

文章编号:1005-0523(2017)02-0020-09

上方开挖卸荷作用下地铁隧道的实测数据分析

郭鹏飞,杨龙才,于 正

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 200092)

摘要:在已有隧道上方进行基坑开挖,下方隧道的变形是基坑施工控制的关键。采用实测分析的方法,详细介绍了在已建盾构隧道上方进行基坑开挖的工程中,下卧隧道的变形控制措施,即在基坑开挖前进行搅拌桩加固、设置抗拔桩并在隧道内设置“米”字型支撑,通过实测数据分析研究了上方基坑开挖过程中下卧隧道的变形规律。得到如下结论:搅拌桩加固过程中,隧道发生轻微的下沉变形,而基坑开挖则会导致隧道整体抬升与横截面收敛变形;搅拌桩加固与抗拔桩能有效控制施工过程中的隧道隆起变形,而隧道内的“米”字型加固则能有效减小隧道的收敛变形,搅拌桩施工引起隧道发生“横鸭蛋”式收敛变形,而后续的基坑开挖则对隧道的收敛变形影响不大。

关键词:基坑开挖;下卧隧道;隆起变形;收敛变形

中图分类号:TU470 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.02.003

随着城市化进程的不断推进,城镇人口不断增加,城市拥挤、交通拥堵等现象日益严重。由于地铁线路多埋置于地下,与其他地面建筑配合,可使城市土地资源得到充分利用,因此得到迅速发展。截止2014年底我国已有22个城市开通了城市轨道交通线路,运营里程达3 155 km,其中地铁线路2 438 km,且在开通运营的地铁线路中多以地下线路为主,以上海为例,地下线路所占比例竟达70%左右。城市轨道交通工程能够方便人们出行、解决城市交通拥堵问题,同时也给城市建设带来了新的技术难题,如在地铁隧道上方进行的基坑开挖工程等。在国内外的地铁建设过程中均遇到过此类问题,如上海世纪大道杨高路立交上跨地铁2号线工程^[1,2]、南京龙蟠路隧道上跨地铁1号线工程^[3],国外的新加坡Tan Tock Seng(TTS) hospital上跨Mass Rapid Transit(MRT)隧道工程^[4]等。

盾构隧道对变形的要求相当严格,《城市轨道交通隧道结构安全保护技术规范》^[5]要求外部施工引起的地铁结构设施绝对沉降量及水平位移 ≤ 20 mm,隧道变形曲率半径 $\geq 15\ 000$ m,相对弯曲 $\leq 1/2\ 500$,直径累计变化量小于 $5\%D$ (D 为盾构隧道外径)。在此类立体交叉工程施工中,如何采取有效措施控制隧道变形,确保地铁结构安全,成为上方基坑施工控制的关键。

对于此类上跨于隧道上方的基坑工程,地基加固、设置抗拔桩、分区开挖等措施可适当减小下卧隧道的变形^[6]。但由于隧道的变形影响因素众多,如基坑规模、隧道刚度、周边环境等,以往的工程经验只能作为参考而不能完全照搬照用^[7],此外由于工程地质的地区差异性,即使采用同样的控制措施,在不同地区也会出现不同的控制效果。

杭州金沙湖绿轴下沉广场工程位于已建杭州地铁1号线上方,在隧道上方进行基坑开挖在杭州地区尚属首例,针对这一工程,本文详细介绍了基坑施工过程中的隧道变形控制措施,结合监测数据对基坑开挖过程中下卧隧道的变形规律进行分析,为此类外部卸荷作用下隧道变形规律的理论研究提供数据支撑,并为杭州地区类似工程积累经验。

收稿日期:2016-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51478353,41472247)

作者简介:郭鹏飞(1987—),男,博士研究生,主要从事地基处理及基坑方面的研究工作。

1 工程概况

金沙湖绿轴下沉广场位于杭州金沙湖北侧,毗邻下沙大道、德胜快速路,位于城市快速路九沙大道下方,为沟通大道两侧地块的人行交通广场工程。下沉广场上方为九沙大道钢梁桥,桥长 222 m、宽 50 m,桥梁下部结构为钢筋混凝土墩台立柱,直径 1.5 m 的钻孔灌注桩基础,在进行下沉广场施工时九沙大道桥梁已经完成了桩基施工。

下沉广场平面呈月牙儿形,基坑开挖面积为 12 580 m²,开挖深度 5.3 m,紧邻杭州地铁 1 号线下沙西站。基坑正下方存在既有 1 号线下沙西路站——金沙湖站区间盾构隧道,隧道外径 6.2 m,内径 5.5 m,壁厚 35 cm,环宽 1.2 m,错缝拼装,下沙西站为二层地下岛式车站,端头井埋深 17.3 m,标准段埋深 15.7 m。隧道与广场平面关系如图 1 所示,基坑坑底距地铁隧道左右线的竖向距离分别为 3.3 m 和 4.3 m。

场地范围内土层以填土、砂质粉土、粉砂夹砂质粉土、淤泥质粉质粘土为主,盾构主要穿越土层为钱塘江冲积层,以砂质粉土和粉砂夹砂质粉土层为主,地层分布如图 2 所示。各土层的主要物理力学指标见表 1。场地范围内地下水以第四纪松散岩类孔隙水为主,地下水位埋深 1.30~2.50 m,水位埋深随季节略有变化,年变化幅度 1.00 m 左右。

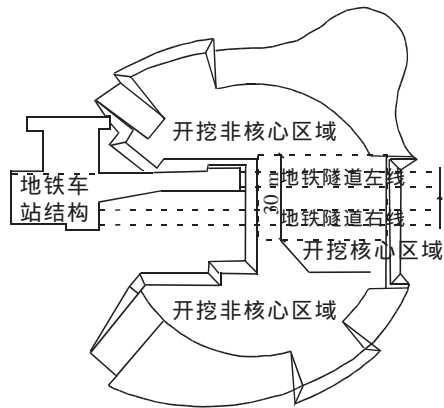


图 1 基坑与隧道平面关系示意图

Fig.1 Plan view of foundation pit and tunnel

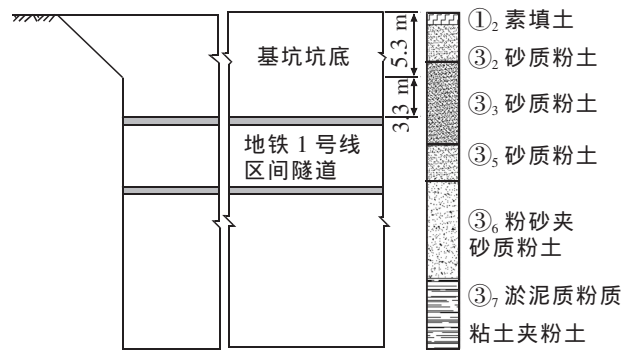


图 2 场地地层分布示意图

Fig.2 Distribution chart of layer

表 1 主要土层的物理力学指标

Tab.1 Physico-mechanical index of soil layer

层号	岩土名称	层厚 /m	含水量 w ₀ /%	天然密度 ρ/(g/cm ³)	孔隙比 e	压缩系数 a _v ^(0.1-0.2) /(MPa ⁻¹)	压缩模量 E _s ^(0.1-0.2) /MPa	凝聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
① ₂	素填土	0.2~2.8	31.3	1.88	0.88	0.18	10.36	—	—
③ ₂	砂质粉土	0.2~3.0	29.2	1.90	0.84	0.16	11.52	7.7	30.7
③ ₃	砂质粉土	1.9~8.1	27.9	1.95	0.77	0.13	13.84	8.1	30.7
③ ₅	砂质粉土	0.7~3.4	26.6	1.95	0.74	0.15	12.30	6.6	31.0
③ ₆	粉砂夹砂质粉土	1.4~11.0	25.2	1.97	0.71	0.14	12.33	4.5	32.0
③ ₇	淤泥质粉质黏土夹粉土	1.0~11.1	32.9	1.89	0.91	0.38	6.46	13.3	18.9
③ ₈	砂质粉土夹粉砂	1.5~4.0	28.5	1.90	0.83	0.18	10.70	6.8	30.7
⑥ ₁	淤泥质粉质黏土	2.9~9.8	41.8	1.78	1.18	0.73	3.1	19.2	10.7

2 基坑施工控制措施

根据相关研究成果,基坑开挖深度与隧道初始覆土厚度之间的比值(卸荷比 R)和基坑面积 S 是影响下卧隧道隆起变形的重要因素^[8]。本工程中,左右线的卸荷比分别 0.62 和 0.55,基坑面积 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,与同类工程相比,明显偏大,因此需要考虑分步施工,将基坑分为核心区与非核心区,首先进行核心区的施工,待核心区底板浇筑完成后再进行非核心区开挖,本文仅对核心区的施工过程进行分析。如图 1 所示,核心区宽度为 30 m,位于盾构隧道正上方,关于上下行中线对称。

2.1 地基加固

根据类似工程经验,对隧道周边土体进行加固提高其抗剪强度,能有效减小开挖引起的隧道隆起变形。与高压旋喷桩、袖阀管注浆相比,三轴搅拌桩对下方隧道的影响更小,应用也更为普遍。如图 3 所示,采用直径 850 mm,间距 600 mm \times 600 mm 的,三轴搅拌桩对坑底及隧道两侧进行加固,考虑搅拌桩加固对盾构隧道变形的影响,隧道顶部加固至距离隧顶 1 m 位置,左右线的加固深度分别为 6.8 m 和 8.5 m。对于隧道两侧,根据《城市轨道交通隧道结构安全保护技术规范》中规定,在地铁工程(外边线)两侧的邻近 3 m 范围内不能进行任何工程,因此取深层搅拌桩加固区与隧道水平间距 3.1 m,加固深度 26 m,进而在隧道周围形成“门式”联合加固体,要求加固体 28 d 无侧限抗压强度不小于 1 MPa。

2.2 设置抗拔桩

除地基加固外,基于下沉式广场抗浮的需要,同时也为了防止下方隧道发生明显的隆起变形,需在隧道左右线两侧及中间设置抗拔桩,抗拔桩由九江大道大桥桩基和专门设置的抗拔桩两部分组成,抗拔桩采用钻孔灌注桩进行施工,与深层搅拌桩形成组合式门柱,桩径 500 mm,桩长 47 m,间距 3.1 m。此外,由于九江大道上跨广场,跨越桥段在基坑开挖范围内共有 9 个桥墩,中心间距沿隧道向为 22.5 m,垂直隧道向为 15 m。每个桥墩下有两根桥桩,桩间距为 3.6 m,桥桩桩径 600 mm,桩长 57 m。待底板浇筑完成后,将抗拔桩、桥梁桩基与底板浇筑在一起,形成门式抗拔结构,抗拔桩平面设置示意图如图 4 所示。

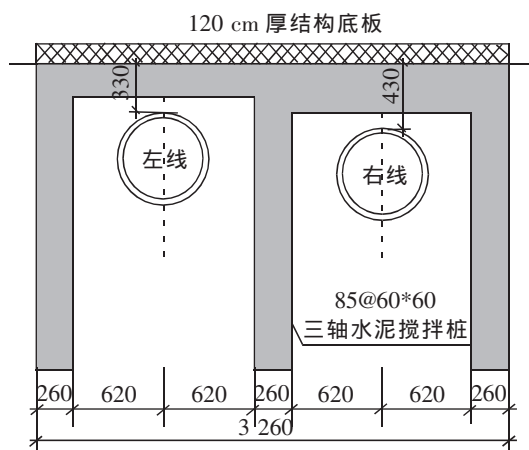


图 3 地基加固立面示意图(单位:cm)

Fig.3 Cross section of the soil reinforcement (cm)

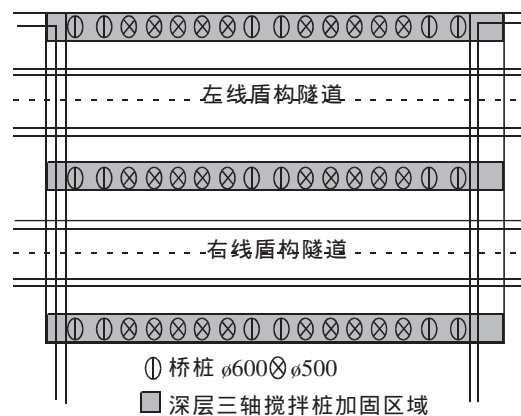


图 4 地基加固平面示意图

Fig.4 Plan view of ground stabilization

2.3 隧道内支撑

施工时下方隧道尚未开通运营,在进行上方基坑开挖前,除搅拌桩加固和设置抗拔桩外,还可在隧道内部对其进行“米”字型钢构加固,加强隧道的整体性,减小隧道的收敛变形。“米”字型钢构加固不仅可以防止加载作用下隧道断面发生竖向收敛变形,还可以抑制卸载作用下隧道断面的横向收敛。本工程中,在搅拌桩施工阶段,由于上方土体容重及刚度的增加,相当于对隧道断面进行加载,而基坑开挖阶段,又相当于对隧道断面进行卸载,最终的隧道断面收敛变形有“横鸭蛋”和“竖鸭蛋”两种情况。隧道内部的加固典型断面如图 5 所示。在贴近隧道管片位置设置环向 H 型钢,型钢型号为 200 \times 200 \times 8 \times 10,并用纵向 HW200 \times 200a 型钢

对环向型钢进行支撑,纵向支撑之间通过 12×800×800 钢板进行焊接连接。

2.4 分层分块开挖

本工程基坑开挖遵循“分块、分层、对称”的开挖原则,根据现场情况,将核心区域土体竖向分为两层,第一层厚 3.3 m,第二层厚 2.0 m;平面分为 9 个区域,如图 5 所示。开挖过程中采取跳挖方式进行。开挖时,首先大面积开挖至地面以下 3.3 m;之后根据图 6 分区垂直跳挖至坑底;跳槽的开挖顺序为:8(2)-7(3)-4(6)-5(1,9),由于基坑四周场地开阔,可进行放坡开挖。分区开挖结束后,应及时浇筑垫层与底板,减少基坑暴露时间,并在混凝土中添加早强剂。整个基坑开挖过程中,进行控制性降水,使水位控制在基坑开挖面以下 0.5~1.0 m。

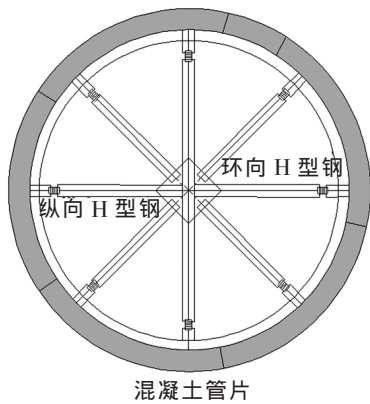


图 5 隧道内支撑加固示意图

Fig.5 Diagram of bracing reinforcement in tunnels

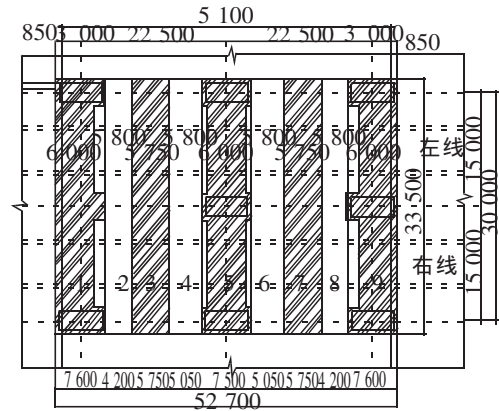


图 6 核心区分块开挖示意图(单位:mm)

Fig.6 Diagram of part-excitation in core area(mm)

除上述施工控制措施外,施工过程中还可通过一些辅助措施来限制隧道结构上浮,如隧道周围注浆加固,底板堆载反压和沙袋护坡等。核心区基坑的施工顺序依次为:① 三轴搅拌桩地基加固及隧道内“米”字形支撑设置,② 工程桩及桥桩基础施工,③ 第 1 层土体开挖,④ 第 2 层土体分区开挖并浇筑底板。

3 地铁监测概况

隆起及收敛变形过大易引起隧道结构裂缝、管缝张开及渗漏水的发生,根据工程特点及地铁保护要求,对地铁隧道的沉降及收敛变形进行观测,在基坑下方及两侧一定范围内每环管片上均布置相应测点,如图 7 所示,其中左线隧道沉降点从左至右编号依次为:L01-L90,共 90 个点,编号 L01~L50 等 50 个监测点位于开挖区域下方。右线位移观测点,从左至右编号为 R01-R128,共 128 个测点,右线 R51~R100 等 50 个测点位于开挖区域下方。每环隧道内的测点布置示意图如图 8 所示,其中隧道沉降测点布置在轨道板上两条轨道中间,收敛变形则通过隧道圆环的水平直径变化进行测量,所有监测项目的监测频率均为每日一次。

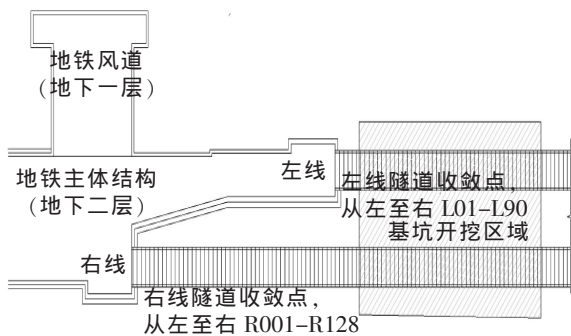


图 7 变形监测点布置示意图

Fig.7 Diagram of distribution of distortion monitoring points

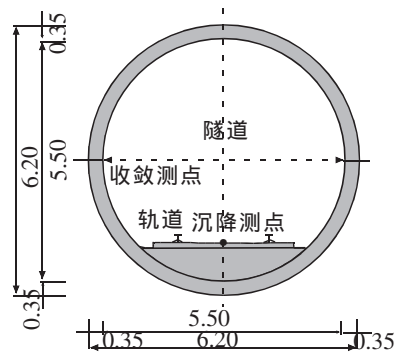


图 8 隧道内监测测点布置示意图(单位:m)

Fig.8 Diagram of distribution of tunnel monitoring points(m)

4 监测结果分析

在开挖卸载作用下,坑底土体发生回弹,两侧土体向坑内挤压,进而引起下方隧道发生变形,隧道的主要变形特征有隆起变形、水平变形和收敛变形^[10],由于本工程的基坑核心区域位于盾构隧道的正上方,开挖区域关于隧道线路左右对称,因此不会引起较大的水平位移。

4.1 隧道隆起变形

4.1.1 左线隧道

隧道隆起变形是上跨基坑施工控制的关键,图9给出了整个过程不同阶段的隧道竖向位移(图中隆起为“+”,沉降为“-”),可以发现,整个基坑施工过程中右线隧道的竖向位移均小于10 mm,满足盾构隧道对变形的控制要求。搅拌桩施工结束后,隧道的竖向位移表现为沉降,隧道最大沉降变形为4.5 mm,发生在第35环,而不是在第25环,竖向位移曲线并不关于基坑中心对称,且靠近车站一侧的竖向位移明显小于另外一侧,证明地铁车站对盾构隧道的竖向位移产生了一定的限制作用。在钻孔桩及第1层土体开挖结束后,隧道的沉降变形略有减小,可见钻孔桩及浅层土体的开挖对隧道竖向位移的影响不大。核心区第2层土体的分区开挖过程中,隧道发生明显的隆起变形,开挖结束后隧道的最终竖向位移由沉降转变为隆起,最大隆起量达5.5 mm。

图10为基坑开挖引起的隧道竖向位移,即以钻孔桩施工结束后的隧道位移作为初始值时,后续不同开挖阶段盾构隧道的竖向位移变形曲线。可见,第1层土体开挖引起的隧道隆起变形不大;后续对称分区开挖过程中,隧道的竖向位移不断增加,整个开挖阶段引起的最大竖向位移为8 mm,发生隆起变形的盾构隧道范围为10~65环,在临近地铁车站的0~10环内,竖向位移基本没有变化,且在75~90环区域,隧道却出现了反弯,发生了至少1 mm的沉降变形。

图11为左线不同测点竖向位移随施工时间的变化情况,其中第5,15,25,35,45环位于基坑施工范围内,第65,85环位于开挖范围外,搅拌桩施工结束后,除5,65和85环以外,其他测点均发生了明显的沉降变形,在钻孔灌注桩的施工过程中,各测点的竖向位移变形都不大。基坑开挖开始后,基坑开挖范围内的第5,15,25,35,45环均发生隆起变形,而第85环则反而发生沉降变形,65环的竖向位移则没有明显变化。

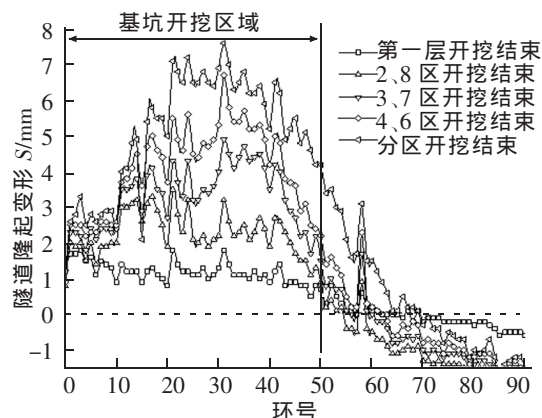


图10 开挖引起的左线隧道竖向位移曲线
Fig.10 Vertical displacement curve of the left tunnel by excavation

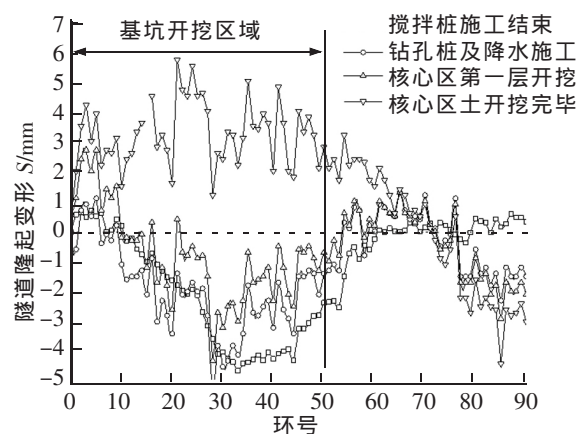


图9 左线隧道竖向位移曲线
Fig.9 Vertical displacement curve of the left tunnel

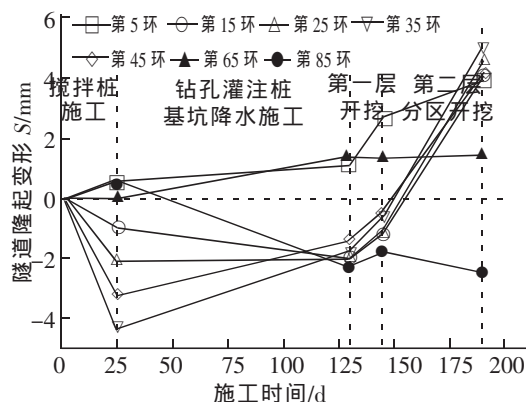


图11 左线典型测点的位移-时间曲线
Fig.11 Displacement-time curve of typical points of left tunnel

4.1.2 右线隧道

右线隧道与左线隧道最大的差别在于,隧道左端距离地铁车站较远,与车站的最短距离约 50 环,车站对基坑下方区域盾构隧道的约束作用减弱。

图 12 为右线隧道在基坑施工过程中不同阶段的隧道竖向位移曲线,从图中可以发现,整个施工过程中右线隧道的竖向位移均小于 10 mm,满足盾构隧道的变形要求。隧道 50~100 环位于基坑开挖范围内,搅拌桩施工开始后,基坑及两侧一定范围内的盾构隧道均发生了明显的沉降变形,其中 45~80 环的沉降变形较大,最大沉降达 7.5 mm,发生在 60 环左右,其余部分的沉降量均在 -2 mm 左右,最大位移发生在 60 环而不是 75 环(基坑中心),这可能与搅拌桩施工时,水泥旋喷的压力控制有关。

钻孔桩及基坑第一层开挖结束后,隧道的沉降变形逐渐减小,当第二层分区开挖结束后,0~60 环范围内的竖向位移几乎为 0,而 70~130 范围内的最终竖向位移表现为隆起,最大隆起值达 7.7 mm,发生在 80 环附近。

图 13 为以钻孔桩施工结束后的隧道位移作为初始值,基坑开挖引起的右线盾构隧道竖线位移。从图中可以发现,基坑开挖开始后,隧道不断发生隆起变形,尤其在基坑开挖范围内,隧道隆起变形更加明显,由于每次开挖都关于基坑(75 环)对称,因此隧道的变形曲线也基本关于 75 环对称,越靠近基坑中线,隧道隆起变形越大,基坑开挖结束后,由开挖引起的最大隧道变形为 6.3 mm,明显小于左线的最大隆起变形 8 mm,这与开挖结束后隧道的上覆土厚度有关,右线隧道的上覆土厚度(4.3 m)大于左线的覆土厚度(3.3 m)。

图 14 为右线部分圆环竖向位移随施工时间的变化情况,其中第 55,65,75,85,95 环位于基坑施工范围内,第 15,35 环位于基坑外靠近地铁车站一侧,第 115 环则位于开挖范围以外远离车站一侧。由图可知,搅拌桩施工结束后,所有测点

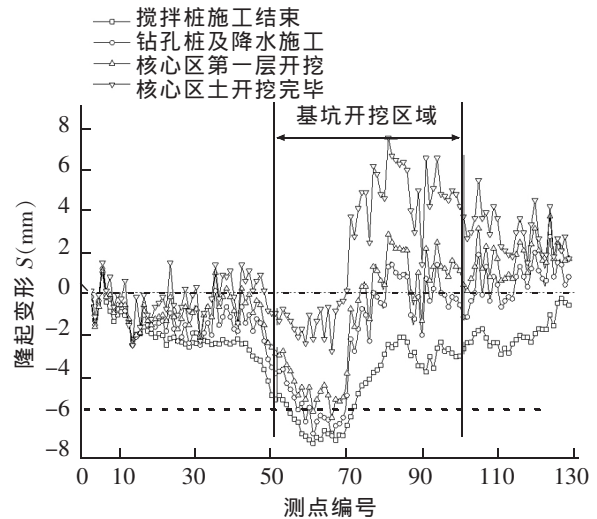


图 12 右线隧道竖向位移曲线

Fig.12 Vertical displacement curve of the right tunnel

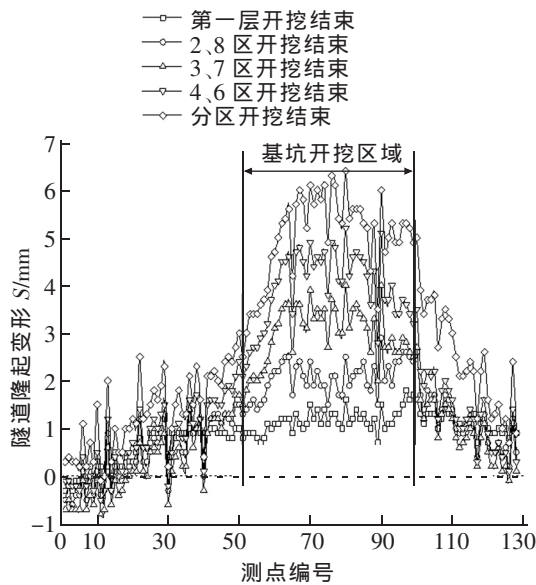


图 13 开挖引起的右线隧道竖向位移曲线

Fig.13 Vertical displacement curve of the right tunnel by excavation

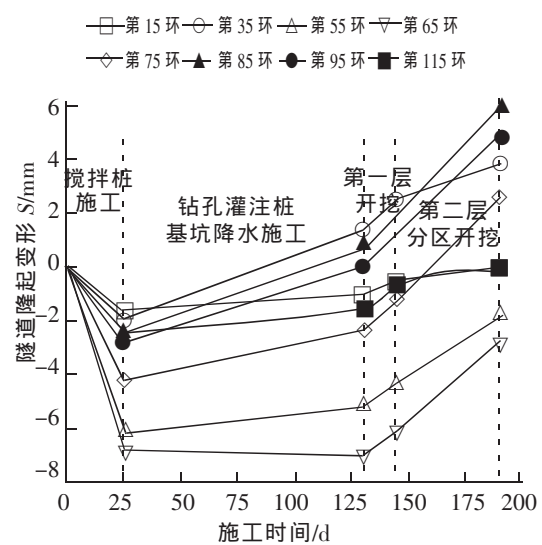


图 14 右线典型测点的位移-时间曲线

Fig.14 Displacement-time curve of typical points of right tunnel

均发生了一定的沉降变形,在钻孔灌注桩的施工过程中,多数盾构圆环的沉降数值逐渐减小。基坑开挖开始后,除基坑开挖范围外的第15,35,115环外,多数测点的隆起变形速率迅速增大。

4.2 隧道管片收敛

4.2.1 左线隧道

对于盾构隧道的收敛变形,同样是上跨基坑施工控制的关键,图15为三轴搅拌桩施工结束及基坑开挖结束两个阶段左线管片的收敛变形,监测时只对管片的水平收敛进行了监测,其中“+”代表直径增大,“-”代表直径减小。从图中可以发现,三轴搅拌桩施工结束后,几乎所有管片的水平收敛变形值均为“+”,即水平直径增大,管片圆环变形形态表现为“横鸭蛋”,产生这种变形的主要原因是搅拌桩加固后隧道上方土体容重和刚度增加,相当于对隧道截面进行竖向加载,此外搅拌桩施工过程中的搅拌压力同样会引起隧道发生竖向收敛变形。文献[11,12]采用有限元和理论计算的方法对基坑施工引起下卧隧道的收敛变形进行了计算分析,结果表明,基坑开挖卸荷作用下,下卧隧道会发生明显的“竖鸭蛋”式收敛变形,即水平收敛变形显著减小。而图15表明,当隧道上方进行开挖卸载后,在基坑开挖结束后,所有盾构圆环的水平收敛变形并无太大变化,只是略有减小(1 mm),证明盾构隧道一旦在外部扰动作用下发生收敛变形,将很难发生可逆变形。

图16为不同隧道圆环水平收敛在不同施工阶段的发展变化情况,同样说明,一旦盾构隧道在搅拌桩施工影响下发生“横鸭蛋”式收敛变形,在进一步的开挖卸荷作用下,收敛变形将很难恢复。

此外从图15还可发现,整个施工过程中,水平收敛变形最大值为6 mm,发生在搅拌桩施工结束后,施工结束后,盾构圆环最终的收敛变形为5 mm。收敛变形沿隧道轴向的变化与隆起变形相类似,在0~10环范围内,由于地铁车站的约束作用,收敛变形很小,多在1 mm左右,基坑范围内的15~55环则较大。

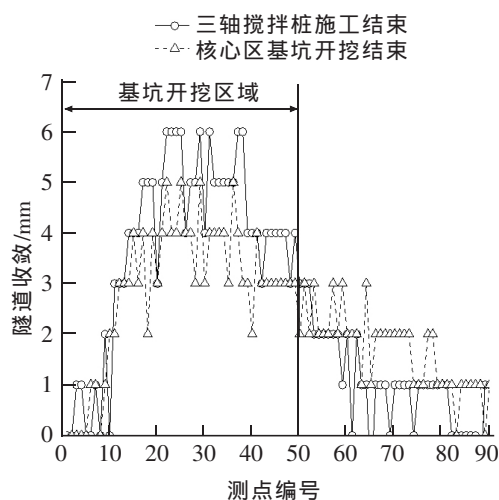


图15 左线隧道收敛变形曲线

Fig.15 Convergence deformation curve of the left tunnel

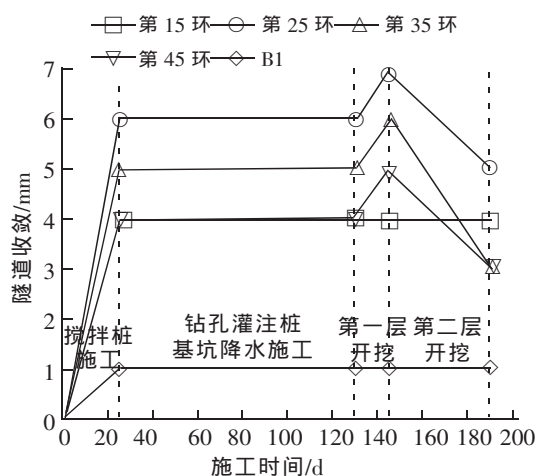


图16 收敛变形随时间的变化曲线(左线)

Fig.16 Development curve of convergence deformation with different time (the left tunnel)

4.2.2 右线隧道

图17为搅拌桩及开挖结束时右线隧道的收敛变形曲线,从图中可以发现搅拌桩施工结束后,隧道水平收敛变形同样为“+”,即隧道截面发生“横鸭蛋”式变形,水平收敛变形较大的测点范围为30~120环,既除基坑下方的盾构圆环外,基坑两侧各20环范围内同样会发生一定的收敛变形,只是收敛变形量有所减小。开挖结束后,隧道的水平收敛变形并无太大变化,基坑施工完成后隧道收敛变形的最大值为7 mm。

图18为特定测点收敛变形随施工进度的变化曲线,从图中可以发现,搅拌桩施工结束后,所有测点均发生了一定的收敛变形,且越靠近基坑中心,隧道圆环的收敛变形越大。如左线隧道一样,在钻孔灌注桩及基坑开挖施工阶段,隧道的收敛变形略有减小,但变化不大。

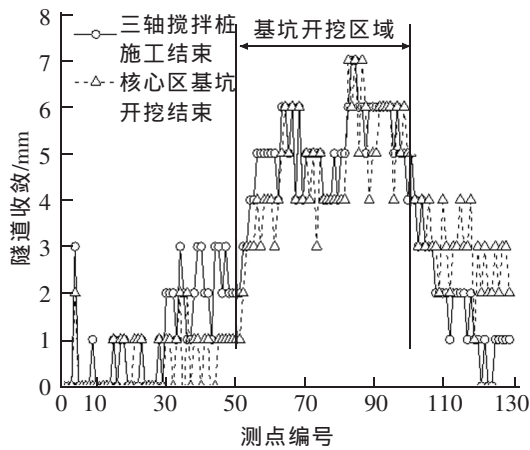


图 17 右线隧道收敛变形曲线

Fig.17 Convergence deformation curve of the right tunnel

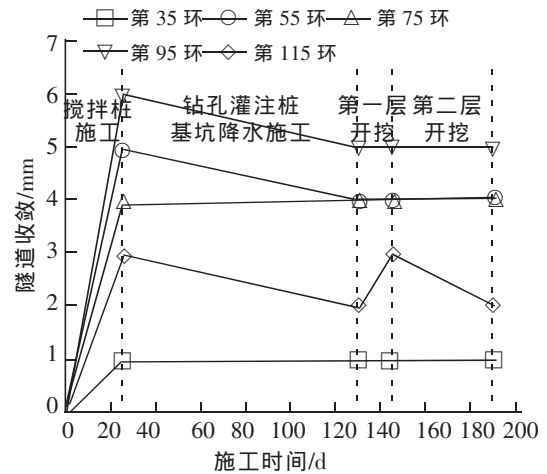


图 18 收敛变形随时间的变化曲线(右线)

Fig.18 Development of convergence deformation of the right tunnel

5 结论

文章详细介绍了金沙湖绿轴下沉广场上跨杭州地铁 1 号线基坑施工时的隧道变形控制措施,并对监测数据进行分析,分析了施工过程中的隧道隆起及收敛变形,得到如下结论:

1) 上跨地铁隧道的基坑施工时,对基坑下方土体进行“门”式三轴搅拌桩加固,坑底设置抗拔桩,对隧道结构进行“米”字形支撑加固,采用分区对称开挖方式进行施工,能有效控制下卧隧道的隆起变形和收敛变形,施工过程中左线隧道的竖向位移变化范围为 $-4.5\sim 5.5$ mm,右线竖向位移的变化范围为 $-7.5\sim 7.7$ mm,施工结束后,左右线隧道的最终最大竖向位移分别为 5.5 mm 和 7.7 mm,均表现为隆起变形,且左右线隧道的隆起变形均能满足规范给定的竖向位移要求。

2) 搅拌桩施工时隧道发生沉降变形,且隧道的最大沉降变形量与搅拌桩施工控制有关,搅拌桩施工结束后,左右线隧道的最大沉降量分别为 -4.5 mm 和 -7.5 mm,钻孔灌注桩距离隧道较远,施工时对隧道的竖向位移影响不大,基坑开挖开始后,隧道竖向位移快速增加,并由隧道沉降逐渐转变为隆起,开挖引起的左右线隧道竖向位移分别为 6.3 mm 和 8 mm,右线略大于左线,这与基坑开挖结束后左右线隧道的上覆土厚度有关。

3) 浅层土体开挖引起的隧道竖向位移明显小于深层土体开挖,开挖过程中隧道的隆起变形影响范围为基坑两侧 20 环以内,且在两侧 20 环以外,隧道会出现反向的沉降变形,基坑开挖引起的隧道隆起变形曲线基本关于基坑中线左右对称。

4) 由于加固后上方土体容重和刚度的增加,加之,施工中搅拌压力的作用,搅拌桩施工过程中隧道发生水平直径增大竖向减小的“横鸭蛋”式收敛变形,左右线隧道的最大水平收敛变形分别为 6 mm 和 7 mm。与隧道的竖向位移不同,隧道收敛在后续施工过程中的变化不大,水平收敛变形只略有减小,即钻孔桩与基坑开挖阶段隧道的收敛变形并无太大变化,说明隧道横断面一旦在外部扰动作用下发生收敛变形,将很难再在外力作用下发生逆向的收敛变形,治理起来将会非常困难,这已在此类的治理案例中得到了验证^[13-15]。

参考文献:

- [1] 张俊峰. 软土地区基坑对下卧隧道变形的影响与控制研究[D]. 上海:上海交通大学,2013:117-119.
- [2] 吉茂杰,刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2001,29(5):531-535.

- [3] 李平,杨挺,刘汉龙,等. 基坑开挖中既有下穿地铁隧道隆起变形分析[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2011,12(5):480-485.
- [4] SHARMA J S,HEFN Y A M,ZHAO J,CHAN C W. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2001,16(2):93-98.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T202-201,城市轨道交通隧道结构安全保护技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [6] 温锁林. 近距离上穿运营地铁隧道的基坑明挖施工控制技术[J]. 岩土工程学报,2010,32(S2):451-454.
- [7] 郑刚,刘庆晨,邓旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. 岩土力学,2013,34(5):1459-1468.
- [8] 魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学,2013,34(5):1421-1428.
- [9] 孙玉永,肖红菊. 软土地区坑中坑的抗隆起稳定性分析[J]. 中国铁道科学,2013,3(6):66-72.
- [10] 青二春. 基坑参数对地铁纵向变形的影响分析[D]. 上海:同济大学,2007:7-12.
- [11] SHI J,NG C W W,CHEN Y. Three-dimensional numerical parametric study of the influence of basement excavation on existing tunnel[J]. Computers and Geotechnics,2015,63:146-158.
- [12] 周宁,袁勇,王莉,等. 基坑开挖对下方越江隧道变形影响的评价[J]. 防灾减灾工程学报,2012,32(5):565-572.
- [13] 邵华,黄宏伟,张东明,等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(6):1036-1043.
- [14] 车风,宫全美. 盾构隧道下穿引起浅基础变形的有限元分析[J]. 华东交通大学学报,2015,32(6):74-81.
- [15] 刘畅,周顺华,季昌,等. 类矩形盾构隧道施工期上浮影响因素分析[J]. 华东交通大学学报,2016,33(1):94-99.
- [16] 周顺华,何超,肖军华. 环间错台效应下基坑开挖引起临近地铁盾构隧道变形的能量计算法 [J]. 中国铁道科学,2016,37(3):94-99.

Measurement analyses on the deformation of shield tunnels due to excavation-induced unloading

YANG Longcai, GUO Pengfei, YU Zheng

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: To safely excavate a pit over the existing tunnel, it is of great importance to control the deformation of the downside tunnel during the excavation construction process. Measuring analysis method is used in this paper to introduce in detail about the deformation control measures of the lying tunnel in the process of pit excavation. The measures mentioned above include mixing piles strengthening before excavation, setting anti-floating plies and setting ‘star shape’ support inside the tunnel. Conclusions have been drawn from the analysis of the deformation mechanism of the lying tunnel during pit excavation process: the cement mixing process will cause slight settlement of the tunnel; pit excavation will lead to whole-slab lifting and convergence of the tunnel itself; the cement lifting method and the anti-floating piles can effectively control the uplifting deformation during the tunnel construction process, while the asterisk support inside the tunnel have a strong effort on minimizing the convergence deformation of the tunnel; the construction of mixing piles will cause ‘oval shaped’ of deformation of the tunnel, while the pit excavation afterwards has little influence on the deformation.

Key words: pit excavation, underling tunnel, uplift deformation, convergence deformation

(责任编辑 王建华)