

高圧噴射攪拌工法による供用中の鉄道トンネル補強工事

清水建設株式会社土木横浜支店 正会員 ○渡邊 洋輔
 横浜高速鉄道株式会社工務部施設課 杉山 伸康
 日本シビックコンサルタント株式会社 横山 顕

1. はじめに

トンネル補強工事は、みなとみらい線のシールドトンネルにおいて一部に変状が確認されたことをうけ、トンネル上部の土地利用計画による上載荷重の増加ならびに首都直下型地震に備えるための恒久的な対策工事である。補強工事は、高圧噴射攪拌工法による外部補強工と、変状の大きい区間に対する鋼製段差継手セグメントによる内部補強工からなっている。本報告はこれらの補強対策工のうち、外部補強工について試験施工から本施工完了までの経過を述べる。また、トンネル構造物ならびに列車運行の安全性を確保するために実施した計測管理の結果についても述べる。

2. 工事概要

本補強工事は、平成24年9月から平成27年3月までの2年半にわたって施工した。将来的な地上改変によって作用すると考えられる荷重を $q=120\text{kN/m}^2$ とし、トンネル延長約110m区間に対して Superjet-midi 工法(以降「SJM工法」)によって約 $V=24,700\text{m}^3$ の改良体を造成するものである。

3. 外部補強工概要

外部補強工は将来的な地上改変によって作用すると想定される荷重からトンネルを防護する目的で実施した。図-1はトンネルと改良体との位置関係ならびに改良体の形状を示したものである。改良体は地上改変によって生じる上載荷重をトンネルに作用させずに、基盤層に直接伝達させる門型構造を採用した。施工はトンネルとの位置関係で近接部、側部および頂部に分類し、施工の影響が大きいと考えられる近接部と頂部は夜間線閉時間に行い、側部はトンネルへの影響が限定されることが考えられることから施工時間の制約を設けずに行った。

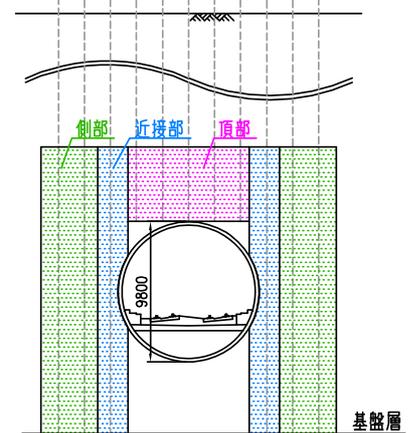


図-1 外部補強断面図

4. 計測工概要

トンネルは横に伸びる方向に変形(以降「横伸変形」)が確認されており、地盤改良を行うことによって周辺地盤に乱れが生じてさらに横伸変形が進行することが懸念された。このため、レーザー距離計による内空変位計測を実施し、トンネルの変形を監視した。そのほか表-1に示す計測機器を設置し、トンネルおよび周辺地盤の挙動を計測した。

表-1 計測管理項目

計測対象	トンネル変位計測			軌道計測	地盤計測	
計測内容	内空変位計測	水盛沈下計測	ひずみゲージ	軌道計測	層別沈下計	間隙水圧計

5. 外部補強工試験施工

外部補強工の対象土質は粘着力 C が 50kN/m^2 を越える高い粘着力を有する粘性土地盤であることから、SJM工法による改良体の造成径が目標とする $\phi 3,200\text{mm}$ を下回ることが懸念された。そのため、所定の改良径や設計強度が確保出来ること、および近接するトンネルへの影響を確認するための試験施工を実施した。1回目の試験施工は、SJM工法の仕様の範囲内で削孔径、プロジェクト(以降「PJ」)のピッチ、PJの引上げ速度、PJの添加剤の有無、造成時の引上げ速度、造成時の回転数、および固化材の種類を変えて複数の組み合わせで試験杭の造成を行い、最適と考える仕様(表-2)の評価を行った。評価の方法は、造成杭ごとに中心からの距離を変えてコアボーリングを行って試料を採取し、硬化したコアの割合およびコアの一軸圧縮強度を測定して可否の判定を行った。2回目の試験施工は、1回目の結果の再現性が得られることを確認するために、表-2の仕様により試験杭の造成を行った。その結

キーワード 高圧噴射攪拌工法, 営業線地下鉄トンネル, 補強工事, 試験施工, 計測管理, 内部補強

連絡先 〒231-0041 神奈川県横浜市中区吉田町65番地の7 清水建設土木横浜支店土木部 045-253-2280

表-2 主な試験施工項目と確定仕様

※色付箇所が確定仕様

削孔径	PJ ピッチ	PJ 引上速度	混和剤	引上速度	回転数	使用固化材
φ140	0.5m ピッチ	6 min/m	6kg/m ³	12 min/m	4 rpm	SJ-2 号
φ216	1.0m ピッチ	10 min/m	12kg/m ³	24 min/m	3 rpm	SJ-3 号

果、1 回目ではφ3,200mm の径が確認されたが、2 回目では、φ1,000mm～1,800mm と出来形がばらつく結果となった。

トンネルの内空変位は、地盤改良によって横伸変形がさらに進行することが懸念されていた。このため、当初計画では外部補強および内部補強の併用区間では、内部補強を先行して実施し、その後、外部補強を行う施工手順を予定していた。しかし、試験施工を実施した結果、近接部および側部の地盤改良を行うことによって横方向に生じていた変形が復元する方向に変形し、頂部の地盤改良を行うことによって横伸変形を生じることが確認された(図-2)。試験施工時において、1 断面の施工完了時には、縦伸変形が卓越して残るといった結果であった。

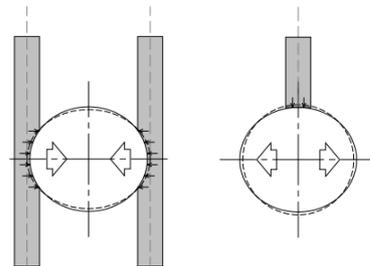


図-2 トンネル変形の傾向

6. 試験施工結果の考察と本施工の施工方法

試験施工の結果、補強範囲全体に対して同一の改良径が得られないことが確認された。原因としては、対象地盤が高い粘着力を有する地盤であるとともに、基盤層の傾斜が急な複雑な地層を形成する地盤であることに起因すると考えられた。このため、補強区間を約10m の11ブロック(A からK ブロック)に分割し、ブロックごとに試験杭を先行して改良径を設定して杭を割付けし、造成を行うという施工方法とした。内部外部補強の施工順序は、トンネルの変形が当初想定した横伸変形ではなく復元方向の変形であったことから、内部補強併用区間から最も遠いA ブロックを最初に施工して変形



図-3 ブロック割付 ※青部が内部併用区間

の傾向を確認し、次に内部併用区間の隣であるFブロックを施工して変形の傾向を再確認し、いずれのブロックでも復元方向の変形をするようであれば、計測管理で安全性を確認しながら、外部補強を先行する手順とした。

7. 施工結果および計測結果

本施工では、ブロックごとに四隅の4本の先行杭を施工してコアボーリングを実施して有効径を確定し、施工をすすめた。有効径はφ2,000mm～φ2,400mm となり、当初の目標であり、1 回目の試験施工結果でもある、φ3,200mm の有効径が得られたブロックはなかった。

計測の結果、内空変位については試験施工と同様、近接部および側部の施工時には復元方向の変形が生じ、頂部の施工時には横伸変形が確認された。復元方向の変形量と横伸変形量とは、その絶対値が概ね同等であり、トンネルにいびつな変形が生じていないことを確認した。水盛式沈下計による沈下計測の結果は、全体的に10mm 程度の隆起傾向が確認された。ひずみゲージの計測の結果は、内空変位計測結果と相関してトンネル覆工体にひずみが発生していることが確認された。このことから、トンネルの覆工体に想定外の応力が発生していない事が確認できた。

軌道計測の結果は、外部補強施工箇所近傍で僅かに変位はみられたが、列車の運行に支障となる変位は確認されなかった。これは、当該箇所が直結軌道ではなくパラスト軌道であることが一因であると考えられる。

地盤計測結果は、外部補強施工箇所近傍で僅かに変位はみられたものの、大きな変位は確認されなかった。

8. 事後調査工

地盤改良実施後、A～K の各ブロックに対して近接部、側部、頂部の1 箇所ずつ造成杭を選定し、コアボーリングによる事後調査工を実施した。その結果、すべての杭で硬化コアの割合および一軸圧縮強度試験の結果が基準値以上であることが確認できた。

9. まとめ

供用中の鉄道トンネルの近傍で、高圧噴射攪拌工法による補強工事を行った。その結果、列車の運行に対して支障を生ずることなく、設計強度を満足するトンネル補強を完成することができた。