第29卷第4期

2021年8月

DOI:10.11921/j.issn.2095-8382.20210415

浅谈钻孔压水试验在水电工程中的应用

彭佩

(芜湖职业技术学院 芜湖市装配式工程技术研究中心,安徽 芜湖 241000)

摘 要: 岩体的完整性和渗透性对水电工程防渗排水系统的设计具有重要意义,而钻孔压水试验是通常用来测定裂隙岩体透水性的方法之一。考虑到裂隙岩体渗透特性的空间分布与其所在坝址区的地质条件、风化卸荷作用等密切相关,本文将以某水电站工程区裂隙岩体为研究对象,在已有地质勘察资料的基础上,采用压水试验和统计分析相结合的方法,进一步开展天然条件下无卸荷微新岩体和风化卸荷岩体渗透性特征研究,并评估钻孔压水试验在西南峡谷区水电工程中的重要应用。
 关键词:裂隙岩体;钻孔压水试验;渗透系数;风化卸荷作用
 中图分类号:TU443 文献标识码:A 文章编号:2095-8382(2021)04-089-05

Application of Water Pressure Test in Permeable Analysis for Hydropower Engineering

PENG Pei

(Wuhu Assembly Engineering Technology Research Center, Wuhu Institute of Technology, Wuhu 241000, China)

Abstract: The integrity and permeability of rock masses is vital to the design of seepage control system for hydropower projects, water pressure test in borehole is one of the method to assess the hydraulic properties of rock masse.Considering the permeability distribution of fractured rock masses is strongly related to the geological settings and stress release effect, this paper took the fractured rock masses of a hydropower station as the research object, combining the techniques of water pressure test with statistical analysis based on the hydrogeological analysis, in order to analysis the fractured rocks in stress release zone and the deeply seated rocks, and evaluate the significant application of data results for the hydropower projects in the Southwest valleys.

Key words: fractured rock masses; water pressure test in borehole; permeability coefficient; stress release effect

水电工程作为我国的基础性工程,一般多修建 于交通不便的高山地区。目前在金沙江、雅砻江等 西南峡谷流域已建设有多个大型水利水电工程,总 装机容量超过1亿kW。由于受到构造运动和特殊 地质环境的影响,这些流域的工程地质及水文地质 条件具有显著的区域特征。

在实际工程岩体中,裂隙岩体的渗透结构通 常是由基本渗透结构经过组合叠加而形成的复合 渗透结构类型^[1]。考虑到物质组成、构造发育特征 和赋存环境等都会使岩体的渗透特性变得错综复 杂,Louis^[2]早在1974年就根据实测的钻孔压水试 验数据证实了岩体的渗透系数与深度呈负指数关 系。蒋小伟^[3,4]等采用表征岩体渗透性的单位吸 水量 ω 为参数,依据西南某水电站的压水试验提 出了裂隙岩体渗透性分布的一种半经验公式。张 琦伟等^[5]采用指示克里格方法,以指示变异函数 为基本工具分析了向家坝水电站裂隙岩体渗透特 性的分布规律。彭佩等^[6]利用多个水电工程的地

基金项目: 芜湖职业技术学院校级自然科学研究项目(wzyzrzd202102)。

作者简介: 彭佩(**1991-**), 女, 硕士研究生, 主要从事渗流分析与控制方面的研究。 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

收稿日期: 2020-06-15

勘资料,揭示了西南峡谷区岸坡岩体透水性随岩 性、地应力条件等的变化规律,分析结果反映出裂 隙初始张开度对岩体的初始渗透系数影响较大,而 对衰减系数的影响较小。由此可见,钻孔压水试验 数据对于水电工程渗透稳定分析具有十分重要的 意义。

目前我国大部分已建或在建的水电工程都集 中分布在长江流域,在其建设过程中经常会碰到各 种卸荷较强、卸荷较弱或无卸荷的裂隙岩体。其中 位于金沙江某水电站工程区的地质构造环境就极 为复杂,在大范围内发育有深卸荷破碎裂隙带,此 时对渗透特性的准确评估将极大影响水电工程防 渗排水系统的设计。本文将通过系统分析该水电 站工程区裂隙岩体渗透性分布规律,研究并总结钻 孔压水试验在水电工程中的重要应用。

1 钻孔压水试验

我国水利水电工程中测定岩体的透水性主要 采用压水试验,这是根据压力和流量的关系来确定 岩体渗透参数的一种原位渗透试验^[7]。钻孔压水 试验是按照某一指定长度将钻孔分隔成若干钻孔 段,用不同的压力对各试验段进行压水并测定其相 应的流量 Q,由此得到岩体渗透性的表征参数—— 透水率 q 和渗透系数 k^[8]。利用压水试验得到的渗 透系数反映了一定范围内岩体的平均渗透特性,虽 然不能反映岩体的各向异性特征,但由于操作较为 简单,因而在水电工程中应用广泛。

透水率 q 通常采用最大压力阶段的压力值 (*P*_{max})和流量值(*Q*_{max}),因为该组数据最接近吕荣 值的定义压力,具体可由下式得到^[9]:

$$q = \frac{Q_{\max}}{LP_{\max}} \tag{1}$$

式中:q为试验段的透水率(Lu);L为试验段 长度(m);Q_{max}为最大压力时段压水流量(L/min); P_{max}为最大试验压力(MPa)。

将压水试验得到的透水率 q 按照以下公式即 可转换成相应压水段岩体渗透系数 k^[9]:

$$k = 0.00528Lu \lg\left(\frac{1.32L}{r}\right) \tag{2}$$

式中:*k* 为岩体渗透系数(m/d);Lu 为压水试 验的吕荣值(L/m·min);*L* 为压水试验段长度(m); C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publ r为钻孔半径(m)。

为了弥补单孔压水试验的不足,Louis^[1]在 1970年首次提出了三段压水试验,通过利用三个 方向上的试验值和现场统计资料来计算裂隙岩体 的渗透张量,反映出岩体渗透性的各向异性。此外, Hsieh和 Neuman^[10]于 1985年在三段压水试验基 础上提出了交叉孔压水试验。总体来说,现场压水 试验综合考虑了测试岩体现场实际地质条件,比其 他方法更能准确、快速地反映研究区裂隙岩体的渗 透特性,因此成为目前确定岩体渗透性较为有效的 方法。

2 某水电站工程区岩体渗透特征

2.1 工程概况

某水电站位于四川白玉县与西藏贡觉县境内 的金沙江干流上,山顶高程大于4000m,相对高差 大于1000m。左岸岸坡坡度一般45~55°,局部 为陡崖地貌,坡面呈浅沟与山脊相间分布。右岸岸 坡坡度一般40~45°,下游发育董俄措沟,为基本 对称的深切"V"型峡谷。地质勘探初步查明,两岸 岸坡弱卸荷水平深度下限左岸约50~75m、右岸约 45~105m,且在弱卸荷岩体以里的较深范围内发育 有深卸荷紧密岩带与松弛岩带。考虑到工程区水 文地质条件比较复杂,两岸深部卸荷带、断层都较 为发育,渗透稳定及渗漏问题较为突出,为此,需要 在已有地质勘察资料的基础上,进一步研究其工程 区水文地质条件和渗流场特征,分析断层及深部卸 荷带的渗透稳定性。

2.2 工程应用

为了深入分析钻孔压水试验在水电工程中的 具体应用,本文将某水电站左右两岸埋深 200 m 以 内的12个典型剖面的压水实验数据进行汇总分析。 实际钻孔压水试验 37 个钻孔共 1 387 段数据,但 考虑到各种外界环境影响,将试验数据中极大值和 不起压段去掉,实际有效用于后续统计分析的钻孔 段数共 839 段,分段统计结果如表 1 所示。

从图 1 压水试验数据分布对比柱状图中可以 看出,用于统计分析的有效压水段数同实际压水段 数分布规律基本相同。除了透水性在 3~10 Lu 的 压水段数有效值与试验值误差接近 5%,其他各段 误差都在 2% 以内,满足统计分析的精度要求。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 某水电站岸坡岩体钻孔压水试验数据统计表

统计值	总段数	≥ 100 Lu		10~100 Lu		3~10 Lu		1~3 Lu		<1 Lu	
		段数	百分比	段数	百分比	段数	百分比	段数	百分比	段数	百分比
有效值	839	11	1.29%	63	7.53%	319	38.00%	364	43.38%	82	9.80%
试验值	1387	12	0.80%	125	9.01%	480	34.64%	613	44.20%	157	11.35%



图 1 某水电站钻孔压水试验数据分布对比柱状图

为进一步定量分析该水电站左右两岸岩体渗透性分布规律,首先将典型剖面上各钻孔段的压水试验 Lu 值按式 2 换算成岩体渗透系数,然后每隔5 m 为一段进行统计,将孔深和渗透系数进行离散化,最后对左右两岸离散化后的渗透系数和对应的埋深进行拟合,得到渗透系数和埋深呈负指数型关系,拟合结果如表 2 所示。

该水电站工程区具有典型的高山峡谷地貌,利 用统计学原理对压水试验数据进行分析,两岸岩体 拟合得到的初始渗透系数和衰减系数均较大,最 终得到渗透系数随埋深的拟合曲线相关性均在 0.9 以上,基本可以满足分析需求。由表 2 中的拟合结 果得知,左右两岸岩体拟合得到的衰减系数基本相 近,分别为-0.019 4 和 -0.014 2,说明相同岩性的 岩体渗透系数衰减趋势基本相同,地层岩性对裂隙 岩体渗透系数衰减趋势基本相同,地层岩性对裂隙 岩体渗透系数衰减趋势基本相同,地层岩性对裂隙 岩体渗透系数分别为 0.432 2 m/d 和 0.225 9 m/d,相 差近 1 倍,考虑到左右两岸压水试验数据所涉及的 埋深范围不同,左右两岸岩体裂隙发育也不同,从 而导致相同岩性的岩体初始渗透系数不同,这也从 侧面反映出风化卸荷作用对岩体渗透性的影响。

岩体风化卸荷作用主要是沿裂隙和构造破碎

带进行,通过使岩体发生拉裂和松弛,来影响裂隙 岩体渗透通道的连通性和结构面的张开度,进而改 变裂隙岩体的渗透特性。风化卸荷作用的不同会 导致岩体渗透性分布产生差异,近坡面的岩体风化 程度高,卸荷裂隙也比较发育,所以坡面风化程度 高的岩体渗透性强于坡内风化程度相对低的岩体 渗透性,并且从坡面至坡内呈现出明显的分带特征。 考虑到该水电站左岸岩体渗透系数拟合结果相关 性较大,同时为进一步研究压水试验的工程应用 价值,现选取左岸钻孔分布较多、试验数据较为丰 富的3个典型剖面──横Ⅱ-Ⅱ、横Ⅲ'-Ⅲ'和横 Ⅳ-Ⅳ,将各剖面上各钻孔段所穿岩体的风化卸荷 信息进行整理,以弱卸荷下限为界分为无卸荷微新 岩体和风化卸荷岩体。在此基础上对所得数据进 行拟合分析,进而总结压水试验对风化卸荷程度不 同的岩体渗透性的表征意义。各剖面无卸荷微新 岩体(弱卸荷下限以下岩体)和风化卸荷岩体(弱 卸荷下限以上岩体) 拟合结果如图 2 所示。

上图中压水试验数据的拟合结果反映出该水 电站左岸岩体渗透性分布特征:首先,该水电站左 岸同一剖面不同埋深的岩体渗透系数明显不同,透 水性表现出随埋深增加而逐渐变小;其次,在不同 剖面相同埋深处的岩体具有不同的渗透性,说明钻 孔压水试验揭露出的裂隙发育程度不同,也从侧面 揭示了裂隙岩体渗透的非均质性。实际工程中要 注意非均质性对岩体渗透特性的控制作用,断裂构 造、软弱夹层和岩脉等等都是岸坡岩体非均质性的 表现。断层的渗透性取决于断层形成演变的力学 过程,譬如某些断层发育较深、层间结构较破碎,可 能会是良好的导水结构。如若断层两侧有构造形 成的破碎带,地下水可能沿着其走向流动,会成为

表 2 某水电站左右两岸岩体渗透系数与埋深的拟合结果

岸坡	岩性	埋深(m)	拟合曲线(m/d)	相关性
左岸	石英闪长岩	10~200	k=0.432 2 e ^{0.019 4 h}	95.9%
右岸	花岗闪长岩	20~160	k=0.225 9 e ^{0.014 2 h}	90.7%

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



潜在的渗漏通道,这同时也再次说明了压水试验对 水电工程的重要工程意义;最后,经过线性拟合后 所得到的左岸3个典型剖面岩体渗透系数 k 与埋 深 h 的定量关系如表3 所示:

表 3 某水电站左岸典型剖面岩体渗透系数与增	埋深的拟合结果
------------------------	---------

	横 II–II 剖面	横Ⅲ' – Ⅲ' 剖面	横Ⅳ – Ⅳ剖面
风化卸荷岩体	k=0.789 9 e ^{0.036 6 h}	$k=0.592.6 e^{0.052 h}$	$k=0.336 \ 2 \ e^{0.082 \ 6 \ h}$
无卸荷微新岩体	k=0.170 6 e ^{0.012 2 h}	k=0.345 2 e ^{0.022 6 h}	$k=0.116.9 e^{0.013.2 h}$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

横 II-II 剖面风化卸荷岩体的初始渗透系数 ko 分别为 0.789 9 m/d、衰减系数 α 为 0.036 6,无卸荷 微新岩体的初始渗透系数 ko 分别为 0.170 6 m/d、 衰减系数 α 为 0.012 2;横Ⅲ'-Ⅲ'剖面风化卸荷 岩体的初始渗透系数 ko 分别为 0.592 6 m/d、衰减 系数 α 为 0.052 0, 无卸荷微新岩体的初始渗透系 数 k₀分别为 0.345 2 m/d、衰减系数 α 为 0.022 6; 横Ⅳ – Ⅳ 剖面风化卸荷岩体的初始渗透系数 k_0 分 别为 0.336 2 m/d、衰减系数 α 为 0.082 6, 无卸荷 微新岩体的初始渗透系数 ka 分别为 0.116 9 m/d、 衰减系数 α 为 0.013 2。从总体上来看,以上 3 个 典型剖面不同风化卸荷程度岩体的统计结果表明, 无卸荷微新岩体拟合得到的初始渗透系数与衰减 系数均较小,反映其受风化卸荷作用较小、岩体比 较完整。而风化卸荷岩体的初始渗透系数和衰减 指数均大于同一剖面的微新岩体。此外,3个剖面 的拟合结果中关键参数的变化可以看到,无论是风 化卸荷岩体还是微新岩体,衰减指数和初始渗透系 数均各不相同,说明各剖面中岩体风化卸荷程度 有较大差异:(1)横 II-II 剖面风化卸荷岩体的渗 透系数初始值明显大于其他剖面,钻孔附近可能 断层分布较为密集、岩体较为破碎,结合断面裂隙 统计资料,发现钻孔附近确实存在两条透水性较 强的断层 F3、F4,属强~中等透水;并且,在高高程 2800~2930 m 和中高程 2745~2800 m 均存在强烈 松弛~中等松弛型的深部裂缝,断面内裂隙确实较 为发育,对附近岩体渗透性影响较大,导致最后拟 合得到的初始渗透系数偏大。(2)横Ⅳ-Ⅳ剖面 无卸荷微新岩体渗透系数初始值和衰减系数均小 于其他剖面,考虑到在左岸低高程2683~2736m 处仅存在轻微松弛的深部变形破裂,工程地质性状 较好、岩体较为完整,破裂面张开度多小于1 cm, 因此相比于横Ⅲ'和横Ⅲ剖面,横Ⅳ剖面的风化卸 荷岩体透水性较小。最后,从横 Ⅱ、横Ⅲ' 到横Ⅳ 剖 面风化卸荷岩体的衰减系数逐渐减小,表明左岸表 层岩体的渗透系数可能受到应力条件、地层岩性等 其他因素影响较大,导致其随深度变化也呈现出不 同的衰减速度。

和水文地质资料,在统计的基础上分析岩体的渗透 特性和渗透结构分布特征的影响因素,总结压水试 验在水电工程中的应用价值:

(1)根据统计学原理,经拟合得到左右两岸裂隙岩体的初始渗透系数分别为0.4322m/d和0.2259m/d,说明压水试验数据可以用于定量评估岩体渗透特性及其裂隙发育程度。

(2)裂隙岩体渗透系数随着埋深的增加呈负 指数衰减,左右岸岩体衰减系数分别为-0.0194和 -0.0142,说明相同岩性的岩体渗透系数衰减的趋 势基本相同。

(3) 压水试验揭示了风化卸荷作用对岩体渗透 性及其分布特征的影响:随岩体风化卸荷程度的增 加,裂隙的张开度相应增大,岩体渗透性增大的趋 势明显。其中,弱卸荷下限以上岩体的渗透性受风 化卸荷作用影响更大,其初始渗透系数 k₀ 和衰减 指数 α 均大于无卸荷微新岩体。

参考文献:

- 张飞,徐光黎,郭淋,等.裂隙岩体渗透结构类型分析
 [J]. 工程地质学报,2012,20(2):296-303.
- [2] Louis C.Determination of in situ hydraulic parameters in jointed rock[C].Proceedings of second Congress on Rock Mechanics, Belgrade, 1970, 1 (3):40–45.
- [3] 蒋小伟,万力,宋刚,等.玄武岩体及其层间错动带的 渗透性特征 [J]. 工程勘察,2008,36(10):25-29,75.
- [4] 万力,蒋小伟,王旭升.含水层的一种普遍规律:渗透 系数随深度衰减[J].高校地质学报,2010,16(1):7-12.
- [5] 张琦伟,宋刚,万力,等.裂隙岩体渗透性空间分布的指示克里格估值[J].地球物理学进展,2005,20(1):246-251.
- [6] 彭佩.峡谷区岸坡岩体渗透性分布规律浅析[J].陕西 水利,2019(3):127-131.
- [7] 倪绍虎,何世海,汪小刚,等.裂隙岩体水力学特性研 究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):488-498.
- [8] 中华人民共和国建设部.水力发电工程地质勘察规范:GB 50287—2006[S].北京:中国计划出版社, 2006.
- [9] 中华人民共和国水利部.水利水电工程钻孔压水试 验规程:SL 31—2003[S].北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [10] Hsieh P A, Neuman S P.Field determination of the threedimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media: 1.theory[J].Water Resources Research, 1985, 21 (11):1655-1665.

3 结论