

大坝坝址析出物及其对岩体渗透 稳定性的影响^{*}

宋汉周 施希京
(河海大学地质及岩土工程系, 南京, 210098)

文 摘 结合近年来大坝安全定检工作, 以皖浙山区 4 座水电站为例, 在分析了大坝坝址析出物的物质组分、理化指标等特性的基础上, 对其成因作了探讨。并从宏观、微观角度, 评价了析出物对岩体渗透稳定性的影响, 指出析出物在一定条件下系化学潜蚀作用所致, 长期的作用可降低渗径中充填物颗粒间的物理化学连接力, 但只要仍处于化学潜蚀作用阶段, 就不会产生对岩体渗透稳定性有显著的不利影响。

关键词 坝址析出物, 成因, 渗透稳定性, 评价。

1 前 言

近年来, 首次进行的大坝安全定检工作反映出, 在已建成并投入运行的水电站中, 为数不少的大坝坝址区存在胶状物质(简称析出物)。它们大多出现在大坝基础廊道或坝肩平洞中; 多数源于排水孔, 随地下水排出并形成于孔口附近; 或直接源于岩体裂隙, 在其出口处以扇形状堆积。此类物质是如何形成的, 对岩体渗透稳定性乃至对大坝安全运行有何影响, 已引起关注。

以紧水滩等 4 座水电站为例, 采用现场调查、原位测试、取样分析等手段, 在论述析出物基本特征及其成因的基础上, 综合评价水电站运行期间大坝坝址析出物对岩体渗透稳定性的影响。

2 坝址区环境概述

紧水滩、石塘、新安江、陈村等 4 座大坝位于皖浙山区, 地处亚热带湿润气候区, 年均降水量 1500mm 以上, 年均气温 15℃~17℃。4 座大坝中投入运行最长的已超过 30 年, 最迟的亦近 10 年, 因而获得了显著的社会效益和经济效益。不同的坝址区有着不同的基础岩体。紧水滩、石塘两大坝坝址为岩浆岩; 新安江、陈村两坝址为沉积岩。但均属裂隙岩体。尽管不同的坝址区有着不同的自然环境及地质环境(表 1), 但在运行期间都曾出现过或依然存在一些对大坝安全运行产生不利影响的基础问题^[1]。实例研究表明, 诸如坝址区析出物等问题无不与

表 1 水电站的部分统计特征

大坝名称	坝 型	坝高(m)	库容(亿 m ³)	坝址河谷形态	岩性	竣工日期
紧水滩	混凝土三心双曲变厚拱坝	102	1.04	峡谷	花岗斑岩	1988 年
石 塘	混凝土实体重力坝	38.9	0.65	宽谷	凝灰岩	1988 年
新安江	混凝土宽缝重力坝	105	178	峡谷	砂岩夹页岩	1961 年
陈 村	混凝土重力拱坝	76.3	28.25	峡谷	砂页岩	1978 年

^{*} 到稿日期: 1996-05-06。

一定环境下地下水的作用有关。

3 析出物基本特征

现场调查表明,有关大坝坝址区析出物的分布较为普遍(表 2)。据统计,紧水滩大坝坝址析出物的分布除表 2 所示,在其右坝肩 135 上游平硐中还见有近 30 处析出物直接从岩体裂隙中析出,大多以扇形状堆积着,且析出物的量大于该坝址其它部位。陈村水电站坝址析出物的分布相对不普遍,此与有关廊道各排水孔口高、且多数孔不排水有关。

析出物颜色为棕红色、黑色、白色及其过渡色。不同颜色反映出具有不同的化学成分(表 3)。棕红色以 Fe_2O_3 为主;黑色以 MnO 为主;白色以 CaO 为主,且烧失量大。经对析出物样作 X 射线衍射检测,其曲线上无明显的衍射峰(图 1),从而证实了析出物是一种呈无定形的非晶质物质。

表 2 大坝坝址析出物的分布特征统计

大坝名称	分布位置	排水孔数	出现析出物的孔数	所占百分比 (%)
紧水滩	大坝廊道	78	48	61.54
	左坝肩平硐	48	12	25.00
	右坝肩 135 上游平硐	20	7	35
石塘	大坝廊道	88	37	42.05
	消力池	129	63	48.84
新安江	大坝廊道	417	128	30.70
陈村	大坝廊道	226	36	15.93

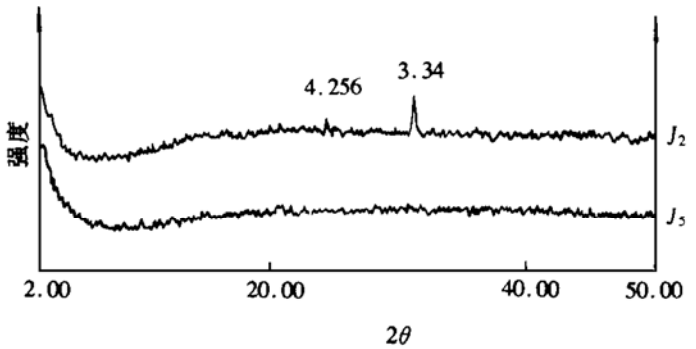


图 1 紧水滩坝址析出物 X 射线衍射谱

表 3 析出物化学成分分析一览表

大坝名称	取样位置	化 学 成 分 (%)							水 pH 值	颜 色
		SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	烧失量		
紧水滩	右 135 裂隙	16.39	59.21	1.30	1.41	0.11	8.36	12.34	6.5	棕 红
	右 135- 14	24.50	26.25	2.96	1.32	0.22	26.33	15.83	6.0	棕红夹黑色
	灌 13- 1	8.33	3.37	3.99	18.70	0.32	0.49		10.27	白 色
石塘	排 16- 3	16.08	25.95	4.25	8.16	0.23	27.52	14.99	-	黑色夹棕红
	排 16- 1	5.63	1.12	1.06	49.30	0.10	0.09	40.22	-	白 色
新安江	排 2- C_3	2.41	78.41	0.11	0.29		0.17		5.5	棕红
	坝基裂隙	8.21	13.73	2.56	5.6		19.87		-	黑色
	灌 20- 4	1.52	0.53	0.47	51.21	0.76	0.27	42.63	9.18	白 色
陈村	灌 17- 4	13.36	43.70	4.54	9.05		0.65	24.60	7.25	棕红
	灌 25- 1	7.38	8.86	4.36	17.74		25.20	28.28	7.95	黑色

4 析出物的成因分析

4.1 水环境及其变化关系

水库蓄水条件下,坝址区地下水动态及其环境特征发生了很大的变化。前者反映为水动力特征的变化,在上下游间数十米甚至近百米的水头差作用下,坝址区地下水处于高渗压状态。这种渗流特征可使地下水渗入到相对不透水的岩层(如页岩层的微细裂隙)中,从而导致渗流场内液—固相间的水文地球化学作用更广泛。后者反映为水文地球化学环境的变化,此

在一定程度上由补给源的变化而引起。一般地说,坝前库水尤其是底层水是坝基地下水的重要补给源。由表 4 知,水库底层水尤其是大型水库(如新安江、陈村水库)的底层水富含侵蚀性 CO_2 , 趋于酸化;耗氧量大、并含 H_2S ;这是库底水处于低温、高压、缺氧还原环境的标志。补给源水环境的这种变化有利于坝址区尤其是坝基地下水环境趋向于还原环境,从而使新环境下液-固相间的新的水文地球化学作用成为可能。如坝址地下水处于弱酸性的缺氧环境,与水相接触的固相中的一些变价元素易以低价的形式(如 Fe^{2+} , Mn^{2+} 等)经水解作用进入液相中,或以游离氧化物态进入液相中,并随之迁移;而在水环境急剧趋于氧化环境的部位(如排水孔口),则以肉眼可辨的胶状物质即析出物出现。由此可见,坝址析出物的出现与水环境的变化密切相关。

表 4 库水若干化学指标统计

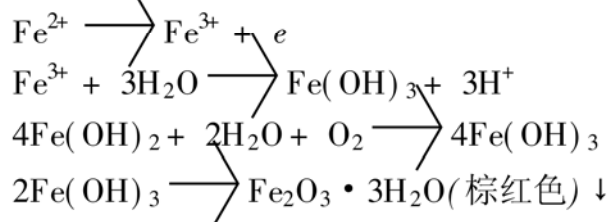
大坝名称	取样层位	pH 值	侵蚀性 CO_2 (mg/L)	AL (me/L)	TH (me/L)
紧水滩	表层	8.04	4.57	0.15	0.19
	底层	7.20	6.84	0.13	0.15
石塘	表层	7.34	4.84	0.09	0.15
	底层	7.23	5.63	0.09	0.15
新安江	表层	8.00	0.90	0.74	0.84
	底层	6.70	9.70	1.00	0.99
陈村	表层	7.40	2.20	0.85	0.90
	底层	6.40	8.80	0.90	1.26

注:AL 指重碳酸盐碱度;TH 指硬度。

4.2 水-岩系列间的相互作用

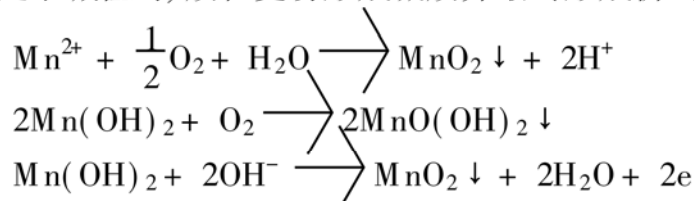
如前所述,蓄水条件下坝址区地下水环境及地下水质的变化促进了水-岩系列间的相互作用,从而为析出物的形成提供了物质来源。由表 2 知,析出物中以铁、锰、钙为主,次为硅、铝;而具体的水质分析资料(略)表明,紧水滩等坝址区地下水中此类物质的含量均高于库水,故认为基岩中铁、锰、钙物质是析出物的主要物质来源。有关勘测阶段及施工阶段的地质资料为此提供了佐证。如石塘坝址岩体结构面充填物中,铁锰质占 33.64%。由于构造应力的作用,它们以浸染状相对富集于结构面中;而钙质则以薄膜状或脉状出现,或作为充填物的胶结物出现。

在还原环境下,含有一定量侵蚀性 CO_2 的地下水使坝址岩体裂隙中的铁以低价离子态或胶粒形式随水流迁移,当地下水流出排水孔口或岩体裂隙而处于氧化环境时,水中的低价铁离子变为高价铁离子,而胶粒则变成凝胶^[2],进而形成析出物。其反应过程如下:



由于 Fe^{2+} 易在弱酸性水中迁移,故棕红色析出物一般出现于 pH 值较低的溶液中。

还原环境亦有利于锰元素或以低价离子或以胶粒的形式迁移。当趋于氧化环境时,被氧化成高价锰;当介质处于碱性时,胶粒更易形成凝胶并最终形成析出物。其反应式如下:

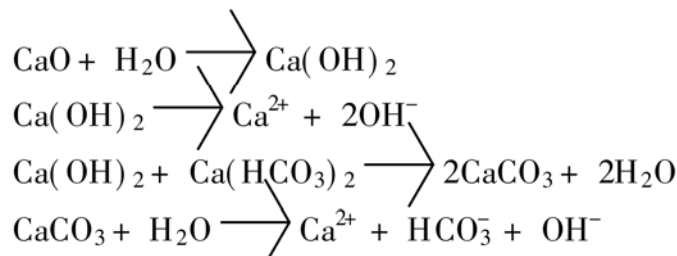


因为 Mn^{2+} 在碱性介质中的 Eh 值(-0.28V)远低于酸性介质中的 Eh 值(1.5V),故黑色析出物多出现于碱性水中。

4.3 水对水工建筑物的侵蚀作用

由表 4 知,紧水滩等水库库水均为极软水($\text{TH} < 1.5\text{me/L}$),且具中等溶出型侵蚀作用

($AL < 1.07 \text{ me/L}$), 而具体的地下水质分析资料(限于篇幅, 未列出)表明, 这 4 座大坝坝址地下水亦普遍为极软水局部为软水, 且普遍具中等溶出型侵蚀作用, 但不存在酸性侵蚀作用。现场调查发现, 坝址区白色析出物主要出现于灌浆廊道内帷幕体下游的排水孔位, 此可作为坝址地下水对于大坝基础及帷幕体中的碳酸盐类物质发生了溶出型侵蚀作用的产物。其反应过程如下:



由表 3 知, 凡出现白色析出物的水介质的 pH 值均比较大, 即碱性化甚至强碱性化, 此与坝踵帷幕体后滞缓的径流条件有关^[3]。

5 析出物对岩体渗透稳定性的影响

5.1 物质组分

表 3 反映出不同颜色的析出物具有不同的物质组分, 但硅、铝含量(SiO_2 : 1.52% ~ 24.5%; Al_2O_3 : 0.11% ~ 4.54%) 均明显低于岩土(包括未风化、强风化岩石及断层带物质), 可见岩石中主要的造岩矿物并没有对析出物具有显著的“贡献”。而在其它组分的含量变化上, 两者之间亦有显著的差异(表 5)。由此表明, 坝址析出物并非简单的机械潜蚀所致。

表 5 部分岩样化学成分分析一览表

大坝名称	取样位置	化 学 成 分 (%)							岩 性
		SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	烧失量	
紧水滩	右坝肩平硐	76.97	1.55	12.99	0.34	0.06	0.09	1.07	新鲜花岗斑岩
	右坝肩岸坡	75.29	0.98	14.39	0.16	0.04	0.01	1.13	强风化花岗斑岩
石 塘	坝 基	79.85	1.70	11.96	0.17	0.25	0.16	2.10	晶屑凝灰岩
新安江	坝 基	76.65	1.45	15.13	0.03	0.29	0.06		杂色页岩
	坝 基	77.86	6.48	8.98	0.20		0.05		砂 岩
陈 村	坝 基	68.42	5.77	14.58	0.41		0.10	3.46	粉砂质页岩
	坝肩平硐	64.28	6.36	16.75	0.15		0.37	5.60	F_{11} 断层泥

5.2 理化特性

阳离子交换量是反映析出物理化特性的一个重要指标。由表 6 知, 析出物的阳离子交换总量远大于岩样的值, 反映出坝址区析出物的物理化学活性远强于岩石。正是这种物理化学性质决定了析出物是化学潜蚀作用的产物; 易随水介质的 pH 值的变化而变化, 如前论及的在碱性水溶液中胶粒可形成凝胶; 且易随环境的 Eh 值的变化而变化。如在现场观察到, 排水孔口附近随着棕红色析出物堆积厚度的增加, 其下部因处于封闭状态故又形成还原环境, 以致棕红色 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体被还原成黑色含水氧化亚铁($\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$)胶体。

表 6 部分电站坝址析出物与岩样的理化指标统计

电 站	阳离子交换总量(me/100g)				
	析 出 物 样			岩 样	
紧水滩	J_1	J_3	J_5	J_{y1}	J_{y4}
	47.69	60.06	63.69	4.13	3.80
石 塘	S_1	S_4	S_6	S_{y1}	S_{y3}
	31.52	47.69	28.71	1.73	1.98

5.3 宏观微观形态

现场观察发现, 出现析出物的有关排水孔内水清透明, 在一束强光束下呈明显的丁达尔现象, 从而证实坝址地下水是一种含有胶粒(或胶体)的溶液, 即水中含有直径小于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒^[4]。在排水孔口等水环境明显变化的部位, 水溶液中就出现肉眼可辨的胶状物质。经烘干后, 呈粉末状, 可见具有很大的总比表面积, 用手搓之, 无颗粒感。经颗粒分析, 析出物中多数为小于 0.002mm 的胶粒级。紧水滩坝址一析出物样(J_4)的颗粒分析结果如下: 颗粒大于 0.05mm 的占 10%; 小于 0.05mm 的占 90%, 其中小于 0.005mm 的占 67%, 小于 0.002mm 的占 58%。

活性氧化物分析结果证实, 析出物游离氧化物中以无定形的氧化物为主, 此与 X 射线衍射分析的结果相一致。少数样品中无定形氧化铁含量不高, 这可能与库底存在的有机质有关。因为有机质与铁可形成络合态铁, 而络合态铁虽然也属无定形物质, 但不被草酸铵所提取(活性氧化物分析是用 $\text{pH}=3.2$ 草酸铵法)。

5.4 地下水动态

由于析出物是一定环境下地下水作用下的产物, 因而对于地下水动态的分析也有助于揭示析出物的形成机制及其对岩体渗透稳定性的影响。有关原型监测资料反映出, 紧水滩等 4 座大坝坝址渗流近年来是相对稳定的, 如坝基总排水量呈逐年减少之势, 但减幅不一。紧水滩坝基平均日排水量 1992 年为 $34.04\text{m}^3/\text{d}$, 1993 年及 1994 年依次为 33.61 , $30.62\text{m}^3/\text{d}$, 1994 年为 1992 年排水量的 89.95%。石塘坝基排水量于相应年份依次为 180.40 , 157.24 , $138.20\text{m}^3/\text{d}$, 1994 年为 1992 年的 76.61%。新安江坝基排水量在相似的高库水位期呈明显的减少之势, 如 1973 年 6 月 26 日(库水位 $H=106.32\text{m}$), 排水量为 $170.27\text{m}^3/\text{d}$; 1983 年 7 月 12 日($H=107.504\text{m}$), 排水量为 $120.60\text{m}^3/\text{d}$; 1993 年 7 月 5 日($H=105.82\text{m}$), 排水量为 $96.46\text{m}^3/\text{d}$, 为 20 年前的 56.65%。陈村水电站于 80 年代后期, 保持了相对持续的高库水位, 然而坝基总排水量并未增大而略有减少, 如图 2 所示。

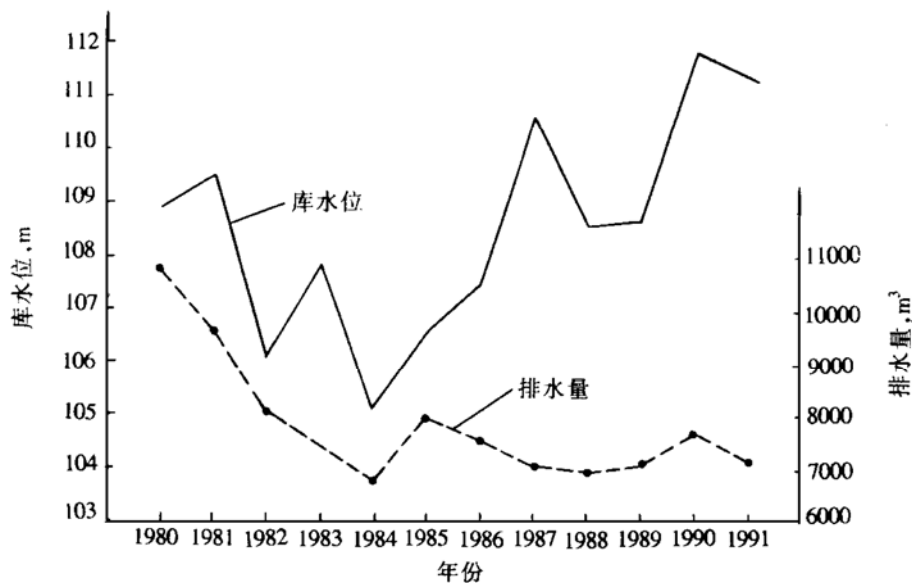


图2 陈村水电站库水位及坝基排水量的年际变化特征

现场观测表明, 凡有析出物出现的排水孔的排水量均较小, 且保持相对稳定, 与上游库水位之间无相关性或相关性很弱。而从坝址区扬压力孔的实测值来看, 这 4 座大坝坝址扬压力的观测值均在正常值区间波动, 变化不大, 仅个别孔实测值大于设计值。很明显, 如果析出物系机械潜蚀(或机械管涌)所致, 那么与之相关的地下水动态必然出现异常, 如排水量出现陡增等。

综上诸方面表明,紧水滩等4座大坝坝址析出物至少目前看来还没有产生对岩体的渗透稳定性构成有意义的不利影响。

6 结 语

以紧水滩等4座水电站为例,对大坝坝址区析出物的化学组分、宏观形态、理化指标等方面作了较为全面的分析,得出坝址析出物是一定条件下化学潜蚀作用的产物,而非简单的机械潜蚀所致。需要指出的是:

(1)化学潜蚀作用的发生与否并不取决于渗透压力的大小,而是取决于地下水质及与之相接触的固相物质的物理化学性状。

(2)在化学潜蚀作用下,作为主要渗径的岩体结构面中诸如碳酸盐类等可溶性物质的溶失及游离氧化物(如 SiO_2 , Fe_2O_3 及 Al_2O_3 等)的析出,可导致充填物颗粒间物理化学连接力的降低乃至介质的“空化扩容”^[5],这将不利于岩体的渗透稳定。但只要处于化学潜蚀作用阶段,这种不利影响一般仅具有微观的标志。

(3)由于这种化学潜蚀作用及其物质已经找到了“出口”,故只要地下水继续从排水孔口或直接从岩体结构面中溢出,那么这种作用就会继续下去,而不会呈“自熄灭”过程。从这个意义而言,在一定条件下它可能是机械潜蚀作用的先导,并在一定阶段伴随渗透变形,而对岩体的渗透稳定性产生有意义的不利影响。但目前对于这种化学潜蚀作用发展趋势的研究尤其是量化的研究还不够。为此,建议仍应定期开展对坝址析出物的监测,以积累资料作进一步评价。

参 考 文 献

- 1 彭汉兴等.皖浙山区大坝坝址环境水特征与作用.水科学进展,1995,6(2):150~155.
- 2 殷纯嘏.地质中的基础化学问题.北京:地质出版社,1980.100.
- 3 宋汉周等.陈村水电站坝基丙凝加强帷幕的防渗时效分析.工程地质学报,1995,3(2):78~85.
- 4 W.斯塔姆等著.水化学——天然水体化学平衡导论.汤鸿霄等译.北京:科学出版社,1987.476~482.
- 5 罗鸿禧.葛洲坝水利枢纽基岩软弱夹层变化趋势的物理化学力学探讨.见:全国首届工程地质学术会议论文集.北京:科学出版社,1983.169~177.

Influence of Eluates Around Dam-sites on Seepage Stability

Song Hanzhou Shi Xijing

(Department of Geology, Hohai University, Nanjing, 210098)

Abstract The formation of eluates around dam-sites is studied in 4 case records on the basis of their chemical compositions and physico-chemical index, etc. The influence on seepage stability is appreciated from macro and micro point of view. It is concluded that the eluates are produced generally by chemical erosion under certain conditions, and the physico-chemical behaviour between grains may be deteriorated as the time elapses. However, the macro influence on seepage stability is unlikely to exist as long as this kind of erosion is of chemical one.

Key words eluates around dam-sites, formation, seepage stability, appreciation.