

実建物での構造ヘルスマニタリングの実例
ー日本女子大学百年館における構造ヘルスマニタリングシステムの構築・運用ー
Application of Structural Health Monitoring System
- Example on “100th Anniversary Building, Japan Woman’s University -

石川孝重 (日本女子大学住居学科), 岩城英朗 (清水建設 (株) 技術研究所)
Takashige ISHIKAWA (Japan Woman’s University), Hideaki IWAKI (Shimizu Corporation)

構造ヘルスマニタリング, 光ファイバセンサ, FBG
Structural Health Monitoring, Optical Fiber Sensor, FBG

1. はじめに

建物にあらかじめ設置したセンサから取得した情報に基づいて、構造体全体の損傷、劣化を検知しようとする「構造ヘルスマニタリング技術」が提案されて以来、数多くの試行実験、開発事例や、実建物への適用が示されている。

本報では、長期にわたる構造ヘルスマニタリングシステムの運用において課題となるセンサおよびシステムの耐久性、安定性に着目して、近年開発が盛んな光ファイバセンサを活用したシステムを実建物に構築・運用した実例を紹介する。

2. システムの概要

2.1. 適用対象

本例で適用対象とした日本女子大学百年館 (高層棟)の外観および諸元を図1に示す。

本例は、地震時における建物の層間変形を抑えるため、建物荷重を支持する柱に加え、層間変形のみを抑制する間柱を柱間に用い、さらに間柱と梁との交点の部材に極低降伏点鋼製の制震ダンパを採用した制震構造である、

このため、制震ダンパが地震のエネルギーを吸収する能力を保っているかどうか、本例のような建物全体の構造健全性を診断するための重要な指標になる。

そこで本例においては、地震時における制震ダンパの挙動を把握することを主眼として構造ヘルスマニタリングシステムを構築することとした。

2.2. 光ファイバセンサ

現代の高速・広帯域デジタル通信を支える基幹メディアとして広く普及している光ファイバは、一方ではひずみ、温度などを検知するセンサとしても活用できる

光ファイバセンサはひずみゲージ等といった従来のセンサと比べ、長寿命かつ無誘導、安定性が高いといった利点を持ち、さらにセンサの多重化 (1本の光ファイバケーブルに複数のセンサを配置する) が容易にでき、さらに分布計測 (1本の光ファイバ全域がセンサ検知部と

なる) といった従来のセンサでは困難な長距離、広域の計測が可能であることが大きな特長である。

また、光ファイバセンサの多くは外部給電を必要としない、いわゆるパッシブ素子であることから、配線量の低減、システム構成の簡素化という点でも従来センサと比べ有利である。

現在実用化、製品 (商品) 化されている光ファイバセンサにはいくつかの方式があるが、本例においては、FBG方式とよばれる光ファイバセンサを用いた。

光ファイバに強い紫外レーザー光を用いて等間隔 (約 $0.5 \mu\text{m}$) に縦縞模様 (格子) を施したものをファイバブラッググレーティング (FBG) と呼ぶ。このFBGに対して、光ファイバの軸方向に沿って光信号を入射すると、入射光のうち特定の波長の光のみがFBGの部分で反射して戻ってくるという特性がある。反射光の波長は、格子間隔および光ファイバの屈折率と比例関係がある。したがって、FBGの外部からひずみ、あるいは温度変化が生じた場合、反射光の波長が変化するため、反射光波長の変化からセンサ部に生じたひずみ量、温度変化を検出できる。この特性を応用したのがFBG方式の光ファイバセンサ (FBGセンサ) である。 (図2)

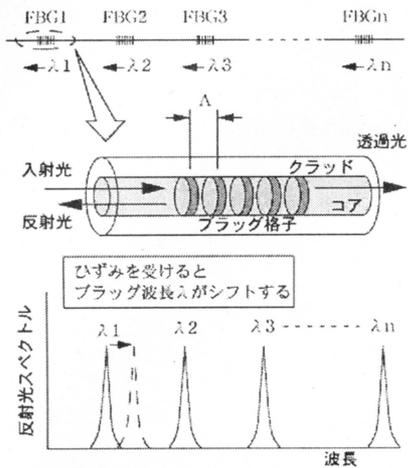


規模: 地上12階, 地下1階, 建築面積2,582m²

延床面積13,891m², 高さ60m

構造: CFT構造 (制震構造)

(図1)適用対象(日本女子大学百年館(高層棟))



(格子間隔と反射波長の関係)

$$\lambda_B = 2n \cdot \Lambda$$

(ひずみ, 温度変化による反射波長変化)

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

ΔT : 温度変化

P_e : 実効光弾性係数

ε : 印加ひずみ

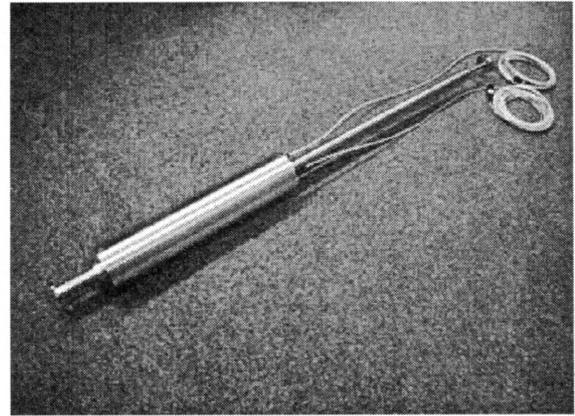
(図2) FBG方式光ファイバセンサの原理

なお, FBGの製造時に, 格子間隔 Λ (\propto 反射光波長)を調整することにより, 容易に多重化ができる. さらに, 計測機器の性能に依存するが, 高速なサンプリングが可能であるため, 動ひずみ計測が可能という特長も併せ有している.

ただし, FBGの形状は細径の光ファイバ($\phi \approx 0.25\text{mm}$)と変わらないものであるため, そのまま建物へ適用すると, 施工時の取り扱いによっては破損あるいはセンシング機能が損なわれてしまう可能性が高いことや, 仮に問題なく施工できても建築部材の変形に追従できずに破損する可能性があることなどが課題であった.

このため本例では, FBGをそのまま建築部材に設置せずに, 制震ダンパなどの変形量大きい部材の計測に対しては, 変形量を緩和するバネとFBGとを組み合わせる筒状の容器に収めたFBG変位計(図3)を開発し, 設置することとした. 一方, 変形量が少ない部材の計測, 温度計測に対しては, FBGと金属プレートとを一体化したシンプルな仕組みのFBGひずみ計, FBG温度計を開発した. FBGひずみ計, FBG温度計ともに金属プレートを部材の所定の位置に接着するだけで設置できる.

この結果, 光ファイバセンサを多様な建築部材に安全・確実に設置し, 安定した計測を行うことが可能となった.



(緒元)

計測範囲: 0~50mm

精度: FBG計測器に準ずるが0.01mm

感度: 約10mm (FBG反射波長1nmあたりの変位量)

寸法: 880mm×65mm×65mm

重量: 1.3Kg

(図3) FBG変位計

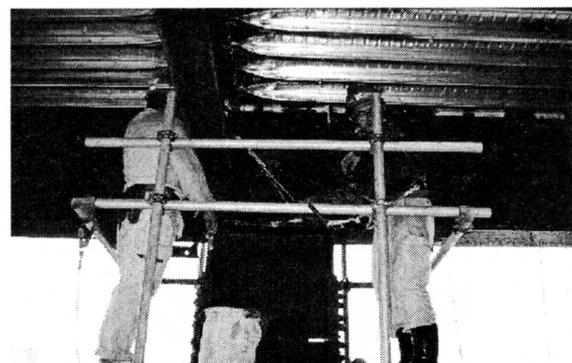
2.3. システムの構築

本例では, 建物4~6階部分に設置した制震ダンパのうち, 平面的に共通の場所に位置する制震ダンパを各階から2箇所, 計6箇所選び, それぞれの制震ダンパ両面に前節で示したFBG変位計を2体ずつ, 計12体設置した. FBG変位計の容器両端は制震ダンパにボルトで締結し固定した.(図4)

また, 建物の柱, 梁, 床などの躯体各所にFBGひずみ計とFBG温度計を52箇所設置し, 建物全体では合計64箇所にFBGセンサを設置した. これらのセンサは, 多重化により7本の光ファイバケーブルに集約した.

なお, 計測器(図5)の同時計測できるケーブル数の制限から, 4本の光ファイバケーブルを常時接続し, 連続計測を行うこととした. 残りのケーブルは地震後など, 必要に応じて切り替えて計測する.

また, 光ファイバセンサに加えて建物全体の震動性状, 地震時応答を計測するために, 建物内4カ所にサーボ型加速度計を設置し, 併せて常時計測を行うこととした.



(図4) FBG変位計の制震ダンパへの設置状況



(緒元)

同時計測ケーブル数 : 4

最大計測センサ数 : 64 (4ライン計で256)

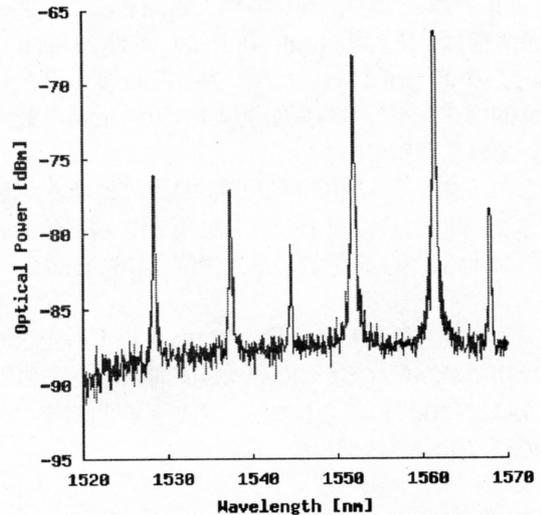
計測波長 : 1525-1565nm

波長精度 : 1pm

波長確度 : 2pm (通常) ~5pm (最大)

計測周波数 : 108Hz

(図5) FBG センサ計測機器



(図6) 光ファイバセンサ試験計測例

2.4. 構造ヘルスマモニタリングの指針

本例での構造ヘルスマモニタリングの指針は以下の通りとした。

- (1) 光ファイバセンサに常時光を入射し、反射する光の波長を常時計測する。
- (2) 地震などにより反射光波長の変化が検知された場合、当該センサ部の波長変化量を記録する。
- (3) 記録された波長変化量から FBG に加わったひずみ値、温度変化を求め、さらに制震ダンパの変形量や、柱や梁のひずみ量を計算する
- (4) 同時に観測された地震波を、本例の設計時に策定した構造解析プログラムに入力して、センサ設置部位の変形量やエネルギー吸収量の予測値などを計算し、実測値と比較する。

指針を用いて得られた結果から、設計者は当該部位、ならびに建物全体の構造健全性を評価するとともに、必要に応じて維持管理計画などを立案することとした。

3. 構造ヘルスマモニタリングシステムの運用

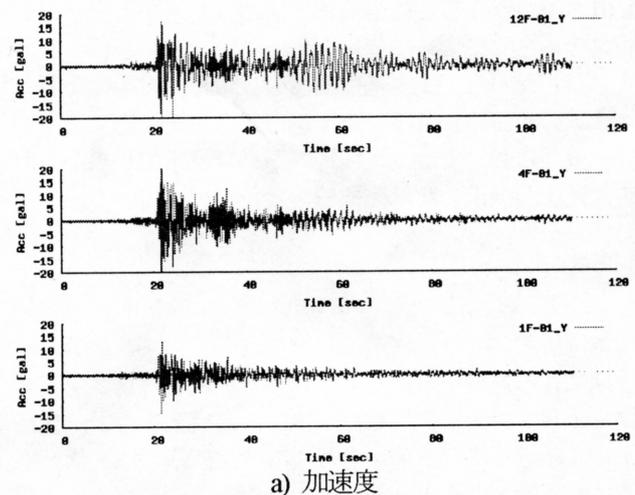
3.1. モニタリング結果例

まず、制震ダンパに設置した FBG 変位計の計測例を示す。

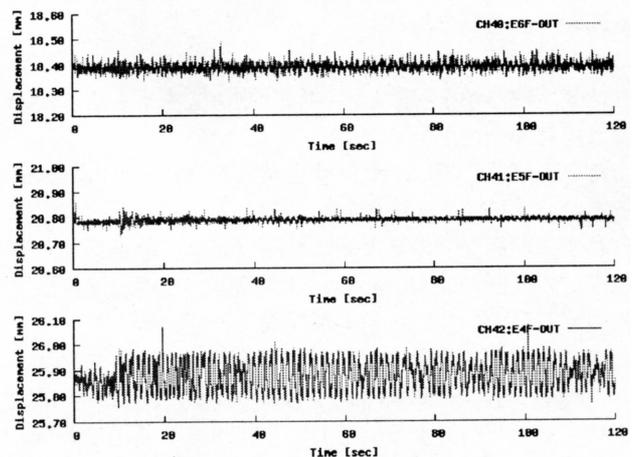
FBG 変位計設置後、光スペクトラムアナライザを用いて設置確認を行ったところ、図6 のとおり多重化した6個のFBG 変位計からの反射光が6箇所ピークとして確認することができる。

これら反射光ピークの変動を前述のような計測機器を用いて取得、記録することにより制震ダンパの挙動を常時計測、把握することができる。

次に、本システムによる地震観測(加速度)例、およびFBG 変位計の計測記録を図7に示した。



a) 加速度



b) FBG 変位計による制震ダンパ変位

(図7) 地震観測記録の例
(2003/9/20 12:54:52 震度4)

図 7a)に示すとおり、建物各層で観測された水平加速度の最大値は、1F は 14.6gal, 4F においては 23.8gal, 12F においては 24.1gal であった。一方、FBG 変位計から得られた制震ダンパの対角変位量は 4F の 0.33mm を最大としていずれも軽微である。

さらに、システム運用開始以降に観測された、現地における 25 回の震度 3 以上の地震記録 (1F 水平最大加速度) に対する FBG 変位計の最大変位 (4F) を図 8 に示した。

最大加速度と最大変位の間には 10gal 以下の記録においては相関がみられるが、10gal 以上の観測記録や他階の観測記録には相関はみられない。更なる観測、モニタリングの積み重ねが必要と考えられる。

3.2. 長期運用における課題

本例のように常時計測を行うシステムの場合、長期間の運用における安定性が非常に重要となる。

本例では、建物の竣工後に計測機器、データ取得、記録保存用 PC、通信機器などシステム機器の設置を行い、2001 年 9 月から現在に至るまで構造ヘルスマニタリングシステムとしての連続運用を行っている。

しかしながら、PC、通信機器の故障や停電等によるシステムの一時停止は不可避であった。また、光ファイバ計測機器においては、故障等の不具合は発生しなかったが、性能が向上した計測機器の更新を行っている。

4. おわりに

本例においては、構造ヘルスマニタリングシステムの長期に亘る運用を目指して、長期安定性を特長とする光ファイバセンサを適用したシステムの構築を行い、現在まで 6 年近くに亘る運用を行ってきた。幸いにも構造性能に悪影響となる大地震の発生もなく、システムの運用もおおむね順調である。

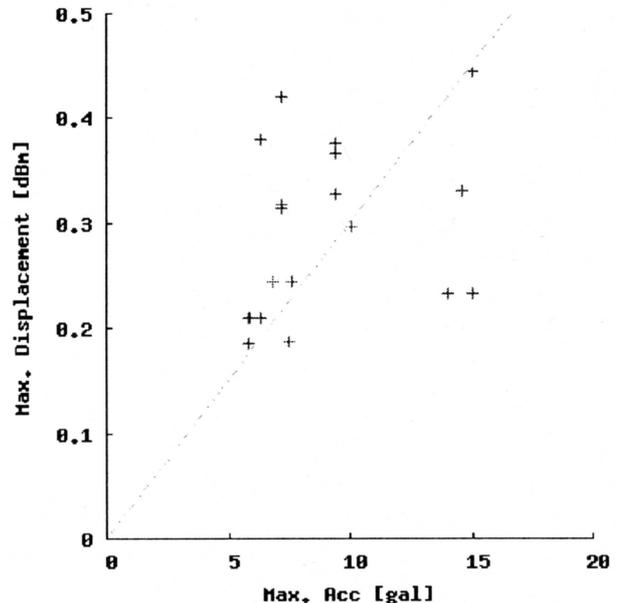
一方で「いつ来るかわからない」地震に対して多数のセンサ、機器類を設置し、常時計測待機する手法については再考の余地がある。

たとえば近年では、センサ自身に計測物理量の最大値あるいは累積値の記憶機能を付加して、常時計測待機は行わず、地震などの発生後に計測 (点検) を実施し、構造部材の変形の最大値あるいは累積値から構造健全性を検討するといったシステムが提案されている。

さらに、センサ間の配線を廃したワイヤレスセンサ、センサネットワーク等の試みもみられるが、これらはいずれもセンサに対する給電という問題は不可避である。

構造ヘルスマニタリングシステムの構築、運用において、現時点では、いずれの方式においても一長一短がある。今後の技術開発による課題の解決、性能向上が期待される。

なお、本システムの構築は、新エネルギー・産業総合開発機構(NEDO) (当時) と(財)次世代金属・複合材料研究開発協会(RIMCOF)が共同で推進した研究開発プロジェクト「知的材料・構造システムの研究開発」中のテーマの一つとして行われた。



(図 8) システム運用中の地震記録と制震ダンパ変位

参考文献

- ・ 岩城ほか「制震・免震建築構造へのヘルスマニタリングシステムの適用」, JCOSAR2003 論文集, pp583-590