

2.2. 鉄道営業線上で実施するスライド工法に対応した 計測・監視システムの開発

大林組 技術研究所
大林組 本店
西日本旅客鉄道

○ 池田 雄一
川上 宏伸
端山 賢一

1. はじめに

スライド工法は、一般的に構造物を水平移動させる工法であり、スライディング工法やトラベリング工法などとも呼ばれている。クレーンの作業半径が全面をカバーできない場合や作業空間に制限が多い工事などに採用される工法であり、鉄道営業線上の大スパン構造物の建設に適用されることが多い。通常、架構をいくつかのブロックに分割して、クレーンの作業半径内の仮設構台上等で地組する。構台上に設けられた仮設走行レール上に地組したブロックを載せて、順次平行移動させながら架構を構築する。工期を大幅に短縮できる一方、多くの場合に架構の補強が必要で施工管理項目が非常に多いといった特徴がある¹⁾。

本報では、鉄道営業線上で実施した2つの異なる架構のスライド工事について、当初の施工計画上の問題点を整理し、それを解決するために実施した計測・監視を中心としたシステムの開発とその適用結果について報告する。

2. スライド工事の概要と当初施工計画

2.1 工事概要

対象は、大都市ターミナル駅に計画された2つの架構のスライド工事である。一つ目は、南側の既存駅ビルと北側に建設中の駅ビルとを接続する橋上駅架構である。二つ目は、最終的に5つのホームの大部分を覆う大屋根が積載される最南ホーム上に構築される東西架構と北側に建設中の駅ビルとを接続する南北架構である。

橋上駅のスライド工事のイメージを図-1に示す。架構は、長さ約100m×幅約40mの鉄骨ラーメン構造であり、建設中の駅ビル内に構築された仮設構台上で地組される。スライド工事に伴い、必要な箇所に補強がなされている。橋上駅は、最終的に5つのホーム上に架設され、各ホームに構築される最大スパン約22mの独立柱で支持される。

南北架構のスライド工事のイメージを図-2に示す。架構は、長さ約80mの鉄骨ラーメン構造であり、東と西に1体ずつの構成である(図-2には東のみ表示)。スライド工事の終了した橋上駅架構を

仮設構台として地組を行い、東西方向へそれぞれ約60mスライドさせる。最終的に5つのホーム上空に構築される大スパン構造物である。

2.2 スライド工事の当初施工計画

鉄道営業線上におけるスライド工事には、夜間のキ電停止時間内(約120分)で完了させるため、高速スライドが可能なジャッキシステムが必要不可欠である。このジャッキシステム(計測・制御を含むシステム全体)と多くの監視者を現場内の各所に配置して安全性と品質が担保されたスライド工事を実施するという当初計画であった。また、スライド工事を司る監視室は、建設中の駅ビル内に設置する計画であった。

(1) 橋上駅

橋上駅スライド工事の概要を表-1および図-3に

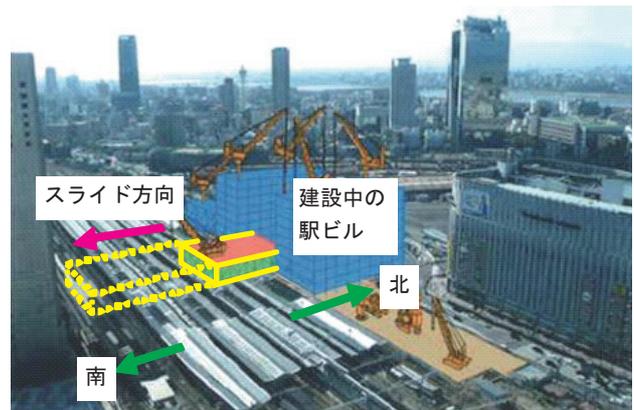


図-1 橋上駅のスライド工事

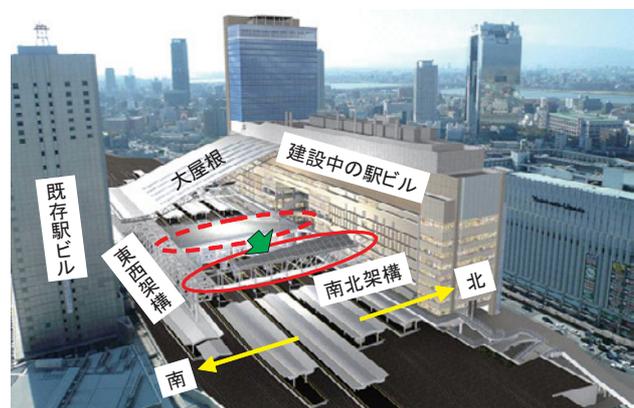


図-2 南北架構のスライド工事

示す。工事は南へ5回に分けて実施し、各回、隣のホームに向けて架構をスライドさせる。並列配置した2台のジャッキを交互に稼働させるジャッキシステムを採用し、ジャッキ戻し時の停止時間がない連続的な高速スライドを可能にした。ジャッキシステムを地組構台上の架構後方に設置し、架構を押し出す方式とした。また、ジャッキシステムに付属するロータリエンコーダで架構後方においてスライド量を計測する計画とした。

各ホームの独立柱上部には、転動機構を備えたエンドレスジャッキを設置した。独立柱上でたわみの生じた架構先端を待ち受けし、ジャッキアップした後、再度スムーズにスライドさせる。また、独立柱上部には水平ガイドをセットして架構の左右方向への動きを拘束するとともに架構停止時に水平ガイドへ反力を取ることによって架構を左右方向に位置調整できるようにした。

(2) 南北架構

南北架構スライド工事の概要を表-2 および図-4 に示す。東と西へ各4回に分けて実施する。橋上駅と同様に並列配置した2台のジャッキを交互に稼働させるジャッキシステムを採用し、高速スライドを可能にした。ジャッキシステムに付属するロータリエンコーダでスライド量を架構近傍で計

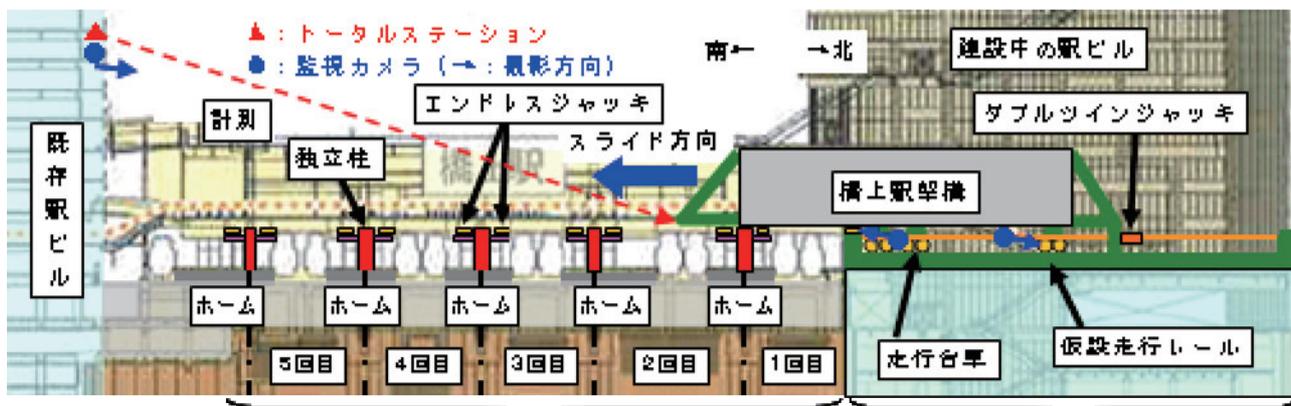
表-1 橋上駅スライド工事の概要

架構総重量	22.64MN (1, 2回目) 34.05MN (3~5回目)
架構大きさ	約90×40×13m
スライド量	約88m
最大区間スライド量	約22m
ジャッキシステム	ダブルツインジャッキ 1,470kN×3基 エンドレスジャッキ 2,450kN×33基
スライド速度	約8.7mm/sec
ジャッキ制御方式	スライド量差分制御

表-2 南北架構スライド工事の概要

架構総重量	4038kN
架構大きさ	約77.5×4.5×7.5m
スライド量	約65m (西側), 約62m (東側)
最大区間スライド量	約23.75m
ジャッキシステム	ダブルツインジャッキ 686kN×2基
スライド速度	約8.7mm/sec
ジャッキ制御方式	スライド量差分制御

測する計画とした。仮設走行レールの基礎となる鉄骨工事の施工手順から、架構の北側は引張る方式、南側は押し出す方式とした。仮設走行レールの北側は建設中の駅ビルのスラブ上にセットされたH形鋼の上を、南側は最南ホーム上に構築される東西架構頂部の鉄骨梁の上をチルトタンクによりスライドさせる計画とした。また、架構側に水平ガイドをセットして仮設走行レール上のチルトタンクの左右方向の動きを拘束できるようにした。



スライド区間 (スパン、約90m)

地組構台

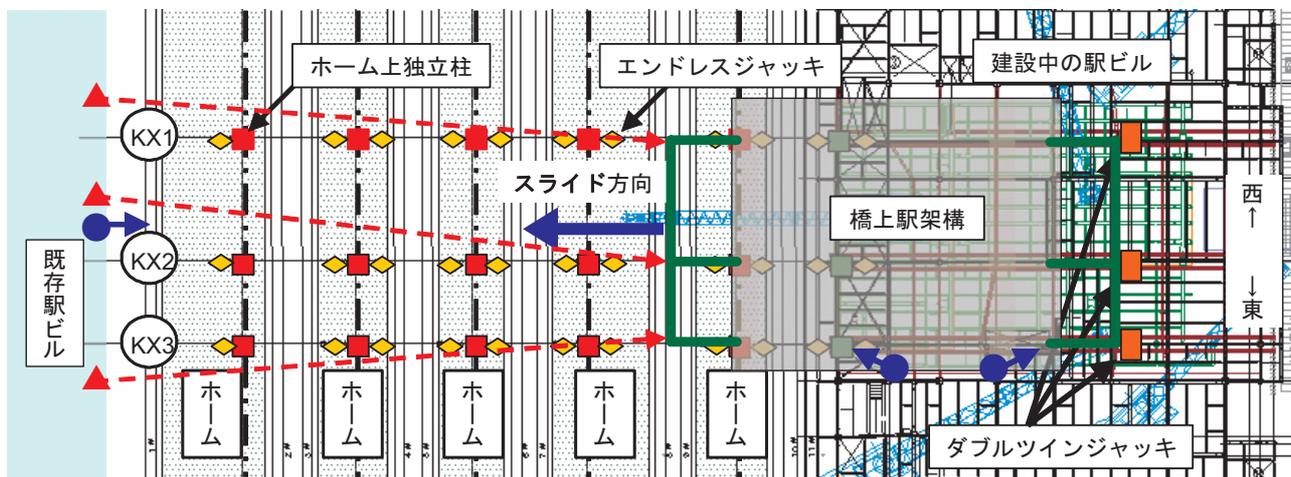


図-3 橋上駅のスライド工事施工計画およびシステム適用計画

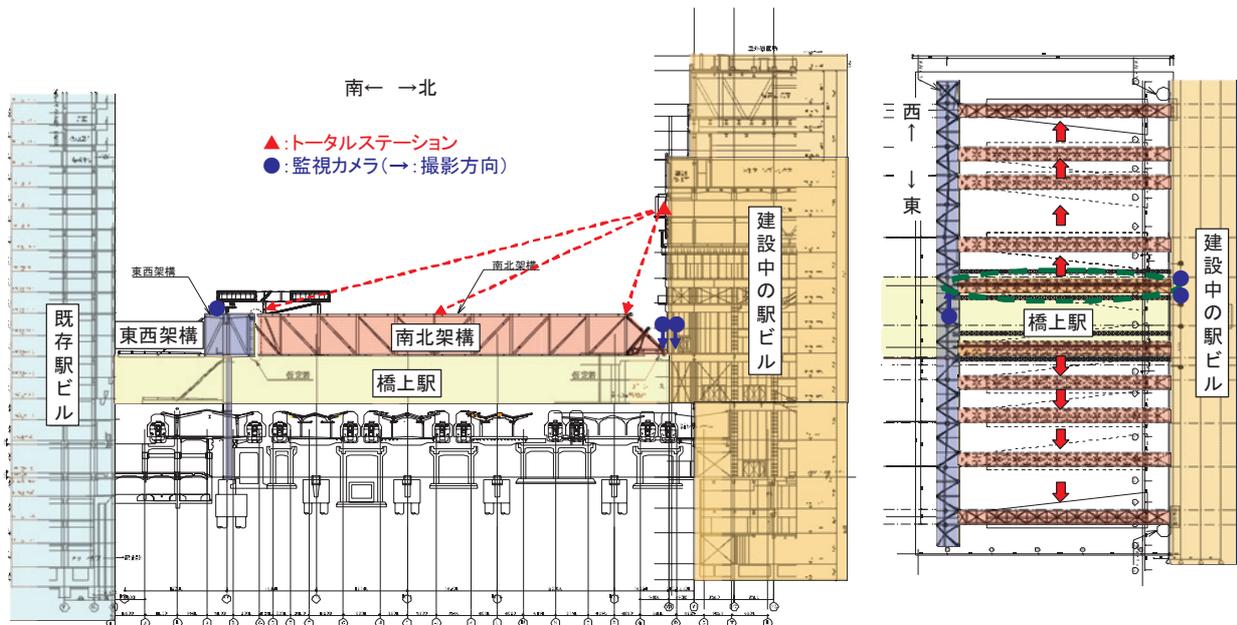


図-4 南北架構のスライド工事施工計画およびシステム適用計画

3. 問題点の整理とシステム開発

3.1 当初施工計画の問題点

(1) 橋上駅

架構先端をスライド停止時のみ、1台のトータルステーションで計測し、監視室にいる管理責任者へその都度、無線連絡する当初計画であった。しかし、線路上へ跳ね出す架構先端は自重によりたわみが発生し、垂直下方へ徐々に変位が大きくなる。また、水平方向は仮設走行レールと車輪の遊びの範囲内で自由に変位する。さらに、図-3のようにKX1, KX2, KX3 通りにダブルツインジャッキを不等間隔に設置するため、各ジャッキの負担荷重の配分が不均等になる。そのため、真っ直ぐ進むより、むしろ西側方向へ進む傾向になることが予想できた。以上から、最大約22m離れた隣のホームの独立柱へ向って正確にスライドさせるには、架構後方に設置したロータリエンコーダから常時得られるスライド量の情報だけでは品質・安全性の面で不十分であると予想できた。このため、架構先端の変位を常時計測する必要が生じた。

一方、各所の監視者からの無線連絡だけで工事状況を把握する当初計画だったが、スライド工事に伴う監視領域は非常に広範囲なため、無線連絡だけで工事状況を的確に把握するのは困難と予想できた。そこで、監視カメラを効率良く配置し、その監視映像を利用して、工事状況を把握しやすくする監視システムが必要となった。

橋上駅スライド工事の計測・監視における問題点に対して必要となる機能を以下にまとめる。

- ・ 架構を迅速かつ正確にスライドさせるため、架構先端の変位を常時計測・管理する機能
- ・ 工事状況を把握しやすい各所の監視映像を管理責任者へ提供する機能

(2) 南北架構

長さ約80mの南北架構両端をジャッキにて引張るまたは押し出す方式で計画された。架構両端2箇所のジャッキの負担荷重がほぼ同等であることから進行方向に対して左右へ偏った変位を生じる要因がほとんどないため、橋上駅のように専用の計測システムを必要としない。また、橋上駅のように水平・垂直変位の修正作業がほとんどないことから、スライド工事が非常に早く進捗することが予想できた。そのため、南北架構の位置を監視室内にわかりやすく表示することが求められた。

図-4のように南北架構は、鉄道営業線上に両端のみを仮固定した状態で長期間留まる。一方、南北架構の約半分の荷重を負担する東西架構は一列の柱で支持されるため、南北架構の荷重や施工誤差によって変位が大きくなると予想された。そこで、スライド前後において、架構の位置および変位状態が構造解析結果または管理値以内であるかを確認する仕組みが必要となった。

橋上駅と同様にスライド工事に伴う監視領域は非常に広範囲で作業エリアが北と南に大きく二分されるため、監視カメラを効率良く配置し、管理責任者へ工事状況を把握しやすい（特に南側エリアの）映像を提供することが求められた。

南北架構スライド工事の計測・監視における問題点に対して必要となる機能を以下にまとめる。

- ・ 架構の位置および南北のスライド量の差を監視室内で常時わかりやすく表示する機能
- ・ 鉄道営業線上に長期間留まる南北架構および東西架構の位置、たわみ・変位をスライド前後において計測・管理できる機能
- ・ 工事状況を把握しやすい各所の監視映像を管理責任者へ提供する機能

表-3 開発、適用したシステム

	システム	内容
橋上駅	位置計測システム	スライド時の架構先端の3点の位置計測を行い、工事に必要な情報を画面に表示した
	監視システム	施工管理上、重要な3箇所の監視映像を監視室内に表示した
南北架構	位置表示システム	ジャッキシステムの計測値を利用し、専用画面に表示した
	架構変位計測システム	スライド工事の前後に東西・南北架構の変位を計測し、計測結果を専用グラフィック画面に表示した
	監視システム	施工管理上、重要な3箇所の監視映像を監視室内に表示した

表-4 橋上駅の監視内容

監視目的	監視内容
全体状況把握	工事の進捗状況を監視
スライド状況の把握	レール上の車輪の動きからジャッキの制御状況を監視
地組構台先端部の状況把握	エンドレスジャッキの稼働状況を監視

表-5 南北架構の監視内容

監視目的	監視内容
ガイドの非接触状況把握	蛇行せずに真っ直ぐスライドしているかを監視
東西架構側の作業状況把握	監視室から遠い作業エリア全体の状況を監視
チルトバンクの転動状況把握	チルトバンクが正常に動作しているか、浮き上がっていないかなどを監視

3.2 システム開発と適用計画

鉄道営業線上のスライド工事は、作業時間に大きな制約があるため、前節で得られた必要機能を満足し、迅速かつ品質・安全性を確保した計測・監視システムの開発・適用が求められた。開発・適用したシステムを表-3に示す。

(1) 橋上駅

架構は高速でスライドし、先端は左右・垂直に時々刻々変位するため、サンプリング周波数 1Hz 以上で計測しないと状況を的確に把握できない。架構先端の3点を 1Hz 以上で計測するため、自動追尾式トータルステーションを各点1台ずつ計3台使用し、架構の各通り先端に取付けた専用プリズムをそれぞれ計測する計画とした。約 8.7mm/sec で動くプリズムを追尾し続け、数ミリ単位の精度でリアルタイム計測可能な変位計測システムを開発した。なお、同システムを適用した架構先端の水平・垂直変位の管理値を独立柱にセットされた水平ガイドのクリア寸法やエンドレスジャッキの待ち受けレベルの下限値などから以下のように設定した。

- ・水平：±40mm（一次），±50mm（二次管理値）
- ・垂直（たわみ）：-100mm（二次管理値）

なお、計測した架構先端3点の3次元座標の履歴のほか、スライド量や各点の変位から推定された架構先端の形状を平面と断面に分けて表示した。

著者らは、ホール施設の屋根架構のリフトアップ工事において、監視カメラを効率良く配置し、

画像処理技術を利用して管理責任者へ工事状況を把握しやすい映像を提供し、その有効性を確認した²⁾。本工事においても同様に管理責任者が工事状況を的確に把握できるよう、3台の監視カメラを効率良く配置する計画とした。各カメラの監視目的・内容を表-4に示す。

(2) 南北架構

過去の同様のスライド工事を参考に南北のスライド量の差についての（二次）管理値を±100mmと設定した。スライド量の差が管理値に到達した際の南北架構の左右のずれは約 6mm であることから、この管理値によって左右方向の変位を合せて管理できる。ジャッキシステムに付属するロータリエンコーダから得られた情報を南北架構の位置情報に置き換え、南北のスライド量の差と合せて常時表示する専用システムを開発した。

スライド前後における東西架構と南北架構の変位計測については、図-5のように南北架構の9点および東西架構の柱頂部を計測して、結果を専用のグラフィック画面にタイムリーにかつ、簡便に表示できるシステムを開発した。このシステムで架構の位置、たわみ・変位を管理する計画とした。

管理責任者が工事状況を的確に把握できるよう、3台の監視カメラを効率良く配置する計画とした。各カメラの監視目的・内容を表-5に示す。

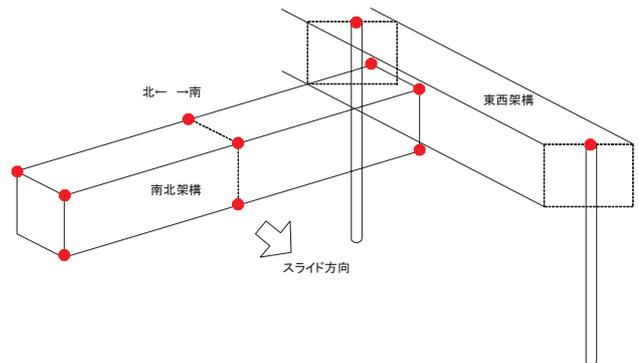


図-5 東西・南北架構の計測ポイント詳細

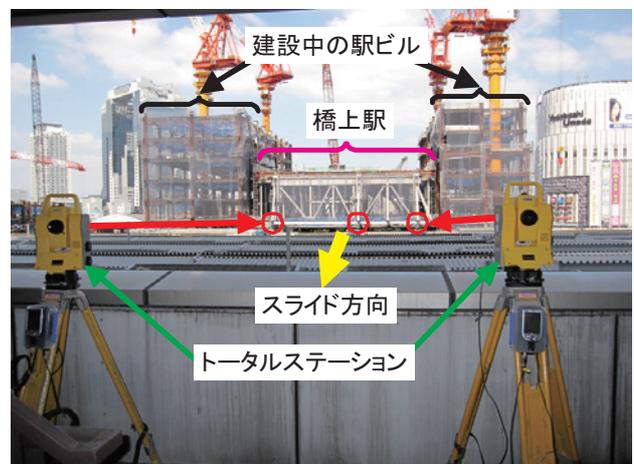


図-6 計測システム適用状況

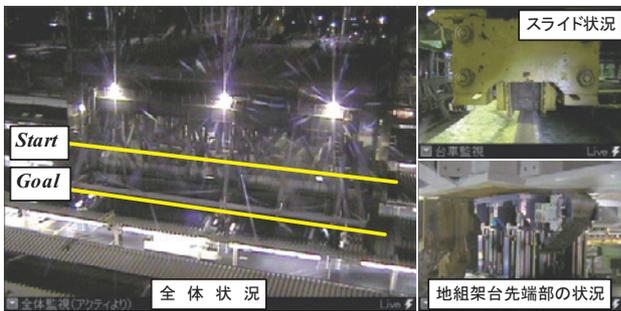


図-7 橋上駅監視システム画面



図-8 南北架構スライド量表示画面



図-9 南北架構監視システム画面

4. システム適用と結果

4.1 適用状況

(1) 橋上駅

位置計測システムの適用状況を前頁図-6 に示す。既存駅ビルの避難用バルコニーに設置した自動追尾式トータルステーション3台から得られた計測データ（架構先端の3次元位置座標）を監視室へ無線LANを利用して約100m伝送した。監視室内の専用モニターにスライド量・工事進捗率などの工事の総括、架構先端の水平変位・垂直変位（たわみ）、変位の履歴をそれぞれ1秒ごとに表示した。

監視システムは、工事の全体状況として橋上駅の進行方向側（既存駅ビルの避難用バルコニー）から見た架構全体の状況、地組構台上の走行台車のスライド状況、地組構台先端部のエンドレスジャッキの状況を図-7 のように表示した。全体状況画面については、画像処理技術を利用して一目で工事進捗状況を把握できるように1日の作業のスタート・ゴールラインを追加表示した。

(2) 南北架構

スライド工事中の架構の位置および南北のスライド量の差を図-8 の画面に表示した。スライドとともに架構が移動するようグラフィック表示を行った。また、架構の変位計測システムについては、スライド工事の前後にトータルステーションを建設中の駅ビルのスラブ上へ設置し、東西架構および南北架構に貼付したターゲットを計測した。計測するとシステムに計測値が入力され、画面の上に架構変形・位置情報をグラフィック表示した。

監視システムは、建設中の駅ビル側の水平ガイドの非接触状況、東西架構の作業状況、チルトタンクの転動状況をそれぞれ図-9 に示すように表示し、管理責任者に状況を把握しやすい映像を提供した。

4.2 工事適用結果

(1) 橋上駅

トータルステーションは、工事中、ターゲットを確実に追尾し、途切れることなく計測を続けた。第1回スライド工事の計測結果から、工事の傾向が掴めたため、作業時間のロスを伴わなければ、管理値到達前であっても水平位置の調整を行う方針に変更した。第2回工事の計測結果を図-10 に示す。スライド中、架構の偏芯や台車車輪とレールの遊びなどの要因から、架構先端は水平方向に比較的自由に動き、西側へ変位する傾向が見られた。いずれも位置計測システムから得られた情報に基

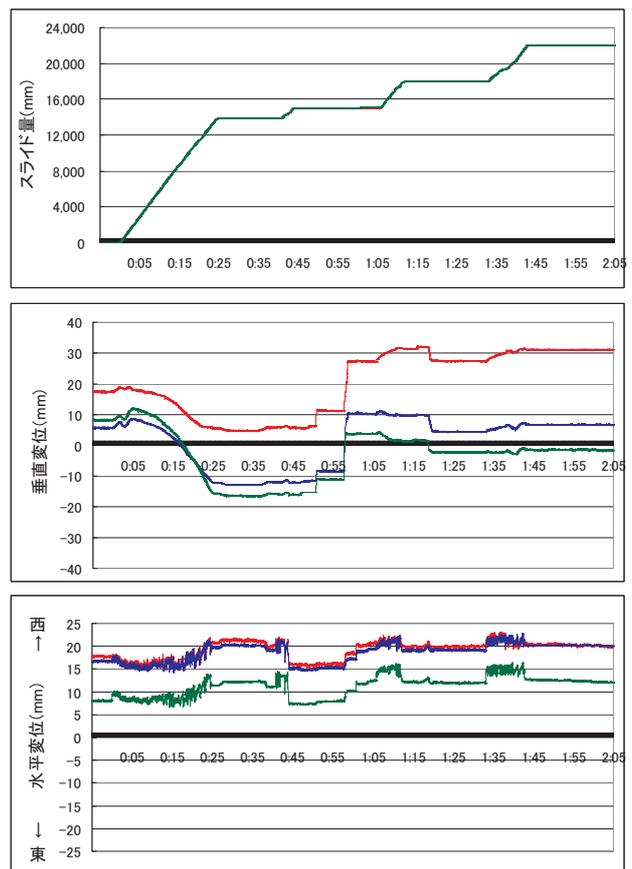


図-10 スライド工事計測結果（第2回）

表-6 スライド工事計測結果

管理項目	単位	区別	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
スライド量	mm	計画値	15,060	22,000	16,900	17,140	14,690
		実測値	15,065	22,015	16,841	17,189	14,728
平均スライド速度	mm/s	計画値	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67
		実測値	8.52	8.63	9.72	10.20	8.90
架構先端垂直変位	mm	管理値	-100	-100	-100	-100	-100
		実測値	-6	-24	-10	-15	-22
架構先端水平変位	mm	管理値	±50	±50	±50	±50	±50
		実測値	13	22	5	-29	20

づいて一次管理値へ到達する前に水平位置の調整を行った。頻繁に水平位置を調整したにも関わらず、作業時間のロスを最小限に留め、作業を2時間以内に収めたことが読取れる。また、架構先端が隣のホームの独立柱にセットされたエンドレスジャッキに到達後、ジャッキアップして、たわみによる変位をキャンセルした。

計5回実施されたスライド工事の計測結果を表-6に示す。架構先端の垂直変位（たわみ）は、独立柱へ到達前に最大24mmの変位を生じたが、構造解析結果に対してほぼ同等の値であることを確認しながら工事を進められた。また、各回とも水平位置の調整を早め実施したことで水平変位は最大29mmであった。

監視室から直接目視できない映像を管理責任者へ提供したことで監視者からの無線連絡だけでは得られない工事の生の状況や的確な判断規準、安心感を与えることができた。

(2) 南北架構

スライド工事の約半分が終了した現段階で適用結果をまとめた。南北架構は、スライド方向に対して左右に大きくふらつくことはなく、スムーズにスライドする傾向にあったことが、位置表示システムから得られた。万が一、南北に大きくふらつき、ガイドがH形鋼に接触しようとしても監視カメラの映像で事前に把握できるため、ジャッキシステムを制御して回避可能であった。また、スライド工事前後の東西・南北架構の変位は、いずれも構造解析結果または管理値以内であることを確認して工事を進められた。

南北架構は、東と西の架構が異なる方向へスライドし、スライド場所もその都度、東西方向に大きく変化することから、管理責任者の重点管理内容に合わせてカメラの設置場所をスライド工事ごとに変更した。カメラを様々な場所へ簡便に取付け

られる治具を製作したことで迅速に監視箇所の変更に対応できた。

5. おわりに

本報では、工事時間の限られた鉄道営業線上でのスライド工事における計測・監視について、スライド形式の異なる2種類の架構に対して、システムを開発・適用した。その結果、以下に示す知見を得た。

(1) 橋上駅

- ・ 架構先端の変位を計測するシステムを開発・適用したことで架構全体の挙動を瞬時に把握でき、迅速な工事進捗を可能にする効果を確認できた
- ・ 効率良く配置した監視カメラの映像によって、管理責任者は施工状況を把握しやすくなり、的確な判断をしながら工事を進められた

(2) 南北架構

- ・ スライド量およびスライド量差を表示する専用システムを開発・適用したことでスライド工事の全体状況を把握しながら迅速な工事進捗を可能にした
- ・ 東西架構・南北架構の変位は、いずれも構造解析結果・管理値以内であった。工事前後に変位状態を確認した上で安心してスライド工事を実施することができた
- ・ 水平ガイドの非接触状況やチルトタンクの転動状況などその場にはないと確認できない映像を監視したことにより、安心して高速スライドを可能にし、作業時間短縮に寄与した

最後に位置計測システムおよび架構変位計測システムの開発にあたり、(株)ソーキの協力を得た。また、御協力頂いた工事関係者に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 木谷：【特集】ドームの計画 VI 施工計画，建築技術，No. 574，pp. 148-167，1997. 12
- 2) 池田：リフトアップ工事の監視・計測技術，建設機械，No. 519，pp. 42-46，2008. 05
- 3) 池田，川上，柴崎，端山：スライド工法における計測・監視システムの開発，2009年度建築学会大会学術講演梗概集A-1材料施工，pp. 1307-1308，2009