

基坑上跨盾构隧道实测数据分析及保护研究

高永, 赖衍鹏

(南京地铁运营有限责任公司, 江苏 南京 210012)

摘要:以某绕城高速公路深基坑上跨运营盾构隧道工程案例为背景,首先以南半幅深基坑违规施工为切入点,通过现场监测、检测与三维扫描普查等实测成果,佐证违规施工对盾构隧道的不利影响程度,其次通过修正惯用法理论计算及Ansys建模分析,评估隧道结构横断面及纵断面的安全性能与安全冗余储备,再次以优化保护措施在北半幅施工为对比研究对象,通过现场实测数据证明分幅、分段、跳仓、限时开挖,增加板凳桩桩长,缩小桩间距,加大盖板厚度,实施土体填充注浆等措施可减少开挖期及工后盾构隧道隆起量,可以缩短工后隆起时间。据此,提出基坑上跨运营盾构隧道在设计、施工相关建议,为该类保护区外部作业及保护工作提供参考。

关键词:深基坑;上跨;盾构隧道;实测数据;保护措施

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)01-0158-05

0 引言

在国家新基建的战略背景下,城市轨道交通将涌现出新一轮的建设高潮。根据中国城市轨道交通协会发布的《城市轨道交通2020年度统计和分析报告》^[1],截止2020年底,中国大陆地区共有45个城市开通城市轨道交通运营线路244条,运营线路总长度7 969.7 km,中心城市城轨交通客运量占公共交通客运总量出行比率38.7%。按线路敷设方式分,地下线5 422.3 km,占比68.1%。地下线隧道多数为盾构隧道,但因多缝、易渗漏、易损伤等缺点,如沿线保护区遭遇外部作业活动,极易发生渗漏和不均匀变形^[2-5],严重时可能危及结构安全及运营安全。如何平衡城市功能开发与城市轨道交通结构安全,是轨道交通运营单位无法回避的现实课题。现有研究方法可归纳为现场实测分析^[6-7]、基于有限元的仿真模拟^[8-9]、模型试验^[10-11]方法等。现有研究更多针对工程前期设计方案可靠度验证,或施工期间相对安全可靠的项目,以阐述某种方案或某项施工措施的科学性,缺乏不同措施的实测对比研究。

本文以某绕城高速公路南半幅深基坑赶工期违规施工为切入点,依托现场监测、检测与三维扫描普查等实测成果,佐证违规施工对盾构隧道的不利影响程度,通过修正惯用法理论计算及Ansys建模分

析以评估隧道结构横断面及纵断面的安全性能与安全冗余储备,再以优化保护措施在北半幅施工为对比研究对象,通过现场实测数据证明优化措施的可靠度及定量效果,以总结与反分析基坑上跨运营盾构隧道的保护措施,旨在为该类保护区作业设计、施工及轨道交通结构保护提供参考。

1 项目概况

1.1 工程概况

某城市绕城高速改建采用半幅改造半幅通行方式进行,先南半幅路面改建、后北半幅改建。改建工程与轨道交通运营1号线、在建5号线存在交叉。交叉范围为改建绕城高速K31+840~K31+920段,对应轨道交通1号线左线K15+393~K15+468、右线K15+394~K15+470,对应5号线左右线K2+777~K2+852。交叉范围内,高速公路路基基坑开挖深度约12.6~16.8 m,开挖最底面距离1号线盾构隧道结构顶覆土厚度约4.15~5.07 m,距离5号线盾构隧道结构顶覆土厚度约7.88~9.3 m,项目平面见图1。

1号线及5号线均为盾构隧道,错缝拼装,内径5.4 m,环宽1.5 m,管片厚度0.3 m,管片混凝土强度C50,区段管片按深埋及超深埋进行配筋。1号线于2016年12月26日投入运营。项目剖面见图2。

1.2 地质概况

场地范围内土层自上而下主要为①-1人工填土(第四系全新统)、②黏土(第四系冲洪积层,膨胀土)、③黏土(上更新统冲积层,膨胀土)、④黏土(中

收稿日期: 2021-09-27

作者简介: 高永(1982—),男,硕士,高级工程师,从事地铁保护区工程管理工作。

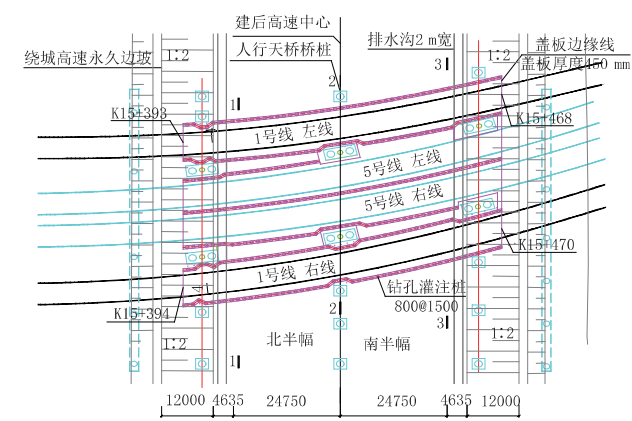


图1 项目平面图(单位:mm)

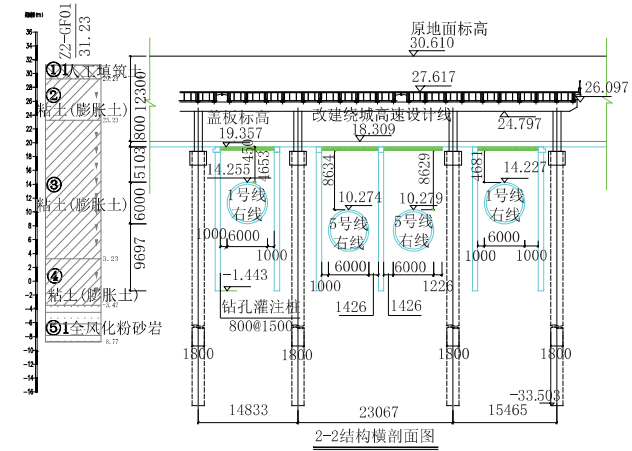


图2 项目剖面图(单位:mm)

更新统冲积层,膨胀土),⑤-1 全风化粉砂岩及⑤-2 强风化粉砂岩(第三系)。1 号线及 5 号线盾构隧道主要穿越③黏土。

1.3 保护设计方案

为保护交叉段 1 号线和 5 号线区间隧道,减小施工对区间隧道的影响,采用板凳桩+钢筋混凝土盖板的门式结构保护轨道交通结构。板凳桩采用直径 800 mm 的钻孔灌注桩,桩间距 1 500 mm,桩长 20 m,盖板及冠梁采用现浇钢筋混凝土,盖板厚度 450 mm。先期施工板凳桩,再施做板凳桩冠梁和盖板,冠梁与盖板连接。

1.4 施工技术要点

上跨轨道交通区间段采用分层分段抽条进行开挖,以“先外围后中间;化整为零,分层分块多次卸载;加隔离快封闭”的总体原则尽可能减少对盾构区间的影响,横向开挖宽度不大于 6 m,纵向一次性开挖。灌注桩施工建议带钢护筒施工,套管采用静压缓慢均匀压入,施作是应采用跳孔施工,在灌注桩混凝土 24 h 后方可进行临桩成孔施工。地下水降排采用坑外截水坑内集水明排的方式进行处理,坑内水位保持在基底以下 1 m。

2 南半幅基坑施工影响分析

2.1 施工方案调整

为了缓解春运绕城高速公路交通压力,政府要求南半幅必须在 2017 年春节前放行交通。南半幅施工区域计算工期 168 d,按设计方案实施不可能完成既定工期目标。施工单位在按既定方案完成第①、②区段土方卸载后,调整了下部土方卸载方案,将原横向 6 个断面(分幅宽度 6 m)、纵向 1 个断面、竖向 2 层开挖调整成横向 3 个断面,纵向 1 个断面,竖向 2 层。标高 22.779 m 至 19.779 m 挖土层开挖宽度由 6 m 调整成 36 m;标高 19.779 m 至设计底标高开挖宽度由 6 m 调整成最大 18 m。

南半幅土方卸载工况平面见图 3,土方卸载时序详见表 1。

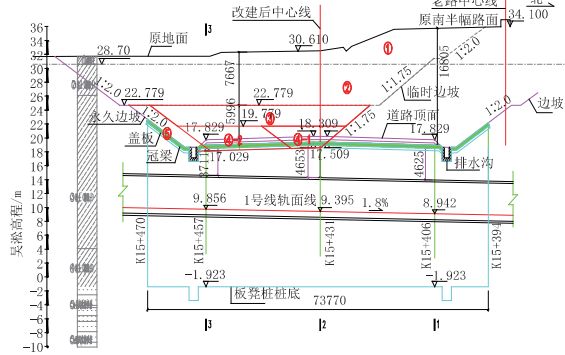


图3 南半幅土方卸载工况平面图(单位:mm)

表 1 南半幅土方卸载时序

时间	施工内容
不详	场地平整,南半幅第①、②区段土方开挖,放坡开挖至标高 22.779 m,最大开挖深度 10.8 m
2016.11.19	完成南半幅区间两侧板凳桩打设
2016.12.9-2016.12.11	南半幅全断面开挖第③区段土方,开挖深度 3.0m,剩余土方深度 2.2 m
2016.12.12-2016.12.15	南半幅北段开挖第④-1 区段土方,开挖面宽度 13.5 m,长度 60 m,深度 2.8 m
2016.12.15	南半幅北段完成盖板混凝土浇筑
2016.12.16-2016.12.21	南半幅南段开挖第④-2 区段土方,开挖面宽度 13.5 m,长度 60 m,深度 2.2 m
2016.12.21	南半幅南段完成盖板混凝土浇筑
2016.12.12-2016.12.28	南半幅边坡开挖第⑤区段土方,开挖面宽度 4.5 m,长度 60 m,深度 5.8 m
2016.12.28	南半幅边坡完成盖板混凝土浇筑
2017.1.24	南半幅交通通行

2.2 隧道结构病害

南半幅施工期间未对轨道交通实施针对性的保护监测,致使土方卸载处于监管盲区,无信息化指导手段。轨道交通运营单位委托的隧道健康监测单位于 2016 年 8 月 31 日建立了初始观测成果,此后

2016年9月20日、11月21日、2017年3月6日相继进行定期监测。2017年3月6日发现该施工区段隧道结构出现异常隆起,详见图4。

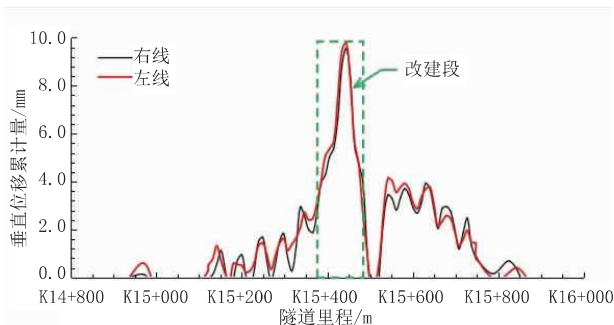


图4 1号线隧道区间结构垂直位移图(单位:mm)

2.3 隧道结构检测

项目建设单位委托专业检测单位于2017年10月28日至11月3日对1号线该区间K15+384~K15+484进行检测。根据《城市轨道交通设施养护维修技术规范》(DB11/T 718—2016),右线主体结构评定为二级、左线评定为三级,总体状态良好,检测区段内左右线24处管片混凝土开裂、剥落,最大面积0.15 m²,2处钢筋外露,管片最大开裂宽度0.1 mm、长0.6 m,环间最大错台35 mm,环内最大错台15 mm,4处管片接缝渗水。

根据探地雷达检测图谱分析,检测区间左线道床下方初衬管片背后K15+401~404、K15+428~430、K15+436~442存在脱空和不密实现象;上行线道床下方K15+387~389、K15+415~422、K15+471~478存在脱空和不密实现象。

2.4 隧道三维扫描

受轨道交通公司委托,专业单位于2017年12月1日凌晨选用法如X330仪器对1号线左线K15+374~K15+508、右线K15+357~K15+483段隧道结构进行了三维激光扫描,提取了轨道几何行位、接触网导高、不同角度的隧道收敛值。经扫描,接触网导高在4.034 m至4.050 m之间,项目投影段隧道腰线水平收敛最大扩张44 mm,最大扩张7.3‰D(D指隧道外径)。

3 隧道结构安全评价

3.1 隧道结构环向分析

隧道管片材料取钢筋混凝土,泊松比0.2,弹性模量 3.45×10^7 MPa,密度 $2\,500\text{ kg/m}^3$,刚度折减系数0.7,接缝处考虑弯矩传递系数0.7与1.3,结构重要性系数1.1,永久荷载分项系数1.35。采用修正惯用法,针对区间隧道的设计正常运营工况、隧道现状

工况进行内力计算和承载力验算。按深埋配筋进行核算,隧道结构满足极限承载力及正常使用安全要求。

3.2 隧道结构纵向分析

将隧道视为温克尔弹性地基梁,将环间接头简化为弹性铰单元,并通过在各环施加实测的沉降值,得到各环的内力值,可进行截面抗剪验算,以评估隧道结构纵向整体安全性能。

管片纵向螺栓为M24的8.8级螺栓,弹性模量为210 GPa,纵向螺栓共计10根,纵向连接螺栓的屈服强度为 6.4×10^5 kPa,抗剪强度为 1.5×10^5 kPa。管片弹性模量 E_c 为 3.45×10^7 MPa,横截面面积 A 为 $5.372\,11\text{ m}^2$,截面惯性矩 I_c 为 21.878 m^4 。经计算,环缝转动刚度 K_θ 为 $39\,374\,193\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$,环间抗切刚度 K_T 为 $40\,000\text{ kN/m}$ 。隧道完全埋设于③黏土之中,根据土层信息,弹性地基基床系数 K 为 $45\,000\text{ kPa/m}^3$ 。

利用有限元软件Ansys进行建模,共模拟300环隧道,中间100环上覆土体自重减少为150 kPa,中间100环发生上浮量取实际观测值。模拟出环弯矩绝对值最大 $312.694\text{ kN}\cdot\text{m}$,剪力绝对值最大 $34.555\,7\text{ kN}$,经校核,隧道管片纵向连接螺栓正向应力 $6\,449.7\text{ kPa}$,剪切应力 $1.018 \times 10^4\text{ kPa}$,距离极限强度冗余量较大,弯矩图和剪力图分别见图5和图6。

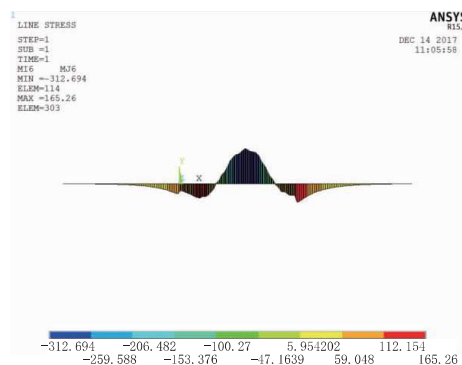


图5 现状工况弯矩图

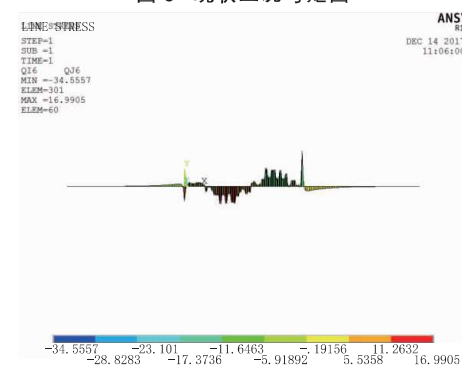


图6 现状工况剪力图

3.3 北半幅设计施工优化

针对南半幅施工对轨道交通结构产生的不利影响,项目自2017年1月24日南半幅交通放行至2018年9月份期间处于停工状态,期间轨道交通经营单位对北半幅设计与施工方案优化进行了多轮商讨与论证。总体上,强化了板凳桩、盖板、盖板下方土体注浆、开挖分幅、限时措施等。方卸载总体按竖向三层、横向每幅宽度3 m、纵向3段进行分块抽条跳仓开挖,北半幅施工工况剖面、平面见图7及图8。

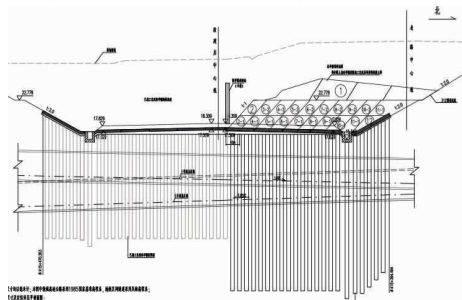


图7 北半幅施工工况剖面图

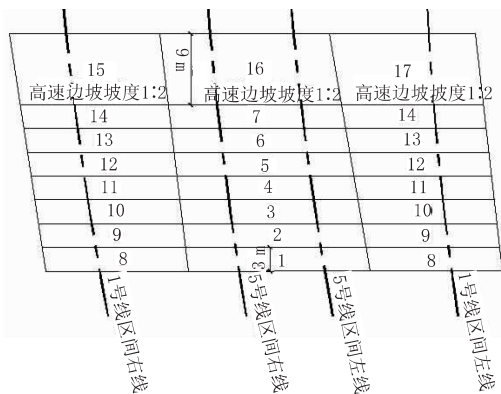


图8 北半幅施工工况平面图

开挖时序如下:

时序1:现状场地标高至22.779标高一次性开挖。

时序2:按台阶步开挖5号线区间上方土体,施工顺序1-2-3.....-7,每块土体开挖后限时48 h封闭盖板。

时序3:按台阶步同步施工1号线区间上方土体,施工顺序8-9-10.....-14,每块土体开挖后限时48 h封闭盖板。

时序4:按由左即右方向,逐步开挖15-16-17边坡位置土体,每块开挖宽度约9 m(合并3幅),每块土体开挖后限时48 h封闭盖板。

3.4 保护效果

3.4.1 开挖阶段优化措施效果

北半幅基坑较南半幅基坑,在开挖阶段优化了开挖分幅、分段,充分利用既有土体对下方盾构隧道的压载功能;通过明水截排措施,尽可能降低雨水慢慢渗透隧道上方膨胀土,充分发挥既有土体物理力

学性能;充分利用时空效益原理,快速开挖,限时封闭,降低单跨土体卸载影响时长。在综合保护措施下,北半幅开挖阶段最大隆起量2.5 mm,平均隆起1.4 mm,最大隆起量减少了75%,平均隆起量减少了70%,见图9,说明优化措施效果显著。

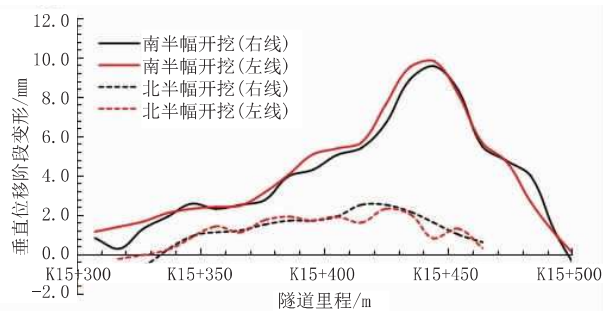


图9 开挖阶段隧道结构垂直位移量对比(单位:mm)

3.4.2 工后阶段优化措施效果

工后隆起量:南半幅基坑施工无保护监测数据,选用健康监测数据作为统计,以2016年3月6日为工后变形统计起始时间,截止2017年4月22日,历时412 d,盾构隧道左右线最大分别隆起了8.8 mm与9.3 mm,平均隆起5.9 mm;北半幅基坑自2019年7月25日施工完成后,截止2019年11月29日,历时127 d,盾构隧道左右线最大分别隆起了2.3 mm与2.4 mm,平均隆起0.5 mm,最大工后隆起量减少了75%,平均隆起量减少了92%,见图10。

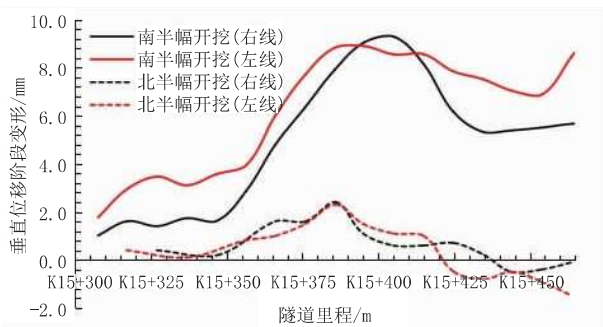


图10 工后阶段隧道结构垂直位移量对比(单位:mm)

工后稳定时间:南半幅基坑因监测数据不全,工后第二期观测较2016年3月6日间隔112 d,随后300天内盾构隧道尚无法进入0.01 mm/d的稳定标准,经回归分析,进入0.04 mm/d的相对稳定标准约历时70 d,进入0.01 mm/d的稳定标准约历时360 d;北半幅基坑保护监测实测数据表明,进入相对稳定标准约历时14 d,进入稳定标准约历时50 d。

经工后隆起量与工后稳定时间分析,南半幅基坑工后隆起量大且稳定周期长,说明桩长20 m的800@1500板凳桩+450 mm厚的盖板无法有效约束盾构隧道隆起,其原因主要为:一是板凳桩桩长不足,造成桩及盖板存在一定量的隆起(地面监测数据

已予以佐证);二是盖板施工及隆起造成下方土体与盖板存在间隙,隧道上方4.6 m高的土体发生长期的回弹变形;三是北半幅基坑长期停工暴露,势必引起其所对应的盾构隧道(K15+394~K15+431)隆起变形,另外隧道断面及上覆土均为膨胀土,雨水的长期浸透,造成土体遇水膨胀及强度降低,进一步加剧了盾构隧道隆起变形。北半幅基坑吸取了南半幅基坑所揭露的问题,优化了板凳桩长、桩间距,增加盖板厚度,对盖板下方的土体进行填充注浆。通过一系列针对性措施,北半幅工后隆起量得到有效控制,大大缩短了进入稳定的时长,见图11。

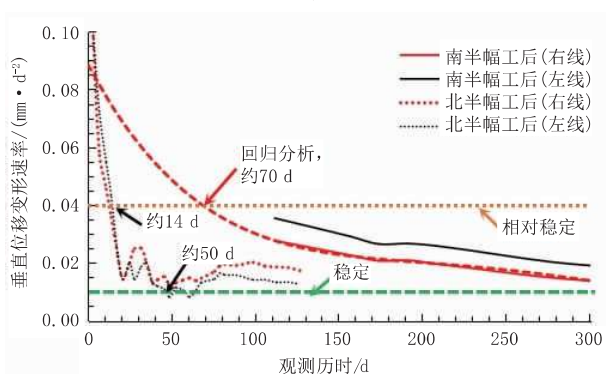


图11 工后阶段隧道结构垂直位移速率对比(单位: mm/d)

4 结 语

基坑上跨运营盾构隧道因上覆土体卸载造成隧道四周土压力发生改变,必须采取可靠措施控制隧道隆起,通过南半幅与北半幅不同保护措施下的实测数据分析,说明采用板凳桩、土体注浆、分仓限时开挖等措施可有效控制隧道隆起。

(1)基坑上跨运营盾构隧道应制定专项保护措施,开展专项保护监测,以信息手段指导现场施工。

(2)优化板凳桩的桩长与间距,细化分块抽条跳仓限时开挖等施工组织措施,可有效降低盾构隧道隆起量。

(3)针对膨胀土遇水膨胀、物理力学性能降低的特殊地层特性,开挖时需采取有效的隔水与截水措施。

(4)针对板凳桩下方施工空隙所造成隧道长期隆起变形,可采用预留注浆孔、及时填充注浆主动保护措施,以缩短隆起时长,减小隆起量。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通2020年度统计和分析报告[EB/OL]. [2021-05-12]. <https://www.ccrcc.com/news/detail-30-32364.html>
- [2] 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):1-6,52.
- [3] 叶耀东,朱合华,王如路.软土地铁运营隧道病害现状及成因分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(1):157-160,166.
- [4] 王如路,刘建航.上海地铁监护实践[J].地下工程与隧道,2004,18(1):27-32.
- [5] 刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.
- [6] 郭鹏飞,杨龙才,周顺华,等.基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J].岩土力学,2016,37(S2):613-621.
- [7] 魏纲,李钢,苏勤卫.基坑工程对运营地铁隧道影响的实测分析[J].现代隧道技术,2014,51(1):179-185.
- [8] 王永伟.基坑开挖对下方地铁隧道影响数值分析[J].铁道工程学报,2018,35(2):74-78.
- [9] 汪鹏程,方祥,徐巍,等.骑跨于既有隧道基坑的开挖过程数值模拟[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(4):506-511,540.
- [10] 龚伦,马相峰,敖维林,等.既有隧道上方挖方承载拱效应模型试验研究[J].中国铁道科学,2019,40(1):55-62.
- [11] 张玉伟,谢永利,翁木生.非对称基坑开挖对下卧地铁隧道影响的离心试验[J].岩土力学,2018,39(7):2555-2562.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com