

首都高速中央環状新宿線における 地下鉄アンダーピニングの影響検討と計測管理

Impact examination and monitoring management for a subway of the underpinning method of construction in Metropolitan Expressway Central Circular Shinjuku Route.

川田成彦¹・遠藤蔵人²・水越英世³・陣内久之⁴・岩倉孝幸⁵
Naruhiko Kawada and Kurato Endo
and Hideyo Mizukoshi and Hisayuki Jinnai and Takayuki Iwakura

¹正会員 工修 首都高速道路(株)建設管理部技術管理室構造技術グループ
(〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1)

E-mail:n.kawada106@shutoko.jp

²正会員 工修 首都高速道路(株)東京建設局工事第一グループ
(〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-15-3)

^{3,4,5}正会員 間・三井住友SJ41トンネル特定建設工事共同企業体
(〒164-0011 東京都中野区中央1-35-6)

For the cut and cover construction project under the intersection, a comparison between a displacement analysis and a monitoring result accompanying underpinning construction for the existing subway was performed. From this study, the analysis method was found to give the practically reasonable result presenting the good consistence with the amount of the maximum subsidence of a measurement value of 1.2mm.

Key Words : Metropolitan Expressway, cut and cover tunnel, underpinig, monitoring , subway,

1. 概要

本工事は、山手通で施工中の首都高速道路中央環状新宿線建設工事のうち、青梅街道と交差する中野坂上交差点部において、直交する東京地下鉄丸ノ内線を上部に、また、平行する都営大江戸線を下部に、開削工法にて首都高速トンネルを構築するものであ

り、構築後の各地下鉄構造物との離隔は、上部の丸ノ内線で約 2m、下部の大江戸線で約 6m となっている。図-1、2 に概要図を示す。

ここで、丸ノ内線が上部を交差するため、トンネル構築に際し丸ノ内線構造物のアンダーピニングが必要となった。本報告書では、変状予測解析と計測結果の比較検討を行い考察を述べるものである。

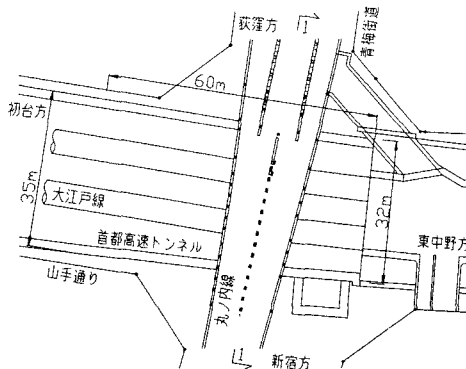


図-1 概要平面図

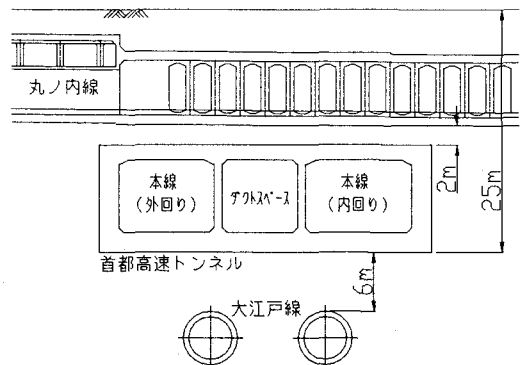


図-2 概要 1-1 断面図

2. 施工方法

(1) 丸ノ内線アンダーピニングの工法選択

営業線のアンダーピニングについては、過去種々の実績があるが、今回工事における工法選択のポイントで最も重要なのは、営業線への影響を営業に支障のない範囲に抑えられるか否かである。今回採用した方式は「下受梁方式」であり、このメリットは以下の通りである。

- ①施工実績が多く、比較的施工における信頼性が高い。
- ②営業線構造物下部に土塊を残さないため挙動予想が比較的容易である。
- ③プレロードジャッキを介して荷重を導入する場合、変状に対して、臨機応変な変状修正が可能である。

(2) 施工方法

以下にアンダーピニングの施工フローを示す。また図-3, 4, 5 に仮設の概要を、図-6 に施工ステップ図を示す。

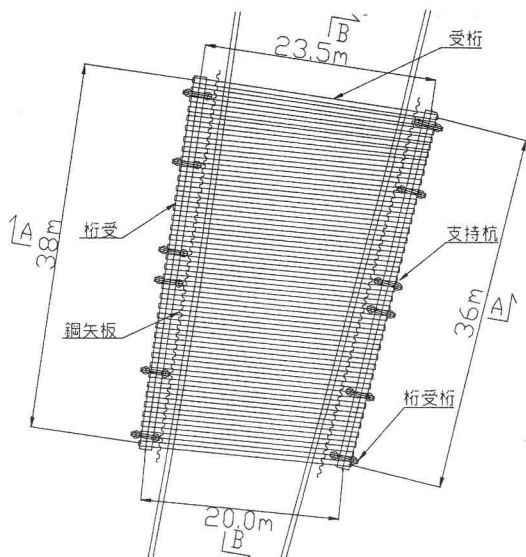
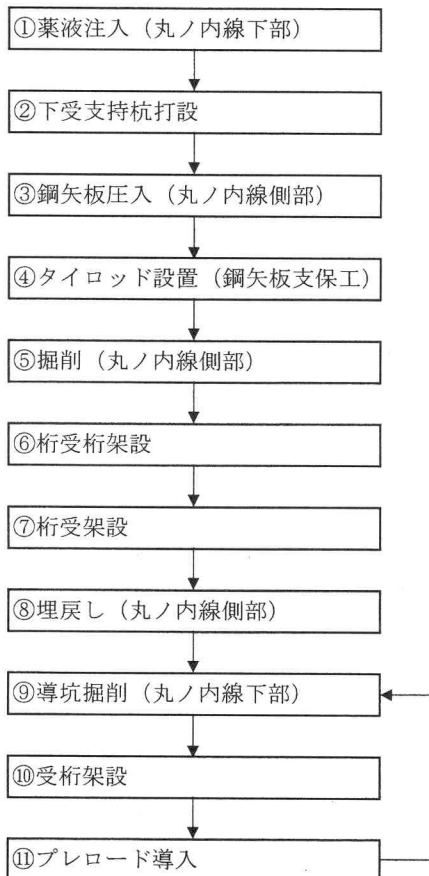


図-3 平面図

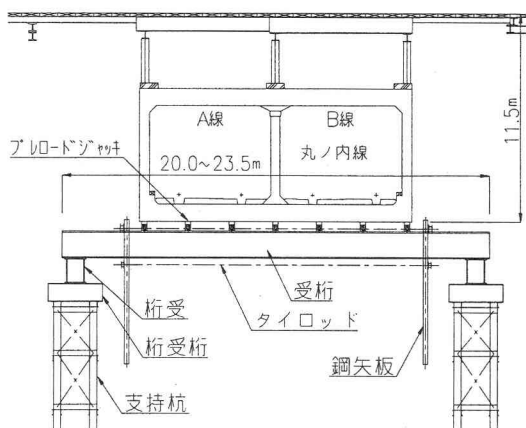


図-4 A-A断面図

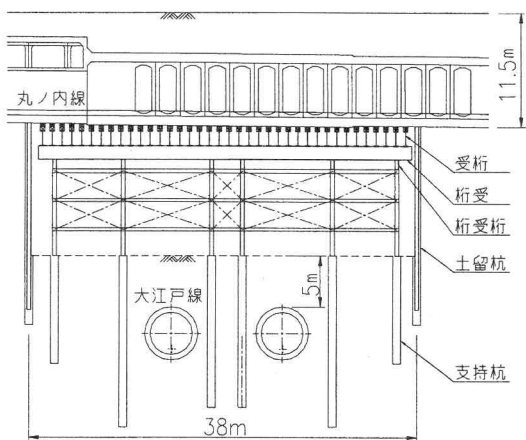


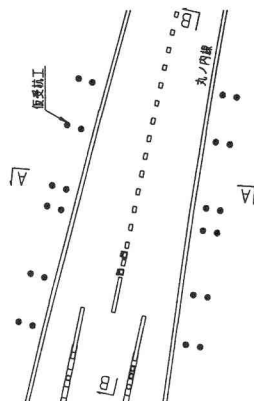
図-5 B-B断面図

図-6 アンダーピーニング施工ステップ図

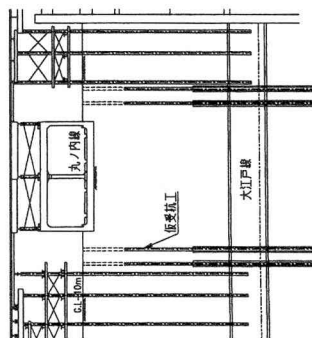
STEP1

下受支持杭②

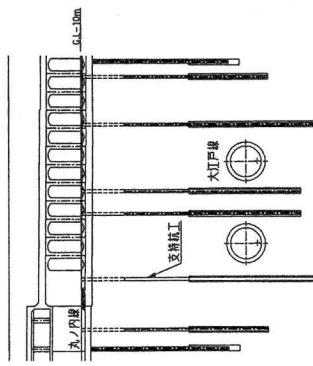
平面図



A-A断面図



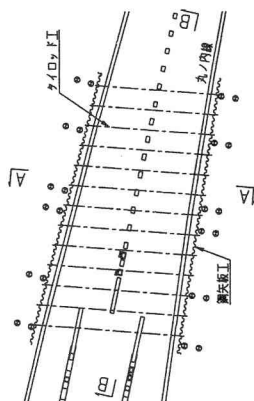
B-B断面図



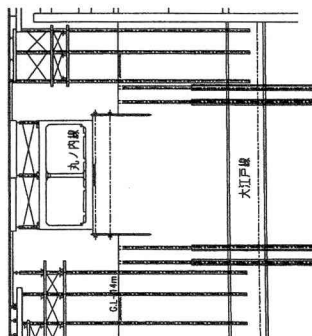
STEP2

鋼矢板圧入工③
タイロッド工④

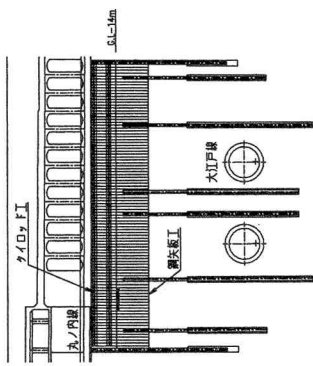
平面図



A-A断面図



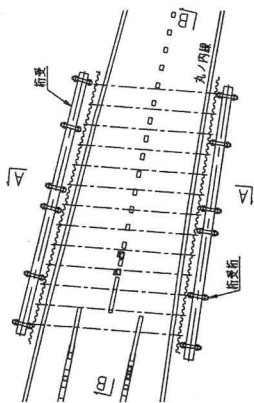
B-B断面図



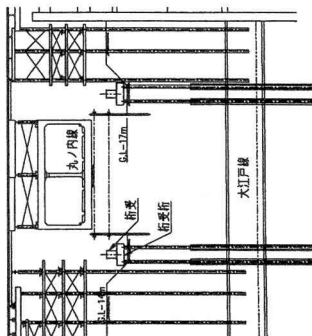
STEP3

桁受桁架設工⑥
桁受架設工⑦

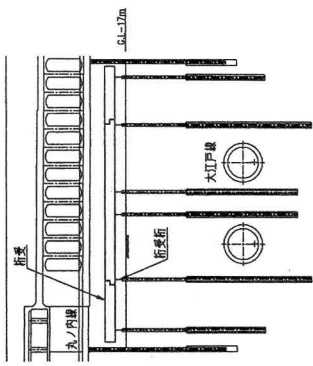
平面図



A-A断面図



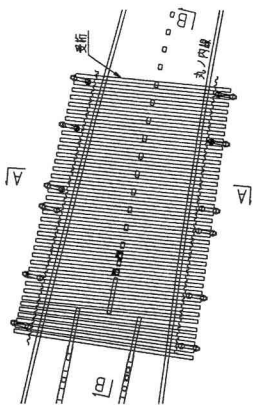
B-B断面図



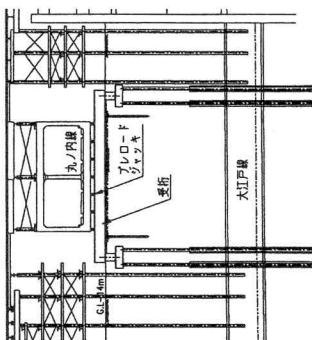
STEP4

導坑掘削工⑨
プレロード導入工⑩
受桁架設工⑪

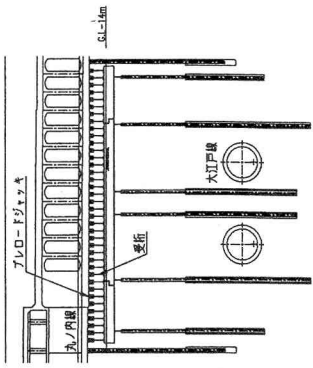
平面図



A-A断面図



B-B断面図



a) 薬液注入による丸ノ内線下部の地盤改良①

下受工導坑掘削時の地山強度増加、将来開削による地山の緩み防止等を目的とした薬液注入工を下受工に先行して行った。改良範囲は丸ノ内線下部になるため、丸ノ内線構内から底版に注入孔を設け、営業時間外に注入作業を行った。注入圧による丸ノ内線の隆起が懸念されたため、変状計測結果を注視しつつ施工を行った。

b) 下受支持杭打設②

下受工の荷重支持は、 $\phi 800$ で根固めした H 鋼杭 24 本に分担させている。杭施工は、狭隘な路下作業であること、Tog 層に大きなレキが存在することから TBH 工法を採用した。

下部に大江戸線シールドが存在するため、杭施工位置が限られ、杭スパンが大きくならざるを得なかった。その結果、各支持杭に大きな支持力が要求され、そのため、支持杭の沈下が懸念された。

支持杭の沈下において、即時沈下はプレロード導入により解消可能であるが、時間とともに進行する沈下は、丸ノ内線の変状に大きく影響する事になる。支持杭根固め部の品質管理（特にスライム処理）には厳重な管理を要した。

また、桁受の断面力低減、支持杭反力平均化を目的として、桁受の一部にゲルバー構造を取り入れた図-7 に桁受構造概要図を示す。

c) 丸ノ内線側部土留工③④

導坑掘削に先行して、支持杭の杭頭処理～桁受桁・桁受架設のために、丸ノ内線側部の掘削が必要となるため、土留壁として鋼矢板 (SP-4 型, $L=8.0\text{m}$) の圧入と、支保工としてタイロッド ($\phi 12.7\text{mm} \times 7$ 本より $\times 7$ 本 $\phi 2.8\text{m} \times 2$ 段) を施工した。

ここで、土留壁の変形による丸ノ内線変状を抑制するため、タイロッドの鋼線量は反力から決定する量の倍以上となっている。

d) 桁受桁・桁受架設⑤⑥⑦⑧

桁受桁と支持杭を連結する際、支持杭廻りを部分的に深堀りした。この際、丸ノ内線側部鋼矢板の変形からくる、丸ノ内線の変状を抑制するため、極力

短時間で設置し埋戻す必要があった。

そこで、肉厚の鋼板を接合する支持杭・桁受桁・桁受の連結ボルト孔を工場穿孔とし、精度の高い測量によってボルト孔位置を決定し、現場穿孔による施工時間を省略可能とした。

e) 導坑掘削⑨

導坑掘削～受桁架設は 2 箇所からの切抜げによった。導坑の掘削仕上がり高さは、受桁の桁高が 1.5m に対し 2.0m、掘削幅は受桁の中心から 1.0m の余堀を設定したが、非常に狭隘な箇所での掘削となったため、全て人力による切り崩し、ベルトコンベアーによる土砂搬出を行っている。また、掘削部を薬液注入工によって改良しているものの、導坑掘削開始後は早急に受桁設置、プレロード導入することを心掛けた。

f) 受桁架設⑩

受桁材は 1m ピッチで計 38 本仮設した。受桁材 ($H-1500 \times 500 \times 25 \times 50$) の桁長は、 $L=21.5 \sim 25.0\text{m}$ であり、狭隘な路下での架設を勘案し、3 分割の 2 箇所継手とした。架設方法としては、開口部から投入した桁材を構内に設置したホイストクレーン (10t 吊り) にて移動し、導坑部への受桁挿入は、レールを挿入ラインに設置し、吊り台車にてレール上を走行、挿入することとした。

g) プレロード導入⑪

1 本の受桁に対し、8～10 個のプレロードジャッキを配置し、プレロード導入によって受桁の先行変位を発生させた。導入ステップとしては、初期荷重として設計荷重の 80% を導入し、隣接の受桁にプレロードを導入する毎に導入荷重を 90%、100% と段階的に増加していくものとした。導入完了後は固定用のサポートジャッキにて受替えた。

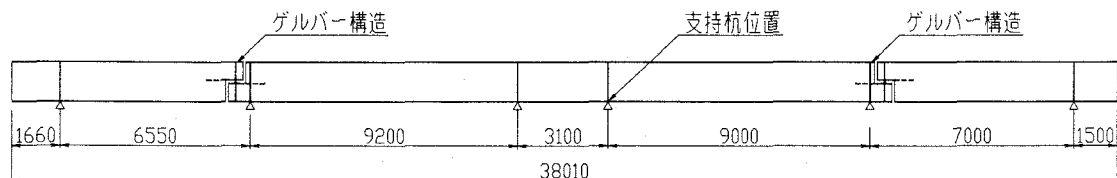


図-7 桁受構造図

3. 丸ノ内線の事前変状解析

(1) 解析条件

13のステップにて導坑掘削～プレロード導入を施工するものとして、施工ステップ毎の丸ノ内線鉛直変状を下部の地盤、仮設材をバネ評価した弾性床上の梁モデルとして逐次解析にて算出した。

a) 検討ステップ

表-1に検討ステップと各ステップ毎の設計荷重に対するプレロード導入率を示す。

b) 検討モデル

丸ノ内線の開削延長38.2mに対し、縦断方向延長150mのモデルを想定した。検討モデルを図-8に示す。

c) 荷重条件

鉛直方向の作用荷重として、死荷重と活荷重（路上自動車荷重、列車荷重）を考慮した。プレロード荷重としては、上記荷重から列車荷重を減じた荷重に各ステップ毎の導入率を乗じた値とした。列車荷重は、モデル縦断方向に980kN/m(10tf/m)としており、全荷重の5%程度である。表-2に荷重一覧表を示す。

d) 地盤バネ

原地盤バネ値は、事前に行った土質調査結果と過去の近接工事採用データを勘案し設定した。また、種々の過去に行われた類似検討事例を参考に、薬液注入工による改良地盤は、検討バネ値を50%増として、掘削による緩み領域については各々のバネ値の50%減とした。表-3に地盤バネ定数の一覧を示す。

表-1 施工ステップ毎のプレロード荷重導入率

歩行NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38		
STEP-1										80	80																	80	80											
STEP-2										80	80	80	80															80	80	80	80									
STEP-3									80	80	90	90	80	80													80	80	90	90	80	80								
STEP-4								80	80	90	100	100	90	80	80											80	80	90	100	100	90	80	80							
STEP-5						80	80	90	100	100	100	100	100	90	80	80									80	80	90	100	100	100	100	90	80	80						
STEP-6					80	80	90	100	100	100	100	100	100	100	90	80	80							80	80	90	100	100	100	100	100	90	80	80						
STEP-7				80	80	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80	80					80	80	90	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80	80				
STEP-8			80	80	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80	80			80	80	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80	80			
STEP-9		80	80	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80	80		80	80	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80	80	
STEP-10	80	80	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80	80	80	80	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80	80
STEP-11	80	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	80
STEP-12	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90
STEP-13	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

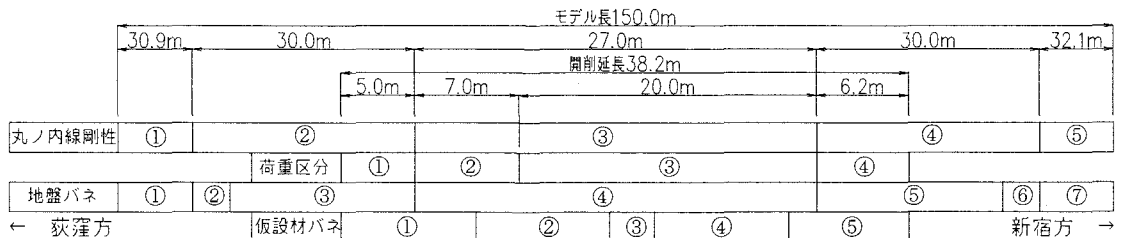


図-8 検討モデル

表-2 荷重一覧表

荷重区分		①	②	③	④
載荷荷重 (kN/m)	掘削範囲	2370	2160	2050	1660
	ゆるみ範囲	1185	1080	1025	830

表-3 地盤バネ定数一覧表

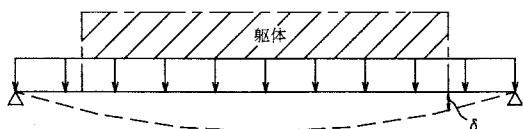
バネ定数(kN/m)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
通常範囲	1,750,000	1,650,000	2,470,000	2,290,000	2,090,000	1,390,000	1,300,000
緩み範囲	875,000	825,000	1,235,000	1,145,000	1,045,000	695,000	650,000

e) 仮設材バネ

単位荷重を作用させたときのたわみ量から、受桁、桁受、支持杭の鉛直方向バネ値を算定し、直列バネとして合成したバネ値を用いた。各々のバネ値算定方法を以下に示す。また表-4に仮設材バネ定数の一覧を示す。

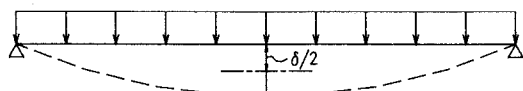
①受桁のバネ定数

躯体側壁部直下におけるたわみ量 (δ) を用いて受桁のバネ定数を求める。



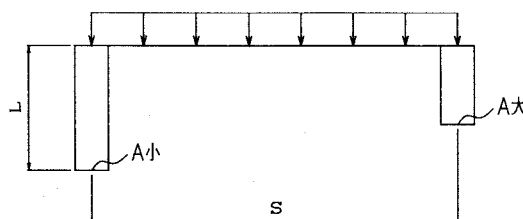
②桁受のバネ定数

桁受中央におけるたわみ量 (δ) の 1/2 (端部と中央部の平均値) を用いて桁受のバネ定数を求める。



③支持杭のバネ定数

荷重分担幅 (S) の両端における杭のうち断面積 (A) の小さい方の杭長 (L) と断面積 (A) を用いて杭のバネ定数を求める。



f) 丸ノ内線断面剛性

丸ノ内線構造物の縦断方向断面剛性は、構造物断面計上により5ケースに分け算出した。構造物の縦断方向打継ぎ目やクラックによる剛性低減は考慮していない。表-5に丸ノ内線の断面剛性 (断面二次モーメント) を示す。

(2) 解析結果

丸ノ内線の最大鉛直沈下量は、ステップ9の掘削時に1.47mmとなった。どのステップにおいても、最大沈下量発生位置は丸ノ内線の縦断方向開削範囲中央部付近である。各ステップの掘削時に沈下が発生し、プレロード導入時に沈下が復旧する傾向が繰り返されるが、残留する沈下量が徐々に累積していく

ものである。

また、丸ノ内線縦断方向の変状は、施工箇所における局部的なものではなく、広範囲に及ぶ事になる。

表-4 仮設材バネ定数一覧表

バネ定数	①	②	③	④	⑤
(kN/m)	78,000	61,500	110,000	65,200	105,800

表-5 断面剛性一覧表

断面二次モーメント	①	②	③	④	⑤
(m^4)	506	475	339	241	118

4. 変状計測管理

(1) 概要

地下鉄管理者からの地下鉄丸ノ内線許容変位は、アンダーピニング開始時を初期値として、鉛直方向の絶対変位で $-1.5 \leq \delta \leq \pm 0.0 mm$ であり、0.1mm精度を有する高精度計測が必要となった。また、突然の計測不能状態が考えられること、各々の計測結果を比較することで得られたデータの信頼性を確認する必要があることから丸ノ内線変状計測は、5種類の計測を併用することとした。

あわせて、事前変状解析の妥当性の評価、仮設材の健全性の確認のため、下受仮設材の変状計測を行った。

(2) 計測内容

図-9に丸ノ内線変状計測概要断面図を、図-10に概要平面図を、表-6に計測項目一覧表を示す。

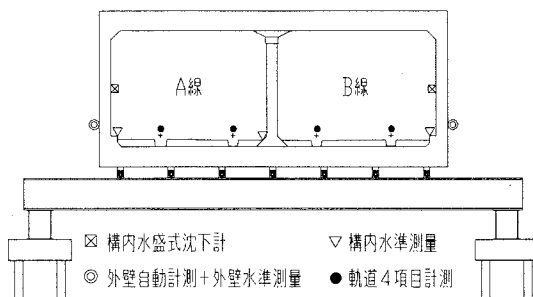


図-9 計測概要図

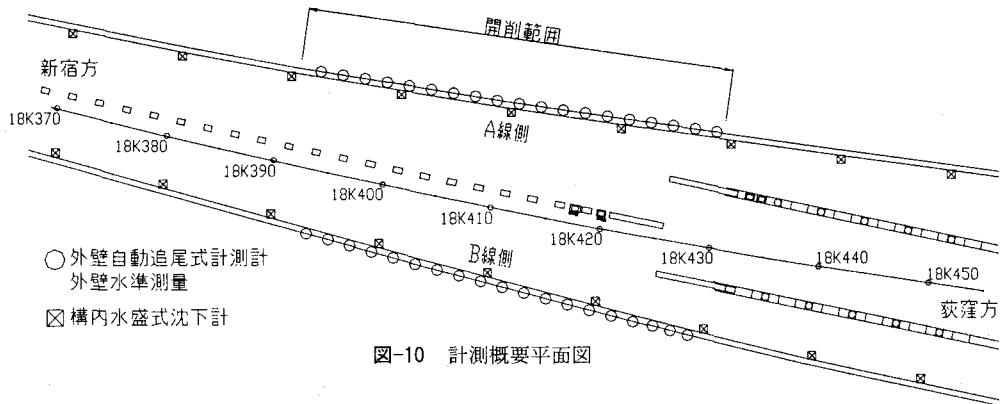


図-10 計測概要平面図

表-6 計測項目一覧表

項目	計測頻度	計測キロ程	計測延長	計測ピッチ	備考
構内水盛式沈下計測	1回/5分	18k+370m～18k+450m	80m	10m	自動計測
外壁自動追尾式沈下計測	1回/時間	18k+390m～18k+430m	40m	2m	自動計測
構内水準測量	2回/月	18k+310m～18k+510m	200m	10m	
外壁水準測量	1回/日	18k+390m～18k+430m	40m	2m	
軌道4項目計測	2回/月	18k+340m～18k+480m	140m	5m	軌道の軌間・水準・高低・通り

5. 変状解析と計測結果の考察

(1) 変状の傾向

併用した計測結果はほぼ一致しており、計測結果の信頼性を確認した。ここでは、計測頻度が多く、計測値のばらつきが小さい構内水盛式沈下計測の結果で丸ノ内線の変状分布と推移を確認した。また、支持杭の沈下量について考察を行った。

a) 縦断方向の変状分布

図-11で示したとおり、解析結果よりも実際は広範囲に渡って緩やかな変状が発生している。特に荻窪方において開削範囲外の沈下傾向が確認できる。このことから、丸ノ内線の縦断方向断面剛性が大きく低下していないこと、実際の開削範囲外の地盤バネ値が解析条件よりやや小さいことが推測される。

b) 各施工ステップ毎の変状推移

図-12から掘削時に沈下し、プレロード導入時に隆起し、残留した沈下量がステップに伴い累積していく傾向は解析結果通りである。発生した最大沈下量は解析沈下量の80%強に抑えられたが、ステップ10～13においては、解析結果ほど隆起傾向が確認できなかった。このことから、沈下の影響範囲が広範囲に発生したことにより、プレロードが負担する丸ノ内線荷重が増加していると考えられる。

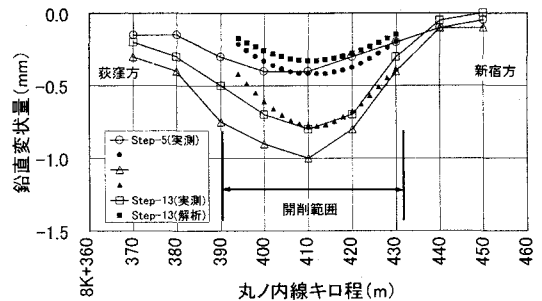


図-11 縦断方向の鉛直変状分布

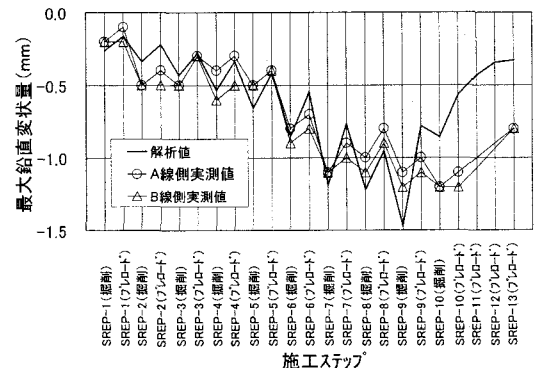


図-12 施工ステップ毎の最大鉛直変状分布

c) 支持杭沈下変状

支持杭の沈下量としては、杭材の弾性変形量と根固め部における杭自体の沈下量が考えられる。根固め部の沈下量が杭径の10%に達する時の荷重を極限支持力と仮定して¹⁾設計杭反力作用時の予測沈下量と比較したものを図-13に示す。この場合、弾性沈下量は全沈下量の10%程度であり、ほとんどが根固め部での沈下と予測される。実際の沈下量は、計算値の概ね半分程度であるが、荻窪方の杭沈下量がやや大きいことから、丸ノ内線縦断方向の変状分布と同様に、開削範囲外の地盤バネがやや小さいため、直近の支持杭が負担する荷重が大きくなっていることが推測される。

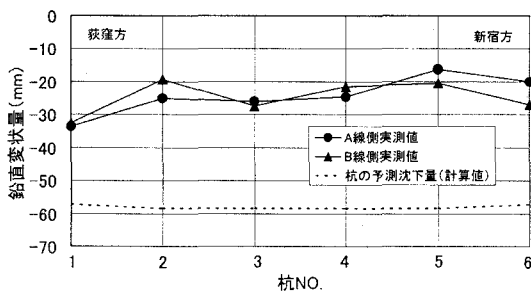


図-13 支持杭の鉛直変状

(2) まとめ

事前の変状解析と実際の計測結果は、概ね傾向が一致したと思われ、許容変位量内での施工完了を遂げることが出来た。丸ノ内線断面剛性、地盤バネ定数等、検討時設計条件設定の妥当性を詳細に検証するには至っていないが、変状値が非常に小さい状況の検討を行う上では、支持杭根固め部の被圧水頭の変動や、隣接箇所プレロード導入時の先行導入荷重減少等、検討条件に評価困難な要素が与える影響が無視できないと推測される。

謝辞：今回の工事においては、営業線である地下鉄丸ノ内線の安全確保を第一に施工したが、事前の解析結果通り、許容変位量内での施工を無事完了できたのは、東京地下鉄をはじめとする関係者の皆様のご指導があったおかげであり、この場を借りて深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鋼管杭協会：鋼管杭—その設計と施工—, pp. 300, 鋼管杭協会, 2000