

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.022

某水电站坝址区钙质砂砾岩溶蚀发育规律研究

王锦国, 周志芳, 卢 刚

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 分析了我国西南某水电站坝址区钙质砂砾岩溶蚀发育分布规律, 并采取岩样进行了室内溶蚀试验。试验结果表明, 砾岩和含砾砂岩不仅胶结物主要为钙质成分, 30% ~ 50% 的砾石成分也为钙质, 因此加强了岩体的可溶性。新鲜岩石表面最容易受溶蚀, 且溶蚀速度较快。这与现场调查和钻孔岩芯统计裂隙表面溶蚀风化程度最强, 垂直裂隙面向岩石内部风化程度逐渐减弱的实际情况相一致。

关键词: 地下水; 溶蚀; 可溶岩; 水电站

中图分类号: P642.253

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2008)06-0828-05

在酸性环境下, 许多岩石会发生溶蚀作用, 例如灰岩、钙质砂岩等。岩石被溶蚀后其强度、渗透性等物理力学性质将会发生很大的变化^[1], 这对于岩石工程的强度、稳定性会有不同程度的影响。许多学者对砂岩的溶蚀作用进行了试验和机理探讨^[2-7]。在水利水电工程中, 基岩作为坝基或地下洞室的载体, 其物理力学特性同样受到地下水溶蚀作用的影响^[8-11]。

位于云南省丽江地区华坪县(左岸)与四川省攀枝花市(右岸)的金沙江某水电站, 坝址区基岩体主要为钙质胶结砂岩和砾岩。由于地下水溶蚀作用, 沿层理方向或陡倾角裂隙产生溶蚀现象, 局部形成小型溶洞, 在右岸岩体中沿缓倾角卸荷裂隙或层面产生钙质流失, 在裂隙或层面两侧形成半胶结状砂土, 对坝基的稳定性产生不利影响。本文在对砂、砾岩可溶成分统计的基础上, 采取岩样进行了室内溶蚀试验, 分析了钙质砂岩、砾岩在酸性环境下的溶蚀速度、程度等, 为进一步分析钙质砂、砾岩的溶蚀成因机制、溶蚀发育规律以及对大坝抗滑、变形及渗透稳定性的影响, 提供了基础资料。

1 坝址区地层岩性及影响溶蚀发育的因素

1.1 地层岩性

该水电站坝址基岩为侏罗系中、下统, 中统蛇店组(J_{2s})为工程区的主要地层。蛇店组为工程区的主要地层, 分3段: (a) 下段(J_{2s}^1)为棕红色中~厚层状粉砂岩夹紫红色厚层~巨厚层状铁质钙质细粒岩屑石英砂岩, 棕红色薄~中厚层状泥质粉砂岩, 局部互层。粉砂岩由石英、方解石、氧化铁和硅质岩屑组成, 粉砂状结构, 铁、钙质呈孔隙状胶结, 岩石含灰绿色条带或团块。泥质粉砂岩具崩解特性。厚度大于240 m。(b) 中段(J_{2s}^2)以灰紫色、紫红色厚层~巨厚层状砾岩、铁质钙质含砾细粒岩屑石英砂岩为主, 夹棕红色薄~中厚层状铁质钙质粉砂岩和泥质粉砂岩。砾岩由石灰岩屑、硅质岩屑、粉砂(泥质)岩屑和石英、方解石组成, 砂砾状结构, 钙质呈孔隙状胶结。粉砂岩中局部含灰绿色团块或条带。泥质粉砂岩具崩解特性。厚度200~250 m。(c) 上段(J_{2s}^3)为紫红色厚层~块状细粒砂岩、棕红色中~厚层状铁质钙质粉砂岩夹泥质粉砂岩, 偶见浅灰色薄层泥质灰岩透镜体。上部夹灰色角砾状硅质灰岩透镜体。细粒砂岩由石英、硅质岩屑和灰岩岩屑组成, 细粒砂状结构, 铁、钙质呈孔隙状胶结。泥质粉砂岩具崩解特性。厚度约550 m。

1.2 影响溶蚀发育的主要因素

影响坝址区岩体溶蚀作用的因素较多, 其中主要有地层岩性、地质构造和地下水活动。岩石的矿物成分和化学成分对岩石的溶蚀性能起着决定性的影响。不同的造岩矿物抗地下水侵蚀的能力是不同的。对于相同矿物组成的岩石, 其结构、构造以及地质构造和地下水水质、水循环情况对岩石的抗侵蚀能力也起控制作用。

收稿日期: 2007-11-23

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0717) 国家自然科学基金(50579012) 河海科技创新基金(2013406077)

作者简介: 王锦国(1974—), 男, 山西阳泉人, 副教授, 博士, 主要从事地下水科学与工程研究。

1.2.1 岩性

该水电站坝址区 J_{2s} 钙质胶结的砂岩、砾岩,碎屑物中砂质碎屑主要为石英,可溶性很差,而砾岩碎屑物大部分为可溶的 $CaCO_3$,可溶性较好.胶结物主要为钙质胶结,也属于可溶岩类,加之胶结类型多为孔隙式胶结,因此胶结物很容易被地下水所溶蚀,同时可溶的砾石也被溶蚀,可溶物质流失后不容易溶蚀的碎屑物质呈松散状堆积于溶蚀空洞中.

1.2.2 地质构造

地质构造与岩体的溶蚀作用有着密切的关系.各种类型的结构面是地下水深入岩体内部的主要通道,促使溶蚀作用向岩体内部发展.具侵蚀能力的地下水,首先沿裂隙进入岩体内部,在不断进行溶蚀循环的条件下,裂隙逐步扩大.岩体中裂隙越发育,连通性越好,水循环条件越好,溶蚀条件也越好.

坝址区构造主要受左岸大平坝背斜和右岸干坪子向斜控制,岩体中发育多组裂隙.岩体的溶蚀作用与构造有密切的关系.根据勘察资料, J_{2s}^2 和 J_{2s}^3 下部砂、砾岩层中在陡倾角裂隙发育并张开部位,岩体钙质物质被地下水带走,形成空洞或架空状.由于地下水淋漓作用,砂岩中的钙质沿层面或陡倾角节理面流失,形成砂土状的透镜体.这些现象表明,溶蚀作用主要受构造控制,根据钻孔岩芯统计,对于岩性相同的岩体,在裂隙发育的部位溶蚀作用就发育,在裂隙不发育的地段,溶蚀作用也不发育.

1.2.3 地下水循环条件

在可溶性岩体中,只有当地下水的补给和排泄条件畅通,能不断地将溶解物质带走,同时又有具侵蚀性的水的不断补充时,才能使溶蚀作用发生.相反,如果地下水流动缓慢或处于静止状态,则溶蚀作用发育迟缓或处于停滞发育阶段.

地下水的流动性主要取决于岩体的透水程度和地下的排泄条件.水电站坝址区受大平坝背斜和干坪子向斜控制,在褶皱核部和两翼结构面发育,特别是层节理、缓倾节理和横节理,透水性较好,地下水有较好的循环条件.地下水接受降雨入渗补给,沿陡倾角裂隙入渗,因此在陡倾角裂隙发育的部位常常会发育有溶孔.在右岸,由于干坪子台地部位发育缓倾角裂隙,因此局部地下水流作用活跃,造成了钙质砂岩中钙质胶结物流失严重的现象.

2 岩体溶蚀发育分布规律

J_{2s}^2 和 J_{2s}^3 下部岩层中分布有钙质砾岩、钙质含砾砂岩,在陡倾角裂隙发育并张开部位,岩体钙质物质被地下水带走,形成空洞或架空状,最大可达 3 m.空洞中原岩中钙质流失后,砾岩中的砾石与紫红色黏土堆积于空洞内,与之相连的陡倾角裂隙一般均为白色软塑状高岭土充填,空洞处于一种相对封闭状态.由于地下水淋漓作用,砂岩中的钙质沿层面或陡倾角节理面流失,形成砂土状的透镜体,其对混凝土坝基稳定产生不利影响.

根据坝址区勘探线横剖面平硐和钻孔资料,通过统计平硐和钻孔内溶蚀发育的位置,将其反映在图 1 上,图中黑色方块表示该处有溶孔发育.从图 1 可以看出,1 200 m 高程以下在两岸岸坡均有溶蚀作用发育,河

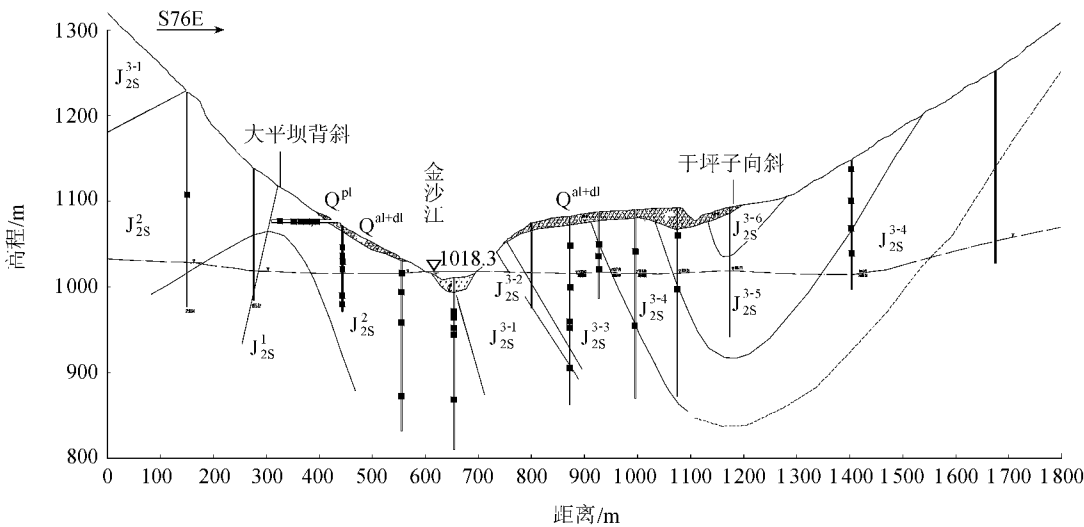


图 1 钙质砂砾岩溶蚀发育深度剖面示意图

Fig.1 Corrosion of calcareous sandy and gravelly rock with depths

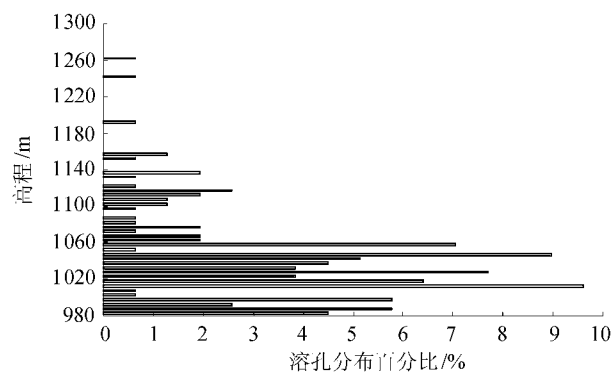


图2 坝址区钻孔出现溶孔(洞)百分比随高程变化柱状图

Fig.2 Change of percentage of dissolved pores (cavities) with elevations at the dam site

床中有深部溶蚀作用发育,最深可达 900 m 高程以下,即埋深约 120 m.结合坝址区地下水分布情况,岩体溶蚀发育分布范围与地下水活动范围基本一致.

通过对坝址区 44 个钻孔进行统计,给出了不同高程溶孔(洞)发育百分比的柱状图,如图 2 所示.根据坝址区河流阶地发育的情况,可以分析溶孔(洞)发育的高程与阶地的关系.坝址区干坪子台地为三级阶地,阶地分布高程 1075~1092 m.从图 2 可以看出,在三级阶地以上,发育溶孔(洞)百分比出现一峰值,但大小仅为 2.6%;三级阶地以上出现溶孔(洞)的百分比总数为 17.95%,其余均发育于 1075 m 高程以下.坝址区一、二级阶地零星发育溶孔(洞),可以认为,82.05%的溶孔(洞)发育于一、二级阶地范围之内.

3 砾岩可溶性统计

根据平硐调查发现,钙质砾岩、含砾砂岩中除了胶结物可溶外,砾石也多为可溶性岩,主要成分为 CaCO_3 ,因此砾岩、含砾砂岩的溶蚀现象很普遍,砾岩(含砾砂岩)层中沿陡倾角裂隙发育有溶洞,洞中堆积了不可溶的砾石、砂、角砾等碎屑物和黏土.在砾岩(含砾砂岩)风化面上,钙质流失以后剩下的碎屑颗粒突出于表面上,可溶砾石表面溶蚀后呈现出了灰白色.在平硐中选取典型面和钻孔中选取典型段对砾岩(含砾砂岩)中不同砾径的碎屑物颗粒数量、可溶砾石的数量进行了统计.统计采用在面上取直线,计算不同砾径砾石长度占统计总长度比值的方法,统计结果见表 1.

从表 1 可以看出,共统计了 12 800 mm 长度的钻孔砾岩(含砾砂岩)岩芯,其中砾径大于 2 mm 的段长度占总长度的百分比平均值为 50.0%,可溶砾石长度占总长度的百分比平均值为 30.4%,最大段达到 60.8%.从平硐统计中的砾岩统计可以看出,统计 2 400 mm 长度的砾岩中,有平均 49.6% 的长度为可溶性的,最大值为 64.0%,由此可见坝址区存在可溶性的岩石.在溶蚀产生的洞穴中,堆积物多为不可溶的砾石、角砾和砂、黏土,由于受地下水的浸泡,呈软塑状态.

表1 钻孔砾岩(含砾砂岩)粒径、可溶性统计

统计位置	总长度/mm	不同砾径段长度/mm			可溶砾石长度/mm
		$\geq 2\text{ mm}$	$\geq 5\text{ mm}$	$\geq 10\text{ mm}$	
钻孔	12 800	6 406	4 390	2 661	3 896
平硐	2 400	1 625	1 236	857	1 191

4 钙质砂砾岩溶蚀试验及成果分析

为了了解钙质砂岩、砾岩在酸性环境下的溶蚀速度与溶蚀程度的规律,分别对坝址区不同部位不同岩性取样,利用碳化箱进行溶蚀试验.其原理是:保持碳化箱中的温度、湿度和 CO_2 的压力基本不变,将试样放置于盛 500 mL 蒸馏水的烧杯中,一起放置于碳化箱中,开启运行,在 7 d,14 d 和 21 d 时分别取出溶蚀试样进行水质分析.

试验中碳化箱中的温度保持 $20.0^\circ\text{C} \pm 2.0^\circ\text{C}$,湿度保持 $70\% \pm 5\%$; CO_2 质量分数为 $(20.0 \pm 3.0)\%$;加热功率 600 W,去湿功率 140 W.对碳化箱中取出水样的 HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} 和侵蚀性 CO_2 、硬度等指标分别进行了测量.由于采用的岩石试样形状不是很规则,表面积较难求,为了对比相同岩性试样不同时间溶蚀作用的规律,计算采用了单位质量岩石试样溶液 Ca^{2+} 质量浓度进行分析.

首先分析同一试样连续经过 3 次相同溶蚀时间的溶蚀情况.选取钻孔 122 的砂岩和平硐 106 中取的砾岩进行连续 3 次的溶蚀试验,每次 7 d,结果如图 3 所示.结果显示,在相同的时间段中,新鲜

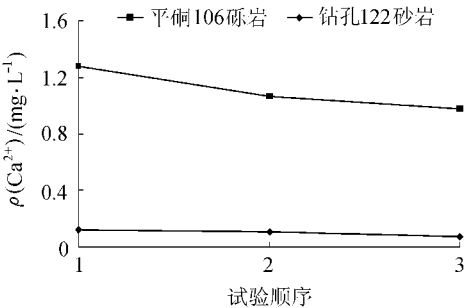


图3 同一试样 3 次溶蚀试验 Ca^{2+} 质量浓度变化曲线

Fig.3 Change of Ca^{2+} concentration in the same rock sample in three duplicated experiments

岩石表面受溶蚀后水中 Ca^{2+} 质量浓度最大,同一试样再次溶蚀时,溶解于水中的 Ca^{2+} 质量浓度呈下降趋势.

上述结果说明,新鲜岩石表面最容易受溶蚀,或者说新鲜岩石表面受风化溶蚀速度较快.需要指出的一点是,第 2、第 3 次用同一试样进行试验的时候,没有清洗试样表面的物质,这可能减缓了 H_2CO_3 对岩样的进一步溶蚀作用.此外,对平硐 106 砂岩、平硐 108 砂岩样品分别经过 2 次 14 d 的溶蚀试验,后一次溶蚀量均比前一次要小,即同一岩样多次试验时,虽然溶蚀时间相同,但溶蚀速度或程度却逐渐减小.

图 4 为钻孔岩芯沿陡倾角裂隙发生溶蚀作用产生溶隙的照片.在现场调查和钻孔岩芯统计中发现,在裂隙表面溶蚀风化程度最强,垂直裂隙面向岩石内部风化程度逐渐减弱.上述试验结果与实际情况相当吻合.

分别计算平硐中砾岩、砂岩和钻孔中砾岩、砂岩试样溶蚀后水样中 Ca^{2+} 平均质量浓度,得到其随溶蚀时间的变化曲线如图 5 所示.从图 5 可以看出,随着溶蚀时间的增加,溶液中 Ca^{2+} 的质量浓度总体上呈增加的趋势.



图 4 钻孔 164 深度 65 m 处沿陡倾角裂隙发生的溶蚀现象

Fig.4 Corrosion along the steep fracture of borehole 164 at 65 m in depth

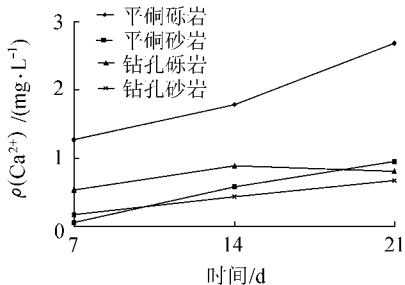


图 5 岩石溶蚀液中 Ca^{2+} 质量浓度平均值随试验时间的变化曲线

Fig.5 Change of mean value of Ca^{2+} concentration with time

对比不同平硐和钻孔中取样的几组试验结果,平硐砾岩溶蚀速度较快,溶液中 Ca^{2+} 质量浓度最大.其次是钻孔砾岩,平硐中砂岩和钻孔中的砂岩溶蚀速度基本相同.由此可以看出,砾岩的可溶性较好,砂岩可溶性次之.需要指出的是,由于试样都为不规则的形状,特别是在平硐中取岩样,其比表面积都较难求,因此在试验数据处理时选取了单位质量的试样溶液 Ca^{2+} 质量浓度作为对比标准.

5 结 论

- a. 钙质砂砾岩溶蚀作用主要受岩性、构造和地下水活动影响,地下水化学成分和水循环条件对岩体的溶蚀起主要作用.
- b. 在坝址区 1 200 m 高程以下在两岸岸坡均有溶蚀作用发育,河床中有深部溶蚀作用发育,最深可达 120 m,溶蚀发育分布范围与地下水活动范围基本一致.
- c. 砾岩和含砾砂岩不仅胶结物主要为钙质成分,30% ~ 50% 的砾石成分也为钙质,因此加强了岩体的可溶性.
- d. 新鲜岩石表面最容易受风化溶蚀,且溶蚀速度较快.这与现场调查和钻孔岩芯统计裂隙表面溶蚀风化程度最强,垂直裂隙面向岩石内部风化程度逐渐减弱的实际情况相一致.
- e. 地下水对岩石的溶蚀作用是随时间变化的.在天然环境下,地下水对岩体的溶蚀作用主要受地下水循环条件控制,由于地下水处于弱酸环境,在水循环较好的条件下,岩体的溶蚀作用处于弱侵蚀状态或动态平衡状态.在水库蓄水后,由于地下水环境有较大的改变,水与岩体之间的作用会发生什么样的变化,还有待于进一步的预测研究.

参考文献：

[1] 汤连生,王思敬.水岩化学作用对岩体变形破坏的力学效应研究进展[J].地球科学进展,1999,14(5):433-439.
[2] 郑力会,崔小勃,李嗣贵,等.地层温度下疏松砂岩酸溶实验研究[J].油气井测试,2007,16(6):9-15.
[3] 季汉成,徐珍.深部碎屑岩储层溶蚀作用实验模拟研究[J].地质学报,2007,81(2):212-218.
[4] 霍润科,李宁,刘汉东.受酸腐蚀砂岩的统计本构模型[J].岩石力学与工程学报,2005,24(11):1852-1856.

- [5] 王静波,赵立强,刘平礼,等.砂岩储层酸压液有效作用距离数学模型研究[J].天然气技术,2007,1(6):31-34.
- [6] 司学强,张金亮.博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩次生孔隙形成机制[J].地质科技情报,2008,27(1):59-63.
- [7] 黄洁,朱如凯,侯读杰,等.深部碎屑岩储层次生孔隙发育机理研究进展[J].地质科技情报,2007,26(6):76-82.
- [8] 李正坤,左重辉.湖南白垩系红色砾岩溶蚀风化特性研究:以株洲航电枢纽工程为例[J].水利水电科技进展,2001,21(增刊1):80.
- [9] 陈祥军,马凤山,王思敬,等.水布垭大坝左岸岩溶发育规律及渗透性分析[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(3):256-260.
- [10] 徐锋,江兆云,别传言.三峡右岸换流站泥质砂岩洞穴成因分析[J].土工基础,2006,20(6):44-46.
- [11] 刘明寿.高家坝水库坝基岩溶泄漏问题评价[J].水利水电科技进展,2001,21(增刊1):113.

Corrosion rules of calcareous sandy and gravelly rock at dam site of a hydropower station

WANG Jin-guo, ZHOU Zhi-fang, LU Gang

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The corrosion distribution rules of calcareous sandy and gravelly rock at the dam site of a hydropower station in the southeast of China were analyzed, and the laboratory tests on the corrosion of rock samples were done. The test results show that not only the agglutination of the sandy and gravelly rock is calcareous but also 30% ~ 50% of the gravel is calcareous, so the dissolubility of the rock is strong. The fresh rock surface is easily corroded, and the corrosion rate is fast. The test results agree well with the field investigation and the statistics of borehole rock cores, that is, the corrosion degree of the fresh rock surface is most severe, and the weathering degree from the fracture surface to the interior rock matrix gradually decreases.

Key words: groundwater; corrosion; dissoluble rock; hydropower station

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32-1521/C, ISSN1671-4970, 季刊, 自办发行)

《河海大学学报(哲学社会科学版)》以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和‘三个代表’重要思想为指导,认真贯彻落实科学发展观,坚持实事求是的思想路线,贯彻‘双百’方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

《河海大学学报(哲学社会科学版)》为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章。本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。《河海大学学报(哲学社会科学版)》为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊。

《河海大学学报(哲学社会科学版)》由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行人。2009年每本定价5元,每本邮费1元,全年订费24元。欢迎广大读者直接向编辑部订阅。

联系地址 210098 南京市西康路1号 《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部

电话/传真 025-83786376

E-mail: sxb@hhu.edu.cn