

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.309>



盾构掘进与干渠渗漏耦合作用下干渠变形规律

任磊^{1,2}, 王晓睿^{1,2}, 景来红^{3*}, 孟旭央³, 杨捷³, 张华青^{1,2}

- 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南郑州 450046
- 城市地下交通工程减灾防灾河南省交通运输行业技术创新中心, 河南郑州 450046
- 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南郑州 450003

摘要: 盾构下穿南水北调干渠时, 在渠底结构渗漏条件下, 将造成更为严重的危害, 因此为研究在双向作用耦合作用下的扰动变形规律, 采用 FEFLOW 软件模拟渠道不同渗漏工况时地下水渗流影响范围, 利用 FLAC3D 软件建立干渠-地层-隧道模型, 进行不同施工工况的协同变形数值模拟。研究表明: 当渠道局部渗漏量接近或大于 100 m³/d 时, 渗漏的平面影响范围大于 100 m, 在垂直方向上渠道渗漏中心至隧洞顶板的地层由包气带转化为饱水带, 该地层从不饱和状态转变为饱和状态; 正常工况与渗漏工况模拟结果对比, 渠底变形曲线形态分别为“W 型”和“V 型”, 最大沉降量为 3.6 mm 和 6.4 mm, 沉降槽宽度分别为 27 m 和 45 m。表明渠底渗漏将使得渠底变形沉降槽深度增大, 是由于渠底渗漏使得影响范围内土层强度降低、压缩系数改变, 饱和土层需产生更大变形抵消应力变化。

关键词: 南水北调工程; 盾构隧道; 渠道变形; 数值模拟; 工程地质。

中图分类号: TU443

文章编号: 1000-2383(2025)06-2387-13

收稿日期: 2024-08-01

Deformation Law of the Main Canal Bottom Plate under Coupling Effect of Main Canal Leakage and Shield Tunneling

Ren Lei^{1,2}, Wang Xiaorui^{1,2}, Jing Laihong^{3*}, Meng Xuyang³, Yang Jie³, Zhang Huaqing^{1,2}

- College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China
- Disaster Prevention and Mitigation for Urban Underground Transportation Engineering, Henan Provincial Transportation Industry Technology Innovation Center, Zhengzhou 450046, China
- Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China

Abstract: When a shield tunnel passes under the main canal of the South-to-North Water Diversion Project, leakage at the bottom of the canal structure can lead to more severe hazards. Therefore, to study the disturbance deformation patterns under the coupling effects of bidirectional interactions, the FEFLOW software was used to simulate the influence range of groundwater seepage under different leakage conditions in the canal. The FLAC3D software was employed to establish a model of the canal-stratum-tunnel system, and numerical simulations of cooperative deformation under different construction conditions were conducted. The study shows that when the local leakage volume in the canal approaches or exceeds 100 m³/day, the planar influence range of the leakage exceeds 100 m. In the vertical direction, the stratum from the leakage center to the tunnel roof transitions from the vadose zone to

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(No.51309100); 2023 年河南省重点研发项目(No.241111321300)。

作者简介: 任磊(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事轨道交通工程技术管理与研究工作。ORCID: 0000-0003-3538-5580。E-mail: 616144259@qq.com

***通讯作者:** 景来红, E-mail: jinglh@yrec.cn

引用格式: 任磊, 王晓睿, 景来红, 孟旭央, 杨捷, 张华青, 2025. 盾构掘进与干渠渗漏耦合作用下干渠变形规律. 地球科学, 50(6): 2387-2399.

Citation: Ren Lei, Wang Xiaorui, Jing Laihong, Meng Xuyang, Yang Jie, Zhang Huaqing, 2025. Deformation Law of the Main Canal Bottom Plate under Coupling Effect of Main Canal Leakage and Shield Tunneling. *Earth Science*, 50(6): 2387-2399.

the saturated zone, changing from an unsaturated to a saturated state. Comparing the simulation results of normal conditions with leakage conditions, the deformation curves at the canal bottom exhibit “W-shaped” and “V-shaped” patterns, respectively, with maximum settlements of 3.6 mm and 6.4 mm, and settlement trough widths of 27 m and 45 m. The results indicate that leakage at the canal bottom increases the depth of the settlement trough. This is because the leakage reduces the soil strength and alters the compression coefficient within the affected range, requiring greater deformation in the saturated soil layer to counteract stress changes.

Key words: South-to-North Water Diversion project; shield tunnel; channel deformation; numerical simulation; engineering geology.

0 引言

水资源和需水量在时间和空间上的分布不均是全球社会发展面临的共同挑战。为缓解这一矛盾,跨流域调水工程在世界范围内相继涌现(Tang *et al.*, 2022; Woo *et al.*, 2021)。我国南水北调工程作为大型长距离调水工程的典范,以其流量大、距离长、运行条件复杂等特点,在区域水资源配置和经济社会发展中发挥了重要作用(Cao *et al.*, 2017)。南水北调中线干渠以明渠输水为主,采用混凝土衬砌板+复合土工膜的复合衬砌形式,具有渠道断面大、衬砌混凝土板薄、周边环境复杂等特征。这些特点在提升输水效率的同时,也为工程的安全性、稳定性和高效性带来了潜在隐患。

近年来,随着城市化进程的加快,城市轨道交通建设迅速发展,盾构隧道下穿南水北调中线干渠的工程案例日益增多(陈超, 2021)。然而,盾构隧道掘进过程中对地下岩土体的扰动将打破原始地应力平衡,可能引发地表沉降、建筑物变形甚至结构损坏等问题。宏观上,这种扰动表现为施工区域地层的位移和应力重分布,形成典型的施工沉降槽(朱才辉和李宁, 2016; Chen *et al.*, 2022; 王艳等, 2023; 王晓睿等, 2023, 2024)。特别是在干渠渗漏与盾构掘进的耦合作用下,地下水流场的变化和岩土体力学性质的改变可能进一步加剧变形风险,对于干渠结构的稳定性和输水安全构成威胁。因此深入研究南水北调干渠在盾构隧道掘进与渗漏耦合作用下的变形规律,不仅有助于揭示复杂工况下洞-渠协同变形的力学机制,还可为工程设计和施工提供科学依据,对保障南水北调工程的安全运营和可持续发展具有重要意义。

现阶段关于盾构隧道穿越南水北调干渠的研究主要集中于正常工况下的结构变形、地表沉降控

制(贾晓凤等, 2022)、干渠的Peck公式反演分析(田均举, 2021)以及设计参数优化(杨振兴等, 2023)等方面。然而,对于更为复杂且实际的运营期渗漏工况,盾构下穿南水北调干渠的结构影响机理研究仍较为匮乏,尤其是在渗漏条件下干渠与隧道的协同变形机制、地下水渗流场变化及其对土体力学性质的影响等方面尚需深入探索。

本文以郑州轨道交通 10 号线(以下简称“地铁 10 号线”)下穿南水北调干渠段为工程背景,采用多软件耦合数值模拟方法,系统研究了渗漏工况下盾构掘进对干渠结构的变形影响。基于 FEFLOW 软件建立了地下水渗流数值模型,模拟不同渗漏工况下的地下水流场变化,获取渗漏量、水位抬升范围等关键参数;而后利用 FLAC3D 软件构建盾构下穿南水北调干渠的三维数值模型,通过设置正常工况与渗漏工况对比分析,揭示渗漏条件下干渠底板的沉降规律、隧洞周边土体的应力重分布特征以及洞-渠协同变形机制。研究成果可为特殊工况下地铁隧道穿越干渠时的变形控制与工程安全提供科学依据和技术支撑。

1 工程概况

郑州地铁 10 号线须水站—市委党校站区间下穿南水北调中线总干渠郑州 1 段位于中原西路上的中原路跨渠桥区段,该区间西起位于中原路与新田大道交叉口东的须水站,向东沿中原路至中原路与站前大道交叉口东的市委党校站,区间总长 2 960.5 m,如图 1 所示。

交叉段所在的工程区地貌单元为黄(河)淮(河)冲积平原岗地与平原的过渡地带,各土层连续性好且地层均一,地层分布如表 1 所示;地铁 10 号线下穿南水北调干渠长度为 227.1 m,采用双线隧



图 1 隧道 10 号线下穿南水北调干渠区间位置关系

Fig.1 Location relationship of tunnel line 10 passing through the south to north water diversion main canal section

表 1 下穿区间地层分布

Table 1 Distribution of strata in the tunnel underpass area

地层时代	地层岩性	层厚(m)	平均厚度(m)
第四系全新统人工堆积物(Q ^{4ml})	第①层杂填土	1.0~7.0	4.65
	第① ₁ 层素填土	3.0~7.0	4.66
第四系上更新统上段冲洪积物(Q ^{3-3al+pl})	第⑤ ₁ 层黏质粉土	2.7~7.4	5.23
第四系上更新统中段冲洪积物(Q ^{3-2al+pl})	第⑥ ₂ 层黏质粉土	2.8~5.3	3.93
第四系上更新统下段冲洪积物(Q ^{3-2al+pl})	第⑦ ₂ 层黏质粉土	2.9~6.0	4.46
	第⑦ ₁ 层粉质黏土	3.0~9.1	5.68
	第⑧ ₁₁ 层粉质黏土	8.7~13.2	10.53
第四系中更新统冲洪积物(Q ^{2al+pl})	第⑧ ₁₂ 层粉质黏土	6.4~13.0	9.43
	第⑧ ₁₃ 层粉质黏土	7.6~18.9	13.36
	第⑧ ₂ 层细砂	该层呈透镜体状零星分布	
	第⑧ ₈ 层卵石土	该层呈透镜体状零星分布	

道掘进,洞径为 6.2 m,斜穿角度 35.9°,掘进速度控制在 20~30 mm/min,下穿隧道埋置深度 18.5~19.5m,隧洞洞顶距渠底最小距离为 13.0 m.盾构隧道下穿南水北调干渠时,渠底变形沉降量控制在 15 mm 以内,隆起量控制在 5 mm 以内.

2 渠道不同渗漏工况的渗流影响范围研究

为了研究地铁施工对干渠结构变形的影响,需评价渠道不同渗漏工况下平面上的影响宽度和垂向上的影响深度.以地铁 10 号线下穿南水北调干渠

段为对象开展相关研究,构建交叉工程区地下水渗流数值模型.完成模型源汇项和参数的识别校验,结合渠道运行期的渗漏特征,设计不同计算工况,利用校验后的模型对不同工况进行预测评价.

2.1 渠道运行期典型渗漏特征研究

我国目前常用黏性土、水泥土、混凝土、沥青混凝土和合成膜料等材料作为渠道防渗层,以达到防止渠道渗漏的目的.总干渠在运行过程中可能产生的渗漏量主要为混凝土衬砌板、土工膜出现局部损坏所产生的渗漏.南水北调中线总干渠郑州段采用全线混凝土现浇衬砌,防渗层全部采用混凝土衬砌板下铺设复合土工膜,如图 2a、2b 所示.混凝土衬砌板厚 8 cm、渠坡厚 10 cm,并设置横向及纵向伸缩

缝如图 2c 所示,对地下水位高于渠底段设置了排水措施,并设置坡面防护如图 2d 所示.总干渠在运行过程中可能产生的渗漏量主要为混凝土衬砌板、土工膜出现局部损坏所产生的渗漏.衬砌材料局部变形损坏出现的随机性很大,其对渠道渗漏的影响较大,特别是在与盾构工程交叉施工中,盾构掘进产生地层扰动、应力重分布、不同施工工艺等影响,会对干渠产生沉降、变形和渗漏风险等灾害.

2.2 地下水渗流数值模型建立

2.2.1 模型建立的基本假设及参数确定 为简化地质剖面图,模型区垂向上划分为 5 个模拟层,据地层岩性和土层渗透性试验,划分为第一层以杂填土和渠道底板防渗层为主,杂填土层厚 4.7 m;第二层

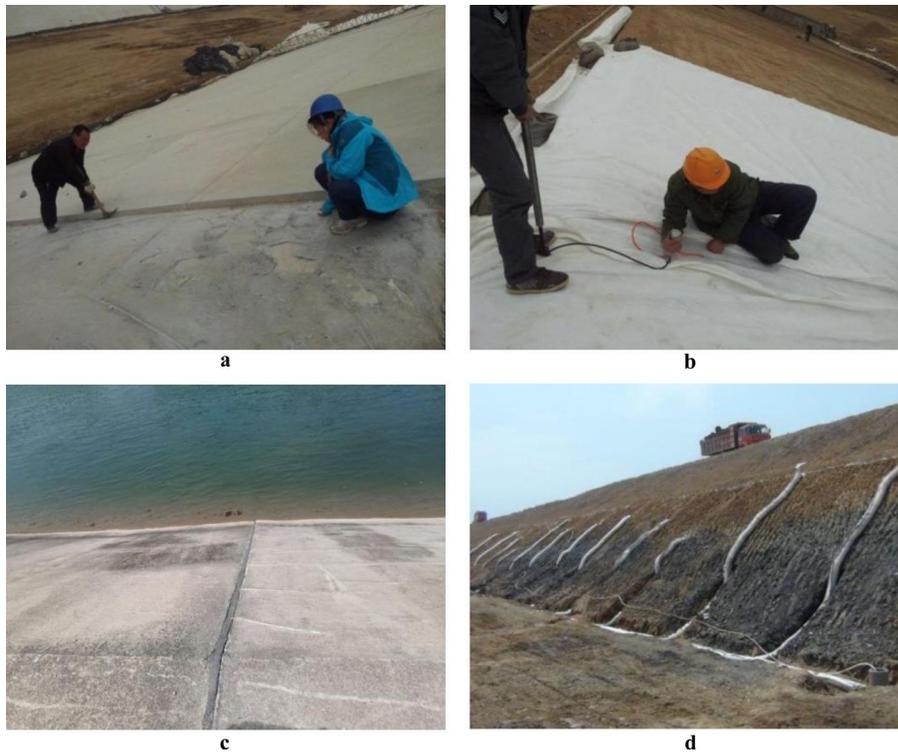


图 2 南水北调中线总干渠郑州 1 段防渗措施

Fig.2 Anti seepage measures for Zhengzhou section 1 of the main canal of the south to north water diversion middle route
a.混凝土衬砌板;b.复合土工膜;c.伸缩缝;d.坡体排水

表 2 土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil

土层	岩性	厚度(m)	密度(kg/m ³)	黏聚力(kPa)	摩擦角(°)	压缩模量(MPa)
1	杂填土	4.7	1.78	7.0	15.5	10.2
2	黏质粉土	13.6	1.83	16.4	23.1	10.5
3	粉质黏土	12.5	1.93	16.8	17.3	10.6
4	粉质黏土	6.2	1.92	17.8	17.8	10.8
5	粉质黏土	20.8	1.91	17.8	17.7	10.8

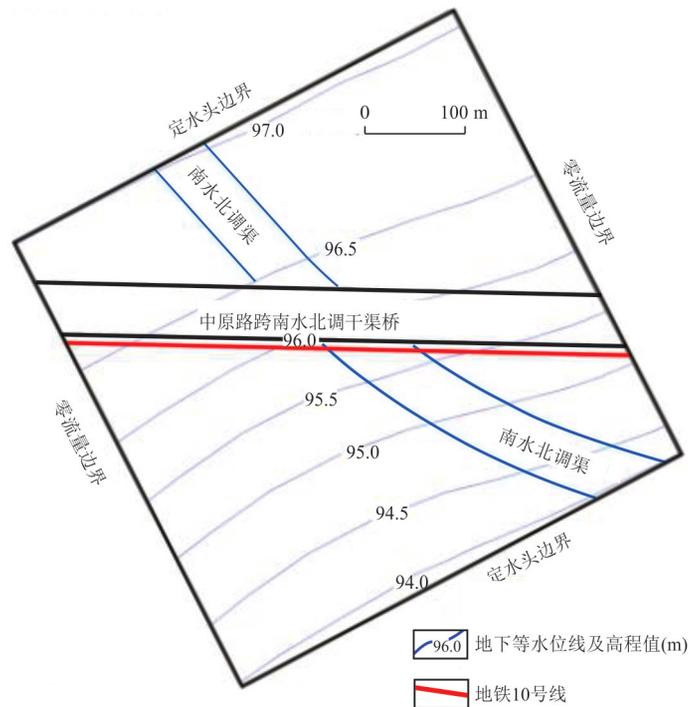


图 3 插值计算水头分布趋势

Fig.3 Trend chart of water head distribution calculated by interpolation

以黏质粉土为主,层厚 13.6 m;第三层以粉质黏土为主,层厚 12.5 m;第四层为郑州地铁 10 号线区间隧洞,以粉质黏土为主,层厚 6.2 m;第五层为粉质黏土,层厚 20.8 m.工程所在地层岩性采用表 2 所示土层参数进行模型材料参数赋值.黏质粉土渗透系数取值为 5.79×10^{-4} cm/s(0.50 m/d),粉质黏土渗透系数取值为 1.16×10^{-4} cm/s(0.10 m/d),根据《渠道防渗工程技术规范》,渠道和隧洞顶、底板混凝土衬砌材料的渗透系数取值为 1×10^{-11} cm/s(8.64×10^{-9} m/d).

根据 2010—2020 年降雨量监测数据,工程区近年平均降雨量为 603.9 mm.参考《水文地质手册》中降雨入渗系数经验值,河南地区黏质粉土降雨入渗系数为 0.15~0.20,模型中取值 0.18,平均降雨入渗量为 0.3 mm/d,交叉工程区内地下水位埋深大于 30 m,植被稀疏蒸散发相对较小,因此源汇项忽略地面蒸散发的影响.

2.2.2 模型边界条件及初始水位确定 图 3 为 Surfer 软件通过插值计算确定模型计算区的水头分布趋势,选取近似平行调查区西北侧和东南侧的一条等水位线作为计算区边界,设为定水头边界,西南和东北侧边界取地下水流线作为零流量边界(李庆伟等,2019).应用 FEFLOW 模拟软件采用三维

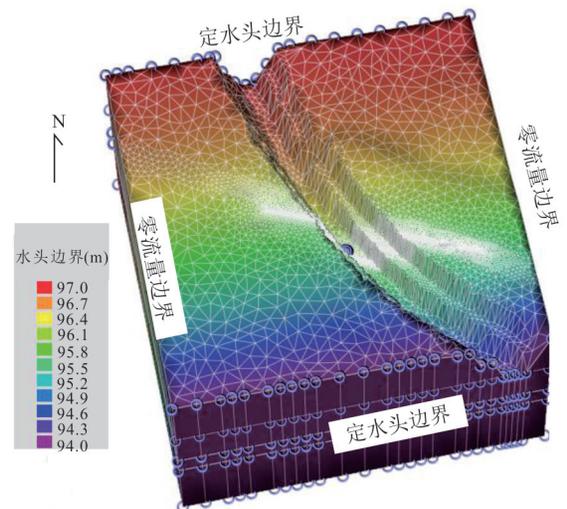


图 4 三维模型及边界条件示意

Fig.4 Schematic diagram of 3D model and boundary conditions

有限元法建立交叉工程区间三维模型如图 4 所示,将 Surfer 软件插值计算的水位数据导入模型作为初始流场进行稳定流模型计算,得到稳定地下水流场如图 5 所示;计算流场与实测流场形状一致,钻孔模拟水位与实际水位拟合情况较好如图 6 所示,拟合误差小于水位值的 5%,所建模型基本可以反映本

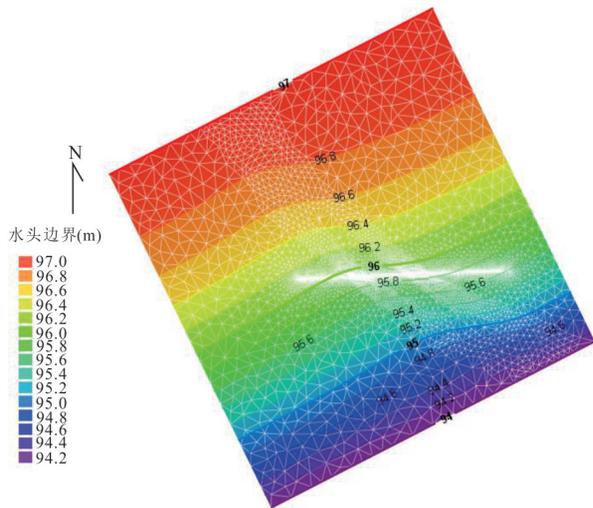


图 5 稳定地下水水流场

Fig.5 Stable groundwater flow field

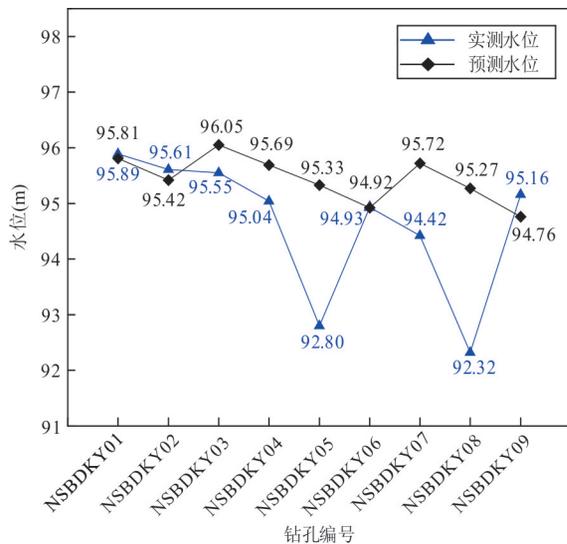


图 6 实测水位与预测水位曲线

Fig.6 Curve of measured water level and predicted water level

区实际水文地质条件.

2.3 渗流计算结果分析

2.3.1 计算工况 研究的工况为地铁施工对总干渠的渗流影响,估算总干渠可能产生的渗漏量,预测地下水流场形态的变化.综合考虑渠道在地铁施工及运行时可能存在的渗漏形式、渗漏位置及渗漏量特征,本次计算设计具体可分为如表 3 所示的模拟工况.

以上 4 种工况均假定裂缝均匀分布且裂缝内无充填,透水裂缝采用厚 20 cm、渗透系数为 1.2×10^{-2} cm/s(10 m/d)的介质层(砂砾石垫层)来模拟.

表 3 模拟工况汇总

Table 3 Summary of simulated operating conditions

工况	对比模型	破损程度
工况一	渠道侧壁土工膜出现局部撕裂	撕裂长度为 4 m、宽度为 2.5 m
工况二	渠道底板土工膜出现局部撕裂	撕裂长度为 4 m、宽度为 4 m
工况三	渠道底板土工膜出现裂缝	裂缝长度为 45 m、宽度为 0.2 m
工况四	渠道底板土工膜出现撕裂	撕裂长度为 45 m、宽度为 2 m

2.3.2 渗流计算结果分析 为研究南水北调干渠渗漏条件下地下水渗流影响范围,采用模拟软件 FEFLOW 建立的交叉工程区间地下水渗流数值模型,设置上述 4 种渗漏模拟概况,得出如表 4 所示的地下水渗流情况,工况三与工况四沿隧洞轴线方向渗流影响范围如图 7 和图 8 所示.

综合分析上述 4 种工况的预测结果,可以得出以下结论.

(1)小渗漏量工况(工况二).当渠道渗漏量较小时,其影响范围有限.平面上,渗漏主要集中于中心四周约 28 m 范围内,水位抬升幅度超过 1.5 m;而在此范围外,水位变幅小于 1.5 m.考虑到地下水位年动态变化的自然波动,该范围内的影响可忽略不计.垂向上,渗漏中心以下 4 m 深度内,包气带转化为饱水带,表明该区域的水分从不饱和状态转变为饱和状态.

(2)大渗漏量工况(工况一、工况三和工况四).当渠道局部渗漏量接近或超过 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,渗漏的平面影响范围显著扩大,超过 100 m.垂向上,自渠道渗漏中心至隧洞顶板范围内,包气带完全转化为饱水带.此时,隧洞内水位变幅超过 1.5 m,隧洞顶板上、下侧水头差大于 4.5 m.这种水文地质条件的变化对工程安全与施工管理提出了更高要求.

(3)包气带转化为饱水带的工程影响.包气带向饱水带的转变不仅改变了区域的水文状态,还显著影响了岩土体的力学性质.例如,土壤和岩石的内摩擦角与黏聚力降低,导致地层稳定性下降.在饱水带中施工,盾构掘进面临更高的地下水位,排水工作变得更加复杂和困难,同时突水、涌泥等地质灾害的风险显著增加.此外,地层作为隧道与渠道协同变形的中间介质,其力学性质的变化将直接影响洞-渠协同变形作用,进一步增加了工程的不确定性和风险.

表 4 渗漏工况模拟结果

Table 4 Simulation results of leakage conditions

计算工况	渗漏概况	平均渗流量(m ³ /d)	平面影响范围(m)	垂向影响范围(m)
工况一	侧壁土工膜局部撕裂 4.0 m×2.5 m	95	108	18
工况二	底板土工膜局部撕裂 4 m×4 m	34	28	4
工况三	底板土工膜裂缝 45.0 m×0.2 m	100	169	12.5
工况四	底板土工膜撕裂 45 m×2 m	125	223	12.5

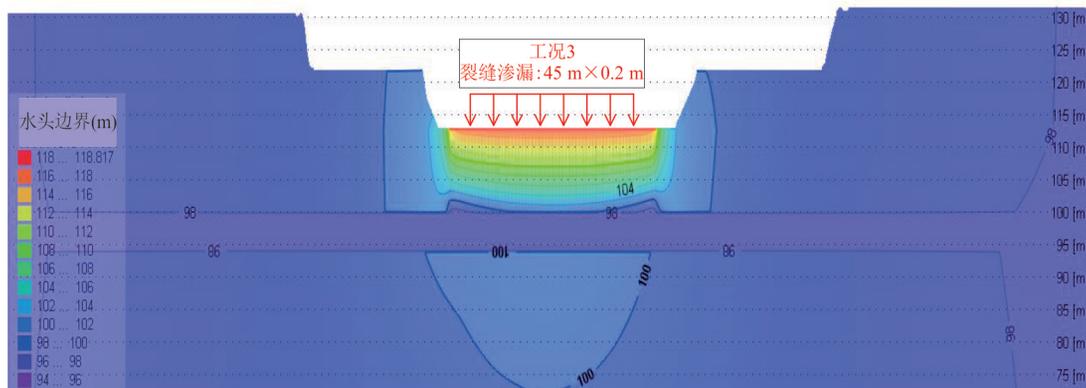


图 7 工况三:沿隧道轴线方向渗流影响范围

Fig.7 Condition 3: Range of influence of seepage along the tunnel axis direction

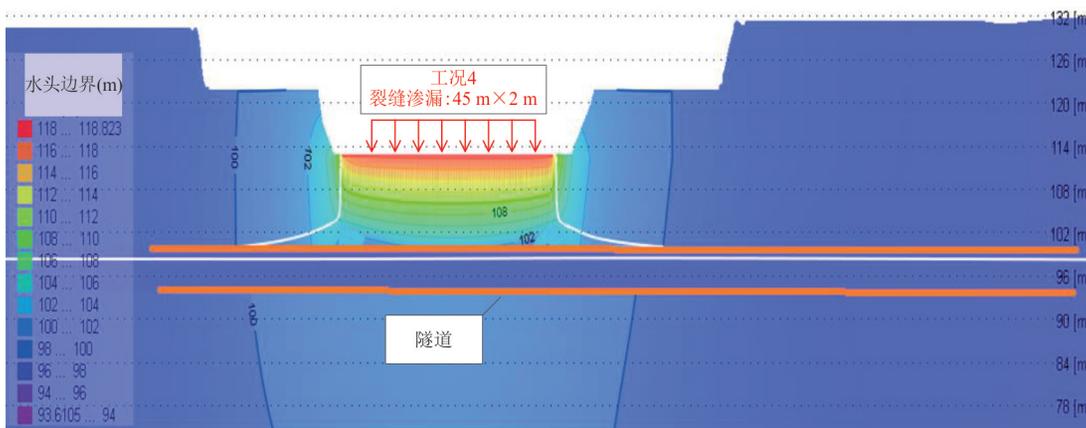


图 8 工况四:沿隧道轴线方向渗流影响范围

Fig.8 Condition 4: Range of influence of seepage along the tunnel axis direction

综上所述,渠道渗漏量的大小直接影响地下水位的变化范围和岩土体力学性质,进而对盾构施工的安全性和隧洞—渠道协同变形产生重要影响.因此,在工程设计与施工中,需充分考虑渗漏量的控制及其对地层稳定性的潜在影响,以降低施工风险并确保工程安全.

3 渠道渗漏工况下的渠道变形研究

为分析渗漏工况下盾构隧道下穿南水北调干渠时洞—渠协同变形作用是否存在加重作用,根据上述渗漏工况地下水渗流影响范围研究数据,分别建立不考虑渗漏工况的盾构下穿南水北调干渠模型;考虑渗漏工况且以渗漏影响范围最大的工况四

的盾构下穿南水北调干渠模型;通过对比两个模型渠底中心线变形曲线,分析渗漏工况下洞—渠协同变形规律。

3.1 盾构隧道下穿干渠时的影响机理

盾构隧道穿越其他建筑物构筑物区间,由于地层土体的扰动,会使地面发生沉降变形,盾构隧道的施工诱发地面变形的因素较多。盾构推进过程中,刀盘切削土体形成的超挖间隙(地层损失)是地表沉降的主要诱因。当盾构穿越南水北调干渠时,地层损失率每增加0.1%,干渠结构沉降量将显著增大。例如郑州机场至许昌市域铁路工程中,地层损失率控制在0.3%以内时,干渠最大沉降量仅为4.83 mm。盾构掘进施工时水文地质条件交互作用导致水渠周边水文地质环境改变而造成较大的影响。在饱和土层中,盾构施工会打破地下水平衡状态。隧道开挖引发的地下水下降可导致干渠底板围岩压力差达25 kN/m²,诱发渗漏风险。青岛地铁下穿引黄济青暗渠的案例显示,粉质黏土地层中盾构掘进引发的地下水重分布,使暗渠最大水平位移达7.68 mm。南水北调干渠的素混凝土板状结构对地层变形具有特殊响应,南水北调干渠结构多为素混凝土板状结构,当地层扰动变形时,板状结构与地层协同变形的影响程度有待研究(王建秀等, 2010)。

盾构推进诱发地面沉降、变形的主要影响因素

有工程设计参数、岩土体性质、变形性质、地下水分布等地质条件,正常工况下工程地质和水文地质等自然条件是客观难以控制的,可通过控制施工参数去调控地层沉降范围。当盾构隧道穿越输水渠道时,地层变形的影响难免会导致渠道发生渗漏,水文地质条件的变化将成为工程施工安全的巨大隐患。在饱和土层中盾构隧道掘进的扰动效应会增大,与正常工况下相比盾构隧道施工参数需要做相应调整,主要是土仓压力增大、注浆压力增大、掘进速度减小等。

3.2 盾构下穿干渠数值模型建立

根据工程所在土层分布,将交叉工程区间地层概化为4个主要层如图9所示,自上至下依次为杂填土、黏质粉土、粉质黏土和粉质黏土,盾构隧道穿越范围的地层主要以第3层粉质黏土和第4层粉质黏土为主,采用表5所示土层参数进行模型材料参数赋值。采用FLAC3D软件建立隧道—土体—渠道结构三维模型,整体模型尺寸为375 m×63 m×80 m,如图10所示。土体和隧道衬砌采用三维实体单元进行模拟,渠道面板采用面单元进行模拟。模型中土体本构模型选用PH(plastic-hardening)模型(Wu *et al.*, 2011),隧道衬砌和渠道面板采用线弹性本构模型,衬砌与渠道结构部件参数如表6所示。根据上述工程背景、假定条件及施工参数,在三维数值分析计算过程中,隧洞每步开挖1.5 m,开挖后采

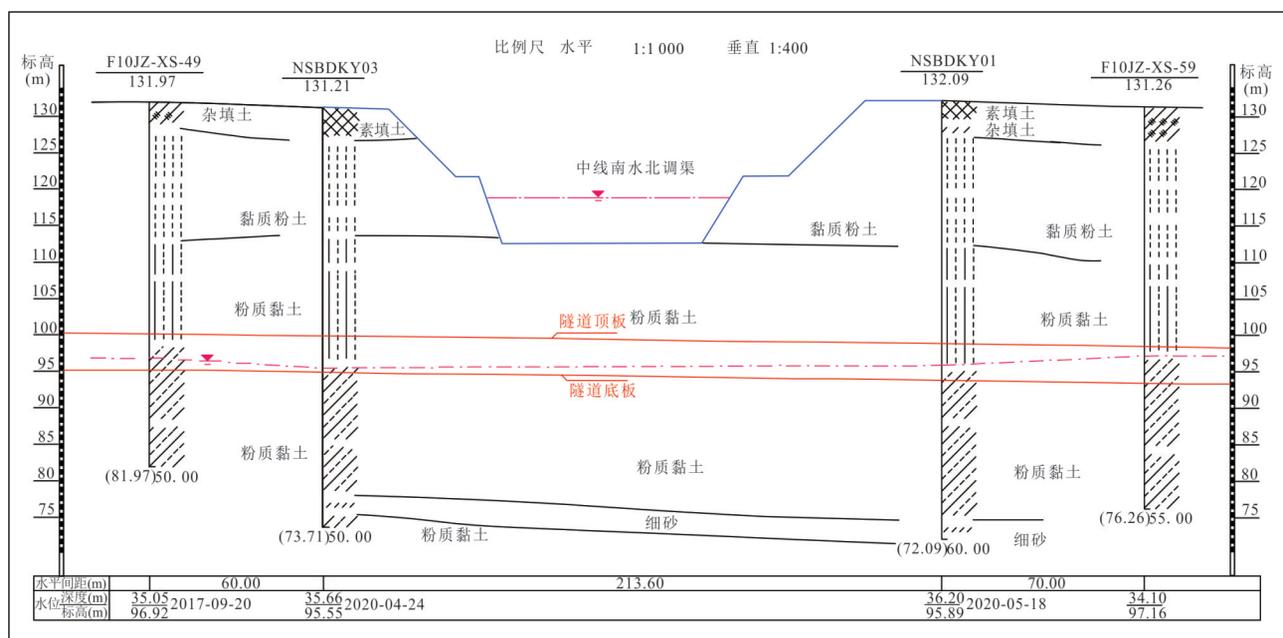


图9 隧道10号线下穿南水北调干渠地质剖面示意

Fig.9 Schematic diagram of geological profile of tunnel line 10 crossing the south to north water diversion main canal

表 5 土体物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters of soil

土层	岩性	埋深 (m)	密度 (kg/m ³)	粘聚力 (kPa)	摩擦角 (°)	压缩模量 (MPa)	泊松比 μ
1	杂填土	4.7	1.78	7.0	15.5	10.2	0.34
2	黏质粉土	11.7	1.82	16.4	23.1	10.5	0.30
	黏质粉土	18.3	1.91	16.5	23.5	10.5	0.30
3	粉质黏土	24.8	1.95	32.9	16.8	10.7	0.32
	粉质黏土	30.8	1.91	32.6	17.7	10.8	0.31
4	粉质黏土	43.5	1.94	32.0	17.8	10.9	0.31
	粉质黏土	63.0	1.97	32.5	17.8	10.8	0.32

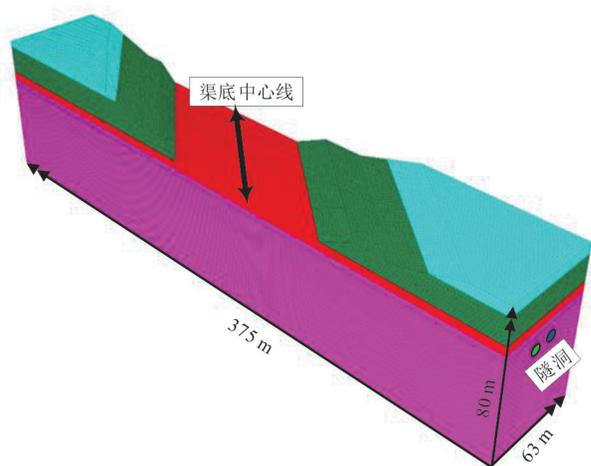


图 10 三维数值模型结构

Fig.10 Three dimensional numerical model structure diagram

表 6 结构部件材料参数

Table 6 Material parameters of structural components

结构部件	厚度(m)	弹模(MPa)	密度(kg/m ³)	泊松比
隧道衬砌	0.3	35 000	2 500	0.2
渠道	0.08	30 000	2 500	0.2

用 0.35 m 厚的衬砌进行隧洞支护,开挖过程中控制地层损失率为 1%。

3.3 计算结果分析

3.3.1 非渗漏工况下盾构掘进对干渠扰动规律分析 在不考虑出现渗漏工况下,隧洞开挖完成后隧洞—土层同变形云图如图 11 所示,在盾构隧道穿越干渠的过程中,隧道洞顶位置土体沉降变形最大量为 29.3 mm,沉降变形向上发展一定范围后逐渐减小,这是因为上部土体由于地层损失,掘进速度、掌子面压力及注浆压力等施工参数的影响产生了较大的沉降,隧洞底部部位受卸荷回弹影响,隆起

变形量最大为 60.0 mm. 在隧道埋深不变的条件下,表沉降与地层损失率呈正相关关系,即随着地层损失率的增大,地表沉降量也会相应增加.地表沉降量的变化同时也会加剧隧洞变形和干渠底板的变形,地层损失率是隧洞—土层协同变形控制的重要因素(杨喜等,2013;王智德等,2019)。

绘制垂直开挖方向渠底板变形曲线如图 12 所示,在垂直隧洞开挖方向,盾构开挖正上方的渠道沉降变形最大;先开挖的渠底沉降变形最大量为 3.45 mm,后开的渠底沉降变形最大量为 3.62 mm,垂直开挖方向的最大变形曲率为 0.26‰,渠底板变形主要集中在两条隧洞之间,向远端延伸变形逐渐减少.这是因为两条隧洞之间存在应力拱效应,在应力拱之内土体变形很小,在应力拱之外土体沉降变形较大,垂直方向上变形主要集中在两条隧洞上方,洞底隆起变形也主要集中于两条隧洞之间,沉降曲线整体呈双槽形.在合理施工参数控制的情况下,地铁盾构施工对渠道变形总体影响不大。

3.3.2 渗漏工况下盾构掘进对干渠扰动规律分析 考虑渗漏工况下,根据第三章渠道渗流影响范围分析基础上,假设渠底渗漏且按照渠道渗漏影响范围最大的工况 4 考虑,即渠道底板土工膜出现撕裂,撕裂长度为 45 m,宽度为 2 m,渠道日平均渗漏量约为 125 m³/d.模拟结果为发生渗漏后水位将稳定在过程交叉段盾构隧道洞顶板位置,渠道底板以下及隧洞顶板以上土体变为饱和土体,渗漏后的土体参数采用饱和土体参数,饱和土体参数如表 7 所示。

图 13 为渗漏工况下隧洞—土层协同变形云图,隧洞顶部土体发生沉降,最大沉降变形约为 39.4 mm 隧洞底部土体有轻微隆起,隆起最大位移量为 41.1 mm. 相比正常工况下,渗漏工况时土体最大沉降量增加,是由于饱和土层压缩性高、透水性低,土体受到挤压和扰动时更容易被压缩导致沉降

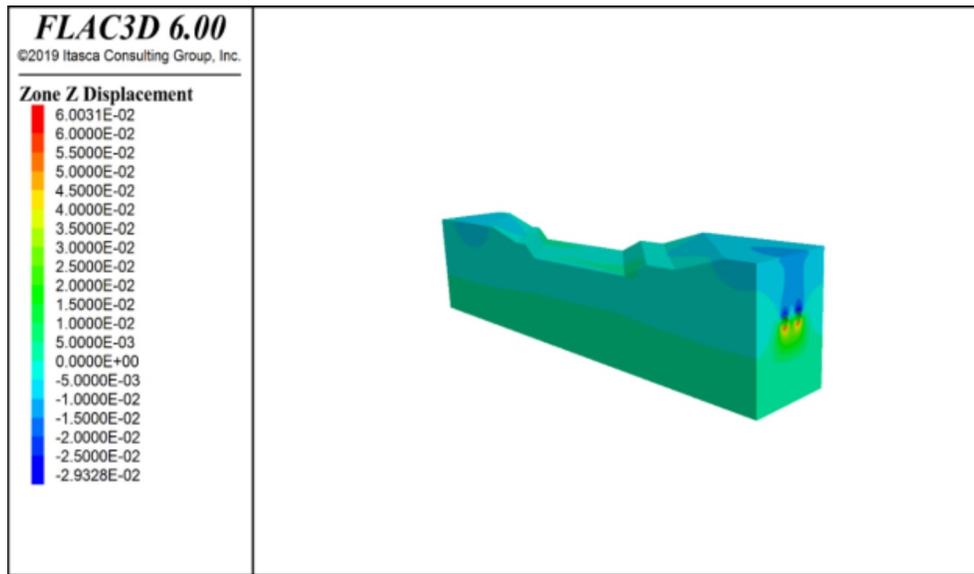


图 11 正常工况下隧洞—土层协同变形云图(单位:mm)

Fig.11 Cloud map of coordinated deformation between tunnel and soil layer under normal working conditions

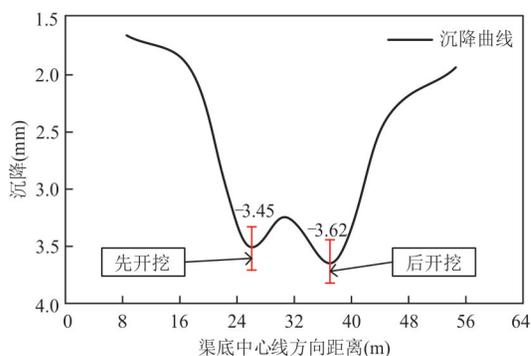


图 12 正常工况下干渠底板变形曲线

Fig.12 Deformation curve of main canal bottom plate under normal operating conditions

量增大。

绘制垂直开挖方向渠底变形曲线如图 14 所示,沿渠底中轴线方向,渠底中心线先开挖隧洞上方渠底沉降变形最大,约为 6.4 mm。在饱和土层中两条隧洞之间存在的应力拱效应减弱,沉降曲线整体呈单槽形,最大沉降位置为先开挖隧道中心线处。

综合图 12 与图 14 两个不同工况的数值模拟结果可以看出,正常工况下,最大沉降位于先开挖隧洞对应渠底,沉降量约为 3.6 mm,曲线形态为“W 型”,沉降槽宽度约 27 m;渗漏工况下,最大沉降位于先开挖隧洞对应渠底,沉降量约为 6.4 mm,曲线形态为“V 型”,沉降槽宽度约为 45 m,如表 8 所示。可见盾构机掘进下穿南水北调水渠时,水渠底板变形曲线在渗漏工况下呈现 V 型,而在正常工况下呈现 W 型,这种差异的机理主要与地层应力分布、土

体特性、地下水渗流效应以及施工扰动范围等因素密切相关。

正常工况下 W 型变形曲线,双线盾构隧道的施工会形成双峰叠加沉降槽。左线隧道开挖引发地层扰动后,右线隧道的施工会与左线扰动区产生应力叠加。这种叠加效应导致水渠底板在双线隧道轴线位置形成两个沉降峰值,呈现“W 型”分布。在非渗漏状态下,粉质黏土地层的黏聚力和摩擦角维持了土体骨架的稳定性。盾构掘进引起的超孔隙水压力能通过排水消散,避免土体液化或软化,从而形成较为均匀的沉降分布。

渗漏工况下呈 V 型变形曲线,由于土体强度劣化效应,渗漏导致地下水渗流路径改变,引发土体有效应力降低,强度劣化使土体难以形成有效的应力拱,沉降集中于隧道正上方,形成单一沉降峰(V 型)。渗流产生的动水压力会改变土体应力场。数值模拟表明,水位上升会使渠底沉降增加约 40%,且沉降槽宽度从 27 m 扩展至 45 m。这种耦合效应导致应力重分布范围扩大,但峰值沉降更集中。渗漏工况下,地下水渗流路径改变会扩大地层扰动范围。土体软化后,扰动范围从隧道直径的 2.5 倍扩展至 3.5 倍,导致沉降槽宽度显著增加(如从 27 m 增至 45 m)。

4 结论

本文研究了盾构隧道穿越南水北调干渠时干

表 7 渗漏工况饱和土体力学参数

Table 7 Mechanical parameters of saturated soil under leakage conditions

土层	岩性	密度(kg/m ³)	黏聚力(kPa)	摩擦角(°)	变形模量(MPa)	泊松比 μ
饱和	粉质黏土	2.03	20.0	10.0	12.5	0.40

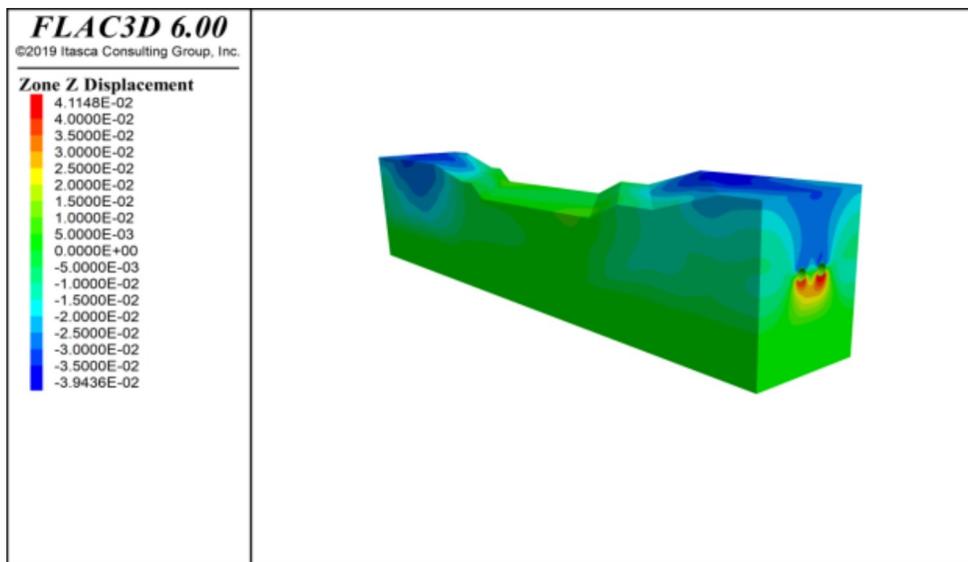


图 13 渗漏工况下隧洞—土层协同变形云图(单位:mm)

Fig.13 Cloud map of coordinated deformation between tunnel and soil layer under leakage conditions

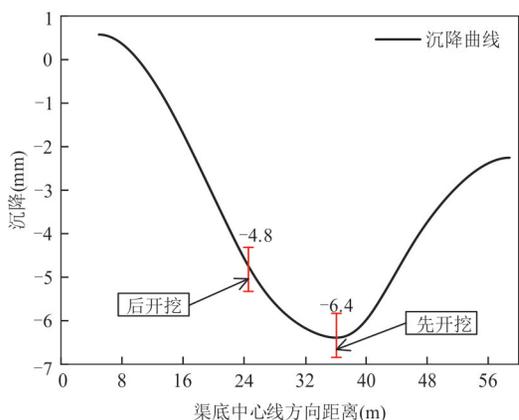


图 14 渗漏工况下干渠底板变形曲线

Fig.14 Deformation curve of main canal bottom plate under normal leakage condition

渠渗漏与盾构掘进的耦合作用.基于FEFLOW模拟稳定地下水流场,预测了不同渗漏工况并确定最不利条件;结合FLAC3D数值模拟,分析了干渠渗漏与盾构掘进对渠底扰动变形的影响,得出以下结论.

4.1 渗漏对地下水流场的影响

渠道渗漏导致地下水流向偏转,渗漏中心附近水位抬升显著,影响范围随距离增加而减小.当局

表 8 正常工况与渗漏工况的变形对比

Table 8 Comparison of deformation between normal working conditions and leakage working conditions

对比项	正常工况	渗漏工况
最大沉降位置	先开挖隧洞对应渠底	先开挖隧洞对应渠底
最大沉降量	约 3.6 mm	约 6.4 mm
沉降曲线形态	W 型	V 型
沉降槽宽度	约 27 m	约 45 m

部渗漏量 $\geq 100 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,渗漏平面影响范围超过 100 m,垂向上从渗漏中心至隧洞顶板由包气带转化为饱水带.饱水带岩土体力学性质改变(如凝聚力、摩擦角降低),影响洞—渠协同变形趋势.

4.2 盾构掘进对土体变形的影响

正常工况下,隧洞顶部土体最大沉降量为 29.3 mm,沉降向上逐渐减小;底部因卸荷回弹,最大隆起量为 60.0 mm.渗漏工况下,隧洞顶部最大沉降量增至 39.4 mm,底部轻微隆起(最大 41.1 mm).这是由于饱和土层压缩性高、透水性低,受挤压和扰动时更易压缩,导致沉降量增大.

4.3 渠底变形特征

正常工况下,渠底最大沉降量为 3.6 mm,位于

先开挖隧洞对应位置,沉降槽呈“W型”,宽度约为 27 m. 渗漏工况下,渠底最大沉降量增至 6.4 mm(约为正常工况的 2 倍),沉降槽呈“V型”,宽度扩大至 45 m. 渗漏显著增大了渠底沉降槽深度和影响范围.

References

- Cao, Y. S., Chang, J. X., Huang, Q., et al., 2017. Real-Time Control Strategy for Water Conveyance of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion in China. *Advances in Water Science*, 28(1): 133–139(in Chinese with English abstract).
- Chen, C., 2021. Research on Construction Technology and Stratum Deformation of Shield Tunneling through the Main Canal of South-to-North Water Transfer Project (Dissertation). Zhengzhou University, Zhengzhou (in Chinese with English abstract).
- Chen, R. P., Song, X., Meng, F. Y., et al., 2022. Analytical Approach to Predict Tunneling-Induced Subsurface Settlement in Sand Considering Soil Arching Effect. *Computers and Geotechnics*, 141: 104492. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104492>
- Jia, X. F., Li, C. J., Ren, L., et al., 2022. Settlement Control of Subway Shield Tunnel under the Main Channel of South-to-North Water Diversion under Complex Conditions. *Safety and Environmental Engineering*, 29(1): 77–84, 118(in Chinese with English abstract).
- Li, Q. W., Yan, E. C., Yang, G., et al., 2019. Simulation of Three-Dimensional Seepage Field of the Bank Slope Groundwater Based on FEFLOW. *Safety and Environmental Engineering*, 26(2): 38–44(in Chinese with English abstract).
- Tang, M., Xu, W. T., Zhang, C., et al., 2022. Risk Assessment of Sectional Water Quality Based on Deterioration Rate of Water Quality Indicators: A Case Study of the Main Canal of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project. *Ecological Indicators*, 135: 108592. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108592>
- Tian, J. J., Zhu, K., Cai, S., et al., 2021. Inversion Analysis of Peck Formula Based on Zhengzhou Subway Running down the Main Channel of South-to-North Water Transfer. *Safety and Environmental Engineering*, 28(2): 109–113, 132(in Chinese with English abstract).
- Wang, J. X., Fu, H. X., Zhu, Y. F., et al., 2010. Advance in Calculation of Subsidence Caused by Shield Tunnel Based on Strata Loss. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 6(1): 112–119, 150 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. R., Liu, X., Zhang, X., et al., 2023. Vibration Response Caused by Silt Layer in Underground Subway under Small Radius Curve Tunnel. *Earth Science*, 48(6): 2415–2426 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. R., Qin, W. Q., Yu, H. C., 2024. Research on Dynamic Response Law of Shield Tunnel and Surrounding Soil Based on Vibration Action of Subway Train. *Earth Science*, 49(12): 4673–4689(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Zeng, C. N., Li, W. W., et al., 2023. Thermodynamic Performance of Phase Change Mortar Based on Shape-Stabilized Phase Change Material. *Earth Science*, 48(12): 4680–4688(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. D., Jiang, L. M., Rao, Y., 2019. Estimation of Ground Settlement Induced by Shield Tunnel Excavation Based on the Time-Space Relationship. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 41(1): 62–69 (in Chinese with English abstract).
- Woo, S. Y., Kim, S. J., Lee, J. W., et al., 2021. Evaluating the Impact of Interbasin Water Transfer on Water Quality in the Recipient River Basin with SWAT. *Science of the Total Environment*, 776: 145984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145984>
- Wu, H. M., Shu, Y. M., Zhu, J. G., 2011. Implementation and Verification of Interface Constitutive Model in FLAC3D. *Water Science and Engineering*, 4(3): 305–316. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2011.03.007>
- Yang, X., Zou, Q., Wang, Q., 2013. Analysis on Influence of Shield Tunneling Crossing underneath Existing Trunk Canal of South-to-North Water Transfer Project. *Tunnel Construction*, 33(7): 562–566 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. X., Du, J. Q., Sun, F. X., et al., 2023. Model Test for Optimization of Design Parameters of Shield Tunnel under Water Transmission Main Canal. *Science Technology and Engineering*, 23(31): 13573–13581(in Chinese with English abstract).
- Zhu, C. H., Li, N., 2016. Estimation Method and Laws Analysis of Surface Settlement Due to Tunneling. *Rock and Soil Mechanics*, 37(Suppl. 2): 533–542(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 曹玉升, 畅建霞, 黄强, 等, 2017. 南水北调中线输水调度实时控制策略. 水科学进展, 28(1): 133-139.
- 陈超, 2021. 盾构下穿南水北调干渠施工技术及其地层变形研究(硕士学位论文). 郑州: 郑州大学.
- 贾晓凤, 李春剑, 任磊, 等, 2022. 地铁盾构隧道下穿南水北调干渠的沉降控制研究. 安全与环境工程, 29(1): 77-84, 118.
- 李庆伟, 晏鄂川, 杨广, 等, 2019. 基于FEFLOW的岸坡地下水三维渗流场模拟研究. 安全与环境工程, 26(2): 38-44.
- 田均举, 朱坤, 蔡松, 等, 2021. 基于郑州地铁下穿南水北调干渠的Peck公式反演分析. 安全与环境工程, 28(2): 109-113, 132.
- 王建秀, 付慧仙, 朱雁飞, 等, 2010. 基于地层损失的盾构沉降计算方法研究进展. 地下空间与工程学报, 6(1): 112-119, 150.
- 王晓睿, 刘旭, 张昕, 等, 2023. 小半径曲线隧道下地铁运行对粉砂土层引起的振动响应规律. 地球科学, 48(6): 2415-2426.
- 王晓睿, 秦文茜, 于怀昌, 2024. 地铁列车振动作用下盾构隧道及周边土体动力响应规律. 地球科学, 49(12): 4673-4689.
- 王艳, 曾长女, 李皖皖, 等, 2023. 基于定形相变材料的相变砂浆热力学性能. 地球科学, 48(12): 4680-4688.
- 王智德, 江俐敏, 饶宇, 2019. 基于时空关系的盾构开挖地表沉降规律. 土木与环境工程学报(中英文), 41(1): 62-69.
- 杨喜, 邹琦, 王庆, 2013. 地铁隧道穿越南水北调干渠施工影响分析. 隧道建设, 33(7): 562-566.
- 杨振兴, 杜家庆, 孙飞祥, 等, 2023. 盾构隧道下穿输水干渠设计参数优化模型试验. 科学技术与工程, 23(31): 13573-13581.
- 朱才辉, 李宁, 2016. 隧道施工诱发地表沉降估算方法及其规律分析. 岩土力学, 37(增刊2): 533-542.