

下承式钢管混凝土系杆拱桥常见拱脚裂缝分析及治理方法

俞阳椿¹ 徐梦喆² 包鸿铨³

浙江省交通运输科学研究院

DOI: 10.12238/jpm.v5i11.7395

[摘要] 近年来在我国得到了快速发展,建造了大量的钢管混凝土系杆拱桥。混凝土拱脚是钢管混凝土系杆拱桥中的重要受力部件,位于拱肋、系杆和端横梁交点位置,主要起联结作用,受力复杂,但在其建设和后期运营管养过程中发现绝大部分钢管混凝土系杆拱桥的拱脚部位存在裂缝,很难防治,甚至部分新建桥梁在通车之前即已严重开裂,对结构耐久性和安全性产生了很大的影响,已成为钢管混凝土系杆拱桥的质量通病和难以克服的工程难题。下承式钢管混凝土系杆拱桥具有结构轻盈、外形美观、跨越能力大、桥下净空高、施工方便、造价经济等特点,近年来在我国得到飞速发展,特别是内河航道上使用较多。拱脚是系杆、端横梁和拱肋的交点,主要起联结作用,为钢结构和混凝土结构的变截面处,受力复杂,在运营过程中钢管混凝土系杆拱桥拱脚部位存在裂缝,影响结构的安全性。

[关键词] 下承式; 钢管混凝土; 拱桥拱脚裂缝

Analysis and treatment method of common arch foot cracks of concrete steel pipe arch bridge

Yu Yangchun¹ Xu Mengzhe² Bao Hongquan³

Zhejiang Transportation Research Institute

[Abstract] In recent years, China has been a rapid development, and a large number of concrete filled steel tube tie rod arch bridge has been built. Concrete arch foot is an important stress parts of the concrete tie pole arch bridge, in the arch rib, tie rod and end beam intersection position, the main coupling effect, force is complex, but in the construction and the late operation of the most concrete tie pole arch arch of cracks, it is difficult to prevent and cure, and even part of the new bridge before traffic is serious cracking, the durability of the structure and safety has a great influence, has become the quality of the concrete tie pole arch bridge common fault and engineering problems to overcome. The concrete-filled steel tube arch bridge has the characteristics of light structure, beautiful appearance, large crossing ability, high clearance, convenient construction, economic cost and so on. In recent years, it has been used in and developed rapidly in China, especially in inland waterways. The arch foot is the intersection point of pole, end beam and arch rib, which mainly plays a connecting role. It is the variable section of steel structure and concrete structure, and the force is complex, and there are cracks in the arch foot of concrete filled steel tube in the operation process, which affects the safety of the structure.

[Key words] lower bearing; concrete filled steel pipe; arch bridge arch crack

下承式刚架系杆拱桥是我国在系杆拱桥基础上发展起来的新桥式。它是由墩柱、拱肋、系杆、吊杆和桥面系梁板等协同工作的组合结构桥梁,以拱肋与墩柱刚结、系杆承受拱脚水平推力为主要受力特征。钢管混凝土具有良好的力学性能,将钢材与混凝土的优势结合在一起,钢管对混凝土的束缚可以使

混凝土具有更好的抗剪切性能,混凝土作为钢管的填充内容物,又能很好地提高截面的整体惯性矩,避免钢管发生失稳。而在施工阶段,钢管又能直接作为模板进行注浆,避免了拆模等复杂工序。钢管混凝土系杆拱桥内部结构超静定,外部结构静定,不需要施加的推力而在工程中被广泛应用,但由于拱肋

压力、弯矩、系杆钢筋预应力、温差、热膨胀系数的不同、以及拱肋注浆时的巨大应力等多种因素的作用,常常会导致拱脚部位产生开裂。

一、钢管混凝土拱桥的特点

钢管混凝土结构是由钢-混凝土组合材料构成,其基本原理是:钢管与混凝土相互作用时,钢管的径向约束会对其内的混凝土产生套箍效应,从而核心混凝土处于三向受压状态,抗压承载能力和抗变形能力得到一定程度的提高,对钢管来说,其内的混凝土不仅提高了空钢管的稳定性,而且对钢管的抗腐蚀性和耐久性也有一定的加强。钢管混凝土结构既弥补了二者性能的不足,又充分发挥了二者性能的优势,工程应用中拥有良好的效果,具有研究的价值与意义。(1)跨越能力大、各跨径适应性强。大量设计方案对比表明,钢管混凝土拱桥在100~400 m之间适应性与综合竞争力相对较强。(2)承载能力高。试验证明,薄壁钢管实际承载力仅仅只有理论计算值的1/3~1/5,在残余应力存在时,对承载力的影响更大。但在钢管内填混凝土后,核心混凝土的填充有利于提高薄壁钢管的稳定性。同时,钢管对混凝土的约束作用,使混凝土处于三向受压状态,延缓了受压时的纵向开裂。两种材料取长补短,从而使钢管混凝土的承载力大大高于两者单独承载力之和,其受力特性也非常适合在拱桥中应用。(3)地基适应性好。钢管混凝土拱桥结构形式多样,可根据实际的桥址情况选择不同的结构形式。地基条件好时,可设计成有推力式拱桥,比如上承式拱桥或中承式拱桥;地基条件不理想时,通常设计为无推力拱桥,多设计为系杆拱桥,可选择下承式拱桥或者飞燕式组合拱桥。(4)美观性。钢管混凝土拱桥线形流畅,造型优美,色彩融于周边环境,符合现代美学的审美标准。(5)施工技术成熟,施工速度快。经过国内外学者长期的研究探索 and 大量工程实践的累积,我国对于钢管混凝土施工技术已形成一套系统的方法,具体可分为悬臂拼装、支架施工主要施工方法和其他新式方法。在施工过程中,钢管可以起到临时模板和劲性骨架的双重作用;钢管混凝土拱桥可模块化施工,并行作业,大大地缩短了工期。

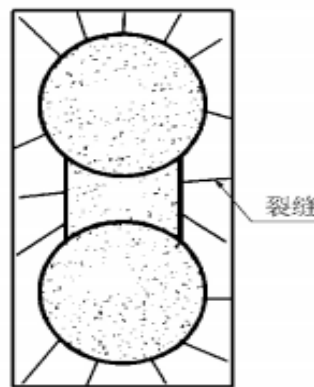
二、钢管混凝土拱桥的应用原理

钢管混凝土系杆拱桥主要是以钢管混凝土拱肋来代替传统的钢筋混凝土拱肋,通过钢管拱肋制作劲性骨架来进行拱桥整体架设,架设完成后进行钢管拱肋混凝土浇筑,从而完成拱肋施工。由于钢管拱肋重量较轻,刚度大,便于制作整体劲性骨架,极大的降低了拱桥吊装施工的难度。钢管混凝土拱肋是在钢管中填充混凝土,本质上是材料的组合构件。它在受力方面有其自身的一些特点。钢管混凝土拱肋从类型上来说是属于普通型钢管混凝土,外部荷载同时施加在钢管和核心混凝土上,而钢管在起到约束混凝土作用的同时也参与轴向受力。当拱肋受到的轴向荷载增加时,钢管内的混凝土的泊松比以增大的速度要超过钢管的泊松比,这就使得核心混凝土因为径向变形被钢管所约束,而形成钢管对混凝土的套箍作用。通过套箍作用,钢管内的核心混凝土的承载力得到了提高,并且大大增加了钢管拱肋的刚度及稳定性。钢管混凝土拱桥中的拱肋以承受轴向压力为主,钢管拱肋的截面选择对于结构稳定性来说十分重要。钢管拱肋按截面形式的不同,可以分为单管式、哑

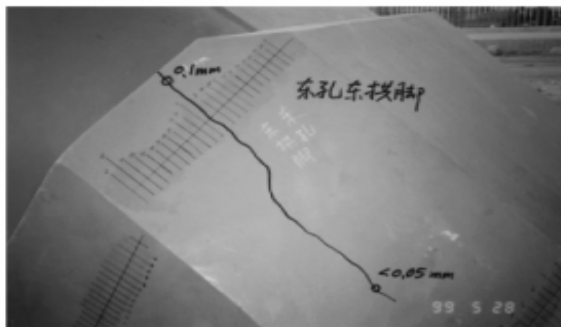
铃式、桁架式、桁架组合式等。就单管式拱肋截面来说,所适用桥梁跨径较小,而大跨径钢管拱桥的拱肋多采用哑铃式、桁架式等截面形式。根据桥面荷载承受形式的不同,钢管混凝土拱桥可以分为上承式、中承式、下承式。上承式拱桥对地基要求较高,一般多用于山区或者峡谷。相对来说,中下承式的钢管混凝土拱桥的适用范围更广,目前在建和新建的钢管混凝土拱桥多以中承式和下承式为主。其中下承式拱桥一般都带有系杆,通过系杆传递推力,可以有效减少了拱桥对于地基条件的依赖。

三、混凝土拱脚裂缝成因分析

钢管混凝土拱脚极易出现裂缝,且多数在施工期即已出现裂缝,其裂缝一般有以下:(1)第一类裂缝出现在混凝土拱脚立面,以沿钢管拱肋轴线平行的纵向裂缝为主,局部可能也分布有不规则的网状裂缝。(2)第二类裂缝出现在混凝土拱脚端面(拱脚与拱肋连接面)上,其裂缝主要以钢管拱肋为中心向四周辐射状分布,见图。



(3)第三类裂缝出现在混凝土拱脚系梁封锚端,其裂缝主要呈不规则的网状。(4)第四类裂缝出现在混凝土拱脚正面(顶面),其裂缝也主要为不规则的网状,从国内多座钢管混凝土系杆拱桥拱脚裂缝检测情况来看,第一、二类裂缝主要出现在钢管拱肋预埋段插入拱脚的上半段外包混凝土四周,一般在钢管拱肋内混凝土泵送后才显现,裂缝主要顺拱轴线方向,在拱肋与拱脚连接界面呈辐射状,裂缝宽度在拱脚上端宽度大,下端宽度小,向下延伸直至消失,其分布具有明显的规律性,具体实桥拱脚裂缝见图。



根据该裂缝出现的时机及分布特点,分析该裂缝产生的主要原因可能由钢管拱肋内混凝土泵送时内部巨大的压力以及日照作用下钢管和混凝土因导热性不同产生的温差引起的,为定量分析这两个因素对混凝土拱脚受力的影响,建立了空间实

体有限元模型,混凝土泵送产生的内应力按 γh 计,日照作用下钢管和混凝土的温差按 10°C 考虑,具体计算结果可看出:在钢管拱肋内混凝土泵送阶段拱脚产生的最大计算拉应力为 15.5MPa ,在日照作用下拱脚产生的最大计算拉应力为 2.5MPa ,两种工况下拱脚拉应力云图和检测发现的裂缝分布位置高度一致,且已远超混凝土的抗拉极限强度,因此有理由判断该裂缝主要由这两种因素引起的,由于混凝土泵送阶段最大计算拉应力远大于日照作用下的拉应力,故前者是主要原因,后者是次要原因。对于第三、四类裂缝,从形态分析来看,主要以不规则的网状裂缝为主,分析其原因可能是由混凝土收缩引起的。对于拱脚系梁封锚端裂缝,主要与设计采用的封锚方式有关,为确保封锚端外观光洁美观,目前设计在梁端多采用整片薄层混凝土进行封锚,由于梁端面积较大、厚度一般仅为 15cm 左右,这样一整片薄层混凝土封锚后由于新老混凝土的收缩差极易出现开裂,甚至严重的会在后期出现大面积的剥落;对于拱脚正面(顶面)裂缝,主要与施工工艺有关,混凝土拱脚在浇筑时,由于顶面采用开放浇筑施工,在构件成型后需进行收浆和整平,拱脚顶面又为倾斜面,难以有效振捣,控制不好易出现表面不平、蜂窝、麻面等病害,收浆后外观较差,极易出现此类不规则的网状裂缝,由于拱脚一般也属于大体积混凝土,如浇筑阶段水化热控制不好,往往也容易出现裂缝;此外,拱脚钢筋密集,浇筑难度大,容易出现因振捣不实导致的蜂窝、麻面、露筋、空洞等质量通病,因此也会加剧裂缝的产生和发展。

四、裂缝控制措施

某桥梁下承式钢管混凝土系杆拱桥常见拱脚裂缝,对拱脚顶面裂缝,从形态分析来看,主要为不规则的网状裂缝,主要因混凝土收缩引起,与施工工艺和结构特点有关,拱脚顶面混凝土一般为 C50 高标号混凝土,水混含量高,水化热高,在构件浇筑成型后需进行收浆和整平,拱脚顶面为斜面且内部用钢管,混凝土相对较薄,导致难以有效振捣,控制不好易出现表面不平整、麻面等病害,再加上养护措施不到位,极易出现不规则网状裂缝。对钢管混凝土裂缝,一般在钢管拱肋内混凝土泵送后才显现,裂缝主要顺拱轴线方向,在钢管与拱脚混凝土连接处呈辐射状。原因可能是由钢管拱肋内混凝土泵送时内部压力过大,界面处混凝土厚度薄弱,特别钢管和混凝土因材质不同导致伸缩变形不一致引起,经试验室对本工程钢管和混凝土加热试验,钢管膨胀率为 4% ,混凝土膨胀率为 2% 。

1、设置剪力钢筋。对拱脚混凝土与钢管受热膨胀率不同,增加剪力钢筋、增加拱肋预埋段横向对拉钢筋及包裹钢板等措施尽量将拱肋预埋段钢管的热膨胀系数控制到与混凝土一致。在拱肋预埋段底口 2m 范围内设置剪力钢筋,通过剪力钢筋将拱肋预埋段和拱脚固结成一整体,实现了“同步收缩”;钢管热膨胀系数大于混凝土,因此在拱肋预埋设置横向对拉筋,限制拱肋过多膨胀,从而避免降低裂缝产生的概率。

2、优化混凝土配合比。施工过程中严格控制原材的质量,选择低水化热水泥,减小粗骨料粒径,采用自平流混凝土,进场的原材经试验检测合格后进入拌合站,确保了成品混凝土抗压、抗剪等性能达到理论值,特别是向混凝土中添加聚丙烯纤维等措施进一步提升混凝土抗裂性能。

3、设置振捣棒导管。一方面增加振捣棒数量及型号,配

置小型振捣棒,在两个拱脚内侧附着两台 ZKF-150G 高频振动器,在浇筑过程中更换安装位置,不得长时间在同一位置进行工作,保证了大方量、钢筋密集等复杂条件下,最大程度地保证了振捣棒能覆盖到每个振捣点;另一方面针对振动棒很难达到的振捣位置,在钢筋绑扎时就设计预留了振动棒导管,先由导管伸入到指定位置,再将振捣棒沿着导管内壁伸入振捣区,实现“零漏振”。

4、拱肋预埋段浇筑混凝土至顶口并增加隔板。对拱肋混凝土压注裂缝,拱肋预埋段有 2m 处于拱肋混凝土中,压注混凝土时,压力传递到拱肋根部,对拱肋产生径向的扩张压力,进而导致拱脚混凝土崩裂,为此向拱脚预埋段内浇筑混凝土至顶口,并且振捣密实,防止压注拱肋混凝土时,压力传递到拱脚。为了进一步加强对拱肋混凝土的“隔离”效果,在拱肋预埋段顶口增加隔板,并与顶口焊接严密,防止压注混凝土浆液言“缝隙”深入拱脚段,有效地阻止了压注混凝土的压力传递。

5、加强施工过程中的温控和后期养护。对混凝土水化热进行有效控制,混凝土浇筑过程中实施全程监测,将内外温差严格限制在 25°C 以内;控制好拆模时间,避免过早,防止浇水急冷,养护水温与混凝土温差控制在 15°C 以内;加强拱脚混凝土的养护,冬季施工时覆盖棉被保温,夏季时采用土工布覆盖加不间断喷淋进行洒水养护。

目前来说,下承式钢管混凝土系杆拱桥适用范围较广泛,既可以用于城市市政景观桥,也可以用于高速公路跨线桥和铁路桥。值得一提的是,近年来在桥梁项目中下承式钢管混凝土系杆拱桥被越来越多的选用。钢管混凝土系杆拱桥拱脚裂缝是工程技术人员面临的常见质量病害,对拱脚常见裂缝的成因进行了深入分析和探讨,并对出现的裂缝给出了处治方法,该防治措施可基本上解决目前混凝土拱脚易开裂的难题。

[参考文献]

- [1]李明,吴凯. 钢管混凝土系杆拱桥拱脚裂缝成因分析及防治措施研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2022(12): 150-152.
- [2]钢管混凝土下承式刚架系杆拱桥中墩拱脚局部受力分析[J]. 张文光. 安徽建筑, 2021, 28(9): 215-216.
- [3]詹刚毅. 下承式钢管混凝土拱梁组合拱桥拱脚有限元应力分析[J]. 南昌大学学报, 2020, (4): 46-50.
- [4]王福春,梁力,李艳凤. 下承式系杆拱桥拱脚局部应力有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2021, 27(2): 281-285.
- [5]程泽兵,胡忠宏. 钢管混凝土拱桥拱脚裂缝成因分析及防治措施[J]. 现代交通技术, 2020, 5(1): 47-49.
- [6]王福春,梁力,李艳凤. 下承式系杆拱桥拱脚局部应力有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版). 2021(2): 281-285.
- [7]田万俊,某下承式钢管混凝土系杆拱桥拱脚裂缝防治措施[J]. 科学技术创新, 2020, (35): 143-144.
- [8]郑振飞,徐艳,陈宝春. 下承式钢管混凝土系杆拱桥固结点局部应力分析[J]. 中国公路学报, 2020(2): 71-74.