

地下室拆复建工程对旁侧地铁影响的实例分析

陈俊辉, 许磊, 岑仰润

(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要:本工程位于杭州市拱墅区地铁 2 号线边, 场地内分布有 1 层老地下室, 需拆除原有地下室改建为 2 层地库, 基坑开挖范围内以淤泥质粉质黏土为主, 基坑位于中心城区, 邻近主要市政道路, 且西侧道路下为运营地铁, 周边环境非常复杂, 拆复建期间要确保周边环境特别是运营地铁安全, 基坑变形控制和环境保护是本工程需考虑的重点。本工程邻近地铁一侧基坑采用 800 厚地下连续墙结合 1 道钢筋混凝土支撑和 2 道带轴力补偿系统钢支撑, 其余范围采用咬合桩结合 2 道钢筋混凝土内支撑, 远离地铁 A 区大坑设置钢筋混凝土栈桥, 邻地铁侧 B 区坑内采用高压旋喷桩抽条加固。实际施工过程中发生了地铁隧道变形超控制值、南侧污水干管渗漏、地墙和桩基施工遇地下障碍清障难等事故, 可为类似软土地基基坑设计、施工、基坑变形控制、地铁保护监测、采用有限元风险分析软件预测地铁变形和地铁设施的保护与修复提供参考。

关键词: 软土; 清障; 旁侧基坑; 变形超控; 隧道监测; 地铁隧道; 有限元分析

中图分类号: TU74

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0020-14

Case study of basement demolition and reconstruction on adjacent subway

CHEN Jun-hui, XU Lei, CEN Yang-run

(Hangzhou Geotechnical Engineering and Surveying Research Institute with Limited Liability, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: This project is located near Metro Line 2 in Gongshu District, Hangzhou City. There is an old basement distributed in the site, and the original basement needs to be demolished and rebuilt into a two-story basement. The soil in excavation range of the foundation pit is dominated by silt and silty clay. During the demolition and reconstruction, the surrounding environment should be ensured, especially the safety of subway operation. Hence the deformation control of foundation pit and environmental protection are the key points to be considered in this project. The foundation pit close to the subway side supported by 800-thick underground continuous wall combined with 1 reinforced concrete support and 2 steel support with axial force compensation system, the rest of the pit was supported by the piles combined with two reinforced concrete internal bracing. Reinforced concrete trestle bridge was used in A division, which is far from the subway. High pressure rotary jet pile pumping reinforcement was used in B division. During the actual construction process, accidents such as subway tunnel deformation exceeding the control value, leakage of the southern sewage main pipe, difficulty in clearing underground obstacles during the construction of ground walls and pile foundations happened. This can provide reference for the design, construction, deformation control of foundation pits on soft soil foundations, subway protection monitoring, prediction of subway deformation using finite element risk software, and protection and repairment of subway facilities.

Key words: soft soil; clearing the barrier; adjacent excavation; deformation super control; tunnel monitoring; subway tunnel; finite element analysis

0 引言

在基坑开挖过程中, 土体应力重新分布、施工

扰动、固结沉降、基坑降水、止水帷幕渗漏等因素会导致周边地层产生变形, 从而引起邻近地下设施(如地铁隧道)产生内力和变形^[1-3]。由于已运营地

铁线路对变形要求极为严格, 基坑施工过程中应采取合理的支护形式和开挖方式, 将基坑开挖和降水对地铁隧道的影响降低到最小^[4-6]。

本文以某邻近地铁隧道的软土地基旁侧地下室拆复建基坑工程为实例, 采用有限元数值分析方法, 预测了旁侧基坑开挖对邻近地铁隧道的影响, 结合地铁保护监测实测数据和施工工况, 对基坑开挖引起隧道变形做了数据分析, 总结了软土基坑开挖影响隧道的相关工程经验^[7]。软土地基变形控制措施尤为关键, 本工程在邻近隧道一侧采用了 800 mm 厚地下连续墙作为围护结构, 邻近地铁侧小基坑坑底采用高压旋喷桩封底抽条加固, 邻近地铁侧采用钻孔灌注分隔桩分成小基坑开挖, 并采用带伺服系统钢支撑控制变形^[8-9]。该基坑工程实施过程中发生了地墙施工清障造成地铁变形大、污水管渗漏、地铁变形超控制值等事故, 因此本项目的工程经验能够对类似地铁边基坑工程提供参考价值。

1 工程概况

项目位于杭州市拱墅区, 基坑西侧为已运营地铁 2 号线武林门—沈塘桥区间隧道。场地内分布有 1 层老地下室, 改造完成后地下室车库为纯地下 2 层, 基础形式为桩筏基础, 工程采用钻孔灌注桩。基坑面积约 8 100 m², 周边延长约 370 m。2 层地下

室基坑开挖深度为 11.90 m, 汽车坡道 C 区基坑开挖深度约 4.6 m。

本工程基坑地下室边线距离 2 号线右线隧道最近处约 15.7 m, 距离 2 号线左线隧道最近处约 28.0 m, 汽车坡道基坑边线距离 2 号线右线隧道最近处约 8.2 m。区间盾构隧道底绝对高程为 -12.76 m, 本基坑普遍开挖底绝对标高为 -7.10 m, 2 号线区间隧道底位于基坑底以下约 5.7 m, 隧道底位于③₂ 淤泥质粉质黏土层中。基坑与地铁隧道的平面关系详见图 1, 基坑与地铁隧道的剖面关系详见图 2。

场地涉及基坑开挖土层主要为①₀₋₁ 杂填土、②₂ 淤泥质粉质黏土、③₂ 淤泥质粉质黏土、⑤₁ 粉质黏土、⑩₁ 全风化泥质粉砂岩、⑩₂ 强风化泥质粉砂岩、⑩₃ 中风化泥质粉砂岩。基坑开挖范围内以深厚淤泥质粉质黏土为主, 淤泥质粉质黏土厚度约 35 m, 该场地地质情况以及基坑范围内典型土层分布情况如表 1 所示。本工程场地地下水主要为浅部孔隙型潜水和深部承压水, 场地孔隙潜水主要赋存于表部①₀₋₁ 杂填土、浅部②₂ 淤泥质粉质黏土层内, 潜水位埋深为地表下 1.80~1.90 m; 承压水主要分布于⑤₂ 含黏性土砾砂层, 该孔隙承压水对基坑工程影响不大, 但对地墙和钻孔灌注桩施工有一定的不利影响。

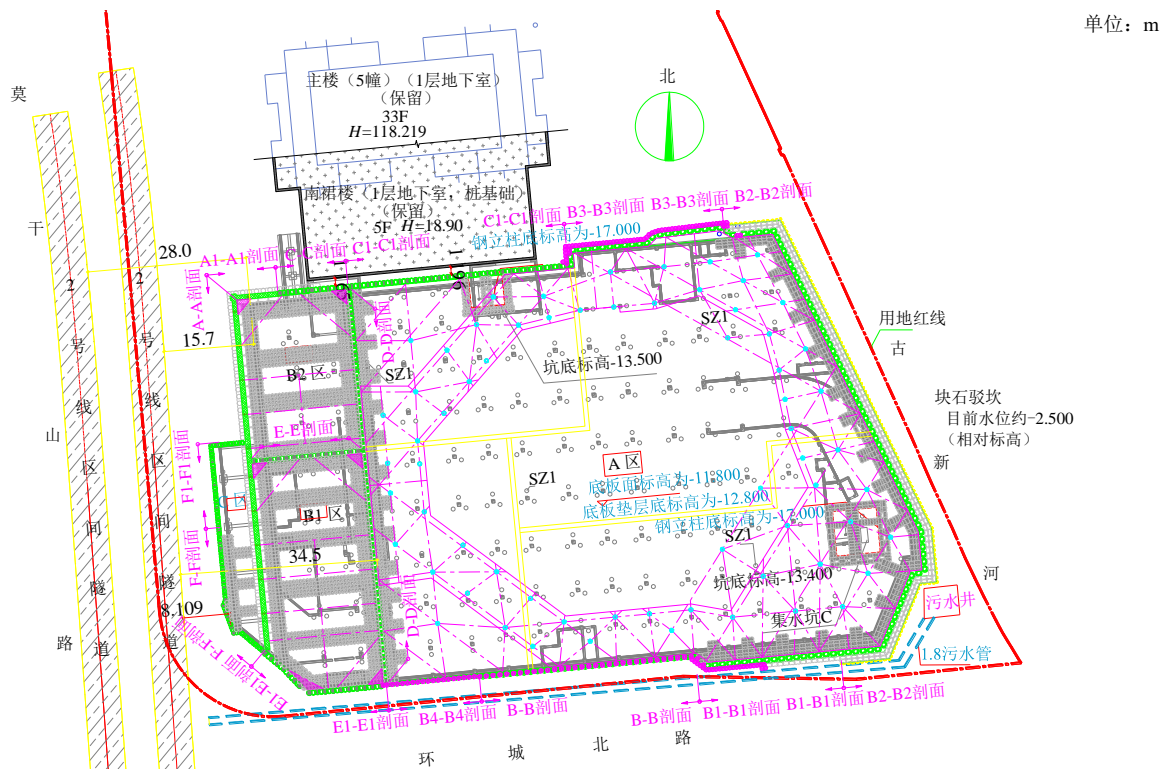


图 1 基坑与地铁隧道的平面布置图
Fig. 1 Layout of foundation pit and subway station

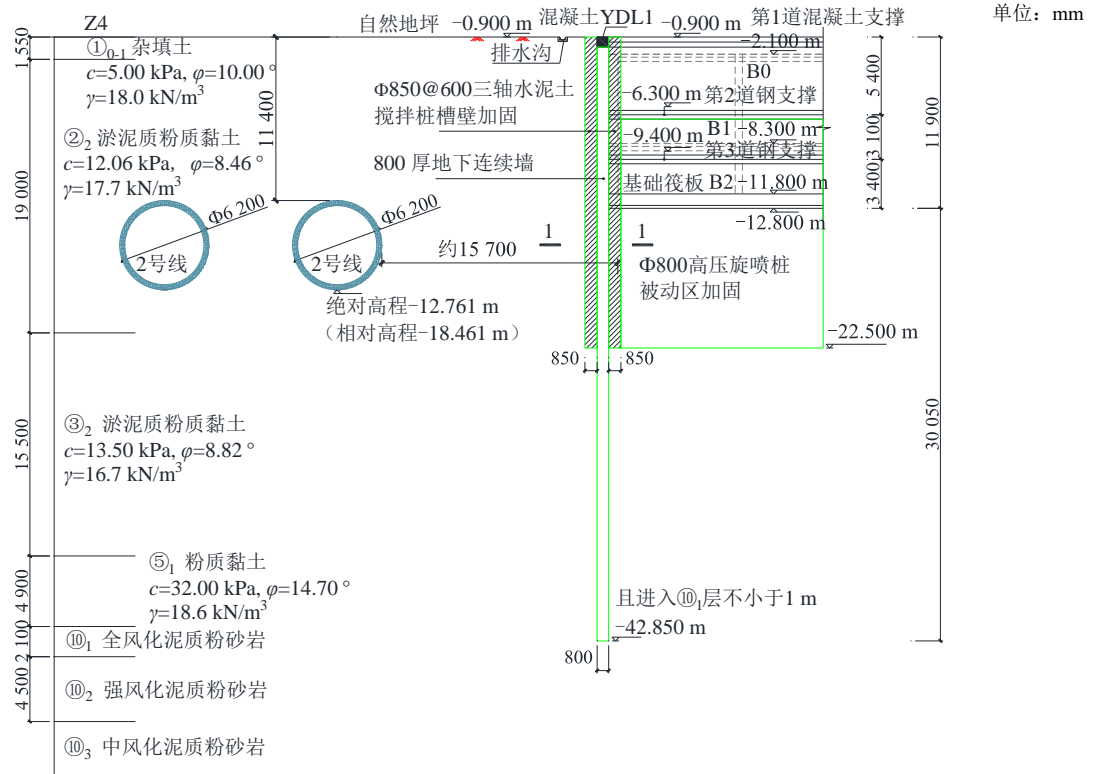


图2 B区基坑与地铁隧道的剖面图

Fig. 2 Profile of B division area and subway station

表1 各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters for each soil layer

层号	地基土名称	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	重度 γ /(kN/m 3)	土层厚度 b /m	渗透系数 k_b /(cm/s)	压缩模量 E_s /MPa
① ₀₋₁	杂填土	5.00	10.00	18.0	1.55	—	(3.5)
② ₁	粉质黏土	11.50	18.30	18.1	—	3.2×10^{-6}	6.2
② ₂	淤泥质粉质黏土	(12.06)	(8.46)	17.7	19.00	8.3×10^{-6}	2.3
③ ₂	淤泥质粉质黏土	(13.50)	(8.82)	16.7	15.50	—	4.2
⑤ ₁	粉质黏土	32.00	14.70	18.6	4.90	—	4.8
⑤ ₂	含黏性土砾砂层	6.00	25.00	19.0	—	—	7.0
⑩ ₁	全风化泥质粉砂岩	(20.00)	(25.00)	(20.0)	2.10	—	6.1
⑩ ₂	强风化泥质粉砂岩	(30.00)	(30.00)	(21.0)	4.50	—	(14.2)

注：()内的数值为土层参数经验值。土体 HSS 模型相关参数： $E_{ocd}=(1.0 \sim 1.2)E_s$ ； $E_{50}=1.5E_{ocd}$ ； $E_{ur}=(7 \sim 10)E_{50}$ 。

2 围护设计方案

本工程邻地铁侧 B 区基坑开挖深度 11.9 m，采用 800 mm 厚地下连续墙结合 1 道钢筋混凝土支撑和 2 道带轴力自动补充系统钢支撑；远离地铁大基坑 A 区开挖深度 11.9 m，采用 $\Phi 1000@700$ 咬合桩结合 2 道钢筋混凝土内支撑方案；外挂汽车坡道 C 区基坑开挖深度约 4.6 m，采用 $\Phi 800@500$ 咬合桩结合 1 道钢筋混凝土内支撑方案。邻地铁侧 B 区基坑采用高压旋喷桩抽条被动区加固，典型支护剖面详见图 2。

3 有限元分析对地铁隧道的影响

为预测基坑开挖对地铁变形的影响情况，采用三维有限元 Plaxis 计算软件进行分析^[10]。基坑土体采用强化土（HSS）模型。围护桩板单元厚度等效同刚度地连墙，地下连续墙、隧道衬砌采用板单元模拟，支撑采用梁单元模拟。模型尺寸 230 m（X 方向） \times 200 m（Y 方向） \times 50 m（Z 方向）。建立三维有限元模型如图 3 所示。

计算参数主要根据岩土工程勘察报告取用，具体见表 1，部分参数通过地勘报告结合理论、软件

说明中的公式进行推导并参考其它工程的经验取值获得。计算结果见表 2。

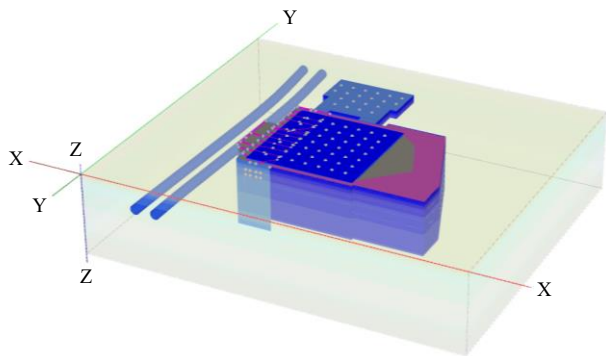


图 3 三维有限元模型示意图

Fig. 3 Three-dimensional finite element model

表 2 主要工况下地铁隧道最大位移

Table 2 Maximum displacement of subway tunnel under main working conditions

工况类型	2 号线地铁隧道结构计算变形/mm	
	水平位移	竖向位移
施工围护结构	0.739	-0.285
A 区地下室施工	2.392	-0.979
B1 区地下室施工	3.387	-1.661
B2 区地下室施工	4.765	-2.475
C 区地下室施工	4.872	-2.392
裙房连接通道完成	4.874	-2.393

4 基坑施工及地铁监测情况

4.1 基坑前期主要施工阶段时间一览表

工程于 2018 年 1 月开始桩基施工, 于 2019 年 7 月完成地下室顶板浇筑, 分割桩拆除和地下室联通已于 2019 年 10 月 10 日全部完成, 地下室施工历时约 20 个月, 基坑施工工况节点详见表 3。

4.2 地铁结构监测点布置

2 号线被监测区域隧道全长约为 165 m。根据隧道监测范围和通视情况, 上行监测区域和下行监测区域各布设 1 台监测机器人徕卡 TM50 全站仪进行测量, 采用自动化监测结合人工复核测量。

地铁监测的主要内容包括隧道道床沉降、道床水平位移、隧道横向收敛及隧道轨间高差。

2 号线被监测区域自动化监测布点原则: 根据浙江省工程建设标准《城市轨道交通结构安全保护技术规程》, 确定基坑投影范围内隧道每 6 m (5 环) 布设 1 个断面, 其余区域每 12 m (10 环) 布设 1 个断面, 因此, 上下行各布设 20 个断面, 共 40 个断面, 同一断面布设各监测项目, 见图 4。

表 3 基坑施工工期表

Table 3 Construction schedule of foundation pit

施工时间	简要工况
2017 年 12 月 1 日—2018 年 2 月 5 日	原有建筑物拆除
2018 年 1 月 25 日—2018 年 11 月 23 日	桩基施工
2018 年 9 月 13 日—2019 年 4 月 15 日	A 区基坑施工
2019 年 2 月 25 日—2019 年 6 月 27 日	B 区基坑施工
2019 年 7 月 16 日—2019 年 7 月 26 日	C 区基坑施工

盾构隧道结构保护监测点平面布置见图 4。隧道水平位移和横向收敛变形控制值为 8 mm, 隧道竖向位移变形控制值为 10 mm。

根据本项目预评估提供的地铁盾构隧道结构安全控制指标值确定预警和报警值, 施工中期过程评估之后, 隧道横向收敛最大累计值超过评估报告提供的变形报警值即报警, 隧道各监测项目累计变化量详见表 4。

4.3 累计变化量沿时程变化

监测项目典型监测点号道床沉降累计变化量沿时程变化见图 5, 正号表示隆起, 负号表示沉降; 道床水平位移累计变化量沿时程变化见图 6, 正号表示往基坑内方向位移, 负号表示往基坑外方向位移; 隧道横向收敛累计变化量沿时程变化见图 7, 正号表示扩径, 负号表示缩径; 隧道轨间高差累计变化量沿时程变化见图 8, 正号表示高差增大, 负号表示高差缩小。各图中字母 X 表示下行线, S 表示上行线; CJ 表示沉降, WY 表示位移, SL 表示收敛, GC 表示高差。

4.4 累计变化量沿里程变化

典型日期监测项目各点号道床沉降累计变化量沿里程变化见图 9, 正号表示隆起, 负号表示沉降; 道床水平位移累计变化量沿里程变化见图 10, 正号表示往基坑内方向位移, 负号表示往基坑外方向位移; 隧道横向收敛累计变化量沿里程变化见图 11, 正号表示扩径, 负号表示缩径; 隧道轨间高差累计变化量沿里程变化见图 12, 正号表示高差增大, 负号表示高差缩小。各图中字母 X 表示下行线, S 表示上行线; CJ 表示沉降, WY 表示位移, SL 表示收敛, GC 表示高差。

4.5 地铁隧道监测数据小结

(1) 从本项目持续的自动化保护监测可以看出, 采用高精度自动化仪器采集的数据可以准确可靠地反映出地铁盾构隧道的变形情况, 满足保护区监测的要求。实时、高精度的自动化监测可在邻近

基坑开挖过程中持续地对地铁2号线区间隧道进行监控量测,且受地铁列车运行及隧道环境影响较小。

(2)截止项目基坑施工完成,上行线盾构隧道各监测项目最大累计变化量:道床沉降-14.4 mm、道床水平位移+3.7 mm、隧道横向收敛+14.7 mm、隧道轨间高差+1.2 mm;下行线盾构隧道各监测项目最大累计变化量:道床沉降-7.6 mm、道床水平位移+3.8 mm、隧道横向收敛+7.2 mm、隧道轨间高差+1.4 mm。

(3)从各监测项目累计变化量来看,本项目基坑工程施工对保护监测范围的地铁区间盾构隧道

造成不利影响,施工期间共发生6次预警或报警。上行线隧道横向收敛和沉降相对较为严重:上行线S245~S310环共13个监测点位隧道沉降超过预评估隧道变形控制值,约占监测点位总数65%;上行线S235~S305环共13个监测点位隧道横向收敛超过预评估隧道变形控制值,约占监测点位总数65%;下行线隧道监测点位位移均未超过预评估隧道变形控制值。

(4)本项目基坑回填完成至今,地铁保护自动化监测各项数据变化速率均小于0.02 mm/d,地铁隧道变形稳定。

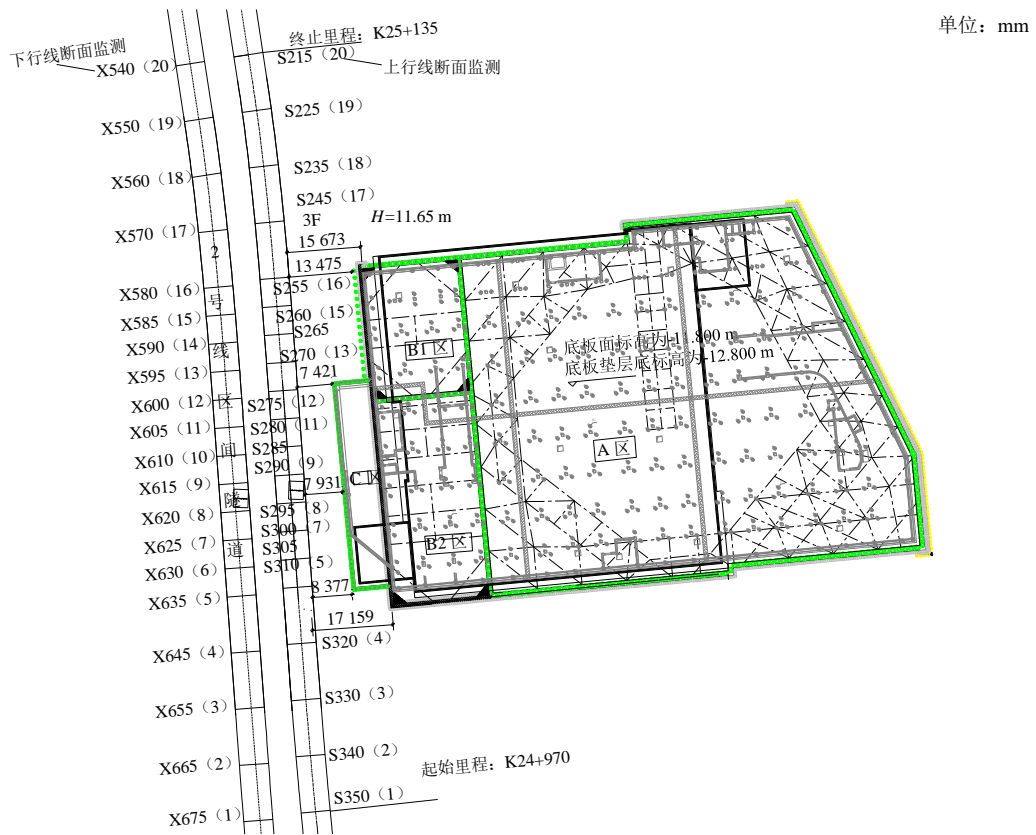


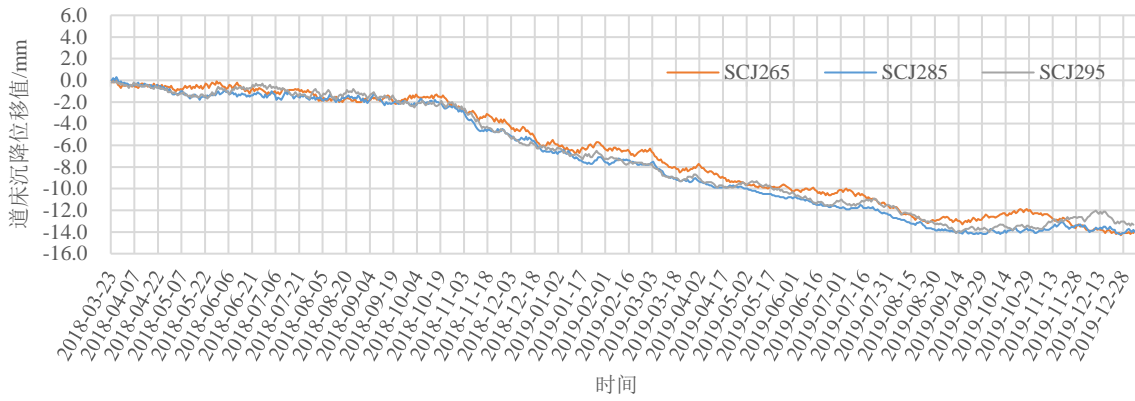
图4 盾构隧道结构保护监测断面平面布置

Fig. 4 Layout of monitoring section for shield tunnel structure

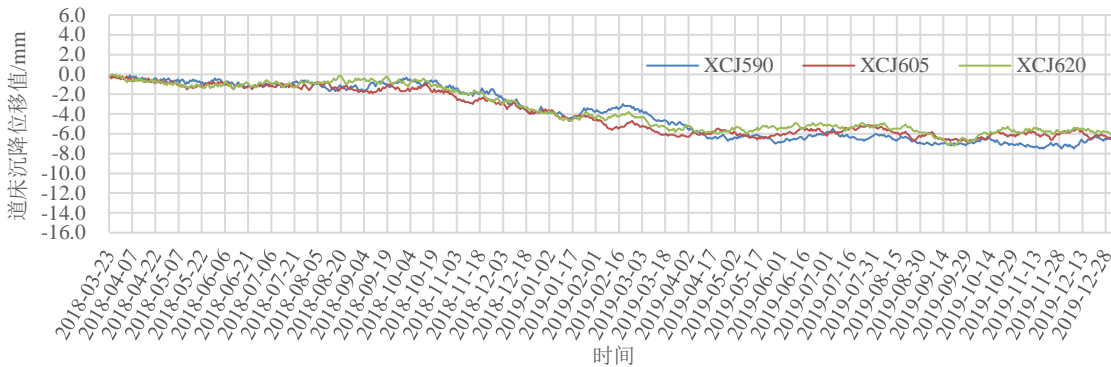
表4 监测项目最大累计变化量

Table 4 Maximum cumulative change of monitoring items

位置	项目	最大累计变化量		报警	超控制值
		监测点号	变化量/mm		
上行线	道床沉降	SCJ280	-14.4	是	是
	道床水平位移	SSP280	3.7	否	否
	隧道横向收敛	SSL285	14.7	是	是
	隧道轨间高差	SCY275	1.9	否	否
下行线	道床沉降	XCJ595	-7.6	否	否
	道床水平位移	XSP615	3.8	否	否
	隧道横向收敛	XSL620	7.2	是	否
	隧道轨间高差	XCY595	1.4	否	否



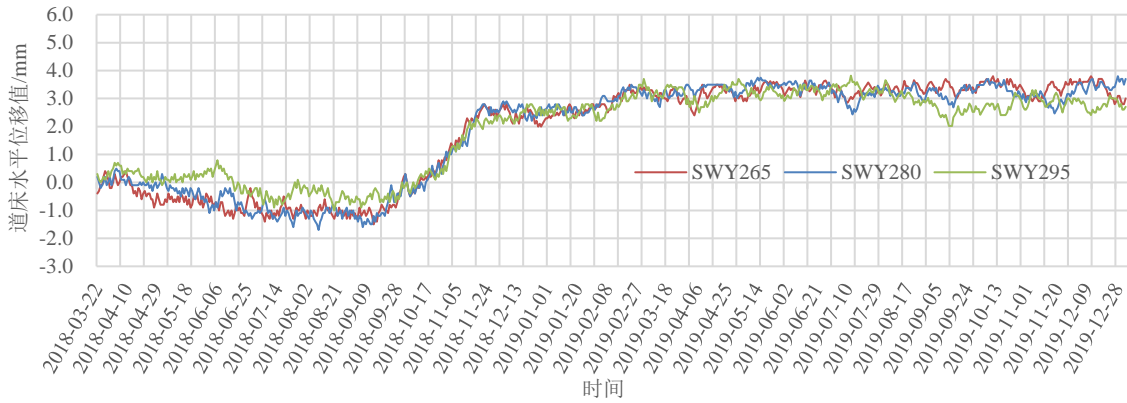
(a) 上行线



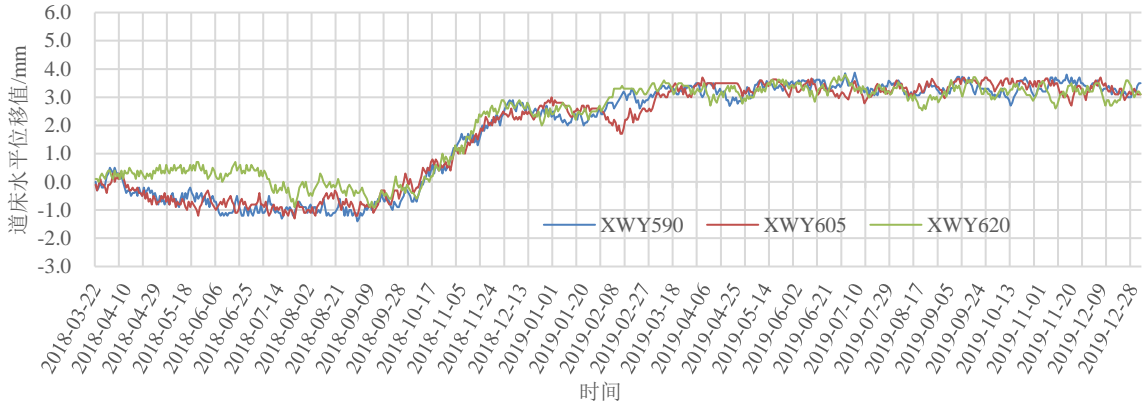
(b) 下行线

图 5 典型监测点号道床沉降累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 5 Cumulative change of track bed settlement at typical monitoring points



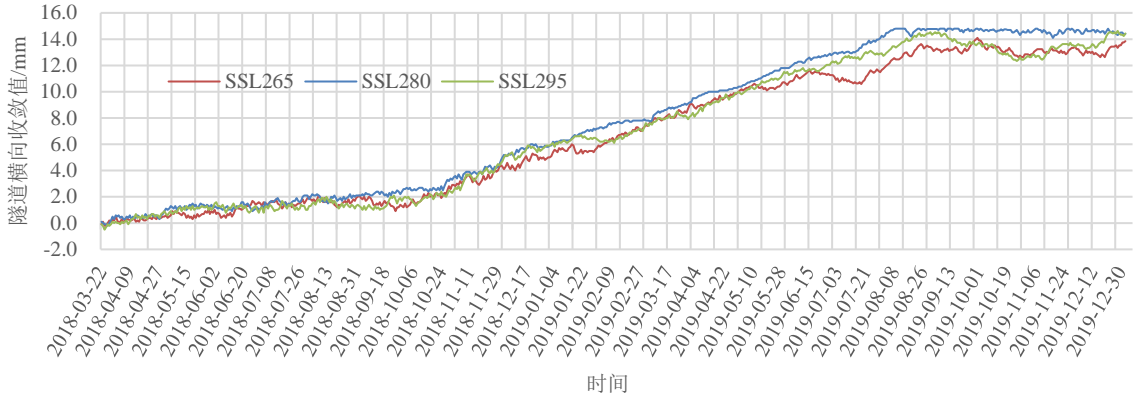
(a) 上行线



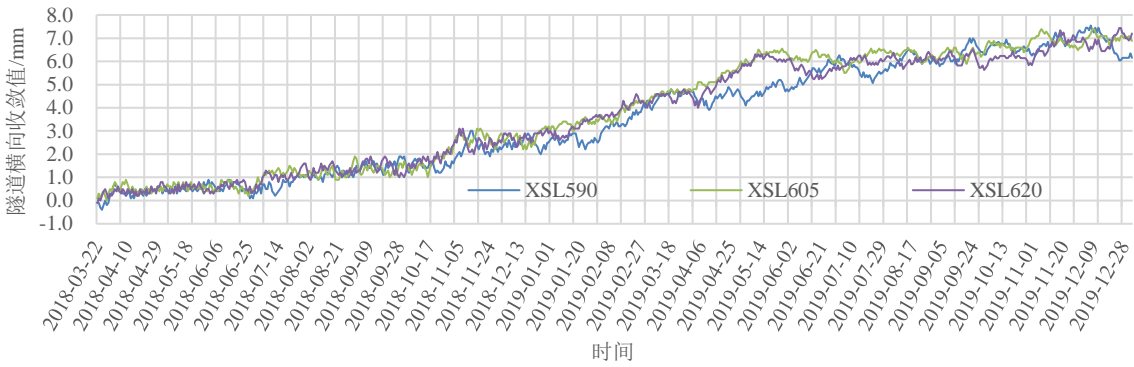
(b) 下行线

图 6 典型监测点号道床水平位移累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 6 Cumulative change of track bed horizontal displacement at typical monitoring points



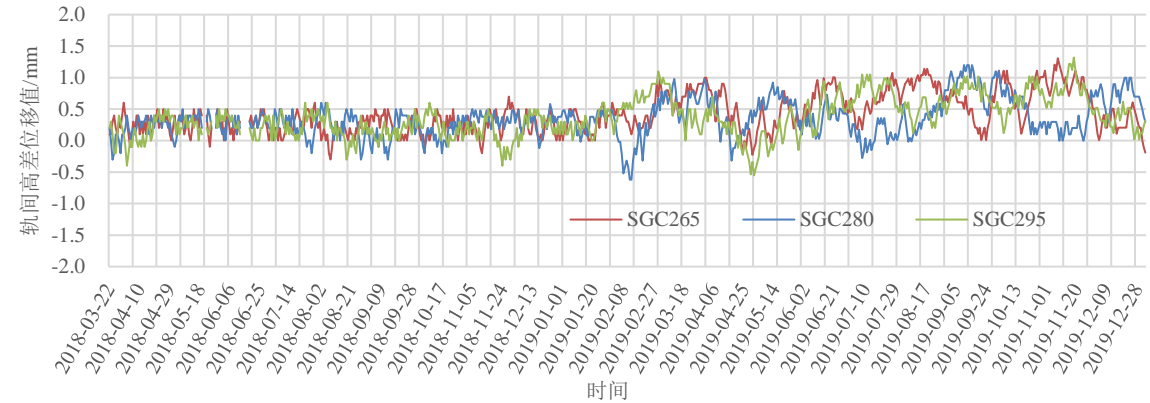
(a) 上行线



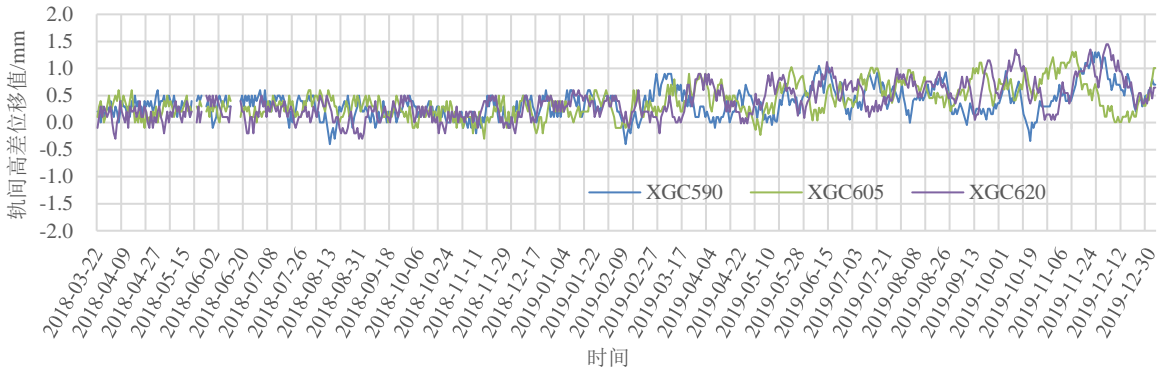
(b) 下行线

图7 典型监测点号隧道横向收敛累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 7 Cumulative change of tunnel lateral convergence at typical monitoring points



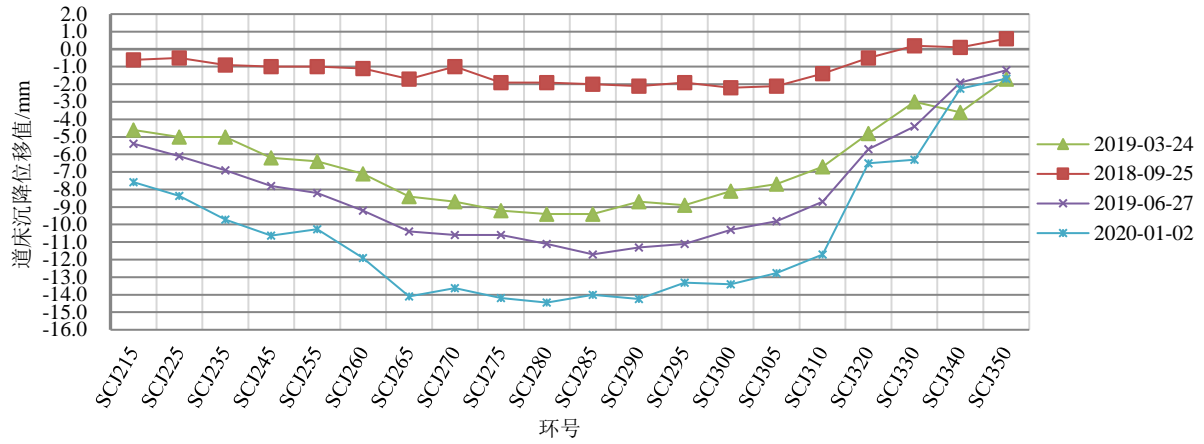
(a) 上行线



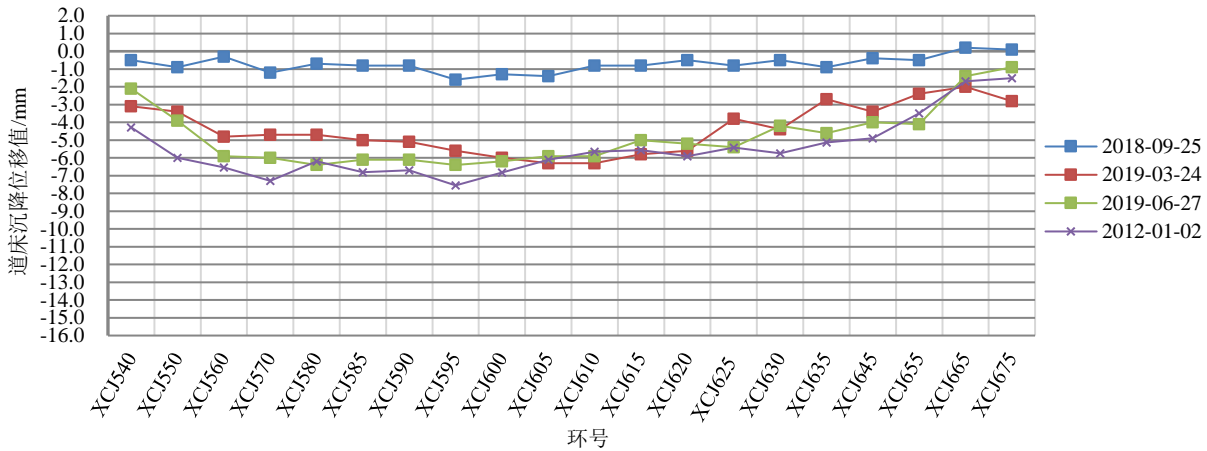
(b) 下行线

图8 典型监测点号隧道轨间高差累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 8 Cumulative change of height difference between tunnel tracks at typical monitoring points



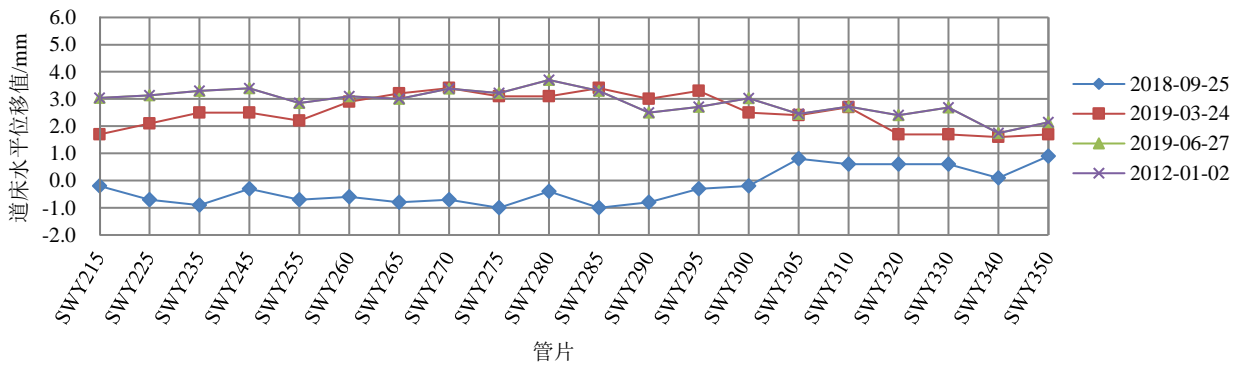
(a) 上行线



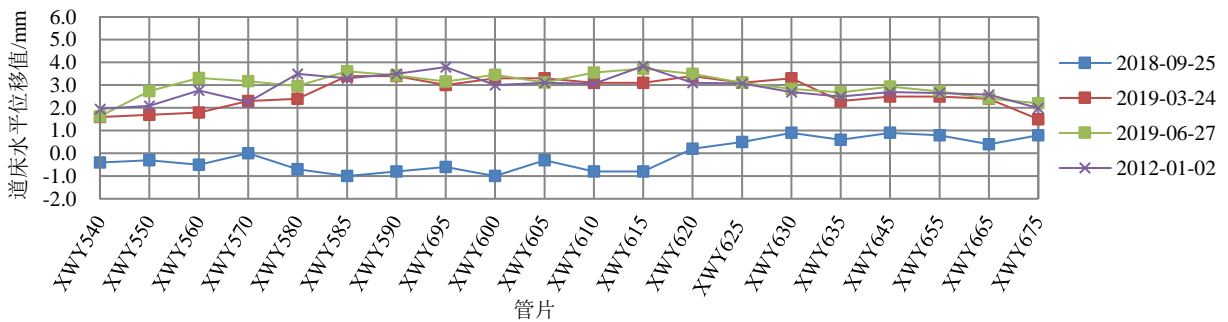
(b) 下行线

图 9 典型日期监测点号道床沉降累计变化量沿里程变化曲线

Fig. 9 Cumulative change of track bed settlement along mileage at different monitoring points



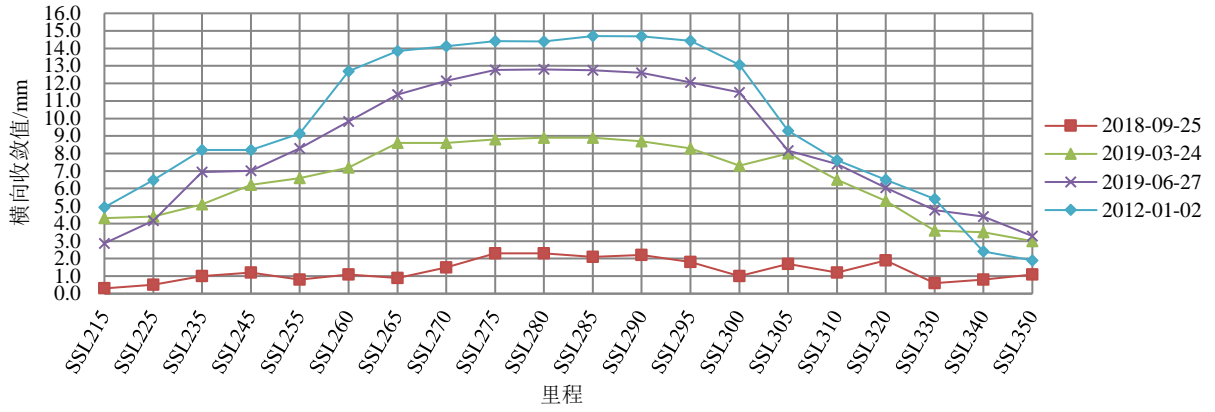
(a) 上行线



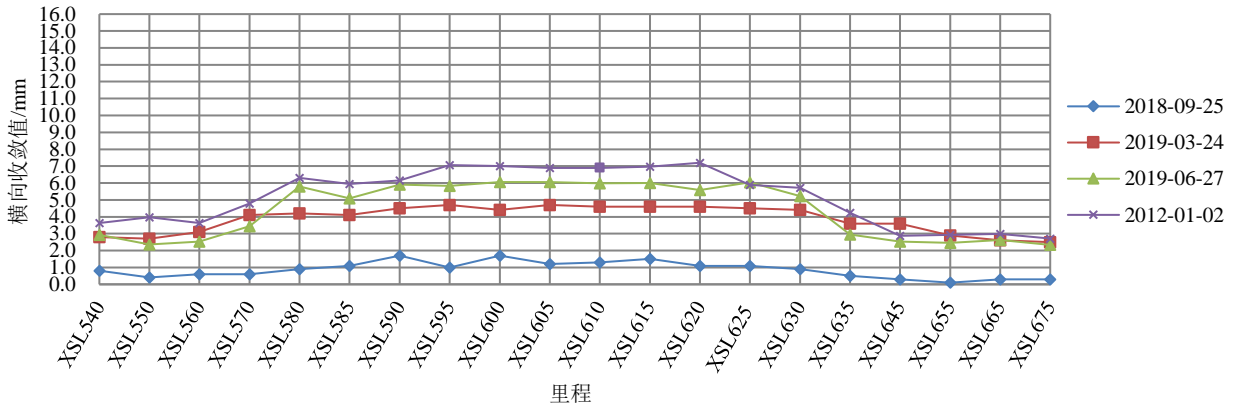
(b) 下行线

图 10 典型日期监测点号道床水平位移累计变化量沿里程变化曲线

Fig. 10 Cumulative change of track bed horizontal displacement along mileage at different monitoring points



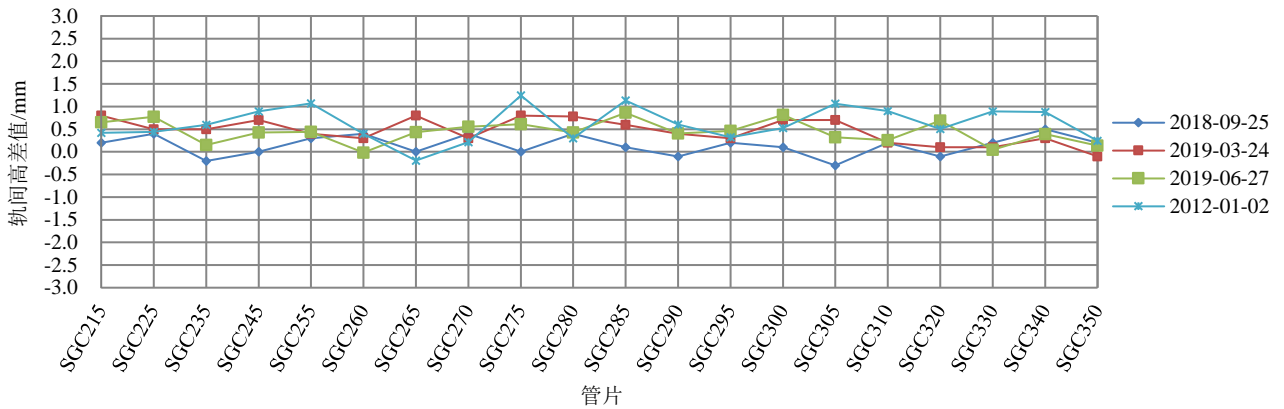
(a) 上行线



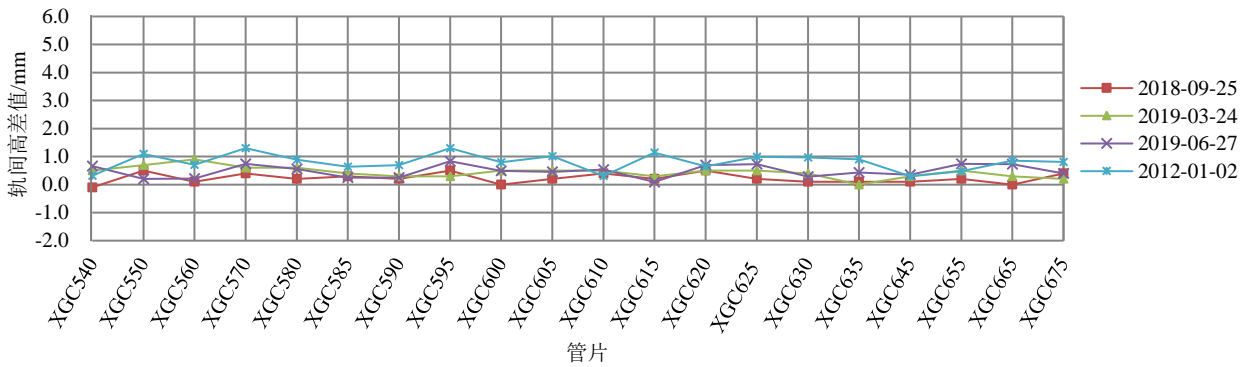
(b) 下行线

图 11 典型日期监测点号隧道横向收敛累计变化量沿里程变化曲线

Fig. 11 Cumulative change of tunnel lateral convergence along mileage at different monitoring points



(a) 上行线



(b) 下行线

图 12 典型日期监测点号隧道轨间高差累计变化量沿里程变化曲线

Fig. 12 Cumulative change of height difference between tunnel tracks along mileage at different monitoring points

5 轨道交通结构变形分析

5.1 隧道道床沉降

典型监测点位道床沉降累计变化量沿时程变

化, 上行线典型断面 SCJ280 道床沉降累计变化量沿时程变化曲线见图 13, 下行线典型断面 X CJ595 道床沉降累计变化量沿时程变化曲线见图 14。

对隧道道床沉降数据做进一步分析, 可知:

(1) 本工程为老地下室拆复建工程, 地墙或桩

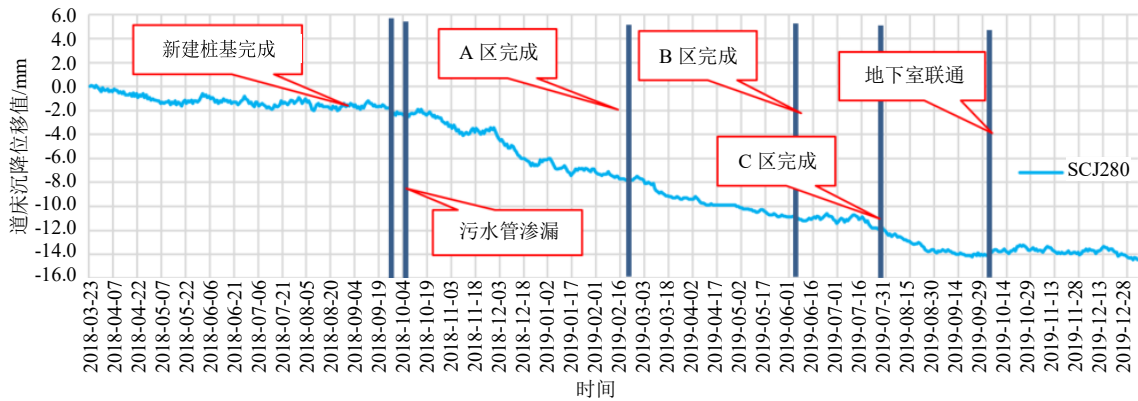


图 13 上行线典型断面 SCJ280 道床沉降累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 13 Cumulative change of track bed settlement at typical section of upbound SCJ280

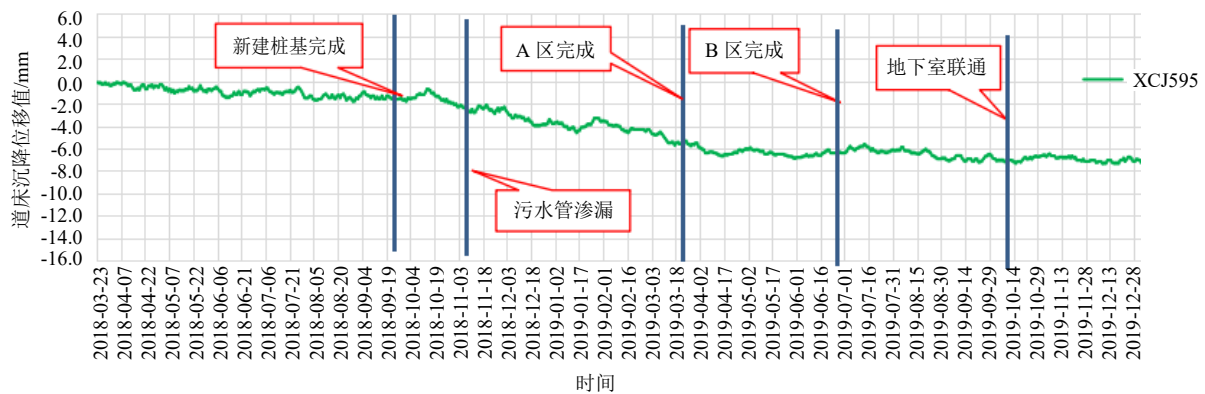


图 14 下行线典型断面 X CJ595 道床沉降累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 14 Cumulative change of track bed settlement at typical section of downbound X CJ595

基施工过程中遇地下障碍物需清障, 清障期间会引起地铁产生变形。本工程桩型包括钻孔灌注桩、咬合桩、双轴水泥土搅拌桩、三轴水泥土搅拌桩、高压旋喷桩、地下连续墙等, 多种桩基施工引起了盾构隧道变形。桩基施工完成后(地墙除外), 隧道道床沉降约-2 mm, 表明大量桩基施工对地铁隧道影响较大, 软土地层中的桩基施工影响较明显。

(2) A 区基坑开挖深度约 11.9 m, 距离上行线盾构隧道约 33 m, 隧道埋深约 11.4 m, 坑底处于隧道顶侧下方, 竖向平均间距约 0.5 m, 水平平均间距约 33 m。A 区开挖第 1 层土方后道床沉降略有增加, A 区开挖第 2 层土方和 B 区地下连续墙施工期间(局部地墙与原地下室围护桩等障碍物冲突, 需清障)道床沉降增加速率较快, 基坑开挖施工对地铁道床沉降影响较大, 且近基坑地铁上行线变化速率和累计值均较大。A 区施工完成后, 上行线道床

沉降累计值约-9.2 mm, 下行线隧道累计沉降约-5.5 mm。虽然 A 区基坑距隧道约 3 倍基坑开挖深度, 但引起上行线隧道沉降增量约 7.2 mm, 说明软土深基坑开挖影响范围较广。基坑东南角污水管破裂, A 区基坑漫水, 拖延了 A 区垫层和底板浇筑时间, 基坑暴露的时间增加导致基坑累计变形增大。

(3) B 区基坑开挖深度约 11.9 m, 距离上行线盾构隧道约 13.4 m, 隧道埋深约 11.4 m, 坑底处于隧道顶侧下方, 竖向平均间距约 0.5 m。B 区施工完成后, 上行线道床沉降累计值约-10.8 mm, 下行线隧道累计沉降约-6.4 mm。B 区引起上行线隧道沉降增量约 1.6 mm, 引起下行线隧道沉降增量约 0.9 mm。B 区基坑开挖对隧道沉降有一定的影响。

(4) C 区基坑开挖深度约 4.6 m, 距离上行线盾构隧道约 7.4 m, 隧道埋深约 11.4 m, 坑底处于隧道顶侧上方, 竖向平均间距约 6.8 m。C 区施工完成

后,上行线道床沉降累计值约-13.7 mm,下行线隧道累计沉降约-7.1 mm。C区引起上行线隧道沉降增量约 2.9 mm,引起下行线隧道沉降增量约 0.7 mm。C区基坑开挖对隧道沉降有一定的影响,且对距离较近的上行线隧道影响较大。

(5)地下室顶板全部施工完成后,上行线道床沉降累计值约-14.4 mm,下行线隧道累计沉降约-7.6 mm,盾构隧道道床总体略有下沉,但变化量不大,隧道趋于稳定状态。

(6)本项目于2019年8月10日完成C区地下室施工,至今地铁保护自动化监测隧道沉降数据变化速率均小于 0.02 mm/d,地铁隧道变形稳定。

5.2 隧道道床水平位移

典型监测点位道床水平位移累计变化量沿时程变化,上行线典型监测断面 SWY280 道床水平位移累计变化量沿时程变化曲线见图 15,下行线典型监测断面 XWY615 道床水平位移累计变化量沿时程变化曲线见图 16。



图 15 上行线典型监测断面 SWY280 道床水平位移累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 15 Cumulative change of track bed horizontal displacement at typical section of upbound SWY280

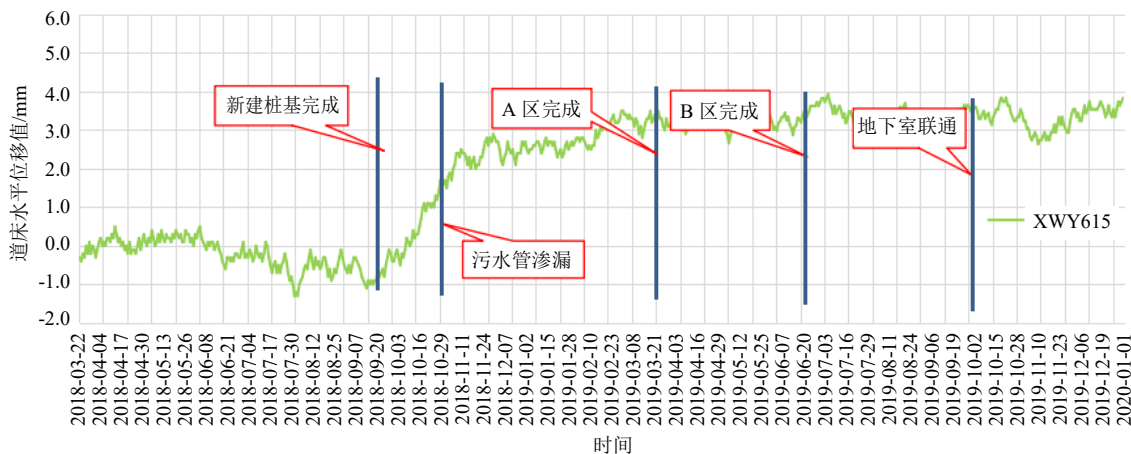


图 16 下行线典型监测断面 XWY615 道床水平位移累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 16 Cumulative change of track bed horizontal displacement at typical section of downbound XWY615

对隧道道床水平位移数据做进一步分析可知:

(1) 桩基施工完成时,上行线和下行线盾构隧道道床水平位移累计值沿里程变化趋势具有一定的相似性:总体向西位移为主(远离基坑方向为“-”),桩基施工使得上、下行线隧道道床产生最大约 1.0 mm 左右的水平位移。

(2) A区开挖第1层土方后道床水平位移往东,A区开挖第2层土方和B区地下连续墙施工期间,道床水平位移增加速率较快,基坑开挖施工对地铁道床水平位移有一定的影响。A区施工完成后,

上行线道床水平位移累计值约 3.3 mm,下行线道床水平位移累计值约 3.3 mm,上行向隧道水平位移方向和累计值均相同。

(3) 后续B区和C区施工过程中,隧道水平位移向东增加趋势为“+”,但增加幅度不大。地下室施工完成后,上行线道床水平位移累计值约 3.7 mm,下行线道床水平位移累计值约 3.8 mm,上行向隧道水平位移方向相同,累计值相近。

(4) A区地下室结构完成后,后续B区和C区施工引起的隧道道床水平位移变化较小,最终上

行线和下行线隧道道床水平位移最大累计变化量都较小, 均在 4 mm 以内。

5.3 隧道横向收敛

典型监测点位横向收敛累计变化量沿时程变

化, 上行线典型监测断面 SSL285 隧道横向收敛累计变化量沿时程变化曲线见图 17, 下行线典型监测断面 XSL620 隧道横向收敛累计变化量沿时程变化曲线见图 18。

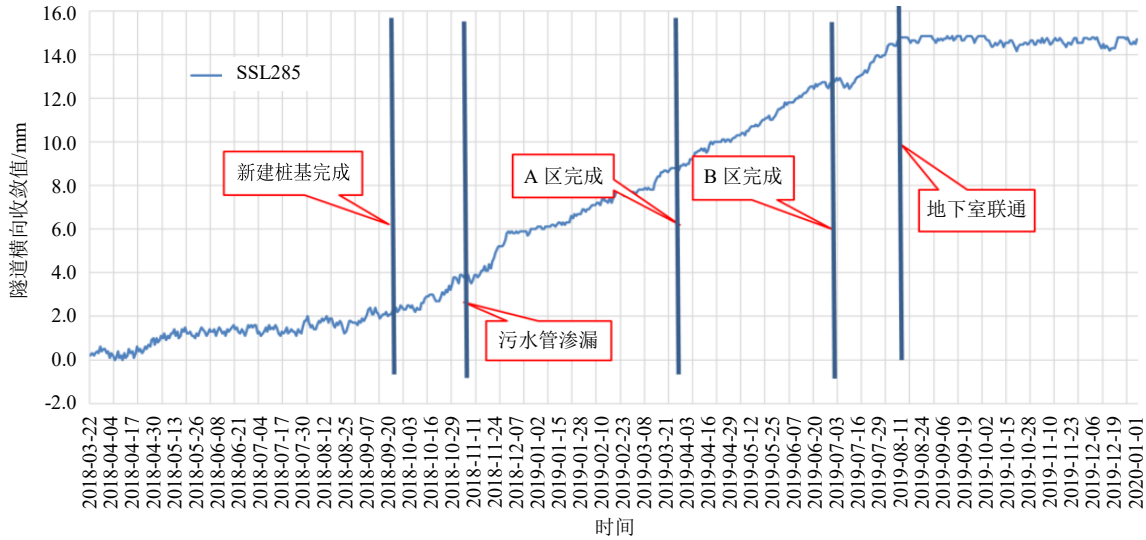


图 17 上行线典型监测断面 SSL285 隧道横向收敛累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 17 Cumulative change of tunnel lateral convergence at typical section of upbound SSL285

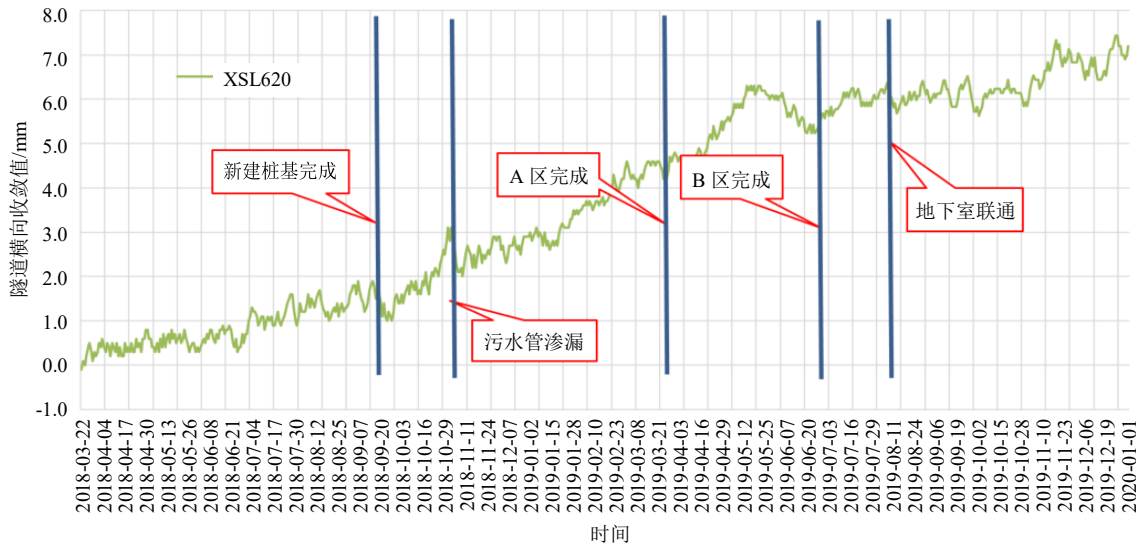


图 18 下行线典型监测断面 XSL620 隧道横向收敛累计变化量沿时程变化曲线

Fig. 18 Cumulative change of tunnel lateral convergence at typical section of downbound XSL620

对隧道横向收敛数据做进一步分析可知:

(1) 桩基施工引起了盾构隧道横向扩径, 桩基施工完成后 (地墙除外), 隧道横向收敛增加约 2 mm, 表明大量桩基施工对地铁隧道影响较大, 软土工程中的桩基施工影响较明显, 这一阶段隧道产生的横向收敛可占上行线总量约 13.6%, 桩基施工引起下行线隧道横向收敛占总量约 27.8%。

(2) A 区开挖第 1 层土方后道床沉降略有增加, A 区开挖第 2 层土方和 B 区地下连续墙施工期间, 隧道水平收敛增加速率较快, 基坑开挖和地墙施工对地铁道床沉降影响较大, 且近基坑地铁上行

线变化速率和累计值均较大。A 区施工完成后, 上行线隧道横向收敛累计值约 8.8 mm, 下行线隧道横向收敛累计值约 4.8 mm。地墙遇老围护桩清障施工、基坑东南角污水管破裂, 基坑漫水, 拖延了 A 区垫层和底板浇筑时间, 基坑暴露时间增加导致基坑累计变形增大。

(3) B 区基坑开挖施工期间, 开挖过程中坑内老桩较多, 清障延误了工期, 隧道水平收敛增加速率较快, B 区施工期间上行线隧道横向收敛累计值约 12.7 mm, 上行线隧道水平收敛增量约 3.9 mm; 下行线隧道横向收敛累计值约 5.3 mm, 下行线隧道

水平收敛增量约 0.5 mm, 表明近地铁基坑开挖施工影响较大, 且对距离基坑较近的上行线影响大。

(4) C 区施工完成后, 上行线隧道横向收敛累计值约 14.4 mm, 下行线隧道横向收敛累计值约 6.2 mm。C 区施工引起上行线隧道横向收敛增量约 1.7 mm, 引起下行线隧道横向收敛约 0.9 mm。C 区基坑开挖对隧道横向收敛有一定的影响, 且对距离较近的上行线隧道影响较大。

(5) 地下室顶板全部施工完成后, 上行线隧道横向收敛累计值约 14.7 mm, 下行线隧道横向收敛累计值约 7.2 mm, 盾构隧道道床总体略有下沉, 但变化量不大, 隧道趋于稳定状态。

(6) 本项目于 2019 年 8 月 10 日完成 C 区地下室施工, 至今地铁保护自动化监测隧道横向收敛数据变化速率均小于 0.02 mm/d, 地铁隧道变形稳定。

6 隧道服役状态评价

参考《盾构法隧道结构服役性能鉴定规范》(DG/TJ 08—2123—2013)^[11](以下简称《鉴定规范》)对杭州地铁 2 号线盾构隧道结构服役状态进行等级评定, 范围: 上行线 215~350 环, 下行线 540~675 环。隧道结构服役状态等级评定划分包括结构构件及连接和结构区段两个层次。

盾构隧道结构性能评定结论如下:

(1) 上行线盾构隧道衬砌结构最大相对收敛 57.0 mm, 下行线盾构隧道衬砌结构最大相对收敛 33.6 mm, 经分析计算, 管片承载力未受影响, 结构处于相对安全状态。

(2) 上行线盾构隧道结构构件服役状态“正常”的数量约占 80%, “退化”的数量约占 18%, “劣化”的数量约占 0%, “恶化”的数量约占 1%; 结构连接服役状态“正常”的数量约占 66%, “退化”的数量约占 34%, “劣化”的数量约占 0%; μ 为结构区段横断面相对变形, $2[\mu] < \mu \leq 3[\mu]$, $[\mu]$ 为横向收敛, 一般为 4‰; 纵断面相对变形 $k \leq 1.5[k]$, $[k]$ 为盾构隧道纵断面的相对变形允许值, 取 1/15 000。评定结构区段服役状态等级为“III”, 定义为: 结构区段中多数构件的耐久性劣化, 整体变形较大或部分结构连接渗漏, 但构件无安全隐患。

(3) 下行线盾构隧道结构构件服役状态“正常”的数量约占 94%, “退化”的数量约占 6%, “劣化”的数量约占 0%, “恶化”的数量约占 0%; 结构连接服役状态“正常”的数量约占 65%, “退

化”的数量约占 34%, “劣化”的数量约占 1%; 结构区段横断面相对变形 $\mu \leq 2[\mu]$, 纵断面相对变形 $k \leq 1.5[k]$ 。评定结构区段服役状态等级为“II”, 定义为: 结构区段中部分构件的耐久性退化, 个别结构变形较大或结构连接处渗漏, 但构件无安全隐患。

7 结论

本项目基坑西侧为已运营地铁 2 号线区间隧道。基坑分为 A 区、B1 区和 B2 区、C 区实施, A 区面积约 6 100 m², B1 区面积约 750 m², B2 区基坑面积约 530 m², C 区基坑面积约 190 m²。地铁隧道顶埋深约 11.4 m, 上行线盾构隧道结构区段服役状态为“III”级, 下行线盾构隧道结构区段服役状态为“II”级。本工程大面积基坑开挖深度约 11.9 m (C 区为 4.6 m), 场地分布有 1 层老地下室, 地质条件以淤泥质粉质黏土层为主, 土质条件较差。邻地铁盾构隧道一侧 B 区基坑支护结构为地下连续墙结合 3 道内支撑结构 (第 1 道钢筋混凝土内支撑, 第 2 道、第 3 道支撑采用轴力自动补偿系统钢支撑)。邻地铁盾构隧道一侧 C 区基坑支护结构采用 $\Phi 800$ 咬合桩结合 1 道钢筋混凝土内支撑方案。基坑施工造成地铁隧道变形超控制值, 对地铁结构造成了一定的影响。本工程目前已完工, 预测的变形数据与实测数据相差较大, 主要原因是有限元模拟无法准确预估清障、桩基施工、污水管渗漏造成基坑暴露时间增长等不利因素。本文通过位于地铁隧道旁侧的软土地基基坑的设计和施工可以得到以下结论和启示:

(1) 通过分析保护监测数据和施工工况的关系, 以及盾构隧道调查、检查结果, 可以看出盾构隧道结构变形及病害发展与施工活动具有相关性, 本项目工程建设对保护范围内的轨道交通结构造成了不利影响。监测数据反映了成桩施工和基坑开挖是影响的两大因素。

(2) B 区障碍物比预期的数量多, 清障过程对隧道有一定影响, 同时影响地连墙施工进度, A 区基坑开挖时, B 区地下连续墙和第 1 道支撑未能施工。地墙施工期间遇原地下室围护老桩, 清障过程对地铁影响较大。

(3) 现场土方外运受限, 施工进度缓慢, 基坑开挖至底后暴露时间较长, 基坑围护结构累计变形大。

(4) A 区开挖到底时, 基坑东南角污水管破

裂,基坑漫水,拖延了垫层和底板浇筑时间,基坑暴露时间增加导致基坑累计变形增大。

(5) B1 区土方开挖过程中存在土方超挖情况,未能按照随撑随挖的设计工况执行, B1 区开挖过程中隧道水平收敛增长速率较快。

(6) B2 区土方开挖过程中遇到大量老桩,凿桩过程产生的振动对坑内土体有一定的扰动,加速了基坑和隧道变形,同时因为清障耽误出土进度,基坑和隧道变形累计时间变长。

(7) 本项目施工造成了地铁隧道变形超控制值,隧道结构出现渗漏、裂缝、破损等病害,影响使用功能和结构耐久性,应对隧道结构进行治理。对隧道渗漏治理一般采用压力注浆法处理;对管片裂缝一般采用表面涂抹水泥基渗透结晶防水材料封闭修补或压力注浆法修补;管片收敛值变化较大(横向收敛累计大于 50 mm)的管片采用洞外微扰动注浆或钢环加固等。

参考文献

- [1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation Engineering Handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [2] 高盟,高广运,冯世进,等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818-823.
GAO Meng, GAO Guang-yun, FENG Shi-jin, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 818-823.
- [3] 王卫东,沈健,翁其平,等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 1): 1340-1345.
WANG Wei-dong, SHEN Jian, WENG Qi-ping, et al. Analysis and countermeasures of influence of excavation on adjacent tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1340-1345.
- [4] 许旭平,冯洪良. 基坑施工对邻近盾构隧道的影响分析[J]. 地基处理, 2022, 4(2): 153-160.
XU Xu-ping, FENG Hong-liang. Analysis of foundation pit construction effects on adjacent tunnels[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(2): 153-160.
- [5] 潘周展. 基坑工程变形控制及对地铁隧道的保护措施[J]. 福建建筑, 2018(12): 44-47.
PAN Zhou-zhan. Foundation pit engineering deformation control and protective measures for metro tunnel[J]. Fujian Architecture & Construction, 2018(12): 44-47.
- [6] 陈颖,张冬梅. 紧邻地铁隧道的深基坑工程设计与施工要点[J]. 建筑施工, 2021, 43(10): 2036-2039.
CHEN Ying, ZHANG Dong-mei. Key points of design and construction of deep foundation pit adjacent to subway tunnel[J]. Building Construction, 2021, 43(10): 2036-2039.
- [7] 丁智,张霄,金杰克,等. 基坑全过程开挖及邻近地铁隧道变形实测分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 415-423.
DING Zhi, ZHANG Xiao, JIN Jie-ke, et al. Measurement analysis on whole excavation of foundation pit and deformation of adjacent metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 415-423.
- [8] 赵永洪,鲍志杰,姬耀斌. 邻近地铁边深基坑工程设计与施工实践[J]. 浙江建筑, 2020, 37(6): 31-35.
ZHAO Yong-hong, BAO Zhi-jie, JI Yao-bin. Engineering design and construction practice of deep foundation pit near a metro[J]. Zhejiang Construction, 2020, 37(6): 31-35.
- [9] 董海君,马榕键,陈骞,等. 深厚淤泥质土层深基坑变形特性研究[J]. 铁道建筑技术, 2022, 355(10): 87-91.
DONG Hai-jun, MA Rong-jian, CHEN Qian, et al. Research on deformation characteristics of deep foundation pit in deep silty soil layer[J]. Railway Construction Technology, 2022, 355(10): 87-91.
- [10] 丁智,王达,王金艳,等. 浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 506-512.
DING Zhi, WANG Da, WANG Jin-yan, et al. Deformation characteristics of Zhejiang soft soil deep foundation pits and their predictive analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 506-512.
- [11] 同济大学. 盾构法隧道结构服役性能鉴定规范: DG/TJ 08—2123—2013[S]. 上海: 中国建筑工业出版社, 2013.
Tongji University. Code for Structural Appraisal of Shield Tunnel: DG/TJ 08—2123—2013[S]. Shanghai: China Architecture & Building Press, 2013.