

砂质黄土区管涵上穿城际隧道施工影响分析

刘耀辉¹, 童景盛¹, 黎大玮¹, 姜有恒¹, 马静², 刘韧³

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州博文科技学院, 甘肃 兰州 730000;

3. 兰州铁道设计院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为探究砂质黄土地层条件下, 上穿城际铁路隧道管涵施工对隧道的不利影响, 依托我国西北地区排水管涵上穿某城际铁路隧道项目, 针对典型砂质黄土增湿变形特性, 采用有限元差分软件FLAC 3D开展数值模拟, 分析管涵施工时土体沉降和隧道结构变形。结果表明: 不考虑水害情况下, 管涵施工对既有隧道结构的影响较小。当砂质黄土遇水劣化后, 管涵施工造成的土体沉降范围和程度均明显增大, 既有隧道结构的受力与变形均超过预警值。通过加强施工区域内的防水设计、排水系统设计、确保填土质量等措施可降低水对砂质黄土力学性能劣化的影响, 提高既有隧道的运营安全。

关键词: 砂质黄土; 上穿隧道; 施工扰动; 数值模拟

中图分类号: TU444

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0338-04

Analysis on Impact of Pipe Culvert Construction Passing through Intercity Tunnels in Sandy Loess Areas

LIU Yaohui¹, TONG Jingsheng¹, LI Dawei¹, JIANG Youheng¹, MA Jing², LIU Ren³

(1. Northwest Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Bowen University

of Science and Technology, Lanzhou 730000, China; 3. Lanzhou Railway Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to explore the adverse impact of the construction of pipe culvert passing through an intercity railway tunnel under the condition of sandy loess stratum, relying on a drainage pipe culvert passing through an intercity railway tunnel project in the northwest China and aiming at the humidification and deformation characteristics of typical sandy loess, the numerical simulation is carried out by using the finite element difference software FLAC 3D to analyze the soil settlement and tunnel structure deformation during the construction of the pipe culvert. The results show that without considering water damage, the impact of pipe culvert construction on the existing tunnel structure is relatively small. When the sandy loess is deteriorated by water, the range and degree of soil settlement caused by pipe culvert construction increase significantly, and the force and deformation of the existing tunnel structure all exceed the warning values. By strengthening the waterproof design, drainage system design, and ensuring the filling quality in the construction area, the adverse effects of water on the mechanical properties of sandy loess can be reduced, and the operational safety of the existing tunnel can be improved.

Keywords: sandy loess; passing through tunnel; construction disturbance; numerical simulation

0 引言

随着城市发展需求的不断扩大, 高铁、地铁建设得到了迅猛发展, 旅客出行便捷性得到了高质量提升。但高速铁路网、地铁线路的不断完善, 使得市政工程建设“涉铁”的情况与日俱增, 管线敷设、基坑开挖等市政项目与既有铁路建(构)筑物降低影响成为当前市政工程领域深入探究的热点问题。

跨越既有隧道开展施工作业会使土体打破原有受力平衡, 产生应力重分布现象^[1-2], 故而施工扰动所产生的影响如不加以控制会造成重大损失^[3-4]。诸多学者在设计、施工、运营三个阶段以开展了大量研究。曹依雯等对上海地区在运营轨道交通隧道上方开挖基坑进行数值模拟, 发现沟槽底部产生的位移、正下方轨道交通结构竖向位移均较大^[5]。李明君等探究了明挖基坑与隧道夹角、明挖基坑横向卸载面积等因素对既有盾构隧道的的影响规律^[6]。胡威等通过实地监测软土地区长条形基坑开挖对既有隧道的位移变形, 表明上跨基坑开挖使下卧地铁隧道

收稿日期: 2025-02-17

基金项目: 甘肃省科技厅重点研发计划项目(24YFGA057)

作者简介: 刘耀辉(1999—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁与隧道的设计与科研工作。

产生隆起变形进一步加剧^[7]。覃维等模拟分析了多种工况下隧道周围产生的应力与位移,提出了既有隧道运营阶段的安全风险评估方法^[8]。杨世东等探究得到顶管与隧道距离对隧道结构位移有显著影响,并给出了顶管施工对隧道结构影响最低的施工工况^[9]。

上述研究在我国东部地区降低施工扰动影响方面取得了一定成果。但针对西北地区砂质黄土地层的相关工程研究尚不多见。且砂质黄土即使在非饱和状态下仍具有明显的增湿变形特性^[10],水对砂质黄土力学性能劣化影响显著^[11-12],黄土湿陷极易产生沉降变形^[13],给市政工程建设带来了诸多挑战^[14]。对于该类工程砂质黄土遇水对既有隧道结构产生病害的影响更应得到重视^[15]。本文依托我国西北砂质黄土地区管线上穿某城际铁路项目,采用FLAC 3D软件模拟分析管道顶管施工对隧道整体稳定性与周边土体沉降变形的影响,为类似工程提供参考。

1 工程概况

西北砂质黄土地区雨污排水管线上穿某城际铁路项目所属地貌属于倾斜冲洪积平原区,地形平缓,地面下约2~4 m为某城际铁路隧道。工程所在地气候属中温带半干旱大陆性气候区,降雨量较少但集中,年平均降水量319.1 mm,年最大降水量452.1 mm。地质勘察表明:工程范围内地层主要分布有第四系全新统素填土,冲积砂质黄土。其中,工程范围内素填土在地表广泛分布,灰黄色为主,在铁路用地范围内多由铁路隧道明洞开挖回填而成,厚度多10~12 m,铁路用地范围外厚度多1~3 m,主要为平整场地等回填而成,成分均以砂质黄土夹杂少量细砂为主等。素填土层下砂质黄土多层状分布,单层厚度多2~9 m,成分以粉粒为主,土体较疏松,垂直节理发育,虫孔及针状孔隙发育。工程范围内及周边既有建筑物、管线施工,对原始地形地貌改变较大。现地面已硬化处理,但地表排水不畅,区域内填土沉降变形,铁路用地范围内地面下沉开裂等现象明显,沉降区内有积水,地表硬化层下部土体已存在空洞。沉降区总体长约140 m,宽约30 m,地面塌陷形成凹槽,地

面硬化层开裂,呈凸凹不平状,并且有进一步扩大趋势,见图1。沉降区距离周边建筑物最近处仅2m左右。雨污排水管道垂直穿越某城际铁路隧道,穿越铁路隧道防护范围内设管涵进行防护。管涵尺寸宽1.5 m,高1.8 m,坡度同排水管。管涵距离既有城际铁路隧道顶板仅1.3 m,管涵施工拟采用顶进施工。



图1 地面下沉导致硬化层开裂

2 数值模拟及计算分析

针对本涉铁项目的工程地质概况及方案设计情况,采用FLAC 3D岩土分析软件分别对其进行在拉管非开挖铺管施工作业和地表水入渗两种不同条件进行分析计算,探究本工程实施作业中对于铁路隧道结构及其周围土体的物理状态及其力学性能影响。

2.1 数值模型

模型尺寸25 m×10 m×16 m,其中包含排水管道防护涵洞1.5 m×1.8 m、城际铁路既有隧道15 m×30 m×9.5 m,且防护涵洞位于模型整体最中央。土体及混凝土既有构筑物均采用brick单元。除混凝土采用弹性理论模型外,其余均采用摩尔-库伦模型。防护涵洞顶端距离地面0.5 m,底端距离既有隧道1.3 m。整体模型见图2。土体及混凝土各项参数取值见表1。

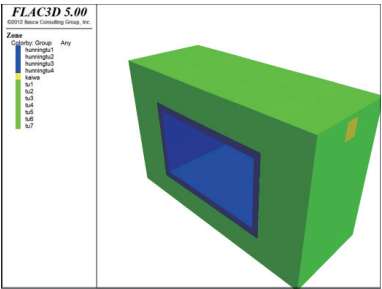


图2 排水管道涵洞总体模型

表1 排水管道涵洞顶进模型各项模拟参数

分项	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/Pa	剪切模量/Pa	黏聚力/Pa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/Pa
土	1 780	2.3×10 ⁷	8.3×10 ⁶	2.2×10 ⁴	27	0
混凝土	2 400	1×10 ¹⁰	3.57×10 ⁸	—	—	—

2.2 计算结果及分析

2.2.1 雨水污水涵洞开挖模拟分析

在数值模型计算收敛后,由图3可得:排水防护

涵洞施工过程中,管涵上覆土体会产生一定量的沉降,其值为3 mm。由于城际隧道埋深较浅,隧道上覆土体仅3.9 m,故而在上穿既有隧道施工时隧道结

构上方土体沉降量较小,约为1~2 mm。而在管涵与既有隧道立体交叉处的土体变形增大明显,变形量总体在6~10 mm。同时,在既有隧道边墙侧方的土体也会产生不同程度的沉降,侧墙靠上部的土体位移较大,位移量随侧墙距离的增大在4~12 mm递增。隧道边墙与其接触的土体沉降相对位移在3 mm以内,隧道结构本身沉降变形约1~2 mm,均在控制范围以内。

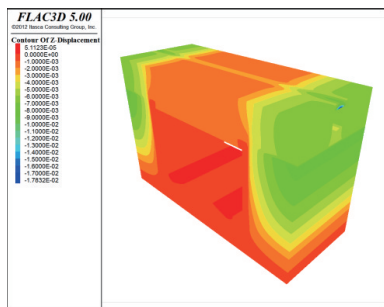


图3 防护涵洞施工竖向位移图

由图4可得:在城际隧道边墙上方及其间土体会产生1~2 mm的横向位移,而在其余位置处位移量均在1 mm以内,影响微小。

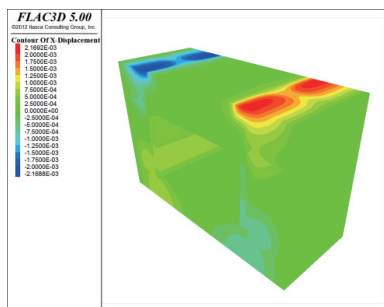


图4 防护涵洞施工横向位移图

模拟结果显示,在未考虑水下渗的工况下,管涵施工虽对既有城际隧道周边土体造成一定程度的沉降影响,但总体对于隧道结构本身的影响有限。因此该工况下,涵洞施工对既有隧道影响甚微,尤其是在隧道正上方影响可忽略不计。

2.2.2 考虑地表水入渗影响的涵洞方案模拟

图5显示:在考虑水下渗的影响之后,施工造成排水防护涵洞上方土体地表沉降增大至4~8 cm,且这种沉降已经不再受到其是否在既有隧道正上方的影响。与不考虑水的情况不同的是,水作用下,即使是城际隧道上方的土体也会产生沉降,其值在0~3 cm变化,且距离排水防护涵洞越近,沉降越明显。在管涵与城际隧道立体交叉处的土体也会产生更为明显的竖向变形,数值由3 cm迅速增至8 cm,沉降范围相较也进一步扩大。在城际隧道边墙两侧地表

土体同样会产生5~9 cm左右的竖向位移,并已经展示出贯通至地表的剪切面雏形,与隧道边墙接触的土体与隧道边墙的相对位移已达到了5 cm,隧道边墙上方范围内土体向边墙范围外滑移的趋势更为明显,滑移范围也扩大3倍以上,越靠近地表滑移面与地表的夹角越小。两侧滑移区总计已达到了隧道横向跨度的40%以上。说明水对砂质黄土的力学性能有重大不利影响。此外,水下渗影响下隧道整体沉降已超过1 cm,远远超出了隧道结构竖向位移预警值3 mm,已对既有城际铁路运行正常运营产生严重威胁。

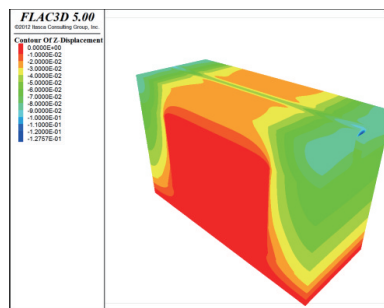


图5 考虑水影响的竖向位移图

图6显示:水作用造成既有隧道边墙上方及周边土体产生的横向位移量增大,主要在0.5~2.0 cm以内,越靠近地表横向位移量也随之增加。横向位移的范围稍有扩大。值得注意的是,在城际隧道边墙与顶板交界处侧方土体会产生2.2 cm左右的横向位移。而在既有隧道正上方的土体,即使在水的影响下其横向位移5 mm以内,对工程影响较小。隧道衬砌混凝土本身并未出现较大受力和变形,但隧道边墙下方土体出现了小范围的横向位移,其数值约为1.5 mm左右,说明水的作用使得砂质黄土的力学性能下降使得整体的承载力不足,使得隧道结构本身出现整体滑移,与施工区域外的隧道整体形成高差和水平差,对于隧道结构稳定性不利,故仍需降低水对砂质黄土的病害影响。

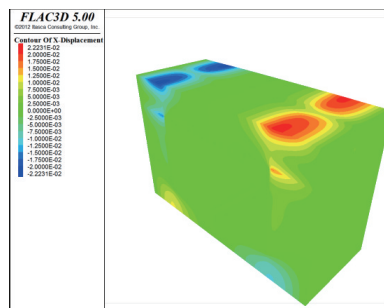


图6 考虑水影响的横向位移图

2.2.3 数值模拟结果分析

雨水污水防护涵洞的施工会造成涵洞上方及周

边土体产生沉降,在铁路隧道正上方沉降较小,管涵两端下沉较大。由于管涵上覆土层厚度较薄,两者荷载变化对于城际铁路隧道结构的受力影响也可忽略。但在考虑了地表水入渗的影响后,管涵底距离隧道结构顶面仅有1.3 m距离,水造成填土的物理力学性能参数迅速降低,通过参考取值进行数值分析,结果显示,管道顶进施工作业完成后,由于该场区区域内砂质黄土的普遍增湿变形特性,并考虑施工夯实质量等的不利因素影响,在地表水入渗情况下,涵洞及周边地层岩土体的沉降变形均显示较大变形量,沉降范围更深显著扩大。隧道结构周边地层由于地表水入渗,力学性能降低,作用在隧道结构上的荷载也呈现较为不利影响。隧道结构与周边土体的相对位移已远超预警值。同时,水所造成地层的沉陷以及力学性能的下降使得隧道下方的基础承载力不足,施工范围内的隧道与城际铁路隧道整体产生相对位移,铁路客运运营存在风险。由此可见,水会使该工程范围内的砂质黄土发生显著的湿陷、沉降变形特性。结合施工前施工区域已经出现地表沉陷和水泥开裂现象,分析原因,工程范围内的素填土和砂质黄土,密实度不均,且具有湿陷性,在地表水长期汇集下渗、湿陷及自然沉降作用下,地面出现不均匀沉降现象,最终导致场地内出现塌陷、地面硬化层开裂等不均匀沉降现象。从而砂质黄土的增湿变形特性进一步得到印证。控制外界水的下渗、后期运营预防管道开裂以及防护涵洞的质量将会对提升既有隧道运营安全起到决定性作用。

此外,应持续监测既有城际隧道结构,监测周期包含施工期和竣工后至少一个月的稳定期。当出现监测数值达到预警、报警值、监测数据持续变化较大、邻近施工出现异常情况、结构裂缝变大或出现明显新增裂缝、暴雨等自然灾害引起的其他变形异常情况等现象时,应提高监测频率或对个别点进行实时监测,并应及时向铁路运输部门报告监测结果。

3 结 语

(1)雨水污水管道采用非开挖施工方法,管涵底部距离铁路隧道顶板有1.3 m的距离,在不考虑水对土体力学性能劣化的影响下,施工对于既有城际铁路隧道的变形影响很小,能够满足城际铁路隧道安全运营的管理要求。

(2)地表水入渗条件下,砂质黄土的力学性能降

低显著,管涵以及城际隧道上覆土层的竖向沉降变形较大,因此,项目区域内做好地表排水系统、硬化路面以及换填等工程措施非常必要。确保填土质量对于地表水入渗后引起地表浅层的地基下沉变形具有非常重要的作用和意义。

(3)考虑到雨水污水管涵尺寸,以顶进工艺从既有城际铁路隧道上覆土层中穿过,该处上覆土层原有厚度仅有3.9 m左右,在保证管涵与铁路隧道结构一定的安全距离后,管涵正上方的剩余覆土厚度较小,对于顶管施工可能造成一定的施工难度。

(4)应持续监测既有城际铁路隧道,尤其是轨道竖向位移、轨道水平位移、隧道结构竖向位移、隧道结构水平位移。同时应建立完善的应急机制以解决突发状况。

参考文献:

- [1] 倪福兴,叶俊能,刘干斌,等.近接基坑开挖对既有隧道变形影响及控制研究[J].防灾减灾学报,2023,39(1):53-61.
- [2] 张治国,黄茂松,王卫东.邻近开挖对既有软土隧道的影响[J].岩土力学,2009,30(5):1373-1380.
- [3] 刘洋,余鹏,潘屹.黄土地区基坑开挖对临近地铁站变形影响及控制措施研究[J].公路,2025,70(1):324-329.
- [4] 李家平,雷丹,杨石飞,等.软土地层临近地铁基坑施工影响控制研究[J].工程勘察,2024,52(4):7-12.
- [5] 曹依雯,庄静,吴坚慧,等.大口径排水管道沟槽基坑开挖对既有轨道交通隧道结构影响分析[J].中国市政工程,2016(5):71-72;76.
- [6] 李明君,孙庆文,陈小飞.明挖卸荷施工对下卧既有地铁盾构隧道的影响研究[J].现代城市轨道交通,2024(1):119-124.
- [7] 胡威,顾晓卫,刘羽,等.软土地区长条形基坑开挖对下卧既有地铁隧道影响的实测分析[J].建筑结构,2023,53(增刊1):2815-2822.
- [8] 覃维,王星.新建管道施工对近距离既有隧道的影响及安全风险评估[J].交通科技,2020(2):92-96.
- [9] 杨世东,鄢海涛,黄莎莎,等.竖井群开挖及顶管施工对运营地铁区间隧道的影响分析[J].交通科技,2024(2):102-108.
- [10] 蔡国庆,韩博文,韦靖威,等.复杂水-力路径下非饱和砂质黄土增湿变形特性[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增刊1):3073-3080.
- [11] 朱熙明.结合兰州新区NCE10#路道路工程浅析湿陷性黄土路基处理方案的比选[J].城市道桥与防洪,2021(1):61-63.
- [12] 蔡国庆,张策,黄哲文,等.含水率对砂质Q3黄土抗剪强度影响的试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(增刊2):32-36.
- [13] 彭晨.宁夏湿陷性黄土路基沉降观测现场试验研究[J].交通科技,2022(3):50-53.
- [14] 童景盛,李菊红,周志华.城市道路塌陷成因分析及精细化预防处理措施[J].城市道桥与防洪,2021(2):29-33.
- [15] 韩波,尹志雨.大跨双连拱黄土隧道力学效应研究[J].交通科技,2021(2):138-141.