

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.001

宝鸡峡引水隧洞下穿既有铁路线控制措施研究

赵玮¹, 张静², 王瑜¹, 陆丽¹, 朱才辉²

(1. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了研究新建隧洞对下穿既有铁路路基的影响, 以宝鸡峡引水隧洞下穿陇海铁路线为研究背景, 采用数值模拟方法, 系统分析地层劣化程度、盾构施工参数、加固措施对铁路路基的沉降规律及盾构管片的力学响应。结果表明: 引水隧洞围岩劣化系数降低至 0.7 时, 铁路路基沉降增加约 16%, 衬砌拉应力分别增加约 4% 和 9%; 随着盾构土舱压力和推力的增加, 路基沉降分别减小约 79% 和 4%, 衬砌拉应力分别增加约 55% 和 44%; 随着注浆压力增加, 路基沉降减小约 26%; 超前注浆圈厚度增大, 可控制沉降降低 19%, D 型施工便梁型号越高, 铁路路基的沉降越小, 最低降至 2.8 mm。在盾构掘进期间应避免盾构机过度扰动地层, 采取地层超前注浆的加固圈厚度宜控制在 2 m 以内或采取 D20 型施工便梁加固既有铁路线。

关键词: 引水隧洞; 盾构施工; 铁路线; 控制措施; 沉降

中图分类号: TV672.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0001-08

Control Measures for Existing Railway Line Underpassed By Baojixia Diversion Tunnel

ZHAO Wei¹, ZHANG Jing², WANG Yu¹, LU Li¹, ZHU Caihui²

(1. Shaanxi Institute of Water Resource & Electric Power Investigation & Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: In order to analyze the impacts of newly constructed tunnels on the underpass of existing railway embankments, against the backdrop of the Baojixia Diversion Tunnel passing under the Longhai Railway, numerical simulation method was adopted, the settlement law of railway subgrade and the mechanical response of shield segment was systematically analyzed, the law was included with formation deterioration degree, shield construction parameters, reinforcement measures. The results are as follows. The settlement of the railway subgrade was increased by approximately 16%, due to the deterioration coefficient of surrounding rock was reduced to 0.7. The tensile and compressive stresses within the lining was enlarged by 4% and 9% respectively. The increase in shield earth pressure and thrust contributed to the reduction of the subgrade settlement by approximately 79% and 4%, respectively. While the tensile stress in the lining was expanded by about 55% and 44%, respectively. With the increase of grouting pressure, the settlement of the subgrade was reduced by approximately 26%. With the increase of advance grouting ring thickness, the controlled settlement was reduced by 19%. The higher the type of D-type construction beam, the smaller the settlement of the railway roadbed, the lowest dropped to 2.8 mm. To ensure the operational safety of the existing railway line. To ensure the safety of existing railway lines, excessive formation disturbance and power loss of shield machine was avoided during the shield tunneling. The thickness of reinforcement ring for advance grouting was controlled within 2 m, or the existing railway line was reinforced with D20 type construction beams.

Keywords: diversion tunnel; shield construction; railway lines; control measures; sedimentation

收稿日期: 2024-08-24

修稿日期: 2024-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279110)

作者简介: 赵玮(1974—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水工结构等方面的研究工作。E-mail: zhaowei@slbsxy.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

随着城市化进程的加快,水资源的合理利用与管理成为了重要课题,为满足城市发展对水资源的需求,引水隧洞的建设逐渐成为一种常见的工程手段^[1]。然而,新建引水隧洞大多会下穿既有上部建筑,如铁路线,由于盾构扰动造成上部轨道结构发生变形,可能给铁路的安全运营带来风险,因此开展盾构隧洞下穿既有铁路线对其影响的研究,对于新建引水隧洞的选线、盾构机的选型、围岩及铁路线的加固措施的制定十分必要^[2]。

关于盾构隧道下穿运营铁路,施工扰动对路基变形的影响,国内外已有许多研究成果。秦欣等^[3]研究了注浆压力及管片环宽对既有隧道和土层的变形影响,表明盾构机开挖掌子面不断靠近既有隧道时,施工对既有隧道的影响不断增大。王磊等^[4]考虑了盾构不同注浆压力和土仓压力作用下新建隧道的施工对既有隧道变形的影响规律,对叠交段采取袖阀管预注浆加固。Feng 等^[5]建立了一种基于贝叶斯优化光梯度增强机 (BO-LGBM) 和数字孪生系统的既有隧道变形预测分析混合智能框架,为现有隧道变形控制的明智决策提供了一个可视化平台。石岩等^[6]提出对注浆压力及土仓压力进行控制,对既有线路采取线路便梁加固措施能有效控制铁路变形,且为类似下穿铁路工程提供有效参考。Jiao 等^[7]提出轨道沉降主要发生在盾构穿越铁路的中后期,路基加固可显著减少铁路轨道的沉降,硬层比例越小,路基加固效果越好。

盾构下穿过程中盾构技术及施工参数的控制影响分析也已有许多研究成果。朱才辉等^[8-10]以西安土层为主将盾构工艺参数的变化对地表沉降的影响进行量化分析,为盾构施工地面沉降控制提供一定的参考。Liu 等^[11]将盾构掘进过程分为盾构穿越前、中、后三个阶段,揭示了盾构机不同掘进参数对既有铁路路基沉降的影响规律。叶飞等^[12]针对盾构密封难度大和刀盘刀具磨损严重等风险和难题进行系统分析,提出增强主轴承密封、优化管片接缝密封和优化刀具形状,并研发无人自动系统巡检。宋鹏飞等^[13]通过室内模拟试验对实际施工参数进行优化分析,为下穿既有线工程,合理选用盾构机推进速度、顶推力、泥水压力、刀盘转速,保证既有隧道的运营安全提供更多参考。刘军华等^[14]结合工程地质和盾构机特征,构建了盾构掘进参数计算模型,并依据现场监测数据和理论分析,优化了盾构掘进参数。Wang 等^[15]提出了一种基于数据驱动的盾构姿态预测的贝叶斯机器学习方法,该方法同时考虑了

岩土参数的空间变异性和盾构姿态参数与操作参数之间的一般互相关性。

为减小盾构施工对临近建筑物的影响,也可采取相应的加固措施。炊鹏飞^[16]通过采取掘进施工前对下穿建(构)筑物进行鉴定评估、隔离加固,掘进过程中合理选择与优化掘进参数、地表跟踪注浆,下穿通过后洞内补充注浆等风险控制措施,对盾构下穿建(构)筑物风险控制技术进行研究。郭利^[17]通过深入分析桩筏加固方案对盾构施工过程及其对京承铁路的关键性影响,证实了该加固方案在确保铁路行车安全方面的显著效果。邓飞^[18]为充分确保施工过程中铁路列车的安全稳定运行,重点探究盾构隧道下穿既有铁路路基的加固措施等相关内容。丁延昌^[19]提出相应的铁路钢轨、路基和接触网立柱加固保护方案,解决了既有铁路钢轨、路基以及接触网变形控制的施工难题。李东阳^[20]针对粉质砂土层地质条件提出了既有铁路路基注浆+扣轨加固方案,并对盾构压力、出土量、姿态控制、同步注浆及二次注浆提出控制措施。

综上,以往针对地铁盾构施工下穿影响及加固措施的研究较多,但对于在富水地层中引水隧洞盾构施工下穿既有铁路线的选线及控制方案研究较为缺乏。本文以宝鸡峡引水隧洞下穿陇海铁路线为工程背景,基于 midas 有限元软件平台,针对隧洞在地层不同劣化条件、不同盾构参数情况下拟对上部铁路影响进行分析,并进一步探讨超前注浆加固和 D 型施工便梁加固对减少铁路线沉降的影响程度,以为引水隧洞下穿铁路的风险评估及相应控制措施的制定提供参考。

1 工程概况

宝鸡峡引水隧洞采用单洞无压输水,全长 20.785 km。隧洞自西南向东北方向下穿铁路,隧洞与陇海铁路夹角为 77°,全部洞段均采用盾构机法施工,开挖洞径 7.6 m,衬砌厚度为 0.35 m,环宽 1.5 m,采用错缝拼接方式。洞顶以上覆土厚度约 32 m,铁路与隧洞位置关系见图 1。

输水隧洞进口位于林家村渠首进水闸下游 300 m 处,岩性为第四系全新统风积黄土,引水隧洞穿越的陇海铁路段地貌单元属渭河 II 级阶地,主要地层为黄土及古土壤层、粉质黏土,少部为粉土。该地多年平均气温为 12.9℃,极端最高气温 41.6℃,极端最低气温 -13.9℃;多年平均降雨量 700 mm,年最大降雨量 800 mm,最小 400 mm;多年平均年蒸发量

550 mm。物理力学参数由土工试验获取见表 1。

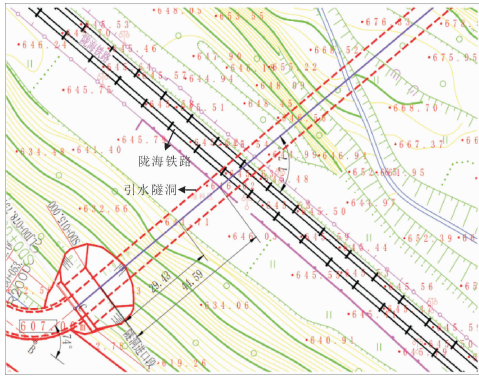


图 1 陇海铁路与隧洞平面位置关系图

表 1 地层参数选取

土层	密度 ρ /($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比 e	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	渗透系数 K_s /($\times 10^{-5} \cdot cm \cdot s^{-1}$)	
							垂直向 K_v	水平向 K_h
Q_4^s	1.96	0.653	21.3	20.4	—	—	5.55	7.32
Q_4^{2a+1}	2.03	—	—	40.0	1000	0.35	4990	4990
Q_2^{col}	2.00	0.711	14.0	18.9	40	0.33	4.88	3.92
K_1^s	2.37	—	200.0	38.0	2000	0.36	0.20	—

2 数值分析方法及方案

2.1 地层劣化表征

根据地层工程地质、水文地质条件及施工方法可知,盾构掘进期间,隧洞围岩必将受到开挖扰动、地下水渗流引起岩土体劣化等作用,地层的劣化对铁路路基沉降及管片的力学响应可能会产生一定影响,为了描述岩体刚度及强度的劣化作用,引入了劣化系数 D_f ,以量化地层参数受到开挖扰动、受水浸泡软化、风化等作用下发生劣化后对围岩及衬砌力学响应的影响。

$$D_f = \frac{E_i}{E} + \frac{c_i}{c} + \frac{\varphi_i}{\varphi} \quad (1)$$

式中: D_f 为劣化系数; E_i 为劣化后的弹性模量; E 为弹性模量; c_i 为强度软化后的黏聚力; c 为黏聚力; φ_i 为强度软化后的内摩擦角; φ 为内摩擦角。

2.2 数值分析方案

洪开荣等^[21]解释了土舱压力、注浆压力与水土压力的关系,土舱压力 P 值应能与地层土压力和静水压力相抗衡,注浆压力可取 1.1~1.2 倍的静止水土压力。张海波^[22]、孟敏强^[23]、陈仁朋等^[24]认为盾构推力是推进过程中盾构机所遇到的所有阻力之

和。本文数值分析方案见表 2。

表 2 参数分析表

名称	变量因素	不变因素
劣化系数 D_f	0.70、0.76、0.85、0.91、1.00	土舱压力 $F = 134$ kPa、注浆压力 $\sigma = 251$ kPa、盾构推力 $F_e = 13251$ kN、外水压力折减系数 $\beta = 0.45$ 、外水压力 $P_w = 67.5$ kPa
土舱压力 F /kPa	0、100、134、200、300	注浆压力 $\sigma = 251$ kPa、盾构推力 $F_e = 13251$ kN、外水压力折减系数 $\beta = 0.45$ 、外水压力 $P_w = 67.5$ kPa
注浆压力 σ /kPa	0、100、251、400、600	土舱压力 $F = 134$ kPa、盾构推力 $F_e = 13251$ kN、外水压力折减系数 $\beta = 0.45$ 、外水压力 $P_w = 67.5$ kPa
盾构推力 F_e /kN	11251、12251、13251、14251、15251	土舱压力 $F = 134$ kPa、注浆压力 $\sigma = 251$ kPa、外水压力折减系数 $\beta = 0.45$ 、外水压力 $P_w = 67.5$ kPa

2.3 加固措施

盾构掘进是一个复杂的过程,需要综合考虑地质条件和掘进参数等多种因素,为减小盾构施工对上部铁路的影响,本文提出了采取地层超前注浆加固和使用 D 型施工便梁进行加固的策略。

2.3.1 地层超前注浆措施

在盾构隧道施工过程中,为了确保施工的安全性和经济性,合理确定注浆圈厚度非常关键。为探究不同注浆圈厚度对铁路路基变形的影响,本文选取了注浆厚度为 0 m、1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 六种不同的注浆圈厚度进行计算,土舱压力 $F = 134$ kPa、注浆压力 $\sigma = 251$ kPa、盾构推力 $F_e = 13251$ kN、外水压力折减系数 $\beta = 0.45$ 、外水压力 $P_w = 67.5$ kPa。

围岩力学参数主要由工程地质勘察资料提供,结合施工规范中的相关规定以及前人研究^[25-26],本文将注浆圈内砂砾岩的弹性模量增加 61%,黏聚力增加 66%,内摩擦角增加 6° ,泊松比减小 12%,注浆圈内黄土状壤土围岩弹性模量增加 3.37 倍,黏聚力增加 3.5 倍,内摩擦角增加 1.17 倍;其余参数保持不变。具体的模型计算参数见表 3。

表 3 围岩及支护结构力学参数表

	材料名称	容重 γ /($kN \cdot m^{-3}$)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
注浆圈	黄土状壤土地层	20.0	135	0.33	49	22.1
	砂砾岩地层	23.7	3220	0.32	332	44.0
衬砌管片	C50	27.0	34500	0.27	—	—
壁后注浆	水泥砂浆	24.0	400	0.25	—	—
	盾壳	78.5	210000	0.20	—	—

2.3.2 D 型施工便梁加固措施

陇海线为碎石道床,下穿陇海线处隧洞埋深相对较大,上下行线间距 5 m,列车最高运营速度 160 km/h。为减小施工对铁路的影响,本文采用 D 型施工便梁对铁路上下行线进行加固,选取了目前常用的 D12、D16、D20、D24 四种型号的便梁,以 D20 型施工便梁为例,加固图见图 2。具体的施工便梁尺寸参数见参考文献[27]D 型便梁施工技术研究。

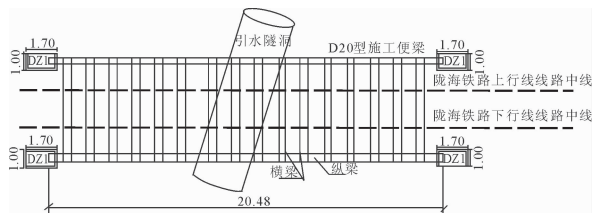


图 2 D20 型便梁加固图

3 3D 数值分析模型构建

3.1 盾构施工数值模拟流程

本文使用 midas GTS NX 进行分析计算,三维有限元分析模型尺寸为:80 m × 44 m × 67 m (长 × 宽 × 高),其中隧道开挖直径 $D = 6.8$ m,衬砌厚度为 0.35 m,注浆厚度为 0.2 m,隧道中轴线平均埋深 $H = 31.57$ m,为减少尺寸效应,将模型的左和右边界沿轴线方向扩展 46.1 m 和 26.1 m,下边界距隧道底部 27.6 m,三维几何模型如图 3 所示。

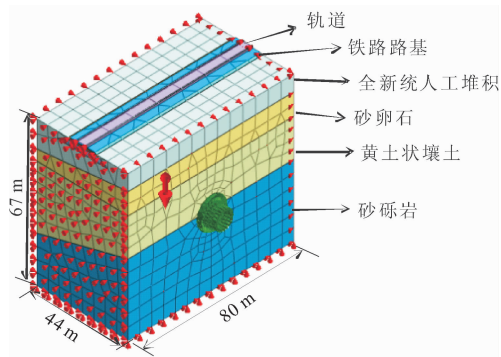


图 3 三维几何模型

盾构施工具体模拟施工过程为:

(1) 初始地应力的模拟:激活隧道开挖之前的原始土层、自重应力及自动约束,并进行位移清零。

(2) 盾构隧道掌子面开挖:通过激活钢壳模拟盾构机的放入,对隧道掌子面进行开挖,并激活开挖掌子面的土舱压力,钝化开挖土层。

(3) 盾构管片支护:开挖完毕后,进行注浆支护,激活预制拼装管片、注浆结构属性,对盾尾填充注浆,同步激活注浆压力。

(4) 外水压力的模拟:通过在衬砌外壁上施加均匀外水压力进行计算。

3.2 约束边界条件

midas GTS NX 边界一般采取位移边界条件、力的边界条件和混合力与位移同时约束条件三种处理方式。假设所有土层均为各向同性的均匀土层,初始地应力场为自重应力场,模型的上边界设置为自由约束,下边界和左右两个边界设置自动约束。

3.3 渗流边界条件

在隧道衬砌部位设置节点水头模拟作用在隧道上外水压力的改变。具体方式为:激活地层水位线处的零水头边界条件,水位线以下土体呈饱和状态。在隧道衬砌部位设置节点水头模拟作用在隧道上外水压力的改变。

3.4 本构模型及参数的选取

在 midas GTS NX 中进行盾构隧道模拟时,本构模型的选择对于分析结果的准确性至关重要。衬砌和管片壁后注浆层均采用弹性本构模型模拟,盾壳采用壳单元模拟,土层采用实体单元进行模拟。

4 计算结果分析

4.1 铁路路基控制标准

邓海鹏等^[28]在研究盾构隧道下穿多股铁路影响分析时,结合《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》^[29](TB 10314—2021),确定盾构隧道下穿铁路段的路基竖向位移控制标准为 6 mm。

通过《混凝土结构设计规范》(2015 年版)^[30](GB 50010—2010)对 C50 混凝土轴心抗拉强度标准值、混凝土轴心抗压强度标准值规定:C50 混凝土轴心抗拉强度标准值 $f_{tk} = 2.64$ MPa, C50 混凝土轴心抗压强度标准值 $f_{ck} = 32.4$ MPa。

4.2 地层劣化影响

基于 midas GTS NX 软件构建盾构施工三维模型,根据表 2 的数值模拟方案,研究地层不同劣化系数对路基沉降及管片变形的影响,限于篇幅仅展示劣化系数 $D_f = 0.7$ 的计算结果云图,如图 4 所示。

地层劣化系数与最大沉降和衬砌应力关系如图 5 所示,由图 5 可知:随着砂砾岩劣化程度的加剧,路基的最大沉降逐渐增加,衬砌拉应力和压应力也逐渐增加;当劣化系数从 1.0 (未劣化)减小至 0.7 时,路基的最大沉降从 4.46 mm 增加到 5.16 mm,衬砌拉应力从 1.49 MPa 增加到 1.55 MPa,压应力从 6.85 MPa 增加到 7.48 MPa。路基竖向最大位移 $S_{max} = 5.16$ mm < 6.00 mm,满足《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》^[29]的变形监测要求。衬砌拉应力最大

值 $f_{lk} = 1.55 \text{ MPa} < 2.64 \text{ MPa}$, 压应力最大值 $f_{ck} = 7.48 \text{ MPa} < 32.4 \text{ MPa}$, 均满足《混凝土结构设计规范》^[30] 中 C50 混凝土轴心抗拉、抗压强度标准值。

地层劣化程度的加剧导致其承载能力下降,使地层对隧洞开挖面提供的支撑力减弱,从而使铁路路基面沉降增加,衬砌管片受到更大的拉力和压力。

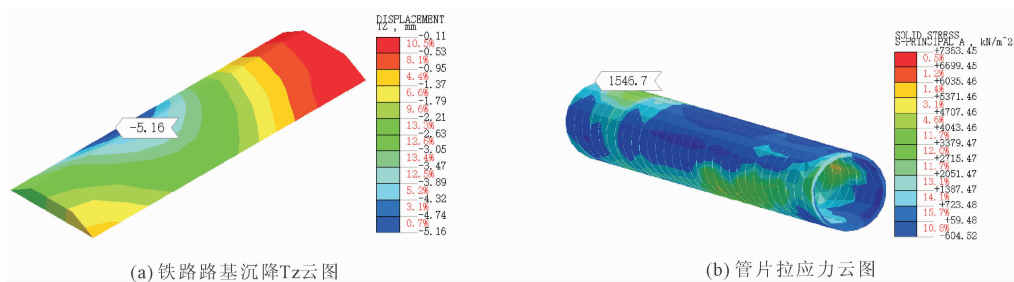


图 4 劣化系数影响路基沉降及管片变形计算的应力云图

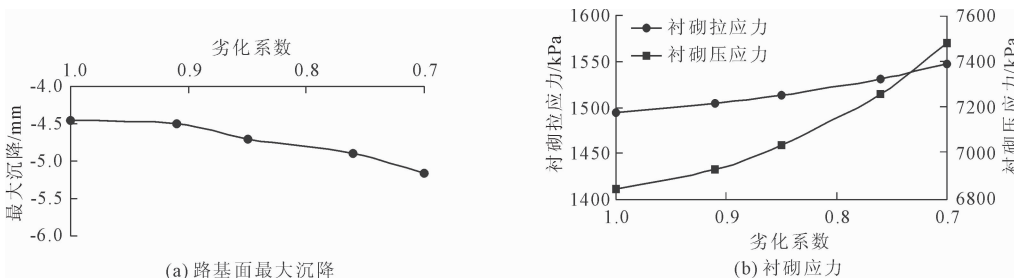


图 5 地层劣化系数与最大沉降和衬砌应力的关系

4.3 盾构施工参数对地表铁路线的影响

4.3.1 土舱压力影响

根据表 2 的数值模拟方案,研究土舱压力对路基沉降及管片变形的影响,限于篇幅仅展示 $F = 0 \text{ kPa}$ 的计算结果云图,如图 6 所示。

不同土舱压力与最大沉降和衬砌应力的关系如图 7 所示,由图 7 可知:随着土舱压力的增加,路基的最大沉降逐渐减小,衬砌拉应力和压应力均逐渐

增加;当土舱压力 $F = 0 \sim 300 \text{ kPa}$ 时,路基沉降减小约 79%,衬砌拉应力增加 55%,衬砌压应力增加 14%;当土舱压力 $F = 0 \text{ kPa}$ 时, $S_{\max} = 14.0 \text{ mm} > 6.00 \text{ mm}$,当施加适当土舱压力后, $S_{\max} = 5.3 \text{ mm} < 6 \text{ mm}$;衬砌拉应力、压应力监测最大值 $f_{lk} = 1.87 \text{ MPa} < 2.64 \text{ MPa}$, $f_{ck} = 7.75 \text{ MPa} < 32.4 \text{ MPa}$;土舱压力的增加对隧洞掌子面前方土体的支撑作用加强,提高围岩的承载力和稳定性,地表变形相对降低,但衬砌

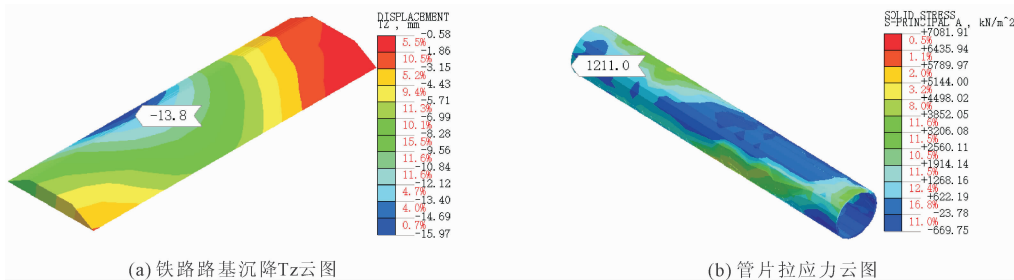


图 6 土舱压力影响路基沉降及管片变形计算的应力云图

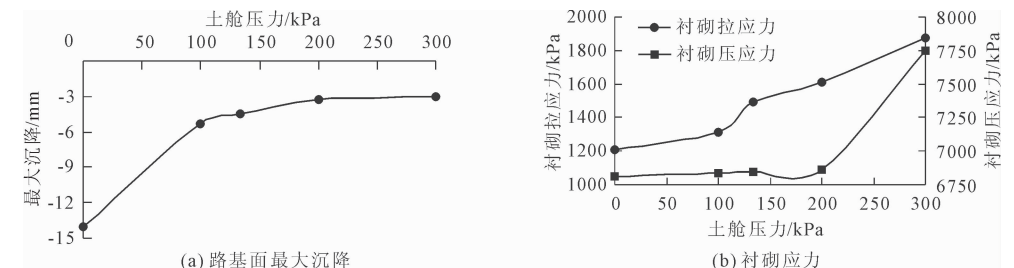


图 7 不同土舱压力与最大沉降和衬砌应力的关系

将承受更大的外部荷载,因此拉应力和压应力都会相应增加,盾构施工中应适当的控制土舱压力,同时避免地表沉降过大和衬砌受力过大。

4.3.2 注浆压力影响

据表 2 的数值方案,研究注浆压力对路基沉降及管片变形的影响,限于篇幅仅展示注浆压力 $\sigma = 251$ kPa 的计算结果云图,如图 8 所示。

不同注浆压力下沉降与衬砌应力如图 9 所示,由图 9 可知:随着注浆压力的增加,路基的最大沉降

逐渐减小,衬砌拉应力逐渐减小,压应力呈现小幅度的增加趋势;当注浆压力 $\sigma = 0 \sim 600$ kPa 时,路基沉降从 5.17 mm 减小到 3.80 mm,衬砌拉应力从 1.55 MPa 减小到 1.42 MPa,压应力从 6.84 MPa 增加到 6.85 MPa; $S_{\max} = 5.17$ mm < 6.00 mm; 衬砌拉应力、压应力监测最大值 $f_{ik} = 1.55$ MPa < 2.64 MPa、 $f_{ck} = 6.85$ MPa < 32.4 MPa; 得出合理的注浆压力可以起到支撑围岩,提高围岩稳定性作用,也有利于减小路基的沉降。

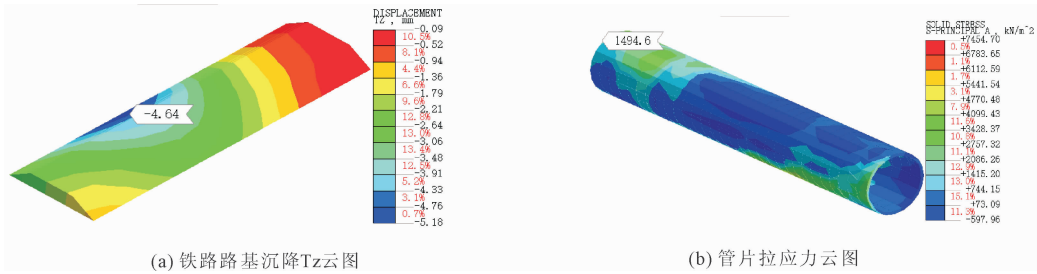


图 8 注浆压力影响路基沉降及管片变形计算的应力云图

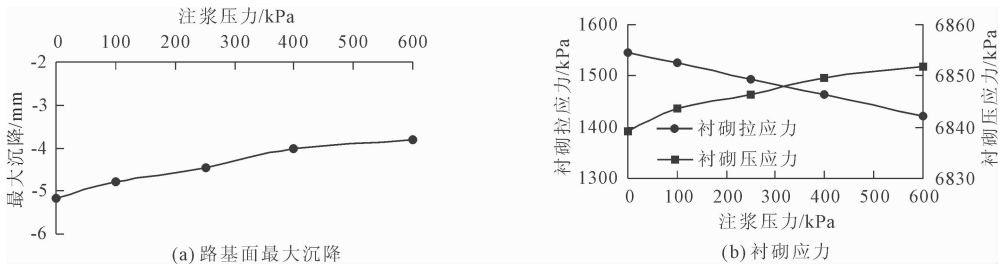


图 9 注浆压力与最大沉降和衬砌应力的关系

4.3.3 盾构推力影响

根据表 2 的数值模拟方案,研究盾构推力对路基沉降及管片变形的影响,限于篇幅仅展示盾构推

力 $F_e = 11\ 251$ kN 计算结果云图,如图 10 所示。

不同盾构推力计算结果如图 11 所示,由图 11 可知:随着盾构推力的增加,路基的最大沉降逐渐减

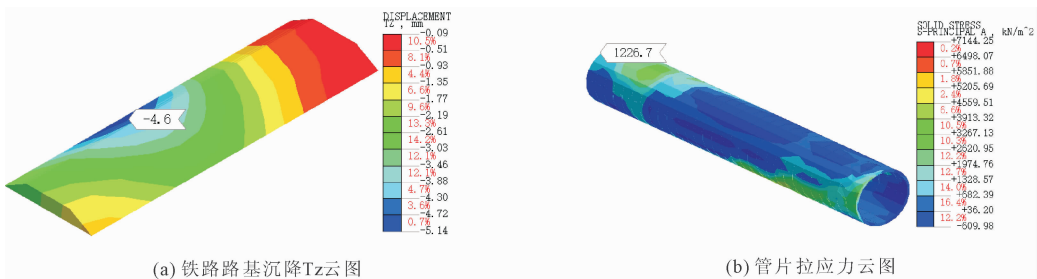


图 10 盾构推力影响路基沉降及管片变形计算的应力云图

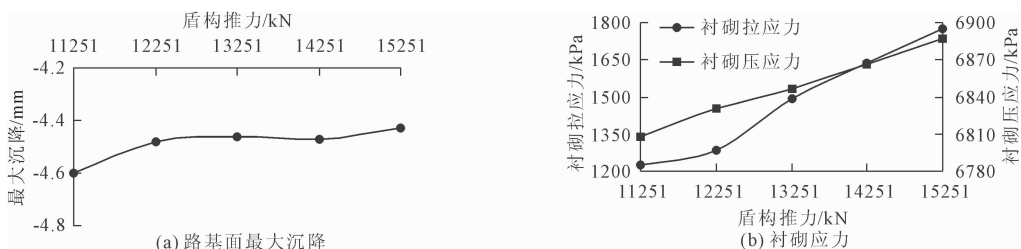


图 11 盾构推力与最大沉降和衬砌应力的关系

小,衬砌拉应力逐渐增加,衬砌压应力也呈现小幅度的增加;当盾构推力 $F_e = 11\ 251\ \text{kN} \sim 15\ 251\ \text{kN}$ 时,路基沉降减小了 3.8%,衬砌拉应力增加了 44%,压应力仅增加 1.2%; $S_{\max} = 4.60\ \text{mm} < 6.00\ \text{mm}$;衬砌拉应力、压应力监测最大值 $f_{ik} = 1.77\ \text{MPa} < 2.64\ \text{MPa}$ 、 $f_{ck} = 6.89\ \text{MPa} < 32.4\ \text{MPa}$ 。盾构推力的增加能够更好地支撑隧道围岩,减少地层位移,从而降低路基的沉降,较大的推力会导致隧道周围地层的应力重新分布,进而增加衬砌的应力。

4.4 注浆圈厚度的影响

在保证盾构参数均满足设计要求的前提下,研究不同注浆圈厚度对路基沉降及管片变形的影响,限于篇幅仅展示注浆圈厚度 $D = 1\ \text{m}$ 的计算结果云

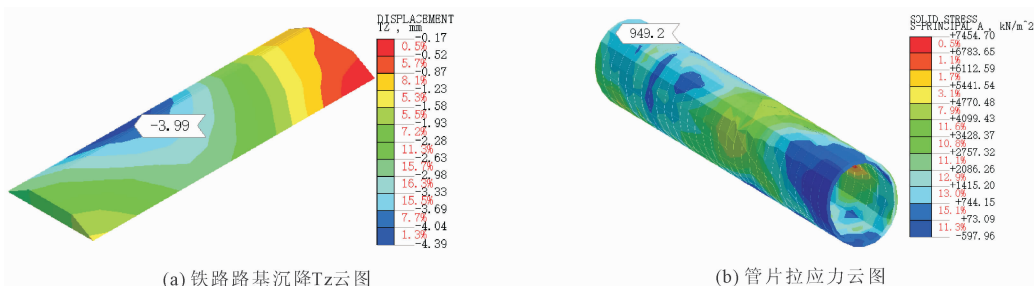


图 12 注浆圈厚度影响路基沉降及管片变形计算的应力云图

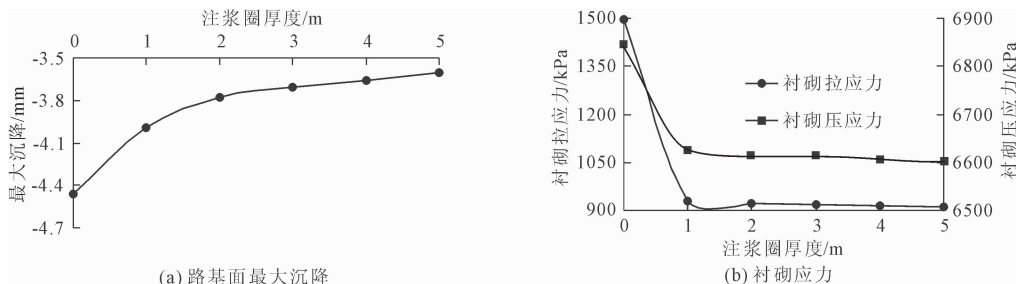


图 13 注浆圈厚度与最大沉降和衬砌应力的关系

4.5 D 型施工便梁类型影响

在保证土舱压力、注浆压力和盾构推力均满足设计要求的前提下,研究不同型号 D 型施工便梁对轨道沉降的影响,铁路路基沉降 Tz 云图 (D12) 如图 14 所示,不同结构加固措施下铁路轨道沉降规律曲线如图 15 所示。

通过对不同型号 D 型施工便梁的模拟计算,可以分析得出,采取不同型号 D 型施工便梁加固铁路线地基后,铁路路基沉降显著减小,施加前沉降变化范围在 4 mm ~ 5 mm 之间,施加后沉降变化范围在 2 mm ~ 3.5 mm 之间,铁路沉降均满足变形监测要求。

5 结 论

(1) 隧洞围岩的劣化导致围岩的承载能力下降,使地表铁路路基沉降逐渐增加,需要在盾构施工

图,如图 12 所示。

不同注浆圈厚度计算结果如图 13 所示,由图 13 可知:随着注浆圈厚度的增加,路基面的最大沉降、衬砌拉应力和压应力均逐渐减小;当注浆圈厚度 $D = 0 \sim 5\ \text{m}$ 时,路基沉降减小 0.86 mm,衬砌拉应力减小 0.58 MPa,压应力减小 0.25 MPa; $S_{\max} = 4.46\ \text{mm} < 6.00\ \text{mm}$;衬砌拉、压应力监测最大值 $f_{ik} = 1.49\ \text{MPa} < 2.64\ \text{MPa}$ 、 $f_{ck} = 6.85\ \text{MPa} < 32.4\ \text{MPa}$ 。对围岩采取适当的注浆加固措施,可有效减小围岩孔隙、增强颗粒间粘结力,提高围岩的密实度和强度,达到了提高围岩承载能力的目的,从而减少了路基沉降和衬砌应力。

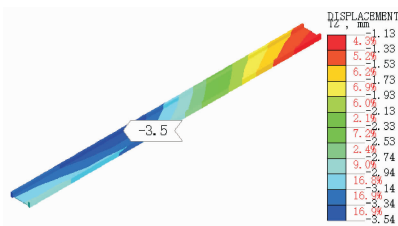


图 14 铁路路基沉降 Tz 云图 (D12)

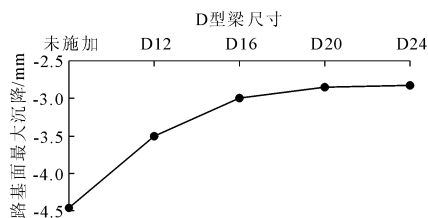


图 15 不同结构加固措施下铁路轨道沉降规律曲线

中严格控制盾构参数,避免过度扰动地层。正常盾构施工条件下铁路路基最大沉降 $S_{\max} = 4.46 \text{ mm}$ 小于沉降预警值 6.00 mm ,表明该引水隧洞选线的埋藏深度满足铁路线的安全许可要求。

(2) 盾构参数的变化对地表既有铁路线路路基沉降及盾构管片的力学响应影响显著,当盾构机停止掘进 ($F = 0 \text{ kPa}$) 时,铁路路基最大沉降 $S_{\max} = 14.00 \text{ mm}$,超过了沉降预警值 6.00 mm ,建议土舱压力控制范围 $F = 100 \sim 200 \text{ kPa}$;注浆压力控制范围 $\sigma = 200 \sim 300 \text{ kPa}$;盾构推力控制范围 $F_e = 13\ 251 \sim 14\ 251 \text{ kN}$ 。

(3) 采取超前注浆加固地层或 D 型施工便梁加固既有铁路线路路基可以有效减少路基沉降,当注浆圈的厚度超过 2 m 后,路基沉降的减少幅度不显著,建议注浆厚度不超过 2 m 或推荐采用 D20 型施工便梁对铁路上下行线进行加固。

参考文献:

[1] 石波,李科.隧道邻近建筑物影响分区研究及工程对策分析[J].隧道建设(中英文),2021,41(S2):230-235.

[2] 文冲.地铁盾构施工对地表铁路无砟轨道结构变形的影响研究[D].成都:西南交通大学,2021.

[3] 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.

[4] 王磊,刘伟萍,郝昕驰.多线叠交盾构下穿既有隧道数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2023,21(3):58-64.

[5] Feng Zongbao, Wang Jingyi, Liu Wen, et al. Data-driven deformation prediction and control for existing tunnels below shield tunneling[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024,138(PA):1093799.

[6] 石岩,黄博,丁海峰.盾构隧道下穿既有铁路变形影响分析[J].价值工程,2022,41(26):118-120.

[7] Jiao Ning, Sun Shuai, Liu Jinyu, et al. Analysis of existing railway deformation caused by double shield tunnel construction in soil-rock composite stratum[J]. Energy Reports, 2023,9(S2):159-165.

[8] 朱才辉.西安黄土层地铁盾构施工引起地层变形规律研究[D].西安:西安理工大学,2009.

[9] 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.

[10] Zhu Caihui, Wang Songhe, Peng Sen, et al. Surface settlement in saturated loess stratum during shield construction: Numerical modeling and sensitivity analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2022,119.

[11] Liu Xiang, Zhang Rui, Fang Qian, et al. Subgrade settlements of existing railway lines and operational parameters

of shield machine induced by twin shield tunnel excavations: A case study[J]. Journal of Central South University, 2024,31(1):272-287.

[12] 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.

[13] 宋鹏飞,李超.盾构下穿施工参数控制影响分析[J].城市道桥与防洪,2024(7):203-207,24-25.

[14] 刘军华,傅鹤林.复杂地层中盾构掘进参数计算与研究[J].水利与建筑工程学报,2022,20(5):137-142.

[15] Wang Lai, Pan Qiuqing, Wang Shuying. Data-driven predictions of shield attitudes using Bayesian machine learning[J]. Computers and Geotechnics, 2024:166106002.

[16] 炊鹏飞.富水砂层区盾构下穿建(构)筑物风险控制技术研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(1):210-215,227.

[17] 郭利.地铁盾构隧道下穿既有铁路对股道沉降的影响分析及桩筏加固技术[J].黑河学院学报,2024,15(9):185-188.

[18] 邓飞.盾构隧道下穿既有铁路路基的加固措施[J].科技与创新,2022(16):136-138,142.

[19] 丁延昌.盾构隧道下穿既有铁路路基的加固措施[J].路基工程,2022(1):160-164.

[20] 李东阳.粉质砂土层盾构隧道下穿既有运营铁路施工技术研究[J].国防交通工程与技术,2022,20(1):74-76,41,58.

[21] 洪开荣.盾构与掘进关键技术[M].北京:人民交通出版社,2018.

[22] 张海波.地铁隧道盾构法施工对周围环境影响的数值模拟[D].南京:河海大学,2005.

[23] 孟敏强.饱和软黄土地铁隧道盾构施工控制技术[D].西安:西安科技大学,2016.

[24] 陈仁朋,刘源,汤旅军,等.复杂地层土压平衡盾构推力和刀盘扭矩计算研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):26-32.

[25] 陈克霖.水工引水隧洞施工对围岩渗流场影响研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.

[26] 张健.引水隧洞富水洞段全断面超前帷幕注浆圈厚度优化研究[J].中国水能及电气化,2021(11):35-38.

[27] 夏森林.D型便梁施工技术[J].国防交通工程与技术,2018,16(2):41-44.

[28] 邓海鹏,丁祖德,李兴龙.盾构隧道下穿多股铁路影响分析[J].施工技术(中英文),2024,53(1):130-135.

[29] 邻近铁路营业线施工安全监测技术规程:TB 10314—2021[S].北京:中国铁道出版社有限公司,2021.

[30] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].2015年版.北京:中国建筑工业出版社,2015.