

董奉山隧道仰拱及衬砌裂缝处治技术研究

郑若泓^{1, 2, 3} 杨朝帅^{1, 2, 3} 徐海廷^{1, 2, 3} 陈星¹

1. 中铁隧道局集团有限公司 广州 511458;
2. 广东省隧道结构智能监控与维护企业重点实验室 广州 511458;
3. 中铁隧道勘察设计院有限公司 广州 511458

摘要:近年来随着中国经济迅速增长,大量公路和铁路开始建设和投入运营,配套的隧道也在不断增多,隧道病害也随之出现,其中隧道结构开裂最为常见。目前关于隧道结构开裂的研究不够系统,不够全面,仍需进一步深入研究。福州董奉山隧道施工过程中发生仰拱、二衬开裂,对此结合病害检测结果、隧道工程地质资料和施工实际情况开展了病害成因分析,确定了水文地质、施工设计两大因素为隧道结构开裂的主要原因,并根据该结果采取了针对性的处治措施。病害处治效果良好,隧道基底的承载力得到了提升,确保了隧道结构的安全性和稳定性。

关键词:公路隧道;董奉山隧道;结构裂缝;裂缝治理;注浆加固

前言

近年来随着中国经济迅速增长,大量公路和铁路开始建设和投入运营,配套的隧道也在不断增多,隧道病害也随之出现,其中隧道结构开裂是最常见的一种病害。李佳翰搜集了国内外266座隧道的病害情况并对其进行了统计分析,分析结果显示隧道衬砌病害中衬砌裂缝占比最高(82%),充分说明了隧道结构开裂在隧道结构病害中的普遍性^[1]。隧道仰拱、二衬裂缝的发展可能会带来渗水、掉块、掉拱等病害,进而对行人和车辆的安全产生威胁,影响公路、铁路的正常运营。

为了对隧道进行综合整治,对隧道结构裂缝的形成原因、分布状况和处治措施进行研究显得非常重要,国内外学者对此也展开了一系列研究。为研究隧道衬砌不同部位产生的裂缝对隧道结构的影响,余晶利用ANSYS对其进行了有限元分析,分析结果显示衬砌裂缝的产生会导致衬砌内力的重新分布,进而使得原有裂缝继续发展并诱发产生新的裂缝,严重危害隧道结构的安全性^[2]。杨朝帅等建立了一种基于安全系数法的隧道安全量化方法,并通过数值模拟分析了病害对隧道的安全性的影响,研究结果表明,衬砌开裂、渗漏水、背后空洞会导致衬砌轴力、弯矩、剪力增加,衬砌安全系数下降,拱顶或仰拱的衬砌病害最不利于隧道安全^[3]。彭星等结合监控量测、数值仿真等方法对某公路隧道二衬裂缝进行了分析,结果表明其开裂主因是围岩力学性能差、地表水渗入、基底承载力不足、施工扰动等,并针对性地采取了二衬临时背拱、仰拱钢管注浆、地表注浆覆膜、二衬注浆补强等处治措施,有效遏制了仰拱沉降及二衬开裂现象^[4]。

目前关于隧道结构裂缝的相关理论未进行系统性的梳理,相关施工工艺普适性不强,大多仅局限于该施工工程本身,相关研究仍需要进一步推进和完善。本次研究就董奉山隧道仰拱及二衬开裂治理工程的施工技术进行了总结,以期为类似隧道裂缝治理技术的进一步提高和发展提供经验借鉴和技术参考。

1. 工程概况

国道G316线董奉山隧道,位于福建省福州市长乐区鹤山镇岱岭村(如图1),为下穿董奉山的特长隧道,双主洞双辅洞四洞并行,四洞进口端均为分离式小净距浅埋隧道^[5]。进口端为145m的明洞段+均长为303m的浅埋段,浅埋段下穿董奉山国家级森林公园保护区,地层主要为坡积粉质粘土、全风化和砂土状强风化花岗岩(凝灰熔岩)地层,明洞段基底主要位于全风化、砂土状强风化凝灰熔岩层。



图1 董奉山隧道地理位置示意

隧址区位于坡积平原地貌单元,场地现状主要为林木、果园,地形具有一定起伏,局部起伏较大。场地区域内未发现断裂构造和新构造活动迹象。

隧道进口端浅埋段水系充分发育,地表穿越或紧邻多条冲沟,受季节性降雨影响较大,左辅洞临近凤凰溪,右辅洞洞顶临近水塘;隧道开挖揭示,明洞及浅埋暗挖段地下水系丰富且地下水位高,多处呈股状流水,隧道施工期间采取了洞内外井点降水措施和河道临时截流、改道措施。

2. 病害状况及成因分析

2.1 病害状况

2021年已发现有隧道裂缝,年内进行了一定的加固处治;受2022年5-6月持续强降雨影响,拱顶发现纵向裂缝,同年8月明洞段及浅埋段拱顶发现有30余条纵向裂缝。对董奉山隧道进行专项检测后,

发现主要病害情况如下：二衬出现环向裂缝 85 条、纵向裂缝 73 条、斜向裂缝 16 条，局部环向裂缝伴随有渗漏水现象；隧道仰拱填充层存在 36 条纵向裂缝，裂缝长度为 5~140m，裂缝宽度为 1~42mm。

裂缝类型及分布特征如表 1 所示。总体而言，隧道仰拱及二衬的开裂以纵向裂缝为主，二衬中环向裂缝数量较多、延伸长度大多较短且分布较为分散，该现象的产生可能与隧道基底的不均匀沉降有关。

表 1 裂缝类型及分布

裂缝类型	分布特征	可能形成原因
仰拱裂缝	距隧道中心及靠左位置，裂缝走向多数为纵向，裂缝上宽下窄，从上至下明显缩小	隧道基底不均匀沉降
纵向裂缝	拱顶位置居多，局部出现于拱腰位置，往往多条成组产生，延伸长度较长，最长可达 58m	开挖后基底扰动遇水软化，仰拱不均匀沉降、二衬受力状态发生变化、局部钢筋保护层厚度偏差等
环向裂缝	数量较多但延伸长度大多较短（0.5~2m），分布较为分散，多出现于拱脚位置	隧道基底变形、开挖爆破扰动
斜向裂缝	数量较少，和隧道纵轴呈大角度斜交	隧道围岩应力变化、隧道基底变形、开挖爆破扰动等综合作用

2.2 病害成因分析

通常而言，隧道结构裂缝的成因并非是单一的，往往存在多种因素共同叠加作用于隧道结构上从而诱发裂缝产生^[6]。根据隧道病害检测结果，结合隧道区域地质状况、隧道施工过程状况对隧道病害进行分析，得出造成该隧道病害形成的主要因素为水文地质和设计施工两大因素。

(1) 水文地质原因：

明洞及浅埋段隧道穿越地层为残坡积土、全风化及砂土状强风化岩，为特殊性岩土，其结构松散，遇水易软化，致使岩土层物理力学性质急剧下降，开挖面稳定性极差。同时隧道进口端，富含地下水，受雨水和隧道附近地表水补给，地下水水力路径复杂，由于隧道底为全强风化岩、残积土等，受施工扰动和遇水软化后，隧底岩土层承载能力下降，造成拱脚下沉、仰拱填充层开裂，二衬产生裂缝。

隧道开挖场地临近溪流，虽已事先将溪流进行改道、截流，但隧道的开挖仍有可能改变原地下水的汇流路径，使得地下水汇流到隧底岩土层并加剧其软化程度，进一步诱发仰拱不均匀沉降、二衬开裂等病害。

(2) 设计施工原因：

由于该隧道是小净距隧道，主路隧道右洞 YK12+420 附近发现左拱腰纵向裂缝时左主洞掌子面正在施工，受左主洞开挖支护包括爆破、围岩变形等影响，该段岩体多次被扰动围岩物理学参数降低等原因导致隧道衬砌结构所承受的荷载增加，在结构受力的不利位置发生开裂。

另外，原设计中在明洞段隧道底部设置了厚度为 60cm 的碎石垫层作为排水用的疏水层，但施工过程中长时间暴雨天气影响，大量地下水和施工用水涌入碎石层中，远超出了其排水能力设计范畴，过量的水长时间无法得到排放，底部围岩与之长久接触而产生软化，导致隧道底部结构承载力不足，发生基底不均匀沉降，并进一步诱发仰拱裂缝和拱顶裂缝产生。

3. 处治措施

隧道形成开裂的可能原因较多，结合病害检测状况和辅助资料

判断，二衬开裂与围岩应力变化、结构沉降变形有关。对此，采取锁脚加固、基底注浆加固和裂缝修复等措施进行病害整治。以下以董奉山主路左洞隧道为例来说明其病害整治措施。

3.1 锁脚加固处治

对基底位于全风化及砂土状强风化岩段落设置锁脚钢管桩加固。

主路隧道在左右侧电缆沟沟底各设置 3 根 Φ108×6 锁脚钢管桩，长 9m，斜向角度按 70°、80°、90°，纵向按 80cm 间距布置，具体布置如图 2、图 3 所示。

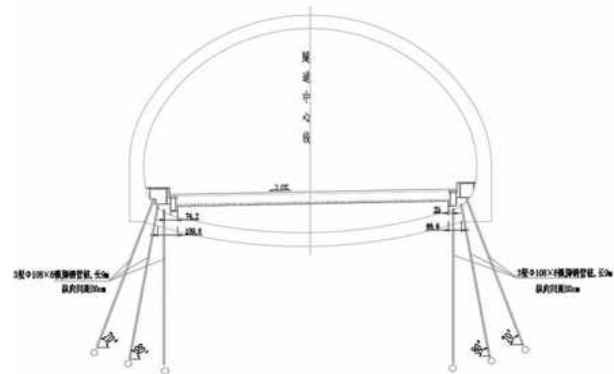


图 2 主洞隧道锁脚钢管桩施工示意图

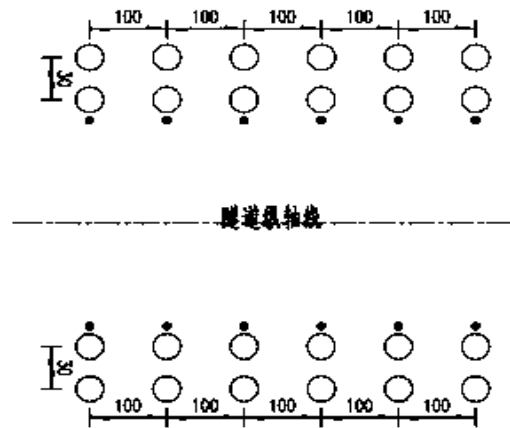


图 3 钢管桩梅花型布置图 (cm)

锁脚加固处治工艺流程主要为钻孔、安装钢管桩、钢筋笼制作及安装、焊接封口、封孔和注浆。施工工艺具体控制要点如下：

(1) 钻孔采用潜孔钻机，钻至基底采用干钻，墙脚钢管桩钻孔直径为 150mm，钻进过程中控制终孔偏斜率在 $\pm 5^\circ$ 范围内。

(2) 钢筋笼主筋长 8.7m，采用 6+2.7m 分段制作， $\Phi 42$ 钢环（壁厚 4mm）作固定环，固定环节长 5cm，与钢筋笼主筋焊接，纵向间距 100cm，同时将 PE 管穿入固定环作为注浆管，如图 4 所示。

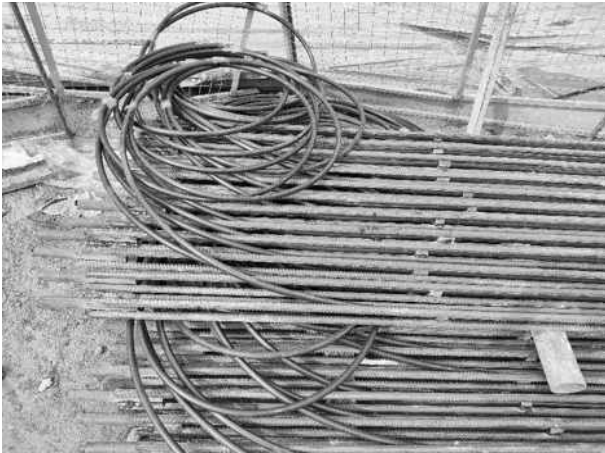


图 4 钢筋笼示意图

(3) 钢筋笼进行分节下放。先下放 6m 长钢筋，下放过程中将钢筋用布绳绑以防止钢筋笼突然脱落。第二节钢筋与第一节钢筋连接时，钢筋接头对齐，对钢筋与连接套管进行满焊。

(4) 采用热熔器高压压紧镀锌管与 PE 管接头，然后焊接封口钢板进行封口，做到不漏焊。

(5) 采用分段批量封孔法进行封孔，成孔与微型钢管桩之间封孔时，保持与钻孔间距 10m。

(6) 注浆浆液采用水泥浆液，注浆初压 0.5~1.0MPa，终压 2.5~3.0MPa，注浆参数根据现场试验予以调整。注浆顺序遵循“先两侧后中间”、“分段进行”的原则。注浆结束标准如下：①注浆量达到设计注浆量，注浆压力小于 0.5MPa 按设计注浆量 2 倍控制；②当达到设计压力时，控制进浆速度为初始正常注浆速度 1/4 或小于 5L/min 时稳压 10min；当注浆过程满足以上两者其一时，即可认为单孔注浆已达到设计的要求并结束注浆。

若注浆时间过长且始终未达到设计压力时，应停止注浆并对周围注浆孔排查，若无串浆、溢浆现象，则存在注浆通道与地下水通道相连的可能，可考虑掺入适量水玻璃以加快浆液凝结时间，对与地下水通道相连通道口进行封堵。

3.2 隧底注浆加固处治

隧底基底软弱是二衬及仰拱开裂的主要影响因素之一，为保证隧道病害整治效果，确保隧道结构安全，采用注浆加固手段对隧道基底软弱地层段落进行加固，通过改善围岩受力结构，提高围岩强度，来加强隧道基底的承载能力，避免隧道仰拱、二衬进一步持续开裂^[7-9]。

隧底加固主要采用 $\Phi 50 \times 4$ mm 钢管注浆加固，钢管长度 6m 或 7m，布置间距为 1.5m \times 1.5m（横向 \times 纵向）梅花型布置，如图 5、图 6 所示。

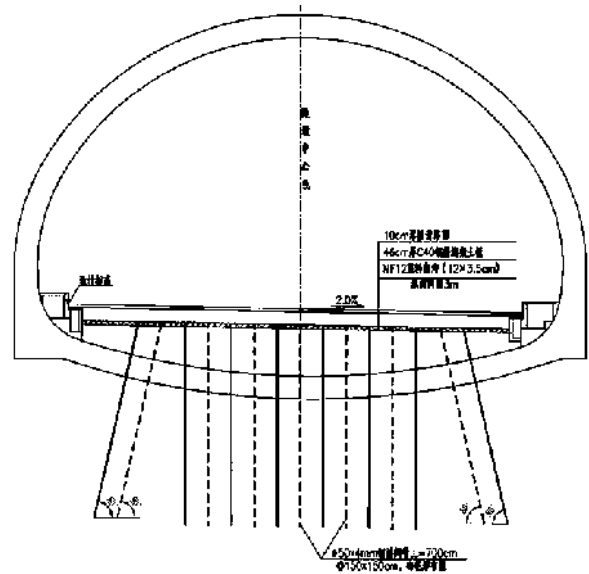


图 5 隧底注浆加固剖面图

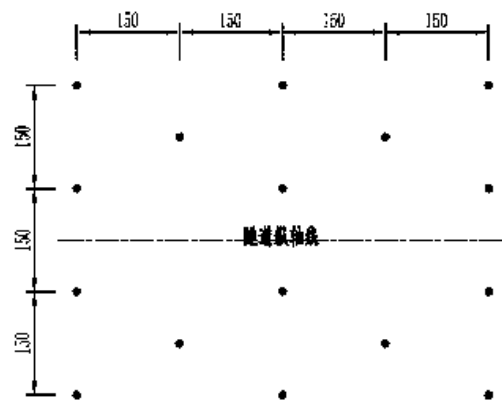


图 6 注浆钢管梅花形布置示意图 (cm)

隧底注浆加固工艺流程主要为钻孔、安装钢花管、成孔与钢花管之间封孔及注浆。施工工艺控制要点如下：

(1) 采用水泥净浆进行钢袖阀管注浆，可适当掺入水玻璃调节凝结时间，浆液配合比根据施工中实际注浆效果调整。

(2) 注浆采用边注浆边抽水的工艺，隔孔间隔注浆，注浆孔相邻钻孔作为抽水孔。注浆结束标准与锁脚加固处治时保持一致。

(3) 对于施工过程中所产生的废孔采用较原衬砌混凝土高一个强度等级的水泥砂浆、锚固胶黏剂等材料进行回填封堵，并根据现场实际状况在附近进行补打。

(4) 明洞基底存在碎石层，其空隙率大且结构松散，钻孔时易塌孔且钻进困难，为保证成孔效果，先进行碎石垫层预注浆。预注浆采用 $\Phi 76$ mm PVC 袖阀管，采用潜孔钻机成孔，预注浆孔位间距 6m \times 6m 布设，与 50 袖阀管同孔位布设，孔径 115mm，孔深钻至碎石层顶面。预注浆时不限制注浆量，应控制注浆压力，当压力

达到 0.8MPa 且稳压 10min 后可结束注浆。

3.3 二衬加固处治

对于纵向裂缝密集段落,采用粘贴钢带加固的手段可有效的提高衬砌的承载能力。加固材料采用 W280 型钢带,钢带纵向间距 60cm,加固范围为检修道以上全断面。

施工控制要点如下:

(1) 衬砌表面凿槽 (30cm×6cm),并用高压水或压缩空气将凿毛面吹洗干净。

(2) 钢带采用Φ25 树脂锚杆锚固,锚杆长度 30cm,环向间距 0.6m,纵向间距 0.6m,锚杆在裂缝区域两侧 1.2m 范围内环向间距 0.5m,但锚杆不能打在裂缝上,钢板网片焊接于锚杆端头,并用聚合物水泥砂浆抹抹。锚钉及钢带布置如图 7 所示。

3.4 裂缝修复处治

对于裂缝较为稀疏、无明显发展趋势的地段,采用环氧树脂浆对混凝土表面进行涂抹充填和沿裂缝刻槽进行低压注射修补。

对于裂缝宽度小于 0.2mm 的封闭裂缝,先将混凝土表面进行和清洁,留足作业空间,然后用环氧树脂浆充填混凝土表面,修补胶液封闭裂缝,最后用修补材料涂覆表面直至与原结构表面平整。

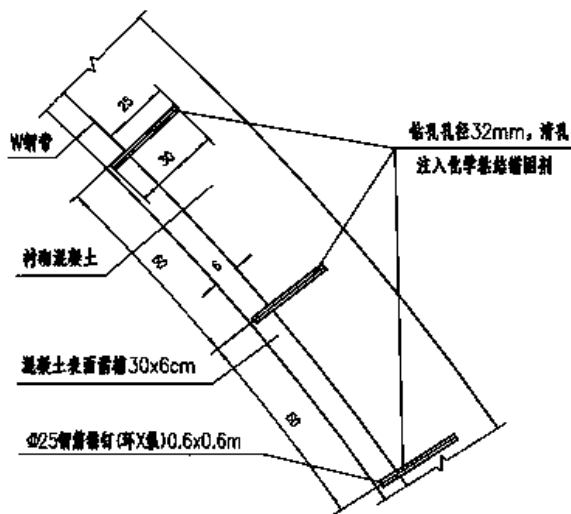


图 7 锚钉及钢带布置示意图

对于裂缝宽度大于 0.2mm 的出现渗漏水点的裂缝采用环氧树脂浆沿裂缝走向进行低压注射修补。裂缝缝宽小于 0.5mm 时,需先采用环氧胶泥进行其表面进行封闭,再进行注胶操作;缝宽大于 0.5mm 时,应进行开槽填充后进行注胶,开槽宜为倒梯形开槽 30*20*20mm (顶*底*深),填充材料宜为聚合物防水砂浆。

4. 处治效果检验

裂缝处治期间,洞内外进行实时监测,洞内监控量测点按纵向

每 20~40m 布置一个监测断面,结构变形及裂缝发展较严重段落适当加密,监测频率为每周一次。裂缝处治结束后,病害段未见发展有新的裂缝,也未见有渗漏水现象产生,裂缝治理效果良好。

锁脚加固和隧底注浆加固工艺注浆结束 7d 后对病害段进行钻芯取样验证,仰拱在板中位置左右各取一处芯样,钻孔深度为超过隧底 30cm。其中隧道底部与围岩间松散体(虚渣)被浆液包裹固结,破损围岩裂缝处和明洞段碎石层部分碎石均被浆液填充,隧道底部围岩裂隙间有浆液留存现象,总体注浆效果良好。

5. 结论

根据董奉山隧道病害检测结果,结合董奉山隧道地质概况、施工记录等相关资料对董奉山隧道病害成因进行了分析,董奉山隧道仰拱及二衬开裂主要由水文地质、施工设计两方面的因素所引发。根据病害成因分析结果开展了修复加固工作,通过锁脚加固和隧底注浆加固对隧道仰拱结构进行了加固,通过表面涂抹和低压注射的手段对二衬混凝土裂缝进行了修复,经后期监测和验证后,整体治理效果良好。

参考文献:

[1]李佳翰. 山岳隧道衬砌异常状肇因诊断技术研究[D]. 台北: 台北科技大学, 2013.

[2]余晶. 公路隧道衬砌裂缝对结构受力分布影响规律研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50 (S1): 70-75.

[3]杨朝帅, 崔臻, 牛富生等. 隧道衬砌病害对结构安全性影响机理研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21 (04): 180-186.

[4]彭星, 饶军应, 陈朝颖. 某公路隧道衬砌开裂机理及处治措施研究[J]. 水利规划与设计, 2022 (11): 146-152.

[5]林振宇. 董奉山隧道大跨径断面初支变形侵限处置措施分析[J]. 福建交通科技, 2021, (12): 67-71.

[6]卢颖明, 陈礼伟. 既有隧道病害现象分类及原因分析[J]. 铁道建筑, 2010, (11): 46-49.

[7]王家进. 路基工程注浆加固技术探讨[J]. 交通科技与管理, 2023, 4 (16): 102-104.

[8]刘勇. 公路隧道注浆处治方法的探讨[J]. 中华建设, 2023, (12): 124-126.

[9]傅俊. 寒区高铁隧道仰拱拱底注浆施工技术研究[J]. 绿色环保建材, 2018, (05): 124-126.

作者简介: 郑若泓 (1997—), 男, 汉, 广东湛江人, 硕士, 中铁隧道局集团有限公司 助理工程师, 现从事隧道与地下工程研究工作