

大坝坝基水质与渗流特征

杨保全¹, 杨光中¹, 叶桂萍²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 陈村水电站, 安徽 泾县 242500)

摘要 运用水文地球化学原理, 对坝基水质资料进行了分析, 结果表明, 坝基水化学场是坝基渗流场的重要组成部分, 水的 pH 值、化学成分和化学类型的形成均受制于坝基地下水的径流条件, 可依据水质的特征将坝基划分出不同的水文地质单元, 即强径流带、缓径流带和孤立水体带。

关键词 大坝; 水质; 渗流

中图分类号: P641.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2001)02-0091-05

大坝坝基渗流对坝体和坝基稳定有着重要影响, 因而坝基渗流观测是大坝安全监测的主要内容之一。坝基岩体地质条件的复杂性、地下水赋存空间——岩石裂隙分布的不均匀性以及工程处理的影响, 导致坝基渗流状态的复杂化, 而由渗流理论建立起来的基本方程仅在边界条件简单时才适用, 解决复杂的坝基渗流问题则必须进行综合分析。目前, 在坝基渗流分析工作中多侧重于扬压力(对混凝土重力坝而言)和渗流量分析, 对水质资料所反映的坝基径流条件注意不够。

库水作为一种溶液, 在向坝基运移的过程中会产生水与坝基岩石之间、水与帷幕、混凝土之间的相互作用, 坝基水质特征的形成即是这些作用的结果。坝基地下水径流条件制约着作用进行的速度和程度, 反之, 坝基地下水质特征又可反映出坝基的径流条件。更确切地说, 坝基水化学场也是渗流场的重要成分, 即坝基渗流场是由水物理场(压力、流量及水温等)和水化学场共同组成的。

本文依据水化学成分分析资料对坝基水质与渗流的关系作一研讨。

1 坝基水质基本特征

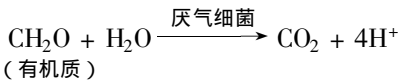
大坝坝基水质监测主要进行水的简分析, 少数坝基进行特殊成分的分析, 如气体、胶体成分、以及 Fe、Mn、NH₄、SiO₂ 等有关项目的分析。从部分大坝坝基水质监测成果看(表 1), 坝基水质的基本特征是成分复杂, 化学类型多样, 水 pH 值变化大。

1.1 水质成分复杂

一般地说, 峡谷区坝基范围有限, 但坝基水质成分复杂, 除一般的主要离子成分外(表 1), 还有分子、气体、胶体成分以及有机质成分。

气体成分中常见有 H₂S、CH₄ 以及 CO₂。坝基排水孔中有 H₂S 气冒出时, 臭蛋气味十分明显。新安江大坝坝基个别排水孔水中最大含量达 3.5 mg/L。丹江口大坝 21 坝段的 5、6 号扬压力孔内既有臭蛋味的气体又有可燃性气体冒出。经对气体定量分析, 饱和烃(甲烷 CH₄、乙烷 C₂H₆ 等)占 11.38%~23.4%, 其余为硫化氢和氮气等。

坝基地下水中所含的气体成分与库底水的补给密切相关, 水库底部因富集有机物, 在厌氧条件下, 产生不完全的分解, 反应式为



反应过程中还可释放出还原态物质 H₂S 和 CH₄ 等^[1]。

库底水中 H_2S 除有机质分解过程中释放出来的外,水中硫酸盐的还原也是产生 H_2S 的原因之一.在库底、坝基还原环境下,微生物的参与使 SO_4^{2-} 还原生成 H_2S ,反应式为

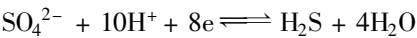


表 1 部分大坝库水及坝基水化学特征

Table 1 Chemical characteristics of reservoir and dam foundation water								
取样地点	pH	侵蚀 CO_2 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Ca^{2+} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mg^{2+} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	HCO_3^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	CO_3^{2-} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	OH^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	水化学类型
陈村	库水(水下 30 m)	6.70	11.90	4.60	48.82			$\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$
	灌 10—4	7.40	53.39	10.29	231.88			$\text{HCO}_3\text{-Ca}$
	灌 12—5	10.20	4.32	40.49		54.02	24.66	$\text{CO}_3\cdot\text{OH-Mg}$
	灌 17—4	7.25	93.07	26.70	411.89			$\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$
	灌 24—2	9.10	14.43	6.47		27.01	4.25	$\text{CO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$
	下层库水	6.34	15.40	8.80	43.30			$\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{K} + \text{Na}\cdot\text{Mg}$
梅山	13(拱廊道)—1	7.23	4.65	26.62	154.80			$\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$
	13(拱廊道)—13	9.48		10.51	1.27	50.75		$\text{CO}_3\text{-K} + \text{Na}\cdot\text{Ca}$
	13(拱廊道)—19	7.77		64.46	13.17			$\text{HCO}_3\text{-K} + \text{Na}\cdot\text{Ca}$
	13(拱廊道)—34	8.00	11.63	36.43	5.95	354.74	19.03	$\text{HCO}_3\text{-K} + \text{Na}\cdot\text{Ca}$
	下层库水	7.75		39.30	1.94	113.0		$\text{HCO}_3\text{-Ca}$
丹江口	灌 9—4	8.04	2.29	44.90	20.40	460.00		$\text{HCO}_3\text{-K} + \text{Na}\cdot\text{Ca}$
	灌 9—7	8.08		39.30	19.00	409.00		$\text{HCO}_3\text{-K} + \text{Na}\cdot\text{Ca}$
	灌 10—10	11.72		4.41	0.24		57.70	$\text{CO}_2\cdot\text{OH-K} + \text{Na}$
	灌 28—9	8.03		18.80	11.90	333.00		$\text{HCO}_3\text{-K} + \text{Na}$
新安江	下层库水(水下 50 m)	7.30	6.00	16.00	2.00	54.20		$\text{HCO}_3\text{-Ca}$
	排 2—C(右岸)	5.15	50.50	2.00	1.80	6.10		$\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Mg}\cdot\text{Ca}$
	灌 2—3(右岸)	6.31	41.79	9.62	3.40	46.97		$\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$
	灌 24—1(左岸)	11.59		154.13	2.00	10.07	67.38	$\text{OH-Ca}\cdot\text{K} + \text{Na}$

注 灌 10—4 为灌浆廊道 10 坝段 4 号排水孔 灌 24—1 数据为 5 年均值.

丹江口大坝在作扬压力孔水中气体成分分析的同时,取水样作微生物培养分析,发现有硫酸盐还原型细菌存在,正是此类细菌的作用而引起脱硫酸作用,使 SO_4^{2-} 还原生成 H_2S 气体.部分坝基排水孔水中胶体含量较丰富,丁达尔现象明显,常在排水孔口形成红色、黑色和白色,或间以锈黄、黄褐等过渡色的胶状析出物.经 X 射线衍射分析,并不产生衍射峰,说明为非晶质胶体,从化学分析看,既有正胶体,如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, CaCO_3 等,又有负胶体,如 SiO_2 , MnO_2 等.其中多数是铁、锰、钙等元素组成的胶体,硅、铝成分一般甚少.

水中有机物含量不易测定,化学耗氧量(COD)可作为有机物含量的指标.新安江水库上层水中 COD 值不大,其底部 COD 值大,是库面水的 10 倍,达 15 mg/L ,说明库底水中有机物含量较丰富(表 2).坝基水中多数不含或含量少,如灌 5—5,但少数排水孔水中有机物含量较多,如灌 12—6.

1.2 水化学类型多样

库水的水化学类型一般较简单,下层库水水化学类型一般为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型或 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水,多以前者为主.作为库水排泄区的坝基地下水,水化学类型多样,就阴离子成分来说,除 HCO_3 , $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 型水外,还由于水中 CO_3^{2-} , OH^- 含量丰富,因而出现 OH 型, CO_3 型以及 $\text{CO}_3\cdot\text{OH}$ 型水,此在山区基岩地下水中是罕见的.在阳离子成分中,多为 Ca 或 K + Na 型,或两者为主型.

水化学类型的多样化,反映出库水在向坝基运移过程中水化学作用强度与条件的不同.

表 2 新安江大坝库水与坝基水中 COD 测值

Table 2 Measured COD of Xin'anjiang reservoir and dam foundation water

库水		坝基水	
位置	COD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	孔号	COD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
库面	1.5	灌 5—5	2.2
库面下 50 m	1.5	灌 11—5	22.0
库面下 70 m	3.3	灌 12—6	11.0
库底	15.0	灌 14—6	2.6

1.3 水 pH 值变化大

反映水酸碱性的 pH 值,在坝基水中变化甚大.以新安江大坝为例,坝基水 pH 值变化范围在 5.15(排 2—C₃)~12.6(灌 24—1)之间.依水的酸碱度划分,坝基水中从弱酸性至碱性,强碱性均有出现.

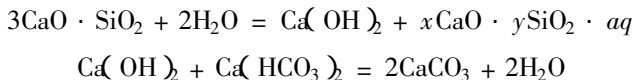
丹江口大坝廊道内,28 坝段 3~5 号排水孔间距仅 4 m,水的 pH 值同样变化很大.3、5 号孔水 pH 值为 8.17,属弱碱性水,但 4 号孔水 pH 值却高达 12.29,相距约 2 m,pH 值变幅大,达 4 以上.又如 9 坝段 1、2 号孔水 pH 值在 10.25 以上,3~7 号孔水仅 8.01~8.32,而 8 号孔又高达 11.34(图 1).从水 pH 值连线看,中间为水的低 pH 值带,两侧为高 pH 值区.水 pH 值的明显差异,使水的化学成分和类型也显然不同.低 pH 值水为 HCO₃⁻型,而高 pH 值水为 CO₃·OH 型(表 1).

2 坝基水质成因与径流条件

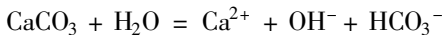
坝基水质的形成与坝基地下水径流条件密切相关,因而坝基水质成分可为分析与确定坝基径流条件提供重要依据.

水 pH 值是反映水质成分的重要指标,在坝基条件下水 pH 值的大小与渗流状态是密切相关的.

大坝灌浆廊道内的排水孔位于帷幕之后,排水孔水 pH 值大小与坝基水-水泥石间相互作用的强度有关.水与水泥石作用的反应式为:



碳酸钙水解反应式



随着碳酸钙水解作用的进行,水中 OH⁻ 含量不断增加,水的碱性亦愈来愈大.在碱性环境中 HCO₃⁻ 进一步离解,使水中 CO₃²⁻ 富集.但碳酸钙是难溶矿物,其水解速度是极其缓慢的,只有在地下径流缓慢的条件下才能形成 pH 值较大的碱性或强碱性水,故坝基帷幕后出现此类水时,表明坝基径流缓慢.碱性愈大,径流愈慢.

同样坝基水出现以 CO₃²⁻ 或 OH⁻ 为主的水化学类型,这是伴随碱性、强碱性水的形成而出现的,同样可作为坝基径流滞缓的标志.

新安江水电站 24 坝段 1 号排水孔,5 年来水 pH 平均值为 11.59.23 坝段排水孔水 pH 值为 9.8,水化学类型为 OH 型或 CO₃ 型,孔水位多年来变化甚微,尤其是灌 24—1 孔被认为“死水”,说明坝基径流滞缓,故此类型水质出现在坝基防渗帷幕后,可作为帷幕防渗性能完好的标志.一般下层库水 pH 值在 7 左右,为弱酸性-弱碱性水.若坝基防渗帷幕后排水孔水 pH 值和化学类型与下层库水相近,则说明坝基地下径流通畅.

丹江口大坝坝前下层库水为弱碱性水(pH 值为 7.75),大坝廊道内大流量(大于 0.5 L/min)排水孔水的 pH 值均与库水相近,其中近 78% 的孔水 pH 值为弱碱性水,虽有 22.0% 的孔水为碱性水,但其 pH 值较小,接近 8.5^[2].28 坝段为排水量最大的坝段,现场实测资料(表 3)表明,28—4 孔水为强碱性水,排水量仅 0.005 L/min,且动态稳定.其他排水孔水 pH 值、化学成分均与下层库水相近,又多为大流量孔.显然,28—4 孔水为一孤立的滞水体,28 坝段其他排水孔则处于强径流带上.相邻的 29 坝段水 pH 值则多在 8.50 以上,最大达 10.10,整个坝段 11 个排水孔排水量不到 1 L/min,比 28 坝段小 6 倍多.两个坝段地下径流条件显然不同,29 坝段坝基为一缓径流带.

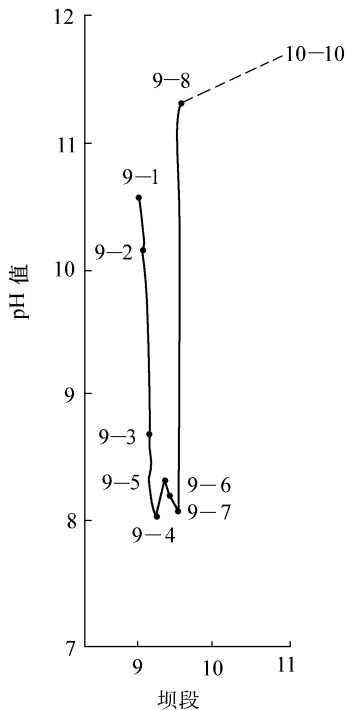


图 1 丹江口大坝部分坝段排水孔水 pH 值

Fig.1 pH value of water from Danjiangkou dam-section drain holes

表 3 28 坝段排水孔流量统计
(1997 年 9 月 15 日,库水位为 143.00 m)

Table 3 Statistics of flow from drain hole at dam-section No.28

孔号	pH 值	流量/(L·min ⁻¹)	孔号	pH 值	流量/(L·min ⁻¹)
28—1	8.19	0.69	28—6	8.08	0.52
28—2	8.17	1.09	28—7	8.09	0.41
28—3	8.17	0.95	28—8	8.13	0.2
28—4	12.28	0.005	28—9	8.03	0.55
28—5	8.17	0.35	28—10	8.07	0.51

9~10 坝段 现场排水孔水 pH 值系统测值(图 1)以及水化学成分分析成果(表 1)表明,尽管 9 坝段 3 A, 5, 7 号孔排水孔排水量甚小,仅滴水,但水 pH 值(8.01~8.31)水化学类型与库水相近,说明坝基地下径流条件好,同样属于强径流带.排水孔排水量小,是孔口高程较高之故.其两侧排水孔地段则为缓径流带.

以上实例说明坝基水质特征可明显地反映出坝基径流状态,即可划分出强径流带、缓径流带以及孤立滞水体带.

坝基地下水的成分还可反映出地下水的补给来源和水动力条件.新安江大坝右岸坝基多数排水孔水 pH 值明显小于库水,最低值仅 5.15,且富含侵蚀 CO₂(表 1),水质特征与右岸岸坡基岩地下水相近,同为弱酸性水,但侵蚀 CO₂ 含量更多, pH 值更小.岸坡水质的成因是基岩石英砂岩层中有多层薄层碳质页岩,其中有机质经分解形成弱酸性水.故右岸坝基地下水主要是接受岸坡水的补给,而不是库水,在高水压力的作用下(岸坡坝基地下水力坡降高达 1.13)更有利于水的入渗和有机质的分解,故形成的水 pH 值低,侵蚀 CO₂ 含量高.此处水质特征既反映出坝基水的补给来源,又反映出水动力条件.

陈村水电站为一座峡谷型大坝,据灌浆廊道 8 个排水孔水质定期分析资料,灌 10—4、灌 17—4 两孔水 pH 值最低,为弱碱性水,与中下层库水相近,且水化学类型相同.灌 10—4 孔为坝基排水量最大的,最大值达 1.22 L/min,且有逐年增大的趋势.灌 17—4 孔常年排水,水量小且多为滴水,仅从排水孔口算,要比左右相邻两孔水位至少高 6.5~7.5 m.为进一步了解水力特性,1992 年 12 月封孔观测,灌 17—4 孔 6 h 后水位竟抬升 11.5 m,达 80.95 m(库水位 101.06 m),然而两侧邻孔受此影响甚小,左侧灌 17—3 孔水位仅升高 2 cm,右侧灌 18—1 孔水位升高 10 cm,水位差值达 18~19 m,构成了局部高水位柱.灌 10—4 孔封孔后,24.5 h 水位抬升 2 m,对邻近坝段的影响较大,9~12 坝段排水孔和扬压力孔水位均随之上升了 0.03~0.76 m 或更大,影响半径达 20 余 m^[3].封孔试验证实灌 10—4 和灌 17—4 孔坝基地下径流通畅,前者属强径流带,后者为径流通畅的孤立水体带.

坝基排水孔水中 H₂S 的冒出,是水处于还原或弱还原环境的标志,也反映出此类排水孔地段地下径流较缓慢,而排水孔口外胶状析出物沉淀,是由于环境变迁(由还原、弱还原转变为氧化环境)引起的胶体凝聚沉淀.此与坝基水化学潜蚀有关^[4],而非水动力作用引起的机械管涌.

3 结 语

a. 大坝坝基渗流场是由水物理场和水化学场共同组成的.坝基水质成分是水-岩石间及水-帷幕、混凝土间相互作用的产物,它可反映库水向坝基运动过程的径流方向与条件.

大坝灌浆、排水廊道内排水孔众多,孔间距短,为研究坝基水化学场提供了有利条件.现场定期而系统地进行水的 pH 值的全面测试以及选点取样进行水质分析,不仅可为评价帷幕防渗性状提供详细而重要的依据,同时对掌握复杂的坝基岩体渗流场特征也有重要意义.

b. 坝基岩体中的地下水尽管在相对稳定的水库水头作用下,但由于地质条件的复杂、岩体裂隙分布的不均匀以及多种工程措施的采用,使得坝基岩体地下水分布复杂化.复杂的坝基渗流场只有在综合分析的基础上划分出不同的水文地质单元,即强径流带、缓径流带、孤立水体(滞水的、通畅的)带等,并选定不同的参数进行数值计算,才可能得出更符合实际的分析结果.

c. 坝基排水孔水中气体冒出以及孔口胶状物的沉积,既反映坝基水的径流条件,又是坝基水所处地球

化学环境及其变迁的标志.它对坝基岩石(尤其是软弱岩层)在水的长期浸泡下性状的变化以及渗透稳定的评价均有重要意义.这方面的工作还有待进一步开展.

参考文献：

[1] 彭汉兴.河谷工程地质问题[M].南京:河海大学出版社,1993.8~12.
[2] 彭汉兴,方学敏.陈村大坝坝基丙凝加强帷幕耐久性评价[J].水力发电学报,1994(4):34~40.
[3] 曾开华.坝基析出物分析中的几个问题[J].大坝观测与土工测试,2000(3):35~38.

Quality of Water under Dam Foundation and Seepage Characteristics

YANG Bao-quan¹, YANG Guang-zhong¹, YE Gui-ping²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098 China;
2. Chencun Hydropower Station, Jinxian County, Anhui Province 242500, China)

Abstract By uses of the principles of hydrology and geochemistry, the data of quality of groundwater under the dam foundation is analyzed. The results indicate that the hydrochemical field in the dam foundation is an important part of the seepage field, and that the pH value, the chemical composition and chemical types of groundwater are subject to the run-off condition of the groundwater in the dam foundation. Thus, the dam foundation can be divided into different gydrogeological units on the basis of the features of water quality.

Key words dam; groundwater quality; seepage

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于1957年,是我国中文核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得全国优秀高校自然科学学报二等奖,以及全国水利系统优秀期刊、江苏省优秀期刊称号。本刊每逢单月出版,国内外公开发行,邮发代号:28-63,每期定价8.00元,全年订费48.00元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址:南京市西康路1号《河海大学学报》编辑部,邮政编码210098。