

全天候型ビル自動施工システムの開発と適用

前田 純一郎
(技術開発センター)

§ 1. はじめに

我が国の建設業を取り巻く環境は、近年大きく変化してきた。建設産業は、労働集約型の典型と言われて久しいが、近年その担い手としての技能労働者の絶対数の不足と、年々進む高齢化が深刻化している。また建設産業にも国際化の波が押し寄せており、生産性の向上や、技術力の強化など国際競争に対応できる体質の強化を迫られている。そのためには、建設業とりわけ建設現場を若者にとって魅力ある職場に変えると共に、建設生産プロセスの変革による従来の労働集約型産業からの脱皮と、生産性の一層の向上を図ることが大きな課題となっている。

このような背景の下に、この数年、ビルの建設全体を対象とした、いわゆる「ビル自動施工システム」の開発がゼネコン各社で積極的に取り組まれ、いくつか具体的なシステムの提案と、実際の現場への適用が試みられている。

全天候型ビル自動施工システム（スマートシステム）は、その提案の1つであり、雨風に左右されない快適な環境下で、事務所などの高層ビルの地下工事から躯体工事、仕上・設備工事に至るあらゆる施工作業を自動的に行うものである。その開発のねらいは、次の4点に集約される。

- 1) 作業環境を安全で、清潔、快適なものにする。
- 2) 天候に左右されずに作業を行えるようにする。
- 3) 労務工数の削減など、生産性を向上させる。
- 4) 現場からの建設廃材を大幅に削減する。

これを実現するために、屋根と外周部をシートで覆うことにより、工場内でビルを造るような作業環境を作り出す。そして、その環境下で、自動化やロボット化技術を全面的に導入し、プレハブ化など工業化技術を大幅に採用したシステムの開発を目指した。本システムは、1988年に開発に着手、1990年秋のプロトタイプによる初の現場実証工事を経て、1991年

10月着工した名古屋市内の事務所ビルに本格的に導入した。1993年秋に本システムによる施工を終了し、1994年3月竣工した。写真-1は、施工中の外観を示す。

§ 2. システムの構成

図-1に示すように、システムの主要架構は、ハットトラスと呼ばれる塔屋階の本体鉄骨を利用した屋根面を構成するフレームと、それを支える4本の仮設マストとから構成されている。屋根フレーム面には、水平・垂直搬送装置が設けられ、各マストには、ハットトラスをせり上げるためのリフトアップ装置が組み込まれている。ハットトラスの上面には、屋根養生として透光性の高いシートが設けられ、外周部には、施工階を全面的に覆う外周養生メッシュシートが養生フレームで補強されて吊り下げられている。屋根フレームと外周養生で囲まれた内部作業空間は、製造業の工場をイメージさせるもので、「施工プラント」と称する。このプラント内部でビ



写真-1 施工中の外観

ルの組立工事が1フロアずつ行われる。ハットトラス、マストで構成される施工プラントの主架構は、 $k=0.2$ として設計している。施工時に関しては、施工する建物構造体と主架構との連成系モデルにて応答解析を行い、安全性を確保した。また、耐風性能については、主架構、養生フレーム、養生シート共に基準風速 $V=35\text{m/s}$ で算定、風力係数は、風洞実験を行い確認した。

§ 3. 適用技術とその特徴

本システムを構成する主要な技術とその特徴を、

以下に説明する。

3.1 リフトアップ自動化

「施工プラント」全体を自動的にせり上げるもので、全重量1,200トンのプラントを4本のマストに取り付けられたリフトアップ装置を同調駆動させながら、1フロア分を約90分で上昇させる。クライミング式タワークレーンに似たせり上げ方式であるが、リフトアップ装置の下部にあり荷重を本体鉄骨梁に伝えるアームの開閉や、油圧シリンダの駆動、施工プラントを支える4本のマストの同調制御などを自動的に行う。

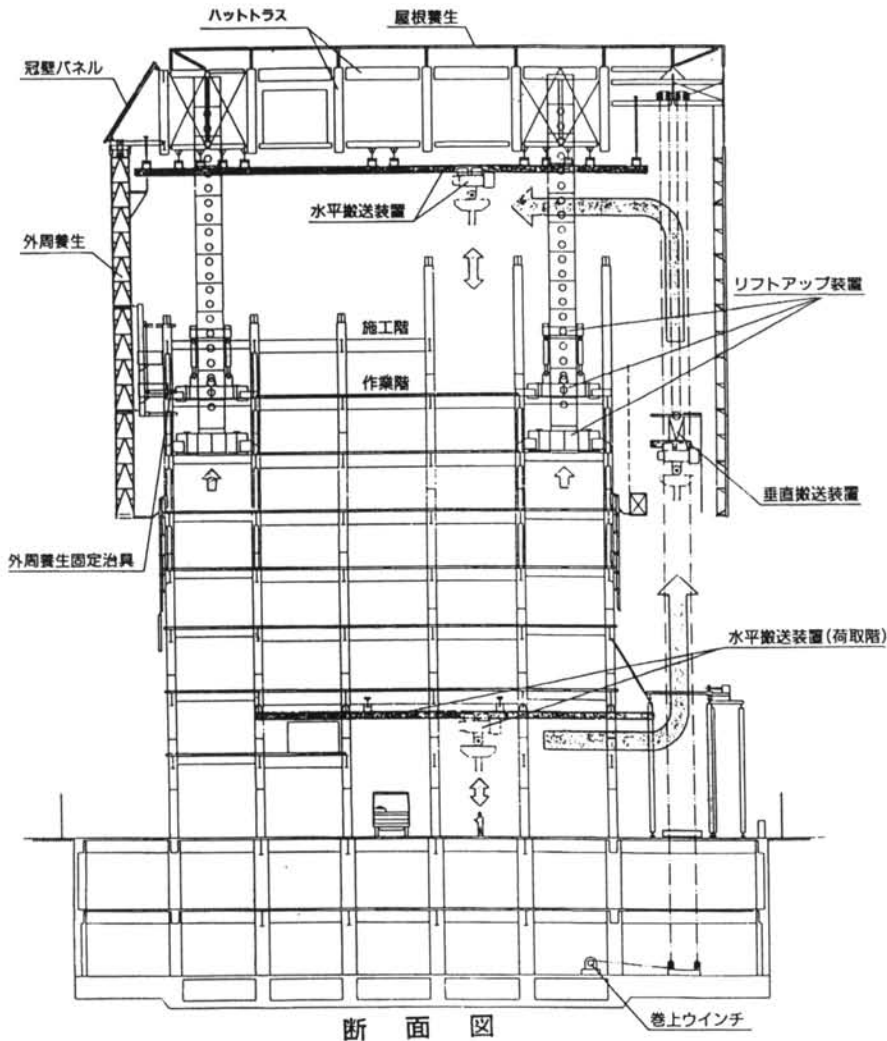


図-1 システムの構成

3.2 資材自動搬送

3.2.1 システムの構成と搬送のフロー

搬入された建設資材は作業階の取り付け場所まで自動的に連続搬送される。システムは地上と作業階を往復する垂直搬送装置と、作業階および荷取階に設けられた水平搬送装置、さらにこれらの装置を乗り継いで資材を運搬するトロリーホイストとで構成されている。写真-2は、作業階に設置された水平搬送装置である。図-2に示すように、荷取階で玉掛けされた資材は、垂直搬送装置や複数の水平搬送装置を次々に自動的に乗り移りながら、指定された3次元の目標点まで搬送される。なお、自動搬送は

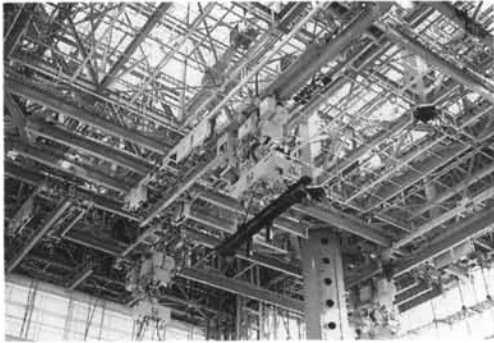


写真-2 作業階の水平搬送装置

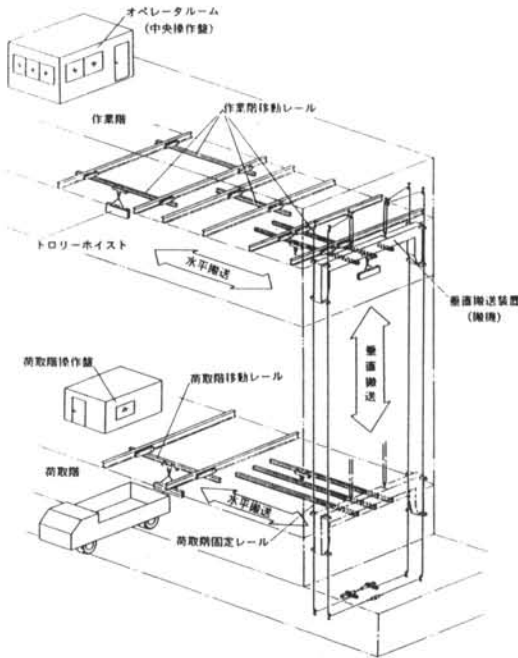


図-2 搬送システムの構成

取付位置の近傍までとし、後は、遠隔操作により取り付けを行う。複数台のトロリーホイストは資材を吊ったままコンピュータにより生成された搬送経路を経て、次々に目標点に到着する。資材の搬送を終えたホイストは、再び自動運転で荷取階へ戻る。名古屋の工事では、水平搬送装置として、10台の乗り継ぎ装置付き天井クレーンと、5台のトロリーホイスト、および1台の垂直搬送装置が導入された。

3.2.2 システムの基本的な考え方

従来の揚重方法と比較すると、従来のタワークレーンによる作業では、図-3に示すように玉掛・揚重・取付・玉掛外し・ブーム戻しを1サイクルとする繰り返しであり、連続作業は不可能で、荷取階及び作業階の作業員は手待ちになることが多かった。これに対して本システムでは、複数台のホイストにより連続自動搬送を行うことができ、人手に係わる玉掛け、取付け各作業での手待ちを解消し、一日の揚重回数を増加させることができる。

3.2.3 制御システムと搬送経路自動生成

運転制御システムは、荷取階および作業階水平搬送システムと垂直搬送システムが連携しながら、複数のホイストにより効率良く安全に資材を自動搬送するためのシステムである。本制御システムの中核となるのは、搬送経路自動生成タスクであり、自動運転モードのホイストを任意の目標座標点に滞留なく連続的に搬送するための経路を生成する。図-4に示すように建物平面を東西および南北にゾーン分割し、ホイストが垂直搬送装置から目標点までどの

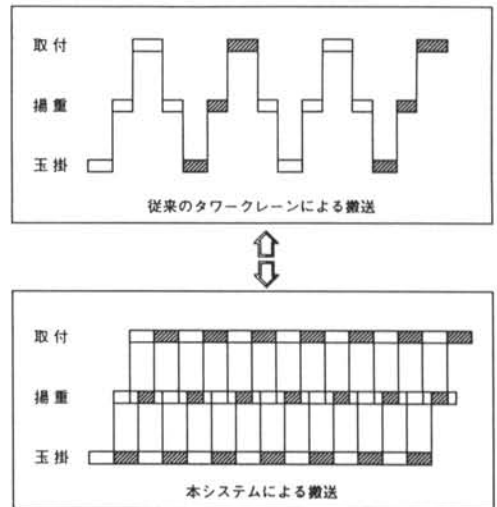


図-3 搬送システムの基本的な考え方

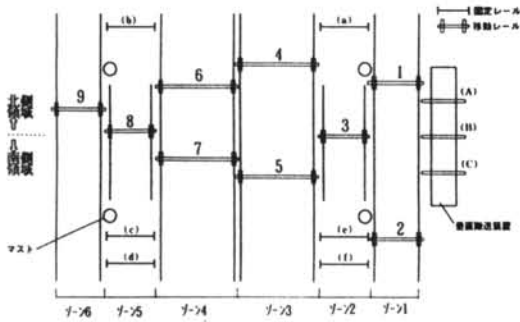


図-4 経路生成のためのゾーン分割

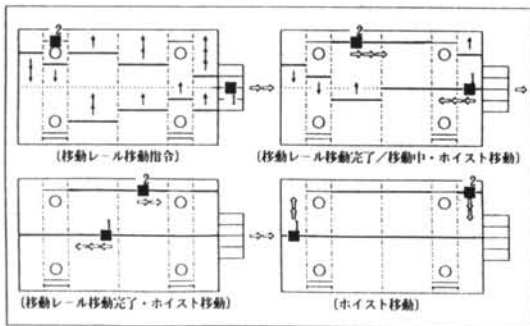


図-5 経路生成例

ゾーンのどのレールを選択して進行するか演算する。その際、各移動レールの移動時間、レール同志の連結時間、ホイストの横行時間などが最短になるように、なおかつ、往路と復路のホイスト同志が経路上の移動レールを取り合いにならぬように経路を決める。図-5は、経路生成の一例である。

3.3 鉄骨組み立て

自動搬送・位置決めされた鉄骨の柱や梁の取り付けは、人手を介さずにホイストの操作だけで行えるように継ぎ手部分にガイド機構を採用した。この機構は取り付けした柱や梁が固定される仕組みになっており、従来の仮組みボルトも不要になった。写真-3および図-6は、鉄骨柱のジョイント部形状を示す。玉掛け外しも自動化しており、据え付け後直ちに玉外しを行ってホイストを返し、搬送時間の短縮を図った。

据え付けた鉄骨柱の垂直精度の調整には、新たに開発したレーザー自動計測装置を導入した。柱の据え付け後、レーザー発信装置を床の基準線の上にセットし、垂直に発信されたビームを柱頂部の受光装置で受けて垂直度を検出する。作業員はそのディジタル

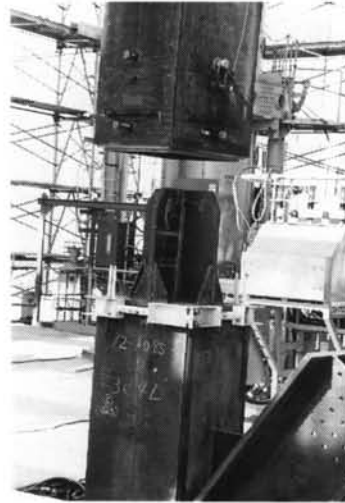


写真-3 柱の据え付け状況

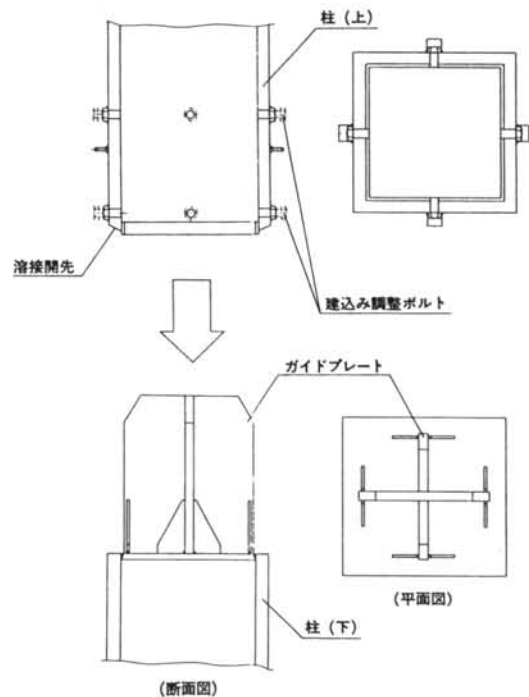


図-6 鉄骨柱のジョイント部形状

表示を見て、図-6の調整ボルトを操作しながら垂直度の調整を行う。

3.4 鉄骨自動溶接

柱接合部の横向き多層盛溶接用ロボットを開発し、柱のコーナー部を含む全周連続自動溶接を実現した。



写真-4 作業中の溶接ロボット

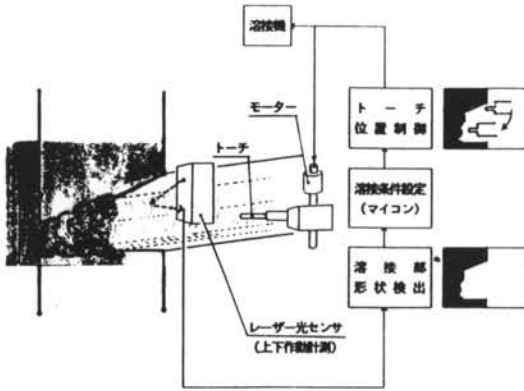


図-7 開先形状の認識と溶接条件の設定

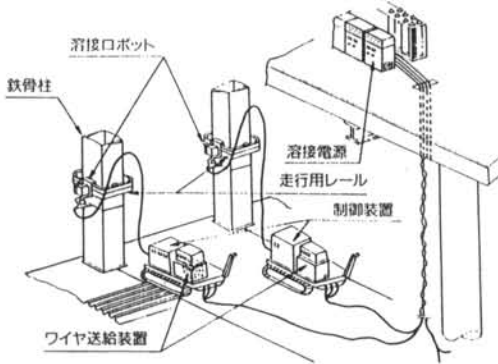


図-8 柱溶接システムの構成

写真-4は、ロボットによる溶接作業状況である。ロボット本体は横向きアーク溶接を行う駆動軸4軸の走行式のロボットで、開先形状を認識するためのレーザーセンサーを備えている。ロボットは柱に仮固定したレールに沿って一周連続溶接し、その後反転して溶接を繰り返す。シールドガスは炭酸ガスまたはMAGを使用できる。本ロボットは、走行レールを交換することにより、方形、円形いずれの柱断面形状にも対応でき、方形の場合は、コーナー部も



写真-5 外壁パネルの搬送

含めて全周を連続溶接できる。レーザーセンサーで開先形状を認識し、データベースから最適なトーチ位置や速度などの溶接条件を設定する。(図-7参照) また、本体、レール共に小型・軽量で操作も容易である。さらに自動化のレベルが高いので、1人の作業者が複数台のロボットを操作でき、省力効果を期待できる。図-8は、溶接システムの構成を示す。

柱と梁の接合部のうち、上フランジについても下向き走行式溶接ロボットにより自動化を図った。

3.5 プレハブ化・ユニット化

床工事は、PC工場で製作された大型の床PC版を据え付け、ジョイント部のみコンクリートを充填する方式とした。現場に搬入されたPC版は、荷取階にて玉掛け後、自動搬送システムによって指定された位置まで搬送され、据付けられる。また、外壁工事では、あらかじめ工場でガラスを嵌め込み、映像調整まで行ったカーテンウォールを現場に搬入する。荷取階ではさらに空調機をも組み込み、ユニット化されたものを自動搬送し、据えつける。ユニットには、落とし込み式のワンタッチジョイントが設けてあり、据え付けは簡略化されており、以後の調整作業は殆ど要しない。写真-5は、外壁の施工状況である。設備機材や仕上げ材も、パイプシャフトや電気配線のユニット化や間仕切り壁のユニット化などを積極的に進めた。

本工事においては、以上のようなユニット化・プレハブ化に加わえて、内装材のプレカット化や梱包

91年			92年												93年												94年	
10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
連壁・杭工事			根切工事			地下躯体工事			地下設備工事												地下設備・仕上工事							
										① ハットトラス組立		② スマストシステムによる 躯体・外装・設備工事												④ 解体		⑤ 屋上工事		
												③ 内装・設備工事																
																								低層部躯体・内外装・設備工事				

表-1 全体工程表

材の省略などを徹底して実施し、現場から発生する廃材の低減を図った。

3.6 現場情報管理

設計図書の図面情報データベースに基づいて、各種の施工図、部材リスト、工程表などが作成される。この部材情報は、建方手順情報などと共に搬送制御システムに入力され、自動搬送が実行される。施工状況は、リアルタイムにモニターされ、その結果は、生産管理システムにおいて出来高や、機器稼働実績の集計が行われる。また、ハンディな入力方式の品質管理システムや、作業者向けの労務・安全管理システム、工事総合調整用のシステムなどが総合的に導入され、活用された。

§4. 適用工事概要と施工手順

4.1 工事概要

名古屋市内の事務所ビル新築工事は、1991年10月に着工し、1994年3月に竣工した。建物規模は、地下2階、地上20階、塔屋1階で、最高軒高88m、延床面積は、約20,000m²である。構造は、地上部が鉄骨造、地下部が鉄骨鉄筋コンクリート造の事務所ビルである。表-1に、本工事の全体工程表を示す。また、写真-6は、竣工時のビル外観である。

4.2 本システムによる施工手順

図-9に本システムの施工手順を示す。

4.2.1 施工プラントの組立

地下工事を終わると、地下1階のスラブ上に4本のマストとリフトアップ装置を据え付け、1階のスラブ上でハットトラスすなわち塔屋階の骨組を組み



写真-6 竣工時のビル外観

立てる。ハットトラス下面には、水平搬送装置などの機器類を組み込んだ後、リフトアップ装置を使ってハットトラスをせり上げ、ハットトラスがマストの頂部まで達すると両者を結合する。並行して、外周養生シートおよび支持する外周養生フレームをハットトラスの周囲にめぐらせ、施工プラントの組み立てを終わる。なおハットトラスの上には、屋根養生シートを張り、側面には、ビル外壁の一部となる冠壁パネルを先行して取り付ける。

4.2.2 施工プラントによる基準階施工

この施工プラントにより、鉄骨やスラブなどの躯体ばかりでなく、外周パネルや内部間仕切りなどの仕上げや設備の一部をも含む1階分の工事を繰り返していく、基準階の繰り返し施工（「施工サイク

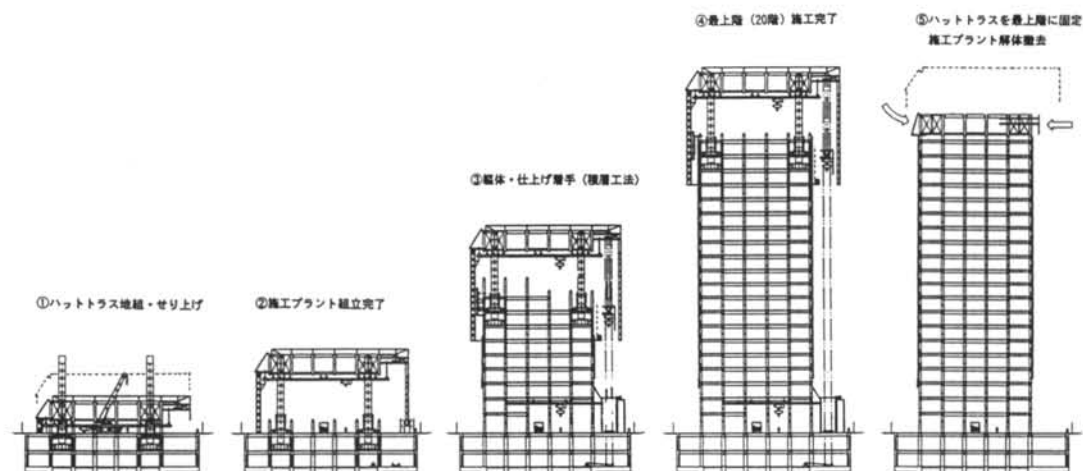


図-9 本システムによる施工手順

区分	作業内容	備考
鉄骨工事	柱、梁、小梁建方、階段取付 柱・梁本締め、吊接（柱、梁）	
床工事	床PC版建方 ジョイントコンクリート打設	
外装工事	ガラスカーテンウォール取付 アルミカーテンウォール取付	
内装工事	A.L.C耐火間仕切取付 外周鉄骨柱耐火被覆取付	サムライト貼
設備工事	パイプシャフト（PSユニット）取付 電気配線シャフト（EPSユニット）取付 空調機取付 スプリンクラー取付	盤及び配線まで完了 保温工事共 主配管取付

表-2 施工サイクルに含まれる作業

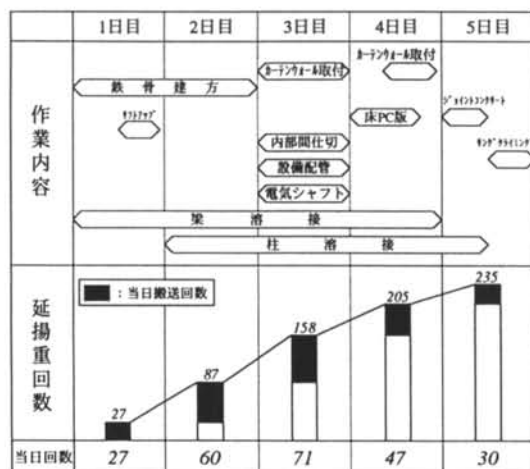


表-3 施工サイクルと揚重量



写真-7 外周養生の解体

ル)に含まれる作業を、表-2に掲げる。表-3は、施工サイクルの作業手順と搬送システムによる揚重量とを示す。施工サイクルに要する日数は、本システムの立ち上がり時点では9日であったが、後述するシステムの改善により、5日で完了できるようになった。

4.2.3 施工プラントの解体

最上階までの施工を終了すると、プラントの解体・撤去に移る。写真-7に示すように、まず外周養生の解体を行う。外周養生フレームは折り畳み式になっており、1ユニットずつ折り畳んで、トロリーホイストで吊って地上へ降ろす。次に、リフトアップ装置によりハットトラスをリフトダウンさせて、本体鉄骨に結合させ、溶接接合してビル全体の構造体が完成する。リフトダウンと並行して、マストを構成するユニットを下部から順に取り外し、同時に水平搬送装置や走行レールも撤去する。最後に、

ハットトラス部の外装となる冠壁パネルを畳み込み、ハットトラスの補強鉄骨の解体・撤去を行い、プラント解体を終了した。

4.2.4 内装・設備工事

施工プラントによる繰り返し施工に並行して行われる内装・設備工事の特徴は、次の通りである。

1) 作業の早期着手

本システムでは、全天候養生の効果により雨もりの心配がないので、躯体施工の直下階から内装・設備工事に着手でき、全体工期の短縮を可能とする。

2) 資材の先行揚重

搬送システムの搬送能力の大きさを活用し、全天候養生の完備とも相まって、資材の先行揚重・据え付けが可能となり、後続の作業量を低減させる。

3) 工事のタクト化・労務平準化

躯体の進捗にあわせたフロア別タクト工程を組み、工事の早い段階から平準化された一定量の労務を投入でき、工事の最終段階での作業量の集中を避けることができる。

ことができた。施工サイクル日数の短縮を可能にした要因は、次のようなものであった。

1) 搬送システムの改善

- ・制御ソフトの改善による搬送時間短縮
- ・トラブル（故障）要因の除去

2) 作業手順や方法の変更

- ・効率のよい建て方手順
- ・同時並行作業化

3) 人的習熟効果

- ・作業員の習熟（玉掛け、取付け、段取）
- ・オペレータの習熟（割り込み作業など）
- ・管理者のシステム理解度の向上

1フロア5日の施工サイクルに基づいて、モデルビルについて在来工法との工期の比較を行ったのが図-10である。太実線は本システムによる工事の進捗を、点線は在来工法の工事の進捗状況を示す。本システムによる場合には、躯体、外装、および仕上・設備の一部は、1フロア5日の速度で施工が進むが、プラントの組立、解体にかなりの期間を要する。しかし、a点から仕上・設備工事が開始され、施工効率もよいためc点で施工を終了する。これに対して在来工法では、b点でようやく仕上・設備工事がスタートし、d点で終了する。c点とd点の差が工期短縮の大きさとなる。試算によれば、階数その他の条件の違いにもよるが、20~40%の短縮の効果が確認できた。

§5. 施工結果とその評価

本工事へのシステム適用により得られた結果を、その評価とともに以下に述べる。

5.1 施工サイクルと工期の短縮

1フロアの施工サイクルに要する日数は、システムの立ち上がり時点では9日であったが、フロアごとに改善を重ね、工事後半には5日にまで短縮する

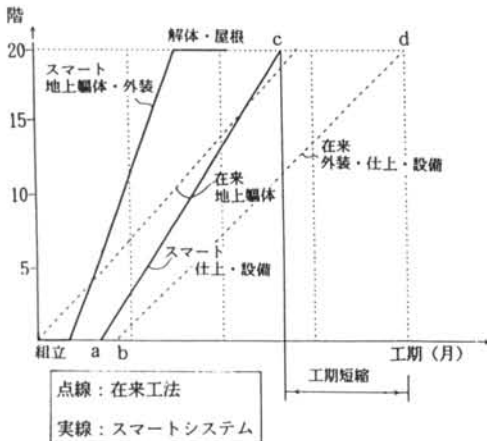


図-10 在来工法との工期比較

5.2 現場労務工数の削減

部材のプレハブ化・ユニット化の徹底と搬送や組立・溶接の自動化、内装・設備工事の効率向上などの総合効果として、現場での労務工数を約30%削減することができた。これは高層棟部の地上工事について、全ての躯体、内・外装、設備、仮設工事を集

階数	スマート労務工数	在来工法労務工数	低減率
9F	188人	215人	13%
13F	168人	215人	22%
15F	150人	215人	30%
17F	130人	215人	39%
19F	119人	215人	45%

表-4 フロア別延べ労務工数

計したものである。前出の表-2に示す本システム「施工サイクル」に含まれる作業に対して、フロア別の延べ労務工数まとめたのが、表-4である。フロア毎に作業の改善・改良を加え、サイクル日数の短縮を実現すると共に、最終的には在来に比べて約50%の工数削減となった。ただ、システムの組立・解体に要する工数が、在来のタワークレーンの組立・解体に比べると大幅に増えており、この組立・解体の方法の改善が、今後の課題の1つになっている。

5.3 天候に左右されない現場の実現

施工プラント内では、屋根養生と外周養生とが完全に風雨を遮断したため、天候に関係なく作業を進める事が出来た。当現場におけるシステムの稼働期間中、工事に影響したと考えられる悪天候日は、全体の20%にもなったが、好天日と変わらず作業を行う事が出来、残業や休日出勤もなく、順調に工事を消化する事ができた。さらに具体的な効果として、次の点が挙げられる。

- 1) 悪天候による作業中止のための人や資材の手配

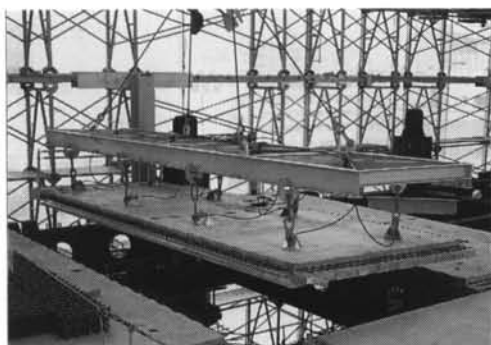


写真-8 床PC板の施工状況

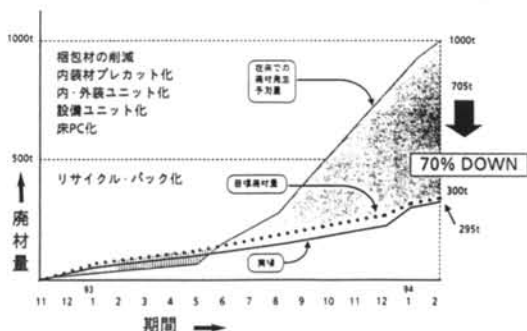


図-11 建設廃材の削減

の変更が必要なくなり、工程管理が非常に楽になった。

- 2) 休日が予定通り取れるため、作業員にとっては勤務日数も安定し、好評であった。
- 3) 濡れては困る仕上工事が軀体工事と同時にでき、工程の組み立ての自由度が増し、労務工数の山ならしと低減につながった。

5.4 現場作業環境の改善

施工プラントの内部は、明るく広々とした適度の通風もある空間となり、雨風ばかりでなく冬の寒さや夏の暑さ、直射日光からも作業員を保護することが出来た。

また、1フロアずつリフトアップしながら施工を繰り返す積層工法を採用したことで、全ての作業を安全な床の上から行い、階高を越える高所作業をなくした。同時に外周養生が作業階を完全に覆い、墜落や飛来落下の心配のない安全な現場を実現した。

さらに、自動化や工業化の効果として、鉄骨組立や溶接、床PC版据え付けなどのように、労働負荷の大きな作業や悪環境での苦渋作業から作業員を解放した(写真-8参照)。また、汚れや埃の出る作業をプレハブ化や材料の変更でなくして、清潔で、整然とした作業現場を実現した。

5.5 建設廃材の削減

軀体、仕上、設備工事における部材の徹底した工場生産化、プレカット化、梱包の廃止など、現場に廃材の発生原因になるものを持ち込まない、と言う基本的な考え方が全業種に徹底された結果、図-11に示す様に、実績として在来工法の70%(約700t)の削減を達成し、さらに減量させることができた。また、副次的な効果として、通常仕上げ材や残材の揚げ降ろしに使用する仮設リフトの稼働回数が、従来の現場に比べて大幅に少なくなり、仕上げの最終段階でよく見られる片付けや残材降ろしのための残業はほとんど行われなかった。

§6. 今後の課題

現在ゼネコン各社から提案されているビル自動施工システムに共通の最も大きな課題の1つは、コストの問題であろう。システムのイニシャルコストが非常に高いことから、1現場当たりの償却負担を減

らすためには、複数の現場に転用して使うことが必要になる。そのためには、システムに汎用性の高いことが条件となる。イニシャルコストの低減と併せて、汎用性を一層高めるべくシステムの整備が必要となる。また、システムの稼働率を高める1つの方法として、2交代制による稼働日数の短縮も検討されるべきである。

今回の工事では、設計が全て完了した時点でシステムの採用が決まったため、本システムによる施工を前提にした設計にはなっていない。今後は、トータルコストミニマムの観点から、構造計画の初期の段階から本システムを前提とした諸検討がなされ、適切な本設・仮設の分担、断面の算定、ディテールの決定など、システムの適用を前提とした設計のあり方を確立する必要がある。

また、本システムは自動化による省力効果には期待するが、最終的にも無人化を目指すものではない。人間と機械とが適切に機能を分担し合うマンマシンを目指している。本システムの導入により、従来の労働負荷が大きく危険度の高い作業から、監視や確認など、より知的で安全度の高い作業へ変化した。作業内容も簡略化し、あまり高度の熟練度を要しな

い多能工的なチームによる作業を基本とするようになった。このような新しい職能をもつ人材の確保と養成が、今後の課題の1つとなるだろう。

以上に掲げたのは、多くの課題の一部に過ぎない。取り組むべき課題は、多方面にわたっている。運用上の問題や技術的な課題、作業する人間の問題や協力会社との関係など、多くの要素を念頭に置きつつ、さらに新しい建物の作り方を追求してゆく必要がある。

§7. おわりに

本工事におけるスマートシステムの適用は、1993年の秋に終了したが、当初のねらいはほぼ達成できたと考えている。しかし、前述のように今後取り組むべき課題は多く、新しい生産技術として第一歩を踏みだしたに過ぎない。

今後は、生産性の向上や汎用性の向上に努め、新しい建築生産システムの1つとして確立してゆきたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 前田ほか：“全天候型ビル自動施工システムの開発と適用” 第3回建設ロボットシンポジウム予稿集 1993年7月
- 2) 前田：“施工自動化実現のための課題” 日本建築学会大会 研究協議会パネルディスカッション予稿集 1993年9月
- 3) 前田：“スマートシステム「高層ビル自動施工システム」” 建築の技術 施工 1994年3月号
- 4) 菊地：“建築工事における資材搬送自動化の現状と課題” 第9回建築施工ロボットシンポジウム予稿集 日本建築学会 1995年1月