

大型泵站裂缝成因分析及处理

王星梅¹, 沈长松², 刘远胜³

(1. 淮安市水利设计勘测研究院, 江苏 淮安 223005; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 淮安市房产管理局, 江苏 淮安 223001)

摘要:结合南水北调工程中某大型泵站的设计、施工情况,从结构设计、原材料选用、温度控制、混凝土超强、施工工艺及方案等方面对裂缝成因进行了定性分析,并利用三维有限元仿真计算成果对裂缝成因进行了定量分析。总结出大型泵站容易产生裂缝的部位、类型及原因,认为进水流道混凝土降温过程中出现的较大温度应力是早期裂缝出现的直接原因,采用的施工方案和泵送混凝土工艺是导致裂缝出现的间接因素。由于后期养护和保温措施不力产生较大的收缩应力和温度应力是引发中后期裂缝的主要原因。提出了从工程设计、原材料选用、温度控制、施工工艺及方案等方面采取综合防裂措施和处理裂缝的方法。

关键词:大型泵站;裂缝成因;裂缝处理;优化配合比;温度控制;三维有限元仿真计算

中图分类号:TV698 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-7647(2006)03-0041-04

Causes of formation of cracks in large pumping station and measures for their treatment/WANG Xing-mei¹, SHEN Chang-song², LIU Yuan-sheng³(1. *Water Resources Investigation, Design & Research Institute of Huai'an City, Huai'an 223005, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Authority of House Property of Huai'an City, Huai'an 223001, China*)

Abstract: Combining with the design and construction of a large pumping station in the South-to-North Water Transfer Project, a qualitative analysis was performed of causes of cracks from aspects of structure design, selection of raw materials, temperature control, excessive strength of concrete, techniques and scheme of construction, etc., and a quantitative analysis was made by using 3-D finite element simulation. Then, the distribution, development and classification of cracks were summarized. It is considered that the large thermal stress in concrete during temperature decrease in the intake channel is the direct cause of the formation of the cracks at early stage, while the construction scheme and the technique of pouring concrete by pump are the indirect causes. The large shrinkage stress and thermal stress induced by ineffective measures for concrete curing and temperature insulation are the main causes at middle and later stages. Finally, it is suggested that integrated measures for crack prevention and crack treatment should be taken for engineering design, selection of raw materials, temperature control, and determination of reasonable scheme and techniques.

Key words: large pumping station; cause of formation of crack; crack treatment; optimized mix-proportion; temperature control; 3-D finite element simulation calculation

1 工程概况

南水北调工程中某大型泵站设计流量 $100\text{ m}^3/\text{s}$,安装 3 台叶轮直径 3.1 m 的可逆式全调节立式轴流泵。该泵站 2001 年 12 月开工建设,2002 年 12 月通过竣工验收,工程质量总体优良,目前运行良好。该泵站于 2001 年 6 月 11~13 日浇筑进水流道混凝土,7 月 2 日拆除进水流道墩墙模板,4 日发现部分进水流道墩墙上出现了裂缝,位置基本上都是在进水流

道墩墙中部靠近水泵井处,方向呈斜竖向,上不到顶、下不到底,向两端渐灭,站身底板无裂缝。另外,2001 年 9 月 8 日进水流道水泵井拆砖模时发现位于各水泵井靠近排水廊道侧肘形面上有 1 条竖向裂缝。随着结构上升及环境温度的变化,这些裂缝有所发展,并陆续发现新缝。截至 2002 年 1 月份为止,裂缝基本稳定。墩墙缝宽最大为 0.5 mm;靠近水泵井肘形面上的裂缝宽最大为 0.8 mm。裂缝位置如图 1 和图 2 所示。

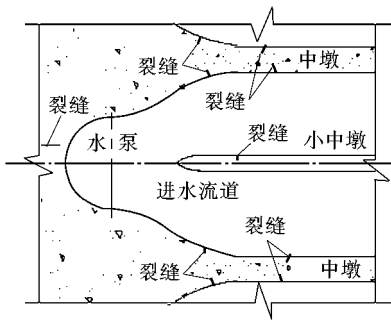


图1 裂缝平面位置(1台机组)

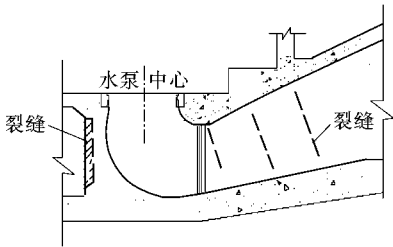


图2 裂缝立面位置

2 混凝土裂缝成因分析

2.1 定性分析

2.1.1 设计方面

a. 结构特性。泵站抽水功能决定了进水流道及水泵井结构的复杂性,空间形体各异,结构断面的平面和立面变化较大,应力变化较复杂,易产生应力集中,在混凝土温度应力和收缩应力作用下其应力向相对薄弱的部位集中。

b. 配筋设计。泵站流道部位因尺寸较大,强度是足够的。以往大型泵站混凝土的浇筑一般采用车辆运输入仓的方法,因坍落度较小,水泥用量少,相应的温度应力和收缩应力较小,所以以往泵站出现裂缝的几率也较小。现在混凝土施工大多采用泵送的方式,坍落度较大,水泥用量多,温度应力和收缩应力大幅度增加,而设计人员往往对泵送混凝土施工工艺的特性认识不足,在断面变化较大且容易产生裂缝处没有配置足够的抗温度应力和收缩应力的钢筋,同时所配钢筋间距及直径略为偏大,因此造成这样的部位易发生裂缝。

2.1.2 原材料选用及配合比设计

在原材料选用方面易发生裂缝的原因主要有:未采用中低热水泥而采用普通硅酸盐水泥;未采用优化配合比,未掺用粉煤灰或抗裂剂等,致使水泥用量较大,坍落度控制不好,实测值比设计值大;掺用具有早强性能的外加剂,使得混凝土早期强度大,增加了混凝土的脆性。

2.1.3 施工方面

a. 温度控制:进水流道混凝土浇筑尽量避免在

高温季节进行。由于该泵站进水流道混凝土浇筑正值夏季高温季节,环境温度的变化及水化热作用使得混凝土内外温差超过 25°C ,上下层温差均超过 25°C (浇筑后第3天实测混凝土内部温度最高为 59°C ,持续时间为 $3\sim 7\text{d}$),施工时未能采取有效的降温保温、养护等措施控制温差。

b. 混凝土养护和表面保护:混凝土浇筑初期应加强对其表面的养护,后期应加强表面保护。该泵站施工期较长,从盛夏酷暑到严寒隆冬,年月日温差较大,进水流道墩墙混凝土在 $11\sim 12$ 月间经常遭遇寒流袭击并出现气温骤降,施工时虽然采取了一定的防冻保温措施,但对关键部位和重要部位的表面未能采取有效的保护措施。

c. 施工工艺:在有条件的情况下应尽量避免采用泵送混凝土。该泵站进水流道施工采用泵送混凝土施工工艺,客观上要求水泥用量大、用水量也较大,因此引起坍落度大,混凝土脆性大,产生的水化热高,同时增加混凝土收缩。

d. 混凝土强度的影响:实配混凝土强度不应较多地超过设计强度。该泵站混凝土设计标号为 C25,但实际混凝土强度大大超过设计强度。现场试块 R_f 最小值为 40.2MPa ,最大达 52.8MPa ,混凝土脆性加大,致使混凝土抗拉强度和配置的钢筋已不能满足其抗裂要求。

e. 混凝土浇筑分缝分块的影响:站身底板先行施工,进水流道混凝土1个月后浇筑,底板对进水流道的变形有约束作用,同时进水流道浇筑块($23.4\text{m}\times 25.4\text{m}$)较大,墩墙断面尺寸变化大,未能采取合理的分缝分块、预留后浇带的施工措施。

2.2 利用三维有限元仿真计算成果分析裂缝成因

该泵站施工期发现裂缝后,笔者即进行了裂缝成因分析。根据设计和施工资料,使用大型非线性分析软件进行三维有限元仿真计算,并应用计算成果定量分析裂缝的成因及其对结构的影响。

2.2.1 非稳定温度场

计算结果显示,温度最高部位出现在流道肘部大体积中心,最高温度超过 60°C ,最高温度出现的时间较晚,但持续时间较长。侧墙最高温度为 52°C ,出现在浇筑后第6天。分流墩最高温度为 36°C ,出现在浇筑后第3.5天。

2.2.2 混凝土温度应力

如不考虑温度应力,仅由重力引起的拉应力除底板外是很小的,顺水流方向拉应力为 0.3MPa 。而温度应力计算结果显示,从浇筑后第5天开始,温度应力逐渐上升,分流墩到第11天时顺水流方向拉应力上升到 2.3MPa ,大主应力上升到 4.7MPa 。侧墙

到第 12.5 天时顺水流方向拉应力上升到 3.07 MPa, 大主应力上升到 5.2 MPa。由计算可知, 最大拉应力出现的位置一般在侧墙和分流墩中部偏上游, 与裂缝出现的位置吻合。

2.2.3 混凝土开裂时间推算

对比温度应力出现的时间和混凝土强度增长的情况, 可得出结论: 浇筑后第 12.5 天时, 在分流墩、侧墙部位的温度应力已经大于混凝土的抗拉强度, 混凝土出现开裂。温度应力计算结果显示, 分流墩降温最快, 出现裂缝的时间最早, 侧墙其次, 肘部最后出现裂缝。这与实际情况相吻合。

2.2.4 裂缝对结构空间应力状态的影响

取厂房以下全部结构整体建模, 分别计算完建期、设计水位运行期和检修期 3 种工况。计算采用弹性应力-应变模型^[1]。计算表明最大拉应力在运行期 y 方向有裂缝为 1.83 MPa, 无裂缝为 1.82 MPa^[1]。空间应力结果表明裂缝产生对流道在常规荷载作用下的整体应力状态影响甚微。常规荷载作用下结构中的拉应力不超过混凝土的抗拉强度, 在常规荷载作用下裂缝不会扩展。

3 大型泵站防裂限裂预防措施

3.1 工程设计方面的措施

3.1.1 结构形状及配筋设计

合理进行泵站平立面设计, 在泵站底板底面集水坑处、水泵井及与流道交接处应尽量避免截面突变, 从而减小约束拉力。确因结构需要开洞或截面变化较大处(如墩墙门洞、水泵井与进水流道交接处等), 可在孔洞四周增配斜向钢筋、钢筋网片; 在变断面处为避免断面突变, 可作局部处理使断面逐渐过渡或设置暗梁等, 同时增配一定量的抗裂钢筋或钢板网。设计中应有温度控制应力的计算成果, 以供施工单位参照应用。

3.1.2 加强易裂部位混凝土抗裂设计

a. 砌筑浆砌石心墙或抛块石技术。一般在泵站较厚的底板、水泵井及靠近水泵井处的进水流道墩墙内采用该技术, 可减少水泥用量。块石抛填量不超过总填量的 20%。抛块石要分散, 材质及规格要符合要求; 砌筑心墙要砌实, 并使表面粗糙, 以便与周围混凝土黏结。

b. 采用纤维混凝土。采用纤维混凝土可以增强混凝土的抗裂性能, 南水北调工程宝应站、洪金洞拆建等工程应用纤维混凝土均取得良好的抗裂效果。采用的纤维必须具备产品合格证和相关的质量检测证明材料, 纤维性能和混凝土配合比均通过现场试配确定。

3.1.3 合理分缝分块, 预留合适后浇带

对于大型泵站, 浇筑块尺寸应根据理论分析和参考实际经验确定^[2], 在同一浇筑块内应避免基础过大的起伏, 在结构形式上应尽量避免或减缓应力集中。超长站身底板可分成规则块体间隔浇筑或者在突变处预留后浇带; 水泵井大体积混凝土与进水流道墩墙间宜设置后浇带; 进水流道墩墙下部约 1 m 高范围与底板同时浇筑, 进水流道墩墙其余部分与顶板一起浇筑, 在墩墙适当部位预留 1 道或 2 道后浇带。

3.1.4 大体积混凝土设计龄期及强度等级的选用

根据工程结构实际承受荷载的情况, 对结构的强度和刚度进行复核, 允许的情况下可采用 f45, f60 或 f90 替代 f28 作为混凝土设计强度, 这样可使每立方米混凝土中水泥用量减少 40 ~ 70 kg, 混凝土水化热温升也相应降低 4 ~ 7 ℃。

3.2 原材料选用方面的措施

选用中低水化热低碱水泥, 优选收缩性小的或具有微膨胀性的水泥; 优选线膨胀系数小、岩石弹模较低、表面清洁无弱包裹层、级配良好的骨料。采用双掺技术, 优化混凝土配合比, 在混凝土中掺入Ⅱ级及其以上等级的粉煤灰和防裂外加剂等, 可以降低水化热。

3.3 积极采用补偿收缩混凝土技术

较长结构采用补偿收缩混凝土技术无缝施工^[3], 可提高混凝土抗裂性, 缩短工期, 有利于结构防渗漏和提高整体质量。补偿收缩混凝土的关键技术是选择合适的限制膨胀率 ϵ_2 , 科学合理地做好补偿收缩混凝土配合比设计。对于超长结构, 可设置大面积小掺量(10%左右)膨胀混凝土和局部大掺量(13%左右)膨胀加强带。

3.4 混凝土施工方面的措施

a. 科学合理地施工, 确保混凝土浇筑的连续性和质量可靠性。加强混凝土试验, 科学施工, 确保极限拉伸、强度保证率及离差系数满足要求。浇筑前合理安排施工, 选用适当的机具和浇筑方法保证浇筑强度和入仓连续性; 浇筑时应提倡加强振捣; 混凝土尽可能晚拆模, 拆模后混凝土表面温度下降不应超过 15 ℃。

b. 改进泵送混凝土施工工艺^[4], 提高混凝土抗裂性能。①搅拌工艺: 采用二次投料的净浆裹石或砂浆裹石工艺, 可以提高混凝土强度 10% 或节约水泥 5%, 进而可达到防裂的目的。②振动工艺: 对已浇筑的混凝土, 在其终凝前进行二次振动, 可排除因泌水而在石子、水平钢筋下部形成的空隙和水分, 提高黏结力和抗拉强度, 并减少内部裂缝与气孔。

③加强养护工作。

c. 混凝土温度控制措施。①严格控制混凝土出机口温度和浇筑温度:通过原材料遮阳、覆盖、喷雾及骨料二次风冷、加冰拌和等技术,严格控制混凝土出机口的温度和浇筑温度。②采用冷却水管通水降温技术:根据上海某大型泵站的施工经验,对泵站墩墙采取水管冷却措施效果显著。冷却水管大多采用直径 25 mm 的钢管或高密聚乙烯塑料管,铺设水平间距为 1.5~3.0 m,垂直间距为 1.0~2.0 m,上下层间通水方向相反。③加强混凝土养护及其表面保护。

4 进水流道裂缝处理

4.1 裂缝处理方案

根据上述研究成果,决定对该泵站裂缝采用灌浆、结构补强、表面处理的综合处理方法。即对缝宽小于或等于 0.15 mm 的裂缝采用强度高、韧性较好的环氧聚合物进行封闭,表面再涂抹环氧厚浆;对缝宽大于 0.15 mm 的裂缝,采用江苏省水利科学研究所研制的 E-85 环氧浆材进行灌浆,并贴环氧玻纤布(二布三胶)进行补强。为了“掩盖”修补痕迹,提高修补后的外观质量和整体效果,再采用 H_{52-S4} 环氧厚浆涂料进行二道封闭。所用材料应严格按配比称量,强度应经现场取样做破损试验,均应大于混凝土设计强度。

4.2 裂缝修补工艺

4.2.1 化学灌浆

首先沿裂缝凿槽(底 5~7 cm、深 6~7 cm),刷去粉尘浮灰后,在每条缝上布置进浆嘴 2~3 个,埋设后用氰凝速固剂嵌固进浆管和用环氧聚合物嵌缝,等 2~3 d 方可压浆。裂缝灌浆采用 E-85 环氧浆材,严格按配比称量,使用轻型环氧灌浆桶灌浆。

4.2.2 环氧玻纤布

化学灌浆后采用二布三胶施工。首先采用 0.2 mm 厚的无碱无捻玻纤布,每铺 1 层布,涂刷 1 遍环氧基液,保证各层玻纤布浸透基液。刮平贴实,达到无气泡、无分层、无褶皱,以确保其整体性,在该裂缝处的迎水面再复贴 1 层 420 cm×90 cm(长×宽)环氧玻纤布。最后在混凝土表面均涂刷 H_{52-S4} 环氧厚浆掩盖修补痕迹。

4.3 裂缝处理效果的分析评价

每条裂缝注浆时,出浆孔均能冒浆,同时进浆量较大,说明浆液在混凝土裂缝内达到饱满、密实。裂缝处理后进行压力为 0.2 MPa 的压水试验,无渗水现象。经鉴定,该工程修补材料均比母材质量好、强度高,裂缝处理是成功的。

5 结 语

a. 进水流道混凝土降温过程中出现的温度应力是早期裂缝出现的直接原因,而施工采用的方案和泵送混凝土工艺是导致裂缝出现的间接因素。后期养护和保温措施不力而产生的较大收缩应力和温度应力是引发中后期裂缝的主要原因。三维有限元分析成果表明,裂缝对流道在常规荷载作用下的整体应力状态影响甚微。常规荷载作用下结构中的拉应力不超过混凝土的抗拉强度,裂缝不会扩展。

b. 通过对泵站裂缝的成因分析,确定采取相应的防裂措施如下:①合理的结构及配筋设计,采用纤维混凝土和补偿收缩混凝土,合理选用混凝土强度和等级;②优选原材料,采用双掺技术,优化混凝土配合比;③改进施工工艺和方法,合理分缝分块,预留合适后浇带;④严格进行温度控制,加强混凝土养护和表面处理。

c. 本文介绍的对进水流道所采取的裂缝处理方法是适用、有效的,能使建筑物整体性能得到明显加强和改善,经过几年的运行状态良好,裂缝处理是成功的。

d. 开展大型泵站裂缝研究,科学分析裂缝成因,力争做到裂缝控制以预防为主,避免事后修补加固,可为今后南水北调工程中其他大型泵站群提供借鉴。

参考文献:

[1] 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, 1999.
[2] 龚召熊. 水工混凝土的温控与防裂[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1999.
[3] 鲁统卫. 补偿收缩混凝土在超长大面积薄板工程中应用[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2005, 3(2): 13-17.
[4] 李继业. 新型混凝土技术与施工工艺[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2002.

(收稿日期: 2005-11-28 编辑: 高建群)

