

大型渡槽温控防裂技术及发展趋势

陈彦玉,黄达海

(北京航空航天大学交通科学与工程学院 北京 100191)

摘要 介绍南水北调工程大型渡槽在材料性质、结构设计、施工措施等方面温控防裂的基本经验,针对渡槽薄壁结构的特点,阐述短期温度应力和温湿耦合作用下渡槽的开裂机理;从温度监测、温度场实时仿真和预报、早龄期混凝土开裂风险预报、施工信息平台搭建、限裂设计下渡槽混凝土温控标准制定等方面探讨渡槽温控防裂的发展趋势。

关键词 大型渡槽 温控防裂 温度应力 温湿耦合 限裂设计

中图分类号 :TV672+.3

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2011)02-0016-07

Techniques and development trends of temperature control and crack prevention of large-scale concrete aqueducts//CHEN Yan-yu, HUANG Da-hai (School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract :The temperature control experience of large-scale concrete aqueducts in China's South-to-North Water Diversion Project was introduced, such as material properties, structural design and construction measures. The cracking mechanism of the concrete aqueducts under short-term thermal stress and coupling of heat and moisture diffusion effect was illustrated as regards the features of the aqueduct with thin-walled structure. Finally, the development trends of temperature control and crack prevention of concrete aqueducts were discussed from the aspects of temperature monitoring, real-time temperature simulation and prediction, early-age concrete cracking risk prediction, construction information platform and temperature control standards for concrete aqueducts under crack-control design.

Key words :large-scale aqueduct; temperature control and crack prevention; thermal stress; coupling of heat and moisture diffusion; crack-control design

1 研究背景

地球上水资源的空间分布悬殊,大规模、长距离、跨流域的调水已成为人类优化水资源配置的重要手段。已建的调水工程中调水量较大的是巴基斯坦西水东调工程,年调水量为 148 亿 m^3 ;距离较长的是美国加利福尼亚北水南调工程,输水线路长达 900 km,调水总扬程为 1151 m,年调水量为 52 亿 m^3 [1]。从 20 世纪 50 年代开始规划的中国南水北调工程是我国继三峡工程之后启动的又一项世界级水利工程,对于优化中国水资源的配置具有重要意义。

渡槽是输送渠道水流跨越河渠、道路、山冲、谷口等的架空输水建筑物,是水工建筑物中应用最广的立体交叉建筑物之一 [2]。在横断面形式上,U 形和矩形渡槽较为常见,具有外形简洁、结构跨度大、节省材料、受力清晰等优点 [3]。在支撑形式上,有拱

式、桁架式、梁型桁架式、桁架梁式、桁架拱式、斜拉式、拱梁组合式等诸多样式 [4]。王长德等在不改变施工材料的前提下,设计出目前世界上最大的渡槽——多厢梁式渡槽,使槽底的承重能力呈几何级数提高。在材料使用上,已从传统的钢筋混凝土转向钢丝网水泥、高标号预应力混凝土(通常为 C50)。高性能混凝土中水泥含量较高,混凝土水化热温升较大,现场实测渡槽混凝土的最高温度可达 60 $^{\circ}\text{C}$ [5],温升和温降快,而且降温幅度大。此外,渡槽的运行环境一般较为恶劣,既受到水荷载的反复作用,又受到温度变化、干湿交替、冻融循环、环境水侵蚀等的作用,由此产生的温度应力和收缩变形导致渡槽常出现不同程度的裂缝,一旦出现贯穿性裂缝,可引起溶蚀,严重危害结构的耐久性和安全性。工程中大型渡槽多采用预应力钢筋混凝土,预应力主要是针对运行期结构荷载和非结构荷载施加的 [6-7],一般在混凝土强度达到设计强度的 80% 后

进行张拉,而施工期内的温度裂缝和收缩裂缝问题并没有得到解决,预应力钢筋仅起到限裂作用。

在渡槽等薄壁混凝土结构设计中,对温度应力的计算非常粗略,不能反映真实情况。南水北调渡槽施工实践表明,温度应力对裂缝的形成和发展起到至关重要的作用,而适当地进行温控对于防止出现危害性裂缝和限制裂缝宽度是十分有利的,因此有必要对大型渡槽施工期温度应力及温度裂缝问题进行专门研究。笔者结合南水北调中线和东线工程渡槽温控防裂实践,从材料性质、结构设计、施工措施等层面系统总结温控防裂基本经验,探讨了短期温度应力和温湿耦合作用下渡槽的开裂机理,并对渡槽温控发展趋势进行预测,旨在为后续南水北调渡槽温控防裂提供参考。

2 大型渡槽温控防裂基本经验

随着世界各国调水工程的开展,大型渡槽的建设在数量、规模上均有重大突破。其中印度萨达尔—萨哈亚克调水工程中的戈麦蒂渡槽建于20世纪70年代中后期,也是目前世界上已建成的最大渡槽之一,通过对渡槽结构体型优化、采用预应力以及构造措施较好地解决了槽身的抗裂问题^[1];中国南水北调工程中的大型渡槽是渡槽建设史上的又一个里程碑,其中在建的沙河渡槽的设计和施工中有许多项技术处于国内领先水平,而且以渡槽综合流量、跨度、质量、总长度等综合指标排在世界同类渡槽首位。

世界各国在渡槽混凝土材料性质、设计技巧、施工方法、管理模式研究等诸多方面硕果累累。下面仅就中国南水北调大型渡槽温控防裂方面的经验作一简述。

2.1 材料性质方面

南水北调渡槽的大流量、大跨度等结构特点以及恶劣的使用环境,要求混凝土具备高工作性能(低坍落度、高流态、稳定泵送)、高抗裂性能(低收缩)、高抗渗性能、高抗冻性能及防止碱骨料反应的高耐久性能,目前多采用C50高性能泵送混凝土。由于高性能混凝土温度收缩和自收缩均较大,一般都掺加高效减水剂和粉煤灰,以降低水灰比,减少水泥和水的用量,减少水化热,提高混凝土的强度,减少混凝土的收缩、徐变,改善混凝土的抗裂和抗渗性能。中国水利水电科学研究院对漕河渡槽槽身C50混凝土进行配合比优化试验研究,实践表明所推荐的配合比的材料具有良好的抗裂、抗渗、抗冻性能且经济合理^[8]。武汉理工大学研究了聚丙烯纤维对渡槽C50高性能混凝土工作性能、力学性能、变形性能及耐久性的影响,试验结果表明掺有聚丙烯纤维的混

凝土抗折强度、劈裂抗拉强度提高20%~24%,同时能提高混凝土的韧性,减小混凝土的开裂风险,对于混凝土的抗渗性、抗冻性和耐久性均有不同程度的提高^[9]。渡槽属于典型的薄壁结构,比表面积比大坝等大体积混凝土大得多,且混凝土早期内部温度较高,温湿耦合作用较为明显,水分散发速度和散发量相对快和大,干缩变形突出。文献^[10]介绍了洛河渡槽高性能混凝土抗干缩试验的情况,发现适宜的水胶比和适量的粉煤灰掺量,对于减小干缩变形以及可能产生的干缩裂缝是有效的,特别是在早期,抗干缩作用尤为显著。

2.2 结构设计方面

现场浇筑的渡槽通常分2层施工,如漕河渡槽第1次浇筑底板及纵梁至槽壁底“八”字以上垂直段25cm处^[11],采用移动模架(也称造槽机)技术很容易实现^[12-13]。此方法能明显降低底板附近的竖向温度梯度,改善底板对侧墙的变形约束条件,降低底板强约束部位部位的拉应力。但应控制上下层混凝土之间的浇筑间歇期,较长的浇筑间歇会导致新老混凝土接合面处温度梯度加大和收缩变形不协调,使得外部约束应力加大,容易导致混凝土开裂;此外,长间歇浇筑的底板一旦遭遇寒潮或混凝土低温入仓冷击也容易开裂。根据国外大型海底深埋式隧洞温控防裂经验,混凝土浇筑的间歇期一般控制在14d以内^[14]。

预制与现浇相结合的混凝土浇筑方式目前已成为大型渡槽施工技术的发展趋势,这样的技术在施工进度及施工顺序安排方面更具灵活性^[15]。根据国外大型预制桥梁温控防裂经验,室内预制时采取控制混凝土入模温度和环境温度2项基本措施,并以保温和埋设冷却水管作为辅助温控措施^[16],该温控措施在室内操控十分方便。目前沙河渡槽主体预应力混凝土结构采用现场预制架槽机架设施工方法,填补了国内外水利行业大流量渡槽施工的技术空白。室内预制使得渡槽温控防裂难度相对较小,合理的温控能降低早期混凝土的开裂风险,消除初始温度应力,对于后期预应力的施加和正常运行意义重大。

2.3 施工措施方面

2.3.1 控制浇筑温度

为了控制混凝土的最高温度,一般在不同季节制定不同的浇筑温度^[17]。对于夏季施工的混凝土,现场控制浇筑温度的主要措施是:在原料拌和前将骨料放入加冰的浸泡池,由于混凝土浇筑量与大坝混凝土相比较少,一般很少采用二次风冷技术,延长水泥储存时间,保证入罐温度在55℃左右^[18],基本符合文献^[19]的规定:水泥的拌和温度不能超过

60℃。上述措施是控制出机口温度的有力保障。此外,应尽量减少运输距离、减少运输过程中的太阳辐射,以减少温度回升。同时,冬季应规定混凝土的最低浇筑温度(一般不宜低于5℃)。

混凝土一般在夜晚低温时段浇筑,对于白天太阳辐射较强的施工时段应实施仓面喷雾,形成低温小气候,浇筑完成后应及时覆盖保温材料以减少混凝土热量倒灌。对高温时段浇筑的混凝土应保持慎重,由于渡槽体型较薄,在太阳辐射较强时段,短时间内容易“热透”,即形成高温区,低温入仓容易造成冷击,导致老混凝土开裂。

2.3.2 水管冷却

水管冷却技术在大坝等大体积混凝土温控中使用较多,目前在闸墩等薄壁结构中均有使用,具有明显的导热降温作用,尤其是在混凝土浇筑早期,在外表面保温的前提下,内部采用水管冷却可有效地减小内外温差,从而达到减小应力、预防早期表面开裂的目的^[20]。但在采用水管冷却技术时,应严格控制通水温度、降温速度和通水时间,防止因水温过低、降温过快或通水时间过长而导致混凝土开裂,一旦出现裂缝往往都是贯穿性的。因此,对水管冷却技术的使用应该合理规划。移动式冷水站具有提高冷却水的回收利用率、降低施工成本、节约施工时间、易实现个性化通水等诸多优点,目前在混凝土坝温控中使用较多^[21]。由于渡槽施工流动性较强,移动式冷水站的优势非常明显,值得推广使用。

2.3.3 表面保护

表面保护包括表面保温和流水养护。表面保温措施通过降低混凝土的表面散热能力来减小混凝土的早期内外温差,从而达到减小混凝土表面拉应力的目的^[22]。由于渡槽体型较薄,表面保温对混凝土内部温度的影响较大。保温性能越强,混凝土内部早期升温 and 后期温降幅度也越大,从而会增加后期混凝土内部的拉应力。另外,拆模将引起混凝土表面温度和拉应力的急剧变化,相当于承受了寒潮袭击,对于保温材料和拆模时机的选择,应从理论上进行分析。为防止拆模后混凝土出现干缩裂缝,通常进行流水养护,但应注意水温的选择,水温过低会对混凝土造成冷击,导致混凝土表面产生裂缝。值得一提的是,南水北调工程部分标段渡槽早期采用暖棚蒸汽养护,营造了较为稳定的暖环境,不但能减小混凝土内外温差,而且能提高早龄期混凝土的成熟度,即能提高其抗裂能力。南水北调中线京石段水北沟渡槽采用蒸汽养护防裂效果十分显著^[23]。

实际工程中,上述温控措施通常是一并使用,形成“内降外保”的综合温控措施。南水北调中线工程

大型渡槽实践表明,上述温控措施对于防止裂缝十分有效^[24-27]。

3 特殊气候下渡槽开裂机理分析

随着南水北调中线和东线工程的陆续开展,渡槽的温度应力问题得到了足够的重视,温控防裂也积累了丰富的经验。实践表明,温度应力受外界条件影响较大,尤其是我国北方地区,寒潮频繁、夏季太阳辐射大、冬季气温低、干湿交替等气候条件复杂多变,对于渡槽的温控防裂十分不利,而南水北调西线工程将面临更为复杂的气候条件。因此,开展渡槽短期温度应力和温湿耦合的研究具有重要意义。

3.1 早期气温骤降

早龄期混凝土表面开裂是工程中普遍存在的问题,主要是由于混凝土抗拉强度低,一旦遭遇气温骤降等极端天气,表面附近温度梯度增大,混凝土就会产生裂缝。在年变化温度场中,渡槽体型很薄,内部温度下降很多,内外温差小;而在寒潮作用下,由于温度变化时间很短,内部温度下降得少,内外温差大,内部对外部的约束作用大,因此,寒潮在渡槽表面引起的拉应力往往较大。文献^[28]给出了气温骤降时渡槽温度应力的实用计算方法,假定渡槽横断面指数温差分布为控制荷载,将该温差引起的横向温差应力分成横向板厚范围内非线性温差自约束应力和箱身横向框架约束应力2个部分。该方法简单实用,但温度梯度模式指数函数中的参数需要通过试验取得。更为精确的计算可采用有限单元法,目前相关单位已开发了较为成熟的温度应力仿真程序,能更准确地模拟气温骤降时整个渡槽的温度和应力变化历程^[29-32]。

3.2 夏季运行期太阳辐射

对于大坝等大体积混凝土结构,考虑日照的计算时一般将太阳辐射强度折算成等效温度值;由于渡槽体型较薄且内部有流动的水,夏季太阳辐射时段内外温差较大,引起较大的温度应力;此外,由于太阳入射角度不同,太阳辐射差异会造成渡槽边墙局部应力集中,容易产生表面裂缝。

由于温度影响因素复杂,太阳辐射与渡槽朝向、地区所在经纬度、海拔等相关,通常难以准确计算而往往被简化考虑,从而也直接影响到渡槽温度场和温度应力计算成果的可靠性。渡槽由于日照温度变化引起的表面和内部温度变化是一个随机变化的复杂函数。冯晓波等^[33]根据太阳辐射原理和对流原理,对自然条件下受太阳辐射和空气对流影响的渡槽温度场的温度边界开展研究,得出渡槽温度场的边界条件计算方法,但其中部分参数的取值有待商

榘。文献[34]提出用光线追踪算法准确计算周围地形和自身遮蔽的坝面太阳辐射的框架,能够准确计算晴天时拱坝坝面太阳辐射的不均匀分布,为温度场计算提供准确的边界条件,该方法需要的观测数据较少,不依赖于原型观测资料,对准确模拟太阳辐射下渡槽的边界条件有一定借鉴意义。

3.3 冬季运行期内外温差和冰胀作用

南水北调中线工程部分大型渡槽位于河北省境内,冬季该区域会发生冰冻现象。冬季结冰过程中,槽外遭遇特别低温,槽内的水是从上游流来的,即使气温在零摄氏度以下,槽底部的水温仍在零摄氏度以上,外面气温可能达到 $-30 \sim -40^{\circ}\text{C}$,甚至更低,这一温差可引起很大的拉应力^[35]。冰层冻结在渡槽结构中,后者是前者的边界,并对之形成约束。当外界环境温度回升,冰层内部的温度场发生变化,冰层受到渡槽边墙的约束就会产生温度应力,并对结构产生温度膨胀力,冰温度膨胀力对结构产生推力。文献[36]模拟了冰温度膨胀力对渡槽结构的影响,同时考虑了预应力、自重以及水压力,认为冰温升过程中引起的推力足以使渡槽混凝土开裂。

在上述3种特殊气候条件下,无论是渡槽自身内外温差引起的温度应力,还是冰膨胀推力都会给渡槽带来较大的开裂风险。解决办法是在渡槽外边(底面和侧面)用外部涂有保护层的聚苯乙烯泡沫板进行永久保温,顶部则加盖封闭^[35]。

3.4 渡槽薄壁结构的温湿耦合效应

渡槽混凝土结构的比表面积要比大坝等大体积混凝土的比表面积大得多,且高性能混凝土的水化热较高,水分散发速度和散发量相对快和大,由此引起的干缩应力或湿差应力直接导致混凝土表面开裂或使已有的表面裂缝扩展^[37]。因此,研究渡槽混凝土中温度与湿度的耦合原理,对揭示混凝土产生表面裂缝的条件具有实质性的帮助。

刘光廷等^[38]认为对于混凝土表面开裂问题,应以非线性耦合理论为基础。目前温度传导计算方法已较为成熟,由于湿度扩散方程的高度非线性特性,其中的扩散系数受到温度、湿度以及混凝土类型的影响,湿度场求解较为困难,导致不能分析混凝土在温度、湿度和应力相互作用下的裂纹扩展过程。而对于早龄期混凝土来说,预测裂缝的位置以及裂缝的发展趋势至关重要。文献[39-40]分析了闸墩薄壁结构的湿度场及干缩应力,认为薄壁结构的干缩影响深度大,干缩应力在水工薄壁结构混凝土裂缝产生和发展中有很大的作用;唐世斌^[41]采用统计分布和损伤力学相结合的方法,初步建立了混凝土湿度-应力-损伤耦合作用的数值模型,阐明了湿度扩

散、应力重分布、损伤出现之间的相互关系,相应的计算结果如图1所示。

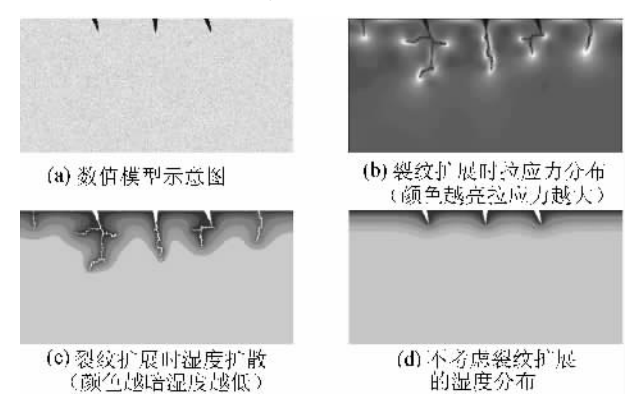


图1 湿度扩散引起的预置裂缝扩展数值模拟

上述数值计算虽然在材料参数取值、力学模型描述及结构边界处理等方面存在一定的局限性,但在一定程度上阐明了混凝土干缩应力致裂的机理,也警示人们渡槽等薄壁结构混凝土表面保湿防裂的重要性,尤其是在拆模后混凝土表层存在着很大的湿度梯度,更应加强保湿工作。

4 大型渡槽温控防裂发展趋势

目前,南水北调中线工程和东线工程在渡槽温控防裂工程实践方面取得了极为宝贵的经验。西线工程将遭遇更为复杂的环境,由于没有相应的温控标准和类似的工程借鉴,目前仍在论证当中^[42]。这一方面说明工程师们对南水北调工程后续渡槽建设持谨慎态度;另一方面说明渡槽薄壁结构温控防裂的复杂性。

通过进行渡槽温控防裂基本经验总结和可能遭遇的极端气候下渡槽开裂机理分析,结合混凝土坝和工业与民用建筑行业大体积混凝土结构温控防裂经验,对渡槽后续温控防裂研究发展趋势进行如下预测。

4.1 加强原材料配合比优化及施工过程质量控制

南水北调大型渡槽150年的使用寿命和恶劣的使用环境对材料提出了更高的要求。从提高混凝土自身抗力和温度控制的角度考虑,应更加重视材料配合比的研究,采用低水化热的胶凝材料体系,优化配合比,降低混凝土发热量,避免早强、超强,适当加入减水剂、引气剂等,开发具备高工作性能(低坍落度、高流态、稳定泵送)、高抗裂性能(低收缩)、高抗渗性能、高抗冻性能及防止碱骨料反应的高耐久性能的结构材料。

实践表明,混凝土的质量控制不严,强度离差系数越大则裂缝越多^[43]。为提高渡槽混凝土的质量,应加强对施工环节的质量管理,避免过振和漏振,避

免赶料,以提高混凝土的均匀性。在温控措施方面,应重视施工前期准备工作,如制冷设备、冷却水管布置、保温材料的准备等;夏季施工应避开高温时段,浇筑完成后应及时覆盖保温材料,减少热量倒灌,浇筑完成后应加强混凝土的保温、保湿等工作。总之,在拟定温控措施经济、可行的前提下,应保证各项温控措施及时到位。

4.2 加强混凝土温度监控

温度监测是信息化施工的体现,其目的是掌握混凝土内部的实际最高温度和混凝土中心至表面温度梯度,通过对温控指标的判断,可及时调整温控措施,同时通过实测温变历程曲线,可以反演混凝土热学特性参数,以便更好地对正在施工或将要施工的混凝土温度状态进行仿真与预报。南水北调工程漕河渡槽等标段施工期温度监测对于指导温控防裂起到积极的作用^[5,44]。

目前渡槽温度检测多采用传统的电子温度计,由于受成本、埋设、观测、数据整理等诸多因素制约,现场只在典型部位埋设少许温度计,且温度计受现场施工干扰以及人为读数误差等影响,不能真实地反映温变历程。分布式光纤测温以其测点多、灵敏度高、单位温度信息成本低、能实现实时在线监测等优点,在石油管道渗漏监测、高压电力电缆温度监测及大坝混凝土温度监测方面均得到应用^[45-47];此外,在深溪沟闸墩薄壁结构温度监测中也得到应用,在现场安置监测房可以实现近距离永久观测。光纤测温可实现实时在线监测早期混凝土温变历程及运行期外界复杂气候变化条件下渡槽内部的温度分布,但由于分布式光纤测温系统空间分辨率通常为1m,光纤只能沿渡槽纵向铺设,而横断面继续采用常规温度计,温度计同时可以用来对光纤测温系统进行标定,即采用光纤-温度计相结合的测温形式。

4.3 开展温度应力实时仿真和预报

温度场及应力场的仿真分析虽然能够在宏观上探明渡槽最大应力、最高温度发生的部位和时间,但输入的环境温度和施工参数与渡槽实际施工时的温度和参数有较大的出入,所以传统的仿真成果只能提供参考。

利用光纤测温的成果,反演混凝土热学特性参数,更加系统、准确地收集和處理施工过程、施工环境参数,进行渡槽温度场和应力场全过程仿真。在施工阶段,可给出当时的应力场,并可根据当时的渡槽实际状态及预定的施工计划预报后期的应力场和安全系数,研究提出渡槽混凝土施工的综合温控措施,并制定相应的施工方案,用以指导渡槽混凝土浇筑施工;在运行阶段,可充分反映施工过程及运行条

件的影响并充分利用观测资料,对渡槽做出比较符合实际的安全评估。

通过实时仿真和现场预报,使渡槽各部分的应力和温度都处于受控状态,能发挥反馈分析和仿真分析的优势。

4.4 开裂风险预报系统以及渡槽施工信息平台

目前,渡槽温控防裂的重要性已经形成共识。但在具体温控实践操作层面上仍存在断层现象,导致各方不能实现信息共享。建议搭建渡槽施工信息平台,具体来说应是光纤测温-温控预报-开裂风险预报-信息平台。

渡槽薄壁的体型特点导致其对外部条件变化较为敏感,且通常在龄期2~3d左右达到最高温度,这使得开展现场温控预报成为可能。在利用光纤测温成果反演混凝土热学参数的基础上,结合未来5d的天气预报(5d内预报可信度较高)和拟定的温控措施,在混凝土浇筑之前对温控措施进行评价,并给出相应的温控建议。

开裂风险预报是在温控预报的前提下开展混凝土浇筑块的应力计算与超前预报。在获得较为真实的温度场的基础上,结合现场实际施工中可以模拟的因素对渡槽混凝土应力场进行预报,并结合相应部位相应时段混凝土的抗力,对混凝土的抗裂问题进行全面分析,建立早龄期混凝土开裂风险评价与预报体系。由于混凝土的力学性能指标受运输方式与振捣方式等因素影响,应结合施工队伍素质、施工过程录像、监理质量检验成果等,对混凝土真实抗力做出评价。工程实践证明,绝大多数混凝土裂缝为表面裂缝,而且常发生在混凝土浇筑后不久。因此,开裂风险预报对施工单位根据天气变化及时修订温控措施、修订浇筑方法与养护方法十分必要。

上述预警系统的成果主要包括:①典型点光纤监测与预报温变历程曲线;②典型时刻渡槽温度场云图;③施工信息、温控信息以及温度应力历程信息;④混凝土抗力评价等级分类;⑤混凝土开裂风险指标化、可视化区域信息。通过建立渡槽施工信息平台,可实现上述温控防裂信息共享,对施工单位、运行单位和设计单位均可提供服务。目前,上述施工信息平台在溪洛渡特高拱坝施工期混凝土温控防裂中已初显成效。

4.5 限裂设计下渡槽混凝土温控标准的制定

目前,对于渡槽温控设计并没有相应的行业标准可循,而在结构尺寸上与渡槽相似的结构,如铁路基础、公路桥涵、块体基础等均有相应的温控标准^[48-50]。由于材料属性和使用环境的不同,渡槽的温控并不能直接套用上述工业和民用建筑行业的

标准。

由于采用高性能混凝土,渡槽混凝土施工过程中土温升较大,要实现完全防裂,要求实施的温度控制相当严格,考虑到现场温控措施的技术可行性,按照经济合理、安全适用的原则,文献[19]规定混凝土温控目标是不出现危害性裂缝,同时强调应结合混凝土的施工方法,配置承受因水泥水化热和收缩而引起的温度应力和收缩应力的构造钢筋。配置构造钢筋可以控制裂缝的宽度并限制其发展,其质是通过减少裂缝间距使裂缝宽度能够控制在可以接受的范围内^[51]。图2引自日本土木学会大体积混凝土温度应力委员会提出的一份报告(p 为配筋率),其表明配筋率越高、钢筋应力越低则限裂效果越好。因此,从经济、安全使用的角度来说,配足温度钢筋且采用低应力钢筋可以达到限裂设计的目的。

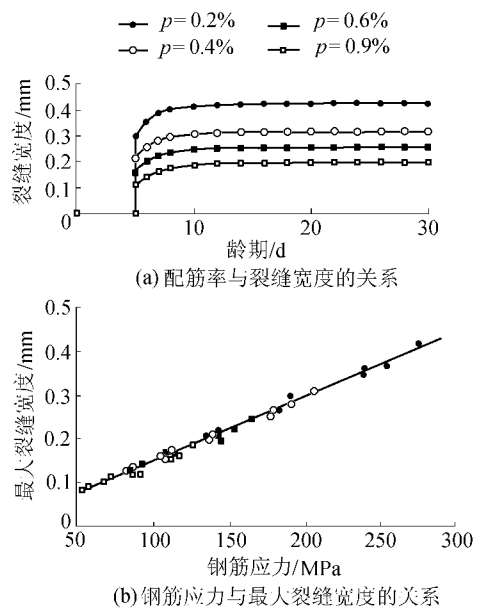


图2 大体积混凝土裂缝宽度与配筋率、钢筋应力的关系

鉴于国内没有相关标准,那么,收集整理国内外渡槽温控设计思想、措施以及实践效果至关重要。通过对渡槽施工期混凝土温度应力仿真,在温控措施经济、可行的前提下,采用钢筋混凝土非线性有限元技术对结构进行限裂设计,根据结构重要等级、使用环境等差异,分别提出相应的温控标准和温度配筋建议。可以预见,按限裂设计,配足温度钢筋,计算中充分考虑温度作用是渡槽温控防裂的发展趋势。

以上认识有待于南水北调后续渡槽工程实践的检验,更企盼专家们的斧正。

参考文献:

[1] 杨立信. 国外调水工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.

[2] 竺慧珠. 渡槽[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.

[3] 白新理, 李玉河, 吴泽玉, 等. 沙河渡槽槽身结构优化设计[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 350-352, 358.

[4] 周厚贵, 马吉明, 马金刚. 国内外渡槽的发展与南水北调中线漕河渡槽[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(3): 14-17, 20.

[5] 李峰, 贾志营, 唐孟军, 等. 落地矩形渡槽水化热温度分析[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 47-49, 52.

[6] 李向辉, 张晓玉. 南水北调中线漕河渡槽试验跨三向预应力施工[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(1): 62-63, 89.

[7] 边秋璞, 雷进生, 孙庆. 漕河渡槽后张预应力结构原位测试方法[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(2): 23-25.

[8] 马锋玲, 边秋璞, 王少江, 等. 漕河渡槽槽身混凝土配合比优化及性能试验[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(2): 110-114.

[9] 贺图升, 李北星, 王长德, 等. 聚丙烯纤维对大型渡槽高性能混凝土的性能影响研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(9): 32-35.

[10] 李兴贵. 渡槽高性能混凝土抗干缩试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 201-203, 215.

[11] 周吉顺, 张忠林, 姜作艳. 泵送混凝土在30m跨渡槽槽身施工中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(1): 111-112.

[12] 贾志营, 张志华, 牛桂林. 南水北调中线京石段漕河渡槽采用移动模架技术现浇施工研究[J]. 水利水电技术, 2006, 37(3): 72-75.

[13] 周厚贵. 南水北调中线漕河渡槽工程施工的关键技术问题[J]. 葛洲坝集团科技, 2006(1): 1-5.

[14] AHMET G, FUMIO K, MASAHIKO T, et al. The challenges involved in concrete works of Marmaray immersed tunnel with service life beyond 100 years [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(5): 592-601.

[15] 张宁, 郭春雷, 周磊. 大跨度预制渡槽在工程中的应用与实践[J]. 水利水电工程设计, 2009, 28(3): 8-11.

[16] FERNANDO H, GUILLERMO S, JUAN A B, et al. Temperature and cracking control of the deck slab concrete at early ages [J]. Automation in Construction, 2000, 9(5/6): 437-445.

[17] 贾志营. 高性能泵送混凝土温控措施在漕河渡槽Ⅲ标工程中的应用[J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 81-83, 93.

[18] 王永军, 朱耘志, 李英杰. 漕河渡槽裂缝成因及温控措施[J]. 水科学与工程技术, 2008(2): 41-44.

[19] GB 50496—2009 大体积混凝土施工规范[S].

[20] 朱岳明, 徐之青, 曹为民, 等. 墩墙混凝土结构水管冷却分析[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 182-187.

[21] 邹良智, 王燕, 郑亮. 移动式冷水站在高拱坝混凝土冷却中的应用[J]. 水力发电, 2009, 35(11): 35-36.

[22] 李文超, 余剑英. 渡槽保温材料的制备与性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(4): 37-40.

- [23] 臧孟军 ,张伟水 .北沟渡槽温控措施及效果分析[J]. 水科学与工程 2008(4) 31-33.
- [24] 刘清泉 ,王发廷 ,庞章斌 .混凝土温控“内降外保”综合措施在放水河渡槽施工中的应用[J]. 中国水利 ,2009 (4) 36-38.
- [25] 汪易森 .南水北调中线京石段应急供水工程设计和施工中的主要技术问题[J]. 水利水电技术 ,2009 ,40(1) : 10-15 28.
- [26] 陈卫国 .放水河渡槽大断面槽身高标号混凝土薄壁结构温控防裂措施[J]. 水科学与工程 2009(2) :11-12.
- [27] 刘清泉 ,庞章斌 ,李晓燕 ,等 .放水河渡槽施工的裂缝预防与控制[J]. 南水北调与水利科技 ,2009 ,7(2) :103-105.
- [28] 季日臣 ,夏修身 ,陈尧隆 ,等 .骤然降温作用下混凝土箱形渡槽横向温度应力分析[J]. 水利水电技术 ,2007 ,38 (1) 50-52.
- [29] 冯晓波 ,王长德 ,夏富洲 .沙河—大郎河箱基渡槽温度作用计算分析[J]. 南水北调与水利科技 ,2009 ,7(6) 98-101 ,197.
- [30] 宋书卿 ,王长德 ,冯晓波 .空心渡槽的温度应力研究[J]. 中国农村水利水电 ,2005(11) 86-88 90.
- [31] 张萍 ,田斌 ,刘德富 .漕河落地矩形渡槽施工期温度实时仿真[J]. 武汉大学学报·工学版 ,2008 ,41(3) 38-42.
- [32] 刘爱军 ,秦忠国 ,张子明 ,等 .洛河渡槽施工期温度应力仿真研究[J]. 南水北调与水利科技 ,2006 ,4(2) :15-19 , 35.
- [33] 冯晓波 ,王长德 ,管光华 .大型渡槽温度场的边界条件计算方法[J]. 南水北调与水利科技 ,2008 ,6(1) :170-173.
- [34] 陈拯 ,金峰 ,王进廷 .拱坝坝面太阳辐射强度计算[J]. 水利学报 ,2007 ,38(12) :1460-1465 ,1474.
- [35] 朱伯芳 .水工钢筋混凝土结构的温度应力及其控制[J]. 水利水电技术 ,2008 ,39(9) 31-35.
- [36] 张社荣 ,李升 ,彭敏瑞 .冰温度膨胀力对渡槽结构影响的有限元分析[J]. 天津大学学报 ,2008 ,41(9) :1096-1102.
- [37] 黄达海 ,刘光廷 .混凝土等温湿过程的试验研究[J]. 水利学报 ,2002 ,33(6) 96-100.
- [38] 刘光廷 ,黄达海 .混凝土温湿耦合研究[J]. 建筑材料学报 ,2003 ,6(2) :173-180.
- [39] 朱岳明 ,肖志乔 ,吴健 ,等 .水工薄壁结构混凝土中的干缩应力[J]. 红水河 ,2004 ,23(1) 31-34.
- [40] 马跃先 ,陈晓光 .水工混凝土的湿度场及干缩应力研究[J]. 水力发电学报 ,2008 ,27(3) 38-42.
- [41] 唐世斌 .混凝土温湿型裂缝开裂过程细观数值模型研究[D]. 大连 :大连理工大学 ,2009.
- [42] 姚国寿 ,廖鹏 .慎重对待南水北调西线工程——四川省水力发电工程学会副理事长马怀新访谈录[J]. 四川水力发电 ,2006 ,25(5) :100-102.
- [43] 朱伯芳 .大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京 :中国电力出版社 ,2003.
- [44] 雷进生 ,彭辉 ,王林伟 .多侧墙矩形渡槽施工期结构温度测试与分析[J]. 人民长江 ,2009 ,40(3) :74-75 96.
- [45] FEMI T ,DAVID H .Distributed fibre optic sensors for pipeline protection[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering ,2009 ,1(4) :134-143.
- [46] GUNES Y ,SAIT E K .A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables[J]. Sensors and Actuators A :Physical ,2006 ,125(2) :148-155.
- [47] 徐卫军 ,侯建国 ,李端有 .分布式光纤测温系统在景洪电站大坝混凝土温度监测中的应用研究[J]. 水力发电学报 ,2007 ,26(1) 97-101.
- [48] YBJ224—1991 块体基础大体积混凝土施工技术规范[S].
- [49] TZ210—2005 铁路混凝土工程施工技术指南[S].
- [50] 刘吉士 ,阎洪河 ,李文琪 .公路桥涵施工技术规范实施手册[M]. 北京 :人民交通出版社 ,2002.
- [51] 陈肇元 ,崔京浩 ,朱金钤 ,等 .钢筋混凝土裂缝机理与控制措施[J]. 工程力学 ,2006 ,23(1) 86-107.

(收稿日期 2010-07-06 编辑 :高建群)

· 简讯 ·

绿色能源——水库大坝与环境保护论坛在北京举行

近年来 ,在全球排放温室气体的压力下 ,各种化石能源的使用受到了较大限制。由于社会对能源的需求是刚性的 ,因此 ,开发利用目前最有效的非化石能源——水电 ,已经重新受到社会各界的高度重视。为了实现我国的减排承诺 ,加速水电开发已经成为我国“十二五”规划的重要任务。

2011 年 3 月 6 日 ,中国水力发电工程学会、中国大坝委员会邀请了我国从事地震研究工作的专家以及水库大坝地质和抗震专家 ,在北京中国科技会堂举办了绿色能源——水库大坝与环境保护论坛。为了回答社会各界对水电开发、包括怒江等流域水电开发中的地质和地震问题的疑问 ,中国水力发电工程学会、中国大坝委员会邀请从事怒江等流域地质勘探和抗震设计的工作人员与我国的水库大坝地质、抗震专家一起向社会介绍情况 ,并解答各种有关怒江等流域水电开发中地质、地震方面的疑问。与会专家科学地分析和阐述了地震发生的原因与几率 ,并介绍我国水电大坝的设防标准。

(本刊编辑部供稿)