

文章编号: 1674—8247(2024)06—0104—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.06.017

旋喷桩加固黄土区重载铁路隧道基底效果分析

张亚辉^{1,2} 刘 勇^{2,4} 韩乃杰³ 徐 强²

(1. 河北城乡建设学校, 石家庄 050031; 2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室, 石家庄 050043;
3. 河北交通投资集团有限公司, 石家庄 050000; 4. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:黄土地区土体因其湿陷性较大,导致基底稳定性较差,道床、基底等均可能在列车的动力振动作用下发生基底下沉、开裂、翻浆冒泥等病害,这在一定程度上遏制了重载铁路的发展,影响了列车的运行安全。依托山西中南部铁路通道石楼隧道,建立三维有限元模型,针对旋喷桩加固效果进行计算分析,首先针对在隧道施工期间旋喷桩的加固效果进行计算,结果表明:在无旋喷桩加固时,仰拱部分最大隆起量为 16.3 cm,采用旋喷桩加固后,最大隆起量降低为 5.66 cm,且仰拱各测点的变形量的变化幅度减小,说明旋喷桩不仅起到了减小围岩变形的作用,同时也提高了围岩稳定性。其次对运营期间旋喷桩对于改善仰拱动力响应效果方面进行了计算分析,结果表明:当采用旋喷桩时,仰拱中心位置最大位移振幅由 2.51 cm 降低至 0.69 cm,降幅达 72.5%;加速度响应方面,仰拱中心位置的加速度峰值最大,其值为 3.29 m/s⁻²,较无加固时的 5.11 m/s⁻² 降低了近 36%。

关键词:重载铁路;隧道;黄土;加固;动力响应

中图分类号:U45 **文献标志码:**A

Analysis of the Effect of Jet Grouting Pile Reinforcement on the Tunnel Foundation of Heavy-haul Railways in Loess Areas

ZHANG Yahui^{1,2} LIU Yong^{2,4} HAN Naijie³ XU Qiang²

(1. Hebei Urban and Rural Construction School, Shijiazhuang 050031, China;
2. MOE Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Hebei Transportation Investment Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 4. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The soil in loess areas exhibits significant collapsibility, leading to poor foundation stability. Components such as the track bed and foundation may experience settlement, cracking, mud pumping, and other defects under the dynamic vibration of trains. These issues have hindered the development of heavy-haul railways to a certain extent and compromised train operation safety. Based on the Shilou Tunnel of the Central and Southern Shanxi Railway Corridor, a three-dimensional finite element model was established to analyze the reinforcement effectiveness of jet grouting piles. Initially, the reinforcement effect of jet grouting piles during tunnel construction was calculated. The results indicated

收稿日期:2024-01-30

作者简介:张亚辉(1989-),男,副教授。

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2020210068);中铁二院工程集团有限责任公司院控项目(KYY2018071(18-20));河北省大学生创新项目(S202010107080)

引文格式:张亚辉,刘勇,韩乃杰,等.旋喷桩加固黄土区重载铁路隧道基底效果分析[J].高速铁路技术,2024,15(6):104-110.

ZHANG Yahui, LIU Yong, HAN Naijie, et al. Analysis of the Effect of Jet Grouting Pile Reinforcement on the Tunnel Foundation of Heavy-haul Railways in Loess Areas[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6):104-110.

that without jet grouting pile reinforcement, the maximum uplift of the inverted arch was 16.3 cm, which was reduced to 5.66 cm after reinforcement. Additionally, the variation amplitude of deformation at various measurement points on the inverted arch decreased, suggesting that jet grouting piles not only reduced surrounding rock deformation but also improved its stability. Furthermore, this paper conducted computational analysis on the effectiveness of jet grouting piles in improving the dynamic response of the inverted arch during operational periods. The results showed that when jet grouting piles were used, the maximum displacement amplitude at the center of the inverted arch decreased from 2.51 cm to 0.69 cm, representing a 72.5% reduction. In terms of acceleration response, the peak acceleration at the center of the inverted arch was the highest, with a value of 3.29 m/s^{-2} , which was nearly 36% lower than the 5.11 m/s^{-2} observed without reinforcement.

Key words: heavy-haul railway; tunnel; loess; reinforcement; dynamic response

据统计,截至2023年,我国重载铁路线路长度已经达到了1.9万km。与此同时,我国西部地区铁路运输发展迅速,线路里程长度逐年增加,其中重载铁路占比近48%^[1]。我国西部地区黄土覆盖厚度大,主要为第四系堆积的大陆沉积物,物理力学性质相对较差。当重载铁路经过黄土地区时,由于黄土自身湿陷性强、稳定性差、强度低等特点,影响工程的施工进度,甚至严重威胁运营期内铁路隧道的稳定性与安全性。因此,黄土地区重载铁路围岩变形与加固方法的研究是举足轻重的。

基于以上地质环境特点,诸多学者针对黄土地区重载铁路隧道展开了研究。王虎^[2]以蒙华铁路王家湾隧道为依托,基于其特有的湿陷性黄土地层,通过对现场岩土体样本进行室内试验确定模型地层参数,结合有限元模拟分析发现,黄土重载铁路隧道仰拱与边墙是薄弱环节,极易受到列车动力荷载的影响而发生破坏;郑卫东^[3]结合具体工程案例,采用灰土挤密桩处理重载铁路过渡段湿陷性黄土路基以消除湿陷性,提高施工质量;杨碧峰^[4]等依托土家湾隧道软黄土隧道软基进行了50m超长旋喷桩的设计、施工试验研究,结果发现,该设计合理,加固效果明显,为类似黄土隧道工程的设计与加固施工提供了宝贵的经验;李小杰^[5]对高压旋喷桩复合地基的承载力、沉降量实测值与计算值进行了对比分析,发现了影响复合地基承载力的影响因素。以上分析侧重于加固方法的优化且仅为理论分析,缺少实际工程基底加固效果与计算模型之间的结合验证分析。

朱丽刚^[6]以国道G309线炸山嘴隧道工程项目为研究背景,采用MIDAS GTS软件分析了地表垂直预注浆加固技术和防渗水技术的效果,研究发现该技术有效改善了地表裂缝、洞顶掉块、坍塌、突泥涌水以及拱顶沉降过大的问题;MAIR J R^[7]运用有限元模拟的方法针对伦敦黏土地区隧道的掘进施工所引起的地面固

结沉降进行了分析计算,得到了不同类型的衬砌结构以及不同衬砌尺寸等工况下土体沉降固结变形规律和受力特性。

以上国内外学者围绕黄土区隧道围岩变形及隧道地基与仰拱的加固方式等,进行了相关研究,为类似隧道工程的设计与施工积累了宝贵经验,然而对于“加固基底与仰拱后围岩变形量可以减小多少,基底动力响应改善效果如何”的问题缺乏定量的研究,因此,本文以山西中南部铁路通道——石楼隧道地基加固段为依托,利用有限元分析软件ANSYS建立三维数值分析模型,对黄土重载铁路隧道基底仰拱在有无旋喷桩两种工况下的变形量以及动力荷载响应方面的特点展开研究。

1 工程概况

1.1 隧道概况

此线路上共有28座隧道,石楼隧道是其中长度最长的,断面如图1所示。石楼隧道进、出口里程分别为DK 234+415、DK 257+225,全长12.8 km,隧道设计为单洞双线,线间距4.4 m,设计速度120 km/h,轨道面以上净空横断面积面积为 64 m^2 。全线穿越地质条件为黄土高原丘陵。石楼隧道最大埋深约为252 m,最小埋深约为2 m,为大风险隧道,是山西中南部铁路通道全线控制工程之一。

本文选取石楼隧道工程二标段DK 231+400~500典型区段为研究对象,该段围岩级别为Ⅳ级。

1.2 工程地质条件概况

石楼隧址区属于典型的黄土塬梁地貌,隧道穿过黄土与第三系黏土分界处,地表覆盖有第四系更新统风积(Q_3^{col})新黄土、第四系中更新统洪积层(Q_2^{pl})老黄土、第三系(N_2)粉质黏土、下伏三叠系(T_2^{e})泥岩与砂岩。其中,第四系更新统风积(Q_3^{col})新黄土的特征表现为:褐黄色,近粉质黏土状,压缩强度较低,土层中

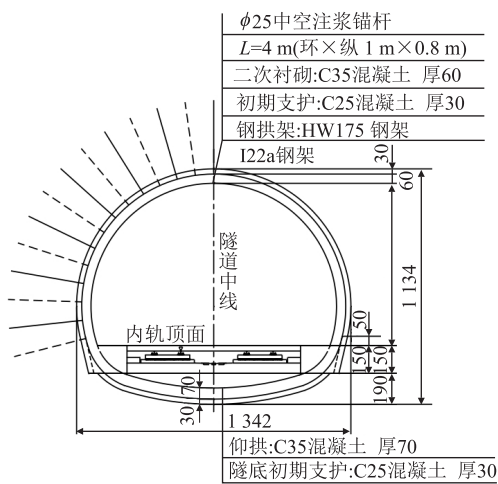


图1 隧道断面图 (cm)

夹杂少许粉土和黏土,空隙率较高,其内不含水分,湿陷性较为明显。典型断面横向地质剖面如图2所示。

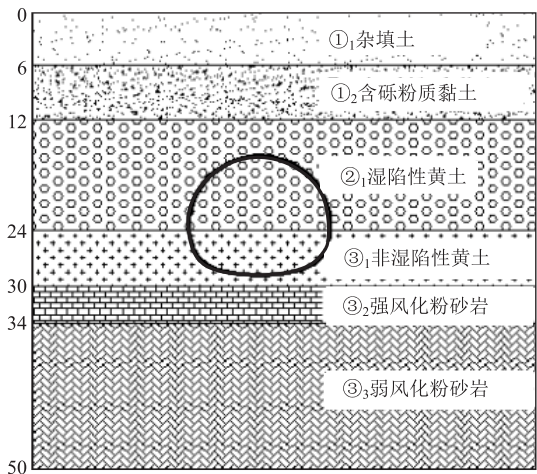


图2 典型断面横向地质剖面图

2 有限元模型分析

2.1 有限元模型建立

本文利用有限元软件 ANSYS 建立三维有限元模型,模型与网格划分如图3所示。

大量研究发现^[8-10],当数值计算模型的水平方向尺寸3~5D(洞径),竖直方向尺寸距离隧道底部3~5H(隧洞高度)时,边界效应产生的影响最低,因此本文模型尺寸为100 m×100 m×40 m。模型的水平两端通过施加水平约束模拟静态边界条件,模型的底部则采用竖直与水平双向约束的边界条件,上部为自由面不施加约束。

本文计算模型共划分了6 915个节点和5 386个单元。

围岩在计算分析时,按照弹塑性材料进行考虑,且

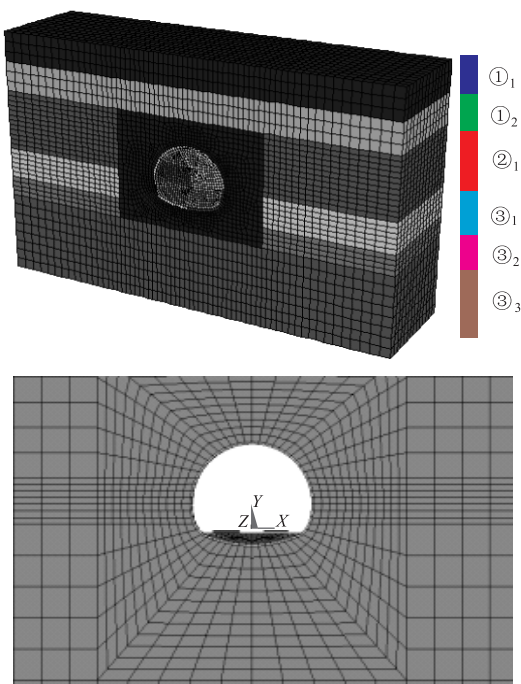


图3 围岩与隧道模型网格划分示意图

满足 Mohr-Coulomb(摩尔库伦)准则。隧道周边的围岩采用 Solide45 实体单元进行模拟,衬砌结构主要考虑初期支护与二次衬砌,两者均采用 Shell63 单元类型进行模拟,围岩与混凝土底座以及轨道板均采用 Solide45 实体单元类型进行模拟。

根据相关地质资料^[11-12],石楼隧道的围岩基本物理力学参数与衬砌结构弹性力学参数分别如表1、表2所示。

表1 围岩的物理力学指标表

类别	重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	变形模量 E/MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/KPa
湿陷性黄土	15.0	20	0.35	25	25
非湿陷性黄土	18.5	39	0.35	27	30
强风化砂岩	18.0	41	0.23	30	110

表2 衬砌等结构弹性力学参数表

结构名称	材料类型	重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	变形模量 E/GPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/MPa
初期支护	C25 混凝土	23	28	0.20	43	12.7
二次衬砌	C35 钢筋混凝土	26	31	0.20	46	15.6
仰拱填充	C25 混凝土	23	26	0.20	46	12.7
道床基础	C30 混凝土	25	29	0.20	46	14.0
加固圈	C35 混凝土	28	35	0.25	42	19.0

为提高计算精度,本文充分考虑旋喷桩结构和地基围岩的相互作用,将旋喷桩在计算模型中设置为加固圈(距离隧道仰拱中心6 m范围),提高相应的力学参数。计算模型主要分为两种:一种是隧道开挖洞室模型,包括隧道开挖掌子面、初期支护、加固层以及二

次衬砌;二是隧道所处围岩模型,本文选取隧道左线出口附近的围岩地质条件,隧道开挖面同时位于湿陷性与非湿陷性土层部分(如图2所示)。为了使模拟计算更加贴合工程实际情况,将纵向长度40 m分为40个开挖断面,即以1 m/t的速度进行开挖。其中,在无旋喷桩加固的计算模型中,按照开挖掌子面—施作初期支护—施作二次衬砌的步骤进行循环计算;在采用旋喷桩加固的计算模型中,按照开挖掌子面—旋喷桩加固—施作初期支护—施作二次衬砌的步骤进行循环计算。

2.2 模拟计算结果及分析

2.2.1 施工期间仰拱变形分析

在仰拱底部设置4个监测点,监测点分布如图4所示。在竖直方向上,距离监测点每2 m设置1个监测点,分析在仰拱下方围岩内力以及位移变化规律。

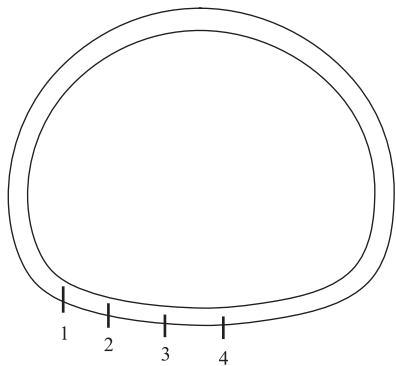


图4 仰拱监测点分布图

无加固圈(即无旋喷桩)仰拱相应监测点位置的位移量如图5所示。

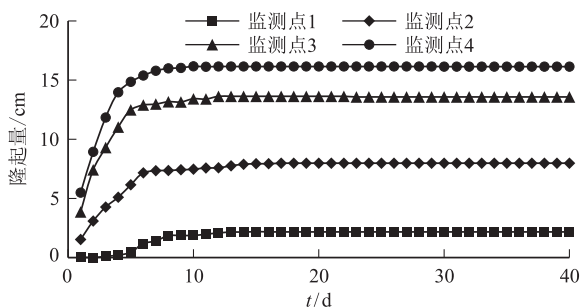


图5 无旋喷桩仰拱监测点变形图

由图5可知,在未采用旋喷桩加固时,4个检测点的变化规律基本相同:随着开挖的进行,仰拱4个监测点的变形量先逐渐增大,而后逐渐趋于稳定。以仰拱中心(监测点4)为例,当开挖隧道至14 m时,隆起量最大为16.3 cm,随着开挖的进行,由于仰拱受到自身重力的影响而出现微量下沉现象,隆起量略微降低,最终变形量稳定在16 cm。边墙与仰拱相交部位隆起量

最小,且随着隧道的开挖进度变化,呈现出先增大后减小的趋势。

当采用旋喷桩进行仰拱加固后,仰拱各监测点隆起量如图6所示。

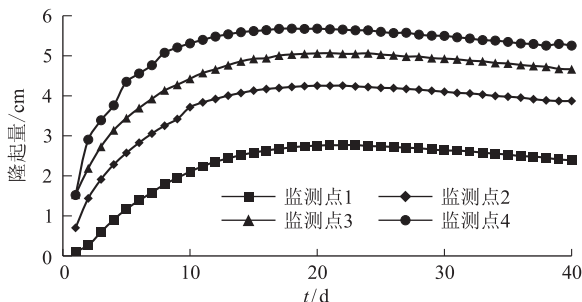


图6 采用旋喷桩加固后仰拱监测点变形图

由图6可知,与无旋喷桩加固时不同,当隧道开挖至距离洞口20 m时,即当 $t=20$ 时,隧道仰拱中心位置隆起量最大为5.66 cm,由于仰拱自身重力的作用隆起量逐渐降低,最终基本稳定在5.26 cm。其余监测点变化规律相似,其中边墙与仰拱相交部位的隆起量最低,在 $t=20$ 后逐渐趋于稳定,最终变形量为2.33 cm。

结果表明,在施工期间对基底仰拱进行旋喷桩加固处理,可以有效减小施工期间基底与仰拱的隆起量,防止由于隆起变形挤压造成衬砌开裂破坏。施工中仰拱与边墙的夹角易产生应力集中现象,需要进行重点专题研究。

有无旋喷桩时仰拱以下围岩监测点的隆起量如图7、图8所示。

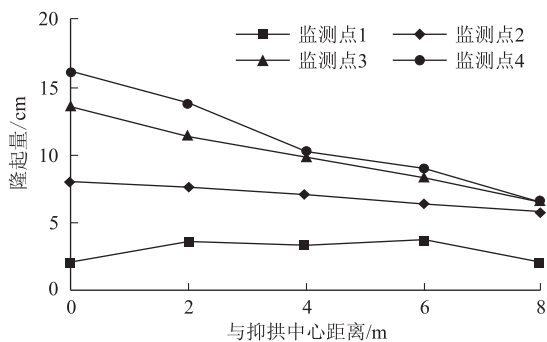


图7 无旋喷桩加固监测点最终隆起量图

由图7、图8可知,在未采用旋喷桩进行加固时,隧道仰拱底部围岩隆起量随着埋深的增大而减小,这说明在没有旋喷桩影响时,围岩自然释放地应力,符合隧道开挖围岩变形的一般规律;在有旋喷桩加固时,仰拱底部围岩变形与埋深变化关系不大,说明旋喷桩提高了围岩的整体稳定性,而围岩应力的释放通过围岩本身与旋喷桩共同承担,避免了由于围岩产生过大变

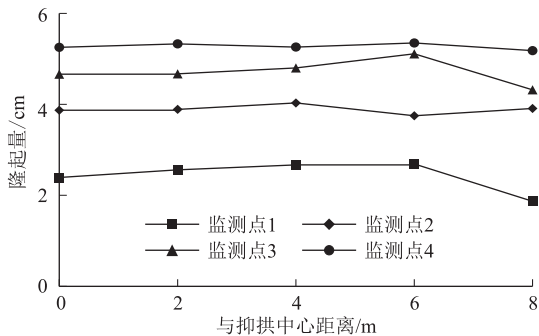


图8 旋喷桩加固后监测点最终隆起量图

形而造成衬砌开裂破坏,提高了地基稳定性和衬砌安全性。

2.2.2 运营期间仰拱动力响应分析

运营期间隧道仰拱部分主要受到列车振动荷载的动力作用影响,因此本节重点研究列车动力荷载作用下,有无旋喷桩对仰拱各监测点动力响应的影响与区别。

一般而言,凡涉及到重载铁路隧道振动响应的分析计算,列车荷载的施加通常分为3种方法:换算土柱法、现场实测荷载法和人工施加激励法^[13-14]。英国国铁中心通过对采集到的大量列车动力荷载数据进行拟合,发现列车荷载可以通过激励函数来表达,该函数中将轮轨系统的竖向相互作用力分成为低频、中频、高频3个频率。其中低频部分是列车自身悬挂系统相对运动所产生的补充频率;中频部分是列车运行时通过钢轨施加在道床基底结构上,被反弹后的振动频率,这是列车振动频率的主要组成部分;高频部分则是轮轨自身系统产生反力作用的振动频率。

由此3种频率组成的函数可以较好地反映轮轨之间的作用力,其表达式为:

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega_1 t) + P_2 \sin(\omega_2 t) + P_3 \sin(\omega_3 t)$$

(1)

式中: P_0 ——车辆的自重,即静载(kg);

P_1 、 P_2 、 P_3 ——低、中、高3部分振动荷载,其表达式为:

$$P_i = M_0 \alpha_i \left(\frac{2\pi v}{L_i} \right)^2$$

(2)

式中: M_0 ——列车簧下结构质量(kg);

α_i ——对应表3中,在3种不同状态下的振动矢量(mm);

v ——列车的运行速度(km/h);

L_i ——对应表3中,在3种不平顺状态下的振动波长(m)。

列车轴重采用典型的重载铁路列车轴重27 t计算,簧下质量为750 kg,根据TB 10625-2017《重载铁

表3 英国铁路管理控制值表(车速为200 km/h)

控制变量	振动波波长/m	正矢量值/mm
行车线路不平顺①	50.00	16.000
	20.00	9.000
	10.00	5.000
线路上作用的附加荷载②	5.00	2.500
	2.00	0.600
	1.00	0.300
轨道磨损附加的荷载③	0.50	0.100
	0.05	0.005

路设计规范》的规定,列车振动荷载的具体取值如表4所示。

表4 本文列车荷载模拟具体参数表

控制变量	振动波波长/m	正矢量值/mm
行车线路不平顺①	10.0	3.000
线路上作用的附加荷载②	2.0	0.300
轨道磨损的附加荷载③	0.5	0.005

通过式(1)、式(2)计算的列车振动荷载可以有效模拟列车动力学特点。因此,本文利用施加人工激励的方式模拟列车振动荷载。

列车以120 km/h的速度经过,提取瞬态钢轨受到的压力,以此作为列车对隧道基底结构的动力荷载,最终得到在列车荷载作用下产生的钢轨压力时程曲线,如图9所示。

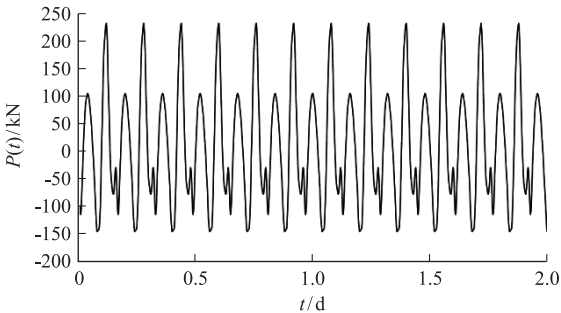


图9 人工激励荷载图

在无旋喷桩加固下,仰拱部分的动力响应(位移与加速度)结果如图10所示。

由图10可知,各监测点处的位移、加速度时程曲线律较相似,其中位移响应仰拱中心位置振幅最大,且达到的峰值也最大,最大位移值达到了2.51 cm,最小位移峰值为0.77 cm,出现在仰拱与边墙交界位置;而加速度响应方面,振幅与峰值上的差异尤为显著。仰拱中心位置的加速度峰值最大为5.11 m/s⁻²,最小加速度峰值出现在仰拱与边墙交界位置,为1.88 m/s⁻²。

当采用旋喷桩进行仰拱加固后,仰拱各监测点隆起量如图11所示。

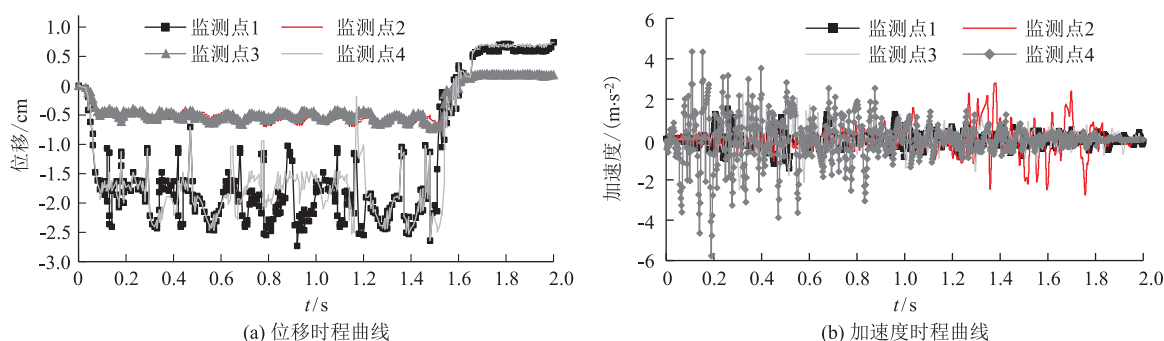


图10 人工激励荷载作用下各监测点动力响应曲线图(无旋喷桩加固)

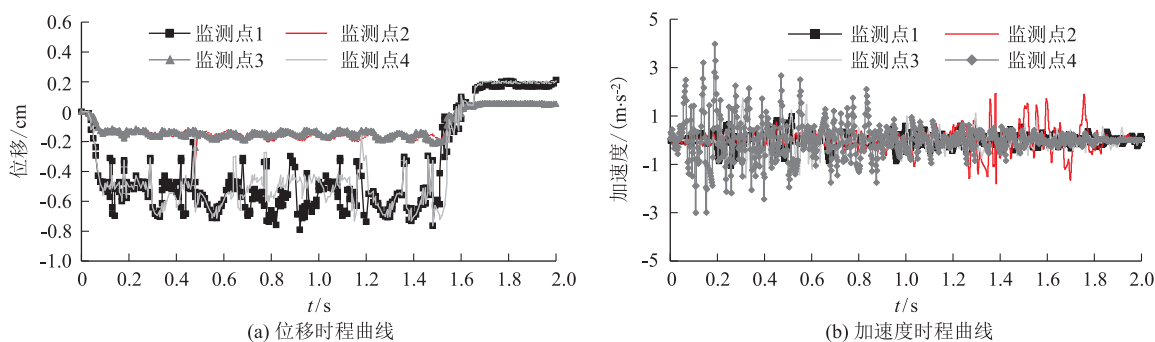


图11 人工激励荷载作用下监测点动力响应曲线图(旋喷桩加固)

由图11可知,当采用旋喷桩进行加固后,各监测点处的位移、加速度时程曲线规律均有明显降低,其中位移响应仰拱中心位置最大振幅降低至0.69 cm,降幅达72.5%;加速度响应方面,仰拱中心位置的加速度峰值最大为 3.29 m/s^2 ,较无加固时降低近36%,结果表明,无论是位移响应还是加速度响应,采用旋喷桩加固后效果均明显。

3 数值模拟结果与实测结果对比

取现场仰拱中心位置隆起量与动力响应监测数据模拟所得结果进行对比,对比结果如图12、图13所示。

由图12、图13可知,随着隧道开挖过程的进行,

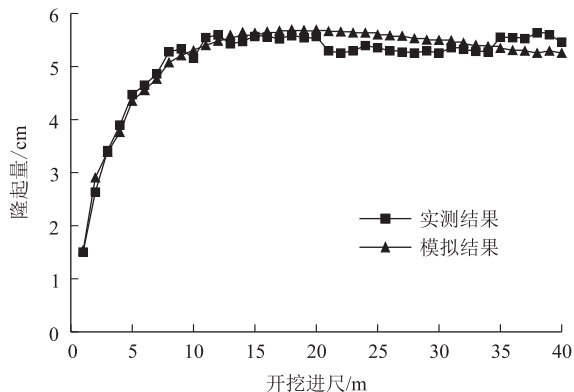


图12 隆起量结果对比图

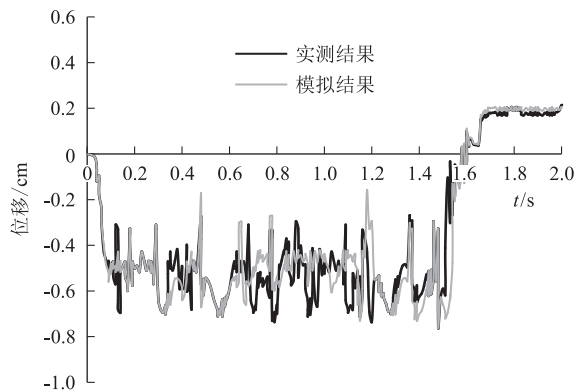


图13 位移响应结果对比图

仰拱中心位置隆起量与实测结果变化规律一致,即先增大后缓慢减小最终趋于稳定,两者最大差值出现在开挖21 m处,隆起量相差4 mm;位移响应结果同样差别很小,两者最大响应差出现在0.8 s处,差值为2 mm,影响很小。因此,数值模拟计算的结果基本上反映了施工过程中隧道仰拱位置的实际变形与响应,模拟变形情况与实测值基本吻合。

4 结论

(1)通过对仰拱部分测点隆起量进行计算分析可知,在无旋喷桩加固时,仰拱部分最大隆起量为16.3 cm,采用旋喷桩加固后,最大隆起量降低至

5.66 cm;在旋喷桩加固后,仰拱各测点的变形在明显降低的同时,变化幅度也开始减小,这说明旋喷桩不仅起到了减小围岩变形的作用,同时也提高了围岩稳定性,缓解了由于围岩释放地应力而造成的衬砌不均匀变形甚至开裂破坏,加固效果显著。

(2)由于仰拱直接受到列车动力荷载的影响,其动力响应特性影响着整个隧道衬砌结构的安全,通过计算分析发现,在运营期间,旋喷桩对仰拱在动力响应的改善方面效果显著;当采用旋喷桩进行加固后,各监测点处的位移、加速度时程曲线规律均有明显降低。在位移响应方面,仰拱中心位置最大振幅由2.51 cm降低至0.69 cm,降幅达到72.5%;加速度响应方面,仰拱中心位置的加速度峰值最大为 3.29 m/s^{-2} ,较无加固时的 5.11 m/s^{-2} 降低了近36%。

(3)文中只针对石楼隧道的工程特点进行了计算分析,未定性考虑重载铁路隧道仰拱与边墙夹角变化对运营期内隧道基底变形的影响。

参考文献:

- [1] 刘宝,李丹峰.重载铁路黄土路堑三联生态护坡入渗稳定性及应用研究[J].铁道勘察,2022,48(3):57-62,68.
LIU Bao, LI Danfeng. Infiltration Stability Analysis and Practical Application of Triple Ecological Protection for Loess Cutting Slope of the Heavy-haul Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(3): 57-62, 68.
- [2] 王虎.湿陷性黄土隧道重载条件下对隧道结构下部的影响分析[J].路基工程,2023(6):80-85.
WANG Hu. Analysis of Influence of Collapsible Loess Tunnel on the Lower Part of the Tunnel Structure under Heavy Load Conditions[J]. Subgrade Engineering, 2023(6): 80-85.
- [3] 郑卫东.重载铁路湿陷性黄土路基工程施工技术探讨[J].技术与市场,2020,27(9):80-81.
ZHENG Weidong. Discussion on Construction Technology of Collapsible Loess Subgrade Engineering of Heavy-haul Railway[J]. Technology and Market, 2020, 27(9): 80-81.
- [4] 杨碧峰,杨晓华.超长旋喷桩在黄土隧道软基加固中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2007(5):16-18.
YANG Bifeng, YANG Xiaohua. Application of Super-long Jet Grouting Pile in Soft Foundation Reinforcement of Loess Tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007(5): 16-18.
- [5] 李小杰.高压旋喷桩复合地基承载力与沉降计算方法分析[J].岩土力学,2004,25(9):1499-1502.
LI Xiaojie. Analysis of Calculation Methods for Bearing Capacity and Settlement of High-pressure Chemical Churning Pile Composite Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1499-1502.
- [6] 朱丽刚.浅埋大断面隧道黄土地层注浆预加固技术应用[J].新乡学院学报,2023,40(12):49-53.
ZHU Ligang. Application of Grouting Pre-reinforcement Technology in Loess Stratum of Shallow Buried Large Section Tunnel[J]. Journal of Xinxiang University, 2023, 40(12): 49-53.
- [7] WONGSAROJ J, SOGA K, MAIR R J. Tunnelling-induced Consolidation Settlements in London Clay[J]. Géotechnique, 2013, 63(13): 1103-1115.
- [8] 方勇,郭建宁,康海波,等.富水地层公路隧道衬砌背后空洞对结构受力的影响[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1648-1658.
FANG Yong, GUO Jianning, KANG Haibo, et al. Influence of Voids Behind Lining on the Mechanical Behavior of Lining Structure of Highway Tunnel in Watery Strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1648-1658.
- [9] 王瑞.列车荷载下回填黄土铁路路堤的动力响应及其长期强度与沉降研究[D].西安:长安大学,2019.
WANG Rui. Study on Dynamic Response, Long-term Strength and Settlement of Railway Embankment Filled with Loess under Train Load[D]. Xi'an: Changan University, 2019.
- [10] 孙文.黄土隧道洞口段地震动力失稳机制及对策研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
SUN Wen. Study on Seismic Dynamic Instability Mechanism and Countermeasures of Loess Tunnel Entrance Section[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.
- [11] 梁金平.地基加固成桩对邻近高速铁路变形影响研究[J].高速铁路技术,2023,14(5):13-17,87.
LIANG Jinping. A Study on Impact of Foundation Reinforcement Piles on Deformation of Adjacent High-speed Railways[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5): 13-17, 87.
- [12] 陈朝阳.黄土地区浅埋铁路隧道施工控制关键技术研究[D].石家庄铁道大学,2020.
CHEN Chaoyang. Research on Key Technology of Construction Control of Shallow Buried Railway Tunnel in Loess Area[D]. Shijiazhuang Railway University, 2020.
- [13] 丁祖德.高速铁路隧道基底软岩动力特性及结构安全性研究[D].长沙:中南大学,2012.
DING Zude. Study on Dynamic Characteristics and Structural Safety of Soft Rock at the Base of High-speed Railway Tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [14] 张亚辉,安洋,郭唯伟,等.围岩空洞对重载铁路隧道动力稳定性的影响[J].铁道勘察,2023,49(4):135-141.
ZHANG Yahui, AN Yang, GUO Weiwei, et al. Influence of Surrounding Rock Voids on the Dynamic Stability of Heavy-haul Railway Tunnels[J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(4): 135-141.
- [15] 罗军,王炳龙,陕耀,等.邻近高速铁路单根高压旋喷桩施工对周围土体的变形影响[J].高速铁路技术,2023,14(1):13-19.
LUO Jun, WANG Binglong, SHAN Yao, et al. Deformation Impact of Construction of a Single High-pressure Jet Grouting Pile in the Vicinity of a High-speed Railway on Surrounding Soil Mass[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 13-19.
- [16] Yahui Z. Prediction Model of Surrounding Rock Deformation in Double-continuous-arch Tunnel based on the ABC-WNN[J]. Railway Sciences, 2024, 3(6): 717-730.