

文章编号:1674-2974(2018)07-0103-08

DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbk.2018.07.013

MJS 水平桩加固在盾构下穿既有隧道中应用研究

陈仁朋^{1,2,3†}, 张品^{1,2,3}, 刘湛⁴, 穆岩松⁴, 钟志全⁴

(1.湖南大学土木工程学院,湖南长沙 410082; 2.湖南大学 建筑安全与环境国际联合研究中心,湖南长沙 410082;
3.湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室,湖南长沙 410082; 4.中国建筑第五工程局有限公司,湖南长沙 410082)

摘要:以在富水砂层中,长沙地铁4号线近距离下穿上覆2号线运营隧道工程为背景,对 Metro Jet System (MJS)水平桩加固在盾构下穿既有隧道中的应用进行研究.通过现场钻孔取芯与室内试验,并在地表和2号线隧道内布置竖向位移监测点、管片应力监测点,研究 MJS 水平桩的成桩效果,以及盾构掘进时周边地层与上覆隧道的变形响应规律.研究表明:MJS 工法桩直径为 2 m 左右,抗压强度达到 3 MPa 以上,均满足设计要求;盾构下穿时,上覆隧道沉降呈高斯曲线分布,最大沉降 4.33 mm;由于盾构开挖的卸载,相交位置处上覆隧道断面在水平方向被挤压,产生的最大附加应力为 1.4 MPa;地表最大沉降为 1.1 mm,其中,MJS 水平桩加固区域,地表沉降相对较小.总体来看,MJS 水平桩加固效果较好,可为类似工程的实施提供借鉴.

关键词:MJS;隧道开挖;掘进参数;地表沉降

中图分类号:TU 443

文献标志码:A

Application Study of MJS Horizontal Column Reinforcement in Shield Tunneling

CHEN Renpeng^{1,2,3†}, ZHANG Pin^{1,2,3}, LIU Zhan⁴, MU Yansong⁴, ZHONG Zhiquan⁴

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2.National Center for International Research Collaboration in Building Safety and Environment, Hunan University, Changsha 410082, China; 3.Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 4.China Construction Fifth Division CO, LTD, Changsha 410082, China)

Abstract: Taking a case of Changsha Metro Line 4 excavated beneath closely spaced existing Changsha Metro Line 2 twin tunnels as research background, this paper studies the application of the Metro Jet System (MJS) Horizontal Column Reinforcement in Shield Tunneling. The quality of MJS column and the response of stratum and overlying tunnels are studied during the shield tunneling by carrying out in-situ and laboratory tests, installing the additional stress sensors and vertical displacement monitoring points inside Metro Line 2 and setting up monitoring points on ground surface. The result indicates that the diameter is appropriately 2 m and the compressive strength is higher than 3.0 MPa, which satisfy the designed specifications. When the shield excavates beneath the overlying tun-

* 收稿日期:2017-06-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0800207),The National Key Research and Development Program of China (2016YFC0800207);中建隧道建设有限公司技术开发课题(17430102000417),The Industrial Technology and Development Program of Zhongjian Tunnel Construction Co Ltd(17430102000417);湖南省重点研发计划项目(0105679005),The Provincial Key Research and Development Program of Hunan(0105679005);长沙市科技计划项目(kq1703051),The Research Program of Changsha Science and Technology Bureau(kq1703051)

作者简介:陈仁朋(1972—),男,浙江衢州人,湖南大学教授,博士

† 通讯联系人,E-mail:chenrp@hnu.edu.cn

nels, the settlement of the overlying tunnel present Gaussian curve distribution, and the maximum settlement is 4.33 mm. Due to the unloading of the shield excavation, the maximum additional stress is 1.4 MPa and the maximum settlement is 1.1 mm. Surface settlement is relatively small in the MJS horizontal pile reinforcement area. Overall, MJS horizontal pile can effectively reduce the settlement of existing tunnel, and can offer reference for the application of similar engineering.

Key words: metro jet system(MJS); tunnel excavations; operational parameters; surface settlement

近年来,随着地铁建设加速及运营里程的增加,盾构穿越已建运营隧道的概率越来越大,确保邻近既有运营隧道的结构安全和正常运营成为盾构法隧道工程中必须解决的难题^[1]。

针对这一问题,目前有部分学者分别从现场实测、模型试验、理论计算和数值模拟等方面进行研究。Kim等^[2]和Byun等^[3]分别进行了临近隧道开挖对均质土体中已埋管道影响的模型试验研究。模型试验成本较高,试验繁琐,耗时长,无法应用到每个工程中;张治国等^[4]首次采用弹性层状半空间地基模型,建立了用连续弹性方法研究这一问题,但只考虑了土体损失的影响;张琼方等^[5]利用Mindlin^[6]解,将上覆隧道视为Winkler弹性地基梁,推出盾构下穿引起上覆隧道竖向位移的理论解,但公式较为复杂;毕继红等^[7]分别用数值模拟的方法分析了盾构开挖对邻近既有隧道的影响,但施工现场状况复杂,数值模拟难以综合考虑各种因素的影响。目前较为普遍的研究方法是通过现场布置监测点,分析盾构下穿对上覆隧道的影响。Fang等^[8]分析工程实例发现,盾构近距离下穿上覆已建运营隧道,会致使上覆双圆隧道沉降呈“W”形分布;张琼方等^[9]和朱蕾等^[10]通过现场实测数据分析盾构下穿的影响,发现隧道交叉区域,上覆隧道隆起值达到16 mm,但未提出控制这一变形的有效措施;李磊等^[11]通过现场监测数据结合数值模拟,研究了盾构下穿时注浆压力和掌子面推力对上覆隧道沉降的影响。然而,上述研究多涉及到盾构下穿对上覆已建隧道受力变形规律的影响,而对保护措施及其应用的研究较少。

本文依托长沙地铁4号线盾构下穿2号线运营隧道工程,通过现场钻孔取芯与室内试验研究MJS水平桩的成桩效果,并在地表和2号线隧道内布置竖向位移监测点、隧道内应力监测点,研究在MJS水平桩加固的作用下,盾构下穿对地表变形和上覆已建运营隧道受力变形的影响,其研究成果可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

长沙地铁2号线是目前正在运营的东西走向的地铁线路,左右线轴线间距15 m,与4号线呈大约60°夹角相交,4号线和2号线的平面位置关系如图1所示。在建4号线溁湾镇站分别与既有地铁2号线隧道水平净距分别约为38.7 m、28.8 m,其左右线轴线间距17 m,盾构机在溁湾镇站始发后向南下穿已建地铁2号线。

已建2号线隧道埋深9 m左右,4号线隧道埋深18 m左右,4号线区间隧道与2号线最小竖向净距约2.857 m,如图2所示。场地地层分布大致可分为4层:第1层为杂填土,厚度约1 m;第2层为细砂,厚度为8.4 m;第3层为圆砾,厚度约7.3 m;第4层为中粗砂,地下水位在地表下3 m左右。通过室内实验获得圆砾和中粗砂的级配曲线,其不均匀系数分别为13.75、17.5,级配良好。MJS水平桩施工和4号线盾构掘进位置主要位于④₄中粗砂层,室内级配实验的结果表明该砂土粒径大于0.25 mm的颗粒含量占全重的55%,粒径大于0.5 mm的颗粒含量占全重的23%,相应土层具体物理力学性质指标见表1。

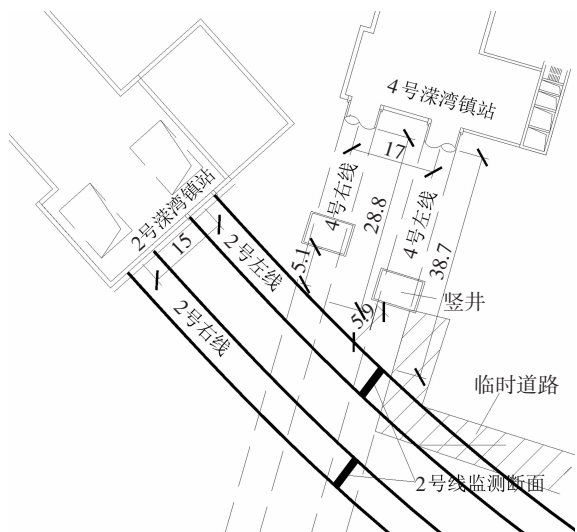


图1 4号线与2号线平面位置图

Fig.1 Plan view of metro line 4 and line 2

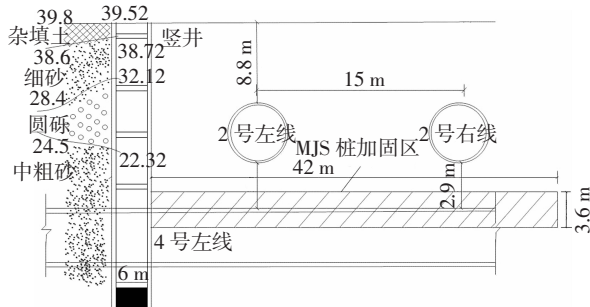


图 2 4 号线与 2 号线剖面图

Fig.2 Sectional view of metro line 4 and line 2

表 1 土层物理力学性质参数表

Tab.1 Soil physical and mechanical properties

土层	天然重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	饱和重度 γ_{sat} / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模 量 E / MPa	泊松 比 ν	有效黏 聚力 c /kPa	有效内 摩擦角 φ ($^{\circ}$)
杂填土① ₁	19	19.2	6.4	0.3	46	18.5
细砂④ ₃	19.6	19.8	32	0.3	2	32
圆砾④ ₅	20	20	34.9	0.27	0	37.4
中粗砂④ ₄	19.5	19.5	37.8	0.3	2	34

4 号线掘进采用土压平衡盾构机, 主机长 12.5 m, 刀盘开口率为 37%, 最大开挖直径为 6.29 m. 隧道结构采用预制钢筋混凝土管片, 综合考虑各种因素, 采用错缝拼装方式^[12], 管片外径 6 m, 内径 5.4 m, 幅宽 1.5 m, 管片之间采用高强度螺栓连接, 断面贴有遇水膨胀橡胶条用于防水. 盾构机掘进过程中, 通过计算机对掘进参数进行实时监控记录. 为减小盾构下穿对上覆已建地铁运营隧道的影响, 对该隧道采取的保护措施如下:

1) 4 号线左右线路上各设置一个长 8 m, 宽 6 m 的竖井(如图 1 所示), 左线竖井距 2 号线最短距离 5.9 m. 竖井内设有一道冠梁, 三道腰梁, 采用袖阀管注浆方法在竖井底部施工 4 m 厚水泥浆加固体和 2 m 厚双液浆加固体.

2) 在竖井内施工 MJS 施工平台, 施工平台为 500 mm 厚 C25 素混凝土加固层.

3) 在 4 号线左右隧道拱顶上方各施工两排共计 13 根 MJS 桩, 设计桩径 2 m, 桩长 42 m, 桩间搭接厚度 400 mm, 桩剖面呈半圆形, 图 3 为 4 号左线拱顶施工的 MJS 桩示意图. 水平桩采用跳桩法施工, 具体的施工顺序是: 12、6、13、11、9、10、8、7、5、3、1、2、4. 其中, 7 号和 5 号桩、3 号和 1 号桩、2 号和 4 号桩皆

为两根桩同时施工. 13 根 MJS 桩在隧道开挖区上方及周边形成相互搭接的具有高强度的水平旋喷固结体拱棚, 拱棚长 42 m, 最大截面高度为 3.6 m. MJS 桩施工的主要技术参数如表 2 所示.

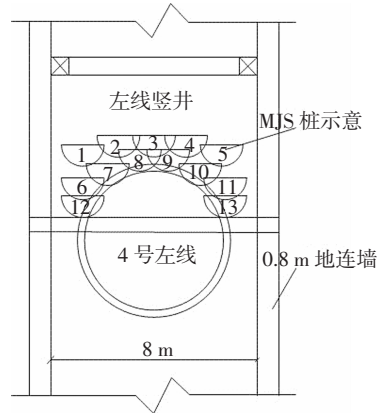


图 3 MJS 桩示意图

Fig.3 Schematic diagram of MJS piles

表 2 MJS 工法主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters of MJS method

项目	设计参数	实际参数
喷浆压力	≤ 40 MPa	≤ 38 MPa
空气压力	0.7 MPa	0.7 MPa
地内压控制范围	0.06 ~ 0.10 MPa	0.22 ~ 0.38 MPa
水泥浆用量	2 m^3/m (180 $^{\circ}$)	1.9 m^3/m (180 $^{\circ}$)
回抽速度	15 min/m(180 $^{\circ}$)	17.3 min/m(180 $^{\circ}$)
回转速度	4 r/min(半圆)	3.4 ~ 4.1 r/min(半圆)
提升步距	25 mm	25 mm
浆液流量	85 ~ 100 L/min	≤ 85 L/min
浆液类型	纯水泥浆	纯水泥浆
水灰比	1 : 1	1 : 1

2 MJS 加固效果研究

2.1 现场取样

为检验 MJS 水平桩施工的有效性, 13 根 MJS 桩施工完后, 在加固区进行现场竖向钻孔取样. 图 4 中线 1~4 为 2 号线隧道轮廓外扩 1 m 线, 共布置 10 个取样孔, 1 号、3 号、6 号、9 号钻孔分别位于 4 号线轴线与各条外扩 1 m 线相交位置, 其他 6 个钻孔位于 4 号线轮廓线与各条外扩 1 m 线相交位置, 具体布置位置如图 4 所示. 为研究 MJS 成桩效果和加固体性能, 在 12 号和 6 号 MJS 桩施工完成, 凝期达到 30 d 后, 在图 4 所示的 A、B 取样孔钻孔取样, 分别制取 3 个试样. 试样长径比为 1.0, 测试尺寸为 70 mm \times 70 mm 的圆柱体试样的抗压强度.

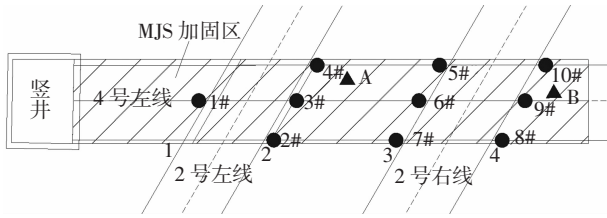


图4 钻孔位置图

Fig.4 Drilling position map

表3为10个取样孔中取芯情况的统计,钻孔深度设定在19~22m之间,以保证钻孔深度能到MJS桩加固区域.加固体芯样出现位置在17.4~17.6m之间,基本在同一地层深度位置,故MJS水平桩施工时的控制较为精准.1号、3号、6号、9号取样孔位于4号左线轴线位置,MJS加固体厚度较隧道边缘位置加固体小,从图3中可以看出芯样长度应为一倍MJS桩径左右,隧道正上方的加固体芯样长度在1.2~1.6m之间,满足要求.在隧道边缘位置取的加固体芯样长度在1.6~2.9m之间,总体来看,MJS水平桩成桩效果较好.

表3 取芯情况统计表

Tab.3 Calculate the situation of the core m

孔号	钻孔深度	芯样出现位置	芯样长度
1#	19.0	17.4	1.6
2#	21.0	17.4	2.9
3#	19.5	17.4	1.6
4#	22.0	17.7	2.3
5#	21.8	17.6	1.7
6#	20.6	17.4	1.5
7#	21.0	17.5	2.5
8#	20.5	17.6	2.6
9#	19.0	17.4	1.2
10#	21.8	17.6	1.6

利用微机控制压力试验机测得A组试样抗压强度平均值为3.9MPa,B组为3.53MPa,如表4所示,满足设计的强度要求.

表4 芯样强度统计表

Tab.4 Core strength statistics

孔号	试样编号	直径×高度 /(mm×mm)	抗压强度 /MPa	平均值 /MPa
A	1	68.5×68.0	3.33	3.90
	2	68.0×67.0	2.92	
	3	68.5×67.0	5.44	
B	1	68.0×70.0	2.65	3.53
	2	68.0×68.0	4.80	
	3	68.0×68.0	3.13	

3 盾构掘进参数分析

3.1 土仓压力

土仓压力是土压平衡盾构施工管理的主要参数,是土压平衡盾构保证开挖面稳定、控制地表变形的关键指标.意大利学者Russo^[13]在总结欧洲地铁隧道数值分析结果和现场实测资料的基础上,提出保证掘进工作面稳定的土压力经验公式为

$$p = K_0\gamma'H + p_w \pm 20 \quad (1)$$

式中: K_0 为静止土压力系数; γ' 为土的有效重度(kN/m^3); H 为隧道拱顶上覆土厚度(m); p_w 为水压力;20kPa是波动压力.

根据公式(1),计算出4号左线盾构下穿时,土仓压力应保持在222~262kPa之间,和实测结果较为相似.图5反映盾构机掘进过程中各环拼装时土仓压力的大小,前10环拼装时,主要是适应地层的过程,土仓压力设置较小;16和20环位置处,盾构机破除竖井井壁,混凝土结构稳定性较好,所以土仓压力设置较小;从第21环起,盾构机开始下穿上覆已建运营2号线,盾构机穿越2号线之前(11~20环),土仓压力平均值为181kPa,下穿2号左线时,土仓压力平均值为178kPa,此时上覆隧道发生沉降,为减小上覆隧道进一步沉降,下穿2号右线时调整掘进参数,土仓压力平均值为221kPa,较左线提高了43kPa.

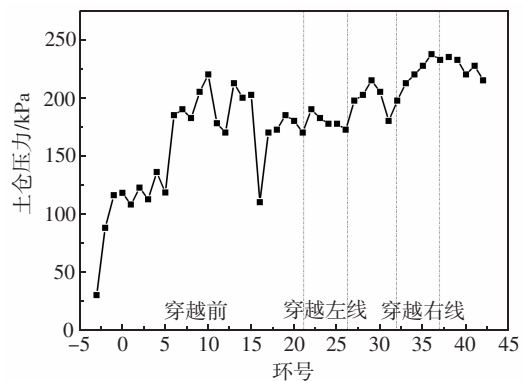


图5 土仓压力变化曲线

Fig.5 Soil pressure change curve

3.2 总推力与掘进速度

盾构机掘进过程中,陈仁朋等^[14]认为总推力主要由盾构机正面压力和机身与周围土体接触所引起的摩擦力两部分组成,其中,盾构机正面压力由刀盘面板压力和刀盘开口压力两部分组成.图6反映4

号左线掘进过程中各管片拼装时总推力和推进速度的变化情况,和土仓压力的情况一致,前 10 环拼装时,参数设置较小;16 和 20 环位置处,盾构机破除竖井井壁,混凝土井壁坚硬,所以推力设置增大,推进速度同时有所降低;盾构机穿越 2 号线之前(11 ~ 20 环),推力和推进速度的平均值分别为 13 450 kN 和 30 mm/min,下穿 2 号左线时,二者的平均值分别为 13 560 kN 和 41 mm/min,下穿 2 号右线时,由于土仓压力的提高,推力平均值变为 14 930 kN,较左线提高 1 370 kN,推进速度平均值保持不变。

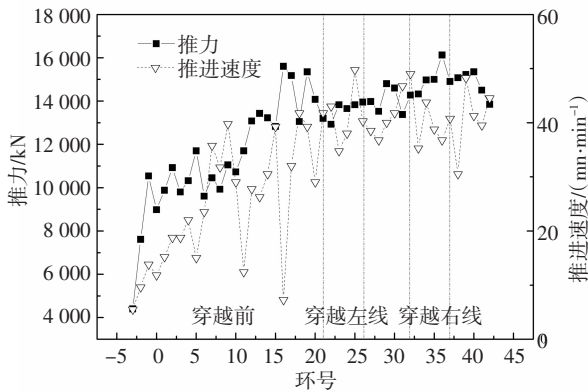
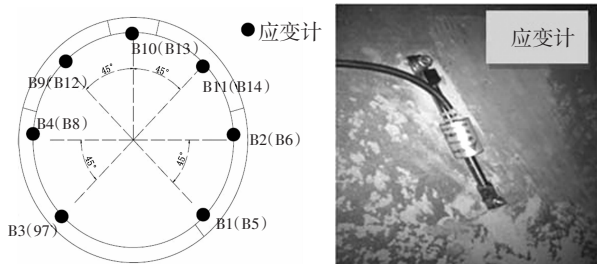


图 6 千斤顶推力和推进速度变化曲线

Fig.6 Thrust and propulsion speed change curve

4 隧道内应力监测

2 号线管片拼装形式采用“3+2+1”型错缝拼装,在图 1 中 2 号线监测断面处,管片内侧表面安装弦式表面应变计监测隧道内侧受力变形状况,其中应变计测的是管片的环向应变,具体安装位置如图 7 所示(括号内表示左线布置的传感器编号)。



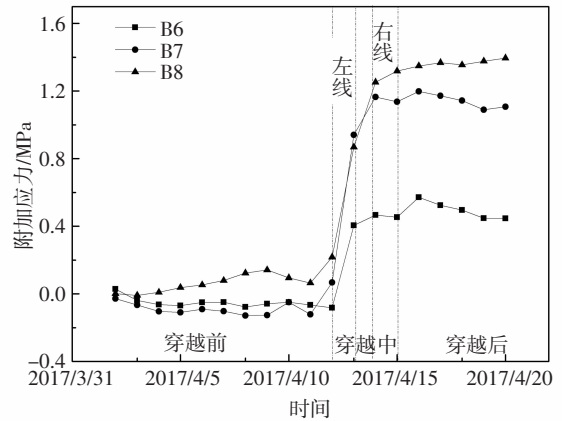
(a) 变形传感器布置位置图 (b) 变形传感器现场布置图

图 7 应变传感器布置图

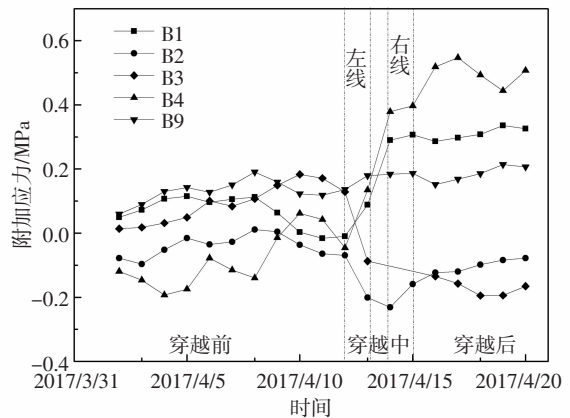
Fig.7 Layout of strain sensors

典型应变传感器布置位置处的附加应力变化情况如图 8 所示,其中管片附加应力为在实测管片应变的基础上乘以管片混凝土(C50)模量 34.5 GPa 得

到,隧道内侧受拉为正,受压为负.图 8 表明盾构机在下穿 2 号线之前,各传感器位置处附加应力基本不变,下穿期间各处产生附加应力;下穿左线时,左右隧道传感器附加应力陡增,左右线隧道附加应力最大分别达到 1 MPa 和 0.2 MPa,由于掘进位置离右线有一段距离,故右线传感器附加应力相对较小;盾构机掘进参数调整后,下穿右线时,左右隧道各位置处传感器产生的附加应力较小,最大分别为 0.4 MPa 和 0.2 MPa;穿越后,各传感器数值基本保持不变。



(a) 左线传感器附加应力变化



(b) 右线传感器附加应力变化

图 8 传感器附加应力变化

Fig.8 Additional stress changes in the sensor

图 9 反映盾构下穿结束后,2 号右线监测断面的最终附加应力分布图. 由于盾构开挖 2 号线下方土体,在 2 号线隧道垂直方向发生卸载,隧道两侧的土压力基本保持不变,相当于三轴实验中的被动挤伸过程,同时由于两条线路的斜交,致使隧道最终的附加应力状况如图 10 所示。

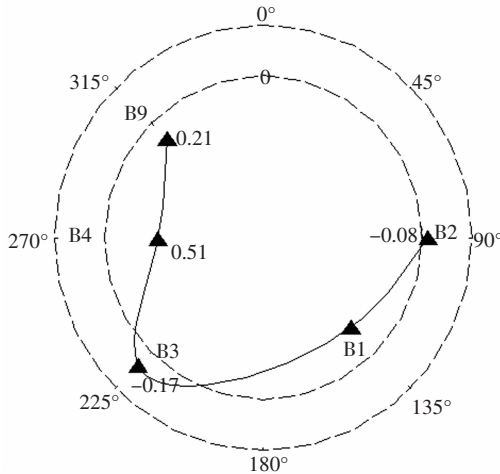
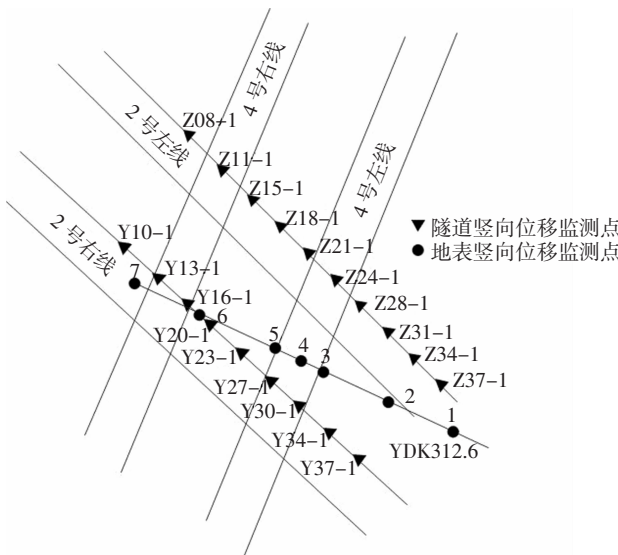
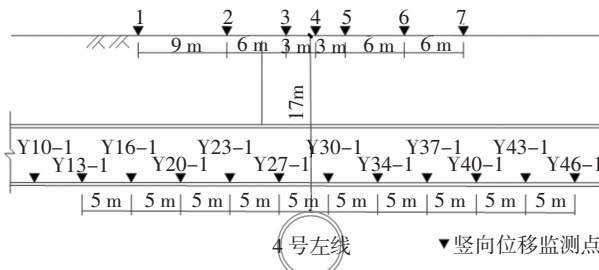


图9 监测断面附加应力图

Fig.9 Monitoring section additional stress map



(a) 监测点布置平面图



(b) 监测点布置剖面图

图10 监测点布置图

Fig.10 Layout of monitoring point

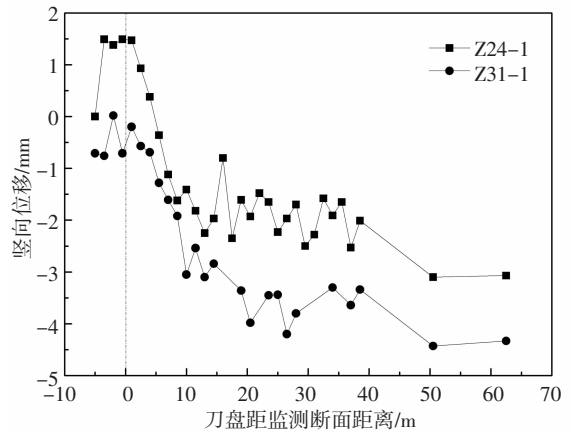
5 沉降监测分析

为研究盾构下穿施工对上覆已建运营隧道和地表变形的影响,对两条线路交叉区域的地表和上覆

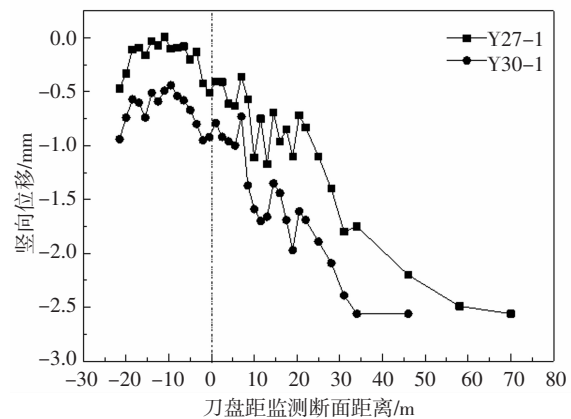
隧道的竖向位移进行监测.在2号线右线上方ZDK27+312.6断面布置地表竖向位移监测点,通过水准仪监测地表沉降.同时在2号左右线隧道道床位置每隔5 m布置竖向位移监测点,采用液压式静力水准仪进行实时监测,监测点详细布置位置如图10所示.规定竖向位移沉降为负,隆起为正.

5.1 运营隧道沉降分析

图11为上覆已建运营隧道典型竖向位移监测点在盾构掘进过程中的沉降曲线,在穿越上覆已建隧道之前,Z24-1监测点隆起1.5 mm,其余监测点表现为轻微沉降;盾构机在下穿2号左线过程中,2号左线沉降较快发展,调整掘进参数后,穿越2号右线下方时,相对左线2号右线沉降发展较为平缓,在盾尾注浆区沉降开始较快发展;盾头距监测断面隧道50 m之外后,上覆隧道沉降趋于稳定.



(a)左线部分监测点沉降曲线



(b)右线部分监测点沉降曲线

图11 隧道竖向位移监测点沉降曲线

Fig.11 Vertical settlement curve of tunnel vertical displacement monitoring point

隧道掘进过程中土体的沉降槽形态一般可以用高斯曲线拟合,即Peck公式^[15]:

$$S_v = S_{\max} \exp \left[-\frac{x^2}{2i^2} \right] \quad (3)$$

式中: S_{\max} 为土体最大沉降; i 为沉降槽宽度系数; x 为到隧道轴线的水平向距离. 然而, Celestino 等^[16]在分析案例发现, 高斯曲线有时不能精确地描述土体实际的沉降槽形态. 因此, 修正高斯曲线公式的提出较好地解决了这一问题:

$$S_v = \frac{n}{(n-1) + \exp[\alpha(x/i)^2]} S_{\max} \quad (4)$$

$$n = e^{\alpha} \frac{2\alpha - 1}{2\alpha + 1} + 1 \quad (5)$$

i 和 S_{\max} 的意义和式(3)中相同, n 为沉降槽宽度的控制参数; α 影响沉降曲线的反弯点位置. 当 $\alpha = 0.5$ 时, 式(4)和式(3)相同.

上覆已建运营隧道脱离盾构机的影响范围后, 为描述上覆隧道的沉降形态, 结合实测数值和式(4)计算的理論值, 绘制了如图 12 所示的沉降槽曲线. 由图 12 可知, 2 号右线的实测值和通过公式(4)计算得到的理論值所描绘的沉降槽形态吻合度高, 最大沉降发生在隧道中心线位置, 达到 2.56 mm; 离轴线越远沉降越小, 距隧道中心线 20 m 左右, 上覆隧道沉降基本为 0.2 号左线的左侧位置由于铺有临时道路(见图 1), 在车辆荷载的作用下, 沉降有所偏大, 距 4 号左线左侧 10 m 位置处, 2 号左线隧道沉降最大, 达到 4.33 mm, 致使 2 号左线实测值和通过计算的理論值所描绘的沉降槽形态有所差别, 具体计算参数如表 5 所示. 结合下穿 2 号左线时的掘进参数和上覆隧道的响应, 穿越 2 号右线时, 土仓压力和总推力皆有所提高, 致使 2 号右线隧道的沉降值整体小于 2 号左线隧道.

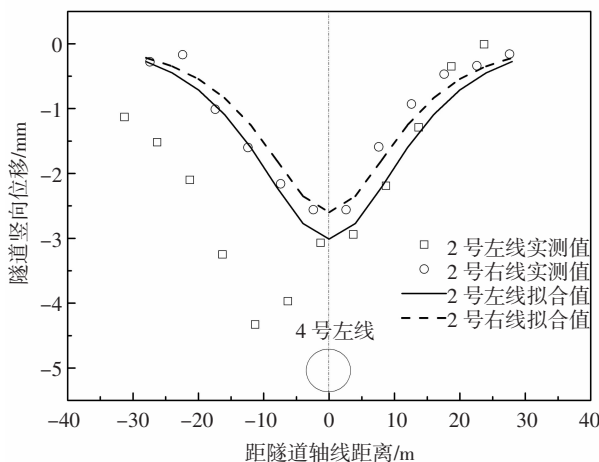


图 12 2 号线横向沉降槽

Fig.12 Line 2 transverse settling tank

表 5 上覆隧道的沉降计算参数

Tab.5 Settlement parameters of overlying tunnels

项目	实测最大沉降 S_{\max}/mm	拟合最大沉降 S_{\max}/mm	沉降槽宽 度/ m	α
2 号左线	4.33	3.01	8.70	8.70
2 号右线	2.56	2.60	7.60	0.10

5.2 地表竖向位移分析

盾构掘进过程中, 从盾构机开始破除竖井井壁到盾头离监测断面 65 m 远期间, YDK312.6 断面 1 ~ 7 号竖向位移监测点的沉降情况如图 13 所示. 在盾头到达监测断面之前, 各监测点皆发生隆起, 3 ~ 5 号监测点最大隆起值达到 1.5 mm 左右; 盾头到达监测断面后, 各监测点开始沉降; 盾尾到达监测断面时, 地表各监测点沉降发生陡变, 1 ~ 7 号监测点分别沉降 0.37 mm、1.32 mm、1.25 mm、1.52 mm、1.51 mm、0.71 mm 和 0.18 mm, 距离隧道中心线越近沉降越大; 盾头距监测断面 20 m 后, 各监测点沉降基本稳定.

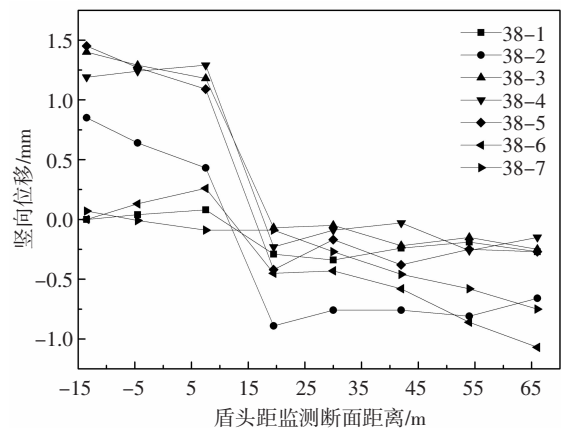


图 13 地表 ZDK27+312.6 断面(38 环)监测点竖向沉降

Fig.13 Surface ZDK27 + 312.6 section (38th ring) monitoring point vertical settlement

盾构机远离监测断面 Y312.6 后, 监测断面的沉降形态如图 14 所示. 整体来看, 地表位移值较小, 最大为 1.1 mm, 小于上覆 2 号线施工时引起的地表最大沉降(7 mm 左右), 远小于我国规定的地铁隧道允许的地表沉降值 30 mm, 同时也远小于同类工程引起的地表沉降^[9-11], 表明 MJS 水平桩加固的有效性. 地表和上覆已建隧的沉降槽形态有所不同, MJS 加固区地表的沉降明显小于未加固区, 这是由于在盾构机到达监测断面之前, MJS 加固区地表的隆起值较大, 进而使最终产生的沉降值较小.

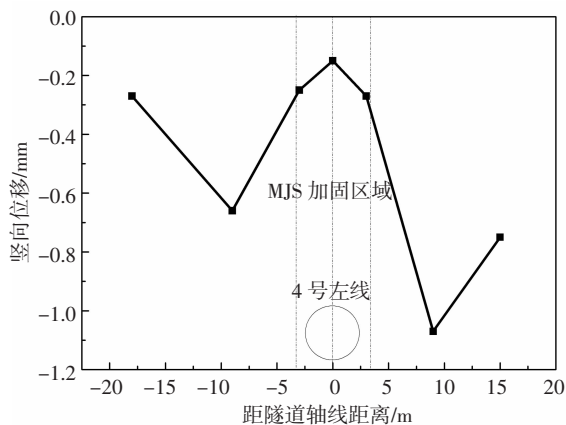


图 14 ZDK27+312.6 断面(38 环)横向沉降槽

Fig.14 ZDK27 + 312.6 section transverse settling tank

6 结 论

盾构近距离下穿上覆已建运营隧道会致使隧道的受力变形发生改变,同时也会影响地表的竖向位移。基于长沙地铁 4 号线近距离下穿上覆已运营 2 号线,通过现场布置竖向位移和应力监测点,研究在 MJS 水平桩加固条件下,盾构掘进时周边地层与上覆隧道的变形响应规律,结论如下:

1) 在中粗砂地层中,MJS 工法桩施工桩身完整性较好,单轴抗压强度达到 3.5 MPa 以上。

2) 盾构下穿上覆隧道之前,上覆隧道附加应力基本未发生改变,下穿时隧道在竖直方向卸载,致使在水平方向受到挤压,最大附加应力为 1.4 MPa。

3) 盾构下穿过程中,上覆左线隧道最大沉降 4.33 mm;右线隧道最大沉降 2.56 mm,沉降槽形态符合高斯曲线;刀盘距离上覆隧道 25 m 后,隧道沉降基本稳定。地表最大沉降 1.1 mm,MJS 加固区地表沉降仅有 0.3 mm,远小于同类工程引起的地表沉降值。

4) MJS 水平桩加固隧道之间土层,能有效降低盾构掘进过程中对地表和上覆隧道的影响,可为类似工程提供借鉴。

参 考 文 献

[1] 周念清,魏诚寅,娄荣祥,等.上海地铁 M4 线修复的深基坑降水应急预警体系[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(12):25—31.
ZHOU N Q,WEI C Y,LOU R X,*et al.*Emergency warning system of deep foundation pit dewatering for Shanghai metro line No.4 reconstruction project [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2012,39(12):25—31.(In Chinese)

[2] KIM S H,BURD H J,MILLIGAN G W E.Model testing of closely spaced tunnels in clay[J].Geotechnique,1998,48(3):375—388.

[3] BYUN G W, KIM D G, LEE S D. Behavior of the ground in

rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 361—367.

[4] 张治国,黄茂松,王卫东.层状地基中隧道开挖对临近既有隧道的影响分析[J].岩土工程学报,2009,31(4):600—608.
ZHANG Z G,HUANG M S,WANG W D.Response analysis of existing tunnels due to adjacent tunnelling in multi-layered soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 600—608.(In Chinese)

[5] 张琼方,林存刚,丁智,等.盾构近距离下穿引起已建地铁隧道纵向变形理论研究[J].岩土力学,2015,36(S1):568—572.
ZHANG Q F, LIN C G, DING Z, *et al.* Theoretical analysis of vertical deformation of existing metro tunnel induced by shield tunneling under-passing in a short distance [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1):568—572. (In Chinese)

[6] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid [J]. Journal of Applied Physics, 1936, 7(5):195—202.

[7] 毕继红,刘伟,江志峰.隧道开挖对地下管线的影响分析[J].岩土力学,2006,27(8):1317—1321.
BI J H, LIU W, JIANG Z F. Analysis of effects of tunnel excavation on underground pipeline [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1317—1321. (In Chinese)

[8] FANG Q,ZHANG D L,LI Q Q,*et al.* Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 45:128—137.

[9] 张琼方,夏唐代,丁智,等.盾构近距离下穿对已建地铁隧道的位移影响及施工控制[J].岩土力学,2016,37(12):3561—3568.
ZHANG Q F,XIA T D,DING Z,*et al.* Effect of nearby undercrossing tunneling on the deformation of existing metro tunnel and construction control [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12):3561—3568.(In Chinese)

[10] 朱蕾,赵敬妍.盾构近距离下穿对上覆已建隧道影响的实测研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(3):656—662.
ZHU L,ZHAO J Y. Monitoring data analysis of shield-driven construction undercrossing the existing tunnel in a short distance [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3):656—662. (In Chinese)

[11] 李磊,张孟喜,吴惠明,等.近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J].岩土工程学报,2014,36(6):1036—1043.
LI L,ZHANG M X,WU H M,*et al.* Influence of short-distance multi-line overlapped shield tunnelling on deformation of existing tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6):1036—1043.(In Chinese)

[12] 方勇,汪辉武,郭建宁,等.下穿黄河盾构隧道管片衬砌结构受力特征模型试验[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(5):132—142.
FANG Y, WANG H W, GUO J N, *et al.* Model test study on the mechanical characteristics of segment lining for the shield tunnel undercrossing the Yellow River [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(5):132—142.(In Chinese)

[13] RUSSO G. Evaluating the required face-support pressure balance control for EPB advance mode [J]. Gallerie Grandi Opere Sotteranee, 2003, 71: 27—32.

[14] 陈仁朋,刘源,汤旅军,等.复杂地层土压平衡盾构推力和刀盘扭矩计算研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):26—32.
CHEN R P, LIU Y, TANG L J, *et al.* Research on calculation of thrust and cutter head torque on shield in complex strata [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 26—32.(In Chinese)

[15] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]// Proceedings 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Report. Mexico City, 1969:225—290.

[16] CELESTINO T B, GOMES R A M P, BORTOLUCCI A A. Errors in ground distortions due to settlement trough adjustment [J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2000, 15(1):97—100.