

光ファイバセンサによる柱の動的軸変形計測に基づく高層建物の固有振動特性の推定

Estimation of Natural Frequency Characteristics of a High-Rise Building based on the Dynamic Axial Deformation Observation of the Columns by use of Fiber Optic Sensors

2. 構造 - 2. 振動

高層建物 解体 光ファイバセンサ
柱軸変形 工事振動 固有振動数正会員 ○今枝 賢志朗*
正会員 飛田 潤**
正会員 福和 伸夫***
正会員 矢代 晴実****KENSHIRO Imaeda
TOBITA Jun
FUKUWA Nobuo
YASHIRO Harumi

1. はじめに

筆者らはこれまでに、E ディフェンス試験体において光ファイバセンサの静的計測を用いて試験体作成過程の荷重増加に伴う柱軸力の変化を確認するとともに、振動台加振時の動的計測を用いて柱の動的な軸変形と曲げ変形を分離して評価し、さらに架構の損傷評価につながる計測結果を得ている¹⁾。また実在高層建物でも同様の計測を行い²⁾、光ファイバセンサによる損傷評価の有効性を示した。

ここで用いた光ファイバセンサは比較的安価で耐久性があるため、建設時から柱に設置しておけば、必要な際に随時計測・収録機器を接続することで、建物の重量と固有振動数を容易に計測することが可能になる。これは剛性とその変化の直接的な評価による構造ヘルスマonitoringにつながる。

本研究は、実在鉄骨造高層建物解体時の柱変形を光ファイバセンサにより継続的に計測し、静的計測を用いて躯体重量の詳細な評価を行うとともに、動的計測を用いて建物の固有振動数や建物の変形を検討したものである。解体過程での振動特性とその変化については、常時微動計測、振動実験、地震観測などを継続的に実施し、基本的な振動特性とその変化を詳細に検討している³⁾。本論では、これらの振動特性の変化を光ファイバセンサによる柱軸変形の計測から詳細に評価することを目的とする。

2. 対象建物と解体の概要

2.1 対象建物

計測対象は名古屋市中心部の熱田台地上に立地する地上25階、地下3階、高さ90m、基準階面積約1500㎡の高層事務所建物である。図1に立面図と基準階平面図、表1に建物概要を示す。本建物は1971年に設計・着工し、1973

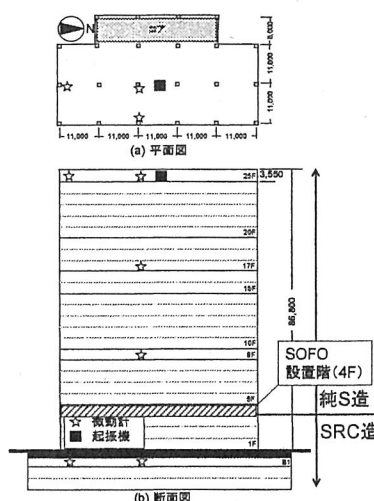


図1 立面図・基準階平面図

表1 建物概要

建物概要	用途	貸事務所
	基準階面積	1500.69 m ²
階数	地上	25階
	地下	3階
高さ	塔屋	1階
	最高部	90.00 m
基礎	基準階階高	3.55 m
	地階階高	B1: 5.00 m B2,3: 3.40 m
	基礎底深さ	GL - 15.10 m
	杭	φ1,500×106本 φ2,000×22本
主体構造	骨組種別	4階床以下SRC造、 4階柱以上純S造
	耐震壁 その他	4階以上はK型鉄骨ブレース 3階以下はSRC造ブレース RC造地下外壁
構造概要	床形式	鉄筋コンクリート造
	固有周期	EW方向 2.47秒 NS方向 2.44秒
	減衰定数	鉄骨造部分 2% 鉄筋コンクリート部分 5%

年9月に竣工している。構造種別は、比較的階高の高い4階床までは鉄骨鉄筋コンクリート造となっており、4階柱以上は鉄骨造の純ラーメンで西側コアにブレースがある。

設計1次固有周期は張間方向2.47秒、桁行方向2.44秒であり、内装解体前で積載荷重がほぼない状態の微動計測では、張間で0.43Hz (2.3秒)・桁行で0.46Hz (2.2秒)となっている。

2.2 解体概要

図2に解体工程と計測スケジュールを示す。まず2009年10月から約4ヶ月の内装解体と石綿除去工事が行われ、鉄骨躯体と床スラブ、および外壁カーテンウォールのみとなった。次に2010年3月中旬から7月末まで、4階以上の鉄骨造部分を上階から順に解体し、最後に4階以下と地下部分の鉄骨鉄筋コンクリートの解体破碎工事と進出した。

光ファイバセンサによる柱変形の計測は、内装解体撤去後の2月中旬から、5階床スラブ解体中の7月中旬までの約5ヶ月間にわたり行った。その間に10分間隔で静的計測を行うとともに、8回の動的計測を実施した。この間、床

*名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

**名古屋大学災害対策室 教授・工博

***名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

****東京海上日動リスクコンサルティング(株)・工博

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
Prof., Disaster Management Office, Nagoya University, Dr. Eng
Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng
Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd., Dr. Eng

スラブ、鉄骨ラーメン、カーテンウォール、コア周りのPCパネル等のみの解体がほぼ階ごとに進行した。各階の解体手順は、まず対象階以下の3階程度を支保工で支え、床スラブと鉄骨フレームをピースに切断して、タワークレーンと建物内の工事用資材運搬エレベータにより搬出している。タワークレーン基部は4階に設置されているため、上部建物の重量の計測にはほとんど影響しないが、中間階にステイで支持されているため、振動特性には影響する可能性がある。

1階の解体に要する日数は平均4.4日、人員は1日あたり平均40人程度である。なお、先行して行われた内装解体では、1日当たり約100人、石綿除去に80人程度の作業員を要している。

3. 計測概要

解体中の柱軸変形の計測には、光ファイバセンサ SOFO を用いた。この計測システムは筆者らが実建物や実大試験体で使用しており^{2), 4)}、解体工事の現場の環境でも長期間の安定性に優れ、連続的に計測を行う機材はさほど大型ではなく、運搬が容易で工事作業への影響は少ない。また、SOFO センサは静的・動的計測のいずれも可能であるが、本論では動的計測の結果について検討する。光ファイバセンサの構造と設置の詳細は文献⁴⁾で示すとおりである。

SOFO センサの動的計測における周波数特性 (1kHz まで) や分解能 (0.01 μ m) は、一般的な建築構造物の計測には十分である。

センサ位置はS造の最下階である4階の柱とし、図3に示すように、隅柱・側柱・中柱5本に計9本のセンサを設置した。たとえば「中柱、西側、中央」とあるのは、中柱の西側の面で中間の高さ (床から 1.5m 程度) のセンサを示している。柱の軸力を安定して評価するため、主に曲げの影響が少ない柱中間部に設置しているが、中柱1本については柱頭にも同様に設置した。建物中央の中柱の両面には動的軸変形と曲げ変形の分離検出を試みるために、建物のEW方向の端にある2本の柱には建物の全体の変形を検出するために、北側の中柱にはNS方向の建物の変形を検出するために、隅柱の両側面には設置面の違いで記録の違いがあるのかを検討するためにセンサを設置した。

光ファイバセンサの動的計測結果と建物の振動特性を比較するために分解能の高い強震計 (加速度計) を用いる。これは解体工事現場の悪条件や、工事振動によるトリガ収録、さらに地震があった場合の確実な記録などの利点がある。2010年3月以降の解体中は、1階とできる

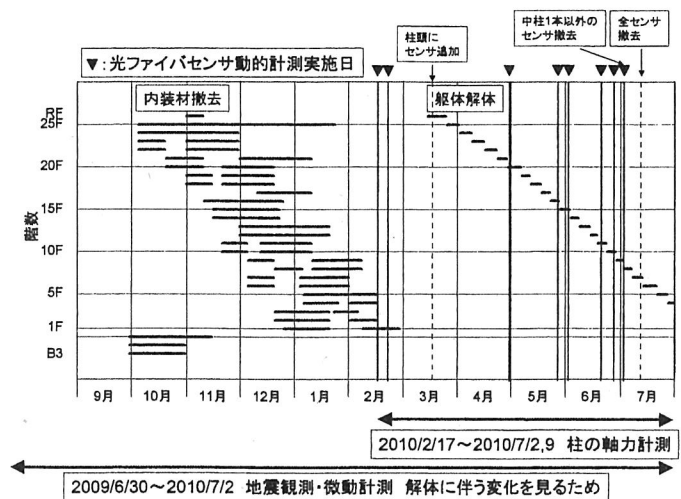


図2 解体工程と計測スケジュール

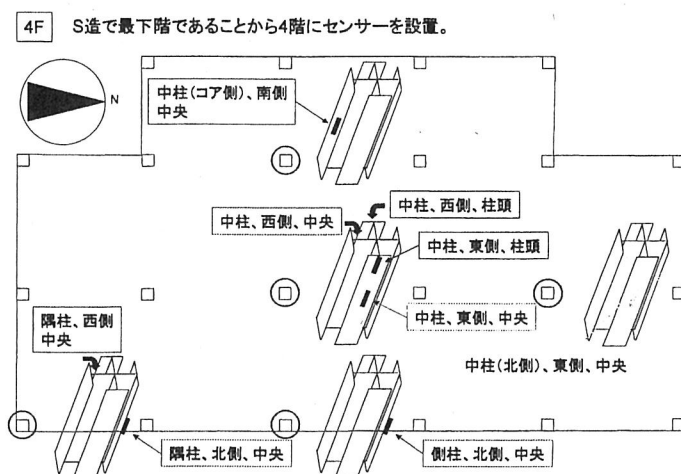


図3 センサの配置 (4階)

だけ上の階に強震計を設置し、解体による階数の減少に伴う振動特性の変化を計測している。光ファイバセンサの動的計測と同日に手動でトリガをかけて常時微動観測を30分程度行った。以降これを手動トリガ記録と呼ぶことにする。

表2に光ファイバセンサの動的計測と同日に手動トリガによる加速度記録の有無のデータ一覧を示す。手動トリガによる加速度計測は全5日間計測を行った。計測の時間帯は5日間のうち2日間は昼休み (12~13時) に行ったが、3日間は工事中に行った。手動トリガとは別に工事振動によるトリガ記録 (約5分) も随時得られている。工事振動によるトリガは水平方向 1gal、上下方向 5gal に設定し、1回の記録時間は300秒とした。

光ファイバセンサの動的計測実施日の加速度記録は、2回積分して変位波形を求めて比較検討を行った。手動トリガによる微動記録がない日は工事振動によるトリガ記

録が毎日数十回程度得られたため、その日1日に得られた記録全てをアンサンブル平均することで、日ごとにスペクトルを求めた。

4. 光ファイバセンサの動的計測記録の特性

例として図4に工事振動の影響を検討するために用いた2010年4月30日の変位記録と光ファイバセンサの計測結果を示す。図5,6に各柱での振動特性を比較検討のために2010年2月23日と2010年4月30日計測記録のスペクトルを示す。建物は、それぞれ25階と20階の状態である。

図4(a)(b)(c)は、加速度記録から求めた変位波形と光ファイバセンサの比較である。加速度と光ファイバセンサの計測は同日ではあるが、解体工事中の異なった時間帯に行った。いずれも波形からほぼ同様の特性がみられ、工事振動の影響がある。

図4(d)は柱変形の分析において、工事振動の影響の検討を行った。図中の①は(b)の波形全体に対してアンサンブル平均を用いてスペクトルを求めた。また②は静かな区間のみを切り出して、アンサンブル平均で重ね合わせてスペクトルを求めた。工事振動によるピークの位置の違いは $\pm 0.01\text{Hz}$ 程度の範囲でしか見られず、工事振動がある状態でも固有振動数を推定できる事がわかった。

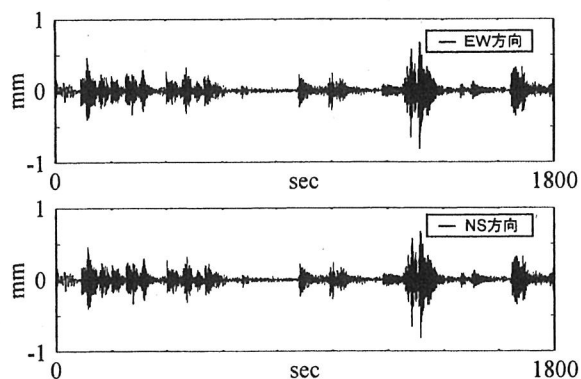
図5,6に他の光ファイバセンサで得られた記録のスペクトルを示す。これらの記録は、工事振動を含んだ状態の波形からスペクトルを求めた。図6の柱頭の記録は収録できる収録数の制限により他の記録より30分後に計測したものを使用している。両方の記録を比較したところ振幅レベルは柱頭を収録した記録の方が小さい値を示したが、スペクトルは同様の形状を示すことを確認した。

図5よりセンサの設置する柱や側面によって建物のどの成分を示すかを検討してみると、「中柱(北側)、東側、中央」と「隅柱、西側、中央」以外のセンサはEW・NS方向ともにピークが確認でき、振動が卓越するEW(短辺)方向の成分のピークが大きくなる。「中柱(北側)、東側、中央」はNS方向の振動ピーク成分をほとんど含んでいない。「隅柱、西側、中央」はEW・NS方向ともにピークが確認できるが、NS方向の成分を多く含んでいる。センサが設置されている面の方向から考えると、もし柱の曲げ成分があるならば、EWの面に設置したセンサはEW方向、NSの面に設置したセンサはNS方向の成分を比較的多く含むと予想したが、隅柱に設置した2つのセンサは逆の傾向を示した。なお、建物中央の中柱以外の柱では、ねじれの成分も確認できた。

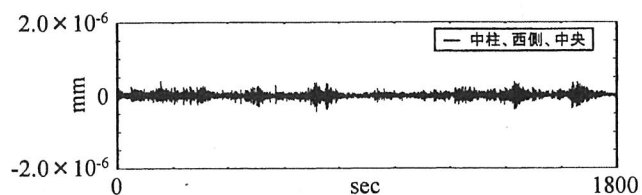
柱両面のセンサの差と和から曲げと軸力が分離できる

表2 データ一覧

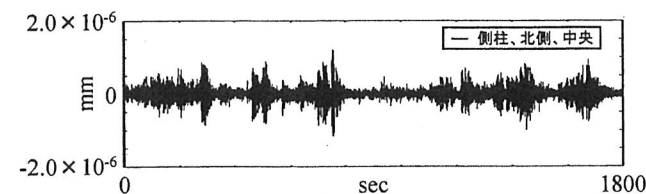
計測日	計測センサ(ch)	計測時間[sec]	計測開始時刻	手動トリガによる加速度記録	計測時間
2010/2/17	1~7	656.67	13:55	無	
2010/2/23	1~7	1800	12:09	無	
	1~7	1800	12:42	無	
2010/3/17				中柱1本の柱頭にセンサ2本追加	
2010/4/30	1~7	1800	15:45	有	13:40~14:10
	3~9	1800	16:17		
2010/5/27	1~7	1800	14:18	無	
	3~9	1800	16:51		
2010/6/3	1~7	1200	15:47	有	14:24~14:54
	3~9	1200	16:09		
2010/6/19	1~7	1800	10:45	有	9:47~10:17
	3~9	1800	11:23		
2010/6/25	1~7	1800	12:25	有	12:42~13:10
	3~9	1244.31	12:58		
2010/7/2				中柱1本以外のセンサ撤去	
2010/7/2	4,5,8,9	1200	12:17		
	4,5,8,9	1200	12:38	有	12:18~13:01
	4,5,8,9	1200	13:04		
2010/7/9				センサ撤去	



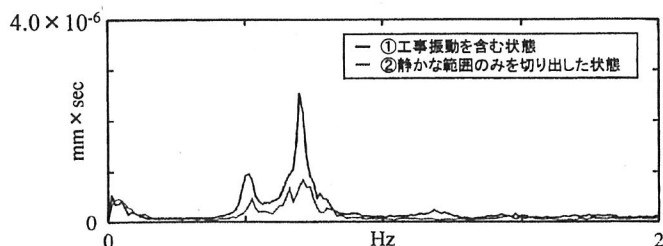
(a) 16階の変位波形



(b) 「中柱、西側、中央」センサの変位波形



(c) 「側柱、北側、中央」センサの変位波形



(d) 「中柱、西側、中央」センサの
工事振動による影響の比較

図4 2010年4月30日の計測記録

はずであるが、今回は十分な検討ができていない。

加速度記録と光ファイバセンサの動的計測記録からそれぞれスペクトルを求め、ピーク位置により並進1次固有振動数を推定した。この結果と建物高さとの関係を図7に示す。加速度記録と光ファイバセンサの1次の固有振動数は、解体が進むことによって建物高さが変化しても $\pm 0.02\text{Hz}$ 程度の誤差で整合する。

5. 結論

本論文では、実在高層建物の解体時に、光ファイバセンサを用いて低層階の柱変形を計測し、微動記録と比較した。光ファイバセンサと加速度計から得られた波形とスペクトルは良く対応し、推定された1次固有振動数はほぼ同じ値を示した。また、柱変形から固有振動数を求める際は、工事振動を含んでいる波形からでも十分推定可能である。

この結果より、光ファイバセンサのみで重量と固有周期を計測して、剛性を正確に推定できることを示した。

謝辞

本建物の振動実験・計測において、㈱竹中工務店現場作業所・技術研究所のご協力を得た。また東京海上日動火災保険㈱には計測の便宜を図っていただいた。記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 飛田潤、福和伸夫、西澤崇雄：光ファイバセンサによる鋼構造試験体の静的・動的柱軸変形の計測、構造工学論文集、Vol.55B、pp.577-756、2009.3
- 2) 西澤崇雄、大野富男、飛田潤：設計から竣工後までの長期的な品質確保のための光ファイバセンサによる高層建物の構造性能把握に関する研究：日本建築学会構造系論文集 75(658)、2247-2255、2010.12
- 3) 今枝賢志朗、飛田潤、福和伸夫、矢代晴実：解体時の継続的観測に基づく高層建物の振動特性：第13回地震工学シンポジウム、Paper No. GO9-Sat-AM-4、2010.11
- 4) 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫：光ファイバセンサによる高層建物建設時の柱軸力変化の計測、日本建築学会技術報告集、第15巻、第31号、pp.751-756、2009.10

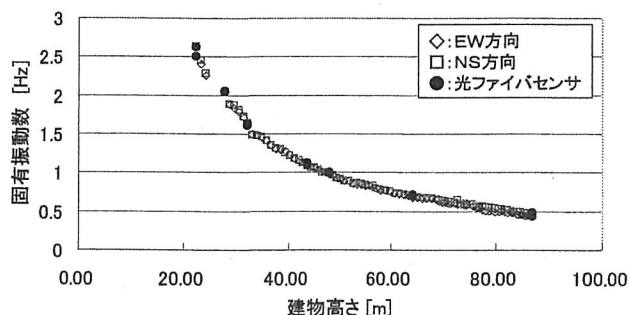


図7 加速度記録と光ファイバセンサで求めた固有振動数

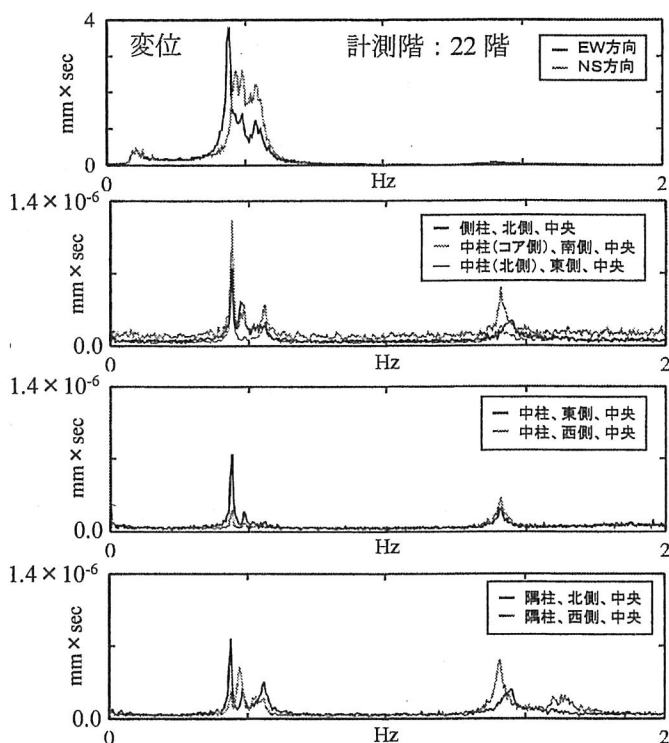


図5 計測記録のスペクトル (2010年2月23日、25階)

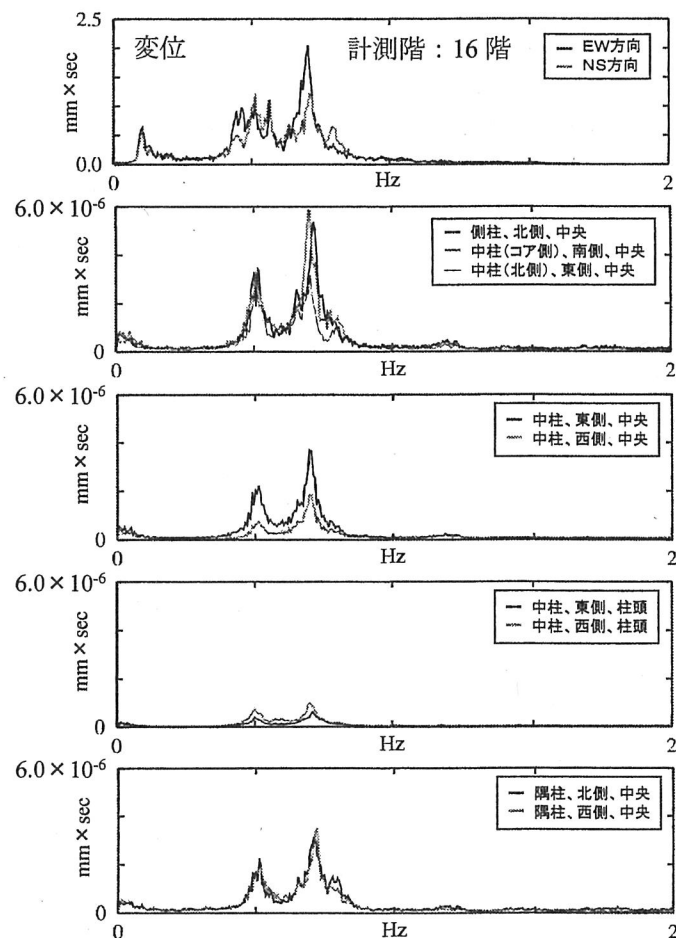


図6 計測記録のスペクトル (2010年4月30日、20階)