

3次元計測システムおよび出来形管理システムの開発

池田 雄一 内田 茂 金子 智弥
浜田 耕史 鼻戸 勝紀 国島 敏敬

(東京本店建築事業部) (東京本店建築事業部)

Development of a 3D Surveying System and a 3D Skeleton Members Display System

Yuichi Ikeda Shigeru Uchida Tomoya Kaneko

Koji Hamada Katsunori Hanato Toshinori Kunishima

Abstract

The total stations (TS) used in building constructions has increased gradually such as steel frame members or pre-cast concrete members erections. A surveyor can measure TS, but it is not easy to reduce the labor of surveying and construction management because of the various requirement of specific to building constructions. It would be useful to understand the erection accuracy as one unit, because the shape or displacement of steel or precast concrete members can be complicated. The current author has therefore developed a three-dimensional (3D) surveying system that can easily measure the erection accuracy of members based on the TS and a 3D skeleton members display system that can show the two or three-dimensional as-built model, as measured by a 3D surveying system. This paper presents the background of the development, an outline of the two systems, and the results from their application to building constructions.

概要

建築工事では、トータルステーション(以下、TS)の利用機会が増えてきている。TSによる測量は基本的に1名で可能だが、建築工事特有の様々な理由により、必ずしも工数削減や省力化効果が得られていない。一方、最近、部材形状・配置が複雑な構造物では、建入精度を効率良く把握することが求められている。そこで、著者らは、鉄骨工事やプレキャストコンクリート工事において、部材の建入精度をTSの利用により簡便に計測できる3次元計測システム、および、その建入精度を含む出来形を簡単に管理できる出来形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り、後者は、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次元または2次元で表示するシステムである。本報では、システム開発の背景、システム概要、工事適用結果と得られた知見について報告する。

1. はじめに

近年、建築工事では、鉄骨工事やプレキャストコンクリート工事(以下、PCA工事)などでトータルステーション(以下、TS)の利用機会が増えてきている。TSによる測量は1名で可能だが、建築工事特有の様々な理由により、必ずしも測量の作業工数削減、施工管理業務の生産性向上効果が得られていない。一方、最近、部材形状・配置が複雑な構造物が増えてきており、構造物全体や節・フロア単位での建入精度や取まりを従来より効率良く把握することが求められている。

そこで、著者らは、鉄骨工事やPCA工事において、部材の建入精度をTSの利用により簡便に計測できる3次元計測システム、および、その建入精度を含む出来形を簡単に管理できる出来形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り、後者は、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次元または2次元で表示するシステムである。

本報では、システム開発の背景、システム概要、工事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 建築工事における情報化施工の現状

土木工事では、電子化された設計データを施工時に有効利用する情報化施工の普及が推進されつつある。情報化施工では、設計データから竣工データまで一貫して、3次元モデルなどの電子データを取扱うことでコスト低減や施工品質の向上、透明化などの効果を得ている¹⁾。一方、建築工事における情報化施工は、以下の3つの理由から部分的な適用に留まることが多い。

- ①建築工事はほとんどが民間工事であるため、設計データの標準化が進んでいない
- ②同理由により、電子納品を求められていない
- ③3次元CADを利用しなくても、設計や施工が可能な

建築物の割合が高い

上記の理由から、建築工事で情報化施工を実施するには、情報化施工で利用できる専用の設計データを新たに準備するか、現状の設計データを利用しやすい形式に電子化する専用ソフトが必要になる。この結果、余分なコストや手間が発生し、情報化施工を導入したことによるコスト低減効果を得にくい背景がある。

情報化施工を効率良く実施するためには、設計データを電子データの状態で施工まで継続的に扱う必要がある。近年、建築工事では、BIM (Building Information Modeling) の利用が急速に進められつつあるため、その情報を利用することで土木工事が目指す情報化施工と同等の効果を効率良く得られることが期待されている。

2.2 専用システムの構築

鉄骨工事やPCa工事では、部材全数の建入精度を計測し、その結果を帳票にまとめ、監理者へ節またはフロアごとに提出する。著者らは、これらの作業全体の業務の効率化およびコスト低減を実現するため、情報化施工の概念を導入したFig. 1のような全体システムの構築を計画した²⁾。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として記録し、外部出力する。外部出力したデータを出来形管理システムに取り込み、出来形モデルを3次元または2次元で表示し、帳票として外部出力する。

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 例えば、鉄骨工事ではFig. 2に示すようにトランシットやオートレベルなどの測量器を利用して現場内に設けた基準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しなければならない。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、工数が多く掛かる。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付ければ、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 システム機器構成 システムの機器構成をFig. 3に示す。TS、ノートパソコン(以下、ノートPC)、ターゲットで構成される。ノートPCにソフトウェア(以下、SW)を搭載し、TSを無線遠隔操作する。計測結果は、すべてノートPCに取り込まれる。ノートPCからの操作可能な自動視準・追尾式のTSを選択した。ノートPCには、屋外使用を考慮して、堅牢・防水タイプを選択した。操作が楽なタッチパネル式のモニターや無線通信機

能付きで両手を自由にできる小型の首掛け可能な機種を選択した。ターゲットは、プリズム、シール、ノンプリズム(罫書きのみ)の中から選択でき、工事種、部材形状、

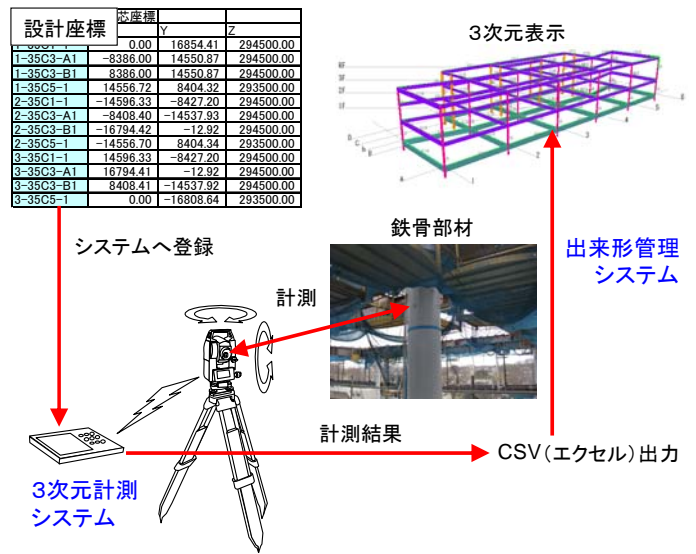


Fig. 1 システム全体概要
Outline of Whole System

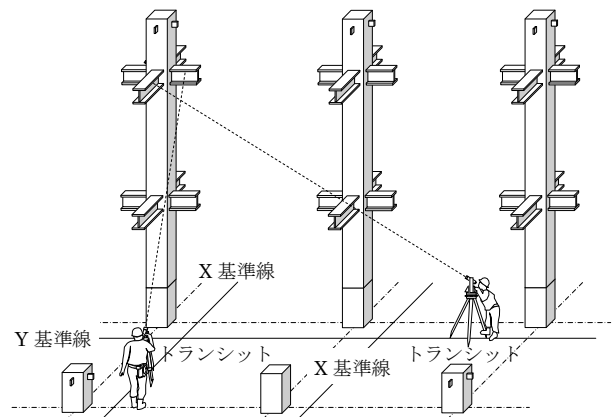


Fig. 2 鉄骨工事における在来測量
Conventional Surveying at Steel Work

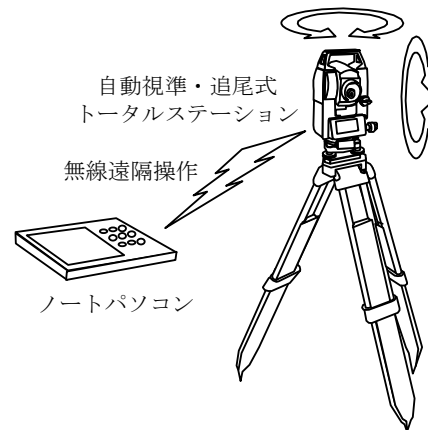


Fig. 3 システム機器構成
Equipment Structure of 3D Surveying System

計測目的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 鉄骨工事とPCa工事の計測対象や管理内容が大きく異なるため、SWは共通部分と個別工事対応部分に分割した。SW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。共通部分の特徴を以下に示す。

- ・設計座標を専用フォーマットのエクセルにまとめてSWへ自動登録
- ・対象部材の形状は自由(何でも対応可能)
- ・通り芯や座標系を自由に設定可能
- ・計測結果をエクセル出力

ターゲットにシールまたはノンプリズムを選択すると計測時に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(半自動計測)。プリズムを選択すると回転後、自動視準および追尾計測が可能である(自動計測)。

(1) 鉄骨工事前システム 鉄骨工事では、柱全数を計測し、その倒れをJASS6の限界許容差内(1/700かつ±15mm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。鉄骨工事前のSWの特徴を以下に示す。

- ・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、JASS6の管理許容差の範囲表示する表示建入ナビゲーション機能

(2) PCa工事前システム PCa部材の建入精度はJASS5やJASS10、品確法などで細かく規定されており、柱・梁部材の建入精度を全数計測する必要がある。PCa工事前のSWの特徴を以下に示す。

- ・計測点を1部材あたり最大16点登録可能
- ・2点選択時、交互自動計測が可能

3.2 出来形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き込む。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まとめ直すことで、節またはフロア全体の建入精度を把握できる。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。

3.2.2 システム開発 対象は、柱、梁の区別が明確な鉄骨工事やPCa工事である。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、柱に合わせて描画される。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エクセル形式で、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. 超高層塔状構造物へのシステム適用実験

4.1 実験工事概要

実験対象となる鉄骨工事の概要をTable 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497mまで行われた。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2,300mm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約70mの正三角形である平面形状は、上部に行くにつれ徐々に円形に近づき、地上300m付近で円形になる。

4.2 適用実験計画

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ことと平面形状が変化して複雑なため、在来測量用の通り芯線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

Table 1 実験工事概要
Outline of Super High-rise Tower Construction

タワー高さ	634m
鉄骨工事時最高高さ	497m
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

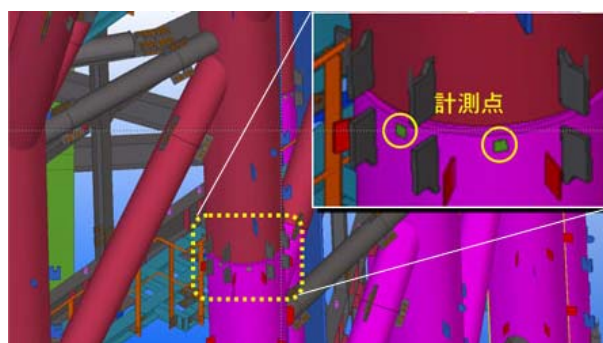


Fig. 4 3次元CAD上における計測点計画
Planning of Measurement Points in 3D CAD

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3次元CADが導入された。Fig. 4のように3次元CAD上で(万が一、視認できないことを見込んで)柱1本あたり最大8点の計測点座標を計画した。3次元CADは製品により、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することができる。その機能を使い、計画された大量にある計測点座標の自動抽出を試行した。計測座標点をシステムへ自動登録する機能により、工事担当者の負担を最小限にできることが確認できた。また、鉄骨柱には鉄骨製作工場にて各計測点に十字の罫書きを入れ、現場にて墨出し工がターゲットシールを貼付する計画とした。

4.3 実験結果

3次元計測システムによる計測作業をFig. 5に、機器仕様をTable 2に示す。TSを小型の堅牢型ノートPC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、システム上で座標を登録し、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墨出し工1名での計測作業が可能なることを確認した³⁾。また、建入調整を行っている鳶工へわかりやすい計測結果を伝達するため、システム上で座標変換を行い、梁の取付け方向である円周方向と直角の放射方向に成分を分解した。

システムの画面例をFig. 6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、建入ナビゲーション画面などが表示される。柱芯で鉄骨柱の収まりを管理することで、柱の建入精度だけでなく、複雑に取り付け梁やブレースの収まりを良好に保つ効果を得た。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、建入調整時における作業効率が約30%向上することを確認した。1節あたり大量にある計測点の座標登録作業を自動化したことで、人為的ミスの発生はなくなり、担当職員で十分に対応できるようになった。この結果、墨出し工の座標入力工数を約90%以上削減できる見込みを得た。

外周の柱はすべて傾斜しているが、建入ナビゲーション機能を利用して、建入調整時にJASS6の管理許容差内に確実に収めると溶接後も安定した建入精度データを得ることが確認できた。

3次元計測システムで得られた計測結果は、エクセル形式で出力できる。その出力ファイルを利用した施工管理業務への利用展開を説明する。まず、建入精度の品質管

理記録表を自動的に作成することが可能である。また、出来形管理システムの入力ファイルを同一形式としたことで表示用の3次元モデルを自動的に生成することが可能になった。建入精度の3次元表示例を次頁Fig. 7に示す。同図では、設計情報を水色の線画、建入精度を緑色のポリゴンで表示した。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次元表示例を次頁Fig. 8に示す。同図では、1次管理値以内の梁スパンを緑色表示、同管理値を超えた梁スパンを黄色表示、2次管理値を超えた梁スパンを赤色表示とした。さらに、3次元計

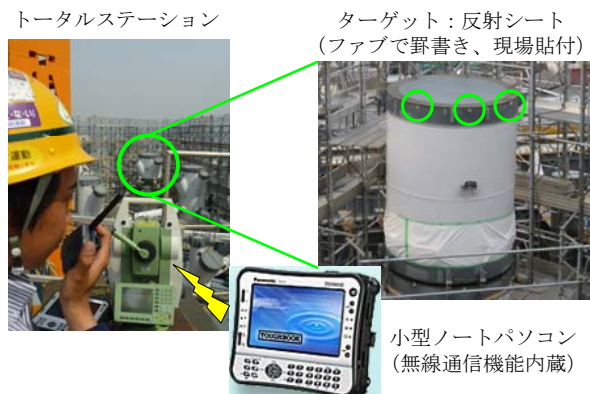


Fig. 5 3次元計測システムによる計測作業
New Style Surveying with 3D Surveying System

Table 2 システムの機器仕様
Equipment Specification of
3D Surveying System

■ トータルステーション	
測角精度	3秒
測距精度	2mm+2ppm
回転速度	45° /s
自動チルト補正範囲	4分
■ ノートパソコン	
外形寸法	W184×D151×H57mm
画面	5.6インチワイド
無線通信	Bluetooth Class1
重量	約1kg
バッテリー駆動時間	約10時間

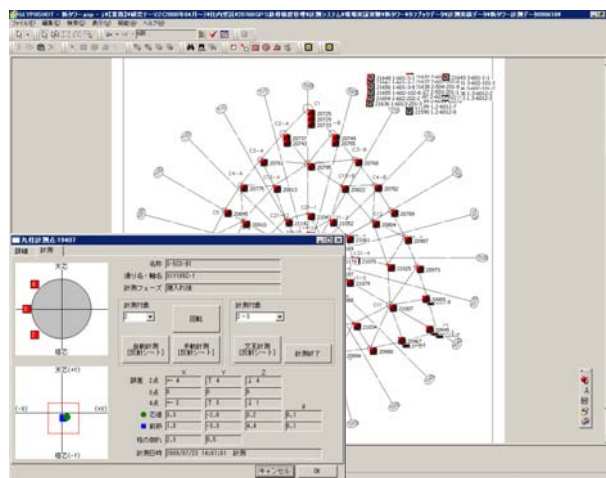


Fig. 6 システム画面とユーザーインターフェース
Graphical User Interface of
3D Surveying System

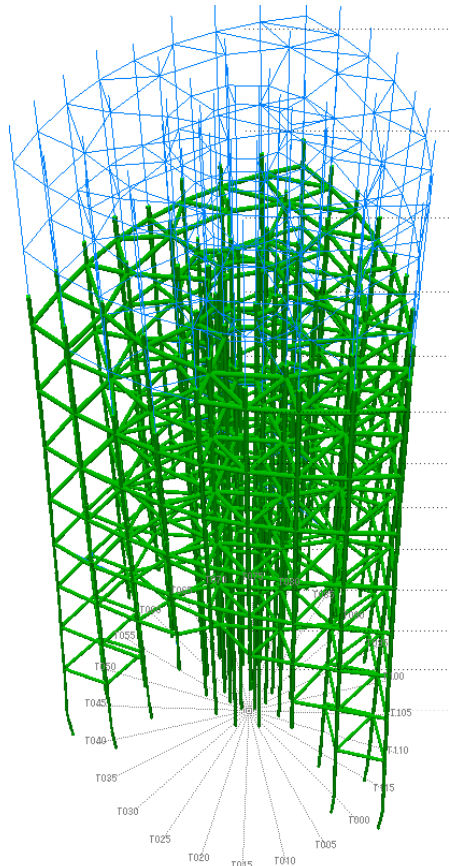


Fig. 7 鉄骨建入精度の3次元表示例
3D Display As Build Model of Steel Structure

測システムで計測した日時データを入力すると時間軸上で施工実績をアニメーション化できる。

5. PCa工事へのシステム適用

5.1 工事概要

3次元計測システムを55階建て超高層集合住宅のPCa工事へ適用した。工事概要をTable 3に示す。平面形状はコーナー部にセットバックがある正方形で中央に吹抜部を有する。6階から55階の基準階および塔屋階において、柱梁接合部をPCa化したオールPCa工法(LRV工法)が採用された(Fig. 9)。約1,600m²の基準階に対して、柱48ピース、梁36ピースが割り付けられ、1フロア3日のサイクル工程でPCa工事が計画された⁴⁾。

従来のPCa部材の建入計測をFig. 10に示す。トランシットを利用して同図赤線のように各通り芯の通り墨(同図青点線)からの離れをx, yの2方向で計測し、オートレベルを利用して高さを計測していた。計測およびPCa部材の位置調整作業に関する工数は、5名(墨出し工3名, 位置調整工2名)であった。

5.2 システム適用計画

TSを利用した計測作業には、座標が既知である基準点が作業階に数箇所必要である。PCa部材の下部足元

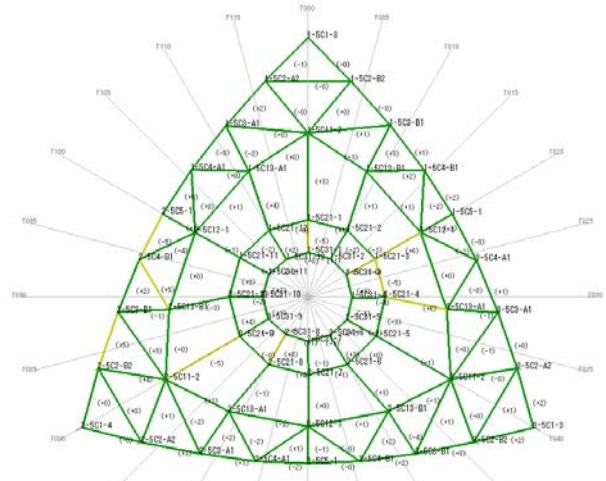


Fig. 8 鉄骨建入精度の2次元(平面)表示例
2D Display As Build Model of Steel Structure

Table 3 工事概要
Outline of Super High-rise Condominium Construction

建物用途	主として集合住宅
階数	地下2階、地上55階
構造	RC造
建築面積	4,300m ²
延床面積	87,600m ²
最高高さ	192m
工期	2007.8~2010.8 (36ヵ月)
基準階面積	1,600m ²

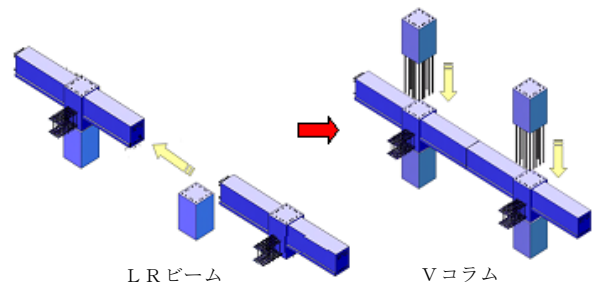


Fig. 9 LRV工法
LRV Construction Method



Fig. 10 PCa工事における在来測量
Conventional Surveying
at Precast Concrete Construction



Fig. 11 3次元計測システムによる計測作業
New Style Surveying
with 3D Surveying System

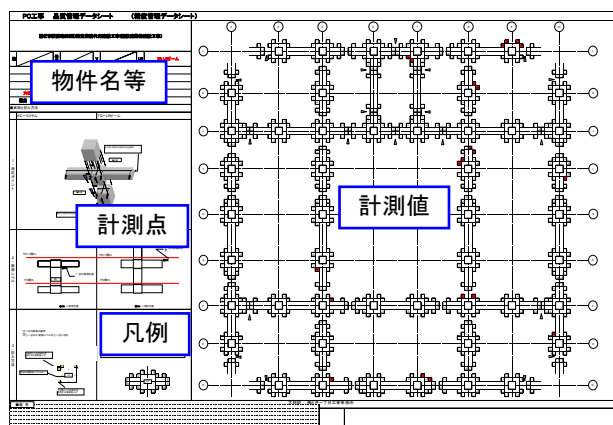


Fig. 12 建入精度管理の帳票
Table of Erection Accuracy for
Precast Concrete Members

にターゲットシールを貼付し、基準点とした。TSをN+1階(グラウト充填の終了した柱部材や梁部材の上)にセットし、ノートPCから無線遠隔操作した。また、自動計測を実施するため、ターゲットのプリズムを正確にPCa部材へセットするため、Fig. 11右上に示す専用のアルミ製架台を製作した。この架台によって、PCa部材のコーナー部とx, y座標は同一で50mm高い位置へプリズムが確実にセットできるため、設計座標として、z座標(高さ)のみ50mmオフセットした値を登録した⁵⁾。柱部材の場合、同図の赤丸で示すようにプリズムを対角コーナー部天端にセットし、建入誤差をx, y方向でそれぞれ均等に振り分けた。

5.3 適用結果

操作端末の画面上には、各フロアの図面・部材形状や計測点の座標を表示できる。また、PCa部材の位置調整時には、部材の動きに追従してリアルタイムに計測結果を表示できる。N階で行われるスラブ配筋やコンクリート打設作業との干渉がなくなり、測量器の盛替回数を最小限にすることができたため、計測精度の向上・安定化が実現した。本システムを利用したことで、位置調整

に必要な工数を3名(墨出し工1名,位置調整工2名)に削減することができた(Fig. 11)。これは、TS1台でx, y, zのすべての座標が把握できるようになったことと自動計測機能を備えたことでTSを遠隔操作できるようになったことが大きな理由である。また、トランシットを利用した従来の計測では、通り芯の返り墨を直角平行にほぼ全数出す必要があった。これに対して、本システムでは、フロア内の数箇所に基準点を作成するだけで良いため、墨出し関連作業が大幅に削減できた。

また、計測結果を集計して建入精度管理の帳票(Fig. 12)をフロアごとに自動作成する機能によって、担当職員の品質管理業務を大幅に効率化できた。

6. まとめ

鉄骨工事やPCa工事において、TSを利用して部材の建入精度を簡単に計測でき、その建入精度を含む出来形を簡単に管理できる3次元計測システムおよび出来形管理システムを開発した。これらのシステムを鉄骨工事やPCa工事へ(一部実験的に)適用して、その効果を確認した。その結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 超高層塔状構造物の鉄骨工事への適用実験
 - ・システム適用により、すべての鉄骨建入精度を10mm以内に収めたことを確認した
 - ・座標データの自動登録機能により、座標の登録ミスをはほとんどなくし、鉄骨工事の進捗遅延を防止した
 - ・出来形管理システムにより建入精度と3次元的な収まりを関係者間で共有することができた
- 2) 超高層集合住宅のPCa工事への適用
 - ・システム適用により、計測や墨出しの工数を約1/3に削減し、大幅なコスト低減効果を得た
 - ・建入精度に関する帳票自動作成機能により、担当職員の品質管理業務の生産性を大幅に向上できた

参考文献

- 1) 古屋弘：情報化施工に取り組む現場—事例紹介—, 建設マネジメント技術, No.384, pp.41~51, (2010)
- 2) 池田雄一, 他：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, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, 日本建設機械化協会, pp.141~146, (2010)
- 3) 複雑な形状の鉄骨を精度よく建てる：http://www.obayashi.co.jp/news/skytreedetail17_20110715, (2011.07)
- 4) 大山重俊, 他：オールプレキャスト工法を使用した超高層集合住宅の施工, コンクリート工学, Vol.48, No.7, pp.22~27, (2010)
- 5) 池田雄一, 他：三次元計測システムの開発と工事適用 その3 機能追加とPCa工事への適用, 日本建築学会大会(北陸)学術講演梗概集, A-1(材料施工), p.p.119~120, (2010)