

黄土地层盾构隧道长距离下穿湖泊安全性研究

罗桂军¹, 刘湛¹, 刘建民¹, 谢梦珊², 刘紫嫣², 张聪²

(1. 中建五局土木工程有限公司, 湖南长沙 410004;

2. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南长沙 410004)

摘要: 为评价盾构隧道上穿湖泊的施工安全性, 依托西安地铁8号线曲江池西路—曲江池寒窑区间工程, 采用多物理场耦合软件建立黄土地层盾构隧道上穿曲江池的隧道开挖模型, 并选取四种典型工况从盾构开挖面稳定性、盾构施工地表沉降以及盾构管片结构安全性三个方面进行分析。研究表明: 随着盾构隧道开挖, 围岩塑性区范围逐渐增大呈现“水平椭圆”状, 且四种典型工况下未出现贯通盾构开挖面与地表以及贯通左线与右线围岩的塑性区, 即盾构施工过程中开挖面相对稳定; 四种典型开挖工况下的施工地表沉降量最大值为 20.42 mm, 出现于隧道线正上方地表, 满足规范要求; 管片结构的最大主应力与最大剪应力数值较小, 均出现于隧道前半段的拱腰处, 盾构管片受力相对安全。研究成果对于保证盾构下穿湖泊安全施工具有重要工程意义, 也可为类似工程的建设 and 运营提供借鉴和参考。

关键词: 盾构下穿; 黄土地层; 安全性; 数值模拟

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)06-0031-08

Safety Assessment of Shield Tunnel in Loess Stratum Crossing Lake in Long Distance

LUO Guijun¹, LIU Zhan¹, LIU Jianmin¹, XIE Mengshan², LIU Ziyang², ZHANG Cong²

(1. CCFEB Civil Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: In order to evaluate the construction safety of shield tunnel passing through lake, relying on the section project from Qujiangchi West Road to Qujiangchi Hanyao of Xi'an Metro Line 8, the tunnel excavation model of shield tunnel passing through Qujiangchi in loess stratum was established by using multi-physical field coupling software, and four typical working conditions were analyzed from three aspects: the stability of shield excavation surface, the ground settlement of shield construction and the structural safety of shield segments. The results are as follows. With the shield tunnel excavation, the plastic zone of surrounding rock gradually increases and presents a “horizontal ellipse” shape, and in four typical working conditions, there is no plastic zone that runs through the shield excavation face and the ground surface, and runs through the left line and the right line surrounding rock, that is, the excavation face is relatively stable during shield construction. The maximum settlement of the construction surface under four typical excavation conditions is 20.42 mm, which appears on the surface just above the tunnel line. The maximum principal stress and maximum shear stress of the segment structure are relatively small, both of which occur at the arch waist of the first half of the tunnel, so the shield segment is relatively safe. The research results have important engineering significance for ensuring the safety of shield tunneling through rivers and lakes, and can also provide reference for the construction and operation of similar projects.

Keywords: shield tunneling; loess stratum; safety; numerical simulation

收稿日期: 2022-07-26

修稿日期: 2022-08-23

基金项目: 湖南省自然科学基金(2021JJ41086)

作者简介: 罗桂军(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事土木工程施工研究工作。E-mail: 591746332@qq.com

通讯作者: 谢梦珊(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为岩土与地下工程。E-mail: 1774562265@qq.com

随着城市地铁建设规模的不断扩大,地铁隧道穿越河流湖泊的情况愈发频繁^[1]。盾构法因对周围环境影响小、不受气候条件影响、掘进速度快等优点,已逐渐成为隧道下穿河流湖泊工程的首选施工方法^[2]。然而,水下盾构施工难度较大,面临开挖面失稳、地表坍塌、地面建筑物破坏等诸多风险,施工安全问题备受关注。

近年来,国内外学者在盾构隧道下穿河流湖泊的安全性问题方面进行了大量研究。对于盾构开挖面稳定性问题,吴文彪等^[3]建立土压平衡盾构下穿水道的流固耦合数值模型,进行了开挖面渗流分析以及开挖面涌水量计算;Liang 等^[4]以兰州地铁 1 号线为依托,重点研究了砂卵石层穿越黄河下游开挖面的极限支撑压力、失稳机理和失稳破坏方式。针对开挖过程出现的施工地表沉降和管片受力变化,金明明等^[5]基于 Verruijt 和 Booker 的解析解并结合等效刚度原理,推导出双洞单线盾构隧道穿湖施工引起的地层沉降计算公式,并结合检测数据对双洞单线盾构隧道施工引起的沉降进行分析;王凯等^[6]采用现场测试和数值模拟方法,研究了同等荷载下管片轴力和弯矩的分布情况;马晓波^[7]通过对兰州地铁下穿黄河区间盾构隧道施工过程的三维数值模拟,探究了不同工况下的围岩压力、管片应力、地面沉降。上述研究取得了较为丰富的研究成果,但盾构隧道下穿河流湖泊施工受到水文地质条件影响较大,且目前针对黄土地层盾构隧道下穿河流湖泊案例较少,其安全性仍值得深入研究。

鉴于此,本文依托西安地铁 8 号线曲江池西路一曲江池寒窑区间工程,建立黄土地层盾构隧道下穿曲江池的数值模型,通过计算不同开挖工况下引起的围岩塑性区范围、地表沉降量以及管片受力情况,分析盾构隧道下穿曲江池的施工安全性,研究成果对于保证盾构下穿湖泊安全施工具有重要工程意义。

1 工程概况

西安地铁 8 号线曲江池西路一曲江池寒窑区间沿雁南四路向东,下穿曲江池至寒窑路,起始里程为 YCK7+082.559 m,终点里程为 YCK8+059.842 m,全长 977.283 m。勘察期间实测地铁线路范围内曲江池湖水深度最大为 3.0 m,本段区间地层以老黄土、粉质黏土为主,见图 1。下穿区间采用盾构法施工,盾构左右中心线 16.0 m,衬砌环外径 6.2 m、内径 5.5 m,衬砌结构顶板距湖底最小距离 6.0 m,与

地层的位置关系如图 2 所示。

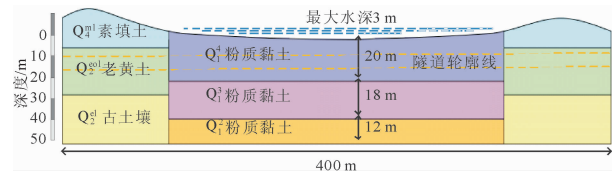


图 1 隧道下穿区间水文地质情况

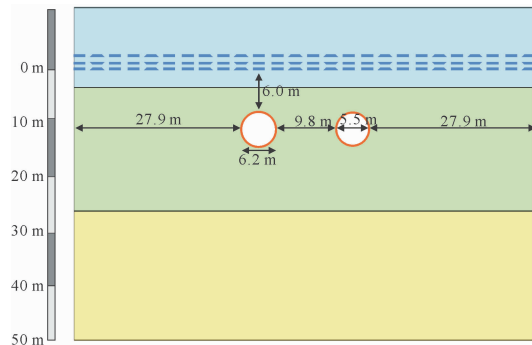


图 2 隧道线与地层相对位置关系

2 三维数值模型的建立

2.1 几何模型

为探究黄土地层盾构长距离下穿曲江池的安全性,采用软件 COMSOL Multiphysics 进行盾构隧道开挖数值仿真,分析盾构隧道开挖面的稳定性、施工地表沉降以及管片结构安全性等。鉴于模型的复杂性,建立盾构下穿曲江池的三维几何模型,其中左右双线均倾斜向上与 xy 平面成 0.45° 。一般而言,隧道开挖影响范围为 3~5 倍隧道直径,为避免边界条件对计算结果造成影响,研究区域高度取至池底以下 50 m,长度 400 m,宽度 80 m。

考虑到盾构开挖过程的阶段性,选取以下 4 个典型的危险工况对黄土地层盾构长距离下穿曲江池的安全性进行评价。工况 1:表示盾构左线开挖至离湖底最近点;工况 2:表示盾构左线开挖贯通,右线开挖至离湖底最近点;工况 3:表示盾构左线开挖贯通;工况 4:表示盾构左线右线开挖贯通。典型工况具体示意图见图 3。

2.2 边界条件

选用软件中结构力学模块中的固体力学接口与多孔介质与稀物质传递模块里的达西定律接口建立黄土地层盾构下穿曲江池的隧道开挖模型,以工况 4 为例,对模型的边界条件设置进行示意,具体见图 4。

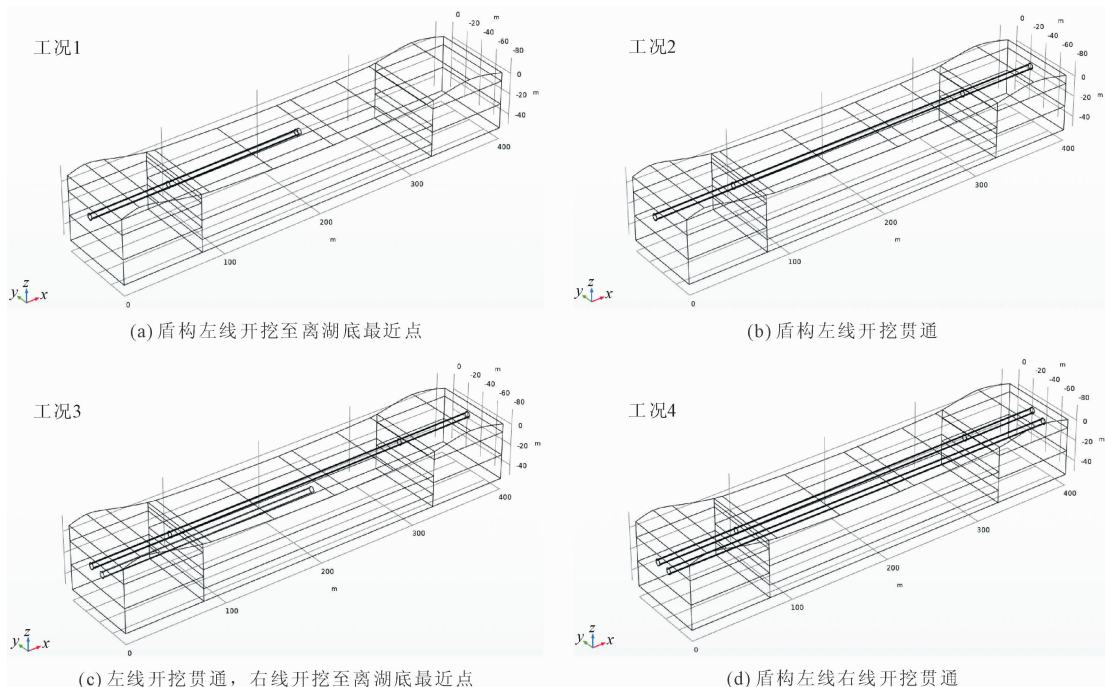


图 3 四种典型工况几何模型

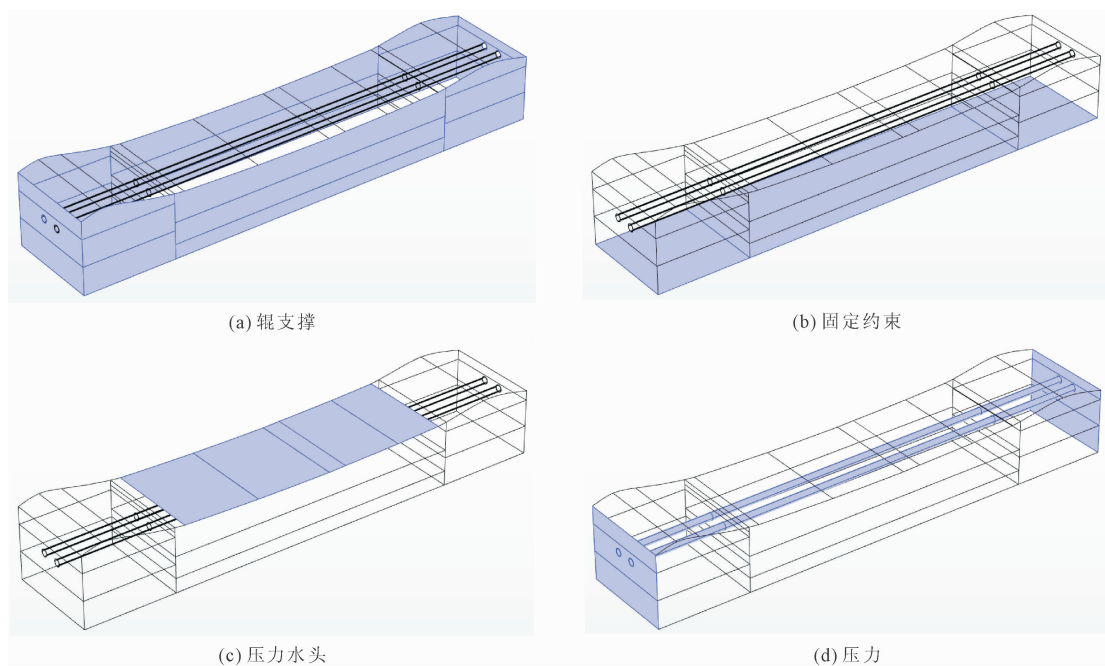


图 4 边界条件示意图

2.3 参数选取

建模过程中选用 Drucker-Prager 准则,并匹配莫尔-库伦准则来输入各层土体材料物理力学参数,结合现场勘察报告和盾构相关资料,各层土体物理力学参数以及管片材料参数选取见表 1。

2.4 网格划分

网格划分采用自由三角形网格,对管片以及管片边界区域进行加密处理,图 5 中 (a) — (d) 四种工况分别生成网格单元 21 866、40 594、57 590、72 850 个。

表 1 模型参数

物理力学指标	素填土	老黄土	古土壤	Q ₁ ⁴ 粉质黏土	Q ₁ ³ 粉质黏土	Q ₁ ² 粉质黏土	管片
密度/(g·cm ⁻³)	1.96	1.65	1.85	1.93	1.96	2.01	2.50
孔隙比	0.413	0.500	0.424	0.446	0.433	0.397	—
渗透率/m ²	8.69 × 10 ⁻¹¹	5.47 × 10 ⁻¹²	6.56 × 10 ⁻¹²	6.56 × 10 ⁻¹²	6.56 × 10 ⁻¹²	6.56 × 10 ⁻¹²	—
内聚力/Pa	20 × 10 ³	32 × 10 ³	22 × 10 ³	30 × 10 ³	50 × 10 ³	50 × 10 ³	—
内摩擦角/(°)	25	25	25	25	25	25	—
杨氏模量/MPa	10	25	30	10	20	30	30000
泊松比	25	25	25	25	25	25	0.20
Biot-wills 系数	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	—

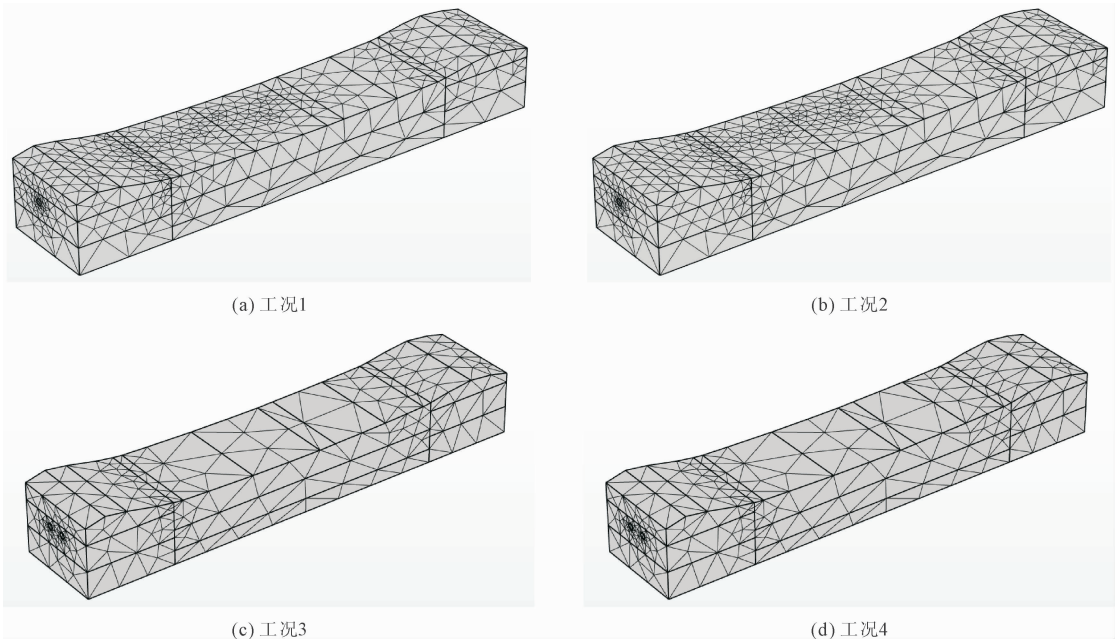


图 5 网格划分

3 模拟结果与分析

3.1 盾构开挖面稳定性评价

隧道开挖引起的围岩塑性区,是影响盾构开挖面稳定性的关键。通过计算,得到了四种开挖工况下盾构隧道围岩塑性区的分布云图,并取曲江池湖底最低点处横截面为典型危险截面,截取其每种工况的塑性区分布情况,具体如图 6。

由图 6 可知,随着盾构隧道开挖,围岩塑性区范围逐渐增大,且塑性区在拱腰处发育范围大于隧道拱顶和拱底处的发育范围,塑性区范围呈现“水平椭圆”状;工况 1—工况 4 地层中未出现贯通盾构隧道开挖面与地表的塑性区,同时工况 3 与工况 4 中盾构隧道左线与右线围岩塑性区并未相接,表明盾构隧道开挖面较稳定,一般不会出现地面塌陷问题。

3.2 盾构施工地表沉降分析

3.2.1 判断标准

查阅《城市轨道交通工程监测技术规范》^[8]可知,在中软—软弱土层开展盾构法隧道施工,地表沉降累计值应控制在 15 mm~25 mm 范围内(见表 2)。

3.2.2 地表沉降分析

为了避免地面隆起或沉降过大影响周边重要建筑物的安全,对盾构下穿曲江池不同工况下的地表沉降值进行了计算,计算结果如图 7。

由图 7 可知,工况 1—工况 4 地表出现了不同程度的沉降,沉降量的较大值出现于隧道线正上方地表,沉降量的最大值出现于隧道线中部位置的正上方地表;四种工况下地表最大沉降量分别为 20.22 mm、20.24 mm、20.42 mm、20.37 mm,均满足相关规范要求;左线开挖贯通后,右线开挖对地表沉降值的影响不大,但地表沉降槽范围增大,由此说明地表最大沉降值主要受先开挖一侧隧道线路的影响。

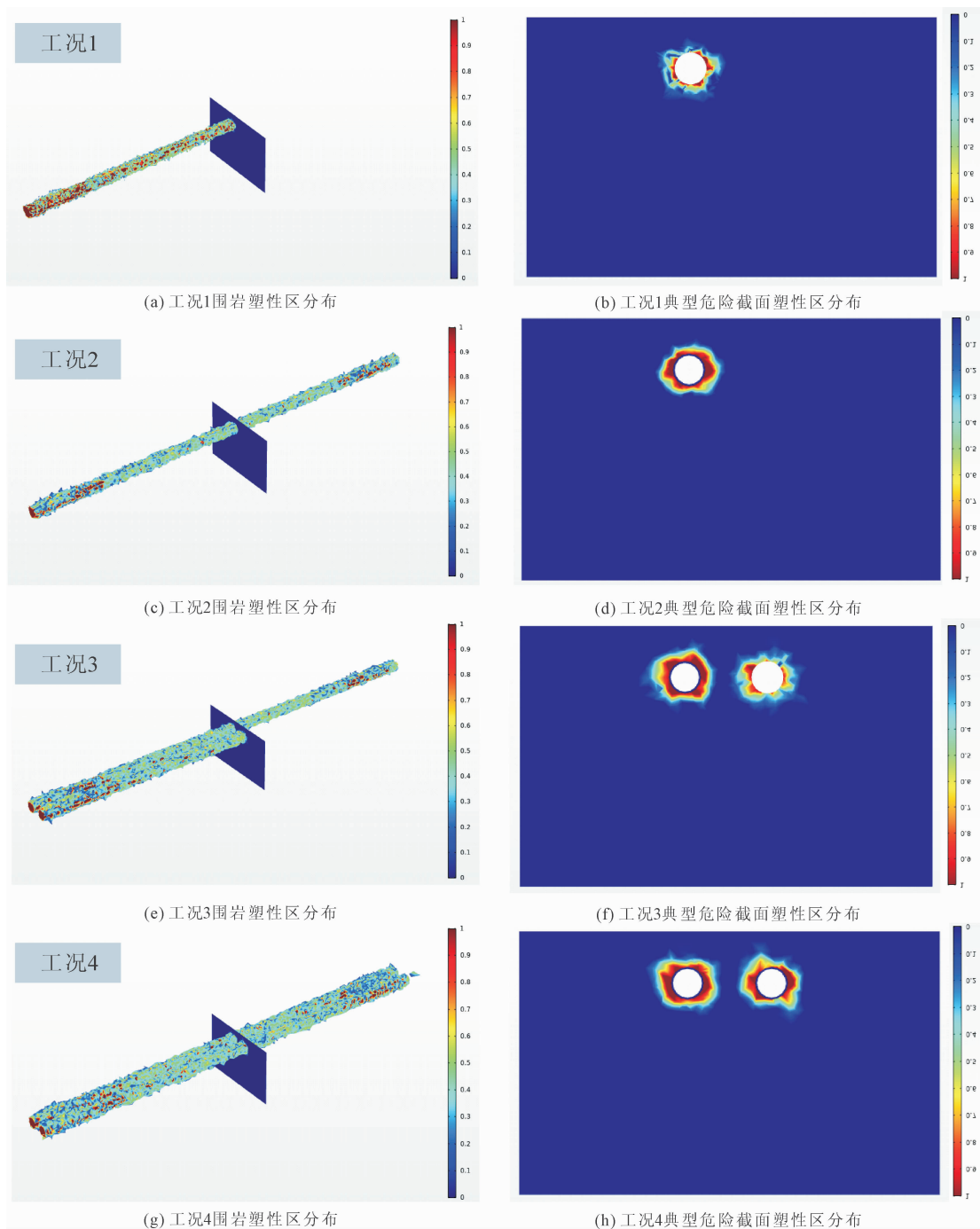


图 6 四种工况下隧道围岩塑性区以及典型危险截面塑性区分布云图

表 2 盾构法隧道地表沉降监测项目控制值

监测项目及岩土类型		工程监测等级					
		一级		二级		三级	
		累计值 /mm	变化速率 /(mm · d ⁻¹)	累计值 /mm	变化速率 /(mm · d ⁻¹)	累计值 /mm	变化速率 /(mm · d ⁻¹)
地表沉降	坚硬—中硬土	10 ~ 20	3	20 ~ 30	4	30 ~ 40	4
	中软—软弱土	15 ~ 25	3	25 ~ 35	4	35 ~ 45	5
地表隆起		10	3	10	3	10	3

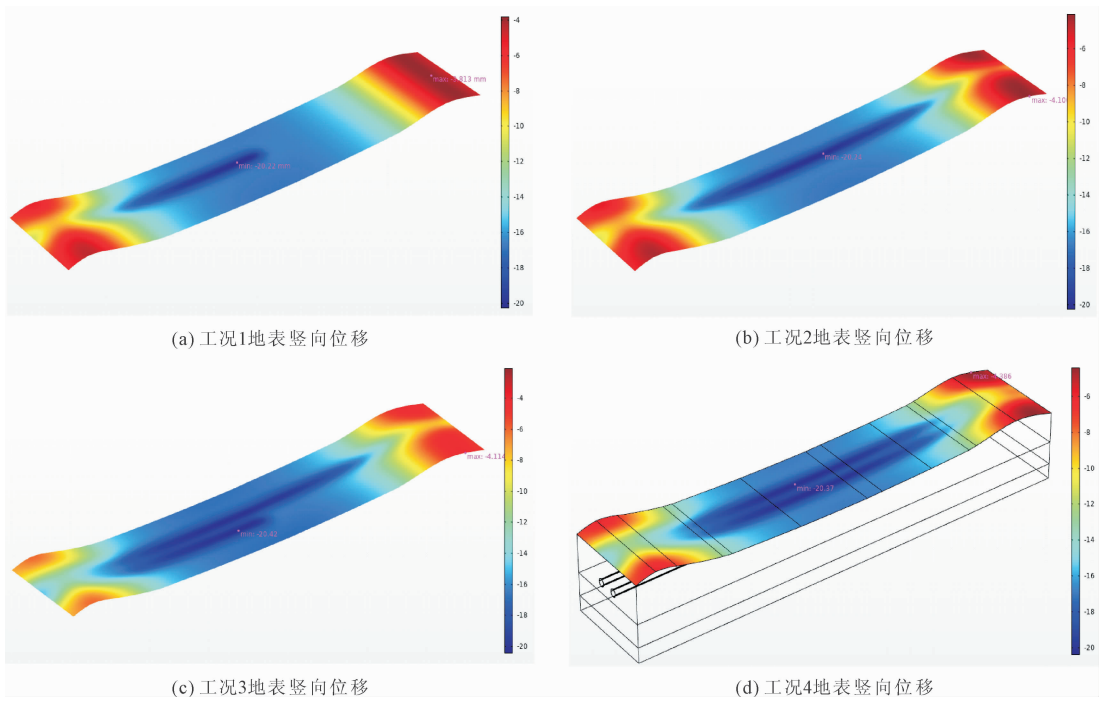


图 7 四种工况下地表沉降情况

3.3 盾构管片结构安全性评价

(1) 最大主应力。图 8 为四种工况下管片中的最大主应力分布云图,可以看到,工况 1—工况 4 下的最大主应力值相差不大,分别为 0.21 MPa、0.20

MPa、0.24 MPa、0.22 MPa,且均为压应力,出现于隧道的拱腰处;各工况下的隧道拱顶与拱底处最大主应力基本为拉应力,拱腰处最大主应力呈压应力-拉应力-压应力的变化。

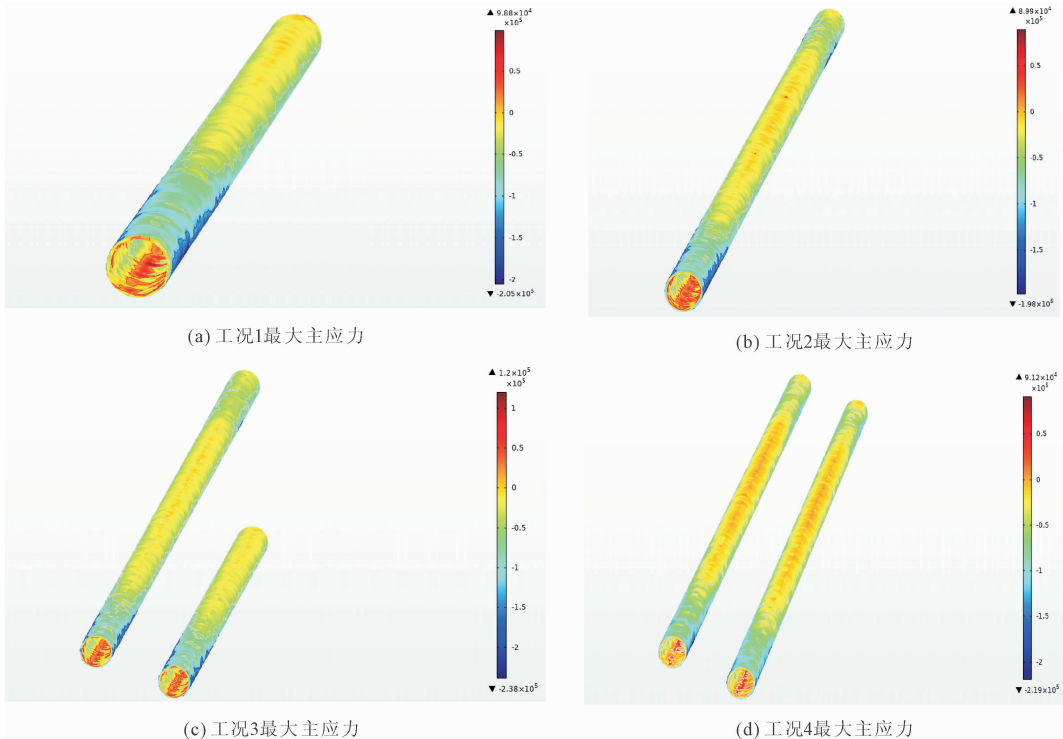


图 8 四种工况下最大主应力分布

(2) 最大剪应力。图 9 为四种工况下管片中的最大剪应力分布云图,可知工况 1—工况 4 下的最大剪应力为 1.02 MPa、1.05 MPa、1.10 MPa、0.93 MPa,且均出现与隧道的拱腰处。选取掘进方向 $x =$

213 m 截面(湖底最低点处截面)处有代表性的 8 个点,点位置关系如图 10 所示,其最大剪应力的变化如图 11 所示。

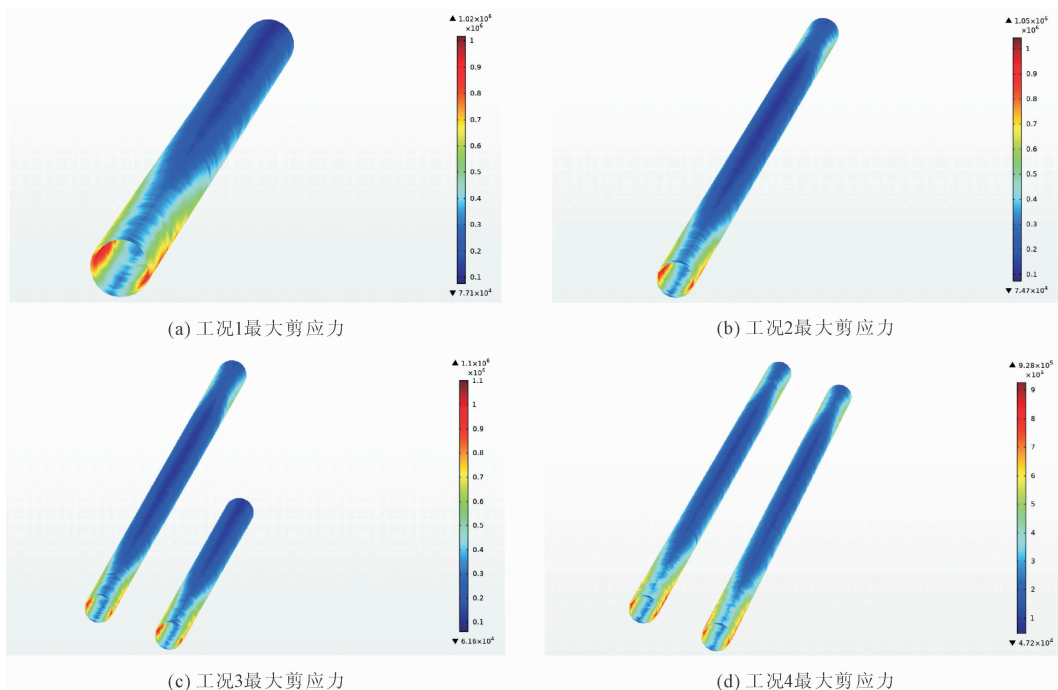


图 9 四种工况下最大剪应力分布

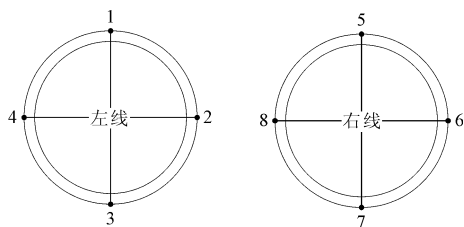


图 10 代表性点的位置关系

由图 11 可知,工况 1—工况 4 管片相同位置点最大剪应力的变化值不大,且管片中最大剪应力均出现在 2、4、6、8 点(拱腰处),最小值出现在 1、3、5、7 点(拱顶或拱底处),由此可知,管片最大剪应力位于拱腰位置,由拱腰向拱顶与拱底方向最大剪应力值逐渐减低,但最终拱顶值略小于拱底值。

4 结 论

本文采用多物理场耦合软件建立了黄土地层盾构下穿曲江池的隧道开挖模型,并选取四种典型工况从盾构开挖面稳定性、盾构施工地表沉降以及盾构管片结构安全性三个方面对黄土地层盾构长距离下穿曲江池的安全性进行了评价,主要结论如下:

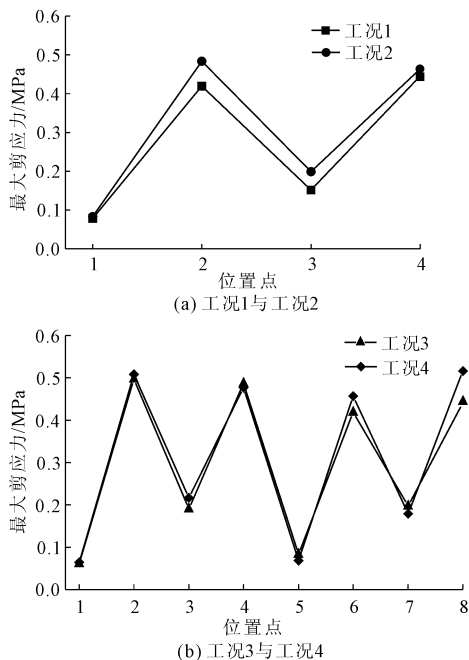


图 11 四种工况下中间管片上位置点的最大剪应力

(1) 随着盾构隧道开挖,围岩塑性区范围逐渐增大呈现“水平椭圆”状,塑性区在拱腰处发育范围大于隧道拱顶和拱底处的发育范围;四种典型工况

下未出现贯通盾构开挖面与地表以及贯通左线与右线围岩的塑性区,说明盾构施工过程中开挖面相对稳定。

(2) 四种工况下盾构施工地表沉降量的最大值出现于盾构隧道线正上方地表,且最大值为 20.42 mm,查阅《城市轨道交通工程监测技术规范》可知沉降量满足规范要求。

(3) 通过四种典型工况下盾构管片的最大主应力与最大剪应力分布云图可知,最大主应力均为压应力,且最大主应力与最大剪应力均出现于隧道前半段的拱腰处;选取池底最低点处截面对管片上代表性的点进行分析发现,管片最大剪应力位于拱腰位置,从拱腰向拱顶与拱底方向最大剪应力值逐渐减低,但最终拱顶值略小于拱底值。

参考文献:

[1] 林世奇,王海君,郑晓光.新建地铁盾构下穿既有江心洲的隧道管片受力安全分析[J].建筑技术开发,2021,48(24):155-157.

[2] 卢浩,施焯辉,戎晓力.水下隧道盾构法施工安全风险评估探讨[J].中国工程科学,2013,15(10):91-96.

[3] 吴文彪,李锦平,林辉,等.大埋深裂隙岩层中土压平衡盾构下穿水道施工安全性分析[J].铁道建筑,2019,59(8):81-83,107.

[4] Liang X, Ye F, Ouyang A H, et al. Theoretical analyses of the stability of excavation face of shield tunnel in Lanzhou metro crossing beneath the Yellow River[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(11): 04020200.

[5] 金明明,张稳军,张高乐,等.双洞单线盾构隧道穿湖施工引起的地层沉降分析[J].土木工程学报,2015,48(S2):293-297.

[6] 王凯,赵辉,周凯歌,等.南昌地铁3号线盾构隧道穿湖段管片受力特征研究[J].现代隧道技术,2019,56(S2):400-408.

[7] 马晓波.下穿黄河区间盾构隧道埋深和管片厚度的优选分析[J].铁道标准设计,2014,58(2):75-78.

[8] 城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

(上接第 30 页)

[4] 董志勇,江录兵,毛斌,等.异侧布置竖缝式鱼道紊流结构试验研究[J].水生态学杂志,2021,42(1):129-136.

[5] 张羽,张凌峰,杜庆君,等.异侧竖缝宽度对鱼道水流结构的影响研究[J].水力发电,2020,46(9):37-42.

[6] Wu S, Rajaratnam N, Katopodis C. Structure of flow in vertical slot fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999,125(4):351-360.

[7] Mao X, Tuo Y C, An R D, et al. Influence of structure on hydraulic characteristics of fishway[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012,24:684-691.

[8] 水利水电工程鱼道设计导则:SL609—2013[S].北京:中国水利水电出版社,2013.

[9] 赵彬如,戴会超,戎贵文,等.竖缝位置对竖缝式鱼道水力特性的影响[J].水利水电科技进展,2017,37(5):69-73,83.

[10] 边永欢,孙双科.竖缝式鱼道的水力特性研究[J].水利学报,2013,44(12):1462-1467.

[11] 贺翠玲,张若羽,薛琦.竖缝式鱼道休息池水力特性研究[J].西北水电,2020(2):93-96.

[12] 张国强,孙双科.竖缝宽度对竖缝式鱼道水流结构的影响[J].水力发电学报,2012,31(1):151-156.

[13] 徐体兵,孙双科.竖缝式鱼道水流结构的数值模拟[J].水利学报,2009,40(11):1386-1391.

[14] 刘本芹,黄岳,宣国祥.小长宽比鱼道池室水力学试验研究[J].水利水运工程学报,2015(6):101-106.

[15] 金忠青.N-S方程的数值解和紊流模型[M].南京:河海大学出版社,1989.

[16] 李玲,李玉梁.应用基于RNG方法的湍流模型数值模拟钝体绕流的湍流流动[J].水利学报,2009,40(11):1386-1391.

[17] 郭维东,孙磊,高宇,等.同侧竖缝式鱼道水力特性研究[J].水电能源科学,2012,30(3):81-83.

[18] 刘东.竖缝式鱼道水力特性研究[D].武汉:长江科学院,2010.

[19] 李秀萍,周济人,傅朝康,等.竖缝宽度对双侧竖缝式鱼道水力特性的影响研究[J].中国农村水利水电,2020(6):188-192.

[20] 郭维东,孟文,熊守纯,等.同侧竖缝式鱼道结构优化数值模拟研究[J].长江科学院院报,2015,32(2):48-52.

[21] 张超,孙双科,李广宁.竖缝式鱼道细部结构改进研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2017,15(5):389-395.

[22] 吕强,孙双科,边永欢.双侧竖缝式鱼道水力特性研究[J].水生态学杂志,2016,37(4):55-62.