



Fig.5 Embedded i-station in glass composites

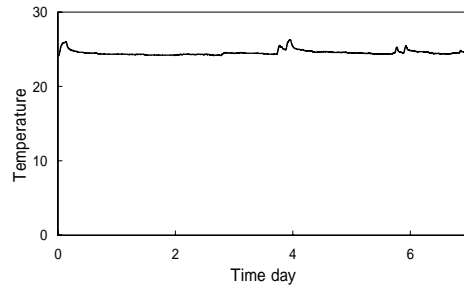


Fig.6 Surface temperature of the i-station terminal

### 4. 複合材破壊センサの実証試験

#### 4.1 試験片作成および実験方法

先に図 4 に示した複合材破壊センサ試験片を作成する．常温硬化型エポキシ樹脂に、カーボンブラックを混合した炭素体積含有率が 20% のカーボンシートを作成する．このカーボンシートから厚さ 1 mm 長さ 400 mm の導電性シートを作成する．市販のガラス織物プリプレグを用い、基盤部で 4 層積層する．次に、表層のガラス織物プリプレグの繊維を切断し、このき裂スター部分と基盤との間に作成したカーボンシートを挟み込む．カーボンシートには電極として厚さ 200  $\mu$ m の銅箔を設置し、この銅箔にエナメル線をはんだ付けしてエナメル線を試験片端部から外まで配線する．これをアルミ平板ではさみ圧力をかけて、130  $\times$  1 時間 30 分電気炉内で加熱成形し作成した．この平板から矩形試験片を作成した．作成した試験片の寸法は (1.5  $\times$  20  $\times$  110mm) である．

構造物に設置した状態を想定して、この試験片を図 7 に示すようにアルミプレート (2.0  $\times$  25  $\times$  170mm) にボルト (M2) で 4 ヶ所固定し、試験機にて 4 点曲げ試験(外スパン 160mm, 内スパン 20mm, 変位速度 1mm/min)を実施し、荷重点変位と基盤側表面層ひずみを測定した．

カーボンブラックシートに取り付けたリード線に

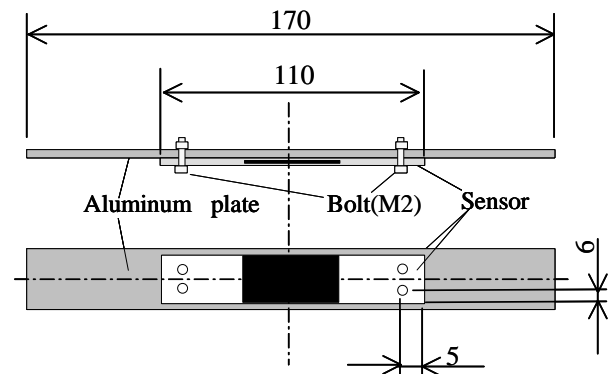


Fig. 7 Composite sensor with aluminum plate

は 120 の抵抗を直列に接続して 1.5V の電圧を負荷して試験片に負荷される電圧を試験中測定した。曲げ試験の実験装置を図 8 に示す。

なお、ここで複合材破壊センサーの印加電圧を直接測定しないで直列接続の 120 抵抗の電圧を測定したのは、センサ破壊時に確実に電圧 0 V の出力を測定するためである。

破断ひずみを制御するため、表面層の繊維切断部分をき裂とみなし、センサ部の破壊をモード き裂の進展として表面層の積層枚数を変えることで破断ひずみの変化を考察する。このため表面層が 1,2,3,4 層の 4 種類の試験片を作成し、これらの試験片で曲げ試験を実施し、破壊ひずみを測定した。

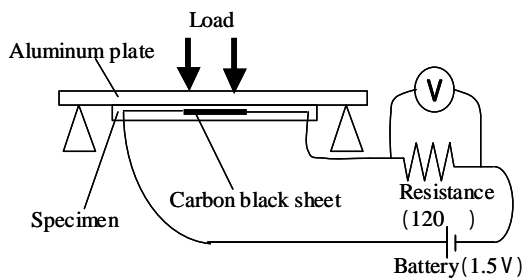
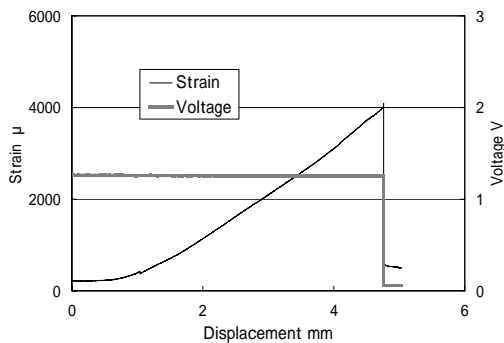


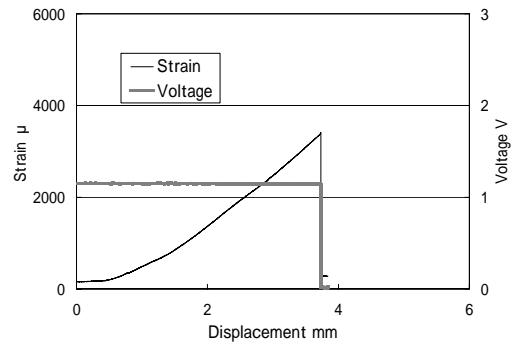
Fig.8 Experimental setup

#### 4.2 試験結果と考察

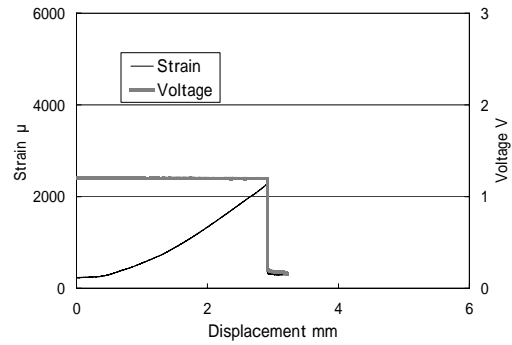
表面層が 1 層から 4 層の実測した基盤層側ひずみ-荷重点変位、電圧-荷重点変位関係を図 9(a)~(d) に示す。横軸は荷重点変位、縦軸は負荷、ひずみ、電圧である。図 9(a)で、変位約 4.5mm でセンサの繊維切断部にき裂が発生し、同時にポップインが生じている。ポップインと同時にカーボンシート部にき裂が達し電圧が低下した。表面層が 1 層から 4 層のそれぞれの破断部側面写真を図 10(a)~(d) に示す。図に示すように表面層とカーボンシート部は破壊後も完全に接着しており、繊維切断部で発生したき裂の進展でカーボンシート部が破断していることがわかる。



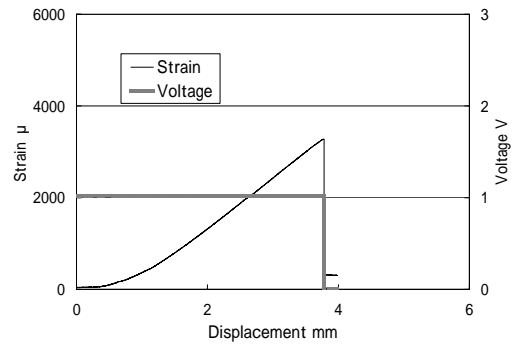
(a) One ply



(b) Two plies



(c) Three plies



(d) Four plies

Fig.9 Experimental results

実測した破壊ひずみと表面層厚さの関係を図 11 に示す。横軸は実測表面厚さ、縦軸は破壊ひずみである。表面厚さをき裂長さ  $a$  とみなすと破壊ひずみ  $\varepsilon_c$  は応力拡大係数  $K$  とき裂長さの関係式  $K = \dots$  (  $a$  ) と応力とひずみの関係から次式で推定される。

$$\varepsilon_c \propto 1/\sqrt{a} \quad (1)$$

図中実線部は両対数関係において最小二乗法で直線近似した場合結果である。この結果、傾きが -0.5 であり、式(1)の  $1/\sqrt{a}$  に比例する関係と合致していることがわかる。このことから、表面層厚さをき裂長さとして考え枚数を調節し表面厚さを変えることで、破壊ひずみを制御できると判断できる。



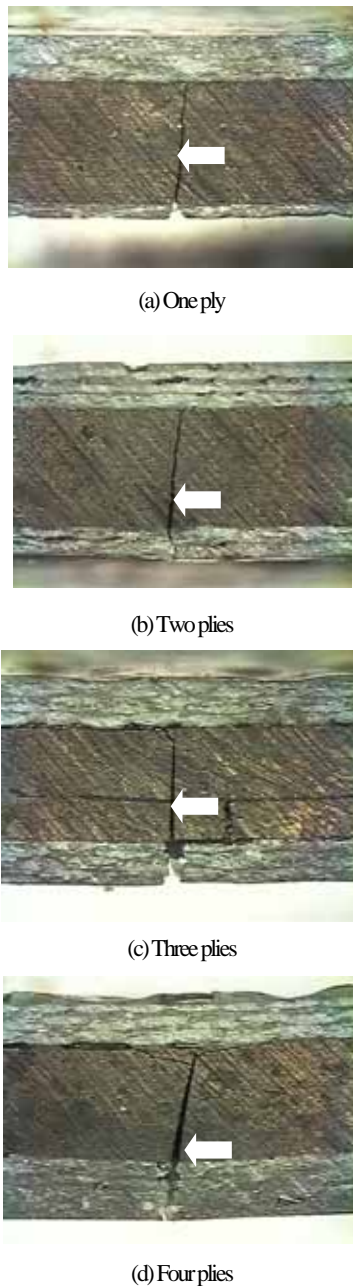


Fig.10 Cracks in composite sensors

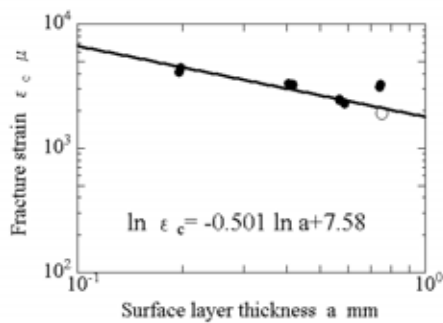


Fig.11 Relationship between fracture strain and surface thickness

しかし、図中表面層が4層のときの破壊ひずみは予想されるひずみより高い値となっている。この原因を調査するため、4層試験片で詳細に実験を実施し、破壊を観察した。具体的には表面層が4層の試験片に曲げ試験を実施して、式(1)から推定される破壊ひずみ1500 $\mu$ で試験を中断し、試験片の断面を観察する。この断面を図12に示す。図中上部の白い部分は基盤層GFRPであり、下部黒い部分はカーボンシートである。図からわかるように試験片は繊維切断部でき裂を発生する前に基盤層とカーボンシート部の界面に剥離が発生している。この剥離によって応力状態が変化したことが原因と判断される。

これは基盤層が4層であることから、表面層の増大に伴いカーボンシート層側に曲げの中立軸が移動し、ガラス繊維層とカーボンシート層の界面での応力が増大し、さらに両者の弾性率の差異に起因する微視的なせん断応力が増大されるためであると思われる。確認のため、基盤層を8層として表面層を4層とした試験片を作成し、実験を実施した。結果を図中印で示す。この結果は計算から推定される線上にある。このため、表面層が基盤層と同じ層数以上の厚さになると表面厚さによる破壊ひずみの制御ができずセンサとして有効に作用しないことがわかる。さらに小さい変形で破壊するためには基盤層厚さを増大させる必要があることがわかる。



Fig.12 Debonding between carbon sheet and glass composites

## 5. モニタリングシステムの適用例

提案システムを用いて、実際に下水管の破壊をモニタリングする試験を実施した。鉄筋で強化された下水管内(外径200mm、内径170mm、長さ400mm)に本研究で開発した複合材料破壊センサーとインターネット接続端末(iStation)を図13のように設置し、インターネットケーブルでPCに接続した。地震時の破壊は本来は下水管接続部分が覆いが、下水管破壊の一例として、この下水管に対して材料

試験機で三点曲げ試験を実施した。この装置の外観を図 14 に示す。なお、この実験ではセンサ印加電圧は5Vとした。

実験の結果、下水管が徐々に破壊し、破壊が進行した時点でセンサの出力電圧状況をモニタリングしている WEB 画面の値が 5[V]を表す 1023 から 0[V]を表す 0 になり、WEB 上で破壊が検出できることが実証された。

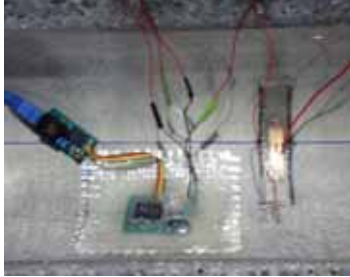


Fig.13 Sensor and connected terminal in sewerage pipe

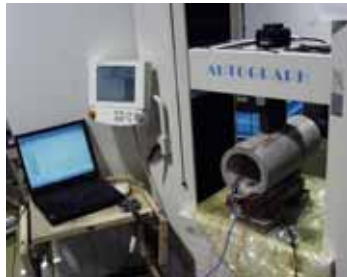


Fig.14 Experimental setup

## 6. 結論

以上、大地震時のインフラ破壊モニタリングを目的としたインターネット利用のシステムを開発し、下水管を模擬した実験的検討を実施した。得られた結果を下記に示す。

- (1)導電体を埋め込んだ GFRP センサと超小型インターネット接続端末によるインターネット利用の破壊モニタリング装置の提案を行った。
- (2)提案手法に用いる超小型端末を作成し、信頼性試験を実施して、使用環境に耐えられることを示した。
- (3)提案手法に用いる破壊センサ試験を実施し、織物 GFRP、カーボンシートを用いた複合材破壊センサが有効であることを示した。

- (4)複合材破壊センサは、表面層の厚さを変えることで、破壊ひずみを制御可能であることを示した。ただし、基盤層よりも表面層が薄い必要がある。
- (5)提案システムを実際の下水管に適用し、このシステムの有効性を実証した。

## 参考文献

- (1) Idriss R L, Kodindouna M B, Kersey A D and Davis M A, *Smart Materials and Structures* 7, (1998) 209-216.
- (2) Brönnimann R, Nellen P M and Sennhauser U, *Smart Materials and Structures*, 7, (1998) 229-236.
- (3) [Ayres J.W., Lalande F., Chaudhry Z., Rogers C.A, *Smart Materials and Structures*, 7(5), (1998) 599-605.
- (4) Pines D J and Lovell P A, *Smart Materials and Structures*, 7(5), (1998) 627-636.
- (5) Aktan A E, Helmicki A J and Hunt V J, *Smart Materials and Structures*, 7(5), (1998) 674-692.
- (6) Fuhr P.L., Huston D.R., Nelson M., Nelson O., Hu J., and Mowat E. J. of *Intelligent Material Systems and Structures*, 10, (1999) 293-303.
- (7) Sohn H., Czarnecki J. A., Farrar C.R. , J. of *Structural Engineering*, November, (2000) 1356-1363.
- (8) Hampshire T.A. , Adeli H., *Journal of Constructional Steel Research*, 53(3), (2000) 267-281.
- (9) Xu R., Chen J., and Kwan C., *Proceedings of SPIE*, 4389, (2001) 47-50.
- (10) Mangal L., Idichandy V.G., and Ganapathy C., *Ocean Engineering*, 28, (2001) 689-705.
- (11) Tennyson R C, Mufti A A, Rizkalla S, Tadros G and Bemmokrane B, , *Smart Materials and Structures*, 10, (2001) 560-573.
- (12) Todoroki A, Shimamura Y and Inada T.,., *Structural Health Monitoring 2000*, edited by F.K.Chang, Technomic, Lancaster PA USA, (1999) 571-580.
- (13) Chiba Y, Jo T and Ito N, *Water Science Technology*, 34(3-4), (1996) 111-115.