

国際線エプロンにおける京急シールドトンネル動態観測について

国際線エプロン JV 神谷 誠

キーワード：京浜急行シールドトンネル，動態観測

1. まえがき

東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業の事業用地下に，空港アクセスとして重要な供用中の京浜急行のシールドトンネルが存在することから，エプロン舗装および路体・路床等の盛土および既設構造物対策工（軽量盛土）等による地盤沈下およびリバウンドの影響を抑制した設計・施工が求められた。また，列車運行の安全性確保が最優先されることから，施工によるシールドトンネルへの影響をリアルタイムに把握する目的として，トンネル内外に計測器を設置し常時，動態観測を行った。

本報告は，シールドトンネルの動態観測計画と計測結果の一例として掘削時リバウンドの解析値と計測値の比較を行ったものである。

2. 京浜急行シールドトンネル周辺の工事概要

京浜急行シールドトンネル直上および周辺で行われる工種と懸念される現象を表 2-1 に，その平面図と断面図を図 2-1 に示す。掘削工事が伴う①③ではリバウンド，締固め砂杭工の②では水平変位，④～⑥では沈下の現象が懸念される。

表 2-1 京急シールドトンネル直上および周辺で行われる工種と懸念される現象

施工順序	工 種		懸念される現象
①	地中障害物撤去工	掘削，埋戻	リバウンド
②	液状化対策工	SAVE, CDM-LODIC	水平変位(鉛直変位)
③	軽量盛土工	SGM工, FCB工	リバウンド, 沈下
④	路 床 工	水砕スラグ敷均	沈下
⑤	路 盤 工	再生砕石敷均	沈下
⑥	エプロン舗装工	コンクリート舗装	沈下

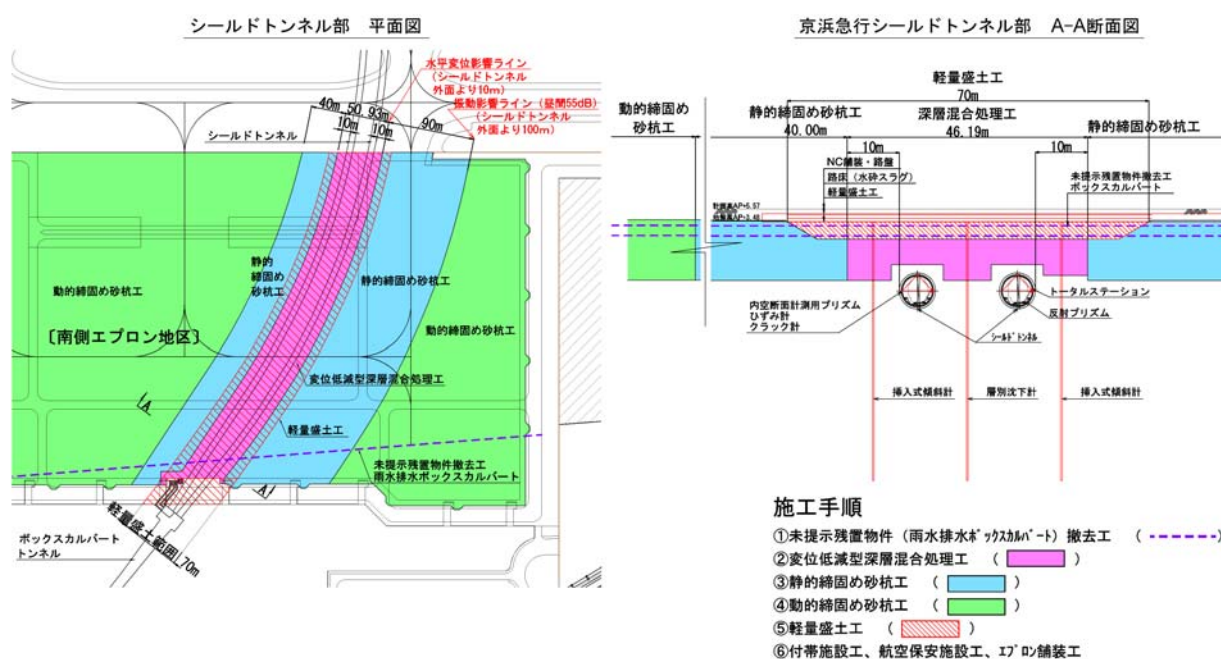


図 2-1 京急シールドトンネル直上および周辺で行われる工種

3. シールドトンネルの動態観測計画

3-1 京浜急行空港線トンネル近接施工に関する留意事項

事業の実施に際しては既事業者に影響を与えないことを前提に、入札公示時（2005年7月）に提示された「京浜急行空港線トンネル近接施工に関する留意事項」を以下に示す。

(1) 動態観測の実施

- ① 構造物の動態観測を行い、管理値を越えないように施工管理すること。
- ② 軌道検測の実施。
- ③ 変状管理に関するフローに従い実施（図3-1）。

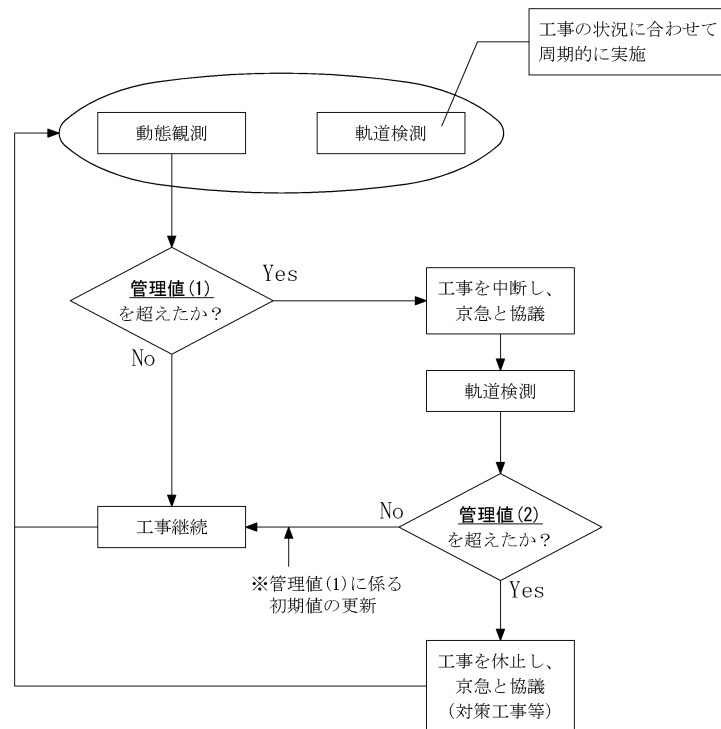


図3-1 変状管理フロー

(2) 動態観測方法

- ① 鉄道トンネルの観測は24時間連続とする。
- ② 観測結果がリアルタイムに分かるように自動計測システムを採用する。
- ③ 観測はPFI事業者が計測し、京浜急行電鉄にリアルタイムで報告する。

(3) 動態観測範囲

- ① 空港線天空橋駅～羽田空港駅間（第3換気所橋駅～羽田空港駅間）のうち、PFI事業者が行う解析結果をもって京浜急行電鉄と協議して計測範囲を決定する。
- ② 変位の基準点に関しては、京浜急行電鉄と協議の上、本事業の影響範囲外の点を設定する。
- ③ 測定はXYZ軸方向の1mm単位の初期値との差とする。

3-2 動態観測項目

3-2-1 シールドトンネル変位計測

(1) 計器の配置

工事の影響によるトンネルの動態観測をリアルタイムに行うため、トンネル壁面に自動視準・自動追尾型トータルステーション（以下TSとする）を設置し、内軌レールに測点となるプリズムを10m毎に取付けた（図3-2および図3-3）。計測範囲が650mと長いためTSを5台数珠繋ぎにして、両端の基準点（第4換気所と影響範囲外トンネル壁面に設置）から各TSの座標を求める基線測定（図3-4）を行った後、各測点プリズムの測定（図3-5）を行った。

※自動視準・自動追尾型トータルステーション

自動制御により継続的に光波による測距と水平・鉛直角度を計測する測量器。

軌道構造図（シールド曲線部）

R=800m (C=140)

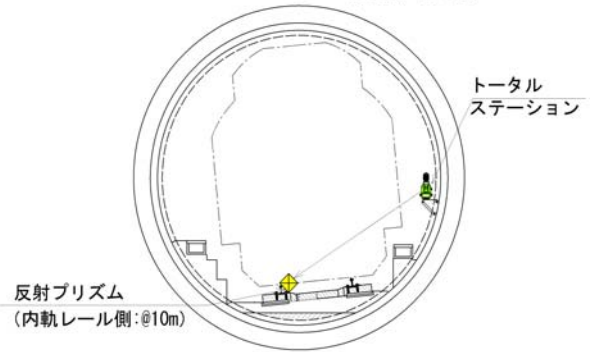


図3-2 TSおよびプリズム取付断面図

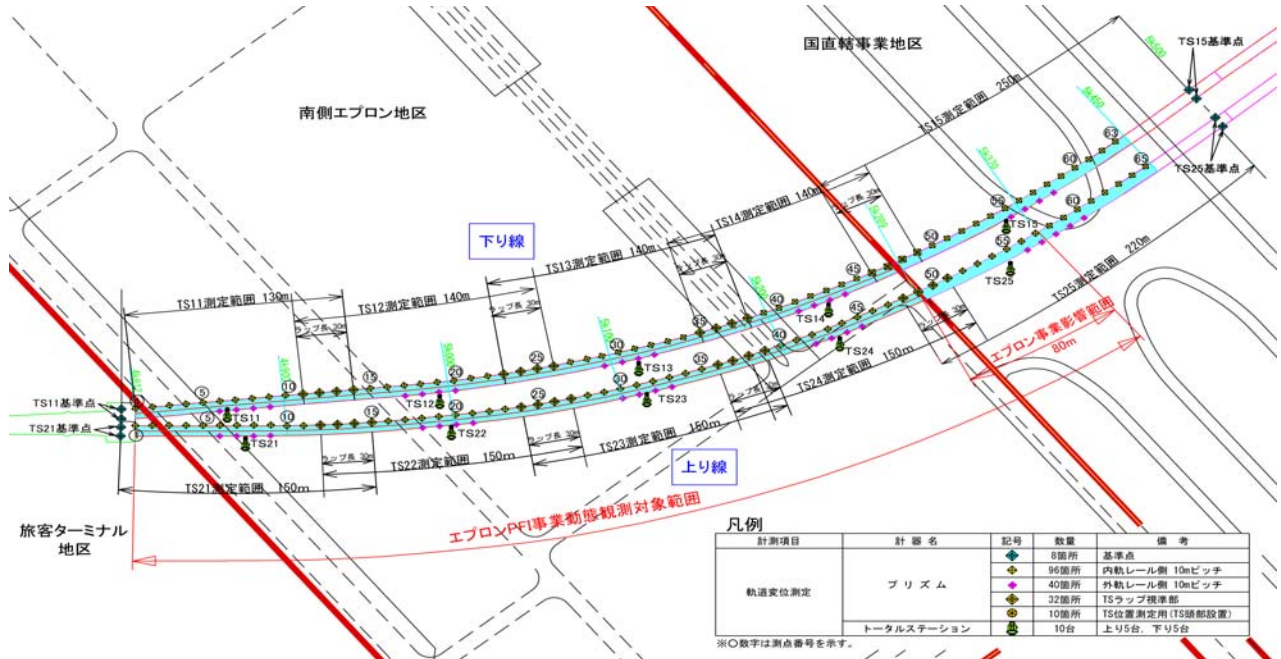


図3-3 シールドトンネル変位計測位置図

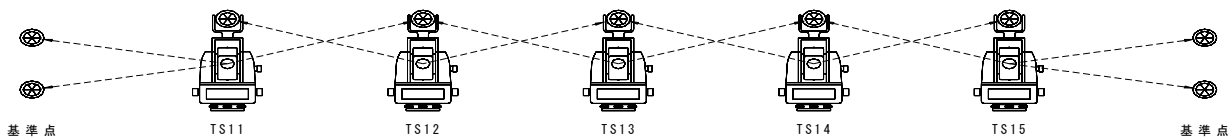


図3-4 基線測定概念図

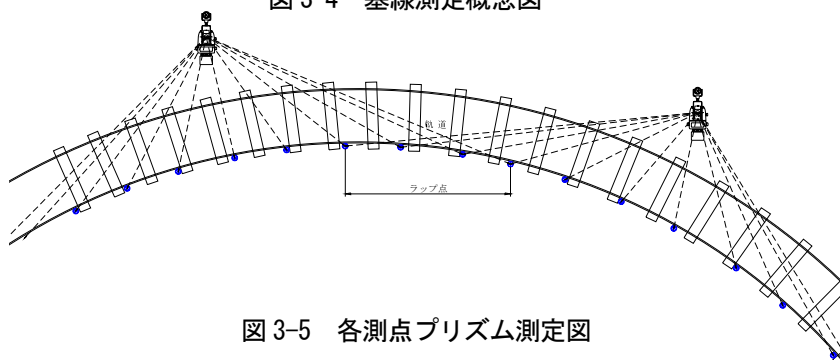


図3-5 各測点プリズム測定図

(2) 計測精度および計測頻度

供用中の鉄道トンネルであり安全確保を最優先するため、以下のような計測精度向上及び計測頻度増加の対策を図った。

1) 計測精度の向上

TS を 5 台数珠繋ぎにして測定を行うと、基準点から遠い TS や測定点ほど盛替え誤差が累積される。特に、各測定点を観測する TS の座標を求める“基準点⇔各 TS 間”の基線測定の精度を確保する必要がある。本計測システムにおいて、基線測定の精度向上のため以下の計測方法を採用する。

- ① 各 TS 直上にプリズムを設置し、TS の位置を直接測定することにより、盛替え誤差を軽減させる。(図 3-4)
- ② 各 TS 間の距離をほぼ同距離にし、TS 間に生じる誤差を同程度とさせる。
- ③ 観測点にラップ観測区間(30m)を設けることにより、各 TS から測定したラップ点は閉合されるため、ラップ点の閉合結果より各測定点の測定値について補正を行い、開放トラバースによる誤差を軽減させる。(図 3-5)
- ④ 直接測量を 1 回/月行い、基準点および TS 計測結果のチェック、更新を行う。
- ⑤ 工事着手前の 2 ヶ月間で事前計測を行い、トンネル内の環境因子(温度・湿度・気圧・列車振動等)による影響、計測機器の誤差の固有値を把握し、計測プログラムに反映させる。また、この計測プログラムによる事前計測のデータを用いて、本エプロン事業の初期値を設定した。

2) 計測頻度の増加

事前計測において、計測精度を確保しながらリアルタイムな計測を行うための検証(計測頻度増加の検証)を行った。頻度の検証は、TS の座標を求める基線測定(基準点⇔各 TS 間)と各測点プリズム測定(TS⇒プリズム)に分けて行い、測定 1 回当りにデータを取得する回数、対回測定(正反測定)の有無、測定時間(ピッチ)、精度をパラメータとして検証した。(表 3-1 および 3-2)

(a) 基線測定(基準点⇔各 TS 間)

基準点⇔各 TS 間の基線測定(図 3-4)の精度および頻度の検証結果を表 3-1 に示す。

表 3-1 計測頻度の検証(基線測定)

測定方法 (測定1回当りのデータ取得回数) (対回測定の有無、回数)	測定時間 (測定ピッチ)	精度(3σ) mm	
		水平方向	鉛直方向
1回測定 正のみ	10分~15分	2.79	2.29
1回測定 2対回	40分~50分	1.47	1.32
5回連続測定 正のみ	15分~20分	2.19	1.32
5回連続測定 1対回	30分~40分	1.41	1.29
5回連続測定 2対回	1時間~ 1時間20分	1.19	1.14

※連続測定：1つの測点プリズムを測定する際にデータを取得する回数。5回測定の場合、5つの計測データの平均値を1回の測定結果とするため、1回測定の場合より精度は向上する。

※対回測定：測量における基本動作。正測定と反測定(望遠鏡を反転させて行う測量)を両方行うことにより測定誤差要因を消去する。

表 3-1 より、精度のよいデータを得るためには最低でも対回測定が必要であると考えられる。その中でも測定時間が短く、精度も良好な「5回連続測定 1対回」で“基線測定”を行うことにした。

また、基線測定を毎回行うと時間を要するため、基線測定は 4 回/日(施工の影響による誤差を極

力避けるため、休工時間である7:00, 12:00, 19:00, 0:00に設定)のみ行うこととした。

(b) 各測点プリズム測定 (TS⇒プリズム)

各測点プリズム測定 (TS⇒プリズム) (図3-5)の精度および頻度の検証結果を以下に示す。

表3-2 計測頻度の検証 (各測点プリズム測定)

測定方法 (測定1回当りのデータ取得回数) (対回測定の有無、回数)	測定時間 (測定ピッチ)	精度(3σ) mm	
		水平方向	鉛直方向
1回測定 正のみ	15分	0.80	1.22
1回測定 1対回	25分~30分	0.44	0.73
3回連続測定 正のみ	30分~35分	0.62	1.13
3回連続測定 1対回	1時間~ 1時間10分	0.66	0.59

※ 連続測定: 1つの測点プリズムを測定する際にデータを取得する回数。3回測定の場合、3つの計測データの平均値を1回の測定結果とするため、1回測定の場合より精度は向上する。

※ 対回測定: 測量における基本動作。正測定と反測定(望遠鏡を反転させて行う測量)を両方行うことにより測定誤差要因を消去する。

表3-2より、基線測定同様に精度のよいデータを得るためには最低でも対回測定が必要であると考えられる。その中でも測定時間が短く、精度も良好な「1回測定 1対回」で“各測点プリズム測定”を行うことにした。

更に計測頻度を上げるために、1対回の測定を正のみ・反のみの計測に分けて交互に測定を行い、1つ前の計測結果と併せて計測結果とすることとした。例えば、今回の測定で“正の測定”を行った場合、前回の“反の測定”の結果と併せて対回計算を行って今回の結果として算出し、また次回の“反の測定”の時は今回の“正の測定”の結果と併せて次回の結果として算出することとした。

この方法により、測定時間を20分(5分程度のインターバル含む)まで短縮することができ、よりリアルタイムな計測が可能となった。

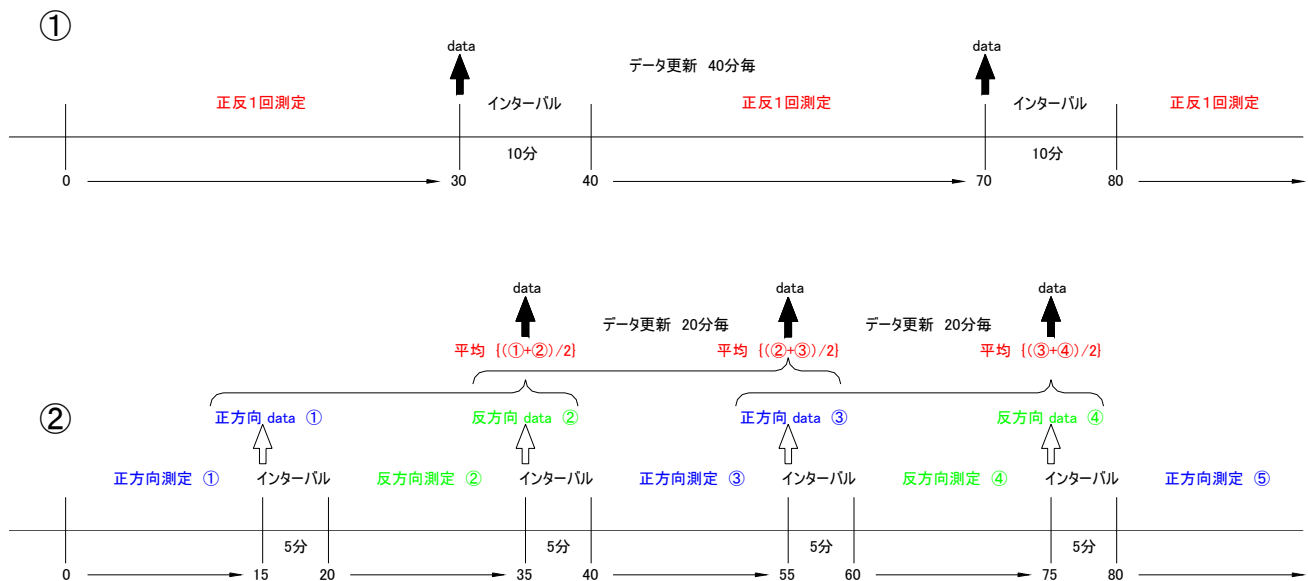


図3-6 計測頻度検証

(c) 計測頻度検証のまとめ

以上の検証より、基線測定は5回連続測定1対回で4回/日、各測点プリズム測定は1回測定1対回で20分ピッチと設定し、シールドトンネルのリアルタイム計測を行うこととした。

3-2-2 その他の計測

(1) 二次覆工応力度および二次覆エクラック

掘削時のリバウンドや断面変形による二次覆工コンクリートの応力度およびクラックの変化を把握するため、二次覆工コンクリート表面にひずみゲージおよびクラックゲージを取付けて計測を行う。

取付位置を図3-7に示す。軽量盛土工のブロック割に準じて12ブロックに分割した各ブロック中央の断面においてひずみゲージ（天井部1箇所 縦横断方向）を取付け、二次覆工応力を計測する。更に、3断面に1箇所は重点計測対象ブロックとし、天井部に加え天井から60°方向の位置2箇所にもひずみゲージ（縦横断方向）を取付ける。（重点計測対象ブロック中央断面をA断面、それ以外をB断面とする）。また、ブロック境界部（土被りが浅い第4換気塔近傍の2断面のみ）をC断面として、シールド天頂部の縦断方向の応力を測定する。

詳細の取付位置は平成18年12月に実施した打音クラック調査結果を基に注目クラックを選定し、その近傍に取付ける。

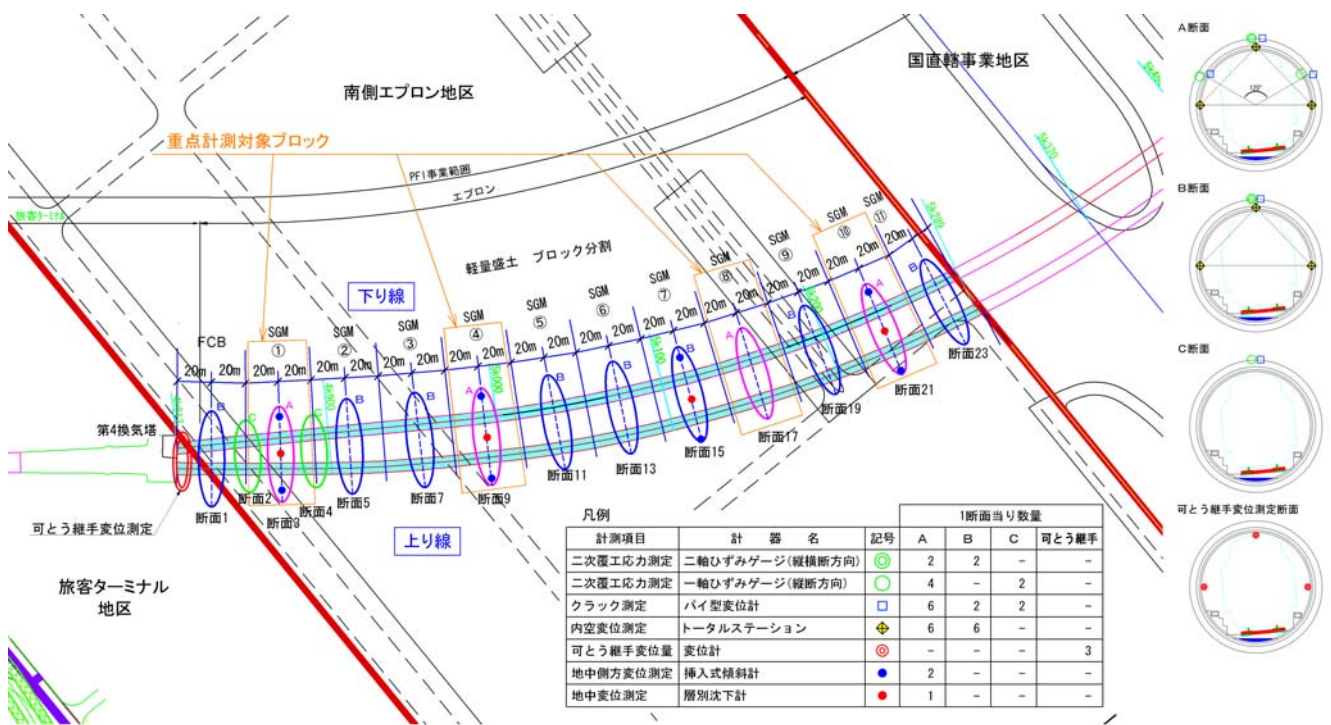


図3-7 二次覆工・可撓継手・トンネル周辺地盤計測位置図

(2) 可撓継手変位

第4換気塔から約5mの地点にある可撓継手のトンネル頂部、横(左右)の3ヶ所に変位計を取り付けて可撓継手部の挙動を計測する。

(3) シールドトンネル周辺地盤変位

重点計測対象ブロックにおいて、上下線シールドトンネル間に層別沈下計、トンネル外面から9mの位置に挿入式傾斜計を基盤層まで設置し、地盤の鉛直および水平変位を計測する。

3-3 計測システム

本計測は施工による京浜急行空港線への影響をリアルタイムで把握して、列車運行の安全性を確保することを目的としている。計測システムは、トンネルの挙動を迅速かつ的確に把握する為に、集中自動管理システムとした。第4換気塔内に集中計測室を設けて、各種計測器の測定値をデータ収集用パソコンに収集した上で、ADSL回線を用いて関係者にデータを転送する。

管理値超過時には、関係者のパソコンや携帯電話にメールで送信を行い、24時間監視体制をとる。

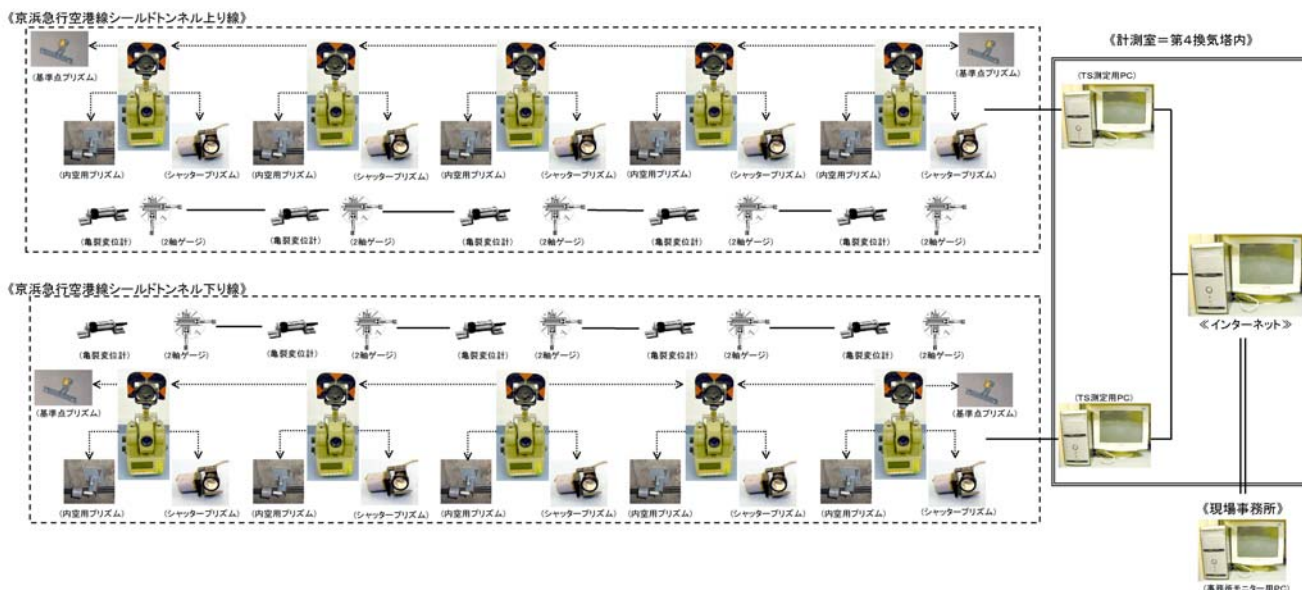


図 3-8 計測管理システム

4. 動態観測計測結果（軽量盛土工(SGM)掘削時のリバウンド）

4-1 SGM 掘削条件および対策

軽量盛土工(SGM)各ブロックにおける施工状況縦断面図を図 4-1 に示す。第 4 換気所近傍の①～③ブロックにおいて掘削深さ約 3m と他ブロックよりも深く、かつ掘削完了後の土被りが 6.4～8.7m と他ブロックより浅いため、掘削時のリバウンドの影響が他ブロックよりも大きいと考えられる。

従って、実施工では、鉄道の安全運行を阻害する局所的なリバウンドを抑えるため、1ブロックを2分割し掘削延長を 40m→20m に変更した。施工は一番リバウンドが懸念される①ブロックから順に行ったが、トンネルの挙動を動態観測でリアルタイムに確認しながら施工を行うのと同時に、①ブロックの施工時は、二次覆工の剥落により鉄道の安全運行に支障をきたさないようにするため、影響範囲に剥落防護ネットを設置し、二次覆工の目視点検を毎晩行った。

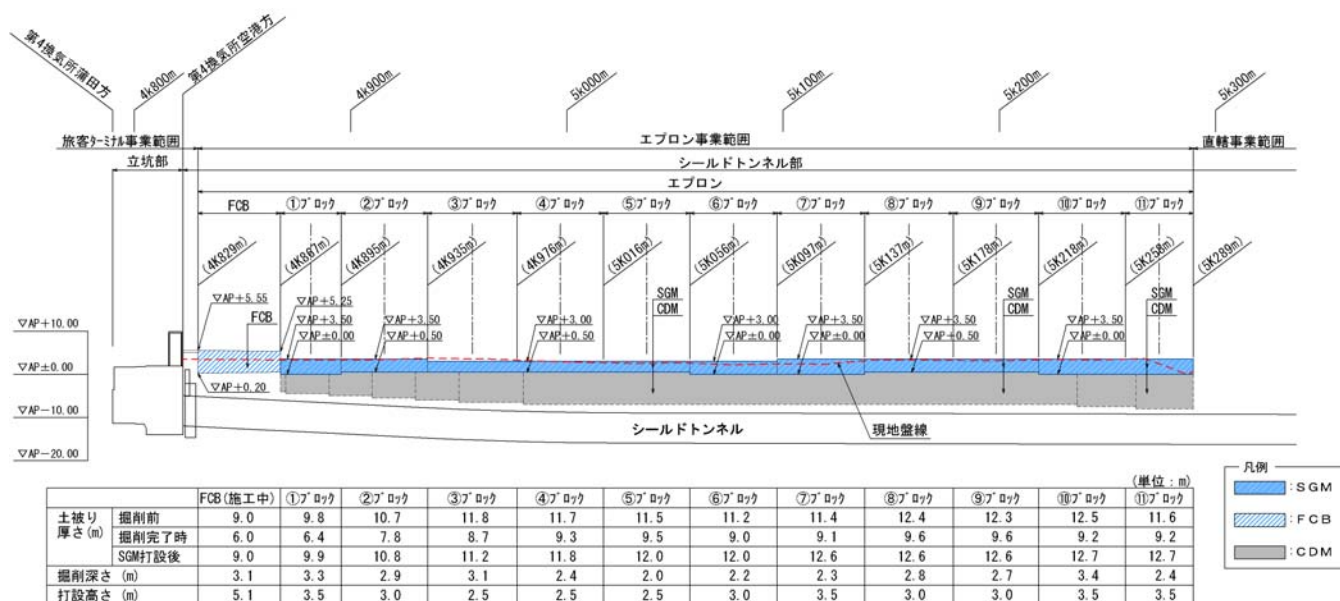


図 4-1 SGM施工状況縦断面図

4-2 SGM 掘削時のリバウンド解析値と計測値の比較

軽量盛土工(SGM)掘削に伴うシールドトンネルのリバウンド解析値と計測値の比較を図4-2に示す。解析ではリバウンド量は最大28mmであったが、実際は第4換気所近傍の①～③ブロックにおいて最大12mm(解析値の43%)、その他のブロックでは平均5mm(解析値の20%)であった。計測値が解析値の5割未満であった原因は、①施工延長を40m→20mに短縮したこと、②解析で無考慮のシールドトンネル直上で施工済の深層混合処理工が一体型の版となり変位を抑制したこと、③解析に用いる地盤の弾性係数は鉄道指針に準拠し通常の約3倍としたが、実際にはそれ以上の弾性係数であったことが可能性として考えられる。

設計時は、図4-2に示す解析値に対して、鉄道運行の安全性、及びシールドトンネル本体の健全性を確認していた。実施工時には、シールド挙動をさらに小さく抑えられたことから、前記の安全性及び健全性は十分確保できたと考えている。

またシールドトンネルの変位のみならず、二次覆工コンクリート応力度、クラック、可撓継手変位についてもリバウンドに伴う有意な変動は見られなかった。

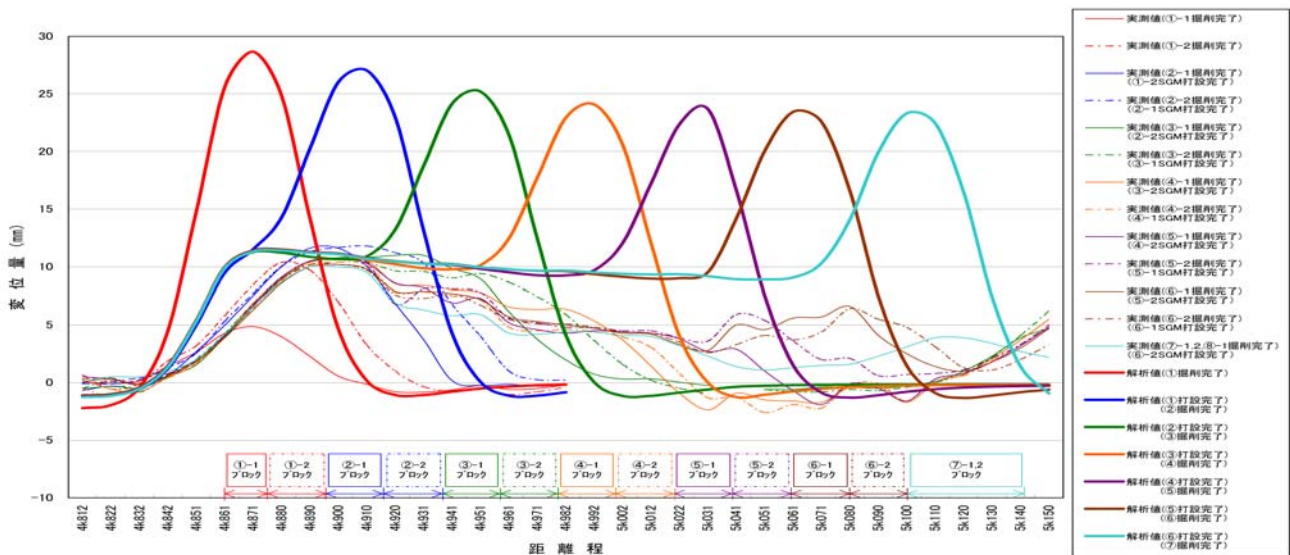


図4-2 シールドトンネルのリバウンド解析値と計測値の比較

5. あとがき

動態観測をリアルタイムに行い、大量輸送、高速性、安全性といった鉄道の輸送特性を損なうことなく軽量盛土工(SGM)掘削を進めることができた。引き続き、今後も路床・路盤・エプロン舗装工についても鉄道の安全運行を堅持するためシールドトンネルの挙動を常時動態観測し、問題が生じた場合には即作業中止、対策工の検討・実施が出来る体制を確保した上で工事を遂行する。