

大坝坝址环境水特征及工程地质问题

马晓辉¹ 彭汉兴¹ 杨光中¹ 谭晓华²

(1. 河海大学河海工程技术总公司, 江苏 南京 210098; 2. 青海黑泉水库工程建设局, 青海 西宁 810002)

摘要 依据我国 15 座水电站大坝的调查资料, 着重论述了坝址环境地下水特征与作用, 及其引起的帷幕失稳与渗漏溶蚀, 岸坡坝基侧向稳定以及坝基软岩或软弱夹层软泥化等工程水文地质问题, 并分析产生这些问题的某些机理作用, 因此, 在大坝安全监测中应重视对坝基水质的定期分析与监测。

关键词 大坝 地下水 微生物 软岩 工程地质

中图分类号 :P64 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2003)06-0635-04

大坝建成蓄水, 坝址自然环境发生剧变, 湍急的河流变为人工湖泊, 气候环境更为湿润, 环境的剧变加速环境水作用的进行, 国内外由坝基地质缺陷而引发大坝事故的实例均与此密切相关。依据国内 15 座大坝坝址环境水特征的调查资料看, 各座大坝虽地质环境不同, 但存在着许多共同的工程地质问题, 如化学潜蚀、坝基软岩的软泥化、扬压力超限和侧向渗透压力作用, 以及帷幕和混凝土受腐蚀等。被调查大坝中最大坝高为二滩双曲拱坝 240 m, 最低坝高为安徽纪村混凝土重力坝 22.5 m。坝的类型有重力坝、拱坝和支墩坝。多数大坝已运行 20 a 以上, 运行 40 a 以上的有 4 座, 二滩大坝仅运行 4 a。三峡大坝正在施工中, 坝基岩体三大岩类岩石均有出露。

1 坝址环境水特征

1.1 坝前库水

坝前库水深达数十米或 100 ~ 200 m, 甚至更深。由于库水热力和重力对流, 水温从库面至库底逐渐降低, 库底水多处于 12℃ 以下的低温状态。库水水质也具有分层性, 上层库水与河水水质相近, 为中性或弱碱性水。随着水深的增加, 水的 pH 值逐渐减小, 水库底层水 pH 值多小于 6.5, 为弱酸性水^[1]。

库底水中离子含量甚少, 矿化度多小于 0.1 g/L, 总硬度不大于 33 mg/L, 为低矿化度的极软水。但库底水中常含有侵蚀 CO₂。如安徽梅山水库库底水中含量 16 ~ 17 mg/L, 是库面水的 7 ~ 10 倍, 此是有机质分解的结果, 并造成水呈弱酸性化, 故库底水是处于高压、低温、弱酸、缺氧的还原环境。

1.2 坝基地下水

坝基地下水分布是不均匀的, 多数排水孔水位低平, 动态稳定, 但在帷幕失效地段出现带状或脉状径流通畅带, 带上水位动态与库水位具同步性, 渗漏量出现逐年增加或扬压力超设计值等。

岸坡坝基地下水既受库水的渗透补给, 又受岸坡地下水的补给, 甚至还可能受到绕坝渗流的补给。由于坝基排水, 因而岸坡坝基地下水具有水力坡降大、渗流量大的特征。新安江大坝右岸坡坝基水力坡降可达 1.12, 比蓄水前增大近 1 倍。地下水流速经食盐法测定为 12.6 m/d, 即 1.5×10^{-2} cm/s (1970 年)。三峡大坝左岸永久船闸由于深挖闸首岸坡, 地下水坡降可达 2.0, 施工前仅 0.3, 增大 6 倍多。

坝基水质成分复杂, 除主要离子外, 还有胶体、分子、气体、有机质以及微生物等。坝基水 pH 值在 5.15 ~ 12.60 之间, 即从弱酸性水至强碱性水均有出现。河床坝基多为碱性、甚至强碱性水, 岸坡坝基水多为弱酸性、中性水。据四川龚嘴水电站大坝廊道水 Eh 值的实测资料^①, 岸坡坝基水 Eh 值多在 300 mV 以上, 处于氧化环境, 河床坝基水多在 80 ~ 300 mV 之间, 但仍有 1/5 的孔水 Eh 值在 300 mV 以上, 多数处于氧化还原环境, 少

数为氧化环境.地下水处于氧化环境,有利于从库水中带来的有机质完全分解,故少数坝基水中侵蚀 CO_2 含量可达 $30 \sim 60 \text{ mg/L}$.大黑汀水库在大坝廊道内还进行了微生物的调查分析^①,以库面水中含量 $10^1 \sim 10^3$ 个/mL 为基准,廊道排水孔水内均有明显增加,其中好氧异养细菌含量增加 1 个数量级;硫酸盐还原细菌增加 1 ~ 5 个数量级;硫化菌、氨化菌、铁细菌等增加 1 ~ 3 个数量级.大黑汀大坝坝基水 pH 值最小为 7.5,一般在 9 以下,水温在 $9 \sim 15^\circ\text{C}$,属微生物生长发育的 pH 值和温度范围.水中有一定的氨态、硝态氮;相当量的总磷和可利用的有机物(BOD 达 $2.9 \sim 21.7 \text{ mg/L}$);以及有足够的铁、硫无机离子提供有关自养菌的生存,所以存在微生物繁殖的良好条件.

水中胶体在排水孔口和排水沟内形成红、白、黑等不同颜色的胶体沉积,称之为析出物,在大坝坝基较为常见,出现率从 22% ~ 61%.其化学成分主要为 Fe_2O_3 、 CaO 、 MnO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 及有机质等,矿物成分仅在少数大坝坝基出现,主要为方解石、长石、石英、伊利石等(表 1).从出现时间看,大黑汀水库蓄水运行 10 a 后出现,且逐年增多.二滩大坝运行仅 4 a,基岩廊道排水沟内就有厚达 10 cm 以上的胶状析出物沉积,三峡大坝永久船闸边坡个别排水平洞内也有明显的胶状物沉积.

表 1 坝基排水孔口胶状析出物化学和矿物成分

Table 1 Chemical and mineral components of colloidal sludge from drain boreholes of some dam foundations										
坝名	排水孔号	化学成分/%					矿物成分	排水孔数	有析出物孔数	所占百分比/%
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MnO				
新安江	灌 4-6	4.0	1.17	75.90	0.36	/				
	灌 3-2	29.89	5.78	30.74	9.92	0.20		417	128	31
	排 11-2	59.57	6.47	7.34	9.85	0.31				
石塘	中 16-8	28.21	5.88	13.05	13.21	7.49	无定形铁、锰少量长石、石英、高岭石	118	48	41
	中 16-4	30.19	10.92	8.55	15.81	7.55				
大黑汀	40-西 6	33.35	5.93	31.42	23.02	/	无定形铁、锰、方解石、长石、石英、伊利石、绿泥石	82 *	75 *	/
	53-西 5 ~ 6	30.98	6.44	8.29	21.28	/				
安砂	A ₄ '	47.09	8.48	10.17	12.04	4.95	无定形铁锰、少量石英、长石、方解石	/	58	/
狮子滩	K ₁₅	10.16	/	43.86	14.67	7.81	方解石、有机质，水晶质 Fe(OH) ₃	124	27	22
	B ₁₁	11.28	/	47.29	9.13	6.61				
龚嘴	5-1-9	11.08	0.00	42.67	5.54	14.59				
	9-1-1	42.06	9.32	11.67	11.08	4.72		311	191	61
	基岩洞(2)	13.0	0.00	63.20	2.58	2.50				
丹江口	9-5	25.42	6.56	35.71	2.10	0.06				
	20	20.89	2.51	30.60	1.08	0.07		91	37	41
	28-11	11.47	15.37	48.63	1.11	0.10				
紧水滩	右 135	16.39	1.30	59.21	1.41	8.36		146	67	46
	右 135-14	24.50	2.96	26.25	1.32	26.33				
古田	13-W ₁₂	6.23	0.28	0.25	47.06	0.78	方解石	/	/	/
	17-F ₁₀	60.07	15.23	8.75	3.16	0.29				

注: * 为坝段数.

2 大坝运行中的坝基工程地质问题

2.1 帷幕失稳与渗漏溶蚀

坝基水中钙的迁移主要来自水与帷幕水泥土间的作用.在坝址环境下,水的总硬度值与暂时硬度常是一致的,故可用总硬度值结合渗漏量来评价帷幕水泥石(包括岩层中碳酸盐矿物)中碳酸盐的迁移量.丰满大坝坝基岩层为变质砾岩,1983 ~ 1985 年对坝基帷幕溶蚀量进行监测,54 个坝段中大多数坝段年溶蚀量不大,但 36[#] ~ 39[#] 坝段溶蚀量大,在 $400 \sim 1923.8 \text{ kg/a}$,年溶蚀量已占全坝总溶蚀量的 56.9%,说明这些坝段发生了集中渗溶,基础帷幕已发生了不同程度的衰减^②.

① 中国科学院微生物研究所环境微生物研究组.大黑汀水库环境微生物调查报告,1997.
② 陈宛平,李玉兰.高坝岩基灌浆帷幕防渗能力衰减原因的研究.北京水利水电科学研究院,1989.

浙江湖南镇大坝 1979 年水库蓄水运行,坝基设有 3 排水泥防渗帷幕,主幕深约 60 m。1983 年 4 月 21 日,当库水位接近正常库水位时,河床 12[#]坝段灌浆廊道排水孔渗漏量突然大幅度增加,与 1982 年相近库水位相比,渗漏量增大约 6 倍。当超过正常蓄水位时,渗漏量达 51 m³/d,其中 3[#]排水孔最大,达 32.8 m³/d。幕后扬压力孔水位逐渐上升,扬压力系数超过设计值。经查明此系帷幕体及其与坝基接触部位遭受渗透破坏的结果。后经水溶性聚氨脂灌浆,效果显著,渗漏量明显下降,3[#]排水孔已不排水,扬压力系数满足设计要求^[2]。

大黑汀水库水属 HCO₃-Ca 型,偏碱性。在近期勘察中揭露到基础混凝土的 28 个钻孔中,有 50% 钻孔岩芯上见有溶蚀现象,主要形态为溶孔,零星分布,局部见有密集成群发育的情况,此表明虽库水对混凝土无腐蚀性,但微生物参与了腐蚀过程,利用有机物产生有机、无机酸来腐蚀混凝土。

2.2 岸坡坝基侧向稳定问题

岸坡坝基地下水力坡降大,侧向渗透压力大,加之水侵蚀性强,渗漏量大,若存在库水渗漏补给,这一作用更加强烈。安徽梅山连拱坝是 1958 年建成蓄水,1962 年库水位上升到建坝以来最高水位 125.56 m 后,右岸坝肩基础突然大量漏水,14[#]~16[#]拱的总漏水量为 70 L/s,且扬压力甚大,14 垛一钻孔往外射水,水平射程竟达 11 m。坝基岩体产生蠕动,13[#],14[#],15[#]支墩向河床位移,拱面产生裂缝,坝的上游面沿拱台前缘与基岩接触线附近,出现长 100 余 m 宽 17 mm 的裂缝。主因是由于在库水推力和岸坡侧向渗透压力的作用下,坝基岩石裂隙进一步张开,风化夹泥裂隙面受到地下水浸润后,抗剪强度骤然减低引起的^[3]。

新安江水电站已正常运行 40 a,右岸岸坡坝基稳定问题仍是大坝最主要的地质问题之一,主要表现在个别扬压力长期超值,水质酸化, pH 值比库底水还小,最小测值 5.15。这是在侧向渗压力作用下,坝基薄层碳质页岩中有机质经氧化分解的结果;岸坡施工平台有利于降水入渗,致使渗漏量大以及软弱页岩夹层产生软泥化问题等。现正设法采取防治措施,如右岸 142 施工平台已被混凝土封盖,效果明显,渗漏量减少近一半。

2.3 软岩性状变化问题

大坝坝基软岩或软弱夹层长期在水浸泡下性状的变化,即软泥化问题是最为人们所关注的地质问题。丹江口水电站坝基为变质闪长岩、变质辉长辉绿岩,部分坝基排水孔水中 K⁺ + Na⁺ 含量丰富,可达 100~200 mg/L,而库水中含量不到 5 mg/L。经室内分别测试钾、钠成分,坝基排水孔水中 Na⁺ 占 95% 以上,而库水则以 K⁺ 为主,基岩化学成分也是以 Na₂O 为主,水中 SiO₂ 含量亦高于库水 2~5 倍,说明水中 Na⁺ 来源于基岩。从分布上,排水孔水中 K⁺ + Na⁺ 含量多的主要位于左岸。经分析,坝基地下水中 K⁺ + Na⁺ 主要来源于未拆除的左岸上游围堰风化石,其次与部分坝基岩石的风化有关,如少数排水孔淤堵,最大厚度达 8 m,淤堵物中含有岩石碎屑。在右岸坝基排水孔(如 9~4 孔)水中 K⁺ + Na⁺ 含量丰富(80~100 mg/L),孔口胶状析出物中 SiO₂ 含量达 25.42%,则来自岩石的风化。

梅山水电站坝基为花岗岩,13[#]拱廊道内排水量大,其中 34[#]孔平均值达 570 mL/min(1998 年),水中 K⁺ + Na⁺ 含量达 112.75 mg/L,是库水的 13.8 倍。坝基水中 K⁺ + Na⁺ 来自基岩,年迁移量约 31 kg,说明局部地段坝基水对岩石的侵蚀强度是大的。

安砂、古田和石塘等坝基少数排水孔口析出物中硅、铝含量丰富,成为主成分。安砂样中两者之和达 50% 以上,且与坝基软弱夹层化学成分相近,说明坝基局部软岩化学潜蚀作用突出并出现泥化。

大黑汀水库 82 个坝段中有 73 个坝段出现析出物,而且数量多^[4]。经收集后在日光下晒干称重,总量达 608 kg,其中溢流坝最多,仅 16[#]~18[#]坝段重达 157.14 kg。9 个化学、矿物成分分析样中,多数以碳酸钙(方解石)和无定形铁为主,但有两个样 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量分别达 37.42% 和 39.28%,成为主成分。经 X 衍射分析,粘土矿物(伊利石和绿泥石)分别占 5.8% 和 16.8%,还有少量的石英、长石。所在坝段的水质资料表明,水中 K⁺ + Na⁺ 的迁移量也大,得出的结论是析出物形成主要是化学潜蚀作用的产物,兼有少量的断裂破碎带内粘土物质的机械搬运。

龚嘴坝基有 61% 的排水孔口有析出物,30 个化学成分分析样中,Fe₂O₃ 和 MnO₂ 为主成分的有 22 个。经对排水孔进行冲洗后证实,冲孔前后,无论是渗出物总量,还是 Fe₂O₃ 和 MnO 的渗出量的变化均不太明显。坝前沉积物和坝基花岗岩中铁、锰含量均甚少,惟辉绿岩中含量较多,达 9%~15%,因而铁、锰是来源于辉绿岩的风化,但析出量小。

3 几点认识

a. 大坝建成蓄水后,库水成为坝基地下水的主要补给源。在向坝基渗透过程中,坝基水多处于氧化还原

过渡环境或氧化环境,有机质分解更完全,水的侵蚀性 CO_2 含量更丰富.地球化学环境的变迁,导致水与岩石、水与帷幕混凝土间的相互作用,也使岩石中一些难于迁移的元素以胶态迁移.如 Al_2O_3 属两性化合物,在介质 pH 值 4~9 之间几乎不发生溶解,但以含水氧化铝($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)胶体形式则易于迁移.水溶性有机物还能与铁、锰、硅等金属元素形成络合物产生迁移.在有机质分解、腐殖质形成过程中产生的有机酸(如富啡酸、胡敏酸)也是强烈的化学制剂,它加速了结晶岩矿物的分解.地球化学环境变迁及水中有有机质的分解,是影响坝基水化学潜蚀作用进行的主要因素.

b. 库底缺氧还原环境有利于微生物活动,坝基又存在微生物生长繁殖的良好环境.微生物生命活动中需要有机养料,水中有有机质的分解即是在微生物作用下产生.在电子显微镜下观察坝基析出物,可以看到一些真菌和丝状铁细菌是形成絮状沉积的重要骨架,这说明微生物还加速了析出物的产生和迁出.总之,生物化学作用是坝基水化学潜蚀作用的重要组成部分,但在这方面的研究还待深入.

c. 坝基环境存在着软岩泥化(即化学潜蚀)的条件.软岩泥化主要是在渗流水的作用下,岩石中的元素发生迁移的结果,并造成原岩结构破坏.因此,坝基水中钾、钠等离子以及 SiO_2 、 Al_2O_3 胶态的多量迁移,是评估软岩软泥化的重要标志.大坝安全监测中应重视坝基水质的定期分析与监测.岸坡坝基侧向渗透压力大,径流条件通畅,水多处于氧化环境,侵蚀性较强,更有利于坝基地下水作用的进行,影响岸坡坝基的侧向稳定,在工程防渗设计上应加强堵排措施.

参考文献:

- [1] PEN Han-xing, SHI Xi-jing, LIU Jian-gang. Environment water action around dam site in Wanzhe mountainous area of China[A]. Proceedings of 7th International AEG Congress[C]. Rotterdam : Balkema , 1994. 2583—2589.
- [2] 邢林生, 胡庚白. 湖南镇大坝 12# 坝段帷幕稳定性分析[J]. 水力发电学报, 1997 (1) 25—31.
- [3] 水利电力部科学研究所. 水利水电工程地质[M]. 北京: 科学出版社, 1974. 107—108.
- [4] 牛世豫, 赵振海. 大黑汀水库坝基析出物研究[J]. 水利水电工程设计, 2000 (3) 35—37.

Dam site environmental water characteristics and some engineering geological issues

MA Xiao-hui¹, PENG Han-xing¹, YANG Guang-zhong¹, TAN Xiao-hua²

(1. Hohai Engineering and Technology Corporation, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;

2. Hequan Reservoir Construction Bureau of Qinghai Province, Xining 810002, China)

Abstract: Based on the investigated data about 15 hydropower stations in China, the analysis emphasizes the characteristics and functions of groundwater in the dam site environment and some engineering and hydrological-geological problems and related mechanism, including the loss of stability of curtains, seepage induced-erosion, lateral stability of dam foundation on bank slopes, and argillization of soft rock and strata, showing the importance of periodic analysis and monitoring of water quality at dam foundations in dam safety monitoring.

Key words: dam ; groundwater ; micro-organism ; soft rock ; engineering geology