

黄土地层地铁隧道水环境变化对地表沉降影响研究

赵爱军¹, 曾 华¹, 樊鑫尚², 于永堂^{3,4}, 彭 森⁵, 朱才辉⁵

(1. 中铁城市发展投资集团有限公司, 四川 成都 610218; 2. 中铁新丝路建设投资投资管理有限公司, 陕西 西安 710038;
3. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055; 4. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077;
5. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 黄土地层中城市地铁隧道水环境变化主要体现在地下水位升降和盾构衬砌管片渗水, 地层中水位的变化及管片渗漏会进一步影响地表沉降。以某地铁区间隧道为背景, 采用修正摩尔库仑模型 (MM-C 模型) 和 DP 模型来描述复杂加卸载条件下的地层隆沉问题, 并深入研究水环境变化下地表沉降规律。结果表明: 盾构管片渗漏比从 0.1 增大到 10 期间, 地表沉降增加了 24%; 管片渗漏块数从 1 增大到 6 块时, 地表最大沉降增大了 77%; 地下水位下降 5 m 期间, 地表最大沉降增大了 1.2 倍, 水位降深每增加 1 m, 地表下沉量增加约 7 mm; 初始水位高度抬升 5 m 期间, 地表最大沉降减小了 37%。为了控制地表不发生过量隆沉, 渗漏块数不宜超过 3 块, 并应避免拱底管片发生破坏或渗漏, 地下水位的回灌抬升高度及降水深度宜分别控制在 3.0 m 和 2.0 m 以内。

关键词: 黄土地层; 城市地铁隧道; 水环境; 数值模拟; 地表沉降

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0001-09

Ground Subsidence Caused by the Change of Water Environment in the Loess Shield Tunnel

ZHAO Aijun¹, ZENG Hua¹, FAN Xinshang², YU Yongtang^{3,4}, PENG Sen⁵, ZHU Caihui⁵

(1. China Railway Urban Development Investment Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610218, China;
2. China Railway New Silk Road Construction Investment Management Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710038, China;
3. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;
4. Zhonglian Northwest Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China;
5. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The change of water environment in urban subway tunnel in loess stratum is mainly reflected in the fluctuation of groundwater level and the seepage of shield lining segments, which will further affect the surface settlement. Based on the background of a subway tunnel, the modified Mohr-Coulomb model (MM-C model) are used to describe the ground surface uplift and settlement under complex loading and unloading conditions. The results are as follows. The surface settlement increases by 24% when the shield segment leakage ratio increases from 0.1 to 10. The maximum surface settlement increases by 77% when the number of segment leakage blocks increases from 1 to 6. The maximum surface settlement enlarges by 1.2 times during 5 m groundwater level decline, and the surface settlement increased by about 7 mm with 1m water level decline. During the initial elevation of 5 m, the maximum surface settlement decreased by 37%. In order to control the surface from excessive uplift and settlement, the number of leakage blocks should not exceed 3, and the failure or leakage of arch bottom segments should be avoided. The recharge elevation of groundwater level and the dewatering depth should be controlled within 3.0 m and 2.0 m respectively.

Keywords: loess stratum; urban subway tunnel; water environment; numerical simulation; surface settlement

收稿日期: 2024-05-29

修稿日期: 2024-06-28

基金项目: 国家自然科学基金 (52279110)

作者简介: 赵爱军 (1972—), 男, 正高级工程师, 主要从事隧道工程等方面的研究工作。E-mail: zaj116@163.com

通讯作者: 朱才辉 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事黄土力学与工程、地下洞室稳定性分析等方面的教学与研究工作。

E-mail: zhucaihui123@163.com

在我国现代化进程中,城市由地上空间的不断扩张,逐渐转型到地下空间的开采与利用,以古都西安为例,国家“十三五”期间,提出了建设“地上”、“地下”两个西安的宏伟蓝图,地下空间的建设给城市规划、施工、灾害控制带来了巨大挑战,其中,盾构施工对地层的扰动、地下水流动路径的破坏、地下水位的变化、管片的渗漏破损等问题,一直是困扰施工质量与安全的首要难题。

较多学者对西安某区段地铁的实测资料进行反演分析,对注浆填充率等施工工艺参数和地层移动规律之间的关系进行量化分析,引入到“间隙参数”公式,提出了一种盾构间隙计算方法;通过多组实测数据,总结了在不同施工方法、地层条件、覆跨比下的最大沉降量、沉降槽宽度的变化规律^[1-3],并基于地表沉降实测数据提出了修正的 Peck 公式^[4]。然而由于控制技术的局限性,城市地下空间的开发应用必然对区域地层移动、地下结构变形破坏产生一定影响,甚至诱发工程和环境灾害,因此,有必要针对地下空间开发期间“隧道-地层-环境”相互影响下灾害问题及控制措施展开探讨^[5],对于盾构施工引起的地层扰动及沉降问题,已有的规范中提出了管片竖向位移预警值 10 mm,控制值 20 mm 的限制,但当地下水运移路径发生变化后,地下水位变化及管片破损对地表变形的影响往往难以事先考虑。大量学者通过对盾构隧道渗漏部位现状调研,提出一种同时满足刚度要求和接缝处渗水模型的计算方法,通过有限元分析不同位置的沉降、孔压分布及隧道力学响应,发现不同部位渗漏对孔压影响较大,特别是拱底渗漏的影响显著,随着局部渗漏效果的增强,隧道管片会发生“椭圆现象”,但有限元仅用二维简化模拟,与实际工程中三维渗漏存在较大差异^[6-7]。

部分学者通过对上海地铁 1、2 号线实际区段分析,将集中破坏的管片某些区域换转为均匀渗透,用有限元模拟渗漏点及不同渗透系数对地层沉降的影响,认为衬砌管片的渗漏引发的地表沉降与渗透系数是正相关,渗漏比在 0.01~1.0 时,地表沉降与土层模量呈负相关,并提出了工后长期沉降的预测方法^[8-9]。同时较多学者对砂卵石地层中盾构地铁施工掘进参数进行优化分析,认为注浆压力控制在 250 kPa,土舱压力是静止土压力 1.6 倍较为合理,千斤顶推力控制在 34 000 kN 左右,推进速度控制 6 m/d,可保证施工及地层稳定性^[10-11],在富水圆砾

地层中,需将泥水仓压力控制在 0.20 MPa~0.22 MPa,注浆压力控制在 0.25 MPa~0.40 MPa,同时掘进速度提升至 10 mm/min~15 mm/min,当处于砂卵石及粉质黏土复合地层时,土仓压力理论值为 0.74 bar~1.01 bar,控制注浆压力为 2.43 bar,盾构推力理论值为 27 472 kN^[12-13]。在此基础上有学者对上海软土地层中盾构地铁施工诱发的水环境变化及灾变问题开展了大量研究,同时通过对实际隧道工程中存在的大面积渗水问题,利用有限元分析软件研究了地下水环境变化条件下的二衬力学特征和渗流变化规律,结果表明隧道开挖的渗流影响大于力学影响,轴力发生在侧墙,弯矩发生在拱脚,剪应力发生在拱底,侧墙是发生渗水部位最薄弱区域,应加强对侧墙的结构优化^[14-15]。但二维数值模拟不能阐述实际三维工程问题,由此有学者采用三维流固耦合分析方法,研究了盾构施工阶段下水环境变化及管片不同渗流位置,环缝接头渗漏的劣化对地表沉降影响规律,表明环缝接头处将产生沉降漏斗,衬砌接头会张开,出现扁平化变形,随着渗漏程度的增大,隧道渗漏区域周围土体孔压降低的程度不断提高^[16-18],并分析了渗漏时间、渗漏程度、渗漏位置和渗漏面积对土体孔压分布、地表沉降、管片变形的影响,表明盾构隧道渗漏使土体中的孔压降低,渗漏时间越长、渗漏程度越严重、渗漏位置越靠近拱底、渗漏面积越大,孔压降低的幅值越大^[19-22]。

综上,学者针对砂卵石地层、软土地层中盾构地铁施工期及运营期诱发的灾变问题开展了大量研究,但对于黄土地层中的水环境问题研究较少。近些年来,黄土地层中地铁建设项目增多,涌现出来的工程问题也与日俱增,其中,盾构施工期间地下水位下降、盾构隧道运行期间地下水位逐渐抬升,盾构管片防水措施老化或衬砌开裂等问题,导致地下水环境发生变化,进而会诱发隧道上覆地层产生隆沉问题,影响地表建(构)筑物、道路及盾构管片的正常使用,这些问题仍是困扰工程界的热点问题。鉴于此,本文通过总结大量文献归纳了西安黄土地层的分布特征,基于某实测的地铁车站基坑施工引起的地表沉降问题开展反演分析,对地下工程问题中的黄土地层的本构模型及参数的合理选取进行系统研究,进一步基于 MIDAS 数值分析方法研究盾构管片所处地层的地下水位升降及管片不同程度渗漏对地表沉降的影响规律,以期类似工程的设计施工提供參考。

1 黄土地层本构参数合理取值反演分析

1.1 地层条件

根据大量工程地质调查,西安地铁埋深约为 8 m~30 m,平均埋深为 15 m,所在的地层从上到下主要为填土或杂填土、新黄土、饱和软黄土、古土壤、粉质黏土等典型土层。隧道底部以下土层多为 Q₃ 粉状黏土层和局部砂层,地层水平分布相对均匀。地下水位高度在地表以下 8 m~15 m,隧道多数在地下水位以下,但由于盾构施工期间地下水的排出,盾构隧道运行期间地下水位逐渐恢复,或由于盾构管片的施工间隙、防水措施老化等问题,导致地下水环境发生变化,进而会引起地下水位出现下降、上升以及衬砌出现渗漏水等现象,最终表现为隧道上覆地层产生隆沉问题,影响地表建(构)筑物、道路及盾构管片的正常使用,由此诱发的灾害问题如图 1 所示。



图 1 临近地铁水环境变化诱发的灾害问题

1.2 数值模型的构建

为了获得较为合理的黄土地层在开挖卸载工况下的本构参数,以西安地铁 6 号线某竖井施工引起的地表沉降为背景,针对典型黄土地层的本构参数展开数值反演分析。其中,竖井端口尺寸 7.3 m×5.8 m,井深 28.7 m,井壁的初支厚度为 0.3 m,格栅钢架间距为 0.5 m,学生公寓为三层框架结构,基础为条形基础,距离竖井约 20 m。该竖井工程的建设场地位于西安市的黄土梁洼区,该处地层从地表向下依次为:1-1 杂填土,厚度在 0.5 m~1.2 m 左右;1-2 素填土,厚度约为 0.7 m~2.7 m;3-1-1 新黄土软黄土,厚度在 0~3.6 m;3-1-3 饱和软黄土,厚度在 8.1 m~14.6 m;3-2-2 古土壤,厚度为 2.0 m~3.3

m;4-1-2 老黄土,厚度为 7.0 m~10.2 m;4-2-2 古土壤,厚度在 3.7 m~4.8 m;最下层为 4-4 粉质黏土,地质剖面见图 2。

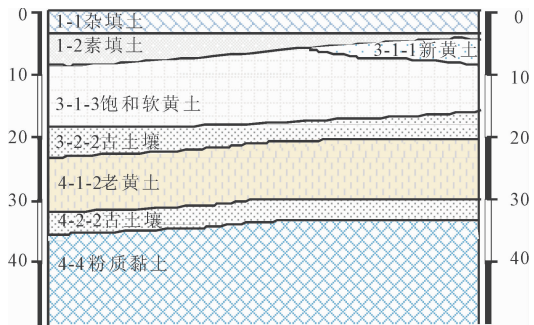


图 2 工程地质剖面图

数值模型长度采用 100 m,深度 80 m,有限元模型如图 3 所示,土层共分为 7 层,中间设有围护桩和内支撑防止开挖以后出现坍塌,初始水位在地下 4.7 m,在基坑左侧 10 m 处设置一监测点 A。具体施工过程:(1)开挖土层地下 3 m,降水一次,降水到地下 7 m;(2)开挖土层地下 6 m,降水一次,最低水位到地下 13 m;(3)开挖土层地下 12 m,降水一次,降水到地下 18.5 m;(4)开挖土层地下 17.8 m,降水一次,降水到地下 21.5 m;(5)开挖土层地下 20.8 m,封底。

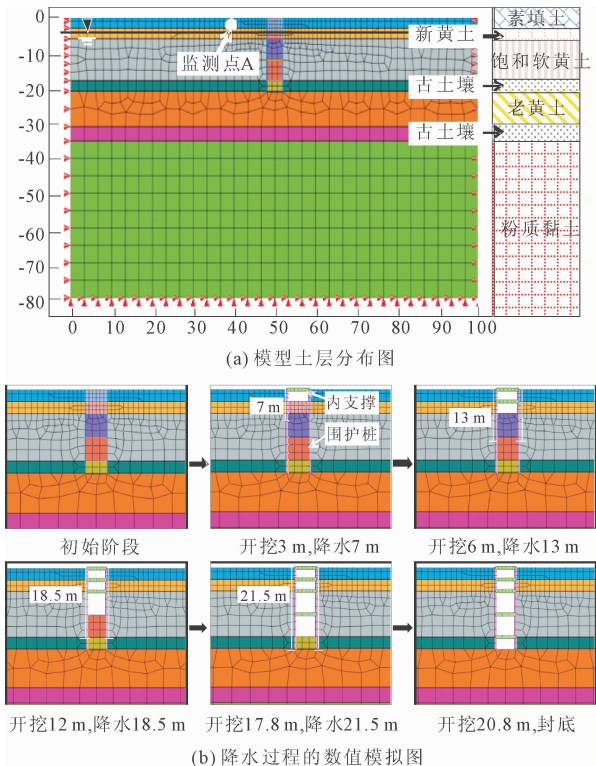


图 3 有限元模型图

1.3 计算参数选取及数值方案

针对隧道所处地层分别选取修正摩尔-库仑模型 (MM-C), DP 模型和摩尔-库仑模型 (MC) 进行对比分析, 制定了四种不同土层的本构模型方案, 具体方案如表 1 所示。

表 1 不同本构模型方案

工况	本构模型
工况 1	七层土-MC
工况 2	七层土-MM-C
工况 3	素填土 + 新黄土 + 饱和软黄土-DP; 其余土层-MC
工况 4	饱和软黄土 DP 模型; 其余层土 MM-C

围护桩和内支撑采用混凝土属性, 具体参数如表 2 所示。

表 2 地层及混凝土参数表

名称	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E_s/MPa	ν	e	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
素填土	17.8	3.00	0.36	1.30	12	16.0
新黄土	18.6	5.60	0.28	1.10	30	20.5
饱和软黄土	19.7	4.42	0.36	0.85	19	15.5
古土壤	19.9	7.75	0.30	0.66	28	22.8
老黄土	20.0	8.67	0.35	0.80	24	20.0
古土壤	19.9	8.32	0.32	0.72	28	22.8
粉质黏土	20.3	9.30	0.30	0.71	30	23.8
混凝土	25.0	30000	0.20	—	—	—

注: E_s 为土层压缩模量; ν 为土体泊松比; γ 为土体重度; c 为土层黏聚力; φ 为土体内摩擦角; e 为土体孔隙比。

1.4 反演结果分析

通过上述数值分析方案, 得到不同方案下地表沉降 S_y 与实测值对比结果见图 4。

由图 4 可得, 地层采取不同本构参数, 对地表沉降影响较大, 工况 4 的数值结果与实测值基本一致, 工况 1—工况 3 的计算结果与实测值相差较大, 其原因是: 工况 1 的 MC 模型难以考虑开挖卸荷回弹, 工况 2 是的 MM-C 模型, 虽然考虑了开挖卸荷问题, 但沉降过大, 工况 3 未考虑饱和软黄土在空间土层中的软化效应, 导致计算结果偏小, 工况 4 综合考虑了饱和软黄土的软化效应和卸荷回弹问题, 其数值结果与实测结果相差 2%。可见, 在地下开挖数值模拟期间, 采取 MM-C 与 DP 模型组合运用, 能够较为合理的模拟地下工程施工问题, 这对后文进一步模拟盾构隧道的开挖问题, 具有重要参考意义。

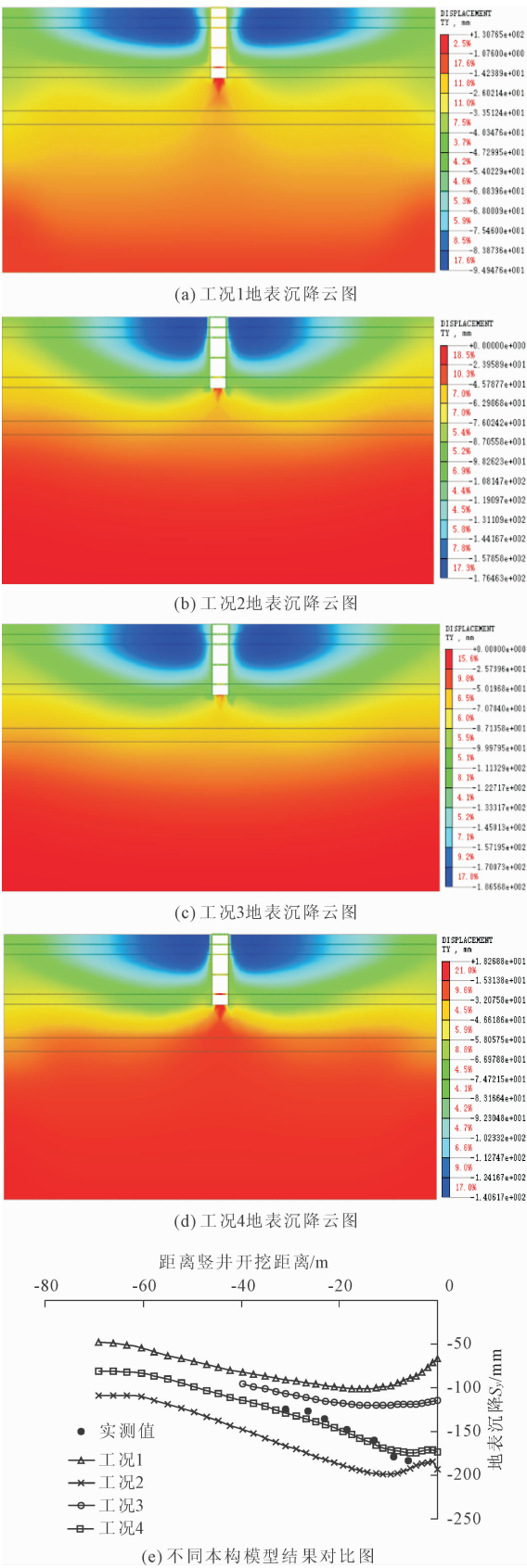


图 4 不同本构模型数值结果与实测结果对比图

2 盾构隧道掘进施工数值模拟方法

2.1 盾构土舱压力模拟

对于土压平衡盾构施工而言,盾构机施工是一个动态掘进过程,见图 5(a),盾构土舱内部压力与掌子面前方侧向土压力保持动态的平衡,土舱压力模拟见图 5(b),掌子面处前方侧向土压力由式(1)求得:

$$F = k_0 \gamma h \tag{1}$$

式中: F 为掌子面前方侧向土压力,kPa; γ 为土层重度,kN/m³; h 为隧道开挖轮廓距离地表面深度,m; k_0 为地层侧压力系数。

根据地层参数表 2 对土舱压力如式(1) 计算后,土舱压力理论计算结果为: $F = 146.9 \text{ kPa}$ 。

2.2 盾尾注浆压力模拟

由于盾构机在施工过程中盾壳的宽度大于衬砌外径,施工期间会出现盾尾间隙,这些间隙最后通过同步灌浆形式填充,但是注浆压力过大或过小可能会导致地层出现隆沉现象,因此考虑注浆效果影响,注浆压力模拟过程见图 5(c),注浆压力计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_h^2} = \sqrt{(\gamma h)^2 + (K_0 \gamma h)^2} = \gamma h \sqrt{1 + K_0^2} \tag{2}$$

式中: σ 为注浆压力,kPa; σ_v 为水平土压力,kPa; σ_h 为竖向土压力,kPa; h 为隧道开挖轮廓距离地表面深度,m; K_0 为土层平均侧压力系数。

根据地层参数表 2 对注浆压力计算后,注浆压力理论计算结果为: $\sigma = 350.5 \text{ kPa}$ 。

2.3 盾构千斤顶推力模拟

为有效考虑盾构期间的盾构推力作用,采取装配推力进行估算,盾构推力计算如表 3,盾构千斤顶推力模拟过程见图 5(b),估算公式为:

$$F_p = \frac{\pi D^2 p_j}{4} \tag{3}$$

$$F_\beta = \beta D^2 \tag{4}$$

$$F_e = (F_p + F_\beta)/(2A) \tag{5}$$

式中: F_p 为经验公式(3) 计算推力,kN; D 为盾构开挖直径,m; F_β 为经验公式(4) 计算推力,kN; p_j, β 为经验系数,kN/m²; F_e 为设计推力,kN; A 为安全系数,取 3~4。

表 3 盾构推力计算表

F_p/kN ($p_j = 700 \sim 1200$)	F_β/kN ($\beta = 500 \sim 1200$)	F_e/kN ($A = 3 \sim 4$)
35848.3	35721.0	11928.0

为有效模拟盾构施工过程,盾构隧道衬砌通过螺栓孔将 6 环分块管片拼接而成,不考虑盾构超欠挖引起的盾构姿态不良问题,将盾构推力转化为均布荷载施加于管片尾部环端面上,驱动盾构机掘进施工。根据式(1)一式(5) 及表 2 中的地层参数,计算土压平衡盾构施工期间的外力,分别取:土舱压力为 146.0 kPa,注浆压力为 350.0 kPa,盾构推力为 11 928.0 kN。

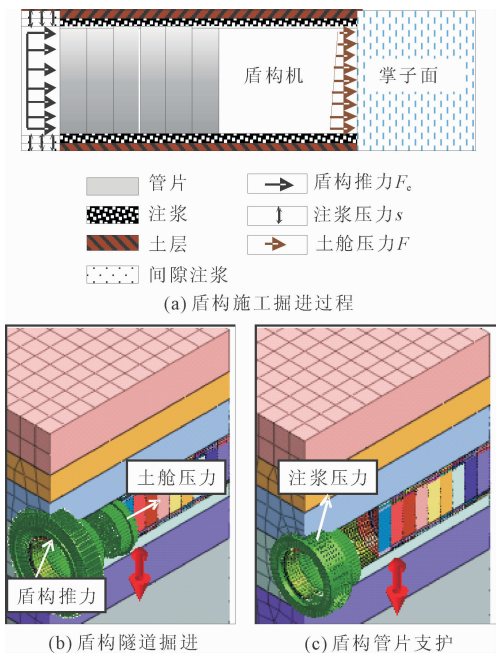


图 5 盾构施工示意图

3 地铁隧道水环境变化数值模拟方法

3.1 有限元模型的构建及分析流程

地铁隧道三维有限元分析模型尺寸为:80 m × 30 m × 50 m (长 × 宽 × 高),其中隧道开挖直径 $D = 6.8 \text{ m}$,衬砌厚度为 0.3 m,注浆厚度为 0.25 m,隧道中轴线平均埋深 $H = 15 \text{ m}$,为减少尺寸效应,将模型的左右边界沿轴线方向扩展 40 m (约 6D) 下边界距隧道底部 30 m (约 5D),三维几何模型如图 6 所示。

边界条件设置:在隧道底部设置固定约束于 X 、 Y 、 Z 方向上位移,模型顶面为自由位移边界,模型正面、背面设置 Y 方向约束,两侧约束为 X 方向固定。在流固耦合分析时,模型四周及底部均设置不透水边界,地下水位以上土层孔压始终为零,工后期水环境条件下在隧道衬砌处设置透水边界(激活节点水头全排水边界),以模拟衬砌渗漏现象,初始地下水位处于地表下 10 m。

数值模拟流程如下:

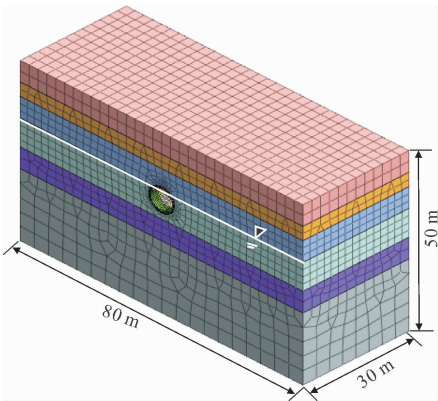


图6 三维几何模型

- (1) 初始渗流场的模拟:土层激活,采取对应土层参数替换衬砌、注浆、盾壳等结构,渗流边界设置初始水位 $h = -10\text{ m}$ 水头,获取初始渗流场。
- (2) 初始地应力的模拟:激活自重应力及自动约束,位移清零,实现流固耦合分析。
- (3) 盾构隧道掘进:盾构机置入土层如图 7(a),作为盾构机临时支护;对开挖掌子面施加土仓压力如图 7(b),钝化开挖土层,激活盾构机预埋钢壳。
- (4) 盾构管片拼装:当(3)步序终止,盾构机前行 1 环(2 m),激活预制拼装管片、注浆结构属性如图 7(d),对盾尾开挖轮廓和物理间隙之间填充注浆,同步激活物理间隙中的注浆压力,模拟注浆支护效果如图 7(c),激活管片尾部环端面上的盾构推力模拟系统驱动盾构机掘进施工。
- (5) 盾构管片渗漏:通过调整衬砌接缝处析取单元的裂缝渗透系数确定漏水区域,激活预设的渗漏边界模拟管片渗漏部位渗流。

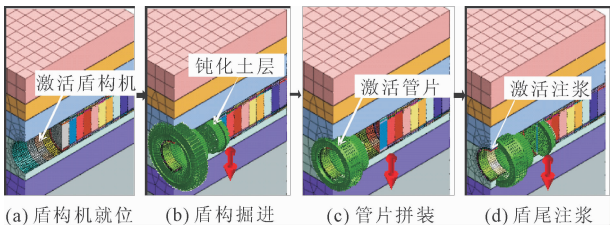


图7 盾构施工阶段模拟

3.2 计算参数的选取

根据数值反演分析表明,当黄土地层采取 MM-C 模型和 DP 模型能够较为合理的反映地表沉降问题。其中,室内试验在确定 MM-C 模型的卸载应力-应变关系相对较为复杂,其关键参数割线刚度、卸荷模量参数难以获取,数值模拟分析时往往需要借助于工程经验或数值反演分析获得较为合理的参数,本文引入割比 n 和卸荷系数 a :

$$n = \frac{E_{50}^{\text{ref}}}{E_s} \tag{6}$$

$$a = \frac{E_{\text{ur}}^{\text{ref}}}{E_{50}^{\text{ref}}} \tag{7}$$

式中: n 为割比系数; a 为卸荷系数; E_{50}^{ref} 为割线刚度, kPa; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸荷模量, kPa。

根据以往的工程经验发现:北京区域工程经验取值 $n = 1.0$ 左右, $a = 2.0 \sim 4.0$ 之间;上海区域经验取值 $n = 0.9 \sim 1.0$ 左右, $a = 4.0 \sim 9.0$ 之间;天津区域比值 $n = 1.5 \sim 2.0$ 左右, $a = 5.0$ 左右。综上所述案例中修正摩尔库仑关键参数取值为 $n = 1.4$, $a = 4.5$;根据地铁六号线资料,西安地铁隧道外径为 6.8 m,衬砌环宽 2 m,地层及支护结构参数见表 4。

表4 地层及结构参数表

名称	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/MPa	ν	e	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	n	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	a	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$
素填土	17.8	15	0.30	0.90	12.0	15.0	1.4	10.5	4.5	47.3
饱和软黄土	19.7	12	0.39	0.86	19.8	18.5	1.5	6.6	4.5	29.7
新黄土	18.6	18	0.29	0.86	38.0	20.0	1.4	12.6	4.5	56.7
古土壤	19.9	33	0.37	0.67	24.7	18.9	1.4	19.8	4.5	89.5
老黄土	20.0	45	0.29	0.66	27.5	20.5	1.4	31.5	4.5	141.7
粉质黏土	20.3	54	0.30	0.64	31.7	22.8	1.4	37.8	4.5	170.1
衬砌管片	27.0	34500	0.27	—	—	—	—	—	—	—
壁后注浆	24.0	400	0.25	—	—	—	—	—	—	—
盾构钢壳	78.5	210000	0.20	—	—	—	—	—	—	—

3.3 数值分析方案

3.3.1 管片局部渗漏

将错缝拼装的每环管片按照 6 块单元错缝拼接

而成,分别表示为:part1 为封顶块,part2—part6 均为标准块 1~5,将衬砌结构管片接头处的边界设置为全排水边界,其余部分设置为不透水边界,如图 8

所示。

对于局部渗漏的影响,除了单个部位 part1—part6 总计 6 个部位单独出现渗漏之外,还存在多块管片接缝处同时渗漏,即当衬砌管片渗漏块数 N 从 1 增至 6 块时,模拟多部位渗漏区域对衬砌稳定性影响。

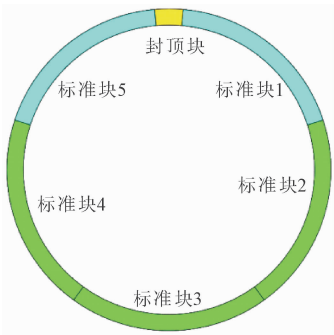


图 8 管片渗漏分区部位

3.3.2 地下水位变化

通过对西安市区 50 口观测井近 30 年的地下水位变化规律勘察资料统计发现,西安地区的水位埋深条件在 6 m~16 m 之间,如图 9 所示。模拟地下水位抬升和下降过程中,选取水位变化范围为地表以下 6 m~16 m,地下水位变化幅度 Δh 表示为:

$$\Delta h = h_1 - h_0 \tag{9}$$

式中: h_1 为变化后水位,m; h_0 为初始水位,m。

结合西安地铁隧道所处的地层条件及水位变化幅度,确定地下水位抬升工况为 $\Delta h = 1\text{ m}$ 、 2 m 、 3 m 、 4 m 、 5 m ,地下水位下降工况为 $\Delta h = -1\text{ m}$ 、 -2 m 、 -3 m 、 -4 m 、 -5 m 。

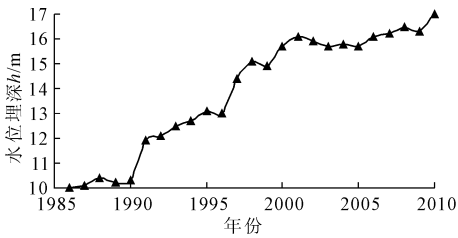


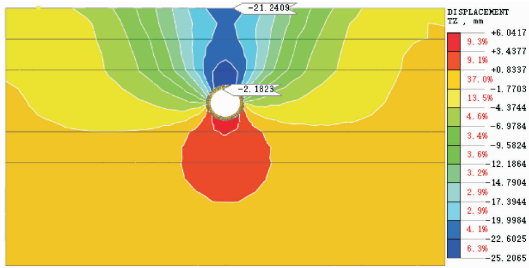
图 9 西安市主城区地下水埋深情况变化曲线

4 数值计算结果分析

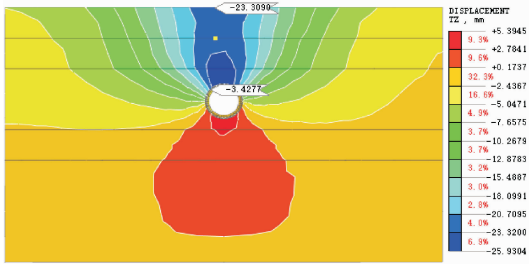
4.1 管片渗漏部位对地表沉降影响

在不同部位处下,模拟隧道局部管片渗漏情况对地表沉降影响,计算结果如图 10 所示,由于篇幅有限仅展示 part1 和 part5 渗漏时云图。衬砌在不同部位局部渗漏引起的平均地表最大沉降 $S_{\max} = -22.6\text{ mm}$,相较于未渗漏时, $S_{\max}$ 增长了 26%,均未

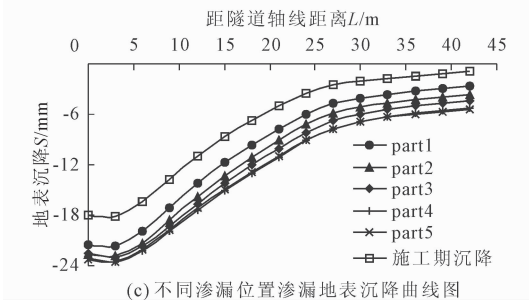
超过控制值 S_l ; part1 (拱顶) 部位渗漏时, $S_{\max} = -21.6\text{ mm}$; part2 (拱肩) 接头部位渗漏时,水压力开始向拱肩逐渐渗流, part3 接头部位渗漏时,拱腰的衬砌螺栓接缝处劣化,导致“漏斗型”逐渐转移至拱肩, part4 接头部位渗漏过程中,水流均聚集在拱脚; part5 是局部渗漏过程中 $S_{\max}$ 最大部位;隧道底部渗漏时地表沉降较大,应注重隧道拱底的防水措施,尽可能保证拱底处较少或不渗流,降低工程灾害发生的概率,避免衬砌拼装缝隙渗漏问题。



(a) part1 渗漏地表沉降云图



(b) part5 渗漏地表沉降云图



(c) 不同渗漏位置渗漏地表沉降曲线图

图 10 不同渗漏位置云图和曲线图

4.2 不同渗漏块数对地表沉降影响研究

不同管片渗漏块数情况下地表的沉降特征如图 11 所示,由于篇幅有限仅展示 $N = 1$ 和 $N = 6$ 渗漏时云图。

由图 11(c) 计算结果表明:随着衬砌渗漏块数逐渐增加, $S_{\max}$ 呈现递增趋势,不同块数衬砌渗漏时,地表沉降平均值 $S_{\max} = -30.2\text{ mm} > S_l = -30\text{ mm}$,当整环管片全部渗漏 ($N = 6$) 时,地表沉降量相较于无渗漏工况扩大了 2 倍,图 11(d) 发现,当 $N_l = 3$ 块时, $S_{\max}$ 接近 -30 mm ,可见,为了降低管片渗漏对地表沉降的影响,管片渗漏块数适宜控制在 3 块

以内。

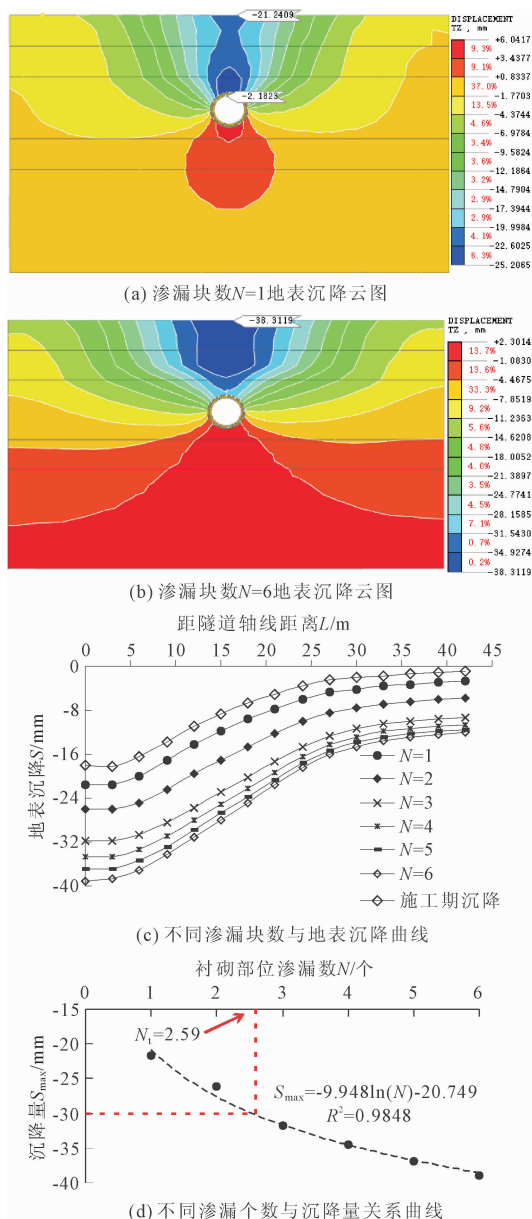


图 11 不同渗漏块数数值曲线结果

4.3 地下水位上升对地表沉降影响

根据前述数值分析方案,得到不同水位抬升高度条件下地面沉降曲线,如图 12 所示,由于篇幅有限仅展示 $\Delta h = 0$ m 和 $\Delta h = 5$ m 时沉降云图。

由图 12 可知,随着地下水位抬升高度的增加,地表沉降逐渐减小,图 12(c) 可知地下水位的抬升对减小地表沉降是有利的;当地下水位抬升超过 3.0 m 时,在隧道中心两侧约 $3D$ (洞径) 局部区域会产生隆起现象,但隆起值未超过 10 mm;从图 12(d) 得出:地下水位抬升时, S_{max} 均未超过 $S_t = -30$ mm, 因此,在地下水位上升时,抬升水位对减少地表沉降

有积极影响,沉降可满足隧道施工要求,但水位过量抬升可能会引起原有湿陷性黄土地层的湿化变形,反而会增大地表沉降,故地下水位的回灌抬升高度不宜超过 3.0 m。

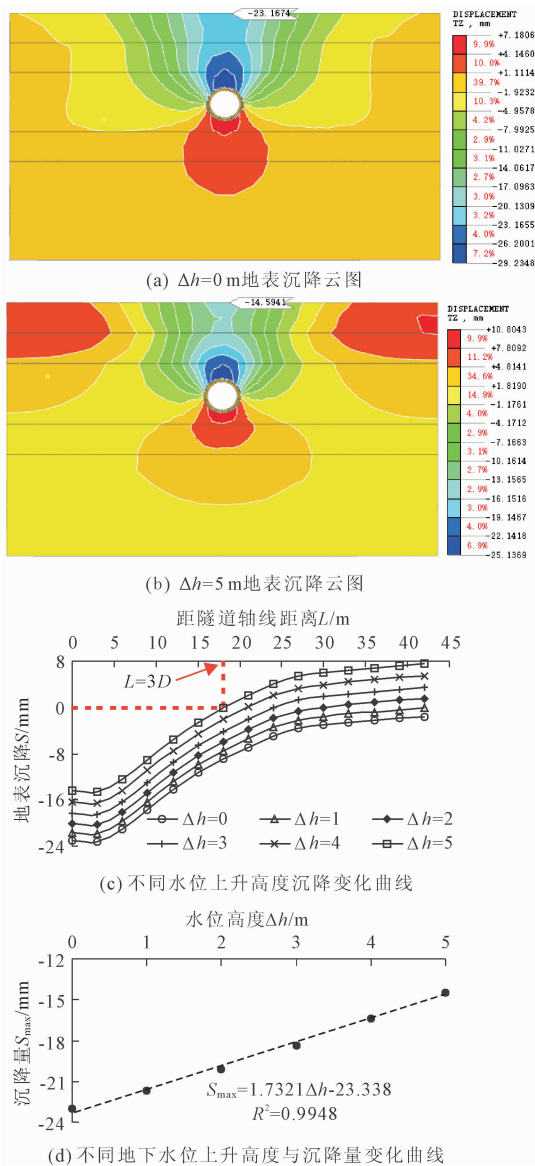


图 12 不同水位上升高度数值曲线结果

4.4 地下水位下降对地表沉降影响

通过计算得到水位下降不同高度下地面沉降规律见图 13,由于篇幅有限仅展示 $\Delta h = 0$ m 和 $\Delta h = -4$ m 时沉降云图。

由图 13 可知,随着地下水位持续下降,水位降深 Δh 与地表沉降 S_{max} 呈线性相关,水位降深每增加 1 m,地表下沉量增加约 7 mm 左右,当水位降低高度 $\Delta h_t = -1.39$ m 时,地表沉降总量超过控制值 $S_t = -30$ mm。因此,在地铁盾构施工期间,建议地下水位应控制在原始水位 -2 m 以内或保持水位高

度不变。

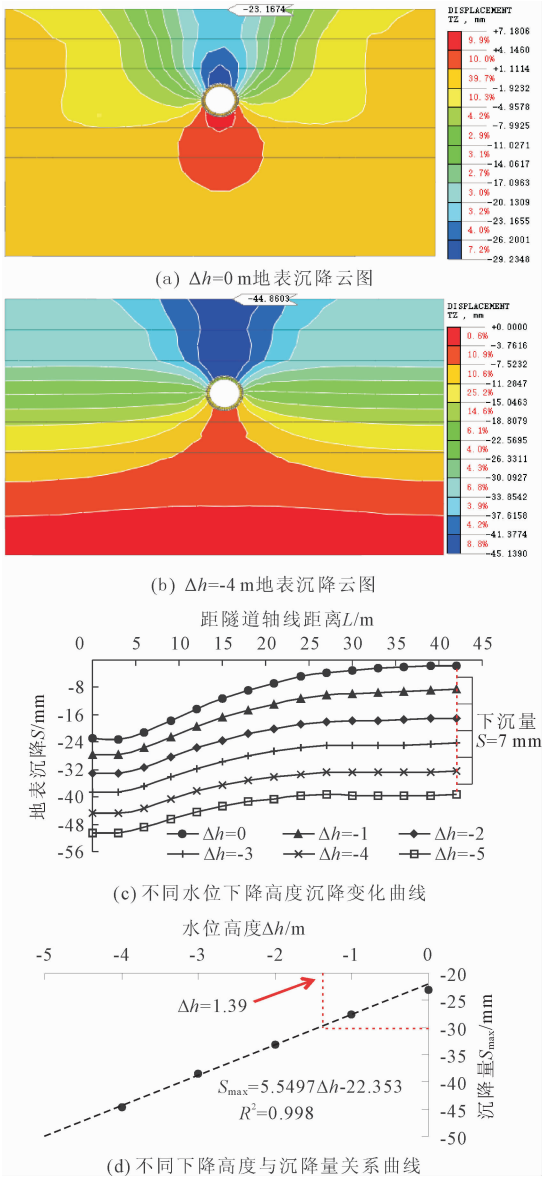


图 13 不同水位下降高度数值曲线结果

5 结 论

- (1) 黄土地层中地下开挖对地表沉降影响的数值模拟中,宜组合使用修正摩尔库仑模型 (MM-C) 与 DP 模型,该组合方式能够较好的模拟地下工程施工引起的地表隆沉问题。
- (2) 盾构管片拱底渗漏时对地表沉降影响最大,管片渗漏块数从 1 增大到 6 块时,地表最大沉降从 -21.6 mm 增大到 -38.3 mm;初始地下水位高度下降 5 m 期间,地表最大沉降从 -23.0 mm 增大到 -50.5 mm;初始水位高度抬升 5 m 期间,地表最大沉降从 -23.0 mm 减小到 -14.5 mm。
- (3) 为了保证盾构管片长期安全及地表不发生

过量隆沉,应采用合适的防水材料对隧道管片接缝处进行防水保护,避免拱底管片发生破坏或渗漏,且盾构管片渗漏块数不宜超过 3 块;黄土地层中的地下水位的回灌抬升对减小地表沉降是有利的,但宜控制在 3.0 m 以内,地下水位降深每增加 1 m,地表下沉量增加约 7 mm,建议地下水位宜控制在初始水位以下 2 m 以内。

参考文献:

[1] 朱才辉,李 宁. 地铁施工诱发地表最大沉降量估算及规律分析[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S1): 3543-3560.

[2] 朱才辉,李 宁. 西安地铁施工诱发地表沉降及对城墙的影响[J]. 岩土力学,2011,32(S1): 538-544.

[3] 朱才辉,李 宁,柳厚祥,等. 盾构施工工艺诱发地表沉降规律浅析[J]. 岩土力学,2011,32(1): 158-164.

[4] 钟俊辉,尹培林,刘 俊. 福州软土地区土压平衡盾构隧道地表沉降特性分析[J]. 现代隧道技术,2019,56(5): 180-186.

[5] 杨振华,宗军良,饶 倩. 浅覆土盾构隧道渗漏水对隧道收敛变形及地表沉降的影响分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(S1): 228-234.

[6] 刘 印,张冬梅,黄宏伟,等. 盾构隧道局部长期渗水对隧道变形及地表沉降的影响分析[J]. 岩土力学,2013,34(1): 290-298,304.

[7] 罗桂军,刘 湛,刘建民,等. 黄土地层盾构隧道长距离下穿湖泊安全性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(6): 31-38.

[8] 魏 纲. 盾构施工引起地面长期沉降的理论计算研究[J]. 岩石力学与工程报,2008,27(S1): 2960-2966.

[9] 孔德志,陈槽守,原 华,等. 盾构穿越富水砂卵石地层河道施工参数研究[J]. 河南大学学报(自然科学版),2024,54(2): 221-228.

[10] 王国富,王 建,路林海,等. 富水大粒径砂卵石地层盾构施工适应性研究[J]. 施工技术,2017,46(19): 88-92.

[11] 徐前卫,贺 翔,龚振宇,等. 砂卵石地层盾构微扰动施工及掘进控制研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(9): 72-77.

[12] 江 杰,龙逸航,邢轩伟,等. 富水圆砾地层盾构下穿既有地铁隧道掘进参数研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(7): 1828-1836.

[13] 吉小明,王宇会,阳志元. 隧道开挖问题中的流固耦合模型及数值模拟[J]. 岩土力学,2007,28(S1): 379-384.

[14] 叶 飞,黄 雷,吴 坚. 复杂地层长距离盾构隧道施工关键技术优化[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(3): 9-18,72.

- 全工作的实施意见 [EB/OL]. (2017-09-09) [2017-09-20] https://www.gov.cn/zhengce/content/2017-09/20/content_5226346.htm.
- [2] 晋宏逵. 文物建筑的价值评估与有效保护[J]. 中国文化遗产, 2015(3): 14-21.
- [3] 申俊云. 浅谈古建筑火灾特点和防护对策[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 26(6): 134-137.
- [4] 中华人民共和国中央人民政府网. 国家文物局: 2018 年全国重点文物保护单位火灾事故下降 50% [EB/OL]. (2019-02-01) [2019-02-01] https://www.gov.cn/xinwen/2019-02/01/content_5363142.htm.
- [5] 中华人民共和国中央人民政府网. 国家文物局关于近期文物火灾事故情况的通报[EB/OL]. (2019-04-17) [2019-04-17] https://www.gov.cn/xinwen/2019-04/17/content_5383672.htm.
- [6] 中华人民共和国中央人民政府网. 国家文物局关于 2020 年度文物行政执法和安全监管工作情况通报 [EB/OL]. (2021-03-24) [2021-03-24] https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/24/content_5595429.htm.
- [7] 张泽江, 梅秀娟. 古建筑消防[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 148-172.
- [8] 刘国柱. 空气采样早期烟雾报警器在古建筑中的应用[J]. 电气应用, 2005(11): 149-151.
- [9] 赵玉宝, 李 铭. 吸气式极早期火灾智能预警系统在古建筑中的应用[J]. 消防技术与产品信息, 2009(12): 24-26.
- [10] 任海龙. 大空间古建筑火灾探测方法研究[J]. 武警学院学报, 2012, 28(4): 58-60.
- [11] 吴希晖, 刘东锋. 极早期空气采样火灾预警系统在古建筑本体保护中的最佳管线设计安装方法初探[J]. 消防技术与产品信息, 2007(10): 37-38.
- [12] 何 晶. 空气采样早期烟雾探测系统在地铁火灾防护中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(5): 126-128.
- [13] 吸气式感烟火灾探测报警系统设计、施工及验收规范: DB 11/1026—2013 [S]. 北京: 北京市公安局消防局, 2013.
- [14] Kohler M T, Fischer M, Lepffer M. Identifying and blocking interrupted aspirated smoke detector (ASD) in [J]. Engineering, Environmental Science, 2011(11): 19-20.
- [15] 火灾自动报警系统设计规范: GB 50116—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [16] 穆 康, 刘 京, 卢 振, 等. 城市办公建筑空调制冷系统大气排热实测分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(11): 126-131.
- [17] 博物馆建筑设计规范: JGJ66—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [18] 张 欢, 梁 义. 纸质文物保护技术及环境控制对策[J]. 中国文物科学研究, 2010(4): 20-22, 26.
- [19] 朱明亚, 潘毅群, 沙华晶, 等. 气候变化条件下中国典型城市未来天气参数与建筑能源需求预测[J]. 建筑节能, 2013, 41(3): 57-64.
- [20] 白晓彬, 杨 娜, 等. 长期监测中藏式古建筑木梁应变-温度模型分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017(11): 117-125.
- [21] 徐方圆, 解玉林, 吴来明, 等. 文物保存环境中温湿度研究[J]. 文物保护与考古科学, 2009, 21(S1): 69-75.
- [22] 李 妮. 影响馆藏文物保存的环境因素及预防性保护浅析[J]. 东西南北, 2019, 47(23): 132-133.
- [23] 张宝龙, 何建斌. 文物展柜内环境温湿度的调控与监测[J]. 辽宁省博物馆馆刊, 2021(1): 267-271.
- [24] 胡 洁. 影响馆藏文物保存的环境因素及预防性保护探讨[J]. 中国民族博览, 2019(16): 232-233.
- [25] 张 婵. 从字画修复看纸质文物的预防性保护[J]. 贵博论丛, 2021(1): 256-266.
- [26] 张建雄. 陈列布展文物安全要素分析[J]. 中国文物科学研究, 2010(3): 44-48.

(上接第 9 页)

- [15] 李翔宇, 李新源, 李明宇, 等. 不同程度渗漏水对盾构隧道长期沉降影响规律研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 72-79.
- [16] 李翔宇, 李新源, 秋仁东, 等. 局部渗漏水对盾构隧道长期沉降的影响规律[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(S1): 197-203.
- [17] 周 建, 张 晓, 蒋熠诚. 考虑环缝接头水力劣化的盾构隧道渗漏数值分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(9): 142-151.
- [18] 加 瑞, 李青苗, 杨 岗, 等. 盾构隧道渗漏对地表沉降和管片受力影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S1): 423-435.
- [19] 孙智慧, 唐 勇, 刘 涛. 盾构隧道局部渗漏水对其力学特性的影响[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 141-149.
- [20] 王志良, 申林方, 伍 曾. 盾构隧道局部渗漏水对周围土体孔隙水压力的影响[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(1): 89-95, 115.
- [21] 朱留杰, 许伟伟, 金洪杰, 等. 地下引水隧洞施工期渗流分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(4): 113-119.
- [22] 秦 欣, 王江锋. 盾构法施工近距离下穿既有隧道变形影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(2): 7-11.