

DOI: 10.11779/CJGE20220194

芝瑞抽水蓄能电站沥青混凝土心墙砂砾石坝坝体 反滤设计及渗流安全评价

李 伟¹, 韩华强^{*2}, 吴吉才¹, 沈 婷², 蒋达超¹

(1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 根据抽水蓄能电站运行期水位变化频繁、水位变幅大的运行工况, 针对天然砂砾石料抗渗透破坏和冲蚀能力差的缺点, 结合国内在建抽水蓄能电站中首座采用砂砾石料筑坝并直接填筑在河床覆盖层上的沥青混凝土心墙坝, 基于当前反滤准则仅重视级配关系而忽略相对密度对砂砾石料渗透性影响的缺点, 提出了修正的砂砾石料反滤准则, 并通过心墙砂砾石坝坝体的反滤设计、各区坝料的渗流试验及坝体的渗流安全分析进行了验证。结果表明: 除级配特征外, 反滤设计中相对密度变化对反滤保护能力的影响也至关重要, 由于天然砂砾石料渗透性能差, 在库水位快速下降过程中, 短时间内砂砾石坝体内孔隙水无法排出, 坝内浸润面跌落速度远低于库水位下降速度, 存在明显的滞后现象, 且随水位变化, 坝体内部存在渗透坡降大于允许坡降的现象, 通过修正反滤准则进行的坝体各分区间的反滤保护设计, 可有效应对抽水蓄能电站运行过程中库水位变化频繁、水位变幅大带来的心墙坝大坝迎水侧砂砾石料的渗透稳定问题, 结合优良的力学特性及储量丰富便于施工的特点, 砂砾石料也是构筑抽水蓄能电站当地材料坝的良好天然材料。

关键词: 抽水蓄能电站; 心墙坝; 砂砾石料; 渗流; 反滤

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)02-0369-07

作者简介: 李 伟(1987—), 男, 山东滕州人, 高级工程师, 主要从事抽水蓄能电站坝工方面的研究工作。E-mail: liwei3@bjy.powerchina.cn。

Dam filter design and seepage safety evaluation of asphalt concrete core wall gravel dam of Zhirui Pumped Storage Power Station

LI Wei¹, HAN Huaqiang², WU Jicai¹, SHEN Ting², JIANG Kuichao¹

(1. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing

Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: According to the operating conditions of frequent water level changes and large water level fluctuations during the operation period of pumped storage power stations, aiming at the shortcomings of poor anti-permeability and erosion capability of natural gravel materials, the first asphalt concrete core wall dam of a pumped storage power station under construction in China, which uses gravel materials to build dams and fills directly on the riverbed cover, is taken as an example. Based on the shortcomings of the current filter criterion that only pays attention to the gradation relationship and ignores the influences of the relative density on the permeability of gravel materials, a modified filter criterion of gravel materials is proposed, and it is verified through the filter design of the core wall gravel dam body, the seepage test of dam materials in each area and the seepage safety analysis of the dam body. The results show that in addition to the gradation characteristics, the change of the relative density in the filter design is also crucial to the filter protection capability. Due to the poor permeability of natural sand and gravel materials, in the process of rapid decline of reservoir water level, the pore water in the sand and gravel dam cannot be discharged in a short period of time. The falling speed of the infiltration surface in the dam is far lower than that of the reservoir water level, and there is a significant lag phenomenon. With the change of water level, there is a phenomenon that the seepage gradient in the dam is greater than the allowable gradient. The filter protection design of each sub-interval of the dam is carried out by modifying the filter criterion. It can effectively deal with the seepage stability problem of gravel materials at the waterward side of the core dam caused by the frequent change of reservoir water level and the large fluctuation of water level during the operation of pumped storage power stations.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404804)

收稿日期: 2022-02-23

*通信作者 (E-mail: hqhan@nhri.cn)

Based on their excellent mechanical properties, abundant reserves and convenience for construction, the local gravel materials are also the good natural ones for constructing the dams of pumped storage power stations.

Key words: pumped storage station; core wall dam; gravel material; seepage flow; filter

0 引言

砂砾石料广泛分布在河床和岸坡滩地，具有储量丰富，就地取材，易于开采，施工成本低，施工速度快，施工受气候影响小，且压实后具有较高的强度和变形模量等特点，能较好满足工程抗震和抗剪要求，是构筑当地材料坝良好的天然材料。中国在常规当地材料坝的建设中，在砂砾石料的工程特性研究、坝体和坝坡抗震措施、填筑碾压标准、合理利用材料综合分区，以及采用新的施工方法与施工设备等方面均取得了长足发展，并广泛应用于当地材料坝的建设中，取得了举世瞩目的成就^[1-6]。

为应对全球气候变化，努力实现碳达峰碳中和的“双碳”目标，加快中国能源绿色低碳的转型需求，中国将在 2025 年—2035 年规划新建一大批以当地材料坝为主的抽水蓄能电站^[7]。但由于天然砂砾石料的颗粒形状及级配特点，导致其渗透性相对较弱，细料易被渗透水流冲蚀，造成其渗透稳定性差、抗渗透破坏和冲蚀能力差，从而导致其具有在渗流作用下更易产生渗透破坏^[5-6, 8]的缺点；加之抽水蓄能电站具有调节周期短，电站的运行和工况转换导致库水位变幅大、变化剧烈、频繁^[9]的特点，导致运行过程中由水位频繁变化带来的大坝迎水侧的渗透问题更为突出，使得此前砂砾石料几乎很少被用作抽水蓄能电站当地材料坝，尤其是心墙坝的筑坝料。

砂砾石料的反滤设计及渗流安全是抽水蓄能电站中砂砾石大坝设计应关注的重点之一，然而当前的反滤准则很难适应天然砂砾石料级配离散、间断性及宽级配的特点。因此，本文根据天然砂砾石料的特点，结合国内首座建在覆盖层上的芝瑞抽水蓄能电站下水库、沥青混凝土心墙砂砾石坝的反滤设计，修正了当前的反滤准则，并基于砂砾石料渗流试验及坝体平面有限元渗流安全评价，对修正的反滤准则进行了验证。

1 工程概况

芝瑞抽水蓄能电站位于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗芝瑞镇，电站距赤峰市直线距离 110 km。电站拟安装 4 台单机容量为 300 MW 的立轴单级混流可逆式水泵水轮机，总装机容量为 1200 MW，额定发电水头 443 m。永久性主要建筑物包括上水库挡水建筑物、下水库挡水及泄水建筑物、输水系统主要建筑物、地

下厂房等，其中下水库拦沙坝为沥青混凝土心墙砂砾石坝，兼做拦沙库及蓄能专用库大坝，坝顶高程为 1133.00 m，坝顶宽度为 10.0 m，坝顶长为 514.0 m，最大坝高为 27.0 m，是目前国内抽水蓄能电站中在建首座采用河床砂砾石筑坝并直接填筑在河床覆盖层上的沥青混凝土心墙坝。

芝瑞抽水蓄能电站下水库大坝坝壳料直接采用河床开挖砂砾石料填筑，河床砂砾石料及其天然级配分别如图 1, 2 所示。



图 1 河床天然砂砾石料图

Fig. 1 Natural gravel materials of riverbed

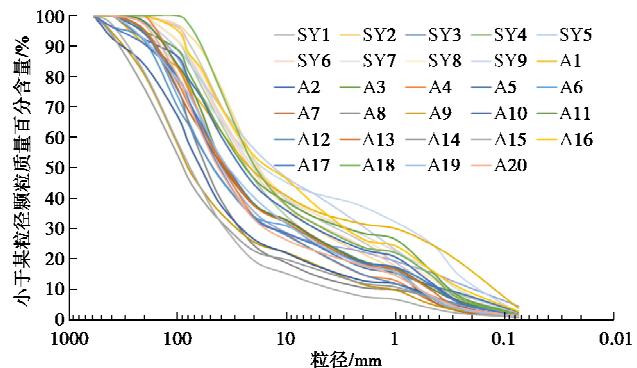


图 2 砂砾石料天然级配曲线

Fig. 2 Natural grain-size distribution curves of gravel

由图 1, 2 可知，芝瑞抽水蓄能电站下水库大坝河床开挖砂砾石料，具有砂砾石料细颗粒含量较高（小于 5 mm 含量为 11.4%~41.1%）、宽级配、级配离散、间断性等天然沉积的级配特性，以及粗颗粒磨圆度较好、咬合力差、施工易离析等颗粒形状特点，符合天然砂砾石料渗透稳定性差的特点。因此，为适应抽水蓄能电站典型的运行工况，坝体中不同分区间的设计重点，通过反滤设计^[5-6, 8]：①阻碍被保护土中细颗粒通过滤层，防止被保护砂砾石料被渗透水流带走，造成大坝的渗透破坏；

②允许被保护土中的水通过滤层,从而减小被保护土中的水压力,并防止细颗粒被渗透水流带入到保护料中、以及由此导致的大坝排水系统淤塞并危及大坝安全的问题,达到滤土排水的作用。根据上述要求,坝体分区如图3所示,在沥青混凝土心墙两侧均设置过渡I区以保护沥青混凝土心墙;在过渡I区指向上、下游方向分别设置过渡II区做为竖向排水层,并对过渡I区及上、下游填筑区具备反滤保护功能;在上、下游填筑区指向上、下游方向分别设置反滤层、碎石垫层、堆石护坡等;同时为保护坝基覆盖层,在坝基覆盖层上设置一层1.0 m厚水平反滤区及1.0 m厚水平过渡II区做为排水层,形成L型排水系统,以快速消散坝体内部孔压,并保证坝基的渗流稳定。

2 级配设计

当被保护料为无黏性土,且其不均匀系数 $C_u \leq 5 \sim 8$ 时,一般采用保护料的 D_{15} 与被保护料的 d_{15} 、 d_{85} 之间的关系来确定保护料的级配特征,然而本工程中起反滤功能的过渡II区料及反滤区料大于5 mm颗粒的含量均大于60%,不再适合套用 D_{15} 与 d_{15} 、 d_{85} 的关系进行坝体层间反滤关系验算^[10],因此,采用刘杰^[11]推荐的 D_{20} 与被保护料的 d_k 、 d_{20} 之间的关系来确定保

护料的级配特征,由此确定坝体各区料的级配曲线如图4所示,相应各区料平均线间的反滤关系见表1。

由于天然砂砾石料具有级配离散、间断性及宽级配等特点,按照当前的反滤准则,在反滤设计中,各层间的反滤关系往往很难同时满足滤土及排水要求。由表1,过渡II区料对上、下游填筑区料/坝基覆盖层料及过渡I区料满足排水要求,过渡II区料对反滤料满足滤土要求;其它均略超要求值。鉴于上述反滤关系仅考虑了不同分区间层间的级配特征,而忽略了相对密度大小对砂砾石料渗透性的重要影响作用,因此,笔者根据大坝砂砾石填筑料的相对密度值采用室内渗流及反滤保护试验,分别对上述各分区料开展了滤土及排水关系的论证,以验证各层间的反滤关系。

3 渗流及反滤试验

渗流试验主要包含3部分内容:①各区料自身的渗透系数,以确定层间排水关系;②各区料自身的渗透稳定性;③保护料对被保护土的反滤保护能力,验证保护料对被保护土是否能起到滤土作用。渗流试验均采用直径为300 mm的垂直渗透仪进行试验,试验水流方向自下向上,下游面为临空面。试验过程参照水电水利工程粗粒土试验规程^[12]。试验结果见表2。

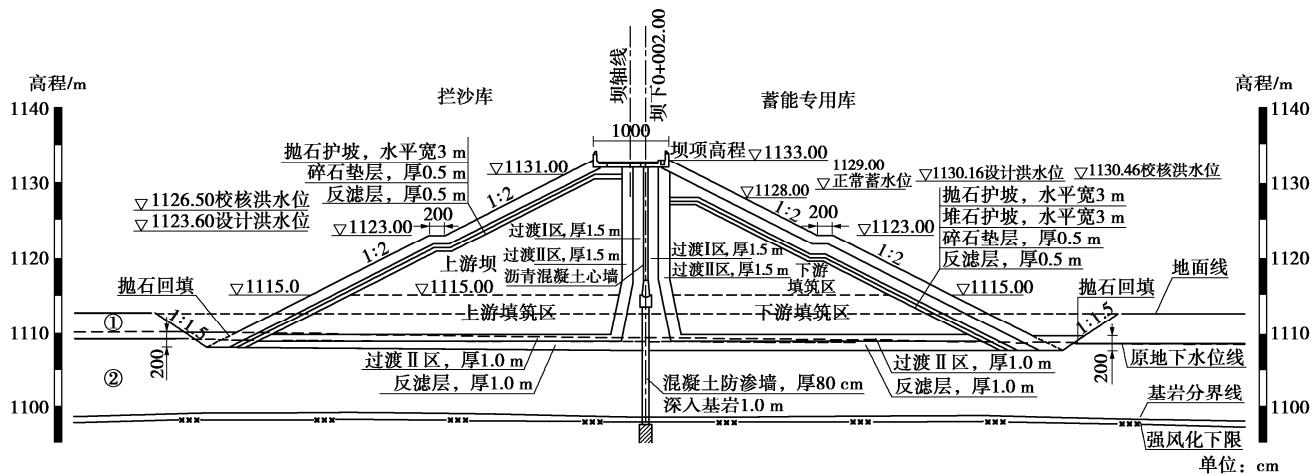


图3 下水库沥青混凝土心墙堆石坝典型分区剖面

Fig. 3 Typical section of asphalt concrete core rockfill dam in lower reservoir

表1 各区料反滤关系验算表

Table 1 Checking table of material filtration relationship in each zone

| 保护料 坝体分区 | D_{20}/mm | 被保护料 坝体分区 | 反滤准则 | | 排水准则 | |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------------|
| | | | d_{20}/mm | d_k/mm | $\frac{D_{20}}{d_k} < 7$ | $\frac{D_{20}}{d_{20}} > 4$ |
| 反滤料/坝坡反滤料 | 2.8 | 上、下游填筑区料/坝基覆盖层料 | 1.30 | 0.3 | 9.3 | 2.2 |
| | | 上、下游填筑区料/坝基覆盖层料 | 1.30 | 0.3 | 21.7 | 5.0 |
| 过渡II区料/坝坡碎石垫层区料 | 6.5 | 反滤料/坝坡反滤料 | 2.80 | 7.1 | 0.9 | 2.3 |
| | | 过渡I区料 | 0.75 | 0.6 | 10.8 | 8.7 |

表 2 大型渗流反滤试验结果
Table 2 Results of large-scale seepage and filtration test

| 保护料 | | | 被保护料 | | | 无保护 | | 有保护 | |
|-------|------|---|---------|------|---|------|-----------------------|-------|------|
| 坝体分区 | 相对密度 | 渗透系数/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ | 坝体分区 | 相对密度 | 渗透系数/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ | 临界坡降 | 破坏坡降 | 临界坡降 | 破坏坡降 |
| 过渡II区 | 0.82 | 6.54×10^{-2} | 过渡I区 | 0.82 | 3.13×10^{-4} | 2.39 | 2.54 | 17.30 | 18.5 |
| | | | 反滤区 | 0.85 | 3.08×10^{-3} | 0.85 | 3.08×10^{-3} | 1.64 | 1.74 |
| | | | 上、下游填筑区 | 0.82 | 4.33×10^{-4} | 2.10 | 2.19 | 7.03 | 9.9 |
| | | | 坝基覆盖层 | 0.71 | 9.46×10^{-4} | 1.82 | 1.94 | 6.98 | 8.6 |
| 反滤区 | 0.85 | 3.08×10^{-3} | 上、下游填筑区 | 0.82 | 4.33×10^{-4} | 2.10 | 2.19 | 12.00 | 13.4 |
| | | | 坝基覆盖层 | 0.71 | 9.46×10^{-4} | 1.82 | 1.94 | 9.40 | 11.1 |

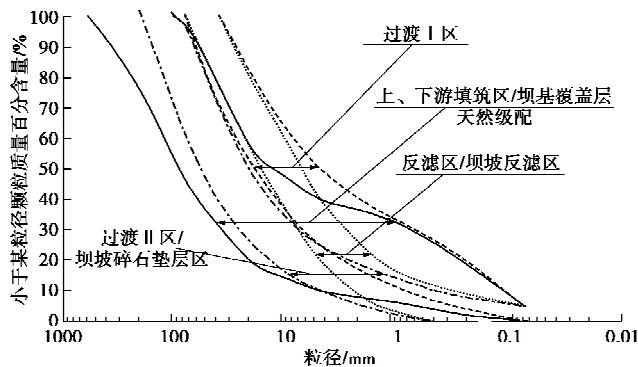


图 4 各区料级配包络线

Fig. 4 Envelope curves of material grading in each zone

由表 1, 2, 根据级配关系, 反滤区与坝基覆盖层、上下游填筑区, 过渡 II 区/坝坡碎石垫层区与反滤区并不满足排水准则, 然而渗流试验结果却表明, 上述各保护料对被保护料均具有一定的排水能力。造成矛盾的原因在于: 当前反滤设计中, 仅通过保护料和被保护料级配曲线的特征粒径来确定排水关系, 忽略了砂砾石料相对密度值的大小对保护料和被保护料渗透性能的影响, 而随相对密度值的变化, 有可能改善或者恶化保护料对被保护料的排水能力; 同样的由于相对密度大小对保护料和被保护料渗透特性的影响, 虽然反滤料及过渡 II 区对坝基覆盖层、上下游填筑区, 以及过渡 II 区对过渡 I 区不满足滤土要求, 但根据反滤试验结果各保护料对被保护料也均具有一定的滤土能力。

4 修正反滤准则

反滤试验结果表明, 砂砾石料的反滤保护能力除受级配影响外, 相对密度的大小对砂砾石料渗透性也起支配作用, 相关反滤准则仅通过级配关系来确定层间反滤关系, 忽略了相对密度大小对砂砾石料渗透性的影响, 而由于过分注重级配关系在层间反滤关系中的作用, 又往往会增加宽级配天然砂砾石料反滤设计的难度; 同时, 反滤设计中定义层间关系的特征粒径, 过于注重某一粒组对砂砾石料渗透特性的决定作用, 而忽略了其它粒组在渗流中的耦合作用。事实上, 砂砾石料的渗透特性是各粒组的共同作用及对相对密度

值代表的密实程度的综合反映。

此外, 虽然级配设计时级配特征满足层间关系, 但由于忽略了相对密度大小对砂砾石料渗透性的影响, 使得理论上也会出现保护料的渗透系数低于被保护料的风险, 无法达到排水减压的目的。

因此, 结合本文试验结果, 对刘杰^[11]推荐的反滤准则进行如下修正, 适当降低排水及滤土关系中特征粒径的要求, 同时增加渗透性的要求, 修正后的反滤准则如下:

$$D_{20}/d_k \leq 20 \quad (\text{滤土准则}) \quad (1)$$

$$D_{20}/d_{20} \geq 2 \quad (\text{排水准则}) \quad (2)$$

$$K_{\text{反}}/k_{\text{保}} \geq 3 \quad (\text{渗透要求}) \quad (3)$$

式中: D_{20} , d_{20} 为反滤料和被保护料的特征粒径, 表示小于该粒径的土重占总土重的 20%; d_k 为被保护料的粒径, 小于该粒径的土重占总土重的 $k\%$; k 仍采用刘杰^[11]推荐的公式进行计算; $K_{\text{反}}$, $k_{\text{保}}$ 则分别为反滤料和被保护料实际的渗透系数。

5 渗流安全评价

级配设计及相关渗流试验仅从级配关系及试验验证考虑了材料渗流特性, 然而由于抽水蓄能电站运行工况的特殊性, 且在运行过程中坝体各分区对水位变化的响应并不一致, 并进一步影响坝体的渗透稳定性, 因此采用非稳定饱和-非饱和渗流平面有限元方法^[13-15]分析了 3 种典型抽水蓄能电站运行工况下坝体各区料的水头变化, 分析评价了运行过程中大坝的渗流安全特性, 并进一步对采用本文修正反滤准则设计的各坝体分区的渗流可靠性进行了验证。

5.1 渗流安全评价方法

以关键部位渗透坡降小于允许渗透坡降, 渗流出逸点在反滤保护范围作为大坝渗流安全的判别准则。渗流计算分析中各区料的渗透系数均为上述渗流试验结果, 允许渗透坡降由临界渗透坡降确定, 临界渗透坡降则通过渗透变形试验获得。

5.2 有限元计算模型和计算工况

大坝平面有限元网格模型见图 5 所示。

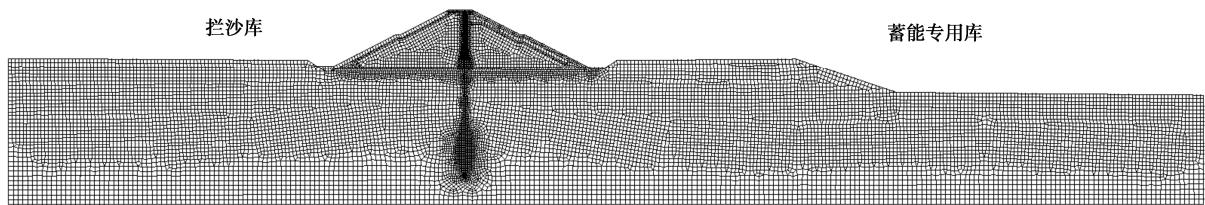


图 5 有限元网格

Fig. 5 Subdivision of finite element mesh

表 3 不同工况砂砾石坝壳浸润面变化

Tab. 3 Variation of infiltration surface of gravel dam shell under different conditions

| 时刻/h | 工况 1 | | 工况 2 | | 工况 3 | |
|------|-----------|----------------|---------|----------------|-----------|----------------|
| | 蓄能专用库水位/m | 下游坝壳浸润面最高点高程/m | 拦沙库水位/m | 上游坝壳浸润面最高点高程/m | 蓄能专用库水位/m | 下游坝壳浸润面最高点高程/m |
| 0 | 1129.00 | 1129.00 | 1126.50 | 1126.50 | 1129.00 | 1129.00 |
| 2 | 1120.33 | 1124.07 | 1119.74 | 1126.03 | 1124.00 | 1124.24 |
| 4 | 1111.67 | 1123.63 | 1116.78 | 1125.86 | 1119.00 | 1123.73 |
| 6 | 1103.00 | 1123.15 | 1115.50 | 1125.49 | 1114.00 | 1123.36 |
| 8 | — | — | 1115.31 | 1125.09 | — | — |

根据抽水蓄能电站水位变动特点,拟定下列上下游水位组合工况进行计算分析。

工况 1: 拦沙库水位保持 1114.00 m 不变,蓄能专用库水位由正常蓄水位 1129.00 m 降至死水位 1103.00 m, 库水位均匀下降,历时 6 h。

工况 2: 蓄能专用库水位正常蓄水位 1129.00 m, 拦沙库水位由校核洪水位 1126.5 m 骤降至 1115.31 m 水位, 库水位下降过程采用洪水演算结果, 历时 8 h。

工况 3: 拦沙库水位保持 1114.00 m 不变,蓄能专用库水位由正常蓄水位 1129.00 m 降至正常运行最低水位 1114.00 m, 库水位均匀下降,历时 6 h。各工况水位下降过程如图 6 所示。

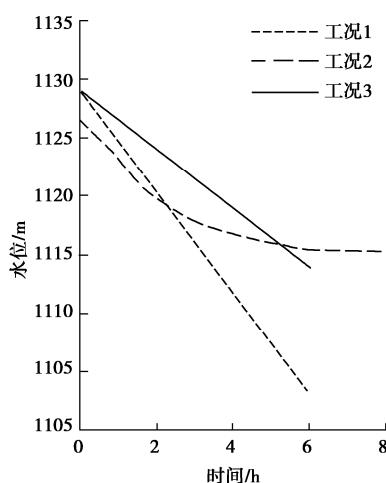


图 6 各工况库水位下降过程曲线

Fig. 6 Curves of water-level decline process under different conditions

5.3 坝体渗流计算结果

表 3 列出了各工况砂砾石坝壳浸润面变化。由浸

润面位置变化来看,坝体的浸润面随库水位下降而下降,但由于坝壳砂砾石的渗透系数数量级仅为 $4.33 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 渗透性能差,导致短时间内砂砾石坝体内孔隙水无法排出,坝内浸润面跌落速度远低于库水位下降速度,存在明显的滞后现象。

表 4 列出了各工况库水位下降过程主要料区最大渗透坡降,表 5 为各主要层间的最大渗透坡降。计算结果表明:随水位变化,坝基覆盖层、过渡 I 区、坝坡碎石层、坝基反滤层、砂砾石填筑区内的渗透坡降浮动变化,大部分分区内砂砾石料的渗透坡降小于无反滤保护条件下允许坡降,但也存在渗透坡降大于无反滤保护条件下允许坡降的现象,图 7 给出了渗透坡降超标位置,该超标区域受反滤层保护,其对坝体渗透稳定不会造成影响。沥青混凝土心墙砂砾石坝不同分区间反滤保护是保证抽水蓄能电站运行过程中砂砾石坝壳料渗透稳定性的关键,采用本文修正反滤准则设计的各坝体分区间反滤关系可有效应对电站运行过程中库水位复杂变化带来的大坝迎水侧砂砾石料的渗透稳定问题。

6 结 论

(1) 针对当前反滤准则仅重视级配关系而忽略相对密度大小对砂砾石料渗透性影响的缺点,笔者结合反滤级配设计及渗流试验,提出了修正的砂砾石料反滤准则,修正反滤准则适当降低了排水及滤土关系中对特征粒径的要求,但增加了对渗透性的要求。

(2) 由于天然砂砾石料的渗透性能差,在抽水蓄能电站水库水位骤降工况下,虽然坝体的浸润面随库

表4 不同工况各主要分区最大渗透坡降

Table 4 Maximum seepage gradients of main zones under different working conditions

| 材料分区 | 最大渗透坡降 | | | 允许坡降 | |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 工况1 | 工况2 | 工况3 | 无反滤保护 | 有反滤保护 |
| 上游砂砾石区 | 0.044 | 0.668 | 0.045 | 1.0 | 3.5 |
| 下游砂砾石区 | 0.730 | 0.018 | 0.540 | 1.0 | 3.5 |
| 过渡I区 | 1.740 | 0.870 | 1.350 | 1.2 | 8.7 |
| 过渡II区 | 0.220 | 0.170 | 0.140 | 0.2 | — |
| 坝坡反滤层 | 1.550 | 1.120 | 1.050 | 0.8 | 6.6 |
| 坝基反滤层 | 0.320 | 0.274 | 0.140 | 0.8 | 6.6 |

表5 不同工况各主要层间最大渗透坡降

Table 5 Seepage gradients between layers under different working conditions

| 主要层间关系 | 最大坡降 | | | 允许坡降 |
|--------------|-------|-------|-------|------|
| | 工况1 | 工况2 | 工况3 | |
| 上游过渡I-上游过渡II | 0.189 | 0.870 | 0.151 | 8.7 |
| 上游砂砾石-坝坡反滤 | 0.017 | 0.668 | 0.045 | 6.0 |
| 上游砂砾石-过渡II | 0.044 | 0.624 | 0.039 | 3.5 |
| 过渡II-下游坝坡反滤 | 0.220 | — | 0.106 | 0.2 |
| 下游砂砾石-过渡II | 0.545 | 0.018 | 0.480 | 3.5 |
| 坝基覆盖层-坝基反滤 | 0.290 | 0.213 | 0.183 | 4.7 |

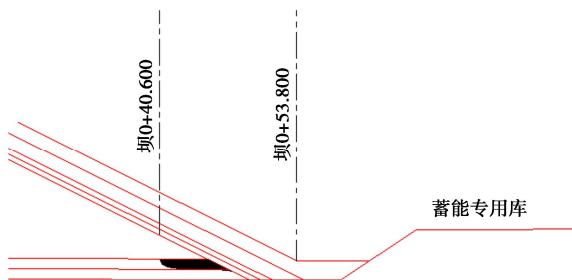


图7 工况1 渗透坡降超标区域

Fig. 7 Infiltration slope exceeding area of mode 1

水位下降而下降, 但短时间内坝体内部砂砾石料中的孔隙水无法排出, 坝内浸润面跌落速度远低于库水位下降速度, 存在明显的滞后现象, 且导致局部区域出现超标渗透坡降, 不过该超标区域受反滤保护, 不会对坝体渗透稳定造成影响。

(3) 根据渗流试验结果, 在抽水蓄能电站心墙砂砾石坝的反滤设计中, 修正反滤准则可以较好适应天然砂砾石料级配离散、间断性及宽级配等特点; 坝体有限元渗流分析结果则表明, 应用修正反滤准则设计的反滤料, 可对坝体内部出现的超标渗透坡降区域, 起到很好的反滤保护作用, 进一步验证了修正反滤准

则的适用性。

(4) 沥青混凝土心墙砂砾石坝不同分区间反滤保护是保证抽水蓄能电站运行过程中砂砾石坝壳料渗透稳定性的关键, 并可有效应对电站运行过程中水位变化频繁、水位变幅大变化带来的大坝迎水侧砂砾石料的渗透稳定问题, 结合优良的力学特性及储量丰富便于施工的特点, 砂砾石料是构筑抽水蓄能电站当地材料坝的良好天然材料, 不同分区间反滤保护应是抽水蓄能电站沥青混凝土心墙砂砾石坝大坝设计关注的重点之一。

(5) 笔者基于芝瑞抽蓄河床砂砾石料的渗流试验结果, 提出的砂砾石料反滤保护的修正反滤准则, 对于优化抽水蓄能电站中天然砂砾石料的反滤设计具有一定的参考意义, 但需要指出, 新准则的提出所依据的工程及试验资料仍相对较少, 在今后的工程设计中, 新准则的适用性仍需要更多试验及工程资料的进一步验证。

参考文献:

- [1] 陈生水, 凤家骥, 袁辉. 砂砾石面板坝关键技术研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 16-20. (CHEN Shengshui, FENG Jiaji, YUAN Hui. Research on key techniques of facing sandy gravel dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 16-20. (in Chinese))
- [2] 李学强, 苗喆, 邓成进. 新疆大石峡面板砂砾石坝坝体分区安全性分析[J]. 西北水电, 2020(增刊2): 51-57. (LI Xueqiang, MIAO Zhe, DENG Chengjin. Safety analysis of the zoning of dashixia concrete faced sand-gravel dam in Xinjiang[J]. Northwest Hydropower, 2020(S2): 51-57. (in Chinese))
- [3] 陈义军. 高土石坝砂卵石作坝壳堆石料应用研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. (CHEN Yijun. The research for the applied of the grit and pebble acting as the fill-stuff of high embankment[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese))
- [4] 关志诚, 王庆华. 土石坝设计中砂砾料的若干技术问题[J]. 东北水利水电, 1992, 10(1): 11-17. (GUAN Zhicheng, WANG Qinghua. Some technical problems of gravel materials in earth dam design[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 1992, 10(1): 11-17. (in Chinese))
- [5] 关志诚. 强震区砂砾石筑坝技术进展[J]. 中国水利, 2012(12): 4-5, 20. (GUAN Zhicheng. Dam construction technology of using sand gravel in earthquake zone[J]. China

Water Resources, 2012(12): 4-5, 20. (in Chinese))

[6] 邓铭江, 夏新利, 李湘权, 等. 新疆黏土心墙砂砾石坝关键技术研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(11): 30-37. (DENG Mingjiang, XIA Xinli, LI Xiangquan, et al. Study on key construction technologies of sand-gravel dam with clay core in Xinjiang[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(11): 30-37. (in Chinese))

[7] 国家能源局. 抽水蓄能中长期发展规划(2021~2035年)[R]. 北京: 国家能源局, 2021. (National Energy Administration of China. Medium and Long Term Development Planning of Pumped Storage[R]. Beijing: National Energy Administration of China, 2021. (in Chinese))

[8] 刘杰, 谢定松. 反滤层设计原理与准则[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 609-616. (LIU Jie, XIE Dingsong. Design principles and guidelines of filters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 609-616. (in Chinese))

[9] 李惕先, 季云, 刘启钊. 抽水蓄能电站[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995. (LI Tixian, JI Yun, LIU Qizhao. Pumped Storage Power Station[M]. Water Resources and Electric Power Press, 1995. (in Chinese))

[10] 碾压式土石坝设计规范: DL/T 5395—2007[S]. (Design Code for Roller Compacted Earth-Rock Dam: DL/T 5395-2007[S]. 2007. (in Chinese))

[11] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利出版社, 1992. (LIU Jie. Seepage Stability and Seepage Control of Soil[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Electric Power Press, 1992. (in Chinese))

[12] 水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006. (Code for Coarse-Graied Soid Tests for Hydropower and Water Conservancy Engineering: DL/T 5356—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese))

[13] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (MAO Changxi. Seepage Computation Analysis & Control[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2003. (in Chinese))

[14] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. (ZHU Baili, SHEN Zhujiang. Computational Soil Mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1990. (in Chinese))

[15] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Geotechnical Principle and Calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996. (in Chinese))