

水库大坝帷幕防渗能力衰减问题之我见

夏可风

(中国水电基础局有限公司, 天津 301700)

摘要 根据对国内若干座大坝的防渗帷幕运行情况进行的工程实例调查和资料分析, 讨论国内外热议的大坝帷幕防渗能力衰减问题。认为我国水库大坝防渗帷幕大部分运行正常或基本正常, 不存在帷幕防渗能力普遍衰减的情况; 少数帷幕防渗能力衰减的主要原因并非灌浆浆液太稀所致。影响防渗帷幕耐久性的主要因素有设计质量、施工质量、不良地质条件和浆材浆液等。欧洲一些水利工程发生帷幕防渗能力衰减现象较为普遍, 有可能是灌浆方法简单和防渗标准较低所致。

关键词 防渗帷幕 防渗能力衰减 浆液水灰比 施工工艺 防渗标准

中图分类号 TV223.4⁺3

文献标识码 B

文章编号 1006-7647(2011)04-0073-04

Uncommon phenomenon of attenuation of anti-seepage capacity of curtains for reservoir dams//XIA Ke-feng (Sinohydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

Abstract : According to case studies and data analyses of operation of anti-seepage curtains for some dams in China, the worldwide hot topic on the attenuation of anti-seepage capacity of curtain for reservoir dams was discussed. A conclusion is drawn that the operation of most anti-seepage curtains for reservoir dams in China is normal or basically normal, and the attenuation of anti-seepage capacity of curtains is not common. The attenuation of anti-seepage capacity of some curtains is not induced by thin grouting. The main factors for the durability of anti-seepage curtains include design quality, construction quality, poor geological conditions and grouting materials, etc. The attenuation of anti-seepage capacity of curtains for some hydraulic projects in Europe is prevalent. It may be aroused by simple grouting method and low anti-seepage standards.

Key words : anti-seepage curtain ; attenuation of anti-seepage capacity ; water cement ratio of grouting ; construction technology ; anti-seepage standard

1 帷幕防渗能力衰减问题的提出

20世纪70—80年代, 西班牙学者发现有些工程因基础存在渗漏和扬压力高的问题而进行过灌浆处理, 但运行若干年后却又不得不再度进行补灌。有一些按照最严格施工规范灌浆的水坝也同样需要再次进行补灌处理。由此认为, 在几十年前施工的灌浆工程, 由于某些尚未搞清楚的原因, 灌浆帷幕的防渗能力正在逐渐衰退, 因而建议每隔10~15a对防渗帷幕进行勘察和补充灌浆^[1]。

此后, 世界各地陆续发现了一些帷幕防渗能力衰减甚至失效的工程实例, 从而引发了许多学者、专家参与的研究与讨论。

2 浆液水灰比问题成为众矢之的

尽管导致帷幕防渗能力衰减的成因十分复杂, 但有些学者却认为是浆液水灰比的问题, 是灌注了

稀浆导致帷幕耐久性降低^[2-3]。

澳大利亚学者郝斯贝^[2]认为, 使水泥灌浆耐久的主要方法是确保灌浆结石牢固、浆液完满且很少有遗留地充填裂隙或孔洞, 甚至没有能通过灌浆体的渗透通道存在, 使明显可见的缺陷减到最少。然而, 为了确保充填完满, 需要有适合于现场条件的灌浆技术, 其中控制好浆液水灰比尤为重要。如果含水量太多, 就会产生弱的结石体以及由于浆液分离而产生的被封堵在结石体内的空穴(水包)。

郝斯贝^[3]还认为, 岩基水泥灌浆若要取得满意的耐久性效果, 在很大程度上取决于所用浆液的水灰比。水是浆液流动必不可少的条件, 但如果过量, 部分水分就会从浆液中析出, 导致水泥充填物连续性的中断, 形成空囊、水包及泌水通道。

瑞士学者隆巴迪等^[4]认为, 浆液硬化后在岩体中发挥作用时, 稠浆较之稀浆有如下优势: ……浆液中水泥含量较高, 密度和力学强度较高, 具有较强的

抗物理侵蚀和管涌的能力 孔隙率和透水性更低,结合强度更高,因此具有更强的抗化学淋溶侵蚀能力,大坝的灌浆帷幕具有更好的耐久性。

随后,国内学人附和者甚多,但其理论和言论似并无新的发展。

3 帷幕防渗能力衰减并非普遍现象

混凝土与其他材料一样,年深月久也会老化。所谓帷幕防渗能力的衰减是指非正常的衰减,是一种快速的老化现象。但这种现象是否普遍值得讨论。

3.1 国内坝基帷幕防渗能力衰减情况及原因分析

1986—1990年,“七五”国家科技攻关项目《高坝地基处理技术研究》针对帷幕防渗能力的衰减问题开展了一系列研究工作(笔者参与并负责了该项工作)。其中由大坝安全监察中心和中国水电基础局科研所课题组联合对国内的丰满、上犹江、新安江、古田溪一级、梅山、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡、桓仁、云峰、陈村、天桥、池潭、纪村等15座大坝的防渗帷幕运行情况进行了调查,这些坝坝高为22.5 m(纪村)至147 m(刘家峡)不等,开始蓄水日期为1942年(丰满)至1980年(池潭)期间,基本代表了我国早期施工的水电站的一般情况。课题组完成的调查分析报告^[5]相关结论如下:

a. 目前国内运行中的一些大坝,绝大部分坝基帷幕的防渗效果是好的,排水孔的降压作用明显,达到了设计要求,保证了大坝的安全运行。不过也有一些坝段在运行中暴露出某些缺陷和异常现象,如扬压力偏高、排水孔淤积、渗漏溶蚀等,防渗能力不能满足设计要求,帷幕有逐渐衰减失效的情况,有的甚至过早地衰减。但是,经过补强灌浆和加固修复,大多数防渗帷幕仍能正常运行。

b. 灌浆帷幕防渗能力衰减是由于多因素综合影响的结果。工程水文地质条件的复杂性是其客观原因,而设计施工质量是其主观原因,且后者更为重要。设计得体且切合实际,施工质量优良,可以弥补一些客观因素的不足。通过调查发现,因施工质量而影响帷幕防渗能力的实例较多,甚至在运行初期帷幕防渗能力就满足不了设计要求,有的不仅危及大坝运行安全,而且给工程留下长期难以解决的隐患,造成较大的经济损失。因此,保证施工质量是关系到帷幕正常运行及其发挥防渗效果的关键。结论还提到,帷幕所处的地质条件,如软弱夹层、红层、地下水化学侵蚀等对帷幕的稳定性和耐久性的影响也较大。

这一调查结果至少表明了2个事实:①帷幕防

渗能力衰减不是普遍情况,因为我国早期施工的大坝帷幕大多数甚至绝大多数都在正常运行;②我国有些工程帷幕运行不正常或防渗能力衰减过快,多数是由于设计不当或施工质量不好所致。这里所说的施工质量不好不是指浆液水灰比太大、太稀(被调查坝灌浆帷幕使用的都是稀浆,开灌浆液水灰比都为8:1或10:1),而是指施工质量达不到要求,有的在完成施工时就没有达到设计要求。

3.2 乌江渡水电站的防渗帷幕

乌江渡水电站是我国在石灰岩岩溶地区兴建的第一个大型水电站,重力拱坝高为165 m,正常蓄水位为760 m。工程于1969年开始筹建,1982年基本建成。坝基防渗帷幕为分层搭接的悬挂式水泥灌浆帷幕,轴线长度为1020 m,灌浆孔总长19万 m。灌浆深度一般为80~100 m,局部为220 m。防渗标准要求河床及左岸680 m、右岸700 m以下的帷幕透水性 $q \leq 0.5 \text{ Lu}$,其余部分小于或等于 1 Lu 。灌浆采用孔口封闭法,最大灌浆压力为6 MPa。使用42.5级普通硅酸盐水泥,浆液水灰比分别为8:1,5:1,2:1,1:1,0.8:1,0.7:1,0.6:1,0.5:1,开灌水灰比为8:1。灌浆结束须同时满足2个条件:①注入率小于或等于 0.5 L/min ,且持续时间不少于1 h;②达到设计压力的持续时间不少于1.5 h。封孔方法是将孔内置换为0.5:1的稠浆,以该孔最大灌浆压力进行全孔纯压式灌浆2 h。该工程帷幕灌浆平均单位注入量为 294.7 kg/m 。

灌浆完成后按灌浆孔数的4%布置检查孔145个,进行压水试验1261段,95.2%的帷幕满足透水性 $q \leq 0.5 \text{ Lu}$ 的要求,其中河床及两岸指定高程以下的合格率为99.39%,指定高程以上部分的合格率为98.1%。

工程于1979年11月下闸蓄水。帷幕运行初期进行渗流渗压观测,厂坝基础渗水量很小,且与库水位无明显关系。在正常高水位下总渗水量在 $20 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下,渗压水头比设计值小很多,一直处于尾水位以下^[6]。

1990年,中国水电顾问集团公司中南勘测设计研究院组织人员对该工程进行了回访检查,关于帷幕运行情况的检查结论^[7]是,水库渗漏微小,经10余年运行观测,防渗效果良好。下游的泉水点、暗河或其他可能的渗漏通道经蓄水后多年观测未发现异常。蓄水后帷幕下游侧、深部岩溶地下水取样检测氡含量显著低于库水,矿化度进一步下降,帷幕灌浆前原有的地下水位低槽不复存在,这些情况足以说明防渗措施是有效的。

由此可见,一个以水灰比为8:1的稀浆开灌建

成的乌江渡水电站防渗帷幕,其防渗标准可以达到帷幕透水率 $q \leq 0.5 \text{ Lu}$,说明其帷幕体相当密实。运行 10 a(至今已几十年)后防渗效果仍然良好,未见防渗能力衰减的明显迹象。这是否也可以证明,水灰比与帷幕防渗能力衰减似乎没有那么密切的关系。

3.3 丹江口水利枢纽的防渗帷幕

丹江口水利枢纽初期工程混凝土重力坝高 97 m,坝长 1 141 m,河床坝段为 3 ~ 32 号坝段,基岩为闪长岩、闪长玢岩及辉长辉绿岩等。帷幕灌浆轴线长达 1 103.7 m,钻孔 37 576 m,灌浆 27 115 m(其中丙凝灌浆为 2 553 m),自 1960—1970 年进行施工。帷幕防渗标准为透水率 $q \leq 0.5 \text{ Lu}$ 。根据地质情况帷幕孔布置 1 排、2 排或 3 排,灌浆材料以 42.5 级和 52.5 级普通硅酸盐水泥、自加工磨细水泥(雷蒙磨,通过 6 400 孔筛余 0.15% ~ 0.3%,比表面积 $710 \text{ m}^2/\text{kg}$)为主,部分坝段增加丙凝灌浆。浆液水灰比等级分别为 10:1,8:1,6:1,4:1,2:1,1:1,开灌水灰比为 10:1。采用自上而下循环式灌浆法,最大灌浆压力为 3 MPa。灌浆结束条件为正常孔段在连续灌注 30 min 内吸浆率小于或等于 0.2 L/min,持续 1 ~ 2 h 即可结束灌浆。单位注入量各坝段不同,最小单位注入量为 0.38 kg/m(右 4 ~ 2 坝段,辉长辉绿岩,不透水带),最大单位注入量为 5.58 kg/m(25 ~ 31 坝段,变质玢岩,强及弱透水带)。水泥灌浆后布置检查孔 67 个,丙凝灌浆后布置检查孔 12 个,检查孔数占灌浆孔总数的 8.5%。检查结果表明,水泥灌浆后大部分坝段可达到透水率 $q \leq 0.5 \text{ Lu}$ 的设计要求,但玢岩区的 22 号、25 ~ 28 号等坝段压水试验合格率仅为 38.6%,经采用丙凝灌浆后合格率提高到 71%,透水率 $q < 1 \text{ Lu}$ 的比例为 87.1%。丹江口水利枢纽于 1968 年 11 月下闸蓄水,部分帷幕在蓄水后施工,至今已运行 40 多年^[8]。

近年来,丹江口水库作为南水北调中线水源工程,大坝坝顶高程由 162.00 m 加高至 176.60 m。为此,业主及设计单位组织人员对枢纽河床坝段的防渗帷幕效果进行检测和耐久性研究,通过分析施工和运行观测资料,布置检查孔进行取芯、压水试验、电视摄像、声波检测、电磁波 CT 剖面测试、芯样力学试验和理化试验等,对原帷幕进行了一次全面的“体检”,提出了研究报告,其中关于帷幕耐久性的结论如下^[9] 除 30 ~ 31 坝段水泥灌浆帷幕已发生明显的溶蚀破坏外,其余坝段水泥灌浆帷幕耐久性的有效年限在 161 a 以上,即在 161 a 内帷幕防渗性能在现状基础上不会产生明显破坏。纯丙凝灌浆帷幕耐久性有效年限还有 431 a 水泥 + 丙凝复合灌浆帷幕

耐久性有效年限大于纯水泥灌浆帷幕。

丹江口水利枢纽工程是一个开灌浆液水灰比为 10:1 的防渗帷幕工程实例,浆液单位注入量也不大。运行 40 多年之后的全面检查表明,绝大多数坝段帷幕未见老化;其取样水泥结石的耐久性试验表明,防渗帷幕可正常运行 200 a 以上。这一防渗帷幕工程实例似乎又一次否定了瑞士学者隆巴迪^[4]的推断 稀浆开灌 = 不密实的帷幕 = 防渗能力衰减。

4 浆液试验结果与实际灌浆情况存在差异

笔者认为浆液自由沉积试验尚不能完全反映实际岩体灌浆的复杂情况。隆巴迪等^[4]是将实验室内静置条件下获得的水泥结石进行对比的,从而推断帷幕体内岩体裂隙中的水泥结石性能,这未必正确。在实验室静置试验条件下,稠浆得到的结石会比稀浆结石密实。但是岩石中的水泥结石是在受到灌浆压力和裂隙两侧的岩体压力下形成的,岩石中的节理裂隙是要渗水的,因此帷幕中的水泥结石远比实验室烧杯里的结石密实得多。这就是前面列举的那么多以稀浆开灌的帷幕灌浆工程为什么并未快速衰减的原因。

表 1 为室内静置条件、模拟现场压迫滤水条件以及工程中取样获得的水泥浆液结石性能对比。由表 1 可见:①在静置条件下,不同水灰比的浆液,稠浆比稀浆的结石更密实,强度更高;②在压迫滤水的条件下,原来较稀的浆液(2:1,1:1)结石密实度和强度大幅度提高,如果试验的压力再大一点,时间再长一点,其性能不会亚于较稠的稳定性浆液;③同样是 0.5:1 的浆液,在现场压力灌浆的条件下,水泥结石的密度和强度远大于静置条件下的试验结果。这也说明了稳定性浆液也有通过泌水提高浆液结石性能的问题。

表 1 不同条件下形成的水泥浆液结石性能对比

试验条件	水灰比	结石干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗压强度/ MPa
实验室静置凝固	0.5:1	1.51	46.0
实验室静置凝固	1:1	1.47	20.4
实验室静置凝固	2:1	1.42	14.1
实验室压滤凝固	0.5:1	2.24	66.0
实验室压滤凝固	1:1	2.17	39.3
实验室压滤凝固	2:1	2.17	31.3
工程取样封孔灌浆	0.5:1	2.48 ~ 2.85	42.5 ~ 78.0

注 使用水泥等级为 42.5 压滤压力为 0.3 MPa,时间为 25 min 封孔取样工程为水布垭水电站河床帷幕,封孔灌浆压力为 4 MPa,时间为 60 min。

5 部分水库大坝帷幕防渗能力衰减的原因

5.1 帷幕防渗能力可能衰减的一般性原因
帷幕防渗能力衰减虽非普遍现象,但确有发生。

将帷幕防渗能力衰减的主要原因简单归咎于浆液水灰比未必正确。根据文献[5]的分析和笔者新近的思考,大致可概括为如下4个方面:

a. 帷幕的设计质量。这里不仅指对帷幕灌浆孔的布置,而且包括制定一个高质量的、有针对性的、可获得密实帷幕的同时也便于实施的施工技术要求,要求中应当规定质量标准、灌浆材料和浆液、主要施工方法和施工参数等。这是保证帷幕质量和耐久性的前提。

b. 帷幕的施工质量。应以严格细致的工艺作风实施设计制定的技术要求,全面达到质量标准。最好的施工还应能修正设计出现的差错或缺陷,灵活正确地处置随时可能遇到的地质异常或其他特殊情况,而不是机械地执行设计规定。我国早期一些工程帷幕因施工质量不好而导致以后补灌,其教训深刻。

c. 不良地质条件。断层破碎带、软弱夹层等,以及地下水侵蚀,是这些部位帷幕防渗能力衰减过快的重要原因。但也有不少工程的灌浆帷幕一开始就没有做好,以致工程投入使用时就不是一个合格工程。

d. 使用的浆材浆液。对浆材浆液的规定是设计内容的重要组成部分,针对侵蚀性地下水应采用抗侵蚀性水泥,或掺加粉煤灰等混合料;水泥的细度、浆液的水灰比及其变换应与岩体的裂隙发育情况和可灌性相适应。水泥灌浆并非万能,在需要采用化学灌浆的部位应进行适宜的化学灌浆。

5.2 欧洲一些工程帷幕防渗能力衰减的原因

帷幕防渗能力衰减现象为何在欧洲比较常见?笔者粗略分析后认为可能有以下2个主要原因:

a. 一般西方人讲究简约和效率,过于喜欢工序简单的纯压式灌浆,而这种灌浆方式无法像循环式灌浆配合多级水灰比浆液那样可将岩石的大小裂缝裂隙几乎灌注至极致。另外纯压式灌浆的结束条件都很短暂匆促,不可能施加较长的衡压时间,而这正是不能造就坚强水泥结石的原因。

b. 西方的防渗标准普遍较为宽松,他们过分地将防渗标准与‘库水渗漏损失的经济价值’挂钩,而忽视了渗漏量越大,对帷幕的侵蚀越厉害,防渗能力衰减也越快的规律。反之,我国的防渗标准较高,如丹江口、乌江渡等水利工程都要求透水率 $q \leq 0.5 Lu$,这么高的防渗标准也提高了帷幕的耐久性。

6 结 语

a. 在我国,有些工程或其个别坝段发生了帷幕防渗能力衰减的问题,但总体而言,不是普遍现象。

b. 我国已建成的众多水电站防渗帷幕大多数是用稀浆开灌建成的,它们绝大多数防渗效果良好,运行正常,据此可以认为稀浆不是导致帷幕防渗能力衰减的主要原因。

c. 灌浆浆液在岩体中发生压迫滤水现象是客观存在的事实,经过压迫滤水的水泥浆结石性能显著优于浆液自由沉积的结石。以室内静置浆液试验成果推断实际工程现象未必完全正确。

d. 引起帷幕防渗能力衰减的原因十分复杂,主要的影响因素有设计质量、施工质量、不良地质条件和灌浆材料浆液等。欧洲一些水利工程发生帷幕防渗能力衰减现象较为普遍,有可能是灌浆方法简单和防渗标准较低所致。

参考文献:

[1] 尤利欧,奥森德.水泥浆的耐久性[c]//李德富,译.水电部水利水电规划设计总院.第十五届国际大坝会议论文译文选编.北京:中国水利学会,中国水力发电工程学会,1985:127-131.

[2] 郝斯贝 A C. 水泥灌浆耐久性的研究[c]//郭玉花,译.《现代灌浆技术译文集》编译组.现代灌浆技术译文集,北京:水利电力出版社,1991:94-98.

[3] 郝斯贝 A C. 岩石水泥灌浆浆液的最佳水灰比[c]//李玉兰,译.《现代灌浆技术译文集》编译组.现代灌浆技术译文集.北京:水利电力出版社,1991:82-93.

[4] 隆巴迪 G,迪尔 D. 灌浆设计和控制的 GIN 法[J]. 刘东译. 施工设计研究,1993(2):44-52.

[5] 吴定安,王瑞芾. 国内坝基帷幕防渗能力衰减情况及原因的调查分析[R]. 北京:能源部大坝安全监察中心,水电部地质勘探基础处理公司,1990.

[6] 水利电力部第八工程局. 乌江渡工程施工技术[M]. 北京:水利电力出版社,1987:581-702.

[7] 谭靖夷,王三一. 乌江渡水电站运行10余年后的回访检查[c]//中国水力发电年鉴编辑部. 1992—1994 中国水力发电年鉴. 第四卷. 北京:中国电力出版社,1995:331-332.

[8] 水利电力部第十工程局. 丹江口水利枢纽施工技术总结[R]. 丹江口:水利电力部第十工程局,1975.

[9] 徐年丰,李洪斌,廖仁强,等. 丹江口水利枢纽河床坝段防渗帷幕效果检测及耐久性研究报告[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2009.

(收稿日期:2010-10-13 编辑:方宇彤)

