

光ファイバーセンサーによる鋼構造試験体の静的・動的柱軸変形の計測

STATIC AND DYNAMIC MONITORING OF COLUMN AXIAL DEFORMATION OF A STEEL STRUCTURE BY USE OF FIBER OPTIC SENSORS

飛田 潤*, 福和伸夫**, 西澤崇雄***

Jun TOBITA, Nobuo FUKUWA and Takao NISHIZAWA

Observation method of static and dynamic behavior of axial deformation is discussed for steel frame column by use of fiber optic deformation sensor (SOFO). A full-scaled steel structure specimen for E-defense shaking table is used for the investigation. Static observation is done for the structure during its construction with increasing dead load of concrete slabs. It is clearly shown that the fiber optic sensor is suitable for evaluation of average deformation of columns, and the correction of temperature-dependent characteristics and appropriate sensor installation are most important for the observation. Dynamic observation is also performed under earthquake shaking test, and it is verified that the axial and bending deformation are evaluated separately. Structural damage detection is observed to be possible by use of dynamic axial loads of columns. By use of the sensor, both of the log-span static monitoring and the short-range dynamic observation will be possible for the structural health monitoring.

Keywords : Fiber optic sensor, Steel structure, Column axial deformation, Temperature dependency, Installation, E-defense
 光ファイバーセンサー, 鋼構造, 柱軸変形, 温度依存性, 設置方法, E-ディフェンス

1. はじめに

近年、環境と安全の両面で、構造物の長期にわたる劣化や地震による損傷など構造性能の変化を的確に把握する技術が強く求められ、構造ヘルスモニタリングの技術開発が進んでいる。現状では、計測事例を重ねて、将来に向けたデータベースを構築することが重要と考えられる。その際に、完成後のみならず建設時から連続して観測を行うことにより、建物完成時の構造性能が設計意図通りであるか確認でき、完成後の劣化や損傷評価の初期値を明確にすることと合わせて有効であると考えられる。

このような長いスパンでの構造物の性能把握を目指して、著者は複数の建物で建設時から完成後の長期に渡る地震観測などを継続している^{1),2)}。これらは振動特性とその変化の把握が主であるが、さらに変形・ひずみや応力の計測を併用することで多くの知見が得られる可能性がある。建設分野の構造ヘルスモニタリングにおける光ファイバーセンサーの利用は、これまでに様々なタイプのセンサーによる事例がある。長い区間のひずみ・変形の分布を検出可能なBOTDRやBOCDA等は、橋梁やトンネル、地盤など土木構造物に用いられる例が多い。数10cm~10m程度の区間の平均ひずみを測定できるOSMOSも用いられる。一方、FBGやFPIなど短い区間を対象とするセンサーを用い、建築構造物等の局所的挙動を的確に反

映するように設置した例があるたとえば³⁾。いずれも長期の耐久性・安定性に優れ、比較的高い測定精度が期待できる利点がある。

本論では、高層建物の耐震性評価に関するEディフェンス実験⁴⁾の鋼構造試験体を対象として、光ファイバーによる構造物計測システム(SOFO)を用いた鉄骨柱の静的・動的軸変形の計測方法と計測結果について論じる。SOFOは計測対象区間の変形を測定するもので、ここでは30cmのセンサーを用いて、柱中間部の軸変形を評価する。まず試験体製作過程の荷重増加に伴う柱軸力の変化を静的計測で検討する。その際に、計測結果に大きく影響する温度依存性について、センサー設置方法を含めた補正法を詳細に明らかにした点に特徴がある。続いて、振動台加振時の動的計測により、柱の動的な軸変形と曲げ変形を分離して評価でき、さらに架構の損傷評価につながる結果が得られたことを示す。

計測対象の試験体は長周期地震動に対する高層建物の挙動と損傷を模擬するものであり、多数のひずみ・変形・加速度センサー等が設置されている。筆者らも独自の応答計測を行っている⁵⁾。明快な鉄骨造フレームで二次部材が少なく、建設中の重量等の変化が明確であり、最終的に上階を模擬した重量スラブも載るため、実際の高層建物建設時と同様に柱軸力の変化が大きく、建設途中の変化に関するモニタリングの検討に適している。また本試験体は耐火被覆や

* 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・工博

Assoc. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

** 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

*** 日建設計 主管・工修

Nikken Sekkei, M. Eng.

外壁などがなく鉄骨部材が露出しており、軸体の温度変化が大きいため、変形計測における温度補正の検討に適している。さらに軸体が損傷する大レバーアクション実験が予定されているため、動的計測や損傷検知の検討も行なっている。

この試験体の検討と並行して、同様のセンサーを用いて実建物の建設段階における変形（応力）の変化を計測している。具体的には、不整形超高層建物の建設中のCFT柱軸力の変化^{6,7)}、新築免震建物および免震レトロフィット建物⁸⁾の工事中の免震支承軸力の変化、直接基礎下の地盤改良杭および杭間地盤の荷重の建設段階による変化などである。このような計測状況では、ひずみゲージやFBGなどよりやや広い範囲（数10cm）で安定した平均変形特性をとらえる必要がある。また、建設期間を通じて現場で随時あるいは連続的に計測を行うため、センサーを設置したままでも耐久性や安定性に問題がないこと、収録装置を計測時の接続しても前回からの変化を安定してとらえられること、などの特性が必要である。このためには本論で用いたような光ファイバーセンサーが有効と考えられる。実建物の検討結果の報告はそれぞれ別稿に譲るが、本論での設置条件やデータ補正等の検討結果はそれらの計測と分析に活かされている。

2. 試験体、センサーおよび計測の概要

試験体は、既存高層建物の平均的なモデルとして地上21階・高さ80mを考え、振動台で加振できるように縮約して計画されている。図1に試験体概略を示す。下層4層はそのまま試験体とし、上層は5層ごとに質量・剛性を集約して、約1,900kNのコンクリートスラブ

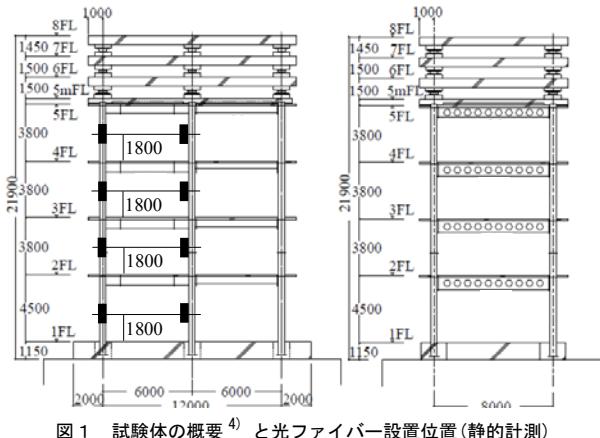


図1 試験体の概要⁴⁾と光ファイバー設置位置(静的計測)

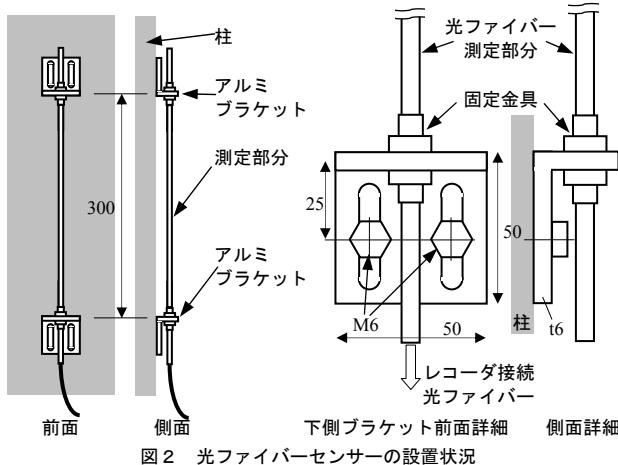


図2 光ファイバーセンサーの設置状況

3枚と積層ゴム・鋼製ダンパーに置換したものである。平面は2スパンで12m×8mである（詳細は文献⁴⁾を参照されたい）。

計測に用いたセンサーは計測長さ300mmの光ファイバーセンサー(SOFO)である⁹⁾。図2に設置状況を示す。直径約8mmのパイプに計測用と参考用の2本の光ファイバーが入っており、それらの位相差から計測部両端の間の伸縮を計測する。センサー自体は温度変化の影響を受けない構造になっているが、計測対象の鋼材が温度変動により伸縮するため、変形から応力変化を推定するには温度計測による補正が必須である。

変位計測の分解能は静的計測で2μm、動的計測で0.01μmとされている。これは長さ300mmのセンサーに対してそれぞれ10⁻⁵、10⁻⁷レベルのひずみに当たる。同一のセンサーで静的・動的特性に対応するが、収録機器が異なるため同時に計測できない。静的計測は、センサーからの延長光ファイバーをアタッシュケース大のロガーに接続すればよく、計測場所や手間の制約が少ない。動的計測はアンプ及び小型のデータレコーダーを使用する。

センサー両端を支持するL型アルミブラケットはM6ボルトまたは瞬間接着剤で柱に固定する。瞬間接着剤はシアノアクリレート系の高粘度タイプ（ゼリー状）を用い、鋼材表面をサンダーで磨いてアセトンで拭いた後に塗布・接着し、硬化促進剤を周辺からスプレーして手で数分間保持することで養生を完了する。本実験では、試験体完成までの静的計測では瞬間接着剤で固定し、加振時の動的計測では衝撃による脱落も考慮してスタッドボルト止めに変更している。4章で検討するように、ブラケットの固定方法による影響が無視できないため、設置には細心の注意が必要である。

屋外で製作されている試験体の鉄骨フレームが4層まで完成した時点で、図1に示すように1~4各層の中柱と隅柱の計8カ所の静的計測を開始した。軸力の計測を主として、各柱の中間部分に設置している。その後、2~5階の各階のスラブの打設（層重量で各々約520kN、うちコンクリートは300kN）、5階上の集約スラブ打設（約1,100kN）、試験体の屋内への移動と振動台上への設置、さらに集約スラブ3枚（各々約1,900kN）を順次設置して試験体が完成するまでの間で、連続して静的計測を行った。データ収録はセンサーごとに順次行われ、静的計測では1センサーあたり約7秒かかるため、全体の計測時間間隔は5~30分に設定した。温度計は5~10分間隔で記録している。その後の一連の加振実験中は、3・4層のセンサー4本を1・2層のセンサーが設置された柱の裏側の面に移設し、各柱の動的な軸変形と曲げの計測を行った。

3. 試験体製作過程における柱の軸変形の静的計測

図3に、屋外での試験体製作過程から屋内での縮約スラブ設置まで、各層の中柱と隅柱の計8箇所の柱軸変形の変化を示す。変形は相対値であるので計測開始時点を0とし、圧縮（縮み）側を負とする。また同じ時間軸で気温の変化も示す。気温は2箇所で計測したが、ほとんど差はないため平均値を用いている。本試験体には外壁や耐火被覆などではなく、計測された温度を軸体全体の温度と見なした。屋外の一日の気温変化幅が約5~10°C、屋内に搬入した後も含めて-2~25°Cの範囲にある。

図3を見ると、軸変形の傾向が気温の日変動にほぼ対応していることが明らかであり、温度変動の影響がきわめて大きいことを示す。

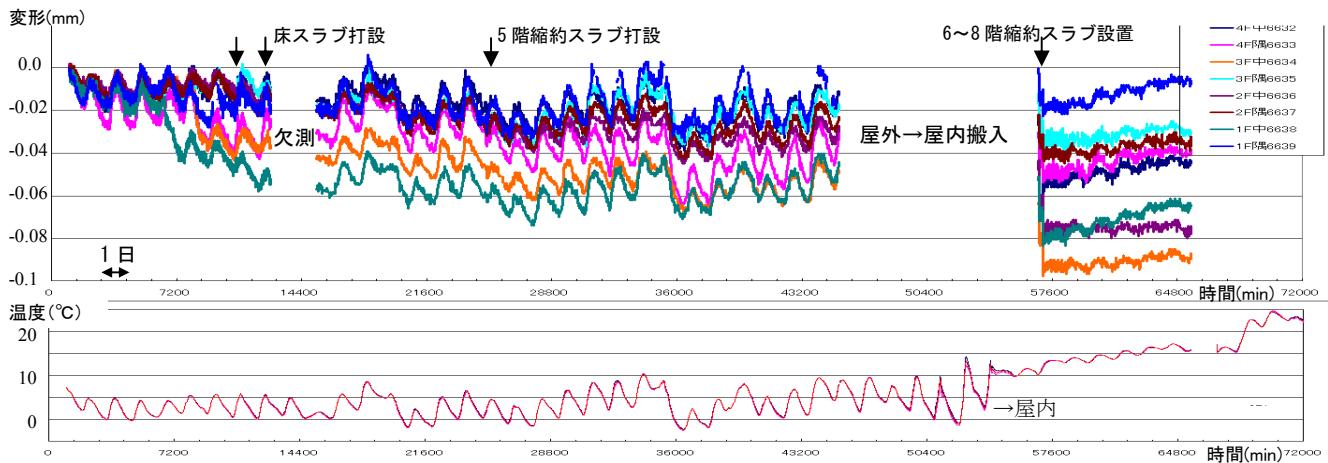


図3 光ファイバーセンサーによる柱の軸変形の静的計測値（温度補正なし、各センサーで初期値=0）と温度変動の関係

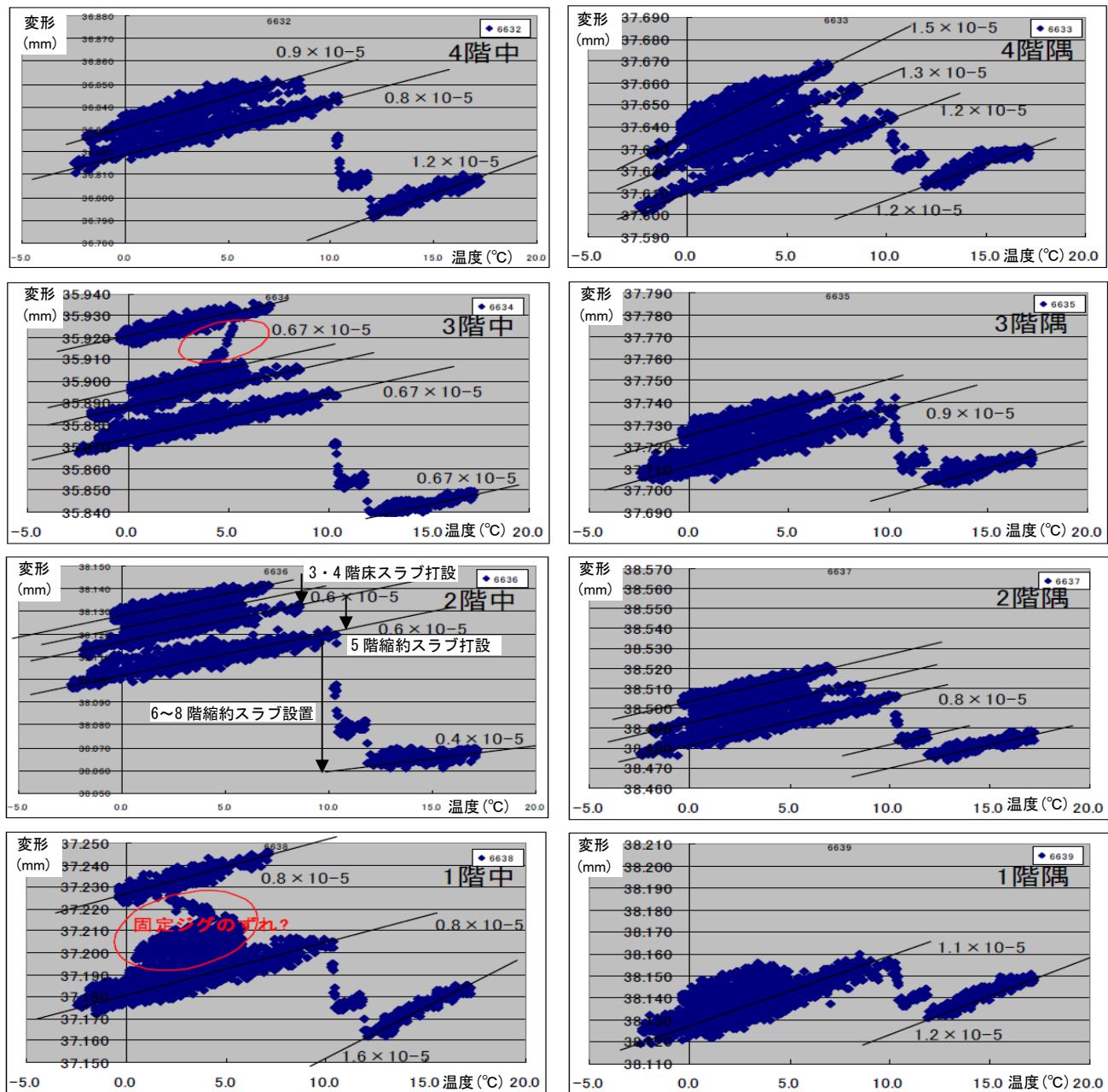


図4 各柱の温度と軸変形の関係（縦軸は初期値を引く前の変形計測値、縦軸の刻みはすべて $0.01\text{mm}=10\mu\text{m}$ ）

ている。鋼材の線膨張率は、組成にも依存するものの、おおむね $11.5 \sim 12 \times 10^{-6}/\text{°C}$ であり、SOFO センサーの 300mm の区間では $0.0036\text{mm}/\text{°C}$ 程度の変形にあたる。一方、柱は $\square 400 \times 25$ で断面積は 0.0375m^2 、従って 1°C の温度変化による柱の伸縮は、荷重で約 95kN 、床面積あたり荷重に直すと約 6kN/m^2 に相当し、床コンクリートスラブ打設による柱の縮みも $1\sim2\text{°C}$ の温度上昇でキャンセルされることになる。従って、1~4 階の各階スラブ打設による軸変形への影響は、このままで確認できない。さらにこの変形の大きさは、先に述べた静的計測の分解能 ($2\mu\text{m}$) のオーダーに近い。

そこで、まず上記で略算した線膨張係数 ($12 \times 10^{-6}/\text{°C}$) とセンサー一間距離 (300mm) から温度依存の柱鋼材の伸縮を求めて計測値から引いたところ、温度の日変化による変形への影響が除かれることはなかった (図は省略)。むしろ温度変動と逆の変形変動を示すセンサーもあるなど、全体に温度の影響を補正しそうの傾向があり、しかもセンサーごと、計測期間ごとにばらつきが大きい結果であった。

次に温度依存性を詳細に検討するために、各センサーにおける温度と軸変形の関係を求め、図 4 に示す。図中で各階の中柱と隅柱について、横軸が温度 (°C)、縦軸が軸変形 (長さ 300mm のセンサーあたり、ただし初期値を引く前の計測値なので変化量のみ有効) を示している。また、プロットした点は 5~30 分ごとの値で、図 3 に対応して屋外から屋内搬入、縮約スラブ載荷までの記録がすべて含まれている。各図で左上のプロットが屋外での最初の状態、そこから 2~5 階床スラブの打設で圧縮を受けて下に移動、屋内搬入後は温度が上がり、 $1,900\text{kN}$ の縮約スラブを 3 枚載せたため右下に移動する。これらのスラブ打設・設置による荷重変化は数時間程度で行われているため、それ以外の荷重が変化しない時には温度依存の右上がりの直線上に分布する傾向が明確に見られる。図中の直線は、そのような温度依存性の傾向をおおむね表すように引いたもので、縦軸が 300mm のセンサーあたりの変形であることを考慮すれば、直線の傾きからみかけの線膨張係数を求めることができる。

結果として場所 (センサー) により傾きが異なること、同じ場所でもスラブ打設前後で傾きが変わることもあることがある。また、傾きから求めた見かけの線膨張係数は $0.6\sim1.5 \times 10^{-5}$ 程度の範囲にあり、鋼材の線膨張係数 1.2×10^{-5} よりかなり小さい値となる場合が多い。この原因として、センサーの両端を固定しているアルミ製の L 型プラケットの伸縮の可能性がある。アルミは鉄に比べて線膨張係数が 2 倍程度あり、気温の上昇にしたがって柱鋼材の伸びを打ち消すように内側に変形することで、柱の鋼材の見かけの線膨張係数が小さくなつたと考えられる。またセンサーによって傾きが異なることは、固定条件によりプラケットの伸び量や対象とする鋼材の計測対象区間長が異なる可能性がある。これらの点に関しては 4 章で検討を加える。また、3 階中柱と 1 階中柱のように、荷重増に關係なくある時点で大きく縮んでいるものは、プラケットと母材や固定金具の間で何らかのずれ等が生じた可能性もある。ただし、実験中およびセンサー撤去時の観察では、接着面や固定金具に目視できるような接着不良やずれは見られなかった。

このようなセンサーの固定状況による影響は正確な温度補正を困難にするが、図 4 のように温度と軸変形の関係で表示することで、温度依存の右上がりの傾向と、その回帰直線の間隔から、温度の影響を分離して軸圧縮変形を読み取ることができる。また、異常な変

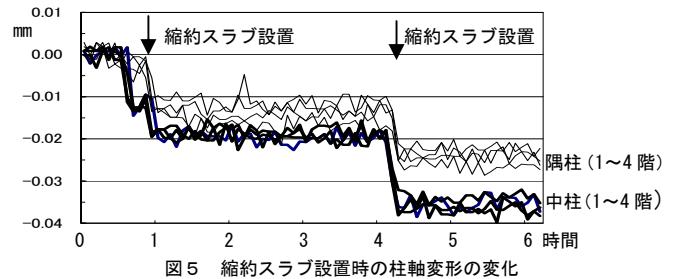


図 5 縮約スラブ設置時の柱軸変形の変化

形の傾向も発見しやすくなるなどの利点がある。

図 4 では、左上の開始時点から図の中央付近までの低下が 2~5 階のスラブ打設によるものである。たとえば 5 階の重量 $1,600\text{kN}$ による各柱の変形を計算すると、約 $0.01\sim0.015\text{mm}$ 程度が予想され、おおむね一致しているが、変動が大きい。一方、図 4 各図の中央付近から右下への低下は 3 枚の縮約スラブ (合計約 $5,600\text{kN}$) によるものであり、これらの縮約スラブのうちの 2 枚を連続して設置した際の計測値を拡大して図 5 に示す。変形量はスラブ重量とほぼ対応し、中柱の変形が隅柱の約 1.5 倍になっている。この部分に関しては実験室内のため温度変化が少なく、安定した傾向が得られているが、静的計測の分解能 ($2\mu\text{m}=0.002\text{mm}$) 前後の変動が見られる。

4. センサー設置方法に関する追加確認検討

ここまで検討で、光ファイバーセンサーを L 字型プラケットで柱に固定する場合には、変形計測結果の見かけの温度依存性が鋼材の線膨張係数より小さくなる傾向が見られた。その原因としてプラケット材質と固定方法の影響が考えられる。プラケットの材質を計測対象の構造とそろえ、プラケットの変形方向を考えて両端のプラケットの L の向きをそろえることにより、プラケットの変形による影響が改善する可能性がある。またプラケットの固定方法による差異を比較検討する必要もある。

以上の条件の相違を考慮して、ダミーの鋼材に図 6 に示す 4 ケースの固定条件でセンサーを設置し、温度変化のある環境で計測を試みた。傾き (見かけの線膨張係数) とばらつきに着目すると、もともと良好な結果を示すのは(c)ステンレスプラケット・接着固定の場合で、次いで(b)アルミプラケットで両端の L の向きを合わせて接着した場合であった。(a)アルミニウムで接着、および(d)アルミニウムでボルト固定では、ばらつきが大きいのみならず、見かけの線膨張係数 (傾き) が小さくなり、特にボルト固定の場合に小さい。またボルト固定では、実験開始前後 (図 6(d) の左下付近) のばらつきが大きい傾向が見られる。以上から、プラケットの材質を母材と同じものとし、設置の向きをそろえること、ボルトで固定する場合はボルト位置とセンサー固定位置の間のプラケット変形や計測区間長の変化を考慮すること、などの対応が必要になることがわかる。

5. 加振実験時の柱軸力変動の動的計測

SOFO は動的計測における周波数特性 (1kHz まで) や分解能 ($0.01\mu\text{m}$) は、一般的な建築構造物の計測には十分である。振動台加振実験時に 1・2 階の中柱と隅柱の計 4 本で柱両面にセンサーを設置し、動的軸変形と曲げ変形の分離検出を試みる。中柱は長辺方向、隅柱は短辺方向の 2 面に設置し、その方向の曲げを対象とする。

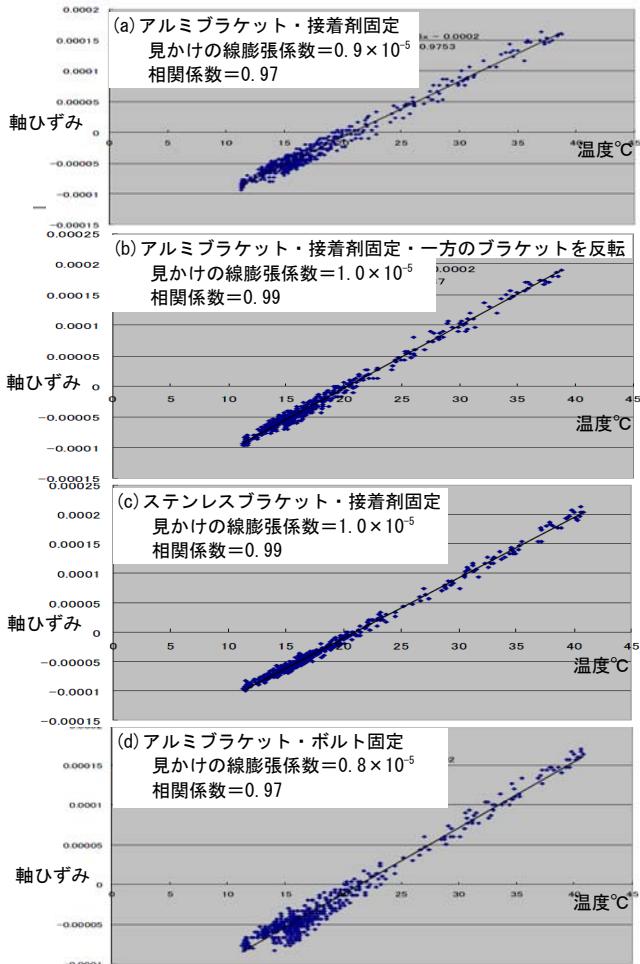


図6 光ファイバーセンサーの設置条件による温度依存性

図7は、三の丸波で振動台を加振した際の5階の揺れを強震計で計測した結果で、加速度記録を2回積分して変位波形を求め、加速度のフーリエスペクトルとともに表示している。0.37Hz, 1Hz, 2Hz, 5Hzなどに固有振動数のピークが伺える。次に、1階・2階の中柱・隅柱の相対する2面のセンサーによる変位波形とスペクトルを図8(a)に、柱ごとにそれらの和と差を求めて(b)・(c)に示す。光ファイバーセンサーの波形は、強震計による応答観測記録と類似の特性を示すことがわかる。また柱の両面の計測値の差と和から、それぞれ曲げ変形と軸変形の時刻歴を分離できている。曲げ変形では高次振動数のピークも明確で、建物の水平応答による柱の曲げモーメントに対応すると考えられる。一方、軸変形成分は主に1次固有振動数のピークのみで、1次モードの転倒モーメントの影響が大きい。

図8(c)の軸変形に対応する成分の波形を見ると、図中の90~100秒以降で形状が明確に変化し、構造物の固有振動に由来する周期成分が小さくなっていることがわかる。この時刻は2・3層で張間方向の柱梁接合部が破断した時点にほぼ等しいことから、顕著な構造被害によるフレームの動的応力状態の変化を、当該の層および下層の柱の軸力センサーがとらえている可能性がある。一方、図7などの応答波形からは、損傷が生じた時刻に明確な変化は読み取れない。

以上の結果から、光ファイバーセンサーによる動的な計測は柱の変動軸変形や曲げ変形をとらえており、その変動特性が構造物の損傷モニタリングにつながる可能性を示していると考えられる。

6. 結論

本論では、Eディフェンス実験の高層建物試験体について、構築時から光ファイバー(SOFO)による柱軸変形の連続計測を行い、計測・分析手法の検討と結果の考察を行った。また振動台加振実験時には柱の軸変形・曲げ変形の動的計測を行い、加速度・変位応答と比較して特性を検討した。主な結論は以下の通りである。

- (1) 試験体の製作時の柱軸変形の連続静的計測において、本論で用いた光ファイバーセンサー(SOFO)は荷重の増加による柱軸力の変化をおおむねとらえることができた。ただし、300mm程度の長さでは建物の重量増に対応する柱の変形が小さく、SOFOセンサーの静的分解能($2\mu\text{m}$)は必ずしも十分ではない。
- (2) 静的な計測は、温度変化による対象構造物およびセンサー設置ジグの変形の影響を敏感に受ける。従って温度計の併設と設置ジグの材質・取付方法の吟味が必須である。また、計測結果から温度-変形関係を求めるこにより、温度依存の見かけの変動と実際の変形を区別し、設置の問題も明示することができる。
- (3) 振動台加振時の動的変形の計測から、柱の動的軸変形と曲げ変形を評価できる。またこれより躯体の損傷を検出できる可能性が示唆された。構造物の応答と架構応力との関連を含めて、モデル等も用いて検討を加える必要がある。

鋼構造建物は損傷が内部に隠れていること、鉄筋コンクリート部材のように損傷の度合いに応じて徐々に剛性が低下するわけではないこと、二次部材の影響が大きいことなど、固有周期の変化にのみ依存した構造ヘルスモニタリングは必ずしも容易ではない。本論の成果は限定的ではあるものの、長期の静的計測と短期の動的計測の利点を組み合わせており、建設時の特性確認から動的応答と損傷の評価までを視野に入れたモニタリング技術に寄与すると思われる。今後は実用化に向けて検討を加える予定である。

謝辞

本研究は文部科学省「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の一部であり、(独)防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターの長江拓也氏ほかの研究グループで実施した。また計測にあたり、石川島検査計測(株)の三上隆男氏、西沢隆夫氏ほかのご協力をいただいた。以上、記して深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1)飛田潤・福和伸夫ほか：地盤・建物系の高密度強震観測の展開と建物動的挙動の検討、日本地震工学会論文集 第7卷、第2号、37-56、2007.
- 2)飛田潤・福和伸夫ほか：建設時の継続的な振動観測に基づく高層建物の振動特性、日本建築学会構造系論文集、第625号、391-398、2008.
- 3)松本健太郎・山田聖志・田口孝・松本幸大：鋼製制震部材の光ファイバセンシング、日本建築学会大会、C-1、759-760、2006.
- 4)井上貴仁、長江拓也ほか：高層建物の耐震性評価に関するE-ディフェンス実験、その1~11、日本建築学会大会、C-1、823-832、873-884、2008.
- 5)飛田潤・福和伸夫：高層建物の強震応答と損傷のモニタリング、日本建築学会大会、C-1、881-882、2008.
- 6)西澤崇雄・大野富男：不整形超高層ビルの柱歪モニタリング報告—計測的目的と概要、日本建築学会大会、B-2、83-84、2007.
- 7)西澤崇雄・大野富男・飛田潤・福和伸夫・護雅史・小島宏章：不整形超高層建物の建設時観測に基づく柱歪・振動特性変化に関する研究、日本建築学会大会、B-2、273-274、2008.
- 8)西澤崇雄、大野富雄、大西稔、福和伸夫：愛知県庁本府舎免震レトロフィット工事における基本設計の概要、日本建築学会技術報告集、第28号、2008.10
- 9)三上隆男：光ファイバ変位センサ(SOFOセンサ)による構造物のヘルスマニタリング、IHI技報、Vol.47、No.4、2007.12.

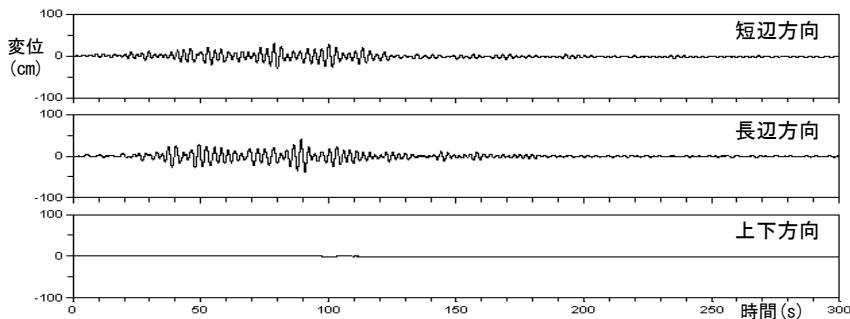
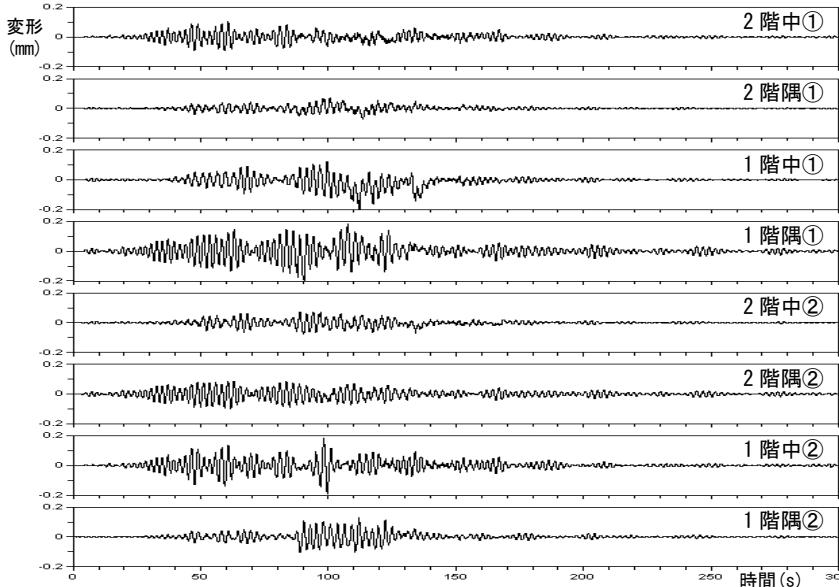
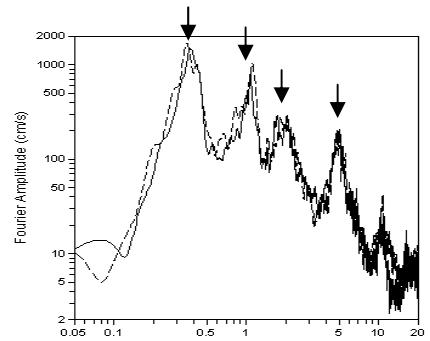


図7 加振時の変位波形（想定三の丸波入力、5階の応答加速度記録の2階積分による）と加速度フーリエスペクトル



(c) 柱の変形記録（左）とフーリエスペクトル（右）



(b) 柱の両面の変形記録の差（左）とフーリエスペクトル（右）

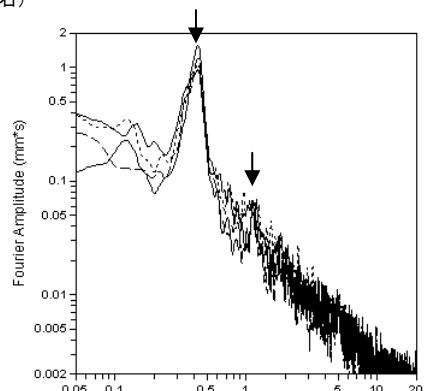
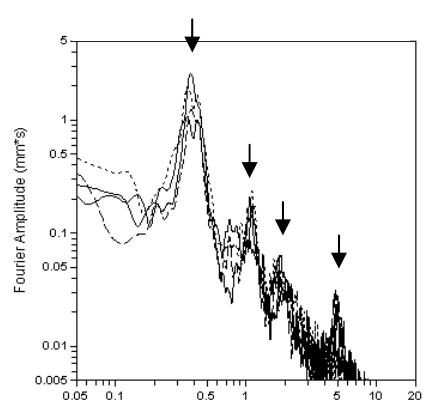
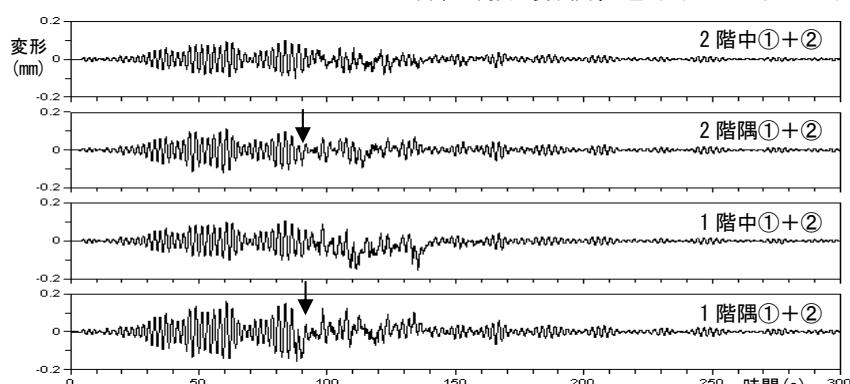


図8 光ファイバーセンサーによる柱軸力の動的計測結果と軸変形・曲げの分離（変形の波形とフーリエスペクトル）