光ファイバ変位センサによる高層ビルのヘルスマニタリング*

三上 隆 男^{*1}, 西 沢 隆 夫^{*2}Health Monitoring of High-Rise Building
with Fiber Optic Deformation SensorTakao MIKAMI^{*3} and Takao NISHIZAWA^{*3} IHI Inspection & Instrumentation Co. Ltd.,

1 Shin-Nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 235-8501 Japan

Structural health monitoring is becoming more and more important in the domain of civil engineering as a proper mean to increase the safety and to verify design strategies. In many civil structures, the deformations are the most relevant parameter to be monitored. A complete understanding of the structure's behavior requires the measurement of deformations based on long-gage sensors. A monitoring technology, based on the use of long-gage fiber optic deformation sensors has been applied to a 33-floors tall building in Tokyo. Sensors were installed on the 2nd floor's steel columns of the building in order to monitor elastic strain evolutions at the early stage of construction. The installed sensors were dynamic compatible ones which enable both static and dynamic measurements. The monitoring was initiated on May 18th, 2005 and has been performed during the whole lifespan of the building. The results of the monitoring have been showing high performance of the measurement system.

Key Words: Health Monitoring, Fiber Optic Sensor, Long Gage, Deformation, Building

1. 結 言

近年, 多くの超高層ビルが建設されている。背景として, 構造解析技術の進歩があるが, 施工が段階的に実施される状況を考慮していないため解析と実際の応力状態は相違していると考えられるが, 実測事例は少ない⁽¹⁾⁽²⁾。また, 地震大国である日本では, ビル施工後の健全性評価も重要である。このため, 施工段階に主要構造部材にひずみセンサを設置し, ヘルスマニタリングを実施することが望ましい。しかしながら, 従来のひずみゲージでは長期安定性に問題があり, また, 得られる情報が局所的であるため構造物全体の挙動を捉えることが困難である。光ファイバ変位センサは構造物の大局的な変形を捉えることができ, かつ, 長期安定性を有するため, 高層ビルのヘルスマニタリングに適していると考えられる。

このような背景の下, 東京都内の33階建て超高層ビル(高さ: 約147m)の施工段階にゲージ長が長い光ファイバ変位センサ(SOFO センサ⁽³⁾⁽⁴⁾)を設置し, 2005年5月から柱の軸力やビルの固有振動数の変化を長期的にモニタリングしている⁽⁵⁾。

本報では柱の軸力モニタリングの結果を報告する。

2. SOFO V システム

SOFOとはフランス語の‘Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques’の略称で, 日本語では「光ファイバによる構造物のモニタリング」を意味する。SOFOセンサの計測装置は静的計測専用(SOFO V)と動的計測専用(SOFO Dynamic)の2種類がある。センサは共通であり, 計測の目的に応じて計測装置を使い分けている。柱の軸力モニタリングにはSOFO Vを適用した。

図1にSOFO Vシステムの概念図を示す。

Fig.1 SOFO V system

SOFO標準センサは図2に示すように2本の光ファイバ(石英ガラス製の単一モードファイバ)で構成されている。

* 原稿受付 2008年7月18日。

^{*1} 正員, (株)IHI 検査計測計測事業部(〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1)。

^{*2} (株)IHI 検査計測計測事業部計測技術部。

E-mail: t_mikami@iic.ihi.co.jp

Fig.2 SOFO standard sensor

測定ファイバ:①には、あらかじめ0.5%の引張荷重が付与されており、測定対象物に固定された2点間の変位に応じて伸縮する。もう一方の参考ファイバ:②は螺旋状になっているため、この長さは固定点間の変位に左右されない。SOFO 本体はこの2本の光ファイバの長さの差(=測定対象物の2点間の変位)を2重マイケルソン干渉計方式で測定するものである。図1において、発光ダイオードから発射された光がセンサに送られ、カプラによって分割された後、2本の光ファイバに送られる。その光はセンサ端部に付いている鏡で反射され、カプラによって再び集光され、SOFO 本体に戻ってくる。そこで再び2本の光ファイバに分光される。一方の光ファイバの端部は固定されているが、もう一方の端部は可動式の鏡になっている。測定時には、鏡の動きによる光の干渉強度の変化からセンサ部のファイバ長さ、すなわち、測定対象物の2点間の変位を測定する。センサ自身が一番目の干渉計であり、本体内部の可動式鏡の部分が2番目の干渉計である。

SOFO V の分解能はセンサ長さに関係なく $2\mu\text{m}$ である。センサはコンクリートに埋め込むことも、既設構造物の表面に取り付けることも可能である。計測の際に、電磁波、振動、湿度などの影響を受けないという優れた特長をもつ。SOFO V にはセンサを最大12点接続できる。計測は手動、自動の両方で可能である。センサの長さは0.25m~20mで、計測精度は計測変位に対して $\pm 0.2\%$ 以内である。計測範囲はセンサ長さに対して圧縮側が0.5%、引張側が1.0%である。付録1に代表的な光ファイバ変位センサの比較を示す。センサ長さ、分解能、精度などを総合的に評価すると、柱の軸力モニタリングにはSOFO センサが適していると考えられる。

3. 超高層ビルのヘルスマニタリング

3-1 超高層ビルの概要 対象としたビル(東京都豊洲地区)は、33階建て、高さ約147mであり、2004年に建設開始、2006年8月に竣工した(ビルの外観については図6参照)

3-2 センサの設置 SOFO センサを2005年5月に2階の鋼鉄柱に設置した。2階は機械室であり、柱は化粧タイルなどで覆われず、センサの設置とモニタリングが容易である。33本の柱の中で代表的な柱5本(X4Y2, X4Y5, X6Y5, X7Y9, X8Y6)をモニタリングの対象とした。なお、X4Y2などは建築区画を座標的に表示(X, Yはそれぞれ横および

縦方向)したもので、当該区画内の柱であることを意味する。柱に作用する主な荷重は圧縮軸力であり、曲げ荷重は無視できる。このため、柱1本について1本のSOFO センサを表面中央部に設置した。一例として柱X7Y9への設置状況を図3に示す。

Fig.3 SOFO sensor on column X7Y9

柱の高さ(3m)とコンクリート床高さなど現場の状況を考慮してSOFO センサの長さとして1mを選定した。図4に示すように、柱の熱膨張による変形を評価するため、SOFO センサの中央部付近に熱電対を設置し、参考として防水型ひずみゲージも1点貼り付けた。

Fig.4 SOFO sensor, thermocouple and strain gage

柱は最終的には断熱材が吹き付けられるため、すべてのセンサの端末コネクタを小さな接続箱に導いた。また、バッテリー作動の小型温度ロガーをこの箱の中に格納し、計測時にロガーに収録された温度データをパソコンに取り込んだ。(図5参照)

Fig.5 Connection box and data logger

3・3 SOFO V による静的モニタリング SOFO センサは2005年5月18日に設置を完了し、同日からモニタリングを開始した。以後、この日の計測データを基準とし、竣工までは原則として1ヶ月毎に計測を行い、竣工後は約2ヶ月毎に計測を続けている。図6に建設中のビルの外観を示す。

Fig. 6 Pictures of the building during construction

図7に柱の温度変化を示す。ただし、X7Y9の熱電対は竣工時にSOFOセンサとともに不慮の事故で切断されてしまったので、このデータは除外した。2006年8月の竣工までは、4本の柱の温度はそれらの位置による日照の違いでわずかながら異なるが相違している。竣工後はX8Y6の温度が他と大きく相違する。空調装置などの影響と考えられる。

SOFOセンサの出力には鋼製柱の軸力による平均ひずみと熱膨張によるひずみが含まれる。熱膨張によるひずみは(1)式により除外した。

$$\varepsilon = \frac{(d_{sm} - d_{s0}) - d_t}{\ell_s} \quad (1)$$

ただし、

ε : SOFO センサの平均ひずみ (熱膨張成分を除外)

d_{sm} : SOFO センサの計測値 [mm]

d_{s0} : SOFO センサの初期計測値 (2005年5月18日)
[mm]

ℓ_s : SOFO センサの初期長さ (=1,000mm)

d_t : 柱の熱膨張による変形で、(2)式で表される

$$d_t = \alpha_t \Delta t \ell_s \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

ただし、

α_t : 柱の熱膨張係数 [$^{\circ}\text{C}$]

Δt : 柱の初期温度 (2005年5月18日) からの温度変化 [$^{\circ}\text{C}$]

Fig. 7 Results of temperature measurements of the columns

柱の軸力は(3)式により計算できる.

$$F = E \varepsilon S \quad (3)$$

ただし,

F : 柱の軸力 [N]

E : 柱のヤング率 [Pa]

S : 柱の断面積 [m^2]

柱の温度変化が大きいので, 熱膨張によるひずみの評価は重要である. 熱膨張係数を求めるため, 鋼材に SOFO センサを設置して熱膨張試験を実施した. SOFO センサは, L 型ブラケットを介して接着剤またはボルトで固定する構造であり, ブラケットの材質 (AL と SUS) と向き, および固定方法 (接着剤とボルト) をパラメータとして試験を実施した.

角パイプ鋼材 (120W×60H×5 t) を供試体とし, 4 本の 0.3m-SOFO センサ (センサのシリアル NO : 6742~6745) を図 8 のように設置した. また, 鋼材温度 (Temp-1~Temp-3) と外気温度 (Temp-4) を計測するため, 熱電対を設置した. 本供試体を 4 日間屋外に曝露し, 10 分毎に自動計測を行った. この試験では, 鋼材に荷重が負荷されていないので, 外気温度の変化により鋼材は自由熱膨張する.

図 9 に計測結果を示す. 日照の影響で外気温度より鋼材の温度の方がはるかに高いことがわかる. 鋼材の中でも日照の違いでやや温度分布を生じている. 鋼材の温度に対する SOFO センサのひずみをプロットすれば, その傾きが熱膨張係数となる. 今回の超高層ビルのモニタリングでは, センサ :

6742 の固定方法を採用しているので, センサ : 6742 と Temp-1 のデータに着目して回帰分析した結果を図 10 に示す. 熱膨張係数は最小 2 乗法で近似した結果, 9×10^{-6} が得られた. センサ : 6743~6745 ではすべて 10×10^{-6} という結果が得られた. これは, ブラケット材質と向きの違いによるものである.

Fig. 8 Thermal expansion test of steel pipe

Fig. 9 Results of thermal expansion test of steel pipe

Fig. 10 Thermal expansion coefficient of steel pipe (sensor No: 6742)

熱膨張係数を 9×10^{-6} として(1), (2)式から SOFO センサのひずみを解析した。結果を図 11 に示す。ビル建設の初期段階には 2 基の巨大なクライミングクレーンが頂上に設置されていた。(図 6 参照) その内の 1 基が 2005 年 10 月 21 日～2005 年 11 月 22 日の間に撤去された。撤去により柱に作用する荷重は減少するが、図 11 の当該期間に圧縮ひずみの減少傾向が明確に示されている。2006 年 8 月末のビル竣工後は、柱のひずみ変動は小さくなり、ほぼ一定値を保つものと予想していたが、結果は図 11 に示すように大きく変動している。

この結果の妥当性を評価するため、ひずみゲージの計測データと比較する。図 12 にひずみゲージによる計測結果を示す。

ひずみゲージは参考用として各柱に 1 箇所設置したものである。自己温度補償型なので、温度変化による見掛けひずみは小さく、計測されたひずみ変化はほぼ軸力変化に相当する。ゲージ長が 3mm と短く、また、点数が 1 点だけなので、ゲージ長:1m の SOFO センサに比べて絶対値の計測精度は低いものの、軸力変化のトレンドは実際の状況を概ね捉えていると考えられる。

Fig. 11 Results of static strain measurements of the columns by SOFO sensors

Fig. 12 Results of static strain measurements of the columns by strain gages

図 12 によると, X4Y2 や X6Y5 で一時的に不連続なひずみ変化が見られるが, 全体的なひずみ変化は SOFO センサと同様である. 竣工後も大きなひずみ変動が見られる.

図 11 と図 12 から, 竣工後も鋼製柱に軸力変動が生じていることは明らかである. モニタリング対象の柱は CFT (Concrete filled steel tube) 構造であり, 柱の内部はコンクリートで充填されているため, この部分も荷重を負担する. コンクリートは打設後に熱膨張, 乾燥収縮, クリープなど複雑な挙動を示す. 竣工後, 柱全体に作用している全荷重 (鋼製柱と充填コンクリート部の合計) はほぼ一定と考えられるので, 充填コンクリート部には鋼製柱と逆方向の軸力変動が生じていると推定される.

4. 結 言

光ファイバ変位センサ (SOFO センサ) による超高層ビルの柱の軸力モニタリングを 2005 年 5 月から実施中である. その結果, 以下のことが明らかとなった.

- (1)SOFO センサにより, 柱の軸力変化をモニタリングすることができる.

- (2)SOFO センサを設置してから 3 年以上経過しているが, センサの出力は安定しており, SOFO V システムの長期安定性を確認できた.

- (3)CFT 構造の柱では, 建物の竣工後も鋼製柱部の軸力は変動する. コンクリートの熱膨張, 乾燥収縮, クリープなどの影響で CFT 内部の軸力が変動しているためと考えられる.

- (4)CFT 構造の柱の軸力変動を評価するためには, 鋼製柱部と CFT 内部の両方の軸力変化をモニタリングする必要がある.

文 献

- (1) Glisic, B. et al, Monitoring of Building Columns during Construction, 5th Asia Pacific Structural Engineering & Construction Conference (APSEC), 2003, Malaysia, pp. 593-606.
- (2) Nishizawa, T. et al., The Report of the Monitoring of High-rise Building with irregular shape, The Aim and Abstract of the Monitoring, Proceedings of Kyuusyuu Conference of Architectural Institute of Japan, (2007-9), pp. 83-84
- (3) Inaudi, D. et al, Bridge Monitoring by Interferometric Deformation Sensors, SPIE International Photonics China Symposium on Laser Optoelectronics and Microphotonics: Fiber Optic Sensors, 1996, China

- (4) Inaudi, D, et al, Geo-structural Monitoring with Long-gage Interferometric Sensors, SPIE Conference on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure, 2000, USA
- (5) Mikami, T. et al., Structural Health Monitoring with Fiber Optic Sensors, *SEWC2002, Yokohama, Japan*, T9-1-d-1, pp. 1-6.
- (6) Mikami, T. et al., High-rise Building Monitoring by Fiber Optic Sensors, *IABSE Symposium, 2006, Budapest*, pp. 1-6

付 録

現在, 日本国内で使用されている代表的な光ファイバ変位センサについてカタログをベースに計測原理, 分解能などを比較した結果を付表 1 に示す.

Appendix 1 Comparison of Fiber Optic Deformation Sensors

System name	Measurement principle	Resolution	Precision	Sensor length	Measurement domain
BOTDR ^{*1}	Frequency shift of Brillouin back scattered light	100 $\mu \epsilon$	100 $\mu \epsilon$	1m~10km	Distribution
SOFO ^{*2}	Michelson interferometry	2 μm	Better than 1% of the measured deformation	0.2m~20m	Single point
FBG ^{*3}	Wavelength shift of Fiber Bragg Grating	1 $\mu \epsilon$	4 $\mu \epsilon$	1cm	Multi point
OSMOS ^{*4}	Change of the amount of transparent light by micro-bending	2~4 μm	4~20 μm	0.15m~10m	Single point

^{*1} BOTDR: Brillouin Optical Fiber Time Domain Reflectometry (NTT InfraNet)

^{*2} SOFO: Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques (Smartec)

^{*3} FBG : Fiber Bragg Grating (NTT InfraNet)

^{*4} OSMOS : Optical Strand Monitoring System (JGC Corporation)