

软土地区深基坑预应力钢筋混凝土支撑对 邻近地铁隧道变形影响分析

邹文豪

(上海地铁维护保障有限公司工务分公司, 上海 200233)

摘 要: 依托上海地区一邻近地铁的深基坑工程, 通过基坑分区后大坑内预应力钢筋混凝土支撑的使用, 解决了上海软土地区复杂地质条件下深基坑开挖对邻近地铁隧道结构变形影响较大的技术难题。第三至第五道支撑使用预应力钢筋混凝土, 共设置 89 个伺服式千斤顶。监测结果表明, 大坑内预应力钢筋混凝土支撑的使用, 使中隔墙墙身侧向位移向坑外方向持续发展, 未改变隧道水平位移、竖向位移及管径收敛沿轴线方向的变化趋势; 在该支撑系统工作过程中, 隧道水平位移变化量控制在 0.5 mm 内, 竖向位移和管径收敛变化量控制在 2~3 mm 内。预应力钢筋混凝土支撑的使用成本增加有限。

关键词: 预应力钢筋混凝土支撑; 深基坑; 侧向位移; 隧道; 水平位移; 竖向位移; 管径收敛

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0152-07

Influence of prestressed reinforced concrete struts in a deep excavation on deformation of the adjacent metro tunnel in the soft soil area

ZOU Wen-hao

(Shanghai Metro Maintenance and Maintenance Co., Ltd. Engineering Branch, Shanghai 200233, China)

Abstract: Based on a deep excavation project near a metro tunnel in Shanghai, the technical problem that deep excavation has a great impact on deformation of the adjacent metro tunnel in Shanghai's soft soil area is solved by using the prestressed reinforced concrete strut in the largest excavated zone of the entire foundation excavation. Prestressed reinforced concrete struts were installed for the third to fifth layers of foundation bracing, and 89 servo jacks were installed in total. The monitoring results showed that the use of prestressed reinforced concrete struts makes the lateral displacement of the middle partition wall develop continuously towards the outside of the foundation pit. The variation of tunnel horizontal displacement, vertical displacement, and pipe diameter convergence along the axial direction is not changed. By using this support system, the variation of horizontal displacement of the tunnel is controlled within 0.5 mm, and the variations of vertical displacement and pipe diameter convergence are controlled within 2~3 mm. The total cost has not increased significantly after using prestressed reinforced concrete strut.

Key words: prestressed reinforced concrete strut; deep excavation; lateral displacement; tunnel; horizontal displacement; vertical displacement; pipe convergence

0 引 言

近年来, 上海轨道交通迅猛发展, 上海地铁运营里程超过 800 km, 位居世界第一。同时, 邻近地铁开挖的基坑变得更多、更深, 对地铁隧道结构变形产生较大影响。为此, 刘建航等^[1-2] 和杨国伟等^[3] 专家提出“时空效应”理论, 即控制基坑开挖空间尺寸, 减少基坑暴露时间, 及时形成支撑, 以控制

地层位移, 提高基坑稳定性。

钢筋混凝土支撑具有截面尺寸布置灵活、受力结构稳定、松弛变形小、受压能力强、抗弯强度大、支撑体系稳定等优点。邻近地铁隧道大基坑大多采用钢筋混凝土支撑^[4-13]。

传统钢筋混凝土支撑轴力状态不可控, 对基坑围护结构变形无法主动干预。对于此类问题, 上海勘察设计研究院(集团)有限公司首先提出“预应

力钢筋混凝土支撑”技术，即在普通钢筋混凝土系统中引入伺服式千斤顶（也称轴力自动补偿）系统，向基坑围护结构实时、动态、主动施加预应力^[14]。

1 工程概况

1.1 项目概述

上海市虹口区 105、106 地块旧区改造及新建综合开发项目基坑面积约 7 100 m²，开挖深度为 10.95~19.90 m，设地下 4 层（西侧为地下 2 层），距离上海地铁 10 号线上行线 8.3~9.5 m。为确保地铁安全运行，该项目分为 A 区、B1 区和 B2 区共 3 个基坑进行施工。采用顺作法施工，基坑围护体采用地下连续墙，项目平面图、剖面图及土层分布见图 1、图 2。

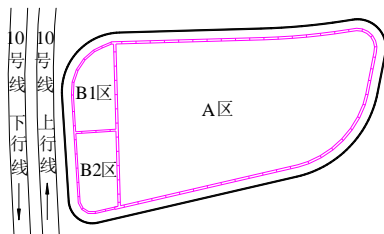


图 1 项目平面图
Fig. 1 Project plan

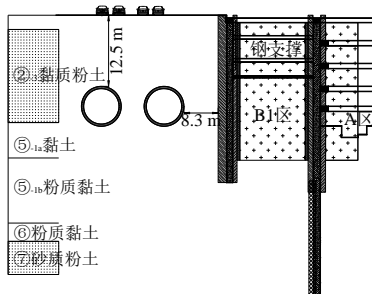


图 2 项目剖面图
Fig. 2 Project profile

该项目 A 区基坑面积约 5 960 m²，开挖深度为 19.40~19.90 m，距离地铁 10 号线最近约 35 m，设地下 4 层。根据上海经验，邻近地铁的深大基坑进行合理分区后应先开挖大坑后开挖小坑。结合工程经验，A 区为大坑，先开挖，待 A 区地下结构完成后再开挖 B 区，其中 B 区采用钢支撑轴力伺服系统。传统大坑的支撑方式为普通钢筋混凝土支撑，为避免传统支撑方式轴力不可控等问题，进一步控制大坑开挖对地铁变形的影响，该项目在 A 区基坑钢筋混凝土支撑系统中引入了伺服式千斤顶系统。A 区基坑平行地铁边线的围护结构长约 67 m，设五道钢筋混凝土支撑，其中三~五道使用预应力钢筋混凝土支撑，共设置 89 个伺服式千斤顶。

1.2 预应力钢筋混凝土支撑施工工艺

该项目 A 区基坑采用五道支撑，第一、二道支撑采用普通钢筋混凝土支撑，见图 3。第三~五道支撑采用双围檩布置形式的预应力钢筋混凝土支撑。双围檩形式，即围护结构设置外圈梁，钢筋混凝土支撑体系设置内圈梁，圈梁间浇筑钢筋混凝土支墩并设置伺服式预应力系统，第三道支撑平面布置见图 4，第四、五道支撑平面布置见图 5。

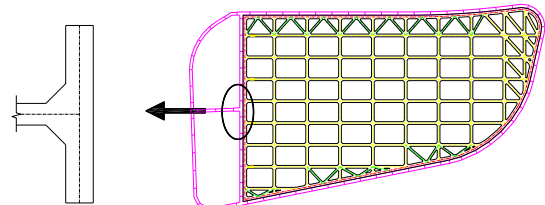


图 3 第一、二道支撑平面布置图
Fig. 3 Plan of the first and second layers of struts

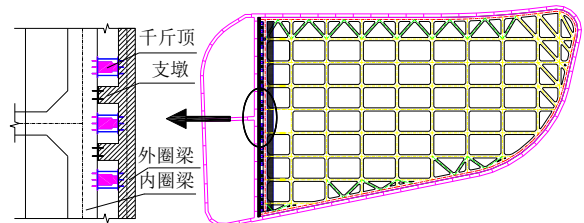


图 4 第三道支撑平面布置图
Fig. 4 Plan of the third layer of strut

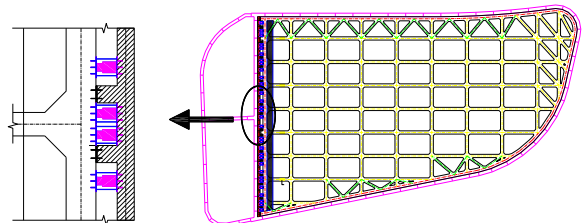


图 5 第四、五道支撑平面布置图
Fig. 5 Plan of the fourth and fifth layers of struts

第三层土方开挖过程中伺服式千斤顶设备进场。开挖完成后绑扎外圈梁钢筋，并设置预埋件和支墩隔离板（见图 6）。随后绑扎内圈梁及支撑体系钢筋，支模并浇筑混凝土。混凝土浇筑完成后架设预应力系统（见图 7），养护 3 d 后分级施加预应力。



图 6 外圈梁施工
Fig. 6 Construction of outer ring beam



图7 预加力系统安装

Fig. 7 Installation of prestressing system

第三道支撑养护 3 d 后, 伺服式千斤顶由南向北逐个施加 600 kN 预应力, 后按基坑稳定情况逐级将预应力增加至 3 300 kN; 第四道支撑养护 3 d 后首次施加预应力值为 900 kN, 根据基坑变形情况, 施加至 2 700 kN 后停止加力; 第五道支撑首次

施加预应力值为 1 200 kN, 根据基坑变形情况, 施加至 2 400 kN 后停止加力。伺服式预应力系统施加预应力过程中, 支墩与内圈梁之间产生间隙, 间隙采用钢板内插方式填实并进行灌浆 (见图 8)。表 1 为施工工况表。



图8 支墩与内圈梁间隙

Fig. 8 Clearance between buttress and inner ring beam

表1 施工工况表

Table 1 Table of construction condition

工况	加力序号	施工/加载时间	加载力/kN	备注
首道撑完成	—	2021-09-17	—	—
第二道支撑完成	—	2021-10-22	—	—
第三道支撑完成	—	2021-11-03	—	—
第三道支撑施加预加力	1	2021-11-06/20:00-23:00	600	逐个
	2	2021-11-07/10:00	900	同步
	3	2021-11-07/13:00	1 200	同步
	4	2021-11-07/16:00	1 500	同步
	5	2021-11-07/19:00	1 800	同步
	6	2021-11-08/10:00	2 100	同步
	7	2021-11-08/13:00	2 400	同步
	8	2021-11-11/11:30	2 700	同步
	9	2021-11-12/11:30	3 000	同步
	10	2021-11-15/11:30	3 300	同步
第四道支撑完成	—	2021-11-21	—	—
第四道支撑施加预加力	1	2021-11-24/20:00	900	逐个
	2	2021-11-25/10:00	1 200	同步
	3	2021-11-25/13:00	1 500	同步
	4	2021-11-25/16:00	1 800	同步
	5	2021-11-25/20:00	2 100	同步
	6	2021-11-26/07:00	2 400	同步
	7	2021-11-26/10:00	2 700	同步
第五道支撑完成	—	2021-12-03	—	—
第五道支撑施加预加力	1	2021-12-06/20:00	1 200	逐个
	2	2021-12-07/13:00	1 500	同步
	3	2021-12-07/16:00	1 800	同步
	4	2021-12-08/13:00	2 100	同步
	5	2021-12-08/16:00	2 400	同步
底板浇筑完成	—	2021-12-24	—	—

1.3 预应力钢筋混凝土支撑轴力对比

将围压乘以支撑间距近似视为设计轴力。该处围压通过施加不同预应力后试算围护变形量，围护变形达到设计要求后得到最终围压。

A 区底板浇筑完成后，东西向每道支撑实测最大轴力与设计轴力相比数据如表 2 所示。施加预应力过程中，第四道支撑实测轴力与设计轴力比值最大为 126%，其余东西向支撑轴力比值变化范围为 83%~106%，除第四道支撑外，实测东西向支撑轴力与设计计算轴力相近。

表 2 不同工况轴力比较表

Table 2 Comparison table of axial force under different working conditions

工况	设计轴力/kN	实测轴力/kN	百分比/%
首道撑	1 602.24	1 573	98
第二道支撑	2 812.20	2 338	83
第三道支撑	12 157.80	10 144	83
第四道支撑	12 326.40	15 518	126
第五道支撑	12 370.20	13 169	106

2 A 区施工对围护结构变形影响

A 区、B 区间中隔墙采用地下连续墙形式。选取中隔墙侧向位移受预应力钢筋混凝土支撑影响最大点 CX38 和最小点 CX40 进行分析，点位见图 9。CX38 和 CX40 侧向位移数据由埋设于墙体中测斜管测得，并由全站仪测量墙顶位移进行复核。

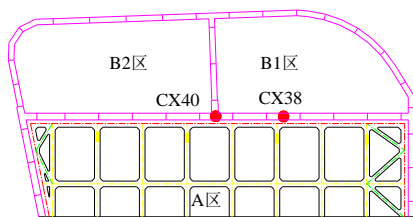


图 9 测点位置图

Fig. 9 Location of monitoring points

一般基坑开挖过程中，坑内土体卸载后导致坑内土压力减小，使围护结构受到坑内被动土压力和坑外主动土压力作用。随基坑开挖深度不断增加，内外土压力差增加，围护变形向坑内不断增加，这又导致坑外土体应力和位移重新分布。

预应力钢筋混凝土支撑系统通过向围护结构施加预应力来重新改变围护结构受力及位移状态。图 10~11 分别为 CX38 和 CX40 墙身侧向位移随深度变化曲线。

由图 10~11 可知，钢筋混凝土支撑施加预应

力后，测点 CX38 和 CX40 墙身侧向位移明显向坑外方向移动，即便后续土体开挖过程中未施加新的预应力，开挖面以上墙身位移也逐渐向坑外方向移动，这是因为伺服系统一直维持向围护结构加力状态，通过围护结构不断改变基坑内、外土体应力及位移状态，致使围护结构变形持续向坑外方向移动。

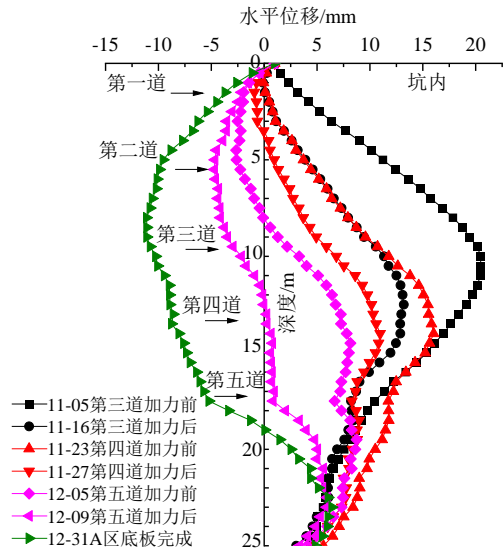


图 10 CX38 墙身侧向位移随深度变化图

Fig. 10 Profile of wall deflection monitored at CX38

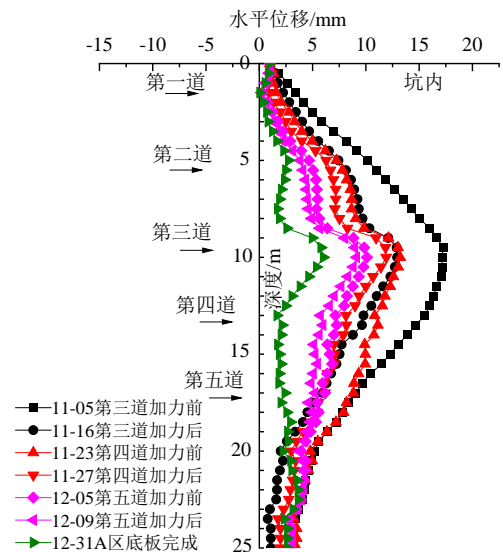


图 11 CX40 墙身侧向位移随深度变化图

Fig. 11 Profile of wall deflection monitored at CX40

第四道支撑预应力设计值为 3 500 kN，施加至 2 700 kN 时，测点 CX38 墙身侧向位移最大值减小到 5 mm 左右，控制效果较好，随后不再增加预应力。随着预应力维持时间不断增加，第五道支撑施加预应力前，测点 CX38 墙身侧向位移控制在 ±5 mm 左右。第五道支撑伺服施加预应力后，墙身位移不断向坑外移动，为控制中隔墙变形发展，维持中隔墙外土体稳定，第五道支撑伺服预应力加至 2 400 kN

后停止加力，未达设计要求 5 000 kN。底板完成后，墙身在坑外的最大位移在第三道支撑附近，这是因为第三道支撑施加的预应力最大，且施加时间最长。

测点 CX40 处为 T 型地下连续墙，该处水平中隔墙后有垂直方向中隔墙，限制测点 CX40 墙身侧向位移的发展，故测点 CX40 与 CX38 墙身侧向位移发展趋势相似，但变形量较小。

3 A 区施工对邻近地铁结构变形影响

基坑对应隧道区间进行人工及自动化竖向位移和管径收敛监测，并进行隧道水平位移监测。隧道水平位移、人工竖向位移和管径收敛采用全站仪测量。自动化竖向位移采用静力水准仪测量，自动化管径收敛采用激光测距仪测量。部分监测布点见图 12。

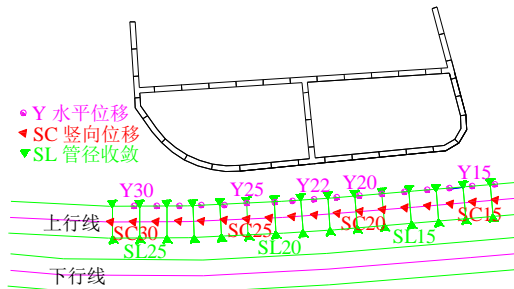


图 12 隧道内部分监测点布置图
Fig. 12 Layout of some monitoring points in the tunnel

基坑开挖对邻近地铁隧道变形的影响因素众多，包括相对位置关系、挖深、基坑形状、土体性质、地下水位、围护结构及支护形式、土体加固、降水等。一般土体开挖过程中，围护结构向坑内方向变形，随开挖深度增加，基坑底部土体发生回弹，二者使隧道随土体向基坑方向移动，并使隧道产生水平向拉伸。因基坑两端受垂直方向围护结构约束，使得围护变形及土体位移两端小中间大，对应隧道水平位移和收敛也表现出相似的变形特性。

图 13 为不同时间上行线隧道人工监测点水平位移变化图，图中负值代表隧道向基坑方向移动。由图可知，在不同监测时间，隧道均表现出两端水平位移较小而中间水平位移较大的规律，其中监测点 Y22 的水平位移最大，该监测点位于隧道对应基坑边线中心位置。这是由于基坑开挖导致应力集中主要作用于围护结构两端，对围护结构中部遮挡效应较差，使得变化曲线沿隧道轴线方向呈“V”型。预应力钢筋混凝土支撑的使用未改变隧道水平位移沿轴线方向的变化趋势。

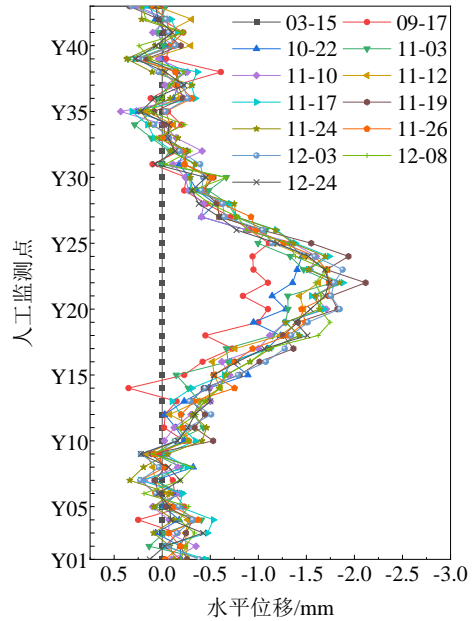


图 13 上行线隧道人工监测点水平位移变化图
Fig. 13 Manually monitored horizontal displacement along the uplink tunnel

图 14 为水平位移监测点 Y22 随时间变化曲线图。由图可知，从桩基进场到首道支撑完成水平位移变化量最大，达到 1 mm。随基坑开挖，Y22 点水平位移继续增大，直至 11 月 10 日，该点水平位移趋于平缓。到底板完成后，水平位移变化量控制在 0.5 mm 范围内。该图说明，在满足基坑开挖“时空效应”前提下，预应力钢筋混凝土支撑加力后隧道水平位移开始趋于稳定，且在施加预应力初期，水平位移有一定程度的减小，这说明预应力钢筋混凝土支撑的使用能有效控制隧道水平位移的变化。

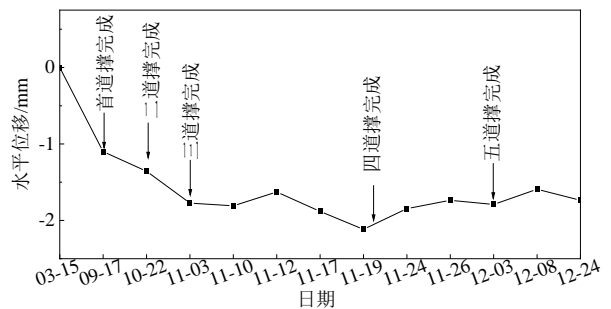


图 14 水平位移监测点 Y22 随时间变化曲线图
Fig. 14 Horizontal displacement monitored at Y22 plotted against time

图 15 为上行线隧道人工监测点竖向位移变化图，图 16 为上行线隧道人工监测点管径收敛变化图。隧道竖向位移以沉降为主，变化曲线沿隧道轴线方向呈“V”型。隧道管径收敛变化以横向椭圆为主，变化曲线沿隧道轴线方向呈倒“V”型。竖向位移和管片收敛最大值均出现在隧道对应基坑边线

中心位置处，且钢筋混凝土支撑加力后未改变其变形沿轴线方向的变化趋势。

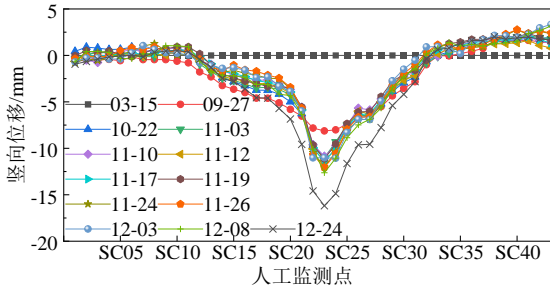


图 15 上行线隧道人工监测点竖向位移变化图

Fig. 15 Manually monitored vertical displacement along the uplink tunnel

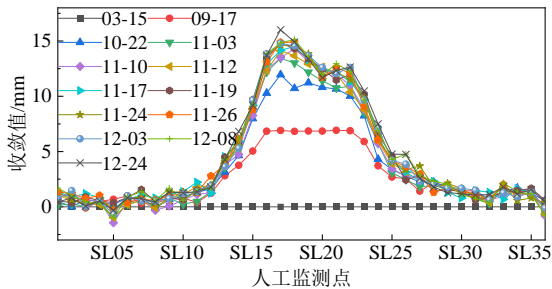


图 16 上行线隧道人工监测点管径收敛变化图

Fig. 16 Manually monitored pipe convergence along the uplink tunnel

图 17 和图 18 分别为基坑边线中点对应上行线隧道人工监测点和自动化监测点竖向位移随时间变化曲线图。由图可知，人工监测点和自动化监测点竖向位移变化规律基本一致。竖向位移发展到 11 月 3 日后变化趋势减缓。这是由于开挖速度加快，支撑形成及时，且预应力钢筋混凝土向围护结构主动施加轴力，最终竖向位移变化量在 2~3 mm 范围内，有效控制了隧道竖向位移。

图 19 和图 20 分别为基坑边线中点对应上行线隧道人工监测点和自动化监测点管径收敛随时间变化曲线图。由图可知，人工监测点和自动化监测点曲线基本一致，在预应力钢筋混凝土支撑的作用下，最终管径收敛变化量在 2~3 mm 范围内，有效控制了隧道管径收敛。

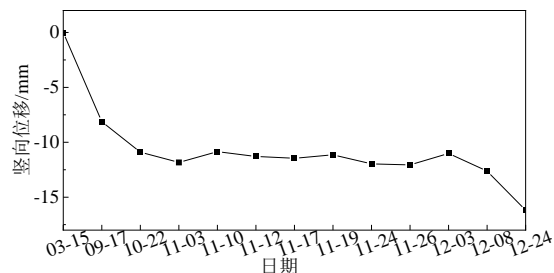


图 17 人工监测点竖向位移随时间变化曲线图

Fig. 17 Manually monitored vertical displacement plotted against time

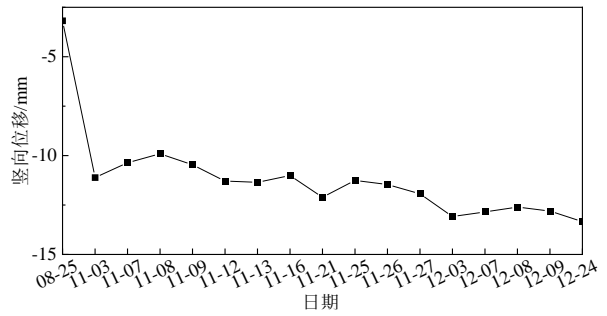


图 18 自动化监测点竖向位移随时间变化曲线图

Fig. 18 Automatically monitored vertical displacement plotted against time

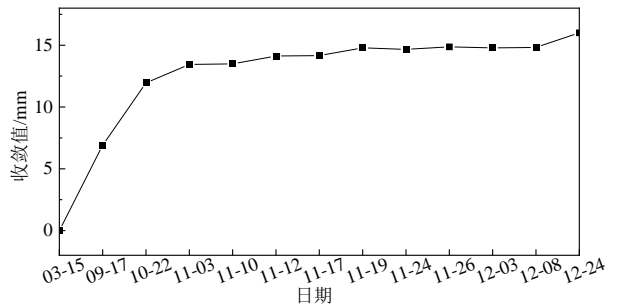


图 19 人工监测点管径收敛随时间变化曲线图

Fig. 19 Manually monitored pipe convergence plotted against time

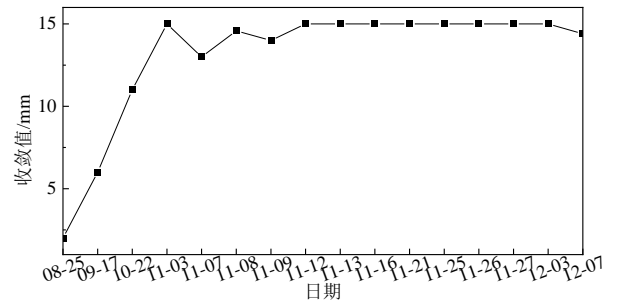


图 20 自动化监测点管径收敛随时间变化曲线图

Fig. 20 Automatically monitored pipe convergence plotted against time

4 应用效果

监测结果表明预应力钢筋混凝土支撑的使用未改变隧道水平位移、竖向位移及管径收敛沿轴线方向的变化趋势。A 区基坑底板完成后隧道水平位移变化量控制在 0.5 mm 范围内，竖向位移及管径收敛变化量控制在 2~3 mm 范围内，说明预应力钢筋混凝土支撑的使用可有效控制隧道结构水平位移、竖向位移及管径收敛的发展。

预应力钢筋混凝土支撑比普通钢筋混凝土支撑费用增加的部分，主要体现在伺服式千斤顶（轴力自动补偿系统）的租赁、使用和圈梁、板带、立柱的专门设计，其中伺服式千斤顶可回收再利用。该支撑系统已在上海、深圳、杭州地区逐步使用，

目前已有供应商提供成套服务,包含预应力系统的安装、调控、拆除等,每个伺服式千斤顶收费标准约为3万元。以本工程为例,基坑设置五道钢筋混凝土支撑,其中三道支撑采用预应力钢筋混凝土支撑,圈梁、支撑、立柱、伺服系统等费用约400万元,相较后续隧道纠偏整治费用,未见显著增加。随着该类型支撑的推广应用,费用将进一步降低。

5 结论

(1) 本工程在A区基坑钢筋混凝土支撑系统中引入了伺服式千斤顶系统。A区基坑平行地铁边线的围护结构长约67m,设五道钢筋混凝土支撑,其中三~五道使用预应力钢筋混凝土支撑,共设置89个伺服式千斤顶。底板完成后,东西向第四道支撑实测轴力与设计计算轴力相差26%,其余东西向支撑轴力与设计计算轴力相近。

(2) 深基坑使用预应力钢筋混凝土支撑能有效控制围护结构侧向位移,使围护结构向坑外方向移动。

(3) 深基坑使用预应力钢筋混凝土支撑不改变隧道水平位移、竖向位移及管径收敛沿轴线方向的变化趋势,只改变其数值大小,总体呈现两端小中间大的变化趋势,变形最大点位于隧道对应基坑边线中点位置。

(4) 在满足基坑开挖“时空效应”的前提下,深基坑使用预应力钢筋混凝土支撑能有效控制隧道结构的变形发展。在预应力钢筋混凝土支撑的工作过程中,隧道水平位移变化量控制在0.5mm范围内,竖向位移和管径收敛变化量控制在2~3mm范围内,效果显著。

(5) 深基坑采用预应力钢筋混凝土支撑,增加费用主要用于圈梁、支撑、立柱和伺服式千斤顶的使用,成本增加有限,避免了后续隧道纠偏整治,更好地确保了地铁的安全,社会效益非常明显。

参考文献

- [1] 刘建航,刘国彬,范益群. 软土基坑工程中时空效应理论与实践(上)[J]. 地下工程与隧道, 1999(3): 7-12, 47.
LIU Jian-hang, LIU Guo-bin, FAN Yi-qun. The theory and its practice by using the rule of time-space effect in soft soil excavation (part I)[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(3): 7-12, 47.
- [2] 刘建航,刘国彬,范益群. 软土基坑工程中时空效应理

论与实践(下)[J]. 地下工程与隧道, 1999(4): 10-14.

- LIU Jian-hang, LIU Guo-bin, FAN Yi-qun. The theory and its practice by using the rule of time-space effect in soft soil excavation (part II)[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(4): 10-14.
- [3] 杨国伟,王如路,刘建航. 时空效应规律在深基坑施工中的应用[J]. 地下工程与隧道, 2000(4): 41-45, 50, 63.
YANG Guo-wei, WANG Ru-lu, LIU Jian-hang. The application of time-space effect rule in deep excavation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2000(4): 41-45, 50, 63.
- [4] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092.
ZHANG Zhi-guo, ZHANG Meng-xi, WANG Wei-dong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [5] 马少俊,李鑫家,王乔坎,等. 某深基坑开挖对邻近既有盾构隧道影响实测分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(1): 86-94.
MA Shao-jun, LI Xin-jia, WANG Qiao-kan, et al. Influence of deep excavation on adjacent existing shield tunnel: field measurement and analysis[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(1): 86-94.
- [6] 夏明. 某基坑开挖对邻近区间隧道的影响分析[J]. 土工基础, 2020, 34(4): 469-473.
XIA Ming. Influence of a deep excavation on the adjacent tunnel[J]. Soil Engineering and Foundation, 2020, 34(4): 469-473.
- [7] 胡俊涛,吴大志,陈柯宇. 软土地区基坑开挖对侧方隧道的位移影响分析[J]. 科技通报, 2022, 38(3): 95-102.
HU Jun-tao, WU Da-zhi, CHEN Ke-yu. Analysis on the displacement of tunnel due to the excavation of side foundation in soft soil[J]. Bulletin of Science and Technology, 2022, 38(3): 95-102.
- [8] 张旭,邵华,季蓓蓉. 基坑开挖施工对临近地铁影响的实测分析[J]. 上海地质, 2008(2): 27-29, 34.
ZHANG Xu, SHAO Hua, JI Bei-rong. Influence of foundation pit excavation on adjacent subway tunnel[J]. Shanghai Land & Resources, 2008(2): 27-29, 34.
- [9] 张兵兵,卢伟晓,李为腾. 基坑开挖对临近既有地铁隧道影响分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(35): 14673-14680.