

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202105024

王俊智, 李清波, 王贵军, 等. 近水平层状坝基岩体渗透结构及其工程意义 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 12-19.

WANG Junzhi, LI Qingbo, WANG Guijun, *et al.* Permeability structure of the horizontally-stratified dam foundation rock mass and its engineering significance[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 12-19.

近水平层状坝基岩体渗透结构及其工程意义

王俊智^{1,2}, 李清波^{1,2}, 王贵军^{1,2}, 张 一^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;

2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

摘要: 查明坝基岩体的渗透结构对于大坝工程防渗方案的制定具有重要意义。以黄河古贤水利枢纽工程近水平分布的红层坝基岩体为研究对象, 使用“连续、高分辨率”压水试验数据处理与统计方法, 分析了岩体透水率与高程、岩性及顺层剪切带的关系, 阐明了坝基岩体的渗透结构, 提出了工程防渗建议。研究发现, 坝基岩体渗透结构表现出结构性和随机性双重特征。结构性表现为岩体透水率随高程的降低而减小; 随机性表现为岩体透水率会因岩性和剪切构造等随机变化。对于河床及滩地坝基岩体, 风化卸荷带底高程在 450 m 附近, 1 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 340 m 附近。对于岸坡坝基岩体, 3 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 560 ~ 580 m。在坝基勘察深度范围内, 350 ~ 360 m 高程段连续分布具有一定厚度的软岩类岩体, 剪切构造不发育且岩体透水微弱, 可视为相对隔水层, 对坝基防渗帷幕优化设计具有指示意义。文章提出的统计、分析方法具有一定普适性, 可为类似工程所借鉴。

关键词: 岩体透水率; 岩性; 顺层剪切带; 渗控设计; 黄河古贤水利枢纽

中图分类号: P641.2; TV698

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0012-08

Permeability structure of the horizontally-stratified dam foundation rock mass and its engineering significance

WANG Junzhi^{1,2}, LI Qingbo^{1,2}, WANG Guijun^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}

(1. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd. (YREC), Zhengzhou, Henan 450003, China;

2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin,
Ministry of Water Resources (under construction), Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Identifying the permeability structure of the dam foundation rock mass is important for the formulation of seepage control schemes. For the horizontally-stratified red-bed rock mass of the Yellow River Guxian Dam foundation, this paper adopted a "continuous, high-resolution" water pressure test data processing method to analyze the relationships between rock mass permeability and elevation, lithology and shear zones, clarify the permeability structure of the dam foundation rock mass, and propose seepage control advice. The results indicate that the Guxian Dam foundation rock mass is characterized by a structural and random permeability behavior. The structure shows that the permeability decreases with elevation. The randomness shows that the permeability

收稿日期: 2021-05-06; 修订日期: 2021-07-10

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902245); 国家重点研发计划项目(2018YFC1508703); 河南省重点研发与推广专项科技攻关项目(212102311150); 黄河勘测规划设计研究院有限公司自主研发项目

第一作者: 王俊智(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水文地质研究。E-mail: wang_jzh@yrec.cn

通讯作者: 李清波(1964-), 男, 本科, 正高级工程师, 主要从事工程地质及水文地质研究。E-mail: liqb_yrec@163.com

randomly fluctuates due to lithology and shear zones. For the river-bed dam foundation rock mass, the bottom elevation of the weathering and unloading zone is 450 m or so, and the 1Lu bottom boundary is at the elevation of approximately 340 m. For the rock mass of the dam abutment, the 3Lu bottom boundary is located at the elevation of 560 ~ 580 m. The section of 350 ~ 360 m elevation has a certain thickness of soft rock, a poor development of shear structure, and a low permeability. It can be regarded as a confining layer and a potential target for the optimization of seepage control schemes. In view of the universal applicability, the method proposed in this paper can be used for reference in similar projects.

Keywords: rock mass permeability; lithology; shear zone; seepage control scheme; the Yellow River Guxian Dam

岩体渗透结构是指不同渗透性的岩体在空间中的组合方式,即岩体渗透性的空间分布规律^[1-2]。开展岩体渗透结构研究,有助于从宏观上把握岩体的渗透特征,对水文地质、工程渗流、石油工程、核废料处置等领域具有重要的应用价值^[3-7]。

岩体的渗透结构主要受控于结构面的发育程度。风化卸荷、岩性、断裂构造等是影响结构面发育程度的主要因素^[1-2]。风化卸荷通常会引起表层岩体结构面发育,导致岩体渗透性的增加。结构面的发育程度在不同岩性的地质背景下可能有很大的差异。例如,砂泥岩互层型红层地层中,在相同的构造应力作用下,因岩体自身物理力学性质的不同,以砂岩为代表的硬岩更容易发生破裂变形,以粉砂岩、泥岩等为代表的软岩多产生塑性变形。此外,受构造作用的影响,断层或剪切构造带附近的岩体破碎、结构面发育且张开,容易形成强渗透通道。如何通过恰当的方法评价上述因素对岩体渗透性空间分布规律的影响,是从宏观上把握岩体渗透结构的关键。

岩体透水率是水利水电工程中评价水库渗漏、水工建筑物及坝基渗透稳定、地下洞室突涌水等的关键水文地质参数^[8-11]。钻孔压水试验是获取岩体透水率最基本、最普遍的方法。根据工程勘察需要,大型水利水电工程的坝址区通常需布置成百甚至上千段试验,大量的压水试验数据为研究岩体渗透结构特征提供了便利。我国现行规范建议的压水试验试段长度多为 5 m,分辨率较粗^[12]。对于垂向岩性变化剧烈、顺层剪切带发育厚度较薄的红层地区,如何根据粗分辨率的压水试验数据精确评价坝基岩体及剪切带的渗透结构特征,是值得探讨的技术问题。

本文以黄河古贤水利枢纽工程为例,针对近水平分布的坝基岩体,使用了一种“连续、高分辨率”的压水试验数据处理与统计方法,评价了岩体透水率与埋

深(或高程)、岩性及剪切带的关系,阐明了坝基岩体的渗透结构,提出了工程防渗建议。

1 研究区概况

黄河古贤水利枢纽工程位于黄河中游,壶口瀑布上游约 10 km 处。作为黄河干流的七大控制性骨干工程之一,黄河古贤水利枢纽工程控制了黄河 80% 的水量、66% 的泥沙和 80% 的粗泥沙,可与小浪底水利枢纽工程联合调水调沙、协调黄河水沙关系,在黄河治理开发和水沙调控体系方面具有极为重要的战略意义^[13-14]。根据黄河治理开发的总体要求,考虑工程在黄河水沙调控体系中的战略地位和重要作用,确定工程的开发任务为:以防洪减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电等综合利用。现阶段推荐坝型为碾压混凝土重力坝,正常蓄水位为 627 m,最大坝高为 215 m,相应总库容约为 $126 \times 10^8 \text{ m}^3$,电站装机 2 100 MW^[15]。

黄河古贤水利枢纽工程坝基岩体为三叠系中统二马营组上段(T_2er_2)和铜川组下段(T_2t_1)砂泥岩互层岩体,岩性为暗紫红色钙泥质、泥质粉砂岩夹青灰色、灰白色长石砂岩、细砂岩及少量粉砂质黏土岩^[16-17](图 1)。坝基地层产状近水平、单层厚度较薄、垂向岩性变化剧烈,且高倾角节理裂隙、表层风化卸荷带和顺层剪切带发育,可能存在较为严重的坝基及绕坝渗漏问题^[18]。查明近水平层状坝基岩体的渗透结构特征对渗控方案的制定具有重要的工程意义。

2 数据与方法

2.1 压水试验数据

黄河古贤水利枢纽工程坝基岩体的渗透结构分析是基于 46 个河床及滩地钻孔和 65 个岸坡钻孔,共计 2 700 多段常规垂直孔压水试验(图 2)。111 个钻孔中,28 个钻孔为 2017 年可行性研究阶段所布置的勘

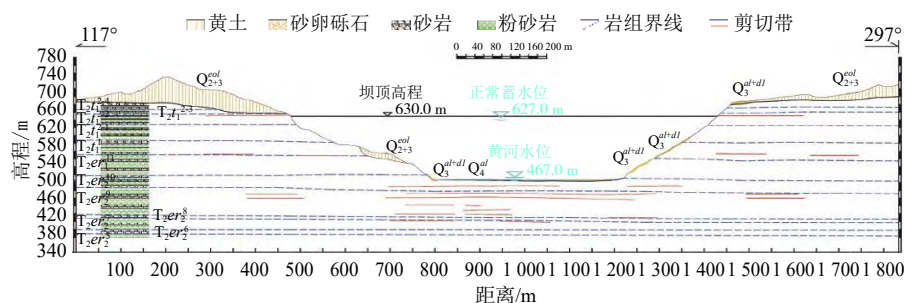


图 1 黄河古贤水利枢纽工程重力坝坝轴线地质剖面示意图

Fig. 1 Geologic profile along the Yellow River Guxian gravity dam axis

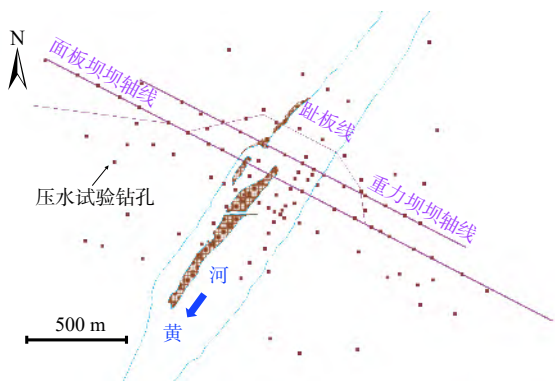


图 2 坝址区压水试验钻孔分布位置示意图

Fig. 2 Spatial distribution of borehole water pressure tests at the dam site

探钻孔,使用黄河勘测规划设计研究院有限公司自主研发的“新型钻孔压水试验仪”进行测试^[19];其余钻孔为前期勘察阶段所布置,使用水利水电规范推荐的传统方法进行测试。

2.2 透水率的对数正态分布

含水介质的渗透参数多呈对数正态分布^[20-21]。通常,验证一组数据是否符合对数正态分布需使用统计学的经典方法进行假设检验。但是,由于含水介质的渗透参数具有空间相关性,并非相互独立,不满足假设检验的基本要求。在实际应用时,可以采用概率图法进行验证。将累积概率分布图的纵坐标用对数坐标表示就是概率图^[22-23]。如果横坐标使用对数表示后呈直线分布,则可判定该组数据符合对数正态分布。

据此,绘制了黄河古贤水利枢纽工程坝址区坝基岩体透水率的概率图(图 3)。从图中可以看出,横坐标采用对数坐标后,绝大部分数据都分布在一条直线上,可以判定坝址区岩体的透水率呈对数正态分布。所以,在统计计算时,应该采用对数平均值。

2.3 数据处理与统计

黄河古贤水利枢纽工程坝址区发育一套三叠系

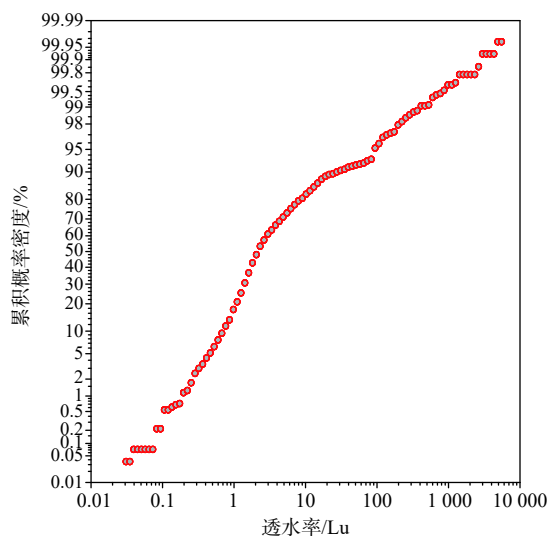


图 3 坝址区坝基岩体透水率概率图

Fig. 3 Probability plot of the Lugeon values at the dam site

陆相碎屑沉积岩,河床及两岸坝基岩体产状近水平,在水平构造应力的作用下形成多层顺层剪切带(图 1)。理论上讲,可以对同一高程的压水试验数据进行统计与分析。

图 4 和图 5 为河床及岸坡坝基岩体压水试验数据与对应高程的散点图。从该图可以看出,坝址区岩体渗透性的随机特征十分明显,同一高程段的岩体透水率可相差 3~5 个数量级(0.01~1 000 Lu),难以从中发现渗透结构的规律性特征。

基于前述理论基础,借鉴前人相关方法^[11, 24-25],本文采用了一种适用于近水平层状坝基岩体的“连续、高分辨率”压水试验数据处理与统计方法。具体步骤为:假设每一压水试验段内的岩体透水率处处相同,将 5 m 低分辨率的压水试验段离散为 1 m 高分辨率的压水试验“点”,然后计算不同高程处岩体透水率的对数平均值,即分别对每一高程处的透水率的对数值取算术加权平均值,最后绘制岩体透水率随高程的

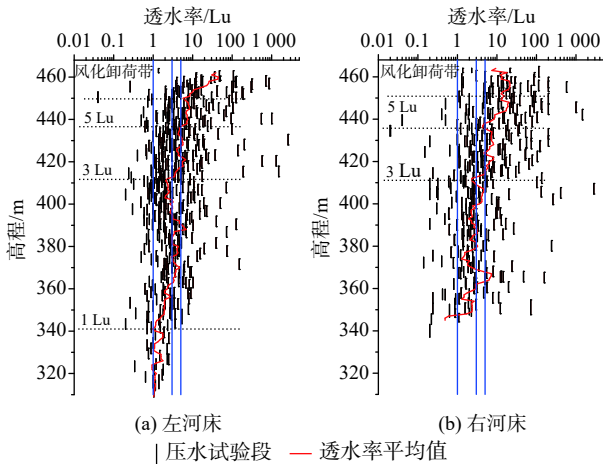


图 4 河床及滩地岩体透水率平均值随高程变化
Fig. 4 Variation of the average Lugeon values with elevation at the riverbed

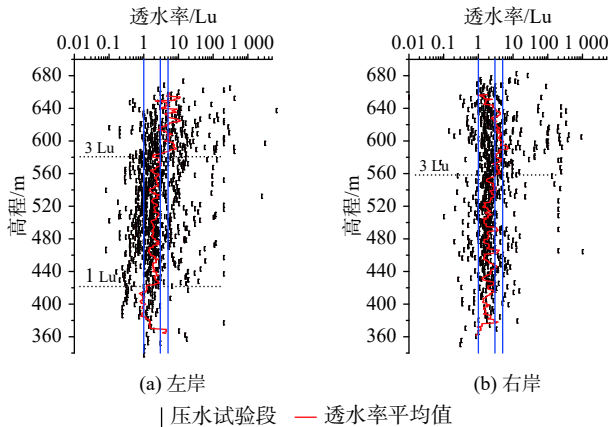


图 5 岸坡岩体透水率平均值随高程变化
Fig. 5 Variation of the average Lugeon values with elevation at the dam abutments

变化曲线,分析曲线的结构性变化和随机性变化,进而提出工程防渗建议。

3 结果与讨论

3.1 渗控设计关键透水率指标界线

3.1.1 河床坝基

图 4 给出了河床及滩地钻孔压水试验平均值随高程的变化情况。受风化卸荷作用影响,钻孔压水试验结果在岩体表层附近较大,并会随着深度的增加而减小。岩体透水率曲线显示,随着高程降低,河床及滩地岩体透水率从岩体表层 20~50 Lu 逐渐减小至 5~10 Lu,然后在 450 m 高程附近保持稳定或稍有增加。因此,初步判断,风化卸荷带的底高程在 450 m 附近。基于钻孔岩芯、物探波速等的工程地质勘察成果亦显

示,河床坝基风化卸荷带的底界高程在 449~456 m,平均值为 452 m^[15]。两者的判别结果基本一致。

图 4 中的 3 条蓝色直线分别表示工程渗控设计中重点关注的 1, 3, 5 Lu 关键透水率指标界线。图 4 显示,河床及滩地坝基岩体平均透水率曲线在 436 m 高程附近与 5 Lu 关键透水率指标界线相交,在 410 m 高程附近与 3 Lu 关键透水率指标界线相交,在 340 m 高程附近与 1 Lu 关键透水率指标界线相交。因此,从统计意义上看,工程渗控设计重点关注的 5 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 436 m 附近,3 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 410 m 附近,1 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 340 m 附近。需要说明的是,右河床钻孔勘探深度有限,最大揭露深度在 350 m 高程,没有揭露稳定的 1 Lu 关键透水率指标界线,推测其可能与左河床 1 Lu 关键透水率指标界线的底高程接近。

3.1.2 岸坡坝基

受风化卸荷作用影响,钻孔压水试验数据一般在岩体表层附近较大。鉴于岸坡钻孔孔口高程存在较大差异,在对岸坡钻孔压水试验数据进行处理和统计分析时,首先要把每个钻孔中受到风化卸荷作用影响的试段剔除。工程地质勘察成果表明,左、右岸坡风化卸荷带的深度通常在基岩面以下 25 m。

图 5 为左、右岸岸坡钻孔压水试验平均值随高程的垂向变化情况。由于左、右岸坡相对不同的地形、地貌和地质条件,变化曲线规律存在稍许不同。根据统计结果,工程渗控设计重点关注的 3 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于左岸坡 580 m 附近,1 Lu 关键透水率指标界线的底高程在 420 m 附近;3 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于右岸坡 560 m 附近,在勘察深度范围内(钻孔揭露深度达到 370 m 高程),没有显示稳定的 1 Lu 关键透水率指标界线。

前期工程地质勘察成果^[15]及文献[26]指出,坝址区三叠系坝基岩体的地层产状约为 307°∠0.5°。因此,地层层面在左岸稍高、右岸稍低。坝轴线方向上,两岸钻孔最远相距约 1.5~2.5 km,经三角函数估算,两岸同一地层的最大高差可达 13~22 m。这与左、右岸岸坡 3 Lu 关键透水率指标界线的高程差值较为一致。

至于为何右岸岸坡 400 m 高程附近没有显示稳定的 1 Lu 关键透水率指标界线,这可能与钻孔压水试验数据的不确定性、岩体渗透参数的非均质性有关,也

可能是受到了坝址区三叠系地层岩性强烈变化的影响。坝址区同一岩组内岩性变化显著,砂岩、粉砂岩的空间分布和相对含量可能存在较大差异^[15, 26],导致右岸岸坡岩体钻孔压水试验的平均值接近但稍大于 1 Lu。

3.2 剪切带与岩性对透水率的影响

岩体透水率随高程的变化曲线表现出了结构性和随机性双重特征(图 4、图 5)。结构性表现为岩体透水率随高程的降低逐渐减小。这是因为渗流主要发生在结构面中,结构面的张开度随着自重应力的增加而减小。因自重应力和埋深存在线性关系,从而引起岩体透水性随着深度的增加而减小^[25]。随机性表现为岩体透水率随高程会因岩性分布和剪切构造带等随机出现变化。鉴于在基岩表面,风化卸荷作用对渗透性能的影响程度大于岩性与构造等因素,这里仅对微新岩体进行讨论。

需要说明的是,鉴于坝址区三叠系坝基岩体地层产状近水平($307^{\circ} \angle 0.5^{\circ}$),且河床宽度较窄(最宽处约为 400 m),河床两侧同一地层的最大高差约为 3.5 m,平均高差约为 1.7 m,小于钻孔压水试验 5 m 试段长度的要求。因此,对于河床坝基岩体,基本可以忽略地层产状所引起的曲线差异。

3.2.1 剪切带对透水率的影响

工程地质勘察成果显示,黄河古贤水利枢纽工程坝址区分布有 12 层不同规模和性状的顺层剪切带(图 1)。其中,两岸坝基部位 2 层(JQD01 和 JQD02),河床坝基部位 10 层(JQD03 ~ JQD12)。在河床坝基部位的剪切带中,JQD11 和 JQD12 因埋深较大,揭露的钻孔数量有限,统计意义不强。JQD03 和 JQD04 因埋深较浅,风化卸荷作用对其影响程度大于岩性与剪切构造等因素。因此,仅对 JQD05 ~ JQD10 共计 6 个典型层位的剪切带予以分析(图 6)。

将钻孔资料揭示的剪切带分布高程与图 4 所示的岩体透水率变化曲线进行叠加,绘制于同一纵坐标,以评价剪切带对岩体渗透性空间分布规律的影响(图 6)。结果显示,对于绝大部分剪切带(JQD05、JQD06、JQD08、JQD09、JQD10),岩体透水率曲线在剪切带分布高程附近向大值侧(右侧)均发生了一定程度的凸起,表明剪切构造作用引起了邻近岩体结构面的发育与张开,形成了相对强渗透通道。但是,对于 JQD07,这种现象不存在或不明显,岩体透水率曲线表现为向小值侧(左侧)凹陷。这应该与 JQD07 的

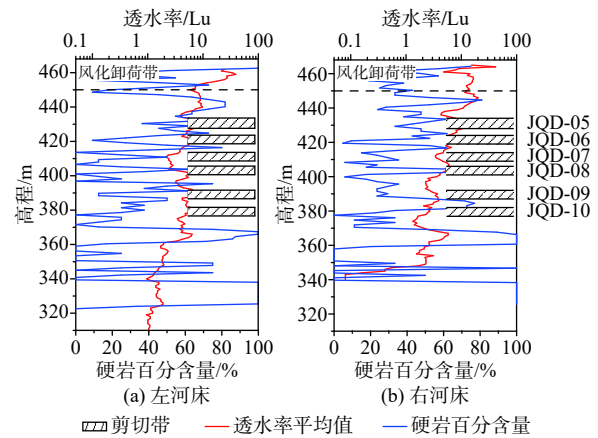


图 6 河床及滩地岩体透水率与岩性、剪切带关系

Fig. 6 Relationship of the Lugeon values with lithology and shear zones at the riverbed

具体发育情况有关。工程勘察资料表明,JQD07 仅在河床坝基左侧下游区域内局部发育,整体连续性很差^[15, 26],因而其对岩体透水率的影响不明显。

3.2.2 岩性对透水率的影响

受沉积环境影响,黄河古贤水利枢纽工程坝址区地层岩性的相变特征显著,导致呈互层状沉积的不同岩性(主要是砂岩、粉砂岩和黏土岩)的比例发生随机性变化,岩体的渗透结构特性也随之发生变化。

为此,文献[26]以河床及滩地处钻孔岩芯编录数据为基础,绘制了硬岩百分含量随高程变化的曲线,定量评价了河床坝基岩体的相变程度。需要说明的是,文献中所指的硬岩主要指青灰色、灰白色长石砂岩、细砂岩;紫红色泥质粉砂岩、钙质粉砂岩及黏土岩被归类为软岩。本文将文献[26]绘制的硬岩百分含量随高程变化曲线与图 4 所示的岩体透水率随高程变化曲线进行叠加,绘制于同一纵坐标下(图 6),评价岩性对岩体渗透性空间分布规律的影响。

整体上看,岩体透水率曲线与硬岩百分含量曲线的变化规律较为一致,表明硬岩百分含量与岩体透水率之间呈正相关关系。例如,左河床部位,在高程 440, 365, 330 m 岩体透水率曲线与硬岩百分含量曲线共同表现为向大值侧(右侧)凸起;在高程 435 m 表现为向小值侧(左侧)凹陷。右河床部位,在高程 445, 405, 365 m 岩体透水率曲线与硬岩百分含量曲线共同表现为向大值侧(右侧)凸起;在高程 435, 405 m 共同表现为向小值侧(左侧)凹陷。在剪切带分布高程范围内,虽然剪切带多由软岩组成,但剪切作用导致其附近岩体透水性增大,因而岩体透水率曲线与

硬岩百分含量曲线的变化规律相反, 呈现出负相关关系。

3.3 防渗帷幕设计优化思路

本质上讲, 黄河古贤水利枢纽工程近水平层状坝基岩体为一典型层状渗透结构, 主要由透水层与相对隔水层互层构成^[1-2]。在坝基勘察深度范围内若连续分布有具有一定厚度且剪切构造不发育的软岩类微透水岩体, 可构成相对隔水层, 对坝基防渗帷幕优化设计意义重大。

岩体透水率与岩性、剪切带关系图(图 6)显示: 左河床部位, 在 405 ~ 410 m、350 ~ 360 m 等高程段, 岩体透水率小于 3 Lu, 剪切带基本不发育, 岩性为软岩或硬岩百分含量小于 1/3; 右河床部位, 在 391 ~ 399.5 m、369 ~ 377.5 m、350 ~ 360 m 等高程段, 岩体透水率小于 3 Lu, 剪切带基本不发育且岩性为软岩或硬岩百分含量小于 1/3。因此, 这些高程段理论上具有一定的隔水能力, 可视为相对隔水层。

上述高程段中, 350 ~ 360 m 高程段无论从相对隔水层厚度及分布连续性、软岩百分含量、剪切带发育程度还是从岩体透水率上看, 均优于其它高程段, 可作为大坝防渗帷幕优化设计的潜在目标层位, 予以进一步研究论证。

4 结论

本文采用了一套适于近水平层状红层坝基岩体的“连续、高分辨率”压水试验数据处理与统计新方法, 在黄河古贤水利枢纽工程中进行了应用, 得到以下结论:

(1) 坝基岩体渗透结构表现出结构性和随机性的双重特征。结构性表现为透水率随高程呈负指数减小。随机性表现为透水率随高程会因岩性分布和构造特征随机变化。岩体透水率曲线在剪切带分布高程附近向大值侧(右侧)凸起, 表明剪切构造作用可引起邻近岩体结构面的发育与张开, 形成强渗透通道。岩体透水率曲线与硬岩百分含量曲线的变化规律较为一致, 表明了硬岩百分含量与透水率之间的正相关关系。

(2) 河床及滩地坝基岩体风化卸荷带的底高程约在 450 m 高程附近, 5 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 436 m 附近, 3 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 410 m 附近, 1 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 340 m 附近。

(3) 左岸坡坝基岩体的 3 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 580 m 附近, 1 Lu 关键透水率指标界线的底高程在 420 m 附近。右岸坡坝基岩体的 3 Lu 关键透水率指标界线的底高程位于 560 m 附近, 在勘察深度范围内, 没有显示稳定的 1 Lu 关键透水率指标界线。

(4) 在坝基勘察深度范围内, 350 ~ 360 m 高程段分布有具有一定厚度且剪切构造不发育的软岩类微透水岩体, 可视为相对隔水层, 对坝基防渗帷幕优化设计具有指示意义, 可进一步予以研究论证。

参考文献 (References) :

- [1] 李清波, 闫长斌. 岩体渗透结构类型的划分及其渗透特性研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 503 - 507. [LI Qingbo, YAN Changbin. Classification of permeability structure types of rock mass and its permeability characteristics[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 503 - 507. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 万力, 李清波, 王文贵. 砂泥岩互层裂隙地层的渗透性特征[J]. 水利学报, 1993, 24(9): 82 - 88. [WAN Li, LI Qingbo, WANG Wengui. Permeability characteristics of interbedded fractured strata of sand and mudstone[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 24(9): 82 - 88. (in Chinese)]
- [3] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. [ZHANG Youtian. Rock hydraulics and engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese)]
- [4] 周志芳, 王锦国. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. [ZHOU Zhifang, WANG Jinguo. Fracture medium hydrodynamics [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2004. (in Chinese)]
- [5] BEAR J, DE MARSILY G, TSANG C F. Preface[C]//Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. Amsterdam: Elsevier, 1993.
- [6] 田开铭, 万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价[M]. 北京: 学苑出版社, 1989. [TIAN Kaiming, WAN Li. Research and evaluation of permeability in anisotropic fractured media [M]. Beijing: Xueyuan Press, 1989. (in Chinese)]
- [7] 刘瑞新, 曹丁涛, 胡东祥. 基于原位实测的下组煤底板岩层阻渗性研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 105 - 110. [LIU Ruixin, CAO Dingtao, HU Dongxiang. A study of the impermeability of the lower

- coal seam floor rocks at the Yanzhou coalfield based on in situ test[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(1): 105 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 水利电力部水利水电规划设计院. 水利水电工程地质手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985. [*Water Resources and Hydropower Planning and Design Institute. Geological manual of water conservancy and hydropower engineering* [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985. (in Chinese)]
- [9] 王新峰, 梁杏, 孙蓉琳, 等. 一种层状岩体压水试验成果计算分析渗透性的新方法[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(1): 46 – 52. [WANG Xinfeng, LIANG Xing, SUN Ronglin, et al. A new method of hydraulic conductivity calculating and analysis by water pressure test in layered rock[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(1): 46 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张必昌, 胡成, 陈刚, 等. 利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 62 – 69. [ZHANG Bichang, HU Cheng, CHEN Gang, et al. Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 62 – 69. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 蒋小伟, 万力, 胡晓农. 砂泥岩裂隙岩体埋深和岩性对渗透性影响分析[J]. *水科学进展*, 2008, 19(4): 574 – 580. [JIANG Xiaowei, WAN LI, HU Xiaonong. Variation of permeability with depth and lithology in a formation of fractured sandstone-mudstone media[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(4): 574 – 580. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of water pressure test in borehole for water resources and hydropower engineering: SL 31—2003[S]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese)]
- [13] 陈小江. 全面实施黄河流域综合规划谋求黄河长治久安和流域可持续发展[J]. *人民黄河*, 2013, 35(10): 1 – 4. [CHEN Xiaojiang. Full scale implement of master planning of Yellow River Basin promoting long-term stability and sustainable development of Yellow River[J]. *Yellow River*, 2013, 35(10): 1 – 4. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 胡春宏, 陈建国, 陈绪坚. 论古贤水库在黄河治理中的作用[J]. *中国水利*, 2010(18): 1 – 5. [HU Chunhong, CHEN Jianguo, CHEN Xujian. Discussion on the role of Guxian reservoir in the improvement of Yellow River[J]. *China Water Resources*, 2010(18): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 黄河勘测规划设计研究院有限公司. 黄河古贤水利枢纽工程可行性研究报告[R]. 郑州: 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 2018. [Yellow River Engineering Consulting Co Ltd. Feasibility study report of Yellow River Guxian Water Conservancy Project [R]. Zhengzhou: Yellow River Engineering Consulting Co Ltd, 2018. (in Chinese)]
- [16] 闫长斌, 吴伟功, 王贵军. 含层间剪切带的层状复合岩体质量分级[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增刊 1): 3449 – 3457. [YAN Changbin, WU Weigong, WANG Guijun. Quality classification of stratified composite rock mass with interlayer shear zones[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Sup1): 3449 – 3457. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈艳国, 李斌, 吴伟功. 基于CATIA的古贤水利枢纽三维地质建模[J]. *人民黄河*, 2011, 33(5): 138 – 139. [CHEN Yanguo, LI Bin, WU Weigong. Three-dimensional geological modeling of Guxian Water Conservancy Project based on CATIA[J]. *Yellow River*, 2011, 33(5): 138 – 139. (in Chinese)]
- [18] 白正雄, 李斌, 宋志宇. 古贤水利枢纽工程重力坝典型坝段地基渗流分析[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(1): 85 – 87. [BAI Zhengxiong, LI Bin, SONG Zhiyu. Seepage analysis of base in typical gravity dam of Guxian water conservancy project[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(1): 85 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张成志, 尹丹, 郭明. 钻孔压水试验测试仪及其在古贤水利枢纽工程中的试验应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2010, 37(12): 32 – 35. [ZHANG Chengzhi, YIN Dan, GUO Ming. Experimental application of borehole water pressure test instrument in Guxian hydro-junction project[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2010, 37(12): 32 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [20] FETTER C W. *Applied hydrogeology*[M]. New Jersey: Prentice Hall New Jersey, 2001.

- [21] 杨金忠,蔡树英,黄冠华,等.多孔介质中水分及溶质运移的随机理论[M].北京:科学出版社,2000. [YANG Jinzhong, CAI Shuying, HUANG Guanhua, et al. Stochastic theory of water and solute transport in porous media [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)]
- [22] DEUTSCH C V. Geostatistical reservoir modeling [M]. New York: Oxford University Press, 2002.
- [23] 蒋小伟,万力,梁四海,等.基于去丛聚效应的裂隙岩体渗透性分析[J].工程勘察,2007,35(3):21-26. [JIANG Xiaowei, WAN Li, LIANG Sihai, et al. Analysis on spatial structure of permeability in fractured media based on declustering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007, 35(3): 21 - 26. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 蒋小伟,万力,胡晓农.基于压水试验数据的砂泥岩裂隙岩体渗透结构分析[J].自然科学进展,2008,18(3):355-369. [JIANG Xiaowei, WAN Li, HU Xiaonong. Analysis the permeability structure based on the sandstone and mudstone fractured rock of the water pressure test[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(3): 355 - 369. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 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. [WAN Li, JIANG Xiaowei, WANG Xusheng. A common regularity of aquifers: the decay in hydraulic conductivity with depth[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(1): 7 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [26] LI Q B, WANG J Z, WANG G J, et al. Evaluation of lithology variations in layered red beds with depth: an example of the Yellow River Guxian Dam, NW China[J]. Lithosphere, 2021,DOI:10.2113/2021/7866225.

编辑:张若琳