

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220721

某抽水蓄能电站上库堆石坝防渗面板允许裂缝宽度分析

马国杰¹, 朱 晟¹, 王汇明²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510635)

摘要: 由于水库频繁的蓄泄循环作用, 抽水蓄能电站面板堆石坝垫层应具有良好的排水性能, 但当面板出现裂缝时偏低细粒含量的垫层可能存在渗透稳定问题。以某抽水蓄能电站混凝土面板堆石坝为例, 开展反滤试验和渗流计算分析, 重点研究垫层料和过渡料的反滤保护机制, 并根据垫层料的破坏坡降确定面板的允许裂缝宽度。结果表明, 适当优化垫层和过渡料的细粒含量, 可满足反滤准则要求, 并在保证垫层渗透稳定的前提下将面板的允许裂缝宽度提高30%。

关键词: 抽水蓄能电站; 面板堆石坝; 反滤; 渗透稳定; 裂缝

中图分类号: TV743

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0086-04

1 引言

历经30余年的发展, 我国已成功修建大量面板堆石坝, 但部分工程也出现了面板开裂等问题^[1]。当面板出现裂缝漏水时, 过渡料对垫层起到反滤保护作用, 保证其不出现渗透破坏。对于严寒地区及抽水蓄能电站面板堆石坝而言, 为防止面板出现反渗或冻胀破坏, 要求垫层区应有良好的排水性能, 细粒含量一般在25%左右, 渗透系数在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/s量级^[2], 导致在面板开裂的非常工况下更易出现渗透稳定问题, 如我国株树桥面板堆石坝失事时混凝土面板最大裂缝宽度40 mm, 汪易森等^[3]认为过渡料对垫层料未起到反滤保护作用, 导致垫层料大量流失、面板大面积塌陷开裂、漏水进一步发展。张嘎等^[4]计算公伯峡堆石坝防渗面板出现裂缝时的渗流场, 发现垫层细粒含量按常规设计时裂缝宽度达40 cm可保证渗透稳定性; 张凤财等^[5]通过计算猴子岩堆石坝防渗面板出现裂缝时的渗流场, 指出渗流场和渗流量受垫层渗透系数的影响较大; GAO S等^[6]将三维有限元分析方法与块体等效连续介质法相结合, 研究堆石坝防渗面板中大量且分布不均匀裂缝的渗流特性, 认为垫层设计对保证大坝渗流安全起关键作用。既有研究表明垫层对面板

开裂时大坝渗透稳定的重要性, 但尚未进行定量评判。因此, 偏低细粒含量垫层能保证渗透稳定时的面板允许裂缝宽度的标准值得深入研究。本文以某抽水蓄能电站上库沥青混凝土面板堆石坝为例, 开展坝料反滤试验与渗流计算分析, 重点研究垫层料和过渡料的反滤保护机制, 提出填料改进措施, 并根据垫层料的破坏坡降确定面板的允许裂缝宽度。

2 垫层和过渡料反滤保护试验

2.1 试验级配

垫层采用上水库库盆及输水发电系统开挖的灰岩料, 主要设计参数为渗透系数 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ cm/s; 小于5 mm粒径含量为25%~35%, 小于0.075 mm的颗粒含量为1%~5%。过渡料采用上水库库盆开挖的灰岩料, 主要设计参数为渗透系数 $>10^{-2}$ cm/s; 小于5 mm粒径含量 $\leq 25\%$, 小于0.075 mm的颗粒含量 $\leq 5\%$ 。

根据料场现场取样颗粒分析试验结果, 总结出垫层料和过渡料的级配包线 $D_{上}$ 、 $D_{中}$ 、 $D_{下}$ 、 $G_{上}$ 、 $G_{中}$ 、 $G_{下}$ 及优化后的坝料 $CD_{上}$ 、 $CD_{中}$ 、 $CD_{下}$ 、 $CG_{上}$ 、 $CG_{中}$ 、 $CG_{下}$ 。优化前后的平均级配用适度等量替代法缩尺后为 $D_{中-1}$ 、 $G_{中-1}$ 、 $CD_{中-1}$ 、 $CG_{中-1}$, 见表1。

收稿日期: 2022-04-12, **修回日期:** 2022-05-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404801)

作者简介: 马国杰(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工结构工程, E-mail: maguojie@hhu.edu.cn

通讯作者: 朱晟(1965-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水工结构及岩土工程, E-mail: Szhu@hhu.edu.cn

表 1 渗透变形及反滤试验用料级配

Tab. 1 Grading of materials for permeability and reverse filtration test

编号	小于某粒径(mm)的颗粒含量/%												
	300	200	100	80	70	60	40	20	10	5	2	0.5	0.075
D _上						100	90	71	50	35	24	13	5
D _中				100	93.9	79.3	58.3	42.2	30.3	19.3	9.6	3.6	
D _下			100		84	68	49	34.5	25	15.5	8	1	
D _{中-1}				100	82.9	58.3	42.2	30.3	19.3	9.6	3.6		
G _上	100	75	70		63	54	41	30	22	15.9	9	5	
G _中	100	90	64	58.5		51.5	43	31.5	22.5	16.5	10	4.9	3
G _下	100	80	53	47		40	32	22	15	11	6.4	3	1
G _{中-1}				100	70.9	31.5	22.5	16.5	10	4.9	3		
CD _上					100	90.8	73.2	53.8	40.0	27.4	14.9	5.7	
CD _中				100	94.3	80.8	61.3	46.3	35.3	22.5	11.2	4.2	
CD _下				100	85.1	70.1	52.4	38.9	30.0	18.6	9.6	1.2	
CD _{中-1}					100	84.1	61.3	46.3	35.3	22.5	11.2	4.2	
CG _上	100	74.4	69.2		62.1	52.8	39.5	28.2	20.0	14.5	8.2	4.5	
CG _中	100	89.8	63.4	57.8		50.6	42.0	30.3	21.1	15.0	9.1	4.5	2.7
CG _下	100	79.8	52.5	46.4		39.3	31.2	21.1	14.0	10.0	5.8	2.7	0.9
CG _{中-1}					100	70.3	30.3	21.1	15.0	9.1	4.5	2.7	

2.2 反滤保护特性试验

对反滤有效性的判断方法,太沙基(Terzaghi K)准则^[7]不仅明确了反滤层的功能,同时给出了相应的本构关系:①滤土准则。 $D_{15}/d_{85} \leq 4$;②减压准则。 $D_{20}/d_{20} \geq 4$ 。其中, D_{15} 、 D_{20} 均为反滤层的特征粒径; d_{85} 、 d_{20} 均为被保护土的控制粒径。对于 $d < 0.075$ mm 的颗粒含量小于 15% 的无粘性土,谢拉德^[7]有如下建议:①滤土准则。 $D_{15}/d_{85} \leq 4$ (若被保护土的 $d_{85} > 5$ mm,则以小于 5 mm 的细料部分确定控制粒径 d_{85});②减压准则。 $D_{20}/d_{20} \geq 5$ 。此外,刘杰^[7]提出的方法为:①滤土准则。 $D_{20}/d_k \leq 10$;②排水准则。 $D_{20}/d_{20} \geq 2 \sim 4$ 。其中 d_k 为被保护土的控制粒径。

采用 3 种反滤准则和方法评价各种反滤组合的保护效果,结果见表 2。由表 2 可知,原设计过渡料对于垫层料的排水减压效果不佳。

表 2 各反滤组合效果初步判断结果

Tab. 2 Preliminary judgment results of effect of each inverted filter combination

反滤组合	太沙基准则		谢拉德准则		刘杰方法	
	滤土	排水	滤土	排水	滤土	排水
	$D_{15}/d_{85} \leq 4$	$D_{15}/d_{15} \geq 4$	$D_{15}/d_{85} \leq 4$	$D_{15}/d_{15} \geq 5$	$D_{20}/d_k \leq 10$	$D_{20}/d_{20} \geq 3$
D _中 /G _中	0.09	3.23	1.15	3.23	0.87	3.42
D _{中-1} /G _{中-1}	0.10	3.23	1.15	3.23	0.87	3.61
CD _中 /CG _中	0.11	5.00	1.33	5.00	1.85	5.45
CD _{中-1} /CG _{中-1}	0.12	5.00	1.33	5.00	1.85	5.45
D _上 /G _下	0.29	12.94	2.80	12.94	4.86	16.70
CD _上 /CG _下	0.38	24.80	3.56	24.80	7.04	24.12
D _下 /G _上	0.03	0.95	0.47	0.95	0.29	1.17
CD _下 /CG _上	0.04	1.62	0.60	1.62	0.64	2.11

为验证表 2 的判断结果,针对 D_中/G_中、CD_中/CG_中 两种反滤组合,采用适度等量替代法(用 20~60 mm 代替 60 mm 以上超径颗粒)进行缩尺,得到 D_{中-1}/G_{中-1}、CD_{中-1}/CG_{中-1} 组合,按规范^[8]要

求,开展反滤保护试验。采用 30 cm 直径的渗透仪,渗透水流由上至下。反滤试验结果(表 3)进一步验证了表 2 中的判断,即过渡料承受的水力比降低于垫层料,但也较大,水力过渡一般,反滤保护效果不佳。

表 3 垫层料和过渡料反滤试验结果

Tab. 3 Inverted filtration test results of cushion material and transition material

反滤组合	垫层料		过渡料		试验综述
	K_{20}	J_{max}	K_{20}	J_{max}	
D _{中-1} /G _{中-1}	7.72×10^{-3}	9.41	2.03×10^{-2}	3.94	过渡料的水力比降低于垫层料,但也较大,水力过渡一般。
CD _{中-1} /CG _{中-1}	2.39×10^{-3}	20.99	8.51×10^{-2}	0.93	过渡料承受的水力比降低很低,水力过渡良好。

注: K_{20} 、 J_{max} 分别为渗透系数、水力坡降; K_{20} 的单位为 cm/s。

由表 2 可知,在采用适度等量替代法进行缩尺时,反滤准则的初判结果基本不变。且缩尺前后的垫层料和过渡料的等效粒径 d_{20} 值均不变,根据已有的研究成果^[9]可知,渗透系数应不变,反滤的有效性也基本不变。若直接采用等量替代法进行缩尺,则反滤准则的初判结果和过渡料的等效粒径 d_{20} 变化均较大,可见适度等量替代法缩尺级配的试验结果更合理。

2.3 坝料级配优化

原设计方案的反滤保护效果之所以不佳,是因为两种填料的级配包线存在部分重叠。在坝体填筑时,级配颗粒可能出现离析现象,两种填料的级配包线的重叠区域很可能增大,更容易出现排水不畅、水力过渡不佳等问题。因此,有必要对级配进行适当优化。

已有研究资料^[10]表明,可通过提高垫层料的细粒含量的方式来改善反滤保护效果。事实上,由于抽水蓄能电站面板堆石坝要求垫层区应有良好的排水性能,渗透系数在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/s 之间,因而垫层料的细粒含量的提高有限。若仅将垫层料中 5 mm 含量适当提高,其排水性能有所降低,但仍不满足反滤准则。为防止垫层料的排水性能过低,参考类似工程的现场检测资料,将设计级配的垫层料细粒含量提高 5%,同时将过渡料的细粒含量降低 1%~2%,以满足反滤层排水减压要求和改善反滤保护效果。如此改进后,垫层料小于 5 mm 颗粒含量将提高至 30%~40%,过渡料小于 5 mm 颗粒含量将降低至 10%~20%。与原设计相比,优化后垫层料与过渡料级配包线的重叠部分明显减小,水力过渡关系应有所改善。

优化后垫层料平均线与过渡料平均线的反滤试验中(表 3),垫层料的渗透系数为 2.39×10^{-3}

cm/s,符合设计要求。垫层料的水力坡降为20.99时,过渡料的水力坡降仅为0.93。可见,优化后的过渡料能对垫层料起到有效的滤土和排水减压作用,大坝的渗透稳定性能得到保障。

3 库坝渗流计算分析

3.1 几何模型

根据垫层料的破坏坡降确定面板的允许裂缝宽度,并进行饱和和稳定渗流计算分析。基于渗流分析的一般原则和特点,结合抽水蓄能电站上库坝的实际情况,在计算中参照坝体设计渗控布置进行了数值模拟。图1为有限元网格模型,共生成24 293个节点、23 829个单元。

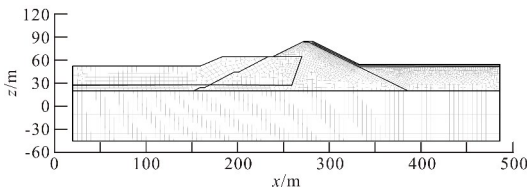


图1 有限元网格模型

Fig. 1 Finite element mesh model

3.2 边界与工况

计算域四周截取边界条件分别假定为:①计算域的底边界、侧边界均为隔水边截面;②计算域的其他边界:在库盆内侧,低于特征水位(为方便计算,以坐标轴为基准,正常蓄水位为79 m)处为定水头边界;在坝轴线下游侧,由于坝址处地下水埋藏很深,且地下水位未知,故下游边界均取为可能的渗流逸出面。考虑到面板在转折处存在应力集中,容易出现裂缝,故在此处设置6、8、10、12 cm宽度的裂缝作为坝料优化前后的计算工况。

3.3 材料参数

计算中,采用渗透系数扩大法^[11,12]模拟面板裂缝,即将面板裂缝当作极强透水材料。渗透系数取值见表4。

表4 各材料的渗透系数

Tab. 4 Permeability coefficient of each material

分区名称	设计要求	渗透系数	
		原设计	优化后
沥青混凝土面板	$\leq 1 \times 10^{-8}$	6.40×10^{-9}	6.40×10^{-9}
破损面板		1 000	1 000
垫层区	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	7.72×10^{-3}	2.39×10^{-3}
过渡区	$> 10^{-2}$	2.03×10^{-2}	8.51×10^{-2}
主堆石区及库底填料	$> 10^{-1}$	3.21×10^{-1}	3.21×10^{-1}
次堆石区	$> 10^{-1}$	4.25×10^{-1}	4.25×10^{-1}
坝后堆渣		2.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}
岩基		5.00×10^{-4}	5.00×10^{-4}

3.4 结果与分析

在垫层料和过渡料级配优化前,裂缝宽度为

8 cm时,水头分布见图2(a)。由图2(a)可看出,整个渗流场的水头分布规律合理,较准确地反映了防渗措施的渗控效果和渗流特性及裂缝作用和边界条件。由图2(b)可知,裂缝附近的垫层区内集中了较大的水头损失,这说明垫层区的渗透坡降很大。裂缝宽度为6、10、12 cm时坝体等水头线位置与裂缝宽度为8 cm时的非常接近,仅在裂缝附近的等水头线位置有差别。

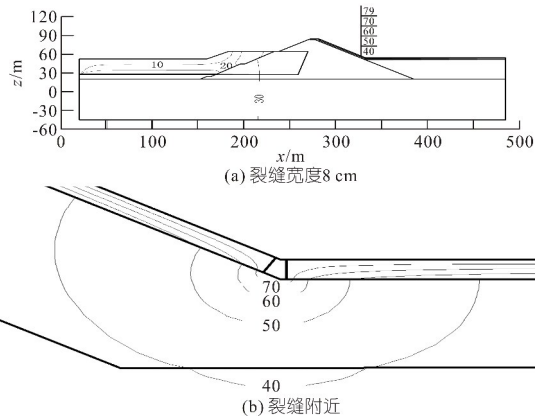


图2 裂缝宽度8 cm时裂缝附近的水头等值线(单位:m)

Fig. 2 Contour of water head when crack width is 8 cm and water head near crack

不同裂缝宽度下垫层区承受的渗透坡降见图3。由图3可知,在垫层料和过渡料优化前,裂缝宽度为6、8、10、12 cm时,垫层区承受的渗透坡降分别为8.96、9.42、10.03、10.64;在垫层料和过渡料优化后,裂缝宽度为6、8、10、12 cm时,垫层区承受的渗透坡降分别为18.46、19.46、20.57、21.75。可见,裂缝宽度越大,垫层区承受的渗透坡降越大;优化后垫层区承受的渗透坡降明显比优化前更大。

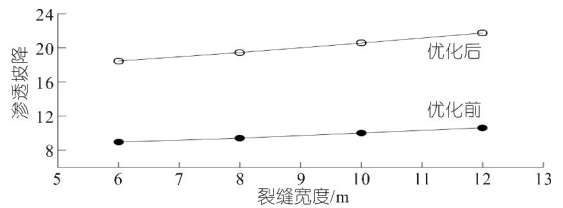


图3 不同裂缝宽度下垫层区承受的渗透坡降

Fig. 3 Seepage gradient borne by cushion area under different crack widths

由表3可知,垫层料和过渡料优化前后允许的渗透坡降分别为9.41、20.99。因此,当裂缝宽度为8 cm时,原设计的垫层区已发生渗透破坏,而优化后的垫层区仍保持渗透稳定。通过插值,可得到优化前后能保证渗透稳定的允许裂缝宽度分别为7.96、10.71 cm。

允许裂缝宽度可作为该抽水蓄能电站上库堆石坝运行状态是否出现异常的有效判据之一,其

他类似工程可按本文方法求得相应的允许裂缝宽度。在实际监测过程中,发现面板裂缝宽度大于 0.2 mm 或判定为贯穿性裂缝时,应采取专门措施从严处理^[2];而发现贯穿性裂缝宽度超过允许裂缝宽度时,应紧急处理。

4 结论

a. 在垫层与过渡料之间的反滤试验中,需采用适度等量替代法缩尺,使反滤准则的初判结果和填料的等效粒径 d_{20} 均不变,以保证反滤的有效性不变。

b. 在保证垫层料排水性能的基础上,将垫层料的细料含量提高 5%,过渡料中小于 5 mm 含量降低 1%~2%,则可满足反滤准则的要求,反滤保护效果良好。

c. 在面板转折处出现 8 cm 宽的裂缝时,原设计垫层已发生渗透破坏;对垫层与过渡料的级配优化后,在渗透系数满足规范要求时,可将保证垫层渗透稳定的允许裂缝宽度提高到 10.7 cm。

参考文献:

[1] 何鲜峰,汪自力,何启. 寒冷地区面板堆石坝施工期面板开裂原因[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3): 68-74.

[2] 国家能源局. 混凝土面板堆石坝设计规范:DL/T 5016-2011[S]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

[3] 汪易森,庞进武,刘世煌. 水利水电工程若干问题的调研与探讨[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[4] 张嘎,张建民,洪韬. 面板堆石坝面板出现裂缝工况下的渗流分析[J]. 水利学报,2005,36(4):420-425.

[5] 张凤财,姜媛媛,窦向贤. 猴子岩水电站面板堆石坝三维渗流计算分析[J]. 水力发电,2018,44(11):80-83.

[6] GAO S, CHAI J, CAO J, et al. Numerical analysis of seepage for concrete face rockfill dam with cracks based on block equivalent continuum method[J]. Arabian journal of science and engineering, 2021, 46(11):10341-10354.

[7] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 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.

[9] 谢定松,蔡红,魏迎奇,等. 粗粒土渗透试验缩尺原则与方法探讨[J]. 岩土工程学报,2015,37(2):369-373.

[10] 定培中,严敏,常敬雄. 某面板堆石坝垫层料和过渡料渗透变形及反滤试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2016,14(6):454-459.

[11] 邱鹏. 不同面板缺陷下面板堆石坝渗透稳定性数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2019,37(11):104-108.

[12] 吕高峰,王玉洁,朱锦杰. 某面板堆石坝垂直缝破损渗漏量估算方法的适用性分析[J]. 水电能源科学,2015,33(5):65-68.

Allowable Crack Width of Impervious Panel of Upper Reservoir Rockfill Dam of A Pumped Storage Power Station

MA Guo-jie¹, ZHU Sheng¹, WANG Hui-ming²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Due to the frequent storage and discharge cycle of the reservoir, the cushion of the face rockfill dam of pumped storage power station should have good drainage performance, but when the face slab appears cracks, the cushion with low fine particle content may have the problem of seepage stability. Taking the concrete face rockfill dam of a pumped storage power station as an example, the inverted filtration test and seepage calculation and analysis were carried out, focusing on the filter protection mechanism of cushion material and transition material. The allowable crack width of the face slab was determined according to the damage slope of cushion material. The results show that after properly optimizing the fine particle content of cushion and transition material, the requirements of inverted filtration criterion can be met, and the allowable crack width of the panel is increased by 30% on the premise of ensuring the seepage stability of cushion.

Key words: pumped storage power station; concrete face rockfill dam; filtration; seepage stability; crack