

鉄骨工事における自動化技術の改良と現場適用

IMPROVEMENT AND APPLICATION OF AUTOMATION TECHNOLOGY AT STEEL FRAME CONSTRUCTION SITES

市村 元*¹, 鈴木 信也*¹, 岡田 大輔*¹, 山本 真之*¹, 山内 博史*¹

Hajime ICHIMURA, Shinya SUZUKI, Daisuke OKADA, Masayuki YAMAMOTO and Hiroshi YAMAUCHI

For better productivity at construction sites, the authors have been making efforts to introduce new construction methods and automation technology in joining and steel frame construction sites. This paper reports first an adjustment system of automatic measurement and plumbing for steel columns, a load rotation control system, improvement in the assembly system not requiring the use of temporary fitting-up bolts—which are all developed as a part of steel work automation—and secondly the results obtained from their applications on site. We were able to confirm that the improvements in this project are effective in enhancing the safety of construction sites.

Keywords : Adjustment System of Automatic Measurement and Plumbing for Steel Columns, Load Rotation Control System, Assembly System Not Requiring the Use of Temporary Fitting-up Bolts

鉄骨柱の自動計測・建入れ調整システム, 吊荷旋回制御装置, 仮ボルト不要接合法

1. はじめに

近年、少子高齢化や人口の急速な減少を背景に、建設作業員の高齢化や就業労働者の減少が進行している。今後の建設業において労働生産性の向上は必須であり、その方法の一つとして、機械化施工技術や自動化施工技術を用いた作業の効率化・無人化が挙げられる。筆者らは、建設現場の生産性向上を目指し、接合作業と接合に係る鉄骨工事の現場作業に、新たな構工法・自動化技術などを用いて生産性を向上させる取り組みを行ってきた。図1にその全体構想図を示す。

筆者らは建設現場の生産性向上を目指し、鉄骨の接合作業と、接合に係る鉄骨関連工事の現場作業に、新たな構工法・自動化技術などを用いて生産性を向上させる取り組みを行ってきた。図1にその全体構想図を示す。

本報告では、鉄骨工事の自動化施工技術として開発した、鉄骨柱の自動計測・建入れ調整システム、吊荷旋回制御装置および仮ボルト不要接合法の改良への取り組みと、現場適用および実施工を行った結果について報告する。

2. 鉄骨柱の自動計測・建入れ調整システムの改良

2.1 旧システムの問題点および新システムの提案

筆者らはこれまで中低層の建物で鉄骨柱の自動計測・建入れ調整システムを使用してきたが、超高層建物でも繰り返し使用できるようにシステムの改良を検討した。本項では、そのシステム概要および改良内容について報告する。

旧型のシステム概要を図2に示す。筆者らが開発した鉄骨柱の自動計測・建入れ調整システムは、自動視準トータルステーション(以

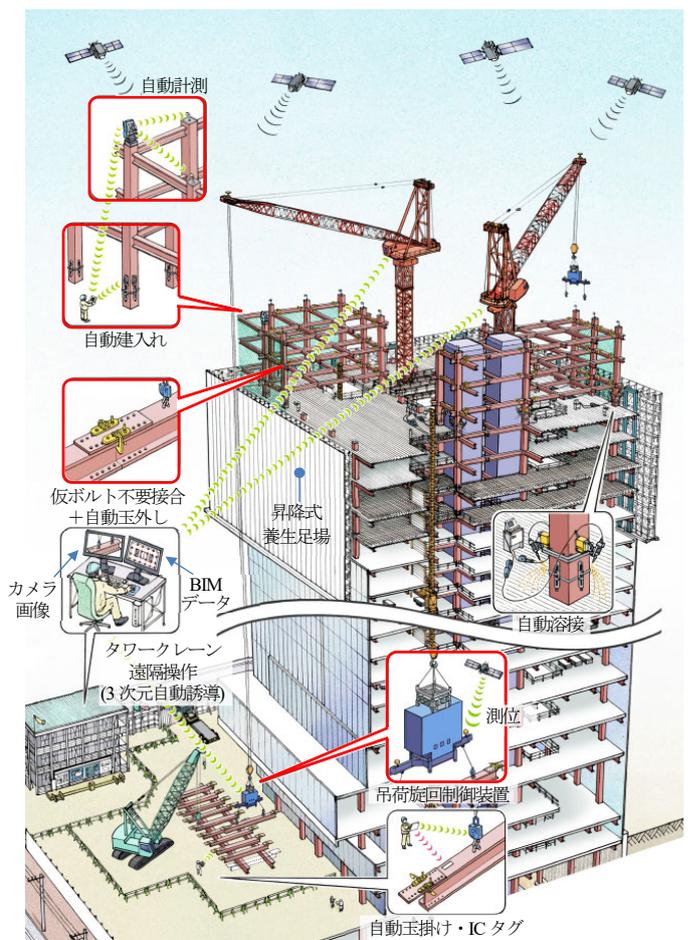


図1 全体構想図

*1 戸田建設株式会社技術開発センター

下、TS)および鉄骨柱頂部に設置したプリズムにより鉄骨柱の建入れ位置を計測し、自動で建入れ調整を行うシステムである。

このシステムにおいてTSは見下げ計測としているため、TSを設置するのは施工階の柱よりも高い場所とする必要がある。TSの設置場所は図3に示すように、以下の3つが考えられる。

- ①周辺建物の屋上
- ②現場内に設けたTS専用の支柱
- ③本設の鉄骨柱

旧システムでは主に①と②にTSを設置していたが、それぞれ利用上の問題点がある。①は揺れの影響を受けにくいのでTSでの自動視準を行うには好ましいが、現場周辺に高い建物が無い場合は利用することができない。また②は、剛性が低いためTSの視準に支柱の揺れが影響し、視準できなくなる可能性がある。一方で、③は施工初期段階の工夫が必要とされるものの、剛性が高いため揺れの影響は比較的小さい。そこで今回、新たに③にTSを設置する方法を推進した。

また、このシステムにおける柱の建入れ位置の計測には基準点を用いる。基準点は揺れの影響を受けない地面に設けることが望ましいが、TSの見下げ角度には制限があるため、建物が高くなるほど、建物から遠い位置に設置する必要がある。一方で、基準点を建屋内に設置した場合は、工事の進行に伴って下階の基準点が使用できなくなるため、必要に応じて都度基準点を上階に盛替えるための測量作業が発生する。そこで今回、建屋内の基準点を使用する方法を広く検討した。

検討の結果、図4に示す超高層建物対応版の新システムを考案した。①TSは、専用の「TS架台」および「TS養生カバー」を用いて本設の鉄骨柱の柱頭に設置する。②基準点については、1FL床(基準階)に配置した基準点を、レーザー鉛直器と基準点プリズム設置治具を使用して上階に順次盛替えていく「基準点盛替えシステム」を考案した。超高層建物の場合、30m~50mの範囲で数回に分けてコンクリート打設階にレーザー鉛直器を盛替えていく。③自動計測用のモバイルPCと建入れ調整装置の通信方式を変更し、計測ソフトは使いやすいように改良および機能の追加を施している。④建入れ調整装置については現場で使用しやすいよう、20t柱対応型装置(約19kg)を約10kgまで小型化・軽量化している。

2.2 TS架台・TS養生カバー

TS架台およびTS養生カバーを図5に示す。架台および養生カバーは、仮置きされた鉄骨に地上で取り付けることが可能であり、高所作業が発生しないため、安全性を確保できる。また振動によって計測精度が低下しないよう、鉄骨柱上部に設けた仮設ピースにTS架台をボルトで固定している。TS養生カバーは空気圧により駆動する機構としており、エアホースを通してコンプレッサーから圧縮空気を送り込むことで、遠隔で開閉操作が可能である。

2.4 レーザー鉛直器を用いた基準点盛替えシステム

基準点プリズム設置治具およびレーザー鉛直器を図6に示す。製作した基準点プリズム設置治具は、先端のプリズム設置部分を半透明の亚克力板とし、位置を調整できる構造となっている。そのた

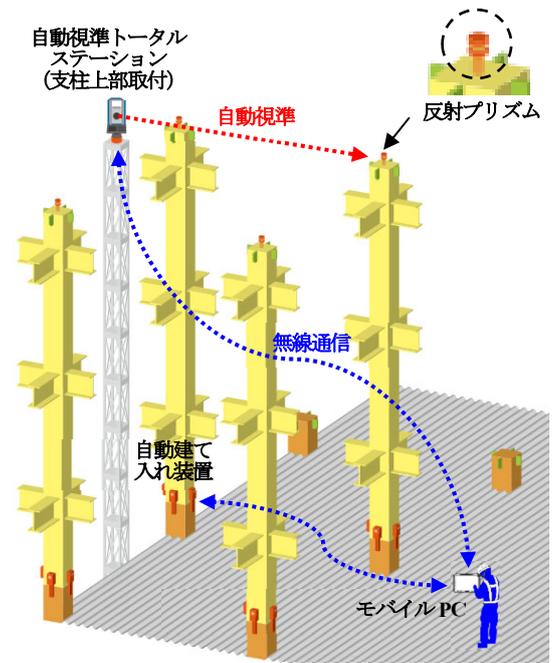


図2 旧型自動建入れシステム概要



図3 TSの設置場所

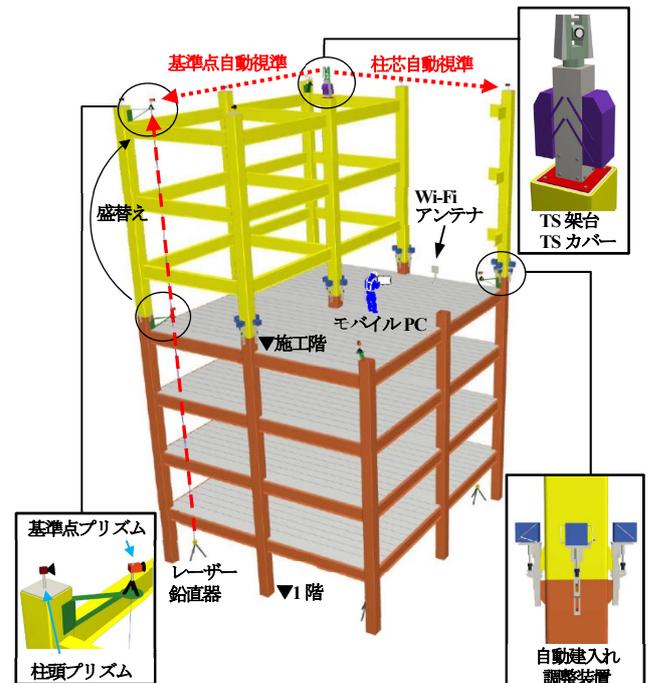


図4 新型自動建入れシステム概要

め、下階の柱周辺に設けた基準点の直上にレーザー鉛直器を設置した後、鉛直上方にレーザーを照射し、その場所に合わせて台先端の位置を調整することで、上階に基準点を盛替えることができる。この方法を用いることで、常に鉄骨工事の建方階に基準点を設置することが可能となる。

2.5 自動建入れ調整装置の軽量化

旧型と改良型の自動建入れ調整装置を図7に示す。以前製作した10t 柱用建入れ調整装置は、重量が12kg と重く、人が盛替えるには手間がかかるため、装置の再検討を行った。大きなトルクを維持しながら軽量化を図るために、モーターの回転機構の改良（軽量型ウームギアへの変更）等を行った結果として、装置重量を10kg に軽量化できた。

2.6 通信方式の変更

旧型の計測ソフトでは、柱の設計座標と計測結果の差分データを、Bluetooth の無線通信を介してモバイル PC から自動建入れ装置へ送り、その差分に基づいて装置の内蔵するモーターを作動させる仕組みとなっていた。しかし建設現場には無線通信の障害となる物が多く、建入れ調整中に無線通信が切断される問題が度々発生していたが、新型の計測ソフトでは、Bluetooth から長距離無線 LAN システムによる Wi-Fi 通信を利用した形式に変更することで、安定性が高く途切れにくい通信状況を実現した。

2.7 自動計測ソフトの改良

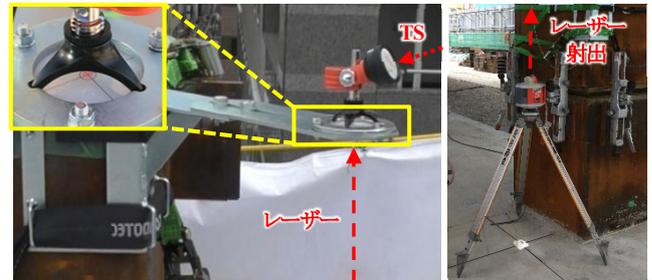
自動計測ソフトについて改良した項目を表1に示す。代表的な改良事項として、項目2の機能については、計測ソフトの画面左下にある気泡管の表示をタッチすることで現状の TS の傾斜角情報を取得できるようにした（図8）。この画面は、TS の自己位置確認時、基準点の確認時、鉄骨柱の計測時に表示されるため、TS での計測を行う際、都度 TS の整準状態を確認することができる。またこの動作は、TS から離れた位置でも無線通信を介して行うことが可能である。そのため鉄骨柱上に TS を設置した場合でも、整準状態を確認するために柱頭まで移動する必要がなく、高所作業を発生させないため、安全性の確保に貢献している。

また図9に、自動建入れ調整装置の配置画面を示す。旧型の計測ソフトでは、建入れ調整装置と連携した建入れ調整を行う場合、柱1本に対して装置4台を使用することを前提としていた。そのため、柱の各面にエレクションピースを2枚ずつ溶接した、ピース8枚



養生カバー：開 養生カバー：閉

図5 TS 架台およびTS 養生カバー



基準点プリズム設置治具

レーザー鉛直器

図6 基準点プリズム設置治具およびレーザー鉛直器



旧型 (12kg)

改良型試作品 (10kg)

図7 自動建入れ調整装置

表1 計測ソフトの主な改良項目

項目	内容
1	通信方式の変更 (Bluetooth から Wi-Fi に変更)
2	遠隔での TS 整準情報取得が可能
3	複数柱(5×5)の同時表示
4	TS 初期方位の設定機能
5	自動建入れ装置 8 台での建入れ調整
6	反射シートによる計測機能の追加
7	TS 自己位置の自動修正 (一定間隔で実施)



図8 計測画面



4 台配置

8 台配置

図9 自動建入れ調整装置 配置画面

イプの柱に対しても装置4台で対応していたが、建入れ精度の確保に時間がかかっていた。そこで、表1の項目5に示す「自動建入れ装置8台での建入れ調整」機能を追加することで、建入れ調整装置8台を同時に制御ができるようにソフトを改良し、8枚タイプの柱に対して8台の装置で対応することが可能となった。

2.8 現場での施工検証

今回改良した新型自動建入れシステムを検証するため、2020年3月、鉄骨造地上10階建（計5節）の事務所ビル新築工事現場の2節鉄骨にて施工検証を実施した。現場の状況を図10に、自動建入れシステムの施工計画図を図11に示す。TSは2節1工区の本設鉄骨柱頭に設置し、レーザー鉛直器を用いた基準点盛替えシステムにより、1階の基準点を施工階に順次盛替えて使用した。建入れ調整には改良型の自動建入れ調整装置および計測ソフトを使用した。施工の対象とする2節の柱の重量は、平均7.1tであった。建入れ精度は正規の座標値±1mmとし、柱一本について目標の精度を確保するのに要した「計測回数」と「建入れ調整時間」、また「計測1回あたりの時間（TSによる計測1回あたりの動作時間）」および「建入れ調整1回あたりの時間（建入れ調整装置の1回あたりの動作時間）」を記録した。

検証結果を図12に示す。現場で計測した際の実測値（図中①～③）とその平均、また旧型の建入れ調整装置と旧型ソフトの組み合わせで動作検証を行った際の数値（図中「旧型」）を比較している²⁾。今回の検証では、柱の建方作業中に無線通信が途切れることはなく、安定した通信状況を確認することができた。今回の検証では、建入れ調整1回あたりの時間は平均で36秒、計測1回あたりの時間は平均16秒、計測回数は平均4回、建入れ調整時間は平均で3分15秒(195秒)という結果になった。「旧型」の結果と比較すると、計測1回あたりの時間が8秒長くなったが、これは無線通信をBluetoothからWi-Fi形式に変更した影響と考えられる。ただし、柱の建方作業中に無線通信が途切れることはなく、安定した通信環境を確認することができた。また建入れ調整1回あたりの時間は27秒長くなっているが、計測回数については平均15回減少しており、約1/5の回数で±1mmの精度を確保することができた。これは、改良型の自動建入れ装置は旧型装置と比較してモーターの回転速度が遅く、1回の建入れ調整に時間がかかるが、発生させるトルクが大きいため動作1回あたりの調整量が大きく、建入れ調整を完了するまでの計測回数を大幅に減少させることができたためと考えられる。結果として、柱1本の建入れ調整にかかる時間は約2分30秒短くなり、旧型のシステムと比べておよそ6割程度の時間に短縮できることを確認した。



図10 現場状況写真

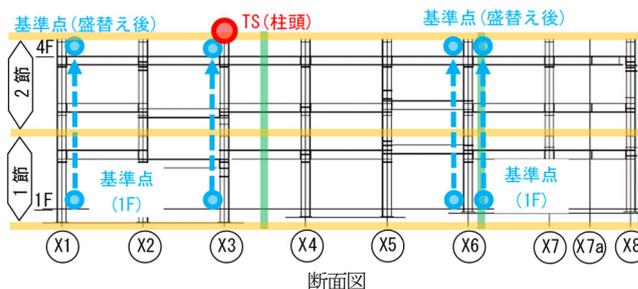
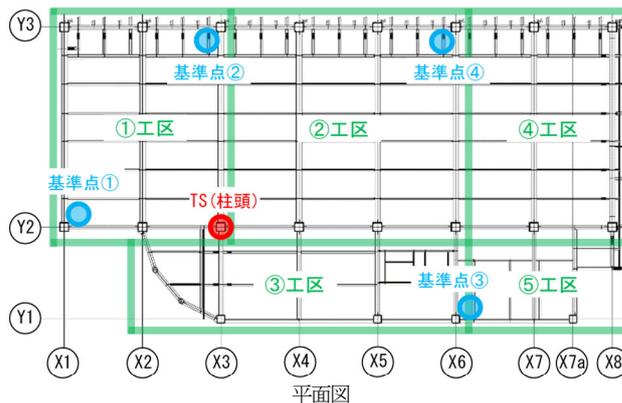


図11 施工計画図

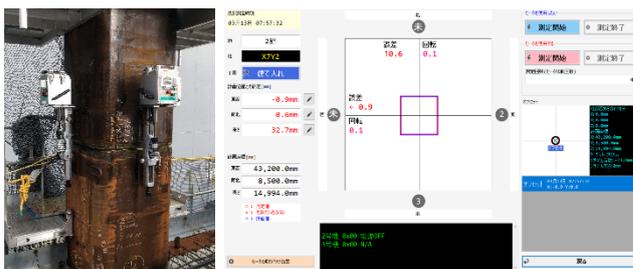


図12 施工状況写真

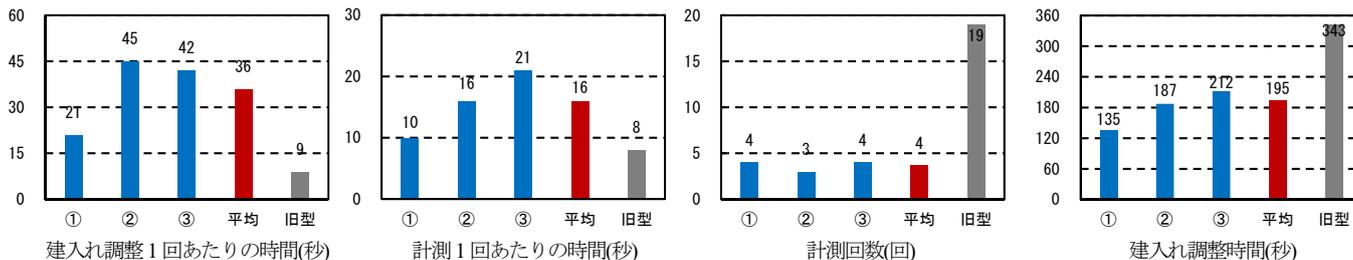


図13 検証結果(建入れ精度±1mm)

3. 吊荷旋回制御装置・自動玉外し

3.1 吊荷旋回制御装置の軽量化

筆者らが採用した吊荷旋回制御装置（以下、本装置）は、内蔵するホイール（フライホイール）を高速回転させ、そのジャイロ効果によって吊荷の旋回を制御する装置である¹⁾。この装置は、タワークレーンを使用した鉄骨や PCa 工事への適用を想定して開発されており、その重量は約 2.3t と大きく、タワークレーン以外の揚重機での適用は困難であった。

そこで筆者らは、フライホイール、バッテリーおよびフレームを軽量化することで装置の重量を約 700kg 低減し、1.6t まで軽量化した軽量化版吊荷旋回制御装置を開発した。装置自体は軽量化しているが定格能力については軽量化前の数値を維持しており、定格能力 75t・m²、定格荷重 20t としている。

3.2 PCa 床版の施工における適用

2019 年 1 月に、東京都内における床版の架替え工事において、本装置による施工を行った。施工状況を図 14 および図 15 に示す。ここでは仮線工法が採用されており、仮高架橋工事桁と営業線との離隔が 50 cm と非常に近接する厳しい条件であった。また今回の施工では、揚重機に移動式クレーン（機種：50 t ラフテレーンクレーン）を用いており、吊荷旋回制御装置をタワークレーン以外の揚重機と組み合わせて施工した事例は、本件が初となる。さらに今回は図 16 に示す自動玉外し装置と組み合わせて使用し、床版仮設時の玉外し作業を無人で行うこととした。自動玉外し装置は、ワイヤーを介して本装置の下部に取付け、4 点で床版を吊り上げた。床版架設時には専用の操作リモコンを用い、遠隔操作により玉外しを行った。

クレーンでの移動・旋回時における吊荷の制御は安定しており、列車の走行に支障を与えることなく安全に架設することができた。近接線走行時においても吊荷の静止状態を維持することができ、営業線近接条件下での安全性を確保できることを確認した。また自動玉外し装置と合わせて使用することで、架設時の作業員の近接作業が不要となるため、玉外しの作業を安全に、かつ効率よく行うことができた。

3.3 PC カーテンウォールの施工における適用

2020 年 7 月に、神奈川県内での PCCW（プレキャストコンクリートカーテンウォール）工事において、吊荷旋回制御装置用に開発した専用バルンサーを用いて施工を行った。施工状況を図 17 に示す。

今回製作したバルンサーは、前方先端に PC 版を吊り下げた状態で、チェーン駆動によりカウンターウェイト（最大 6t）を前後に移動させることで、つり合いを取る形となっている。カウンターウェイトの移動は、専用のリモコンを使用して遠隔で操作した。今回は、バルンサーの前方を本装置中心から約 1.5m 突き出させることで、底の下においても PC 版を取り付けることが可能となるように設計している。また、本装置による旋回制御機能と組み合わせて使用することで、PC 版を安定した位置・姿勢で保持することができるため、現場での施工検証においても風等による影響を受けることなく、PC 版の取付作業を安全に、かつ効率よく行うことができたことを確認した。



図 14 営業線列車走行時の架設状況

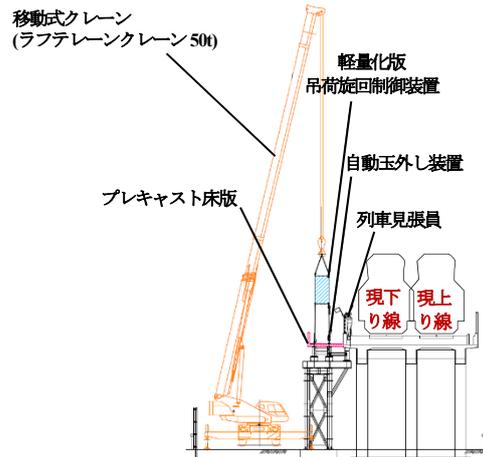


図 15 床版架設状況断面図



自動玉外し装置 操作リモコン

図 16 自動玉外し装置



図 17 バランサー使用状況

4. 仮ボルト不要接合治具

4.1 仮ボルト不要接合治具の改良

筆者らが開発した仮ボルト不要接合治具（以下、本治具）は、地上にてネジ付ピンにより鉄骨梁に固定しておき、梁の取付けの際、ブラケット梁のボルト穴に接合ピンを落とし込むだけで梁を取り付けることができる治具である¹⁾。図18に本治具の施工状況を示す。

図19に本治具の改良状況を示す。今回、鉄骨梁のフランジ厚が30mmを超える場合にもこの治具が採用できるように改良を行った。また、旧タイプの治具はネジ付きピンの穴を1か所のみに入れてあるため、梁ウェブに対して左側専用の治具と右側専用の治具の2種類を製作し、それらを1セットとして使用していた。そこで、左右兼用できるようネジ付きピンの孔を2箇所設けることで、地組み時の取付け作業性を向上させた、新タイプの治具を製作した。

さらに表2に示すように、上フランジとその上側のスプライスプレートの合計厚さにより「標準型」と「厚板型」を、このそれぞれに対しボルト径の違いによって「M20用」と「M22用」の計4種類の治具を製作することで、より多くの条件に対応することができるようにした。

4.2 仮ボルト不要接合治具の現場導入

図20に仮ボルト不要接合法の検討フローを示す。仮ボルト不要接合治具の導入を検討する場合、構造図が作成された時点で事前に適用可否を判断する必要がある。

本治具が適用可能であり、かつ採用を決定した場合、安全上の検討を行う。この検討は、水平荷重（地震荷重および風荷重）に対して治具の接合ピンが損傷しないこと、鉛直荷重（梁の自重（固定荷重）および先行仮置き資材等の積載荷重）に対してスプライスプレートが損傷しないことの2点についてそれぞれ実施する。検討方法については、「鉄骨工事技術指針・工事現場施工編」等の指針に準じて作成した検討書を用いて行う。

以上の確認および検討を行った後、使用開始1か月前までに治具の仕様数量を算出し、最終的な治具の仕様個数を決定する。その後、現場で本治具を使用する作業員に対して、治具の取扱い方法や注意事項等の説明を行った後、本治具の使用を開始する。このように本治具の導入に際しては、安全性に関する検討および安全注意事項の周知を徹底したうえで運用することとしている。また現在、上記検討を行うことを前提とした外販を実施している。

5. おわりに

鉄骨工事における自動化施工技術の要素技術について、現場の意見を反映した改良を行い、繰り返し新たに現場適用を行っている。その中で、建設作業における効率化と安全性の確保に有効であることは確認できた。

今後は、鉄骨工事の更なる生産性向上を目指し、開発した技術に更なる改良を加え、またタワークレーンの3次元自動誘導等の自動化施工技術の開発を進める予定である。

参考文献

- 1) 三輪明広, 鈴木信也, 中村淑子: 「鉄骨工事における自動化技術に関する開発」 戸田建設技術研究報告第43号, 2017.11

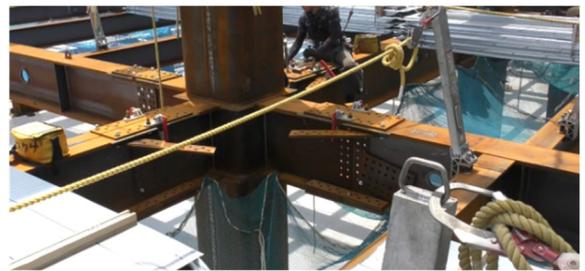


図18 仮ボルト不要接合治具の施工状況

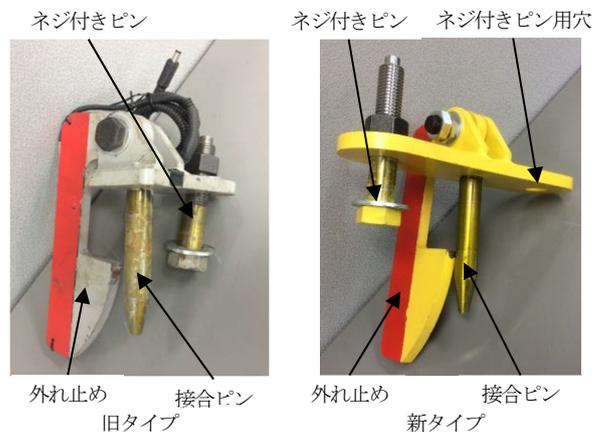


図19 仮ボルト不要接合治具の改良状況

表2 仮ボルト不要接合治具の種類

		上フランジとスプライスプレートの合計厚さ	
		67mm 以下	95mm 以下
ボルト径	M20	M20用 標準型	M20用 厚板型
	M22	M22用 標準型	M22用 厚板型

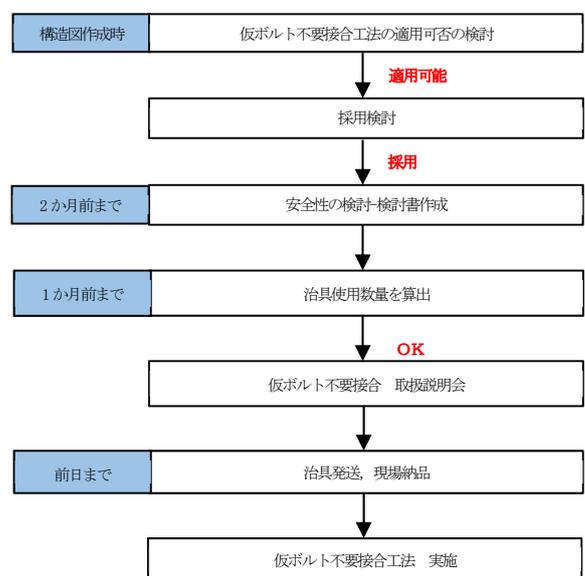


図20 仮ボルト不要接合法 検討フロー

- 2) 山内博史, 市村元, 鈴木信也, 岡田大輔, 中村保則: 「鉄骨柱の自動計測・建入れ調整システムに関する研究 その4 20t柱用建入れ調整装置の検討」 日本建築学会大会学術講演梗概集 材料施工 p.1251-1252, 2019.7