

3次元計測システムと3次元建入精度管理システムの開発

池田 雄一

東京スカイツリー®の塔体鉄骨は、地上部で正三角形であった平面形状が滑らかに正円へと変化する反りとむくりが融合した複雑な形状を有し、鉄骨配置は各層ごとと少しずつ3次元的に座標が変化する設計であった。そのため、3次元光波測距儀（トータルステーション）を利用した高効率の鉄骨建入精度管理が要求された。そこで、著者らは3次元計測システムと3次元建入精度管理システムを開発し、塔体鉄骨工事へ適用した。その結果、すべての柱（高さ h ）の建入精度を建築工事標準仕様書 JASS 6 鉄骨工事で規定される管理許容差（ $h/1000$ かつ 10 mm）以内に収めたことを確認した。

キーワード：鉄骨工事，精度管理，BIM，トータルステーション，建築工事標準仕様書

1. はじめに

近年、建築工事では部材形状や配置が複雑な構造物が増えてきており、部材の建入精度や収まりを効率良く正確に把握することが求められている。これらの工事では、従来の測量器（例えば、トランシット（2軸の測角や相対距離を計測）やオートレベル（相対高さを計測））では役不足であり、2軸の測角と対象までの測距が同時にできる3次元光波測距儀（＝トータルステーション（以下、TS））を利用する必要がある。

そこで、著者らは、鉄骨工事などにおいて、部材の建入精度を3次元座標で得られるTSを利用してより簡便に計測できる3次元計測システムを開発した。さらに、その建入精度を容易、かつ、わかりやすく表示できる3次元建入精度管理システムを開発した。前者は、TSを利用した計測・測量作業の工数削減、施工管理業務の省力化を図るためのシステムである。後者は、設計値に対する計測した部材の建入精度（設計座標に対する施工誤差）を3次元で表示したり、2次元（平面または断面）で帳票を簡易に作成するシステムである。

本稿では、これらのシステムの開発背景、システム概要、東京スカイツリー®の鉄骨工事への適用結果や得られた知見について報告する。

2. システム開発の背景

2.1 建築工事におけるBIMの利用

近年、建築工事では、BIM (Building Information Modeling) の導入が急速に進められつつある。BIMでは、各モデルに属性情報を与えられるため、その情報を利用した施工や維持・管理の効率向上が期待されている。また、設計データから竣工データまで一貫して、3次元モデルで取扱うことで早期の合意形成や設計品質の向上、手戻りの削減などの効果を得ている。BIMの利活用を推進するには、設計データを3次元モデルの状態で施工まで継続的に扱う必要がある。すなわち、川上の段階で施工を意識したモデリングを行うことで、3次元データを計測などにも有効活用できる。

2.2 専用システムの構築

鉄骨工事では、柱全数の建入精度を計測し、その結果を帳票にまとめ、監理者へフロアまたは節ごとに提出する。著者らは、これらの作業全体の効率化およびコスト低減を実現するため、図1のような全体システムの構築を計画した[1]。まず、計測する点の座標（設計座標）を部材ごとに抽出し、3次元計測システムに登録する。TSで各部材の計測点を自動計測し、設計座標との誤差を電子データで記録し、外部出力する。外部出力したデータを3次元建入精度管理システムに取り込み、モデルを3次元または2次元で表示し、帳票として外部出力する。

いけだ ゆういち

株式会社大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部
〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640

3. システム開発

3.1 3次元計測システムの開発

3.1.1 建築工事における計測作業の現状

図2に示すように鉄骨工事では、トランシットやオートレベルなどの測量機器を利用して現場内に設けた基準線に対する相対値を計測することが多い。事前に多数の基準線（例えば、通り芯の返り墨や基準レベルなど）を準備し、基準線ごとに測量器を盛り替えなければならない。基準線にスケールを当てて相対値を計測するため、2名1組での作業が普通であり、工数が多くなる。それに対して、TSを利用した測量は、座標が既知な基準点を2点以上準備し、対象部材にターゲットを取りつければ、1名で計測作業が可能である。しかし、計測の主な作業が座標管理となったことで、各計測点の準備・登録や計測結果の整理など新たな作業項目が増えた。

3.1.2 機器構成

システムの機器構成を図3に示す。TS、堅牢・防水タイプのタブレットパソコン（以下、TPC）、ターゲットで構成される。TPCにソフトウェアを搭載し、TSを無線遠隔操作する。計測結果は、すべてTPCに取り込まれる。また、ベルト装着により首や肩掛けを可能にし、両手を自由にできるようにした。ターゲットは、プリズム、シール、ノンプリズム（罫書きのみ）から選択でき、部材形状、計測目的、作業スタイル、要求精度などに応じてユーザーが自由に使い分けできる。

3.1.3 システム開発

ソフトウェアは、工事図面、設計座標などのデータベースと、座標計算、計測結果表示などの機能から構成される。特徴を以下に示す。

- 設計座標を専用フォーマットの表計算ソフトにまとめてソフトウェアへ自動登録
- 通り芯や座標系を自由に設定可能
- 計測結果を表計算ソフトへ出力可能

計測作業時には、事前に登録した設計座標に向かってTSが自動的に回転する。ターゲットにシールまたはノンプリズムを選択した場合、TSを手動で位置合わせし、計測する（半自動計測）。プリズムを選択した場合、回転後、自動視準を行い、ターゲットが動いても追尾計測が可能である（自動計測）。システムで得られた計測結果は表計算ソフトで読込める形式で出力するため、建入精度の品質管理記録表等を自動作成できる。

鉄骨工事では、柱全数を計測し、溶接作業終了後の

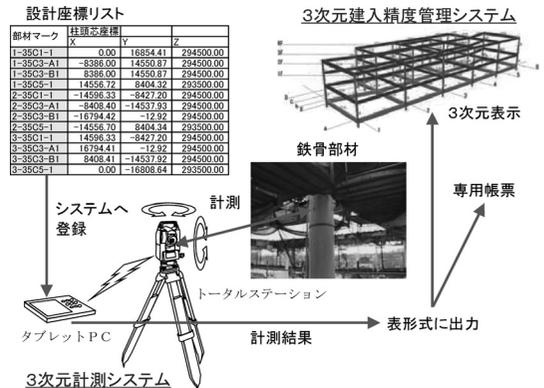


図1 システム全体概要

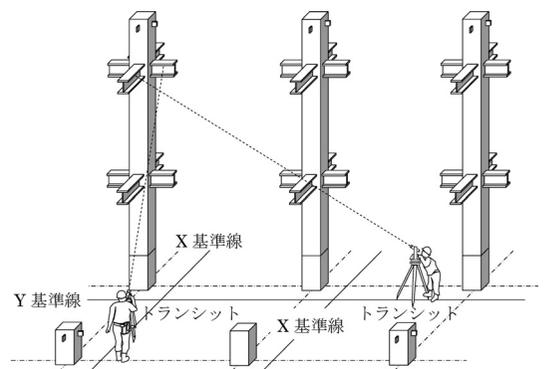


図2 鉄骨工事における在来測量

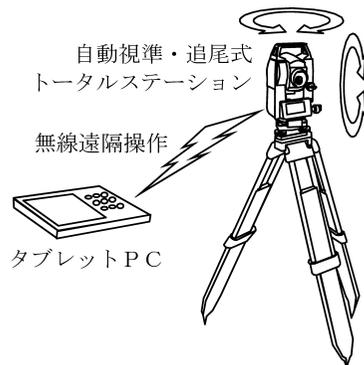


図3 3次元計測システムの機器構成

柱（高さ h）の倒れを建築工事標準仕様書 JASS 6 鉄骨工事（以下、JASS 6）の限界許容差内（ $h/700$ かつ $\pm 15 \text{ mm}$ 以下）に収めなければならない。鉄骨柱に設定した設計座標のうち、できるだけ少ない計測点で建入精度を効率良く的確に把握する必要がある。ソフトウェアの機能詳細を以下に示す。

- 設計座標を柱1本あたり最大8点登録可能
- 上記のうち、任意の2点を計測すると柱芯の誤差

とねじれを計算・表示

- 前節の計測結果から柱の倒れを算出し、JASS 6の管理許容差 ($h/1000$ かつ ± 10 mm 以下) の範囲を表示する建入ナビゲーション機能

3.2 3次元建入精度管理システムの開発

3.2.1 開発の背景

在来測量で得られた計測データは、測量工の読み値であることが多く、通常、野帳などに計測結果を書込む。工事担当者は、野帳などに記入された結果を別途、手入力して品質管理の帳票を作成するため、非常に効率が悪い。3次元計測システムにより計測結果を得て、品質管理の帳票などに手入力でまとめ直すことで、フロアまたは節全体の建入精度を後日、把握できる。しかし、近年、形状や配置が複雑な工事も増加しつつあり、迅速に効率良く精度を把握する必要がある。

表 1 鉄骨工事の概要

タワー名称	東京スカイツリー®
事業主体	東武鉄道株式会社 東武タワースカイツリー株式会社
タワー高さ	634 m
鉄骨工事時最高高さ	497 m
外周鉄骨	丸形鋼管柱
エレベーターシャフト鉄骨	角形鋼管柱
地上部平面形状	三角形
高層部平面形状	円形



図 4 鉄骨工事中の塔体

3.2.2 システム開発

システム上の構造設定 (柱、梁の構成) は、各部材の端点 (始点・終点) 定義ファイルで構成される。端点の座標リストは、柱部材のみ必要であり、梁部材は不要で、柱に合せて描画される。また、部材形状、断面サイズ、通り芯、階高情報などは別のファイルで設定する。システムの特徴を以下に示す。

- 入力データはすべて表計算ソフト形式で、3次元計測システムの出力データを利用可能
- 3次元表示はポリゴン、線画、点群から選択でき、2次元表示は線画または点群で管理値に応じた色別表示が可能
- 3次元計測システムから得た施工日時データから施工実績の3次元アニメーションが可能

4. 工事適用

4.1 工事概要と施工計画

東京スカイツリー®の鉄骨工事の概要を表 1 に示す。タワークレーンを利用した積層工法による鉄骨工事は地上 497 m まで行われた (図 4)。鉄骨は、大きくエレベーターシャフトの鉄骨と外周部の鉄骨に分かれ、前者は角形鋼管柱、後者は丸形鋼管柱である。外周鉄骨の最大径は 2,300 mm であり、正確に計測ポイントの座標を抽出し、精度良く計測する必要があった。地上部において一辺 68 m の正三角形である平面形状は、上部にいくなつて徐々に円形に近づき、地上 300 m 付近で正円になる。

4.2 システム適用計画

通常の高層建物の鉄骨工事と異なり、作業階には測量に利用できる作業床がほとんどない。また、鉄骨配置が各節ごとに変化する複雑な形状であるため、在来測量用の通り芯の返り墨を出すことができない。そのため、任意の場所から精密な計測が可能な TS を利用した 3次元測量が必須であった。

1節あたりの柱の本数は、通常の高層建物と比較して非常に多い。エレベーターシャフト以外の外周の鉄骨はすべて傾斜し、平面形状が徐々に変化する。各節ごと傾斜角が微妙に変化し、ねじれを伴い、柱の座標は少しずつ変化する。傾斜した柱を持つ工事では、座標抽出時のポイント指定ミス、座標登録時の入力ミスなど、人為的なミスを防ぐため、可能な限り自動化することが鉄骨工事の進捗を遅らせない重要なポイントである。

本工事では、鉄骨製作用に BIM が導入された。図 5 のように BIM のモデル上で柱 1 本あたり最大 8 点の

計測点を柱頭周りに計画した。BIM は使用する CAD ソフトにより、幾何図形定義言語：GDL (Geometric Description Language) でユーザーの使い勝手に応じたライブラリを作成できる。その機能を使い、大量の計測点の設計座標を自動抽出することで、工事担当者の負担を最小限に抑える計画とした。また、鉄骨柱には鉄骨製作工場にて各計測点に十字の野書きを入れ、現場にて測量工がターゲットシールを貼付することとした。

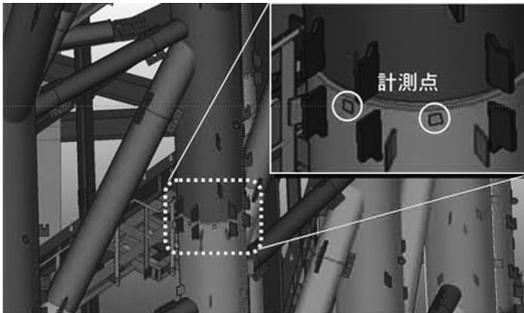


図 5 BIM モデル上における計測点計画

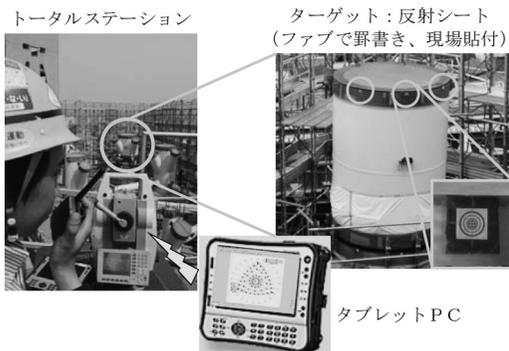


図 6 3次元計測システムによる計測作業

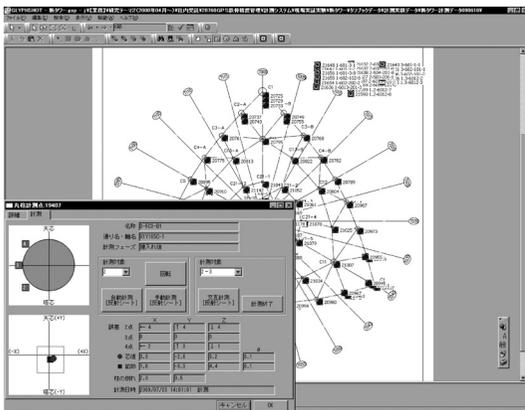


図 7 システム画面とユーザーインターフェース

4.3 適用結果

3次元計測システムによる計測作業を図6に示す。TSをTPCで無線遠隔操作した。最初に基準点を計測するとTSの設置した点の座標が自明になるため、事前に設計座標を登録し、ターゲットシールを貼付した各計測点に向かってTSは自動的に回転する。建入調整時には、計測結果を無線により柱脚部にいる鳶工へ伝達することで測量工1名での計測作業が可能になった[2]。また、システム上で座標変換を行うことで、建入調整を行っている鳶工へ計測結果をわかりやすく伝達できることを確認した。

システムの画面を図7に示す。画面上に各柱のアイコンが配置され、計測したい柱のアイコンをクリックすると小画面(同図左下)が開く。この小画面には、選択した計測点とその座標、同計測結果、2点計測によって算出された柱芯の誤差値とねじれ角、建入調整の方向などが表示される建入ナビゲーション機能が備わる。外周の柱はすべて傾斜しているが、この機能を利用したことで良好な建入精度を維持することができた。最終的に溶接後のすべて柱の建入精度をJASS6の管理許容差内に収めることができた[3]。また、柱芯で鉄骨柱の収まりを管理したことで、柱に複雑に取り付く梁やプレースの収まりを良好に保つ効果を得た。

システムの自動回転機能(半自動計測)や建入ナビゲーション機能により、建入調整時の作業効率が約30%

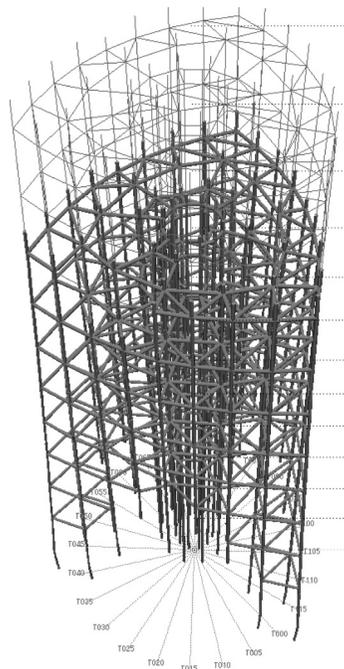


図 8 鉄骨建入精度の3次元表示例

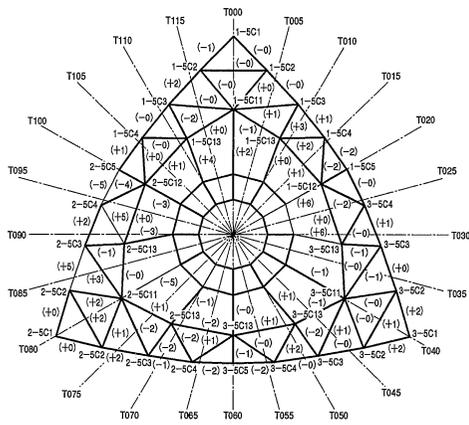


図9 鉄骨建入精度の2次元(平面)表示例

向上することを確認した。また、計測座標点の登録作業の自動化により、人為的ミスはなくなり、担当職員で十分に対応できるようになった。

建入精度の3次元表示例を図8に示す。同図では、設計情報を線画、建入精度をポリゴン(太線)で表示した。建入精度の誤差倍率を任意に設定することで誤差を強調できる。また、2次元表示例を図9に示す。同図では、工事担当者が視覚的に確認しやすいように1次管理値以内の梁スパンを実線、同管理値を超えた梁スパンを点線、2次管理値を超えた梁スパンを一点鎖線(同図中には存在しない)で表示した。

5. おわりに

鉄骨工事において、TSを利用して部材の建入精度

を簡便に計測でき、その建入精度を簡単に管理できる3次元計測システムおよび3次元建入精度管理システムを開発した。これらのシステムを東京スカイツリー®の塔体鉄骨工事へ適用した結果、すべての柱の建入精度を建築工事標準仕様書の管理許容差内($h/1000$ かつ10mm)に収めることができた。

開発した2つのシステムは、東京スカイツリー®以外にも多くの工事に適用され[4]、技術提案などにも利用されてきた。今後のシステムの普及、水平展開には、汎用性の向上と運用手間の軽減が重要であると考え、汎用性向上については、さまざまな工事や作業での利用や対応可能なTSの追加などを予定している。また、運用手間の軽減については、すでにBIMと連動した設計座標の自動抽出を実施しており、今後、BIMと連携強化を図っていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 池田雄一, 鉄骨・PCa部材の精度管理技術の高度化に関する取組み, 建築技術, **743**, 68-75, 2011.
- [2] 「複雑な形状の鉄骨を精度よく建てる: 3次元計測・管理システム」, http://www.obayashi.co.jp/news/skytree_detail17_20110715
- [3] 池田雄一, 浜田耕史, 田辺潔, 原田恒則, 田村達一, 超高層タワー建設工事における精度管理技術の開発, 第13回建設ロボットシンポジウム論文集, 169-176, 2012.
- [4] 池田雄一, 金子智弥, 浜田耕史, 3次元計測/出来形管理システムの開発と建築工事への適用, 平成22年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, 123-128, 2010.