

東京メトロ半蔵門線渋谷駅のアンダーピニング

東日本支社 土木部 岡部真一郎

Key Words: アンダーピニング, プレロード, フラットジャッキ, 場所打ち杭

1. はじめに

東京メトロ副都心線工事は、和光市～池袋間にて既に営業されている有楽町新線を、明治通りに沿って渋谷方まで約 8.9km 延伸する工事であり、平成 20 年 6 月 14 日に開業された。更に渋谷駅においては、東急東横線と相互直通運転を行う予定になっており、和光から北西部の東武東上線と併せると、埼玉県南西部方面から都心を経由し横浜方面に至る広域的な鉄道軸が完成する計画となっている。

当現場が開削工法にて施工した東京メトロ副都心線渋谷駅は、幅 36m×深さ 21m×長さ 108m (土被り 10 m) の四層五径間を基本とした直接基礎形式のボックスカルバート構造であるが、直交する現在供用中の東京メトロ半蔵門線渋谷駅と一体化構造となるため、交差区間の 28m に渡り、下受ばり方式によるアンダーピニングを行ったので施工実績を報告する。施工完了状況を写真-1 に示す。



写真-1 アンダーピニング施工完了状況

2. 工事概要

2.1 全体工事概要

工事名：13号線渋谷二工区土木工事

発注者：東京地下鉄株式会社

施工者：鹿島・アイサワ・ピーエス三菱工事共同企業体

工事場所：東京都渋谷区渋谷1丁目14番～2丁目20番地

工期：2002(平成14)年3月20日～2008(平成20)年7月5日

主要工事数量

・掘削	92,400m ³	・路面覆工	4,300m ²
・柱列式地下連続壁	2,300m ²	・鉄筋コンクリート	17,800m ³
・13号線本線部半蔵門線受防護工	一式	・既存ビル受防護工	一式
・半蔵門線連絡通路工	一式		



岡部真一郎

2.2 地盤条件

当施工範囲では渋谷駅周辺に見られる沖積層は存在せず、過圧密の関東ローム層、東京層群（互層）、並びに上総層群と比較的強固な地層で構成されている。更に、GL-12m以下から支持杭根入れ深度までは、非常に自立性の高い、土丹 ($q_u=2MN/m^2$) の単層となっている。地質縦断図を図-1に示す。これら地盤条件に対し、半蔵門線躯体下端は、GL-20mに位置し、土丹層を基礎地盤とした直接基礎形式となっている。

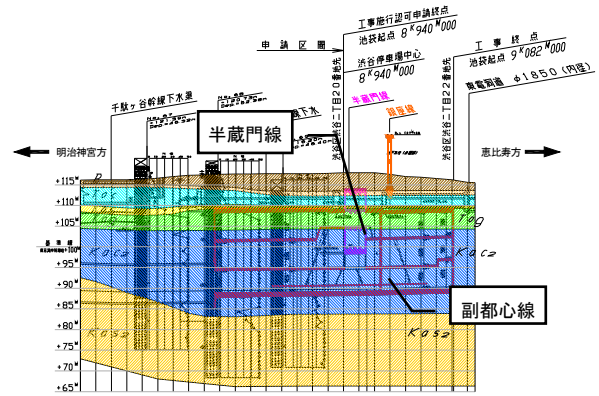


図-1 地質縦断図

3. 副都心線本線部・半蔵門線アンダーピニング概要

3.1 アンダーピニング対象物

半蔵門線渋谷駅は、高さ 16m（土被り 5m）の地下 3 階 R C ボックスカルバート直接基礎構造となっているが、東急電鉄田園都市線の相互乗り入れ駅であることから、電気・機械設備等の駅施設物が大規模となり、ボックスカルバートの幅も 28m と大きく、副都心線と交差する 36m 分のアンダーピニング総重量は、240MN（土被り荷重を含む）である。図-2 にアンダーピニング形状を示す。

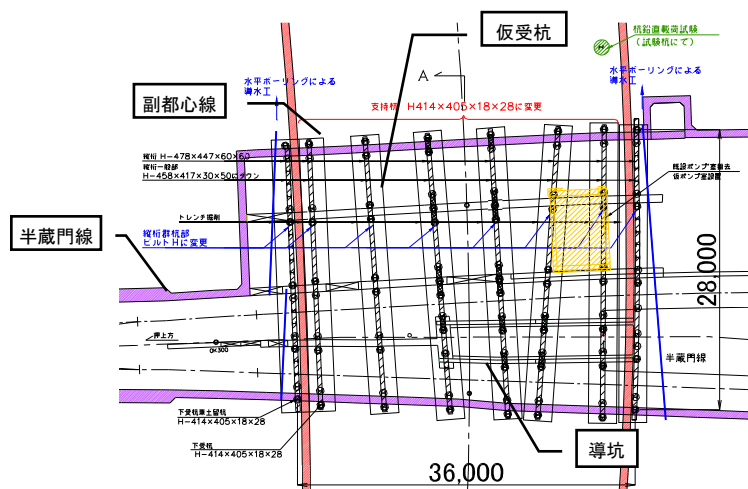


図-2 アンダーピニング平面図

3.2 アンダーピニング施工数量

アンダーピニング施工数量は表-1のとおりである。

表-1 アンダーピニング施工数量

工種	項目	数量	単位
導坑掘削	掘削土量	2,690	m ³
	支保工	145	t
切り広げ掘削	掘削土量	1,710	m ³
路下BH杭	H414×405×18×28(φ700)	911	m
	H400×400×13×21(φ650)	482	m
下受梁架設・撤去	H458×417×30×50	104	t
プレロード	プレロード回数	8	回
	フラットジャッキ	236	個
載荷試験	鉛直載荷試験	1	式

3.3 アンダーピニング施工手順

掘削幅 36m のアンダーピニング区間に対して、幅 3m の導坑を 8 列掘削し、導坑内にて仮受け杭打設～縦桁架設～プレロードまでの一連の作業を順次行う。隣接導坑内におけるプレロード完了後に、導坑間の抜き掘りを行う。以上の施工手順を図-3にまとめる。

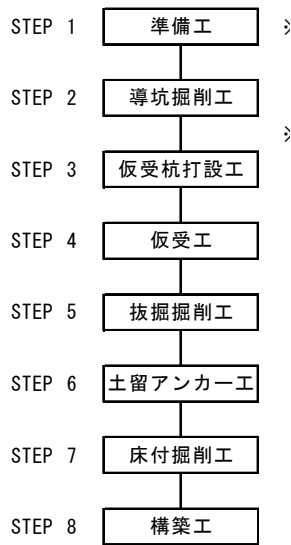


図-3 施工手順

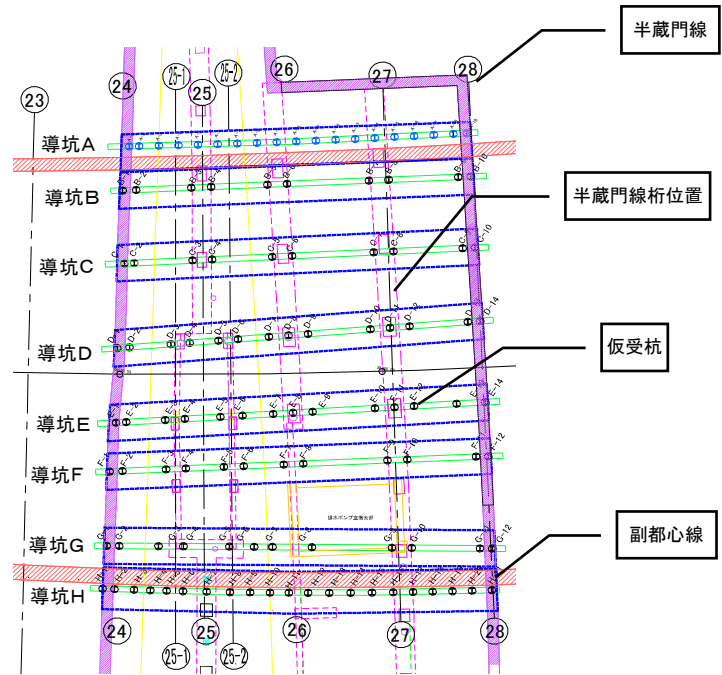


図-4 杭伏図

3.4 仮受け杭概要

3.4.1 杭伏せ及び設計荷重

図-4に杭伏せを示す。半蔵門線躯体の桁ラインに沿って杭配置を行う。杭1本あたりの荷重が4,000kN程度となるように桁ラインに複数個の杭を配置した結果、合計で112本の杭が必要となった。(この内18本は土留杭) 支持杭の設計アンダーピニング荷重は、表-2に示すとおりであり、最大値は4,750kNである。

表-2 設計アンダーピニング荷重

導坑	杭材	削孔径	杭1本あたりの設計アンピン荷重(kN)(活荷重含む)					平均
			24	25	26	27	28	
A	H400×400	φ650	1,400	2,012	2,268	2,127	1,488	1,859
B	H414×405	φ700	2,176	3,232	3,245	2,695	1,500	2,569
C	H414×405	φ700	3,144	4,441	4,608	3,847	2,574	3,723
D	H414×405	φ700	3,904	3,440	4,305	4,055	2,901	3,721
E	H414×405	φ700	2,482	3,222	4,106	4,746	3,201	3,533
F	H414×405	φ700	1,943	2,560	3,414	3,664	2,617	2,839
G	H414×405	φ700	2,593	2,490	3,638	2,973	1,452	2,629
H	H400×400	φ650	1,992	1,579	3,134	2,678	1,872	2,251
							全平均	2,891

3.4.2 要求品質

今回、コスト上の理由から仮受け杭のプレロードはフラットジャッキで設計されている。フラットジャッキのストロークは25mm程度しかないため、杭の沈下量を10mm程度に抑えることが必要となった。

4. 施工計画

4.1 導坑掘削工

導坑掘削寸法は、半蔵門線への影響を極力抑えるため、幅 3m (内空 2.6m) × 高さ 4m と坑内 BH 杭を施工する上で最小限の寸法にて設計されていた。したがって掘削機械には、ベルトコンベヤ内蔵型電動掘削機 (通称：シャフローダー：写真-2) を採用した。これにより施工効率のみならず、狭隘な導坑内での旋回時の巻き込まれ防止や排気ガスの解消などの安全環境面も向上した。

掘削補助工法については薬液注入等は特に採用せず、半蔵門線均しコンクリート下部の外壁沿いに敷設されていた半蔵門線築造時の排水ドレーン管 (同管を通じて合計 1.5m³/分程度の湧水が生じていた) を切り回し、端部導坑の外側に水抜き用水平ボーリングを行なった。

なお、1列の導坑掘削に伴って開放されるボックスカルバート重量は、導坑両端の地山にて負担し、導坑自体には作用しないものと設計されている。



写真-2 掘削中のシャフローダー

4.2 仮受け杭打設工 (単一土丹層を生かした改良BH工法)

狭隘な作業スペースでも施工可能な BH 工法は、泥水を正循環させて削孔汚泥を回収し、このときに地層に応じた濃度の泥水を送って孔壁の安定を図っているため、底部にはスライムが溜り易く、更に孔壁にマッドケーキが付着しやすいことから、支持力に関する信頼性が低くなり支持杭には適さない工法と言われている。支持杭造成方法としては TBH, BCH 工法があるが、今回は施工スペースやコスト面の問題からこれらによる施工が困難なため、削孔対象地盤が自立性の高い単一土丹層であるという好条件を生かして合理的な改良 BH 工法を考案した。

4.2.1 設計支持力確保のメカニズムと対策

当該仮受杭は、先端支持力と周面摩擦力によりアンダーピニング荷重を負担する設計となっている。支持力確保のための対策を図-5に示し、次項に具体的対策を記す。

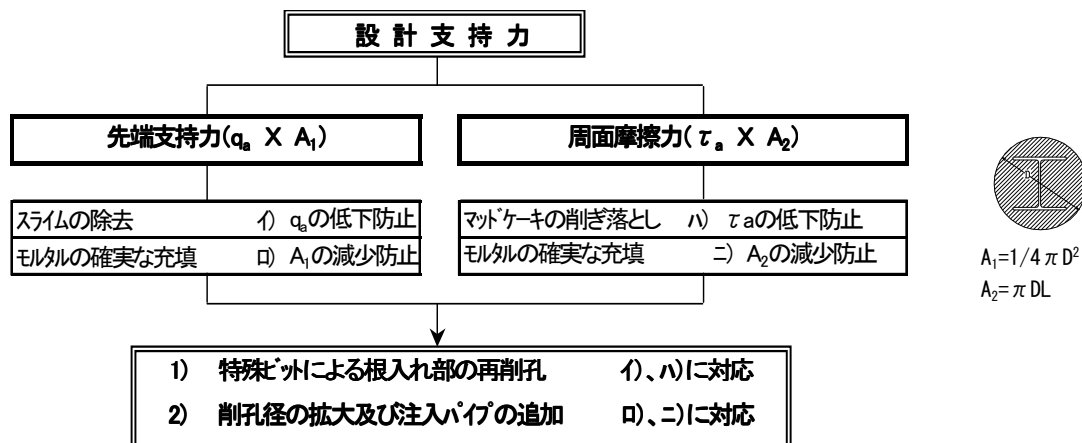


図-5 設計支持力確保のメカニズムと対策

4.2.2 具体的対策

(1) 特殊ビットによる根入れ部分の再削孔

一般的な BH 杭削孔ビットは、ウィングビットと称され、ビット長に応じた余掘り部分が発生する (図-6参照)。更に、削孔長が長い時や礫層を抜く場合などは、削孔精度確保のためにビットを長くする結果、より大きな余掘り部分が発生する。

当該箇所における削孔長は最大で 11m と比較的短い上、設計根入れ長が 2m しかないこと、更に単一

土丹層であることから、以下の手順にて削孔を行うこととした。

- ① 短めのウイングビットを用い、著しく濃度の低い泥水により、ビット先端が設計深度となるまで、一次削孔を行う。
- ② 特殊ビット (写真-3) に付け替え、清水にて先細り部分を削り取る。このとき、根入れ深度から高速回転で再削孔を行うことにより、根入れ部分のマッドケーキおよびスライムを除去する。

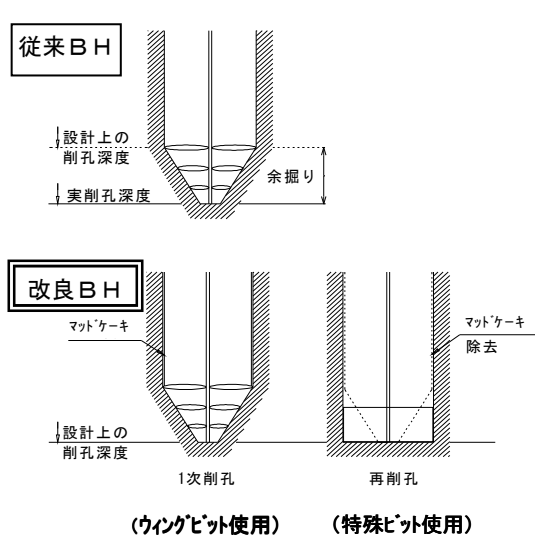


写真-3 ウイングビット(上)と特殊ビット(下)

図-7 改良BH削孔方法

(2) 削孔径の拡大及び注入パイプの追加

BH 杭は、削孔機の自重が軽く、比較的孔曲がりが生じ易い。更に、導坑内での施工であり、高所から杭の落とし込みができないため、通常の本 BH 杭と比べ高い削孔精度が求められた。杭材が高止まりしない場合も、表-3のように削孔断面と杭芯が偏芯すると、削孔断面内に、未充填による根固めモルタル欠損部が発生する懸念がある。以上のことから、下記の2つの対策を講じた。

- ① 通常1本のモルタル注入パイプを、ウェブ両側に1本ずつ、計2本配置する。
- ② 杭材から決まる通常削孔径より50mm大きな削孔径とし、下図のいずれの偏芯ケースにも断面欠損の発生を防ぐ。

表-3 偏芯ケースと対応

偏芯ケース	注入パイプ1本	注入パイプ2本
フランジ端 外接パターン	未充填 範囲大	未充填部 なし
フランジ1面 外接パターン	未充填 範囲大	未充填 範囲小

4.3 仮受け杭載荷試験工

4.3.1 試験概要

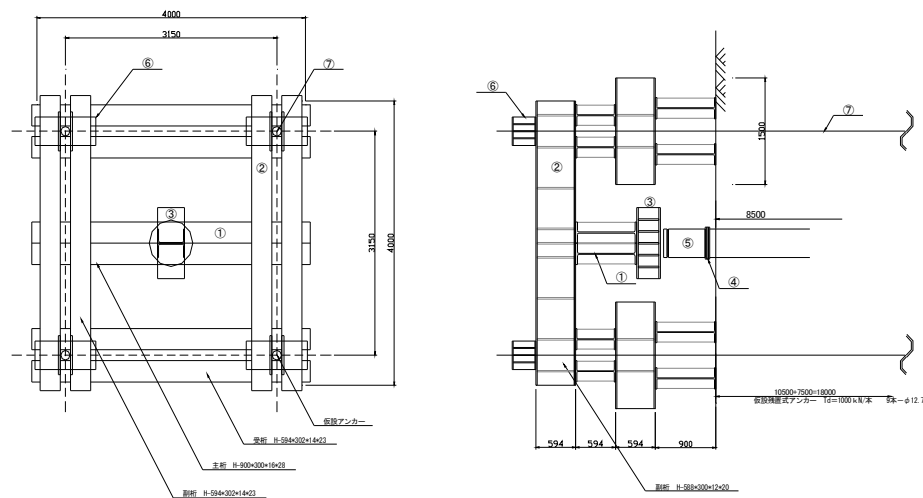
前項に示した改良BH杭の支持力確認のため、鉛直載荷試験を行う。原位置(導坑内)では反力架台が設置できないため、仮受け杭施工箇所から約10m離れた箇所にて試験杭を打設し、同杭にて載荷試験を行う。試験概要は表-4のとおりである。

表-4 載荷試験概要

項目	内容
試験の種類	鉛直載荷試験
試験最大荷重	$P_{max} = 4,400kN \times 1回$
試験杭	H414×405 (φ700)
試験基準	地盤工学会「くいの鉛直載荷試験方法・同解説」
試験方法	多サイクルによる段階載荷方式
測定項目	1) 荷重 …… 1点 2) 杭の変位量 …… 計6点 3) 時間
加力装置	電動式油圧ポンプおよび5,000kNジャッキ

3-2 反力架台

図-8に示すとおり、4本のグラウンドアンカーを利用した反力架台を架設する。



番号	名称	寸法	番号
①	主桁	H-900×300×16×28	2本
②	副桁	H-594×302×14×23	2本
③	上台座	□-1000×400×350	1個
④	下台座	2×PL-22×450×450	1個
⑤	油圧ジャッキ	500kN 220st	1基
⑥	スタッパー	□-400×350×910	6個
⑦	テンション材		4本

図-8 反力架台図

4.4 縦桁架設

4.4.1 縦桁形状

仮受け杭を半蔵門線桁ラインに沿って配置しているため、アンダーピニング荷重は杭頭支持となる。今回は、杭荷重の均一化、並びにフラットジャッキの水・樹脂交換時の一時的なジャッキダウンを勘案し、アンダーピニング荷重を等分布載荷した単純梁モデルから、縦桁仕様をH458×417×30×50とした。

同一桁ライン上の杭群間の縦桁は、半蔵門線構築の支点反力が集中荷重として載荷するが、施工性から、桁高を一般部 (h=458mm) に合わせた上で、支点反力に応じたリブ補強を行う。

4.4.2 縦桁架設

トッププレート (t=22mm) による杭頭処理後、導棒上梁を下方に盛替え、同梁にローラーコンベアーを設置し、導坑坑口に架設した電動ウィンチにて、縦桁の引き込みを行う。

引き込んだ縦桁は、添接プレートにて隣接桁と固定し、杭頭プレートともボルト接合する。引き込みの際に必要な半蔵門線構築との間隙は、鋼製金物とライナープレートにて間詰を行なった。

4.5 プレロード

4.5.1 プレロード施工フロー

プレロードの施工フローは、図-8のとおりである。フラットジャッキ内に充填した樹脂の硬化時点で、プレロードの1サイクルが完了するが、水から樹脂への置換については、導坑間の抜き掘り完了後、半蔵門線躯体の挙動の安定を確認した後にいった。

4.5.2 プレロード荷重とフラットジャッキ配置例

プレロード荷重は死荷重の100%とする。

フラットジャッキは導坑坑口付近の電動ポンプを利用し、水圧によりジャッキアップする。プレロードは導坑ごと一度に行うが、杭反力に応じて、能力の異なる3種類のジャッキを組み合わせ、所定のプレロード荷重を載荷できる配置を行う。

フラットジャッキ設置例を図-9に示す。

4.5.3 加圧ステップ

プレロードは、き電停止中(1:05~4:15)に行う必要があることから、図-10に示す加圧ステップを基本にプレロードを行う。前述のとおり、3種類のジャッキの組み合わせでプレロードを行うため、各支点の設計荷重に対するプレロード荷重の割合は不均一となっている。

ジャッキアップ完了後も初電運行より1時間は、ジャッキやバルブの状態を点検する。

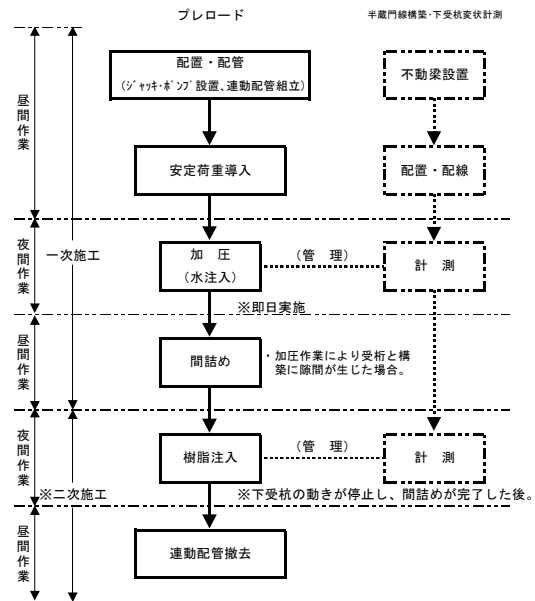


図-8 プレロード施工フロー

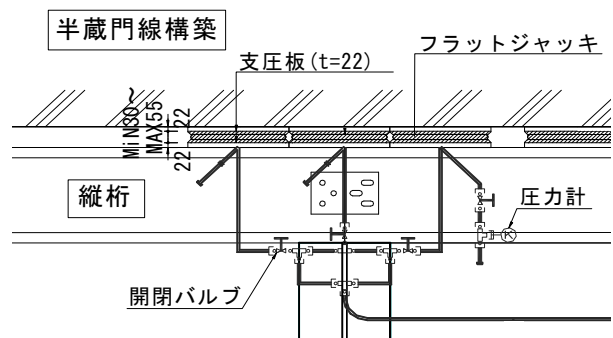
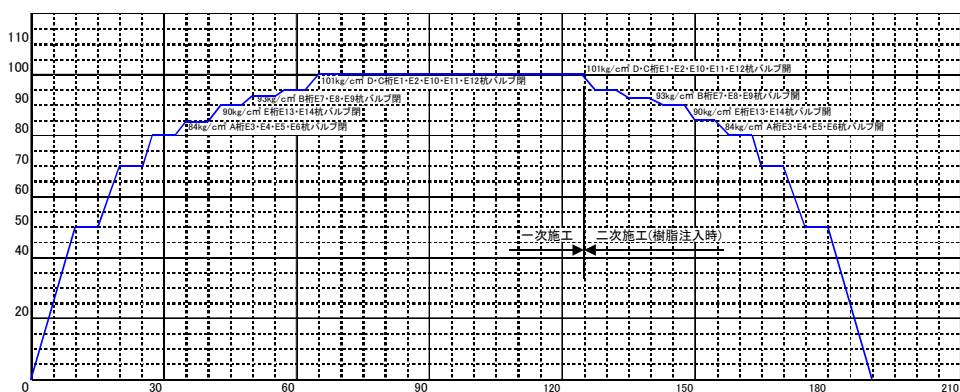


図-9 フラットジャッキ設置図

フラットジャッキ加圧 ステップ表 (E導坑部) 水注入 (横軸:(分)、縦軸:(kgf/cm²))



新設 既設 橋 番号	既設 橋 番号	抗 数	F J 台数	死荷重反力 KN	加圧ステップ																		導入目標 反力 KN	
					1		2		3		4		5		6		7		8		9			
					圧力	%	圧力	%	圧力	%	圧力	%	圧力	%	圧力	%	圧力	%	圧力	%	圧力	%		
	D	E1	170	2	2238	228	50	50%	70	69%	80	79%	84	83%	90	89%	93	92%	95	94%	101	100%	101	228
	D	E2	170	2	2238	228	50	50%	70	69%	80	79%	84	83%	90	89%	93	92%	95	94%	101	100%	101	228
	A	E3	170	3	2765	284	50	60%	70	83%	80	95%	84	100%										284
	A	E4	170	3	2765	284	50	60%	70	83%	80	95%	84	100%										284
	A	E5	170	3	2765	284	50	60%	70	83%	80	95%	84	100%										284
	A	E6	170	3	2765	284	50	60%	70	83%	80	95%	84	100%										284
E 導 坑		E7	170	3	3570	365	50	54%	70	75%	80	86%	84	90%	90	97%	93	100%						365
		B	E8	170	3	3570	365	50	54%	70	75%	80	86%	84	90%	90	97%	93	100%					365
		B	E9	170	3	3570	365	50	54%	70	75%	80	86%	84	90%	90	97%	93	100%					365
		C	E10	170	3	4389	448	50	50%	70	69%	80	79%	84	83%	90	89%	93	92%	95	94%	101	100%	448
		C	E11	170	3	4389	448	50	50%	70	69%	80	79%	84	83%	90	89%	93	92%	95	94%	101	100%	448
	C	E12	170	3	4389	448	50	50%	70	69%	80	79%	84	83%	90	89%	93	92%	95	94%	101	100%	448	
	E	E13	170	3	2985	305	50	56%	70	78%	80	89%	84	93%	90	100%								305
	E	E14	170	3	2985	305	50	56%	70	78%	80	89%	84	93%	90	100%								305
	計			40	4647	4731																		4731

図-10 加圧ステップ例

4.5.2 プレロード時計測管理

プレロード時の計測管理項目として、①半蔵門線下受杭の鉛直変位、②半蔵門線下床版の鉛直変位及び③半蔵門線構内（軌道階）の鉛直変位を測定した。

①②については、杭及び躯体より縁切りした導枠支柱から変位計を取り付け計測した。現場計測における導坑内計測器の設置状況を図-11に示す。③については、別途工事にて設置された水盛式沈下計のデータを自動計測した。

プレロード作業にあたっては、①にて加圧状況を確認し、②の変化量に応じて放置時間を延長する等、適宜加圧ステップを細分化する。③については発注者と協議し、一次管理値を3.5mm、二次管理値を5.0mmとした。

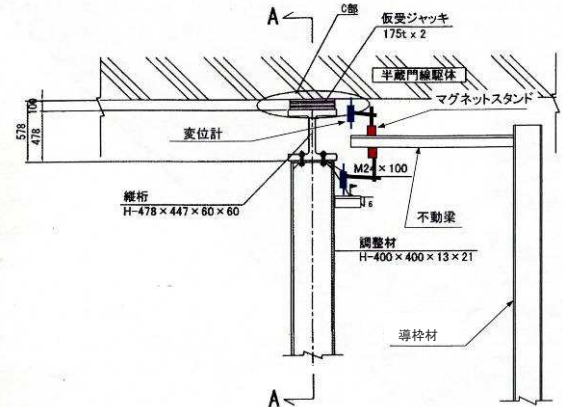


図-11 導坑内計測器図

5. 施工実績

5.1 試験杭載荷試験結果

試験結果（図-12）より、載荷重 3,600kN までは塑性変位量が 2mm 程度であるが、4,000kN を越えた辺りから、塑性変位量が増加する傾向となった（4,400kN で 10.8mm）。杭の最大設計荷重は、4,750kN であり、上記の結果はこれを満たしてはいないため、根入れ長の増加、芯材とモルタル塊との付着力増加（ジベル筋設置、モルタル強度増加）などの追加措置を検討した。しかし、半蔵門線躯体は下床版厚さが 1.0m と剛性の高い構造物であるため、アンダーピニング荷重はより平均化（単純平均の場合 2,890 kN）されることが想定できる上、発注者の意向により 10 本の支持杭にひずみ計を設置して設計荷重に対する実荷重を随時確認できることも考慮し、杭の仕様は変更せず当該改良工法にて全ての支持杭を施工することとした。

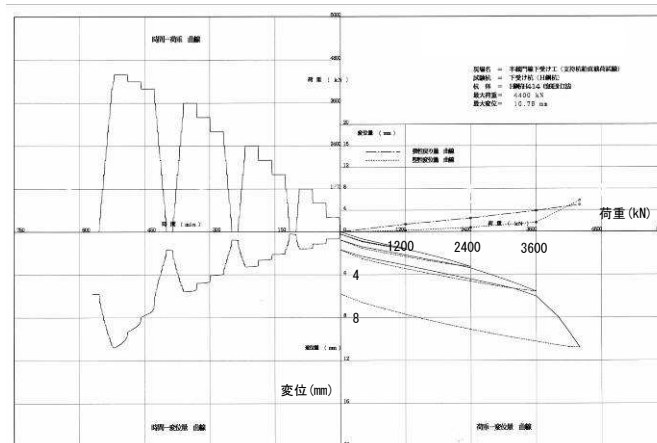


図-12 載荷試験結果図

5.1 プレロードによる杭および半蔵門線躯体挙動

ジャッキストローク 25mm に対して、プレロード時の沈下量が 20mm を越えた杭が存在する杭群は、全 45 組中 3 組あった。半蔵門線躯体は、プレロードにより、軌道内レベルにて最大 1.0mm 上昇した。下床版下面における隆起量は最大 1.5mm であったが、許容値 5.0mm 以内であり、躯体表面に異常などは生じなかった。

5.2 床付け掘削完了までの半蔵門線躯体の挙動

隣接導坑のプレロードにより、軌道内レベルにて±0.3mm 程度の変位が生じた。

導坑間の抜き掘り完了後、更に深さ 6m の掘削を行ったが、表-5 に示すとおり、一次管理値に収まる範

囲で副都心線下床版施工を完了することができた。

なお、杭のひずみ計から算出される杭軸力は、最大 4,160kN であり、縦桁補強工事などの追加措置を行う必要はなかった。

表-5 ステップごとの半蔵門線躯体挙動 (単位:mm 隆起 (+) 沈下 (-))

	A線(表参道方)		B線(田園都市)		備考
	最大値	最小値	最大値	最小値	
導坑掘削開始前	1.8	0.8	2.3	0.8	
プレロード開始前	2.2	1.2	2.2	0.3	導坑掘削5列/8列完了
プレロード完了	2.7	1.1	3.5	0.3	
導坑間抜き掘り完了	2.6	1.1	2.2	-0.8	
樹脂置換完了	2.8	1.1	2.1	-0.7	
掘削完了	2.4	1.1	0.6	-2.3	
副都心線下床版完了	1.6	0.3	0.7	-3.3	

5.3 アンダーピニング考察

半蔵門線軌道内の変位を一次管理値±3.5mm内に収めることができた。良好な地盤と剛性の高いアンダーピニング構造物という好条件の中では、大きな問題とはならなかったが、本工事で生じた懸案事項と今後の対策について表-6にまとめる。

表-6 今後の懸案事項

対象	問題点	対策
施工順序	各導坑の残留変位が考慮されない	解析のステップ化
フラットジャッキ	アンダーピニング構造物の挙動に応じて再ロードできない	油圧ジャッキの利用
	ジャッキ荷重の不均一のためプレロード時の制御が難しい	ジャッキ仕様の統一
	樹脂が水と反応するため樹脂のロスが大きい	メーカーとの協議
半蔵門線構築	温度による影響	事前計測
構内沈下計	目詰まりなど水盛式沈下計自体の信頼性が低い	参考値とし別の指標の設定

6. むすび

今回は、各種の好条件に恵まれ、従来工法より合理的な(簡素な)方法にて、要求品質を十分満たす仮受け杭の施工が可能となり、良好なアンダーピニングを実現できた。

今後、大深度地下利用に伴い、固結度が高い地盤を対象とすることが増加すると思われるが、施工環境を十分分析し、従来工法の単純な足し合わせを避けることで、より合理的な施工を実現できればと考える。

プレロード完了後の状況を写真-4に示す。



写真-4 樹脂置換後ジャッキ状況

【参考文献】

- 1) (社)地盤工学会；くいの鉛直載荷試験方法・同解説-第一回改訂版
- 2) (財)鉄道総合技術研究所；アンダー・ピニング設計・施工の手引き
- 3) 東京地下鉄(株)；東京メトロ副都心線パンフレット