

変位・荷重自動制御による地下鉄躯体アンダーピニングの情報化施工

鹿島建設(株)	正会員	○岩下	直樹
鹿島建設(株)	正会員	板橋	信男
鹿島建設(株)	正会員	山本	章貴
鹿島建設(株)	正会員	安形	早織

1. はじめに

相鉄・東急直通線（以下「ST 線」と称す）は、相鉄・JR直通線羽沢横浜国大駅と東急東横線・目黒線日吉駅間に、延長約 10km の連絡線（図-1）を新設するものである（2022 年度下期開業予定）。これにより、横浜市西部地区及び神奈川県央部と東京都心部とを直結させ、鉄道の利便性向上、地域の活性化等への寄与が期待される。そのうち、新横浜駅（仮称）は、横浜市営地下鉄新横浜駅の直下をアンダーパニングによって仮受けして、新駅を構築する工事である（図-2）。

地下鉄の列車走行の安全性および躯体の健全性を確保するため、「変位・荷重自動制御システム」を用いて制御するとともに、CIM（建設3次元モデル：Construction Information Modeling）を用いてアンダーピニングの見える化を図ったので、ここに報告する。

2. 施工手順

当初計画では、躯体周囲の土砂掘削が完了したら掘削は一旦止め、躯体底部に導坑を掘り、仮受け杭を設置する手順であった。しかし、本工事では、工期短縮のため、地上からの土留め掘削と並行して、地下鉄躯体底部にアクセスする導坑を掘削し、仮受け杭設置を先行する手順を採用した（図-3）。



図-1 路線図

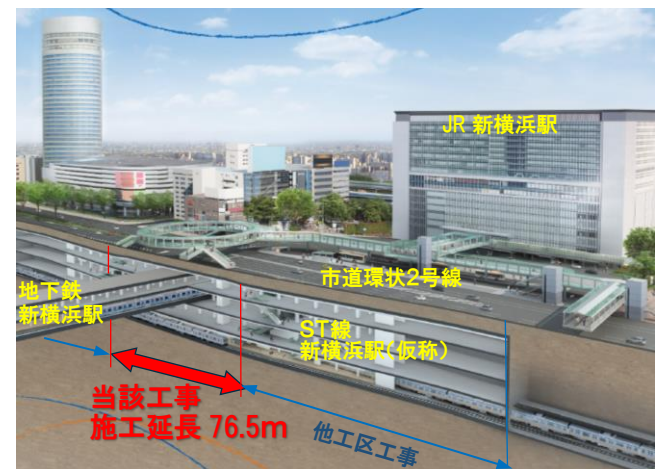


図-2 完成予想パース

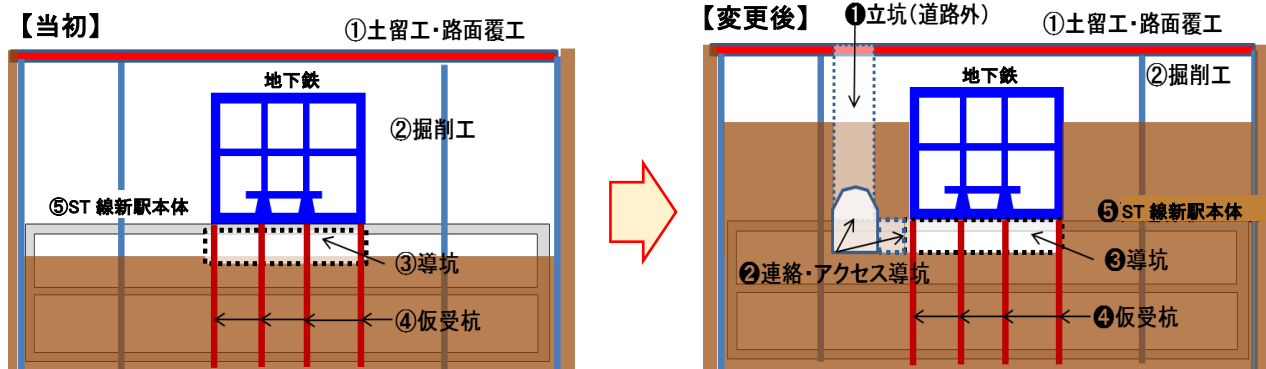


図-3 施工手順図（当初・変更後）

キーワード 情報化施工 アンダーピニング 自動制御 CIM

連絡先 〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜 2-5-14 鹿島・鉄建・不動テトラ・NB 建設共同企業体 TEL 045-476-0875

3. 地下鉄躯体の計測管理計画

地下鉄躯体の計測管理値は、以下の2項目について設定した。

- ・変形により生じる応力値は、躯体の健全性を確保する範囲に抑えること。
- ・列車の走行安全性を確保するために必要な許容範囲の変形に収めること。

地下鉄躯体の健全性に関しては、下床版の変形に着目して管理値を設定し、変位測定箇所は、各断面につき4測定とした。地下鉄躯体の健全性に影響を与える変形は、変形の大きさではなく、局所的に生じる変位差の大きさである。そこで、解析的アプローチにより部材応力度（鉄筋応力度 295N/mm²）が限界となる局所変位量を設定し、上記の4測点によって表現できる下床版の様々な変形モードに合わせた相対変位をノモグラム（図-4）で表現して、現状の健全性をリアルタイムで確認でき、ジャッキ操作による地下鉄躯体変位の修正を可能とした。

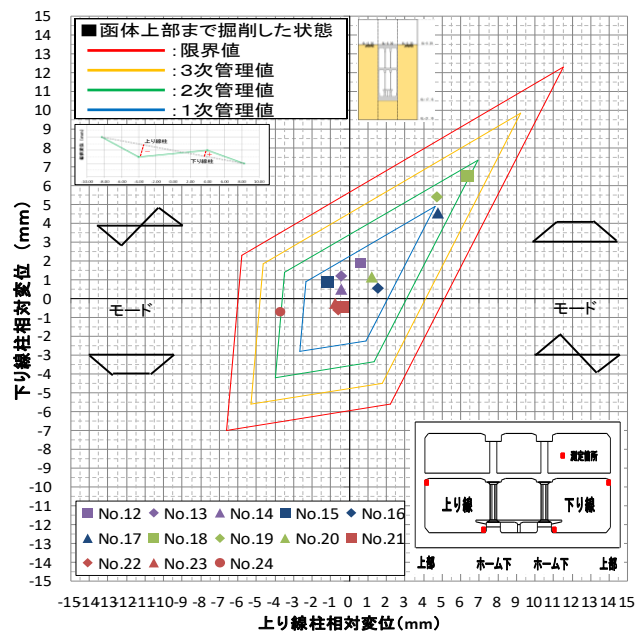


図-4 ノモグラム管理図

現して、現状の健全性をリアルタイムで確認でき、ジャッキ操作による地下鉄躯体変位の修正を可能とした。また、「列車走行安全性」は横浜市交通局の軌道整備基準値をもとに、別途限界値を設定して管理することとした。

4. 変位・荷重自動制御システムの導入

当工事のアンダーピニングは、営業中の地下鉄躯体（受替え荷重：約 6,800 t）を 24 本の仮受け杭頭部に設置された 24 台の受替え工法用特殊油圧ジャッキ（以下、仮受けジャッキ）で直接支持している。地下鉄躯体直下に新駅を建設するために、以下①～③の施工条件で、初めて「アンダーピニング変位・荷重自動制御方式」を採用し、管理を行った（図-5）。

- ① 仮受けと本体掘削が平行して行われ、地下鉄躯体に作用する荷重が大きく変化。
- ② 地下鉄躯体の健全性から導かれる許容変形角を小さくするような、厳密な変位制御が必要。
- ③ 地下鉄の運行に支障がないよう、変位発生時に迅速なジャッキ修正作業が必要。

「アンダーピニング変位・荷重自動制御方式」により、列車走行の安全性の確保のみならず、地下鉄躯体の健全性確保のために、より精度の高い「変位優先」による制御が可能となった。

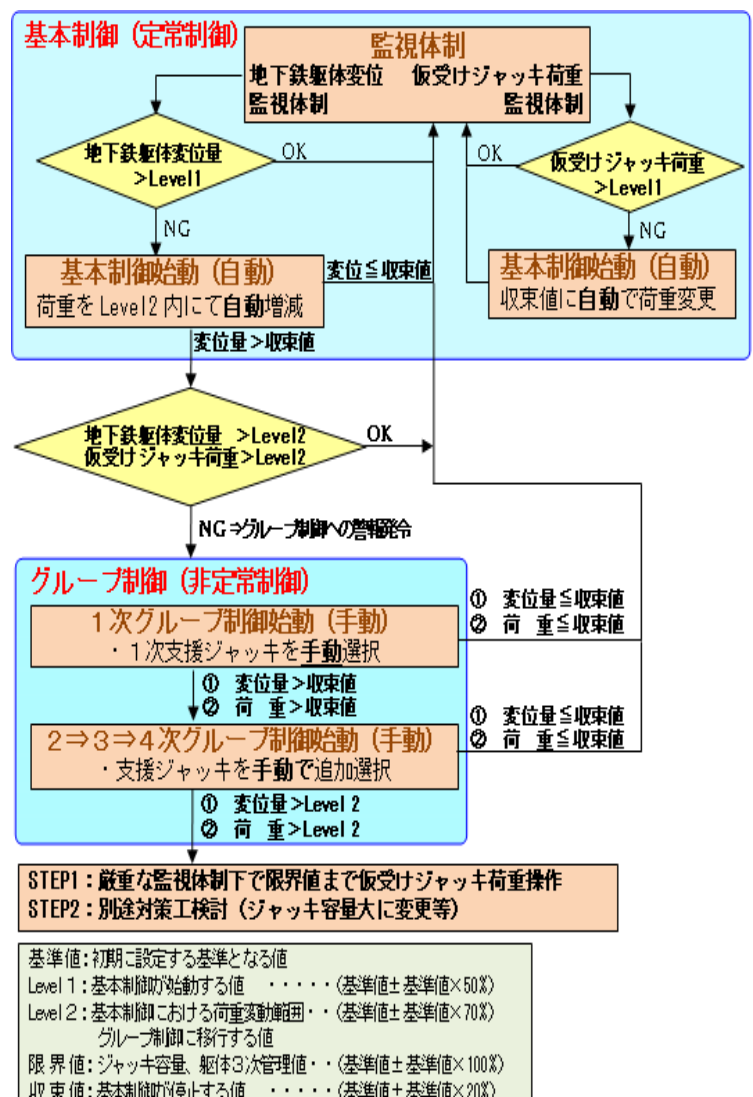


図-5 変位・荷重自動制御システムフロー

当工事で採用するアンダーピニング変位・荷重自動制御システムは、営業中の地下鉄躯体変位量（開水路式鉛直変位計計測値）を、事前に設定されている管理値の範囲内に維持する為に、以下の2つのジャッキ制御により管理を行う（表-1）。

表-1 基本制御とグループ制御

基本制御	・地下鉄躯体の変位および仮受けジャッキ荷重を、管理値内に保持する目的で、単体の仮受けジャッキ荷重の増減を自動的に操作する。 ・仮受け期間中の日常的な定常制御。
グループ制御	・地下鉄躯体の変位が設定した管理値を超過した場合、複数の仮受けジャッキ荷重を操作することで荷重バランスを修正し、変位修正を行う制御。 ・基本制御により地下鉄躯体の変位管理値以内に収めることができない場合に、人的に発動する制御で、非定常（線閉時間内作業）で行う制御。

地下鉄躯体の変位制御を行う場合、基準値（初期に設定する基準となる値）に対して、仮受けジャッキ荷重は LEVEL2（基準値±基準値×70%）範囲内にて操作を行い、地下鉄躯体の変位が収束値（基準値±基準値×20%）に収まるよう自動的に制御を行う。基本制御において単体の仮受けジャッキ操作で LEVEL1（基準値±基準値×50%）内に地下鉄躯体の変位が維持できず、地下鉄躯体の変位及び仮受けジャッキ荷重が LEVEL2 まで進展した場合に、グループ制御に移行する。

5. 仮受け状況

当工事でアンダーピニングする地下鉄躯体は、縦 12m、横 18m、延長は 30m であり、24 本の仮受け杭及び仮受けジャッキ（能力：約 10,000 t）で支持している（図-6）。

地下鉄躯体は、周囲の掘削によるリバウンドや補助工法により若干、隆起傾向であったが、仮受け完了までに徐々に改善され、その後に実施した変位修正により、ほぼ施工前の状態に収束した。

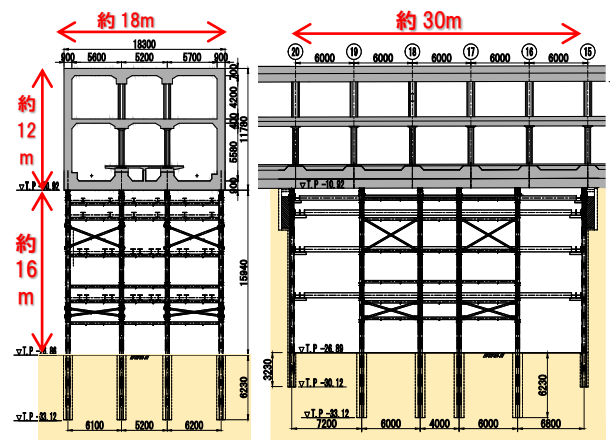


図-6 地下鉄躯体の仮受け状況図

6. CIMによるアンダーピニングの見える化

アンダーピニング自動制御システム導入当時は、集中制御室内に配備したジャッキ操作盤、自動制御 PC に仮受けジャッキの荷重とストロークに加え、別途地下鉄躯体に設置した変位計の計測値を取り込み、数値と制御管理の各状態を識別し、モニターに表示し監視した（図-7）。

しかし、このモニター画面では複数のジャッキ状態、構造物の変位状況を視覚的にとらえることができず、瞬時に仮受け状況を的確に把握できない。そこで、CIM を用いてアンダーピニングの見える化を図った。表-2 に見える化のための計測データ仕様と取得頻度を示す。以下に見える化の特徴を示す。

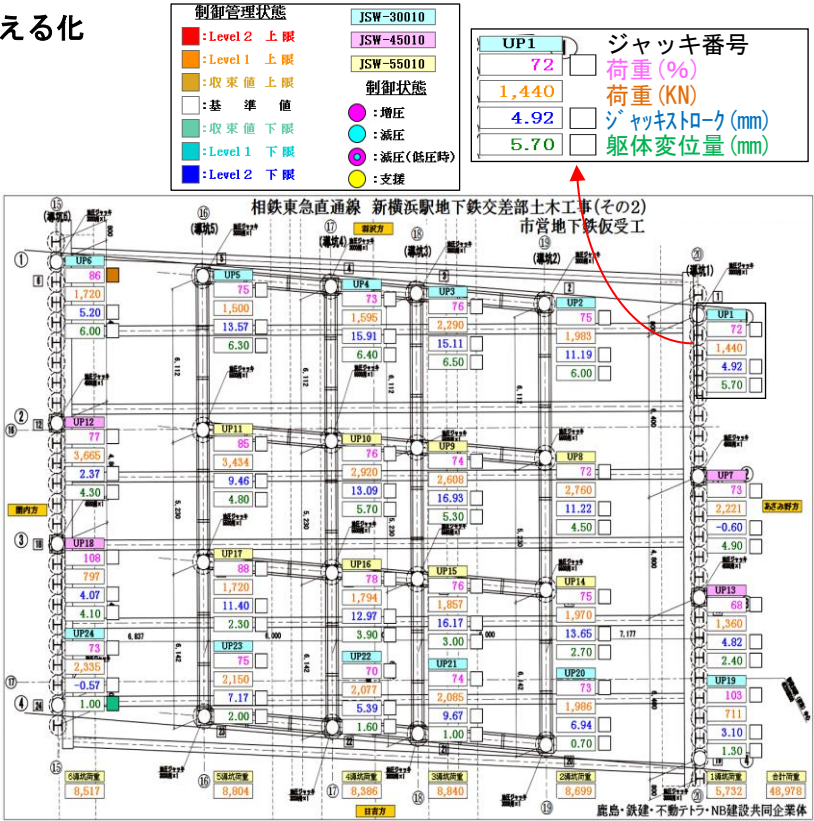


図-7 従来の監視モニター

- ① 地下鉄躯体の鉛直変位を色分けしたコンターで表示
- ② ジャッキストロークの大きさを色と矢印で表示
- ③ ジャッキ荷重の大きさを色で表示
- ④ 1分毎にモデルの状態を更新し、リアルタイムで表示
- ⑤ 開削及び導坑掘削エリアと時間情報をブロック表示

表-2 各種計測データ取得

取得データ	計測方法	精度	計測頻度	取得頻度
地下鉄躯体変位	開水路式鉛直変位計	0.1mm	30秒に1回計測	1分毎
ジャッキストローク	デジタルダイヤルゲージ	±0.03mm	リアルタイム	1分毎
ジャッキ荷重	圧力変換器	0.08%RO(非直線性) 0.06%RO(ヒステリシス)	リアルタイム	1分毎
掘削高さ・位置	レベル・スケール	(目視)	掘削完了日を記録	1週毎

刻々と変化するジャッキストローク量や荷重、地下鉄躯体変状コンターを色と矢印で表示し、見える化を図った（図-8）。また、過去のデータをPCにストックし現在と過去の差分表示を行い、仮受け状況の推移傾向を、迅速かつ的確に把握できるようにして、ジャッキ操作を行う際の判断材料とした（図-9）。

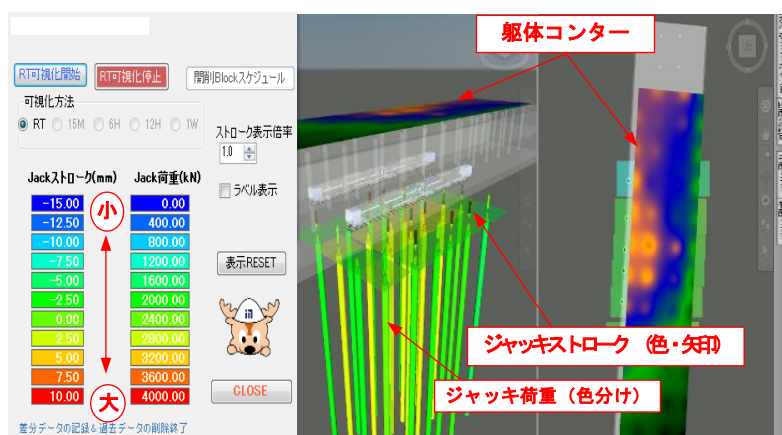


図-8 アンダーピニングの見える化

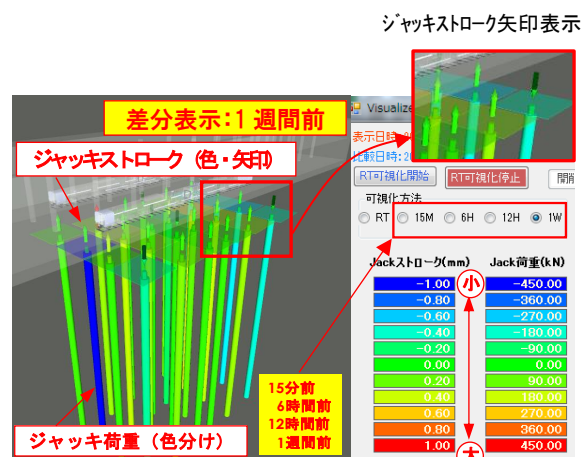


図-9 過去データとの差分表示

7. 導坑間掘削の施工実績

ジャッキ 24 本で地下鉄仮受けが完了した後、隣接する導坑と導坑との間の地山掘削を実施した。この導坑間の掘削の際は、「地下鉄躯体にできるだけ偏荷重を与えない」「仮受けジャッキへの荷重移行を急激に行わない」「導坑の崩壊、支保工の急な変形をさせない」「仮受け中のジャッキに損傷を与えない」ことに注意を払い、ジャッキ荷重、ストローク、地下鉄躯体の変位等の各種計測データを、24 時間体制で密に監視しながら施工を進めた。掘削の順番は、断面図（図-10）の上半部分について、導坑間の掘削順序を示す平面図（図-11）のとおりに、躯体の左右端部から交互に 1～5 の順番に行った。上半掘削完了後、続いて下半掘削を実施した。導坑間の掘削前状況を写真-1 に、掘削状況を写真-2 に、掘削後の状況を写真-3 にそれぞれ示す。

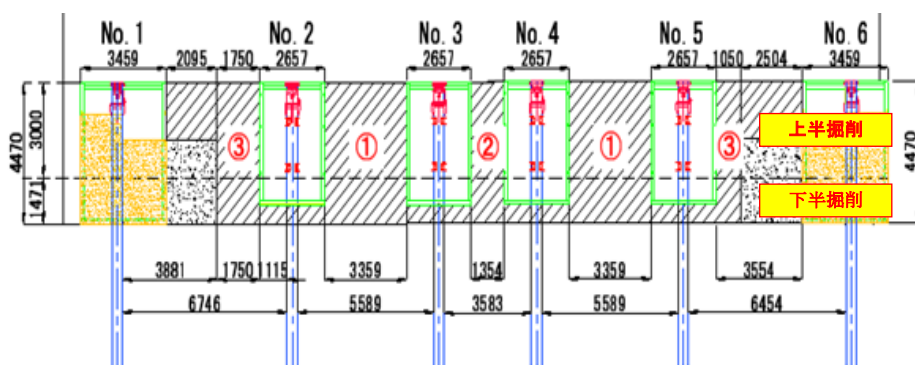


図-10 導坑間の掘削順序（断面図）

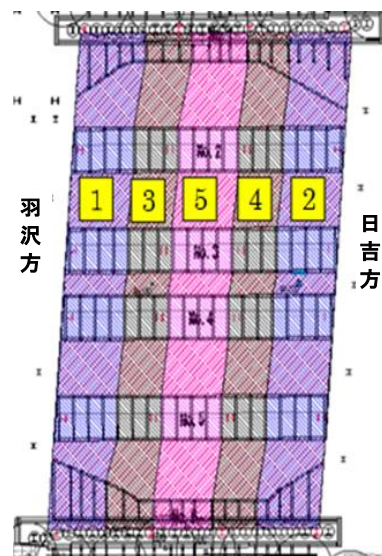


図-11 導坑間の掘削順序（平面図）



写真-1 導坑間の掘削前状況



写真-2 導坑間の掘削状況



写真-3 導坑間の掘削後の状況

導坑間の掘削及びその後の変位修正時のジャッキ荷重の経時変化図を図-12 に、地下鉄躯体変位の経時変化図を図-13 に示す。仮受けジャッキへの荷重移行は徐々に行われ、バランスよく地下鉄躯体の変位調整が実施できた。

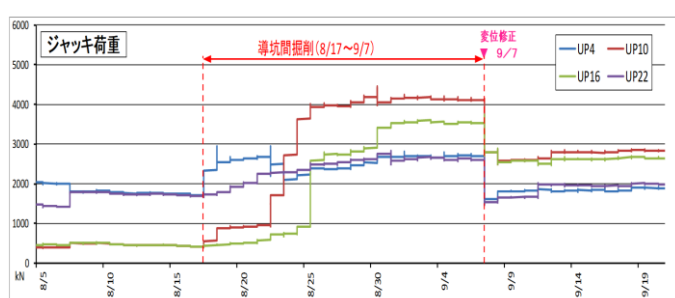


図-12 仮受けジャッキ荷重の経時変化図

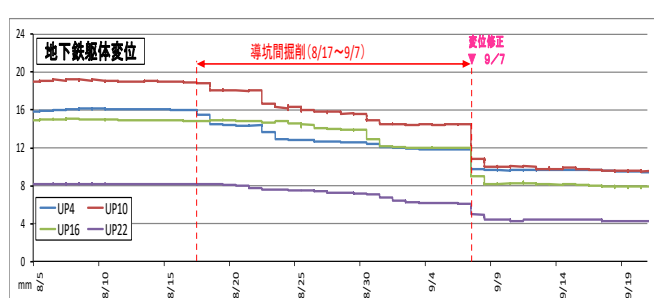


図-13 地下鉄躯体変位の経時変化図

8. CIMによるアンダーピニング情報化管理の施工実績

上記「7.」で示した導坑間の掘削及び変位修正時のジャッキ荷重・ストローク、地下鉄躯体の変位の變動の様子を CIM で見える化し、それを活用して、制御・管理を行った。図-14 に示すとおり、導坑間の掘削前は、地下鉄躯体周囲の掘削によるリバウンドおよび、導坑掘削施工時に実施した薬液注入等の補助工法により若干、隆起傾向であったが、導坑間掘削すなわち仮受け完了までに、隆起傾向は徐々に改善され変位の大きい赤いエリアが小さくなっている。ジャッキ荷重は、特にエリア中央付近の仮受け杭が赤い表示となり、ジャッキ荷重への荷重移行が行われたことが確認できる。さらにその後に実施した変位修正により、変位の大きい赤いエリアが無くなり、全体にフラットな状態に改善された。

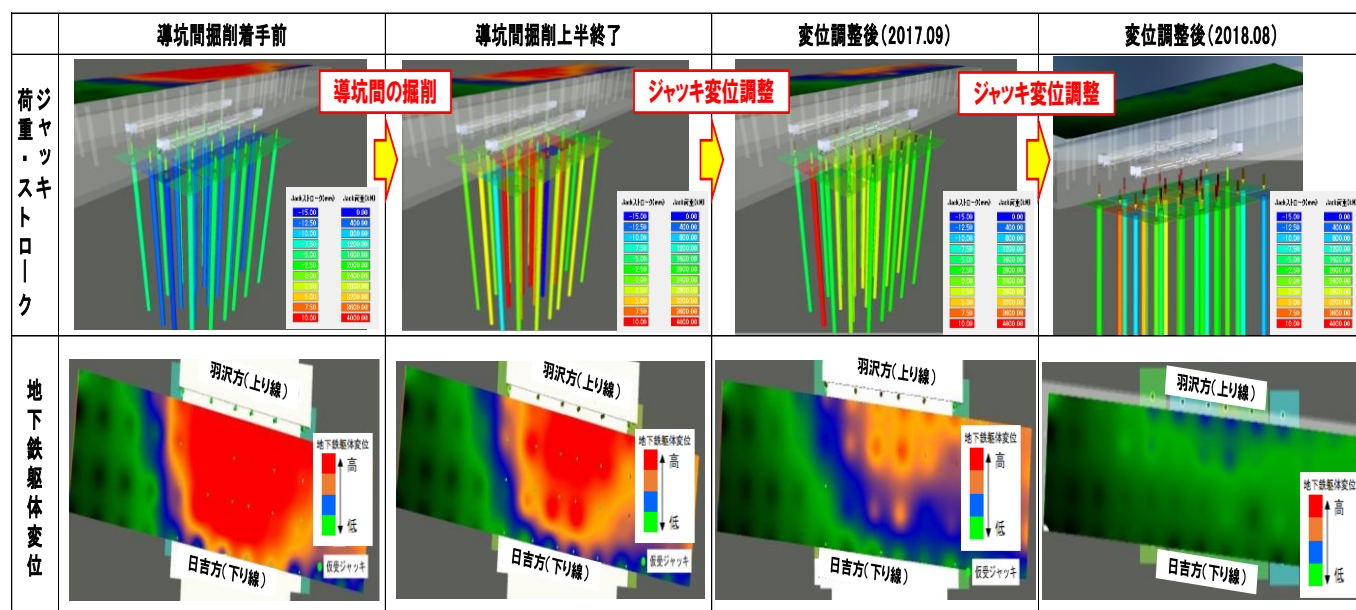


図-14 CIMによる情報化管理状況

9. 地下鉄本受替え工

地下鉄躯体の仮受け状態から、新設躯体への本受替えの手順を図-15に、本受替えのジャッキ配置平面図を図-16に、縦断面図を図-17に示す。本受けジャッキは、仮受けジャッキの両脇に2基設置できるように、コンクリートで台座を構築する。ジャッキの能力は、計算上作用する反力の20%割増の荷重に耐え得る能力を有するものとし、仮受けジャッキよりも形状が小さな、コンパクトロックジャッキ（2,000KN用：16基、3,000KN用：16基）を用いることとした。写真-4に仮受けジャッキと本受けジャッキ配置状況を示す。



図-15 本受替え施工フロー

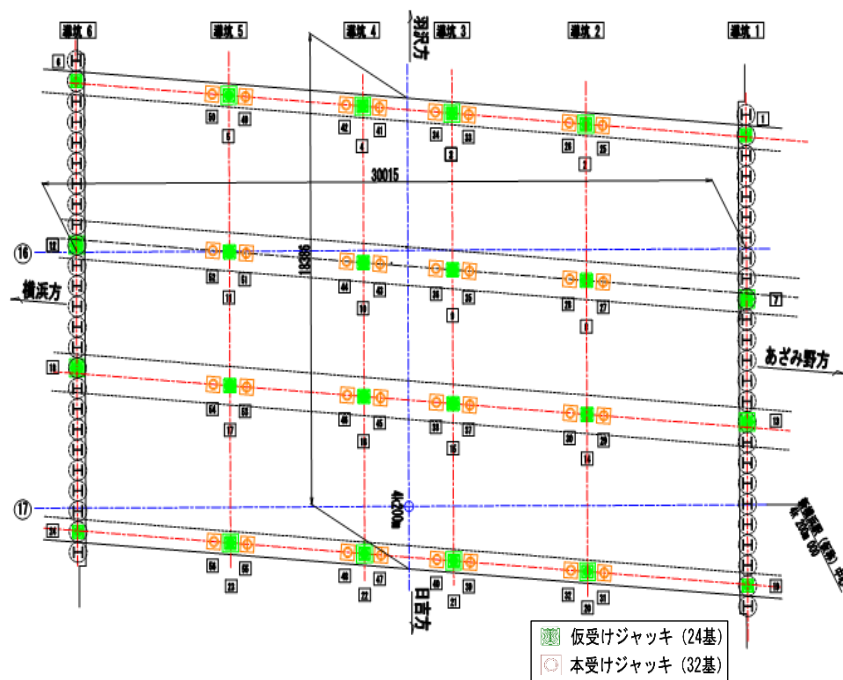


図-16 ジャッキ配置の平面図

仮受けジャッキ 本受けジャッキ



写真-4 仮受けジャッキ（中央）と、本受けジャッキ（両脇）配置状況

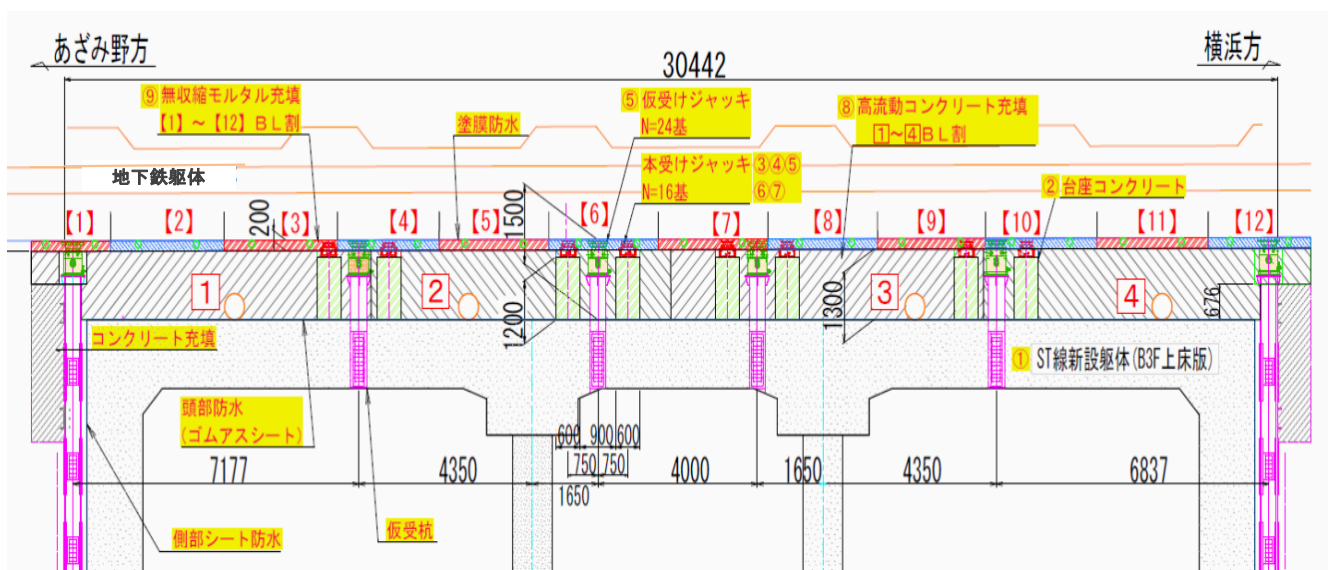


図-17 ジャッキ配置の縦断面図

本受けジャッキの設置、配管・配線設置、油圧系統の耐圧試験後、地下鉄のき電停止時間において、仮受けジャッキ 20%除荷と本受けジャッキ 20%載荷（図-18 の ㉠ まで）の試運転（リハーサル）を実施した。翌日、リハーサルと同様にき電停止時間において、以下の手順で本受替え（応力導入）を実施した。応力導入の履歴を 図-17 に示す。

- ① 仮受けを 20%ずつ除荷（5 分間）。
- ② 20%除荷完了 5 分後、本受けを 20%載荷（5 分間）。
上記仮受けの除荷と本受けの載荷を繰り返す。
- ③ 応力導入前の仮受け荷重までの荷重導入。
（支持力確認、地下鉄躯体変位および変状有無の確認）
- ④ プレロード後は、ジャッキストローク量の安定
（10 分間に 3/100mm 以下の値又は 60 分間の放置）

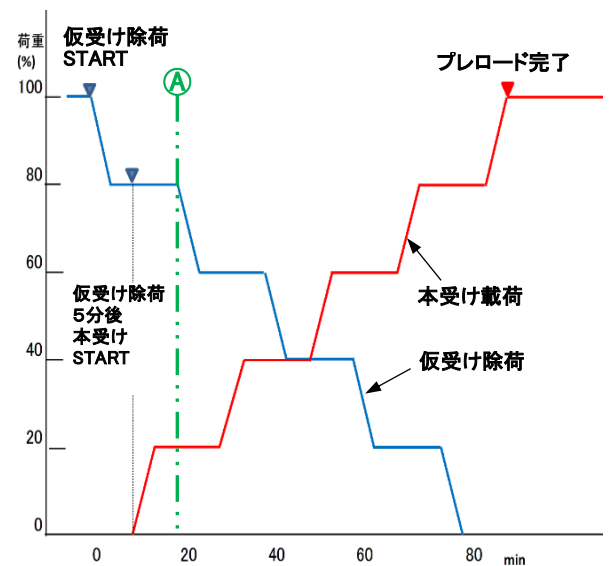


図-18 応力導入履歴図

尚、地下鉄躯体変位を発生させないように応力導入を実施することとし、応力導入作業と並行して地下鉄躯体変位修正は実施しなかった。また、仮受けジャッキ除荷に伴い、地下鉄躯体変位が急激な沈下を生じさせないように、本受けジャッキのロックナット遊間は 0.5mm を保持できる状態を維持した。

2016 年 9 月に仮受けジャッキのプレロードを実施して以来、2 年 10 か月後の 2019 年 6 月に地下鉄躯体の本受替え作業が無事完了した。

10. おわりに

今回工事で初めて、「アンダーピニング変位・荷重自動制御方式」を採用することで、より精度の高い「躯体変位優先」による制御・管理が実施できた。また、CIM を活用して見える化を図ることで、地下鉄躯体の変位やジャッキの制御状況が視覚的に確認でき、アンダーピニングの施工管理が、より安全・確実に実施できた。今後の同種工事で参考になれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 谷澤史剛他：大規模アンダーピニング工の施工実績（その 1）
平成 30 年度土木学会年次学術講演会、VI-1035、2018.08
- 2) 坂梨利男他：大規模アンダーピニング工の施工実績（その 2）
平成 30 年度土木学会年次学術講演会、VI-1036、2018.08
- 3) 山本章貴他：大規模アンダーピニング工の施工実績（その 3）
平成 30 年度土木学会年次学術講演会、VI-1037、2018.08