

光ファイバセンサによる高層建物解体時の柱軸変形の計測

AXIAL DEFORMATION OBSERVATION OF COLUMNS OF A HIGH-RISE BUILDING DURING DEMOLITION BY USE OF FIBER OPTIC SENSORS

今枝賢志朗*, 飛田潤**, 福和伸夫***, 矢代晴実****, 曾我裕*****

Kenshiro IMAEDA, Jun TOBITA, Nobuo FUKUWA, Harumi YASHIRO and Yutaka SOGA

Column axial deformation of a high-rise steel building was continuously observed during its deconstruction by use of fiber optic sensors to evaluate removed weight of upper floors. Installation, observation and data processing method of SOFO type fiber optic sensor were verified especially focused on correction of temperature-dependent effect on strain of steel structure. Accuracy of observed axis deformation was improved by evaluation of the apparent coefficient of thermal expansion which includes thermal deformation of sensor mounts. Evaluated weight of structures was verified by actual weight of deconstructed structures and detailed estimation by structural data. Accurate observation of weight of actual structure is important for structural health monitoring with natural frequency of the building.

Keywords : High-rise Building, Demolition, Fiber Optic Sensor, Axial Deformation, Building Weight, Temperature Correction

高層建物, 解体, 光ファイバセンサ, 柱軸変形, 建物重量, 温度補正

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波による甚大な被害に加えて、巨大地震による広域かつ多面的な被害や影響が改めて浮き彫りになった。長周期地震動による高層建物の揺れもそのひとつであり、首都圏の多数の超高層建物やタワーなどの大振幅応答が多くの人々により体感され、また映像や観測記録に残されたことは重要である。大きな構造被害は報告されていないが、非構造部材や設備の損傷、室内家具の転倒などは多数発生した¹⁾。さらに遠方の大阪平野では、地盤の揺れは小さいものの、超高層建物が深部地盤で浅部の地盤卓越周期と共振してきわめて大きな応答増幅を示した例もある²⁾。

近い将来の東海・東南海・南海地震の連動を想定すれば、濃尾平野・大阪平野をはじめ、首都圏でもさらに大きいレベルの長周期地震動が予測され、多数の高層建物が被災する可能性がある。特に、長周期地震動の入力を十分に考慮していない初期の高層建物に関して、あらためて応答性状や耐震性を検討することは重要な課題であり、建築学会での検討³⁾やEディフェンス実験⁴⁾などが行われている。一方、大規模な地震災害により多数の高層建物が同時被災した際に、損傷程度や継続使用の可否を速やかに確認することが必須であり、

構造健全性・損傷評価の技術も重要度を増している。これらの検討のためには、実在高層建物の計測に基づいた基本振動特性の評価事例の蓄積が必要となる。

筆者らはこれまでに、実在高層建物の施工時から竣工後の振動や変形の計測を通して、詳細な構造モニタリングを行う手法を提示している⁵⁾。その際に、計測された固有振動数の変化を的確に活用するための構造モデリングに当たって、建物重量評価の重要性を検討し、光ファイバセンサによる柱荷重計測の有効性を示した。

本研究は、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連続的に計測し、それをもとに躯体重量の詳細な評価を行うとともに、計測手法の高度化を検討したものである。今回の解体では内装材の撤去と躯体解体が別途行われたため、これまで実施してきた施工時の連続計測に比べて、躯体のみの重量を計測できる点に特徴がある。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検討している⁶⁾。本論では、これらの振動特性の変化を検討するに当たって重要となる躯体重量を、柱軸変形の計測により詳細に評価することを目的とする。その際に、特に柱軸変形の計測結果に及ぼす温度の影響の傾向と補正を検討している。

* 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

*** 名古屋大学減災連携センター 教授・工博

**** 東京海上日動リスクコンサルティング(株)・工博

***** (株) 竹中工務店 設計部・工修

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Prof., Disaster Management Office, Nagoya University, Dr. Eng.

Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd., Dr. Eng.

Building Design Dep., Takenaka Corporation

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

対象建物は、主に事務所ビルとしての機能面の要求から建て替えられることとなった。高層建物の解体例はこれまでに極めて少なく、名古屋周辺では初めてのこととなる。図2に解体工程を示す。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砕工事へと進んだ。

本論文で実施した柱軸力計測は、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ヶ月間である。この間、床スラブ、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んだため、構造モデル化と対応した各階の重量評価を明確に行うことが特徴である。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。タワークレーンは4階に設置されているため、上部建物の振動特性および重量の計測にはほとんど影響しないと考えられる。

図3に、解体により撤去された構造躯体の重量について、構造図面から詳細に計算した結果と、解体に伴い搬出された廃材の記録から概算した結果を、解体過程の日程との関係で示す。本建物に関しては、積載荷重や非構造部材の重量がほぼない状態であるため、上記の2通りの算定結果はかなり近い値となっている。

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

解体工事中を通じて長期にわたる計測による実建物の構造特性の把握を目的としていることから、センサは、解体工事の現場の環境でも長期間の安定性に優れ、計測機材は大型ではなく運搬が容易で工事作業への影響が少ないもので、解体中の建物の重量変化や、固有周期などの動特性が計測できることを重視した。これらの計測目的に適した計測装置として光ファイバによる構造物の変位計測システム SOFO を使用した。

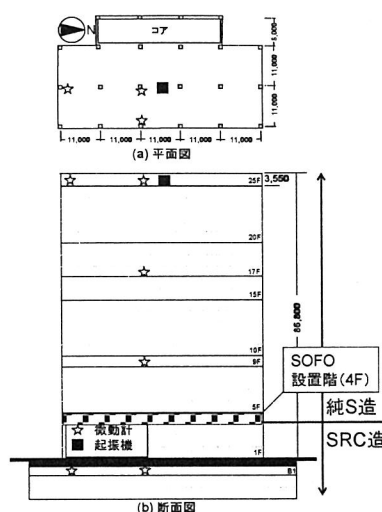


図1 立面図・基準階平面図

表1 建物概要

建物概要	用途	貸事務所
	基準階面積	1500.69 ㎡
	地上階数	25階
	地下階数	3階
	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
構造概要	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
	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%

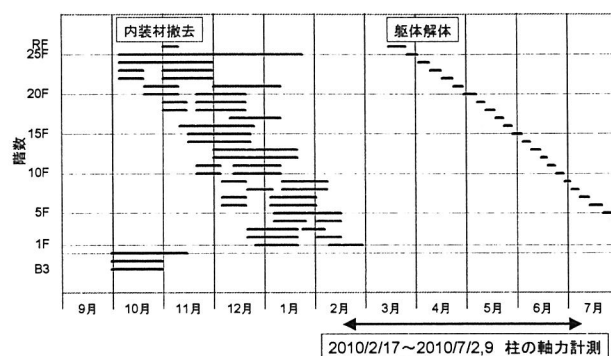


図2 解体工程

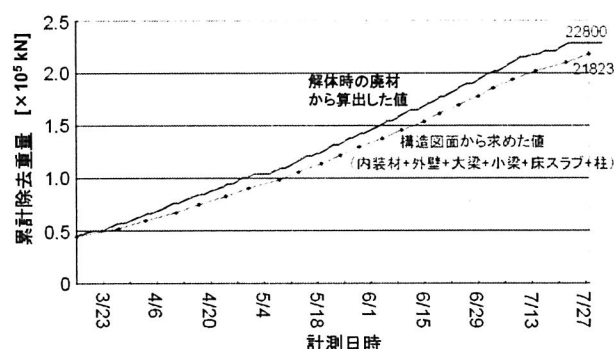


図3 建物重量の計算値について

図4にSOFOセンサの構造の概念図を示す。センサは2本の光ファイバで構成され、1本は構造物の伸縮に追随し、他の1本は長さ変化しない構造になっており、これら2本の光ファイバの長さの差を計測することで温度の影響を除くようになっている。分解能は静的変位で2μmであり、今回の計測での柱変形量(約0.18mm)に対して十分な計測精度を有している。今回使用した長さ300mmのセンサは、局所的な応力状態による影響をのぞいて柱全体の伸縮を計測するのに適している。また、このセンサは動的な計測にも対応できる。その際の周波数特性(0~1kHz)や分解能(0.01μm)は、常時微動レベルの小振幅でも建物の固有振動による構造体の歪変化を捉えることができる精度を有している。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^{5),7)}、静的計測では建物の

重量評価、動的計測では建物の固有周期の特定や、部材の曲げと軸変形の分離を行って、特性を確認している。

図5にセンサの設置状況を示す。光ファイバセンサはL型鋼製固定金物（ブラケット）で両端を支持し、鉄骨柱に瞬間接着剤で固定している。各センサ向きには、柱鋼材の温度を計測する熱電対を設置している。SOFO センサ自体は上述のように温度変化の影響を受けない構造となっているが、計測対象の柱鋼材が温度により伸縮するため、正確な変形の計測と応力の推定のためには温度の計測が必須である。さらに、これまでの計測結果から、ブラケットの温度変形も計測精度に大きく影響するため、材質を柱と同じ鋼製とし、図5に示すように両端のL型固定金物を同じ向きで設置している。またブラケットの柱への取り付けについても、接着面全面が十分一体化するよう注意が必要である。図6に設置時の状況を示す。このような配慮により設置を行っても、温度変化の影響は鉄の線膨張係数による柱の変形だけでは説明できず、センサによって異なった傾向を示すことが多い。これらの補正法に関しては4章で詳細に述べる。

センサ位置はS造の最下階である4階の柱とし、図7に示すように、隅柱・側柱・中柱5本に計9本のセンサをフランジ中央（ウェブと重なる部分）に設置した。たとえば「中柱、西側、中央」は「柱種類、フランジの面、床からの高さ」を表しており、中柱の西側のフランジの面の中央部で中間の高さ（床から1.5m程度）を示している。柱の軸力を安定して評価するため、曲げの影響が少ない柱中間部の両面に設置しているが、中柱1本については柱頭（床から3.0m程度）にも同様に設置した。5本の柱の計測により、柱位置（隅柱、側柱、中柱）による荷重分担率の差や、躯体解体時の平面内の荷重の偏りなどを検討する。また、柱の選定・フランジの設置面に関しては、動的計測も考慮に入れたセンサ配置となっており、計測も行ったが、本論では静的計測の結果について検討する。データ収録にはデータロガーを用い、10分間隔で連続して収録を行った。

4. 計測結果の温度補正

4.1 線膨張係数の求め方

図8に、約5ヶ月にわたる躯体解体過程について、中柱・西側・中央のセンサの変形と温度の関係を示す。(a)は全フロアの解体時で得られた計測記録が異なる色で重ねられており、(b)～(h)は見やすいように計測記録が重ならない3フロア毎で示している。柱の鉄材が温度により伸縮するため、全体に右上がりの傾向を示している。解体開始時点（3月）は図の左下のほうで、温度の日変動で右上がりの直線上に並ぶ傾向を示し、解体が進むにつれて右上がりの線状の分布が図の右上に移動する。これは解体により上部躯体重量が減少することと、夏に向かい気温が上昇傾向にあることによる。

ひずみの変化がない（軸力が変化しない）ときの温度変化による傾きが線膨張係数にあたり、本来は材料に固有の定数となるはずだが、実際には図8の分布の傾きは一定ではなく、センサや解体の時期（解体を行っている階数で表示）により異なっている。平均的には鉄の線膨張係数（ $1.21 \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}]$ ）と大差ないが、 $\pm 20\%$ 程度のばらつきがみられる。これは柱の母材伸縮だけでなく、ブラケットや接着の影響、さらには解体による急激な軸変形の影響も含んでいるためと考えられる。以降この値を「見かけの線膨張係数」と呼ぶことにする。

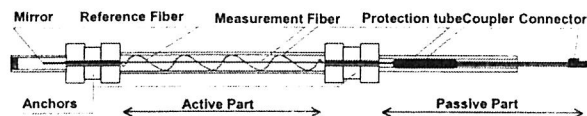
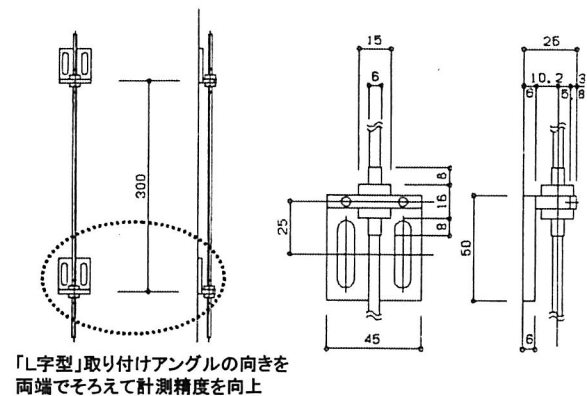


図4 SOFOのセンサ概念図



「L字型」取り付けアングルの向きを
両端でそろえて計測精度を向上

図5 センサの設置概要

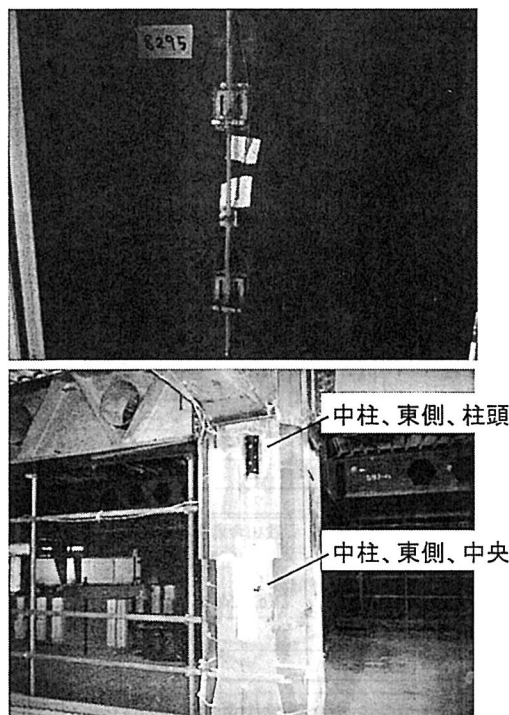


図6 センサの設置状況

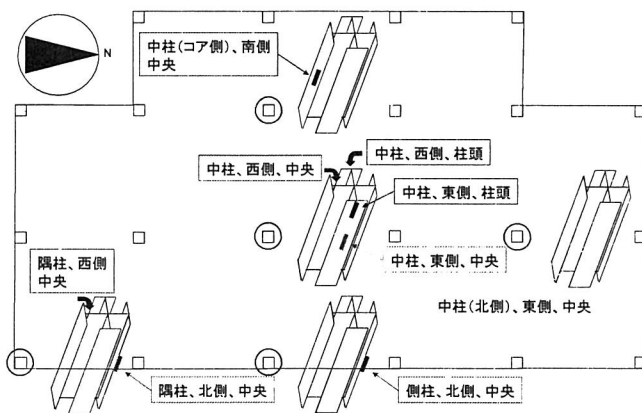
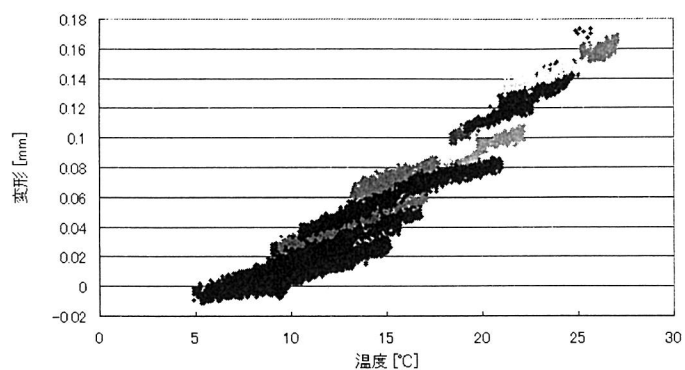
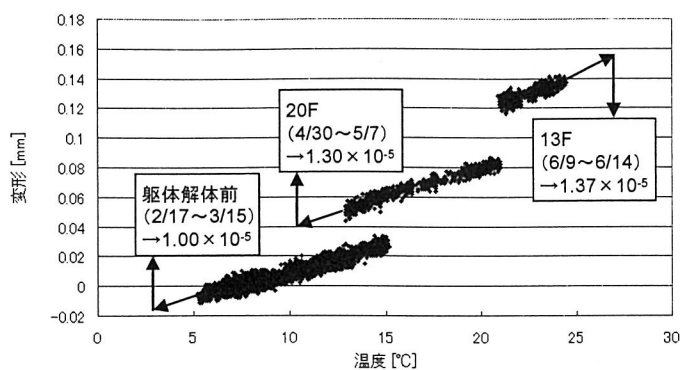


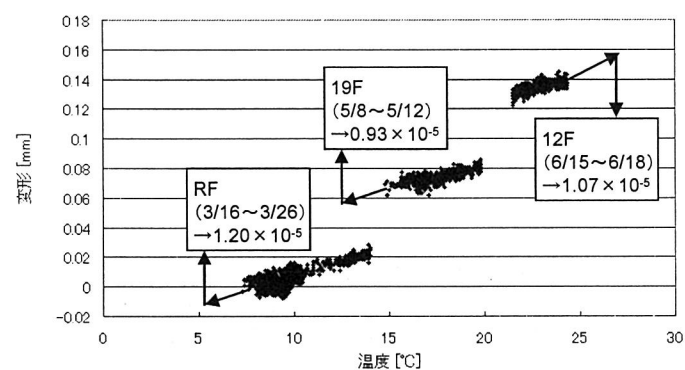
図7 センサの配置（4階）



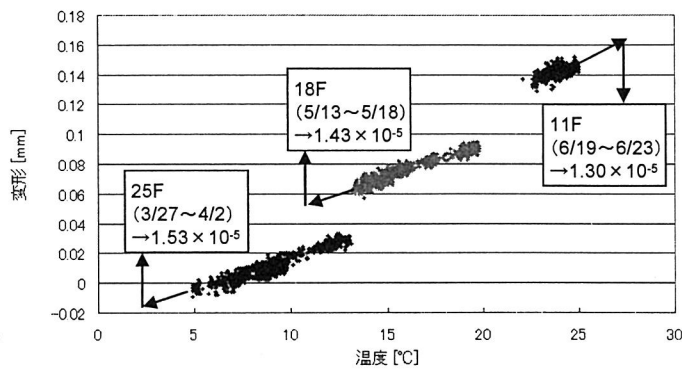
(a) 全フロア



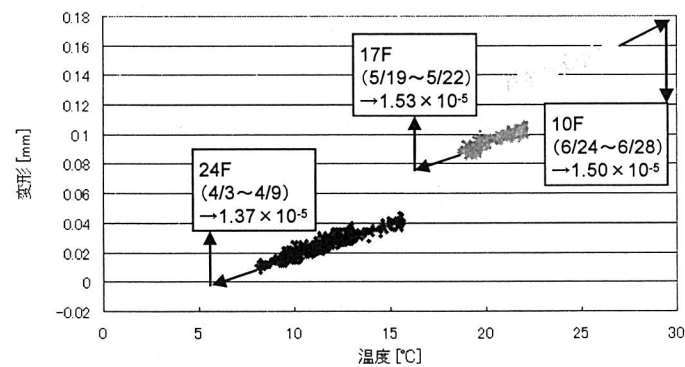
(b) 躯体解体前・20F・13F



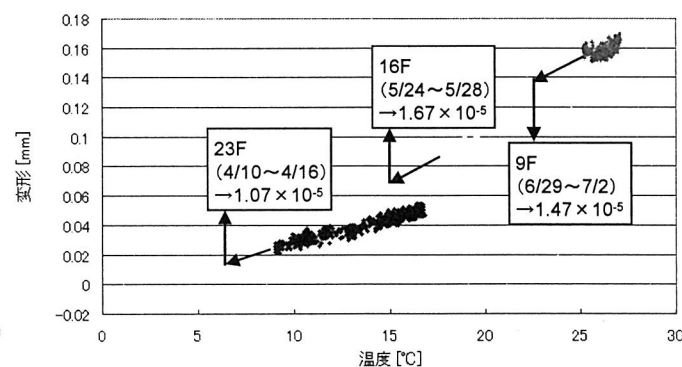
(c) RF・19F・12F



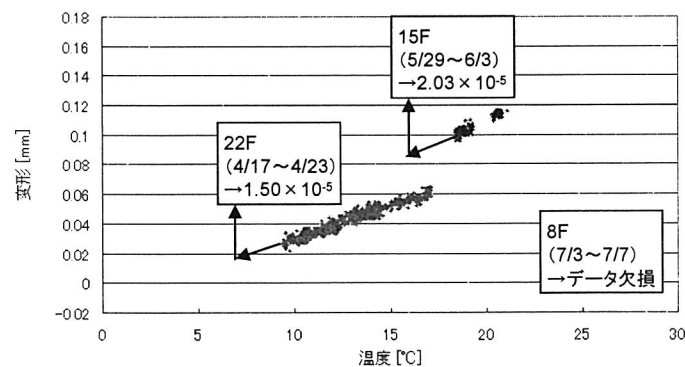
(d) 25F・18F・11F



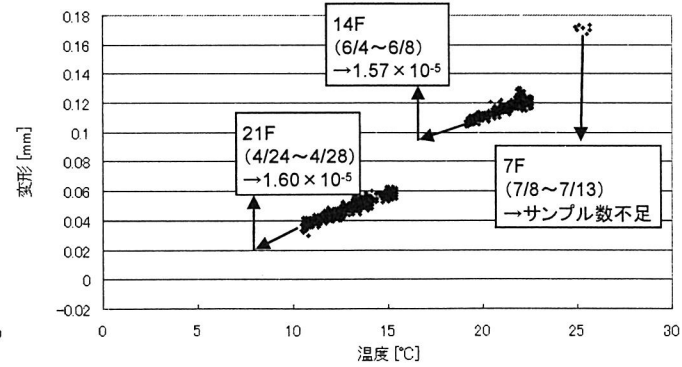
(e) 24F・17F・10F



(f) 23F・16F・9F



(g) 22F・15F・8F



(h) 21F・14F・7F

図8 柱の変形と温度の関係 (中柱・西側・中央)

4.2 温度補正結果の傾向

見かけの線膨張係数に計測された鉄骨の温度を乗じて変形の計測値から引くことで、温度の影響を除くことを「温度補正」と呼んでいる。以下では温度補正の結果をもとに、見かけの線膨張係数の適切な評価法を検討する。図9に中柱・西側・中央の軸変形の計測記録を、下記の3つの条件で温度補正した結果を示す。

- ①鉄の線膨張係数をそのまま使用 ($1.21 \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}]$)
- ②躯体解体開始後に、解体フロア毎にほぼ直線状に並んだ計測値の傾きから見かけの線膨張係数を求め、その平均値を使用（この柱の場合は $1.37 \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}]$ ）
- ③躯体解体開始前の2週間程度の期間（柱伸縮無し）の計測値の温度に対する傾きから見かけの線膨張係数を求めて使用（この柱で $1.10 \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}]$ ）

図9上図の縦軸は、軸変形に断面積とヤング係数 ($2.1 \times 10^5 [\text{N}/\text{mm}^2]$) を乗じて軸力に換算してあり、計測開始時点点を基準として解体に伴う減少分を負の値で示している。計算に使用した柱の断面積はセンサを設置した位置（高さ）のものである。柱は高さによって断面形状が異なり、図面では中央高さの断面形状しか記載されていなかったため、実測により中央高さの断面形状を確認するとともに、柱頭の断面形状を計測した。また図9下図は、同時に計測を行っている柱の鉄骨温度と、名古屋地方気象台の気温を示す。

図中の○・△は、構造設計図書から算出した建物重量（構造躯体＋外壁カーテンウォール、図3と同じ）の変化を比較のために示したものである。当該柱の負担重量の計算法に相違があり、○は単純に負担面積で配分した結果、△は外壁重量を隅柱と側柱に負担させてその他は負担面積で配分したものである。図9は中柱を示しているので○と△の差は小さいが、後述のように隅柱や側柱では両者の差が大きくなる。

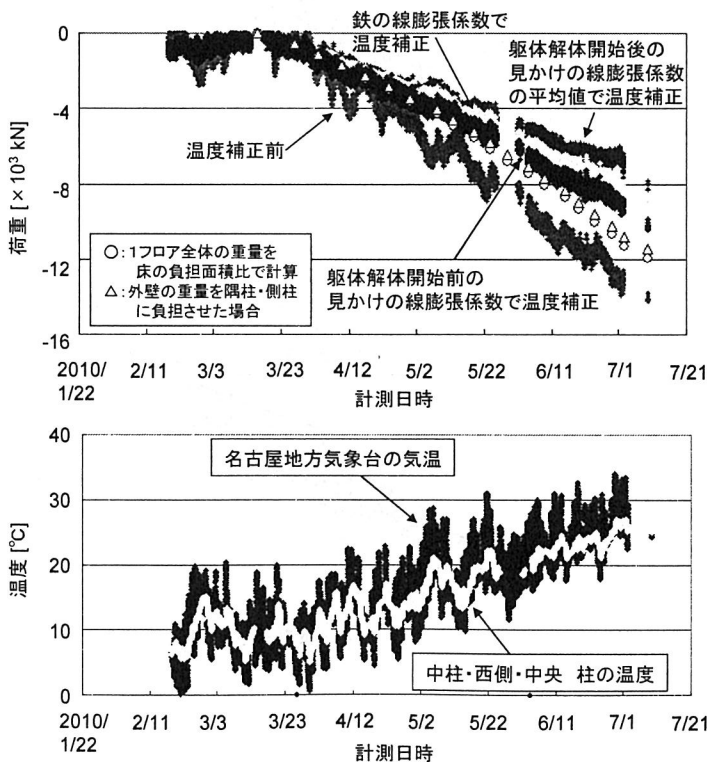


図9 柱軸力と日付の関係と温度

図9より計測期間中に季節が変わっているのに、日変動だけではなく季節変動も温度補正されていることから、全体としての柱軸力変化の傾きも温度補正の線膨張係数によって変化している。計算値(△)と比較して考察すると、躯体解体前の見かけの線膨張係数を使用して温度補正を行った場合が最も近い値を示している。

図9から、解体工事が休みの3日間について温度補正前後の計測値を抜き出した結果を図10に示す。温度は日変動を示し、かつ3日間で上昇傾向にある。センサの計測値はこれらの温度変化の影響を明確に示しているが、温度補正後はほぼ一定値を示していることがわかる。それでも除かれない計測結果のばらつき（点の分布の縦軸方向の幅）は、 $20\mu\text{m}$ 程度で、このばらつきは温度補正前後に同様に見られ、一様に分布している。以上から、十分な温度補正ができていないものと判断される。

4.3 見かけの線膨張係数の算定法の検討

解体の各段階で柱ごとに求めた見かけの線膨張係数を図11に示す。解体段階は、その時点の解体階で示した。この図から、見かけの線膨張係数は躯体解体開始前では全体に小さく、またばらつきも少ない。一方、解体が進行するにしたがって値が大きくなり、また時期や柱によるばらつきが大きくなっていく傾向が見られる。後述する

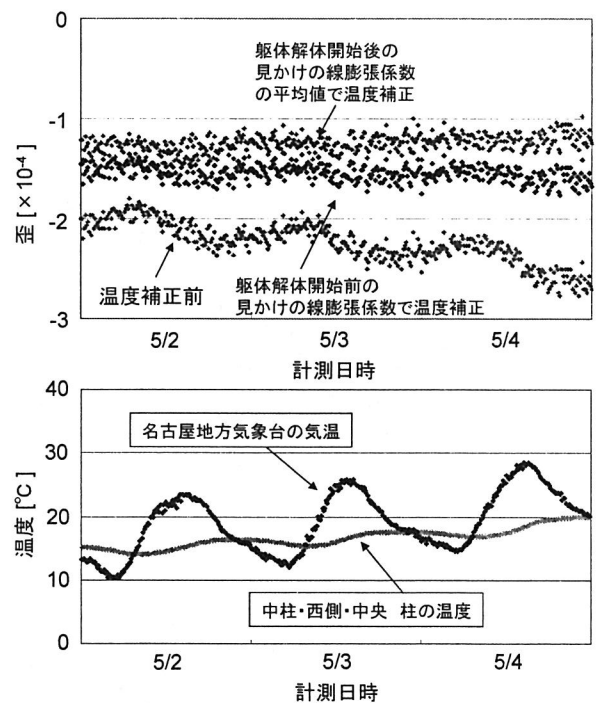


図10 柱軸力と日付の関係と温度（詳細）

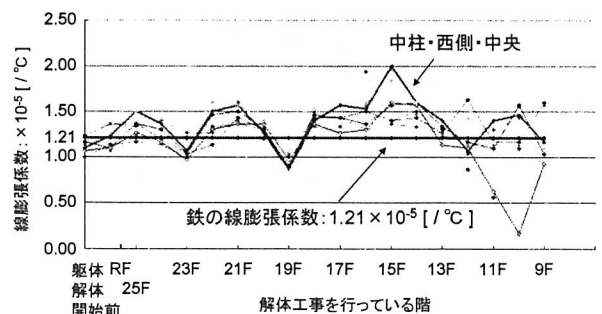
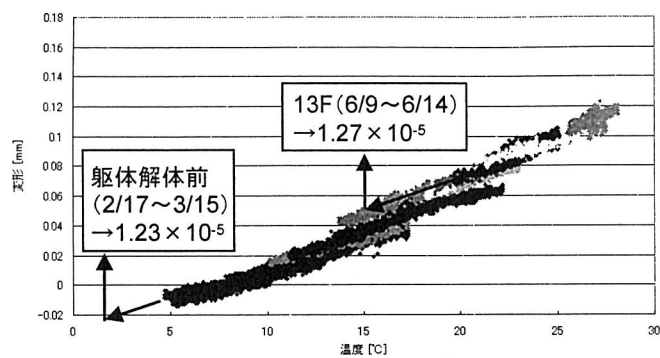
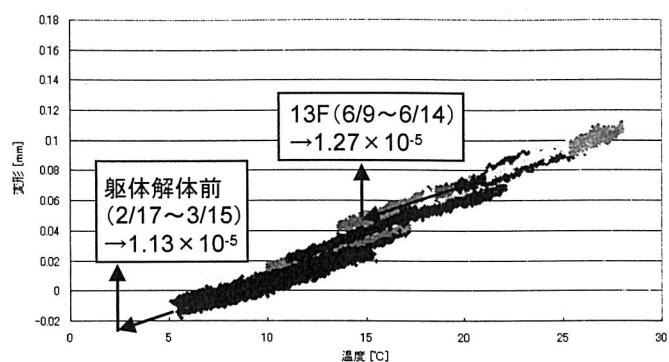


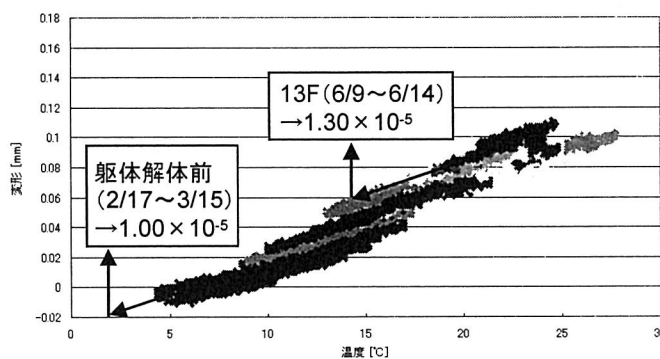
図11 見かけの線膨張係数の変化



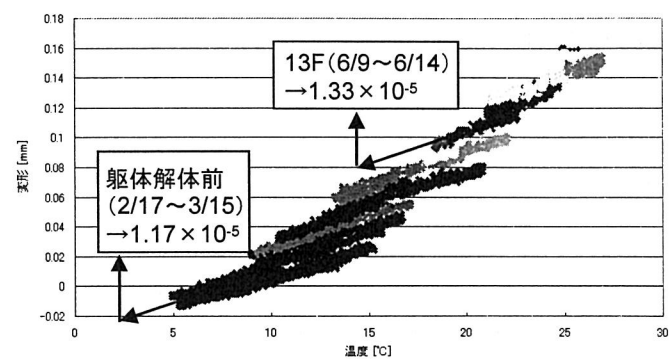
(a) 隅柱・西側・中央



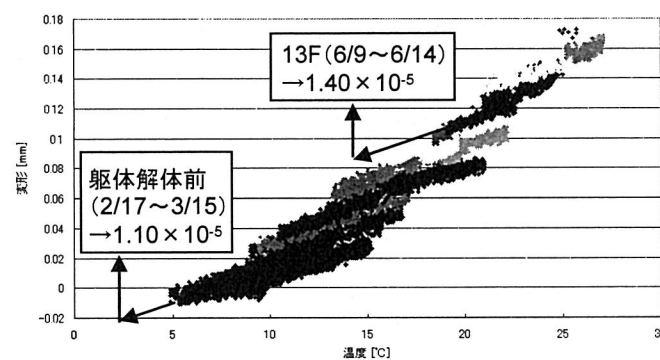
(b) 隅柱・北側・中央



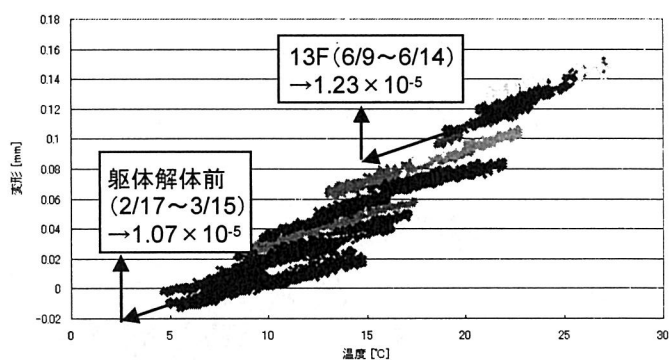
(c) 側柱・北側・中央



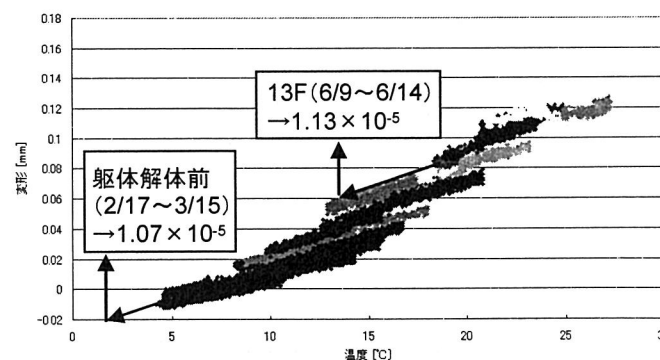
(d) 中柱・東側・中央



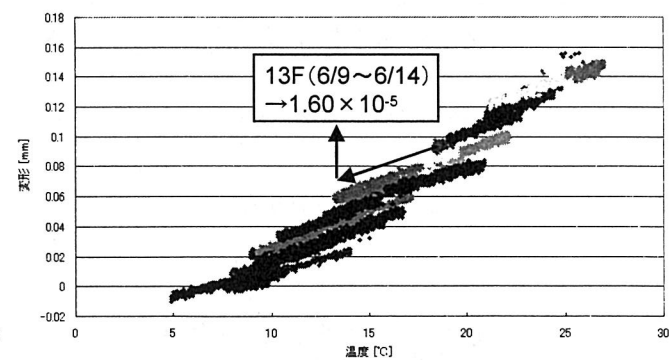
(e) 中柱・西側・中央



(f) 中柱 (コア側)・南側・中央



(g) 中柱 (北側)・東側・中央



(h) 中柱・東側・柱頭

図 12 柱の変形と温度の関係

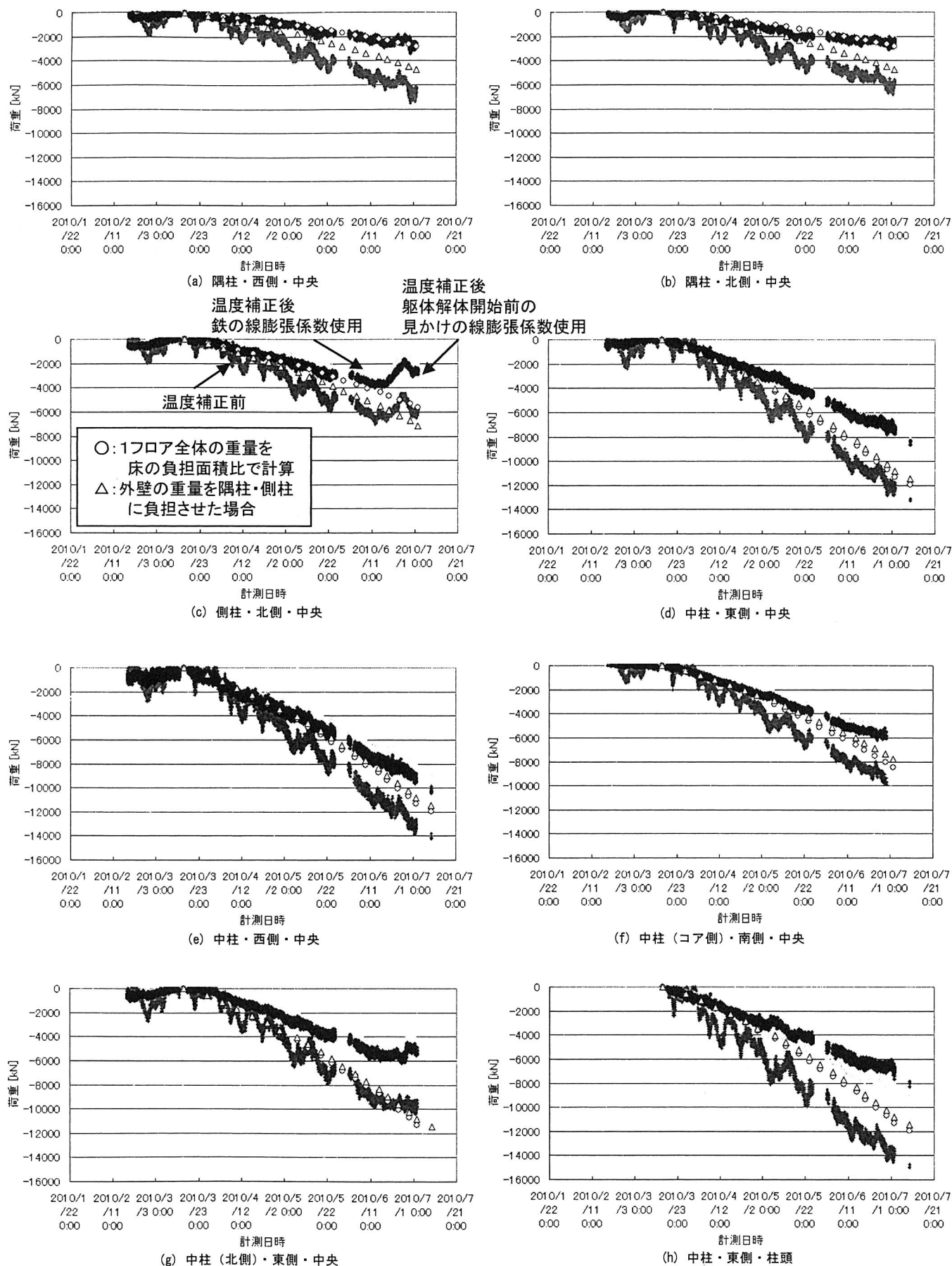


図 13 柱負担軸力の変化

他の柱のセンサについても同様の傾向が見られた。また、工事が行われていない20時から翌6時までの夜間の計測値のみを使用して図11と同様の検討を行ったところ、昼間の解体工事中を含んだ場合と傾向は変わらなかった。

このことから、解体が進行するに従い作業位置が計測階に近づき、また建物重量が減少するため、階の解体中の荷重変化や柱荷重分担の変化の影響が大きくなることが考えられる。以上の結果から、見かけの線膨張係数を評価する際には、あまり細かな変化を詳細に追跡して決めるよりも、荷重変化がない期間を極力長く計測するほうが適切と考えられる。本論の計測では、幸いに内装撤去後から躯体解体開始まで、ほぼ重量変化がない状態で約2週間の計測を行うことができています。

以上から、本論文では、躯体解体開始前の期間について、温度の日変動による傾きからセンサごとに見かけの線膨張係数を求め、その値を用いて全計測期間の計測値の温度補正を行った。

5. 建物解体に伴う柱軸変形の計測値の傾向

4章で検討した以外の柱について、図12に柱軸変形の計測値と温度の関係、図13に見かけの線膨張係数で温度補正した結果(柱断面積とヤング係数で軸力に変換して表示)を示す。見かけの線膨張係数は、前章で検討したように、解体開始前の期間でセンサごとに評価し、参考のために鉄の線膨張係数をそのまま用いた場合も示している。なお、側柱・北側・中央と中柱(北)・東側・中央のセンサで2010年6月中旬以降に荷重増となっている。計測開始時には対象建物は内装撤去も終了しており、躯体のみの状態になっていることから、柱の荷重は躯体解体が進むにつれて減少することは明確である。現場の状況から荷重増に対応する要因が見あたらないことから、この期間の観測に何らかの問題がある可能性が高いと考えられる。ブラケットと母材やセンサ固定金具の間で何らかのずれ等が生じた可能性もあるが、実験中およびセンサ撤去時の観察では、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。

中柱・東側・柱頭以外のセンサでは、躯体解体開始前の期間で推定した見かけの線膨張係数の方が、鉄の線膨張係数をそのまま用いて温度補正した場合に比べて、柱軸力変化の計算値(外壁部分の重量を考慮した△)に近くなることがわかる。なお、それでもすべてのセンサにおいて、補正された計測値は構造図面から算出した軸力と比べて多少なりとも小さい傾向がみられ、今後の検討を要する。

次に複数の柱で得られた計測値の比率に注目すると、隅柱:側柱:中柱:中柱(コア側):中柱(北側)=1:1.6:3.0:2.3:2.2となっている。この値は単なる床の負担面積比率である1:2:4:3:4や、外壁を考慮した比率である1:1.5:2.2:1.6:2.2とは異なっている。この原因として、もともとの柱の荷重分担比率や、解体過程で柱軸力の再配分の影響がありうるため、スラブ剛性も考慮したフレーム解析により解体プロセスを追うことで、実測結果の詳細な検討・評価を行うことを予定している。

6. 結論

本論文では、実在高層建物の解体時に、低層階の柱の軸力変化(軸力の減少に伴う伸び)を光ファイバセンサにより計測することにより、建物重量の詳細な評価について検討した。これまでに建設時の

荷重の増加に関する連続計測は行っていたが、解体時の計測例は珍しく、そもそも高層建物の解体事例は現状でごく少数であり、貴重な計測結果が得られたものと考えている。特に、構造躯体のみの状態から解体が開始されていることから、建物重量評価に関する検討には理想的な条件であった。

光ファイバセンサ SOFO による軸変形計測法については、施工あるいは解体中を含む長期にわたり、柱軸力変化のモニタリングとして有効であることを確認した。その際に、温度に依存する躯体の伸縮の影響が大きいため、温度補正の方法を詳細に検討した。具体的には、センサ設置状況の影響も含んだ温度補正係数である「見かけの線膨張係数」を、建物重量変化がないとき(本計測では解体開始前)の数日間の記録を用いて設定することが有効との結論を得ている。

以上の計測・データ分析法に基づいて、建物内の複数の柱での計測結果を詳細に分析し、柱軸力の計測値とその変化を設計図書から求めた躯体重量や解体部材の大まかな重量と比較した。解体時の柱軸力の変化傾向は、計測値と計算値が良く対応しているが、絶対値についてはある程度のずれが残っている。また平面内の複数の柱の重量分担比率については、各柱の負担面積比率とは多少異なった結果が得られた。解体過程で柱軸力の再配分が考えられることから、躯体のフレーム解析により解体プロセスを追うことで、実測結果の詳細な検討・評価を実施する必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会:2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、2011.3
- 2) 内閣府:東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 第8回会合 資料4、2011.8
- 3) 日本建築学会構造委員会高機能社会耐震工学 WG:長周期地震動対策に関する公開研究会、2008.3
- 4) 長江拓也、鍾育霖、島田侑、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛、斉藤大樹、北村春幸、福和伸夫、日高桃子:高層建物の耐震性能を検証する大規模実験システムの構築—E-ディフェンス震動台実験—、日本建築学会構造系論文集、No.640、pp.1163-1171、2009.6
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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.577-582、2009.3

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。