

富水炭质板岩地层隧道底部结构破损原因分析及防治措施探讨

张海太¹, 沈东², 陈洁金^{3*}, 陈维¹, 王康云¹

(1. 云南丽香高速公路投资开发有限公司, 云南 昆明 650217; 2. 天津市市政工程设计研究院; 3. 长沙理工大学 土木工程学院)

摘要: 云南香丽高速公路穿越富水炭质板岩地段, 多座隧道出现隧底结构破损, 破损主要特征为隧底填充混凝土沿隧道中线纵向开裂, 裂缝上宽下窄, 呈“V”字形, 对于隧道施工以及后期运营带来极大的安全隐患。该文以香丽高速公路典型富水炭质板岩地层隧道为工程背景, 通过现场调查和数值计算分析等方法, 分析隧道底部结构破损原因, 提出相应的防治措施。结果表明: 隧道底部结构破损主要是由于仰拱积水, 隧道基底围岩遇水软化, 导致隧道底部结构所受拉应力过大, 出现张拉裂缝; 隧道仰拱现状也对于仰拱受力不利。对于基底围岩进行加固, 以及适当调整仰拱曲率可以避免隧道底部结构破损的发生。

关键词: 隧道; 炭质板岩; 隧底结构破损; 仰拱; 围岩加固

1 引言

随着中国交通基础设施事业的发展, 长大、深埋隧道数量日益扩大。深埋、长大隧道围岩条件复杂多变, 当隧道穿越炭质板岩等软弱围岩时, 极易发生底部结构破损、大变形、拱顶坍塌等地质灾害。隧道底部结构破损是隧道工程中常见的一种病害现象, 其具有持续性, 难以自稳, 随着底部结构破损的发展, 将会对工程施工以及后期运营带来极大的安全隐患。

国内外众多学者对隧道底部结构破损原因及防治措施进行了研究, 取得了一定的成果, 较为典型的有: 王立川等通过现场测试和数值计算指出西南地区某隧道底部结构破损的地质原因是存在极高的水平构造应力和隧道底部下伏薄~中厚倾斜围岩, 施工、设计原因是仰拱曲率、仰拱建材刚度不能满足地质环境条件; 王树英等对三联隧道底部结构破损问题展开了研究, 指出高地应力状态是造成其破损的主要原因, 并采用了加深仰拱深度的方法对仰拱破损段进行整治, 效果良好; 郑波、崔连友等通过数值模拟和现场测试的方法研究了外水压力对隧道底部结构破损的影响, 结果显示当仅考虑围岩压力时, 仰拱填充物未开裂, 当综合考虑

围岩压力和外水压力时, 仰拱填充产生张拉裂缝; 康涛等采用钻芯取样、地质雷达扫描等方法对槽管头隧道底部结构破损原因进行了研究, 指出由于破碎围岩遇水泥化, 且伴有膨胀性, 加之地下水压过大, 最终造成仰拱填充纵向开裂, 并采取了打设竖向锚杆与注浆管注浆加固的整治措施, 路面采用钢纤维混凝土修复; 丁冬冬等通过现场测试与数值模拟计算等手段, 指出上庄隧道仰拱底鼓开裂主要是由于隧道底部围岩遇水软化后, 隧道底部结构受力不均匀导致。

综上所述, 底部结构破损的主要原因可分为地应力过高、水压力过大和基底围岩软化 3 类。以上研究成果对隧道底部结构破损机理及防治技术奠定了较好的基础, 但由于隧道围岩条件复杂多变, 不同围岩下隧道底部结构破损类型不同, 因此底部结构破损机理具有独特性, 而各种破损机理的适用范围有限, 针对炭质板岩隧道底部结构破损机理及防治措施研究较少。

该文以香丽高速公路典型炭质板岩地层隧道为工程背景, 通过现场调查测试和数值计算, 对隧道底部结构特性进行研究, 重点分析基底围岩软化、仰拱曲率等因素对隧道底部结构破损的影响, 并以此提出隧道底部结构破损整治措施, 为后续工程施工以及类似工程提供参考。

收稿日期: 2019-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51878669); 云南省建设投资控股集团科技项目(编号: 201803B)

作者简介: 张海太, 男, 高级工程师, E-mail: 735705125@qq.com

* 通信作者: 陈洁金, 男, 博士, 讲师, E-mail: chenjjin1975@163.com

2 工程概况

2.1 地质概况

云南省香格里拉至丽江高速公路(简称香丽高速)是国家高速公路网 G0613 西宁~丽江联络线的重要组成部分,位于云南省西北部,沿线地质构造发育,新构造运动激烈。工程地质区域处在环喜马拉雅构造带滇西北小中甸~龙蟠~乔后断裂带,受地质构造作用,多分布炭质板岩等变质软岩。

通过 X 射线荧光光谱分析法对香丽高速公路典型炭质板岩矿物组成进行分析,结果表明炭质板岩主要由石英、绿泥石、云母、钠长石、方解石和白云石组成,由于黏土类矿物(绿泥石)和碳酸盐类矿物(方解石、白云石)等成分较高,围岩整体强度较低,水理性质较差,遇水易软化、崩解,自稳性极差,隧道施工难度较大。

2.2 支护结构类型

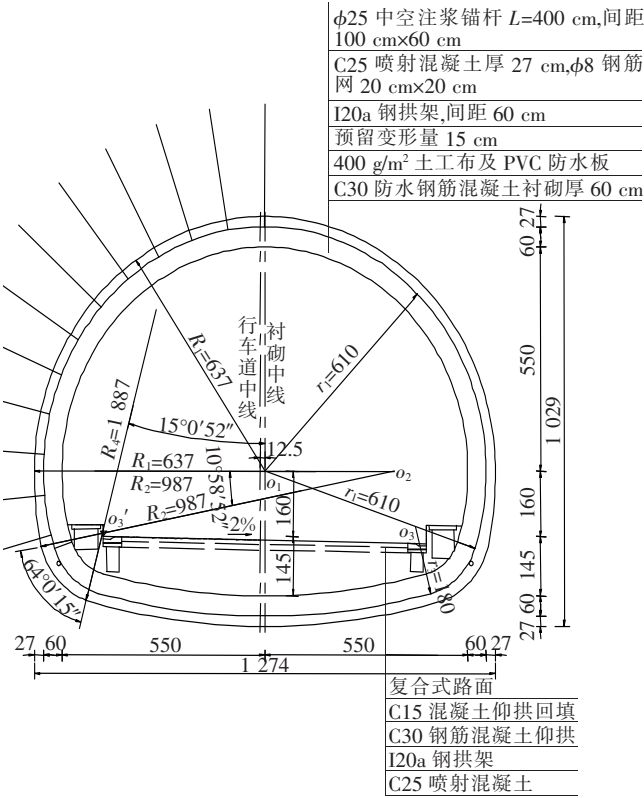
香丽高速公路全线隧道工程设计图阶段单幅Ⅲ级围岩 11 989 m、Ⅳ级围岩 37 891 m、Ⅴ级围岩 29 026 m,在施工过程中,根据开挖揭露围岩以及现场施工情况进行了动态设计,实际隧道单幅围岩分级为Ⅲ级围岩 126 m、Ⅳ级围岩 30 573 m、Ⅴ级围岩 48 207 m。其中,底部结构破损段落大多为Ⅴ级围岩,主要采用的支护结构类型为 SF5c(图 1)。

SF5c 复合式衬砌支护参数为 4 m 长 $\phi 42\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 注浆小导管,C25 喷射混凝土厚 27 cm, $\phi 8\text{ mm}$ 钢筋网 20 cm \times 20 cm,I20a 钢拱架,间距 60 cm,预留变形量为 20 cm,二次衬砌采用 C30 钢筋混凝土,厚度为 60 cm,衬砌底部结构由仰拱初期支护、仰拱、仰拱填充层、水泥混凝土基层和沥青混凝土路面组成。

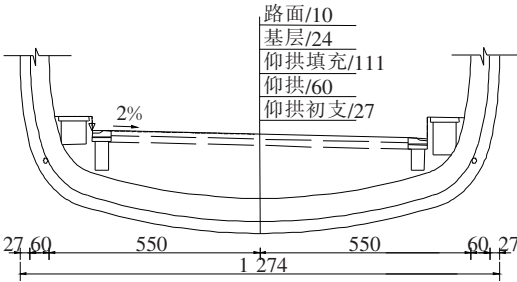
2.3 隧道施工过程

SF5c 衬砌类型段主要采用三台阶(预留核心土)法施工,其主要施工步骤为:① 上弧形导坑开挖,预留核心土;② 拱部初期支护;③ 核心土开挖;④ 中台阶开挖;⑤ 边墙初期支护;⑥ 下台阶开挖;⑦ 仰拱初期支护;⑧ 仰拱及仰拱填充;⑨ 边墙、拱部模筑混凝土浇筑。分步开挖示意图如图 2 所示,施工工序如图 3 所示。

现场仰拱和仰拱填充同时浇筑,隧道底部结构施工主要步骤为:① 仰拱全断面一次性开挖,对开挖面虚渣、积水进行清理;② 喷射 4 cm 厚 C25 早强混凝土,按设计架设钢拱架,并喷射混凝土至设计厚度;③



(a) 衬砌断面设计图



(b) 衬砌底部结构设计图

图 1 SF5c 支护结构断面图(单位:cm)

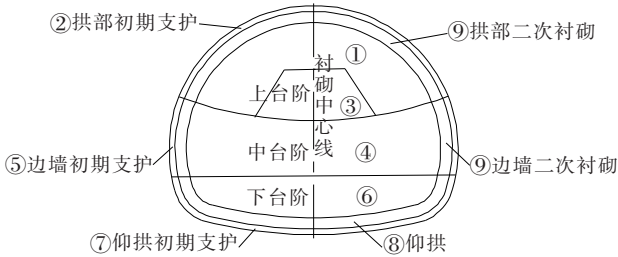


图 2 SF5c 型衬砌开挖断面示意图

④ 浇筑仰拱及仰拱填充混凝土,并采用插入式振捣器振捣密实;⑤ 在隧道贯通后,统一铺设混凝土基层及沥青混凝土路面。

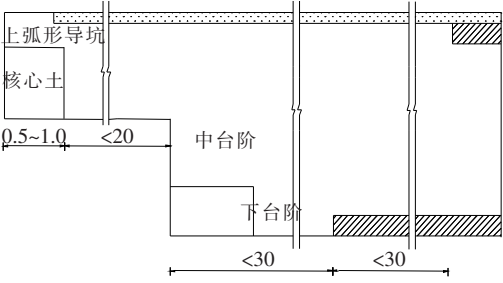


图3 SF5c型衬砌开挖工序图(单位:m)

3 隧底结构破损情况

香格里拉至丽江高速公路在施工过程中,发现大范围穿越强~全风化炭质板岩地层的隧道有11条,其中,隧道底部结构破坏较为严重的隧道有以下7条:阿普洛隧道、排坝隧道、海巴洛隧道、上补洛隧道、昌格洛

隧道、古那湾1号隧道、古那湾2号隧道,各隧道底部结构破损情况见表1。

各隧道底部结构裂缝宽度一般为2.9~23.2 mm,于仰拱填充混凝土中部沿隧道中线附近纵向开裂,钻孔取芯资料显示,裂缝上宽下窄,呈“V”字形,部分裂缝从仰拱填充混凝土表面延伸至仰拱附近,隧底软化围岩深度达2~3 m。裂缝扩展示意图如图4所示。

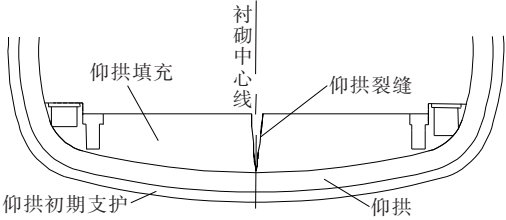


图4 香丽高速隧道仰拱填充裂缝示意图

表1 香丽高速隧道底部结构破损情况统计(截至2018年12月31日)

隧道名称	隧道长度/m	已施工长度/m	底部开裂长度/m	开裂长度占已施工长度比例/%	最大裂缝宽度/mm
阿普洛隧道左幅	823	740	175	23.65	11.3
阿普洛隧道右幅	756	738	50	6.78	10.2
排坝隧道左幅	1 703	1 246	201	16.13	16.8
排坝隧道右幅	1 703	1 171	135	11.53	20.3
海巴洛隧道左幅	2 289	1 551	596	38.43	23.2
海巴洛隧道右幅	2 262	1 777	532	29.93	18.3
上补洛隧道左幅	2 010	1 675	247	14.75	12.2
上补洛隧道右幅	1 992	1 753	237	13.52	10.6
昌格洛隧道左幅	4 625	3 126	115	3.68	4.1
昌格洛隧道右幅	4 578	3 261	69	2.12	2.9
古那湾1号隧道右幅	319	261	62	23.75	10.6
古那湾2号隧道左幅	1 693	1 006	45	4.47	18.5
古那湾2号隧道右幅	1 650	1 119	99	8.85	21.3

其中,海巴洛隧道底部结构破损情况最为严重。海巴洛隧道左幅全长2 289 m(ZK65+505~ZK67+794,右幅全长2 262 m(YK65+495~YK67+757)。自2016年4月进场施工至2018年12月,左幅ZK65+570~ZK65+806、ZK67+410~ZK67+770仰拱填充混凝土均出现不同程度开裂,裂缝宽度为5~23.2 mm;右幅YK65+573~YK65+644、YK65+644~YK65+760、YK67+395~YK67+740仰拱填充混凝土均出现不同程度开裂,裂缝宽度为4.2~18.3 mm。

4 隧道底部结构破损原因分析

4.1 地质特征及其施工影响作用

根据现场围岩条件、围岩变形和施工情况分析,香丽高速公路各隧道底部结构破损主要由水文地质条件和隧道设计施工情况等多因素综合影响造成。

(1) 围岩岩性差

香丽高速公路底部结构严重破损隧道隧址区地质

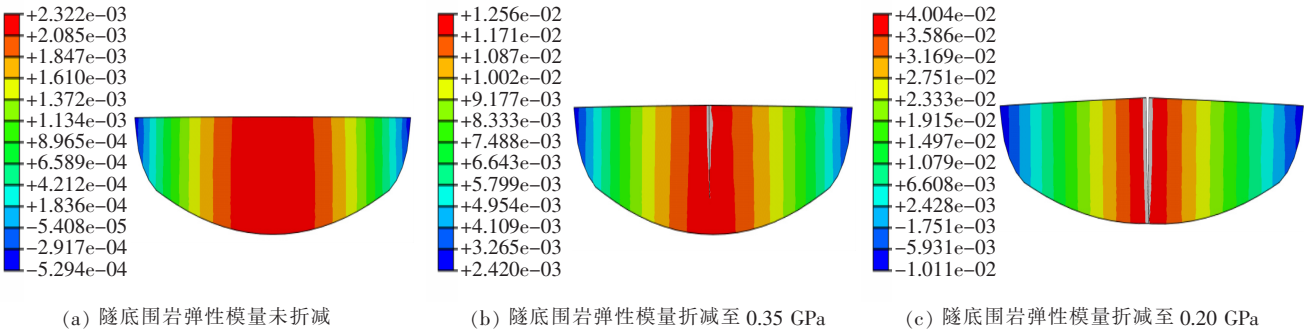


图 6 仰拱填充混凝土竖向位移云图(单位:m)

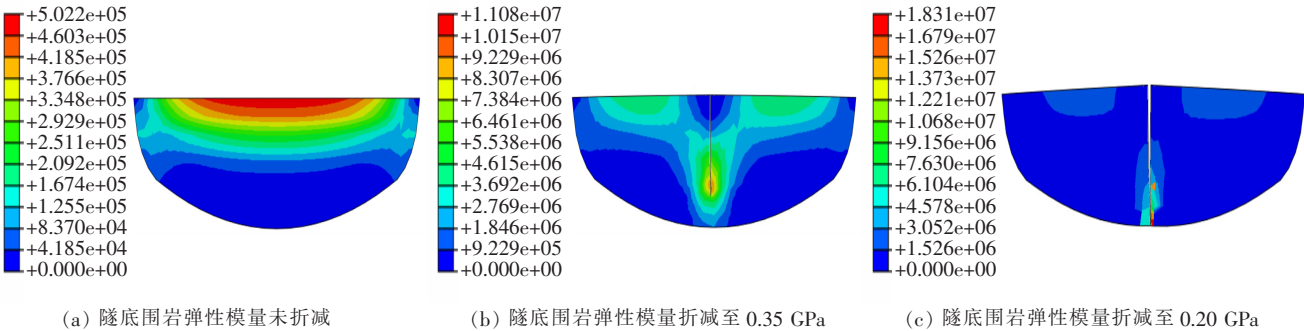


图 7 仰拱填充混凝土最大主应力云图(单位:Pa)

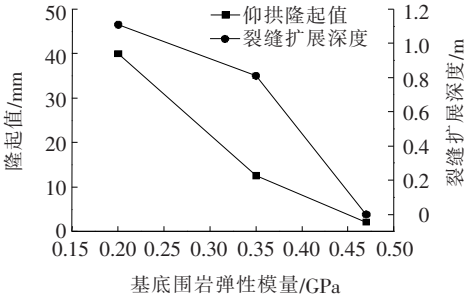


图 8 隧道基底软化与底部结构破损关系折线图

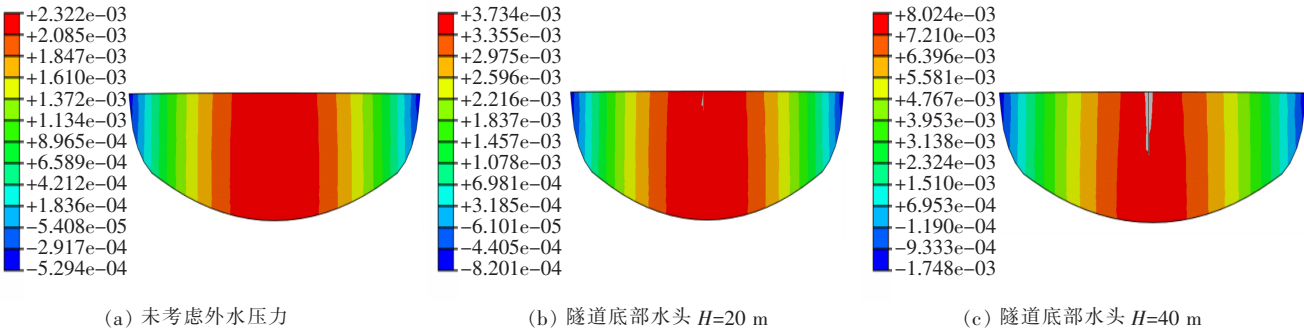


图 9 仰拱填充混凝土竖向位移云图(单位:m)

不同工况下仰拱填充混凝土最大隆起值和裂缝扩展深度如图 11 所示。

由图 9~11 可知:随着外水压力的增大,仰拱填充混凝土隆起值和裂缝扩展深度不断加大。当未考虑外

岩裂隙水,主要为强风化带裂隙富水、导水,地勘报告显示,洞身段隧道底部地下水最大埋深约 40 m。隧底未设置防水板以及排导透水层,仰拱混凝土直接与围岩接触。

此次模拟分析主要分为 3 个工况:工况 1:未考虑外水压力;工况 2:隧道底部水头 $H=20\text{ m}$;工况 3:隧道底部水头 $H=40\text{ m}$ 。围岩渗透系数 k , 取 $5\times 10^{-6}\text{ m/s}$,衬砌不透水。计算结果如图 9、10 所示。

水压力时,仰拱竖向位移值、主应力值均处于安全范围内;当隧底作用水头 $H=20\text{ m}$ 时,仰拱中线位置表面最大主应力值已超过 C15 混凝土极限抗拉强度,仰拱中线位置表面出现裂缝;当隧底作用水头 $H=40\text{ m}$

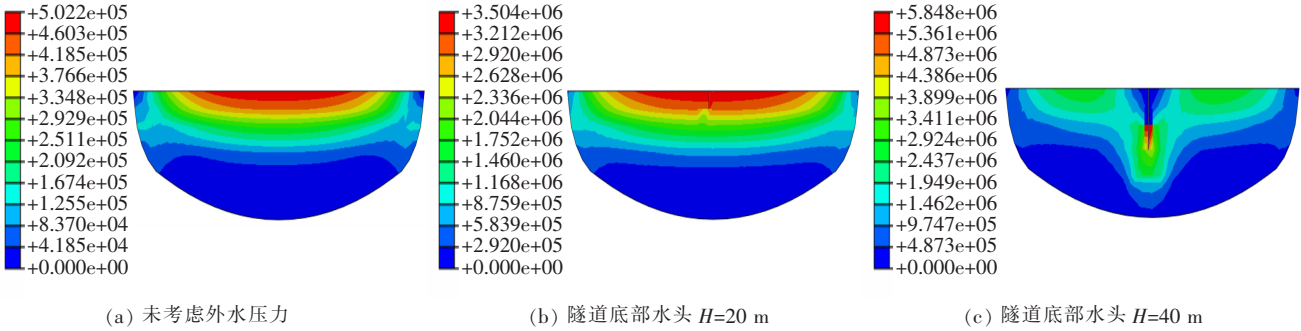


图 10 仰拱填充混凝土最大主应力云图(单位:Pa)

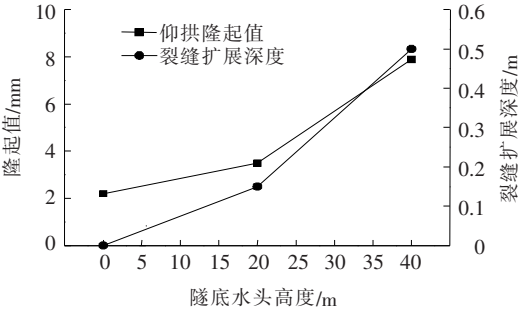


图 11 外水压力与底部结构损坏关系折线图

时,仰拱中线位置裂缝已扩展至仰拱填充中部位置。

(3) 仰拱曲率对底部结构破损的影响

仰拱可抑制隧底围岩变形,改善隧道受力状态,提供足够的抗力以保证隧底结构的安全性。计算以原设计仰拱曲率为基础,共设置 4 个工况,分别为原设计仰拱曲率、仰拱加深 0.5 m、仰拱加深 1.0 m 和仰拱加深 1.5 m,通过改变仰拱曲率半径即改变仰拱深度,分析仰拱结构形式对隧底结构破损的影响,所获得的不同工况条件下仰拱位移和压力分布如图 12、13 所示。

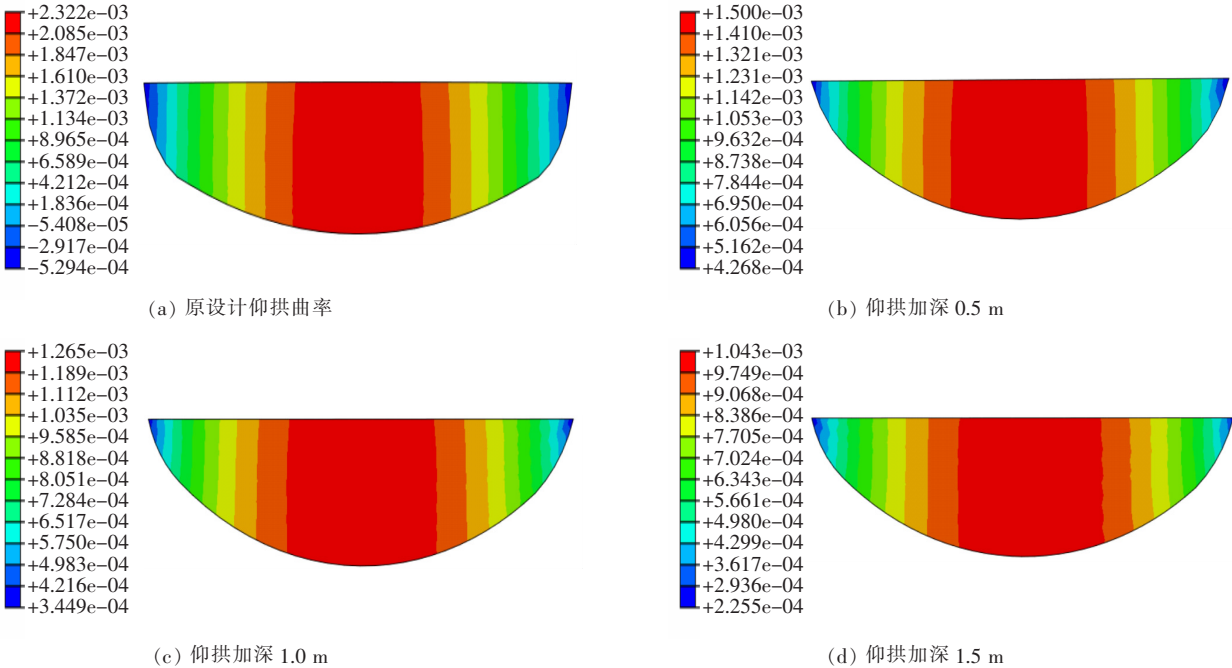


图 12 仰拱填充混凝土竖向位移云图(单位:m)

不同工况下仰拱填充混凝土最大隆起值和最大主应力值如图 14 所示。

由图 12~14 可知:随着仰拱深度的增加,仰拱填充物最大隆起值和最大主应力值均有所减小。由此可得减小仰拱曲率半径即增加仰拱深度可有效抑制隧底

结构破损。

5 隧道底部结构破损防治措施

由前文分析结果可知,隧道基底软化、仰拱曲率、

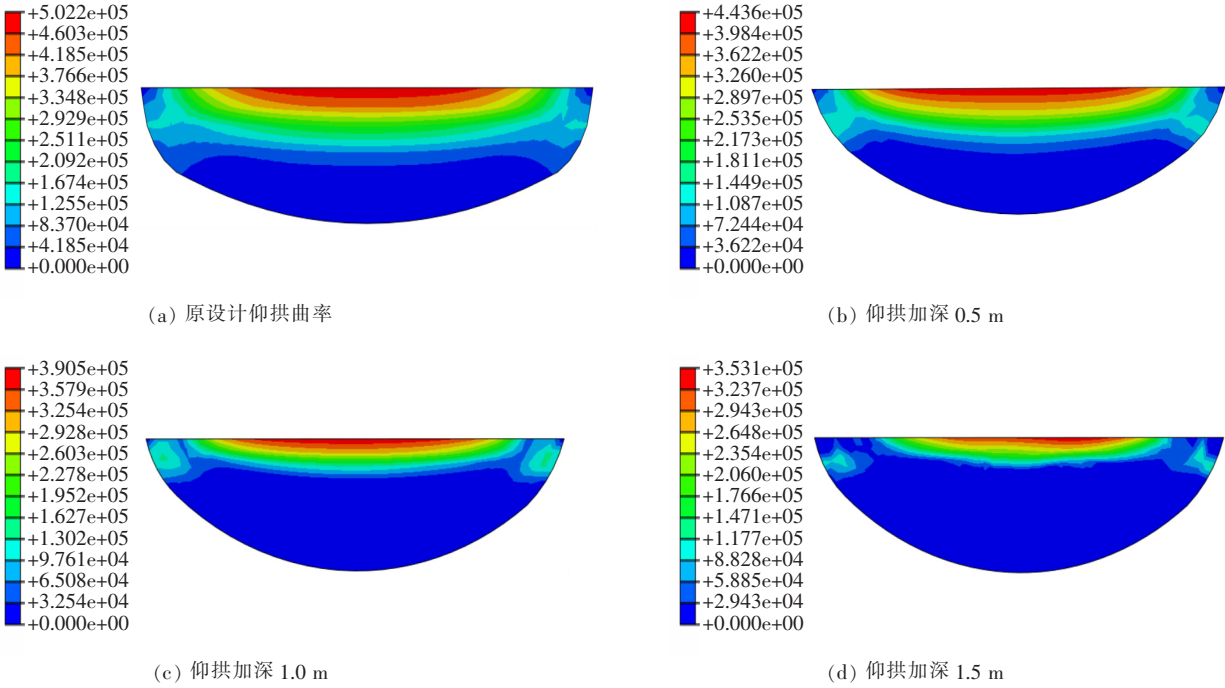
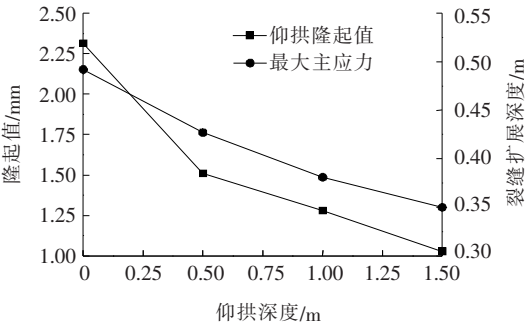


图 13 仰拱填充混凝土最大主应力云图(单位:Pa)



外水压力过大是造成炭质板岩地层隧道底部结构破损的主要原因。因此,富水炭质板岩地层隧道底部结构破损的防治主要从以下 3 个方面考虑:

- (1) 针对软弱炭质板岩地层,隧道仰拱结构应根据地应力水平和围岩体结构进行针对性分析,在此基础上进行隧道底部结构的特殊设计,确定合适的仰拱矢跨比和刚度,对于香丽高速公路隧道,在现有仰拱基础上加深 1.0~1.5 m 可以有效降低仰拱破损发生。
- (2) 加强隧道防排水。由于炭质板岩具有遇水易软化的特性,隧底积水排放不畅不仅加剧了隧底围岩的软化,同时导致隧道底部结构受到过大的水压力,对隧道底部结构的安全性造成极大的影响。因此,应当及时排除隧道底部积水以及完善隧道底部排水系统。
- (3) 隧底软弱围岩的加固。由于隧底围岩软化程

度的加重,仰拱填充混凝土隆起值和裂缝扩展深度不断加大,对于隧底围岩进行加固显得非常必要。可在隧道仰拱填充开裂破损段落设置隧底锚杆或注浆管,根据现场隧底软化围岩深度达 2~3 m 的实际情况,对于隧道底部炭质板岩软弱围岩进行加固,加固圈一般为 4~5 m,注浆材料可以采用超细水泥。

6 结论

以云南香丽高速公路炭质板岩地层隧道为工程背景,现场调查了隧道底部结构破损情况,并以底部结构破损最为严重的海巴洛隧道为典型研究对象,通过 Abaqus 软件扩展有限元法(XFEM)建立数值计算模型,对炭质板岩地层公路隧道底部结构特性及破损机理、破损影响因素和破损整治措施展开研究,主要得出以下结论:

- (1) 香丽高速公路富水炭质板岩地层隧道底部结构破损主要是由于基底围岩遇水软化,导致隧道底部结构所受拉应力过大,出现张拉裂缝。
- (2) 仰拱曲率和水压力是造成炭质板岩地层隧道底部结构破损的重要原因。
- (3) 在富水炭质板岩地层,可采取加固隧底软弱围岩和加强隧底排水、调整仰拱曲率加深仰拱等措施综合防治隧道底部结构破损。

软岩偏压隧道中夹岩施工扰动效应及控制技术研究

李军

(湖南建工交通建设有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 依托某实际工程,采用 Abaqus 建立三维数值分析模型,研究不同净距和坡度对软弱围岩偏压小净距隧道中夹岩围岩塑性区发展规律的影响,并研究中空注浆锚杆长度变化对中夹岩及隧道稳定性的影响,得到合理加固参数。结果表明:随着坡度和净距的变化,中夹岩柱塑性区的表现形式可分为塑性区中心贯通、塑性区边缘贯通和塑性区分离3种类型;塑性区中心贯通产生的围岩塑性变形要比塑性区边缘贯通和塑性区分离的围岩塑性变形严重得多;当净距小于10 m时,中夹岩柱处于塑性区贯通破坏状态,需要对中夹岩柱进行加固;基于锚杆长度变化对锚杆轴力及隧道位移的影响,锚杆长度取4 m较为合理,对于偏压小净距隧道,浅埋洞可以采用规范规定的同等级别下支护参数的较小值,深埋洞可以采用规范规定的同等级别下支护参数的较大值。

关键词: 软弱围岩;小净距隧道;地形偏压;中夹岩;加固参数;围岩稳定性

由于软弱围岩具有强度小、变形大的特点,小净距隧道中夹岩柱厚度较小,在隧道施工过程中多次受到扰动容易发生塑性破坏,为了保证中夹岩稳定性,应采取相应的加固措施对其进行加固处理。确定合理的中夹岩加固范围参数是软弱围岩偏压小净距隧道设计和施工过程中需重点关注的问题,不仅是保证中夹岩柱加固措施有效性的必要前提,也是提高施工效率和效益的重要举措。

目前许多学者对偏压小净距隧道中夹岩柱扰动效应及加固保护措施进行了相关研究。何川等、许书生

等、王更峰等、唐陶文等、刘芸等、万民科采用二维弹塑性数值计算方法,依托实际工程,研究了不同的加固措施(预应力锚杆加固、小导管注浆、普通锚喷支护及不同组合形式)对小净距中夹岩柱扰动效应的控制效果,并对几种加固措施进行了适应性比选研究;杨建平等、黄志义等、章慧健等、张其来等、李君君等、谢俊杰等结合实际工程的施工特点,基于数值模拟及模型试验方法,分别研究了支护时机、施工顺序、施工方法对小净距隧道中夹岩稳定性的影响,为实际工程中夹岩加固方案的制定提供了理论依据。已有研究对于中夹岩加

参考文献:

- [1] 郭健,阳军生,陈维,等.基于现场实测的炭质板岩隧道围岩大变形与衬砌受力特征研究[J].岩石力学与工程学报,2019(4).
- [2] 王维富.炭质板岩地层隧道施工要点及大变形防治措施[J].隧道建设,2010(6).
- [3] 王一鸣,任登富,王立川,等.三联隧道穿越煤系地层软岩大变形控制研究[J].地下空间与工程学报,2013(S1).
- [4] 王立川,肖小文,林辉.某铁路隧道底部结构隆起病害成因分析及治理对策探讨[J].隧道建设,2014(9).
- [5] 王树英,阳军生,李习平.高地应力凝灰岩地层铁路隧道支护结构大变形的原因及其整治[J].中国铁道科学,2014(5).
- [6] 郑波,吴剑,吴晓龙.水压力作用下隧道底部结构裂损机理及其防治[J].铁道工程学报,2017(1).
- [7] 崔连友,吴剑,郑波.雪峰山隧道进口段仰拱填充结构开裂原因探讨[J].地下空间与工程学报,2015(1).
- [8] 康涛,胡斌,刘传新.槽管头隧道病害机理分析及治理方案研究[J].地下空间与工程学报,2013(S2).
- [9] 丁冬冬,梁庆国,徐善常,等.软化泥岩对隧道仰拱的受力特性影响研究[J].铁道科学与工程学报,2016(10).
- [10] 云南省交通规划设计研究院.国家高速公路网G0613云南省香格里拉至丽江高速公路第7标段两阶段施工图设计.第四册《隧道》[Z],2015.