

穿江地铁隧道施工对堤防及隧道结构稳定性的影响

肖志宏¹, 刘思博¹, 易宸², 唐旺^{3,4}, 蔡敏¹, 刘筱钰¹, 刘旭⁵

(1. 湖南建工集团有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 长沙供水有限公司, 湖南长沙 410015;
3. 湖南建投集团基础设施投资公司, 湖南长沙 410018; 4. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004;
5. 广西大学, 广西南宁 530005)

摘要: 为了评价穿江地铁隧道施工对堤防及隧道结构稳定性的影响, 依托湖南长沙某下穿湘江堤防地铁隧道工程, 采用数值模拟方法探讨了不同开挖方式、洞室埋深和盾构掘进下穿江隧道对堤防变形、隧道围岩应力和管片位移的影响。研究表明: 在隧道埋深 30 m 情况下, 三种隧道施工工况下的堤顶最大沉降量均符合规范要求, 且左、右线路管片最大变形量和洞水平收缩值均小于规范控制标准值, 隧道结构较为稳定。采用先开挖左线至堤顶下方再开挖右线的施工方式可有效控制洞室围岩垂直位移, 而且对水平方向位移影响较小; 左洞贯通后再施工右线较左右隧道同时施工和先开挖左线至堤顶下方再开挖右线方案, 洞室围岩应力偏大, 对隧道结构稳定性不利。采用左右洞室同时施工或先开挖左线至堤顶下方再开挖右线的施工工艺能够有效提高隧道结构稳定性, 该研究结果可为类似工程提供参考。

关键词: 穿江隧道; 隧道施工; 堤防; 稳定性; 数值模拟

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)05—0041—07

Influences of the Construction of a Subway Tunnel Across the River on the Stability of the Embankment and Tunnel Structure

XIAO Zhihong¹, LIU Sibo¹, YI Chen², TANG Wang^{3,4}, CAI Min¹, LIU Xiaoyu¹, LIU Xu⁵

(1. Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004, China;
2. Changsha Water Supply Co., Ltd., Changsha, Hunan 410015, China;
3. Hunan Construction Investment Group Infrastructure Investment Company, Changsha, Hunan 410018, China;
4. Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;
5. Guangxi University, Nanning, Guangxi 530005, China)

Abstract: In order to evaluate the influences of subway tunnel construction on the stability of embankments and tunnel structures, based on the subway tunnel project that crosses the Xiangjiang River in Changsha, Hunan Province, numerical simulation methods were used to investigate the effects of different excavation methods, tunnel depths, and shield tunneling on embankment deformation, tunnel surrounding rock stress, and segment displacements. The research results indicate that under a tunnel depth of 30 m, the maximum settlement of the embankment in all three tunnel construction conditions complies with the specifications. The maximum deformation of the left and right tunnel segments and the horizontal contraction value are all smaller than the specified control standards, indicating a relatively stable tunnel structure. In addition, the construction method of excavating the left tunnel first and then the right tunnel effectively controls the vertical displacement of the tunnel surrounding rock, but has a minimal effect on horizontal displacement. Construction of the right tunnel after the left tunnel breakthrough results in higher stress in the tunnel surrounding rock, which is unfavorable for the stability of the tunnel structure. Based on the above analysis, the construction processes of simultaneous excavation of left and right tunnels or excavation of the left tunnel first followed by the right tunnel can effectively improve the stability of the tunnel structure. The research results are expected to provide reference and guidance for similar engineering projects.

Keywords: cross-river tunnel; tunnel construction; dike; stability; numerical simulation

收稿日期: 2023-05-18

修稿日期: 2023-06-19

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年基金项目(20B596)

作者简介: 肖志宏(1974—), 男, 一级建造师, 主要从事建筑工程方面的研究工作。E-mail: 571996094@qq.com

通讯作者: 刘旭(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: 1342014991@qq.com

地铁已成为城市化建设的重要标志,也是缓解城市交通拥堵的有效措施^[1-2]。随地铁建设技术的发展,穿越特殊地层的地铁隧道日益增多,特别是在沿海、沿江地区,穿江隧道的建设不可避免^[3-6]。穿江隧道具有不影响航运、不受天气影响、能作为防空设施等优势,近年来在穿江工程中的应用率逐年递增^[7-8]。但在盾构穿越江河堤防的过程中会对周围土体产生扰动,引起地层变形和地表沉降,从而导致堤防失稳^[9-10]。因此,开展穿江地铁隧道施工对堤防及隧道结构稳定性影响研究,对保障堤防防护区内人民生命及财产安全具有重要意义。

目前,国内外关于地铁隧道施工对堤防及隧道结构稳定性研究主要采用理论分析和数值模拟的方法。在理论分析方面:Mroueh 等^[11]基于随机介质理论,采用极坐标变换和多子域积分法,推导了考虑盾构隧道盾构机滚动的土体变形的理论解。赵凯等^[12]综合考虑大断面水工隧洞开挖影响,研究了水工隧洞下穿既有公路隧道的沉降计算方法。在数值模拟方面:You Shuang 等^[13]采用数值模拟方法分析了上软下硬复杂地层条件下路堤超大直径(15.80 m)盾构隧道的变形特征和安全控制措施。曹磊等^[14]建立了考虑水位骤降条件下的下伏隧道堤防模型,依托湘江某下伏隧道堤防工程,基于堤防边坡渗流原理,结合有限元应力计算,探讨了不同水位骤降速率下的浸润线情况,计算了堤防安全系数。张贵金等^[15]采用数值方法,分别对隧道的覆土厚度、隧道匝道出入口离堤防的距离、隧道主出入口与堤防的相对距离以及地下水等因素进行影响分析。上述文献表明,国内外学者采用不同研究手段在穿堤隧道对堤防安全影响研究方面取得了较为丰富的成果,为工程施工提供了一定的参考指导作用。然而,现有研究依然存在一些不足之处:现有研究主要采用半定量法进行计算,计算结果与实际存在一定偏差;针对穿江双线隧道施工,盾构开挖方式对堤防和隧道结构稳定性的影响研究不够深入。

鉴于此,依托湖南长沙某下穿湘江堤防地铁工程,采用数值模拟方法构建三维数值模型,研究不同开挖方式、隧道埋深和盾构掘进下穿江隧道对堤防、隧道围岩和管片的影响,研究成果可为穿江隧道设计、施工提供一定依据和参考。

1 下伏地铁隧道堤防数值模型

1.1 模型建立

以湖南长沙某下穿湘江地铁工程为例,采用

FLAC^{3D}建立三维数值模型,如图 1(a)所示,共划分单元 432 811 个,节点 172 648 个。为消除边界条件影响,三维模型横向(X 方向)宽度取 60 m、沿穿堤出入线区间线路方向(Y 方向)长度取 105 m,竖直(Z 方向)长度往隧道底下取 10 m、向上按实际地形取至堤顶,三维模型底面尺寸长、宽、高为 105 m × 60 m × 40 m。边界约束为模型顶部自由,前、后、左、右均为水平向约束,底面垂直向约束。根据圣维南原理^[16],开挖区域外 3~5 倍洞跨距离外,开挖产生的位移和应力变化则减小至可忽略不计程度。

出入段线区间隧道于里程 YCK17+090 附近下穿堤防,根据实地情况和施工条件建模,如图 1(b)所示。地铁隧道洞径 6.20 m,施工采用盾构循环,主要穿越层是中风化砾岩,隧道与明渠距离最小 9.30 m,隧道与堤防距离 21 m~27 m。

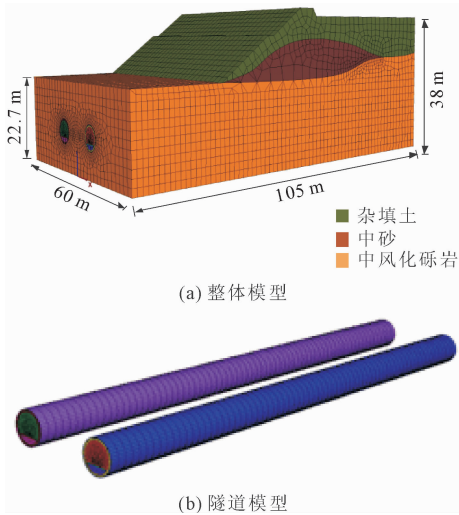


图 1 三维数值模型图

1.2 模型参数与本构模型

模型中计算单元均采用实体单元,其中杂填土、中砂及中风化砾岩采用 M-C 模型;管片采用弹性模型,注浆层采用 shell 单元模拟。相关材料参数结合现场施工实际,同时考虑最不利情况保守取值,具体参数见表 1 和表 2。

表 1 结构参数表

类型	弹性模量/GPa	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比
管片	35	20	0.35
注浆层	30	23	0.20

根据数值模拟分析基本原理和方法,将地层近似视为均匀连续介质,各层之间为连续接触。采用三维等参数单元进行模拟,其中结构单元仅考虑其

弹性工作状态,围岩、加固单元按 M-C 材料设置,服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。

表 2 围岩地层参数表

类型	重度 /(kN· m ⁻³)	弹性 模量 /GPa	泊松 比	内摩 擦角 /(°)	黏聚力 /kPa
杂填土	18.0	1.2	0.35	12.5	3.0
中砂	18.5	0.9	0.20	38.0	—
中风化砾岩	23.1	1.5	0.20	36.5	16.3

1.3 计算工况

考虑两个隧道先后施工顺序的三种工况,具体流程为:

(1) 工况 1。在工况 1 中考虑盾构施工,下穿堤防。隧道开挖前,先平衡初始地应力及渗流场;然后对隧道开挖进行渗流分析,获得施工后的状态;再进行隧道衬砌布置后渗流分析,得到下穿完毕后围岩的应力与渗流状态。具体步骤如下:

① 建立堤防及隧道结构的计算模型,固定静力边界,开始初始状态地应力场的平衡计算,获得开挖前的状态。

② 设置每次开挖 1.5 m 为一个周期并改变隧道周边加固区域土体参数,模拟施作注浆加固和超前注浆加固过程。

③ 进行隧道开挖模拟,每开挖至下一个 1.5 m 时并做上个开挖周期管片安装。

④ 重复步骤②与③直至左洞隧道贯通。

⑤ 开始对右洞进行盾构模拟,循环步骤②与③直至右洞贯通。

(2) 工况 2。模型开挖前期步骤与工况 1 相同,初始状态地应力场平衡后,左右洞线同时施工开挖进尺取 1.5 m,具体步骤如下:

步骤①、②同工况 1。

③ 进行左右洞线同时施工隧道开挖模拟,每开挖至下一个 1.5 m 时并做上个开挖周期管片安装。

④ 重复步骤②与③直至左右洞隧道同时贯通。

(3) 工况 3。模型开挖前期步骤与工况 1 相同,初始状态地应力场平衡后,左洞线先施工开挖进尺取 1.5 m,盾构施工掌子面到达堤防下时开始右洞线施工。具体步骤如下:

步骤①、②同工况 1。

③ 对左洞线进行隧道开挖模拟,每开挖至下一个 1.5 m 时并做上个开挖周期管片安装。

④ 重复步骤②与③直至左洞隧道盾构掌子面到达堤防下部时,开始右洞线施工。

⑤ 重复步骤②并对右洞线进行隧道开挖模拟,每开挖至下一个 1.5 m 时并做上个开挖周期管片安装。

⑥ 重复步骤③与⑤直至左、右洞线均贯通。

2 隧道开挖对堤防工程的影响

2.1 堤顶沉降特征

沿堤顶方向 $X = -30\text{ m}, -26\text{ m}, -24\text{ m}, -20\text{ m}, -16\text{ m}, -12\text{ m}, -8\text{ m}, -4\text{ m}, 0\text{ m}, 4\text{ m}, 8\text{ m}, 12\text{ m}, 16\text{ m}, 20\text{ m}, 24\text{ m}, 26\text{ m}, 30\text{ m}$ 提取 17 个沉降数据监测点,各工况下堤顶监测点沉降位移计算结果如图 2 所示。可知,在堤顶左侧,工况 2 地表沉降量最大,为 4.32 mm;在堤顶中心位置,同样是工况 2 地表沉降量最大,为 4.18 mm;在堤顶右侧,工况 1 地表沉降量最大,为 4.43 mm,工况 3 表沉降量为 4.41 mm,均大于工况 2 时地表沉降量。这三种工况下堤顶最大沉降量均符合我国地下轨道施工所要求的“ $-30\text{ mm} \sim +20\text{ mm}$ ”(沉降、隆起)变形标准。

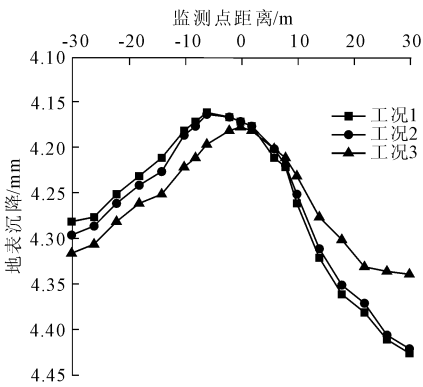


图 2 施工后堤顶横向不同监测点地表沉降值

2.2 围岩变形特征

2.2.1 围岩应变

各种工况下围岩变形如图 3 所示。将图 3(a)—图 3(c)的三种工况下隧道围岩位移计算结果汇总于表 3 中。由表 3 可知,采用先开挖左线至堤顶下方再开挖右线的施工方式,洞线水平收敛最小;先开挖左线至堤顶下方再开挖右线的工况下,拱顶沉降值相对于工况 1 与工况 2 分别减少 35%、37.6%,水平收敛减少 3.7%、5.5%,隧底隆起值增加 17.8%、1.5%。

2.2.2 围岩应力

各种工况围岩应力分布如图 4 所示。将图 4(a)—图 4(c)的三种工况下隧道围岩应力计算结果汇总于表 4 可知,工况 1 的围岩最大主应力为 2.09 MPa,最小 -4.54 MPa。采用另外两种开挖方式后,上述最大主应力值得到明显降低,但最小主应力有

较小增长。从应力变化值和应力变化百分比知,工况 1 最大主应力增幅达到 13.88%,最小主应力降幅为 3.81%。由此可见,工况 2 与工况 3 的围岩应力降低,稳定性提升。

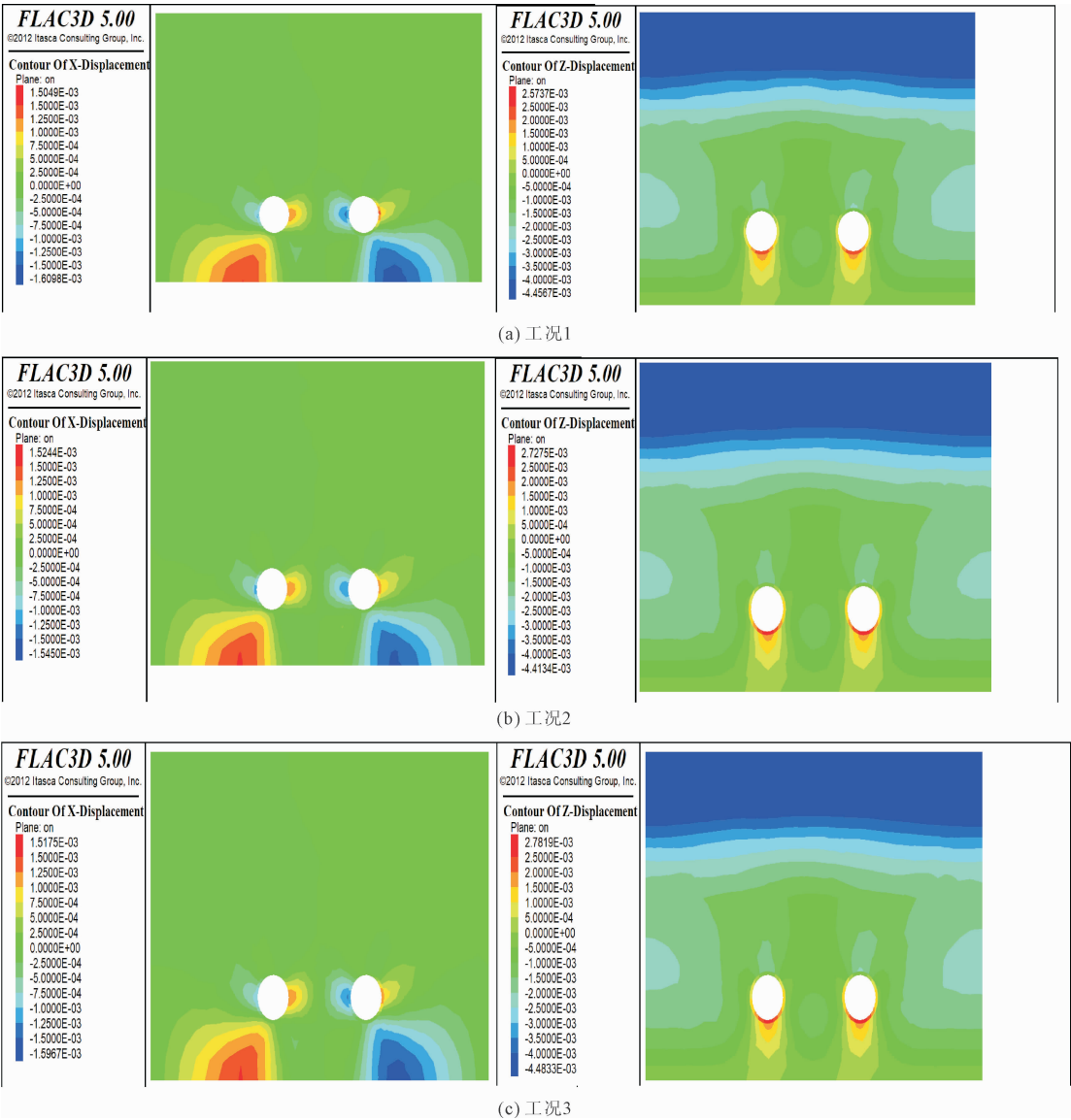


图 3 各工况下围岩变形

表 3 不同工况下隧道变形表						
单位:mm						
工 况	左线隧道			右线隧道		
	水平 收敛	拱顶 沉降	隧底 隆起	水平 收敛	拱顶 沉降	隧底 隆起
1	2.25	2.72	2.48	3.12	3.22	2.57
2	2.71	3.11	2.71	2.71	3.11	2.71
3	2.27	2.56	2.72	2.85	2.49	2.78

表 4 围岩应力计算结果					
单位:MPa					
应力类型	工况 1	工况 2	工况 3	应力 变化量	应力变化 百分比/%
最大主应力	2.09	1.80	1.82	0.29	13.88
最小主应力	-4.54	-4.72	-4.72	-0.18	-3.81

2.3 管片位移

由于篇幅限制,取 Y 方向上 Y=1 m、56 m 和整体管片 Z 方向的位移进行分析,结果如图 5 所示。由图 5 可知,Y=1 m 的管片沉降最大值为工况 1 下的 1.85 mm,隆起最大值为 2.86 mm;Y=56 m 的管片沉降最大值为工况 1 下的 2.21 mm,隆起最大值为 2.86 mm;Y=105 m 的管片沉降最大值为工况 3 下的 5.02 mm,隆起最大值为 4.98 mm。

参照《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[17](CJJ/T202—2013)可知,无论哪种开挖方式,隧道变形值均小于要求的隧道水平位移 10 mm,竖向位移 10 mm 规范值。因此,三种工况下管片稳定

性均能满足规范要求。

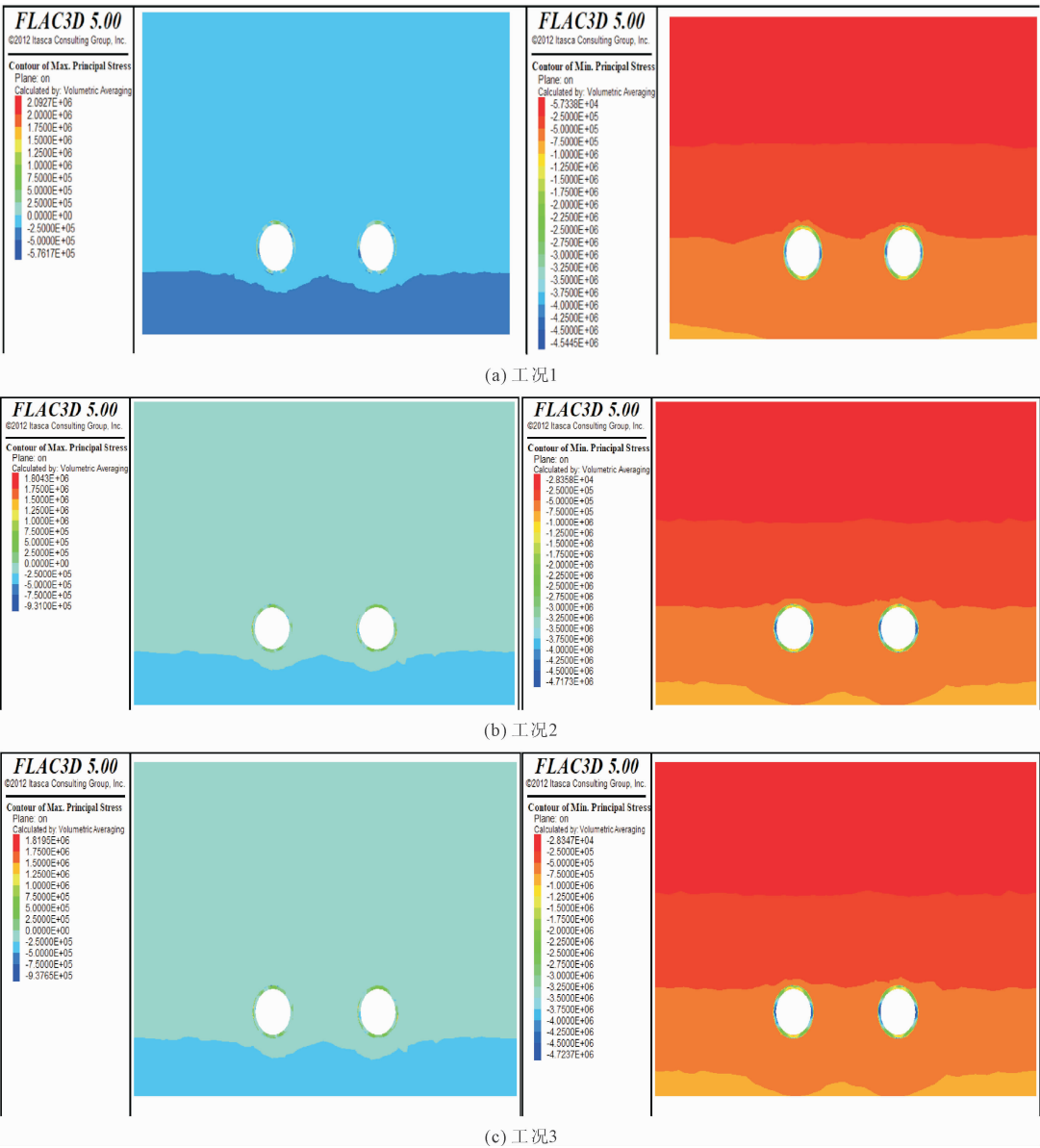


图 4 各工况围岩应力分布

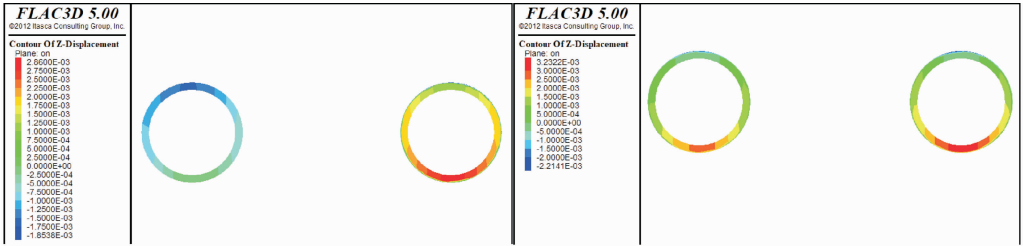
图 6 为各工况作用下 $Y=56\text{ m}$ 处洞身最终变形数据,在三种盾构进程条件下堤防下洞身各点位移监测值存在毫米级差异,在工况 1 下拱顶沉降最大为右线 1.69 mm ,拱底隆起最大为右线 2.72 mm ,最大水平收缩为右线 1.86 mm ;在工况 2 下拱顶沉降最大为右线 1.76 mm ,最大拱底隆起为右线 2.37 mm ,最大水平收缩为右线 1.72 mm ;在工况 3 下最大拱顶沉降为右线 1.81 mm ,最大拱底隆起为左线 2.16 mm ,最大水平收缩为右线 2.39 mm 。参照《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[17] (CJJT202—2013)可知,无论哪种开挖方式,隧道变形值均小于要求的隧道水平位移 10 mm ,竖向位移 10 mm 规范值。

因此,三种工况下管片稳定性均能满足规范要求。

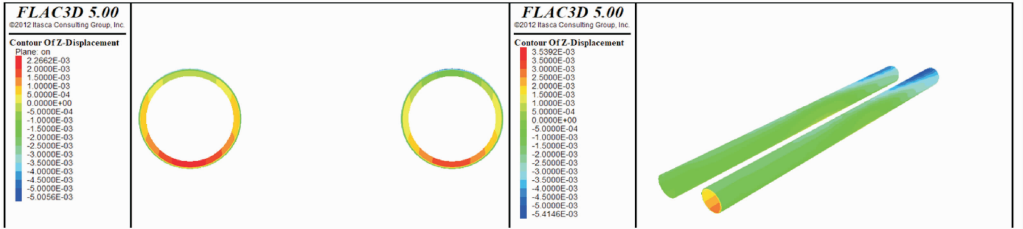
3 结 论

本文依托湖南长沙某下穿湘江堤防隧道工程,采用数值模拟方法探究了三种施工工况对堤防变形、围岩应力、管片位移等的影响,得出以下主要结论:

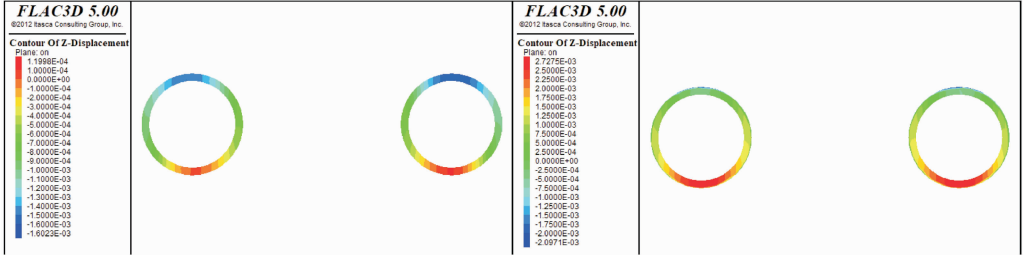
(1) 相对于先开挖一侧隧道、贯穿后再开挖另一侧的工况,左右线同时施工对堤防沉降影响更为显著;堤防稳定性随隧道埋深增加而逐渐提高,但埋深越大亦会增加施工难度和工程量,需合理选择埋深。参考依托项目可在设计埋深 30 m 下进行施



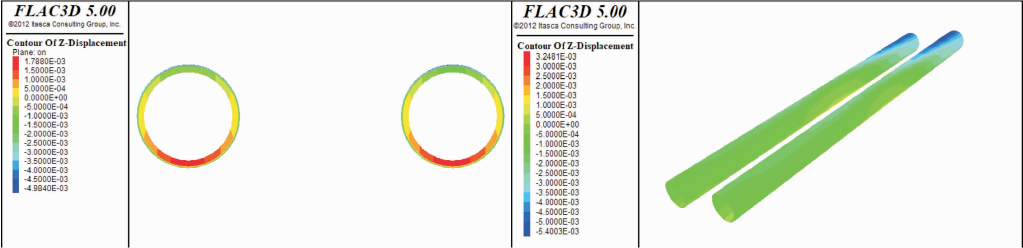
(a) 工况1 $Y=1\text{ m}$, $Y=56\text{ m}$ Z方向位移



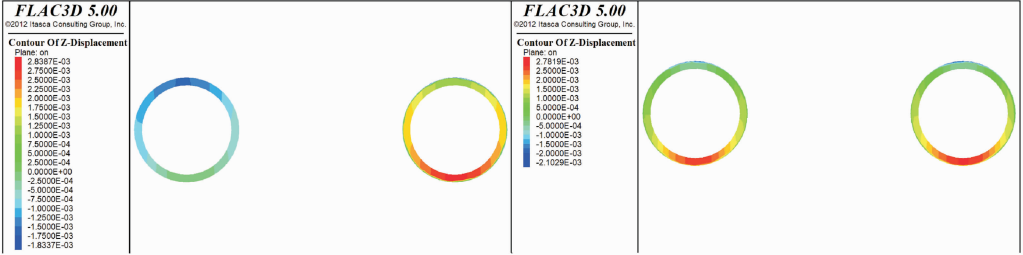
(b) 工况1 $Y=105\text{ m}$, 整体管片Z方向位移



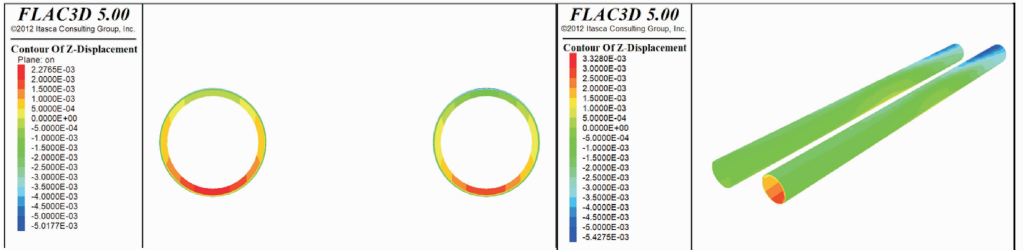
(c) 工况2 $Y=1\text{ m}$, $Y=56\text{ m}$ Z方向位移



(d) 工况2 $Y=105\text{ m}$, 整体管片Z方向位移



(e) 工况3 $Y=1\text{ m}$, $Y=56\text{ m}$ Z方向位移



(f) 工况3 $Y=105\text{ m}$, 整体管片Z方向位移

图 5 不同工况下管片位移计算结果

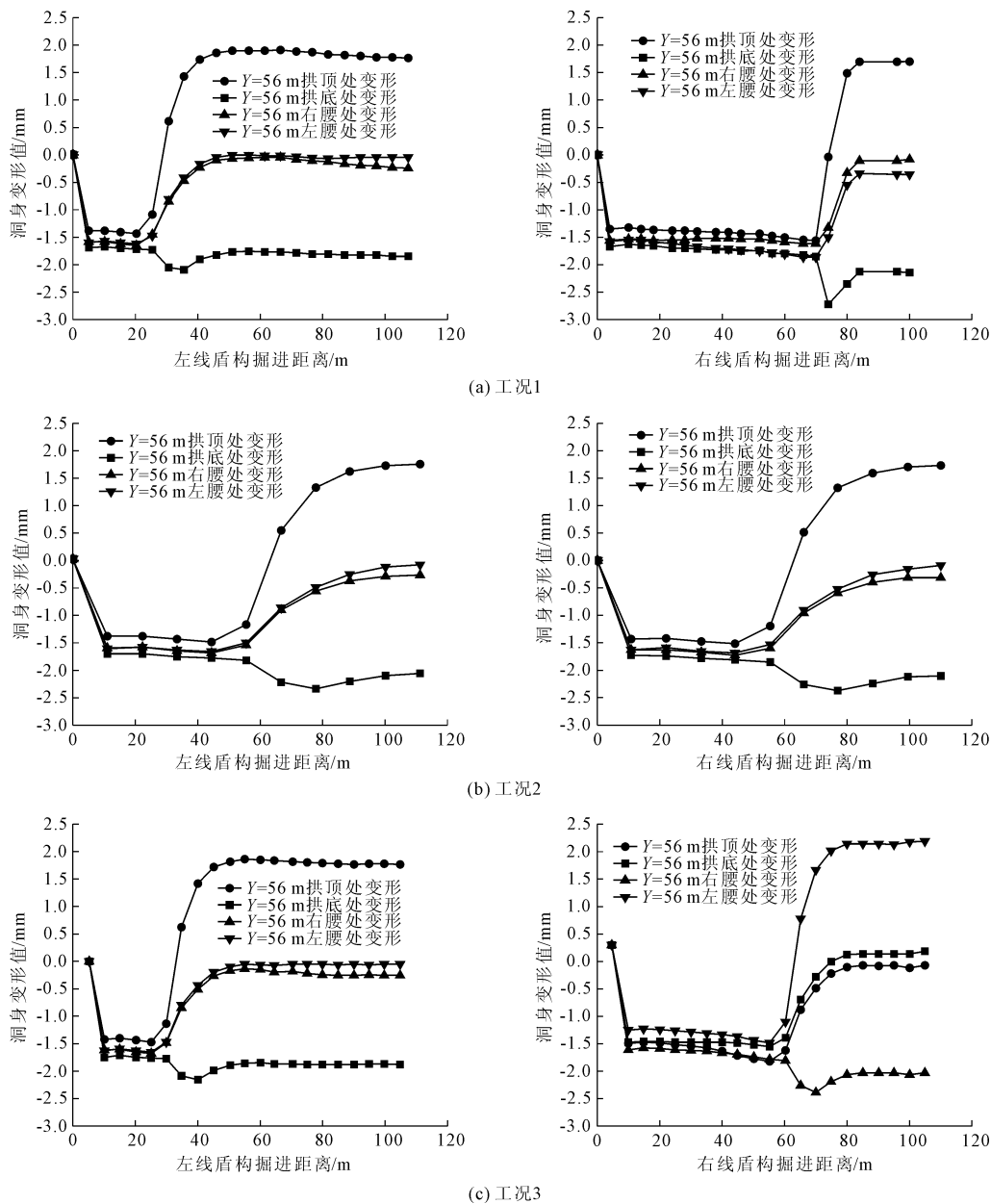


图 6 各工况作用下左右洞线 Y=56 m 洞身各点位移监测值

工,产生的地表的最大沉降为 4.43 mm,其能够满足相关要求。

(2) 隧道开挖过程中左、右线路管片最大变形量、堤防地表的最大沉降及隧道结构的整体位移值较小,均小于变形控制标准值,在规范允许范围内;地铁下穿既有堤防段引起地表沉降中,顺线路方向沉降较大变化范围约在隧道 20 m 和 30 m 之间,在施工过程中应重点加强监控量测。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术 Research综述·2022[J]. 中国公路学报,2022,35(4):1-40.
[2] 李杰伟,陆 铭. 城市人多添堵?——人口与通勤的

实证研究和中美比较[J]. 世界经济文汇,2018,247(6):1-16.
[3] 沈 波,陈能成. 隧道穿越堤防稳定性分析及处理措施[J]. 中国水运(下半月),2016,16(9):308-310.
[4] 钱 龙,檀 颖. 盾构施工穿越江河的防洪补偿方案研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(S1):151-157.
[5] Li Xin, Xue Yiguo, Li Zhiqiang, et al. Numerical investigation and prediction of the excavation face stability for river-crossing shield tunneling: An intelligent prediction model for limit support pressure[J]. Computers and Geotechnics, 2023,160:105493.

(下转第 70 页)

参考文献:

- [1] 水泥土复合管桩基础技术规程:JGJ/T 330—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] 梁善斋. 水泥土复合管桩竖向承载特性现场试验[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):280-283.
- [3] 李俊才,张永刚,邓亚光,等. 管桩水泥土复合桩荷载传递规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S1):3068-3076.
- [4] 黄晓维,郑建国,于永堂,等. BOTDR 分布式光纤传感技术在桩基测试中的应用研究[J]. 岩土工程技术,2021,35(5):281-285.
- [5] 贺玉平,王凯,杨眉. 分布式光纤传感技术在预制管桩应力测试中的应用[J]. 建筑监督检测与造价,2022,15(5):28-33.
- [6] 苗鹏勇,王宝军,施斌,等. 分布式光纤桩基检测数据智能化处理方案的研究与应用[J]. 工程地质学报. 2017,25(6):1610-1616.
- [7] 杨文生,李晓勇,张松,等. 常用桩身内力测试方法数据分析过程与实例[J]. 建筑结构. 2019,49(4):122-125.
- [8] 马加骁,张明义,王永洪. 预应力高强度混凝土管桩桩身受力特性测试技术研究进展[J]. 工程地质学报[J]. 2020,28(4):896-906.
- [9] 张慧海,马林,石怀清,等. 基于光纤测试的超长灌注桩内力测试研究[J]. 岩土工程技术,2021,35(3):196-198.
- [10] 魏广庆,施斌,余小奎,等. BOTDR 分布式检测技术在复杂地层钻孔灌注桩测试中的应用研究[J]. 工程地质学报,2008,16(6):826-832.
- [11] 基桩分布式光纤测试规程:T/CECS 622—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [12] 建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [13] 建筑地基与基桩检测技术规范:DG/TJ08-218—2017[S]. 上海:同济大学出版社,2018.
- [14] 陈磊,詹跃东,田庆生. 基于 BOTDR 分布式传感系统的研究[J]. 仪表技术与传感器,2019(6):96-100.
- [15] 预应力混凝土管桩:10G409[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

(上接第 47 页)

- [6] Chen Guoxing, Ruan Bin, Zhao Kai, et al. Nonlinear response characteristics of undersea shield tunnel subjected to strong earthquake motions[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020,24(3):351-380.
- [7] 孙钧. 论跨江越海建设隧道的技术优势与问题[J]. 隧道建设,2013,33(5):337-342,332.
- [8] 何怡帆,李天斌,曹海洋. 隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用[J]. 水文地质工程地质, 2020,47(2):102-111.
- [9] 程国良,李彦锦,杨俊,等. 复合地层越江大直径地铁隧道盾构地层适应性风险及选型分析[J]. 施工技术(中英文),2023,52(1):48-54.
- [10] 胡炜,谭信荣,蒋尧,等. 深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例[J]. 水文地质工程地质,2020,47(3):60-68.
- [11] Mroueh H,Shahrou I. A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction[J]. Computers and Geotechnics,2003,30(3):245-253.
- [12] 赵凯,崔允亮,李明照,等. 大断面水工隧洞下穿既有公路隧道沉降影响分析[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(3):162-168.
- [13] You Shuang, Sun Jianan. Deformation and control of super-large-diameter shield in the upper-soft and lower-hard ground crossing the embankment[J]. Applied Sciences, 2022,12(9):4324.
- [14] 曹磊,易宸,刘娟,等. 水位骤降对下伏隧道堤防安全影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(2):142-146.
- [15] 张贵金,刘丽玲,陈宏任,等. 穿江隧道对堤防工程影响研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(10):2018-2026.
- [16] 宋少云,尹芳. 有限元网格划分中的圣维南原理及其应用[J]. 机械设计与制造,2012(8):63-65.
- [17] 城市轨道交通结构安全保护技术规范:CJJ/T202—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.