

超軟弱地盤に建設された 鉄道高架橋のアンダーピニング工事

廣元 勝志¹・一寸木 朋也²・水島 明彦³・武田 澄誉⁴

¹正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 第一工事事務所（〒110-0015 東京都台東区東上野四丁目11-1）
E-mail: k.hiromoto@tokyometro.jp

²正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 第一工事事務所（〒110-0015 東京都台東区東上野四丁目11-1）
E-mail: t.chokki@tokyometro.jp

³東京地下鉄株式会社 改良建設部 第一工事事務所（〒110-0015 東京都台東区東上野四丁目11-1）
E-mail: a.mizushima@tokyometro.jp

⁴大成建設株式会社 メトロ東西線外環市川作業所（〒272-0014 千葉県市川市田尻5-24）
E-mail: takeda@ce.taisei.co.jp

外環東西線交差部工事は、千葉区間外環事業のうち、外環と東京メトロ東西線の交差部に、外環高速道路のボックスカルバートを築造する工事である。本工事は、東西線の列車運行を継続したまま、東西線高架橋直下に外環高速道路を構築するため、直接受替方式によるアンダーピニング工法を採用した。

今回の受替えの特徴は、延長約80m、4径間のコンクリートラーメン橋2基（10橋脚、20支柱）、鉄橋1基を同時に受替える点にある。そのために、48基のジャッキを集中制御できるシステムを構築し、殆んど高架橋が変位することなく受け替えに成功した。

Key Words : underpeening, measurement system, proximity construction

1. 工事概要

東京外かく環状道路（通称：外環）は、都心から半径約15kmの地域を環状に結ぶ幹線道路で、「外環」は、都心部から伸びる放射道路を相互に連絡して、都心方向に集中する交通を分散するとともに、都市部の通過交通をバイパスさせるなど、首都圏の渋滞緩和に大きな役割を果たす道路である。（図-1）このうちの千葉区間は、松戸市小山から市川市高谷に至る延長約12.1kmの区間で、平成27年度の全線開通を目標に整備が進められている。

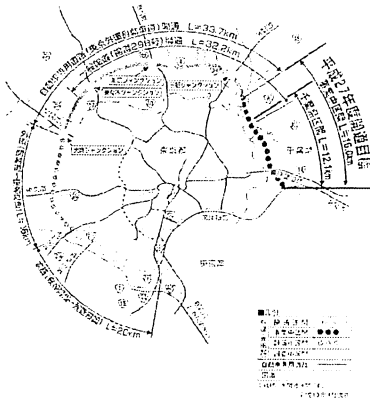


図-1 外環計画図

外環東西線交差部工事は、千葉区間外環事業のうち、外環と東京メトロ東西線が交差する部分の工事で、運行中の東西線妙典駅～原木中山駅間の高架橋直下に外環高速道路のボックスカルバートを築造する工事である。（図-2）本工事は、東西線の列車運行を継続したまま、

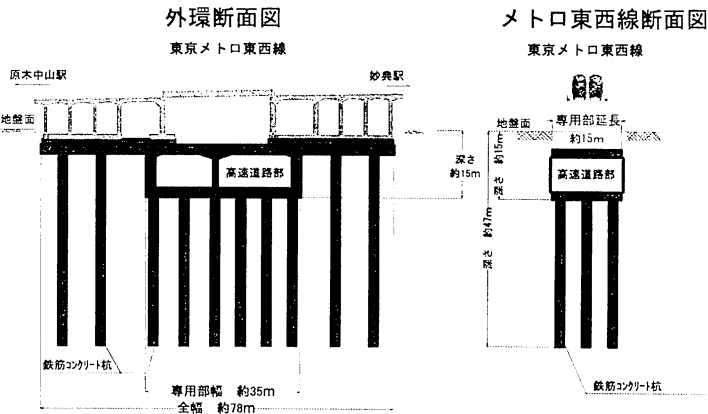


図-2 躯体構造図

東西線高架橋直下に外環高速道路を構築するため、逆巻きスラブによるアンダーピニング工法（総重量3,400t）を採用した。

施工ステップ図（図-3）のように、まず、盛替え用の杭等の基礎工の施工を行い、次に逆巻きスラブ（上床ス

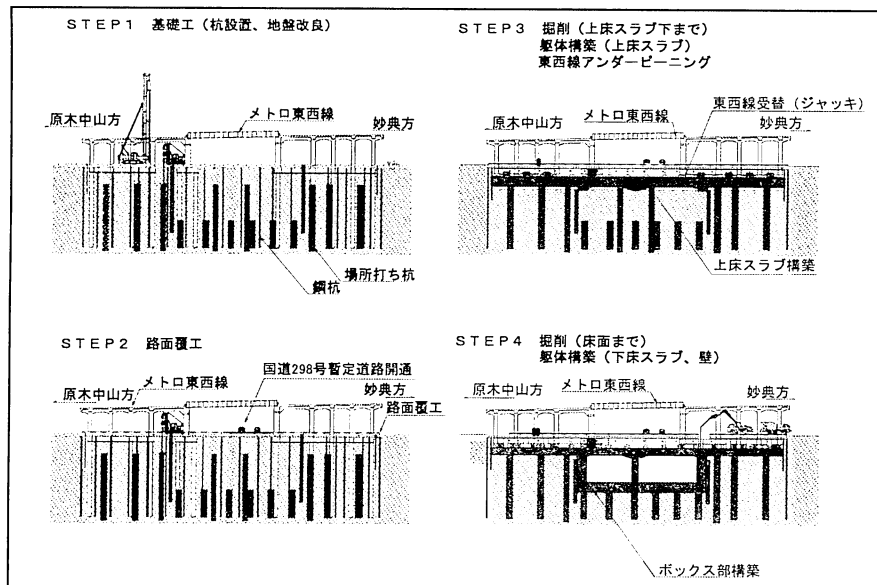


図-3 施工ステップ図

ラブ) 構築を行い、構築した逆巻きスラブで東西線高架橋を受替え、その後、高速道路部の掘削・構築を行う計画とした。この施工方法の利点を以下に列記する。

- ① 逆巻きスラブの構築を先行することにより、掘削時の土留壁の変位量を低減し、掘削背面の構造物（東西線高架橋）への影響を低減することが可能。
- ② 高速道路構築前に、逆巻きスラブに東西線高架橋を受替えるため、施工の影響を最小限に抑えることが可能。

2. 高架橋受け替えの計画・設計上の特徴

盛り替えの計画は経済性に加え「鉄道の安全運行」に重点を置き、高架構造の安全・軌道の変位抑制が可能な方法を採用した。図-4にその構造断面を示す。①仮受け杭の頭部では水平連結材（ $\angle$ -150×75）及びブレースング材で変位を拘束することに加え、ストラットコンクリートにより土留壁・周辺地盤の受動抵抗を期待した骨組構造とした。②異なる構造の高架橋を仮受けするスラブを高剛性の一体RC版（トンネル上床を兼ねる）とし変形制御が容易となる構造形式とした。などの特徴を有する。

一般的に、仮設時の耐震検討は行わないが、今回は、

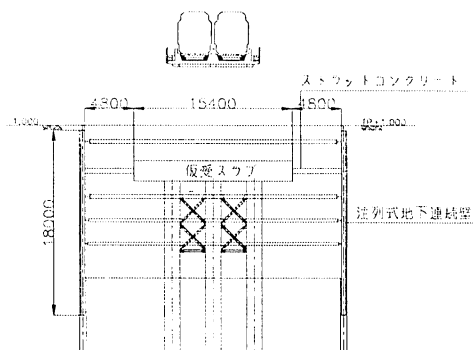


図-4 盛り替え時構造断面

①地盤が軟弱地盤である。②支持杭が約9m突出する。ため地震の影響を受け易い。そのため、施工段階での安全確認を目的として、三次元動的解析（地表面地震動340gal）を実施した。（図-5）結果、各構造部材の応力照査に加え、変形モードの確認、軌道の変位予想を行い地震時の安全性を確認した。特に、軌道の変位に関しては、最も安定性が懸念される施工段階（仮受け後のボックス部床付け最終掘削後）で、軌道直角方向に、最大27mmの水平変位が生ずる結果となる。（図-6）しかし、軌道面の折れ角・目違いは下式の結果となり、制限値（ $\theta=10$ ）以下であることから、走行安全性の確保が可能と判断した。

$$\text{折れ角 } \theta_1 + \theta_2 = \delta / L$$

$$(27\text{mm}-22\text{mm})/28.8\text{m} + (24\text{mm}-22\text{mm})/24.1\text{m} = 0.26 < 10.0 \text{ ok}$$

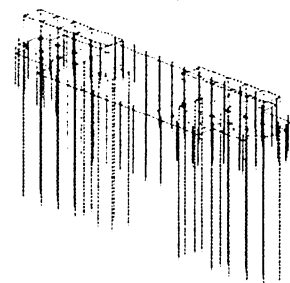


図-5 解析モデル図

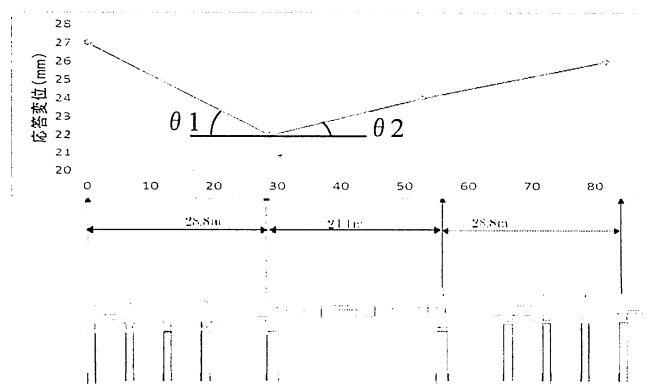


図-6 動的解析結果（軌道直角方向応答変位）

3. 高架橋受け替え施工概要

表-1 高架橋変位管理値

1次管理値	±3.5mm
2次管理値	±5.0mm
盛替え目標値	±1.0mm

(1) 高架橋受け替え手順

東西線高架橋は、図-7の手順で新しい基礎に受替える。まず、ジャッキで高架橋自重と同等の荷重を載荷し、次に既設杭を切断し、最後にジャッキを油圧支持から機械支持（ボルト支持）に移行する。プレロードで、新しい杭のなじみ、弾性変形を吸収し、既設杭切断時の高架橋変位を抑制する。

(2) 高架橋受け替えの特徴

今回の受替えの特徴は、延長約80m、4径間のコンクリートラーメン橋2基（10橋脚、20支柱）、鉄橋1基を同時に受替える点にある。（写真-1）そのためには、48台のジャッキを配置し、これらのジャッキを同時に制御する必要がある。工事に際し設定した変形に対する管理値を表-1に示す。軌道の安全確保、構造安全上さらには類似事例を総合的に判断した。なお、軟弱地盤上での本工事では、受替え前までの工事の影響で高架橋の変位が1次管理値に達していたことから、受替え工事に関しては、極力変位を抑えるため、±1.0mm以下を目標値とした。

上記の厳しい目標値で、受け替えるには、以下の課題を解決する必要がある。

- ①高架橋変位を高い精度で、できるだけ速く計測できるシステムの構築。
- ②高架橋全長の変位を把握し、変位を反映した制御が可能なシステムの構築。

課題①は、連続径間の構造物を同時に受けるためには、全体の変位分布を把握することが重要である。なぜなら、連続体では、橋脚間の相対変位で荷重が偏芯し、バランスが崩れる可能性があるため、常に高架橋全体の変位状況の把握が必要だからである。

課題②は、±1.0mmで制御するため、少しのバランスの崩れも直ぐに修正する必要がある。

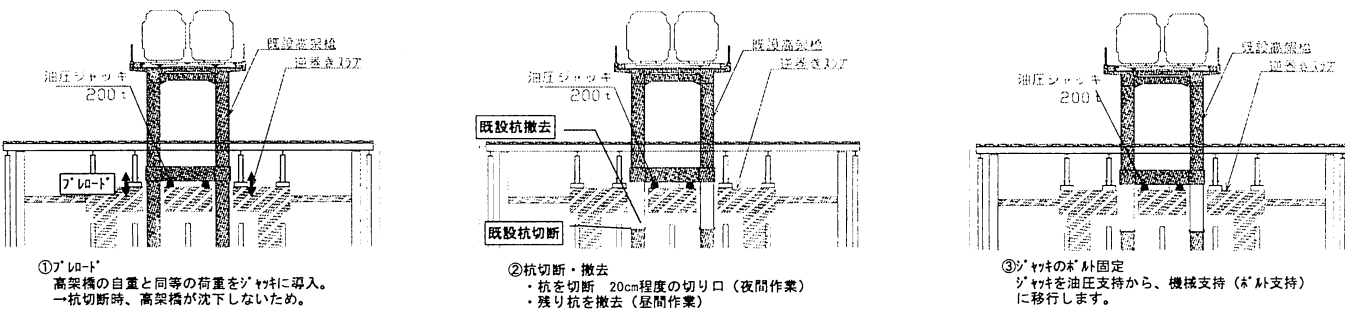


図-7 東西線高架橋受け替えステップ図

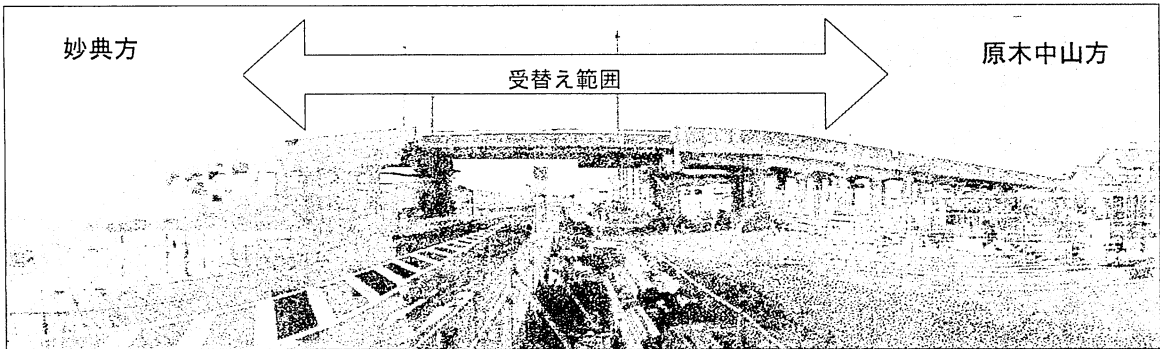


写真-1 受替え範囲全景

4. 高度計測システムを用いた受け替え制御システムの構築

(1) 受け替え制御システムの概要

制御システムの概念図を図-8に示す。本工事の制御システムの特徴は、集中制御にある。高架橋の変位、ジャッキストローク、荷重の計測システムと、ジャッキ操作システムを中央制御室の2台のパーソナルコンピュータ（以下PCと称す）で一元管理する。（写真-2）この制御システムにより、48基のジャッキを同時に操作することが可能になり、10橋脚を同時に受替えることを可能にした。

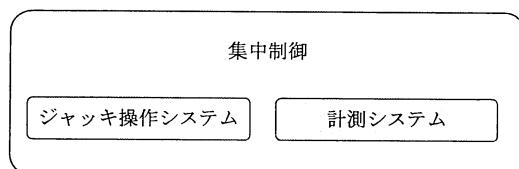


図-8 ジャッキ制御システム概念図

面に表示される。棒の長さがジャッキか荷重を示し、設定値を超えた場合、黄色で表示される。また、この画面でジャッキ操作も可能である。

これらの計測データは、中央制御室の2台のPCに集まり、高架橋変位及びジャッキの荷重を常時把握でき、ジャッキも同じPCより操作し制御した。



写真-2 中央制御室

(2) 計測システム

東西線高架橋受け替え中の計測項目を以下に列記し、計測機器の配置を図-9に示す。

①高架橋絶対変位：トータルステーションで自動レベル測量し、高架橋の絶対変位を計測した。

全ての橋脚にプリズムを取り付け、レーザーを飛ばしてレベル測量を行った。トータルステーションは全橋脚約15分で計測した。計測結果はPC画面に表示される。

（図-10）図中の矢印が橋脚の変位量を示す。

②高架橋相対変位：高架橋基礎と盛り替え用基礎（逆巻きスラブ）の間を、レーザー変位計で計測した。変位はリアルタイムで図-11の画面に表示される。

③ジャッキ荷重：ジャッキ油圧を測定し、ジャッキの作用荷重を計測した。変位はリアルタイムで図-11の画

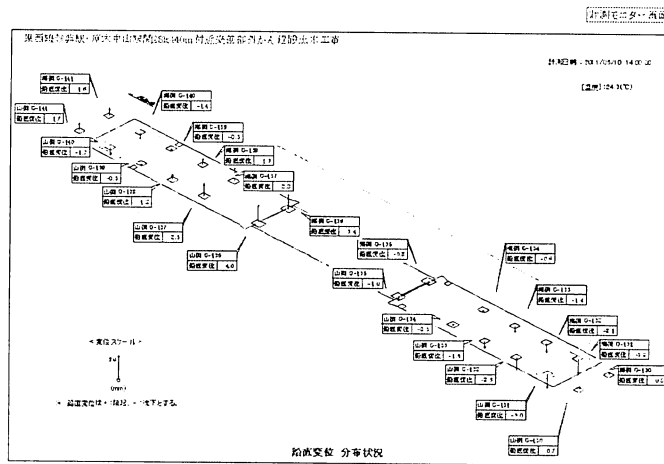


図-10 トータルステーション計測モニター

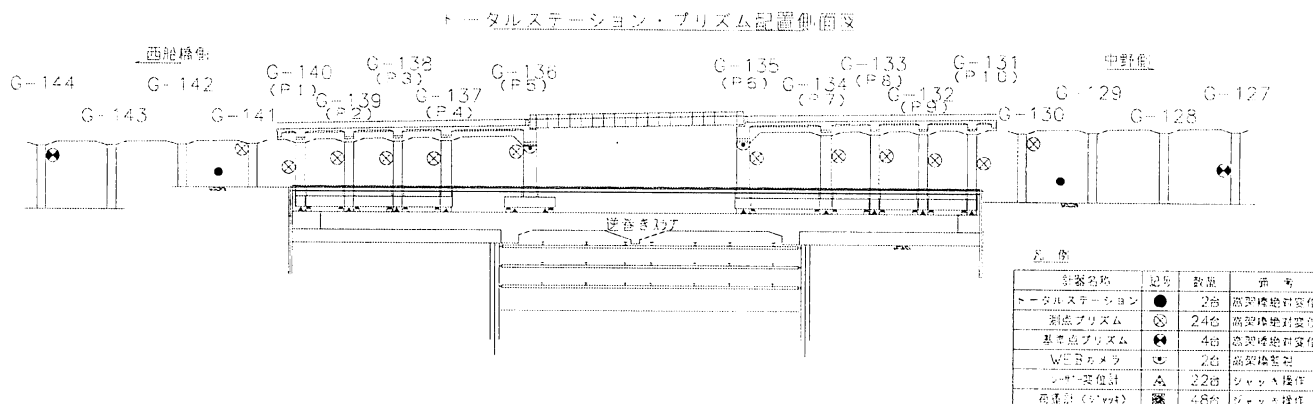


図-9 計測機器配置図

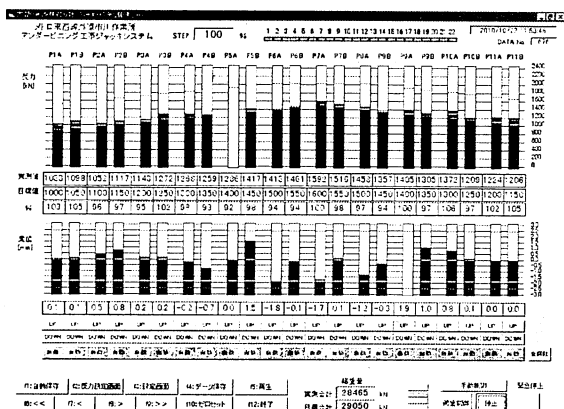


図-11 ジャッキ荷重，レーザー変位計測モニター

(3) ジャッキ操作システム

図-12にジャッキ操作システム図を写真-3にジャッキ配置状況写真を示す。今回の工事では、既設橋脚杭1本に対し、ジャッキ2基とモジュールポンプ1基を配置した。従来のジャッキ操作は、モジュールポンプの操作パネルで操作した。そのため、モジュールポンプ分人員を配置するか、モジュールポンプを1箇所に集め操作した。しかし、今回採用したシステムは、コンピューター制御できるモジュールポンプにLANケーブルを配線し、1台のPCでジャッキ操作を可能にした。本システムに特徴を以下に列記する。

①ジャッキと操作ユニットを最短位置で配置できるため、油圧ホース長を最短にできる。そのため、油圧ホースの温度の影響を最小限にできる。

②操作システムに関わる人員を少なくできる（実際1人で操作）ため、ヒューマンエラーを抑止できる。

③複数のジャッキを同時に操作調整できるため、ジャッキの載荷速度の違いによる荷重のバラツキが小さい。（全体的に円滑に載荷可能）

④全部の高架橋変位を一箇所で常に把握できるため、状況に応じた制御が可能。

5. 受け替え結果

(1) プレロード制御

プレロード作業は、受け替え工の最初のステップで、ジャッキに想定荷重（高架橋死荷重）を載荷する作業である。

この作業は、受け替え工で最重要作業で、今回の制御システムの役割が最も発揮される。なぜなら、監視、制御を確実に実施しないと、高架橋にアンバランスに荷重が作用し、損傷を招くからである。

つまり、高架橋の変位を監視しながら、想定荷重を載荷する必要がある。また、偏荷重がかからないように、

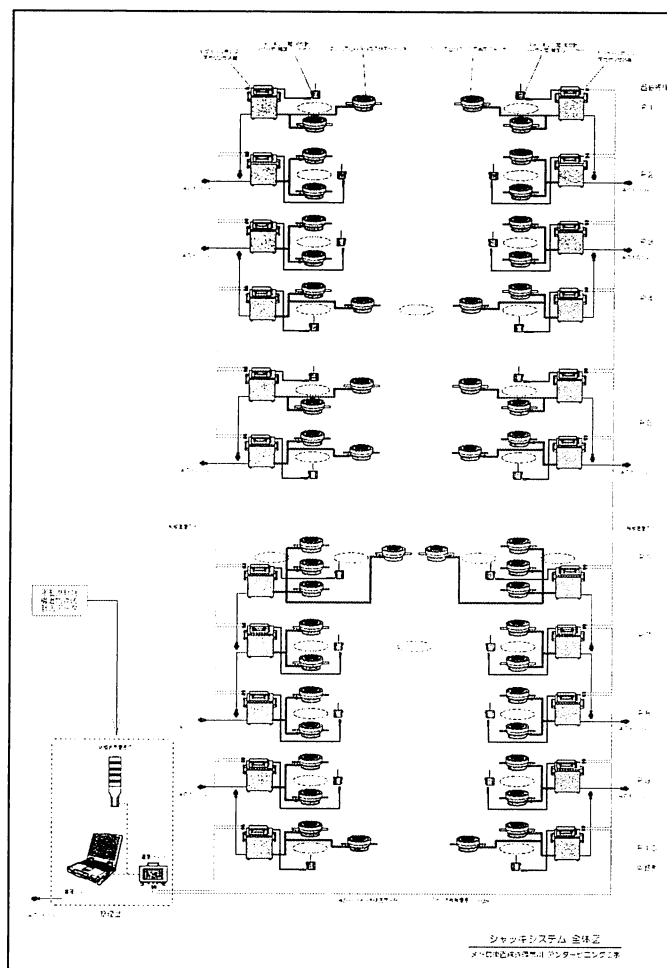


図-12 ジャッキ操作システム図

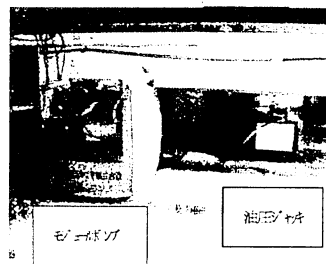
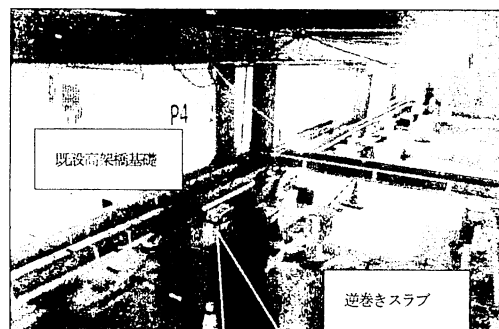


写真-3 ジャッキ配置状況

全体のバランスを把握し載荷する必要がある。

プレロードの作業フローを図-13に示す。プレロード

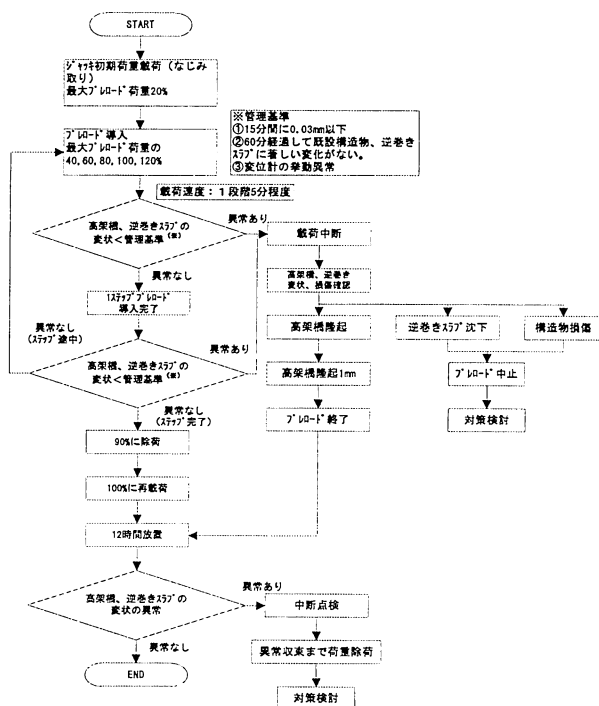


図-13 プレロード作業フロー図

は、想定荷重を5分割し、変位計測をしながら、段階的に載荷する。上述に示すとおり、変位計測は、トータルステーション、レーザー変位計、レベル測量の3方法で計測した。荷重載荷後、60分間各高架橋の変位、高架橋の状況を監視し、異常がなければ、次のステップに移行した。

図-14にプレロード作業の計測値の時系列図を示す。図の上のグラフが荷重計（太線）及び変位計（細線）を

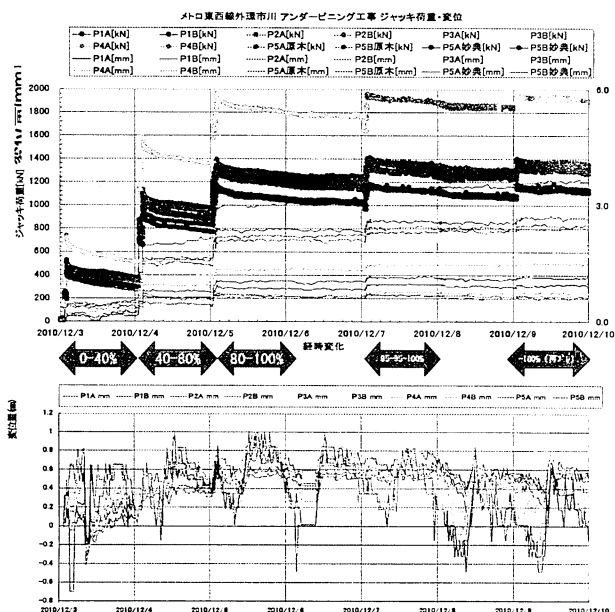


図-14 時系列分布図

示し、下がトータルステーションによる計測値を示す。

(2) 最終プレロード荷重の完了設定

本システムの最も効果的運用例として、最終プレロード荷重の設定方法を示す。最終プレロード荷重の設定は、プレロードで最も重要な要素であり、難しい点である。なぜなら、設定荷重が少ないと、新しい基礎のなじみ（杭先端のスライムによる沈下）とりが不十分のため、杭切断時に沈下する。また、大きいと、既設高架橋が隆起してしまうか、過荷重により部材の損傷を招くためである。

今回のプレロードでは初期段階で、高架橋が隆起し始めたため、最終プレロード荷重の設定が困難であった。

今回のプレロードは、以下の判断により設定荷重の100%を最終荷重とした。

判断1：変位と荷重は弾性変形の関係にある。(図-15)

判断2：変位計の数値が2mm程度であり、弾性変形モデルの予測値に近似している。

判断3：高架橋が隆起傾向にあり、管理値1mm付近に達していた。

以上の判断根拠により、逆巻きスラブのなじみはとれ、既設杭を切断しても大きな変状は生じないと判断した。

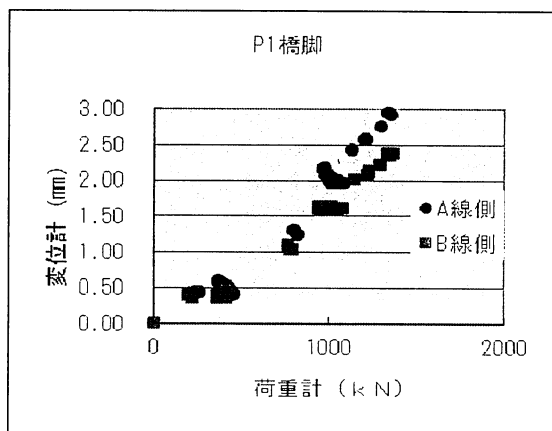


図-15 荷重-変位の関係図

(3) 受け替え結果

図-16に東西線高架橋受替え前後の基準高さの差、つまり、受替えによる高架橋変位量の分布を示す。データは、高架橋天端の上り線、下り線側の2点の、レベル測量の結果である。

測定の結果、受け替えによる高架橋変位量は、最大0.8mmの沈下で、1mm以内に抑える事ができた。言い換えると、殆ど変位なく受け替える事ができた。

もちろん、東西線の運行に支障を招くことは無かった。殆んど変化なく受け替えることができた要因は、ジャッキ制御システムの効果であると考えられる。

高架橋全長の状況をPC画面で把握し、画面上の操作でジャッキを制御し、制御した結果をリアルタイムで把握することにより、変位を抑えることができた。

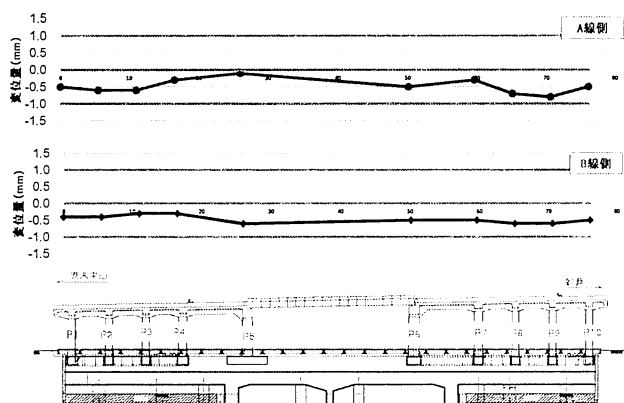


図-16 高架橋変位分布図

(4) 計測値の温度変化による影響

高架橋変位の計測方法は、温度変化の影響程度が異なり、計測値の情報も異なるため、管理方法により使い分けた。表-2に計測方法と温度変化の影響及び使用方法の関係を示す。

表-2 計測補法と温度の影響

測量方法	計測値情報	温度影響の評価	使用方法		
			受替え時 変位管理	日常変位 管理	最終変位 確認
レベル測量 (高架橋天端測量)	レベル (絶対値)	△ 高架橋天端の定点測量のため温度の影響を受けにくい	---	---	○
トータルステーション	レベル (絶対値)	× 高架橋柱に耐震補強鉄板が巻かれており温度の影響を受ける	○	---	---
レーザー変位計	相対変位	○ 高架橋基礎と逆巻きスラブの相対距離の測定のため温度の影響を受けない	○	○	---

受け替え時は、夜間4時間の作業のため温度変化の影響が殆ど無い。そのため、トータルステーション、レーザー変位計の計測値を管理に用いた。一方、昼間の日常管理では、温度影響を殆ど受けないレーザー変位計で管理した。受け替え完了後、最終変位を確認には、計測機器自体が温度変化の影響を受けないレベル測量により、最終変位を確認した。

Underpinning construction of a railroad viaduct built on the super soft ground

Katushi Hirimoto, Tomoya Chokki, Akihiko Mizushima and Smiyo Takeda

This project is construction to construct a expressway(Gaikan Highway) under Tokyo Metro Tozai Line. This construction adopted underpeening method of construction to build Gaikan Highway right under Tozai Line viaduct with continuing train scheduling of Tozai Line.

There is the characteristic of the project at a point I receive extension approximately 80m, two concrete ramen bridges(10 supporting beams, 20 props) , one iron bridge at the same time. Therefore I built the system which controlled 48 jacks intensively and I could receive it without most viaducts being displaced.

6. 結論

延長80m, 10橋脚を一度に受替える工事は、アンダーピニング工事の中でも特異な事例である。今回の工事で、東西線高架橋に殆ど変位なく(±1.0mm以内)受替えることができた。成功の一番の要因は、集中制御システムの構築である。48基のジャッキを1台のパソコンで操作可能にすることにより、全体的にバランス良いプレロードを可能にした。

平成23年3月11日東北地方太平洋沖地震では、高架橋をジャッキ(ボルト固定)で受けた状態で、震度5弱の地震を受けたが、特に損傷することはなかった。現在、東西線高架橋を新しい基礎の受替えた状態で、直下の高速道路部の施工を行っている。今後、平成23年度中の完成を目指し、無事に工事が完成するように努力していく所存である。

謝辞：今回の特異な受け替え工事は、東京地下鉄(株)をはじめとする様々なアンダーピニング工事経験者の助言を元に施工計画をたて、また、施工中も様々な助言をいただきました。その結果、トラブルなくボルト固定まで終了できました。この場を借りまして、ご指導いただきました関係各位に謝意を表します。