

光ファイバーセンサーによる高層建物試験体の静的・動的な柱変形の計測

Static and dynamic monitoring of column deformation of a high-rise building test structure using fiber optic sensors

2.振動—1.ヘルスモニタリング・スマート構造
光ファイバー 温度依存性 柱変形
E ディフェンス 鋼構造 損傷

正会員 ○飛田 潤 * Jun Tobita
正会員 福和 伸夫 ** Nobuo Fukuwa
正会員 西澤 崇雄 *** Takao Nishizawa

1.はじめに

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¹⁾の鋼構造試験体を対象として、光ファイバーセンサーによる構造物の変形計測システム（SOFO²⁾）による鉄骨柱の静的／動的軸変形の計測を行い、建設過程での荷重評価や地震応答による損傷検出の可能性を論じる。

光ファイバーセンサーによる土木・建築構造物の構造ヘルスモニタリングは、すでに多数の事例がある。分布型光ファイバーセンサー（本論で用いる SOFO も含む）は長い区間の平均的変形・ひずみの検出が可能で、土木構造物や地盤などの利用例が多い。一方、FBG 型などの局所型光ファイバーセンサーは、構造物の部材レベルでの特定位置の詳細な挙動検出に適するなどとえ³⁾。本論の観測は両者の中間的な挙動を評価しており、長さ 300mm の分布型センサーを用いることで柱の平均的な軸変形・曲げ変形とその変化の検出を試みる。建設現場の環境で長期計測を行うことにより、センサーの安定性や耐久性、温度依存性の評価や適切な設置方法についても検討する。

2. 試験体とセンサーの概要

試験体は地上 21 階・高さ 80m の既存高層建物を考え、E ディフェンス振動台で加振できるように上層階を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・剛性を集め約して、約 1,900kN のコンクリートスラブ 3 枚と積

層ゴム・鋼製ダンパーに置換している。（詳細は文献 1）。

計測には計測長さ 300mm の光ファイバーセンサー（SOFO）を用いた。図 2 に設置状況を示す。各柱のほぼ中間部（床から約 2m）に設置した。センサーは直径約 10mm のパイプに計測用と参照用の 2 本の光ファイバーが入っており、それらの中を通る光の位相差から計測部両端の間の伸縮を計測する。センサー両端を支持する L 型アルミブラケットは瞬間接着剤またはボルトで柱に固定する。後述するように、ブラケットの材質や固定状況により温度による伸縮やずれの影響があるため、設置には注意が必要である。また温度変動により柱が伸縮するため、鋼材の温度計測による補正が必須である。分解能は静的計測で $2 \mu\text{m}$ 、動的計測で $0.01 \mu\text{m}$ とされ、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。

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から、1~4 層の中柱と隅柱の計 8 カ所の静的計測を開始し、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（積層ゴム等を含めて各々約 1,900kN）を順次設置するまでの間、屋内搬入時に配線を外した他はほぼ連続して計測

を行った。データ収録はセンサーごとに順次行われ、1 センサーあたり約 7 秒かかる。計測時間間隔はメモリ容量などにより 5~30 分に設定し、温度計は 5~10 分間隔で記録している。

振動台上で試験体が完成した後は、3・4 層のセンサー 4 本を 1・2 層の既存センサーの柱反対面に移設し、一連の加振実験中は動的な柱軸変形・曲げ変形の計測を行った。

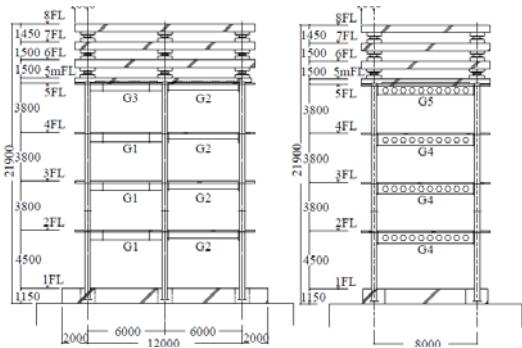


図 1 試験体概要¹⁾

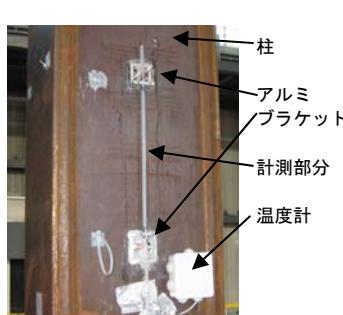


図 2 SOFO センサー設置状況

* 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・工博
** 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博
*** 日建設計 主管・工修

Assoc. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.
Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.
Nikken Sekkei, M. Eng

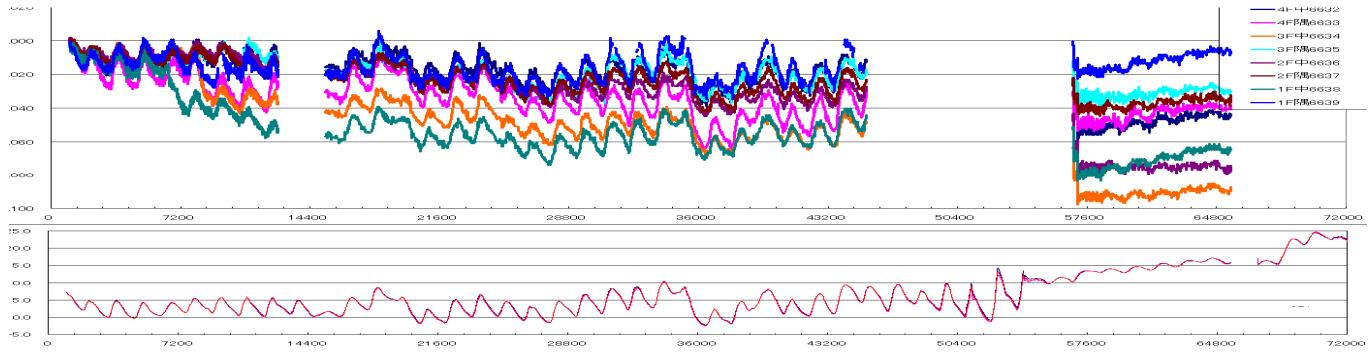


図3 光ファイバーセンサーによる柱軸変形の計測値（温度補正なし）と気温の変動の関係

3. 試験体製作時柱軸変形の静的計測

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箇所の柱軸変形の時刻歴を示す。変形は相対値なので、計測開始時点を0としている。また同じ時間軸で気温の変化も示す。気温は試験体の2か所で計測したが、ほとんど差が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はなく、計測された温度を転体全体の温度と見なした。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から、軸変形の傾向が気温の日変動に対応しており、温度変動の影響が大きい。鋼材の線膨張率はおおむね $11.5 \sim 12 \times 10^{-6}/\text{°C}$ であり、300mmの区間では $0.0036\text{mm}/\text{°C}$ 程度の変形にあたる。柱は□400×25で断面積は 0.0375m^2 なので、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 $6\text{kN}/\text{m}^2$ の変化に相当し、床コンクリートスラブ打設による柱の縮みも1～2°Cの温度上昇でキャンセルされることになる。従って適切な温度補正是必須である。

一般的な温度補正として、鋼材の線膨張係数とセンサー長さから柱鋼材の温度による伸縮を求めて計測値から引いたが、温度変動の影響は十分補正できなかった（図は省略）。むしろ温度変動と逆の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すぎの傾向があり、センサーと計測期間によるばらつきが大きく、各階スラブ打設の荷重増に対する柱軸変形が明確に読み取れない。

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。縦軸

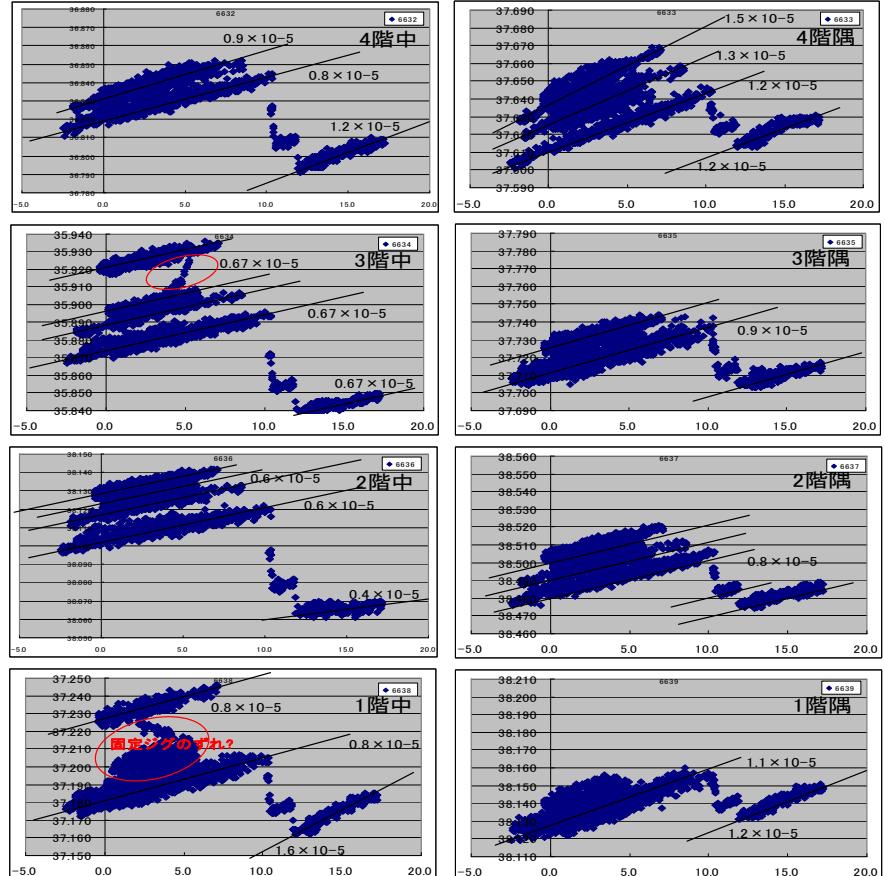


図4 各柱の温度と軸変形の関係

は300mmのセンサーあたりの軸変形を示している。プロットは5～30分ごとの計測値で、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期間がすべて含まれている。全体に、温度依存の右上がりの直線分布が明確で、それが荷重の変化に伴って下方（圧縮縮み）に移動する。各図で左上に分布する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。スラブ打設・設置は数時間程度で行われ、その間の変化（右上がりの直線から、下の別の直線へ）も確認できる。

図中の右上がりの直線は、各段階での温度依存性の傾向を表すように目視で引いたもので、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。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場合があることがわかる。みかけの線膨張係数は $0.6 \sim 1.5 \times 10^{-5}$ 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も多い。

この原因として、センサーの両端を固定している L 型アルミブラケットの影響の可能性がある。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、柱の鋼材のみかけの線膨張係数が小さくなる。センサーによって線膨張係数が異なることは、ブラケットを固定している接着剤の状態や固定中心などにより、温度変化によるブラケットの伸び量が異なることで説明できる。さらに 3 階中柱と 1 階中柱のように、ある時点で大きく縮んでいるものは、ブラケットがずれたことなどの影響が考えられる。後日に別途行った確認試験では、ブラケットを鋼材とし、L の向きをそろえることで安定性を向上できることが確認された。

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正確に読み取ることができる。またブラケットのずれなど異常も発見しやすくなる。長期にわたる変化を扱う場合には、季節変化の影響を除くため、日変動により温度補正を検討しておくことがさらに重要になる。

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 $0.01 \sim 0.015\text{mm}$ 程度が予想され、おおむね一致している。一方、図 4 各図で中央付近から右下への低下は 3 枚の縮約スラブ（合計約 $5,600\text{kN}$ ）によるものである。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柱の縮み（温度補正済）を図 5 に示す。変形量はスラブ重量と対応し、中柱の変形が隅柱の約 1.5 倍になっている。

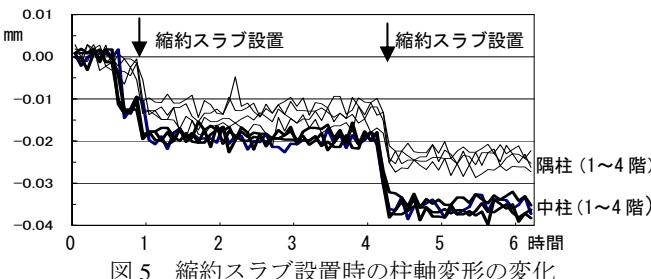


図 5 縮約スラブ設置時の柱軸変形の変化

4. 加振実験時の柱軸力変動の動的計測

SOFO の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。振動台加振実験時は 1・2 階の中柱と隅柱計 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。中柱は桁行方向、隅柱は張間方向の 2 面に設置し、その方向の曲げを対象としている。

図 6 は、三の丸波で加振した際の 5 階の強震計記録から、加速度の 2 回積分による変位と、加速度フーリエスペクトルを求めた。 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 7(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が現れ、1 次モードの転倒モーメントの影響が大きい。さらに軸変形成分が図中の 90~100 秒以降で明確に小さくなっているが、これは張間方向の柱梁接合部の溶接が破断した時にほぼ等しい。

5. 結論

試験体製作時の柱軸変形の連続静的計測において、光ファイバーセンサー（SOFO）は荷重増加をおおむね評価できた。ただし温度の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ため、温度計の併設と設置方法の吟味が必須である。計測結果から温度一変形関係を求ることにより、温度依存の見かけの変動と実際の変形を区別することができる。

一方、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を分離して評価できた。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。他の実建物の長期計測も行っており、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る。

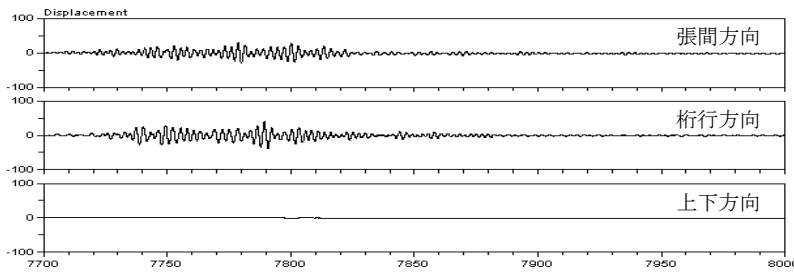
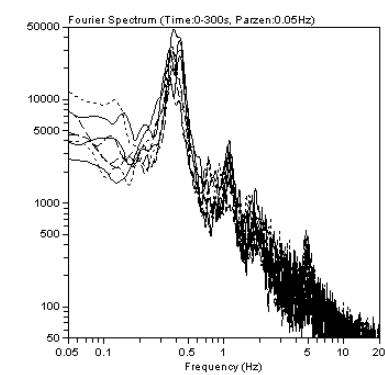
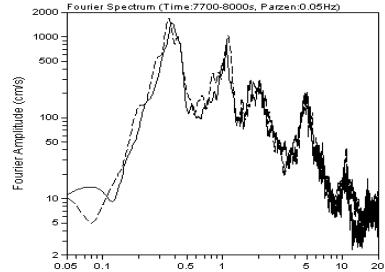
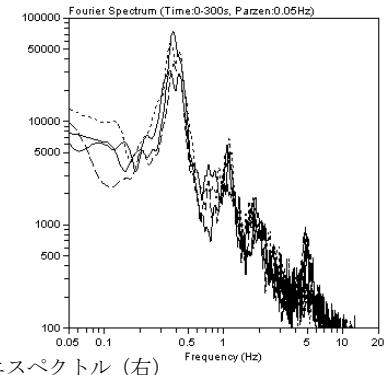


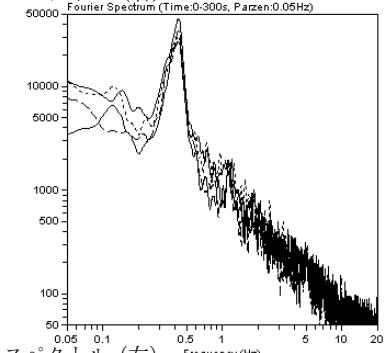
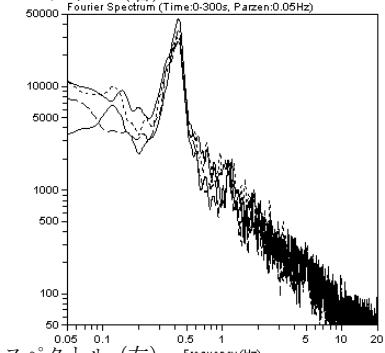
図 6 加振時の変位波形（想定三の丸波入力、5 階の応答加速度記録の積分による）と加速度フーリエスペクトル



(a) 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）



(c) 柱の両面の変形記録の和（左）とフーリエスペクトル（右）

図 7 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（変位波形とフーリエスペクトル）

参考文献

- 1)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、建築学会大会、C-1、823-832、873-884、2008.
- 2)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モニタリング、IHI 技報、Vol.47、No.4、2007.12.
- 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、建築学会大会、C-1、759-760、2006.