

光ファイバ変位センサによる 超高層ビルのヘルスマニタリング（続報）

三上 隆男*

Mikami Takao

地震が多い日本では、建築物の安全性を維持するために建物竣工後の健全性評価は非常に重要である。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。このような背景の下、東京都内の33階建て超高層ビルの施工段階に光ファイバ変位センサ(SOFO)を設置し、2005年5月から柱の軸力変化や固有振動数変化のモニタリングを継続している。IIC Review No.36ではビル竣工前の段階での途中経過を報告した。本号ではその続報として、竣工後のモニタリングの状況、ひずみゲージによる計測結果やセンサ固定部について実施した要素試験結果なども含めて報告する。

キーワード：ヘルスマニタリング、光ファイバ変位センサ、軸力、マイケルソン干渉計

1. はじめに

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、施工は下層部から上層部へと段階的に進むので、完成時の応力を厳密に解析するには、この施工過程の応力状態を把握しておかなければならない。しかし、実際の解析ではこのことを考慮していない。そのため、解析結果と実際の応力状態には差異があると考えられるが、実測事例は少ない⁽¹⁾⁽²⁾。地震が多い日本では、建築物の安全性を維持するためにビル竣工後の健全性評価は非常に重要である。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。

これを検証するため、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)~(5)}）を設置し、2005年5月から柱の軸力変化や固有振動数変化のモニタリングを開始した。2006年8月に竣工したが、その後もモニタリングを継続している^{(7)~(9)}。

IIC Review No.36⁽⁶⁾ではビル竣工前の段階での途中経過を報告した。本号ではその続報として、竣工後のモニタリングの状況、ひずみゲージによる計測結果やセンサ固定部について実施した要素試験結果なども含めて報告する。

なお、読者が本号だけで全容を把握できるよう

* 技師長 博士（工学）、技術士（機械部門）、環境計量士（騒音・振動関係）、一般計量士

にするため、IIC Review No.36号で報告した内容を部分的に再掲している。

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⁽⁶⁾）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装置を使い分けている。柱の軸力の静的モニタリングにはSOFO Vを適用した。

図1にSOFO Vシステム概念図を示す。

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。

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。もう一方の基準ファイバ：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

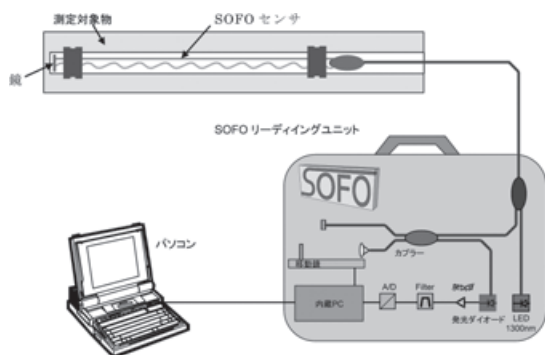


図1 SOFO V システム構成

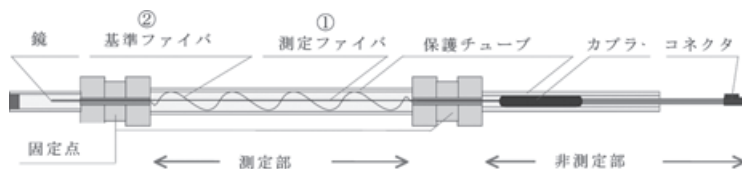


図2 標準 SOFO センサの構造

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2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 μ 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り、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。光ファイバ変位センサには表1に示すように多くの種類があるが、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。

表1 各種光ファイバ変位センサの比較

測定原理	分解能	精度	センサ長さ	測定範囲
BOTDR: Brillouin後方散乱光の 周波数シフト	100 $\mu\epsilon$	100 $\mu\epsilon$	1m~10km	広域
SOFO: Michelson干渉計	2 $\mu\epsilon$	測定変位に対して $\pm 1\%$ 以内	0.2m~20m	単点
FBG: Bragg波長シフト	1 $\mu\epsilon$	4 $\mu\epsilon$	1cm	多点
OSMOS: Micro-bendingによる 透過光量変化	2~4 $\mu\epsilon$	4~20 $\mu\epsilon$	0.1~10m	単点

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写真4参照）

3.2 センサの設置

SOFO センサを2005年5月に2階の鋼製柱に設置した。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への設置状況を写真1に示す。

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。写真2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。

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。（写真3参照）

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、2006年8月の竣工までは原則として1ヶ月毎に、竣工後は2007年末までは約2ヶ月毎に、その後は2~6ヶ月毎に計測を続けている。写真4に建設中のビルの外観を示す。

図3に柱の温度変化を示す。ただし、X7Y9の熱電対は竣工時にSOFOセンサとともに不測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

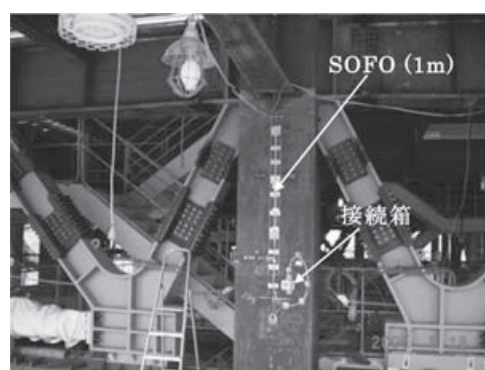


写真1 SOFO センサ（柱：X7Y9）

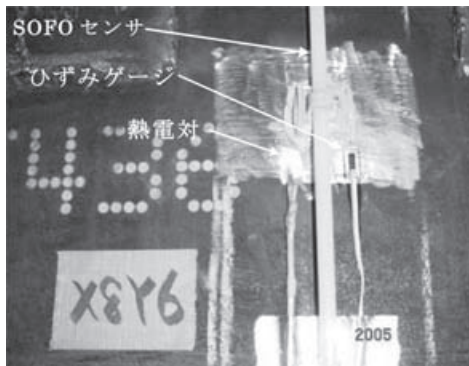


写真2 SOFO センサ、熱電対、ひずみゲージの設置

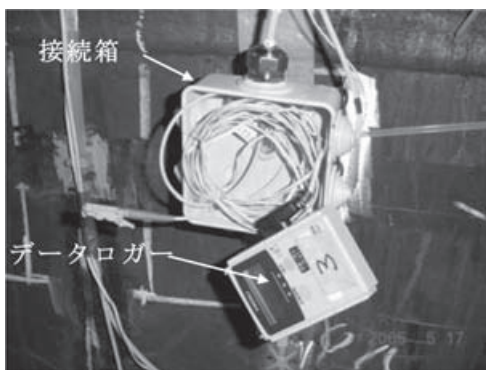


写真3 接続箱とデータロガー



写真4 建設中のビルの写真

はそれらの位置による日照の違いでわずかではあるが相違している。竣工後は X8Y6 の温度が他と大きく相違しているが、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。

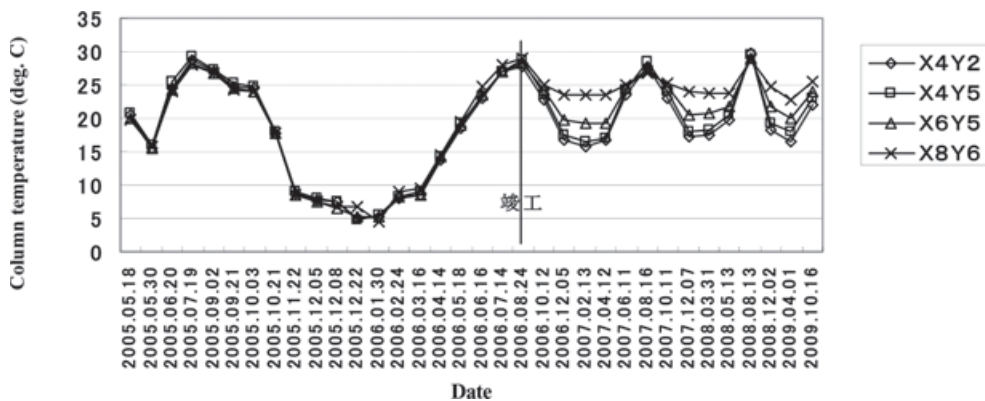


図3 柱の温度変化

$$\varepsilon = \frac{(d_{sm} - d_{s0}) - d_t}{\lambda_s} \dots \dots \dots (1)$$

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]

λ_s : SOFO センサの初期長さ (= 1,000 mm)

d_t : 柱の熱膨張による変形で、(2) 式で表される

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

ただし、

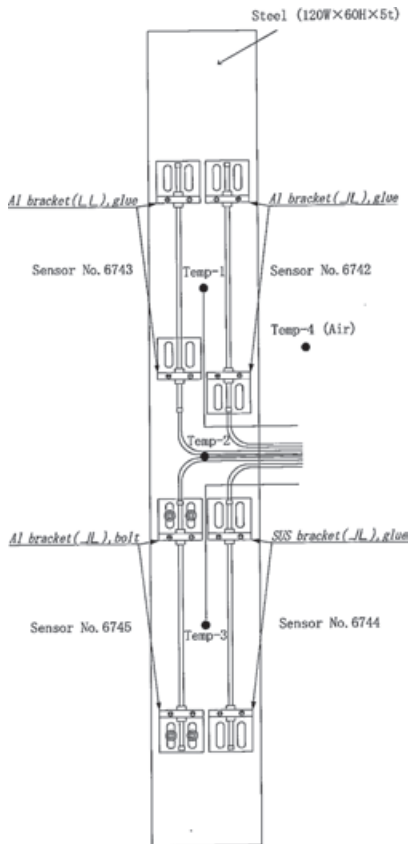


図 4 鋼材の熱膨張試験

α_t : 柱の熱膨張係数 [/℃]

Δt : 柱の初期温度 (2005 年 5 月 18 日) からの温度変化 [℃]

柱の軸力は (3) 式により計算できる。

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

ただし、

F : 柱の軸力 [N]

E : 柱のヤング率 [Pa]

S : 柱の断面積 [m²]

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。

リップ溝形鋼 (120 W × 60 H × 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 4 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

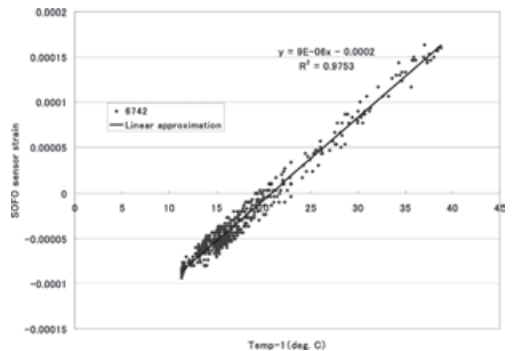


図 5 鋼材の熱膨張係数 (センサ No. 6742)

自由熱膨張する。

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ため、センサ：6742 とその近傍の鋼材温度：Temp-1 のデータに着目して回帰分析した結果を図 5 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。これにより、ブラケットの熱膨張が計測に影響を及ぼすことが明らかとなった。

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 6 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。(写真 4 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 6 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、荷重変動が小さいので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 6 に示すように大きく変動している。この変動は、柱の温度変化に対応していることが図 3 との比較から明らかであり、年単位で見ると規則正しく変動している。

この結果の妥当性を評価するため、ひずみゲ-

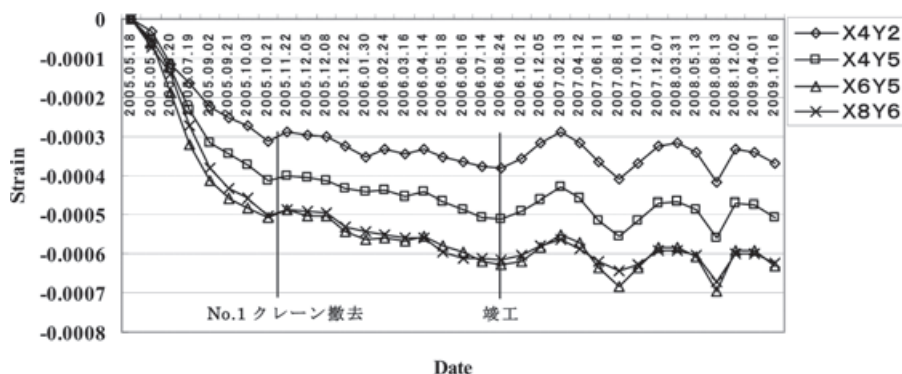


図 6 柱のひずみ変化 (SOFO センサによる)

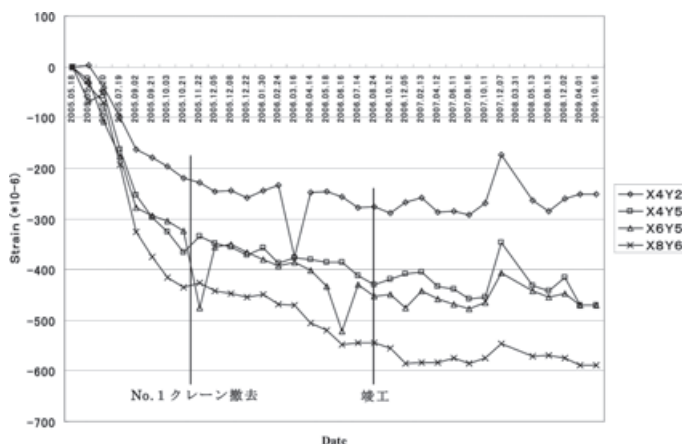


図 7 柱のひずみ変化 (ひずみゲージによる)

ジの計測データと比較する。図7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、軸力変化の傾向は実際の状況を概ね捉えていると考えられる。

図7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センサと同様な傾向である。

図6と図7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、鋼製柱との界面の摩擦など複雑な挙動を示す。竣工後の荷重変化は小さいため、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。上述のように鋼製柱に軸力変動が存在することから、充填コンクリート部には温度依存性の強い要因により鋼製柱と逆方向の軸力変動が生じていると推定される。

3.4 SOFO Dynamic による動的計測

柱が振動するためには大きな励振力が必要と考えられ、強風下で計測を行うこととした。2006年3月17日に最大瞬間風速：15 m/sを記録したので、同日、動的計測を実施した。

計測した柱はX6Y5で、建物の中央に近い柱である。風速が最大となった10時50分から約1分間の計測結果を図8に示す。同図にひずみ式加速度センサによる計測結果も表示している。

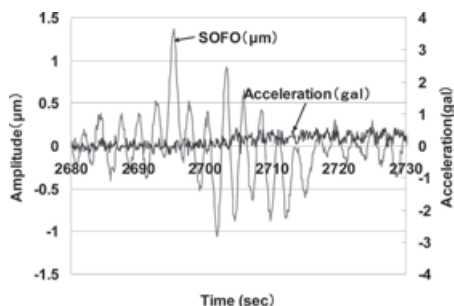


図8 強風下の柱：X6Y5の振動

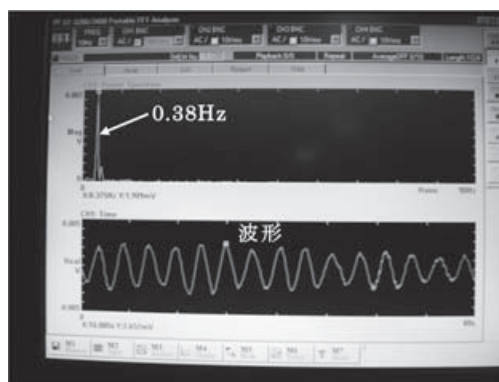


写真5 FFT解析結果

SOFOセンサは振幅1μm以下の微小な振動を捉えていることがわかる。この振動を周波数分析した結果を写真5に示す。ビルの1次曲げ固有振動数：0.38 Hzが明確に現れている。一方、加速度センサでは加速度の値が小さく計測できなかったため、ノイズのみの波形となった。なお、ひずみゲージにおいても同様に検知できなかった。さらに、2006年5月19日に微風状態における計測を試み、固有振動数を明確に捉えることができた。微風による微小な励振力でもSOFO Dynamicシステムの卓越した分解能：0.01 μmにより柱の振動を検知することができた。

ビルの固有振動数は大地震などにより構造部材に大きな損傷が生じないと変化しないと考えられるため、2006年5月19日以降はSOFO Dynamicによる計測は実施していない。次回の計測はセンサ設置後5年（竣工後4年）を経過する適切な時

期（2010年の台風シーズン）に実施し、固有振動数に変化がないことを確認する予定である。

4. おわりに

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4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。この知見をもとに、名古屋モード学園ビル（スパイラルタワー）では世界で初めて鋼製柱部とCFT内部の両方の軸力変化を2007年からSOFOセンサでモニタリング中である。
- (5) SOFO Dynamicの高い分解能により、ビルの常時微動に起因する柱の振動を明確に検知できる。

参考文献

- 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) 三上 隆男, “光ファイバによる動的変位計測システム (SOFO Dynamic)”, IIC Review/ 2006/4. No.35, pp. 54-58.
- 7) Mikami, T. et al., “High-rise Building Monitoring by Fiber Optic Sensors”, IABSE Symposium, 2006, Budapest, pp. 1-6
- 8) 三上 隆男, “光ファイバセンサによる高層ビルのヘルスマニタリング”, IIC Review/ 2006/ 10. No.36, pp. 2-8.
- 9) 三上 隆男, 西沢 隆夫, “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”, 日本機械学会論文集(C編)、75巻750号(2009-2)



技師長
博士(工学)、技術士(機械部門)、
環境計量士(騒音・振動関係)、
一般計量士

三上 隆男

TEL. 03-3778-7965

FAX. 03-3778-7968