

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211008002

地铁振动下盾构隧道道床剥离病害演化规律研究*

陈鹏涛^{1,2}, 漆泰岳^{1,2}, 梁孝^{1,2}, 雷波^{1,2}, 晋智毅^{1,2}

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 盾构隧道整体道床剥离病害是影响地铁行车稳定和运营安全的重要因素。为研究列车振动作用下剥离病害的演化规律,以成都地铁某区段为背景,使用有限元软件ABAQUS建立盾构隧道数值模型,根据地层情况、列车轴重及载客情况确定隧道结构受力,利用DLOAD子程序编写移动荷载实现列车动载模拟,分析列车动载作用下剥离的分布及发展规律,确定结构最薄弱位置。同时,设计剥离裂缝现场动态监测系统并用于实测,得到的实测结果与数值模拟规律一致。最后根据研究中涉及的影响因素提出了剥离病害的防治建议。研究表明:①列车动载作用初期的冲击荷载对道床剥离影响最大,随后在动载作用下,剥离量幅值会逐渐减小;②道床伸缩缝是结构最薄弱位置,列车动载作用引起伸缩缝处的剥离量最大;③提升道床-管片结构整体性可作为病害防治设计思路,如提升道床与管片间粘结面强度、增加锚固措施等,可减少剥离病害的发生。

关键词: 盾构隧道; 整体道床; 剥离病害; 列车振动; 数值模拟; 现场监测

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0797-10

Study on the Evolution of Detachment Disease of Shield Tunnel Track Bed under Metro Vibration

CHEN Pengtao^{1,2}, QI Taiyue^{1,2}, LIANG Xiao^{1,2}, LEI Bo^{1,2}, JIN Zhiyi^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Shield tunnel monolithic track bed detachment is an important factor affecting the stability and operational safety of the metro. In order to study the evolution of detachment disease of track bed under the action of train vibration, a section of the Chengdu metro was used as a background to establish a numerical model of the shield tunnel using the finite element software ABAQUS. The forces on the tunnel structure were determined according to the ground conditions, the axle weight of the train and the passenger load, and the DLOAD subroutine was used to program the moving load to realize the simulation of dynamic train load. The distribution and development pattern of detachment under dynamic train loads was analyzed and the weakest position of the structure was identified. At the same time, an on-site dynamic monitoring system for detachment cracks was designed and used for site measurements, and the results obtained were consistent with the numerical simulation. Finally, recommendations for the control of detachment disease were made based on the influencing factors involved

* 收稿日期:2021-10-08;修回日期:2021-12-27

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978582)资助

作者简介:陈鹏涛(1998—),男,硕士研究生。主要从事隧道与地下工程方向研究。E-mail:271307424@qq.com

通讯作者:漆泰岳(1958—),男,教授,博导。主要从事隧道及地下工程教学研究。E-mail:qitaiyue58@126.com

in the study. The results of the study show that: (1) The impact load at the beginning of the train's dynamic action has the greatest effect on the detachment of the track bed, and then the magnitude of the detachment decreases under dynamic action. (2) The expansion joint in the track bed is the weakest position in the structure and the detachment amount at the joint is the largest due to dynamic train loads. (3) Improving the structural integrity of the bed and lining can be used as a design idea for disease prevention and control, such as improving the strength of the bonding surface between the bed and the lining and increasing anchorage measures, which can reduce the occurrence of detachment disease.

Keywords: Shield tunnel; Monolithic track bed; detachment disease; Train vibration; Numerical simulation; On-site monitoring

0 引言

地铁作为城市轨道交通的主要组成部分,其病害机理研究和病害控制对后期运营安全具有重要意义。地铁盾构区段在运营过程中往往会出现道床剥离病害,道床剥离容易造成区间排水流入剥离裂缝并渗入道床底部,在列车振动下进一步造成裂缝翻浆冒泥和道床脱空,直接影响行车的稳定性和地铁运营安全,是重大的安全隐患。

2000年,上海地铁一号线盾构隧道出现了淤泥地基变形,使盾构隧道不均匀沉降引起的道床剥离现象^[1],胡怡东^[2]和黄金光^[3]认为施工过程中基面清理不彻底及地下水渗透导致道床和仰拱间形成空隙,后期列车振动的长期作用和渗水等因素造成剥离病害恶化。初步研究表明,列车动荷载是引起各种隧道病害的主要原因^[4-7],而目前,我国对盾构隧道道床剥离病害的研究较少,对病害的形成机理、监控量测及整治办法均处于起步阶段,国内外学者的研究主要集中在列车振动下隧道衬砌结构的动力响应及周围土体变形而引起的长期沉降,对于剥离病害的形成机理及发展趋势,只有少数学者做了研究分析^[8-11],季存建^[8]采用数值模拟,计算了明挖、矿山、盾构不同区间的道床脱空时的受力特征,提出道床安全评价标准;杨宁等^[9]分别建立整体式道床和浮置式道床数值模型,输入实测轮轨力,分析不同道床下的隧道结构动力响应特征,提出浮置板轨道结构能有效减小列车振动下的隧道结构沉降;龚雨晨^[10]采用数值模拟,建立有限元-无限元耦合模型,在不同工况下模拟列车振动下道床与管片的粘结面力学特性,并提出加固方案;冀维都^[11]设计了剥离病害自动监测体系,体系内容涉及轮轨力、剥

离裂缝和管片沉降三部分。

从现有研究成果可看出,目前我国针对道床剥离、脱空相关病害研究还不完善,现有的研究手段以病害统计、原因初步分析居多,而对剥离病害的产生机理及发展规律研究较少,针对地层水土压力、列车动载等外部荷载对病害的影响研究几乎空缺。基于现有研究的不足,利用ABAQUS三维数值模拟,并结合现场动态监测,针对地铁列车动荷载下盾构隧道道床剥离病害的发展规律进行研究,为地铁施工设计及后期运营的病害防治提供参考。

1 工程概况

1.1 工程背景

成都地铁已经开通运营的线路均出现了大量的道床剥离病害现象,其中地铁七号线出现了500余处,地铁一号线三期工程更是出现了上千处剥离病害,如图1所示为现场剥离病害情况。选取成都地铁七号线部分区段进行研究,地铁七号线为成都市内环线,全长59.083 km,全程埋深处于泥岩地

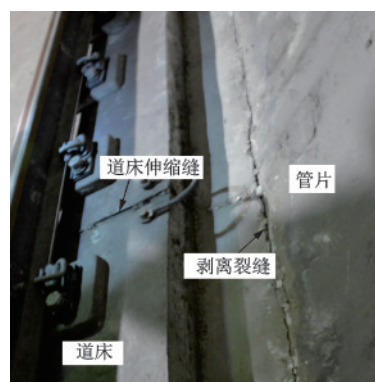


图1 道床-管片剥离病害

Fig.1 Track bed - lining detachment disease

层。经现场调研,某盾构区间长1 080 m,共出现剥离病害37处,其中上行7处,下行30处,剥离位置通常出现在道床伸缩缝附近1 m范围内,剥离裂缝通常在正常运营后3个月陆续发现,出现后在3个月后到达稳定不再发展,最终的剥离裂缝宽度通常在0.5 mm左右。

目前国内地铁轨道道床普遍采用一种自然释放结构,整体道床无防水设计且直接依附于盾构管片上,地下线路整体道床一般间隔12.5 m设置道床伸缩缝,道床结构有钢轨、扣件、轨枕及整体道床组成。经现场调研发现,盾构区间的剥离病害主要发生在普通整体道床铺设段。普通整体道床结构设计如图2所示。

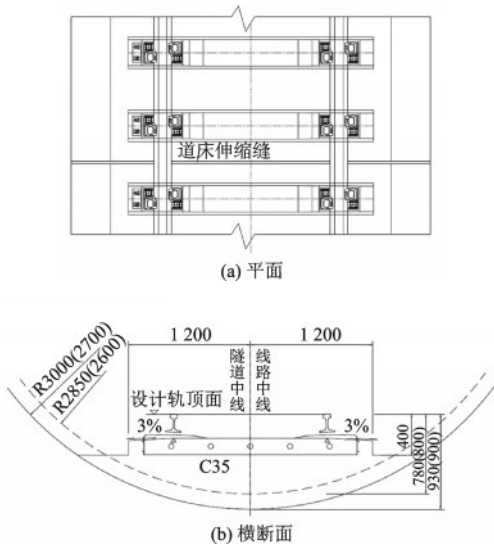


图2 道床结构断面

本次研究取某区间最低点处,通常此处列车行驶速度达到最高,动力效应最为明显,断面的地质断面如图3所示。

1.2 病害原因初步分析

参考相关文献,剥离病害通常由管片不均匀沉降引起,而管片不均匀沉降通常与壁后注浆材料强度相关^[12],因此首先对注浆材料展开测试试验。

参考现场施工资料,盾尾同步注浆浆液比为水泥:水:砂:粉煤灰:膨润土=1:2.3:3.75:1.88:0.4,水胶比0.8,二次注浆使用早期强度更高的水泥-水玻璃双浆液。盾尾注浆与推进同步,而二次注浆一般每个2~3环进行一次。为了了解注浆材料属性,分别取现场浆液进行了材料强度试验,如图4所示。

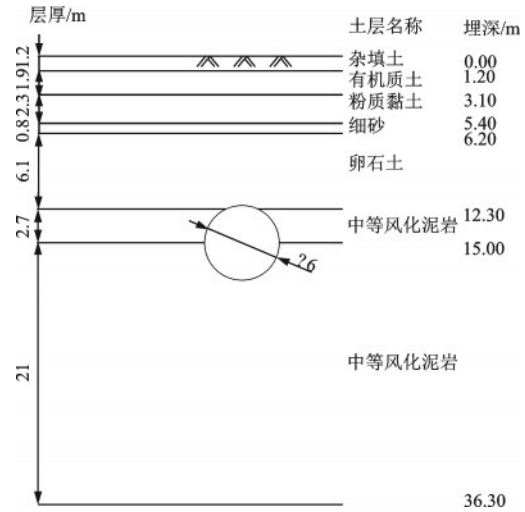


图3 区间地质断面

Fig.3 Interval geological section

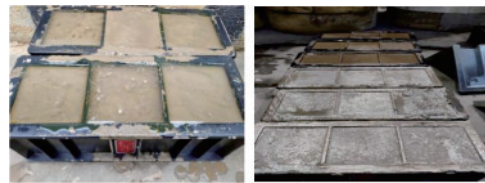


图4 注浆材料试验

Fig.4 Grouting material testing

分别将试块养护1~7 d,单轴抗压强度测试见表1。

表1 浆液试块单轴抗压强度

Table 1 Uniaxial compressive strength of grouted test blocks 单位:MPa

组号	同步注浆液试块/d			二次注浆液试块/d		
	1	3	7	1	3	7
1	0	0.18	0.27	1.84	2.19	2.22
2	0	0.19	0.2	1.82	2.15	2.21
3	0	0.18	0.2	1.81	2.13	2.21
均值	0	0.18	0.22	1.83	2.16	2.21

从测试结果来看,同步注浆液单轴抗压强度很低,其初凝时间约为8 h,但是在1 d后仍未成形,在养护7 d后强度也较差。而二次注浆液水化反应很快,初凝时间在55 s左右,且早期强度高,养护1 d后就能达到较高强度,3 d过后强度趋于稳定。另外脱模后测量试块尺寸并计算试块固结后的体积与浆液体积的比值可得到不同浆液的结石率,二次注浆液结石率接近100%,而同步注浆液为80%~90%,说明二次注浆液填充效果更好。

因此,经初步调研及试验分析,剥离病害产生的主要原因为:盾构掘进同步注浆填充效果一般,凝结后强度较低,且盾构施工的掘进速率为5h推进2~3环,小于浆液初凝时间,同步注浆液在推进时受到挤压易流出。几方面的原因导致同步注浆不密实,注浆层对管片约束不够,在列车动载的反复冲击及水土压力作用下,盾构管片出现不均匀沉降,而道床和管片抗弯刚度不一致,故出现不协调变形。整体道床与管片间是一种自然结合面,黏结强度低易受拉开裂,导致了剥离病害的产生和发展。

由上述分析可看出列车动载是影响剥离病害的重要外部因素之一,所以以数值模拟和现场监测手段,针对列车动载下的剥离病害演化规律进行研究。

2 数值模拟

2.1 建模基本假设

本研究数值模型的建立主要基于如下假设:

(1)研究关注的是道床管片间的剥离脱空病害,为隧道结构内部问题,故采用荷载-结构模型进行建模;

(2)为方便建模及计算,忽略了管片上螺栓手孔和管片接头止水条的影响;

(3)管片之间使用螺栓嵌入约束进行连接,并在接触面设置硬接触;

(4)现场进行整体道床施工为直接浇筑,无凿毛锚固等措施,道床管片间的黏结使用 Cohesive Behavior(黏性行为)模拟。

2.2 数值模型建立

本研究主要关注道床与管片间的剥离问题,故采用荷载-结构模型,以接地弹簧代替注浆层及土体对隧道结构的约束,荷载-结构模型如图5所示。

地铁盾构隧道外径为6 m,内径5.4 m,管片厚度为0.3 m,幅宽1.5 m,道床厚度为0.6 m,建模幅长为28.5 m,由19环管片构成,每两环管片之间由16颗M27螺栓连接,道床铺设分为4段,长度分别为1.48、12.5、12.48和1.98 m,此组合可使中间两端完整道床变形不受外界约束限制,结果更接近实际情况,道床之间设置20 mm的伸缩缝,正线采用60 kg/m、U75V热轧钢轨铺设,标准轨距取1.435 m,道床、钢

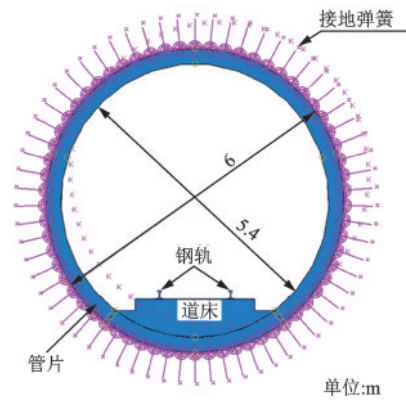


图5 荷载-结构模型

Fig.5 Load-structure model

轨、螺栓及管片的隧道结构模型如图6所示。

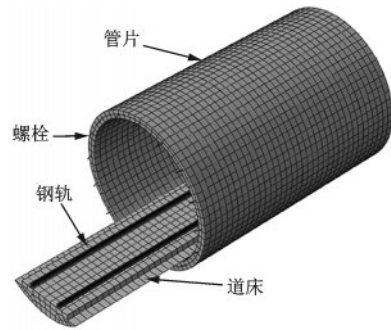


图6 隧道结构模型

Fig.6 Tunnel structural model

根据现场注浆液的配比和地层情况,计算弹簧刚度过程如下:

$$k_1 = Khb = 2.625 \times 10^6 \text{ N/m} \quad (1)$$

$$k_2 = \frac{E \cdot S}{L} = 2.239 \times 10^7 \text{ N/m} \quad (2)$$

$$k = k_1 + k_2 = 2.501 \times 10^7 \text{ N/m} \quad (3)$$

式中, k_1 为土体提供的弹簧刚度; K 为围岩弹性抗力系数,参考地勘报告取值; h 为模型中两个相邻衬砌单元长度的一半; b 为衬砌单元纵向长度; k_2 为注浆层提供的弹簧刚度; E 为实验测得的注浆材料弹性模量; S 为衬砌单元外侧表面积; L 为注浆层厚度; k 为计算时使用的弹簧刚度。

预制的混凝土衬砌管片强度等级为C50,整体道床为C35采用现场浇筑,模型各部件的基本物理参数见表2。

2.3 计算条件

本次计算考虑对比道床和管片间有黏结和无黏结两种情况。通过拉拔试验测试得到分时浇筑

表2 模型基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of the model

部件	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
钢轨	7.72E3	2.06E5	0.27
道床	2.45E3	32.5	0.2
管片	2.45E3	35.5	0.2

的C35与C50混凝土试块间的黏结面强度在0.35~0.5 MPa,计算时按0.4 MPa取值,有黏结时,管片和道床间设置黏性接触,无黏结时,设置硬接触。道床之间和管片之间均采用法向硬接触及切向摩擦模型模拟。钢轨和道床间设置弹簧连接代替扣件作用,查阅相关规范^[13]可知铺轨所用DZIII型扣件,扣件间距600 mm,幅宽150 mm,刚度为50 kN/mm,阻尼取75 kN/(m/s)。

根据工程概况提供的隧道埋深及地质条件,可计算得到对应的围岩压力,其分布如图7所示,各部分压力的计算过程如下:

$$p_1 = \sum \gamma_{\text{rati}} \cdot Z_i = 133.918 \text{ kPa} \quad (4)$$

$$g = d\gamma = 7.203 \text{ kPa} \quad (5)$$

$$p_g = \pi g = 22.617 \text{ kPa} \quad (6)$$

$$p_2 = p_1 + p_g = 156.535 \text{ kPa} \quad (7)$$

$$e_1 = \lambda p_1 = 66.959 \text{ kPa} \quad (8)$$

$$e_2 = \lambda (p_1 + \sum \gamma_{\text{rati}} Z_i) = 138.827 \text{ kPa} \quad (9)$$

式中, p_1 为结构上部竖直荷载; γ_{rati} 为各土层对应重度; Z_i 为各土层埋深; g 为结构自重换算均布荷载; d 为管片厚度; γ 为管片重度; p_g 为结构自重产生的地基反力; p_2 为地基反力; e_1 水平荷载上端集度; λ 为土体侧压力系数; e_2 为水平荷载下端集度。

使用FORTRAN语言编写DLOAD子程序模拟列车移动荷载,现场地铁列车为A8编组,中间车为6辆,A型车轴重16 t,定员载客320人,经计算单轮静载为96 kN,车辆定距为15.7 m,固定轴距为2.5 m,故相邻两车辆前车后轮与后车前轮距离为7.1 m,车辆长度为22.8 m^[13],按照此车轴分布位置进行荷载布置,如图8所示,图中P为列车的单轮静载。荷载移动速率按该线路设计时速取80 km/h,经计算加载时间 $t=6.15$ s。道床结构模型及荷载移动方向示意如图9所示。

根据工程概况,剥离病害主要发生在伸缩缝附近,在2#、3#道床伸缩缝处的断面设置开裂面观测线,即在管片与道床的交界线位置的对应节点。计算得到列车通过1次时隧道结构的动力响应。

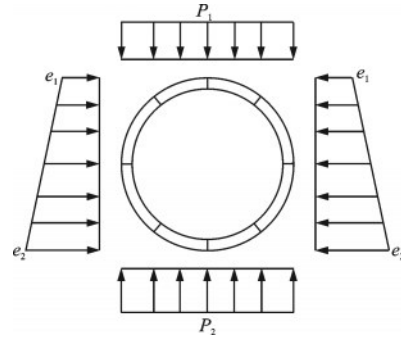


图7 围岩压力示意

Fig.7 Diagram of surrounding rock pressure

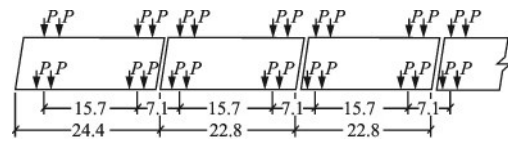


图8 荷载分布示意

Fig.8 Load distribution diagram

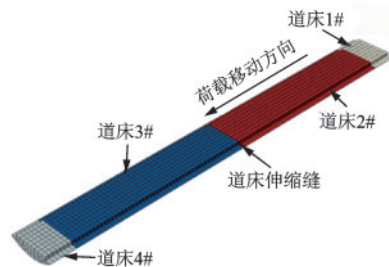


图9 道床结构模型

Fig.9 Track bed structural model

2.4 计算结果

加载结束后得到中间道床2#及道床3#的伸缩缝处COPEN即剥离量计算结果,选取如图10所示的测点进行剥离量观测,取前3秒的计算结果导出时程曲线,如图11~12所示。荷载刚到达伸缩缝处时会产生明显的剥离变化,随着荷载的稳定并在伸缩缝两侧逐渐达到均匀分布,剥离量会恢复到接近初始状态。

图11和图12分别显示了道床管片间无黏结和有黏结条件,在移动荷载下剥离量的变化情况。

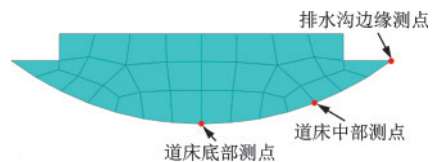


图10 道床测点示意

Fig.10 Diagram of roadbed measuring points

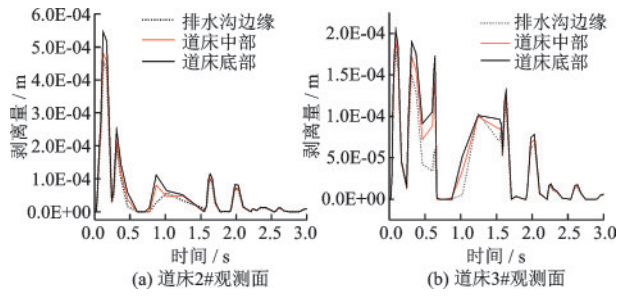


图 11 无黏结伸缩缝处剥离量

Fig.11 Detachment at expansion joints without bonding

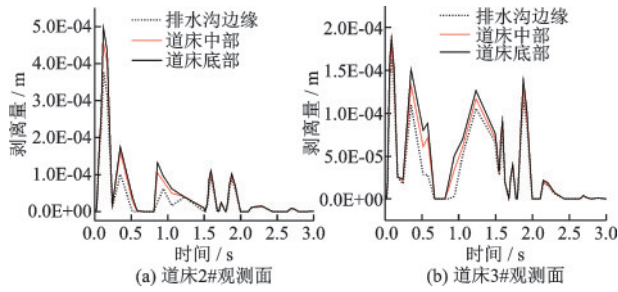


图 12 有黏结伸缩缝处剥离量

Fig.12 Detachment at expansion joints with bonding

由图对比可知,整体道床各位置的剥离量变化规律基本一致,从道床底部到排水沟边缘位置自中间向两侧剥离量减小。两种接触面条件下,剥离变化的曲线走势基本一致,设置黏结强度得到的剥离量结果略小。从计算开始,移动荷载先到达道床 2#,且荷载主要分布在道床 2#一侧,其剥离相对于道床 3#更加明显,随着移动荷载稳定施加,伸缩缝两侧受力分布逐渐均匀,剥离逐渐恢复至初始位置。

由分析可知,有无黏结强度情况下的剥离量大小有所区别,但剥离变化规律保持一致,因此以有黏结强度的工况为例,提取计算云图。在地应力及列车动载作用下,隧道结构发生变形, $t=0.122$ s时,道床 2#伸缩缝观测面达到最大剥离量,此时结构变形如图 13 所示。图 14 记录了第一组轮对通过道床 2 时的剥离量变化过程。 $t=0.014$ s时,轮对到达道床 1#和 2#伸缩缝处,道床 2 产生剥离。随

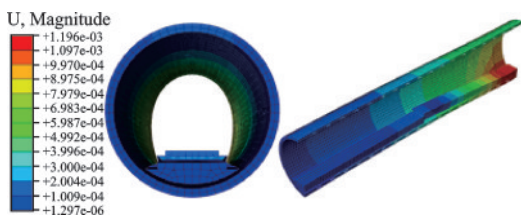


图 13 隧道结构变形云图

Fig.13 Contour of tunnel structure deformation

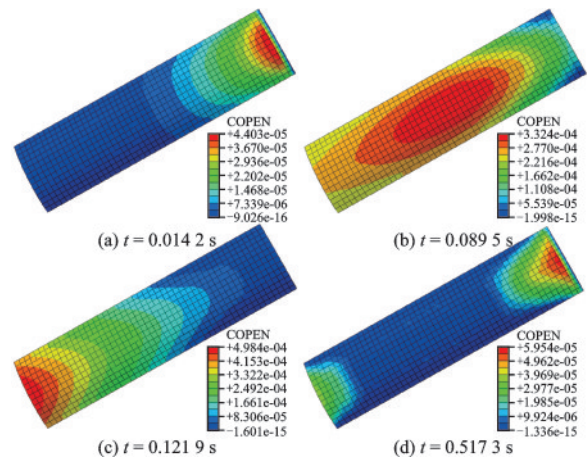


图 14 剥离随时间变化云图

Fig.14 Contour diagram of detachment over time

后最大剥离量随荷载方向移动(图 14(b)、(c)), $t=0.122$ s时,道床 2#伸缩缝断面底部发生全程最大剥离脱空,达到 0.498 mm。 $t=0.517$ s,轮对驶离道床 2#,下一组轮对进入道床 2#,最大剥离发生在与 1#伸缩缝处。

提取道床接缝处各观测点的剥离量数据,见表 3。从表中可看出道床 2#、3#两断面达到最大剥离的时间接近,从道床底部到排水沟边缘的剥离量差异较小。排水沟边缘位置的剥离裂缝处于隧道结构表面,相对道床底部更方便量测,故考虑在现场对排水沟边缘处的剥离裂缝进行动态监测,和数值模拟计算结果对照,确认列车振动荷载对剥离病害的影响。

表 3 剥离病害动力响应数值计算结果

Table 3 Results of a study on the dynamic response of detachment disease under different methods

黏结面强度/MPa	道床编号	测量位置	最大剥离量/mm	达到最大剥离量时间/s
0	2#	道床底部	0.55	0.12
		道床中部	0.49	0.12
		排水沟边缘	0.46	0.12
	3#	道床底部	0.20	0.09
		道床中部	0.12	0.09
		排水沟边缘	0.18	0.09
0.4	2#	道床底部	0.50	0.12
		道床中部	0.46	0.12
		排水沟边缘	0.38	0.12
	3#	道床底部	0.19	0.09
		道床中部	0.18	0.09
		排水沟边缘	0.17	0.09

3 现场监测

3.1 监测系统设计

3.1.1 测缝计设计

本文参考刚性拉杆位移计分体式三向测缝计^[15]设计了一种测缝计的方案,图15和图16所示为设计的测缝计结构及安装示意图,在保护外壳内安装弹簧自复位直线位移传感器,测缝计安装在存在剥离断面的道床排水沟上,拉弦末端固定于管片上,列车通过时,管片与道床振动带动拉弦发生伸缩,从而记录到道床与管片的相对位移,即剥离量。

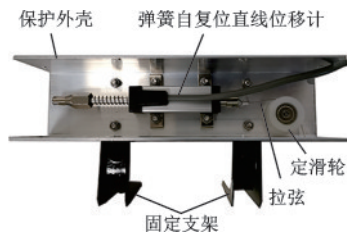


图15 测缝计结构

Fig.15 Seam gauge construction

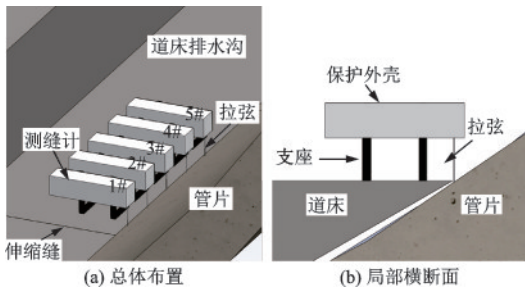


图16 测缝计安装示意

Fig.16 Installation diagram of the seam gauge

由于地铁开通运营后,剥离病害出现的位置难以预测,故选择运营线路上刚开始出现剥离裂缝的位置作为监测断面,同时根据计算结果,现场计划在道床伸缩缝附近,列车先通过的一侧道床排水沟安装测缝计。为减少测量误差,使用5只测缝计在1 m范围内等间距0.2 m布置,测得列车通过时裂缝的张开-闭合位移谱。组装测缝计所使用的位移计的量程范围为10 mm,精度为0.01 mm。

3.1.2 数据采集方案

现场监测中,数据采集系统只能安置在距离现场较远的联络通道内,位移计输出原始信号为微弱

的电压信号,电压信号在传输过程中容易受到外界电磁信号干扰及导线电阻的影响而衰减,使结果与实际产生偏差,因此需要设计稳定的信号传输方式以获得准确数据。

采用测力钢轨法识别列车动态以实现数据的自动采集。在断面处钢轨表面布置应变计,通过实验室标定试验,确定应变计输出端电压变化超过0.5 V,代表列车将通过监测断面。应变计输出端连接至采集卡,使用C语言编程,控制软件在识别到应变计输出端电压变化超过0.5 V时启动数据采集,设置数据采集延时为10 s,超时即停止采集,待下一辆列车通过断面时再次自启采集,如此可实现在监测周期内所有列车通过断面时道床-管片剥离量的变化规律测量。图17展示了监测系统的构成和实现信号传输与数据采集的过程,数据传输使用信号变送模块进行电压-电流-电压的传输方式,以保证远距离数据传输的准确性和稳定性。

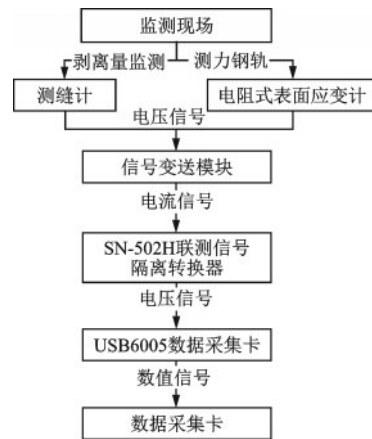


图17 现场监测系统构成

Fig.17 On-site monitoring system components

3.2 现场监测布置

本监测选址在成都地铁某区间站下行线路,监测断面选择区间最低点联络横通道附近,选择的测点为刚开始发生剥离位置,使用不同厚度厚薄规塞入裂缝测得裂缝间隙约为0.1 mm。图18为监测现场布置示意图,监测断面选择在距离联络通道的20 m远处,测缝计和MO信号变送模块布置在监测点,信号隔离转换器、数据采集卡和计算机布置在联络通道内的数据采集站,各监测点布置及5支测缝计的排列及编号如图19所示。

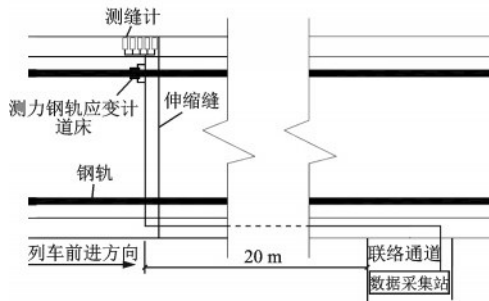


图 18 现场监测布置示意

Fig.18 Diagram of the site monitoring arrangement

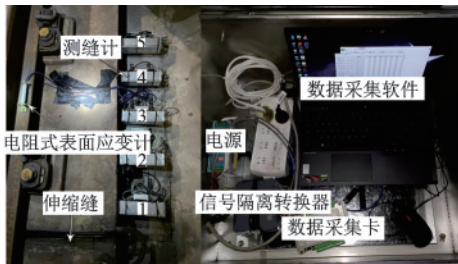


图 19 监测设备

Fig.19 Monitoring equipment

3.3 监测结果

本次监测周期为 1 d,采集到 232 趟列车通过时的剥离裂缝变化数据,如图 20 为早晨 8:08~9:08 时段内 13 辆列车动载作用时测缝计所测得剥离裂缝的变化情况,早高峰时段的振动荷载最大,剥离量变化相对最明显。除去列车通过断面的时段,在其余时段内均未采集数据,证明了监测系统的持续性和可重复性。

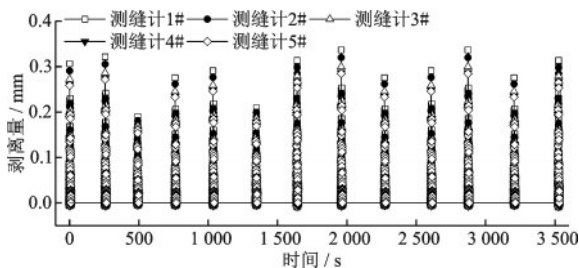


图 20 剥离量变化时间历程

Fig.20 Time course of detachment changes

图 20 中 1 958 s~1 968 s 时段测得的剥离量变化相对最大,提取该段的监测结果进行放大后的信号如图 21 所示,放大后的信号曲线平滑,信噪比较高,证明了现场信号传输的稳定性。

从监测结果可看出,距离道床伸缩缝最近的测

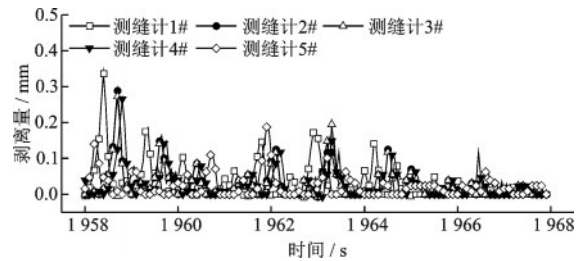


图 21 剥离量变化时间历程局部放大图示

Fig.21 Local enlargement of the time history of detachment

缝计 1# 相对发生的剥离量最大。剥离裂缝振动的幅值和频率不呈现明显的周期性,列车到达监测断面振动荷载刚施加时,剥离裂缝第一次振动张开达到最大为 0.34 mm,随着动荷载继续施加,剥离裂缝振动幅值减小,随后在初始值附近振动。

4 结果分析

4.1 结果对比

以上通过数值模拟和现场监测的方式得到了列车振动荷载作用时间内,道床排水沟边缘位置盾构隧道道床剥离的变化规律。提取数值模拟中有粘结面强度工况下道床 2# 观测面的数据与测缝计 1# 测点结果对比,如图 22 所示,在列车振动下,数值模拟和现场监测得到的剥离演化规律基本一致,两者均在动载刚开始作用的阶段剥离量达到最大,随后在动载继续作用下,剥离的振动幅值会减小,说明列车振动初期的冲击荷载对剥离影响最大,稳定后的动载影响会减小。

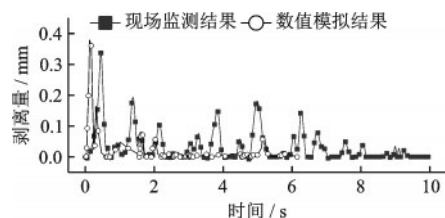


图 22 剥离病害监测与计算结果对比

Fig.22 Comparison of monitoring results with calculated results of detachment disease

参考测力钢轨应变计测得结果,对应时段通过列车的单轮荷载均值为 96.84 kN,与数值计算条件接近,现场列车通过断面时间为 9.5 s,故列车通过的实际速度为 67 km/h。计算与监测结果对比见表 4,数值模拟与现场监测条件基本满足一致,由于该

区间长度较短仅1 080 m,故列车通过区间最低点时未达到设计时速便开始减速,实际速度比计算条件偏低,导致了现场监测结果偏小。此外本监测选择的测点是刚开始发生剥离的位置,按照计算和监测得到的规律,已经开始发生剥离的裂缝发展趋势会比从无到有时减小,也是影响监测结果偏小的原因。

表4 剥离病害动力响应不同方法研究结果

Table 4 Results of the dynamic response of detachment disease by different methods

方法	最大剥离量/ mm	列车速度/ (km·h ⁻¹)	单轮荷载/kN
数值模拟	0.38	80	96
现场监测	0.34	67	96.84

4.2 防治建议

通过两种方法对道床剥离在地铁振动下的演化规律的研究,得到的结果规律一致,确定了振动初期的冲击荷载会使道床产生最大的剥离脱空,结合计算中涉及的影响因素,提出针对剥离病害的防治措施如下:

(1) 盾构隧道施工同步注浆采用凝结快、强度高的新型材料,并对薄弱位置辅助二次注浆,以增强注浆层对管片的约束能力,减小管片工后沉降。

(2) 整体道床铺设时可加入黏性材料,增强道床与管片接触面黏结强度;在道床伸缩缝附近布置螺栓、锚杆等结构连接道床与管片,增强结构整体性,减小列车振动对道床影响。

(3) 发现剥离病害后,及时进行填充处理,填充材料应采用渗透性好、流动性强、黏结强度高的粘结剂,实现剥离封闭与黏合,以防其继续发展。

5 结 论

建立了盾构隧道荷载-结构数值模型,分析了在列车动载下整体道床剥离病害的演化规律,并通过现场监测验证了数值模拟的结果,所得结论如下:

(1) 列车动载作用过程中,初期的冲击作用会对整体道床剥离产生最大影响,随着动载的继续作用,剥离会逐渐减小并恢复到初始位置。

(2) 列车振动下,整体道床最大剥离位置会随着荷载移动,伸缩缝两侧断面会产生全程最大剥离变

形,是最薄弱位置。

(3) 道床与管片的黏结面强度是影响剥离量的重要因素,仅设置0.4 MPa的黏结面强度剥离量相比无黏结小10%~20%,故病害预防设计可从增加粘结面强度,增加结构整体性考虑。

(4) 设计了一套完整的剥离裂缝现场动态监测系统,包括传感器设计与布置、数据传输方案和数值采集软件开发,运用到现场监测的结果证明了方案的持续性和可重复性。监测结果与数值模拟结果规律基本一致,验证了数值模拟的准确性。

(5) 研究仅反映了列车振动下剥离量动态变化,故仍存在不完善需要继续研究:短时间的振动作用后,剥离会基本恢复至初始位置,而现场调研中发现了很多已经成型的大裂缝剥离病害,初步预测是结构疲劳变形的结果。可通过数值模拟对剥离病害发展进行长期预测,并结合长期监测和模型试验进行更深入研究。

参考文献:

- [1] 邱小佩,陈高艺.盾构隧道管片与道床的稳定加固处理[J].岩土工程界,2000,3(12):38-39.
Qiu X P, Chen G Y. Stabilization and reinforcement of the shield tunnel tube sheet and roadbed[J]. Geotechnical Engineering World, 2000, 3(12): 38-39. (in Chinese)
- [2] 胡怡东.水性环氧在广州地铁1号线暗挖区间道床病害治理中的应用[J].新型建筑材料,2005(12):73-74.
Hu Y D. Application of water-based epoxy in the management of roadbed defects in the concealed excavation interval of Guangzhou Metro Line 1[J]. New Construction Materials, 2005(12): 73-74. (in Chinese)
- [3] 黄金光.某隧道弹性整体道床病害整治施工方法[J].隧道建设,2009,29(5):597-599.
Huang J G. Construction method for the remediation of elastic overall roadbed defects in a tunnel[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(5): 597-599. (in Chinese)
- [4] 张冬梅,李钰.地铁荷载引起的盾构隧道及土层长期沉降研究[J].防灾减灾工程学报,2015,35(5):563-567.
Zhang D M, Li Y. Long-term settlement of shield tunnel in soft clay due to vehicle vibration[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(5): 563-567. (in Chinese)
- [5] 赵洁黎.某软土地区盾构隧道结构病害成因分析及治理措施研究[D].杭州:浙江大学,2019.
Zhao J L. Cause analysis and control measures research

- of shield tunnel structural diseases in a soft soil area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [6] Deng F H, Mo H H, Zeng Q J, et al. Analysis of the dynamic response of a shield tunnel in soft soil under a metro-train vibrating load [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 16(4): 509-513.
- [7] 刘力,李严威,李志佳.地铁列车动荷载引起的盾构隧道地层沉降研究[J].特种结构,2020,37(6):48-53.
Liu L, Li Y W, Li Z J. Settlement of shield tunnel and stratum induced by metro train load [J]. Special Structures, 2020, 37(6): 48-53. (in Chinese)
- [8] 季存建.地铁区间道床脱空数值模拟及评价标准研究[J].现代交通技术,2014,11(6):74-77.
Ji C J. Study on numerical simulation and evaluation standard of ballast disengaging for metro sections [J]. Modern Transportation Technology, 2014, 11 (6) : 74-77. (in Chinese)
- [9] 杨宁,耿传智.整体和浮置式道床隧道结构动应力计算分析[J].现代城市轨道交通,2015(1):24-27,33.
Yang N, Gen C Z. Calculation and analysis on dynamics stress of tunnel structure with integral and floating slab track[J]. Modern Urban Transit, 2015(1): 24-27, 33. (in Chinese)
- [10] 龚雨晨.地铁道床与管片剥离病害数值仿真分析[D].成都:西南交通大学,2020.
- Gong Y C. Numerical simulation analysis of peeling disease between metro track bed and segment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [11] 冀维都.地铁道床与管片剥离病害现场实时自动监测体系研究[D].成都:西南交通大学,2020.
Ji W D. Study on real-time automatic monitoring system for stripping disease between monolithic concrete bed and shield segments[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [12] 何剑,彭玥镡,梁孝,等.盾构隧道整体道床剥离病害规律研究[J].现代隧道技术,2022,59(1):232-240.
He J, Peng Y K, Liang X, et al. Analysis on the stripping disease of monolithic trackbed in shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 232-240. (in Chinese)
- [13] 成都市地铁设计规范:DBJ 51/T074—2017[S].成都:西南交通大学出版社,2017.
- [14] 地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [15] 李之中,车佳磊,吴茜,等.三向测缝计研究[J].西北水电,2011(增1):115-118.
Li Z Z, Che J L, Wu Q, et al. Study of three-direction joint meter[J]. Northwest Hydropower, 2011(Sup1): 115-118. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)