

7. 空港ターミナルビルにおける大規模屋根スライド工法

鹿島建設(株)東京建築支店
鹿島建設(株)東京建築支店
鹿島建設(株)機械部

○ 和田 賢一
領木 紀夫
水谷 亮

1. はじめに

本工事は「首都圏の空の玄関口」に相応しい「快適都市空港」の創出の基本方針のもとに、2010年10月に生まれ変わる東京国際空港国際線の旅客ターミナルビル建設プロジェクトである。

ターミナルビルを覆う大屋根は、柱スパン69m、トラス間スパン18mのトラス部材を10個連結した92m×162mの大架構立体鉄骨トラスで構成されており、この大屋根トラス鉄骨の建方工法が最重要課題となっていた。

本報では大屋根トラス鉄骨建方の工法として選定したスライド工法について報告する。



図-1 完成予想パース

2. 工法選定

大屋根の架かる本館のほぼ中央には京浜急行電鉄の既設地下トンネルが縦断しており、大屋根鉄骨建方についてはここに重機を設置することなく施工しなければならない、最適な工法を求めて諸工法の比較検討を進めた。(表-1)

原案であるリフトアップ工法においては、地上1階床躯体に置構台を設けて大型重機を配置することは可能であるが、屋根が架かるまで2、3階の躯体工事に着手できない上に、トンネルを避けて両側に重機を設置して作業環境を整えなければならない。

第2案は各トラスそれぞれにベントを設けた一方向からの建方である。この工法についてもリフトアップと

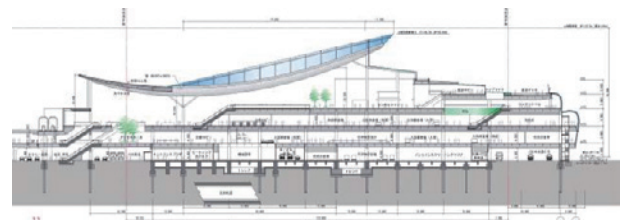
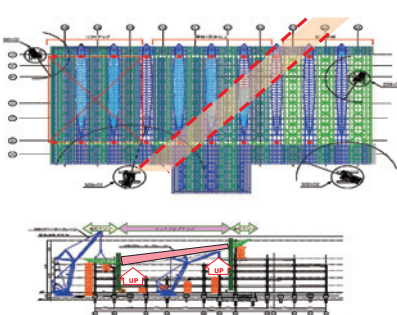
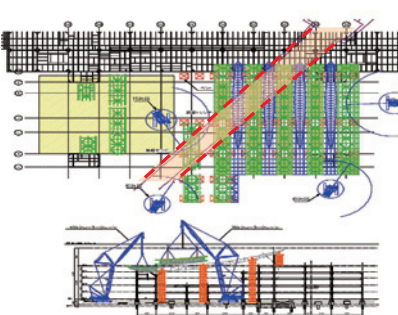
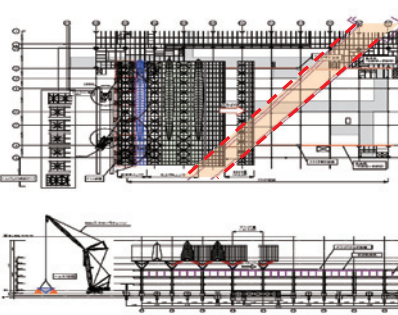


図-2 基準断面

同様に躯体の残工事が多大に発生してしまう。さらに、次のスパンに建方を移行する際に各ヤードの盛替え工事の発生によりコスト、工期に影響が出てしまう。また、各スパンにベントを設けるためすべての箇所躯体補強が必要となる。

表-1 大屋根建方工法比較表

案1 リフトアップ工法 GLで中央部屋根鉄骨を地組しリフトアップ	案2 ベント工法 建方ブロックごとにベントを設置し順次鉄骨建方	案3 スライド工法 妻側建方エリアで組み立てられた鉄骨を順次スライドで送り出す
		
使用クレーン：200tクローラ×2台、300tクローラ×2台	使用クレーン：750tクローラ×2台、450tクローラ×2台	使用クレーン：500tクローラ×1台、180tクローラ×1台

第3案がスライド工法である。18m×9スパンに架かるトラス受け柱を仮設の滑り材で支持し、一体化した9m×92mの立体トラス鉄骨を仮設油圧ジャッキにて18mごとにスライドさせて次のトラスと連結させていく工法である。前述の二案に比べて建物外部に重機を配置して施工できるため、本躯体に多大な残工事が発生しない利点があり、全体工程を考慮して採用に至った。

3. 大屋根鉄骨建方・スライド工法の概要

3.1.大屋根鉄骨トラス形状

トラス本体は上弦材2本と下弦材1本を組み合わせた上辺9m、高さが5.7mから1.8mのキール形のトラス断面となっている。屋根トラスの長さは基準トラスで92m、最大で114m。トラスを支える柱は水下側B通りと水上側G通りの2点で支持され、径間69mである。キール形のトラスが18mピッチに計10本配置され、およそ18,000㎡の屋根を形成している。(図-3,4)

基準トラス1本は約300tで、およそ290ピースの主材で構成されている。それぞれのトラスは4.5mの繋ぎ梁で連結され、連結部中央部に山形のトップライトカーテンウォールが配置される。これら繋ぎ梁鉄骨及び仕上げ材を含めた全体では1スパンおよそ550t、屋根全体質量は約5,000tである。

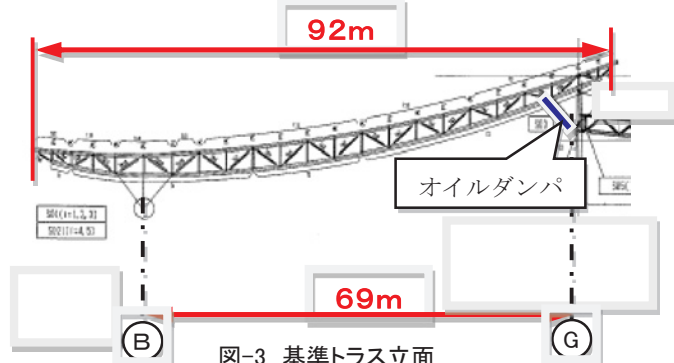


図-3 基準トラス立面

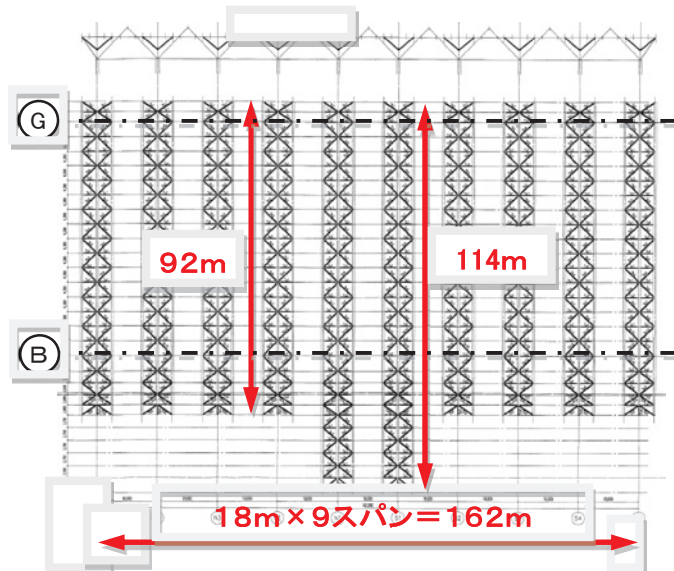


図-4 屋根伏図

3.2.スライド工法の計画概要

建物平面端部には建方用に500tと180tのクレーンを配置した。トラスは吊上げ能力並びに構造上問題のない箇所では7分割し、それぞれを決められた場所で地組みを行う計画とした。地組ヤードには100tクレーンを配置し、建方と地組みが同時進行する。

仮支柱であるベント柱の上に地組みされた鉄骨を揚重し、本締め溶接後にジャッキダウンを行い、92m約300tの大スパン架構が完成する。

その後、PC鋼より線とジャッキを使用して、仮設レールの上をスライドさせ18mのスパンを移動させる。

隣のスパンへの鉄骨スライドが完了したら、次のスパンの屋根トラス鉄骨を同様の要領で組み立て、この屋根トラス鉄骨をジャッキダウンした後に、先行しているトラスとトップライトの鉄骨でジョイントし、合わせてスライドを行う。(図-5)

この作業を10日サイクルで繰り返す。3スパン目で屋根の木毛板の揚重、トップライトカーテンウォールユニット取り付けを行い、4スパン目以降でステンレス屋根葺き作業をサイクルで行う計画とした。

サイクル工程を表-2に示す。

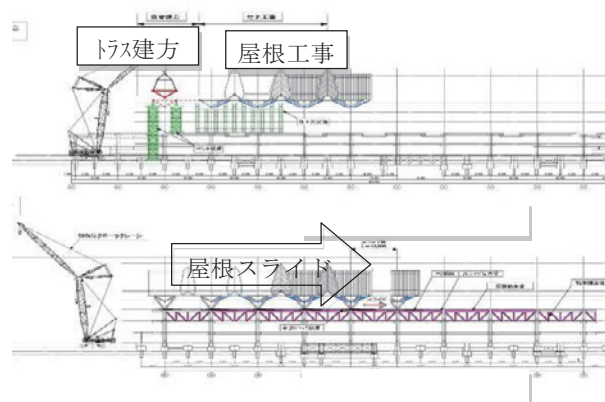


図-5 大屋根スライド概要断面図

表-2 サイクル工程

	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目
地組	トラス間	①トラス	②トラス	③トラス	⑤トラス	④トラス	⑥トラス	⑦トラス	トラス間	
鉄骨建方	①, ②, ③	④, ⑤	⑥, ⑦	トラス間クサビ	ジャッキダウン	トラス間鉄骨	母屋鉄骨	トップライト	スライド	
本締め	トラス鉄骨本締め					トラス間鉄骨本締め				
溶接・UT		トラス鉄骨溶接・UT				トラス間鉄骨溶接・UT				
塗装				トラス鉄骨塗装				トラス間鉄骨塗装		

3.3.スライド工法実施の課題

スライド工法実施に当たっては多くの検討項目があったが、鉄骨形状並びに性能の特殊性から、特に以下の項目が重要検討項目として挙げられた。

- 特殊形状屋根における風の影響の把握
- 不安定トラスの支持方法、オイルダンパの拘束

c. ジャッキダウン・スライド時の屋根全体の変形管理
d. 単独トラススライド時の挙動と転倒の回避

aの風の影響においては、屋根下地母屋鉄骨と屋根材に作用する風圧力、トラス支持柱脚部への影響度及び外装工事着手前の内装天井工事の施工の可否を検証する必要があった。既存空港滑走路沿いでの工事のため万に一つの飛散、風散事故も防がなければならず、施工段階ごとの構造骨組み、外装材用風荷重、先行天井下地に作用する風荷重の検討を風洞実験により行った。(写真-1)

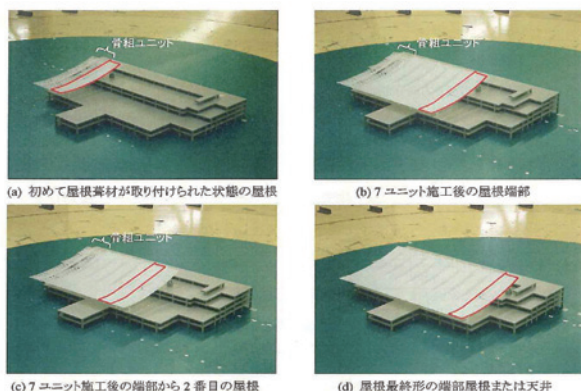


写真-1 風洞実験状況

実験の結果により、屋根施工状況ごとに屋根上下面に作用する風圧力に問題がないこと、柱脚のエクシジョンピースのディテール、有効な面のカーテンウォール着手順、天井仕上げ材の施工時期と天井に作用する風圧力の低減対策方法を検証した。

b・c・dの課題については、重点管理項目として構造検討を行い、後述のスライド設備に反映した。

4. スライド前工程

4.1. 地組み

1本のキールトラスを7分割して、各々決められたヤード7ヶ所で地組みし、これらを3.5日間で建方する計画としている。トラスとトラス支持柱はそれぞれ別々に地組み、地組ヤードでジョイントしてから建方を行う。(写真-2)

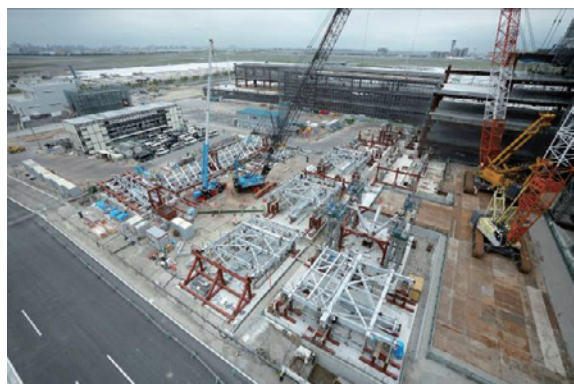


写真-2 地組ヤード

トラス間の山形トップライト鉄骨は、稜線が一定勾配となっており、足元は弓なりの屋根上弦材と取り合うため、建方精度の確保が難しい。たわみを考慮した稜線が水平になるような架台を設置し、建方作業の単純化と精度確保を図った。

4.2. 建方

7分割したトラス鉄骨は、最初にB通り上の柱付きトラスを建て、順次連結してG通り柱トラスを2日目までに建てる計画とした(写真-3)。10日サイクル中の3日間でトラス本体の建方を完了し、5日目のジャッキダウンまでに仕口の本締め溶接、UTを完了させ、先行トラスと一部の梁鉄骨を連結する。

トラスはそれぞれベント架台にボルトにて緊結、仕口部の取合いは座標で建方精度を管理する。

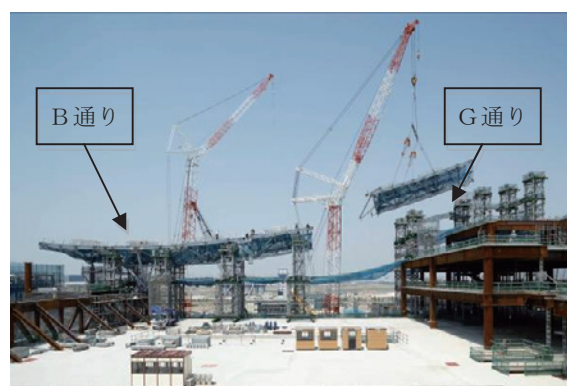


写真-3 ブロック建方

4.3. ジャッキダウン

建方完了後のジャッキダウンにおいては、計画段階で鉄骨自重及び屋根仕上げ、天井仕上げの重量による各接点のたわみ量を解析により求め、製作ムクリを設けている。

ジャッキダウン時はトラス鉄骨を各ベント上で油圧ジャッキに受け替えて段階的に荷重を抜いていくが、ジャッキダウン中のたわみ量や平面変形、上弦材のレベルの管理が重要であり、即時対応が必要となる。そのため、総合司令室を設けてジャッキダウン作業中のトラスを自動追尾トータルステーションによる自動測量システムにて計測管理し、すべての作業員に指示が出せる体制を構築した。(図-6)

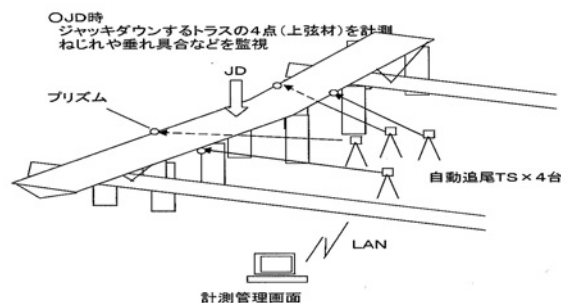


図-6 ジャッキダウン計測管理概念図

管理画面では、プリズム初期座標、解析によるたわみ限界値及びリアルタイムのプリズム平面位置、トラスのたわみ、振れ、水平移動、限界値までの余裕度を確認できる。トラスの挙動が1秒ごとに計測されるため、司令室から減圧のタイミングなどをリアルタイムで指示ができる。

結果、解析たわみ量の100～150mmに対して60～70%と、ほぼ予測どおりのたわみ率であった。

5. スライド設備

5.1. 柱脚支持部

キール形トラス1本の支持点反力は水下側B通り310tf(3,040kN)、水上側G通り240tf(2,352kN)となる。1箇所を200tf(1,960kN)スライディングジャッキ2台で支持し、軌条梁と柱の隙間を10mm空けて浮かしている。スライディングジャッキ下部にはテフロン板を仕込んでおり軌条梁上を滑る。(図-7、写真-4)

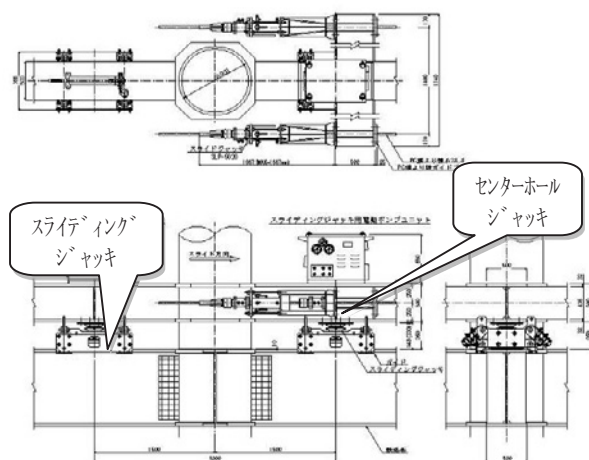


図-7 スライディングジャッキ詳細図



写真-4 トラスの柱脚支持部

本設梁は柱取り合い部が拡幅補強の形状となっており、また、柱径も最大1,100mmと大きいので、スライディングジャッキのガイドには柱を越えるときには干渉しないような、跳ね上げ機構を追加した。また、このガイド跳ね上げ機構にはスラストずれの修正機能も持たせている。(写真-5)



写真-5 スライディングジャッキ

5.2. 牽引装置、制御

最終スライドの質量がおよそ5,000tになるため、各支点をすべて牽引することで1支点当たりの牽引力を抑えるようにした。すべての柱脚部に2本のPC鋼より線(φ28.6mm)をセットし、36m離れた2スパン先を反力として2台の50tf(490kN)センターホールジャッキの伸縮運動で押し出すように屋根をスライドさせる。(図-8、写真-6)

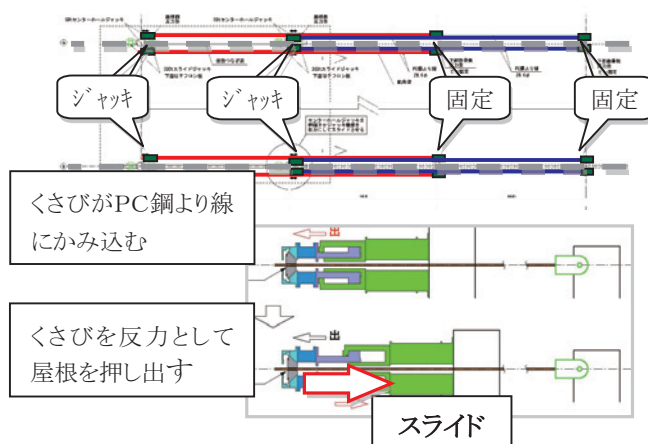


図-8 スライド機構概念図

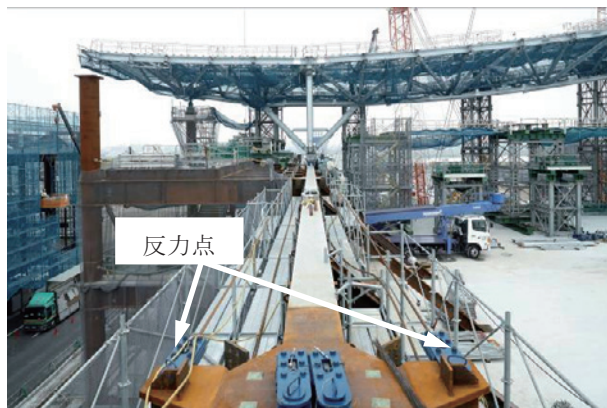


写真-6 ジャッキ反力点

それぞれのジャッキはストローク及び荷重状態を集中管理し、自動的に制御する。ジャッキストロークによる1回の移動量は180mm、100ステップで1スパンのスライドとなる。全体移動量は各通りに設置したリニアエンコーダで計測する。B通りとG通りはそれぞれにかかっている荷重が違うため牽引反力も違ってくる。柱脚部の移動量に差が出ないように20mmの差を限界として制御できるようなシステムとし、総合司令室内で管理した。(写真-7、図-9)

また、縦に連結したジャッキの荷重差は柱脚つなぎ材を圧縮し、座屈すると柱脚間隔保持ができなくなって屋根の崩壊につながる。そこで制御においては、左右の移動量同調制御に加えて、繋ぎ材座屈荷重を考慮した荷重バランス管理も行った。

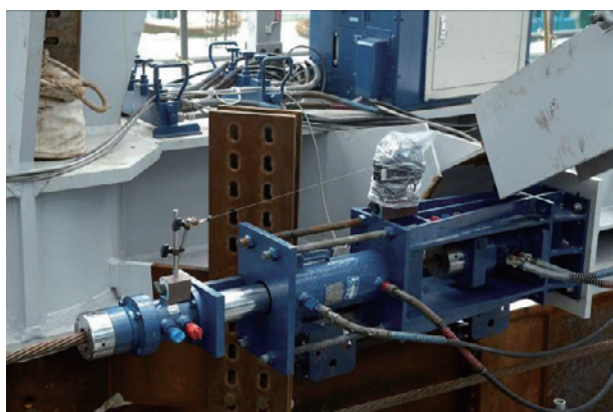


写真-7 センターホールジャッキ, リニアエンコーダ

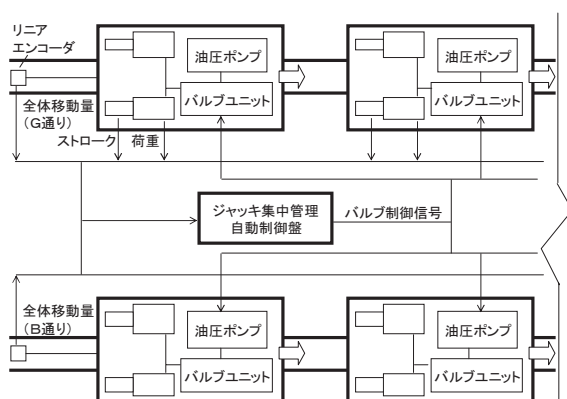


図-9 ジャッキ制御システム

5.3.スライド時のトラス支持拘束等構造仮設

トラス支持材取り合いはピン接合となっているためスライド時に柱脚を解放すると構造的に成立せず、また、柱脚ブロック自体も転倒が生じ、静定状態とするため各部の拘束材が必要となった。さらに第1回目のスライドは単独トラスとなるためトラス本体の転倒が懸念され、転倒防止束材を配置して安全性を高めている。(写真-8)

なお、地震対策として、各回のスライド終了時には本設のオイルダンパを機能させることとした。したが

って、スライド開始から係留までは、オイルダンパ拘束、柱脚回転拘束、エレクションピース解放、スライド、各柱脚微調整、エレクションピース固定、オイルダンパ復旧、柱脚拘束解放という流れとなる。



写真-8 トラス支持拘束材詳細

5.4.柱頭計画

本設柱はCFT構造であるため、最終スライドが完了し柱溶接を行った後にコンクリートを圧入する必要がある。柱最頂部のダイヤフラムには空気抜き穴と中央部に噴出し用の開口が必要だが、スライド時のジャッキの引っ掛けや開口によるダイヤフラムの強度低下が懸念された。そのため、開口を150mmまで小さくし、同厚の鋼板で取外し可能な蓋をし、蓋の脱落と開口補強のため十字型のリブ補強を施した。開口蓋は最終スライドで柱が正規の位置に来る直前に撤去し、CFT施工に支障ない状態とした。(写真-9)

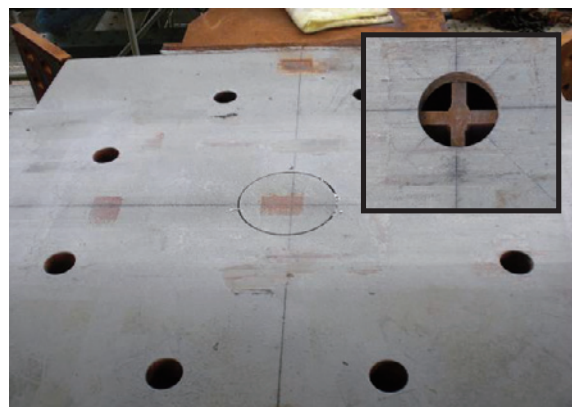


写真-9 柱頭CFT開口蓋

5.5.スライド位置・変形自動測量

ジャッキ制御システムでトラス柱脚部の荷重や移動量を管理することはできるが、屋根トラス全体の挙動は把握できない。屋根全体の過大な振れや平行四辺形の変形が生じていないことを管理するため、自動追尾トータルステーションによる自動測量システムを採用した。先頭トラスと最後部トラスの上弦材にプリズムを設置し、スライド中の屋根をリアルタイムで管理している。(図-10、写真-10)

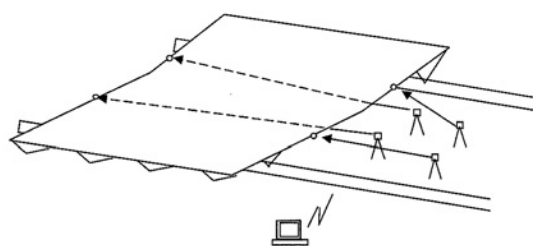


図-10 スライド時計測管理概念図

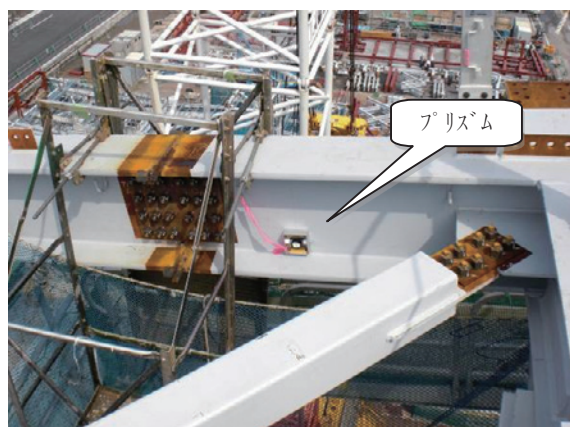


写真-10 プリズム設置状況

監視画面を写真-11に示す。画面右側には、プリズムを設置した座標の初期値、リアルタイム計測値、変化量、設計値との差などを表示している。画面左側上部は屋根の平面形状が大きく変形していない

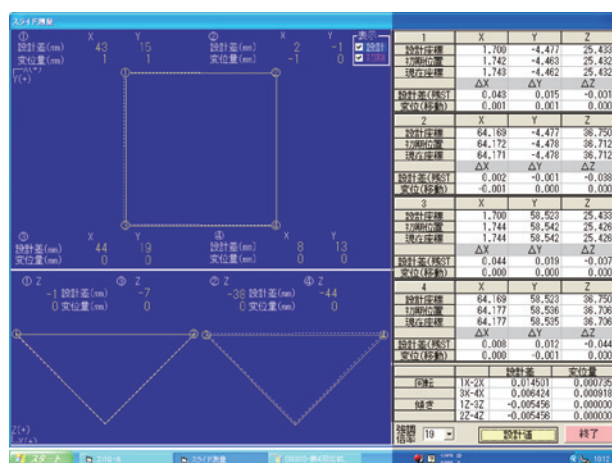


写真-11 スライド監視画面

ことをモデルで確認できるようにしている。スラスト方向は、軌条梁とスライディングジャッキのセリの危険性があるため、自動計測と合わせスケールにて実物の柱脚部のズレ量管理も行った。画面左下部は鉛直方向の変位をモデル化して表示し、初期値に対する変位量を数値化している。特に、柱を乗り越える際の鉛直方向の変位による過荷重の回避などに有効であった。

6. スライド工法適用の効果

①品質

構造的な性能が最も要求され、鉄骨の建方精度が品質に大きく影響する部位であった。すべてのトラスを同じ場所で繰り返し作業としたことで作業員の習熟度が向上し、地組み段階での組立誤差は $\pm 2\text{mm}$ 以下まで精度を上げることができた。建方並びにスライド工事においても同様に精度が高められ、設計要求品質を十分満足する結果となった。

②工程

2009年4月30日から施工開始した大屋根鉄骨スライド工事は同年8月11日に9回目の最終スライドを予定どおり完了、10本目のトラス建方も遅延なく目標を達成できた。外装ACW、吹き抜け天井パネル工事など大屋根が終わらなければ始められない工種が多く、複雑な形状のスライド工事を予定どおり完遂できたことは、工程確保に大きく寄与した。

③コスト

仮設軌条梁鉄骨の追加や躯体補強、鉄骨補強、ベント仮設、牽引設備などに費用は掛かるが、他工法では、仮設の盛替えなどさらに仮設費が膨れ上がっていたと考えられる。繰り返し作業によって習熟度が上がり、工程が順調に進捗したことは、コストにも大きなアドバンテージになった。

④安全

大部分の鉄骨組立を地上の地組ヤードで行うことで、高所作業を大幅に低減した。また、建方エリアにおいても十分に計画された足場やステージ上で養生など盛替えることなく作業を進めることができた。稼働中の空港敷地内での工事であり、風散・飛散防止も重要な管理項目であったが、スライド工法採用により建方エリアを制限でき、安全に施工できた。

7. おわりに

スライド工法によって総重量5,000t、平面面積18,000 m^2 という非常に大規模かつ変形の大きな大屋根を、躯体に大きなダメージを残すことなく短工期で施工することができた。今後は、今回の実績や工夫に加え、予想以上に時間を要した係留位置での微調整作業の効率化の課題を解決して、同種工事に水平展開していく所存である。