

连拱隧道底部岩溶处理方法及其计算分析

张甘成¹, 朱慧芳¹, 童庆峰²

(1. 浙江黄衢南高速公路有限公司, 浙江衢州 324000; 2. 浙江黄衢南高速公路衢州市指挥部, 浙江衢州 324002)

摘要:目前隧道跨越溶洞的处理多以经验为主,处理后也无相应的评价方法,针对这一现状,采用理论计算方法对该问题进行了研究。结合一典型双跨连拱隧道工程实例,在综合比较多种底部溶洞处理方案的基础上,在隧道底部采用拱梁结构跨越溶洞,探讨了计算模型的建立方法和计算荷载的确定方法,提出了隧底拱梁结构的安全判定标准并对该工程实例的安全性进行了判断,所提出的计算方法对保证隧道安全具有重要意义。

关键词:连拱隧道;底部溶洞;拱梁结构

中图分类号:U455.4 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2007)10-0072-04

Treatment Method for Karst Bottom of Double-arched Tunnel and the Calculation & Analysis/ZHANG Gan-cheng¹, ZHU Hui-fang¹, TONG Qing-feng² (1. Zhejiang Huangqunan Highway Co. Ltd., Quzhou Zhejiang 324000, China; 2. Quzhou Headquarters of Zhejiang Huangqunan Highway, Quzhou Zhejiang 324002, China)

Abstract: The paper discussed the establishing method of calculation model and determining method of load calculation in according to a typical double span continuous arch tunnel case, the author made comprehensive comparison on several treatment concepts of karst cave in bottom and determined to adopt arch-beam structure. Judging standard of safety was put forward for arch-beam in bottom of the tunnel and the judgment on the engineering case was made.

Key words: double-arched tunnel; karst cave in bottom; arch-beam structure

我国岩溶地区分布广泛,随着公路和铁路建设的迅猛发展,在岩溶地区修建的隧道越来越多,据不完全统计,目前西部已建公路隧道位于石灰岩溶地区的约占50%。另外,连拱隧道由于其占地面积小、展线容易等优点在中短隧道中成为首选的结构型式。连拱隧道在修建过程中也不可避免的遇到了岩溶的问题,如柳州市南二环路上的桐油山隧道,银仔山一、二号隧道,宜万铁路的白云山隧道等工程均遇到了穿越溶洞的问题。岩溶不良地质现象的存在给隧道开挖和运营安全造成严重的威胁。

对于隧道穿越溶洞的问题,已有较多文献进行了研究^[1~3],溶洞位于隧道上方或侧翼的情况一般较易进行处理,当溶洞位于隧道底部时处理就应慎重。根据文献调研分析,目前隧道穿越溶洞的处理方法多凭经验进行,没有进行理论计算分析,对隧底岩溶地基经处理后是否安全,也没有相应的判定方法,本文结合工程实例对这些问题进行了探讨。

1 工程概况

某双跨连拱隧道通过地段属岩溶发育区,洞身

多处穿越溶洞、溶槽。其中在DK41+085处出现的溶洞,沿隧道纵向长约38m,横向宽约18m,横断面溶洞与隧道的典型关系如图1所示。溶洞呈上宽下窄,钻探至隧底以下28.6m仍未见底,溶洞充填物隧底至隧道拱腰为软塑状粘土,其上为溶洞空腔,隧底以下则为淤泥,承载力极低。由于隧道采用连拱结构形式,隧道跨度大,中墙处于溶洞内,而两侧边墙位于基岩上,如处理不当,有可能造成隧道整体下沉,或者中墙产生过大沉降,从而留下安全隐患,导致衬砌开裂破坏等情况的发生。

2 隧道底部溶洞处理方案选择

隧道底部溶洞的处理方法有多种,主要包括换填封堵、注浆加固、桩基处理、复合地基处理以及筑梁或拱结构跨越等形式。

方案一:换填封堵。该方案主要针对溶洞规模已探明且规模不大和无排水要求的溶洞,将承载力不高的岩溶充填物挖除,并采用混凝土、浆砌片石或干砌片石予以回填封闭。该方案施工简单,造价低,能够保证处理效果。但由于本隧道溶洞范围大,深

收稿日期:2007-05-30

作者简介:张甘成(1969-),男(汉族),浙江衢州人,浙江黄衢南高速公路有限公司工程部副经理、工程师,桥梁工程专业,从事工程管理工作,浙江省衢州市三衢路39号,zgc9671@163.com;朱慧芳(1973-),女(汉族),浙江衢州人,浙江黄衢南高速公路有限公司中心试验室主任、工程师,桥梁工程专业,从事工程技术管理工作,zhuhuifang01@163.com;童庆峰(1975-),男(汉族),浙江衢州人,浙江黄衢南高速公路衢州市指挥部工程师,桥梁工程专业,从事工程管理工作,浙江省衢州市三衢路297号,tqfeng12@163.com。

度尚未探明,基底换填工程量大,工期长,不切实际。

方案二:注浆加固。该方案主要根据隧道底部岩溶充填物的不同性质,采用压密注浆、劈裂注浆、高压旋喷注浆等方法加固岩溶充填物,提高其承载能力。该方案在淤泥质地层进行注浆加固技术要求高,难以保证注浆效果,隧道的安全性无法得到保证。

方案三:桩基处理。该方案主要采用桩基础来承受上部围岩及衬砌结构的荷载,桩基础包括旋喷桩、挖孔桩、钻孔桩、碎石桩、砂桩、石灰桩、钢管桩等,根据实际岩溶充填物的性质采用不同的桩基础。然而在隧道内进行桩基施工,设备操作空间小,施工难度大,工期长,造价高,施工质量也难以保证。

方案四:复合地基处理。复合地基是指由 2 种刚度不同的材料组成的,共同承受上部荷载并协调变形的人工地基,最常用的复合地基是桩基础和其他地基组成的复合地基。由于复合地基在施工难度等方面同桩基础类似,在隧道中应用也较为困难。

方案五:筑梁或拱结构跨越。该方案不需要对溶洞充填物进行处理,直接采用筑拱或梁结构跨越溶洞,将上部荷载转移到拱梁结构上。该方案简单易行,施工方便,但对溶洞两侧的基岩的承载力要求较高。

由于本隧道溶洞两侧基岩完整,承载力较高,因此采用方案五是较为可行的方法。

3 溶洞段隧道支护结构及隧底拱梁结构设计

如图 1 所示,溶洞段隧道支护结构采用复合式衬砌,初期支护采用 15 cm 厚的钢纤维喷射混凝土,同时加设 3.5 m 长的中空注浆锚杆,其间距为 1.2 m;二次衬砌采用 75 cm 厚的 C30 钢筋混凝土。位于溶洞内的隧道,隧底以上溶洞充填物全部清除,施作 75 cm 厚的 C30 钢筋混凝土结构,其上施作 2.0 m 厚的 C15 片石混凝土护拱。

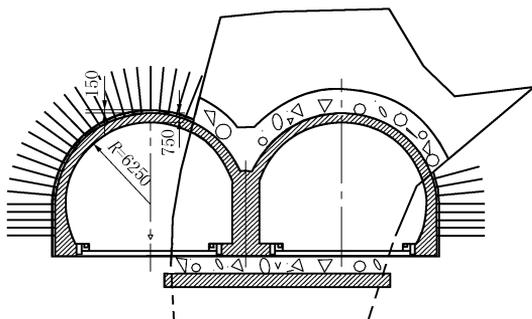


图 1 溶洞段支护结构示意图

隧道底部采用拱梁结构跨越,拱梁沿隧道纵向的设置如图 2 所示,两端支承在基岩(Ⅲ级围岩)上,拱跨 18 m,梁高 1 m,拱轴线半径为 11 m,拱梁采用钢筋混凝土材料,其上溶洞充填物采用浆砌片石回填。在隧道横断面上,拱梁设置在整個溶洞范围内,以分散墙底压力。

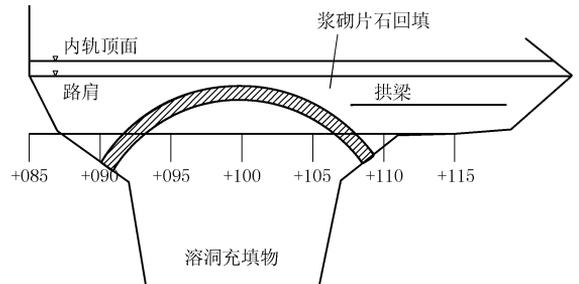


图 2 拱梁结构示意图

4 计算模型及计算荷载

隧道支护结构承受围岩压力以及拱顶回填片石混凝土的重力,并通过隧道中墙和边墙传递到中墙和边墙基底的基岩上。因此对隧道跨越溶洞结构的安全性进行分析可分两步进行,首先计算围岩压力作用于隧道衬砌结构所产生的中墙基底处的压力,而后将此压力作用于基底跨越结构进行分析。

连拱隧道在施工过程中有两种结构状态,即单跨衬砌结构状态与双跨衬砌结构状态。先行施作的单跨衬砌结构是偏压结构,而最终完成的双跨衬砌结构是对称结构,本文重点考虑的是中墙基底的压力,双跨衬砌结构产生的压力显然较单跨大,故取其为研究对象,其计算简图见图 3。

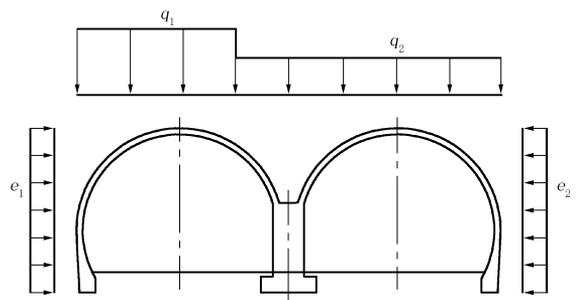


图 3 衬砌结构计算简图

通过计算,隧道中墙基底压力(每延米)为 2170 kN,隧道中墙基底宽度为 2.6 m,因此作用荷载为 835 kN/m²。

需要说明的是,由于隧道底部在整个溶洞范围内都采用了拱梁结构,中墙基底以外的拱梁结构将会分担一部分中墙基底荷载,因此,实际作用在拱梁

上的压力应该比计算值要小,但出于准确判断的难度与顾及到施工中可能出现一些意料不到的不利因素,计算中未予以折减。计算出中墙基底荷载后,即可将此荷载作用在拱梁结构上进行进一步计算。对于拱梁跨越结构,两端支承在基岩上,为固定端支座,考虑溶洞充填物的部分抗力约束,这时求解位于不同地基上的弹性地基曲梁问题,可按局部变形理论,即用温克勒尔(Winkler)假定模拟岩溶地基的沉降变形,采用有限单元位移法编程后进行计算,其计算图式见图4,计算参数为:截面高度1 m,容重 25 kN/m^3 ,弹性模量 28.5 GPa ,溶洞充填物抗力系数 20 MPa/m ,作用荷载 835 kN/m^2 。

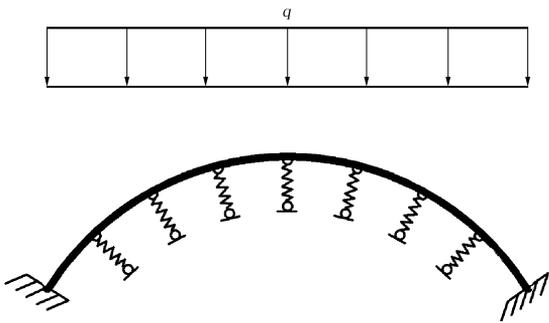


图4 拱梁结构计算简图

5 计算结果及分析

5.1 计算结果分析

根据以上计算,分别得到拱梁结构的位移、轴力和弯矩分布如图5~7所示(由于内力分布对称,图中只给出了半结构的结果图)。

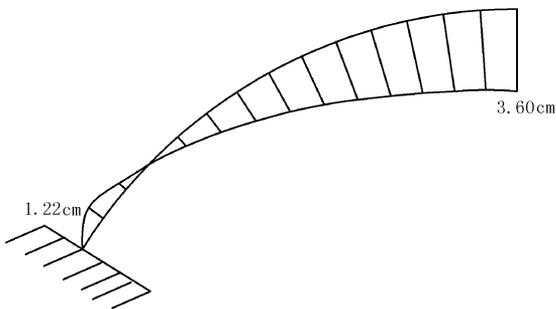


图5 拱梁结构位移分布图

从计算结果来看,最大位移发生在拱梁的跨中(拱顶),达到 3.6 cm ,往拱脚方向位移逐渐减小,在靠近拱脚处出现向上的位移。轴力分布整个拱梁结构均处在受压状态,在跨中为最小,到拱脚位置出现最大值,这说明拱脚基岩将承受很大的压应力,在设计中应予以重视。弯矩分布则在跨中出现最大正弯矩,在拱脚出现最大负弯矩,也即在跨中位置拱梁底

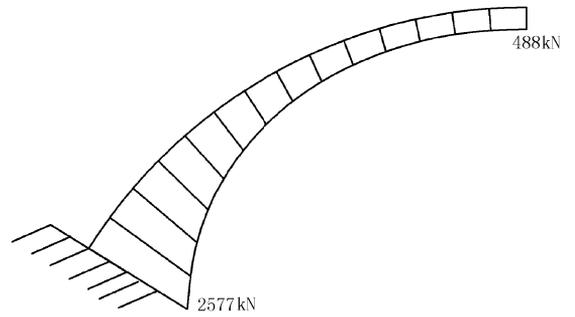


图6 拱梁结构轴力分布图

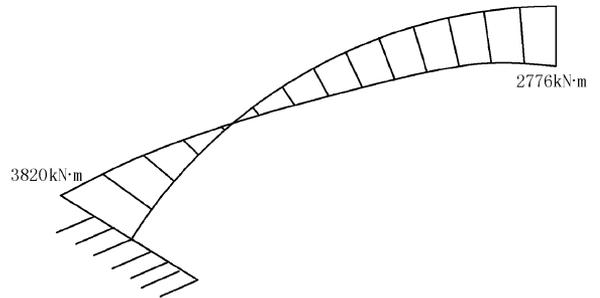


图7 拱梁结构弯矩分布图

面受拉,而在拱脚位置则是拱梁的顶面受拉,这两个位置也是拱梁结构的最不利位置,因此在配筋设计中应给予足够的重视。

5.2 安全性判断

对隧道底部岩溶地基采用拱梁跨越结构进行处理后,其安全性主要体现在2个方面:一是拱梁结构本身的承载力以及拱脚基岩的承载力是否满足要求;二是拱梁的位移(沉降)是否满足要求,即经过处理后连拱隧道中墙和边墙的沉降差异是否会导致隧道结构的安全使用受到影响。

5.2.1 承载力要求

从拱梁的受力状态分析可知,其同隧道的拱部衬砌结构类似,都属于偏心受压构件,因此对其承载力的验算可按我国隧道设计规范规定的隧道衬砌结构的验算方法进行,限于篇幅,具体计算公式从略。根据计算,可得隧道底部拱梁结构的安全系数分布如图8所示。从中可看出,除少数点满足安全系数的要求外,拱梁结构多数部位均不满足安全系数的要求,因此对拱梁结构必须进行配筋,以提高其承载力。

通过计算,拱梁结构作用于基岩上的应力达到 0.943 MPa ,隧底溶洞两端基岩为Ⅲ级围岩,其基底承载力为 1.0 MPa ,基岩的承载力满足要求。

5.2.2 位移要求

对于隧道结构能够承受多大的不均匀沉降,特

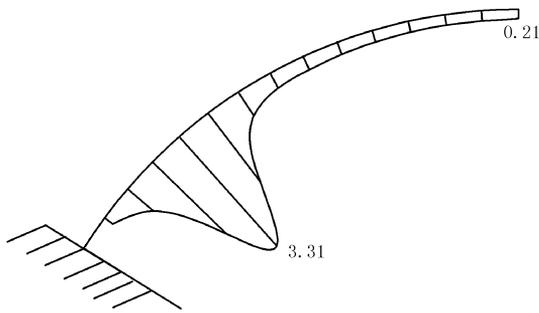


图 8 拱梁结构安全系数分布图

别是连拱隧道中墙和边墙在多大的差异沉降下能够保证隧道的安全使用,目前国内还没有相关的标准。参照文献[7],对于地表的一般钢筋混凝土框架结构,当差异沉降 δ 和建筑物长度 L 的比值 δ/L 达到 $1/500$ 时,结构开始出现裂缝,当比值 δ/L 达到 $1/150$ 时,结构产生严重变形而影响正常使用。根据计算,隧道溶洞段采用拱梁结构处理后中墙最大下沉达到 3.6 cm ,隧道单跨宽度为 14 m ,比值 δ/L 为 $1/389$ 。由此判断该隧道隧底经过拱梁处理后仍有可能由于中墙沉降过大而导致隧道衬砌结构开裂,但隧道还可正常使用。

需要说明的是,以上结论是参照地表建筑物差异沉降的标准得出的,对于处于地下的隧道结构,由于围岩的约束作用,其受不均匀沉降的影响可能会减小,但隧道的受力状态会因此改变,有关这方面将在进一步的研究中进行探讨。

(上接第 63 页)

(5) 钻进中,当地层换层时,不论是由软变硬还是由硬变软,或者是由完整变破碎,由破碎变完整等情况,均应减压减速钻进,对其进尺的速度和冲洗液的流量及压力也应加以适当的控制;

(6) 钻进中,应勤检查钻机有无移动,立轴钻进的方向有无变化,发现应及时纠正;

(7) 为防止冒浆发生,必须熟悉所使用机械的性能和钻孔的特点,经常研究,总结经验,在帷幕的钻孔中,应对冒浆及时控制,以利于及时处理;

(8) 止浆套管下入孔内时,应保证一定的打入深度,可采用小 2 级的钻具进行探测接触段位置,在确定接触段位置后,再根据经验参数或试验参数的厚度进行止水止浆套管作业。

5 施工效果

通过实验段的冒浆事故的处理与预防施工总

6 结语

结合一连拱隧道底部岩溶处理的工程实例,在综合比较多种底部岩溶处理方法的基础上,确定了拱梁结构的处理方案,并针对该处理方案,建立了计算模型,确定了计算荷载,提出了隧道底部拱梁结构的安全评判标准,对其安全性进行了分析。

(1) 该连拱隧道现有拱梁结构跨越溶洞不能确保其安全,必须对其进行配筋设计,同时采取增大拱梁刚度、处理隧底溶洞充填物等措施减小其位移。

(2) 根据计算,隧道拱脚处应力较大,在进行拱梁设计时,应确保拱脚处于稳定的基岩上,必要时应对拱脚基岩进行处理。

参考文献:

- [1] 张德和. 隧道穿越溶洞堆积物的设计与施工[J]. 西部探矿工程, 1999, 11(2): 42-47.
- [2] 李杰, 黄永红. 隧道施工中几种典型岩溶的处理[J]. 铁道建筑技术, 2002, (增刊): 52-54.
- [3] 赵明阶, 敖建华, 刘绪华, 等. 隧道底部溶洞对围岩变形特性的影响分析[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(6): 20-24.
- [4] 赵明阶, 刘绪华, 敖建华, 等. 隧道顶部岩溶对围岩稳定性影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 445-449.
- [5] 李亚武. 岩溶地基处理技术[J]. 铁道工程学报, 2002, (4): 44-49.
- [6] 林存友. 铁路隧道隧底岩溶的处理[J]. 铁道建筑技术, 2001, (2): 13-14.
- [7] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

结,后期的帷幕灌浆孔的冒浆预防对于灌浆质量起到了决定性作用,我院在工期、灌浆质量、效率、效益方面取得了好的成果,并且该工程达到帷幕灌浆优良工程。

6 结语

要保证帷幕灌浆孔不发生冒浆,绝非易事。虽然结合地质条件采取多种技术措施和操作方法,可以预防,但往往也很难以避免冒浆现象。如果用增加止浆厚度等方法来加强控制,势必要增加浩繁的工作量,增加工期。因此,对于解决冒浆问题,笔者认为,不仅要从施工方面入手,而且要从设计方面着手。并通过灌浆试验获得相关参数与技术方法,避免冒浆现象。