

# 地铁整体道床脱空破损机理及结构补强措施

李艳祥<sup>1</sup> 王普林<sup>2</sup> 张 旭<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 南京地铁运营有限责任公司, 210012, 南京//第一作者, 工程师)

**摘 要** 随着我国地铁运营里程的增多,其线路的整体道床脱空破损的问题也日渐突出。为更好地指导道床脱空破损的整治,通过理论假定,建立道床受力模型,并对其进行破损模型验证分析。提出临界脱空面,通过对临界脱空面渗水至浸水过程来探讨分析道床脱空破损的机理。对于具体的道床破损整治工程,基于理论分析的结果,采用环氧补强加固方法。经过三年运营期的跟踪与反馈,表明此破损机理的分析与采用的施工工艺是符合实际情况的。

**关键词** 地铁; 线路道床; 道床脱空破损; 临界脱空面; 结构补强

**中图分类号** U213.2<sup>+</sup>41

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.05.027

## Mechanism of Subway Monolithic Track Bed Void and Damage and the Structural Reinforcement

LI Yanxiang, WANG Pulin, ZHANG Xu

**Abstract** With the increase of subway operation mileage in China, the monolithic track bed void and damage problems are becoming serious. In order to effectively guide the rectification of track bed damages, a stress model of the ballast bed is established based on theoretical hypotheses, which is verified and analyzed through a damage model. On this basis, the water seepage and immersion process on critical hollow surface is discussed, the mechanism of the bed damage is analyzed. For the specific track bed damage remediation project, based on the results of theoretical analysis, the epoxy reinforcement method is adopted. After three years of operation tracking and feedback, the analysis of the damage mechanism and the construction process adopted prove to be in line with the actual situation.

**Key words** subway; railway track bed; ballast void and damage; critical void surface; structural reinforcement

**First-author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

整体道床是地铁线路土建结构的重要组成部分。但受各种因素的影响,部分区段的道床内部或

道床与基底交界面会出现脱空。如果区间排水沟存在破损或者主体结构存在裂缝,地下水就会渗入到道床内部脱空面或者道床与基底的交界面,进而使道床内部或道床与下部结构在振动作用下破损。在列车往复运行的振动荷载作用下,交界面的混凝土逐渐被研磨成泥浆、砂子与石子,从而从道床及结构面的各种缝隙中泛出,长而久之形成整体道床的脱空破损。道床的脱空破损不仅缩短了结构体系的使用寿命,增加了养护成本,也给地铁的正常运营带来不利影响,甚至造成严重的安全隐患<sup>[1-2]</sup>。

目前国内对整体道床病害的研究较多。文献[3]整体分析了地铁隧道的病害,并介绍了地铁整体式道床结构病害;文献[4]给出了整体道床病害检测与评价方法;文献[5]研究了整体道床破损的施工整治措施。本文基于一些基本假定,分析了整体道床脱空破损的机理,并提出了相应的补强加固措施,为类似工程提供参考与借鉴。

## 1 整体道床的脱空破损机理

### 1.1 基本假定

由于列车、轨道、整体道床及基底等之间相互作用,故整体道床的受力情况比较复杂。本文为突出研究重点,对不确定的受力模型及传递路径做一些基本假定:

1) 假定钢轨、扣件与轨枕为一个整体,起到传递荷载的媒介作用。

2) 假定作用于整体道床上的摩擦力由道床承担。道床脱空面的摩擦力,以及道床与基底交界面的摩擦力由接触面承担。

3) 不考虑列车运行对道床的横向作用。

### 1.2 整体道床力学分析

轨道所受纵向力包括钢轨爬行力、坡道上列车重力的纵向分力、制动力、摩擦纵向力和温度力等<sup>[6]</sup>。由基本假定可知,钢轨上的纵向力由道床承

担或传递。道床表面的阻力作用表现为整体道床对摩擦力的吸收与传递。根据基本假定,取微道床片  $dh$  作为阻力单元,则  $dh$  所受阻力如图 1 所示。其中  $dh$  所受到的摩擦力为:

$$dF = F + fAdh - F = fAdh$$

式中:

$F$ ——下部道床对微道床片的作用力;

$f$ ——考虑列车荷载压重影响的混凝土体积摩擦系数,可按压重下混凝土梁板的剪切破坏允许值<sup>[7]</sup>进行取值;

$A$ ——道床片计算面积。

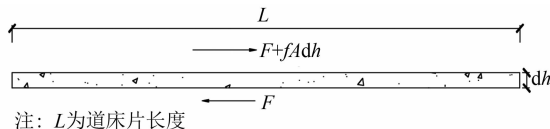


图 1 道床片  $dh$  受力模型

对于高度为  $h$  的道床(如图 2 所示),从道床底部对厚度  $h$  进行积分,可得道床整体所受摩擦力  $F$  为:

$$F = \int_0^h dF = \int_0^h fA_1 dh \quad (1)$$

式中:

$A_1$ ——考虑道床宽度  $B_1$  和道床块长度  $L_1$  的面积函数,  $A_1 = g(B_1, L_1)$ 。

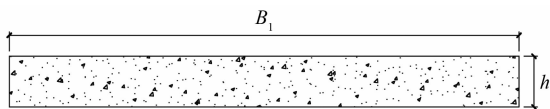


图 2 道床的横断面图

在施工建造或者运营维护等各阶段,部分区段道床内部会产生脱空,如图 3 所示。对于道床脱空部分,由于物理交界面的形成,道床应力在脱空部位重分布。根据基本假定,钢轨整体传递的摩擦力由未破损的上部结构与上下部结构间交界面共同承担,则道床的受力转变为:

$$F = F_1 + \Delta F = \int_0^{h_1} fA_1 dh + \mu A_2 \quad (2)$$

式中:

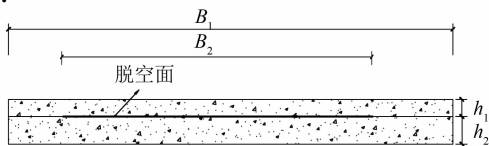


图 3 有脱空面的道床横断面图

$\Delta F$ ——道床脱空面上下两部分之间的摩擦力;

$h_1$ ——上部未破损道床的高度;

$\mu$ ——考虑列车荷载压重影响的混凝土摩擦系数,可按文献[8]取值;

$A_2$ ——道床脱空宽度  $B_2$  与脱空部位长度  $L_2$  的面积函数,  $A_2 = g(B_2, L_2)$ 。

### 1.3 道床脱空破损的机理验证

当道床发生脱空时,在脱空的交界面,道床混凝土的受力边界发生变化,钢轨、扣件与轨枕整体传递的摩擦力由道床上部未发生脱空的混凝土与上下部结构间的交界面共同承担。此外,道床极限状态承载力还应符合要求,故道床的受力为

$$F = F_1 + \Delta F = \int_0^{h_1} fAdh + \mu A_2, \text{ 且 } F \geq M \quad (3)$$

式中:

$M$ ——列车在各种工况下传递到道床的最大摩擦力。

根据式(3)可知,在道床内必然存在一个结构面使得摩擦力  $M$  与阻力  $F$  达到极限平衡状态,此结构面为实际运营状态下道床发生脱空的临界脱空面。此时,有

$$F = \int_0^{h_L} fAdh + \mu A_L = M \quad (4)$$

式中:

$h_L$ ——临界脱空面处未发生道床破损部分的高度;

$A_L$ ——临界脱空面的面积。

将相关数据及边界条件代入式(4),可以得到  $A_L$  与  $h_L$  相关的理论解答或者解析解答,本文主要研究破损机理,对于理论解答或者解析解答不予探讨。当临界脱空面内渗入地下水时,则临界脱空面的摩擦系数  $\mu$  减小;为了保证道床的极限承载力  $F = M$ ,则必然会  $A_L$  使摩擦力  $M$  与抗力  $F$  达到极限平衡状态。通常情况下,轨枕的混凝土强度大于道床混凝土强度,则包含轨枕的道床上部混凝土的整体强度也大于道床下部混凝土的整体强度,因而道床下部混凝土先于上部混凝土破坏,所以增大  $A_L$  时必然会造成下部道床的破损(如图 4 所示)。根据文献[8],干燥状态下的  $\mu$  高于湿润状态下的  $\mu$ ,则渗水量越大,  $\mu$  就越小,待全断面均处于浸水状态时,  $\mu$  达最小值  $\mu_{\min}$ ,此时道床脱空面  $A_L$  达到最大值  $A_{L,\max}$ ,如图 4 所示。这样,在道床脱空面逐渐破损

的过程中,原脱空面与临界脱空面之间的混凝土被逐渐分解成泥浆、砂子与石子,在列车来回往复的运行中从道床内部脱出,散落于道床两侧的水沟,造成道床内部脱空破损。

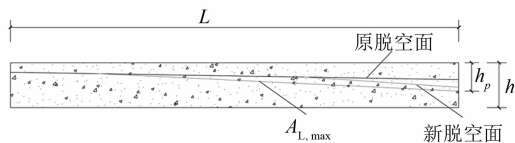


图4 脱空面的发展状态

## 2 破损道床的结构补强措施

根据整体道床破损机理,临界脱空面只要处于浸水状态,道床就会发生脱空破损。整治破损道床的思路就是使整治后的道床可承担荷载 $F \geq M$ 。基于此分析,只要采用考虑列车荷载压重影响的体积摩擦系数 $f$ 不小于原混凝土的材料进行补强加固,破损空间充填材料与上部未破损部分形成加固后的整体,就可以使整治后的道床部分所承担的荷载 $F \geq M$ ,从而为地铁安全运营提供保障。

### 2.1 施工材料及施工前期准备

为不中断地铁正常运营,减少经济社会影响,整体道床加固只能在地铁正常运营的停运期进行。地铁的停运期一般为0:00—3:30,时间很短。此外,为了保证整体道床加固补强的施工质量,补强材料要满足严格的要求。本工程采用环氧型高渗性亲水固结补强材料(配外加剂)进行补强加固。

在对整体道床进行补强加固前,为了能有效地把道床内部的水挤出,避免道床内外的水力联系,也为避免在注浆过程中出现串浆及冒浆等情况,时道床内部所注环氧浆液充分填充,达到最佳加固效果,先对道床同侧墙及水沟的连接部位进行封闭注浆处理。

### 2.2 整体道床注浆加固

加固前,先根据道床的结构设计图纸,目测确定道床脱空破损的最严重位置;然后,进行钻孔取芯,量测所取芯样的未破损部位的长度,进而计算出道床脱空的最底面至道床表面的最大高度 $h_p$ (如图4所示);最后,按照最大高度 $h_p$ 制定加固方案。

具体加固施工步骤如下:

1) 在道床两根轨道之间近似均匀布设3排注浆孔。控制排距为45~50 cm,孔径为32 mm,孔距

为50 cm。采用中间内错式的打孔方式,按照 $h_p+5$  cm的深度进行钻孔,使钻孔进入下部未破损道床的深度为5 cm,并按要求进行清孔清渣。

2) 清除孔内杂质后,采用早强水泥进行注浆管埋设。注浆管为铝合金管,采用双管埋设方式。

3) 待早强水泥凝固后,采用环氧材料由中间向外依次注浆。环氧材料注浆压力为0.5~0.6 MPa。在化学注浆过程中,如注浆压力不达要求,则应采用水泥-水玻璃双液浆进行充填灌注。双液浆注浆初始压力为0.3 MPa,达到环氧材料灌浆压力后再改用环氧材料进行灌注。达到环氧材料注浆压力后维持5 min,方可结束注浆。

4) 在环氧材料注浆时,如出现局部串浆及冒浆,应对串浆冒浆部位先进行封闭处理,之后再继续施行环氧材料注浆作业。

### 2.3 同步测量

施工前,应在施工区域整体道床上设置监测点,以便对注浆施工区域的道床结构设备及钢轨状态进行测量。测量工作频率及注意事项为:

1) 每次注浆作业前都要进行测量。只有确认道床再无沉降变化,才能进行施工。

2) 每次注浆作业时都要同步进行监测,且监测次数不得少于2次。

3) 每次注浆完成后,都要再次监测,并保存相应监测结果,以便为第二天的正常运营提供依据。根据监测结果,如发现道床有沉降变化,则应立即打开注浆口进行泄压处理。使道床恢复正常,以保证第二天列车的正常运行。

此外,注浆加固施工作业时,如有异常情况,则轨道专业应随时测量轨道几何尺寸。

### 2.4 补浆工作

由于补强作业施工时间短,且第二天地铁正常运营,注浆材料可能会被挤出或者更密实。因此,注浆工作次日需要对道床结构设备及钢轨状态进行测量。如数据无异常,则只需要打开注浆头采用0.1~0.2 MPa的压力进行密实性补浆填充,并再次进行同步测量。如数据有异常,则需要分析异常的原因,并制定方案进行整治。

补浆填充后,需进行连续3 d的道床结构设备及钢轨状态的监测。如监测结果无异常,则加固补强工作基本完成,可以拆除注浆管,并修复道床表面裂缝及饰面。

(下转第122页)

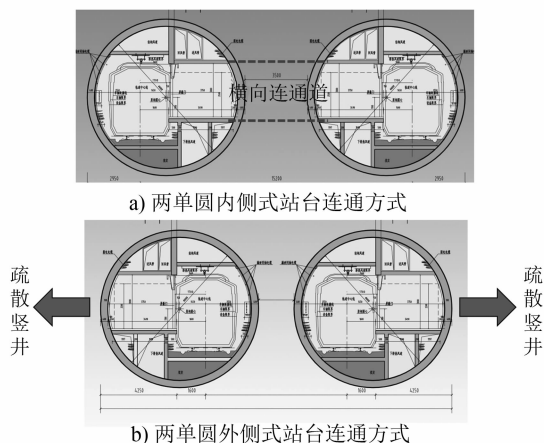


图6 两单圆左右布置断面车站常见的站台连通方式

盾构法车站的技术方案进行初步研究,从客流适应、建筑功能、消防疏散、结构设计及施工安全等方面提出了软土地层盾构法施工车站的建筑布局方案、结构设计要点及施工控制策略,可为远期盾构

法车站的实施提供一定参考和借鉴。

## 参考文献

- [1] (日)地盘工学会著.盾构法的调查·设计·施工[M].牛青山,译.北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.
- [3] 何川,丁建隆,李围.配合盾构法修建地铁车站的技术方案[J].西南交通大学学报,2005,40(3): 293.
- [4] 路美丽,刘维宁,孙晓静.盾构法、暗挖法结合修建地铁车站在我国的应用前景[J].都市轨道交通,2004,17(2): 30.
- [5] 刘洪波.城市轨道交通地下车站暗挖工法综述[J].城市轨道交通研究,2015(7): 99.
- [6] 刘洪波.软土地层暗挖施工地铁车站技术的研究与应用[J].应用技术学报,2018(2): 154.
- [7] 曹文宏,申伟强.软土地层中暗挖轨道交通车站设计方案探讨[J].地下工程与隧道,2015(1): 1.

(收稿日期:2018-05-17)

(上接第 117 页)

## 2.5 运营期的监测

整体道床补强加固完成后,运营工班每月应按照巡检计划对此处进行巡查与检测,并做好相关数据的上报。

某项目实施补强加固措施后,对其进行了接近3年的监测。根据近3年的运营数据,现场轨道几何尺寸数据与道床结构表面病害均没有异常。工程实践结果表明,本文的道床分析与补强加固措施是符合现场实际的。

## 3 结语

本文通过基本假定,提出道床受力的力学模型;对整体道床进行力学分析,提出临界脱空面,并通过对临界脱空面渗水至浸水过程的探讨来分析道床脱空破损的机理。

基于整体道床脱空破损的机理,本文提出采用环氧树脂进行补强加固的措施。3年正常运营期的跟踪与反馈结果表明,本文对整体道床破坏机理的分析是符合工程实际情况的,补强加固措施具有实

际操作性和良好的加固效果。

## 参考文献

- [1] 黄宏伟.隧道及地下工程的全寿命风险管理[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 中华人民共和国铁道部.铁路桥隧建筑物劣化评定标准隧道:TB/T 2820.2—1997[S].北京:中国铁道出版社,1997.
- [3] 董飞,房倩,张顶立,等.北京地铁运营隧道病害状态分析[J].土木工程学报,2017(6): 104.
- [4] 赵振江,乔小雷.地铁隧道整体道床病害机理及防治措施[J].城市轨道交通研究,2014(12): 98.
- [5] 胡怡东.EAA 环氧树脂在广州地铁1号线整体道床病害治理中的应用[J].城市轨道交通研究,2005(6): 75.
- [6] 练松良.隧道工程[M].上海:同济大学出版社,2010.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [8] 陈富强,田唯,刘占国,等.匹配浇筑混凝土接触面摩擦系数试验研究[J].中国港湾建设,2014(12): 34.

(收稿日期:2018-06-28)