

# 浅谈提高腐蚀性环境中大型倒虹吸结构耐久性的设计思路

杨 锋

(河北省水利水电第二勘测设计研究院 石家庄 050021)

**摘 要:**南水北调中线工程是我国特大型调水工程,交叉建筑物众多、工程环境及地质条件复杂,做好工程结构的耐久性设计是工程持久安全运行的重要保证。本文选取南水北调中线工程河北省段的大型河渠交叉建筑物南沙河倒虹吸,简要介绍其耐久性设计的基本思路。为同类建筑物设计提供参考。

**关键词:**南水北调 南沙河 倒虹吸 耐久性

## 1 概述

南水北调中线工程是沟通长江、淮河、黄河、海河四大流域的跨流域调水的特大型工程,输水总干渠线路总长1273km,需穿过黄河干流及其他集流面积10km<sup>2</sup>以上河流219条。南水北调工程为1等工程,具有线路长、交叉建筑物众多、工程环境及地质条件复杂的特点。为保证工程安全运行,做好工程结构的耐久性设计是工程持久安全运行的重要保证,而工程结构耐久性设计又与工程的重要性程度、所处环境的水头、温度、环境腐蚀性等因素有关。要解决好工程结构的耐久性问题,需要综合考虑各种因素。

由于南水北调总干渠线路跨度大、环境影响因素也存在较大的差异,关于结构耐久性的设计也存在较大差异,本文选取南水北调中线工程河北省段的大型河渠交叉建筑物南沙河倒虹吸,简要介绍其耐久性设计的基本思路。

## 2 工程基本情况

### 2.1 工程总体布置

南沙河渠道倒虹吸工程位于河北省邢台市与沙河市之间、高店村东北2km处的南沙河上,是南水北调中线一期工程大型河渠交叉建筑物之一。南沙河渠道倒虹吸由进口渠道、南段倒虹吸、中间明渠、北段倒虹吸、出口渠道五大部分组成,其中南、北段倒虹吸分别由进口渐变段、进口检修闸、管身、出口节制闸(或检修闸)、出口渐变段五部分组成。工程起止桩号

93+621~98+016,全长4395m。

南沙河倒虹吸主要建筑物按1级建筑物设计;防护工程为3级建筑物;临时工程包括导流围堰等为4级建筑物。南沙河倒虹吸设计流量230m<sup>3</sup>/s,加大流量250m<sup>3</sup>/s,防洪标准为:100年一遇洪水设计,300年一遇洪水校核。建筑物区地震动峰值加速度为0.10g(相当于地震基本烈度7度),按设计烈度7度进行抗震设防。

进口连接渠道长度50m,桩号93+621~93+671,出口连接渠道长度10m,桩号98+006~98+016。渠道设计断面为梯形,进口渠道设计底宽21.0m,边坡1:2.5,出口渠道设计底宽20.0m,边坡1:2.5。

南、北段倒虹吸工程分别由进口渐变段、进口闸室段、管身段、出口闸室段和出口渐变段五部分组成。南段倒虹吸起止桩号93+671~94+921,全长1250m。北段倒虹吸起止桩号96+951~98+006,全长1055m。倒虹吸管身为预应力混凝土箱形结构,倒虹吸管为3孔一联,单孔过水断面尺寸6.6×6.5m(高×宽),顶板、边墙、底板厚度均为1.0m,中墙厚0.8m。

中间明渠段起止桩号94+921~96+951,长2030m,本段渠道为挖方渠道,渠底高程80.191~80.110m,底宽21.0m,纵坡1/25000。渠道采用梯形过水断面,全断面现浇混凝土板衬砌,过水断面边坡1:2.5。

### 2.2 水文气象

南沙河流域属暖温带大陆性季风气候区，四季分明。春季干旱多风，蒸发量大；夏季受海洋性气候及太行山地形影响，降雨集中，往往形成久旱不雨或大雨成灾；秋季天高气爽，降雨稀少；冬季多北风，寒冷少雨雪。工程所在地多年平均气温为12.2℃。极端最低气温-20.7℃，极端最高气温42.7℃。

### 2.3 工程地质

本渠段大部位位于南沙河河谷，河谷呈宽浅式，总干渠轴线处宽5.6km，河道内高、低漫滩及两岸一级阶地发育，属侵蚀堆积河谷地貌。

建筑物区在勘探深度范围内揭露地层全部为第四系。主要地层有全新统冲洪积卵石，上更新统冲洪积上段黄土状壤土，上更新统中段卵石，下更新统冰水积湖积砂土、粘性土。

倒虹吸各种土在水平方向上变化较大，应注意不均匀沉降变形。地下水位高于建基面约12m，基坑涌水量较大。基坑开挖深度约13m，边坡主要由卵石组成，边坡稳定性较差。Q1壤土层具有弱~中等膨胀潜势应做好防护措施，应考虑开挖卸荷所引起的地基土回弹变形问题。倒虹吸建筑物的建成，缩小了河道地下水径流断面，倒虹吸河床上游地下水位将雍高甚至产生明流。

南沙河（选矿场弃水）水化学类型为 $\text{SO}_4\text{—HCO}_3\text{—Ca—Mg}$ 型水；矿化度0.829~0.989g/L，为淡水；PH值7.7，为中性水；游离 $\text{CO}_2$ 含量5.3~7.0 mg/L，无侵蚀性 $\text{CO}_2$ ， $\text{SO}_4$ 含量381.2~525.5 mg/L。对普通混凝土具结晶类硫酸盐型弱~强腐蚀。

## 3 钢筋混凝土结构的腐蚀破坏机理

### 3.1 混凝土腐蚀破坏

#### (1) 腐蚀介质单独作用下的破坏

混凝土是一种非均质的颗粒型复合材料，硬化了的混凝土由粗细骨料和硬化水泥浆组成，硬化水泥浆包括水泥水化产物、未水化的水泥颗粒、自由水和气孔。硅酸盐水泥主要的水化产物有水化硅酸钙和水化硅酸钙凝胶、氢氧化钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙晶体，其中氢氧化钙和水化铝酸钙组分是混凝土遭受液态介质侵蚀的根

本因素。另外，深入观察混凝土内部结构，可发现除硬化水泥浆中存在气孔外，在骨料表面及骨料与硬化水泥浆体之间也存在空隙和裂缝，空隙和裂缝的存在为液态介质的侵入提供了通道。

处在空气中的混凝土，由于空气中存在水分和二氧化碳，必然会与混凝土中的水泥水化产物氢氧化钙及水化硅酸钙发生反应生成碳酸钙，反应由表及里不断地进行。处在水中的混凝土，由于孔隙全部被水充满，妨碍二氧化碳扩散，碳化速度极慢。但是水及侵蚀性介质的作用会引起混凝土中水泥石发生一系列物理化学变化，水泥石中的碱度降低将会引起其它水化产物的溶解或分解。

地下混凝土结构遭受的腐蚀介质以液态为主，包括土壤中腐蚀微生物（硫酸盐还原菌、中性硫化菌和异氧菌等）、地下水中的腐蚀介质。输水结构受到水力冲刷作用以及可能滞留的水生生物代谢产生的腐蚀介质的腐蚀。腐蚀介质对构件的腐蚀，一般从混凝土中的孔隙和裂隙等通道由表及里逐渐进行。混凝土抗渗性能对腐蚀速度有重要影响，抗渗性能则主要取决于混凝土的密实度。

#### (2) 荷载和腐蚀介质共同作用下的破坏

混凝土在荷载作用下将产生内部损伤，导致其原有的内部空隙和裂隙扩展，使原来间断的裂隙发展成为连通的裂隙，从而为腐蚀介质的侵入提供了通道，同时也为混凝土内部氢氧化钙的溶出提供了便利条件。因此，在荷载和腐蚀介质共同作用下，混凝土的腐蚀破坏加剧。特别是混凝土结构在压力水作用下出现渗漏时，水对混凝土的溶出型腐蚀破坏成为了不容忽视的混凝土本质病害。

### 3.2 钢筋的腐蚀破坏

#### (1) 腐蚀介质单独作用下的破坏

钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的最关键问题，也是混凝土结构最常见和量最大的耐久性问题。新成型的混凝土是一种高碱性的材料，在钢筋表面形成一层致密的钝化膜，有效地保护钢筋不发生锈蚀。混凝土保护层的碳化和氯

离子等腐蚀介质的影响是钢筋锈蚀的主要原因。当空气中的二氧化碳、二氧化硫等气体及其他酸性介质通过混凝土的孔隙进入到混凝土内部后,与混凝土孔隙溶液中的氢氧化钙发生化学反应,使溶液的碱度降低,钢筋表面出现脱钝现象,如果有足够的氧和水,钢筋就会腐蚀。

混凝土中的钢筋锈蚀是混凝土保护层覆盖下钢筋的电化学腐蚀,钢筋锈蚀严重时,体积膨胀导致沿钢筋长度出现纵向裂缝。顺筋裂缝的产生又加剧了钢筋的锈蚀,形成恶性循环。如果混凝土的保护层比较薄,最终会导致混凝土保护层剥落,钢筋也可能锈断,导致截面承载力降低直到构件丧失承载力。

#### (2) 荷载和腐蚀介质共同作用下的破坏

钢筋混凝土构件在荷载作用下将出现拉应力区,当混凝土拉应力超过其抗拉强度的50%时,混凝土内部实质性的微裂破坏已导致内外裂隙的连通,从而为外部腐蚀介质的侵入提供了通道。如果荷载作用导致了混凝土宏观裂缝的产生,钢筋表面脱钝后便很易于形成电解池,从而加剧钢筋的腐蚀反应。这种破坏为钢筋某一截面的腐蚀破坏,表现为点蚀或环蚀。

### 3 倒虹吸结构耐久性设计

#### 3.1 环境类别

倒虹吸为地下结构,按工程地质勘探成果,南沙河地下水 $SO_4$ 含量381.2~525.5 mg/L,根据《水工混凝土结构设计规范》表3.3.9,化学侵蚀程度为轻度,按有轻度化学侵蚀性地下水的地下环境,南沙河倒虹吸处于三类环境类别。

#### 3.2 混凝土结构抗渗和抗冻等级

倒虹吸进口渠道设计水位为86.783m、加大水位为87.099m,倒虹吸过水断面底高程75.5m,顶高程为82.1m,倒虹吸管边墙厚度为1.0m,钢筋混凝土结构构件的水力梯度为11.6,根据《水工混凝土结构设计规范》表3.3.6,抗渗等级为W6。

南沙河倒虹吸位于寒冷气候分区,根据《水工建筑物抗冰冻设计规范》的规定,混凝土抗冻等级为F100。

#### 3.3 抗化学腐蚀环境设计

从腐蚀机理上看,预应力混凝土结构和钢筋混凝土结构没有本质的区别。关键是预应力混凝土结构由于预压应力的作用,能够控制混凝土拉应力不超过允许限制或裂缝宽度不超过限制值,对于南沙河倒虹吸结构,长期处于地下水环境,控制混凝土拉应力不超过允许限值是非常重要的,这样一来便大大降低了混凝土内部受拉损伤产生贯通型裂隙的可能性,带来的结构耐久性的提高表现为:

(1) 混凝土溶出型和膨胀型破坏降低,分解型破坏也仅限于表层。杜绝了渗漏溶出破坏的可能性。

(2) 普通钢筋点蚀或环蚀的电解池条件不能具备,电化学反应不能形成,杜绝了普通钢筋的点蚀或环蚀破坏。

(3) 预应力钢筋成孔采用聚丙烯波纹管,形成与外部隔绝的封闭空间,即使腐蚀介质到达聚丙烯波纹管外表面,也不能穿过波纹管向内部渗透。孔道内部采用真空辅助灌浆技术,增强了孔道灌浆的密实度,使预应力筋免于腐蚀破坏。

#### 3.4 设计成果

##### (1) 混凝土材料

采用具有抗轻度硫酸盐侵蚀性能的混凝土,强度等级C40,抗渗等级W6,抗冻等级F100。

##### (2) 结构措施

采用预应力混凝土结构,裂缝控制等级一级,即严格要求不出现裂缝的构件,按荷载效应标准组合验算,构件受拉边缘混凝土不产生拉应力。

采用孔道内部采用真空辅助灌浆技术,增强了孔道灌浆的密实度,其砂浆强度不低于M40,浆内掺入阻锈剂,可根据实验加入微膨胀剂。

为防止地下水腐蚀预应力锚头,采用保护罩+混凝土封锚的措施进行保护,即先采用保护罩封闭锚头,再在其外侧浇筑0.3m厚的二期混凝土保护层,保护层混凝土强度等级C40。

### 4 结语

(1) 南水北调中线工程规模巨大,工程重

要程度高,设计时对建筑物结构耐久性分析是十分必要的。

(2)从腐蚀机理分析得出,对处于地下腐蚀环境的水工建筑物,通过阻断腐蚀性地下水对混凝土和钢筋侵蚀通道方式,有效地提高结构的耐久性。基于此,将裂缝控制等级为一级的预应力结构和真空辅助灌浆技术运用到南水北调大型

倒虹吸抗腐蚀设计中,为同类水工建筑物的设计提供了一种新的设计思路。

#### 参考文献

- [1] 水工混凝土结构设计规范 SL191-2008.
- [2] 水工建筑物抗冰冻设计规范 SL203-97.
- [3] 河北省水利水电第二勘测设计研究院. 南沙河倒虹吸预应力混凝土结构分析报告, 2002.
- [4] 河北省水利水电第二勘测设计研究院, 华北水利水电学院. 南沙河倒虹吸预应力混凝土结构新技术研究, 2004.7.

## 信息视窗

# 践行社会责任 欧维姆清华大学颁奖

——2013年清华大学欧维姆奖学金颁奖典礼暨学术报告会在清华大学举行

11月28日下午,2013年清华大学欧维姆奖学金颁奖典礼暨学术报告会在清华大学土木系多功能厅举行。这是欧维姆第九次为清华大学土木系品学兼优的学生颁发欧维姆奖学金,践行企业社会责任,表达对莘莘学子的关爱,鼓励他们健康成长为社会的有用之才,国家的栋梁之才。

清华大学土木水利学院副院长宋二祥首先致辞,他表示,柳州欧维姆不仅在行业发展中声誉很高,而且一直关心社会,关注教育的发展,在物质上、更在精神上激励学生们,使他们认识到社会对他们的关心和爱护,及身上肩负的责任。今后清华大学土木系在努力培养品学兼优的我国建设人才的同时,还将在产学研方面与欧维姆加强合作,共同促进预应力技术人才的培育及预应力技术的发展。

接下来,董事长郑津发表了热情洋溢的讲话。郑董说:“在中国改革开放的30多年里,国有企业的稳步提升,外资企业的加入,民营企业的壮大,铸就了中国经济的高速发展。与此同时,越来越多的优秀企业为传递社会正能量而关注可持续发展,关注社会责任。企业社会责任是科学发展的实际行动,是构建美丽中国的必然要求,是提升企业竞争力、促进可持续发展的重要途径。中国企业社会责任是一个正在发展的生态,政府、企业、媒体、社会组织等各个方面的合力正在经历一个积累量变、等待质变的社会进程。以标准化的行为方式,以地球村的可持续发

展情怀,推动中国企业社会责任体系建设,是欧维姆的重要出发点之一,亦是欧维姆近十年来开展企业社会责任活动的社会追求。在欧维姆奖学金这个项目上,我们将选准每一个受奖励学生,拨好每一笔奖励资金,保证欧维姆基金和爱心安全、公开、高效的传递给受益人。

如今,我国正处在工业转型升级、加快发展的关键期,实现装备制造业由大到强的宏伟目标,是我们肩负的历史使命和最大的社会责任。我们将与负责任的行业企业一起,共同推动装备制造业企业社会责任实践,自觉履行社会责任,以立足企业、创新发展的业绩奉献社会,回报社会。以与国家、民族同呼吸、共命运的实际行动,为实现强国梦、中国梦做出自己应有的贡献。”

在颁奖典礼上,获奖学生代表也发表了获奖感言:“感谢欧维姆公司对清华青年大学生的重视与肯定,能够获得奖学金,对于我们树立信心有很好的导向作用。它既是一种荣誉,又是一种督促力量;不仅是一种物质上的奖励,更是一种精神上的鼓励。我们今后会继续对自己严格要求,争取做到更好,回报企业、回报关爱自己的这个社会。”

依据《2011~2012学年土木建管系研究生欧维姆奖学金评定总则》,经过严格紧张的评选,本次奖学金共计14名学生获奖,其中:一等奖4人;二等奖4人;三等奖6人。

(谢慧芳)