

正上方轻量加卸载时双圆盾构隧道 变形监测与整治分析

袁 钊

[上海勘察设计院(集团)股份有限公司,上海市 200438]

摘 要:软土地区运营轨道交通因上方轻量加卸载作用而产生的变形问题,在工程领域受到广泛关注。上海某道路工程跨越地铁双圆盾构区间,且该项目涉及河道改道施工,故隧道上部存在复杂的轻量加卸载作用。通过对该下卧软土双圆盾构隧道的变形监测,分析了轻量加卸载作用对运营盾构隧道的影响,并针对河道改道区段进行重点分析,总结出了产生沉降漏斗的主要原因;随后,结合现场监测数据和沉降原因,对重点区域的路面结构进行了整治。监测结果表明:基于监测数据采取的重点整治技术措施治理效果明显,对于轻量加卸载作用下双圆盾构隧道运营安全保护具有重要的工程实践价值。

关键词:轻量加卸载;双圆盾构隧道;沉降漏斗;变形监测

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)08-0190-05

0 引 言

随着城市化的不断发展,轨道交通线路开始向郊区延伸,隧道结构安全监护工作面临严峻挑战。位于城郊开发热土区域的施工活动频繁,导致轨道交通结构变形和病害风险增大。在保护范围内,外部作业严重影响了地铁结构的安全^[1],仅在 2014 年上海轨道交通 2 号线就发生了 16 次突发堆载的案例^[2]。由于道路工程、绿化工程、临时堆土等轻量加卸载施工具有隐蔽性,以及现有施工设计对其影响的认识还不够深刻,这类施工活动会给地铁结构造成潜在风险^[3]。因此,当上部存在施工活动时,有必要对隧道结构进行变形监测,并根据监测情况指导上部结构施工,防止隧道在竖直方向产生较大的位移。

城市地下轨道交通线路常受到邻近开挖引起的卸荷作用影响,导致隧道出现一定的变形和位移。陈仁朋等^[4]针对邻近区域深开挖工况,研究了隧道结构变形规律,并提出了相应的加固措施。张治国等^[5]基于两阶段分析方法,推导出软土地层中邻近开挖引起的隧道纵向变形的计算公式。常规解析方法仅考虑基坑开挖卸荷作用对下卧隧道变形的影响,而欧雪峰等^[6]在此基础上引入基坑降水因素,并结合

监测数据验证了计算方法的正确性。地表临近位置施工或局部堆载引起的加载作用会导致下卧隧道纵向产生不均匀沉降,戴宏伟等^[7]通过建立地面施工荷载作用下隧道结构的分析模型,采用有限差分法给出了下卧隧道的纵向位移计算方法。魏纲等^[8]基于 Boussinesq 公式和最小势能原理,提出了在上部堆载作用下隧道纵向位移的计算方法。薛子钎等^[9]结合理论计算和数值模拟方法,研究了土仓压力对既有隧道沉降变形的影响。

本文依托上海市某道路工程案例,采用现场监测技术手段,分析其施工过程对下卧软土轨道交通双圆盾构隧道的影响,并从监管和理论方面进行研究。此外,基于施工过程中隧道变形的监测数据,结合沉降漏斗原因分析,对部分路段的路面结构进行了整治,监测结果表明治理效果明显。本文内容可为后续类似工程提供典型案例参考,减轻新建道路施工对下卧地铁结构的危害。

1 工程概况

本道路工程项目位于上海市浦东新区,道路宽约 40 m,全长约 2.8 km。该项目下卧双圆盾构隧道地铁线路,处于地铁结构安全保护区内,道路施工涉及开挖、换填、铺装等轻量加卸载活动。

1.1 与轨道交通线路的位置关系

图 1 为本道路工程项目的整体概况图。本项目位

收稿日期: 2024-04-24

作者简介: 袁钊(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事运营轨道交通结构智能监测与安全评估。

于双圆区间隧道及车站上方,设计标高约 3.9~7.1 m,施工前地表标高约 3.7~6.4 m;共分为 6 个标段,标段 3、4 区间附近存在河道整治及新挖河道工程,其走向与隧道区间的轴线平行,河道挖深约 4 m。标段 3、4 地铁隧道顶覆土厚度约 8~11 m,属于浅埋隧道。一般情况下,隧道埋深越浅,其位移对上部加卸载作用越敏感^[10]。

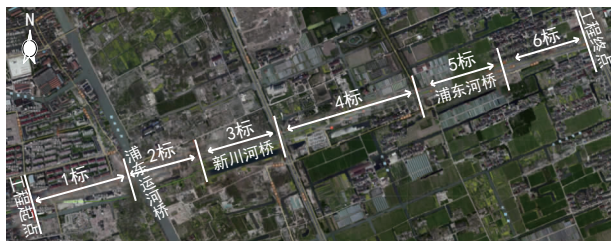


图 1 项目整体概况图

1.2 项目特点

本项目沿线覆盖农田、河浜等地区,施工面临诸多挑战,包括大面积的换填土作业、标高调整以及临时荷载。目前,类似的工程案例还很少,监管和技术难度大,实时监控困难。古河道区域的极端地质条件以第四纪松散沉积物为主,其中软土层深厚,具有强度低、灵敏度高特征。已有轨道结构的监测数据表明:本项目下卧隧道变形显著,最大累计沉降超过 27 mm,隧道收敛达 46 mm,反映出该区域稳定性问题严重,对施工及后续维护构成重大挑战。

2 地铁保护监测方案

2.1 监测方案目的

保护区外部作业的地铁结构专项监测用于及时获取作业期间轨道交通结构的变形状态,需要达到以下 3 个目的。

(1)将获取的监测结果数据反馈到施工部门,用以指导调整施工参数,一旦遇到风险情况,能确保在第一时间采取有效措施,做到信息化施工,避免重大风险事件发生。

(2)将变形结果提供给设计单位,与原有设计方案参数进行相互比对验证,及时判断既有轨道交通结构的安全状态,为设计参数调整提供数据依据,及时排除风险。

(3)将变形结果提供给地铁监护管理单位现场人员,结合经审批的施工组织设计方案等进行现场监护管理,根据项目结构病害现状、技术审批要求及监护监测相关规范设定的限值进行预警预报,评估作业对轨道交通结构的影响,以便采取相应措施,确保作业期间轨道交通结构的安全。

2.2 监测内容及方法

根据相关方提供的资料,本项目设置了两部分的监测内容,分别为:

- (1)上、下行线隧道垂直位移监测;
- (2)上、下行线隧道管径收敛变形测量。

2.2.1 隧道垂直位移监测

隧道垂直位移的测量主要通过监测轨道道床的沉降量实现。采用常规几何水准仪测量沉降时,需要对水准仪 i 角进行修正,并且在监测过程中要对水准仪及配套条码尺进行全面检验,确保仪器 i 角不得大于 $15''$ 。根据工程经验,当 $i>4''$ 时应进行补偿计算。观测方法为:在水准线路测量时,同步进行监测点的观测,观测方法采用中视法,读数 1 次。

完成垂直位移外业测量工作后,需严格检查外业测量数据,确保各水准环闭合差符合要求,完成这些内容后才能开展内业平差计算。通常情况下,由于采用高精度电子水准仪,当闭合差超过 1 mm 时须检查仪器、标尺是否完好,分析观测数据可靠后才能使用。

上述测量工作完成后,根据基准点监测数据,沿垂直位移监测点附近布设 1 条二等水准闭合路线。进行线路测量时,依托各路线水准点可以直接测出各监测点的高程。

2.2.2 隧道管径收敛监测

结合双圆隧道的截面特点和监测要求,布置监测双圆隧道管径收敛的测点,如图 2 所示。图中一共布设了 A-A'(L1)、B-B'(L2)、C-C'(L3) 3 条测线,其中, A-A' 测线的理论长度为 4.959 m, B-B' 测线的理论长度为 4.975 m。

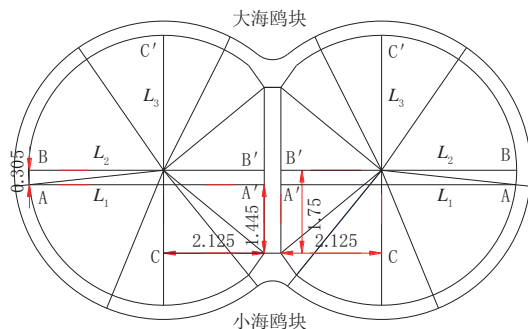


图 2 管径收敛测点布置图(单位:m)

开展外业测量时,首先在相应位置布设好全站仪,完成对中和整平检查后,开始测定各反射贴片的坐标,通过坐标计算对应的测线长度。

后续工程项目监测数据表明双圆盾构隧道收敛阶段变形不明显,故本文不做数据分析。但因目前双

圆盾构隧道运营期的监测数据极少,变形机理尚不明确,因此为研究受力机理本测项不可缺少。

2.3 监测频率及报警值

开展监测工作时,应本着经济和安全原则,结合实际工况合理安排监测频率。参考已完成同类工程经验,拟定出本项目的监测频率,如表1所示。

表1 监测频率表

监测项目	桩基施工	承台施工	上部结构施工	竣工后半年内
道床垂直位移	2次/周	2次/周	1次/周	1次/月
隧道管径收敛变形	1次/周	1次/月	1次/月	1次/月

为保障地铁的安全运营,需控制隧道结构的线性三维位移在允许范围内,所以对施工造成的已运营隧道纵向沉降和曲率半径有严格规定。上海市地铁监测标准《城市轨道交通结构监护测量规范》(DGT J08-2170—2015)要求由周围施工引起的隧道纵向绝对沉降量不大于20 mm(包括各种加载和卸载的最终位移量),纵向沉降曲线的曲率半径不能小于15 000 m等。根据《城市轨道交通结构监护测量规范》规定,制定出本工程具体监测项目的报警值,如表2所示。

表2 监测项目报警值

监测项目	日报警值	累计报警值/mm
道床垂直位移	连续3 d达 ± 0.5 mm/d	± 5
隧道管径收敛变形	连续3 d达 ± 1.5 mm/d	6%L(L为弦长)

3 施工监护结果及分析

3.1 施工过程

施工流程按照施工组织设计,由施工日记得到关键施工的时间节点。本项目于2016年3月22日正式进场启动;4月12日进行场地平整工作,包括地表超高卸载、河道清理以及轻质材料的换填等;2016年下半年施工进展迅速,继11月8日土路基整理和混凝土浇筑工作顺利完成后,11月30日钢筋混凝土面层的施工又取得了重要进展,其标高达到了4.484~4.155 m,到了12月1日,路面混凝土浇筑工作全面完成,标志着该项目的关键施工阶段初步完成^[1]。

3.2 道床沉降结果及沉降漏斗分析

基于监测数据反馈结果,选取5个重要的时间节点,分别为2016-03-22、2016-04-12、2016-11-08、

2016-12-06、2016-12-20,根据这5个时间内隧道的垂直位移累计量绘制隧道道床沉降垂直位移曲线图,见图3;2标因工期原因独立监测,不在本次分析范围内。

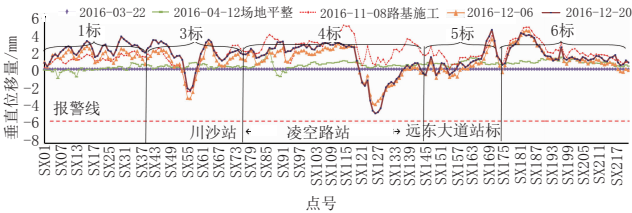


图3 隧道道床沉降垂直位移曲线图

由图3可知,从项目进场后至路基施工开始前的场地平整过程中,监测曲线除3标和4标外,整体表现为上抬,上抬量普遍接近+2 mm,最大上抬量为+4.3 mm,3标则出现一个近-3 mm的沉降漏斗;自路基施工开始,在凌空路站出站远东大道方向出现了长度约150 m(测点SX121~SX135)的沉降漏斗,沉降量急剧增加,至2016年12月20日,沉降量达到报警值,同时该区域出现较明显的隧道次生病害(见图4),而其他大部分区域未发生明显沉降变形。



图4 隧道次生病害图

3.2.1 施工前期上抬原因分析

图3数据表明,路基施工前隧道存在大面积上抬现象。结合设计、原有地形资料和整体工况调查材料进行分析,得到隧道结构上抬的主要原因如下:

(1)如图1所示,工程经过地段大部分为农业用地、宅基地,新建路段全线车行道范围内需挖除耕植土,平均厚度约30 cm;宅基地范围内房屋拆迁完成后,会清除瓦砾杂块及建筑垃圾等。

(2)工程沿线原地表标高3.7~6.4 m,新建道路工程的一般路段设计标高按+4.2 m(或原状地面)控制;对于设计标高高于4.5 m的高路堤路段(且大于原地面标高0.5 m以上),调整道路回填材料,由二灰填筑调整为采用EPS块材进行填筑(路基EPS换填示意图见图5),根据计算,需要进行EPS换填的区段需要卸载至标高3.4 m。

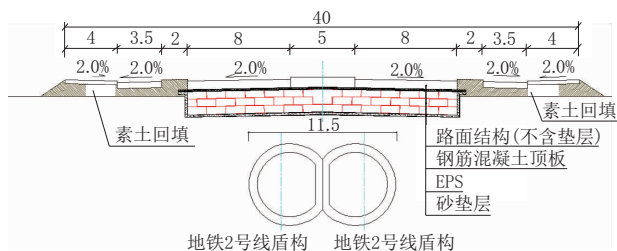


图5 路基ESP换填示意图(单位:m)

综上可知,由于上述工序中的轻量卸载活动,导致下卧地铁隧道产生了竖直向上隆起的变形。

3.2.2 标段3沉降漏斗产生原因分析

经调查,标段3沉降漏斗区域的下卧地铁隧道上部存在未经换填直接浇筑的新建临时施工便道,该局部轻量加载作用是使这段区域产生沉降漏斗的主要原因。由图3可知,标段3隧道沉降槽宽度为64 m(沉降测点SX53~SX59)。由地表标高和工况(见图6),以及标段3垂直位移特征点历时曲线(见图7)可知,隧道上方临时新建的施工便道是在标高为2.6 m的原状土上直接进行了混凝土路面填筑,而现状标高为3.9 m,也就是说隧道上方增加了约1.3 m的堆载。隧道上方临时施工便道范围约为12 m,沉降槽位置最低点对应施工便道正下方的SX55和SX56测点。另外,测点SX58~SX61对应的地表在靠近凌空河桥位置处进行了ESP换填,所以此处标高虽然增加,但因隧道上方荷载并未明显增加,隧道结构也就未发生明显沉降。

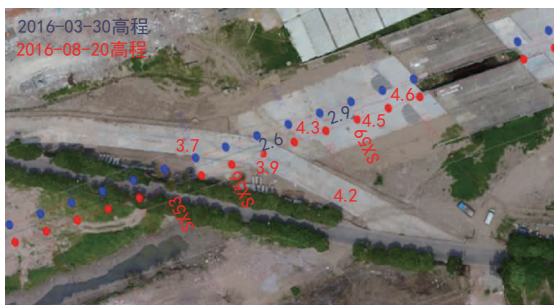


图6 标段3地表标高及工况图

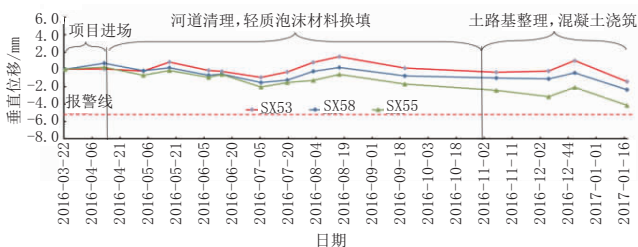


图7 标段3垂直位移特征点历时曲线图

3.2.3 标段4沉降漏斗产生原因分析

由标段4地表及工况图(见图8)和道路横断面示意图(见图9)可知,双圆盾构隧道位于标段4道路正下方,道路南侧为河道,测点SX123~SX131处为

低洼地(2016-03-30)。这里选取标段4内SX105、SX120、SX125和SX140这几个具有代表性的特征测点,绘制这些测点的垂直位移随时间的变化曲线,见图10。



图8 标段4地表及工况图

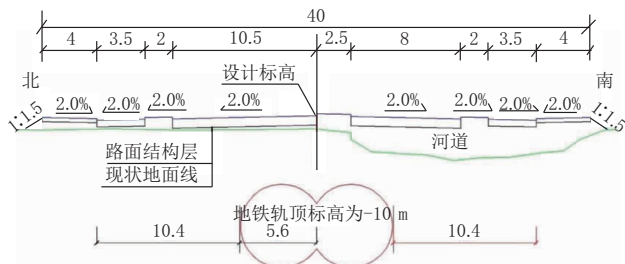


图9 标段4道路横断面示意图^[11](单位:m)

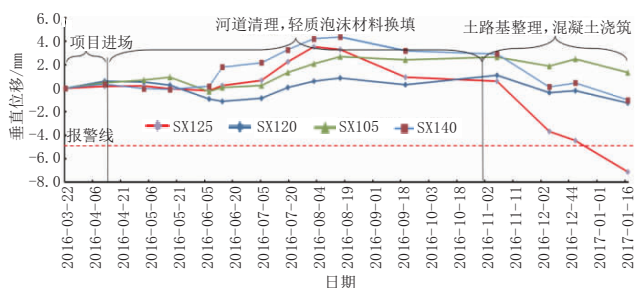


图10 标段4垂直位移特征点历时曲线图

由图10可知:受上方区域轻量卸载作用,测点SX105、SX125和SX140处在进行河道清理和ESP材料换填过程中均存在轻微上抬现象;但在2016年11月2号后,测点SX125和SX140处出现持续下沉现象,对应图3中的沉降漏斗区域。出现该现象的原因主要为该区域上方是低洼地,施工过程中为平整地面直接进行了素土回填,导致这片区域存在较大的附加应力,从而引起地铁隧道产生明显沉降。测点SX105和SX120在进行土路基整理和混凝土浇筑施工后仅出现少量下沉,表明该区域进行的ESP材料换填措施效果较好。

城市轨道交通隧道的埋深一般较浅,当其上部因施工活动或局部堆载产生加载作用时,隧道结构会产生较大的沉降值^[12]。综上可知,上部素土回填是标段4产生沉降漏斗的主要原因,该轻量加载作用导致局部区域隧道结构产生沉降。

3.3 重点整治技术措施及治理效果

基于上述监测数据以及相关的理论知识,按照

监护管理要求,管理方会同设计、监护监测方制定了整治技术措施。

3.3.1 重点整治技术措施

对标段4,保持道路南侧的已换填明浜不变,对道路北侧的低洼路段重新进行零附加荷载设计。北侧低洼地自上而下为:4 cm AC-13C(SBS改性)+8 cm AC-25C(黏层油+铺满聚酯玻纤布)+30 cm C25混凝土基层+15 cm 砾石砂垫层+泡沫轻质土+未开挖原状土;南侧明浜维持原方案不变,自上而下为:4 cm AC-13C(SBS改性)+8 cm AC-25C(黏层油+铺满聚酯玻纤布)+35 cm C25混凝土基层+20 cm 砾石砂垫层+泡沫轻质土+30 cm 砂垫层+未开挖清除的原状土。整治现场见图11、图12。

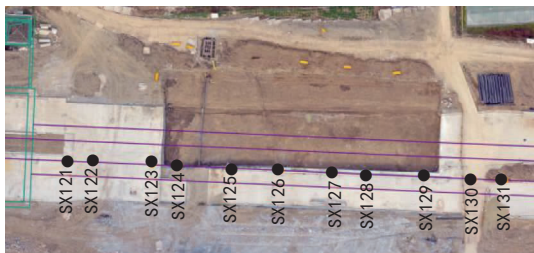


图11 整治范围区域图



图12 整治现场工况图

3.3.2 治理效果及监护分析

根据标段4治理前后的施工工序特点,结合定期沉降监测数据,选取2016-11-05、2016-12-05、2017-01-09、2017-02-13、2017-03-13、2017-04-10这6个时间段的道床垂直位移监测值,绘制标段4治理前后累计位移曲线对比图(见图13)。标段4主要治理范围为XK19+222~XK29+307。

由图13可知,标段4在开始路基整理和道路浇筑施工后,下卧隧道结构呈现下沉趋势;2017年1月中旬整治区域开始卸土至原标高位置,沉降曲线仍保持下沉趋势;2月起,开始进行卸土换填,整治区域内卸土已完成,并开始逐步回填,后期3月和4月的监测数据显示整治区域的道床沉降向上回弹明显,回弹约1 cm,沉降累计曲线回弹至接近11月混

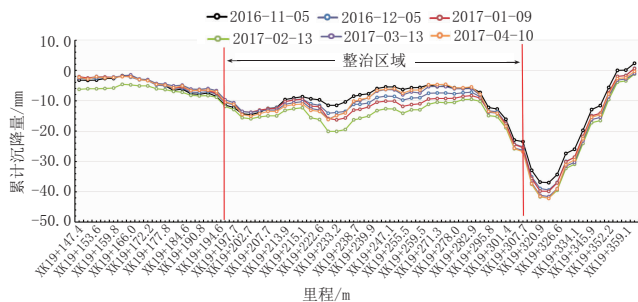


图13 标段4治理前后累计位移曲线对比图

凝土路面浇筑前的沉降变形状态,表明卸土回填的整治方案取得了显著成效。

4 结语

(1)地铁隧道的埋深通常较浅,故结构对上方道路施工引起的轻量加卸载作用较为敏感。为控制隧道上抬或沉降变形量,保障下卧隧道运营安全,开挖回填和路面结构浇筑等施工行为导致的附加应力值应处于合理范围。

(2)城市运营轨道交通隧道上方进行道路施工等轻量加卸载活动时,有必要对隧道结构进行位移监测,防止产生较大变形而影响结构安全。此外,可根据监测数据指导上部结构设计,并调整施工方案。

(3)上部的卸载活动会导致地铁车站和隧道结构产生竖直向上的位移,该原理可用于治理地铁隧道结构的沉降。

(4)道路工程施工应全面了解地铁结构上方地形变化历程,项目施工前应按照《城市轨道交通结构监护测量规范》对于工程影响相对位置关系测量的要求,提供隧道正上方及保护区内1:500附地表标高的地形图,施工过程中应全面了解地表标高变化,宜采用无人机的形式进行工况调查。

参考文献:

- [1] 王如路.上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析[J].地下工程与隧道,2009(1):1-6.
- [2] 邵华,黄宏伟,张冬梅,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(6):1036-1043.
- [3] 王庭博,袁钊,雷丹,等.上方卸载作用下盾构隧道变形特征分析[J].市政技术,2023,41(1):83-88.
- [4] 陈仁朋,王诚杰,鲁立,等.开挖对地铁盾构隧道影响及控制措施[J].工程力学,2017,34(12):1-13.
- [5] 张治国,黄茂松,王卫东.邻近开挖对既有软土隧道的影响[J].岩土力学,2009,30(5):1373-1380.
- [6] 欧雪峰,张学民,刘学勤,等.基坑开挖与降水引起下卧隧道变形的解析计算方法[J].铁道学报,2019,41(3):147-154.
- [7] 戴宏伟,陈仁朋,陈云敏.地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J].岩土工程学报,2006(3):312-316.

工。止水帷幕采用了双排 $\phi 800@600$ 高压旋喷桩,止水帷幕进入坑底以下 10 m。降水后,通过坑外水位观测发现水位降低幅度小于 2 m,基坑东侧现状丹溪路的地面平均沉降量小于 10 mm。基坑内承压水层降水对周边的环境影响得到有效控制。

6 结 语

本文以某净水厂工程中的吸水井、二级泵房及清水池综合基坑为例,通过建立有限差分法数值模型,比选了设置止水帷幕+降水井和仅设降水井的承压水降水方案,分析了承压含水层降水后,承压水位的变化趋势,及降水对地面沉降及现状道路沉降的影响,得出以下结论。

(1)通过在局部深坑处设置止水帷幕,可将局部深坑内的降水井数目减少一半,同时现状道路的地面沉降减少了 23%,坑边的地面沉降减少了 53%,可有效控制基坑降水对周边环境的影响。

(2)在降水井数目不变时,局部深坑止水帷幕进入坑底以下 10 m 后,坑底水位方可满足降水要求;但该深度大于 10 m 后,再加深止水帷幕对坑底及坑边承压水位降深影响逐渐减小。

(3)针对埋深较浅的强透水承压水地层,设置止水帷幕能形成隔水边界。针对本工程而言,其进入坑底以下 10 m 后可形成有效的阻隔效应。

参考文献:

[1] 刘帅君.深基坑降水开挖引发的地面沉降及其控制措施研究[D].上海:上海交通大学,2015.
[2] 骆冠勇,潘泓,曹洪,等.承压水减压引起的沉降分析[J].岩土力学,2004(增刊 2):196-200.
[3] 马昌慧,毛云,黄魏,等.帷幕在降水条件下对基坑周边渗流及变形影响的研究[J].岩土工程学报,2014,36(增刊 2):294-298.
[4] 娄荣祥,周念清,赵姗.上海地铁 11 号线徐家汇站深基坑降水数值模拟[J].地下空间与工程学报,2011,7(5):908-913.
[5] 杨强,丁伟翠,王洪德,等.Visual Modflow 在基坑降水设计中的应用[J].中国给水排水,2009,25(20):97-101.

(上接第 194 页)

[8] 魏纲,俞国骅,洪文强.地面堆载引起下卧盾构隧道剪切错台变形计算研究[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(7):1775-1783.
[9] 薛子钎,夏洪春,朱训国,等.考虑土仓压力作用下的既有盾构隧道沉降变形研究[J/OL].西安理工大学学报,1-13[2024-04-15].http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20240304.1345.004.html.

[10] 罗青峰.道路施工对地铁隧道的沉降影响研究[D].南昌:华东交通大学,2022.
[11] 李筱旻.新建道路工程对下卧软土双圆盾构隧道影响的数值分析[J].浙江水利水电学院学报,2018,30(3):58-64.
[12] 韩国俊,刘洋,邢如飞.道路施工对下方地铁隧道的沉降影响分析[J].铁道标准设计,2012(增刊 1):97-100.