

FBG 型光ファイバセンサを用いた構造ヘルスモニタリングシステム

Structural Health Monitoring System Using FBG-based Optical Fiber Sensors

岩城英朗*・柴慶治**・武田展雄***

Hideaki IWAKI, Keiji SHIBA and Nobuo TAKEDA

*正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

**正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 (同上)

***Ph.D. 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科 (〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

Examples of structural health monitoring (SHM) system using FBG-based optical fiber sensors for the building structure are presented. A series of FBG-based optical fiber sensor modules are developed to apply in SHM system for damage tolerant building structures. The building is equipped with several passive dampers for absorbing earthquake input energy, and the SHM system is focused to monitor performance of these dampers. Two examples of SHM system are verified on static measurement and dynamic measurement in earthquake.

Key Words: structural health monitoring, fiber bragg grating, optical fiber sensor

1. はじめに

「構造ヘルスモニタリング (Structural Health Monitoring)」とは、構造体にあらかじめセンサ等の検知機器を設置し、これらから得られるひずみ、温度、加速度などの情報をもとに構造体の外乱に対する損傷や経年劣化の検知、さらに構造体全体の健全性を迅速かつ正確に診断することを目的として研究開発が行われている技術である。

同技術は1990年代、米国における軍事・航空宇宙分野において萌芽したが、同時期社会問題化していた道路・橋梁など、社会基盤構造物の老朽化への懸念から、これらの損傷・劣化の兆候をいち早く、かつ正確に検知し、補修計画を補助する手法として適用するための研究・開発が今日に至るまで非常に盛んである。

かたや日本国内では、兵庫県南部地震(1995)において建築・土木構造物が被った甚大な被害が契機となり、これらに対する損傷診断技術として、構造ヘルスモニタリング技術を適用しようという機運が高まっている。

さらに、建築基準法の改正施行(1998)による性能設計指針導入に伴い、設計者が構造物の耐震性能を保証する手法としても、同技術の適用が有用と考えられている。¹⁾

一方、構造ヘルスモニタリング技術は、構造体の各所に配置されたセンサ、および計測システムと、これらから得られた計測データを処理・診断するコンピュータなどをハードウェア、ソフトウェア双方の面で組み合わせた複合技術と考えることができる。

この主要な構成要素であるセンサにおいて現在、非常に有用と考えられているのが検知部に光ファイバを用いたセンサ(光ファイバセンサ)である。

光ファイバセンサは従来の電気式のセンサと比べて概ね、

- ・ 広帯域性、低損失性
- ・ 小型、軽量
- ・ 可とう性
- ・ 優れた機械的強度
- ・ 相互不干渉性
- ・ 無誘導性、防爆性
- ・ 高い絶縁耐力、耐腐食性
- ・ 長寿命

などの多くの利点を持つ。

そこで本論では、構造ヘルスモニタリングシステムの建築・土木構造物への適用研究として、光ファイバセンサを用いた構造ヘルスモニタリングシステムを提案し、兵庫県南部地震以降急速に広まった、制震(振)・免震などの機構を有する損傷制御型建築構造物に対して実装、運用を行い、その性能を検証する。

2. 光ファイバセンサの開発

2.1 FBG 型光ファイバセンサ

光ファイバセンサは概ね、ひずみゲージ等、従来の電気信号を用いたセンサに比較して多くの利点を持つ。

例えば、ほとんどの方式の光ファイバセンサは電磁的なノイズとは無縁のため、従来は計測信号に対するノイズ対策を施す必要があった屋外等の環境においても簡便に使用することができる。

また、広範囲に計測点を配置する必要がある大規模プラント等への適用に対しても、光ファイバが持つ低損失性（光量損失が 0.5dB/Km 以下）が利点となる。さらに、光ファイバ自体の引っ張り強度は非常に高く、7Kg 程度の荷重にも耐えることから、広帯域な計測可能なセンサ素材として非常に有用であり、長期耐久性についても、光ファイバ製造時のスクリーニング試験により、20 年間の破断確率が 1.8×10^{-5} /Km 程度という水準にあるため、長期間の使用を想定する建築・土木構造物への適用においても、非常に有用であると考えられる。²⁾³⁾

光ファイバセンサは被測定量・検知手法に応じて様々な方式があるが、本論において用いたのは、ファイバブラッググレーティング（Fiber Bragg Grating；FBG）型光ファイバセンサ（FBG センサ）と呼ばれる方式である。

FBG センサは、図-1 のように光通信で広く用いられているシングルモード光ファイバに対し、軸方向に周期的に屈折率が異なる部分（ブラッグ格子）を、紫外線レーザーを用いて製作し、これをセンサ素子（検知部）として利用するものである。

FBG センサに対し広帯域なレーザー光を入射すると、検知部において特定の波長の光

$$\lambda_B = 2n \cdot \Lambda \tag{1}$$

(n:平均実効屈折率, Λ :格子の周期)

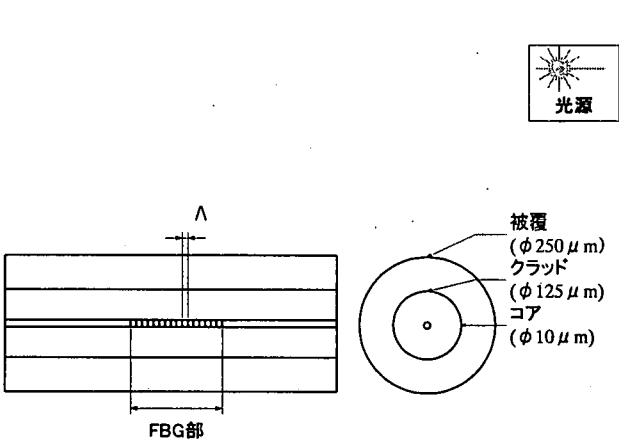


図-1 FBG センサの側面・断面図

のみが反射するという特徴を有している。

検知部が外部からの応力、あるいは温度変化により伸縮、あるいは屈折率変化を受けると、

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left[\left(\frac{d\Lambda}{dT} \right) \frac{1}{\Lambda} + \left(\frac{dn}{dT} \right) \frac{1}{n} \right] \cdot \Delta T + (1 - P_e) \cdot \epsilon \tag{2}$$

(ΔT :温度変化, P_e :実効光弾性係数 (≈ 0.22))

ϵ :印加ひずみ)

に従い反射波長は変動する。解析的および実験的にこれらの感度は

$$(\text{ひずみ感度}) \approx 1.2 \text{ pm}/\mu \text{ strain} \tag{3}$$

$$(\text{温度感度}) \approx 11 \text{ pm}/^\circ \text{C} \tag{4}$$

と求められており、ひずみ、温度のセンサとして FBG センサを使用することが可能である。

また、FBG センサは図-2 のように WDM（波長多重）方式を用いて 1 本の光ファイバケーブルに複数の検知部を配置することができる。

従来の計測のようにひずみゲージ等を用いる場合、計測点数の増加に比例して、各センサから計測システムへの配線数も増大する。特に多数の計測点を設ける大規模計測の場合、配線ケーブルも莫大な量となり、これらの容量が実装対象となる構造物に影響を与える懸念が生じる。また、計測機器においてもセンサ数に応じた多数の接続端子を設ける必要があり、これらの信頼性の低下も問題となりうる。

一方、FBG センサの使用においては、同方式を用いることにより配線数の大幅な低減、および計測機器の簡略化という点で大きく有利となると考えられる。⁴⁾

2.2 FBG センサの計測モジュール化

一方、FBG センサは光ファイバが細径の石英製であることから、建築・土木構造物へ実装する場合の設置作業および配線作業時などにおいて誤って破断してしまう懸念がある。したがって、FBG センサの検知部を容器で覆う等、何らかの保護機構（パッケージ化・モジュール化）を行う必要がある。

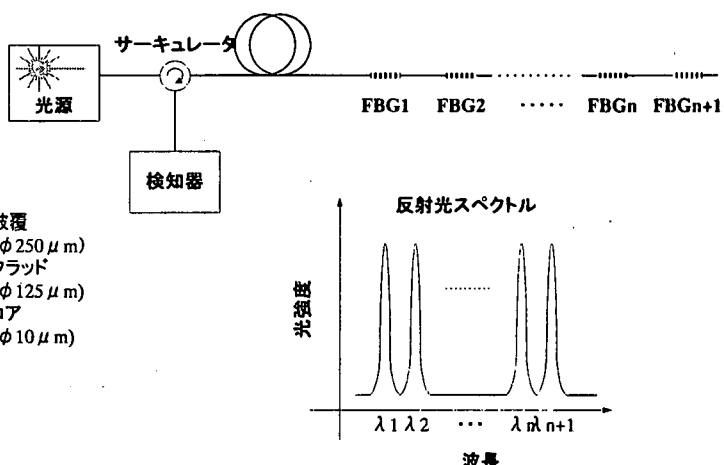


図-2 FBG センサの多重化

また、ひずみ・温度計測にとどまらずに、現行のひずみゲージ式変換器（変位計、加速度計など）と同様にFBGセンサに変換機構を加え、変位・加速度などを計測可能とすることも、パッケージ化・モジュール化で可能となると考えられる。

そこで本論においては、従来から建築・土木構造物を対象とした計測で広く被測定量としている、ひずみ、温度、変位、加速度を想定し、FBGセンサを計測モジュール化することとした。

(1) FBG ひずみ計

細径であるFBGセンサを設置作業時における不意の破断等から保護し、かつ長期計測における腐食等の影響を避けるため、図-3のように金属箔上にFBGセンサを貼付したFBG ひずみ計を製作した。

FBG ひずみ計は計測部位に接着あるいは溶接することを想定している。金属試験片に接着し、引っ張り試験を行った結果、図-4のように従来のひずみゲージと同等な特性を示す結果が得られた。

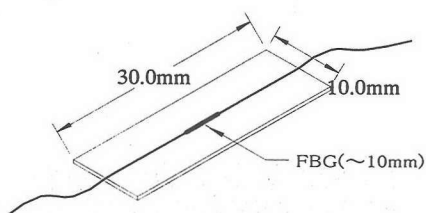
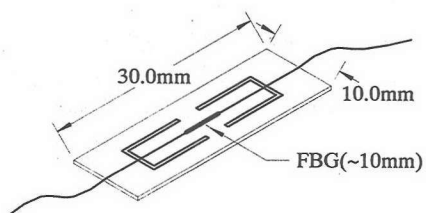
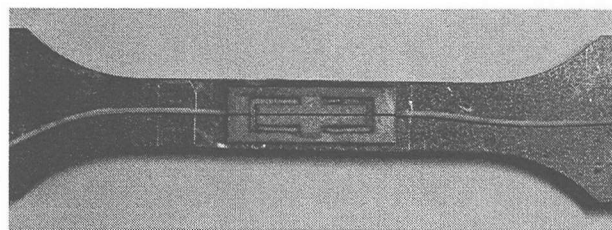


図-3 FBG ひずみ計

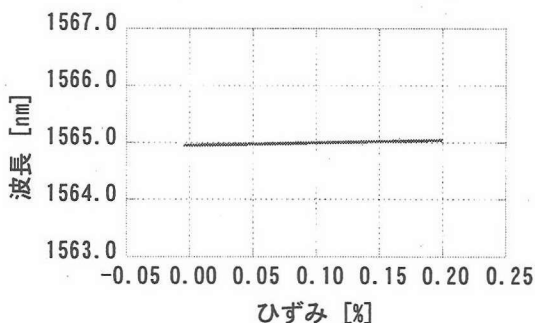


(a) 概要図

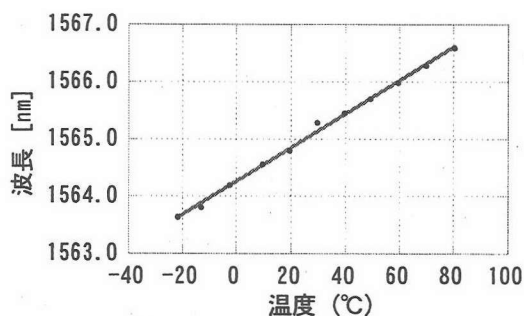


(b) 試験片貼付写真

図-5 FBG 温度計



(a) ひずみ試験結果



(b) 温度特性

図-6 FBG 温度計基本特性

(2) FBG 温度計

FBGセンサに対する温度変化によって、(3)、(4)のとおり1°Cあたり約8 μ strainのひずみ計測誤差が生じる。したがってFBGセンサによってひずみ計測を行う場合、何らかの形で温度校正を行う必要がある。

そこでFBGセンサを、図-5のように外部からの応力に対し影響を及ぼさないよう溝加工を施した金属箔状に接着したFBG温度計を製作した。

本FBG温度計はFBGひずみ計等のセンサと並行して用い、温度による測定誤差を校正することを主眼とし、絶対温度の計測については考慮していない。

FBGひずみ計と同様にFBG温度計を金属試験片に接着し、外部応力（引っ張り）および温度変化を加えた結果、図-6のように引っ張りに対しては反射波長変動がほとんどなく、温度変化に対してのみ反射波長変動が生じる結果が得られた。

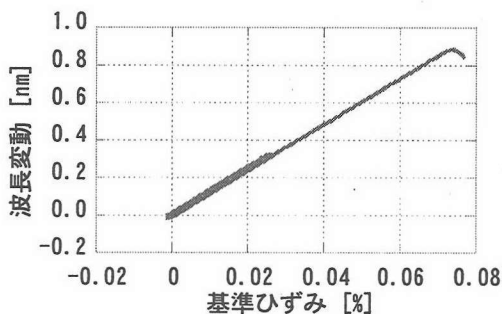


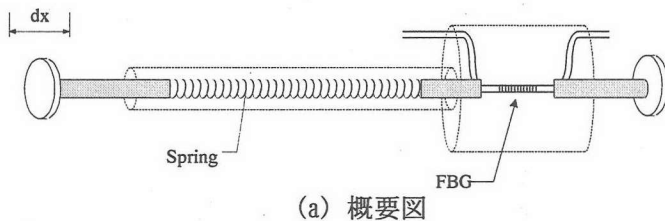
図-4 FBG ひずみ計基本特性

(3) FBG 変位計

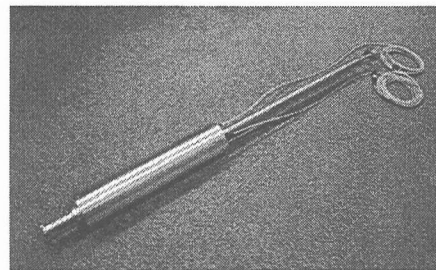
構造体各部位の大きな変形・変位を被測定量とするため、コイルばねを用いて変形を緩和し、微小ひずみと変換してFBG センサに伝達するFBG 変位計を図-7 のとおり製作した。

これに対し一定の変位量を加えた基本特性試験を実施したところ図-8 のように良好な線形性を有する結果が得られた。

次に、建築構造物の柱・梁接合部分を模擬した部材に対するFBG 変位計の実装試験を図-9 のように実施したところ、同部材に対するせん断加力に対してFBG 変位計から得られる出力値は、並行して設置したワイヤー式変位計からの出力値（せん断方向±20mm）とFBG 変位計（対角方向）との値は概ね合致しており、荷重履歴曲線も図-10 の通り得られた。



(a) 概要図



(b) 外観写真

図-7 FBG 変位計

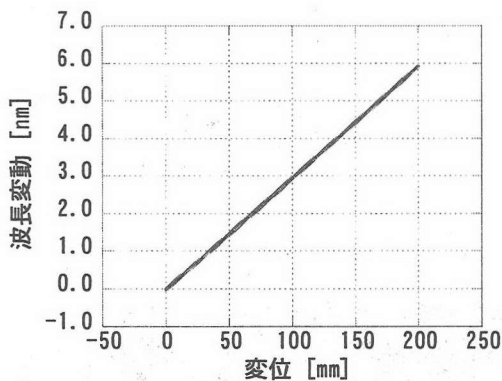


図-8 FBG 変位計基本特性

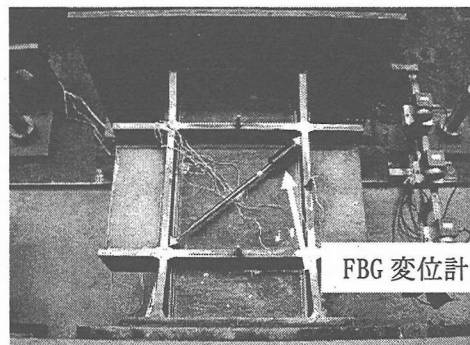
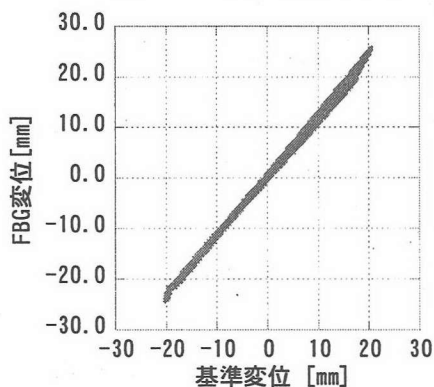
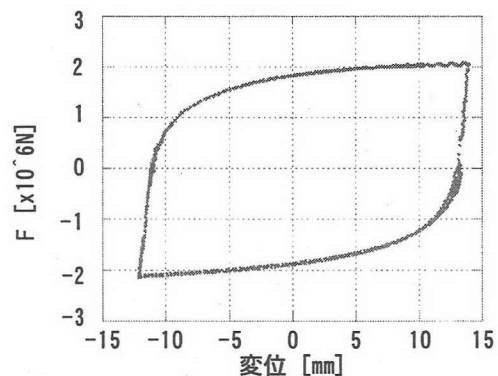


図-9 FBG 変位計実装試験



(a) 変位計との比較



(b) 荷重履歴曲線（せん断±10mm）

図-10 FBG 変位計実装試験結果

3. 構造ヘルスマニタリングシステムの実装

兵庫県南部地震以降、急速に広まり建設されている損傷制御型構造物を、本論における構造ヘルスマニタリングシステムの実装対象とした。

損傷制御型構造物は、構造体に設置された制震・(振)、免震ダンパ等のエネルギー吸収機構の働きにより、地震・風などの外力に対する応答を低減し主体フレームの損傷を抑制することを設計主眼としている。⁴⁾

これらに対して構造ヘルスマニタリングシステムを設計する際には、構造体の実装されたエネルギー吸収機構に対し、損傷の有無、および設計意図通りに外力エネルギーを吸収し、かつ吸収可能エネルギー総量以内であるか否か(継続使用が可能か、あるいは交換が必要か)を、センサ等を用いて検知・記録することが重要となる。

この考えに基づき、前項で示した FBG センサを用いた構造ヘルスマニタリングシステムを、制震・免震ダンパを備えた建築構造物に対し設計し、実装した。

3.1 制震構造物への実装事例

実装対象建物(図-11; 日本女子大学百年館(延床面積 13,891.29 m²)は極低降伏点鋼製の間柱制震ダンパを備えた制震構造物であり、地震等の外力に対し、同ダンパがせん断変形を繰り返すことによりエネルギー吸収を行っている。⁷⁾

本建物における構造ヘルスマニタリングシステムでは、これら制震ダンパの挙動の監視を主眼にセンサ配置を行うこととした。上記制震ダンパの対角に12点のFBG変位計を実装し、FBGひずみ計、FBG温度計など、計64点のFBGセンサと、12点のサーボ型加速度計(EPS;配管室へ設置)など、図-12のとおり用いた。

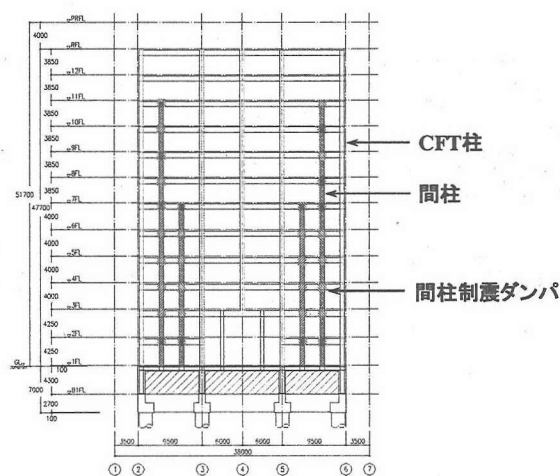
計測データは逐次インターネットを経由しモニタリングサーバに転送され、図-13のように他所からのデータ参照・解析を可能とした。

本建物に対して毎正時においてFBGセンサ24点および加速度計12点の計測(1分間)・記録を実施しており、さらに地震発生時は加速度計のトリガ検知により、上記センサの計測・記録を実施する。記録された計測データは計測機器に接続されたコンピュータ(PC)に一旦保存され、PHS回線を用いてインターネット上のモニタリングサーバに転送される。各々の計測データは同サーバ上でデータベース化して保管され、各所から参照・解析が可能としている。

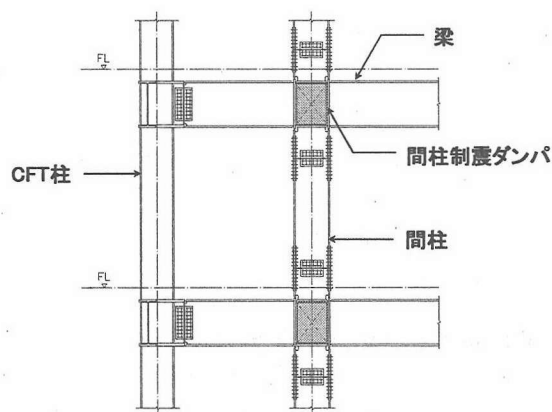
同システムは2001年9月に運用開始し、以後の計測データが一括して保管・運用されている。



(a) 建物外観



(b) 建物軸組図



(c) 間柱制震ダンパ

図-11 制震構造物への実装事例

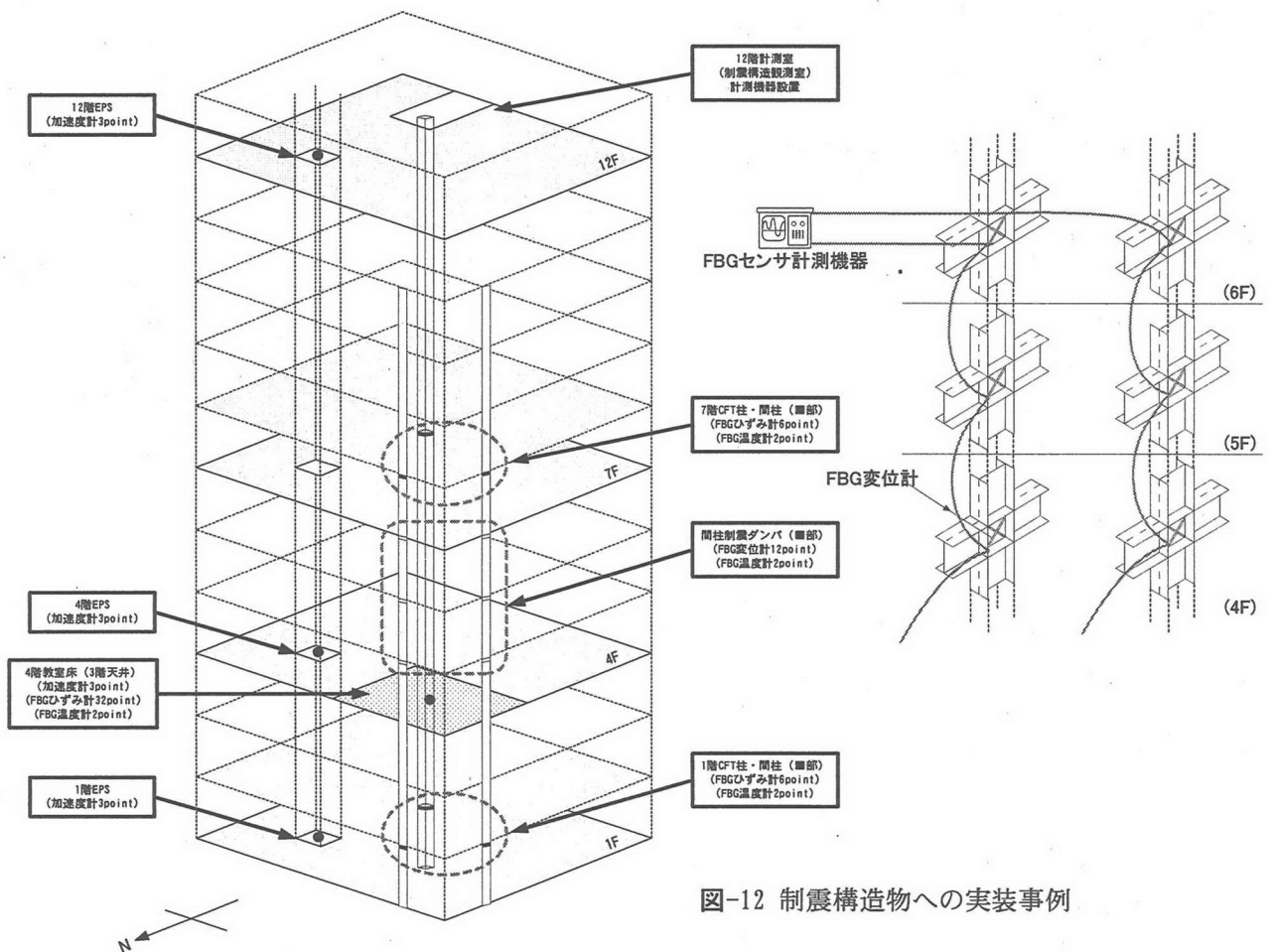


図-12 制震構造物への実装事例

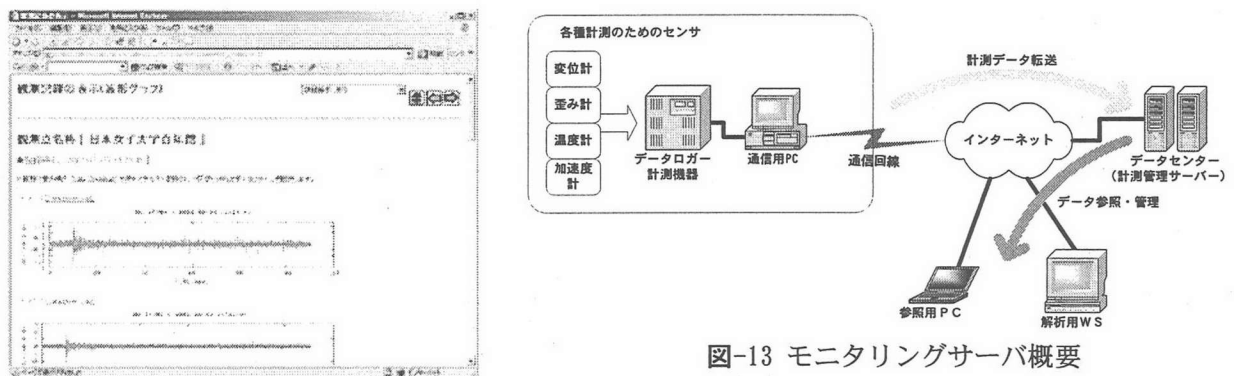


図-13 モニタリングサーバ概要

3.2 免震構造物への適用事例

免震構造物（慶応義塾大学日吉キャンパス新研究棟（来往舎）（延床面積 18,606.28 m²））においても FBG センサを用いた構造ヘルスマニタリングシステムを実装した。

免震構造物においては建物上部架構と下部架構の間に設置された高減衰積層ゴム（免震ダンパ）などの働きにより地震時などの応力を吸収する。

したがって、本建物においては、図-14 のとおり計 4 点の FBG 加速度計を免震ダンパの上下に設置し、地震時等の上部・下部架構双方の水平加速度を検知・記録することとした。

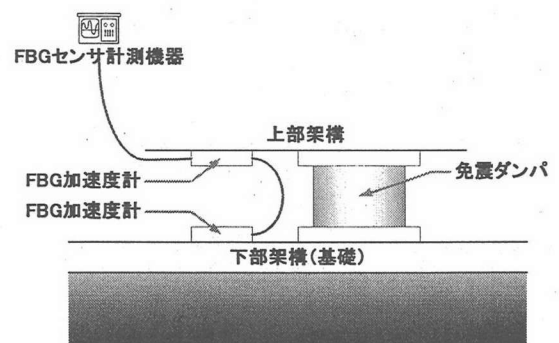


図-14 免震構造物に対する FBG センサ適用

4. 計測例および考察

各々の構造ヘルスモニタリングシステム実装事例において、現在までに得られた計測結果を示す。

まず、各事例で建物内各所に設置した FBG センサを接続した光ファイバケーブルに対して、光スペクトラムアナライザ（アドバンテスト社製 Q8384、および内蔵 EE-LED 光源）を接続し、各事例で設置した FBG センサの確認を行った。

図-15 に示すとおり、各事例で設置された 4 点、あるいは 6 点の FBG 加速度計、FBG 変位計からの出力値（反射光スペクトルピーク部）が確認できる。

次に、制震構造物の実装事例において、地震時における制震ダンパの応答を漏らさず検知するため、高速 FBG 計測システム (FBG-SLI; 米国 Micron Optics 社製) を用いた。

これにより観測、記録された中規模地震 (2002 年 6 月 14 日 11 時 42 分 00 秒発生、地震規模 M5.2、震源 N36.2 E139.9) における各層の加速度と、制震ダンパに設置した FBG 変位計により計測された対角変位を図-16 に示す。(加速度計に備えられているプレトリガ機能は FBG 変位計にはなく、さらに計測時間に制限があるため、図中では時間軸を合わせた。)

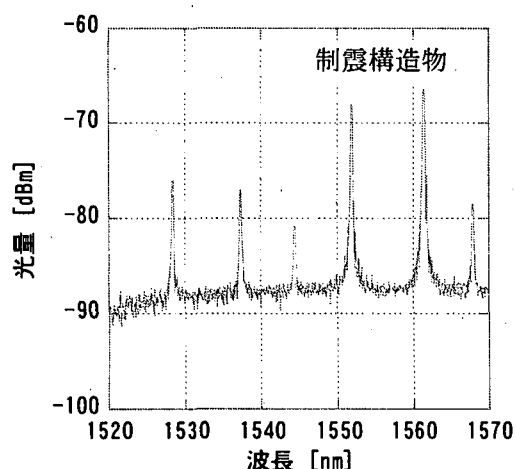
本例においては、制振ダンパの計測値に大きな変動は見られない。

本事例においては、建物最下部の最大加速度 (10gal 程度) から推定される制震ダンパへの最大対角変位は 0.01mm 未満である。一方、FBG 変位計において計測された最大変位は 0.003mm 程度であった。

なお、FBG 変位計の最小計測精度は、0.0008mm 程度である。

なお、本観測事例においては短時間の動的計測であるため、温度補正は行っていない。

一方、免震構造物においては現在まで顕著な観測記録がなく、継続して観測を実施している。



5. まとめ

本論においては、FBG センサを用いた構造ヘルスモニタリングシステムを実際の損傷制御型構造物に実装し、計測を試行、性能を確認した。

まず、FBG センサは建築・土木構造物への構造ヘルスモニタリングシステムにおいてひずみゲージ等の従来センサと比べ数多くの利点を持つが、実装の際の破損防止あるいは、被測定量への変換を目的としたモジュール化が必要であるという観点から、本論では FBG ひずみ計、FBG 温度計、FBG 変位計を製作し、基本動作試験においてそれらの性能を確認した。

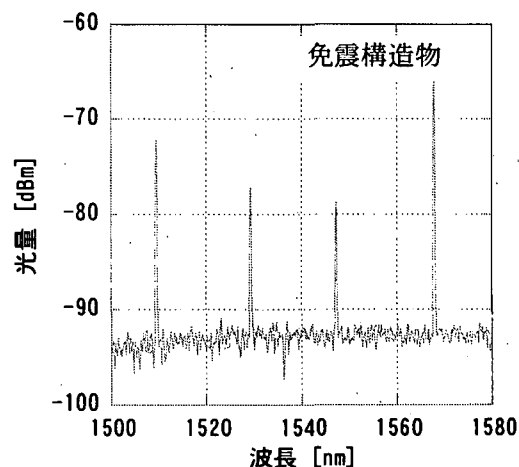
さらに、損傷制御型構造物に対する構造ヘルスモニタリングシステムの構築において、被測定量、およびセンサの配置を、同構造物が有する制震・免震ダンパ等のエネルギー吸収機構の働きの検知に主眼を置くことを提案し、制震構造物・免震構造物双方に対し FBG センサを用いた構造ヘルスモニタリングシステムを実装した。

また、同システムに対して複数の計測機器を用いて動作確認を行った。

今後は両事例において、地震その他の要因に伴い記録される各々の計測データに対し、様々な形での検討を行い、それぞれの構造健全性および構造性能の確認を行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、経済産業省大学連携型産業科学技術研究開発プロジェクト「知的材料・構造システム」(NEDO/RIMCOF) の一環として行った。また、本研究の推進にあたり、日本女子大学住居学科石川孝重教授、慶応義塾大学大学院理工学研究科三田彰助教授に多大なご指導をいただいた。ここに記し謝意を表したい。



参考文献

- 1) Mita, A.: Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technologies in Civil and Building Structures, Proceedings of Second International Workshop on Structural Health Monitoring, pp56-67, 1999
- 2) 大越孝敬: 光ファイバセンサ, オーム社
- 3) 満永豊: スクリーニング試験による光ファイバ強度保証法, 電気通信学会論文誌, Vol. J66-B, No. 7, pp829-835, 1983
- 4) Y.J. Rao: In-Fibre Bragg Grating Sensors, Measurement Science and Technology, Vol.8, pp355-375, 1997
- 5) 三田彰他: 構造ヘルスマニタリング用のFBG 加速度センサの最適設計と寿命推定, 日本建築学会技術報告集, No. 14, pp79-82, 2001
- 6) 岩田衛他: 被害レベル制御構造「Damage Tolerant Structure」に関する研究, 日本建築学会技術報告集, No. 1, pp82-87, 1995
- 7) 矢部喜堂他: 中高層鉄骨造建物用の履歴型制震架構の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 1998
- 8) 岩城英朗他: プラッグ格子型光ファイバセンサの知的構造物への適用検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (広島), 1999
- 9) 岩城英朗他: FBG 変位センサの履歴型制震架構への適用検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 2000
- 10) 岩城英朗: FBG 型光ファイバセンサを用いた建築構造ヘルスマニタリングシステム, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 2002

(2003 年 4 月 18 日 受付)

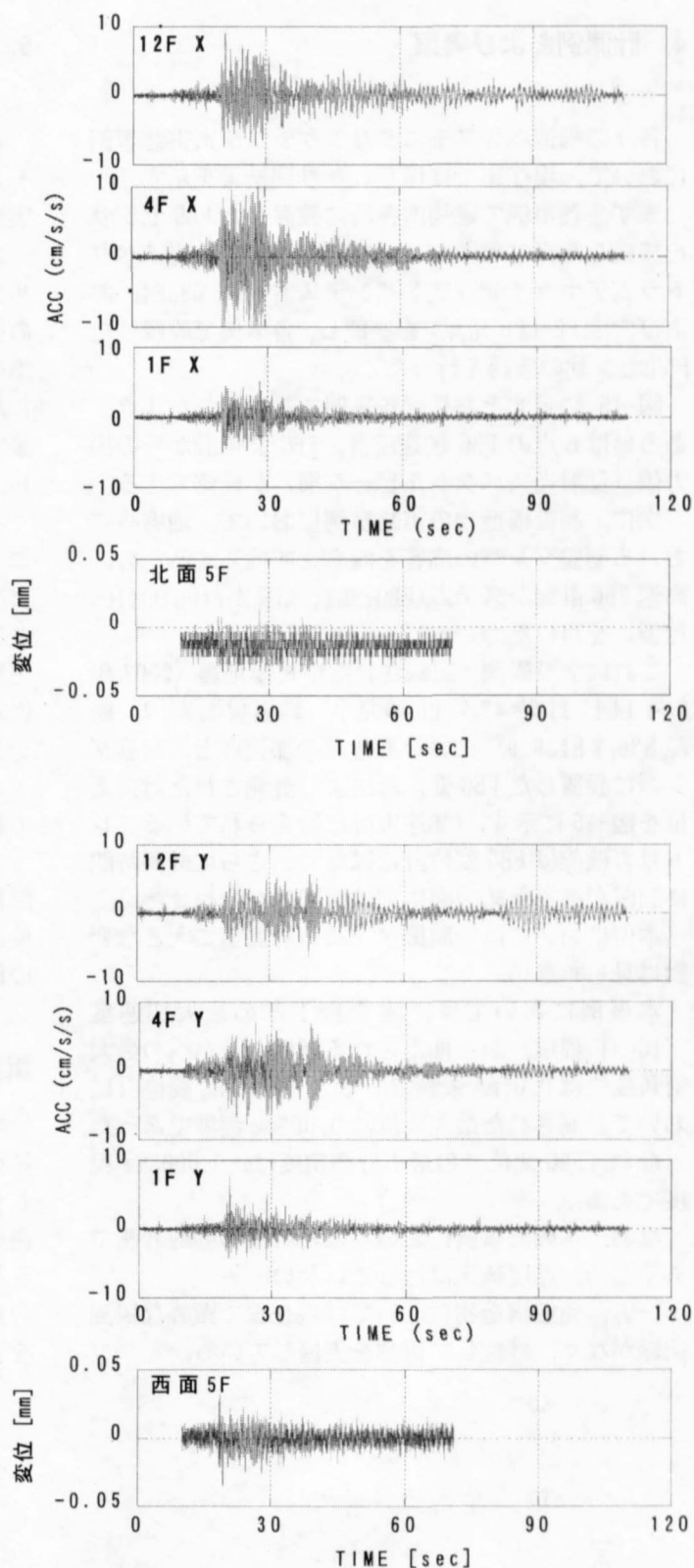


図-16 制震構造物における地震観測事例