

文章编号: 1005-0523(2015)06-0008-06

高铁隧道复合衬砌脱空统计分析防治

江星宏¹, 闫明超², 曾 鹏², 杨新安¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中国中铁五局四公司, 广东 韶关 512031)

摘要:隧道施工中衬砌脱空缺陷广泛存在,若处理不及时将极大的影响衬砌结构承载力和耐久性。现有研究多局限于分析拱顶脱空的成因、影响和整治方法,缺乏探究衬砌脱空的分布规律、空洞特性及其与围岩条件的关系。通过统计方法分析某隧道整治前后无损检测结果,可得衬砌脱空为主要施工缺陷,拱顶脱空占总脱空 37%;脱空长度分布服从 λ 为 4.76 m 的泊松函数,深度分布服从 $N(9.3, 3.62)$ 的正态分布;围岩条件越好,脱空长度越大,深度越小;注浆整治效果在拱顶好而在边墙部分较差。研究结果对脱空缺陷无损检测、脱空处理及施工预防具有重要意义。

关键词:衬砌脱空;脱空位置;脱空长度;脱空深度;注浆整治

中图分类号:U25

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.06.002

随着我国铁路网结构的不断完善和线网水平的提高,大量隧道正在或计划修建。受围岩条件复杂、施工控制不严和混凝土材料自身收缩徐变等因素的影响,新建隧道衬砌脱空缺陷严重,为隧道开裂、渗漏水、压溃掉块等病害的发生埋下隐患^[1]。

国内外学者针对衬砌脱空的危害和机理、检测与防治做了大量研究^[2-5],对地质雷达无损检测在脱空防治中的应用做了大量试验,对其测量和解析做出了标定^[6-8]。研究表明,地质雷达脱空检测精度达探测电磁波波长的 $1/4$ ^[8],一般小于 50 mm,对于确定空洞大小及识别空洞特征具有良好效果。现有研究多局限于分析衬砌拱顶脱空的成因、影响和整治方法,缺乏探究脱空空洞大小与围岩等级及断面形式的关系,对衬砌脱空后结构不良状态的研究停留在数值模拟阶段,缺乏实测验证^[9]。

本文结合某隧道衬砌脱空无损检测结果,统计分析衬砌脱空分布的长度特征、深度特征及注浆整治结果,对施工缺陷类型、脱空分布、脱空规律及注浆整治效果进行研究。

1 背景介绍

某隧道为国内在建特长隧道之一,是沪昆客专全线控制性工程。隧区由一系列北东向平行排列的开阔短轴褶曲和高角度压性逆冲断层组成,区内节理发育,节理面张开 1~15 mm,延伸长度 0.5~5 m。隧区断裂破碎带与地表分水岭一致,地表水沿断层裂隙下渗。隧区集高承压水、岩溶、断层破碎带、煤层瓦斯、采空区、高地应力、岩爆等不良地质于一体,施工难度大,属一级高风险隧道。为控制开挖风险,保障施工安全和工期,应对施工衬砌脱空进行重点控制。

2 病害类型与脱空分布

隧道开挖、支护完成后,主要存在初支脱空、初支后不密实、二衬后脱空、二衬后不密实和二衬厚度不足等缺陷。本隧道缺陷统计共 468 处,其中脱空 385 处,占 82%;不密实或欠密实共 61 处,占 13%;欠厚 14 处,

收稿日期:2015-06-11

作者简介:江星宏(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为隧道工程,城市地下工程。

通讯作者:杨新安(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为隧道工程,城市地下工程。

占4.7%。衬砌脱空为隧道施工中最主要缺陷类型,施工中需重点预防。

无损检测纵向测线分别布置在隧道拱顶、左拱腰、左边墙、左仰拱、右拱腰、右边墙、右仰拱。统计各部位脱空情况如图1所示。

由图可知,隧道拱顶脱空最多,占37%,左、右边墙脱空分别占15%、23%,左右拱腰各占11%,仰拱小于5%。对比分析可知,脱空发生概率由大到小依次为拱顶、边墙、拱腰、仰拱。拱顶脱空为主要脱空,边墙、拱腰脱空相对较少,但仍占相当比例,在脱空特征识别及脱空缺陷防治时不容忽视。

不同围岩条件下施工工法与支护参数存在差异,脱空特征及其影响程度不同。不同围岩条件下衬砌脱空统计如图2所示。由图可知,任意等级围岩拱顶脱空均最多,占总脱空的30%~50%。Ⅰ、Ⅱ级围岩边墙脱空比例大于拱腰,Ⅲ级围岩边墙脱空少于拱腰。围岩越好,开挖变形越小,因施工控制不良引起的衬砌脱空缺陷无法由围岩变形充填,脱空出现的可能性越高,对于脱空缺陷的检测和防治不宜只针对工程地质不良区段,需全面进行。

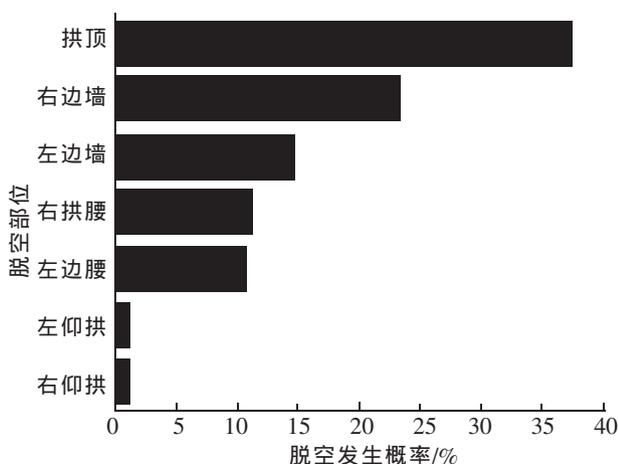


图1 不同部位衬砌脱空分布示意图

Fig.1 Distribution of lining disengaging

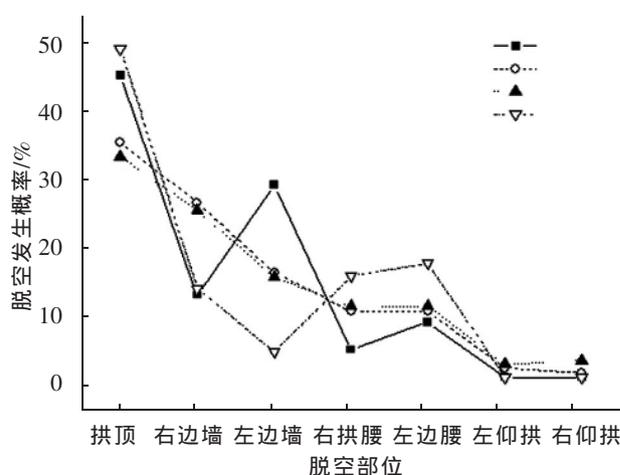


图2 不同围岩等级衬砌脱空分布

Fig.2 Distribution of lining disengaging in different surrounding rock

3 脱空特性

隧道脱空沿线路纵向为脱空长度,沿隧道径向为脱空深度,沿隧道环向为脱空宽度。对脱空长度、脱空深度及不同围岩条件下脱空分布特征进行研究,分析脱空性状,有利于无损检测测线布置、地质雷达天线主频率选定、整治方案及注浆参数选定。

3.1 长度规律

脱空长度与围岩条件、支护设计和开挖方法及作业人员技术能力等相关,衬砌脱空长度分布情况如图3中散点所示。由图可知,长度小于5 m时,脱空频率随脱空长度增加而线性递增;长度大于5 m时,脱空频率随脱空长度增加而指数下降;分布规律与泊松分布相似。函数拟合得到此分布函数见图3右上角,拟合曲线如图中实线所示,拟合结果与概率分布散点图有较好的一致性,能较好的反映散点分布规律^[10]。受围岩条件、台车刚度、混凝土质量、施工质量等因素的综合影响,脱空长度分布期望值为4.76 m,脱空长度主要介于4~8 m。此分布规律可用于确定注浆整治中注浆孔的布置及注浆量的确定,也可用于分析脱空产生原因,确定预防措施。

统计不同围岩等级脱空数目、脱空长度如表1。由表可知,检测区段内脱空发生在Ⅰ、Ⅱ级围岩的次数较多,Ⅲ级较少,这与围岩条件及支护方式相关。随着围岩等级的提高,脱空长度均值由大变形区段的5.14 m增加到Ⅲ级围岩的7.33 m,平均脱空长度呈线性增加。围岩条件的好坏决定开挖、支护方式及围岩变形能力,对衬砌脱空长度有较大影响。

统计进口双线大跨段和左右洞单线段脱空数目、脱空长度如表2。双线大跨段和左右洞单线段衬砌单位脱空间距均约为20 m,大跨段略大;大跨段平均脱空长度为7.55 m,大于单线段平均脱空长度6.52 m。大跨段同等条件下隧道开挖面积更大,二衬混凝土设计厚度和收缩徐变更大,模板台车更长,施工控制更难,脱空长度较单线段增长1 m。相较于单线段,大跨段围岩及衬砌结构受力更为复杂,更大的脱空长度会使其受力状态进一步恶化,施工中须加大防治力度。

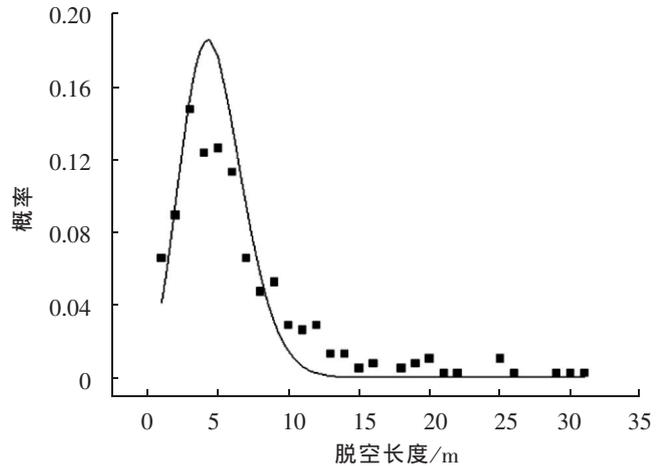


图3 衬砌脱空长度分布及特性拟合

Fig.3 Distribution and feature fitting of disengaging length

表1 不同等级围岩脱空长度

Tab.1 Disengaging length of different surrounding rock levels

围岩等级	脱空数/处	脱空总长/m	平均脱空/m
	24	176	7.33
	151	1 034	6.85
	158	1 083	6.85
	45	235	5.22
大变形	7	36	5.14

表2 不同区段围岩脱空长度

Tab.2 Different disengaging length between large-scale section and normal single section

脱空部位	线路长/m	脱空数/处	总长/m	脱空均值/m
大跨段	1 210.2	53	400	7.55
单线段	6 317.5	332	2 164	6.52

3.2 深度规律

衬砌脱空深度分布如图4中散点所示。由图可知,脱空深度为10 cm时频率最高,并以10 cm为中心向两侧递减,整体上表现为正态分布。采用正态分布拟合得图中正态曲线,拟合结果与散点分布具有较好一致性。由拟合结果可知,隧道脱空深度期望值为9.3 cm,标准差为3.6 cm,隧道脱空深度主要集中于7~12 cm。

不同围岩等级衬砌脱空缺陷统计结果如表3所示。由表可知,随围岩等级的降低,衬砌脱空深度由Ⅰ级围岩平均脱空深度8.63 cm增加到大变形围岩的12.71 cm,表明围岩条件极大地影响了衬砌脱空深度,围岩条件越好,衬砌脱空深度越小,围岩条件越差,脱空深度越大。

衬砌脱空深度在隧道不同部位分布情况如表4所示。由表可知,隧道不同部位脱空深度为8~12 cm,右仰拱及拱顶平均脱空深度最大,分别为11.6,10.51 cm,边墙部分脱空相对较小,不同部位围岩脱空深度没有明显差别,最大脱空深度与最小脱空深度相差3 cm。

表3 不同等级围岩脱空深度
Tab.3 Disengaging depth of different levels of surrounding rock

围岩等级	脱空数/处	总深/cm	平均脱空/cm
	24	207	8.63
	151	1487	9.85
	158	1473	9.32
	45	545	12.11
大变形	7	89	12.71

4 脱空危害

隧道衬砌脱空是施工过程中普遍存在的缺陷类型,产生原因很多,如开挖爆破质量控制不佳、塌方处理不彻底、回填不密实、防水板挂设松弛度不当、注浆压力不足、泵管拆除过早、模架变形和混凝土收缩等。脱空缺陷的存在使附近围岩失去支承,引起二次松弛土压,导致脱离掉块或围岩塌方;脱空缺陷的存在使得衬砌结构受力不均,引起局部应力集中,使混凝土开裂,地下水进入其中腐蚀钢筋,影响衬砌结构使用寿命及运营安全^[3-6]。

对衬砌脱空规律的研究已经得到,隧道施工完成后,脱空长度服从 $\lambda=4.76$ m的泊松分布,深度服从均值 $\mu=9.3$,方差 $\sigma=3.62$ 的正态分布,故可认为典型脱空长约5 m,深约10 cm。围岩条件较好时,二衬结构承担荷载较少,脱空对其应力分布影响较小;围岩条件较差时,二衬要发挥支承作用,脱空对其受力影响大。假定脱空宽度为3 m,采用二维有限元软件模拟一级围岩下不同部位出现衬砌脱空的工况^[9]。

分析可知,无脱空缺陷存在时,围岩与衬砌结构相互作用下,衬砌拱部弯矩较小,边墙和仰拱部位弯矩较大,边墙外侧、仰拱内侧拉应力较大;拱顶脱空时,拱顶和拱腰弯矩明显加大,约为无脱空情况的2倍,拱顶外侧,拱腰内侧出现较小拉应力;拱腰脱空时,衬砌结构受力极度不利,结构最大弯矩为无脱空时20多倍,拱腰内侧拉应力集中;边墙脱空时,最大弯矩位于边墙脱空部位,为无脱空时5倍,脱空部位外侧、临近脱空部位内侧出现拉应力集中。

脱空缺陷的存在,极大的破坏了围岩和衬砌结构间的协同受力,影响二衬结构受力状态,脱空处及脱空四周产生集中应力,拱腰脱空时影响最大。过大拉应力分布易引起混凝土开裂,降低结构防水功能,影响结构稳定性和耐久性,给运营安全埋下隐患。

5 脱空整治与评价

综合考虑施工可行性和整治成本,采用控制注浆方式进行脱空缺陷整治,整治流程如图6所示。

参考《高速铁路隧道工程施工技术指南》^[11],二衬混凝土强度达到设计强度后采用贴近防水板面的预埋注浆管逐级加压注浆。注浆前打开所有止浆阀门,先对每组二衬混凝土最低处的注浆孔注浆,当水泥砂浆从其它注浆管溢出时,用木塞加无纺布堵塞有砂浆溢出注浆管。竖向预留孔注浆压力为0.3~0.5 MPa,纵向预

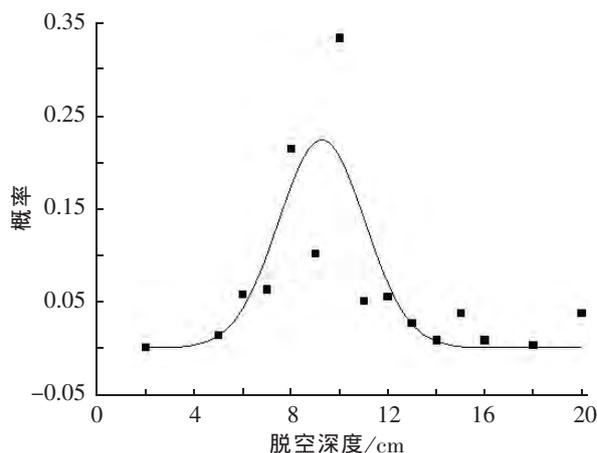


图4 脱空深度分布及拟合特性

Fig.4 Distribution and feature fitting of lining disengaging depth

表4 脱空深度在不同部位分布

Tab.4 Distribution of lining disengaging depth

脱空部位	脱空数/处	总深/cm	平均脱空/cm
左仰拱	5	46	9.20
左边墙	58	492	8.63
左拱腰	41	404	9.85
拱顶	144	1 514	10.51
右拱腰	43	424	9.869
右边墙	90	863	9.59
右仰拱	5	58	11.60

留孔压力为 0.2 MPa,注浆达到设计终压或排气孔出浆后,即可终止注浆。

注浆整治完成后,对 385 处检测出的脱空缺陷中 141 处进行复查,不同位置处置后缺陷分布情况分布如表 5 所示。由表可知,经隧道脱空缺陷注浆整治后,112 处脱空消失,29 处缺陷仍存在,整治成功率为 79.4%,总体效果良好。拱顶的整治效果最佳,整治成功率达到 95.1%,拱腰次之,边墙成功率最低,仅为 45.1%。注浆整治脱空缺陷具有局限性,在拱顶注浆整治效果好而在边墙效果不佳,在脱空缺陷整治时,需分别从产生机理、影响程度、整治方法等各方面分别对拱顶、拱腰、边墙制定整治方案。

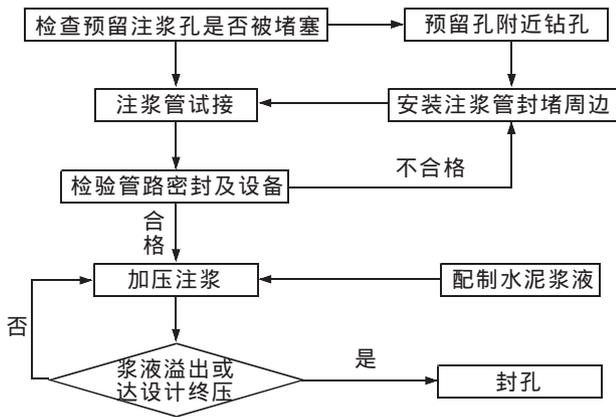


图 6 注浆整治流程图

Fig.6 Flowchart of grouting treatment

表 5 注浆处理后脱空情况表

Tab.5 Disengaging situation after grouting treatment

脱空部位	缺陷消失/处	缺陷存在/处	总计/处
拱顶	58	3	61
右边墙	12	21	33
右拱腰	15	1	16
右仰拱	1	0	1
左边墙	16	2	18
左拱腰	8	1	9
左仰拱	2	1	3
总计	112	29	141

排除支护设计上的不足,脱空缺陷产生的主要原因为施工控制不足,本质问题为施工工艺落后和管理松散,欲消除衬砌脱空缺陷,必须从材料控制,工艺控制出发,加强施工管理,提高施工水平,具体措施有:加强光面爆破控制和初支控制;控制防水板挂贴松弛度;确保封头模板拼接密贴、牢靠;振捣密实混凝土等。边墙脱空整治成功率较低,需尽可能从源头上减少其发生。

6 结论

本文统计分析某隧道缺陷类型、脱空分布、脱空特性和注浆整治效果,通过分析可以得到如下结论:

- 1) 衬砌脱空为主要施工缺陷,在各级衬砌中普遍存在,施工过程中需重点防治。
- 2) 拱顶、拱腰、边墙处均有较大比例脱空分布,顶部脱空最多,占 37%,拱腰及边墙脱空较小但不利程度更大,各部位脱空防治具有同等重要性。
- 3) 隧道脱空与围岩条件相关,围岩条件越好,脱空长度越长;围岩条件越差,脱空深度越大。
- 4) 脱空长度总体服从 $\lambda=4.76$ 泊松分布,大断面双线隧道平均脱空长度 7.55 m 略大于左右线。
- 5) 衬砌脱空深度近似服从 $N(9.3,3.62)$ 正态分布,脱空深度主要为 7~12 cm;拱顶脱空与其他部位脱空深度无明显差异,均值介于 8~12 cm。
- 6) 注浆整治脱空缺陷具有局限性,整治成功率为 79.4%;拱顶的整治效果最佳,达到 95.1%,边墙最低,仅为 45.1%。

总之,脱空缺陷一旦产生就很难消除,只有结合工程实际,从源头上控制才能有效减少衬砌脱空的发生。

参考文献:

- [1] 王立川,周东伟,吴剑,等. 铁路隧道复合衬砌脱空的危害分析与防治[J]. 中国铁道科学,2011,32(5):56-63.
- [2] 罗鑫. 公路隧道健康状态诊断方法及系统的研究[D]. 上海:同济大学,2007:116-117.

- [3] 李伟东. 公路隧道二次衬砌顶部脱空的分析和处理[J]. 交通科技与经济, 2009, 11(2):26-27.
- [4] 杨小玉. 隧道二次衬砌与初期支护间脱空原因分析及处理[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(2):140-143.
- [5] 聂子云. 隧道衬砌背后空洞对结构安全影响及防治技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2013:79-81.
- [6] 耿大新, 李洪梅, 郭俊, 等. 地质雷达检测隧道衬砌常见病害模型实验研究[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(6):7-12.
- [7] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道衬砌质量无损检测规程.TB 10223-2004[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [8] 杨峰, 彭苏萍, 刘杰等. 衬砌脱空雷达波数值模拟与定量解释[J]. 铁道学报, 2008, 30(5):92-96.
- [9] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道设计规范.TB 10003-2005[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [10] 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 统计学[M]. 北京:中国人民大学出版社. 2015:300-408.
- [11] 中华人民共和国铁道部. 客运专线铁路隧道工程施工技术指南.TZ 214-2005[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.

Statistical Analysis and Prevention of Voids in Composite Linings of High-speed Railway Tunnels

Jiang Xinghong¹, Yan Mingchao², Zeng Peng², Yang Xinan¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. The Fourth Branch of the Fifth Bureau of China Railway Engineering Corporation, Shaoguan 512031, China)

Abstract: The lining void exists widely in the construction of tunnels, which would in time have a negative impact on the capacity and the durability of the lining structure without being dealt with. The studies nowadays mostly focus on the causes of the void in the crown of the arch, as well as its influence and solution. While the studies on the distribution, characteristics of the void, and the relationship between the void and the condition of the surrounding rock are lacking. Through the statistical analysis of the nondestructive testing results on the tunnel, it found out that the lining void is the main defect during the construction. It concludes that 37% of voids happened in the crown. The length of void is in accordance with Poisson distribution/function with the λ of 4.76m. The distribution of lining disengaging depth is in accordance with the normal distribution of $N(9.3, 3.62)$. The better the condition of surrounding rock is, the bigger length and the smaller depth the void has. Grouting has more positive effects on the void in the crown than in the side wall. Results are of great importance for the nondestructive testing, solution and prevention of the void during constructions.

Key words: lining void; void position; void length; void depth; grouting treatment

(责任编辑 姜红贵)